

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національна академія наук України

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СОБОЛЯК ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.371+537.86

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОНІТОРИНГ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І АКУСТИЧНИХ
ВИПРОМІНЮВАНЬ АНТРОПОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ**

01.04.03 – радіофізика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.В. Соболяк

Науковий керівник Луценко Владислав Іванович
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Соболяк О.В. Моніторинг електромагнітних і акустичних випромінювань антропогенних об'єктів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню завдання розробки методик виявлення набору характерних ознак - сигнатур акустичних і вторинних електромагнітних полів антропогенних об'єктів, визначенню параметрів фонового шумового сигналу для ефективного виділення на його фоні корисного сигналу, визначенню впливу середовища поширення і стану підстильної поверхні на корисний сигнал і подальшого використання отриманої інформації в системах моніторингу довкілля.

Звернуто увагу на збіг особливостей акустичних та вторинних електромагнітних випромінювань природних та антропогенних об'єктів, що є перспективним при розробленні методик моніторингу довкілля.

Розроблено методику оцінки дальності виявлення джерел акустичного випромінювання в умовах впливу його загасання в атмосфері і інтерференційного ослаблення земною поверхнею. Теоретично обґрунтовано можливість виявлення об'єктів наземної та повітряної техніки за їх акустичним випромінюванням на віддаленнях в кілька кілометрів. Показано можливість опису спектрів джерел шуму фрактальними залежностями.

Запропоновано спосіб визначення сигнатур в радіолокаційних портретах на основі акустичних портретів і оптичних зображень об'єктів техніки. Запропоновано використання вкладених напівмарківських процесів при описі просторово-часової нестационарності сигналу, розсіяного ділянками суші, що вкриті рослинністю. Створено імітаційні моделі акустичних шумів місцевості і об'єктів, а також радіолокаційних відбиттів від суші, які дозволяють здійснювати оцінку робочих характеристик систем

акустичної розвідки і активно-пасивних систем радіолокації. Показано можливість використання систем виявлення, що використовують фізичні поля різних діапазонів частот і природи, при створенні роботизованих комплексів, вбудованих в смарт-грід систему розподіленого інтелекту, для підвищення їх живучості та ефективності застосування.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше показано, що при збільшенні відстані до приймача внаслідок дисперсійних властивостей атмосфери та інтерференційних явищ при віддзеркаленні від поверхні Землі відбувається звуження спектра акустичного шуму.
2. Вперше запропоновано методику визначення акусто-електромагнітних сигнатур за оптичними зображеннями об'єктів техніки. Показано, що частоти модуляції розсіяного сигналу несучим і рульовим гвинтами для різних типів вертольотів істотно відрізняються і можуть бути визначені за їх габаритними розмірами та акустичними шумами.
3. Вперше запропоновано імітаційну модель нестационарних акустичних шумів природних і антропогенних, а також пасивних завад від суші, покритої рослинністю, з використанням напівмарківських вкладених процесів з декількома фазовими станами, що краще ніж раніш відомі моделі описує статистичні характеристики шумів.
4. Вперше у спектрах радіолокаційного відбиття від вертольота, отриманих при інтервалах спостереження менших за період обертання лопатей гвинта, виявлені сплески спектральної щільності у високочастотній області з частотою, кратною частоті їх обертання.
5. Для різних довжин хвиль опромінюючого поля і різних поляризацій прийому вперше виявлено наявність однакових спектральних компонент, пов'язаних з вібрацією обшивки під впливом рушійної установки.
6. Розроблено методику опису і аналізу квазіперіодичних процесів, в тому числі при поширенні хвиль в середовищах з дисперсією і поглинанням. Показано, що кепстральна обробка дозволяє виділяти періодичності, які пов'язані з обертами двигуна. Запропоновано модифіковану двовимірну

кореляційну функцію, яка дозволяє порівнювати характеристики, що отримані на різних довжинах хвиль.

Практичне значення одержаних результатів

1. Розроблено методику оцінки дальності виявлення джерел акустичного випромінювання в умовах впливу загасання в атмосфері та інтерференційного ослаблення його земною поверхнею для нейтрального режиму поширення в атмосфері.
2. Акустичні шуми і оптичні зображення об'єктів техніки можуть служити основою для визначення сигнатур в радіолокаційних портретах.
3. Наявність у високочастотній області широкосмугового сплеску, що з'являється з частотою обертання гвинта, можна використовувати як інформативну ознаку для виявлення вертольота в тих ситуаціях, коли відсутній доплерівський зсув частоти сигналу, відбитого від корпусу, і він не виділяється на фоні віддзеркалень від місцевості.
4. Виявлені однакові спектральні компоненти на різних поляризаціях прийому і довжинах хвиль опромінюючого поля, які пов'язані з вібрацією обшивки під впливом рушійної установки, є основою для створення методик підвищення контрастності виділення сигналів об'єкту з працюючим двигуном на фоні завад від місцевості.
5. Визначено, що у спектрах сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, у діапазоні частот від 6 до 60 Гц відносно несучої, спектральна щільність істотно нижче на 20... 30дБ, ніж в області інформаційних частот, що є основою їх застосування для вирішення задач радіолокації і дистанційного зондування.
6. Запропоновані імітаційні моделі акустичних шумів місцевості і об'єктів, а також радіолокаційних віддзеркалень від суші, дозволяють оцінювати робочі характеристики систем акустичної розвідки (дальності дії) і активно-пасивних систем радіолокації.
7. Показано можливість отримання інформації про навколишнє середовище з використанням вторинних полів, які створюються об'єктами техніки при віддзеркаленні сигналів підсвічування мовних станцій КХ діапазону,

супутникових навігаційних систем, наземних систем телебачення і мовлення, акустичних шумів об'єктів.

8. Звернуто увагу на збіг особливостей акустичних та вторинних електромагнітних випромінювань природних та антропогенних об'єктів, що є перспективним при розробленні методик моніторингу довкілля.

Ключові слова: розсіювання радіохвиль, акустичне випромінювання, коефіцієнт поглинання, радіолокаційні характеристики, активно-пасивні системи, підстильна поверхня, сигнатура, смарт-грід.

ABSTRACT

Soboliak O.V. Monitoring of electromagnetic and acoustic radiation of anthropogenic objects - Manuscript of qualifying scientific work.

Dissertation for competition of scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences on specialty 01.04.03 – Radiophysics. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to solving the problem of developing methods for identifying a set of characteristic signs - signatures of acoustic and secondary electromagnetic fields of anthropogenic objects and determining the parameters of the background noise signal to effectively extract the useful signal on its background and determining the influence of the propagation environment and the underlying surface state on the useful signal and further use of the received information in the environmental monitoring systems.

Attention is drawn to the coincidence of the features of acoustic and secondary electromagnetic emissions of natural and anthropogenic objects, which is promising when developing methods for monitoring of the environment.

A technique has been developed for estimating the range of detection of acoustic radiation sources under the influence of attenuation in the atmosphere and interference attenuation by the earth's surface. Theoretically justified the possibility of detecting objects of ground and air equipment by their acoustic radiation at distances of several kilometers. The possibility of describing the spectra of noise

sources by fractal dependences is shown.

A method for determining signatures in radar portraits based on acoustic portraits and optical images of objects of technology is proposed. The proposed use of nested semi-Markov processes when describing the space-time nonstationarity of the signal scattered by land areas covered with vegetation. Simulation models of acoustic noise of the terrain and objects, as well as radar scattering from land, have been created, which allow the performance evaluation of acoustic reconnaissance systems and active-passive radar systems. The possibility of using detection systems that use the physical fields of different frequency ranges and nature when creating robotic systems embedded in a smart grid system of distributed intelligence, to increase their survivability and application efficiency is shown.

The scientific novelty of the results

1. It was shown for the first time that as the distance to the receiver increases, due to the dispersive properties of the atmosphere and interference phenomena, when scattered from the Earth's surface, the spectrum of acoustic noise narrows.
2. For the first time, a technique has been proposed for determining acousto-electromagnetic signatures from optical images of technical objects. It is shown that the modulation frequencies of the scattered signal by the main and tail rotor for different types of helicopters differ significantly and can be determined by their overall dimensions and acoustic noise.
3. For the first time, a simulation model of unsteady acoustic noise of natural and anthropogenic, as well as passive noise from land covered with vegetation using semi-Markov nested processes with several phase states was proposed, which describes the statistical characteristics of noise better than previously known models
4. For the first time in the spectra of the radar reflection from a helicopter, obtained at observation intervals of smaller periods of rotation of the propeller blades, spectral density bursts were detected in the high-frequency region with a frequency multiple of their rotation frequency.
5. For different wavelengths of the irradiating field and different polarizations of reception, the presence of identical spectral components associated with the vibration of the skin under the influence of the propulsion system was detected for the first time.

6. A technique has been developed for describing and analyzing quasiperiodic processes, including the propagation of waves in media with dispersion and absorption. It is shown that cepstral treatment allows to distinguish the periodicities associated with engine revolutions. A modified two-dimensional correlation function is proposed, which makes it possible to compare the characteristics obtained at different wavelengths.

The practical significance of the results

1. A method has been developed for estimating the range of detection of acoustic radiation sources under the influence of attenuation in the atmosphere and its interference attenuation by the earth's surface for neutral propagation in the atmosphere.
2. Acoustic noise and optical images of objects of technology can serve as a basis for determining signatures in radar portraits.
3. The presence in the high-frequency region of a broadband burst, which appears with a screw rotation frequency, can be used as an informative sign to identify a helicopter if there is no Doppler frequency shift of the signal reflected from the body and it does not stand out against the background of scatterings from the terrain.
4. Identified identical spectral components at different reception polarizations and wavelengths of the irradiating field, associated with cladding vibration under the influence of the propulsion system, are the basis for creating techniques for enhancing the contrast of extracting object signals with a running engine against the background noise from the terrain.
5. It has been established that in the spectra of signals of broadcasting stations of the HF and VHF bands, in the frequency range from 6 to 60 Hz relative to the carrier, the spectral density is significantly lower by 20 ... 30 dB than in the area of frequencies of information, which is the basis of their application for solving problems of radar and remote sensing.
6. The proposed simulation models of acoustic noise of the terrain and objects, as well as radar reflections from the land, allow to evaluate the performance characteristics of acoustic reconnaissance systems (range) and active-passive radar systems.
7. The possibility of obtaining information about the environment with the use of

secondary fields created by objects of technology when reflecting the signals of the illumination of broadcast stations of the HF range, satellite navigation systems, terrestrial television and broadcast systems, acoustic noise of objects is shown.

8. Attention is drawn to the coincidence of the features of acoustic and secondary electromagnetic emissions of natural and anthropogenic objects, which is promising when developing methods for monitoring the environment.

Keywords: radio wave scattering, acoustic radiation, absorption coefficient, radar characteristics, active-passive systems, underlying surface, signature, smart grid.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко, І. В. Луценко, Д. О. Попов, І. В. Попов, О. В. Соболяк // Космічна наука і технологія. - 2015.- Т. 21, № 3.- С.83-90.
2. Луценко В.И. Дальность действия систем акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2015.- Т. 14, № 2.- С.125-136.
3. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Е.В. Кривенко, А.В. Соболяк // Физические основы приборостроения.- 2015.- Т.4, №4(17).–С.3-29.
4. Обнаружение сигналов на фоне нестационарных негауссовых помех от подстилающей поверхности / В.Ф. Кравченко О.В. Кравченко В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк. // Физические основы приборостроения.- 2016.- Т.5, №4(21). –С.23-39.
5. Характеристики акустических полей наземных и малоразмерных воздушных объектов акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Мазуренко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2017.- Т.16, №1, 2.- С.18-22.
6. Луценко В.И. Использование смарт-грид технологий для повышения эффективности применения объектов наземной техники / В.И. Луценко,

- И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2017.- Т16, №3, 4.- С.134-145.
7. The Acousto-Electromagnetic Portrait Signatures For The Aerodynamic And Ground Technology Objects / V. Lutsenko, I. Lutsenko, A. Sobolyak, Y. Luo, Q. Guo, & Y. Zheng // Telecommunication and Radio Engineering.- 2018.- Vol.77, №11. – P.971-993.
 8. Луценко В.И. Пассивные акустические системы разведки, дальность их действия и разрешающая способность / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Інтегровані технології та енергозбереження, щоквартальний науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХП».- 2014.- № 3.- С. 60-64.
 9. Пат. Україна №111262, МПК Н03В 7/14 (2006.01), Н03В 7/06 (2006.01) Відкрита випромінююча система / Кривенко О. В., Луценко В. І., Соболяк О.В. // Заявник і власник Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України.- № а 2014 08410, зявл. 27.04.2014, опубл. дані заявки 21.05.2016, Бюл.№2, опубл. дані про патент 11.04.2016, Бюл.№7.
 10. Луценко В.И. Дальность действия и разрешающая способность пассивных акустических систем разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 5-й Международный Радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Межд. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии», 14-17-октября: сб. научн. тр. – Харьков, 2014.- Т.1.- С. 41-44.
 11. Использование свойств магических квадратов для апертурного синтеза / В.И. Луценко, И.В. Луценко, И.В. Попов, А.В. Соболяк, Иян Ло // 8-я Междунар. научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им.А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.215-219.
 12. Методика оценки уровня акустических шумов объектов на местности / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 8-я Междунар. научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы

- измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.220-225.
- 13.Луценко В.И. Сигнатуры акусто-электромагнитных портретов аэродинамических и наземных объектов техники / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 8-я Междунар научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.226-230.
 - 14.Signatures of Acousto-Electromagnetic Portraits of Aerodynamic and Terrestrial Mechanical Objects / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov, A.V. Sobolyak // Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 електрон. опт. диск (CD – ROM).
 - 15.Optimal Reception of Signals Propagating in Media with Absorption and Dispersion / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov, A.V. Sobolyak // Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 електрон. опт. диск (CD – ROM).
 - 16.Луценко В.І. Акусто-електромагнітні портрети об'єктів наземної та повітряної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.137-138.
 17. Луценко В.І Застосування систем акустичної розвідки для підвищення живучості об'єктів наземної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.139-141.
 - 18.Описание и анализ квазипериодических сигналов распространяющихся в средах с поглощением и дисперсией / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Иян

- Ло, А.В. Соболяк // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С. 29-31.
19. Луценко В.І Використання смарт-грід технологій для підвищення ефективності використання об'єктів наземної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В Соболяк. // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.141-143.
20. Оптимальное обнаружение сигналов на фоне стационарных негауссовых помех / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, И.В. Попов // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С.121-123.
21. Разрешение – обнаружение - измерение параметров сигналов в негауссовых шумах / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, И.В. Попов // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С.118-120.
22. Определение сигнатур акусто-электромагнитных портретов объектов техники на основе их оптических портретов / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, Ло Иян, Гоу Цян, Джин Юн. // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018.- С.703-710.
23. Использование полумарковских вложенных процессов для описания нестационарных акустических шумов. / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Ло Иян, А.В. Соболяк // VIII Всероссийские Армандовские чтения, IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018. –С.25-27.

ЗМІСТ

	Стр.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	15
ВСТУП.....	19
Розділ 1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І АКУСТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ.....	29
1.1 Акустичні шуми природного та антропогенного походження.....	29
1.2 Вторинні електромагнітні випромінювання об'єктів в оптичному, УКХ і КХ діапазонах.....	33
1.3 Системи КХ і УКХ радіолокації, акустичної розвідки і їх можливості по виявленню наземних і повітряних об'єктів.....	36
1.4 Смарт-грід технології в системах виявлення.....	41
Висновки до розділу 1.....	42
Розділ 2 АКУСТИЧНІ ПОЛЯ НАЗЕМНИХ І ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	45
2.1 Рівні акустичних шумів	45
2.2 Спектри.	46
2.3 Дальність дії систем	53
2.4 Акустичні поля наземних і малорозмірних повітряних об'єктів.....	59
Висновки до розділу 2.....	64

Розділ 3	ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І АКУСТИЧНІ ПОРТРЕТИ ОБ'ЄКТІВ.....	66
3.1	Повітряні об'єкти з гвинтовим двигуном типу літак, вертоліт, БПЛА....	66
3.2	Використання кепстральної обробки для визначення частоти модуляції	75
3.3	Радіолокаційні та акустичні поля турбореактивного двигуна.....	79
3.4	Динамічні спектри радіолокаційних і акустичних випромінювань об'єктів	83
3.5	Спектральна і поляризаційна структура відбиття від вертольоту.....	85
	Висновки до розділу 3.....	88
Розділ 4	НЕСТАЦІОНАРНІ ЗАВАДИ ДЛЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ.....	90
4.1	Характеристики радіолокаційних відбиттів від суші і їх математична модель	90
4.2	Завади активно-пасивним системам радіолокації, що створюються випромінюваннями мовних станцій КХ і УКХ діапазонів	123
4.3	Використання напівмарківських вкладених процесів для опису нестационарних акустичних шумів	127
4.4	Оптимальний прийом сигналів, що поширюються в середовищах з поглинанням і дисперсією	140
	Висновки до розділу 4.....	148
Розділ 5	СМАРТ-ГРІД ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄКТІВ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ	151
5.1	Виникнення поняття Smart Grid.....	151
5.2	Датчики і канали отримання інформації об'єктів наземної техніки про навколишню обстановку.....	153

5.3 Канали обміну інформацією і їх комплексне використання.....	162
Висновки до розділу 5.....	170
ВИСНОВКИ	172
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	176
ДОДАТОК А Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.....	196
ДОДАТОК Б Рівні шуму. Коефіцієнти апроксимації. Розрахункові значення дальностей виявлення.....	200
ДОДАТОК В Апаратура, методика, результати досліджень.....	204
ДОДАТОК Г Характеристики об'єктів техніки.....	209
ДОДАТОК Д Результати досліджень відбитків від місцевості. Характеристики вимірювальних систем і акустичних шумів.....	217
ДОДАТОК Є Характеристики об'єктів дослідження і систем виявлення.....	231

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

БПЛА	– безпілотний літальний апарат
БЦОМ	– бортова цифрова обчислювальна машина
ПЦ	– повітряні цілі
ГЛОНАСС	– глобальна навігаційна супутникова система
ГНСС	– глобальна навігаційна супутникова система
ГТД	– газотурбінний двигун
ЄСК	– єдина система керування
ШСЗ	– штучний супутник Землі
КХ	– короткі хвилі
ВВЧ	– вкрай високі частоти
МНК	– метод найменших квадратів
ОЕС	– оптоелектронна система
ППО	– протиповітряна оборона
ПД	– пропелерний двигун
ПКР	– протикорабельна ракета
РЛС	– радіолокаційні системи
РМ	–розвідувальна машина
НВЧ	– надвисокі частоти
СУ	– силова установка
ТВД	– турбогвинтовий двигун
ТРД	– турбореактивний двигун
ТРДД	– турбореактивний двоконтурний двигун
УКХ	– ультракороткі хвилі
ПЕПР	– питома ефективна площа розсіювання
ЕПР	– ефективна площа розсіювання
GPS	– global positioning system
A_f	– амплітуда спектральної складової

$C_s(q)$	– кепстр
c	– швидкість світла у вакуумі
c, c_1	– швидкості поширення в середовищах
d	– відстань від джерела шуму до приймача
d_B	– діаметр гвинта
$E(l)$	– розподіл напруженості опромінюючого поля по довжині лопаті гвинта
f_D	– доплерівський зсув частоти
$f_{ij}(t)$	– щільність розподілу
Δf	– ширина спектру
F	– коефіцієнт віддзеркалення
G_{Tr}, G_R	– коефіцієнти посилення передавальної і приймальної антен
$H_i \in \nu_1 \dots \nu_K,$	– фазові стани
h_{Tr}	– висота передатчика
h_T	– висота джерела шуму
h_R	– висота приймача
k	– хвильове число
$K(f)$	– коефіцієнт придушення
$L(\bullet)$	– множник послаблення
$L_{div}(R)$	– загасання через геометричну дивергенцію
$L_{atm}(R)$	– загасання через звукопоглинання атмосферою
L_{bar}	– загасання через екранування
L_{TrT}, L_{TR}	– втрати при поширенні радіохвиль від передавача до цілі і від цілі до приймача відповідно
Γ_Σ, L_Σ	– інтегральні коефіцієнти відбиття і загасання листяним покривом
Δl	– амплітуда вібрацій корпусу
M_{im}	– « m » момент для « i »-го стану

$n_{\text{Л}} \cdot n_{\text{В}}$	– кількість лопатей і кількість гвинтів
P_i	– фінальна вірогідність існування процесу в i -му стані
P_R	– потужність сигналу, що приймається, від передавальної станції
P_{Tr}, P_T	– потужності випромінюваного і відбитого від цілі сигналу, що приймається
$\overrightarrow{\ P(S)\ }$	– матриця щільності розподілу значень
R_{TrT}, R_{TR}	– дальності між передавачем і ціллю, ціллю і приймачем
S_0	– значення спектральної щільності на нульових частотах
$S_r(f, R, h_r, h_T)$	– спектр джерела звуку
$S(F)$	– спектр флуктуацій амплітуди
$S(F_i), S(F_j)$	– спектральна щільність на F_i і F_j частотах
$\overrightarrow{S(t)}$	– неперервна компонента процесу
$[S_i(t)]$	– статистична матриця розсіяння
T_{ij}	– час очікування в стані ν_i до переходу в стан ν_j .
V	– множник послаблення
V_0	– швидкість польоту
V_{max}	– максимально допустима швидкість руху кінця лопаті
$V_{gr}(R, h_r, h_T)$	– загасання через вплив землі
Z, Z_1	– імпеданс падаючої хвилі і хвилі, що пройшла в друге середовище
α	– параметр, залежний від форми об'єкту
$\alpha \%$	– доля загальної потужності шуму
γ	– погонне загасання
l	– довжина лопаті
l_x, l_y	– горизонтальний і вертикальний розміри конструкції
$\theta(t) = \nu_i$	– дискретна компонента процесу

λ	– довжина хвилі сигналу на несучій частоті
μ	– відношення сигнал-шум
ε	– діелектрична проникність
π_{ij}	– елемент матриці вірогідності переходу
ρ	– щільність повітря
ρ, ρ_1	– щільність середовищ
ρ_s	– коефіцієнт відбиття визначає середньоквадратичне значення поля
$\rho(\tau)$	– кореляційна функція
$\rho(F_i, F_j)$	– коефіцієнт взаємної кореляції на F_i і F_j частотах
$\sigma(\theta_{Tr}, \theta_R)$	– бістатична ЕПР цілі при напрямках на передавач і приймач
σ, σ_{Π}	– ЕПР спектральної лінії, обумовленої вібрацією і корпуси ТДУ
σ_h	– середньоквадратичне значення висот нерівностей поверхні
σ_{lmi}^0	– питома ЕПР i -го кластера поверхні суші (фазового стану) при l поляризації опромінення і m прийому розсіяного сигналу
$\sigma_{x(y)}$	– ЕПР на горизонтальній і вертикальній поляризаціях
τ_{05}	– інтервал кореляції
ψ	– кут перевідбиття

ВСТУП

Актуальність теми

Нині все більший інтерес проявляється до активно-пасивних засобів радіо- і акустичної розвідки. Це пов'язано з тим, що активно-пасивні системи використовують вже існуючі електромагнітні поля систем зв'язку і навігації наземного та космічного розташування, які опромінюють довкілля. Поле, що відбито об'єктами тієї, чи іншої природи несе інформацію для їх виявлення й ідентифікації. У пасивних системах для виявлення об'єктів використовують їх власні теплові або акустичні випромінювання. Тому на відміну від активних систем активно-пасивні і пасивні системи не демаскують себе, тому мають істотно більшу живучість, не забруднюють довкілля додатковими випромінюваннями, істотно дешевші у виробництві і експлуатації.

Останнім часом, більш ніж через 80 років з моменту виникнення, знову зріс інтерес до акустичних систем моніторингу довкілля. Ці системи основані на прийомі акустичних полів, які випромінюються самим об'єктом. Спочатку їх використовували в системах протиповітряної оборони (ППО) для виявлення літаків і наведення на них прожекторів і зенітних установок. Потім, через зростання швидкостей літаків і істотного зниження отримуваної при цьому точності наведення, а також у зв'язку з появою альтернативних методів, які використовують для вирішення цих завдань радіохвилі, інтерес до пасивних акустичних систем виявлення і цілевказівки зник на тривалий час. Проте зараз через більшу прихованість та живучість спостерігається черговий сплеск інтересу до них. Їх намагаються використовувати для виявлення гусеничної і колісної наземної техніки, аеродинамічних об'єктів. Робляться спроби їх застосування для виявлення окремих людей і груп, пошуку і визначення місця розташування снайпера після зробленого пострілу, у рамках антитерористичних операцій, а також для аналізу виникнення екстремальних ситуацій в місцях великого скупчення людей.

Таким чином, використання існуючих електромагнітних і акустичних випромінювань є актуальним завданням при створенні концепції глобального інформаційного поля. Нині особливої актуальності набуває не лише розширення типів фізичних полів та сенсорів, що використовуються, але і раціональне об'єднання отриманої за їх допомогою інформації, та використання смарт-грід технологій (хмарних мереж) для створення інтелектуальних просторово-розподілених систем, що забезпечують ефективне отримання і використання інформаційних потоків для вирішення завдань дистанційного зондування та моніторингу довкілля.

Ключовим завданням у вирішенні цієї проблеми є виявлення набору характерних ознак - сигнатур акустичних і вторинних електромагнітних полів об'єктів техніки, визначення параметрів фонових шумових сигналів для ефективного виділення на його фоні корисного сигналу, визначення впливу середовища поширення і стану підстильної поверхні на корисний сигнал для подальшого використання отриманої інформації в пасивних системах моніторингу довкілля.

Таким чином, актуальність теми дисертаційної роботи обумовлена необхідністю виявлення сигнатур акустичних та електромагнітних випромінювань і відбиттів від природних та антропогенних об'єктів для моніторингу довкілля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У дисертації наведено узагальнені результати досліджень, що отримані автором у період 2013 –2018 рр., які базуються на програмах, планах і держбюджетних темах наукових досліджень Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України:

«Просторово-часові нестационарні електромагнітні та акустичні взаємодії в системі атмосфера – море – речовина; вплив стану середовища та складних відбивачів на дистанційну діагностику при локаційному і ретрансляційному зондуванні та на метеорний радіозв'язок (шифр «Обрій»), яка виконувалася в

період із 01.01.2013 р. по 31.12.2017 р. на підставі Постанови Бюро ВФА НАНУ від 23.05.2012 р., протокол №5, № державної реєстрації 0113U000048 (виконавець);

«Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів», шифр «Діагностика» (2013 –2014 рр.), № державної реєстрації 0113U002976, яка виконувалась відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 – 2016 рр. за розпорядженням Президії НАН України від 01.02.13 № 56 (1-й етап) та від 04.03.14 № 140 (2-й етап) (виконавець);

«Взаємодії електромагнітних і акустичних хвиль в системі довкілля-речовина та їх використання для вирішення проблем радіолокації, енергетики, екології, медицини та зв'язку» (шифр "Обрій-2"), яка виконується в період із 01.01.2018 р. по 31.12.2022 р. на підставі Постанови Бюро ВФА НАНУ від 06.06.2017р., протокол №4, № державної реєстрації 0118U003034 (виконавець).

Мета і задачі дослідження.

Метою дисертаційної роботи є визначення сигнатур електромагнітних та акустичних полів випромінювання та відбиттів об'єктами, які необхідні для розробки наукових засад створення систем моніторингу довкілля.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було розв'язати наступні задачі:

- розробити методику вимірювань і визначити вимоги до радіо та звукометричної апаратури, призначеної для вивчення особливостей випромінювання та відбиттів електромагнітних та акустичних полів природних та антропогенних об'єктів;
- створити вимірювальні комплекси;
- дослідити особливості просторово-часової структури завад, створюваних відбиттями від поверхні суші, покритої рослинністю, створити

модель і визначити характеристики, що входять до її складу;

- вивчити характеристики акустичних полів наземних і повітряних об'єктів;
- встановити теоретично і експериментально підтвердити сигнатури електромагнітних та акустичних портретів об'єктів техніки;
- дослідити нестационарні завади в КХ і УКХ діапазонах радіохвиль і акустичні шуми місцевості, створити імітаційні моделі для їх опису;
- розглянути можливість застосування нових технологій, зокрема смарт-грід, для підвищення ефективності використання об'єктів наземної техніки і створити методики оцінки їх ефективності;
- створити методики оцінки дальності дії як пасивних систем акустичної розвідки, так і активно-пасивних систем, що використовують випромінювання космічних і наземних радіосистем для моніторингу довкілля.

Об'єкт дослідження – процеси випромінювання та відбиття радіо- і акустичних хвиль об'єктами та поширення їх у неоднорідній атмосфері.

Предмет дослідження – параметри прийнятих електромагнітних та акустичних полів випромінювання і відбиттів об'єктами та їх взаємозв'язок з характеристиками довкілля.

Методи досліджень

Теоретичні методи статистичної радіофізики, радіотехніки, математичної статистики, застосування теорії статистичних рішень і експериментальні методи вивчення особливостей поширення радіо- та акустичних хвиль у тропосфері.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше показано, що при збільшенні відстані до приймача внаслідок дисперсійних властивостей атмосфери та інтерференційних явищ при віддзеркаленні від поверхні Землі відбувається звуження спектра акустичного

шуму. Ефективна ширина спектра джерел акустичного шуму, що є об'єктами розвідки, може істотно (в декілька разів) звужуватись зі збільшенням дальності до джерела.

2. Вперше запропоновано методику визначення акусто-електромагнітних сигнатур за оптичними зображеннями об'єктів техніки. Показано, що частоти модуляції розсіяного сигналу несучим і рульовим гвинтами для різних типів вертольотів істотно відрізняються і можуть бути визначені за їх габаритними розмірами та акустичними шумами.

3. Вперше запропоновано імітаційну модель нестационарних акустичних шумів природних і антропогенних, а також пасивних завад від суші, покритої рослинністю, з використанням напівмарківських вкладених процесів з декількома фазовими станами, що краще ніж раніш відомі моделі описує статистичні характеристики шумів (спектри, закони розподілу, питома ефективна площа розсіяння (ПЕПР)).

4. Вперше у спектрах радіолокаційного відбиття від вертольота, отриманих при інтервалах спостереження менших за період обертання лопатей гвинта, виявлені сплески спектральної щільності у високочастотній області з частотою, кратною частоті їх обертання. Встановлено, що високочастотні компоненти спектра віддзеркалень, які обумовлені частотною модуляцією сигналу, розсіяного лопатями, що обертаються, взаємно корельовані.

5. Для різних довжин хвиль опромінюючого поля і різних поляризацій прийому вперше виявлено наявність однакових спектральних компонент, пов'язаних з вібрацією обшивки під впливом рушійної установки.

6. Розроблено методику опису і аналізу квазіперіодичних процесів, в тому числі при поширенні хвиль в середовищах з дисперсією і поглинанням. Показано, що кепстральна обробка дозволяє виділяти періодичності, які пов'язані з обертами двигуна. Запропоновано модифіковану двовимірну кореляційну функцію, яка дозволяє порівнювати характеристики, що отримані на різних довжинах хвиль.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено методику оцінки дальності виявлення джерел акустичного випромінювання в умовах впливу загасання в атмосфері та інтерференційного ослаблення його земною поверхнею для нейтрального режиму поширення в атмосфері. Показана можливість виявлення об'єктів наземної та повітряної техніки за їх акустичним випромінюванням при відсутності зовнішніх шумів на віддаленні в кілька кілометрів. Природні шуми вітру, дощу, власного двигуна можуть в значній мірі (на 1..2 порядки) знижувати дальність дії систем акустичної розвідки. Показано, що, пригнічуючи низькочастотні компоненти шуму в смузі до 1000...2000 Гц, можна підвищити контраст спостереження в умовах шуму вітру наземних об'єктів приблизно на 5...13 дБ і до 10...20 дБ для безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

2. Акустичні шуми і оптичні зображення об'єктів техніки можуть служити основою для визначення сигнатур в радіолокаційних портретах. Акустичні портрети повітряних і наземних об'єктів техніки дозволяють за частотою модуляції лопатями (для вертольотів) і гвинтами (для літаків з пропелерами) визначити оберти двигунів, що також виявляється в віддзеркаленнях радіолокаційних сигналів, у вібраціях корпусу об'єктів техніки і пропелерній, гвинтовій і турбінній модуляціях розсіяного сигналу. Збільшення кількості обертів двигуна призводить не тільки до зростання частоти, а й рівня вібрацій, причому найбільш сильно при режимах максимальних обертів. Різде збільшення амплітуди частоти вібрації може служити ознакою роботи двигуна в режимі форсажу. Частоти модуляції сигналу, розсіяного несучим і рульовим гвинтами, можуть використовуватися для розрізнення типів вертольотів.

3. Наявність у високочастотній області широкосмугового сплеску, що з'являється з частотою обертання гвинта, можна використовувати як інформативну ознаку для виявлення вертольота в тих ситуаціях, коли

відсутній доплерівський зсув частоти сигналу, відбитого від корпусу, і він не виділяється на фоні віддзеркалень від місцевості.

4. Виявлені однакові спектральні компоненти на різних поляризаціях прийому і довжинах хвиль опромінюючого поля, які пов'язані з вібрацією обшивки під впливом рушійної установки, є основою для створення методик підвищення контрастності виділення сигналів об'єкту з працюючим двигуном на фоні завад від місцевості.

5. Визначено, що у спектрах сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, у діапазоні частот від 6 до 60 Гц відносно несучої, спектральна щільність істотно нижче на 20... 30дБ, ніж в області інформаційних частот, що є основою їх застосування для вирішення задач радіолокації і дистанційного зондування.

6. Запропоновані імітаційні моделі акустичних шумів місцевості і об'єктів, а також радіолокаційних віддзеркалень від суші, дозволяють оцінювати робочі характеристики систем акустичної розвідки (дальності дії) і активно-пасивних систем радіолокації. Зокрема, втрати в співвідношенні сигнал-шум, які виникають при виявленні сигналів за рахунок негаусовості завад, досягають 20 дБ.

7. Показано можливість отримання інформації про навколишнє середовище з використанням вторинних полів, які створюються об'єктами техніки при віддзеркаленні сигналів підсвічування мовних станцій КХ діапазону, супутникових навігаційних систем, наземних систем телебачення і мовлення, акустичних шумів об'єктів. Також їх використання може дозволити виявляти рухомі об'єкти наземної техніки на віддаленнях в одиниці кілометрів. Використання для підсвічування довкілля випромінювань мовних КХ станцій і власних радіостанцій об'єктів може дозволити виявляти висотні повітряні цілі на віддаленнях понад 10 км. Власні акустичні шуми об'єктів техніки дозволяють здійснювати їх виявлення на відстанях до 8 км при відсутності зовнішніх завад.

8. Звернуто увагу на збіг особливостей акустичних та вторинних електромагнітних випромінювань природних та антропогенних об'єктів, що є перспективним при розробленні методик моніторингу довкілля.

Особистий внесок здобувача.

У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, виконаних автором самостійно і в співавторстві з колегами. Особистий внесок дисертанта полягає у наступному.

У роботах [38, 40, 53] він експериментально дослідив рівні шуму, діаграми і спектри випромінювання наземних (транспортні засоби, люди) і аеродинамічних (квадрокоптер, літаковий БПЛА) об'єктів. Запропонував методику оцінки впливу на рівні і спектри випромінювання дальності і азимута спостереження.

У роботах [35, 36, 37, 39, 121] запропонував методику оцінки дальності дії систем розвідки, які використовують власне випромінювання наземних (транспортних засобів, людей) і аеродинамічних (літаки і вертольоти) об'єктів. Розглянув вплив на спектри випромінювання атмосфери і підстильної поверхні. Отримав значення множника загасання при різних метеорологічних умовах для типових об'єктів розвідки.

В роботах [40, 52] запропонував методику аналізу квазіперіодичних процесів, в тому числі при поширенні хвиль в середовищах з дисперсією і поглинанням.

У роботах [54-58] брав участь в розробці методики отримання електромагнітних і акустичних сигнатур об'єктів техніки на основі їх оптичних зображень та проводив експериментальні дослідження в натурних і лабораторних умовах.

У роботах [51, 79] брав участь в формулюванні ідеї використання моделі нестационарних, негаусових завад від підстильних поверхонь у вигляді напівмарківських вкладених процесів, в [50, 80] запропонував підхід, що дозволяє імітувати сигнали зворотного розсіювання від суші при високій

роздільній здатності РЛС по дальності і азимуту, а також оцінити робочі характеристики систем селекції і виявлення об'єктів на фоні суші.

В роботі [78] запропонував використовувати напівмарківські вкладені процеси для опису нестационарних акустичних шумів.

У роботах [118, 122, 123] запропонував можливість побудови інтелектуальних мереж з окремих об'єктів наземної техніки і за рахунок цього підвищення ефективності їх застосування та живучості.

В роботі [124] брав участь в розробці способу побудови і алгоритму синтезу двовимірних антен на основі магічних квадратів, що забезпечують, при високому ступені розрідження, досить мале бічне випромінювання.

Апробація результатів дисертації

Матеріали дисертації доповідалися на міжнародних конференціях і симпозиумах (усього 14 доповідей), в тому числі:

1. 5-й Междунар. радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харків, Україна, 2014) – 1 доповідь [35];
2. 8-я Междунар. научно-техническая конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (Суздаль, Росія, 2015) – 3 доповіді [38, 54, 124];
3. International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkov, Ukraine, 2016) – 2 доповіді [40, 55];
4. IV Міжнар. науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, Україна, 2016) – 3 доповіді [39, 56, 123];
5. VI Міжнар. науково-практична конференція «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (Черкаси, Україна, 2017) – 3 доповіді [52, 79, 80];
6. II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы

дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (Муром, Росія, 2018) – 1 доповідь [58];

7. VIII Всероссийские Армандовские чтения IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике» (Муром, Росія, 2018) – 1 доповідь [78].

Публікації

Основні результати дисертації опубліковано у 8 статтях [36, 37, 50, 51, 53, 57, 118, 121] наукових вітчизняних і закордонних виданнях, 1 патенті України про винахід [122] та в 14 тезах міжнародних наукових конференцій [35, 38- 40, 52, 54- 56, 58, 78- 80, 123, 124].

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ І АКУСТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА
ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ**1.1 Акустичні шуми природного та антропогенного походження**

З розвитком обчислювальних систем, засобів накопичення, обробки і передачі інформації, стала можливою побудова систем моніторингу, заснованих на використанні вторинних електромагнітних і власних акустичних випромінювань об'єктів природного та штучного походження [1-4]. Для вирішення даного завдання необхідно знати акустичні властивості атмосфери, шумові характеристики як природних процесів, так і шумів, пов'язаних з діяльністю людини, функціонуванням об'єктів техніки, промислових та інфраструктурних об'єктів [5-13]. Особливий інтерес представляють широкосмугові акустичні імпульси [6].

Акустичне поле будь-якого складного об'єкта техніки формується як суперпозиція акустичних полів окремих джерел випромінювання [10]. При цьому можливе екранування випромінювання окремих джерел елементами самого об'єкта. Поширення шуму в атмосфері і поблизу поверхні землі супроводжується рядом ефектів, що призводять до зміни інтенсивності і спектрального складу випромінювання. Так основними джерелами шуму для літака є його рушії (повітряні гвинти - для літаків з турбогвинтовим двигуном (ТВД) і пропелерним двигуном (ПД), реактивні струмені силової установки (СУ) - для літаків з турбореактивним двигуном (ТРД) і турбореактивним двоконтурним двигуном (ТРДД), лопаткові машини (вентилятор, компресор, турбіна) газотурбінного двигуна (ГТД), елементи планера літака (шасі, механізація крила). Лопаткові машини ГТД генерують випромінювання з дискретними і безперервними по частоті спектрами. За інтенсивністю домінує випромінювання з дискретним спектром на гармоніках частоти обертання лопаток робочих коліс (частоти 1000...4000 Гц) і на гармоніках роторної частоти (надзвукові вентилятори,

область частот 500...2000 Гц). Реактивний струмінь генерує безперервне за частотою випромінювання із максимальною спектральною щільністю потужності в області низьких частот ($f_{\text{макс}} = \text{Sh } U_0 / d$, где $\text{Sh}=0.2-0.3$ – число Струхалія, U_0 – швидкість витікання струменя, d - діаметр сопла реактивного струменя). Планер літака є джерелом широкопasmового шуму з максимальною спектральною щільністю в області середніх частот. Такі міркування справедливі і для вертольотів. У колісної та гусеничної наземної техніки основними джерелами шуму є силова установка, елементи трансмісії, елементи ходової (для гусеничних машин), елементи вихлопної системи. Для різних компонентів акустичного поля наземної техніки характерні різні діаграми спрямованості. Поширення шуму силової установки, як правило, пов'язано з напрямком викиду вихлопної системи.

Шуми ходової і трансмісійних систем мають кругову діаграму. Рівень зовнішнього шуму може досягати значень 90 дБ. Основна енергія акустичного сигналу знаходиться в смузі частот обертання колінчастого валу силової установки. Залп рушниць або гармати є широкопasmовим акустичним імпульсом, який представляє собою суперпозицію великої кількості гармонік [6]. При моделюванні поширення такого сигналу в атмосфері необхідно враховувати енергетичні втрати. Оскільки коефіцієнт поглинання звуку залежить від його частоти, то й амплітуда кожної зі складових широкопasmового сигналу гармонік буде змінюватися з відстанню за своїм законом. Таким чином, при поширенні широкопasmового акустичного імпульсу в атмосфері крім загального зменшення амплітуди буде відбуватися зміна його форми. Широкопasmовий акустичний імпульс можна розглядати як аперіодичну функцію звукового тиску від часу, що обертається в нуль на безкінечності і уявити у вигляді інтеграла Фур'є. Для спрощення розрахунків покладається, що звук поширюється в однорідному об'ємі повітря, в якому встановилися нормальні умови: температура - 293,15 К, тиск – 1013 мбар, вологість - 80%. В цьому випадку вертикальний градієнт коефіцієнта поглинання звуку являє собою лінійну залежність від відстані. За результатами моделювання [6] отримані залежності спектру і форми акустичного імпульсу від відстані, які представлені на рис. 1.1 і 1.2, відповідно.

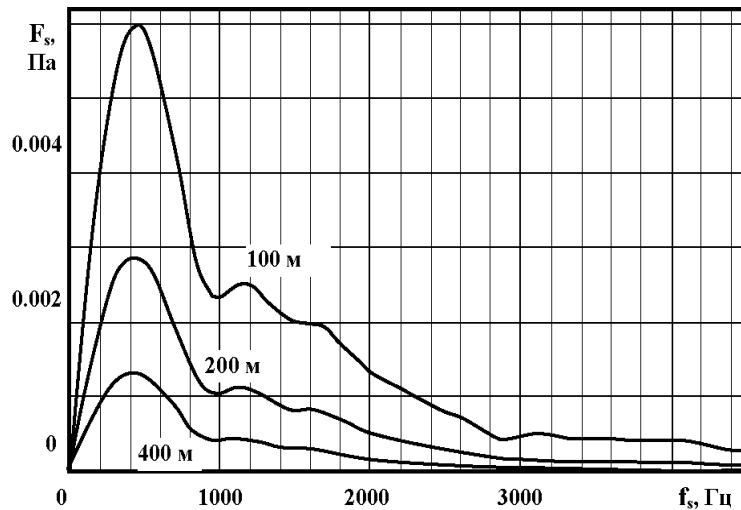


Рис. 1.1- Зміна спектра акустичного імпульсу пострілу від відстані до джерела в діапазоні частот 1...4600 Гц [6].

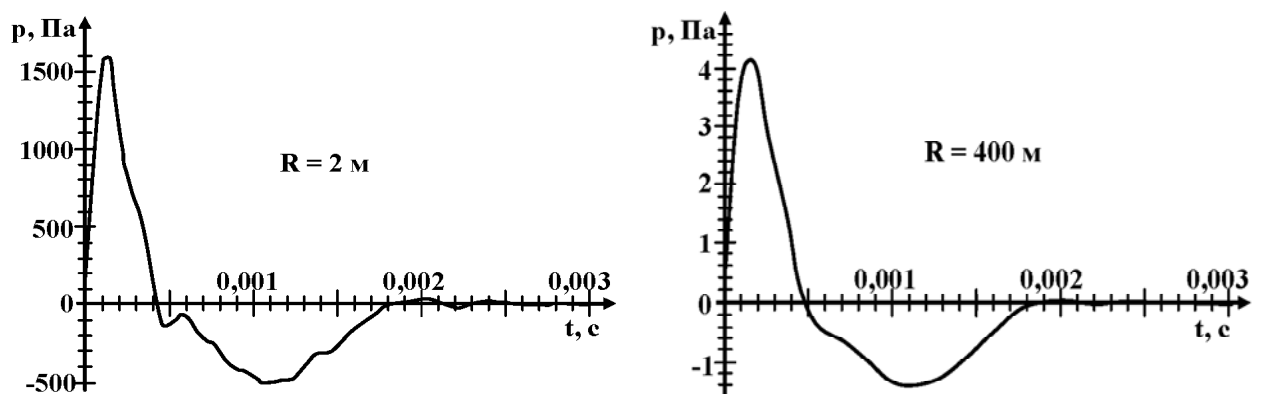


Рис. 1.2- Зміна форми імпульсу зі збільшенням відстані від джерела [6].

Таблиця 1.1

Значення ЕПР акустичного імпульсу і турбулентних неоднорідностей [6]

Відстань від джерела R, м	ЕПР акустичного імпульсу, м ²	ЕПР турбулентних неоднорідностей, м ²
50	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$
100	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$
150	$7,1 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
200	$4,8 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$
250	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-9}$

У припущенні про однорідність атмосфери і відсутності бокового вітру, фронт акустичного імпульсу буде являти собою сегмент сфери. У табл. 1.1 приведені значення ЕПР акустичного імпульсу і турбулентних неоднорідностей.

Акустичні хвилі при вибухах хімічних вибухових речовин (ВР) досліджуються давно [5]. В результаті цих досліджень встановлено, що повітряні хвилі на відстанях 1...10 км навіть при невеликому заглибленні заряду є акустичними, тому що з відстанню хвилі зберігали свої фазові характеристики, а їх амплітуди зменшувалися зворотно пропорційно відстані. Швидкість поширення хвиль збігалася зі швидкістю звуку. При цьому амплітуди акустичних хвиль залежать від кубічного кореня з маси ВР, а основна енергія звукових коливань знаходиться в зоні інфразвуку на частоті до 1 Гц [5].

Максимальні спектральні звукові складові в ударах грому знаходяться в діапазоні частот 50...500 Гц [14]. Рівень звуку розкатів грому до 100 дБ. Шум дощу до 70 дБ.

Гучність людського голосу на відстані 1 м в смузі 0,1...10 кГц відносно порога чутності (2×10^{-5} Па): спокійна розмова, шепіт – 20 дБ, голосна розмова – 40 дБ, крик – 60 дБ [8].

Вночі шепіт може фіксуватися на відстані 150 м, голосна розмова – 600 м, а емоційна - на відстані до 1,5 км. Звук опадів сприяє зменшенню дальності фіксації шепоту до 90 м, голосної розмови до 500 м, а окрику до 1300 м. При наявності автомашин між джерелом звуку і приймачем шепіт фіксуватися не буде, голосна розмова буде фіксуватися на відстані 150 м, емоційна – 600 м. У разі проходження поїзда фіксуватиметься тільки емоційна розмова на дальності до 90 м. Таким чином, визначальним фактором при виявленні акустичних цілей є завадова обстановка, яка обумовлена наявністю інших джерел шуму, тому дальність виявлення цілі може варіюватися від десятків метрів до одиниць кілометрів.

1.2 Вторинні електромагнітні випромінювання об'єктів в оптичному, УКХ і КХ діапазонах

Бурхливий розвиток засобів розвідки, які працюють в різних діапазонах довжин електромагнітних хвиль, розпочався з кінця 1970-х років. На сьогоднішній день існує велика кількість систем виявлення, які використовують різні діапазони електромагнітних хвиль і дозволяють з високою ймовірністю виявляти і ідентифікувати наземні об'єкти [15]. До плюсів візуального пошуку об'єктів можна віднести високу роздільну здатність ока, можливість роботи у великому діапазоні яскравості і широкому діапазоні довжин хвиль, високу чутливість, а також логічність оператора та можливість розпізнавання об'єкта за рухом, формою, силуетом і окремими елементами. До недоліків можна віднести залежність ефективності пошуку від тренуваності, стомлення і уважності оператора, а також відносно низьку швидкість реакції на появу сигналу (від 0,1 до 1 сек.). При веденні візуального пошуку в оптичному діапазоні його ефективність сильно залежить від прозорості атмосфери, освітленості і метеорологічних умов. У хмарну погоду світлі предмети здаються темними на фоні горизонту. У хмарну погоду погано видно світло-сірі предмети. У сонячну погоду навпаки (але тільки проти Сонця). У ясну погоду і в стороні, протилежній Сонцю, найгірше видно сірі предмети (коефіцієнт відбиття 0,25). Максимальна видимість - білий в ясну погоду проти Сонця і чорний в туман та під Сонцем (смугасті маяки). Мінімальна видимість - сірий колір. Дальність видимості - відстань, коли ціль стає видимою в димку. Ілюстрована дальність видимості - дальність видимості абсолютно чорного тіла (хвойний ліс, чорні кораблі). Чорний предмет здалеку здається світлим, але це не його відбите світло, а світло, розсіяне повітрям. Тому дальність спостереження не залежить від

яскравості освітлення предмету (бо він не віддзеркалює), а тільки від прозорості повітря. В залежності від умов освітлення дальність видимості предмета пропорційна дальності видимості абсолютно чорного предмета. Видимість залежить від довжини хвилі - чим більше довжина хвилі, тим менший вплив чинять метеофактори, такі як димка, туман, дощ і т.д. Димка добре пропускає червоні (0,61...0,76 мкм) і погано пропускає сині (0,4...0,52 мкм) промені спектра. В стороні Сонця димка сильніше. Тому в сонячний день темні предмети (ліси) - блакитні, а світлі предмети (гірські вершини) - рожеві. Для збільшення дальності видимості в умовах димки і туману застосовують жовті світлофільтри (від світло-жовтих в легкий серпанок і до жовто-помаранчевих в туман). Граничним контрастом, при якому можна виявити об'єкт при пошуку, прийнято вважати величину 0,04, тобто різниця між яскравістю об'єкта і фону відрізняється не більше, ніж на 4%. При цьому темні об'єкти виявляються на 20% краще, ніж світлі. При зменшенні освітленості менш граничної величини джерело світла перестає бути видимим. Вночі при спостереженні групових вогнів гранична освітленість складає 10^{-6} лк, а вдень - 10^{-3} лк [16]. При цьому в ясну погоду вночі вогонь з яскравістю 1 кд (одна свічка) виявляється на дистанції в 750 м, в сильну димку (дальність видимості – 1 км) - в 500 м, а в туман (дальність видимості – 500 м) - в 300 м [15, 16]. Найкраща видимість вночі притаманна вогням червоного і зеленого кольору, а найгірша - жовтого. Для спотворення образу і утруднення розпізнавання виявлених об'єктів застосовується деформуюче фарбування. Більшу ефективність має імітувальне фарбування [15, 16, 32], проте воно практично не застосовується для рухомих об'єктів за винятком протитанкових гармат, на щиток яких можуть наноситися елементи, що імітують задній фон. У видимій частині спектра контраст між об'єктом в захисному однотонному забарвленні і різними природними утвореннями знакозмінний, лежить в межах + 0,2 ... -0,45, і має, в основному,

малу величину за винятком випадків, коли фоном є небо. Пояснюється це тим, що максимум випромінювання неба лежить в короткохвильовій частини видимого спектру. Середній контраст об'єкту з захисним фарбуванням лежить в діапазоні $-0,2 \dots -0,4$ (більше для далеких фонів, менше для ближніх) за винятком декількох окремих випадків (коли передня проекція спостерігається на ближньому листяному фоні, або об'єкт виявляється світліше фону). У разі, коли об'єкт спостерігається на фоні хмарного неба, його контраст може досягати $-0,6$. І лише в окремому випадку спостереження на тлі ближніх листяних фонів його контраст незначний і лежить в діапазоні $+0,2 \dots -0,2$.

Радіолокація використовується з 1939 року. Для виявлення наземних об'єктів, в основному, використовуються радіолокаційні станції (РЛС), що працюють в діапазонах $0,8$ см, $1,8$ см і $3,2$ см довжин хвиль [15]. Сучасні РЛС працюють в режимі селекції рухомих цілей (СРЦ) і оснащені пристроєм для пригнічування шуму, що дозволяє їм виявляти рухомі об'єкти на великій відстані. Сучасні літакові РЛС бокового огляду дозволяють виявляти об'єкти в русі, літаки на аеродромах і всі види водних переправ на дистанціях 200 км і більше. Помітність об'єкта характеризується радіолокаційної ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР). ЕПР розраховується тільки для простих об'єктів (куля, циліндр, площина), а для складних (автомобіль, літальний апарат, людина) визначається, як правило, експериментально. За результатами теоретичних досліджень і натурних експериментів впливу зовнішніх форм об'єкта на величину вторинного випромінювання і отриманих при цьому середніх питомих ЕПР різних елементів, були розроблені основні конструктивні принципи створення об'єктів з малою ЕПР [15, 33, 34, 160]:

- Форма об'єкту – обтічна і повинна складати єдине геометричне ціле з гладкою поверхнею.

- На об'єкті не повинно бути поверхонь, що перетинаються під кутом, рівним або близьким до 90° , а також вертикальних поверхонь.

- Кількість допоміжних елементів, які розміщуються на зовнішній поверхні - мінімальне. Мінімумально можливою повинна бути і висота об'єкта.

Найбільший внесок в загальне відбиття від об'єкта дають елементи, розташовані зовні: ящики, запасні паливні баки, навісне обладнання, а також дво- і тригранні відбивачі, утворені стінками ящиків і баків з корпусом [15, 160]. З метою зменшення радіолокаційної помітності об'єкта доцільне закриття цих елементів похилими металевими листами, що може зменшити ЕПР в 2 рази [15]. Для подальшого зменшення ЕПР необхідно закривати елементи об'єкта радіопоглинаючими матеріалами [15, 34], або радіорозсіючими матеріалами [15, 34]. Питання зменшення помітності (ЕПР) в радіометричному діапазоні 2,2 і 3,2 мм (пасивна радіолокація ГСН) найменш розібране. Скануючий радіометр, який працює на довжині хвилі 8 мм, виявляє, в основному, горизонтальні і близькі до них ділянки об'єкта. Застосування радіопоглинаючих матеріалів приблизно однаково ефективно для усіх цих діапазонів [15, 34].

1.3 Системи КХ и УКХ радіолокації, акустичної розвідки і їх можливості по виявленню наземних і повітряних об'єктів

Використання оптичних приладів та приладів нічного бачення дозволяє виявляти 6...8 (з 10) однотипних наземних об'єктів на дальності 200-2500 м вдень за 30 хвилин, та до 4-х об'єктів вночі за 40 хвилин [17]. Виявлення вогневої позиції і визначення її координат можливо після 3...10 пострілів. В результаті ефективність засобів протидії становить не більше 25-30%.

Складність виявлення позицій снайперів при проведенні контртерористичних заходів призводить до того, що нападаюча сторона має значну перевагу, в першу чергу у веденні попереджувального вогню. Це

дозволяє нападаючому завдати значної шкоди до початку організованих дій у відповідь.

Акустичний метод виявлення позицій снайперів має ряд переваг [17, 18]:

- можливість визначення в режимі реального часу координат цілі з точністю, достатньою для її вогневого ураження;
- круговий (360°) сектор виявлення; достатня глибина розвідки (не менше від дальності ураження стрілецькою зброєю);
- визначення калібру і виду зброї, що дозволяє аналізувати ситуацію і встановлювати пріоритети цілей;
- пасивний (очікувальний) режим роботи, що забезпечує системі стійкість і маскування;
- виявлення декількох позицій, з яких вогонь ведеться одночасно;
- тривала безперервна робота (місяць і більше) в автоматизованому режимі без додаткового обслуговування;
- робота, як в денний, так і в нічний час при різних погодних умовах та складній фоноцільовій обстановці;
- невеликі масо-габаритні характеристики;
- можливість роботи в русі;
- порівняно невисока вартість апаратури.

Підвищення точності визначення місцеположення системами акустичної розвідки можливо при використанні методу акустичного моніторингу прикордонного шару атмосфери [148].

Сьогодні розвиток акустичних систем виявлення є найбільш актуальним, але стримується відсутністю даних про характеристики акустичних шумів об'єктів і природних завад, а також методів аналізу і оцінки їх характеристик. Однак при цьому, незмінними залишаються вплив пострілу і польоту кулі на навколишнє середовище. Відомі характеристики впливу пострілу [17, 18]: кут конуса ударної хвилі, який залежить від швидкості кулі; довжина створюваної звукової хвилі 0,16...0,6 метра;

приблизний частотний діапазон звукової хвилі від 0,6 до 2 кГц. Розрахунки на основі цих параметрів дозволяють точно визначити місце здійснення пострілу.

Сполучені штати Америки вже успішно використовують такі системи як «PDC», «Boomerang», «Lifequard» [18]. Великобританія використовує систему «BDI». В Франції пропонується система для знаходження снайперів «METRAVIB» [18]. У Російській Федерації ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» система для знаходження снайперів «СОВА» [19]. Даний комплекс має можливість визначити знаходження снайперів в реальному часі. Система може сполучатися з автоматичними засобами протидії. Таке комплексне рішення забезпечує значне скорочення часу на визначення і пригнічення супротивника. Координація системою зводиться до вибору оператором пріоритетів по цілям. "СОВА" може полегшити виконання завдань розвідникам, оскільки визначає цілі до 1-го кілометра. Є можливість використання даних, що отримуються від різних джерел. Система робить розрахунки і видає корегування у реальному часі. До складу системи входить комплект спеціальних акустичних датчиків, обчислювальний блок та програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати обробку інформації, яка поступає з акустичних датчиків за всіма напрямками з одночасним проведенням селекції завад.

Напіваактивні радіолокаційні системи КХ и УКХ діапазонів успішно виготовляються у світі протягом багатьох років [20- 24]. Сфера їх застосування обмежується переважно вирішенням традиційних завдань радіолокації, таких як виявлення і оцінка параметрів руху повітряних цілей (ПЦ). Успіх застосування технології для виявлення ПЦ зумовлений низкою переваг. Перш за все, це більш висока ймовірність виявлення низьколетячих цілей за рахунок досить високого (до декількох сотень метрів) розташування сторонніх передавачів. Так, на випробуваннях система «Поле» [20, 21] показала здатність контролювати повітряний простір на малих і гранично малих висотах (від 50 до 1000 м) і забезпечувати виявлення цілей, що

рухаються з радіальними швидкостями щодо РЛС не менше 30 м/с, на відстанях понад 40 км. Вертоліт при висоті 25 м виявлявся на дальності 37 км, на висоті 600 м - на дальності 51 км [20, 21]. Системи мають більш високу вірогідність виявлення цілей, виконаних за технологією "Стелс", оскільки сучасні авіаційні стелс-технології не планувалися для використання проти сигналів тих частот, які задіяні в системі. Крім того, вони орієнтовані на мінімізацію моностатичної ЕПР, тоді як бістатична ЕПР може бути значно більшою. У зв'язку з відсутністю власного передавача забезпечується повна пасивність приймальної позиції, тобто її більш висока скритність і живучість в порівнянні з активною РЛС. Більше того, оскільки в ефір випромінюються стандартні сигнали, навіть сам факт присутності і роботи системи залишається невідомим, що дає можливість говорити про її потенційну невиявність, а, отже, і неможливості організації протидії [25- 28]. Втім, передавач в системі є і вихід його з ладу веде до припинення роботи системи. Сучасні системи, які працюють по сигналах FM, DAB і DVB, - Т, здатні упевнено виявляти і супроводжувати повітряні цілі на дальності 50...150 км при висотах 25-1000 м [25- 28].

Розвідувальна машина (РМ) тульського НВО "Стріла" [29-31] призначена для ведення розвідки наземних, надводних і повітряних об'єктів. До складу машини входять розвідувальні системи, що діють на різних фізичних принципах: оптоелектронна система (ОЕС) з тепловізійним каналом, РЛС "ФАРА-ВР", безпілотні літальні апарати (БПЛА), розвідувально-сигналізаційна апаратура, акустична система виявлення пострілів. РЛС і оптико-електронний модуль розміщені на телескопічній щоглі, що дозволяє вести розвідку з укриття. Ці системи забезпечують безперервний пошук, виявлення і розпізнавання таких цілей, як гусенична і колісна техніка, люди в групі і поодинці, плавзасоби, легкомоторні літаки, вертольоти і БПЛА, визначення їх координат з відображенням траєкторії руху на електронній карті місцевості. Апаратура розвідувальної машини забезпечує також визначення власного положення машини і координат

виявлених цілей з відображенням на електронній карті, автоматизоване управління всіма системами і засобами за допомогою бортової інформаційно-керуючої системи, в тому числі безперервну обробку навігаційних даних, прийом і обробку розвідувальної відео- і фотоінформації від БПЛА, а також блокування радіокерованих вибухових пристроїв. Максимальна приладова дальність виявлення цілей апаратурою РМ становить 10 км, вогонь по ним може вестися на дистанціях до двох кілометрів.

Комплекс «Кольчуга» складається з трьох станцій. Він здатний з високою точністю визначати координати наземних і надводних цілей, маршрути їх руху на відстані до 600 км в глибину території і на 150 км по фронту, а для повітряних цілей, що летять на висоті 10 км - до 800 км [143, 144].

Чутливість тракту складає від -110 до -155 дБ/Вт в полосі панорамного обзору [143]. Це забезпечуються п'ятьма антенними системами, розрахованими на роботу в декількох діапазонах довжин хвиль.

«Кольчуга-М» контролює імпульсне і безперервне випромінювання на частотах 135...170, 230...470 і 750...18000 МГц [143]. Система обладнана паралельним 36-канальним приймачем виявлення і електронікою, здатною виключити фонові сигнали і одночасно супроводжувати сигнали від 200 цілей.

"Кольчуга", працюючи за принципом тропосферного поширення, здатна не лише виявляти, але і розпізнавати наземні і повітряні цілі. У пам'яті системи записані відомі зразки цілей. Систему "Кольчуга" складно виявити, оскільки вона веде розвідку в пасивному режимі, тобто сама радіохвиль не випромінює.

Однією з основних загроз з боку супротивника є масований штурмовий і снайперський вогонь. Враховуючи актуальність оперативного розкриття позицій стрільців (снайперів), багаторазово зростає роль технічних засобів розвідки, що дозволяють вирішити це завдання [35, 36].

Унікальні можливості для моніторингу навколишнього середовища відкриваються при спільному використанні електромагнітних і акустичних полів [169, 170]. Метод радіоакустичного зондування дозволяє визначити висотні профілі вологості і температури, приземний тиск і оцінити значення коефіцієнта заломлення.

1.4 Смарт-грід технології в системах виявлення

Основним напрямком розвитку систем виявлення на сучасному етапі є «інтелектуалізація». Завдяки досягненням в області технічної кібернетики, обчислювальної техніки і ряду інших наук стало можливим створення інтегрованих адаптивних систем, які швидко і ефективно реагують на зміну обстановки. Найважливішим досягненням є те, що в даний час з'явилася можливість здійснювати переробку інформації, що надходить і оптимальне управління всіма підсистемами в реальному масштабі часу. Це призвело до подальшого розвитку різних форм і способів розвідки, об'єднаних однією ідеологією [130-135]. Звідси спостерігається різка, стрибкоподібна зміна вимог до окремих зразків і поява якісно нових технічних пристроїв. Однією з концепцій передбачається підвищення ефективності, як окремих виконавців, так і структурних формувань, шляхом розподілу окремих завдань між декількома об'єктами, об'єднаними засобами автоматизованої системи управління в єдине формування - «систему систем». До складу системи можуть включатися наземні машини з екіпажем, безпілотні літальні апарати (БЛА), автоматичні системи (окремі пристрої) і наземні дистанційно керовані машини.

Висновки до розділу 1

Таким чином, можна зробити наступні висновки:

- стрімкий розвиток сучасної технічної бази призвів до зростання інтересу і використання пасивних і активно-пасивних засобів радіо, а також акустичної розвідки. Це обумовлено використанням існуючих електромагнітних полів для підсвічування (активно-пасивні системи) або власних теплових та акустичних випромінювань об'єктів (пасивні системи) для їх виявлення і ідентифікації;

- істотною перевагою активно-пасивних і пасивних систем, в порівнянні з активними системами радіо- і звуко- гідролокації, які можуть себе демаскувати, являється їх істотно більша живучість;

- активно-пасивні системи можуть використовувати для підсвічування довкілля існуючі електромагнітні поля, як наземних, так і космічних радіосистем, зокрема систем зв'язку і навігації, у тому числі глобальної супутникової навігації, випромінювання телевізійних і мовних супутників, а також систем наземного мовлення. Це дозволяє з одного боку не витратити значні кошти для створення спеціалізованих систем підсвічування довкілля, а з іншою не збільшувати його екологічне забруднення додатковими електромагнітними випромінюваннями;

- через більшу скритність і живучість активно-пасивних комплексів, у тому числі, пасивних систем акустичної розвідки і цілевказівки, є перспективним їх використання для виявлення гусеничної і колісної наземної техніки, повітряних об'єктів. Робляться спроби їх застосування для виявлення окремих людей і груп, пошуку і визначення місця розташування снайпера після зробленого пострілу у рамках антитерористичних операцій, а також для аналізу виникнення екстремальних ситуацій в місцях великого скупчення людей.

Таким чином, використання існуючих електромагнітних і акустичних випромінювань є актуальним завданням у рамках створення концепції глобального інформаційного поля. Крім того, нині особливу актуальність

набуває не тільки розширення типів сенсорів, що використовують фізичні поля різної природи, а й раціональне об'єднання інформації, отриманої за їх допомогою, а також використання смарт-грід технологій (хмарних мереж) для створення інтелектуальних просторово розподілених мереж, що забезпечують за рахунок цього підвищення ефективності створення і використання інформаційних потоків для вирішення завдань пасивного моніторингу мобільних об'єктів техніки. Багато в чому рішення цих питань стримується відсутністю експериментальних даних про статистичні характеристики випромінювання та відбиття акустичних і електромагнітних полів природних і антропогенних об'єктів, наукових основ їх застосування для вирішення задачі моніторингу довкілля.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити методика вимірювань і визначити вимоги до комплексу вимірювальної апаратури, призначеної для вивчення особливостей випромінювання і віддзеркалення акустичних і електромагнітних полів природних і антропогенних об'єктів;
- створити вимірювальні комплекси;
- дослідити особливості просторово-часової структури завад, створюваних відбиттями від поверхні суші, покритої рослинністю, створити модель і визначити характеристики, що входять до її складу;
- вивчити характеристики акустичних полів наземних і повітряних об'єктів;
- встановити теоретично і експериментально підтвердити сигнатури електромагнітних і акустичних портретів об'єктів техніки;
- дослідити нестационарні завади в КХ і УКХ діапазонах радіохвиль і акустичні шуми місцевості, створити імітаційні моделі для їх опису;

- розглянути можливість застосування нових технологій, зокрема смарт-грід, для підвищення ефективності використання об'єктів наземної техніки і створити методики оцінки їх ефективності;
- створити методики оцінки дальності дії як пасивних систем акустичної розвідки, так і активно-пасивних систем, що використовують для підсвічування обстановки випромінювання космічних і наземних радіосистем.

РОЗДІЛ 2

АКУСТИЧНІ ПОЛЯ НАЗЕМНИХ І ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Дальність дії і роздільна здатність пасивних акустичних систем залежить від рівня і спектра акустичного сигналу, а також від властивостей середовища поширення і підстильної поверхні. У цьому розділі викладені результати експериментальних досліджень акустичних шумів об'єктів техніки, впливу на них атмосфери і підстильної поверхні. Розроблено методики їх оцінки, що дозволяють визначати дальності дії пасивних акустичних систем. Основні результати розділу опубліковані в роботах [35- 40]

2.1 Рівні акустичних шумів

Рівні шуму оцінюються щодо порогового рівня чутності - 10^{-12} Вт/м² [41]. Типові значення рівнів шуму деяких джерел за літературними даними наведені в табл. Б.1.

На дальність виявлення впливає розподіл потужності за частотами, а також висота розташування джерела звуку відносно поверхні Землі.

Для наземної техніки характерними є два джерела звуку - вихлопна система двигуна внутрішнього згоряння і озброєння. Висота розміщення становить 0,8...1,2 м и 1,4...3,0 м [42] відповідно. Висота розміщення приймальних мікрофонів може становити від 1,6 м до 2 м [42].

Дані по октавним загасанням сигналу в атмосфері в залежності від її параметрів наведені в [43]. Залежність погонного загасання для різних частот, отримана за представленими даними показана на рис. 2.1 [43, 45].

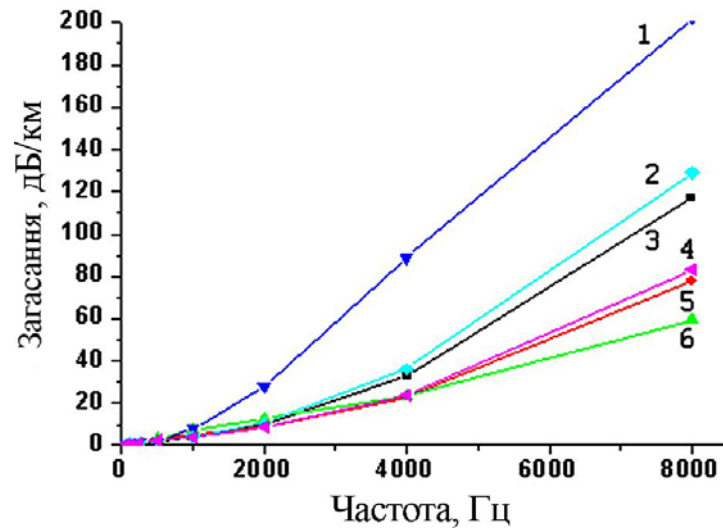


Рис. 2.1. Залежність погонного загасання при поширенні акустичного сигналу в атмосфері від температури $t^{\circ}\text{C}$ і відносної вологості η : 1 – $t=15^{\circ}\text{C}$, $\eta=20\%$; 2 – $t=15^{\circ}\text{C}$, $\eta=50\%$; 3 – $t=10^{\circ}\text{C}$, $\eta=70\%$; 4 – $t=15^{\circ}\text{C}$, $\eta=80\%$; 5 – $t=20^{\circ}\text{C}$, $\eta=70\%$; 6 – $t=30^{\circ}\text{C}$, $\eta=70\%$.

Видно, що погонне загасання зменшується з ростом температури і вологості і добре апроксимується залежністю виду:

$$\gamma \left[\frac{\partial B}{\text{км}} \right] = A + B_1 f + B_2 f^2 \quad (2.1)$$

Коефіцієнти апроксимації наведені в табл. Б.2.

Значення постійної складової, яка визначає загасання сигналу на низьких частотах, доцільно брати з експериментальних даних - наведених в табл. Б.2 коефіцієнт А 1.

Для оцінки спектра на деякому віддаленні від джерела звуку необхідно знати як вихідний спектр випромінювання, так і дисперсні властивості середовища поширення, а також вплив підстильної поверхні.

2.2 Спектри

Наземні і повітряні об'єкти випромінюють звук в досить широкій смузі, однак в спектрах присутні характерні спектральні компоненти, пов'язані з

роботою двигуна (частоти кратні частоті обертання колінчастого вала двигуна – рис.2.2 г, лопатей гвинтів або лопаток турбін та компресорів - рис.2.2 а, б). Характер сигналу квазістаціонарний.

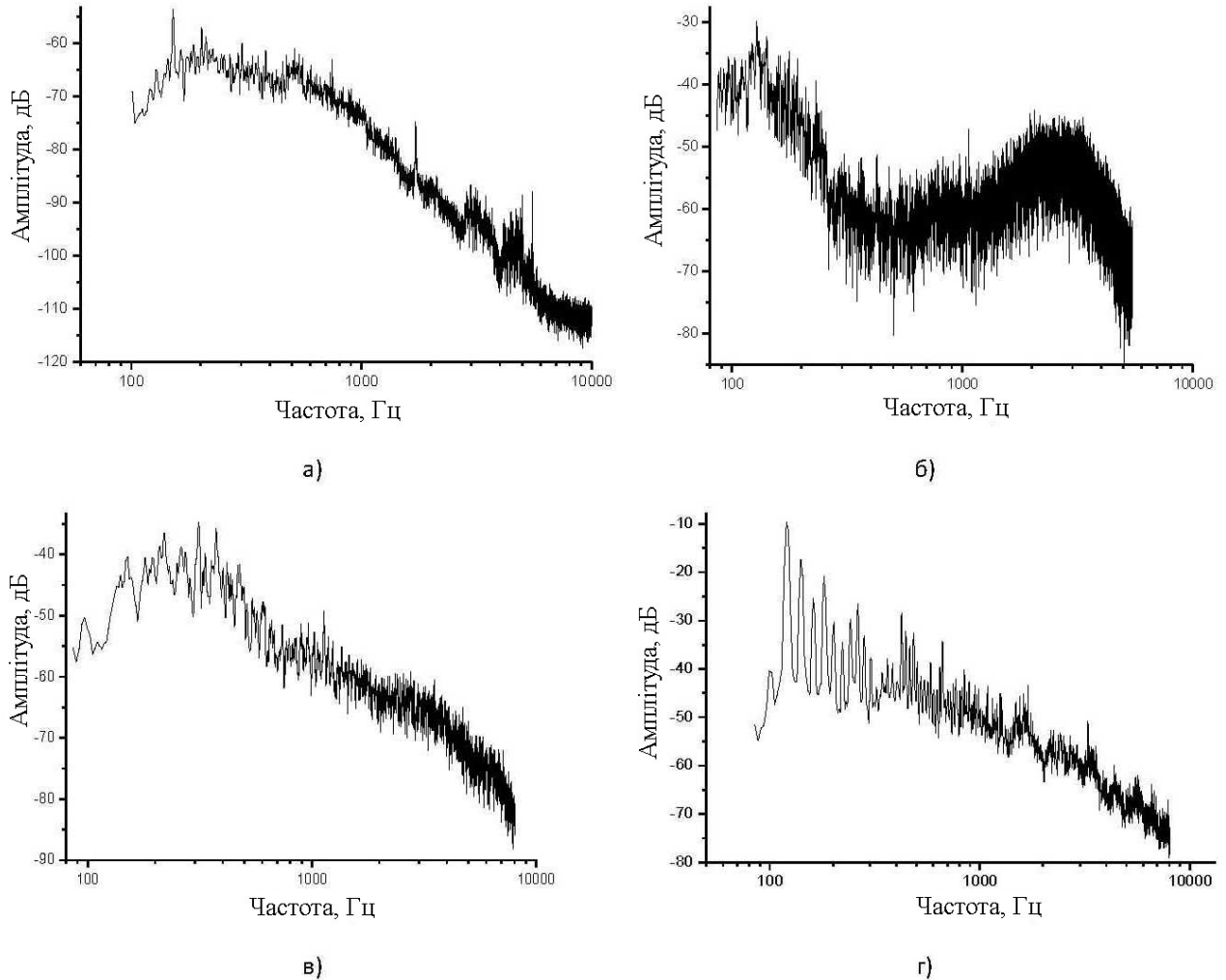


Рис. 2.2. Спектри акустичних сигналів:

а) вертоліт МІ-2; б) літак FALCON; в) постріл гармати; г) дизель 800 об./хв.

При пострілі ж сигнал істотно не стаціонарний. Використовувати опис його у вигляді розкладання по гармонійним функціям (спектра Фур'є) - рис 2.2 в необхідно з обережністю.

При проведенні розрахунків дальності виявлення і роздільної здатності зручно користуватися моделлю апроксимації спектра з якимось фіктивним параметром, що характеризує його ефективну ширину [44].

Для апроксимації спектра у високочастотній області можна використовувати фрактальні залежності виду [44]:

$$S(f) = S_0 \left(1 + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^n \right)^{-1}, \quad (2.4a)$$

де Δf - ширина спектру, S_0 - значення спектральної щільності на нульових частотах, а n - показник ступеня, що характеризує швидкість його зменшення.

У табл. Б.3 наведені результати апроксимації спектрів деяких типів об'єктів залежністю виду:

$$\lg S(f) \approx a + b \lg(f). \quad (2.4b)$$

Для більшості об'єктів (наземна техніка, звук пострілу), швидкість убутання спектральної щільності спектра близька до $n \approx 2$.

Це означає, що спектр, у багатьох випадках, можна апроксимувати виразом:

$$S(f) = S_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^2}, \quad (2.5 a)$$

а кореляційні функції:

$$\rho(\tau) = \sigma_S^2 \exp\left(-\left| \frac{\tau}{\tau_{05}} \right| \right), \quad (2.5 б)$$

де $\sigma_S^2 = S_0 \Delta f$, а $\tau_{05} = \frac{1}{2\pi \Delta f}$

Для оцінки дальності дії акустичних систем розвідки введемо поняття інтегрального множника ослаблення $L(\bullet)$ акустичного сигналу і його спектру $S_r(f, R, h_r, h_T)$ від джерела звуку, що знаходиться на висоті h_T до приймача розташованого на висоті h_r з урахуванням атмосфери $L_0(f, R)$ і підстильної поверхні $V(f, R, h_r, h_T)$ при поширенні на відстань R , що визначаються співвідношенням:

$$L(R, h_r, h_T) = \frac{\int_0^{\infty} S_r(f, R, h_r, h_T) df}{\int_0^{\infty} S_r(f, R=0, h_r, h_T) df} = \frac{\int_0^{\infty} S_T(f) L_0(f, R) V(f, R, h_r, h_T) df}{\int_0^{\infty} S_T(f) df}, \quad (2.6)$$

На рис. 2.3 наведено спектри випромінювання, розраховані на різних віддаленнях при температурі повітря 15°C и вологості 20%. Вплив поверхні розділу не враховувався, тобто $V(f, R, h_r, h_T) \approx 1$. При розрахунках використовувалися дані щодо загасання звуку в атмосфері [43, 45].

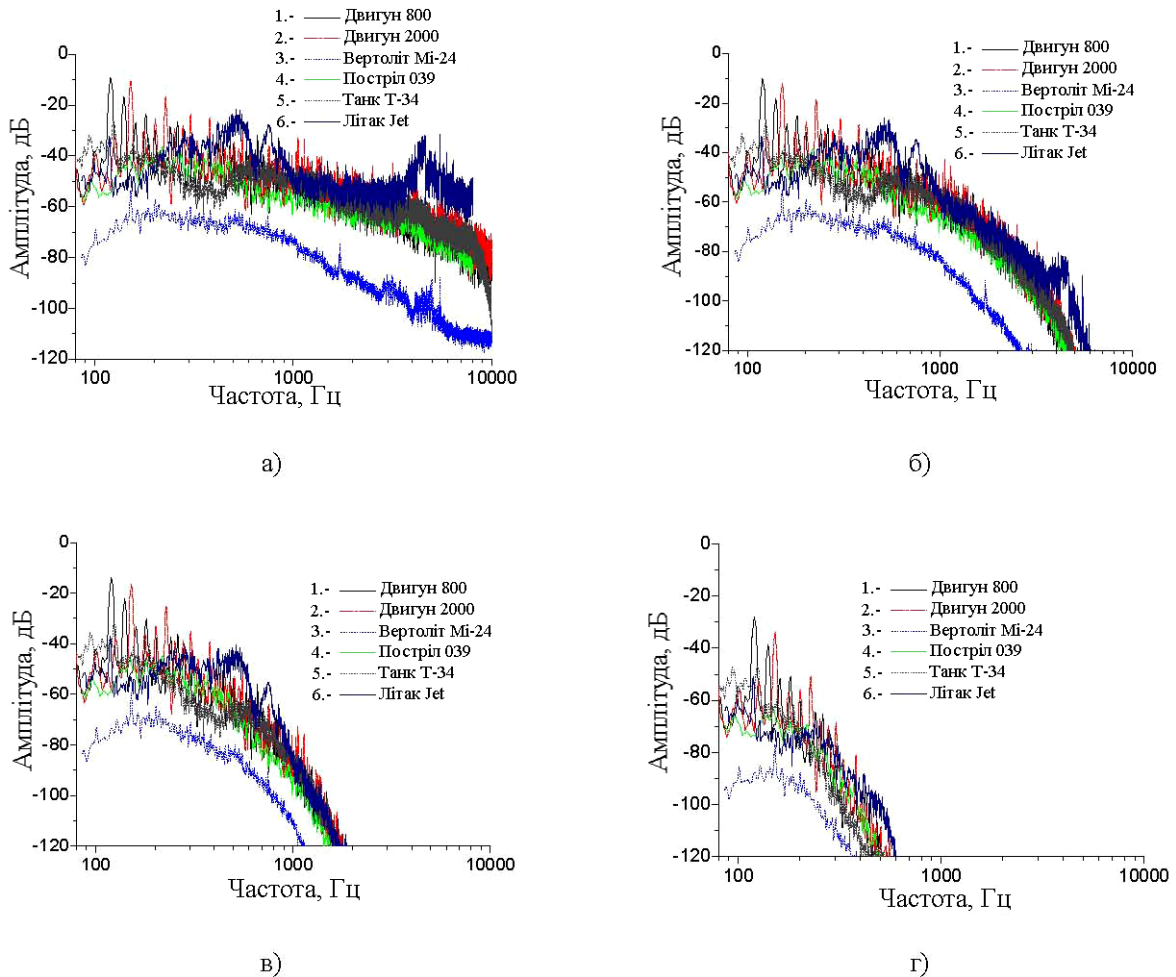


Рис. 2.3. Спектри акустичних сигналів на різних віддаленнях від джерел при поширенні у атмосфері: а) біля джерела; б) дальність 0,5 км; в) дальність 2 км; г) дальність 8 км; 1- дизельний двигун 800 об./хв.; 2- дизельний двигун 2000 об./хв.; 3- вертоліт Мі-24; 4 – звук пострілу; 5 – танк Т-34; 6 – літак Jet.

Видно, що сильніше трансформуються спектри більш широкосмугових джерел звуку і зі зростанням дальності найбільш сильно загасають високочастотні компоненти спектра. Спектри випромінювання для всіх джерел при цьому звужуються (рис. 2.3 а-г) і на великих віддаленнях від джерела шуму вони стають схожі (рис. 2.3 г). У той же час, поблизу джерела випромінювання відмінності між ними суттєво більше (рис. 2.3 а).

Ширину спектра $\Delta f_e (R, h_r, h_T, \alpha)$ на рівнях повної потужності α з урахуванням виразів (2.2, 2.6) при цьому можна визначити з співвідношення:

$$\frac{\int_0^{\Delta f_e} S_r(f, R, h_r, h_T) df}{\int_0^{\infty} S_r(f, R, h_r, h_T) df} = \alpha \quad (2.7)$$

У табл. 2.1 представлені значення ефективної ширини спектра випромінювання деяких джерел шуму на різних рівнях потужності α %, а на рис. 2.4 зміни нормованої ширини спектра на різних віддаленнях від них при поширенні в атмосфері для випадку найбільшого затухання.

Видно, що найбільшу ширину спектра, в якій міститься половина випромінюваної потужності, мають повітряні об'єкти, а також звук пострілу. На рис. 2.4 представлені розрахункові значення ефективної ширини спектра випромінювання різних джерел на різних віддаленнях. Спектр більшості об'єктів досить швидко звужується через більш сильне загасання високих частот – рис. 2.4. Звуження ефективної ширини спектра з дальністю буде призводити до погіршення роздільної здатності систем акустичної розвідки.

Використовуючи реальні спектри джерел звуку [43, 45] на підставі співвідношення (2.6), отримані значення інтегральних послаблень акустичного поля різних джерел випромінювання на різних відстанях, які наведені на рис. 2.5.

Ефективна ширина спектра деяких джерел акустичного шуму

Тип об'єкта	Ширина спектра, Гц		
	50%	90%	99%
Вертоліт Мі-24	358	827,7	1626,7
літак Jet	572	4666	6391,3
Дизельний двигун 800 об. / Хв.	121	199,2	1251
Танк Т-34	181,7	1349,9	4522,6
Постріл гармати	315	834,4	3658

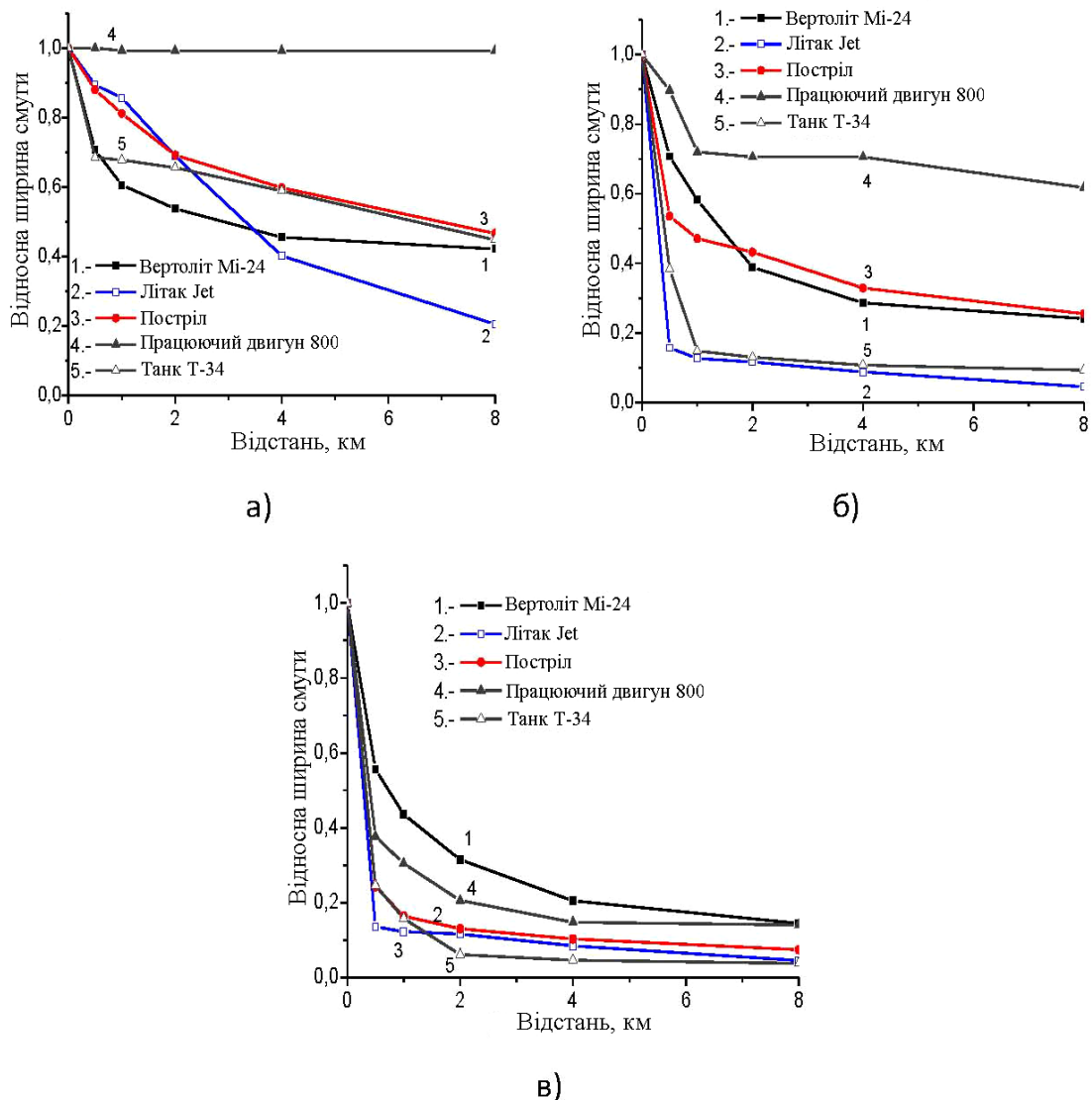


Рис. 2.4. Залежність ефективної ширини спектра від дистанції на різних рівнях потужності: а) 50%, б) 90%, в) 99%; 1 – вертоліт Мі-24, 2 – літак Jet, 3 – постріл гармати, 4 – дизельний двигун 800 об./хв., 5 – танк Т-34

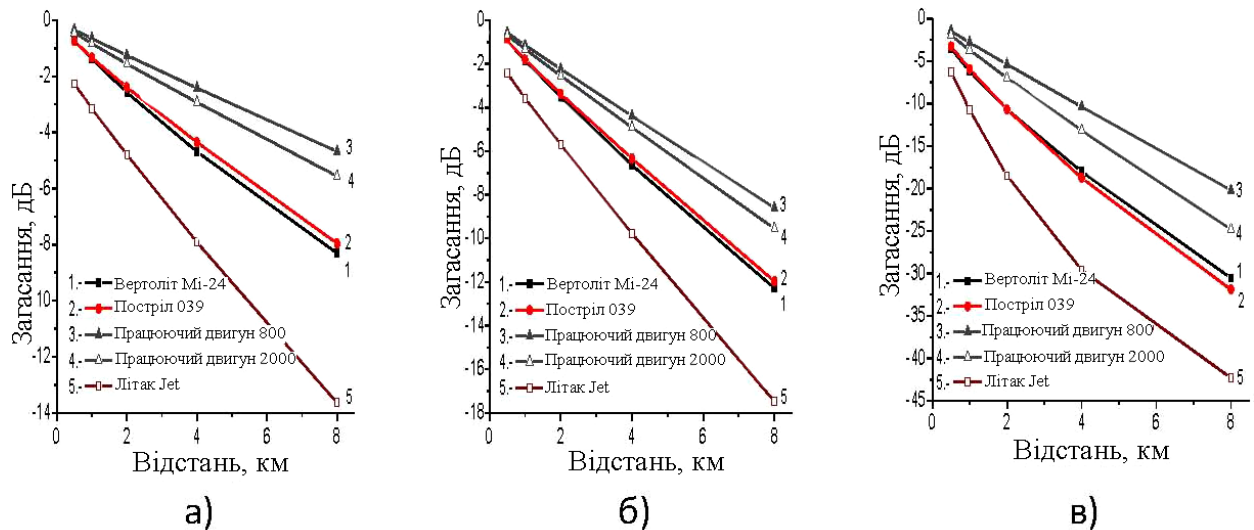


Рис. 2.5. Загасання акустичного випромінювання в атмосфері: а) температура 10°, вологість 70%; б) температура 20°, вологість 70%; в) температура 15°, вологість 20%; 1 – вертоліт Мі-24, 2 – постріл гармати, 3 – дизельний двигун 800 об./хв., 4 – дизельний двигун 2000 об./хв., 5 – літак Jet

Інтегральне загасання для всіх типових джерел, як видно з рис.2.5, задовільно апроксимується лінійною залежністю:

$$L[\text{дБ}] \approx \gamma_0 + \gamma_1 R[\text{км}]. \quad (2.7)$$

Коефіцієнти апроксимації, отримані методом найменших квадратів (МНК) наведені в табл.Б.4.

Зростання кількості обертів від 800 об./хв. до 2000 об./хв. -наводить до зростання спектральної щільності високочастотних компонент (рис. 2.3 а). Для режимів з великою кількістю обертів двигуна буде характерно більше інтегральне загасання акустичного випромінювання в атмосфері. Це проявляється в великих значеннях коефіцієнтів γ_1 - що характеризують нахил залежності загасання від дальності. При практичних розрахунках коефіцієнт γ_0 доцільно брати $\gamma_0 \approx 0$. При поширенні акустичного сигналу поблизу земної поверхні, крім обліку поглинання в атмосфері, необхідно враховувати вплив віддзеркалення сигналу від поверхні землі.

2.3 Дальність дії систем

Вплив земної поверхні на затухання звуку. Інтерференція сигналів, що приходять безпосередньо від джерела шуму в приймач і після відбиття від поверхні землі може призводити до інтерференційного ослаблення прийнятого звукового тиску. При падінні плоскої звукової хвилі на плоску межу розділу двох середовищ із щільністю ρ, ρ_1 і швидкостями поширення c, c_1 коефіцієнт відбиття F визначиться через імпеданс падаючої Z і такої що пройшла в другу середу Z_1 хвиль [46, 47]:

$$F_0 = \frac{Z_1 - Z}{Z_1 + Z}, \quad (2.8 \text{ a})$$

де $Z = \rho c / \cos \theta$, $Z_1 = \rho_1 c_1 / \cos \theta_1$.

У разі, коли коефіцієнт заломлення $n = \frac{c_1}{c} \neq 1$, а $\theta \rightarrow \pi/2$ (ковзне падіння), отримуємо: $F_0 \rightarrow -1$. Якщо F_0 - коефіцієнт відбиття від гладкої поверхні, то коефіцієнт дзеркального відбиття для нерівної поверхні із того ж матеріалу можна представити як [48, 49]:

$$F = F_0 \rho_s \quad (2.9)$$

де ρ_s коефіцієнт відбиття. Його значення можна визначити за аналогією зі значенням для електромагнітних полів [48, 49]:

$$\rho_s^2 = \exp \left\{ - \left(\frac{4\pi\sigma_h \sin \psi}{\lambda} \right)^2 \right\}. \quad (2.10)$$

У цій формулі σ_h - середньоквадратичне значення висоти нерівностей поверхні, ψ - кут перевідбиття, а λ - довжина хвилі.

У тих випадках, коли реальна поверхня замінюється при розрахунках плоскою поверхнею, кут перевідбиття буде дорівнювати:

$$\psi \approx \frac{h_T + h_r}{R}, \quad (2.11)$$

де h_T - висота джерела, h_r - висота приймача, R - відстань між ними.

Тоді множник ослаблення поверхні акустичного сигналу в рамках двопробеневої моделі:

$$V = \sqrt{1 + 2F \cos\left(\frac{4\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) + F^2}. \quad (2.12)$$

При $\left(\frac{4\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) \rightarrow 0$. $F_0 \rightarrow -1$, и $F \approx -1 + \delta$, тоді

$$V \approx 2\rho_S \left| \sin\left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) \right| \approx 2\rho_S \left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right). \quad (2.13)$$

При

$$\rho_S \approx 1 \quad (2.14)$$

можна записати:

$$V^2 \approx 4 \sin^2\left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right) \approx 4 \left(\frac{2\pi h_T h_r}{\lambda R}\right)^2 = 4 \left(\frac{2\pi h_T h_r f}{cR}\right)^2. \quad (2.15)$$

Використовуючи для розрахунків множника ослаблення поверхні розділу вирази (2.8 - 2.12) можна визначити спектр сигналу акустичного джерела випромінювання $S_r(f, R, h_r, h_T)$ на відстані R з урахуванням втрат при поширенні в атмосфері $L(f, R)$ і впливу підстильної поверхні Землі $V(f, R, h_r, h_T)$:

$$S_r(f, R, h_r, h_T) = S_T(f) L(f, R) V(f, R, h_r, h_T). \quad (2.16)$$

З урахуванням (2.16) і (2.6) можна визначити інтегральний множник послаблення $V_1(\bullet)$ акустичного сигналу за рахунок атмосфери і підстильної поверхні при поширенні на відстань R . Значення множника ослаблення поверхні на різних частотах для різного ступеня шорсткості і при різних висотах розташування джерела звуку наведені на рис. 2.6.

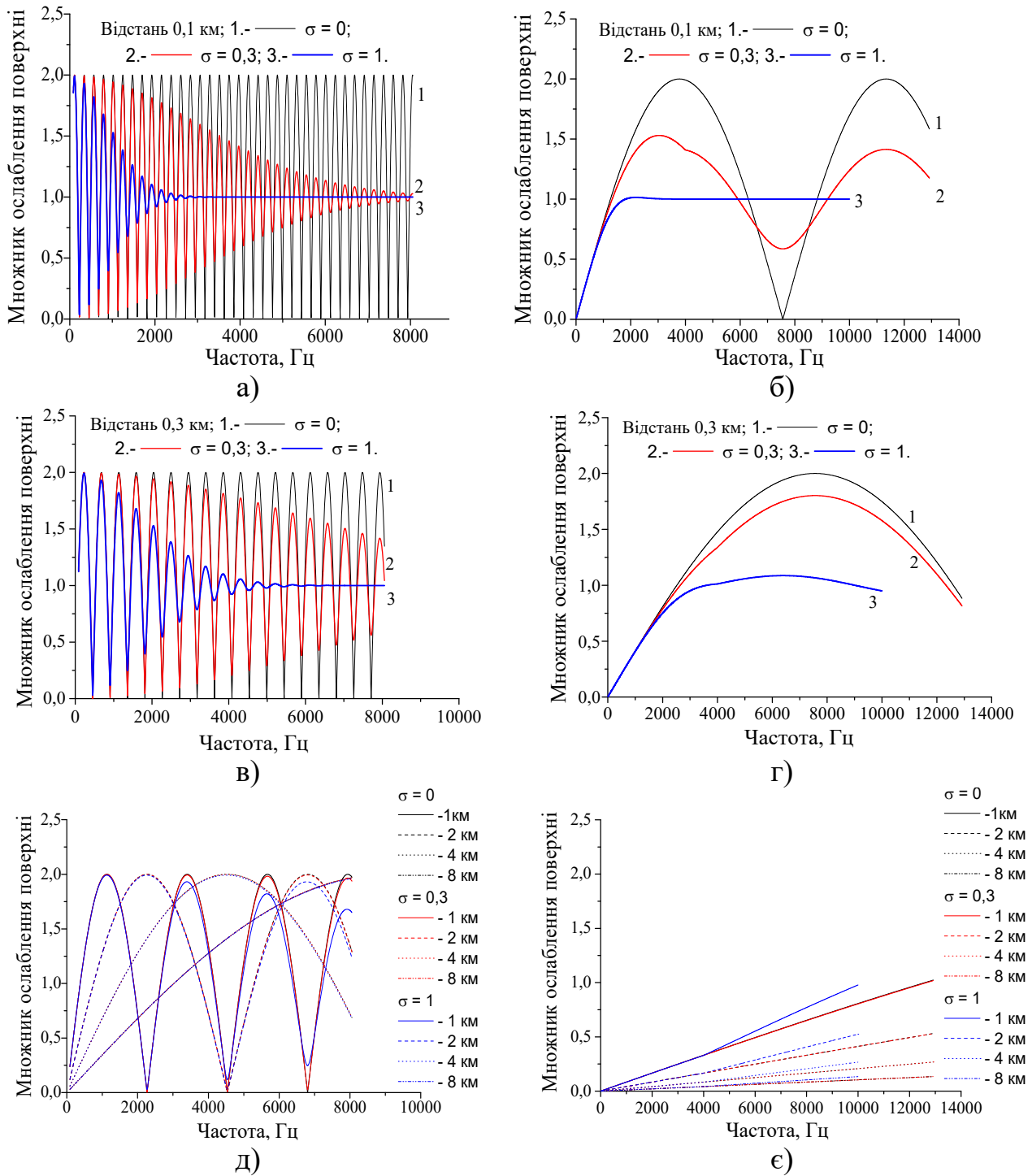


Рис. 2.6. Залежності множника ослаблення поверхні на різних дистанціях від джерела звуку для різних частот в залежності від ступеня шорсткості поверхні: а, в, д – літальні апарати з висотою польоту 50 м, б, г, е - наземна техніка; а, б- дальність 0,1 км, в, г- дальність 0,3 км; д, е- відстані 1...8 км; 1.- $\sigma \approx 0$ м; 2.- $\sigma \approx 0,3$ м; 3.- $\sigma \approx 1$ м

Вони розраховані з використанням співвідношень (2.9 - 2.12). Видно, що при збільшенні ступеня шорсткості поверхні зменшується глибина інтерференційних провалів. Для більш високочастотних компонент звуку руйнування дзеркального механізму розсіювання відбувається раніше, ніж для низькочастотних компонент.

З наведених даних випливає, що інтерференційне ослаблення звуку поверхнею землі необхідно враховувати для наземної техніки і літальних апаратів на висотах 50...100 м. При більших висотах польоту їм можна знехтувати для дистанцій, на яких може здійснюватися акустичне виявлення.

Видно, що зростання середньоквадратичної висоти нерівностей призводить до більш раннього руйнування інтерференційної структури поля. Для об'єктів гусеничної і колісної техніки (висота джерела звуку 1 ... 2 м) вже з відстаней в одиниці метрів для низьких частот звуку, десятки метрів для середніх і сотні метрів для високих частот починається інтерференційна область. У ній множник ослаблення поверхні квадратично убуває з дистанцією. У цій зоні шорсткість поверхні не впливає на його значення. На відстанях більше кілометра виявлення об'єктів наземної техніки здійснюється в зоні глибокого інтерференційного завмирання сигналу. В силу істотно більшої широкосмуговості джерел акустичного шуму в порівнянні з об'єктами радіолокаційного спостереження значно відрізняється і вплив поверхні розподілу на різні долі спектра випромінюваного шуму. Сильніше за рахунок поверхні придушуються низькочастотні компоненти і менше високочастотні.

Результати оцінки інтегральних значень множника ослаблення поверхні для різних джерел шуму показані - рис. 2.7.

Видно, що для повітряних об'єктів загасання сигналу через вплив поверхні розділу невелике. В той же час для об'єктів наземної техніки воно може перевищувати 25 дБ і це необхідно враховувати при розрахунках.

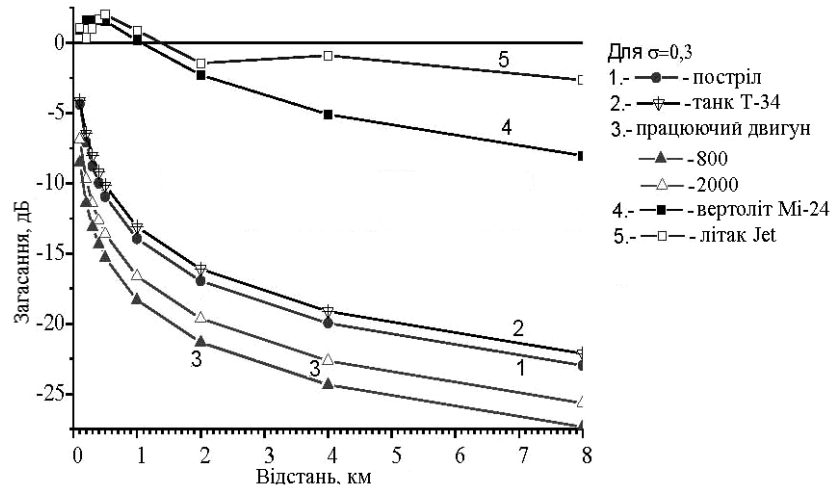


Рис. 2.7. Вплив поверхні розподілу на загасання звуку: 1- постріл гармати, 2- танк Т-34, 3- дизельний двигун: 2000 об./хв., 800 об./хв., 4- вертоліт Мі-24, 5- літак Jet

Еквівалентний рівень звукового тиску з підвітряного боку $P_1(R)$ на приймачі в логарифмічному масштабі можна розрахувати для кожного точкового джерела з урахуванням рівняння радіолокації і співвідношень (2.6) може бути записаний у вигляді:

$$P_1(R) = P_0 + G - L, \quad (2.17)$$

де P_0 – рівень звукової потужності точкового джерела шуму щодо опорного значення звукової потужності, рівного 1 пВт виражений в дБ; G – поправка, що враховує спрямованість точкового джерела шуму і показує, наскільки відрізняється еквівалентний рівень звукового тиску точкового джерела шуму в заданому напрямку від рівня звукового тиску ненаправленого точкового джерела шуму з тим же рівнем звукової потужності P_0 , дБ. L - загасання при поширенні звуку від точкового джерела шуму до приймача з урахуванням впливу всіх факторів, дБ.

Згасання $L(R)$ в формулі (2.17) розраховують по формулі (2.18)

$$L(R) = L_{div}(R) + L_{atm}(R) + V_{gr}(R, h_r, h_T) + L_{bar} + L_{misc}, \quad (2.18)$$

де $L_{div}(R)$ – загасання через геометричну дивергенцію (загасання в вільному просторі через розходження звукової енергії); $L_{atm}(R)$ – загасання викликане звукопоглинанням атмосфери; $V_{gr}(R, h_r, h_T)$ – загасання викликане впливом землі; L_{bar} – загасання викликане екрануванням; L_{misc} – загасання за інших причин.

Загасання через геометричну дивергенцію. Загасання через геометричну дивергенцію (загасання в вільному просторі через розходження звукової енергії) $L_{div}(R)$ [дБ], що відбувається в результаті сферичного поширення звуку точкового джерела шуму у вільному звуковому полі, розраховують за формулою:

$$L_{div}(R) [\text{дБ}] = 20 \lg(d / d_0), \quad (2.19)$$

де d – відстань від джерела шуму до приймача в м; d_0 – опорна відстань (зазвичай використовується $d_0 = 1$ м).

З використанням даних про рівень шумів різних джерел (табл. Б.1) і розрахованих вище значень інтегральних множників ослаблення атмосфери і підстильної поверхні оцінені дальності виявлення об'єктів акустичного випромінювання при різних метеоумовах і зовнішніх завадах. Вони наведені в табл. Б.5. При розрахунках вважалося, що для виявлення необхідне перевищення корисного сигналу над шумами приблизно на 10 дБ. Аналіз показує, що повітряні об'єкти, можуть виявлятися при відсутності завад на відстанях понад 8 км, при низькій температурі і вологості дальність знижується до 5 км. При значних завадах дальність виявлення може бути менше 1 км. Звуки пострілу при слабких завадах можуть бути виявлені на відстанях більше 8 км, при сильних шумах на відстанях 6...7 км, а при поганих погодних умов може знизитися до 3 км. Об'єкти наземної техніки при відсутності перешкод можуть виявлятися на відстанях в 4...6 км.

Слід зазначити, що при проведенні оцінок шуми покладалися стаціонарним гаусовим процесом із заданою середньою інтенсивністю. Звуки руху людей і тварин є суттєво нестаціонарним процесом і це може призводити до додаткових втрат в співвідношенні сигнал / завада при виявленні [50, 51]

2.4 Акустичні поля наземних і малорозмірних повітряних об'єктів

В даний час все більший інтерес проявляється до активно-пасивних засобів радіо [24- 27] і акустичної розвідки [1, 4, 12, 17, 18]. У роботах [35- 37] запропонована методика оцінки дальності дії систем акустичної розвідки, що враховує вплив метеорологічних факторів атмосфери і стану підстильної поверхні. В цьому розділі приведені отримані експериментально просторово-часові характеристики акустичного випромінювання об'єктів наземної техніки і малорозмірних БПЛА, дані про які до теперішнього часу були відсутні в літературі і які необхідні при оцінці відстаней їх виявлення. Метою є експериментальне вивчення характеристик акустичних полів (рівнів, діаграм і спектрів випромінювання), деяких типів наземної колісної техніки, а також малорозмірних літальних апаратів, які необхідні для оцінки діяльності їх виявлення і розробки алгоритмів селекції і розпізнавання.

Апаратура і методика досліджень. Вимірювання рівня шуму здійснювалося з використанням стандартного шумоміра типу JTS-1357, зовнішній вигляд якого показаний на рис. В.1 а, а технічні характеристики наведені в табл. В.1. Для вивчення спектральних характеристик випромінюваних сигналів здійснювався їх запис на цифровий диктофон типу Olympus VN-480 PC зовнішній вигляд, якого показаний на рис. В.1 б, а характеристики, наведені в табл. В.2.

Вимірювання шуму здійснювалися, як для нерухомих наземних об'єктів, так і рухомих при різних кутах розташування приймальної апаратури щодо джерела шуму. Висота розташування мікрофона становила 1... 1,7 м від поверхні землі. Параметрами, що фіксувалися, була дальність до джерела шуму

і погодні умови під час експерименту (температура, вологість повітря, швидкість вітру і тип підстильної поверхні).

Рівні і спектри випромінюваного об'єктами шуму. Рівні шуму різних джерел оцінюються в відносних одиницях щодо порогового рівня чутності, який умовно прийнятий в 10^{-12} Вт/м² на стандартній (від точкового джерела) відстані, зазвичай в 1 м. Рівень звуку (шуму) вимірюється в децибелах (дБ). Значення рівнів шуму деяких джерел, що отримані експериментально, наведені в табл. В.3. Зовнішній вигляд БПЛА, які використовувались в експериментах, наведено на рис. В.2.

Наявність ширококутових перешкод (від вітру) вимагає застосування спеціальних заходів щодо шумоподавлення. У якості прикладу на рис. 2.8 наведено запис шуму квадрокоптера, на висоті близько 10 м від приймача, та його спектр. Під час експерименту швидкість вітру складала близько 7...8 м/с. При поривах вітру (момент 1 на рис. 2.8 а) відбувається збільшення інтенсивності приблизно на 10 дБ, і розширення спектра на нижніх частотах (1 рис. 2.8 б) у порівнянні з паузами (2 рис. 2.8 а, спектр на рис. 2.8 б-крива 2). Для шуму квадрокоптера характерна стаціонарність з наявністю періодичності в спектрі, яка визначається частотою обертання ротора (приблизно 110 Гц), що відповідає приблизно 7000 об./хв.

Аналогічно виглядають і шуми літакового БПЛА- рис.2.9. У спектрі літакового БПЛА спостерігається також періодичність з частотою приблизно 116 Гц, що відповідає приблизно 7000 об./хв. Шум при поривах вітру (спектр 3 на рис. 2.8) може істотно ускладнювати виявлення БПЛА. Вплив кількості обертів двигуна на рівень випромінюваного шуму приведено в табл. В.4. Слід відзначити, що зміна кількості обертів двигуна від холостого до максимального може призводити до зростання рівня шуму до 11...18 дБ. Водночас з цим збільшуються частоти максимумів у спектрі, пропорційно кількості оборотів двигуна. Форма спектру випромінювання при цьому практично не змінюється – рис. 2.10.

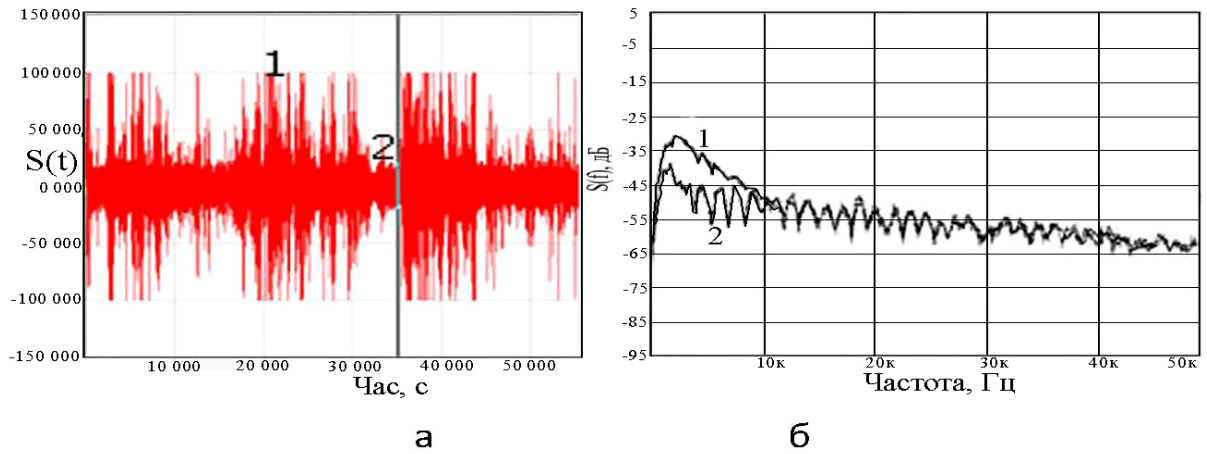


Рис. 2.8. Часова реалізація (а) і спектри шумів квадрокоптера при пориві вітру (1) і його відсутності (2).

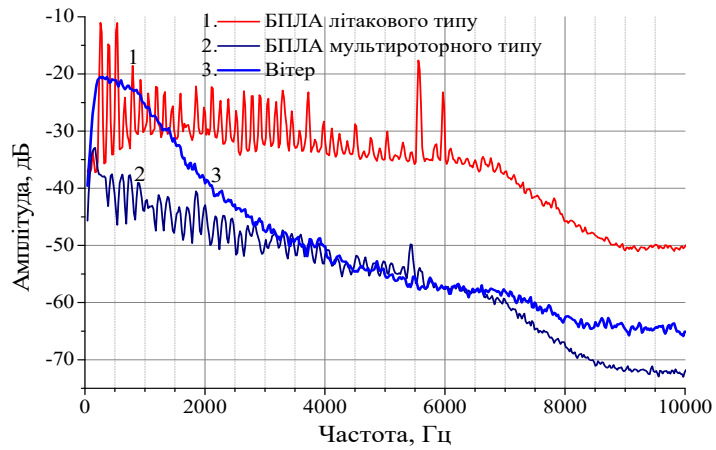


Рис. 2.9. Спектри шумів: 1 - БПЛА літакового типу, 2 - БПЛА мультіроторного типу (квадрокоптер), 3 - пориву вітру.

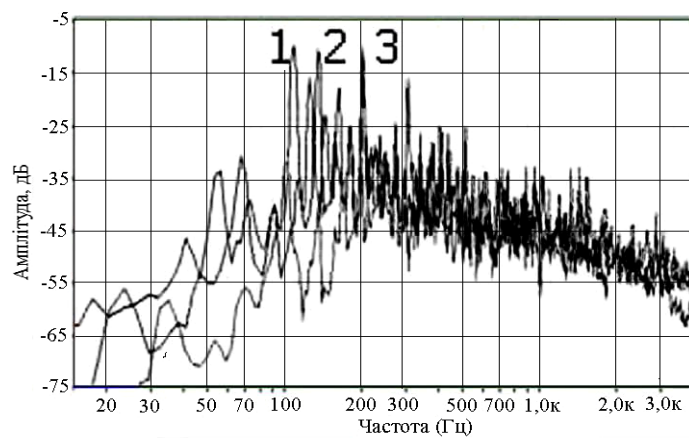


Рис. 2.10. Спектри шумів дизельного двигуна ЗТД при різних обертах: 1 – 600 об./хв. 2 – 1800 об./хв.; 3 – 2400 об./хв. .

Діаграма випромінювання шуму в азимутальній площині також нерівномірна і показана в табл. В.5. Варто зазначити, що максимальні значення спостерігаються в напрямку на джерело шуму - вихлопну трубу, двигун спереду, а мінімальний шум при екранування джерела корпусом. Перепади інтенсивності шуму при зміні азимута і спостереженні на малих відстанях досягають для автомобіля 10 дБ і 16 дБ для БТР-4.

На підставі дистанційних залежностей ослаблення випромінювання $L(R)$ наведених в табл. В.6. і використовуючи співвідношення:

$$V(R)[\text{dB}] = P(R = 1\text{m})[\text{dB}] - P(R)[\text{dB}] \quad (2.20\text{a})$$

$$V(R)[\text{dB}] = L(R)[\text{dB}] - 20 \lg(R)[\text{dB}] \quad (2.20\text{б})$$

де $P(R = 1\text{m})[\text{dB}]$, – рівень шуму в дБ на дистанції 1 м; а $P(R)[\text{dB}]$ – на дальності R , розраховані значення множника ослаблення сигналу $V(R)$, які наведені в табл. В.7. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що за рахунок поверхні рівні шуму джерел на віддаленнях в десятки метрів можуть бути навіть більше, ніж при їх розташуванні у вільному просторі, тобто інтенсивність шуму за рахунок відбиття від поверхні посилюється. Рівні шуму об'єктів гусеничної техніки наведені в табл. В.8.

Оскільки шум вітру, дощу і власні шуми двигуна можуть ускладнювати виділення шумів інших об'єктів техніки (цілей розвідки), то досліджувався розподіл потужності джерел шуму за частотою, а також коефіцієнт придушення джерела шуму при режекції низькочастотних компонент:

$$K(f)[\text{dB}] = 10 \lg \frac{\int_0^{f_{\max}} s(f) df}{\int_f^{f_{\max}} s(f) df}. \quad (2.21\text{a})$$

Розподіл потужності шуму за частотою, обчислене з використанням співвідношення (2.21а) наведені на рис. 2.11

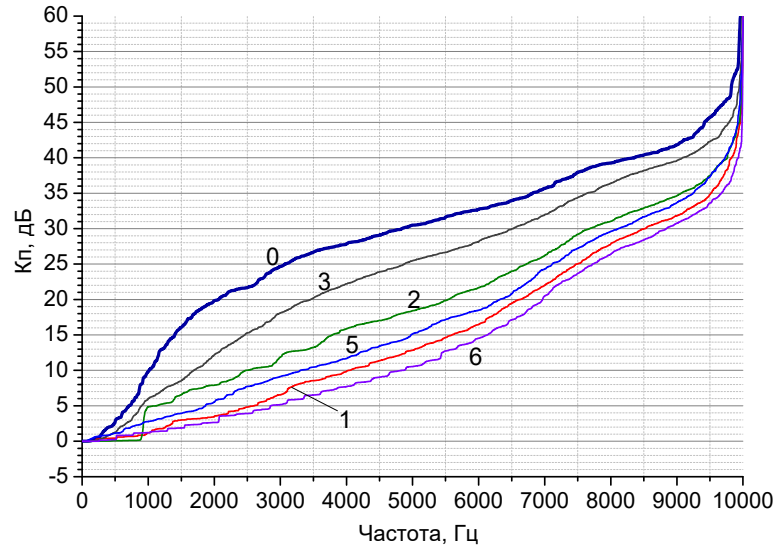


Рис. 2.11. Залежність коефіцієнта пригнічення шуму від смуги режекції: 0- вітер; 1- двигун автомобіль Форд (максимальні оберти, відстань 20 м); 2- двигун БТР-4 (на холостому ходу в ангарі); 3 – постріл з гармати 30 мм; 4 - мультироторний БПЛА (висота 50 м, зависання у точці); 5- БПЛА літакового типу.

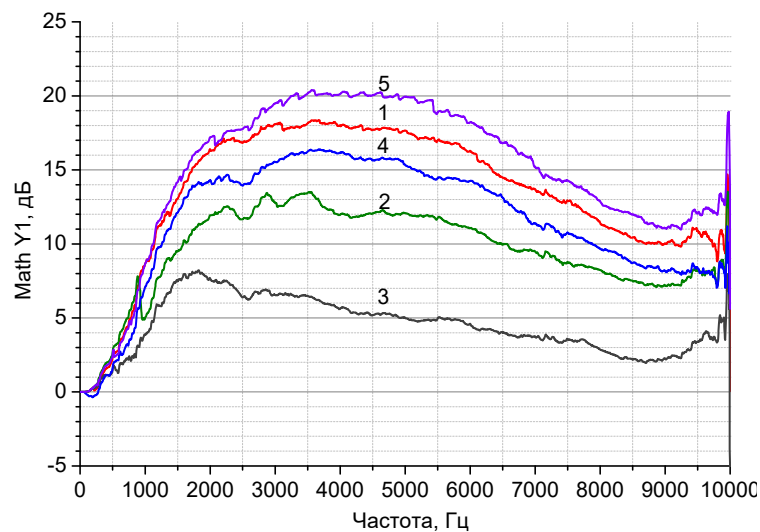


Рис. 2.12. Контрасти спостереження різних об'єктів в залежності від смуги режекції: 1- двигун автомобіль Форд (максимальні оберти, відстань 20 м); 2- двигун БТР-4 (на холостому ходу в ангарі); 3 – постріл з гармати 30 мм; 4 - мультироторний БПЛА (висота 50 м, зависання у точці); 5- БПЛА літакового типу.

У більшості об'єктів спостереження присутні високочастотні компоненти, які можуть використовуватися для їх виявлення і визначення координат. Використовуючи дані про коефіцієнти пригнічення завад режекторним фільтром верхніх частот $K_i(f)[\text{dB}]$ для «і» об'єкта спостереження можна оцінити одержувані контрасти між А і В об'єктами:

$$\Delta K(f)[\text{dB}] = K_A(f)[\text{dB}] - K_B(f)[\text{dB}]. \quad (2.216)$$

Отримувані контрасти спостереження об'єктів в умовах шуму вітру наведені на рис. 2.11, а міжтипові контрасти на рис. 2.12. Смути частот, де зосереджена задана частина потужності шуму показані в табл. В.9. Аналіз показує, що спектр шумів вітру лежить в більш низькочастотній області, ніж шуми об'єктів техніки. Це означає, що виконуючи режекцію низькочастотні компоненти можна отримати додатковий контраст приблизно до 10 ... 15 дБ.

Висновки до розділу 2

1. Через дисперсійні властивості атмосфери при збільшенні відстані до приймача відбувається звуження спектра сигналу. Зниження вологості і зниження температури призводять до збільшення погонного загасання. Найбільш сильно ці явища проявляються на високих частотах.

2. Інтерференційні явища найбільш сильно позначаються на низьких частотах. Шорсткість поверхні сильніше позначається на високих частотах, де вона призводить до зниження коефіцієнта відбиття і зменшення інтерференційного впливу поверхні на інтенсивність сигналу.

3. Ефективна ширина спектра джерел акустичного шуму звужується зі збільшенням дальності до джерела. Зміни ефективної ширини спектра на рівні значущості 90% можуть досягати 10 разів. Це буде призводити до зниження точності визначення його місця розташування.

4. Розроблено методику оцінки дальності виявлення джерел акустичного випромінювання в умовах впливу загасання в атмосфері і інтерференційного ослаблення земною поверхнею. Теоретично показана

можливість виявлення об'єктів наземної та повітряної техніки за їх акустичним випромінюванням на віддаленнях в кілька кілометрів.

5. Показана можливість опису спектрів джерел шуму фрактальними залежностями. Показано, що, в більшості випадків, швидкість убуття спектральної щільності на крилах спектра не перевищує $n \approx 2$.

6. Отримано дані за рівнями акустичних шумів різних об'єктів, як наземної техніки, так і БПЛА при різних відстанях спостереження. Так для легкових автомобілів рівень шуму на відстанях 1 м становить приблизно 55 ... 70 дБ, об'єктів бронетехніки на відстанях 5...300 м - 67...86 дБ, БПЛА на відстанях 2...10 м – 92 дБ.

7. При зміні обертів двигуна від холостого ходу до максимальних відбувається зростання рівня шуму, що досягає 11 дБ для автомобілів.

8. Азимутальна анізотропія шуму, обумовлена ефектом екранування джерела корпусом може досягати 16 дБ, особливо сильно проявляючись поблизу джерела шуму.

9. Природні шуми вітру, дощу, власного двигуна можуть в значній мірі (на 1..2 порядки) знижувати дальність дії систем акустичної розвідки.

10. На малих відстанях від джерела шуму поверхня розділу може призводити до зростання рівня шуму в порівнянні з оцінками для вільного простору. Шум від дистанції загасає дещо повільніше, ніж це дають теоретичні оцінки.

11. Система акустичної розвідки повинна будуватися, як адаптивна, забезпечуючи виявлення об'єктів в просвітах між поривами вітру.

12. Виконуючи режецію низькочастотної компоненти шуму в смузі до 1000...2000 Гц можна підвищити контраст спостереження наземних об'єктів приблизно на 5 ... 13 дБ і до 10 ... 20 дБ для БПЛА.

13. Шум дощу досить просторово-однорідний. Для його пригнічення можна використовувати просторові методи з використанням прийому шуму на допоміжний мікрофон.

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА АКУСТИЧНІ ПОРТРЕТИ ОБ'ЄКТІВ

Розробка систем розпізнавання пов'язана з вирішенням завдань щодо вибору принципу класифікації і складання словника ознак, що використовується як для апріорного опису класів, так і для апостеріорного опису кожного невідомого об'єкта або явища, що підлягає розпізнаванню.

Найбільш доступними для аналізу є оптичні зображення об'єктів нової техніки, а також акустичні шуми. У розділі розглянуті інформативні ознаки, які можуть бути отримані з оптичних зображень і аудіозаписів, і використані для розпізнавання повітряних і наземних об'єктів, а також технології їх виявлення. Основні результати розділу опубліковані в роботах [54-58].

3.1 Повітряні об'єкти з гвинтовим двигуном типу літак, вертоліт, БПЛА

Відеозйомка об'єктів техніки дозволяє оцінити їх габаритні розміри і швидкість руху. Габаритні розміри можуть використовуватися для отримання оцінок ЕПР об'єктів. У резонансній області розміри об'єкта сумірні з довжиною хвилі опромінюючого поля і розсіювання носить резонансний характер. Як було показано в роботах [59, 60] ЕПР повітряних об'єктів в цій області можна порівняти з ЕПР півхвильового (на горизонтальній поляризації), або чвертьхвильового (на вертикальній поляризації) заземленого диполя. У високочастотній області довжина хвилі значно менше розмірів об'єкта і його ЕПР, в першому наближенні, визначається площею поверхні, що опромінюється [61]. При вирішенні завдань радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей (ПЦ) часто використовуються спектральні складові, обумовлені відбиттями від елементів конструкції, що обертаються [62- 65]. Так, в [62, 64] запропоновано метод розпізнавання ПЦ класу «літак з

турбореактивним двигуном», заснований на аналізі співвідношення кількості лопаток на перших двох ступенях компресора двигуна. У розвиток напрямку, доцільно розглянути можливість розробки алгоритму розпізнавання повітряної цілі, заснованого на використанні модуляційної ознаки.

Спектр сигналу, відбитого від літака з гвинтовим двигуном, характеризується наявністю спектральних складових, розташованих симетрично щодо планерної компоненти в вузлах періодичної сітки частот. Дані складові мають ширину, зворотну часу когерентного накопичення сигналу t_c , і характеризуються спектральною амплітудою A_f і частотою $F_i = 1, \dots, i$, де i - кількість спектральних складових. Причому модуляційні компоненти розташовані на частотній осі з періодом F_0 , рівним добутку кількості лопатей на частоту їх обертання. У цьому випадку завдання розпізнавання цілі даного класу може бути вирішено у вигляді завдання виявлення деякої, розташованої компактно сукупності сигналів.

При створенні інформаційних ознакових просторів для розпізнавання ПЦ типу вертоліт на перший план виступають розрахункові методи і методики формування поляризаційно-спектральних портретів. Як правило, з відкритих джерел доступні основні геометричні розміри і технічні характеристики. Відповідно методика отримання інформативних ознак повинна базуватися на використанні цих обмежених, але загальнодоступних характеристик.

Максимальна швидкість польоту V_0 дозволяє оцінити максимальне значення доплерівського зсуву частоти відбитого від вертольоту сигналу:

$$f_D = \frac{2V_0}{\lambda},$$

де λ - довжина хвилі опромінюючого вертоліт поля.

Частота обертання гвинта. Частота обертання лопатей гвинтів вертольоту, як правило, відсутня серед наведених довідкових даних. Але

може бути визначена виходячи з того, що кругова швидкість кінця лопаті вертольоту, що завис, дорівнює приблизно 0,75 від швидкості звуку. Виходячи з чого можна розрахувати частоту модуляції F_{BB} лопатями гвинта, що обертається [55, 66]:

$$F_{BB}[\text{Гц}] = \left(\frac{3}{4} c \right) / (d_B \cdot \pi \cdot n_L \cdot n_B) \quad (3.1)$$

де c - швидкість звуку, а d_B - діаметр гвинта; $n_L \cdot n_B$ - кількість лопатей і кількість гвинтів.

При максимальній швидкості польоту швидкість кінця лопаті, що набігає, не повинна перевищувати 96% від швидкості звуку [66], частота модуляції може бути записана як:

$$F_{BB}[\text{Гц}] = V_{\max} / (d_B \cdot \pi \cdot n_L \cdot n_B), \quad (3.1a)$$

де V_{\max} - максимально допустима швидкість руху кінця лопаті при максимальній швидкості руху вертольоту $V_{B\max}$.

Можна записати:

$$V_{\max} + V_{B\max} \leq 0,96c, \quad (3.1б)$$

звідки

$$V_{\max} \leq \left(0,96 - \frac{V_{B\max}}{c} \right) c = \alpha c, \quad (3.1в)$$

де $\alpha = \left(0,96 - \frac{V_{B\max}}{c} \right)$.

Для відомих швидкостей вертольотів α має значення - $0,75 \pm 0,08$. Це означає, що в наближених розрахунках можна використовувати (3.1). Для точних обчислювань використовувати (3.1б, 3.1в). Порівнюючи (3.1) з (3.1в) можна записати:

$$0,75 + \delta = \left(0,96 - \frac{V_{B\max}}{c} \right),$$

$$\delta = 0,21 - \frac{V_{B \max}}{c}, \quad (3.1 \text{ г})$$

видно що δ відрізняється від розрахункових значень (75%) для всіх типів вертольотів не більше + 3% і -6%.

ЕПР вертольоту і його окремих елементів. У квазірезонансній області, коли довжина хвилі опромінюючого поля порівнянна з розмірами конструкції в цілому або окремих її елементів можливо резонансне зростання ЕПР [59, 60]. Корпус вертольоту може описуватися тривісним еліпсоїдом, для якого ЕПР в резонансній області за аналогією з кулею [68] можна записати:

$$\sigma = 3,65\pi ab = 3,65\sigma_m \quad (3.2)$$

при $k\sqrt{ab} \approx 1$ або $\lambda_0 \approx 2\pi\sqrt{ab}$, де $\sigma_m = \pi ab$ - площа поперечного перерізу еліпсоїда.

У разі, коли форма близька до сферичної $a \approx b$

$$\sigma = 3,65\pi a^2 = 3,65\sigma_m. \quad (3.2 \text{ а})$$

При цьому резонансна довжина хвилі:

$$\lambda_0 \approx \pi a. \quad (3.2 \text{ б})$$

З іншого боку, можна розглядати корпус вертольоту як чвертьхвильовий вібратор, для якого несучий гвинт виконує роль заземлення. Тоді ЕПР такої конструкції буде приблизно на 6 ... 7 дБ нижче, ніж у резонансного півхвильового диполя [59, 60].

Таким чином, якщо висота вертольоту $h = \frac{\lambda}{4} \approx b$, то значення ЕПР для резонансної довжини хвилі $\lambda_0 = 4h$.

$$\sigma = 0,86 * \frac{1}{4} (4h)^2 = 3,44h^2 \quad (3.2 \text{ в})$$

Розглядаючи корпус як сфероїд з осями a, b , при резонансній довжині хвилі для сфери $\lambda_0 \approx \pi h$ - ЕПР при резонансі: $\sigma = 3,65\pi h^2 = 11,46h^2$, Тобто приблизно на 5 дБ більше, ніж у чвертьхвильового вібратора і приблизно така ж, як у півхвильового резонансного диполя. При цьому резонансна частота, на якій реалізується ця ЕПР в 4 і π раз більше вертикального розміру для чвертьхвильового заземленого диполя і сфери відповідно.

Коли несучі і кермові гвинти виконані з композитних матеріалів необхідне введення коригуючого коефіцієнта K відбиття від діелектрика [67, 68]. Для металевих поверхонь $K \approx 1$.

ЕПР гвинтів з композитних матеріалів, з урахуванням даних роботи [67], приблизно на $K = -6 \dots -8$ дБ менше, ніж металевих. Розрахункові значення ЕПР наведені в табл. Г.1.

ЕПР лопатей. Несучі і кермові лопаті можуть розглядатися як диполі, що обертаються з відповідними частотами. Коли довжина лопаті l буде дорівнювати половині довжини хвилі опромінюючого поля $l \approx \lambda/2$, вона буде розсіювати як резонансний півхвильовий диполь з максимальним значенням ЕПР [61]:

$$\sigma_0 \approx 0,86\lambda^2 = 0,86(2l)^2, \quad (3.3)$$

Тоді ЕПР лопатей і корпусу в резонансній області можна оцінити [55, 59, 60]:

$$\sigma_{x(y)} \approx 3,44l_{x(y)}^2, \quad (3.3 \text{ а})$$

а ЕПР в короткохвильовій області [61]:

$$\sigma_0 \approx \alpha l_x l_y, \quad (3.3 \text{ б})$$

де l_x, l_y - горизонтальний і вертикальний розмір конструкції,

$\sigma_{x(y)}$ - ЕПР на горизонтальній і вертикальній поляризаціях, а α - параметр, що залежить від форми об'єкта. Для кулі і еліпсоїда становить, $\alpha = \pi/4 \approx 0,77$. При практичних розрахунках зазвичай $\alpha \approx 0,5 \dots 0,3$.

Якщо лопаті, а також корпус вертольоту виготовлені не з металу, а з композиційних матеріалів, то коефіцієнт відбиття від них R_S буде менше:

$$R_S \approx \left| \frac{n-1}{n+1} \right|^2, \quad (3.4)$$

де $n = \sqrt{\varepsilon}$ - коефіцієнт заломлення матеріалу, а ε - його діелектрична проникність, яка для композитних матеріалів на основі багатостінних вуглецевих нанотрубок [67] становить $\varepsilon = 4 \dots 7$.

В табл. Г.1 наведені ЕПР для різних типів вертольотів, а також модуляційні частоти, що пов'язані з обертанням гвинтів. При виготовленні вертольоту і його лопатей з композитних матеріалів, наведені в табл. Г.1 значення ЕПР, як видно з (3.4), необхідно зменшити на 7 ... 10 дБ.

При обертанні лопаті з частотою $\Omega = 2\pi f_0$ в розсіяному сигналі будуть спостерігатися відгуки на частоті обертання і її гармоніках. Найбільше значення матиме перша гармоніка.

Залежність інтенсивності розсіяного сигналу (ЕПР) від кута орієнтації лопаті при горизонтальній поляризації опромінюючого поля визначиться співвідношенням [69]:

$$\sigma(\Omega t) \approx \sigma_0 \cos^4 \theta, \quad (3.5)$$

де $\theta(t) = -\Omega t = 2\pi Ft$ - кут орієнтації лопаті щодо вектора поляризації опромінюючого поля.

Крім того, внаслідок руху лопаті, відбиття сигналу від окремих її елементів отримує доплерівський зсув.

Відбитий від лопаті сигнал $u(t)$ можна записати у вигляді добутку двох співмножників: один з яких визначає амплітуду (3.5), а інший - фазу відбиття:

$$u(t) = \sigma(\Omega t)^{1/2} \int_0^{d_b} E(l) \exp\left(2 \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \Omega t\right) dl, \quad (3.6)$$

де $E(l)$ - розподіл напруженості опромінюючого поля по довжині лопаті гвинта.

У першому наближенні можна вважати, що $E(l) = const$, тоді з (3.6) можна отримати вираз для розсіяного гвинтом сигналу:

$$\begin{aligned} u(t) &= \sigma_0^{1/2} \cos^2(\Omega t) \int_0^{d_b} E(l) \exp\left(2 \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \Omega t\right) dl = \\ &= \sigma_0^{1/2} \cos^2(\Omega t) \frac{\exp(2kl \sin \Omega t) - 1}{2k \sin \Omega t}. \end{aligned} \quad (3.6 \text{ a})$$

Очевидне, що для $m/2$ пар лопатей в спектрі будуть присутні частоти $\Omega * m$ і $2\Omega * m$, тобто для m лопатей - частоти модуляції зростають у відповідну кількість разів.

Різниця ЕПР корпусів різних вертольотів на вертикальній поляризації, як показав аналіз отриманих даних, може досягати 10 дБ. На горизонтальній поляризації відмінності не перевищують 3 дБ. Різниця ЕПР в резонансній і короткохвильовій областях частот для більшості вертольотів різних типів менше 6 дБ. У той же час частоти модуляції несучим гвинтом для різних типів вертольотів можуть відрізнятися в 3 ... 4 рази. Ще більше відмінності в частотах модуляції рульовим гвинтом. Відмінності можуть досягати 10 ... 15 разів (див.табл. Г.1).

Наведені в (3.2-3.4) співвідношення можна використовувати і для оцінки ЕПР літаків. Для літаків дані з роботи [26] доповнені отриманими оцінками (табл.Г.2).

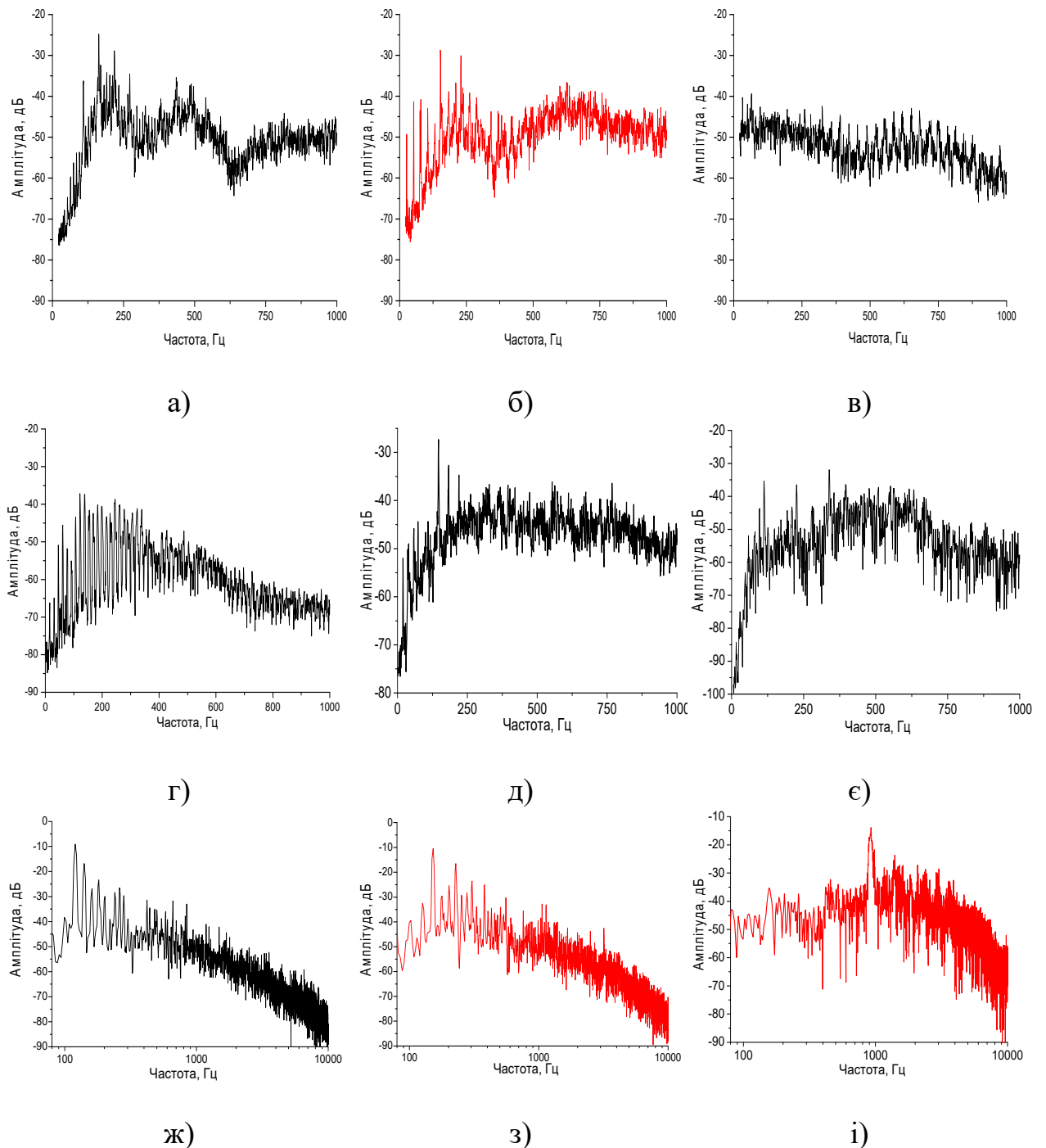


Рис.3.1. Спектри акустичного шуму об'єктів техніки: вертольоти - а, б, в, г, д, е; дизельний двигун - ж, з, і:

а- Bell-210 Частота модуляції несучого гвинта 11 Гц; рульового гвинта 56 Гц;
 б-Bell-429: частота модуляції несучого гвинта 26 Гц; в- McDonnell Douglas MD 900 Explorer: частота модуляції несучого гвинта 36 Гц; г - Камов Ка-32: частота модуляції несучого гвинта 16 Гц, залізничний Мі-38: частота модуляції несучого гвинта 22 Гц; е- Мі-8: частота модуляції несучого гвинта 16 Гц; ж, з, і - дизельний двигун, кількість обертів: ж – 800 об./хв., з – 2000 об./хв., і - на холостому ходу в ангарі.

Дослідження показали, що резонансні частоти для великих літаків (3...6 МГц) нижче ніж у вертольотів (10...20 МГц) і винищувачів (10...17 МГц). Оскільки ЕПР в резонансній області визначається значенням резонансної частоти (3.2), то ЕПР великих літаків може досягати 40 дБ/м², в той час як для вертольотів і невеликих літаків не перевищує 30 дБ/м².

Аналогічним чином отримані ЕПР і для БПЛА-табл. Г.3, Г.4.

Аналіз показує, що для вирішення задачі розпізнавання більш інформативні частоти модуляції, ніж інтенсивність розсіяного сигналу. Для перевірки запропонованої методики оцінки частоти обертання гвинтів і частот модуляції, що використовує їх оптичні портрети, були використані записи акустичних шумів вертольотів. Приклади їх спектрів наведені на рис. 3.1 а-г. Порівняння цих частот з розрахунковими значеннями, наведеними в табл. Г.1 показує на їх задовільний відповідність, помилка розрахунку не перевищує 10%.

Для акустичних і радіолокаційних спектрів малорозмірних аеродинамічних об'єктів - безпілотних літальних апаратів (БПЛА) характерні ті ж особливості, пов'язані з частотою обертання двигуна, яка для них має величину 7000 ... 11000 об./хв.- рис. 3.2.

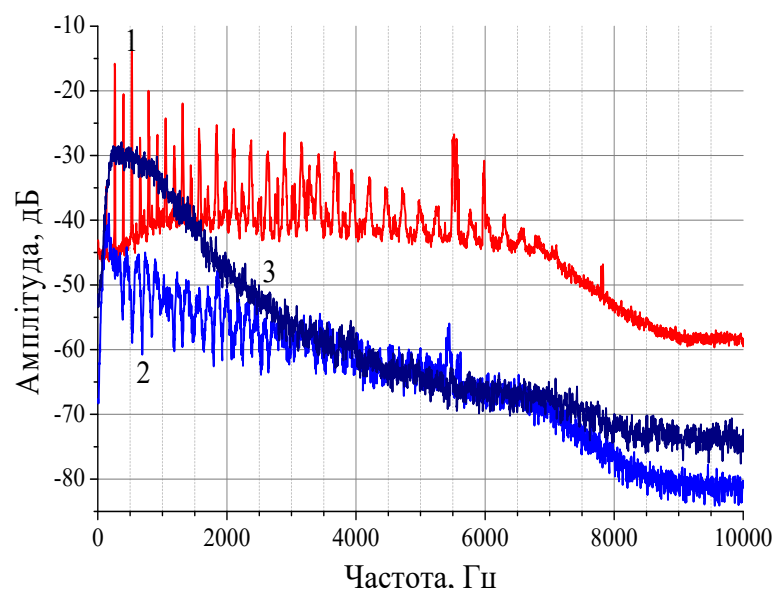


Рис. 3.2 Спектри БПЛА і вітру: 1 БПЛА літакового типу, 2.-БПЛА мультіроторного типу, 3 порив вітру

Для дослідження динаміки зміни характеристик квазіперіодичних послідовностей можна використовувати модифіковане перетворення Фур'є.

3.2 Використання кепстральної обробки для визначення частоти модуляції

Під кепстром $C_s(q)$ розуміють енергетичний спектр функції $\ln|S(w)|^2$, який визначається виразом:

$$C_s(q) = \int_{-\infty}^{\infty} \ln|S(w)|^2 \exp(-iqw) dw \quad (3.7)$$

Іншими словами, кепстр визначає послідовність коефіцієнтів розкладання функції $\ln|S(w)|^2$ в ряд Фур'є [70-72].

В роботі [70] показано, що логарифм спектру потужності коливання, що містить відбитий сигнал, має адитивну періодичну компоненту, створену цим сигналом, і тому перетворення Фур'є від логарифма спектра потужності має пік на місці, відповідному затримці відбитого сигналу [71]. Пізніше, в 1969 р. Шафер ввів поняття «комплексного кепстра» («complex cepstrum»), що спирається на використання інформації як про амплітудний, так і про фазовий спектри сигналу, що спостерігається [73]. Метод комплексного кепстра («complex cepstrum») використовується для відновлення вихідних сигналів з результату їх згортки і був названий методом гомоморфної деконволюції або гомоморфної фільтрації [74]. Перші згадки терміну «cepstrum» відносяться до 1978 року, коли Сільвія і Робінсон у своїй роботі [75] використовували його для позначення запропонованого ними методу аналізу сейсмічних сигналів. Даний підхід полягає в тому, що для мінімально-фазових сигналів cepstrum-спектральні коефіцієнти можуть бути отримані безпосередньо з оцінки спектра потужності. Обидва методи сходяться в тому, що використовують зворотне ШПФ від логарифмічного спектра потужності. А відмінність між ними полягає

в тому, що метод «kepstrum» характеризується kepstrum-коефіцієнтами, отриманими із степеневих рядів Колмогорова [76].

Приклад використання кепстральної обробки для виділення модуляційних частот, пов'язаних з обертанням гвинтів вертольотів, наведено на рис. 3.3. З вихідного запису сигналу акустичного шуму з використанням перетворення Фур'є отримаємо спектр:

$$S(i\omega) = F(S(t)). \quad (3.8)$$

Потім від логарифма модуля спектра обчислюється кореляційний функція:

$$R(\Delta\omega) = \int_0^{\infty} \ln(|S(\omega)|) \ln(|S(i\omega + \Delta\omega)|) d\omega \quad (3.9)$$

і проводиться перетворення Фур'є $F(*) = \int_0^{\infty} (*) \exp(-i\omega t) dt$, яке і буде кепстром вихідного процесу.

$$C(\tau) = F(R(\Delta\omega)). \quad (3.10)$$

Видно, що в спектрах акустичних шумів різних типів вертольотів простежуються гармоніки модулюючої частоти обертання гвинтів (рис. 3.31). Слід зазначити, що у вибраних типів вертольотів є тільки несучі гвинти. Це призводить до того, що в кореляційній функції, розрахованій по логарифму спектра, простежується пов'язана з цим періодичність (рис. 3.3-2). Фур'є перетворення від кореляційної функції (кепстр - рис. 3.3-3) має відгук відповідний кьюфренсі (сачкоті) періоду модуляційної функції, яка як видно має величину приблизно 15 Гц і 30 Гц відповідно (рис. 3.3-4).

Результати оцінки модулюючих частот гвинтів для декількох типів вертольотів наведені в табл. Г.5. Зіставлення частот модуляції, отриманих розрахунковим методом, з частотами акустичного і радіолокаційного портретів показує в більшості випадків на їх задовільну відповідність.

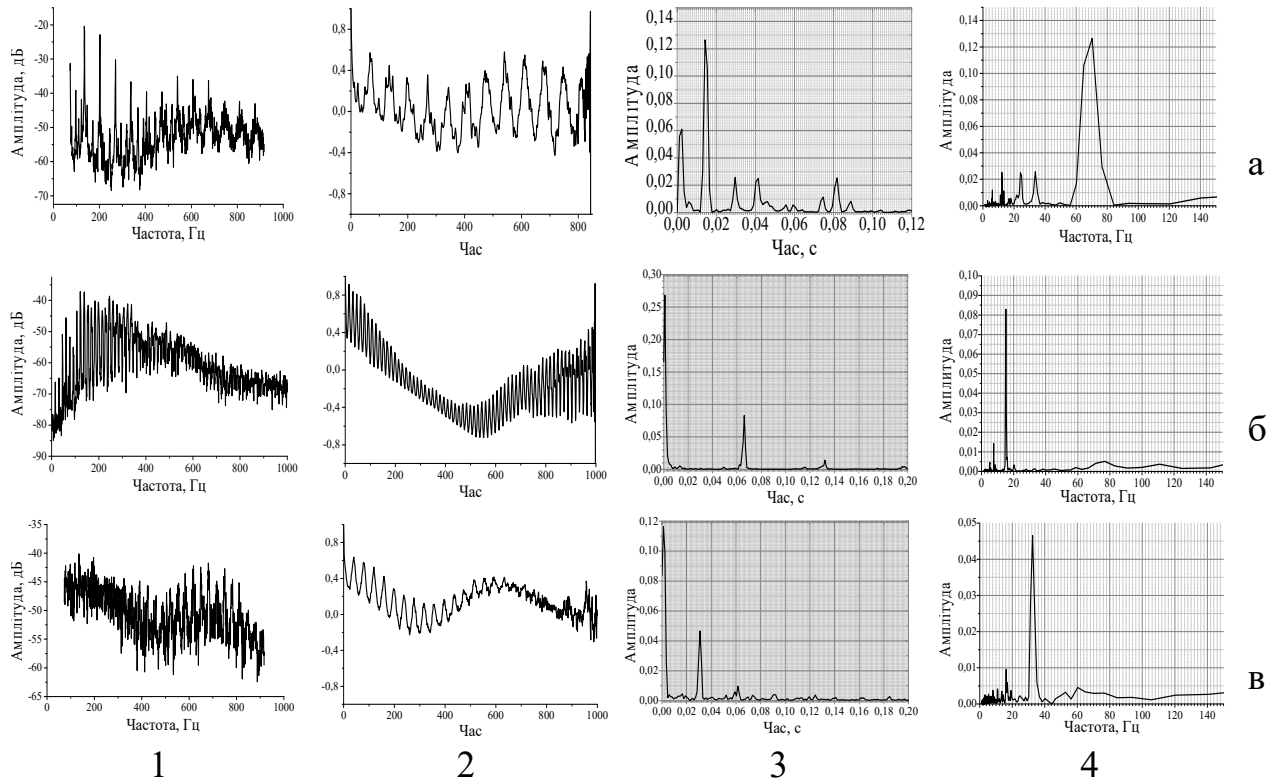


Рис. 3.3. Акустичні шуми. Спектри (1), автокореляційні функції-АКФ (2), БПФ від АКФ- кепстр (3) і періодограма від кепстра (4) для вертольотів: а- KB3-Ансат; б- Ка-32; в- McDonnell Douglas MD 900

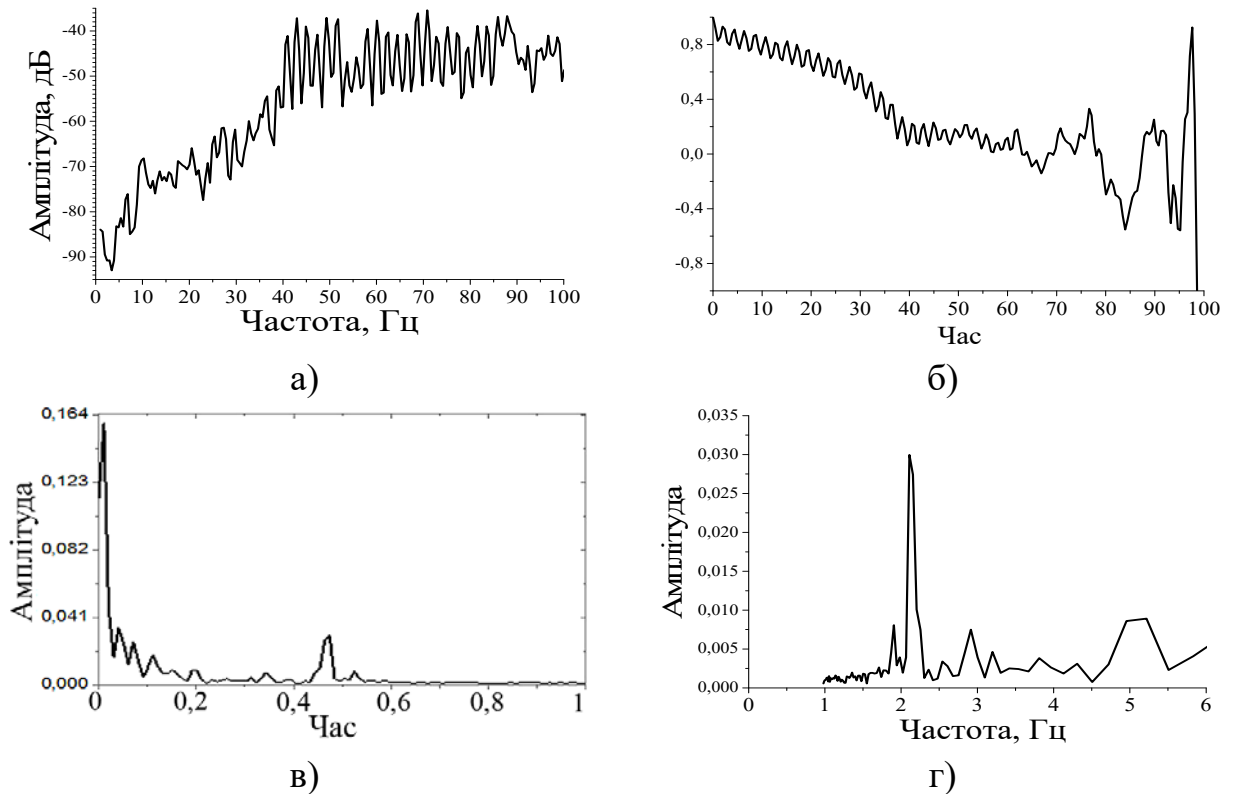


рис. 3.4. Радіолокаційні відображення. Спектр (а), його кореляційна функція (б), кепстр (в) - вісь абсцис час, кепстр (г) - вісь абсцис частота

На Рис. 3.4 а представлений спектр розсіяного вертольотом сигналу УКХ мовної станції.

У ньому простежуються частоти, обумовлені наявністю елементів, що обертаються. Вони спостерігаються і в кореляційної функції, обчисленій від логарифма спектра - рис. 3.4 б, а також в її Фур'є перетворенні (кепстр рис. 3.4 в, г).

Може бути запропонований і інший підхід використання кепстральної обробки для визначення періоду обертання. Він полягає в:

1. Оцінці спектральних характеристик шумів об'єкта.
2. Визначенні ковзного середнього спектра в вікні згладжування.
3. Обчисленні нев'язки між спектром і згладженим спектром, що відображаються в логарифмічному масштабі.
4. Обчисленні перетворення Фур'є від нев'язки спектрів, тобто кепстра.

При такому підході вдається послабити вплив трендів на кепстри і також можна простежити зміну частот, пов'язаних з модулюючим ефектом роботи рушійної установки (рис. 3.5). На ньому зображені спектри, ковзні спектри - рис. 3.5-1, і їх нев'язка зі спектрами - рис. 3.5-2, а також отримані від нев'язки Фур'є перетворення, тобто кепстри - рис. 3.5-3. Вони отримані за акустичними шумами дизельного двигуна при різних його обертах. Видно - рис. 3.5-3, що кепстральна обробка і в цьому випадку дозволяє виділити періодичності, пов'язані з обертами двигуна, послабивши при цьому вплив низькочастотних трендів спектрів.

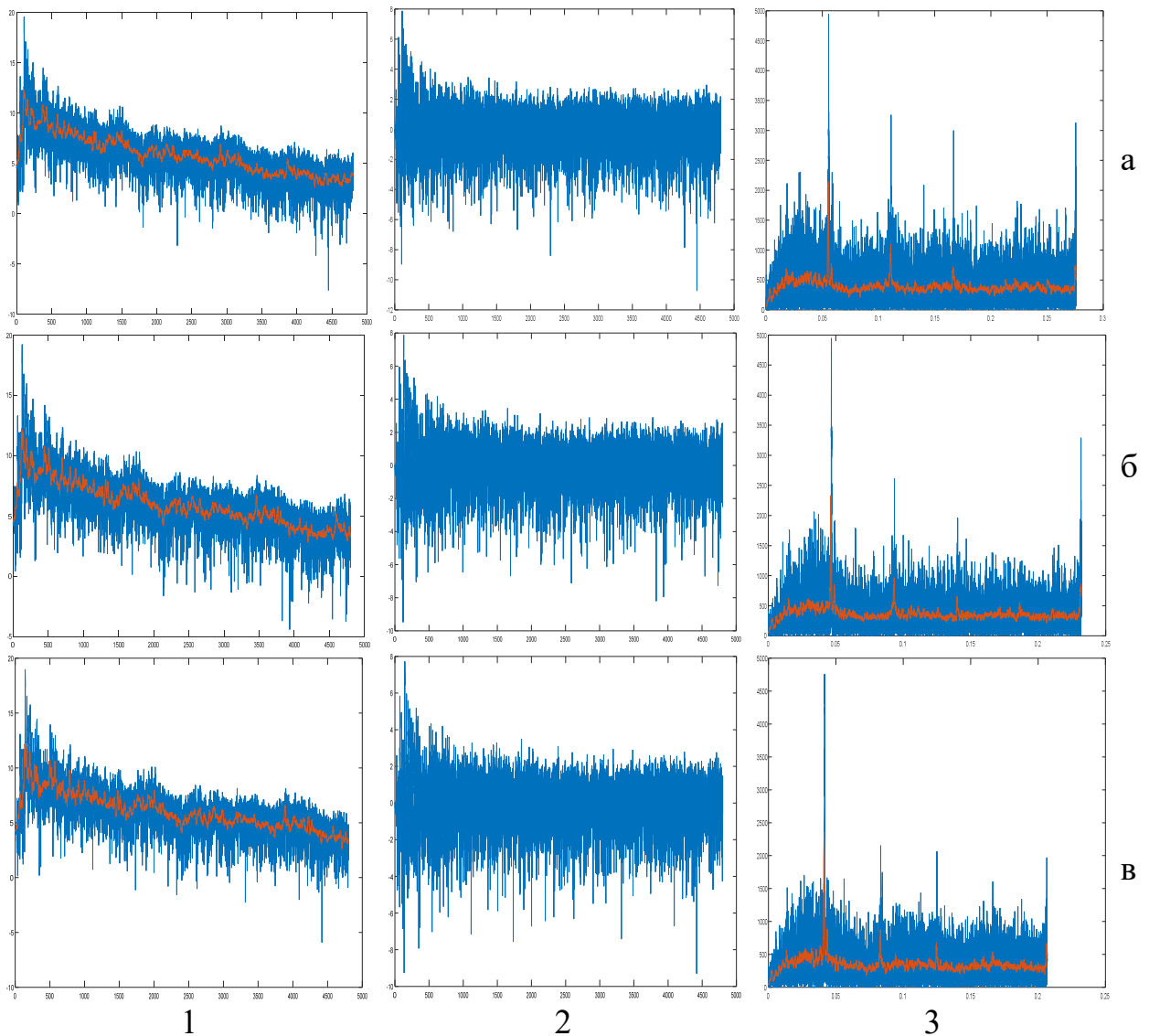


Рис.3.5. Кепстр акустичних сигналів наземного об'єкта з дизельним двигуном при різних оборотах двигуна: а- 600 об./хв.; б-900 об./хв.; в- 1100 об./хв.; 1 - спектр, 2 - нев'язка, 3 - кепстр.

3.3 Радіолокаційні та акустичні поля турбореактивного двигуна

Проведені експериментальні і теоретичні дослідження радіолокаційних відбиттів від турбореактивних двигунів (ТРД) дозволили встановити наявність в їх спектрі дискретних ліній. Зазначені особливості відзначалися у вузькому секторі носових і кормових кутів. Тому становить інтерес вивчення радіолокаційних відбиттів в секторі кутів близьких до нормалі, коли у відбитому сигналі відсутнє доплерівський зсув частоти, а корпус екранує

турбіну і компресор, що обертаються. Крім того, доцільно виявити особливості радіолокаційного і акустичного полів, які могли б використовуватися для виявлення і розпізнавання об'єктів з ТРД.

Експериментально досліджувалися спектральні поляризаційні особливості радіолокаційних відбиттів від ТРД, зв'язки акустичного і радіолокаційного полів. Експерименти проведені з використанням двохвильового (хвилі 8 мм і 3 см) вимірювального комплексу безперервного випромінювання. Об'єктом досліджень був ТРД типу ВК-1.

У другій серії дослідів вивчалися особливості акустичного сигналу, створюваного працюючим двигуном. В спектрах акустичного сигналу на всіх режимах роботи двигуна крім форсажу (14000 об./хв.), спостерігалися дискретні лінії на частотах, кратних частоті обертання валу двигуна (криві 1-3 на рис.3.6). К - значення оцінки кількості лопаток.

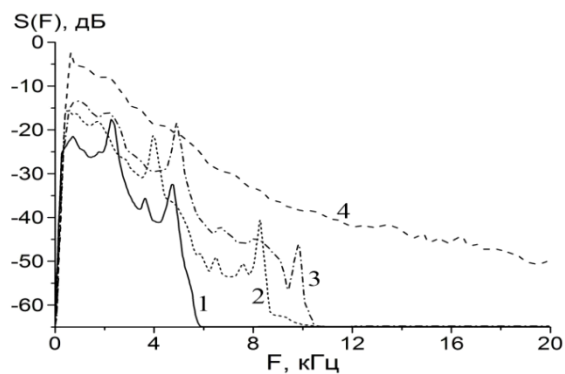


Рис. 3.6. Спектри акустичного шуму двигуна ВК-1:

- 1 $n = 5000$ об./хв., 1-84Гц, К = 36;
- 2 $n = 8000$ об. / хв. 133Гц, К = 38;
- 3 $n = 10000$ об. / хв.167Гц К = 36;
- 4 $n = 14000$ об. / хв. 233Гц

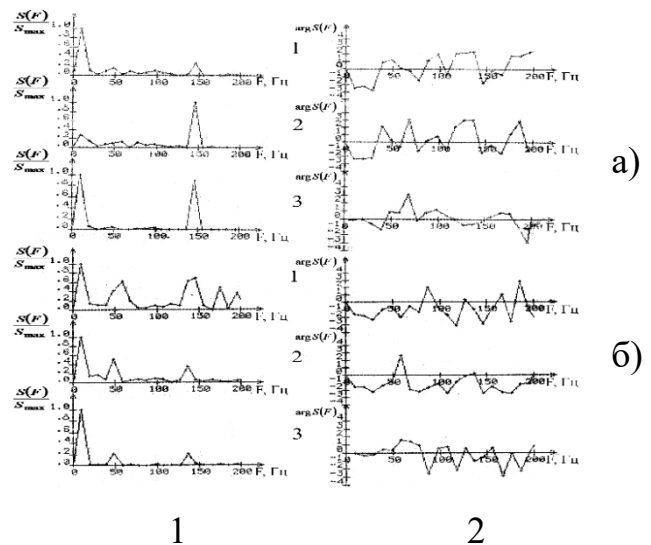


Рис. 3.7. Радіолокаційні відбиття від корпусу ВК-1 при його роботі: спектри - зліва 1 і фази відбиття - справа 2 на хвилі 8 мм- (а) і 3 см (б), 2 вертикальна і 1 - горизонтальна поляризації прийому, 3 - взаємні спектри.

Збільшення обертів двигуна призводило до зміщення у високочастотну область дискретних ліній і одночасно з цим до розширення безперервної частини спектра акустичного сигналу. Як показали дослідження безперервну частину спектру акустичного сигналу для всіх режимів роботи двигуна, можна апроксимувати гаусовою (при малих обертах), а потім експоненційною (при більших обертах) кривими. При роботі двигуна в режимі форсажу (14000 об./хв.) спектр ставав безперервним (крива 4 на рис. 3.6). При цьому інтенсивність сигналу зростала більш ніж на два порядки. Для цього випадку залежність спектральної щільності від частоти можна апроксимувати виразами виду: $S(F) \sim \left(\frac{F}{\Delta F} \right)^{-n}$ з $n \approx 2$.

У доплерівських спектрах радіолокаційних відбиттів від корпусу при працюючому двигуні, як в сантиметровому, так і в міліметровому діапазонах хвиль на узгодженій з випромінюваною (вертикальній) і крос (горизонтальній) поляризаціях спостерігалася спектральна лінія на частоті, відповідній частоті обертання валу двигуна. Як приклад на рис. 3.7 наведені спектри відбиття від місцевості і ТРД, отримані за 0,1 с, на хвилях 3 см (рис. 3.7) і 8 мм (рис. 3.7 б) на горизонтальній (криві 1), вертикальній (криві 2) поляризаціях і взаємний спектр (крива 3) нормовані на максимальне значення спектральної щільності. На рис. 3.7-2 показані фазові характеристики спектрів розсіяних сигналів. Низькочастотна частина спектру (приблизно до 80-100 Гц) обумовлена відбиттями від корпусу об'єкта і місцевості, а спектральна лінія на частоті близько 140 Гц відповідає частоті обертання валу двигуна (близько 8 тис. об./хв.). Необхідно відзначити збіг частот спектральних ліній, які відповідають частоті обертання валу двигуна на горизонтальній і вертикальній поляризаціях в обох діапазонах хвиль, в той час як спектри відбиття від місцевості істотно відрізняються для цих довжин хвиль і поляризацій сигналу. Цю обставину можна використовувати для виділення шляхом взаємно кореляційної обробки співпадаючих спектральних компонент в розсіяному сигналі на різних поляризаціях, або різних

діапазонах хвиль. Імовірно, їх поява пов'язана з фазовою модуляцією розсіяного сигналу, викликані вібрацією корпусу ТРД через роботу двигуна. Величина відбитого сигналу при малих індексах фазової модуляції:

$$m = K\Delta l \ll 1, \quad (3.11)$$

де $K = 2\pi/\lambda$ - хвильове число, а Δl - амплітуда вібрації обшивки корпусу, буде пропорційна:

$$\sigma \sim \sigma_{\Pi} m^2, \quad (3.12)$$

де σ, σ_{Π} - ЕПР спектральної лінії обумовленої вібрацією і корпусу ТРД в цілому.

Очевидно, що з укороченням довжини хвилі ефекти, пов'язані з модуляцією розсіяного сигналу вібраціями корпусу будуть посилюватися пропорційно λ^{-2} , а значить для їх виявлення доцільне застосування хвиль міліметрового та субміліметрового діапазонів.

Вивчення відбитих ТРД сигналів в сантиметровому і міліметровому діапазонах на різних поляризаціях дозволило встановити їх кореляцію. Коефіцієнт взаємної кореляції ортогонально поляризованих компонент на хвилі 3 см становив 0,6-0,75, знижуючись до 0,25-0,65 на хвилі 8 мм. При цьому коефіцієнт деполаризації розсіяного сигналу становив 6 ... 10 дБ.

Проведені дослідження дозволили зробити наступні висновки:

- в спектрах розсіяних об'єктами з працюючим ТРД сигналів, як в сантиметровому, так і міліметровому діапазонах на обох поляризаціях (горизонтальній і вертикальній) виявлені дискретні лінії на частотах обертання валу двигуна, обумовлені фазовою модуляцією відбитого сигналу, викликані вібрацією обшивки корпусу;
- в акустичному сигналі дискретні лінії спостерігаються на частотах кратних твору частоти обертання валу двигуна на кількість лопаток турбіни.

Спостерігається кореляція розсіяних ТРД сигналів в різних діапазонах і поляризаціях.

3.4 Динамічні спектри радіолокаційних і акустичних випромінювань об'єктів

Для вивчення динаміки зміни спектрального складу акустичного сигналу використовувалися спектрограми або динамічне перетворення Фур'є. При цьому розкладання в ряд Фур'є здійснюється в обмеженому по тривалості часовому вікні. Якщо це вікно переміщати по реалізації сигналу, то можна досліджувати динаміку зміни спектрального складу шуму в часі. Як приклад на рис. 3.8 наведені спектрограми акустичних шумів різних об'єктів техніки.

Для спектрограм дизельного двигуна рис. 3.8 а і мотора БПЛА літакового типу рис. 3.8 в. видно моменти зміни режимів роботи двигуна - зменшення кількості обертів - рис. 3.8 а і збільшення, а потім через деякий час зниження до колишньої величини кількості обертів для БПЛА літакового типу - рис. 3.8 в. Для спектрограм звуків пострілів (рис. 3.8 б) і обумовлених рухом лопатей гвинта вертольоту (рис. 3.8 г) характерна істотна мінливість в часі. Так в момент пострілу спостерігається істотне розширення спектра шуму в 5 ... 10 разів протягом часу приблизно в кілька мілісекунд. Для акустичного шуму вертольоту характерна періодичність з періодом руху лопатей гвинтів (рис. 3.8 г). Таким чином, використання спектрограм дозволяє вивчити динаміку зміни спектральних характеристик нестационарних шумів об'єктів. Такі ж особливості характерні і для спектрограм радіолокаційних відбиттів від рослинності під дією вітру, біологічних об'єктів, що рухаються (людей і птахів), вертольотів. Як приклад на рис. 3.8. д, е наведені спектри радіолокаційних відбиттів від очерету на хвилях 8 мм і 10 см, що коливається під дією вітру.

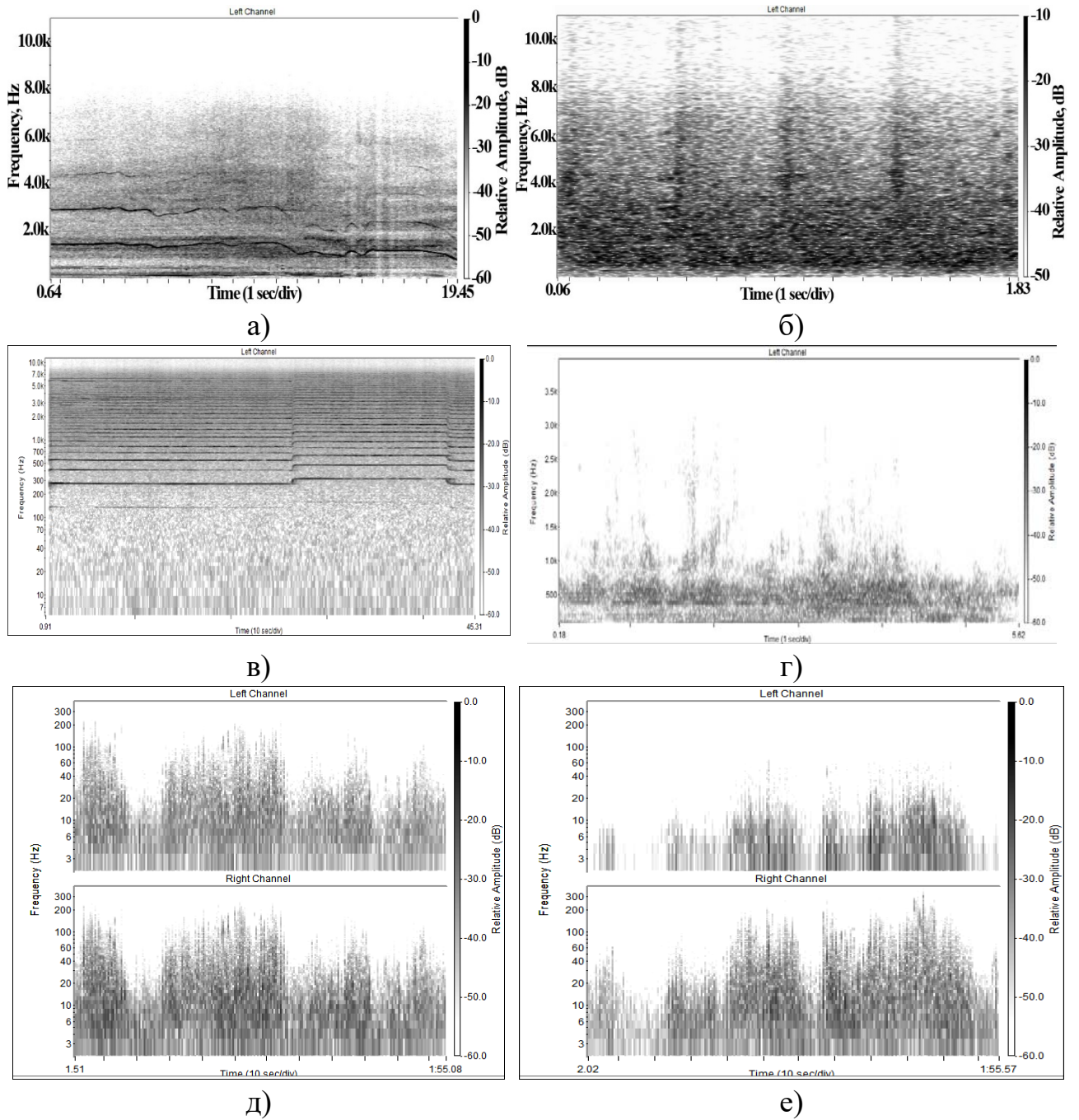


Рис. 3.8. Спектрограми акустичного шуму об'єктів техніки (а-г) і радіолокаційних відбиттів на хвилях 8 мм і 10 см (д, е) від очерету: а) дизельний двигун, б) кілька (5) пострілів з гармати, в) БПЛА літакового типу, г) вертоліт МІ-8, д - відбиття на ГП (верхній рис.) і ВП (нижній рис.) від очерету на хвилі 8мм, е-відбиття на хвилі 10 см (верхній рис.) і 8 мм (нижній рис.) від очерету на ВП.

Дослідження відбиття здійснювалося з використанням гомодинної РЛС міліметрового (хвиля 8 мм) і сантиметрового (хвиля 10 см) діапазонів

безперервного випромінювання (рис. Д2а). Для відбиття від очерету характерні в спектрограмах спалахи спектральної щільності, пов'язані з поривами вітру, причому вони спостерігаються на обох поляризаціях прийому синхронно - рис. 3.8 д. Однаковий характер відбиття від очерету і на хвилях сантиметрового і міліметрового діапазонів рис. 3.8 е. Вид спектрограм радіолокаційних відбиттів від очерету схожий на спектрограми акустичного шуму вітру і морського прибою.

3.5 Спектральна і поляризаційна структура відбиття від вертольоту

Наявність дискретної структури в спектрі розсіяного сигналу радіолокаційних відбиттів від вертольотів, співвідношення рівнів спектральних компонент, рознос між ними і їх кількість можуть бути покладені в основу побудови алгоритмів розпізнавання вертольотів. Для цього довжина реалізації повинна бути не менше періоду обертання гвинта, що накладає обмеження на оперативність вирішення завдань розпізнавання. У деяких випадках довжина реалізації повинна бути менше періоду обертання гвинта. В цьому випадку, спектр відбитого від лопатей вертольоту сигналу динамічно змінюється в часі і необхідно використовувати інші підходи для аналізу. Така ситуація характерна для систем ближньої радіолокації.

Експериментально досліджувалися поляризаційні і спектральні особливості відбиття від моделі вертольоту за часи спостереження, що складають частину періоду обертання гвинта. При експериментах з моделлю вертольоту встановлено, що в спектрах розсіяних сигналів, як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях при довжині реалізації 0,4...1 с спостерігаються співпадаючі дискретні лінії з частотним розносом, відповідним частоті обертання валу гвинта. Істотно відрізняються спектри, отримані при коротких інтервалах спостереження (близько 40 мс). При цьому

окремі спектральні лінії вже не розділяються в частотній області. Крім того, за часи спостереження менші періоду обертання гвинта в спектрі відбитого сигналу спостерігаються «спалахи» спектральної щільності в високочастотній області з частотою обертання валу гвинта. Вони обумовлені частотною модуляцією розсіяного від лопаті гвинта сигналу через зміну проекції вектора швидкості розсіюючого елементу на напрям опромінення. Максимальні значення ширини спектра будуть, коли лопать гвинта буде перпендикулярна напрямку опромінення. В якості ілюстрації на рис. 3.9 наведено спектр сигналу відбитого від моделі вертольоту на вертикальній поляризації, отриманий з реалізації, довжиною 40 мс, в момент проходження лопаттю гвинта нормалі щодо напрямку опромінення.

Подібні значення ширини спектру відбиття від вертольоту в високочастотній області будуть при використанні дециметрового діапазону хвиль (довжина хвилі близько 60 см). Скорочення робочої довжини хвилі буде призводити до пропорційного λ^{-1} уширенню високочастотної частини спектра відбитого сигналу. У НВЧ і УВЧ діапазонах її ширина може досягати десятків кілогерц. При імпульсному режимі зондування спостерігається трансформація (згортання) високочастотних спектральних компонент розсіяного сигналу в діапазонах частот до половини частоти повторення імпульсів.

Вивчення коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент дозволили виявити наявність висококорельованої області в спектрі сигналу, відбитого від моделі вертольоту. На рис. 3.10 приведена залежність коефіцієнта взаємної кореляції ρ від частоти F_i, F_j спектральних компонент, який обчислювався з використанням співвідношення [44]:

$$\rho(F_i, F_j) = \frac{\langle S(F_i)S(F_j) \rangle - \langle S(F_i) \rangle \langle S(F_j) \rangle}{\sqrt{(\langle S^2(F_i) \rangle - \langle S(F_i) \rangle^2)(\langle S^2(F_j) \rangle - \langle S(F_j) \rangle^2)}}, \quad (3.13)$$

де $S(F_i), S(F_j), \rho(F_i, F_j)$ - спектральна щільність на F_i і F_j частотах і коефіцієнт взаємної кореляції відповідно.

Видно, що в діапазоні частот від 100 до 400 Гц коефіцієнт взаємної кореляції спектральних компонент розсіяного сигналу перевищує 0,6. Це підтверджує висновок про синхронність появи «спалахів» спектральної щільності у високочастотній області на різних частотах.

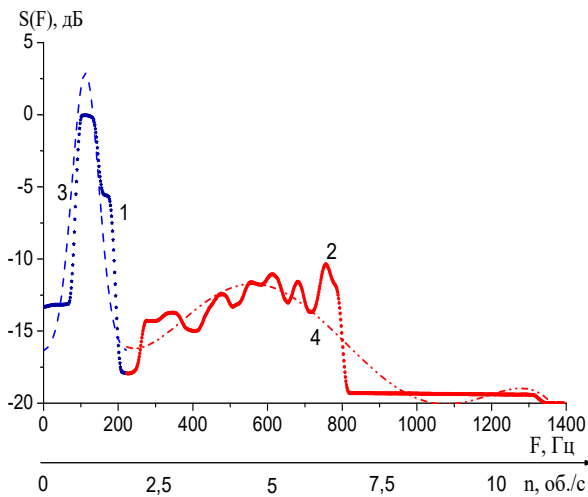


Рис. 3.9. Спектр розсіяного моделю вертольоту сигналу на хвилі 8мм і вертикальній поляризації: 1 лінія корпусу, 2 модуляція гвинтом, 3 апроксимація функцією Гауса, 4 апроксимація поліномом 5 ступеня.

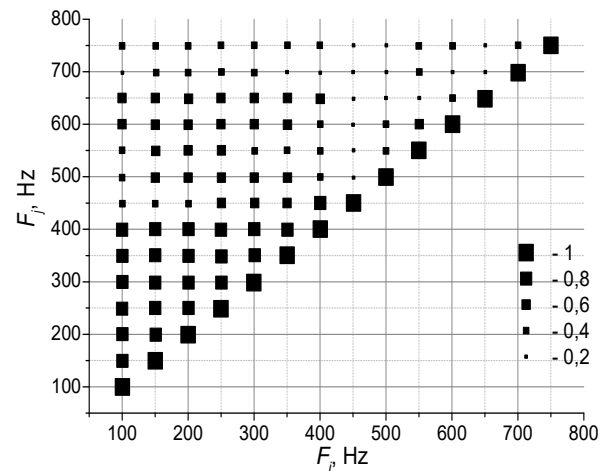


Рис. 3.10. Матриця коефіцієнтів взаємної кореляції спектральних компонент відбиття від моделі вертольоту:

- $\rho(F_i, F_j)=1$, ■- $\rho(F_i, F_j)=0,8$,
- $\rho(F_i, F_j)=0,6$, ■- $\rho(F_i, F_j)=0,4$,
- $\rho(F_i, F_j)=0,2$ коефіцієнти кореляції

Проведені з використанням імпульсної РЛС сантиметрового діапазону (хвиля 2 см – рис. Д.1 а) експерименти в натурних умовах підтвердили основні закономірності, встановлені при вимірах з моделлю і дозволили зробити висновок про те, що в спектрах відбиття від вертольоту, при інтервалах спостереження менших періоду обертання лопатей гвинта, спостерігаються сплески спектральної щільності у високочастотній області. Їх наявність може використовуватися для виявлення і розпізнавання вертольоту.

Висновки до розділу 3

1. Частоти модуляції сигналу, розсіяного гвинтами різних типів повітряних об'єктів, істотно відрізняються, що може бути використано для їх ідентифікації.

2. Акустичні портрети об'єктів техніки дозволяють по частоті модуляції визначити оберти двигунів, які також проявляються у модуляції відбитих радіолокаційних сигналів.

3. Різке збільшення амплітуди частоти вібрації корпусу може служити ознакою роботи двигуна в режимі форсажу.

4. У спектрі відбиттів від аеродинамічних об'єктів з гвинтовим рушієм присутні компоненти з частотами кратними частоті обертання гвинта.

5. Акустичні портрети і оптичні зображення об'єктів техніки можуть служити основою для визначення сигнатур в радіолокаційних портретах.

6. В спектрах розсіяних об'єктами з працюючим ТРД сигналів, як в сантиметровому, так і міліметровому діапазонах на обох поляризаціях (горизонтальній та вертикальній) виявлені дискретні лінії на частотах обертання валу двигуна, обумовлені фазовою модуляцією відбитого сигналу, викликані вібрацією обшивки корпусу. В акустичному сигналі дискретні лінії спостерігаються на частотах кратних твору частоти обертання валу двигуна на кількість лопаток турбіни.

7. Спостерігається кореляція розсіяних ТРД сигналів в різних діапазонах і на різних поляризаціях.

8. У спектрах відбиттів від вертольоту, отриманих при інтервалах спостереження менших періоду обертання лопатей гвинта з частотою, кратною частоті їх обертання, спостерігаються сплески спектральної щільності в високочастотній області. Їх наявність може використовуватися для виявлення вертольоту у випадках, коли відсутнє доплерівський зсув

частоти сигналу, відбитого від корпусу, і він не відокремлюється на фоні відбиттів від місцевості.

9. Високочастотні компоненти спектра відбиттів, обумовлені частотною модуляцією розсіяного сигналу обертовими лопатями, взаємно корельовані. Наявність в високочастотній області широкосмугового сплеску, що з'являється з частотою обертання гвинта можна використовувати в якості інформативної ознаки для розпізнавання вертольоту.

10. У радіолокаційних відбиттях рослинності на різних поляризаціях і довжинах хвиль спостерігаються розширення спектра під час поривів вітру.

РОЗДІЛ 4

НЕСТАЦІОНАРНІ ЗАВАДИ ДЛЯ СИСТЕМ МОНІТОРНІГУ

Дальність дії активних НВЧ і УВЧ радіосистем визначається наявністю завад, створюваних відбиттями від ділянок місцевості, «ясного» неба, гідрометеорів і схвильованого моря. Ці завади, як правило, є нестационарними і негаусовими. Для активно-пасивних систем в якості завад виступають сигнали мовних КХ і УКХ станцій, які використовуються для підсвічування обстановки. Дальність дії систем акустичної розвідки, як було показано у розд. 2, обмежують шуми, що створюються вітром, рослинністю, дощем і рухомими сторонніми об'єктами.

У цьому розділі наведені результати експериментального вивчення характеристик нестационарних завад для активних [50] і активно-пасивних [77] радіосистем, а також систем акустичної розвідки [78]. Запропоновано методи їх опису на основі використання вкладених напівмарковських процесів [50], визначені основні параметри, що входять до складу моделі, а також оцінені втрати при виявленні, що виникають за рахунок негаусових характеристик шумів [51, 79, 80].

Основні результати розділу опубліковані в роботах [50, 51, 77- 80].

4.1 Характеристики радіолокаційних відбиттів від суші і їх математична модель

При високій роздільності по дальності і кутових координатах спостерігаються істотні відхилення законів розподілу флуктуацій відбитих поверхнею розділу (моря, суші) сигналів від стандартних, що обумовлено послідовним спостереженням ділянок поверхні із статистичними властивостями нерівностей, які відрізняються, що породжує нестационарність і

негаусів характер. Вперше на це було звернуто увагу в роботах Г.Транка і Мішеля [81-83].

Спробою врахувати негаусів характер розсіяного морем і сушею сигналу було використання логарифмічно нормального для амплітуд і складеного нормального для квадратур законів розподілу для відбиттів від моря, а також моделі зі змінним числом розсіювачів для суші [82-84]. Використовуючи нелінійні безінерційні перетворення гаусівського випадкового процесу [79, 80, 84, 93, 152], з подальшим спектральним забарвленням отриманого масиву, отримувалися негаусівські процеси зі спектральними характеристиками і законами розподілу, характерними для відбиттів від моря і суші. Істотним просуванням в створенні моделей негаусових процесів, було використання вкладених марківських процесів для опису статистики завад [85, 86]. Одна з компонент процесу використовувалася для вибору фазового стану в якому знаходиться процес, а інша описувала характеристики всередині нього. Цей підхід був використаний для оцінки ефективності прийому сигналів в умовах негаусових завад в системах зв'язку [85, 86]. Однак у запропонованій моделі передбачалося, що час очікування в кожному з фазових станів до переходу в наступне підпорядковується експоненціальному розподілу і спектр завади не змінюється при зміні фазових станів. Це, виправдано для завад, які існують в каналах зв'язку. Для завад, що створюються відбиттями від підстилаючих поверхонь (суші, моря), ці умови, як правило, не виконуються. Щільність розподілу часів існування завади в кожному з фазових станів може мати розподіл, який істотно відрізняється від експоненціального і різний спектральний склад.

У роботах [87, 88] запропонована модель розсіяного сигналу від моря і «ясного неба» в класі двокомпонентних вкладених напівмарковських процесів. Подібний підхід може використовуватися для опису широкого класу нестационарних негаусових процесів [89-92]. В даному розділі розглядається можливість його використання для опису завад, створюваних відбиттями від ділянок суші.

Пропонована модель сигналу, розсіяного ділянками суші містить три рівні деталізації:

- опис статистичних характеристик ділянок в межах регіону за даними топографічних зйомок для визначення ймовірностей існування кожного типу; характерних розмірів і функції розподілу для конкретних ділянок (сільгоспугіддя, лісові масиви, зони забудов тощо) в межах окремих регіонів, а також моделювання просторово-часових характеристик зворотного розсіювання від земної поверхні [93];

- опис просторових розподілів зон з високою інтенсивністю відбитого сигналу в межах досить однорідних за своїм характером ділянок [94-96], причому зондування на декількох частотах дозволяє вивчати розсіювання як від рослинного покриву, так і від ґрунту [96, 97];

- опис спектрів і статистик окремих типів рослинних покривів, ділянок місцевості, фрагментів рослин і їх залежності від вологозапасу. Модель є розвитком запропонованої в [87] моделі радіолокаційних відбиттів від моря. Статистичний опис моделі засновано на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів $\{\overline{S}(t), \theta(t)\}$ у яких одна компонента $\overline{S}(t)$ неперервна, а інша $\theta(t) = \nu_i$ дискретна, а t узагальнений час в якості якого можуть виступати просторові координати. Ці компоненти є залежними і, в загальному випадку, не Марківськими. Це означає, що не накладається ніяких обмежень на розподіл часів існування процесу в кожному з фазових станів. У кожен момент часу процес може знаходитися в одному з K можливих фазових станів $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$, причому покладається відомим початковий стан $\theta_0 = \nu_i$ в момент часу $t=0$ і однокрокові ймовірності переходу π_{ij} , де $i, j = \overline{1 \dots K}$. Зіставимо кожному ненульовому елементу π_{ij} матриці ймовірності переходу випадкову величину T_{ij} з щільністю розподілу $f_{ij}(t)$, яку будемо називати часом очікування в стані ν_i до переходу в стан ν_j . Якщо величини T_{ij} розподілені за експоненціальним законом, то такий процес буде Марківським

[151]. На практиці, в багатьох випадках таке припущення не виконується і тоді процес, у якого зміна станів описується Марківським ланцюгом, а щільність розподілу часів існування в кожному з них відрізняється від експоненційної, відноситься до класу напівмарківських [98]. У середині кожного з ν_i станів процес будемо вважати квазістаціонарним, що описується своєю статистичною

матрицею розсіювання $[S_i(t)] = \begin{bmatrix} s_{11i}(t) & s_{12i}(t) \\ s_{21i}(t) & s_{22i}(t) \end{bmatrix}$, щільністю розподілу значень

$[P_i(S)] = \begin{bmatrix} P_{11i}(s); P_{12i}(s) \\ P_{21i}(s); P_{22i}(s) \end{bmatrix}$ і спектром $[S_i(\omega)] = \begin{bmatrix} s_{11i}(\omega) & s_{12i}(\omega) \\ s_{21i}(\omega) & s_{22i}(\omega) \end{bmatrix}$. Це означає,

що статистична матриця розсіювання процесу $\|S(t)\|$, так само як і матриця щільності розподілу значень $\overline{\|P(S)\|}$ і спектри $\overline{\|S(\omega)\|}$ є блоковими векторами - кожен елемент i вектора є квадратною матрицею 2×2 [50].

Математичною моделлю системи є вкладені процеси, один з яких, визначає зміну фазових станів і є, в загальному випадку, напівмарківським, а другий - визначає поведінку системи всередині фазового стану і, в більшості практично цікавих випадків, може описуватися ергодичним гаусовим процесом. При цьому з'являється можливість охопити більш широкий клас процесів, опис яких неможливий за допомогою ланцюгів Маркова [87- 92]. Так для розвиненого морського хвилювання розподіл періодів хвиль відрізняється від експоненційної моделі [99], а значить і розподіл викидів відбиттів від моря також може не підкорятися експоненціальному розподілу [87]. Відбиття від ясного неба створюються структурами, розподіл розмірів і відстані між якими також відрізняються від експоненціального [88].

Для суші розподіл розмірів окремих кластерів, які визначаються типами місцевості, і відстаней між ними також можуть відрізнятися від експоненційних. Разом з тим всередині кластера є можливість опису розсіяного сигналу, як ергодичного з гаусовою статистикою для кожної з ортогонально поляризованих компонент і своїм спектром. Тому для статистичного опису всіх цих типів розсіяних сигналів (від суші, моря, ясного неба) зручна запропонована модель

вкладеного в напівмарковський процес, векторного гауссова ергодичного процесу із заданою матрицею спектральних щільностей [50].

Алгоритм моделювання розсіяного поверхнею суші сигналу має наступну структуру:

1. Здається початковий стан, в якому знаходиться процес в момент $t = 0$, нехай для визначеності H_i .
2. Визначається наступне фазовий стан процесу. Для цього з вірогідністю (π_{ij}) вибирається випадкове число $j \in E \in (1...K)$.
3. Визначається час знаходження процесу в i стані до переходу в j стан, для чого генерується випадкове число T_{ij} , що має щільність розподілу $f_{ij}(t)$. Протягом цього часу генерується векторна випадкова величина $\overline{S_{ij}(t)}$, що має щільність розподілу $P_i(\overline{S})$ і спектр $\overline{S}_i(\omega)$.
4. Проводиться зміна стану $H_i \rightarrow H_j$ і процес обчислення повторюється.

Для оцінки робочих характеристик систем селекції і виявлення цілей необхідне знання функцій розподілу і спектрів завад, описуваних розглянутою моделлю на інтервалі спостереження $(t, t + T_0)$, де T_0 - час накопичення інформації з елемента роздільності. Визначення спектру $S(\omega, T_0)$ і щільності $P(S, T_0)$ для довільного часу спостереження T_0 представляє значні труднощі. Загальне рішення цього завдання отримано лише для марковських процесів [100]. Однак на практиці найбільш цікаві бувають два граничних випадки: малих $T_0 \leq \min_{i \in E} (\overline{T_{ij}})$ і великих часів спостереження $T_0 \geq \max_{i \in E} (\overline{T_{ij}})$ для яких результати стають очевидними. При малих часах спостереження практично ніколи не відбувається зміни стану за час спостереження і щільність розподілу значень процесу, його спектр і всі числові характеристики відповідають його початковому стану. І якщо вибір початкової точки є несуттєвим, то ці характеристики реалізуються з можливостями, які визначаються фінальними

ймовірностями кожного з станів [89]. При великих часах спостереження щільність розподілу значень, спектр і все числові характеристики, наприклад моменти m порядку M_m , визначаються як середньозважене характеристик в кожному з станів з вагами, обумовленими фінальними ймовірностями їх наявності [50, 89, 90]:

$$\overline{P(S)} = \sum_{i=1}^K P_i \overline{P_i(S)}; \quad \overline{S(\omega)} = \sum_{i=1}^K P_i \overline{S_i(\omega)}; \quad \overline{M_m} = \sum_{i=1}^K P_i \overline{M_{im}} \quad (4.1)$$

де M_{im} « m » момент для « i »-го стану i в цілому M_m , а P_i - фінальні ймовірності існування процесу в i -м стані [50, 89, 90]:

Середній час знаходження в i -тому стані до переходу в j :

$$\overline{T_{ij}} = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt, \quad (4.2)$$

а середній час перебування процесу в i -тому стані до переходу в один з наступних станів:

$$\overline{T_i} = \sum_{j=1}^K \pi_{ij} \overline{T_{ij}}. \quad (4.3)$$

Оскільки другий момент процесу характеризує інтенсивність розсіяного сигналу, а значить ЕПР, то поляризаційну матрицю розсіювання для питомих ЕПР поверхні $\overline{\sigma^0}$ можна записати [50, 109]:

$$\|\overline{\sigma^0}\| = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^0 & \sigma_{12}^0 \\ \sigma_{21}^0 & \sigma_{22}^0 \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^K P_i \begin{pmatrix} \sigma_{11i}^0 & \sigma_{12i}^0 \\ \sigma_{21i}^0 & \sigma_{22i}^0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

де σ_{lmi}^0 - питома ЕПР i - го кластера поверхні суші (фазового стану) при l поляризації опромінення і m прийому розсіяного сигналу.

Процеси з не експоненціальним розподілом часів існування можна наближено описати шляхом введення додаткових фіктивних фазових станів [98, 100].

Розглянемо фізичну інтерпретацію запропонованої моделі. Для сигналу, розсіяного поверхнею суші, дискретна компонента $\theta(t)$ визначається набором типових ділянок поверхні, кожен з яких описується матрицею питомих ЕПР $[\sigma_{lmi}^0]$, функцією розподілу значень $[P_{lmi}(S)]$ і спектром $[S_{lmi}(\omega)]$ розсіяного сигналу.

Слід зробити деякі зауваження з приводу параметрів, що входять до складу запропонованої моделі:

1. Визначення $f_{ij}(t)$ і π_{ij} , що описують їх просторовий розподіл для кожного конкретного типу місцевості, може ґрунтуватися на даних топографічної зйомки, додаткових результатах радіолокаційного картографування. Усереднені статистичні характеристики (4.1) визначаються з урахуванням фінальних ймовірностей P_i кожного з типів ділянок. Для цього по карті місцевості необхідно визначити відсоток площі, займаної конкретними типами ділянок, що і дає оцінки фінальних ймовірностей даного фазового стану завади. Ці характеристики практично не залежать від частоти опромінюючого поля. Для їх визначення можна використовувати радіолокаційні засоби НВЧ діапазону, які мають добрий розділ за дальністю і кутових координатах. Отримані при цьому дані на однорідних ділянках місцевості можуть бути поширені на інші діапазони частот (аж до УКХ і КХ діапазонів).

2. Спектри $[S_{mi}(\omega)]$ розсіяного різними типами місцевості, покритої рослинністю, сигналу при невеликих змінах довжини хвилі λ пропорційні їй [50]:

$$\omega = 2\pi F = 2\pi \frac{2V}{\lambda}, \quad (4.5)$$

де V, F, ω - швидкість руху розсіювача, доплерівський зсув частоти і круговий зсув частоти відповідно.

Така пропорційність зберігається поки розміри елементарних розсіювачів d істотно більше довжини хвилі опромінюючого поля λ . Пропорційність порушується, коли $d \approx \lambda$ і розсіяння відбувається у резонансній області. Коли розміри розсіювачів стають менше довжини хвилі опромінюючого поля $d \leq \lambda$ розсіювання відбувається в релеєвській області і інтенсивність розсіювання буде визначатися відношенням d/λ , а частота флуктуацій буде визначатися не швидкістю руху розсіювача, а частотою його флуктуацій.

Таким чином, в короткохвильовій області, відповідній $d \gg \lambda$, отримані на одній з довжин хвиль результати за спектрами розсіювання від рослинності можуть успішно використовуватися і для оцінки аналогічних характеристик для інших довжин хвиль. У довгохвильовій і резонансній областях така пропорційність порушується і необхідне дослідження цих характеристик саме в цих діапазонах хвиль. В якості моделі розсіювача в резонансній області можна використовувати модель двох схрещених напівхвильових вібраторів, а в релеєвській області двох схрещених диполів Герца [68,69].

Експериментальне вивчення просторових характеристик однорідних ділянок місцевості. Вивчення здійснювалося за результатами радіолокаційного картографування ділянок місцевості із застосуванням макетів імпульсних вимірювальних РЛС з довжинами хвиль 2 см і 8 мм, загальний вигляд яких представлений на рис. Д. 1, а технічні

характеристики в табл. Д. 1. Їх місце розташування показано на рис. Д.3 точками O і O_1 відповідно [50].

Картографування здійснювалося в літньо-осінній період (з липня по початок вересня). Радіолокаційні зображення ділянок місцевості наведені на рис. Д. 4 [50]. Вони отримані після порогової обробки і відображення записів радіолокаційних сигналів з виходу амплітудного детектора РЛС, причому верхні зображення на кожному з рисунків відносяться до випадку порога Π рівного середньому по кадру значенню сигналу \bar{A} , а нижні - на 12 дБ перевищує його рівень. Запис радіолокаційного зображення рядка здійснювалася з дискретом по дальності близько 11 м. Радіолокаційні відбиття всіх ділянок місцевості мають істотно неоднорідну по дальності r і азимуту θ структуру. Коефіцієнт варіації (відношення середньоквадратичного значення флуктуації амплітуди до середнього по кадру) для досліджуваних ділянок становив 1,5 ... 1,6 для пагорба з травостоєм і сільгоспугідь з посадками і 1,8 ... 1,9 для зони забудови. Для лісового масиву він був близько 2. Наведені значення свідчать про значне перевищення випадкової компоненти стабільної в розсіяному місцевістю сигналі. Аналіз показує, що зона забудови - (рис. Д.4 в, г) і пагорб з травостоєм - (рис. Д.4 а, б) дають приблизно однакову щільність засвічення по кадру. Разом з тим для лісового масиву (рис. Д.4 д, е) найбільше засвічення дає передня кромка і ділянки лісу на підвищеннях місцевості. Просторовий розподіл питомої ЕПР можна визначити, використавши ту ж методику, що і при отриманні часового розподілу. На рис. 4.1 наведені функції розподілу амплітуди розсіяного пагорбом з травостоєм, зоною забудови, сільгоспугіддями, лісовим масивом сигналів [50].

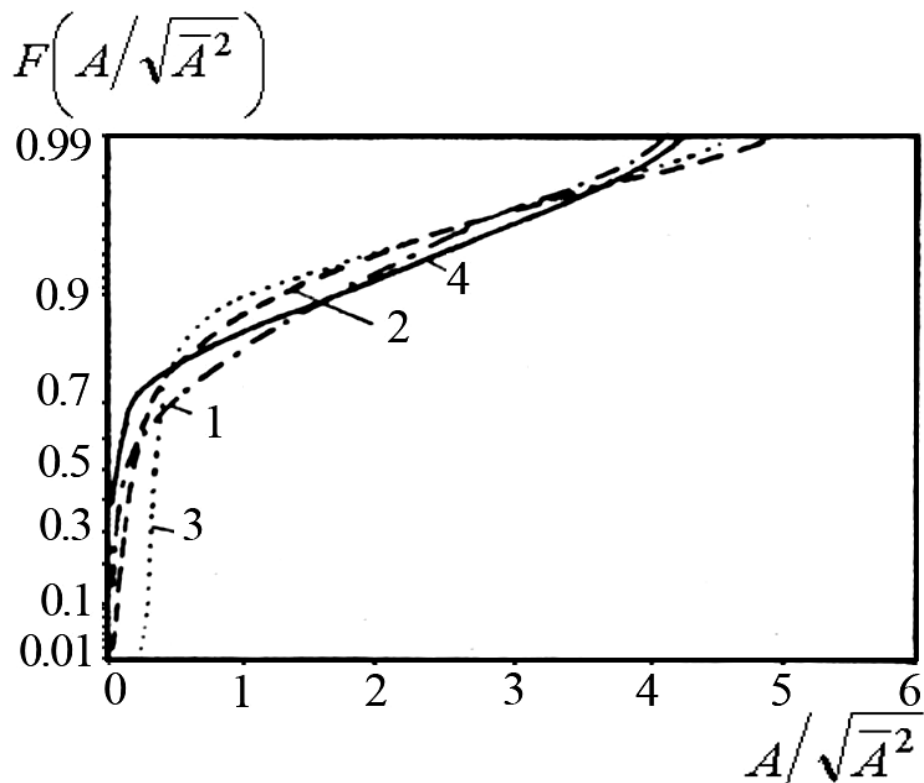


Рис. 4.1. Функції розподілу амплітуди сигналу, відбитого ділянками земної поверхні: 1 пагорб з трав'яним покриттям; 2 зона забудови будинками; 3 сільгоспугіддя з посадками; 4 лісовий масив.

Вони побудовані в масштабі, що лінеаризує релеєвський закон розподілу. Амплітуди розсіяних сигналів нормувалися на величину, рівну кореню квадратному із середньої інтенсивності. Для всіх ділянок місцевості спостерігається суттєві відхилення експериментальних законів розподілу від закону Релея. Вони мають більш високу ймовірність появи великих значень. Для опису розподілу амплітуди A завад від суші в межах досить однорідних ділянок можна використовувати двокомпонентну модель, раніше використовувалася для опису завад від моря [87]. При цьому під сплесками будуть розумітися відбиття від тих ділянок місцевості, ЕПР яких істотно вище середньої, а під паузами, відповідно, де вона нижче середнього рівня [50]. Якщо припустити, що в кожному з фазових станів (сплеск, пауза) флуктуації амплітуд розсіяних сигналів описуються законом Релея, то функція розподілу флуктуації

амплітуди відбитого ділянкою місцевості сигналу, як видно зі співвідношення (4.1), буде описуватися зіставним релеєвським законом розподілу:

$$p(A) = (1 - P) \frac{A}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_0^2}\right) + P \frac{A}{\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (4.6)$$

де P - імовірність сплеску, σ_0^2 , σ_1^2 - інтенсивність пауз і сплесків і їхнє відношення $\gamma^2 = \sigma_1^2 / \sigma_0^2$, яке характеризує ступінь негаусовості процесу.

Для такої апроксимації визначені ймовірності наявності сплесків в їх радіолокаційному зображенні P і відношення інтенсивностей сигналів при сплесках і паузах γ^2 (табл. Д. 3.)

Незважаючи на різнотипність досліджуваних ділянок, спостерігається стійкість значень ймовірностей наявності в них зон з високою інтенсивністю відбитого сигналу (викидів завади) і відношення високоінтенсивної і малоінтенсивної компонент в розсіяному сигналі. Найбільший перепад інтенсивностей компонент спостерігається для ділянок, забудованих будинками (до 30 дБ). Для лісового масиву з ділянками луки, пагорба з травостоем, сільгоспугідь з зонами посадок перепад інтенсивностей становить 23 ... 27 дБ. Імовірність наявності в межах однотипної ділянки зон інтенсивного відбиття сигналу становить від 0,15 до 0,3.

Опис просторової неоднорідності різних типів земної поверхні заснований на визначенні ймовірностей існування ділянок із заданою ЕПР, а також проміжків між ними. Інтегральні розподіли розмірів відбиваючих ділянок за дальністю і проміжків між ними для різних типів місцевості наведені на рис. Д.5. Значення нормованої величини порогу Π , отримані для змінюваного порогу від 0 дБ до 12 дБ ($\Pi / (\overline{A^2})^{0,5} = 1, 2, 3, 4$) відносно

середнього рівня сигналу. Їх аналіз показує, що збільшення порогу призводить до зменшення розмірів відбиваючих ділянок і зростанню відстаней між ними.

За характером поведінки можна відзначити, що функції розподілу відбиваючих ділянок для луки, зони забудови і поля можуть описуватися експоненціальним законом. Двовимірні функції розподілу розмірів $p(x_i, y_i)$ відбиваючих ділянок і відстаней між ними, припускаючи статистичну незалежність характерних розмірів, можна описати експонентними функціями:

$$p(x_i, y_i) = p(x_i)p(y_i); p(x) = \frac{1}{\bar{x}_1} \exp\left(-\frac{x_1}{\bar{x}_1}\right); p(y_1) = \frac{1}{\bar{y}_1} \exp\left(-\frac{y_1}{\bar{y}_1}\right), \quad (4.7)$$

де \bar{x}_i, \bar{y}_i - характерні розміри ділянок відбиття $i=1$ і інтервалів між ними $i=0$ по азимуту x_i і дальності y_i .

Розміри відбиваючих областей різних типів місцевості для рівнів забезпеченості 0,5 і 0,9 приведені в табл. Д 4. При рівні забезпеченості 0,5 (медіанне значення) розміри відбиваючих зон становлять 50 ... 80 м для лісового масиву з лугом, зони забудови, пагорба з травостоєм і 20 ... 40 м для сільгоспугідь, обмежених посадками. Медіанне значення розмірів між відбиваючими областями істотно перевищують характерні розміри самих областей і складають сотні метрів. При цьому з 90% забезпеченістю вони не перевищують 1 ... 2 км. Збільшення класифікаційного порога призводить до зменшення характерних розмірів відбиваючих ділянок і збільшення дистанції між ними.

З використанням співвідношень (4.7) і результатів наведених в табл. Д.4 можна оцінити характерні розміри \bar{x}_i відбиваючих ділянок і відстаней між ними для різних типів місцевостей при апроксимації розподілу їх розмірів експоненційною функцією:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i(P)}{\ln(1-P)}, \quad (4.8)$$

де $x_i(P)$ - розмір відбиваючої області $i=1$ і інтервалів між ними $i=0$ при рівні забезпеченості P . Результати отриманих оцінок наведені в табл. Д.5.

Слід відзначити, що для кожного з типів місцевості існує оптимальний класифікаційний поріг при вирішенні задачі розпізнавання сплеск / пауза, що залежить від співвідношення дисперсій компонент в цих фазових станах. Повна імовірність помилки при описі процесу в кожному з фазових станів законом Релея з урахуванням виразу (4.6) визначиться:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \text{Вер}(A \geq \Pi | H \in H_0) + \text{Вер}(A \leq \Pi | H \in H_1) = \\ &= (1-P) \exp\left(-\frac{\Pi^2}{2\sigma_0^2}\right) + P \left(1 - \exp\left(-\frac{\Pi^2}{2\sigma_1^2}\right)\right). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Тобто помилка буде виникати в ситуаціях, коли пауза буде класифікована, як сплеск, а сплеск, як пауза. Тоді з виразу (4.9) можна отримати умову для мінімізації повної помилки класифікації:

$$\frac{\partial P_{out}}{\partial \Pi} = 0. \quad (4.10)$$

Звідки отримуємо:

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{2 \ln\left(\gamma^2 \frac{(1-P)}{P}\right)}{\frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2}}}, \quad (4.11)$$

$$\text{де } \xi_{opt} = \frac{\Pi}{\sigma_0}, \text{ а } \gamma^2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2}$$

Поріг при нормуванні на середньоквадратичне значення процесу в цілому

$$\xi_{opt}^* = \frac{\Pi}{\sigma_\Sigma} \text{ визначиться з урахуванням виразу (4.1) як:}$$

$$\begin{aligned} \xi_{opt}^* &= \frac{\Pi}{\sigma_\Sigma} = \left(\frac{\xi_{opt}}{\sqrt{(1-P) + P\gamma^2}} \right) = \\ &= \sqrt{\frac{2 \ln \left(\gamma^2 \frac{(1-P)}{P} \right)}{\frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2}}} \frac{1}{\sqrt{(1-P) + P\gamma^2}}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

На рис. 4.2 наведені значення оптимальних порогів, які мінімізують повну імовірність помилки рішення класифікаційної задачі при нормуванні на дисперсію пауз рис. 4.2 а або повну дисперсію процесу рис. 4.2 б.

Видно (рис. 4.2 б), що вибір порога $\Pi / (\overline{A^2})^{0,5} = 1 \dots 2$ від середнього значення інтенсивності є оптимальним при співвідношеннях інтенсивностей компонент від 10 ... 30 дБ і ймовірностей викидів 0,1 ... 0,4, які і мали місце при експериментах.

Приклади просторових спектрів, їх апроксимацій і кореляційних функцій для різних типів місцевості наведені на рис. 4.3. Найбільші просторові радіуси кореляції характерні для лісового масиву (рис. 4.3 б). Для зони забудови, поля і луки характерна істотно більш вузька просторова кореляція (рис. 4.3 б).

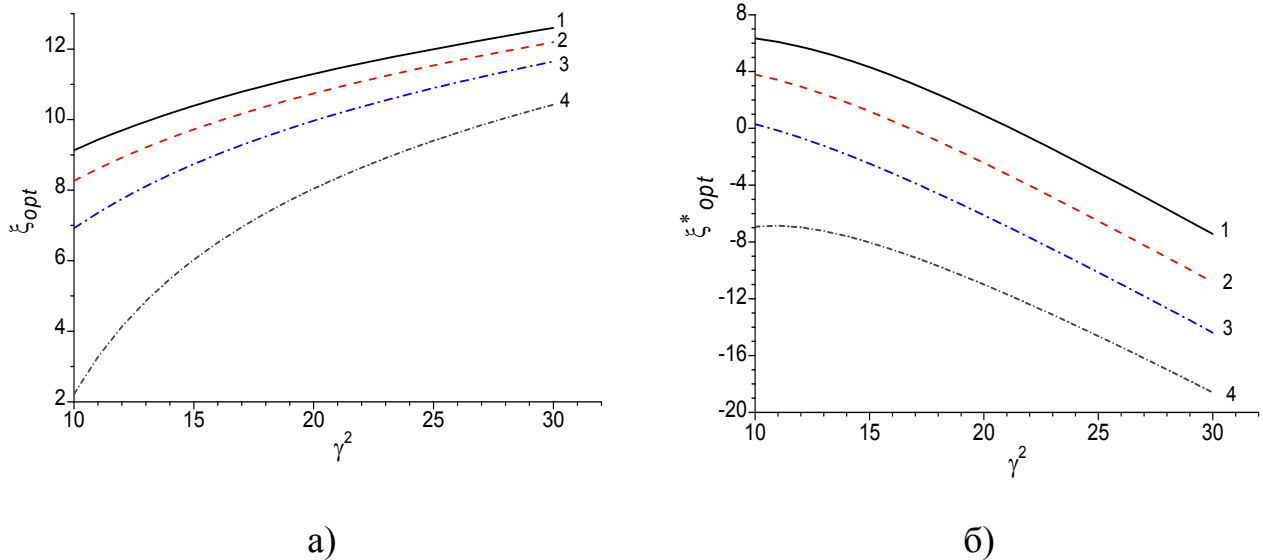


Рис. 4.2. Залежність оптимального порогу від співвідношення інтенсивностей компонент і ймовірностей викидів: а- нормування порогу на дисперсію пауз ξ_{opt} ; б - нормування порогу на сумарну дисперсію ξ^*_{opt} (1 P = 0,1, 2 P = 0,2, 3 P = 0,4, 4 P = 0,8)

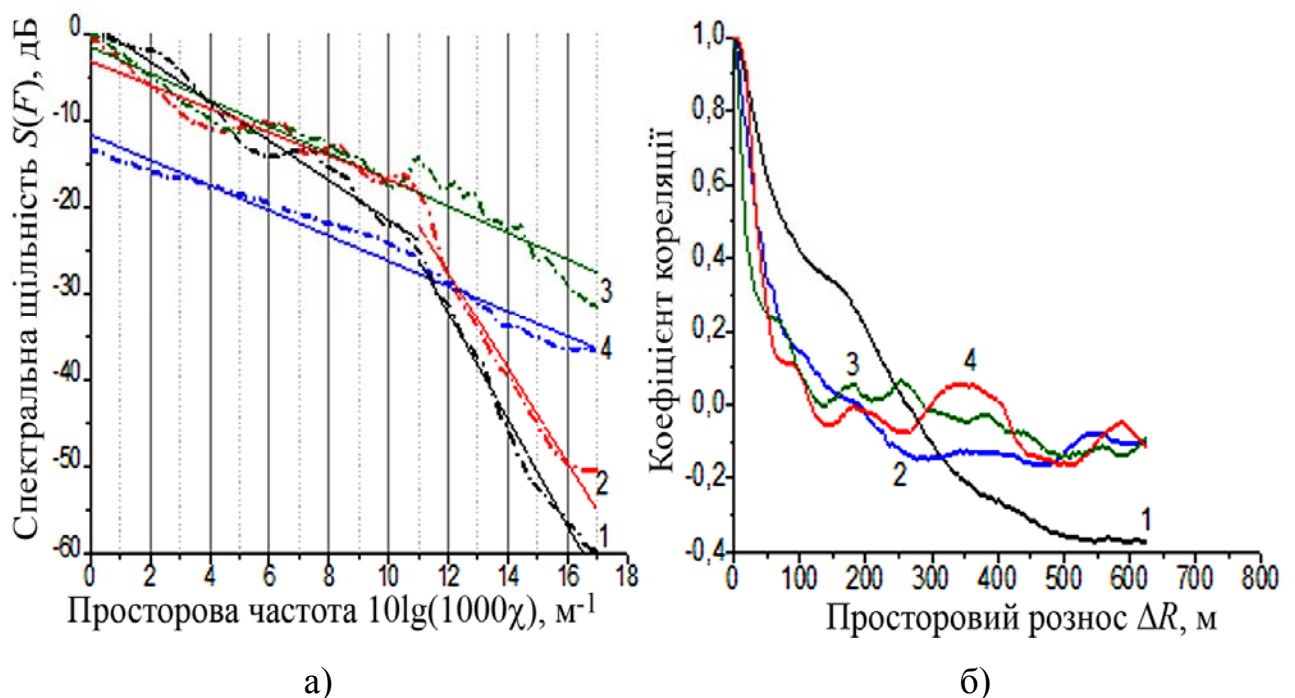


Рис. 4.3. Спектри і кореляційні функції відбиттів від лісу і зони забудови: а) спектри; б) кореляційні функції; 1 - лісовий масив; 2 - зона забудови; 3 - поле; 4 - луг.

Інтервали кореляції для різних типів місцевості наведені в табл. Д.4 і на половинному рівні $R(\Delta r) = 0,5$ вони не перевищують сотні метрів. Просторові спектри відбиття від місцевості, як видно з рис. 4.3 а задовільно описуються статечними функціями виду

$$S(\chi) = S_0 \left(1 + \left(\frac{\chi}{\Delta\chi} \right)^n \right)^{-1}, \quad (4.13)$$

де S_0 - спектральна щільність на нульових частотах, а $\Delta\chi$ - ширина просторового спектра, а n - характеризує швидкість зменшення спектральної щільності.

Для всіх спектрів, як видно з рис. 4.3, характерна наявність областей просторових частот з більш високими, ніж по (4.13) значеннями спектральної щільності. Це означає, що просторові неоднорідності з такими розмірами зустрічаються для даного типу місцевості частіше, ніж це впливає з моделі фрактального спектру [94].

Для зон забудови будинками і лісового масиву можна виділити ділянки спектра, що мають різний нахил - рис.4.3. Це означає, що всередині цих зон можуть бути присутніми ділянки з різними характерними масштабами неоднорідностей. Як видно зі співвідношення (4.1) при цьому результуючий спектр є суперпозицією просторових спектрів ділянок, що мають різні просторові масштаби з вагами, які визначаються можливостями спостереження цих ділянок в межах досліджуваної зони. Результати апроксимації (4.13) просторових спектрів для різних типів місцевостей наведені в табл. Д.6.

Слід зазначити, що практично для всіх типів місцевості в низькочастотній області просторових чисел швидкість убутання спектральної щільності приблизно така ж або трохи менше, ніж спектра експоненційної кореляційної

функції. У високочастотній області для лісового масиву і зони забудови вона приблизно в 3 ... 3,5 рази більше.

Виявлення сигналів на фоні нестационарних негаусових завад від підстильної поверхні. Розглядаючи завдання виявлення сигналів на фоні нестационарних завад, що описуються вкладеними напівмарковськими процесами нами було показано [51], що при негаусовій заваді необхідні більші співвідношення сигнал/завада, ніж при гаусовій, тобто з'являються додаткові втрати в співвідношенні сигнал/завада через негаусовість. Їх величина, в разі опису завади двохфазовою моделлю (сигнал складається тільки з сплесків і пауз) при заданих ймовірностях правильного виявлення D і хибної тривоги F і співвідношеннях, $F \leq P_0$, $1 - D \leq P_0$, тобто, коли величини заданої ймовірності хибної тривоги і не виявлення сигналу істотно менше ймовірності сплеску завади P_0 визначається [51]:

$$Z \approx \frac{\gamma \Phi^{-1}(1-F)}{\nu \Phi^{-1}\left(1 - \frac{F}{P_0}\right)} \approx A_q, \quad F \leq P_0, \quad 1 - D \leq P_0. \quad (4.14 \text{ а})$$

де $Z = z_{0H}/z_{0Г}$ і $A_q = q_H/q_G$ (відношення порогів і параметрів виявлення для негаусової і гаусової статистик завади),

$$\sigma_\Sigma = \sigma_0 \nu, \quad \gamma = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \quad \nu = \sqrt{1 + P_0(\gamma^2 - 1)}, \quad Z_0 = Z_0^* \nu, \quad q^* = q \nu; \quad (4.14 \text{ б})$$

а $\sigma_\Sigma, \sigma_1, \sigma_0$ - середньоквадратичні значення завади в цілому, а також при сплесках, паузах і їхнє відношення γ ;

Φ^{-1} - функція зворотна інтегралу ймовірностей.

Оскільки втрати в співвідношенні сигнал/завада $\Delta\mu$ [дБ] при виявленні пропорційні відношенню параметрів виявлення і порогів для завад з

негаусовою і гаусовою статистиками, то на підставі співвідношень (4.14) можна записати:

$$\Delta\mu[\text{дБ}] \approx \alpha_0 + L, \quad (4.15a)$$

$$L = 20 \lg \left(\frac{\gamma}{\nu} \right) \quad (4.15б)$$

$$\alpha_0 = 20 \lg \left(\frac{\Phi^{-1} \left(1 - \frac{F}{P_0} \right)}{\Phi^{-1}(1-F)} \right) \quad (4.15в)$$

З використанням співвідношень (4.15) оцінені втрати в співвідношенні сигнал/завада при виявленні в негаусових шумах - рис. Д.12.

Оскільки поправка α_0 [дБ] - рис. Д.12 а змінюється незначно (не більше ніж на 6 дБ) в широкому діапазоні зміни ймовірностей хибної тривоги (від 10^{-2} до 10^{-6}) і фінальних ймовірностей викидів (від 0,1 до 1), то основний внесок у втрати вносить другий член L , де основний вплив має параметр γ , який визначається відношенням середньоквадратичних значень компонент завади в кожному з фазових станів (сплесків і пауз) і характеризує ступінь негаусовості процесу. В цілому втрати від негаусовості для завади з рідкими інтенсивними викидами (4.15), можуть досягати 20 дБ.

Для суші, як видно з табл. Д.3, параметр негаусовості досягає 30 дБ, а фінальні ймовірності викидів 0,15. При цьому втрати в співвідношенні сигнал / завада через негаусовість можуть бути дуже значні (більше 10 дБ).

Для їх зниження, як було показано нами в роботі [51] необхідно використовувати адаптивні виявлювані з керованим порогом прийняття рішення, або застосовувати автоматичне регулювання порогу (АРП) по заваді. Крім того можна використовувати бланкування завади при її викидах. Це буде знижувати максимально досяжні ймовірності виявлення за рахунок пропуску

корисного сигналу при сплесках завади, одночасно істотно знижуючи імовірність помилкової тривоги, перешкоджаючи проходженню викидів завади на вихід пристрою. Крім того, застосування непараметричних методів виявлення (знакових і лінійних рангових виявлювачів) також дозволяє істотно знизити втрати в співвідношенні сигнал /завада обумовлені її негаусовістю.

Радіолокаційні характеристики ділянок місцевості з рослинним покривом в НВЧ діапазоні радіохвиль. Вивченню характеристик розсіювання міліметрових хвиль окремими ділянками рослинності під кутами, характерними для розміщення РТЗ на аерокосмічних носіях і розгляду моделей присвячені роботи [93- 97, 101, 102]. Великий матеріал за моделями розсіювання земними покривами міститься в монографії [103]. У цьому розділі розглянуто характеристики розсіювання при ковзних кутах. Для вивчення характеристик радіолокаційних відбиттів (ЕПР, спектрів) ділянок місцевості використовувалась когерентно-імпульсна РЛС з довжиною хвилі випромінювання 2 см. Антена розташовувалась на даху будівлі висотою близько 30 м [50]. Реєстрація прийнятих відбитих від місцевості сигналів здійснювалася як з виходів амплітудного, так і фазового детекторів РЛС. Вимірювання велися систематично, починаючи з ранньої весни і до осені, що дозволило встановити сезонні зміни в радіолокаційних характеристиках місцевості, покритої рослинністю. Схема розташування досліджуваних ділянок наведена на рис. Д.3, а зовнішній вигляд РЛС на рис. Д.1а. Ділянки відрізнялися рослинним покривом і рельєфом, а також різними кутами їх опромінення.

Для виявлення сезонних змін питомої ЕПР рослинного покриву і впливу на неї погодних умов (опадів, швидкості вітру), робилось її усереднення по всім дослідкам. На рис. 4.4 а представлені середні значення питомої ЕПР по кожному дню спостережень. На цьому малюнку відзначені три характерних періоди вегетації і середні значення σ^0 в ці періоди: 1 - відсутність листя на деревах і трави на ґрунті, 2 - інтенсивне наростання листяного і трав'яного покривів; 3 - період стабільного стану повністю розвиненого листяного і трав'яного покриву.

Можна відзначити, що поява листяного покриву і подальше наростання біомаси (травень початок червня) викликало збільшення питомої ЕПР приблизно на 5...7 дБ, після чого вона практично не змінювалася до глибокої осені, коли внаслідок скидання вологи листям і опадання листяного покриву їх ЕПР знову знижувалася.

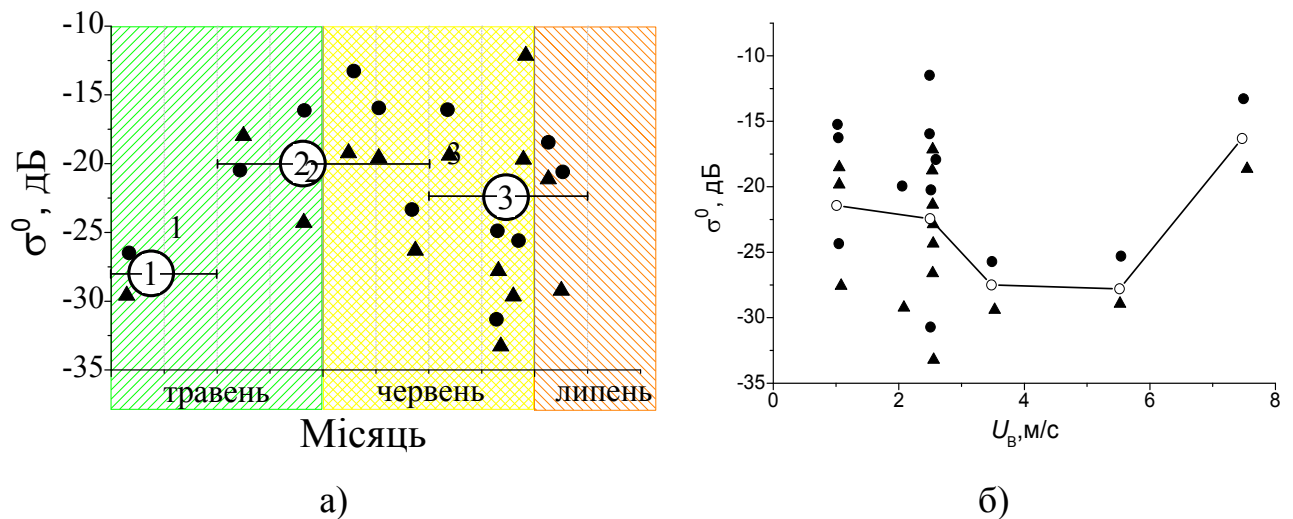


Рис. 4.4. Питома ЕПР ділянок суші, покритих рослинністю: а) сезонна зміна ПЕПР; 1 - відсутність листя і трави; 2 наростання біомаси; 3 - період стабільного стану біомаси, режим роботи РЛС: ▲- когерентний; ●- некогерентний; б) ПЕПР ділянок суші з рослинністю при різних швидкостях вітру.

Досліджено зміну вологості листя у весняно-літньо-осінній сезони (ілюструє рис. Д.6). Для ялини вологість трохи нижче, ніж для листяних порід дерев. Це узгоджується з результатами сезонних вимірювань вмісту вільної води в хвої [104] - рис. Д.7.

Вивчення [105] динаміки хлорофілового індексу і кількості біомаси в трав'янистих рослинах - рис. Д.8 дозволило встановити, що для трав'янистих рослин посилення накопичення хлорофілу в листі відбувається в перехідний до репродуктивної фази період, а максимальний його зміст - у фазі цвітіння. Хлорофіловий індекс пов'язаний з температурою у липні і комплексним індексом зволоження регресійним рівнянням [104, 105]. Загальний вміст

біомаси максимальний до початку серпня. Для опису процесу наростання біомаси в період вегетації можна використовувати фінітні атомарні функції Кравченко [91, 157].

На рис. 4.4 б представлені усереднені в межах кожної з серій дослідів питомі ЕПР, отримані при різних швидкостях вітру. Там же кружечками показані середні по серіях дослідів з однаковими швидкостями вітру значення питомої ЕПР; горизонтальні лінії з рисками показують межі зміни швидкості вітру під час дослідів. Видно, що швидкість вітру практично не впливає на ЕПР рослинності. Зате вона значно впливає на ширину спектра. На рис. 4.5 а наведені значення середньої по кожному з днів вимірювань ширини спектра відбитого від рослинності сигналу з виходів амплітудного і синхронного детекторів. На цьому ж малюнку пунктиром нанесена очікувана ширина спектра відбитого сигналу за даними роботи [106]. Як видно, вона задовільно описує поведінку ширини спектра при швидкостях вітру понад 3 м/с. Для менших швидкостей вітру експериментально спостережувані значення значно більші, ніж передбачаються [106].

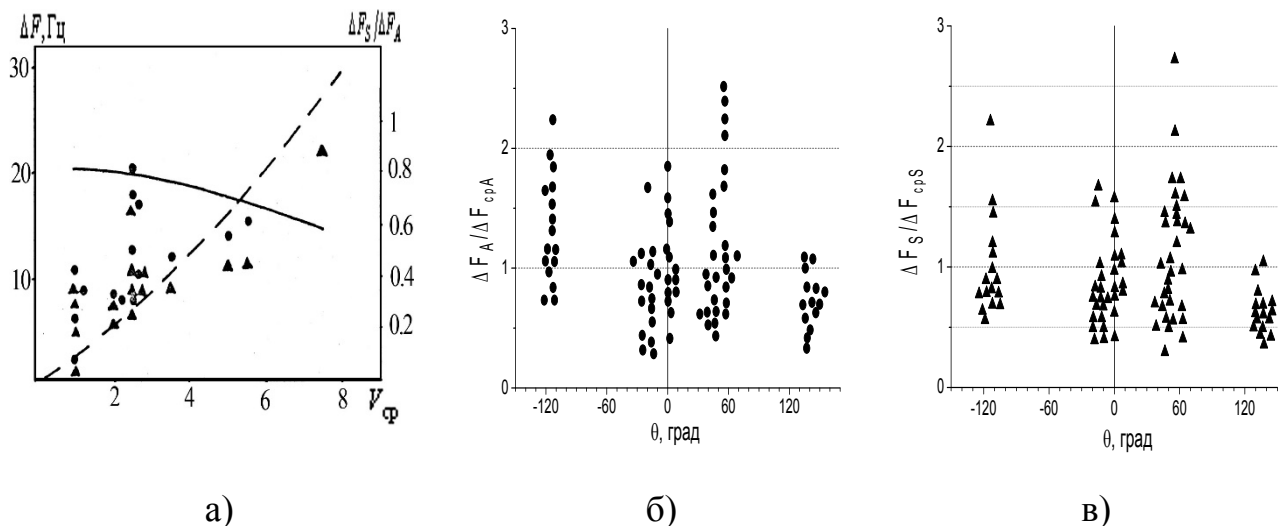


Рис. 4.5. Вплив швидкості вітру і азимута опромінення поверхні на ширину спектра розсіяного рослинністю сигналу: а) - ширина спектра від швидкості вітру: \blacktriangle - доплеровській спектр; \bullet - амплітудний спектр; б) - ширина амплітудного спектра від азимута; в) - ширина доплерівського спектра від азимута.

Ширина спектра відбитого від рослинності сигналу з виходу синхронного детектора менша, ніж з виходу амплітудного детектора. Залежність відношення ширини спектра на вході синхронного детектора ΔF_S до ширини спектра на виході амплітудного детектора ΔF_A від швидкості вітру показана на рис. 4.5 а суцільною лінією. Видно, що в міру посилення вітру від 1 до 7 м/с це відношення знижується з 0,8 до 0,6.

Рис. 4.5 б, в, ілюструє вплив азимутального кута опромінення на ширину спектра розсіяного сигналу з виходів амплітудного і синхронного детекторів відповідно. Вони нормовані на середнє значення ширини спектра по дослідом протягом дня. Це дозволило усунути вплив на значення ширини швидкості вітру. Оскільки при цьому не робилося відмінностей між даними, отриманими при різних напрямках вітру, то наведені залежності дозволяють простежити вплив оточуючого досліджувану ділянку рельєфу місцевості на ширину спектра розсіяного сигналу. Видно, наприклад, що для соснового лісу (точка 8 азимут близько 124° - рис. Д.3), розташованого в низині, ширина спектра завжди менша і складала приблизно 60% від середньої по дослідженню.

Найбільш широкосмугові спектри сигналів, відбитих від рослинності, розташованої на підвищених ділянках місцевості (точки 2, 3, 7 - азимутальні кути 43° , 52° , -108° рис.Д3). При цьому перепади в ширині спектра відбитого сигналу, пов'язані з особливостями рельєфу поверхні, становлять приблизно 2 ... 2,5 рази. Таким же чином впливає зміна напрямку вітру на ширину спектра відбитого сигналу. Ширина спектра відбиттів від ділянок з рослинністю, що знаходяться з навітряного боку - найбільша. У ділянок з підвітряного боку - найменша - рис. 4.6 а.

Швидкість вітру для відібраних дослідів приблизно однакова і становила 2 ... 5 м/с. На цьому ж рисунку стрілками позначено зустрічний для ділянки поверхні напрямок вітру. Видно, що ширина спектра відбиття від місцевості, покритої рослинністю, може змінюватися в 2 ... 3 рази з - за зміни напрямку вітру.

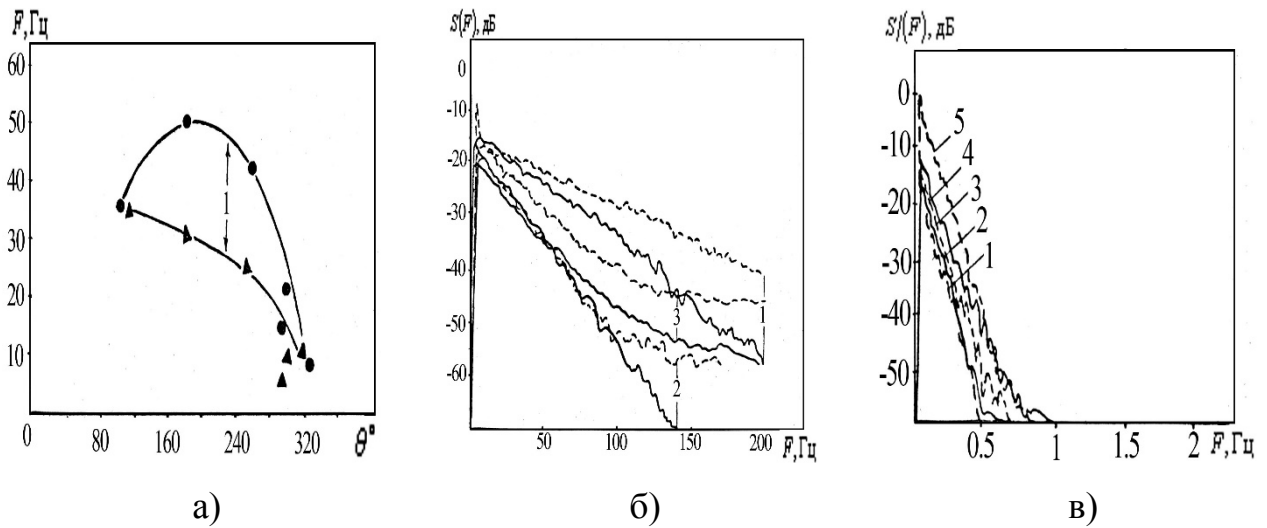


Рис. 4.6. Вплив швидкості вітру і азимута опромінення на спектри розсіяних рослинністю сигналів: а) - ширина спектра для пагорба з травостоем; ▲ - доплерівській спектр; ● - амплітудний спектр; б) - спектри відбиття від рослинності: — амплітудний --- доплерівський; $\Delta\theta = 0^\circ$, 1 - $V_B = 7,5 \text{ м/с}$; 2 - $V_B = 2,5 \text{ м/с}$; $\Delta\theta = 45^\circ$, 3 - $V_B = 7,5 \text{ м/с}$; в) - спектр швидкостей вітру: 1 - $V_B = 1,5 \text{ м/с}$; 2 - $V_B = 2 \text{ м/с}$; 3 - $V_B = 3,5 \text{ м/с}$; 4 - $V_B = 5 \text{ м/с}$; 5 - $V_B = 7 \text{ м/с}$.

Форма спектра розсіяного рослинністю сигналу залежить від швидкості вітру і типу місцевості. В якості прикладу на рис. 4.6 б наведені спектри відбиття від місцевості з виходів синхронного і амплітудного детекторів. Вони отримані для рослинності, що знаходиться з навітряної сторони (криві 1, 2) і для того випадку, коли вітер був спрямований перпендикулярно цій ділянці місцевості (крива 3). Видно, що при посиленні вітру відбувається зростання спектральної щільності високочастотних компонент. На низьких частотах у багатьох спектрах сигналу з виходу синхронного детектора спостерігається сплеск на 2 ... 10 дБ спектральної щільності на низьких частотах, який може бути пов'язаний з відбиттям від стабільних розсіювачів (ствол, великі гілки). Форма спектрів в більшості випадків може описуватися однією з двох кривих апроксимації: експоненційною, або статечною. Причому слід зазначити, що при малих швидкостях вітру (до 3...4 м/с) кращі результати дає статечна апроксимація форми спектра, (криві 2 рис. 4.5 б), в той час як при великих швидкостях вітру кращі результати дає експоненціальна апроксимація. Однією з причин підйому хвостів спектрів на малих рівнях (-30 ... -40 дБ відносно

максимуму) може бути вплив шумів апаратури. Це може пояснювати таку поведінку спектра при малих швидкостях вітру.

У той же час, якщо ділянка поверхні опромінюється під значними кутами до напрямку вітру, тобто проекція вектора швидкості на напрям опромінення має невеликі значення, також доцільно для опису спектра відбитого сигналу використовувати статечні функції -криві 3 на рис. 4.6 б. Як правило, спектр сигналу з виходу амплітудного детектора має більшу ширину - рис. 4.6 а, і швидкість убутання спектральної щільності з частотою - рис. 4.6 б, ніж спектр з виходу синхронного детектора. Спектри флуктуацій швидкості вітру, отримані при обробці результатів реєстрації швидкості вітру інерційним анемометром метеостанції за формою близькі до експоненціальних (рис. 4.6 в). Цим, можливо, і обумовлена спостережувана в багатьох випадках експоненціальна форма спектра розсіяного місцевістю сигналу.

Характеристики розсіювання радіохвиль частинами рослин. Для вивчення розсіювання сантиметрових і міліметрових радіохвиль об'єктами рослинності, були проведені лабораторні експерименти по визначенню характеристик радіолокаційних відбиттів від фрагментів рослин, а також виміряні деякі електродинамічні параметри окремих елементів рослин (листя, трави). Експерименти проводилися на хвилях 10 см і 8 мм з використанням макетів вимірювальних РЛС безперервного випромінювання (рис. Д. 2) з технічними характеристиками наведеними у табл. Д.2. Зразки рослин обдувалися повітряним потоком зі швидкістю від 2 до 14 м/с. Реєструвалися відбиті сигнали вертикальної і горизонтальної поляризація на хвилі 8 мм, а також горизонтальної поляризації на хвилі 10 см в смузі від 4 Гц до 2 кГц. Опромінення зразків здійснювалося вертикально поляризованою хвилею. За зразками розміщувався радіопоглинаючий матеріал. На рис. 4.7 а, б показані залежності ширини спектра сигналу, відбитого на горизонтальній поляризації, від швидкості повітряного потоку при довжині хвилі опромінюючого поля 8 мм.

Ширина спектра ΔF відлічувалася за рівнем -3 дБ (рис. 4.7 а), і -10 дБ (рис. 4.7 б) від максимуму спектральної щільності і перераховувалася в еквівалентні швидкості переміщення розсіювачів по співвідношенню:

$$\Delta V = \frac{\lambda \Delta F}{2} \quad (4.16)$$

Аналіз отриманих даних (рис. 4.7 а, б) показує, що найбільша ширина спектра ΔV має місце при відбитті від сосни (крива 1). Для неї ж характерна і більш різка залежність від швидкості повітряного потоку. Розсіяні сигнали від берези (крива 2), осики (крива 4) і верби (крива 3) мають приблизно однакову ширину спектра і тенденцію зміни від швидкості вітру. Для ширини спектра відбиття від тополі (крива 5) характерна більш слабка залежність від швидкості вітру. Це пов'язано з тим, що листя тополі мають в середньому більші розміри (масу), велику жорсткість ніжки листа і в меншій мірі відчувають коливання під впливом вітру. Найбільш високочастотні коливання голок хвойних порід дерев, (що мають найменшу масу), що і проявляється в розширенні спектра розсіяного від них сигналу. Аналіз отриманих даних показує, що для кожного з типів рослинності існує певна швидкість вітру, починаючи з якої відбувається різке, зростання ширини спектра розсіяних сигналів. Для хвойних порід дерев вона становить 6 ... 8 м/с і 3 ... 5 м/с для листяних порід дерев. Зіставлення спектрів відбитих сигналів на поляризаціях узгодженій (вертикальна) і ортогональній (горизонтальна) випромінюванній (рис. 4.7 в) показує, що практично для всіх порід дерев спостерігається пропорційне їх розширення при збільшенні швидкості вітру.

Однак, якщо для листяних порід спектр розсіяного сигналу на ортогональній поляризації (горизонтальна) дещо ширше, ніж основній (вертикальна) приблизно на 10 ... 30% то для хвойних порід він більш вузький (на 10 ... 20%).

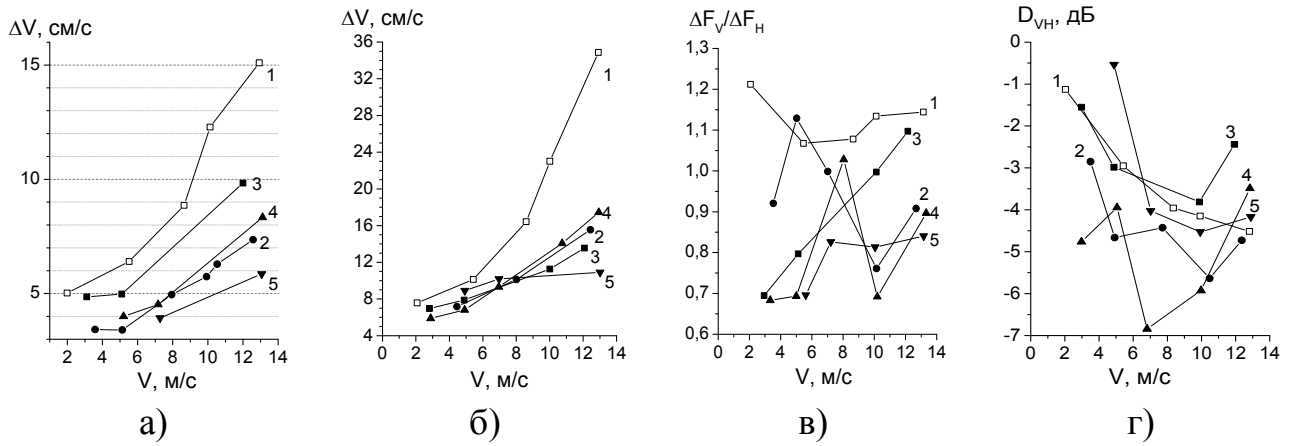


Рис. 4.7. Вплив швидкості вітру на ширину спектра і коефіцієнт деполаризації відбиттів від рослинності: 1 сосна; 2 береза; 3 верба, 4 осика; 5 тополя; а-ширина спектра ΔV за рівнем -3 дБ, б - ширина спектра ΔV за рівнем 10 дБ; в-відношення ширини спектрів за рівнем -3дБ для вертикальної і горизонтальної поляризацій ΔF .

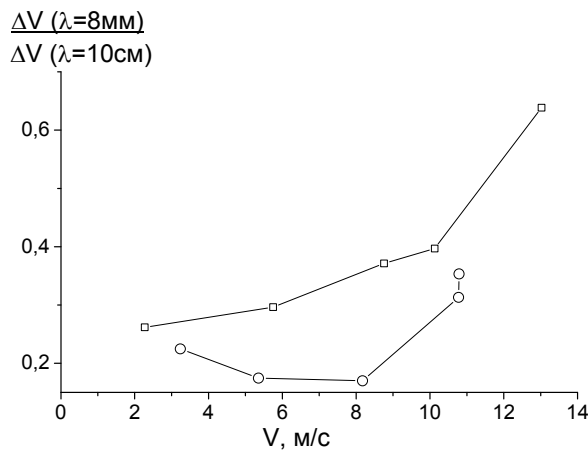


Рис. 4.8. Вплив швидкості вітру на ширину спектра: \square - сосна; \circ - береза.

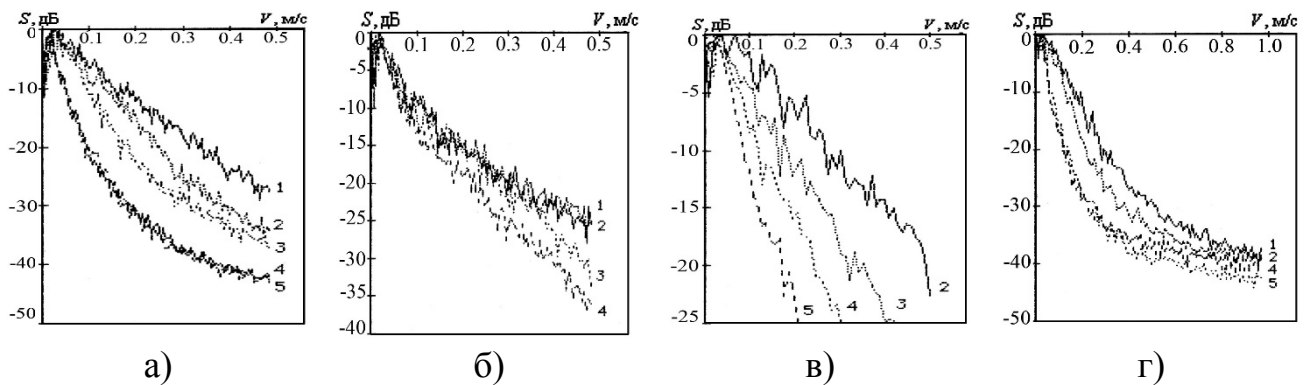


Рис. 4.9. Вплив швидкості вітру на спектр сигналу від фрагментів рослинності: 1- $V_B = 13$ м/с; 2- $V_B = 10$ м/с; 3- $V_B = 7$ м/с; 4- $V_B = 5$ м/с; 5- $V_B = 3$ м/с; а) - осика; б) - тополя; в) - сосна; г) - верба

Велика ширина спектра відбиттів на горизонтальній поляризації для листяних порід дерев і менша для хвойних порід, пов'язана з особливостями орієнтації і коливань елементів листяного і хвойного покривів. Якщо уявити елемент рослинності у вигляді двох схрещених вібраторів [68, 69]: горизонтального і вертикального, то більша ширина спектра на горизонтальній поляризації, в порівнянні з вертикальною, може пояснюватися більшою амплітудою переміщення горизонтального вібратора в порівнянні з вертикальним і зумовленими цим більшим індексом фазової модуляції розсіяного сигналу. Це і призводить до більшої ширини спектра розсіяного сигналу. Листя дерев роблять під впливом вітру складні переміщення. Крім коливань спільно з гілками дерева кожен лист коливається, як щодо точок кріплення до гілок, так і здійснює обертальний рух щодо ніжки листа. Іншими словами, кожен листок представляє собою складний вібратор, який здійснює коливання, як відносно ніжки листа, так в складі гілки і дерева в цілому. При цьому індекси фазової модуляції для кожного зі ступенів свободи можуть істотно відрізнятись. Це буде призводити до складної залежності параметрів спектра від довжини хвилі опромінюючого поля.

Деполаризація розсіяних рослинними покривами сигналів також залежить від швидкості вітру (рис. 4.7 г) причому зростання останньої призводить, як правило, до зменшення коефіцієнта деполаризації. Це пов'язано з тим, що при слабкому вітрі листя (голки хвойних порід) найбільш хаотично орієнтовані в просторі, що і призводить до найбільш сильної деполаризації розсіяного сигналу. Коефіцієнт деполаризації досягає величини $(-0,5 \dots - 2 \text{ дБ})$. При посиленні вітру починаючи зі швидкостей приблизно $6 \dots 8 \text{ м/с}$ коливання листя відбувається відносно середнього положення, в якому вітрове навантаження на лист мінімальне, і коефіцієнт деполаризації падає приблизно до $(-3 \dots - 6 \text{ дБ})$. В цілому, для розсіяного листяним покривом сигналу в міліметровому діапазоні хвиль характерна сильна деполаризація. Для оцінки впливу довжини хвилі випромінювання на ширину спектра відбитого рослинністю сигналу використовувалися дані, отримані на хвилях 10 см і 8 мм . Отримано залежність

відношення ширини спектрів сигналів, відбитих від гілок дерев, на хвилях 8 мм і 10 см (перерахованих в еквівалентні швидкості руху розсіювачів) від швидкості вітру при поляризації прийому, ортогональної випроміненої (рис. 4.8).

Наведені дані вказують на відсутність пропорційності ширини спектра розсіяного сигналу робочій частоті випромінювання. Це пов'язано з тим, що доплерівський спектр відбитого від рослинності сигналу формується не тільки за рахунок зворотно-поступального, а й обертального переміщення елементів рослинності. При цьому, якщо зворотно-поступальний рух листя з великою амплітудою призводить до пропорційного робочій частоті зміні доплерівського зсуву частоти (в короткохвильовій області), то їх коливання і обертання щодо точок кріплення до гілок при зміні довжини хвилі від порівнянної до істотно меншою розмірів листя такої зміни частоти можуть не давати.

Енергетичні спектри, розсіяних різними типами рослинності сигналів на хвилі 8 мм при поляризації прийому, узгодженій з випромінюваною, і різній швидкості повітряного потоку наведені на рис. 4.9.

Встановлено, що для всіх типів рослинності, вони можуть апроксимуватись до рівнів спектральної щільності (-30 ...- 40) дБ щодо максимуму лінійною або логарифмічною кривою, що підтверджує висновки робіт [106] про те, що спектри відбиття від рослинності описуються експоненціальною, або статечною залежностями:

$$S(F) = \begin{cases} \exp[-0.693(F / \Delta F)] \\ [1 + |F / \Delta F|^n]^{-1} \end{cases}, \quad (4.17)$$

де ΔF - ширина спектра відображень по половинній потужності.

Необхідно відзначити, що спектри розсіяного осикою і березою сигналів до швидкостей вітру 7 м/с краще описуються статечною залежністю з показником ступеня $n = 4$. При великих швидкостях краще результати дає експоненціальний опис форми спектра. Для хвойних дерев краще

використовувати при всіх швидкостях повітряного потоку експонентну функцію, в той час як для тополі і верби найкращі результати дає статична апроксимація з показником ступеня $n=3..4$. При збільшенні швидкості повітряного потоку відбувається зростання рівня спектральної щільності в високочастотній області спектра на 5 ... 15 дБ. Зміна інтенсивності розсіяного рослинністю сигналу в смузі від 4 Гц до 2 кГц на хвилях 8 мм і 10 см від швидкості вітру показано на рис. 4.10.

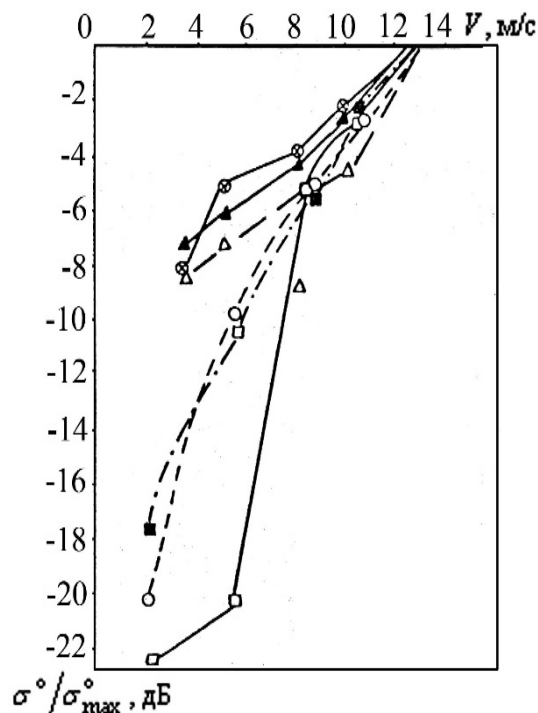


Рис. 4.10 - Вплив швидкості вітру на ЕПР рослинності на виході фільтра СРЦ з смугою 4 ... 2000 Гц: $\lambda = 8$ мм; ВП: ○ - сосна; ● - береза; ДП - ■ - сосна; ▲ - береза; $\lambda = 10$ см - □ - сосна; △ - береза.

Для хвойних порід дерев перепад інтенсивності досягає 20 дБ, для листяних - не перевищує 10 дБ. Вивчення деполаризації окремих спектральних компонент сигналів, розсіяних гілками дерев, за методикою, описаною в роботах [93-97], дозволило встановити, що коефіцієнт деполаризації має величину (-6 ± 3) дБ в енергійній області спектра завод і (-5 ± 4) дБ на його крилах. При цьому тенденції його зміни від швидкості вітру такі ж, як і у інтегрального коефіцієнта деполаризації.

Основний внесок у відбитий рослинними об'єктами сигнал, особливо, в його флюктуаційну компоненту вносять трава і листя дерев. Сумарний відбитий сигнал є результатом складання відбиттів від безлічі елементарних розсіювачів, і, отже, знаючи зміну властивостей останніх в залежності від сезону і метеоумов, можна передбачити зв'язок з цими факторами питомої ЕПР, спектрів флюктуацій і інших характеристик. Такий підхід до вивчення тим більше необхідний, що наявні в літературі дані, в основному, відносяться до великих кутів ковзання [93- 97, 101, 102], відповідним умовам спостереження з аерокосмічних носіїв. Без знання електродинамічних властивостей окремого елемента рослинності важко прогнозувати і ослаблення радіохвиль при їх проходженні через простір з рослинами. Щоб заповнити цю прогалину, були поставлені лабораторні експерименти по оцінці відбиття і ослаблення радіохвиль в діапазоні від 27 ГГц до 85 ГГц окремими елементами рослин при різному їхньому стані, в першу чергу, при різній вологості. Ці вимірювання можуть служити доповненням експериментів в натурних умовах [101, 102, 107, 108] і необхідні для створення моделі розсіювання рослинними покривами. Зразки листя різних порід дерев розміщувалися між прокладками з слюди, і з використанням панорамних вимірників КСХН міліметрового діапазону хвиль P2-65 (27 ... 37 ГГц) і P2-69 (53 ... 78 ГГц) вимірювалися коефіцієнти відбиття і поглинання хвиль міліметрового діапазону листям. Залежності коефіцієнта поглинання сигналу різними елементами рослин від вмісту вологи представлені на рис. 4.11 а.

З рис. 4.11 а видно, що найбільше загасання хвиль міліметрового діапазону викликають очерет, верба і тополя, а найменше - клен платановидний. Оскільки величина загасання навіть при проходженні через один лист становить 6 ... 10 дБ, то це дозволяє зробити висновок про те, що відбиття від цілей, розташованих за зоною рослинності, будуть значною мірою ослаблені. У міру висихання листяного покриву в осінній період загасання при проходженні через окремий лист знижується до 0,5 ... 1 дБ. Залежність коефіцієнта

віддзеркалення від вологості листа представлена на рис. 4.11 б. Слід зазначити, що при початковій вологості 50 ... 70% найбільші коефіцієнти відбиття для листа очерету, тополі і верби (приблизно -3,5 ... -5 дБ) і найменші (близько -6 дБ) для тополі.

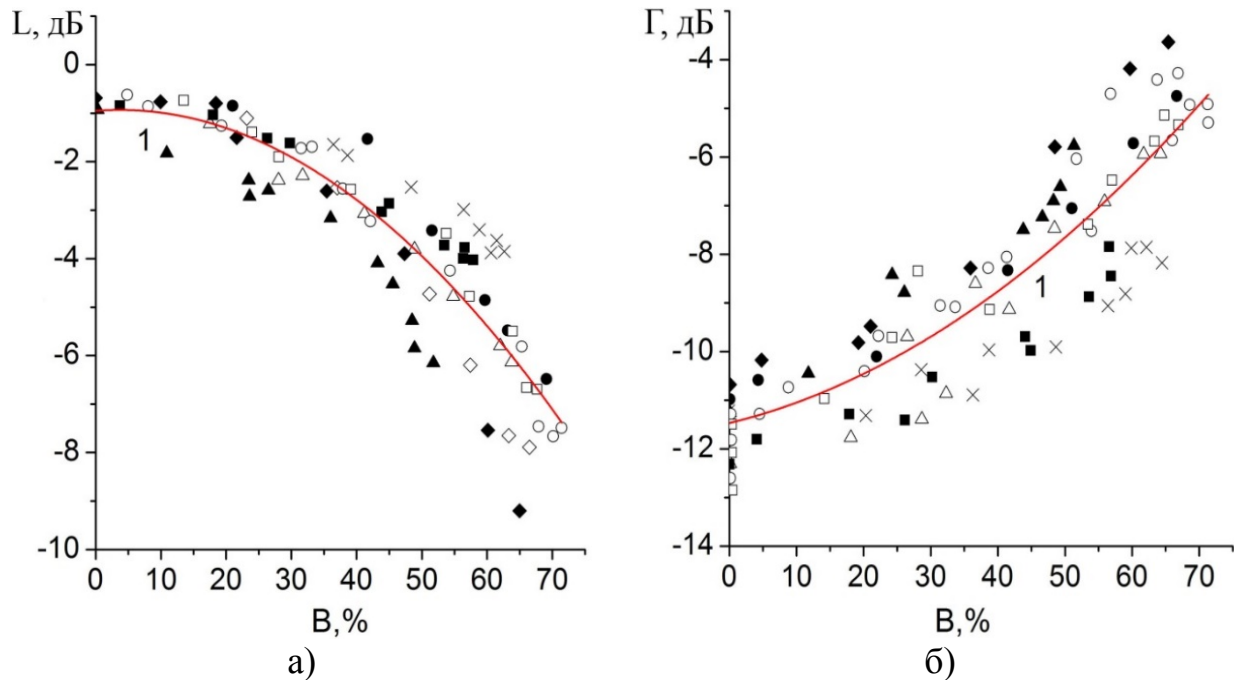


Рис. 4.11. Загасання і коефіцієнти відбиття від листа дерев і трави в залежності від вологості: 27ГГц ... 85ГГц; \triangle - осика; \circ - верба; \bullet - трава; \blacktriangle - береза; \blacklozenge - очерет; \diamond - тополя; \square - клен; \blacksquare - дуб; \times - клен платановидний; а) коефіцієнт загасання L , б) коефіцієнт відбиття Γ .

По мірі зменшення вологості листа знижувалася і величина відбитого сигналу, досягаючи для сухого листа -11 ... -13 дБ.

Для практичних оцінок коефіцієнтів загасання і відбиття в залежності від вологості B можна скористатися емпіричними співвідношеннями:

$$\Gamma[\partial B] = -\Gamma_0[\partial B] + \beta_{1\Gamma}B + \beta_{2\Gamma}B^2; \Gamma = \Gamma_0 \exp(\alpha_{1\Gamma}B + \alpha_{2\Gamma}B^2),$$

$$L[\partial B] = -L_0[\partial B] + \beta_{1L}B + \beta_{2L}B^2; L = L_0 \exp(\alpha_{1L}B + \alpha_{2L}B^2) \quad , \quad (4.18)$$

де $\alpha_{ij} = 0,1151 * \beta_{ij}$, $i \in 0,1$, $j \in \Gamma, L$.

В табл. Д.7 наведені результати апроксимації експериментальних даних емпіричними залежностями (4.18), а також одержувані при цьому середньоквадратичні помилки $\sigma_{\beta_1}, \sigma_{\beta_2}$.

Розглянемо емпіричні моделі опису ПЕПР рослинного покриву. Питома ЕПР рослинного покриву буде залежати від декількох співмножників:

$$\sigma^0 = \alpha_0 \gamma_0 \Gamma_{\Sigma} L_{\Sigma}, \quad (4.19)$$

де $\Gamma_{\Sigma}, L_{\Sigma}$ - інтегральні коефіцієнти відбиття від листяного покриву і загасання при поширенні через нього, а коефіцієнти α_0 і γ_0 враховують, яка частина розсіяного рослинністю сигналу відбивається в напрямку до РЛС, а також щільність заповнення рослинним покривом елемента розділу. Коефіцієнт α_0 становить приблизно 1/6, а γ_0 може змінюватися в широких межах від приблизно 5% до 100%. Для оцінки відбиття і загасання від листяного покриву будемо вважати, що він еквівалентний багат шаровому середовищу, кожен з шарів якого дає загасання і відбиття таке ж, як окремий лист.

Тоді інтегральний коефіцієнт відбиття від листяного покриву, з урахуванням багаторазового розсіювання визначиться як

$$\Gamma_{\Sigma} = \sum_{m=1}^{\infty} \Gamma^m \approx \frac{\Gamma}{1-\Gamma}, \quad (4.20a)$$

а інтегральний коефіцієнт загасання при поширенні через листяний покрив, що складається з багатьох шарів,

$$L_{\Sigma} = \sum_{m=0}^{\infty} L^{2m} \approx \frac{1}{1-L^2}, \text{ при } L \leq 1 \quad (4.20б)$$

Із співвідношень (4.19, 4.20) видно, що в разі сильного загасання в весняно-літній період, тобто коли листя насичені вологою, УЕПР визначається розсіюванням від поверхневого шару листя, в той час як восени, при малих загасання, внесок в ПЕПР можуть давати і розсіювання від глибших шарів листя. З використанням співвідношень (4.18-4.20) отримані оцінки ПЕПР рослинності від вологості - рис. 4.12. Коефіцієнт заповнення γ_0 при розрахунку покладался рівним 100%.

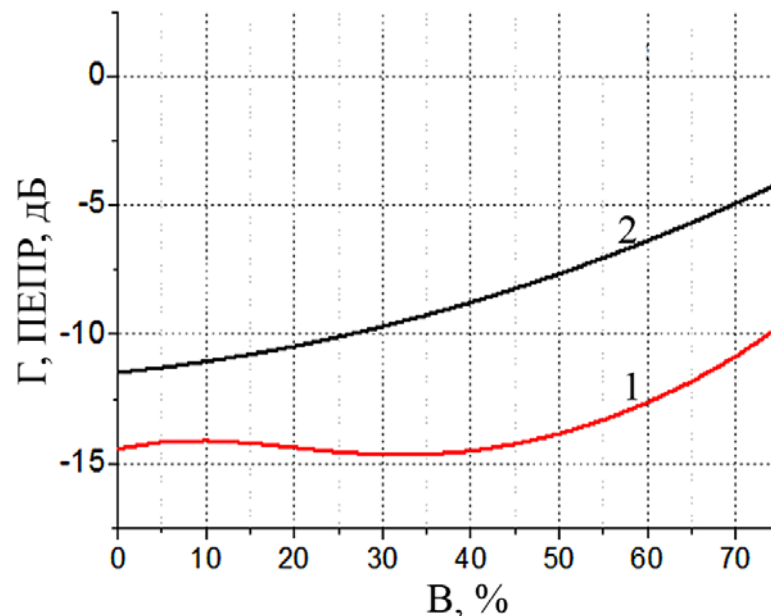


Рис. 4.12. Залежності ПЕПР-1 та коефіцієнта відбиття-2 рослинності від вологості.

На цьому ж рисунку наведені значення коефіцієнта відбиття. Видно, що наявність двох конкуруючих механізмів (зниження загасання і коефіцієнта відбиття при зменшенні вологості при яких в процес розсіювання залучаються не тільки поверхневі але і більш глибокі шари листя призводить до зниження діапазону зміни ПЕПР. Якщо для коефіцієнта відбиття при зміні вологості

перепад може становити 8...9 дБ, то для ПЕПР він близько 5 ... 6 дБ, що узгоджується з експериментальними даними.

4.2. Завади активно-пасивних систем радіолокації, що створюються випромінюваннями мовних станцій КХ і УКХ діапазонів

Останнім часом все більший інтерес викликають активно - пасивні системи, що використовують випромінювання існуючих радіотехнічних систем, як наземного, так і космічного базування для вирішення завдань радіолокації. Так в роботах Ю.М. Седишева і його учнів [24, 110] розглянуті можливості використання для цих цілей випромінювань телевізійних центрів. Аналізувалися можливості застосування мовних станцій УКХ [111]. Але найбільш цікавим і перспективним, на наш погляд, є використання для підсвічування повітряної обстановки випромінювань мовних станцій КХ діапазону, що працюють іоносферною хвилею. Вперше експериментальне підтвердження ця ідея отримала в роботах [112- 116]. Для розробки алгоритмів виділення розсіяних об'єктами сигналів мовних станцій необхідне знання статистичних характеристик полів підсвічування (спектральної щільності, їх законів розподілу, добової і сезонної поведінки), які виступають в ролі завади корисним сигналам вторинного розсіяного від об'єктів поля. Викладу деяких з цих питань і присвячений цей розділ.

Апаратура і методика експериментів. У якості завад активно-пасивним системам, що використовують для підсвічування обстановки сигнали мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, виступають спектральні компоненти переданих інформаційних повідомлень в доплерівських смугах частот, відбитих від об'єктів сигналів. При швидкостях руху об'єктів до 2500 км/год., як легко бачити, доплерівські зсуви частоти для хвиль КХ діапазону 10 ... 30 м становитимуть:

$$F_D = \frac{2V}{\lambda} \quad (4.21)$$

- близько 140 Гц на хвилі 10 м і менш 50 Гц на хвилі 30 м.

Таким чином, в КХ діапазоні доплерівські частоти відбиттів від повітряних об'єктів, навіть сучасних винищувачів, будуть лежати в діапазоні частот до інформаційного сигналу мовної станції, які починаються приблизно зі 100 Гц. У той же час в діапазоні УКХ мовлення (довжина хвилі близько 3 ... 4 м) корисні сигнали швидкісних об'єктів можуть знаходитись в діапазоні частот мовлення, який і буде виступати в ролі завади, перешкоджаючи виявленню відбитих вторинних сигналів від об'єктів. Тому надзвичайно важливим є вивчення статистик (спектрів, законів розподілу, числових характеристик і їх поведінки протягом доби) для сигналів підсвічування, в якості яких виступають випромінювання мовних станцій в діапазонах виявлення вторинних відбиттів від об'єктів.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався всехвильовий радіоприймач DEGEN DE-1127 виробництва КНР - рис. Д.9. Основні технічні характеристики радіоприймача наведені в табл. Д.8. Сигнали, з виходу амплітудного детектора для КХ діапазону і частотного для УКХ діапазону записувалися в форматах mp3 і wav, а потім використовувалися для оцінки спектрів і розподілів потужності випромінюваного станціями сигналу по діапазону частот поблизу несучої. Частота дискретизації становила 8 кГц.

Експериментальні дослідження з приймачем DEGEN. З використанням приймача були проведені експериментальні дослідження сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, які працюють іоносферною (заобрійні) і поверхневою (в межах прямої видимості) хвилями на різних частотах і в різний час доби. Перелік станцій і їх технічні характеристики наведені в табл. Д.9. Спектри мовних станцій КХ діапазону, отримані при різних форматах запису наведені на рис. 4.13а, б, а спектри, нормовані на повну потужність інформаційного сигналу (4.22) при розрізненні по частоті 8 Гц (рис. 4.13 в, г):

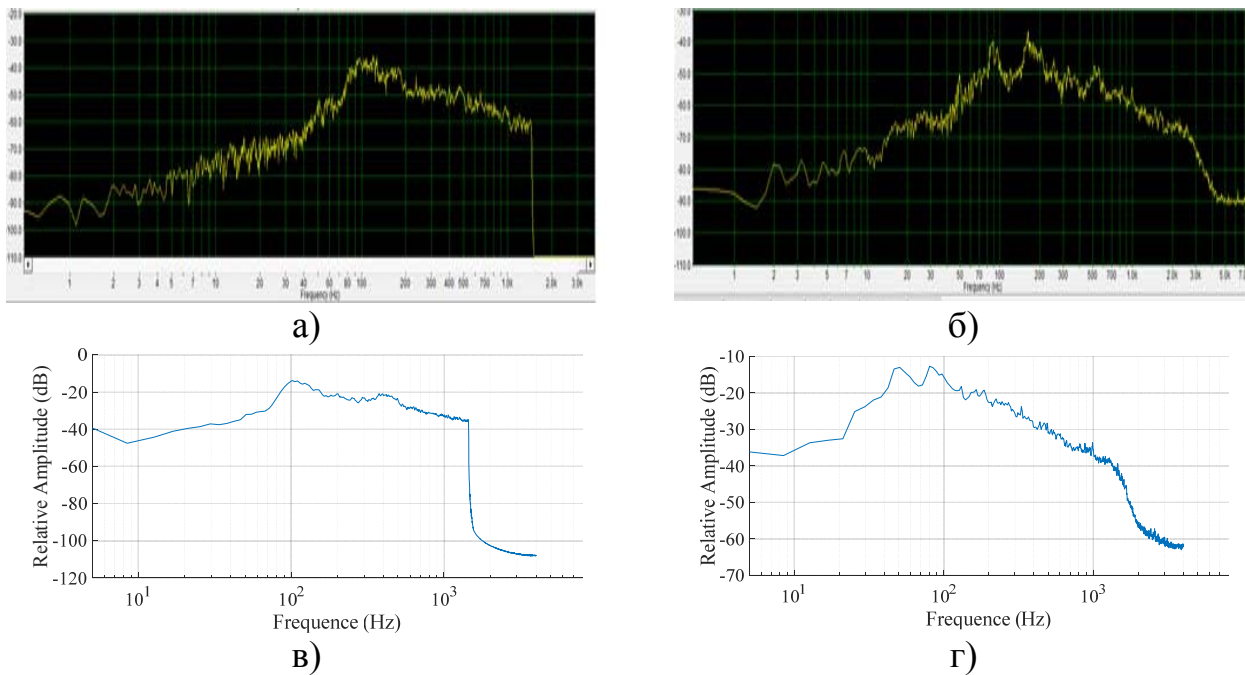


Рис.4.13. Спектр сигналів мовної станції Radio Taiwan International, частота 7385 КГц (а, б) і розподіл потужності (в, г): а- формат запису mp3, б-формат запису wav.

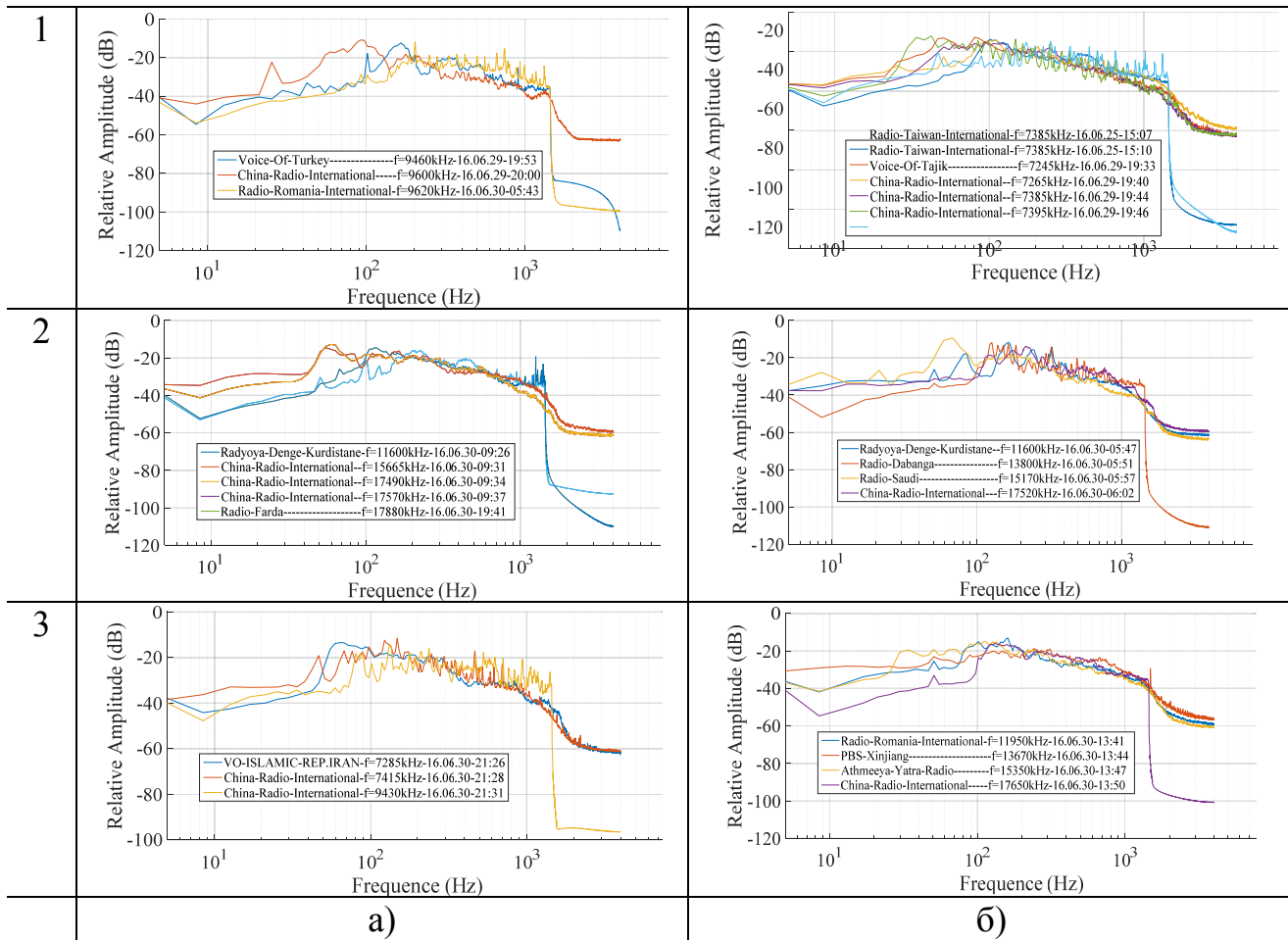


Рис. 4.14. Нормовані спектри сигналів мовних КХ станцій

$$p(F, \Delta F = 8 \text{ Гц}) = \frac{\int_F^{F+\Delta F} S(F) dF}{\int_0^{F_{\max}} S(F) dF} \quad (4.22)$$

Варто відзначити, що при форматі запису mp3 спектр обмежений частотами приблизно до 1500 Гц, що пов'язано з частотним обмеженням кодованих спектральних складових. У форматі wav спектр у високочастотній області спадає значно повільніше.

На рис. 4.14 приведені нормовані на повну потужність спектри мовних станцій різних діапазонів довжин хвиль, в різний час доби.

Загальним для них є значно менші на 20 ... 30 дБ значення спектральної щільності на частотах 6 ... 60 Гц, ніж на частотах 100 ... 200 Гц.

По відношенню до цих частот на частотах близько 1000 Гц рівень спектральної щільності зменшується приблизно на 15 ... 20 дБ.

Для апроксимації спектра можна використовувати співвідношення:

$$S(F) = S_0 \left(\frac{1}{1 + (|F - F_0| / \Delta F_{\pm})^{n_{\pm}}} \right)^{-1}, \quad (4.23)$$

де F_0 , S_0 - рівень і частота максимуму спектральної щільності інформаційного сигналу, зазвичай 80 ... 160 Гц, ΔF_{\pm} , - півширина і швидкість убутання n_{\pm} , спектра правіше ΔF_+ , n_+ і лівіше ΔF_- , n_- частоти максимуму.

Використовуючи співвідношення (4.23) можна оцінити швидкості убутання спектральної щільності вище і нижче частоти максимуму. Як правило, вони мають величину: $n_+ = 1,8 \dots 2,5$, а $n_- = 2,2 \dots 3$, тобто в першому наближенні для апроксимації можна використовувати однакові значення:

$$n \approx n_- \approx n_+ \approx 2 \quad (4.24)$$

Рівень потужності в смузі 8 Гц на частотах 6 ... 60 Гц становить приблизно -40 ... 55 дБ щодо рівня повної потужності інформаційного сигналу. На частотах близько 1000 Гц він становить близько -30 ... -40 дБ. Зміна формату запису позначається не тільки на високочастотних, але і низькочастотних компонентах спектру. Так при форматі запису mp3 рівень спектральної щільності приблизно на 10 дБ нижче, ніж в форматі wav. При форматі запису mp3 здійснюється обмеження спектра на частотах вище 1,5 кГц, що призводить до того, що рівень спектральної щільності на цих частотах -90 ... -110 дБ. У той час, як в форматі wav має величину -55 ... 60 дБ. Для наведених спектрів розрізнення по частоті становило 8 Гц.

Якщо роздільна здатність буде відрізняться від 8 Гц, то отримане значення спектральної щільності необхідно перерахувати з використанням співвідношення:

$$p(F, \Delta F = \delta F \text{ Гц}) = p(F, \Delta F = 8 \text{ Гц}) \frac{\delta F [\text{Гц}]}{8} \quad (4.25)$$

Оскільки при досить вузьких смугах доплерівських фільтрів можна розглядати шум, як білий, то звуження смуги з 8 до 1 Гц призведе до зниження рівня спектральної щільності приблизно на 9 ... 10 дБ.

Наявність провалу спектральної щільності на частотах 6 ... 60 Гц щодо несучої в спектрах випромінювання мовних станцій дозволяє здійснювати виявлення вторинних полів, створюваних відбиттями цих сигналів від повітряних об'єктів.

4.3. Використання напівмарківських вкладених процесів для опису нестационарних акустичних шумів

Для оцінки робочих характеристик систем акустичної розвідки необхідна розробка моделей, що дозволяють імітувати умови реальної нестационарної

завадово-сигнальної обстановки. У роботах [50, 87- 90, 109] запропоновано використовувати вкладені напівмарківські процеси для нестационарних негаусових завад, що створюються відбиттями радіохвиль від поверхні моря [87, 109], суші [50], «ясного неба» [88]. Запропонований підхід виявився продуктивним і для опису радіолокаційних відбиттів від малорозмірних надводних цілей [109]. У цьому розділі розглянуто можливість використання цього підходу для опису акустичних шумів, викликаних вітром, дощем, листям дерев, кроками людей і тварин, а також звуками пострілів.

Математичне формулювання моделі. Статистичний опис аналогічно моделі використовуваної для опису відбиття від суші, покритої рослинністю і засноване на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів $\{\overline{S(t)}, \theta(t)\}$, у яких одна компонента $\overline{S(t)}$ неперервна, а інша $\theta(t) = \nu_i$ дискретна [50, 109, 119]. Тут t узагальнена координата, в якості якої виступає час. Ці компоненти є залежними і, в загальному випадку, не є Марківськими [98]. Це означає, що не накладається ніяких обмежень на розподіл часів існування процесу в кожному з фазових станів. Для кожного моменту часу, в загальному випадку, процес знаходиться в одному з K можливих фазових станів $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$. Окремим випадком є система з двома фазовими станами. Така модель може використовуватися для опису акустичного шуму вітру, шуму листя під впливом вітру, а також кроків тварин і людини. Покладається відомим початковий стан $\theta_0 = \nu_i$ в момент часу $t = 0$ і однокрокові ймовірності переходу π_{ij} , де $i, j = \overline{1 \dots K}$. Зіставимо кожному ненульовому елементу π_{ij} матриці ймовірності переходу випадкову величину T_{ij} з щільністю розподілу $f_{ij}(t)$, яку будемо називати часом очікування в стані ν_i до переходу в стан ν_j . Якщо величини T_{ij} розподілені за експоненціальним законом, то такий процес буде Марківським. На практиці, в багатьох випадках, таке припущення не виконується, зокрема, для відбиттів від суші [50]. Тоді процес, у якого зміна станів описується Марківським ланцюгом, а щільність

розподілу часів існування в кожному з них відрізняється від експоненційної, відноситься до класу напівмарковських [98]. У середині кожного з ν_i станів процес будемо вважати квазістаціонарним, що описується своєю щільністю розподілу значень $[P_i(S)]$ і спектром $[S_i(\omega)]$. Для опису процесу всередині фазового стану, в ряді випадків, можуть бути використані стандартні моделі гаусових процесів. Однак можуть використовуватися і фінітні атомарні функції [50, 91, 92].

Для процесів з детермінованою зміною фазових станів процесу однокрокові імовірності переходу $(\pi) = \|\pi_{ij}\|$, де $i, j = \overline{1 \dots K}$ мають вигляд: $\pi_{ij} = 1$ при $j = (i + 1)_{\text{mod } k}$ и $\pi_{ij} = 0$ в інших випадках. Так, коли кількість фазових станів $k=2$, то $(\pi) = \|\pi_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Це характерно для вітру і пов'язаних з ним шумів, а також звуків кроків людини або тварин. Крім того подібний підхід може використовуватися і для створення імітаційних моделей звуків пострілів.

Результати експериментального дослідження нестационарних акустичних шумів. На рис. 4.15 наведені спектрограми шуму вітру, звуків кроків людини по сніжному насту. Аналогічний вигляд мають шуми листя дерев при вітрі, звуку пострілу автоматичної зброї. Видно, що для цих процесів характерно наявність двох фазових станів, що істотно відрізняються своїми спектрами і інтенсивністю. В одному з них сигнал має досить малу величину. Воно характерно, наприклад, для пауз в інтервалі між поривами вітру - рис. 4.15 а, б. криві 1. Причому посилення вітру призводить як до зростання інтенсивності шуму, так і його ширини спектру (рис. 4.15 а, б) причому як під час пауз (криві 1) так і при поривах (криві 2). При цьому в паузах спектр шумів вітру може в першому наближенні апроксимуватися рівномірною спектральною щільністю, тобто вважатися «білим шумом».

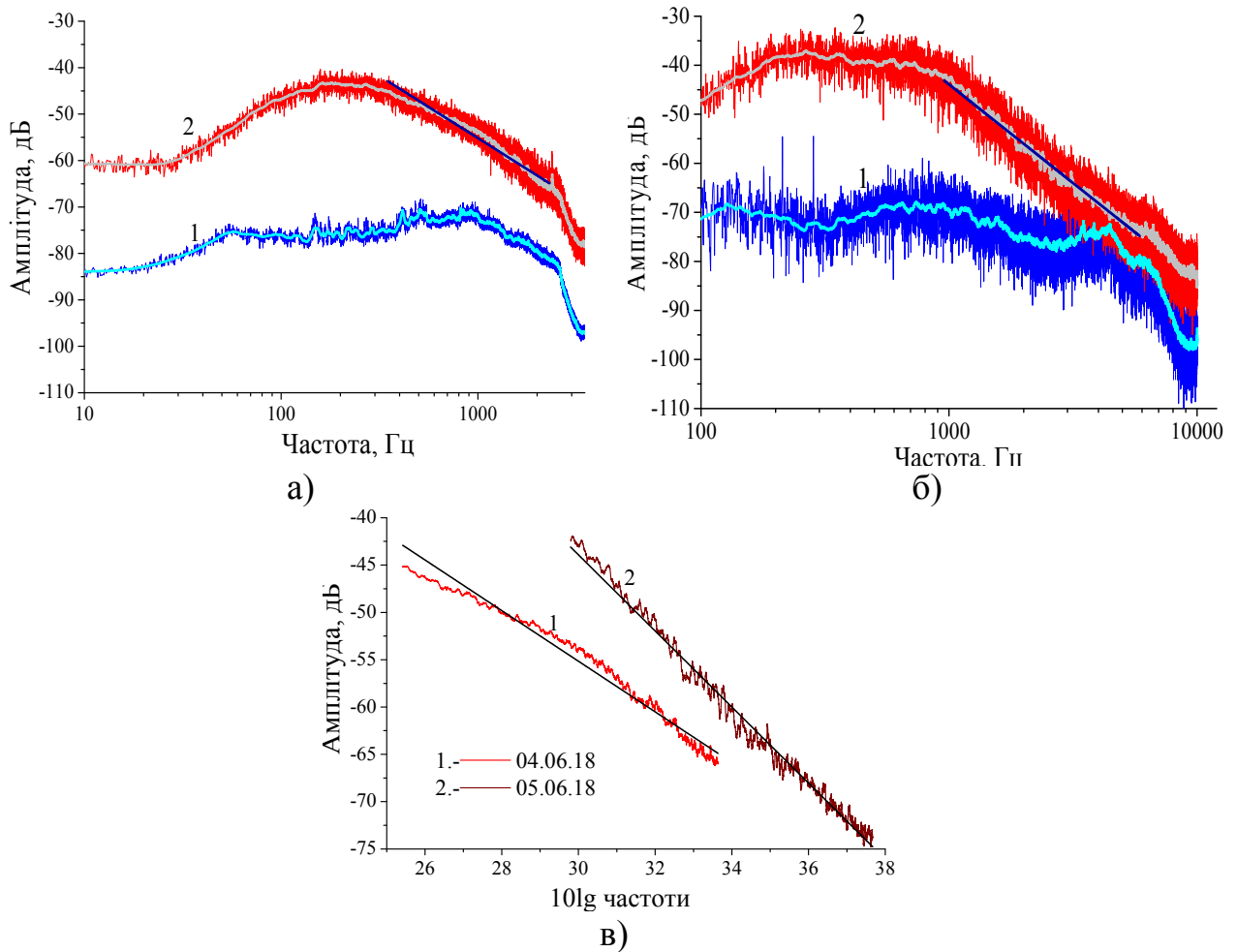


Рис. 4.15. Спектри пауз і поривів вітру: а- 04.06.18 вітер 3...5 м/с, б- 05.06.18 вітер 5...8 м/с, 1- паузи, 2- пориви; в- ВЧ частина спектру поривів вітру та їх апроксимації 1- при вітрі 3...5 м/с, 2- при вітрі 5...8 м/с.

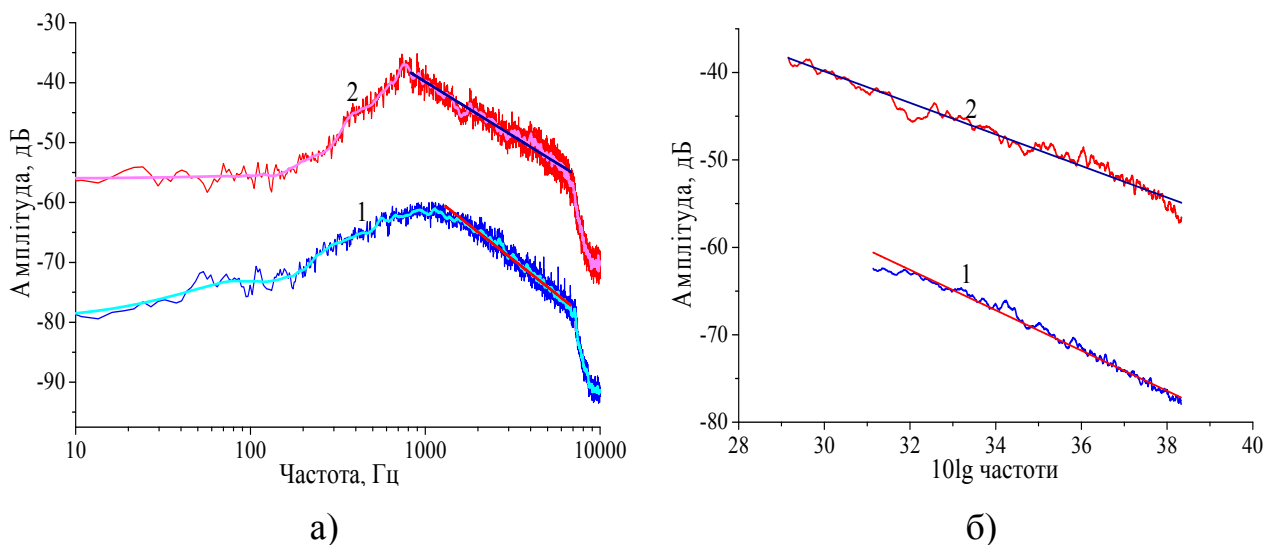


Рис. 4.16. Спектри кроків людини по сніжному насту (а), їх високочастотна ділянка і апроксимації (б): сплески -2, паузи-1.

Так при слабкому вітрі 3...5 м/с можна вважати, що при паузах ширина спектру становить приблизно 1,5...2,5 кГц (рис. 4.15 а), зростаючи до 5...7 кГц при посиленні вітру до 5...8 м/с (рис. 4.15 б). При поривах для великих швидкостей вітру характерна більша швидкість убавання спектральної щільності з частотою.

На рис. 4.15 спектри кожного з фазових станів шумів вітру наведені в подвійному логарифмічному масштабі. Видно, що при сплесках спектри процесів мають більш велику швидкість убавання спектральної щільності з частотою. Оскільки в спектрах, особливо поривів вітру, можна виділити лінійні ділянки, то для опису їх форми можна використовувати залежність:

$$S_i(F) = S_0 \left(1 / \left(1 + \left(\frac{|F - F_{0i}|}{\Delta F_i} \right)^{n_i} \right) \right)^{-1}, \quad (4.26)$$

де F_{0i} , ΔF_i , n_i - центральний зсув, півширина і швидкість убавання спектру для i фазового стану, 1- поривів, 0-пауз.

На рис. 4.15 в наведені високочастотні ділянки спектрів поривів вітру та їх апроксимація (4.26). Слід зазначити, що ці параметри можуть відрізнятися для високочастотної і низькочастотної гілок спектра. Такі ж особливості, мають пов'язані з ним процеси (шум листя дерев, шум дощу). Аналогічні процеси, що виникають при русі людей і тварин в моменти між постановкою кінцівок на землю. Інша фаза має істотно більшу інтенсивність. Ширина спектра і швидкість його зменшення при цьому можуть бути вище, ніж при паузах.

На рис. 4.16 наведено спектри різних фазових станів кроків людини по сніжному насту, високочастотні ділянки - рис. 4.16 б та їх апроксимації залежностями (4.26). Видно, що в даному випадку нахили спектрів при паузах і сплесках приблизно однаковий.

Значення показника ступеня n отримані в результаті апроксимації (4.26) високочастотних ділянок спектра різних фазових станів для шуму вітру і кроків людини по насту наведені в табл. Д.10.

На відміну від шумів вітру, у яких для пауз була характерна, в першому наближенні, модель білого шуму (тобто $n_0=0$) для кроків по насту спектри сплесків мають менший показник ступеня ніж у пауз. До корисного сигналу в процесі реєстрації додаються шуми апаратури, які можуть спотворювати вигляд їх спектральної щільності. Отриманий при цьому нормований на спектральну щільність внутрішніх шумів спектр матиме вигляд:

$$s_i(F) = \mu^{-1} + \left(1 / \left(1 + \left(\frac{|F - F_0|}{\Delta F_i} \right)^{n_i} \right) \right)^{-1}, \quad (4.27)$$

де μ - співвідношення сигнал (зовнішні шуми) / шум (апаратури) при реєстрації.

Видно, що при великих співвідношеннях сигнал / шум співвідношення (4.27) дає результати близькі до (4.26). При малих же співвідношеннях сигнал шум необхідно враховувати пов'язані з цим помилки опису спектру.

Приклад того, як впливають внутрішні шуми на спектри акустичних сигналів, що реєструються наведено на рис. 4.17. На рис. 4.17 а наведені апроксимації спектрів при швидкості убавання спектральної щільності, що визначається показником ступеня $n = 2$, а на рис. 4.17 б - $n = 4$. Видно, що зниження співвідношення сигнал-шум призводить до зменшення швидкості убавання спектральної щільності на крилах спектра і обмеження рівня мінімальних значень спектральної щільності.

Для апроксимації кусково-ламанною залежністю спектрів у подвійному логарифмічному масштабі швидкість убавання спектральної щільності можна оцінити за допомогою співвідношення, що безпосередньо впливає з (4.26):

$$n = \frac{s(F_2)[\text{дБ}] - s(F_1)[\text{дБ}]}{10(\lg(F_2 - F_0) - \lg(F_1 - F_0))}, \quad (4.28)$$

де F_2 и F_1 частоти, взяті на скаті спектра, а $s(F_2)[\text{дБ}]$ и $s(F_1)[\text{дБ}]$ - рівень спектральної щільності, що їм відповідає.

З рис. 4.17 видно, що показник ступеня істотно впливає на швидкість убавання спектральної щільності.

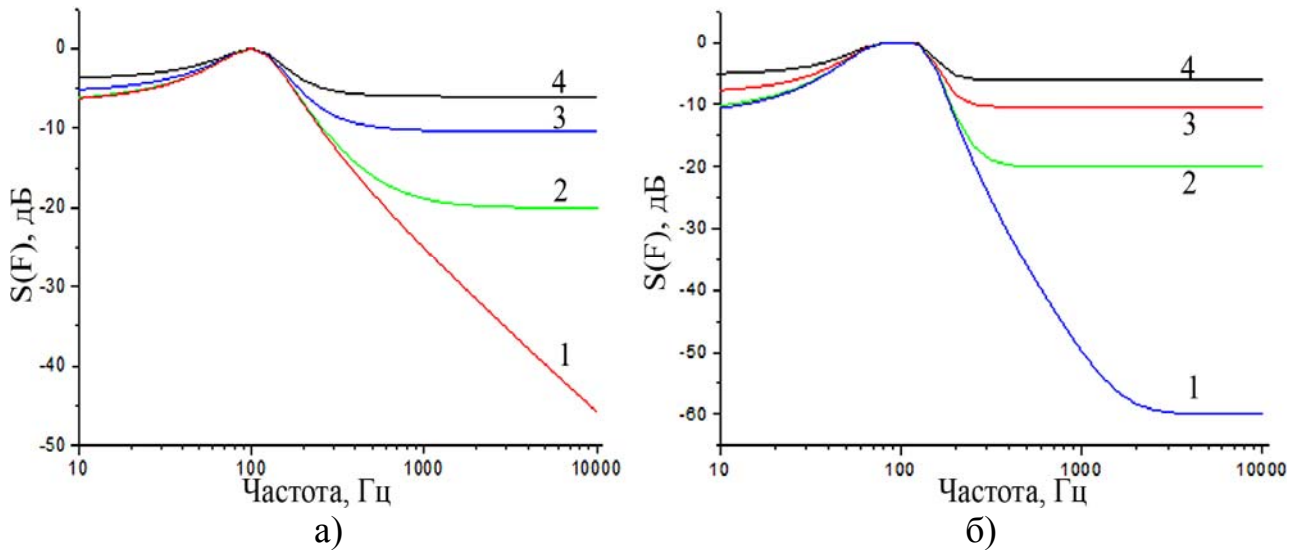


Рис. 4.17. Спектри апроксимацій при різних співвідношення сигнал/шум акустичних шумів:

$F_0 = 100 \text{ Гц}$, $\Delta F = 50 \text{ Гц}$, 1- $\mu = 60 \text{ дБ}$, 2- $\mu = 20 \text{ дБ}$, 3- $\mu = 10 \text{ дБ}$, 4- $\mu = 5 \text{ дБ}$ = а- $n=2$,
б- $n=4$

Для розглянутих прикладів шумів характерна наявність декількох, що розрізняються спектральним складом і інтенсивністю фазових станів. Так при описі шуму вітру і пов'язаних з ним процесів, наприклад шуму листя дерев, досить використовувати два фазових стану: сплески, пов'язані з поривами вітру і паузи.

Оскільки рівень звуку мікрофона пов'язаний з акустичним тиском, який в свою чергу визначається квадратичною залежністю від швидкості вітру, то для акустичного сигналу будуть характерні ті ж закономірності, що й для пульсацій швидкості вітру в тропосфері. Так загальноприйнятою моделлю опису спектра пульсацій атмосфери є модель Колмогорова-Обухова.

Розгляд пульсацій швидкості вітру в частині взаємної обумовленості неоднорідностей, що лежать в одному просторовому діапазоні з неоднорідностями більшого і меншого просторового масштабу, дозволяє виділити кілька основних інтервалів [120] - рис. Д.10.

У приземному шарі атмосфери на висоті 8 м за рахунок деформацій великомасштабних неоднорідностей частотна залежність спектральної щільності енергії $S(f) \sim f^{-3}$ не проявляється. Фактично форму цього спектра можна апроксимувати залежністю $S(f) \sim f^{-5/3}$ - в широкому діапазоні масштабів: від $2,3 \cdot 10^{-6} \times \text{Гц}$ (120 год.) до $3,1 \cdot 10^{-5} \times \text{Гц}$ (9 год.). Використовуючи гіпотезу «замороженої» турбулентності, при середній швидкості вітру $V = 1,9 \text{ м/с}$, просторові масштаби цього діапазону відповідно лежать в межах від 830 до 60 км. У високочастотній частині спектральна щільність питомої енергії пульсацій швидкості зменшується пропорційно частоті в ступені «-2/3». Збільшення питомої спектральної енергії в цьому діапазоні пов'язано з процесами дроблення великомасштабних неоднорідностей і процесами конвекції. На висотах 121, 125 м залежність $S(f) \sim f^{-3}$ починає проявлятися в інтервалі частот від $5,5 \cdot 10^{-6} \times \text{Гц}$ (50 год.) до $8,3 \cdot 10^{-6} \times \text{Гц}$ (33 год.), що відповідає просторовим масштабам при середній швидкості вітру $V = 5,9 \text{ м/с}$ від 1050 до 700 км. У високочастотному діапазоні форма спектра відхиляється від $-f^{-5/3}$ також в сторону збільшення енергії пульсацій. Це говорить про те, що конвективна складова слабше проявляється при цій швидкості вітру ($V = 5,9 \text{ м/с}$) у порівнянні з рівнем 8 м, де $V = 1,9 \text{ м/с}$ (рис. Д.10). На висоті 301 м залежність $S(f) \sim f^{-3}$ охоплює той же частотний діапазон (до 1500 км при $V = 8,5 \text{ м/с}$). У високочастотній частині спектр в широкому діапазоні масштабів описується залежністю $S(f) \sim f^{-5/3}$. Це говорить про те, що приплив енергії за рахунок конвекції на цих масштабах за величиною значно менше, ніж на нижніх рівнях. Таким чином, на підставі досліджень форми спектра в [120] були зроблені наступні висновки: при середній швидкості течії $V > 8 \text{ м/с}$ форма спектра в діапазоні від 2 год до 7 діб залишається незмінною і її можна апроксимувати статечною залежністю, близькою до $S(f) \sim f^{-5/3}$; при середній швидкості вітру

близько 2 м/с на висотах вище 8 м в діапазоні від 9 год до 7 діб форма спектра також може бути апроксимована статечною залежністю $S(f) \sim f^{-5/3}$.

Порівнюючи з отриманими нами результатами - рис. 4.15 видно, що спектр акустичних шумів вітру при сплесках має дещо більший нахил. Що пов'язано, імовірно, з квадратичною залежністю рівня шуму від швидкості вітру. У той же час для кроків по сніжному насту при сплесках швидкість убуття спектральної щільності при сплесках близька до закону $5/3$. Додаткову інформацію про шум вітру, кроках людини і тварин можуть дати спектрограми - рис. Д.11, які дозволяють оцінити динаміку зміни спектрального складу цих нестационарних процесів в часі.

На цьому ж рисунку приведені спектрограми пострілів автоматичної гармати рис. Д.11 (3) і кулемета рис. Д.11 (4). Як і для звуку кроків, для пострілів з автоматичної зброї, на відміну від шуму вітру, характерний більший детермінізм в зміні фазових станів. Крім того слід зазначити, що в разі, коли відсутні дефекти в ході людини або в системі зброї при повторенні окремих циклів їх спектральні характеристики і часи існування процесу в цих фазових станах схожі. Істотно відрізняється ситуація, коли в ході людини є дефекти, наприклад, пов'язані з кульгавістю - рис. 4.18. Видно, що дефекти ходи виявляються як у часових реалізаціях сигналу (1, 3) асиметрією як сигналів відповідних різним крокам, проявляючись відмінностями в рівнях і тривалостях, так і позначаються на асиметрії спектрограм (2, 4). Це може використовуватися для ідентифікації дефектів ходи людини або тварин. Аналіз спектрограм на рис. 4.18 (2, 4) показує, що вони є суттєво нестационарним процесом, спектральний склад якого зазнає значні зміни в часі.

Аналогічний вигляд мають і спектрограми звуку пострілів з автоматичної зброї рис. Д.11 - гармати (3) і кулемета (4).

Як приклад на рис. 4.19 а приведена часова реалізація звуку пострілу, а на рис. 4.19 б його спектр в різних часових перетинах. Можна виділити кілька фаз пострілу. Для 1 фази характерно різке, можна вважати практично миттєве, зростання сили звуку.

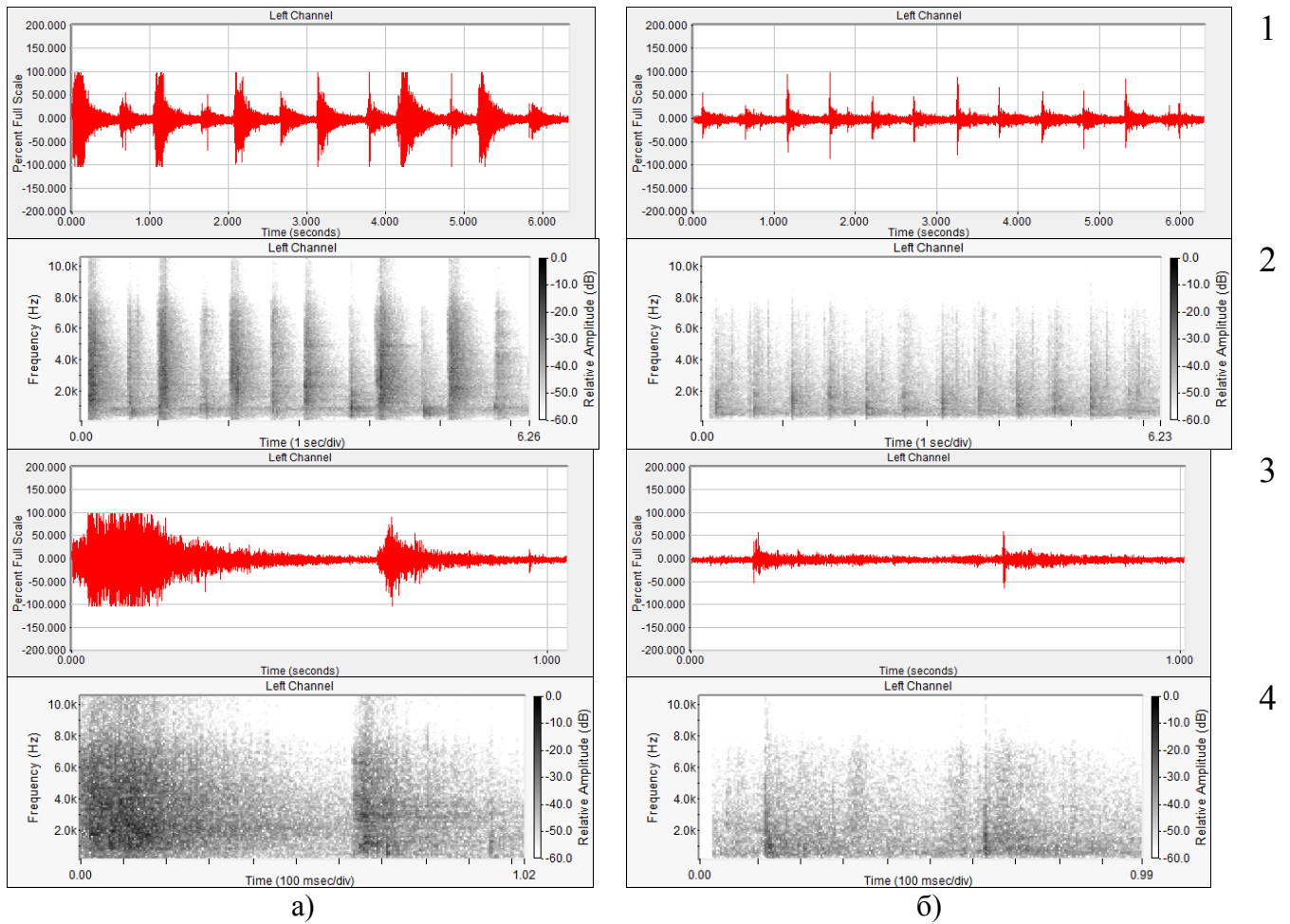


Рис. 4.18. Часові реалізації (1, 3) і спектрограми (2, 4) кроків: без дефекту ходи-б, с дефектами ходи (шкульгання) – а.

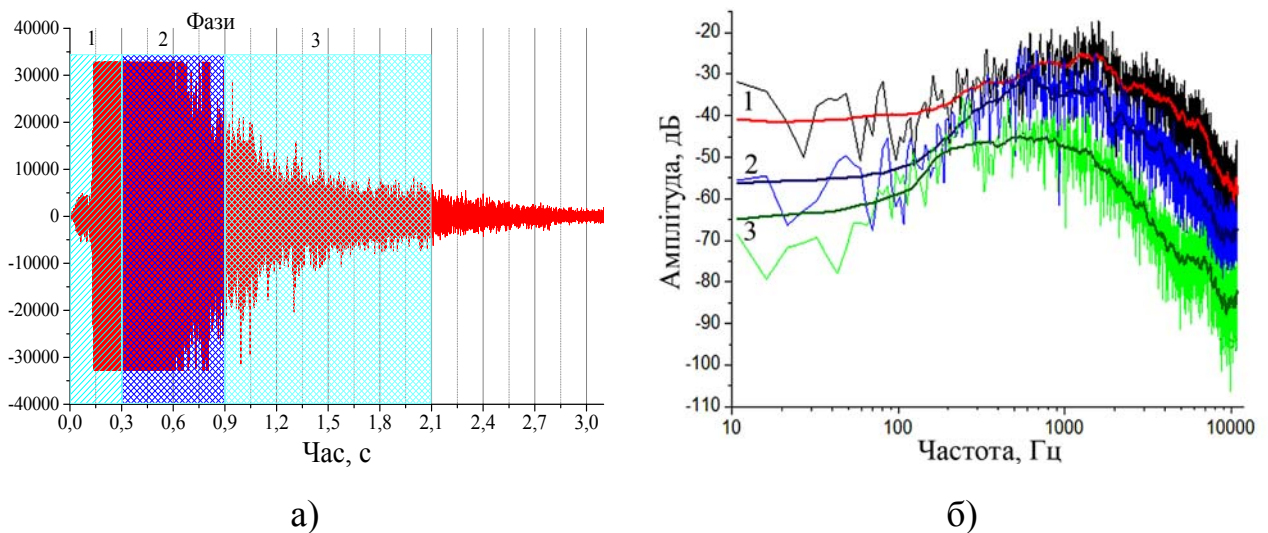


Рис. 4.19. Часова реалізація звуку пострілу гармати(а) і його спектри(б) у різних часових перетинах: 1 фаза - до 0,3 с. 2 фаза - до 0,9 с, 3 фаза - до 2.1 с

На рис. 4.19 а вона спостерігається в інтервалі часу від 0,12 с. до 0,7 с., тобто приблизно 0,5 с. В цей час звукозаписувальна апаратура перевантажена. Потім під час другої фази на інтервалі 0,7 ... 3 с. спостерігається експоненціальне убуття сили звуку:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right), \quad (4.28a)$$

де $I(t)$, I_0 - залежність середньої інтенсивності звуку від часу і її значення в початковий момент.

Інтенсивність i звуку буде описуватися змінними в часі експоненційною, а амплітуда релеєвською щільністю розподілу, а миттєві значення - нормальним законом розподілу:

$$\begin{aligned} p(i) &= \frac{1}{I(t)} \exp\left(-\frac{i}{I(t)}\right), \quad p(A) = \frac{A}{\sigma_A^2(t)} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_A^2(t)}\right), \\ p(S) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2(t)}\right) \end{aligned} \quad (4.28б)$$

Причому інтенсивність $I(t)$ і дисперсія $\sigma_A^2(t)$ процесу пов'язані відомим співвідношеннями:

$$I(t) = \sigma_A^2(t), \quad (4.29)$$

На рис. 4.20 наведені ці ж спектри і апроксимації їх ската залежностями (4.26) Видно їх задовільну відповідність. Числові характеристики спектрів в різних часових перетинах наведені в табл. 4.1. Видно, що в початковий момент пострілу показник ступеня спектра близький до того, який спостерігається у спектрі повністю турбулізованої атмосфери $n \approx 5/3$.

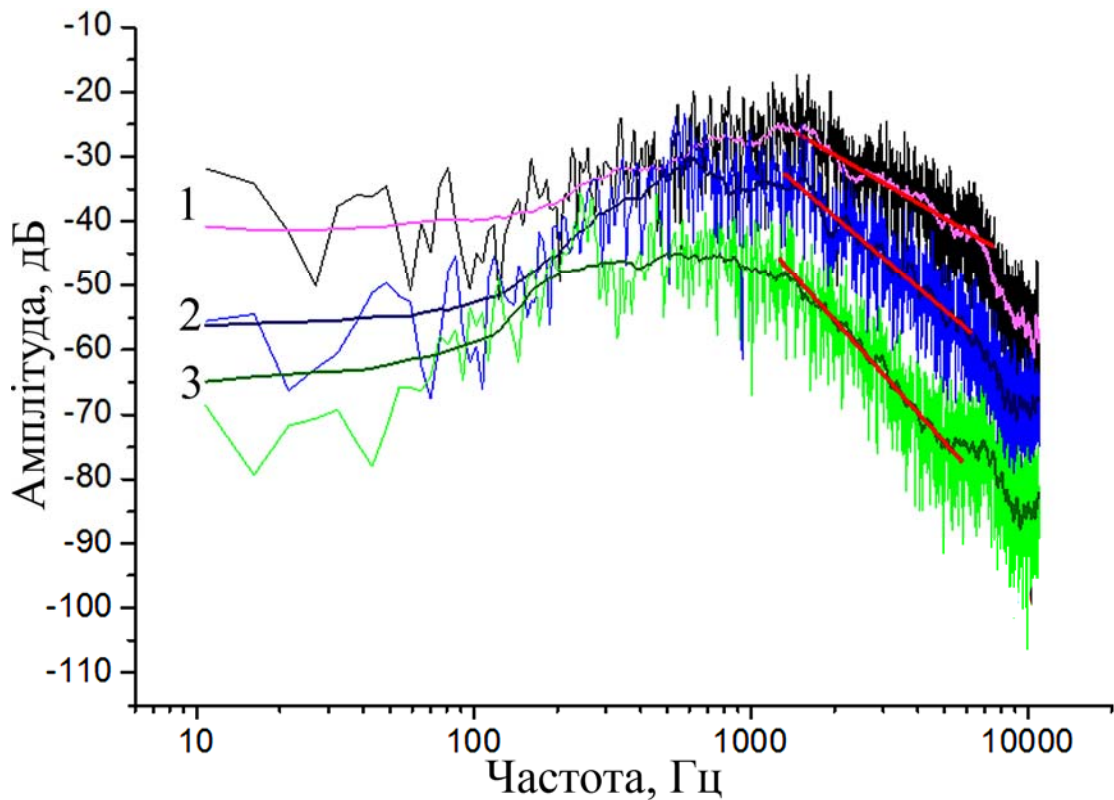


Рис. 4.20. Спектри пострілу на різних фазах і їх апроксимація залежностями (1):
1 фаза; 2 фаза; 3 фаза.

Таблиця 4.1

Числові характеристики спектрів пострілу в різних часових перетинах.

Фаза №	Центральне зміщення, F_0 , Гц	Півширина спектра ΔF , Гц	Показник ступеня, n	Час від початку, t С
1	1286	584	-1,4	0,3
2	1022	624,5	-2,4	0,9
3	586	457,5	-3,4	2,1

По мірі зменшення сили звуку відбувається зниження центрального зміщення спектра, його ширини і збільшення показника ступеня приблизно до $n \approx 4$.

Для імітаційної моделі вітру досить використовувати два фазових стану: сплеску (спайка) і паузи. Перше для поривів вітру, друге при їх відсутності. Аналогічно можна зробити і при створенні моделі шуму листя під впливом вітру.

Для завад, створюваних рухом людини або тварин, наприклад по сніговій поверхні або по траві також у багатьох випадках достатньо використовувати 2-а фазових стани.

При цьому щільність розподілу тривалості кроків може описуватися, в першому наближенні гаусовою моделлю.

$$p(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \exp\left(-\frac{(T - T_1)^2}{\sigma_T^2}\right), \quad (4.30)$$

де T_1 , σ_T – середнє і середньоквадратичне значення періоду ходьби.

Однак, якщо у людини або тварини є дефекти ходи, то вони будуть проявлятися в розходженні законів розподілу і спектрів при кроці різними кінцівками. При цьому для опису цих особливостей необхідно використовувати більшу кількість фазових станів. Це означає, що для людини, встановивши відмінності в законах розподілу тривалостей кроків лівої і правої кінцівкою (різницю в середній тривалості кроку), можна виявити індивідуальні особливості притаманні цій людині.

Аналогічно і для пострілів автоматичної зброї. У багатьох випадках достатньо при моделюванні використовувати 2-а фазових стани - пострілу і інтервалу між ними. При цьому коефіцієнт варіації:

$$K_{\text{var}} = \frac{\sigma_T}{T}, \quad (4.31)$$

який визначається відношенням середньоквадратичного до середнього періоду, буде характеризувати зношеність зброї і може служити інформативною ознакою для діагностики її стану. У разі ж, якщо циклограма автоматичної системи містить більше, ніж два фазових стани, наприклад, у автоматичних шестиствольних гармат в періоді циклограми буде 12 фазових станів, то таку ж кількість фазових станів необхідно використовувати і в імітаційній моделі цього процесу. При цьому необхідно досліджувати характеристики кожного з них (фазових станів) і розкид їх тривалості буде свідчити про ступінь зношеності зброї і дефектах конструкції. Розподіл тривалості пострілу і його спектр також є інформативною характеристикою системи. Ця фаза також не повинна мати великих значень коефіцієнта варіації. Спектральні характеристики пострілів також системи зброї при нормальному періоді експлуатації не повинні сильно відрізнятися.

Запропоновані підходи можна використовувати для створення акустичних систем діагностики технічного стану різних систем, а також оцінки ступеня досконалості його конструкції.

Закони розподілу миттєвих значень акустичного шуму в кожному з фазових станів, в першому наближенні може описуватися нормальним законом розподілу.

4.4. Оптимальний прийом сигналів, що поширюються в середовищах з поглинанням і дисперсією

Кореляційна обробка займає особливе місце при аналізі процесу поширення радіохвиль в атмосфері і космічному просторі, вирішенні задач виявлення, вимірювання координат об'єктів, а також розпізнаванні їх типів [153-156]. Кореляційний інтеграл є достатньою статистикою, що використовується при виявленні сигналів на фоні гаусових шумів [153, 154]. Теорія розрізнення ґрунтується на використанні двовимірної кореляційної функції - функції невизначеності за часом і частотою [153, 154]. Розпізнавання типів сигналів,

оптимальна фільтрація, кореляційні методи наведення засновані на використанні кореляційної обробки. Останнім часом знаходять широке застосування нові методи опису та аналізу надширококустових процесів і полів [162-168]. У цьому підрозділі розглянуті особливості прийому сигналів при їх поширенні в середовищах з дисперсією і поглинанням. Введено поняття модифікованого кореляційного інтегралу, і його Фур'є образу у вигляді узгодженого фільтру, які можуть бути корисні при рішенні задач виявлення, вимірювання і розпізнавання об'єктів в дисперсних середовищах з втратами.

Поширення хвильового пакета в середовищі. При поширенні хвильового пакета в середовищі з комплексною постійною поширення \dot{k} кожна з його спектральних складових $S(\omega)$ може бути записана у вигляді:

$$\dot{S}(\omega) = \dot{S}(\omega) \exp(i(\omega t - \dot{k}z)) \quad (4.32)$$

де

$$\dot{k} = k' - ik'' = k_0(n' - in'') \quad (4.33)$$

а n', n'' - дійсна і уявна частина коефіцієнта заломлення середовища,

$k_0 = \frac{\omega}{c}$ - хвильове число, c - швидкість світла.

Тоді із співвідношень (4.32, 4.33) можна записати:

$$\dot{S}(\omega) = \dot{S}(\omega) \exp(i\omega(t - \frac{z}{c}n') - \omega \frac{z}{c}n'') \quad (4.34)$$

При цьому дійсна частина коефіцієнта заломлення середовища, що входить в перший співмножник впливає на фазове запізнювання спектральної компоненти на $\varphi(\omega, z) = \omega(\frac{z}{c}n') = \omega\tau_0 n'$, де τ_0 - часове запізнювання у вакуумі при поширенні хвилі на відстань z , а n' - враховує його збільшення в середовищі з коефіцієнтом заломлення n' .

Уявна частина коефіцієнта заломлення середовища, що входить в другий співмножник впливає на загасання $L(\omega, z) = \exp(-\omega \frac{z}{c} n'')$ спектральних компонент сигналу при його поширенні в середовищі на відстань z . Якщо середовище не диспергуюче і має малі значення уявної частини коефіцієнта заломлення, тобто $n' \approx const, n'' \approx 0$, то сигнал в такому середовищі поширюється з малими втратами і всі його спектральні компоненти отримують постійну часову затримку. У разі ж дисперсного середовища, тобто, коли коефіцієнт заломлення $n' = n'(\omega)$ залежить від частоти (довжини хвилі), як видно з (4.34) різні частотні компоненти отримують різну часову затримку і крім того по різному загасають в середовищі. Цю обставину необхідно враховувати при реалізації оптимального і квазіоптимального прийому. Кореляційний інтеграл:

$$Z(\tau) = \int_0^{\infty} X(t)Y(t - \tau)dt \quad (4.35)$$

характеризує міру «схожості» випробуваної $X(t)$ і еталонної функції $Y(t)$ при взаємній затримці τ . Їм же визначається і вид частотної характеристики оптимального фільтра.

При виявленні сигналу на фоні гаусових шумів він виступає в якості достатньої статистики, яка порівнюється з порогом прийняття рішення. При виявленні сигналу з випадковою початковою фазою в якості достатньої статистики використовується модуль кореляційного інтеграла. При цьому під еталонною функцією розуміють випромінюваний (зондуючий) сигнал, який порівнюється з випробуваним - прийнятим (відбитим) від об'єкта. Якщо під еталонною функцією $Y(t)$ розуміти імпульсну перехідну характеристику $Y(t) = h(t)$, то вираз (4.35) є інтегралом згортки (Дюамеля) і буде описувати сигнал на виході лінійної системи. В теорії оптимального прийому опорними функціями є сигнали, що розпізнаються. Розглядаючи аналітичні сигнали, було введено [153, 154] поняття двовимірної кореляційної функції:

$$\psi(\tau, F) = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} X(t) X^*(t - \tau) \exp(-i2\pi Ft) dt \right| \quad (4.36)$$

що характеризує результат кореляційно-фільтрової обробки, коли час τ запізнювання і частота F відрізняються від очікуваних. Такий підхід дозволяє аналізувати роздільні властивості сигналів за часом і частотою, точність вимірювання цих параметрів. Для опису процесів в частотній області використовують перетворення Фур'є:

$$Z(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (4.37)$$

У термінах частотних спектрів оптимальний прийом сигналів при їх поширенні в середовищі без поглинання і дисперсії полягає у формуванні частотної характеристики узгодженого фільтра, як частотно-сполученої з частотною характеристикою сигналу [153, 154]. Очевидно, що для середовищ з малими втратами і відсутністю дисперсії незалежно від дальності, на якій здійснюється оптимальний прийом, вид частотної характеристики оптимального фільтра не змінюється. Однаковий і час затримки для всіх спектральних компонент сигналу.

Кореляційний інтеграл і його спектри Фур'є дозволяють аналізувати процеси поширення і розсіяння радіохвиль в середовищах, діелектричні і магнітні властивості яких досить просторово однорідні і мають невелику дисперсією, тобто $\sigma_\varepsilon / \varepsilon \ll 1$, $\sigma_\mu / \mu \ll 1$. При цьому спектральні компоненти випроміненого хвильового пакета поширюються в просторі з однаковою швидкістю, і з приблизно однаковим загасанням. Це призводить до того, що розсіяний об'єктами, розташованими в різних точках простору сигнал відрізняється лише часом затримки і масштабним множником амплітуди, що дозволяє використовувати для його виділення і зіставлення з випроміненим сигналом шляхом взаємної кореляційної обробки. Однак, у багатьох випадках

при поширенні хвильового пакета здійснюється деформація, як його часового масштабу, так і окремих його спектральних компонентів, що призводить до зміни його форми. Зрозуміло, що використання в якості опорної функції вихідного процесу при цьому виявляється неефективним. Необхідно враховувати зміни виду опорної функції в процесі поширення в такому середовищі. Така ситуація характерна, наприклад, для систем підповерхневого зондування, що використовують надширококустові (НШС) сигнали.

Електрофізичні характеристики ґрунту. Вологий ґрунт являє собою дисперсну середу, що складається з багатьох компонентів. Її комплексна діелектрична проникність визначається об'ємними частками і діелектричними властивостями компонент, головними з яких є тверді ґрунтові частинки, повітря, пов'язана і вільна вода. До теперішнього часу немає фізично зумовленої моделі діелектричної проникності дисперсних середовищ, яка дозволяла б визначити діелектричну проникність суміші через діелектричні проникності і об'ємні частки окремих компонент, хоча інтерес до цієї проблеми виник давно. Ідеї щодо визначення діелектричної проникності шаруватих діелектриків висловлювалися ще Максвеллом і Релеєм.

Електромагнітне випромінювання грозових розрядів є прикладом НШС в атмосфері природного походження. Спектр блискавичного розряду лежить в діапазоні $1 \dots 10^6$ Гц, основна частина енергії зосереджена в діапазоні $10^2 \dots 10^5$ Гц [159]. Коефіцієнт ширококустовості цих процесів становить [158]: $\mu = \Delta f / f_0 = (f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}) \approx 0,9 \dots 1,1$.

В такому широкому частотному діапазоні випромінювання середовище поширення (хвилевід Земля - іоносфера) має дисперсні властивості і різне погонне ослаблення для різних ділянок спектра випромінювання. Це призводить до того, що на різних віддальх від джерела грозового розряду спектр сигналу змінюється, і цю обставину необхідно враховувати при реалізації оптимального приймача таких сигналів.

Акустичні шуми об'єктів техніки (автомобілі, літаки тощо) також є надширокосмуговими процесами, що лежать в діапазоні частот від десятків Гц до одиниць кГц.

Ширина спектра акустичних сигналів при поширенні в атмосфері внаслідок нерівномірності загасання різних спектральних компонент сильно змінюється в залежності від дальності прийому (див. розд. 2). Звуження ефективної ширини спектра джерела з дальністю буде приводити до погіршення роздільної здатності і, як наслідок погіршення точності акустичних систем.

Модифікована кореляційна функція, була запропонована нами для обліку можливої деформації часового масштабу [40].

$$Z(\tau) = \int_0^{\infty} X(t)Y\left(\frac{t-\tau}{b}\right)dt \quad (4.38)$$

Фур'є образи сигналів:

$$\begin{aligned} X(t) &\Rightarrow X(i\omega) = \int_0^{\infty} X(t) \exp(-i\omega t) dt \\ Y\left(\frac{t}{b}\right) &\Rightarrow Y(bi\omega) = \int_0^{\infty} Y\left(\frac{t}{b}\right) \exp(-i\omega t) dt \end{aligned} \quad (4.39)$$

також мають деформований масштаб по частоті. Таке перетворення корисно для опису процесів, наприклад, при різних довжинах хвиль сигналу РЛС. Так доплерівський зсув частоти F_i сигналу, розсіяного об'єктом що рухається зі швидкістю V :

$$F_i = \frac{2V}{\lambda_i} = 2V \frac{f_i}{c}, \quad (4.40)$$

де λ_i = довжина хвилі і f_i частота опромінюючого сигналу. Зрозуміло, що доплерівський зсув частоти сигналів, розсіяних на різних частотах буде істотно відрізнятися, що не дозволяє здійснити їх спільну обробку і аналіз. Причому ця відмінність визначається коефіцієнтом пропорційності $\frac{\lambda_i}{2}$. Якщо доплерівські

частоти перерахувати через цей коефіцієнт, тобто масштабувати частоти (4.39), то отримані спектри в термінах швидкостей руху розсіювачів можна порівнювати і спільно обробляти. Як приклад на рис.4.21 наведені масштабовані доплерівські спектри відбиття від морської поверхні, отримані на хвилях 8мм і 3 см з використанням імпульсних радарів.

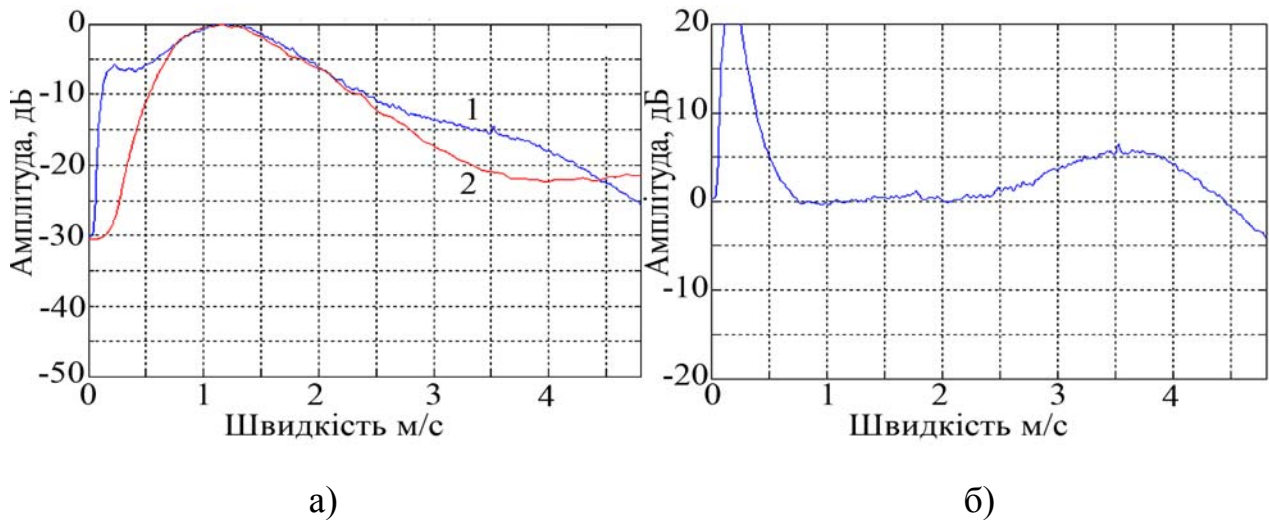


Рис. 4.21. Спектри відбиттів від моря на хвилях сантиметрового і міліметрового діапазонів при горизонтальній поляризації випромінювання і прийому: швидкість вітру 11 ... 12 м/с, кут ковзання $0,25^{\circ}$, опромінення назустріч хвилі; а - спектри відбиттів; 1 - $\lambda = 3$ см, 2 - $\lambda = 8$ мм; б - різницевий спектр.

Частоти перераховані в швидкості руху розсіювачів з використанням відомого співвідношення Доплера. Незважаючи на істотну різницю частот РЛС (приблизно в 4 рази) після приведення їх до одного масштабу, з використанням запропонованого підходу, можливий їх аналіз і спільна обробка. Аналогічно можна зробити і, використовуючи для аналізу в таких випадках введені модифіковані кореляційні функції (4.38) зі зміненими часовими масштабами. Аналіз рис. 4.21 показує, що в міліметровому діапазоні при розсіянні від моря більш істотний внесок високочастотних компонент спектра (розсіювачів з великими швидкостями руху), пов'язаних з зруйнував хвилями і бризками. Подібним чином можна зробити і при побудові двовимірної кореляційної функції дальність-швидкість. Пропонований підхід схожий на використання масштабування при вейвлет аналізі.

Оптимальна фільтрація сигналів в середовищах з втратами і дисперсією. Якщо сигнал на вході каналу зв'язку $\dot{S}(\omega)$ та на відстані z від джерела він може бути записаний з урахуванням (4.34) у вигляді:

$$\dot{S}(\omega, z) = L(\omega, z) \exp(\varphi(\omega, z)) \dot{S}(\omega), \quad (4.41)$$

де перший співмножник, що залежить від уявної частини коефіцієнта заломлення визначатиме загасання спектральних компонент сигналу при їх поширенні в середовищі, а другий, що залежить від дійсної частини коефіцієнта заломлення - фазові спотворення, що отримується при поширенні. Оптимальний фільтр для сигналу, що приймається на видаленні z від джерела повинен мати частотну характеристику комплексно сполучену з його спектром:

$$\dot{S}_{opt}(\omega, z) = \dot{S}^*(\omega, z), \quad (4.42)$$

тобто зобов'язаний враховувати амплітудні спотворення сигналу в середовищі $L(\omega, z)$ і вносити фазові передспотворення $\exp(-\varphi(\omega, z))$, що компенсують вплив середовища поширення, а також забезпечують когерентне додавання всіх його спектральних компонент $\dot{S}^*(\omega, z)$. На відміну від недиспергуючих середовищ без втрат, в цьому випадку, в залежності від дальності до джерела буде змінюватися фазочастотний склад сигналу, а значить повинен і змінюватися вид частотної характеристики узгодженого фільтра.

Співвідношення (4.42) для випадку надширокосмугових сигналів дозволяє оцінити смугу пропускання каналу зв'язку, а значить і смугу пропускання оптимального фільтра:

$$L(\Delta\omega, z) \approx \frac{1}{2}. \quad (4.43)$$

Оцінки з використанням даних [160, 161] і співвідношення (4.43) показують, що при необхідності виявлення джерел акустичного шуму на

відстанях 1 ... 10 км смуга пропускання оптимального приймального пристрою не перевищує 1 кГц.

Висновки до розділу 4

1. Опис просторово-часової нестаціонарності розсіяного ділянками суші, покритими рослинністю сигналу може бути засновано на використанні вкладених напівмарковських процесів.

Усередині кожного з фазових станів процес може розглядатися, як локально Гаусів. Для опису флуктуацій амплітуди або миттєвих значень на виході фазового детектора можна використовувати зіставний релеєвський або гаусів закони розподілу. Просторові спектри розсіяних місцевістю сигналів задовільно описуються статечними функціями з показником ступеня 2 ... 4.

2. ПЕПР розсіювання від ділянок з рослинним покривом в УКХ і НВЧ діапазонах змінюється протягом сезону вегетації, досягаючи максимуму до її завершення. Перепад становить до 6..7 дБ. Збільшення ПЕПР пов'язано з наростанням біомаси. Для опису процесу наростання біомаси а також зміни ПЕПР рослинності можна використовувати фінітні атомарні функції Кравченко. Вологість в період вегетації змінюється незначно, істотно убуваючи перед скиданням листя.

3. Спектри сигналів, розсіяних окремими фрагментами рослин задовільно описуються експонентними функціями в динамічному діапазоні до 30дБ.

4. Отримані експериментально дані щодо розподілу розмірів відбиваючих ділянок, вкритих різними типами рослинності, їх просторові спектри, а також характеристики розсіювання (ПЕПР, частотні спектри) і їх залежність від сезону, швидкості і напрямку вітру дозволяють створити імітаційну модель розсіяного рослинними покривами сигналу, що враховує просторово часову нестаціонарність відбиттів.

5. У спектрах сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, які можуть виступати в якості сигналів підсвічування для активно-пасивних систем

радіолокації, на частотах від 6 до 60 Гц, відповідних доплерівському зсуву частоти відбиттів від повітряних об'єктів, спектральна щільність істотно нижче - на 20 ... 30дБ, ніж в області інформаційних частот, чим і забезпечуватиметься можливість їх застосування для вирішення задач радіолокації і дистанційного зондування. Це співвідношення слабо залежить від робочої частоти і часу доби.

6. Запропоновано імітаційну модель нестационарних акустичних шумів природних (вітру, листя) і антропогенних (кроків людини, пострілів автоматичної зброї) з використанням напівмарківських вкладених процесів з двома фазовими станами. Визначено спектральні характеристики (ширина, спектральна щільність, швидкість убудання) і часи існування цих процесів в кожному з станів (сплеск / пауза.). Показано, що при сплесках розширення спектра шумів для деяких з процесів перевищує на порядок ширину спектра при паузах, наприклад, при звуці пострілу. Форма спектра в кожному з фазових станів задовільно описується фрактальними залежностями, а щільності розподілу часів існування в кожному з фазових станів істотно відрізняються від експоненційних. Закони розподілу миттєвих значень шуму відрізняються від гаусової моделі, однак в кожному з фазових станів можуть бути апроксимовані нормальним законом розподілу. Тому щільність розподілу процесу в цілому може апроксимувати зіставним нормальним для миттєвих значень і релеєвським для амплітуд законами розподілу. Це означає, що в кожному з фазових станів процес може описуватися локально гаусовою моделлю. Запропонована імітаційна модель акустичних шумів місцевості і об'єктів дозволяє оцінювати робочі характеристики систем акустичної розвідки (дальності дії), і може використовуватися при розробці алгоритмів оцінки координат і розпізнавання типу об'єктів.

7. Характеристики звуку пострілу є нестационарним процесом. Його статистики можуть описуватися змінною у часі моделлю нормального шуму, а спектри фрактальними залежностями, причому швидкість зменшення спектральної щільності змінюється з часом.

8. Дефекти в ході людини проявляються у відмінностях часів існування процесу в різних фазових станах, їх інтенсивності та спектрах. Різниця цих характеристик для різних фазових станів може служити інформативним критерієм для виявлення дефектів ходи. Аналогічний підхід може використовуватися і для виявлення дефектів зброї по звуку пострілу. Відмінності в спектрах, темпі стрільби (зміни періоду стрільби) можуть бути інформативними ознаками для виявлення дефектних зразків.

9. Запропоновано модифіковану кореляційну функцію, яка дозволяє врахувати деформацію спектрів (часових масштабів). Розглянуто вплив середовища поширення на характеристику узгодженого фільтра. Використання пропонуваніх підходів є перспективним для опису процесів поширення, виявлення, вимірювання та розпізнавання сигналів в середовищах з дисперсією і втратами. Використання такого підходу може бути корисно при аналізі результатів багатохвильового дистанційного зондування середовища.

РОЗДІЛ 5

СМАРТ-ГРІД ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ОБ'ЄКТІВ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Створення роботизованих датчиків, розвиток каналів зв'язку, засобів накопичення та обробки інформації призводить до того, що системи управління стають в повній мірі інтелектуальними системами з розподіленим інтелектом (Smart Grid). До теперішнього часу технології Smart Grid не знайшли гідного застосування для підвищення ефективності використання наземних об'єктів техніки. У цьому розділі розглянуто наукові основи побудови хмарних інтелектуальних мереж з об'єктів наземної техніки, комплексування сенсорів різних типів і діапазонів довжин хвиль, запропоновані методики оцінки ефективності пропонованих підходів. Основні результати розділу опубліковані в роботах [118, 121- 125].

5.1. Виникнення поняття Smart Grid

Спочатку Smart Grid розглядалися як перспективна концепція майбутньої енергетики [130, 131]. Потім ці підходи були використані у багатьох областях, в тому числі і при розвитку концепції «розумного будинку» [126- 129].

Останнім часом під Smart Grid системами розуміють системи з роздільним інтелектом, так звані хмарні системи, в яких кожна ланка вирішує завдання в обсязі своєї компетентності, обмінюючись отриманими результатами з ланками як вищого, так і нижчого рівнів і використовує для вирішення своїх задач можливості підсистем вищого рівня ієрархії.

Smart Grid можна описати наступними аспектами функціонування [126- 131]: гнучкість, доступність, надійність, економічність.

Аналогічні принципи можуть використовуватися і при побудові інтелектуальних розподілених мереж управління об'єктами військової техніки.

Вперше принципи Smart Grid технологій були реалізовані в ракетному комплексі «Граніт» з протикорабельною крилатою ракетою П-700 великої дальності

підводно-надводного старту, розробки 70 р.р. 20ст [132]. Він призначений для ураження авіаносних груп НАТО. Комплекс забезпечує залпову стрільбу всім боєкомплектom з раціональним просторовим розташуванням ракет і дозволяє діяти проти одиночного корабля за принципом «одна ракета-один корабель» або «зграєю» проти ордера кораблів. У польоті ракети обмінюються інформацією про цілі. Якщо ракета - «навідник» перехоплена, тоді одна з інших ракет автоматично приймає на себе її функції [132]. У БЦОМ закладені дані з протидії засобам радіоелектронної боротьби противника, здатні постановкою завад відводити ракети від цілі, тактичні прийоми ухилення від вогню засобів протиповітряної оборони [132].

Ці ідеї отримали подальший розвиток у наступних комплексах ПКР - «Яхонт», «Онiкс», «БраМос» [133, 145, 146]. Для виключення помилки при виборі маневру і ураження саме заданої цілі в бортову обчислювальну машину закладено «портрети» всіх сучасних класів кораблів у вигляді інформації про електромагнітні та інші силові поля, що притаманні тільки даному типу корабля, а так само відомості про тип ордерів кораблів, що дозволяє ракеті атакувати головні цілі в групі.

І якщо в системах ППО і ПРО принципи побудови інтелектуальних розподілених мереж вже використовуються, то для об'єктів наземної техніки їх впровадження є зараз актуальним завданням.

Перші кроки в цьому напрямку зроблені при створенні російської платформи «Армата» (Т-14) [134].

На відміну від традиційних танків, Т-14 є «мережецентричним танком», тобто призначений не для одиночного бою, а для роботи з групою різних бойових машин в одній тактичній ланці, виконуючи функції розвідки, цілевказівки і дистанційного керування через єдину систему управління тактичної ланки від концерну «Сузір'я» [134]. Це дозволяє всім машинам платформи «Армата» отримувати оперативну обстановку в режимі реального часу і автоматично розраховувати балістичні дані для систем керування вогнем в сценарії ураження цілей не однієї «Арматою», а відразу усією групою, яка включає в себе, крім Т-14, ще декілька важких БМП Т-15, САУ 2С35 «Коаліція - СВ» і ударний вертоліт [134].

Наведені приклади показують, що при впровадженні SmartGrid технологій керування об'єктами військової техніки, ключовими питаннями є створення багатоканальних датчиків відображення інформаційних сцен, які використовують різні фізичні поля, а також автоматизація процесів обміну інформацією між різними учасниками сцен і пунктами управління.

5.2 Датчики і канали отримання інформації об'єктів наземної техніки про навколишню обстановку

Датчики, які використовують електромагнітні поля. Основними каналами отримання інформації у об'єктах наземної техніки, зокрема бронетанкової (БТТ), є прилади оптичного та інфрачервоного діапазонів з дальністю дії до 5 км в денний час і до 3 км в нічний.

Основні технічні характеристики використовуваних на вітчизняній і зарубіжній БТ оптичних і ІЧ датчиків, запозичені з роботи [135] наведені в табл. Є.1.

Додатково до електромагнітних хвиль оптичного і ІЧ діапазонів для розвідки в інтересах об'єктів БТТ можуть використовуватися і існуючі випромінювання систем наземного і космічного базування інших діапазонів довжин хвиль [24, 110, 111], телевізійних центрів [24], мовних станції КХ [25, 26, 27, 113- 117, 136], геостаціонарних телевізійних та навігаційних супутників [137- 139] в тому числі. Для задач розвідки можуть використовуватись власні акустичні шуми об'єктів техніки [1, 12, 13, 17, 35, 36, 37]. Нижче будуть коротко розглянуті можливості використання кожного із цих додаткових інформаційних каналів, а також отриманий від цього ефект.

ЕПР об'єктів техніки в КХ і УКХ діапазонах хвиль. Для розрахунку дальності дії активно-пасивних систем, які використовують для підсвічування сигнали мовних КХ і УКХ станцій, власні радіостанції об'єктів

наземної техніки, сигнали навігаційних і геостаціонарних телевізійних супутників необхідне знання ЕПР наземних і повітряних об'єктів, що виявляються.

Використовуючи результати експериментальних досліджень на моделях [60, 140,141] в роботах [26,57] була запропонована методика і розраховані ЕПР повітряних об'єктів. Значення ЕПР повітряних об'єктів (літаків, вертольотів, БПЛА), як у резонансній, так і в короткохвильовій областях, отримані з використанням цих методик наведені в розд. 3. Аналогічним образом були оцінені ЕПР наземних об'єктів. Загальні дані ЕПР різних типів техніки приведені в табл. Є.2.

У резонансній області розсіювання ЕПР, як повітряних, так і наземних об'єктів, може мати значну величину, яка досягає сотень квадратних метрів. У той же час в короткохвильовій області їх ЕПР істотно нижча. Отримані результати показують доцільність використання випромінювань КХ і УКХ систем для вирішення завдань розвідки наземних і повітряних об'єктів техніки.

Підсвічування з використанням випромінювань мовних КХ станцій. Особливістю даного виду радіолокації є використання для підсвічування обстановки іоносферної хвилі мовної КХ станції. Потужність відбитого ціллю сигналу визначається співвідношенням:

$$P_T = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R F^2(\theta_T) \sigma_T(\theta_{Tr}, \theta_R) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{TrT}^2 R_{TR}^2 L_{TrT} L_{TR}} \quad (5.1)$$

де P_{Tr}, P_T - потужності випромінюваного і відбитого від цілі сигналу, що приймається; G_{Tr}, G_R - коефіцієнти посилення передавальної і приймальної антен; R_{TrT}, R_{TR} - дальності між передавачем і ціллю, ціллю і приймачем відповідно; $\sigma(\theta_{Tr}, \theta_R)$ - бістатична ЕПР цілі при напрямках на передавач і приймач θ_{Tr}, θ_R - відповідно;

L_{TrT}, L_{TR} - втрати при поширенні радіохвиль від передавача до цілі і від цілі до приймача відповідно; λ - довжина хвилі сигналу на несучій частоті.

Потужність P_R сигналу, що приймається від передавальної станції:

$$P_R = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R F^2(\theta_{Tr}) \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{TrR}^2 L_{TrR}}, \quad (5.2)$$

де $F^2(\theta_{Tr})$ - значення діаграми спрямованості приймальної антени по потужності в напрямку на передавач - θ_{Tr} .

При відстані від станції підсвічування до цілі і приймальної системи істотно більших відстані від цілі до приймача $R_{TrT}^2 \approx R_{TrR}^2 \gg R_{TR}^2$, враховуючи, що втрати при поширенні до цілі і приймача приблизно однакові $L_{TrT} \approx L_{TrR}$ (ціль в першому наближенні можна вважати ізотропно відбиваючою $\sigma_T(\theta_{Tr}, \theta_R) \approx \sigma_T = const$ і такою, що знаходиться у межах прямої видимості приймаючої системи $L_{TR} \approx 1$) відношення потужностей сигналів, що приймаються від цілі та передавачем мовної станції μ_{TR} визначається співвідношенням:

$$\mu_{TR} = \frac{P_T}{P_R} \approx \frac{F^2(\theta_T)}{F^2(\theta_{Tr})} \frac{\sigma_T}{(4\pi) R_{TR}^2} \quad (5.3)$$

З (5.3) видно, що для збільшення відношення сигналу від цілі до прямого сигналу передавача станції підсвічування необхідно збільшувати відношення значень діаграмного множника в напрямках на ціль і на станцію підсвічування. При цьому доцільно в напрямку на ціль орієнтувати максимум діаграми спрямованості, а в напрямку на станцію підсвічування формувати нуль діаграми. Глибина провалу в діаграмі спрямованості буде обмежувати максимальну дальність виявлення. Також, підвищення співвідношення сигнал-завада може бути досягнуте за рахунок застосування вузькосмугової доплерівської фільтрації. Відомо, що спектр зворотного розсіювання від повітряних, надводних і наземних

об'єктів досить вузький навіть в НВЧ діапазоні. Ширина спектру лінії корпусу не перевищує десятка Гц [26, 109]. В КХ і УКХ діапазонах хвиль він ще вужче – менш ніж 1 Гц. Приблизно такий же порядок величин має і величина доплерівського зсуву частоти (одиниці-десятки Гц) [26]. При доплерівській селекції можна виділяти спектральну лінію розсіяного об'єктом сигналу на доплерівській частоті. Відношення сигнал-шум μ , при цьому, буде визначатися відношенням сигналу цілі μ_{TR} до сигналу підсвічування, а також відношенням рівня спектральної лінії несучої до спектральної щільності шуму в діапазоні доплерівських частот (швидкостей), де відбувається виявлення цілі μ_{SN} :

$$\mu = \mu_{TR} \mu_{SN} \quad (5.4)$$

Використовуючи співвідношення (5.3), можна записати вираз для оцінки дальності виявлення в бістатичних РЛС:

$$R_{TR} = \sqrt{\frac{\mu_{SN}}{\mu} \frac{\sigma_T}{(4\pi)} \frac{F^2(\theta_T)}{F^2(\theta_{Tr})}} \quad (5.5)$$

Для ймовірностей виявлення 0,9, хибної тривоги 10^{-2} (потрібне співвідношення сигнал - завада становить близько $\mu=10$ дБ), рівні шуму по відношенню до несучої $\mu_{SN}=40...50$ дБ при налаштуванні на доплерівські зсуви частоти, очікувані дальності виявлення об'єктів с різними ЕПР при різній глибині провалу діаграми спрямованості приймальної антени в напрямку на передавач, отримані з використанням співвідношення (5.5), приведені на рис.5.1. На цьому ж малюнку заштрихованими областями показані значення ЕПР наземних і повітряних об'єктів техніки, взяті з табл. Є.2. Для отримання оцінок ЕПР різних типів об'єктів в декаметровому діапазоні хвиль використовувалися результати, наведені в додатку Г, рис. Г1, Г2.

Аналіз показує, що забезпечивши придушення прямого сигналу підсвічування не менше ніж на 40 дБ можна забезпечити відстані виявлення в одиниці кілометрів для цілей з ЕПР більш 10 м^2 .

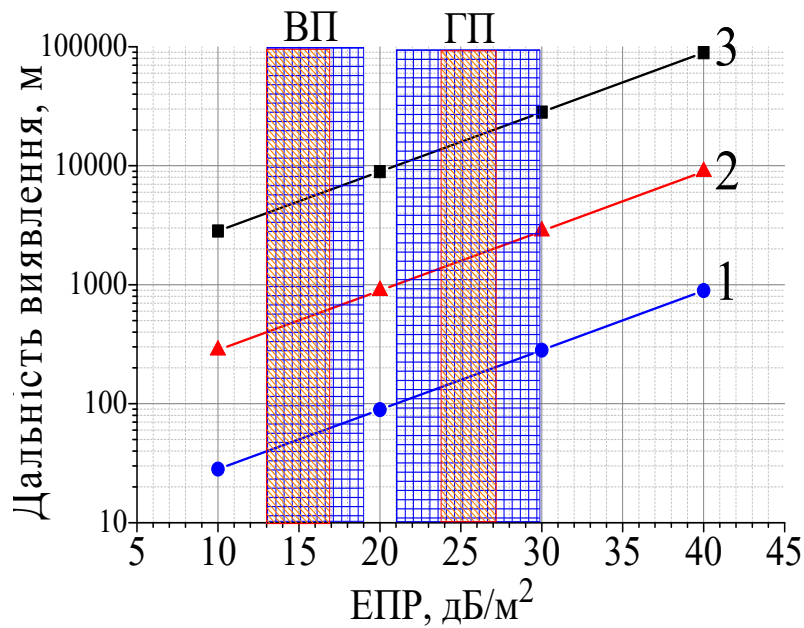




Рис.5.1. Відстані виявлення об'єктів при використанні підсвічування мовними станціями КХ діапазону (глибина провалу діаграми спрямованості антени в напрямку підсвічування: 1- 0 дБ, 2- 20 дБ, 3- 40 дБ); ГП, ВП- горизонтальна і вертикальна поляризації;  - наземні об'єкти,  - повітряні об'єкти

Такі або більші ЕПР в декаметровому діапазоні у об'єктів, як наземної, так і повітряної техніки. Дещо більші відстані виявлення при використанні горизонтальної поляризації випромінювання і прийому, ніж вертикальної, що пояснюється більшими значеннями їх ЕПР на цій поляризації. Для реалізації глибокого придушення прямого сигналу підсвічування необхідно або формування нуля діаграми в напрямку передавача, наприклад, інтерферометричним методом з використанням 2-х антен, або застосування поляризаційних методів придушення прямого сигналу.

Підсвічування обстановки з використанням випромінювань власних радіостанцій КХ і УКХ діапазонів, встановлених на техніці. Крім зовнішніх джерел підсвічування об'єктами наземної техніки можуть використовуватися для цих цілей і власні засоби зв'язку у вигляді КХ і УКХ радіостанцій. Для групи об'єктів техніки можна запропонувати наступний алгоритм використання власних засобів радіозв'язку для освітлення обстановки. Кожен з об'єктів групи послідовно випромінює про-

тягом деякого часу Δt , що визначається необхідним розрізненням по доплерівській частоті Δf , монохроматичний або модульований по амплітуді або частоті сигнал:

$$\Delta t = 1/\Delta f \quad (5.6)$$

Оскільки ширина доплерівської лінії відбиттів від корпусу повітряних об'єктів менше 1 Гц, то тривалість сигналу підсвічування повинна становити кілька секунд, щоб не відбувалося її розширення за рахунок обмеженого часу опромінення. Кожен з об'єктів може підсвічувати обстановку на своїй частоті. При цьому частота може використовуватися для визначення номера об'єкту і його координат. При цьому вдається поєднати режим уоки - токі з випромінюванням чірп сигналу. Тому запропонований нами режим можна назвати: чірп - уоки - токи. Особливістю даного режиму активно-пасивної радіолокації, в порівнянні з розглянутим раніше випадком, є підсвічування обстановки поверхневою хвилею, яка схильна до суттєвого інтерференційному завмиранню внаслідок впливу поверхні розділу.

Потужність прямого сигналу і сигналу підсвічування, відбитого ціллю можна визначити з урахуванням співвідношень (5.1, 5.2):

$$P_R = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R_R^2} V_R^2 \quad (5.7a)$$

$$P_T = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R \sigma_T(\theta_{Tr}, \theta_R) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_T^4} V_T^4. \quad (5.7b)$$

де $V_R = \frac{h_{Tr} h_R}{\lambda R_R}$, $V_T = \frac{h_{Tr} h_T}{\lambda R_T}$ - множник ослаблення поверхні при дальності зв'язку

R_R і дальності радіолокації R_T , а h_{Tr} , h_R , h_T висота антен передавача, приймача і цілі відповідно, причому $h_{Tr} = h_R$. Нехай N і ΔF - коефіцієнт шуму і смуга пропускання приймача.

Тоді, враховуючи, що ці потужності мають перевищувати рівень шумів в μ_T раз при виявленні цілі і μ_R - раз при передачі мовного сигналу:

$$P_R = \mu_T kt \Delta F_R N \quad (5.8 \text{ а})$$

$$P_T = \mu_R kt \Delta F_T N, \quad (5.8 \text{ б})$$

а також те, що потрібні співвідношення сигнал шум в цих випадках приблизно однакові $\mu_T \approx \mu_R$, використовуючи співвідношення (5.7, 5.8) можна записати:

$$\frac{\Delta F_T}{\Delta F_R} = \frac{\sigma_T(\theta_{Tr}, \theta_R)}{(4\pi)R_T^4 R_R^{-2}} \left(\frac{h_{Tr} h_T}{\lambda R_T} \right)^4 \left(\frac{h_{Tr} h_R}{\lambda R_R} \right)^{-2} = \frac{\sigma_T}{(4\pi)} \frac{R_R^4}{R_T^8} (h_T)^4 (\lambda)^{-2}. \quad (5.9)$$

Тоді відстань при такому варіанті активно-пасивної радіолокації визначиться із співвідношення (5.9):

$$R_T = \left(\frac{\Delta F_T}{\Delta F_R} \right)^{-1/8} (R_R^4)^{1/2} \left(\frac{\sigma_T}{(4\pi)} \right)^{1/8} (h_T)^{1/2} (\lambda)^{-1/4}. \quad (5.10)$$

Результати оцінки відстаней виявлення від ЕПР цілі приведені на рис. 5.2.

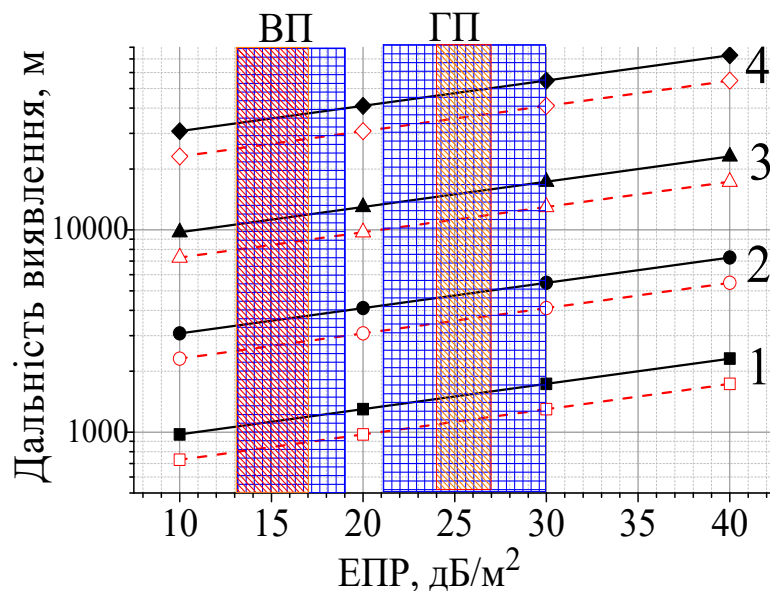


Рис.5.2. Відстань виявлення об'єктів при підсвічуванні обстановки власними радіостанціями КХ діапазону ($\lambda = 20$ м; полоси частот: — 0,1 Гц, ---- 1 Гц; висоти об'єктів: 1- 10 м, 2- 100 м, 3- 1 км, 4- 10 км ; ГП, ВП- горизонтальна та вертикальна поляризації; - наземні об'єкти, - повітряні об'єкти.

При роботі танків в групі ідеологія використання власних засобів радіозв'язку полягає в послідовному підсвічуванні обстановки кожним з танків групи своєю радіостанцією, шляхом випромінювання протягом деякого часу монохроматичного або модульованого сигналу певної частоти, яка може бути пов'язана з номером цього об'єкту в групі, а також його місцем у групі. Решта радіостанцій групи працюють при цьому на прийом. Потім підсвічування обстановки здійснює наступна машина, а решта працюють на прийом. Частота модуляції може використовуватися для оцінки різниці часів (відстаней) між сигналом, що пройшли від джерела підсвічування до приймача і сумарною відстанню між джерелом підсвічування, ціллю і приймачем. При оцінці дальності дії систем зв'язку і радіолокації (5.7, 5.10) значення потужності випромінювання, чутливості приймача і реалізовані співвідношення сигнал / завада при заданій дальності зв'язку використані з табл. Є.3.

Використання для підсвічування сигналів ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Compass). Для освітлення повітряної обстановки можуть використовуватися випромінювання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), як існуючих в даний час російської і американської (ГЛОНАСС, GPS), так і створених європейської та китайської (Galileo, Compass). У цьому підрозділі наведені результати оцінок дальності виявлення наземних і повітряних об'єктів, засновані на методиці, розробленій в роботах [137- 139].

Для оцінки рівня сигналу ГНСС P_{R0} на виході стандартної антени приймача споживача з широкою діаграмою спрямованості з посиленням G_{R0} можна використати співвідношення (5.2). Він повинен складати не менше P_{R0} [дБ] ~ -161 дБ/Вт. Ця величина регламентована в інтерфейсних контрольних документах власників навігаційних систем ГЛОНАСС і GPS. Це означає, що в місці відбиття від об'єкта сигнали ГНСС на частотах L1 і L2 мають потужність не менш ніж -161 дБ/Вт на виході лінійно поляризованої антени з коефіцієнтом посилення 3 дБ при кутах піднесення більше 5 градусів. У перерахунку на щільність потоку потужності це становить $1,38 * 10^{-14}$ Вт/м². Чутливість по по-

шуку сигналу приймачів ГНСС (S_r) на даний момент складає -175 дБ/Вт при накопиченні вимірювань сигналу на епісі коду 1 мс і типовим коефіцієнтом посилення антени від +5 дБ (в зеніте) до -2 на кутах менше 15 градусів [139]. З використанням співвідношення (5.1) можна записати дальність виявлення для систем, що використовують для підсвічування обстановки сигнал ГНСС:

$$R_r^2 < 4 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{\sigma}{S_r} \cdot G_r \quad (5.11)$$

Результати оцінок дальності виявлення [139], з використанням співвідношення (5.11) для чутливості приймача: $S_r = -171$ дБ/Вт - накопичення вимірювань на інтервалі 1 мс, $S_r = -181$ дБ/Вт на 10 мс, $S_r = -191$ дБ/Вт на 100 мс, $S_r = -201$ дБ/Вт на 1 с і $S_r = -211$ дБ/Вт на 10 с і використанні ФАР з $G = 1000$ (30 дБ) приведені на рис. 5.3.

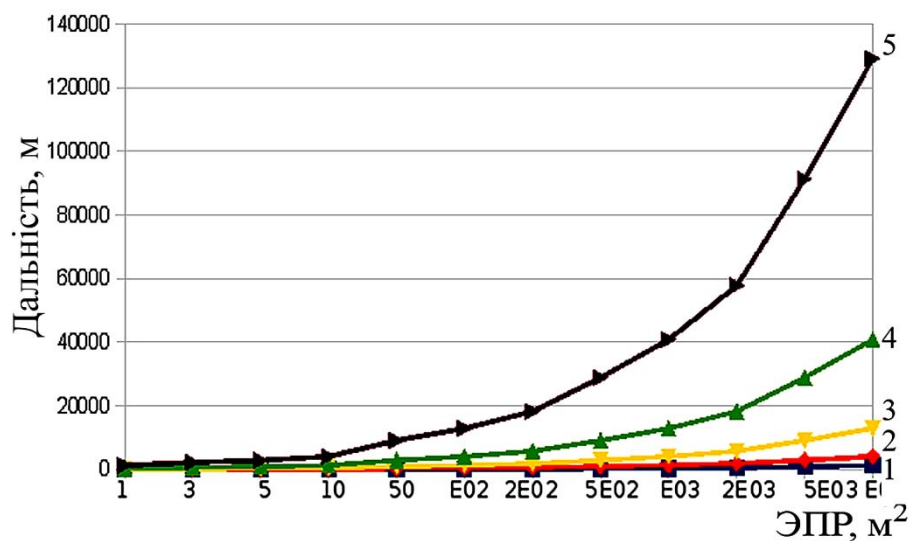


Рис. 5.3. Дальність радіолокації для різних часів накопичення [139]: 1- час накопичення 1 мс; 2- 10 мс; 3- 100 мс; 4- 1 с; 5- 10 с. Посилення приймачою антенної решітки 20 дБ.

Аналіз показує:

а) використання ГНСС в якості «підсвічування» неприйнятне для локації динамічних об'єктів з малим ЕПР;

б) починаючи з часу накопичення більше 1 с локація можлива для об'єктів з великою ЕПР.

в) подібний тип підсвічування безперспективний для використання на об'єктах бронетехніки для освітлення повітряної і наземної обстановки.

Використовуючи приведені в табл. Є.2 дані і результати розрахунків на рис. 5.1, 5.2 можна оцінити дальності виявлення різних об'єктів техніки при їх підсвічуванні, як мовними станціями КХ діапазону, так і власними радіостанціями, встановленими на бронетехніці. Вони показані на рис. 5.1, 5.2 заштрихованими областями.

Аналіз показує, що для висотних повітряних об'єктів дальності виявлення можуть становити десятки кілометрів. У той же час наземні і низьколетючі об'єкти можуть виявлятися лише на невеликих відстанях в одиниці кілометрів.

Використання систем акустичної розвідки для виявлення наземних і повітряних об'єктів. Можливість використання власних акустичних шумів об'єктів для їх виявлення докладно розглянута в роботах [35- 37], проаналізована в розділі 2 і показано (табл.Б.5), що використання цього каналу дозволяє виявляти об'єкти (літаки, танки, звук пострілу) у відсутності перешкод від шуму дощу і вітру на відстанях більш ніж 8 км. У той же час при несприятливих кліматичних умовах дальність виявлення істотно знижується і в ряді випадків не перевищує 1 км.

5.3 Канали обміну інформацією і їх комплексне використання

В даний час для обміну інформацією між об'єктами групи використовуються радіостанції - коротких хвиль (КХ) і ультракоротких хвиль (УКХ). Вони забезпечують підтримку зв'язку на відстанях в кілька десятків кілометрів. Однак швидкість обміну інформацією в такому режимі вельми обмежена. Наступним етапом є автоматизація процесу передачі даних про обстановку між окремими учасниками сцени, створення автоматизованих систем відображення обстановки з урахуванням ризиків для кожного учасника сцени. Для цього також

можуть використовуватися штатні радіостанції, що працюють в режимі автоматичної передачі телеметричних даних. Крім того необхідно відображення як завдань, що виконуються сусідами, так і технічної готовності кожного з учасників до їх виконання. Інтеграція в єдину систему управління (ЕСУ) групи також різко скорочує проблему «дружнього вогню». Точне визначення по ЕСУ групи координат власної техніки (використовуючи ГНСС приймачі) гарантує, що об'єкти групи не знищать випадково власних колег. Інформаційний обмін між об'єктами групи своїх координат і даних координат противника дозволяє підвищити ефективність їх застосування.

Приймачі ГНСС - позиціонування спільно з автоматизованою системою обміну інформацією з командним пунктом і учасниками групи дозволяє здійснювати ураження противника по розрахунковим координатами його знаходження. Кожен учасник групи, виявивши противника, після визначення його координат щодо власних, використовуючи лазерний далекомір і кутомірні оптичні системи, може передати їх в ЕСУ, яка розподіляє ці дані по решті учасників групи.

Прикладом подібного інформаційного обміну є сучасні протикорабельні ракетні комплекси РФ [132, 133].

Вочевидь, якщо противники мають однотипні інформаційні системи з однаковими технічними можливостями, то в них будуть однакові і ймовірності виживання. Якщо ж у одного з супротивників технічні можливості систем розвідки, управління зброєю і сама зброя краще, то підвищується і ймовірність його виживання в конфлікті. До аналогічного результату приводить і поява додаткових інформаційних каналів, що використовують інші фізичні поля, наприклад, електромагнітні поля радіодіапазону або акустичне випромінювання об'єктів.

Нехай залежності ймовірностей виявлення об'єктів противника від дальності різними системами (оптичними, інфрачервоними, радіосистемами) приблизно однакові. Тоді спільне їх використання дозволяє істотно розширити зону впевненого виявлення противника, а значить і ймовірність виживання. До тако-

го ж результату (розширення зони виявлення противника) може призводити використання додаткової інформації, отриманої від інших учасників сцени.

Ефективність комплексування систем, які використовують різні фізичні поля. При виявленні сигналу з випадковою початковою фазою і амплітудою ймовірність виявлення D і помилкової тривоги F пов'язані співвідношенням [142]:

$$D = F^{\frac{1}{1+\mu}}, \quad (5.12)$$

де μ - співвідношення сигнал шум.

При виявленні сигналу на фоні внутрішніх шумів приймальної апаратури можна записати:

$$P_r = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R \lambda^2 \sigma_T}{4\pi^3 R^4} V^4. \quad (5.13)$$

З урахуванням того, що:

$$\Pi = \frac{P_{Tr} G_{Tr} G_R \lambda^2 \sigma_T}{4\pi^3 P_N}, \quad (5.14)$$

де P_{Tr}, P_r – випромінювальна і прийнята потужності, ЕПР і дальність до цілі, $G_{Tr} G_R$ – коефіцієнти посилення передавальної і приймальної антен, Π, P_N – потенціал РЛС і потужність шуму на вході приймача, V - інтерференційний множник ослаблення поверхні. Враховуючи, що $P_r = \mu P_N$ можна записати співвідношення сигнал-шум:

$$\mu = \Pi \frac{\sigma_T}{R^4} V^4 \quad (5.15)$$

Для висотних цілей $V^4 \approx 1$, а для цілей розташованих на поверхні розділу (наземних або надводних), а також поблизу від неї (маловисотних повітряних)

$V^4 \approx \frac{1}{R^4}$, для висот: $h_T < \frac{\lambda R}{4h_R}$, де h_T , h_R висота цілі і антени РЛС.

Для апроксимації множника ослаблення можна використати співвідношення [109]:

$$V^4 \approx \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{R_1}\right)^4} = \frac{(R_1)^4}{(R_1)^4 + (R)^4}, \quad (5.15 \text{ а})$$

де

$$R_1 = \frac{4h_R h_T}{\lambda} \quad (5.15 \text{ б})$$

дальність першого інтерференційного пелюстка поля при висотах розташування цілі h_T і РЛС h_R та довжині хвилі випромінювання λ .

Таким чином, співвідношення сигнал/шум прямо пропорційне потенціалу системи, ЕПР цілі і обернено пропорційне четвертому ступеню дальності для висотних об'єктів і восьмому ступеню для маловисотних або поверхнево розташованих.

У разі маловисотних або поверхнево розташованих цілей найчастіше фактором, що лімітує дальність їх виявлення є не внутрішні шуми апаратури, а завади від місцевих предметів - відбиття від ділянок суші, моря або ясного неба. Тоді з урахуванням виразів (5.12-5.15) можна записати:

$$D \approx F \frac{1}{1 + \Pi \frac{\sigma_T V^4}{R^4}}, \quad (5.16)$$

а значить, для висотних об'єктів має вигляд:

$$D = F \frac{1}{1 + \Pi \frac{\sigma_T V^4}{R^4}} \approx F \frac{R^4}{\Pi \sigma_T V^4} \approx F \frac{R^4}{\Pi \sigma_T}, \quad (5.17 \text{ а})$$

а для маловисотних:

$$D \approx F \frac{R^8}{\Pi \sigma_T (R_1)^4} \quad (5.17 \text{ б})$$

Із співвідношень (5.17) можна визначити дальності R_0 , на яких забезпечуються задані ймовірності правильного виявлення D_0 і хибної тривоги F_0 для висотних:

$$R_0 = \left(\Pi \sigma_T \frac{\ln(D_0)}{\ln(F_0)} \right)^{1/4}, \quad (5.18a)$$

і

$$R_0 = R_1^{1/2} \left(\Pi \sigma_T \frac{\ln(D_0)}{\ln(F_0)} \right)^{1/8}, \quad (5.18б)$$

відповідно для маловисотних цілей.

Тоді співвідношення (5.16-5.18) можуть бути записані у вигляді:

$$D = D_0^{x^{4m}}, \quad (5.19)$$

де $m=1$ для висотних цілей, $m=2$, а $x = \frac{R}{R_0}$ – відносна дальність. На рис. 5.4 показано характер залежності ймовірностей виявлення від дистанції для двох фіксованих ймовірностей виявлення ($D=0,5$ і $0,9$).

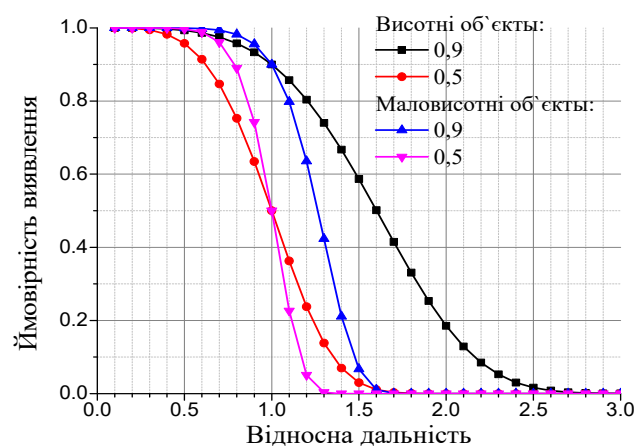


Рис. 5.4. Залежності ймовірності виявлення флукутуючого сигналу від дальності

Із рис. 5.4 виходить, що залежність ймовірності виявлення являється монотонно спадаючою функцією дальності і, в більшості випадків, при практичних розрахунках можна використовувати її апроксимацію, у вигляді ступінчастої функції з постійним значенням від нульових дальностей до дальностей, коли ймовірність виявлення дорівнює 0,9 і вважаючи її рівною нулю на більших відстанях. Це буде давати при розрахунках кілька занижені дані.

Для реальних систем розвідки, а також озброєнь, як правило, залежність ймовірностей виявлення і ураження від дистанції до цілі невідомі. У кращому випадку, в ході випробувань можуть визначатися дальності, на яких реалізуються задані ймовірності виявлення (зазвичай 0,9 або 0,99) і задані ймовірності ураження об'єктів системами озброєння.

Співвідношення (5.19) може бути переписано у виді

$$D = D_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{4m} \quad (5.19a)$$

зручному, для подальших розрахунків. В нього входять задані ймовірності виявлення D_0 на дальності R_0 для висотних $m=1$ і маловисотних $m=2$ об'єктів. Будемо вважати, що аналогічним співвідношенням (5.19a) описується і ймовірність ураження об'єкта системою озброєння при $m = 1$. При цьому під R_0 дальність ураження противника з ймовірністю D_0 .

У разі, якщо використовується кілька датчиків контролю обстановки (оптичні, радіохвильові, акустичні) і кілька систем озброєння (артилерійське, ракетне) то при статистичній незалежності одержуваних ними результатів, ймовірності знищення P_d^k і не знищення \bar{P}_d^k k -го противника визначаються

$$P_d^k = P_{det}^k P_{dest}^k \quad (5.20 a)$$

$$\bar{P}_d^k = 1 - P_{det}^k P_{dest}^k \quad (5.20 б)$$

через імовірність виявлення k -го об'єкта противника датчиками освітлення обстановки P_{det}^k і імовірність знищення k -го противника системами озброєння P_{dest}^k . Останні визначаються

$$P_{det}^k = 1 - \prod_{i=1}^{i=i_0} (1 - P_{det}^{k_i}) \quad (5.21 \text{ а})$$

$$P_{dest}^k = 1 - \prod_{j=1}^{j=j_0} (1 - P_{dest}^{k_j}) \quad (5.21 \text{ б})$$

через імовірності виявлення k -го об'єкта противника i_0 датчиками освітлення обстановки $P_{det}^{k_i}$ і імовірності знищення k -го противника j_0 системами озброєння $P_{dest}^{k_j}$. Співвідношення (5.19-5.21) дозволяють оцінити ефективність комплексного використання датчиків освітлення обстановки різних типів і систем озброєння. Імовірність успішного виконання задачі P_{01} своїм об'єктом, у випадку наявності одного об'єкта противника $k=1$ буде визначатися через творення ймовірностей ураження P_d^1 об'єкта противника і не ураження \bar{P}_d^0 ним (5.20):

$$P_{01} = P_d^1 \cdot \bar{P}_d^0 = P_d^1 (1 - P_d^0) \quad (5.22 \text{ а})$$

де індекси 0 і 1 відносяться до свого об'єкта і об'єкта противника.

Аналогічним чином визначається успішне виконання задачі об'єктом противника:

$$P_{10} = P_d^0 \cdot \bar{P}_d^1 = P_d^0 (1 - P_d^1) \quad (5.22 \text{ б})$$

Можна ввести поняття функціоналу ефективності, що характеризує наскільки імовірність знищення противника в дуельній сутичці двох об'єктів, за умови збереження живучості свого об'єкта, більше імовірності знищення противником вашого об'єкта, за умови збереження живучості об'єктом противника, визначиться з співвідношень (5.22) як:

$$\Delta = P_{01} - P_{10} = P_d^1(1 - P_d^0) - P_d^0(1 - P_d^1) = P_d^1 - P_d^0 \quad (5.23 \text{ а})$$

і буде дорівнювати різниці імовірності знищення своїм об'єктом об'єкта противника і ймовірності знищення противником свого об'єкта. З використанням (5.20 а) можна записати:

$$\begin{aligned} \Delta &= P_{det}^1 P_{dest}^1 - P_{det}^0 P_{dest}^0 = (\Delta_{det} + P_{det}^0)(\Delta_{dest} + P_{dest}^0) - P_{det}^0 P_{dest}^0 = \\ &= \Delta_{det} P_{dest}^0 + \Delta_{dest} P_{det}^0 + \Delta_{det} \Delta_{dest} \end{aligned} \quad (5.23 \text{ б})$$

де $\Delta_{det} = P_{det}^1 - P_{det}^0$, а $\Delta_{dest} = P_{dest}^1 - P_{dest}^0$ різниця ймовірностей виявлення датчиків свого об'єкта і противника, а також різниці імовірностей ураження системами озброєння свого об'єкта і противника.

Із співвідношення (5.23 б) слідує, що забезпечення більш високих імовірностей виявлення $\Delta_{det} > 0$ датчиками обстановки, чим це досягається противником і більших імовірностей знищення $\Delta_{dest} > 0$ його призводить до підвищення значень функціонала якості виконання задачі $\Delta > 0$. Із співвідношень (5.21) слідує, що доповнення системи виявлення додатковим датчиком обстановки або системи озброєння додатковою системою озброєння призводить до росту імовірності виявлення противника і ймовірності його знищення:

$$P_{det}^{k,i_0+1} - P_{det}^{k,i_0} = \prod_{i=1}^{i=i_0} (1 - P_{det}^{k_i}) - \prod_{i=1}^{i=i_0+1} (1 - P_{det}^{k_i}) = P_{det}^{k,i_0+1} \prod_{i=1}^{i=i_0} (1 - P_{det}^{k_i}) \quad (5.24 \text{ а})$$

$$P_{dest}^{k,j_0+1} - P_{dest}^{k,j_0} = \prod_{j=1}^{j=j_0} (1 - P_{dest}^{k_j}) - \prod_{j=1}^{j=j_0+1} (1 - P_{dest}^{k_j}) = P_{dest}^{k,j_0+1} \prod_{j=1}^{j=j_0} (1 - P_{dest}^{k_j}) \quad (5.24 \text{ б})$$

на величини пропорційні можливостям виявлення реалізованим доданим датчиком обстановки і можливостям ураження противника, реалізованим доданою системою озброєння.

Таким чином, поява у супротивника додаткових датчиків контролю обстановки і нових систем озброєння дозволяє йому успішніше вирішувати поставлені завдання. Тому для підвищення живучості власних об'єктів необхідно використання більшої, ніж у супротивника кількості каналів отримання інформації про зовнішню обстановку, з поліпшеними характеристиками, а також засто-

сування додаткових систем озброєння та збільшення дальності дії старих систем.

З використанням розробленого підходу в роботі [118], була проведена оцінка ефективності застосування об'єктів техніки при комплексуванні сенсорів різних типів і систем. Показано, що істотний вплив на ефективність застосування надає використання додаткової активно-пасивної системи моніторингу КХ діапазону і пасивних систем акустичної розвідки.

Висновки до розділу 5

1. Для трансформації сучасних платформ і системи їх управління в сучасну просторово розподілену інтелектуальну смарт-грід мережу необхідно їх об'єднання автоматизованими системами обміну інформацією із зазначенням пріоритетності і ступеня небезпеки окремих елементів обстановки для кожної з платформ. Система передачі телеметричної інформації про обстановку може бути побудована на основі наявних на об'єктах техніки КХ і УКХ радіостанцій.

2. Для підвищення надійності і живучості розподіленої інтелектуальної мережі інформаційні датчики окремих платформ необхідно будувати, використовуючи поля різної фізичної природи (електромагнітні та акустичні), різних діапазонів довжин хвиль (від сотень нанометрів для оптичного діапазону до десятків метрів - для радіодіапазону). Крім того необхідно застосовувати різні методи зондування навколишнього середовища як активні з випромінюванням спеціальних сигналів, так і активно-пасивні - засновані на прийомі вторинних полів створюваних відбиттями від об'єктів техніки існуючих джерел випромінювання наземного і космічного базування, а також пасивні – засновані на використанні власних оптичних, теплових і акустичних випромінювань об'єктів техніки. Це дозволить підвищити інформативність каналів надходження інформації про обстановку і живучість самих об'єктів техніки в умовах впливу на них супротивної сторони.

3. На додаток до існуючих і широко застосовуваним на об'єктах техніки оптичним і інфрачервоним системам, необхідно використовувати акустичні засоби розвідки і цілевказівки, які можуть забезпечити виявлення об'єктів техніки (наземної та повітряної) і озброєнь противника на віддаленнях до 10 км.

4. Для отримання інформації про навколишній стан можуть використовуватися вторинні поля, створювані об'єктами техніки супротивника при відбитті сигналів підсвічування мовних станцій КХ діапазону, супутникових і наземних систем телебачення і мовлення. Їх використання може дозволити виявляти рухомі об'єкти наземної та повітряної техніки на віддаленнях в одиниці кілометрів.

5. Необхідне створення автоматизованих каналів обміну інформацією між окремими учасниками сцени, і систем відображення інформації, як власних датчиків, так і отриманої від інших учасників сцени із зазначенням потенційної ступеня небезпеки, а також пасивні - засновані на прийомі власного випромінювання об'єктів в оптичному, інфрачервоному діапазонах електромагнітних хвиль, а також власних акустичних шумів об'єктів техніки.

6. Використання для підсвічування обстановки випромінювань мовних КХ станцій і власних радіостанцій об'єктів техніки може дозволити виявляти висотні повітряні цілі на віддаленнях понад 10км.

7. Комплексування систем виявлення, які використовують фізичні поля різних діапазонів і природи дозволяє підвищити ймовірність виявлення засобів противника, а значить і ефективність боротьби з ними.

8. Створення роботизованих комплексів, вбудованих в смарт- грид систему розподіленого інтелекту, дозволить підвищити їх живучість і ефективність застосування в умовах протидії супротивника.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено задачу створення методики виявлення сигнатур електромагнітних і акустичних портретів антропогенних об'єктів, розроблено модель для опису їх нестационарної структури, запропоновано способи оцінки дальності дії активно-пасивних систем стеження, що використовують електромагнітні випромінювання систем наземного і космічного базування, а також власні акустичні шуми, показано ефективність застосування смарт-технології об'єднання інформації сенсорів, що використовують фізичні поля різної природи, для підвищення ефективності моніторингу довкілля.

I. Вивчено просторово-часові характеристики електромагнітних і акустичних полів, що випромінюються природними та антропогенними об'єктами, а також джерел підсвічування.

1. Отримано дані за рівнями акустичних шумів наземної техніки і малорозмірних повітряних об'єктів (типу БПЛА) для різної дальності спостереження. Так, рівень шуму поряд з легковим автомобілем становить приблизно 55...70 дБ, а для БПЛА – 92 дБ. Зміна обортів двигуна від холостого ходу до максимальних призводить до зростання рівня шуму більш ніж на порядок.

2. У спектрах сигналів мовних станцій КХ і УКХ діапазонів, які можуть виступати як сигнали підсвічування для активно-пасивних систем радіолокації в діапазоні частот від 6 до 60 Гц відносно несучої, якому відповідають доплерівські зсуви частоти віддзеркалень від повітряних об'єктів, спектральна щільність істотно нижча (на 20...30 дБ), ніж в області інформаційних частот, чим і забезпечується можливість їх застосування для вирішення задач радіолокації і дистанційного зондування.

3. Встановлено, що просторові спектри радіолокаційних віддзеркалень від ділянок суші, спектри акустичних шумів природних і антропогенних

об'єктів описуються фрактальними залежностями $S(F) \approx F^{-n}$ з показником ступеня на крилах спектра, який для більшості випадків не перевищує $n \approx 2$.

II. Встановлено невідомі раніше особливості випромінювання вторинних електромагнітних і акустичних полів наземними і повітряними об'єктами.

1. Істотне (в декілька разів) звуження ширини спектра акустичного випромінювання зі збільшенням дальності до джерела через дисперсійні властивості атмосфери. Зменшення інтерференційного впливу поверхні на інтенсивність сигналу на високих (понад 1 кГц) частотах внаслідок впливу шорсткості поверхні. Найбільший вплив інтерференційних явищ при віддзеркаленні звуку від поверхні Землі на низьких частотах, що знижує інтенсивність прийнятого шуму.

2. Встановлено теоретично і підтверджено експериментально зв'язок між розмірами лопатей вертольоту і частотою їх обертання, яка є сигнатурою для розпізнавання типу вертольоту і може бути оцінена по оптичним портретам і акустичним шумам.

3. Виявлено сплески зі змінною шириною спектра високочастотних компонент віддзеркалень, що обумовлені частотною модуляцією розсіяного сигналу обертовими лопатями гвинтів вертольоту. Наявність у високочастотній області широкосмугового сплеску, який з'являється з частотою обертання гвинта, що обумовлено зміною куту між лопаттю та фронтом електромагнітної хвилі, може використовуватися як інформативна ознака при виявленні нерухомого вертольоту на фоні місцевості і його розпізнавання. Встановлено можливість виділення інформації про частоту обертання гвинтів вертольоту або частоти обертання колінчастого валу двигунів внутрішнього згорання за допомогою кепстральної обробки їх акустичних шумів або радіолокаційних віддзеркалень.

4. Вперше показана можливість використання корельованих спектральних компонент, отриманих на різних поляризаціях прийому і довжинах хвиль опромінюючого поля, пов'язаних з вібрацією обшивки під

впливом рушійної установки, для підвищення контрастності виділення сигналів об'єкта з працюючим двигуном на фоні завад від місцевості.

III. Розвинені статистичні методи опису та проведено оцінку характеристик пасивних і активно-пасивних радіотехнічних систем в умовах впливу на них негаусових нестаціонарних завад, утворених віддзеркаленнями від місцевості, сигналами підсвічування, акустичними шумами.

1. Отримала подальший розвиток теорія опису негаусових шумів: в класі напівмарківських вкладених процесів запропоновано багатовимірну статистичну модель негаусового сигналу, розсіяного сушею, з використанням експериментальних даних визначено параметри, що входять до її складу, вивчено вплив на характеристики віддзеркалення сезону і погодних умов. Показано можливість використання запропонованої моделі для опису нестаціонарних акустичних шумів вітру, кроків людини і пострілів.

2. Різниця в інтенсивності і спектрах сигналів (шуму кроків людини, звуку пострілів) для різних фазових станів може служити інформативним критерієм для виявлення дефектів ходи і зброї. Відмінності в спектрах, темпі стрільби (зміни періоду стрільби) можуть бути інформативними ознаками для виявлення дефектних зразків.

3. Розроблено методику оцінки дальності виявлення джерел акустичного випромінювання в умовах впливу загасання в атмосфері і інтерференційного послаблення земною поверхнею для нейтрального режиму поширення у атмосфері. Теоретично показано можливість виявлення об'єктів наземної та повітряної техніки за акустичним випромінюванням при відсутності зовнішніх шумів на віддаленнях в кілька кілометрів. Природні шуми вітру, дощу, власного двигуна можуть в значній мірі (на 1...2 порядки) знижувати дальність дії систем акустичної розвідки. Експериментально показано, що, пригнічуючи низькочастотні компоненти шуму в смузі до 1000...2000 Гц, можна підвищити контраст спостереження в умовах шуму вітру наземних об'єктів приблизно на 5...13 дБ і до 10...20 дБ для БПЛА. Шум вітру є суттєво нестаціонарним

процесом. В поривах інтенсивність шуму може зростати на 30 дБ. Тому система акустичної розвідки повинна будуватися як адаптивна, що дозволить забезпечити виявлення об'єктів на інтервалах часу між поривами вітру.

IV. Запропоновано технології створення просторово-розподілених смарт-грид мереж для підвищення ефективності застосування об'єктів техніки.

1. Запропоновано функціонали якості, що дозволяють проводити порівняльний аналіз ефективності застосування об'єктів наземної техніки при використанні різних сполучень сенсорів. Комплексування систем виявлення, що використовують фізичні поля різних діапазонів і природи, та побудова роботизованих комплексів, вбудованих в смарт- грид систему розподіленого інтелекту, дозволять підвищити їх живучість і ефективність застосування об'єктів техніки.

2. Показано можливість отримання інформації про навколишнє середовище з використанням вторинних полів, що створюються об'єктами техніки, при віддзеркаленні сигналів підсвічування мовних станцій КХ діапазону, супутникових навігаційних систем, наземних систем телебачення і мовлення, акустичних шумів об'єктів. Їх використання може дозволити виявляти рухомі об'єкти наземної техніки на віддаленнях в одиниці кілометрів. Використання для підсвічування довкілля випромінювань мовних КХ станцій і власних радіостанцій, встановлених на об'єктах, може дозволити виявляти висотні повітряні цілі на віддалях понад 10 км. Власні акустичні шуми об'єктів техніки дозволяють здійснювати їх виявлення при відсутності зовнішніх завад на відстанях до 8 км і істотно знижуються через шуми вітру та дощу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анипко О.Б. Комплексная проблема поиска и обнаружения наземных целей для их поражения вооружением, установленным на объектах бронетехники / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков, Ю.М. Бусяк // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. 2011. Вип. 2 (18). – С.43-47.
2. Анипко О.Б. Физические принципы создания комплексной оптико-акустической подсистемы обнаружения наземных целей объектами бронетехники / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков И.Ю. // Інтегровані технології та енергозбереження.- 3'2012.- С.48-53.
3. Анипко О.Б. Комплексный метод обнаружения и распознавания наземных целей на основе анализа цифровых изображений и регистрации акустических возмущений. / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков // Інтегровані технології та енергозбереження 4'2014.- С.51-55.
4. Бирюков И.Ю. Акустическая компонента разведки наземных целей. Проблемы и решения. / И.Ю. Бирюков // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП, 2013.- С.98-104.
5. Гончаров А.И. Акустические волны при массовых взрывах в карьерах / А.И. Гончаров, В.И. Куликов // «Физика горения и взрыва».- Т.40, №6. – С. 101-105.
6. Карлов В.Д. Применение мощных сверхширокополосных акустических импульсов в системах радиоакустического зондирования/ В.Д. Карлов, Ю.Н. Ульянов, В.Л. Мисайлов, Н.Г. Максимова// Системи обробки інформації.- Харків, 2010.- Вип. 6 (87) – С.95-99.
7. Ененкова Л.Н. Громкость звука. Уровень шума и его источники. / Л.Н. Ененкова // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sensoricinru.wordpress.com/>
8. Дивизинюк М.О. О проблеме расчета дальности приема акустической информации с открытых площадок / М. Дивизинюк, Ю. Гончаренко, Д. Гончаренко // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні.- 2012.- Вип. 1 (23). – С.29-35.

9. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613 - 2:1996) Шум. Затухание шума при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета.
10. Самохин В.Ф. Шум ГТД (Введение в авиационную акустику). Курс лекций./ В.Ф. Самохин// Московский авиационный институт. Факультет «Двигатели летательных аппаратов» Кафедра 201 «Теория воздушно-реактивных двигателей», 2007. – С.49-71.
11. Комкин А.И. ГОСТ 31295.2-2005 Как руководство для акустических расчетов / А.И. Комкин // Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/981408/gost-31295.2-2005-kak-rukovodstvo-dlya-akusticheskikh-raschetov>.
12. Коршикова Ж.С. Алгоритмы пеленгации и распознавания локализованных источников широкополосных излучений на фоне распределенных в пространстве помех: автореф. дис. на соискание научн. степени кандидата технических наук: спец. 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах) / Ж.С. Коршикова.- М., 2010. – 16 с.
13. Красько А.С. Поддержание принятия решения по обеспечению общественной безопасности на городских территориальных объектах на основе оперативного анализа аудиоинформации: автореф. дис. на соискание научн. степени кандидата технических наук: спец. 05.13.10- Управление в социальных и экономических системах / А.С. Красько – Уфа, 2011, 16 с.
14. Клюкин И.И. Удивительный мир звука.- Л.:Судостроение, 1978.-168 с.
15. Смирнов В. Маскировка подвижных наземных объектов в современных условиях /В. Смирнов // [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://samlib.ru/s/smirnow_wasilij/masikirovka.shtml
16. Зверева С.В. В мире солнечного света / С.В. Зверева.- Л.: Гидрометеиздат, 1988.- 160 с.
17. Мокрушин Д. Акустические системы обнаружения / Д. Мокрушин // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://twower.livejournal.com/502014.html?thread=14595326>.
18. Системы обнаружения снайперов противника // [Электронный ресурс].– Режим

доступа: <http://newsmilitary.narod.ru/VH-antisniperteh.html>.

19. Джерелейко Р. Система обнаружения огня «Сова» / Р. Джерелейко // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://topwar.ru/8976-sistema-obnaruzheniya-ognya-sova.html>
20. Бархатов А.В. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Часть 1: освещение воздушной обстановки и экологический мониторинг/ А.В. Бархатов, В.И. Веремьев, Д.А. Ковалев, А.А. Коновалов, В.Н. Михайлов // Инновации №9 (179), 2013.- С.114-119.
21. Бархатов А.В. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Часть 2: освещение воздушной обстановки и экологический мониторинг/ А.В. Бархатов, В.И. Веремьев, Д.А. Ковалев, А.А. Коновалов, В.Н. Михайлов // Инновации №10 (180), 2013.- С.7-11.
22. Ткачев Г.Н. Результаты исследований по проблеме полуактивной радиолокации в диапазоне коротких волн/ Г.Н. Ткачев, И.В. Готовчиц, Б.Н. Крылов // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь».- ИРЭ РАН, 2010. – С.264-267.
23. Сухаревский О.И. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др.// Под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУПС, 2009.- С.90-191.
24. Седышев Ю.Н. Информационные технологии создания пространственно-временных модемов многопозиционных активно-пассивных радиолокационных систем / Ю.Н. Седышев, В.А. Тютюнник //Прикладная радиоэлектроника. - 2015. - Т. 14, № 1. - С. 105-110.
25. Луценко И.В. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона / И.В. Луценко, И.В. Попов, В.И. Луценко // Радиоп физика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиоп физики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков.- 2007.- Т.12, №1.- С. 193 - 204.

26. Луценко В.И. Мониторинг воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций коротковолнового диапазона / В.И. Луценко, И.В. Луценко, И.В. Попов // Изв. Вузов Радиофизика.- 2015.- Т.58.-№ 1.-С. 10-20.
27. Виленчик Л.С. Основы пассивной коротковолновой радиолокации / Л.С. Виленчик П.А. Мельяновский, В.Н. Минаев // Радиотехника.-2009.- С.61-66.
28. Бекетов А.А. Маскировка действий подразделений сухопутных войск. / А.А. Бекетов, А.П. Белоконь, С.Ч. Чермашенцев // Воениздат, Москва, 1976.- С.19-27.
29. Шульман А. Танк побеждает в схватке с ракетой/ А. Шульман // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.jewniverse.ru/biher/AShulman/62.htm>.
30. Кедров И. За кулисами танкового балета. / И. Кедров // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/exhibitions/2012/0716/14288835/print.shtml>
31. Зубов В. Боевая система будущего. / В. Зубов // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.modernarmy.ru/article/144>
32. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска / Н.П. Травникова.-М.: Маш., 1985. -128 с.
33. Крылов И.С. Исследование характеристик излучения танков и природных образований, оценка дальности действия оптико-электронных систем пеленгации и самонаведения/ И.С. Крылов // Вопросы оборонной техники, серия XX, Вып. 26-27.- М.: Миноборонпром СССР, 1972.-202 с.
34. Уменьшение эффективной площади рассеяния объектов бронетанковой техники за счет малоотражающих наружных форм и применения радиопоглощающих покрытий. / И.Ф. Решиков [и др.] // Вопросы оборонной техники, серия XX, Вып. 26-27.- М.: Миноборонпром СССР, 1972.
35. Луценко В.И. Дальность действия и разрешающая способность пассивных акустических систем разведки / В. И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 5-й Международный Радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Межд. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии», 14-17-октября: сб. научн. тр. – Харьков, 2014.- Т.1.- С. 41-44.

36. Луценко В.И. Пассивные акустические системы разведки, дальность их действия и разрешающая способность / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Інтегровані технології та енергозбереження, щоквартальний науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХПІ».- 2014.- № 3.- С. 60-64.
37. Луценко В.И. Дальность действия систем акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.– 2015.– Том 14, № 2.– С.125-136.
38. Методика оценки уровня акустических шумов объектов на местности / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 8-я Междунар. научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.220-225.
39. Луценко В.І Застосування систем акустичної розвідки для підвищення живучості об'єктів наземної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.139-141.
40. Optimal Reception of Signals Propagating in Media with Absorption and Dispersion / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov, A.V. Sobolyak // Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 електрон. опт. диск (CD – ROM).
41. Акустическое оружие / [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://alexsnews.com/ploxoe/2012/01/akusticheskoe-oruzhie/>
42. Веретенников А.И. Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова / А.И. Веретенников, И.И. Рассказов, К.В. Сидоров, Е.И. Решетило под ред. М.Д. Борисюка.– Харьков, 2007.– 188 с.

43. Шум затухание звука при распространении на местности, часть 2. Общий метод расчета. Межгосударственный стандарт, ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613 - 2:1996). М.: Стандартиформ, 2006.– 42 с.
44. Кириченко В. А. Экспериментальное определение информативных признаков для радиолокационного распознавания наземных и надводных объектов / В. А. Кириченко, В. И. Луценко // Техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова.– Харьков, 1993.– С. 5-18.
45. Шум. Расчётная модель Руководство пользователя / ООО «ЭКОцентр», Soft.eco-c.ru. -2012.- 19 с.
46. Исакович М.А. Общая акустика / М.А. Исакович.– Учебное пособие. И-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М.: 1973.– 495 с.
47. Бреховских Л.М. Акустика слоистых сред / Л.М. Бреховских, О.А. Годин.– М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит.– 416 с.
48. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард / Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсберна. М, «Сов. Радио», 1976.– 392 с.
49. Справочник по радиолокации / Под. ред. М. Сколника.– М.: Сов. радио, 1976.– Т. 1.– 455 с.
50. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Е.В. Кривенко, А.В. Соболяк // Физические основы приборостроения.- 2015.- Т.4, №4(17). –С.3-29.
51. Обнаружение сигналов на фоне нестационарных негауссовых помех от подстилающей поверхности / В.Ф. Кравченко О.В. Кравченко В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк. // Физические основы приборостроения.- 2016.- Т.5, №4(21). –С.23-39.
52. Описание и анализ квазипериодических сигналов распространяющихся в средах с поглощением и дисперсией / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Иян Ло, А.В. Соболяк // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С. 29-31.

53. Характеристики акустических полей наземных и малоразмерных воздушных объектов акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Мазуренко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2017.- Т.16, №1, 2.- С.18-22.
54. Луценко В.И. Сигнатуры акусто-электромагнитных портретов аэродинамических и наземных объектов техники / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 8-я Междунар научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.226-230.
55. Signatures of Acousto-Electromagnetic Portraits of Aerodynamic and Terrestrial Mechanical Objects / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov, A.V. Sobolyak // Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 электрон. опт. диск (CD – ROM).
56. Луценко В.І. Акусто-електромагнітні портрети об'єктів наземної та повітряної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.137-138.
57. The Acousto-Electromagnetic Portrait Signatures For The Aerodynamic And Ground Technology Objects / V. Lutsenko, I. Lutsenko, A. Sobolyak, Y. Luo, Q. Guo, & Y. Zheng // Telecommunication and Radio Engineering.- 2018.- Vol.77, №11. – P.971-993.
58. Определение сигнатур акусто-электромагнитных портретов объектов техники на основе их оптических портретов / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, Ло Иян, Гоу Цян, Джин Юн. // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018.- С.703-710.
59. Луценко В. И. Частотные зависимости ЭПР объектов в декаметровом диапазоне / В. И. Луценко, С. И. Хоменко // Радиофизика и электроника: Сборник

научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. - Харьков, 1998. - Т. 3, № 2. - С. 33-37.

Перевод Lutsenko V.I., Khomenko S.I. Frequency Dependences of Target RCS at Decimeter Wave lengths / «Telecommunications and radio engineering», 1997, N4, P.67-74

60. Lutsenko V. I. Frequency Dependences of Scattering Matrices in the Resonance Domain / V. I. Lutsenko, S. Y. Tolstel. // Telecommunication and Radio Engineering. - 2001. - V. 55, № 4. - P. 33-39.

61. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник/ Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин, С.В. Москвитин, С.А. Горшков, Д.И. Леховицкий, Л.С. Левченко / Под. ред. Я.Д.Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.

62. Небабин В.Г. Методы и техника радиолокационного распознавания. / В.Г. Небабин, В.В. Сергеев - М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.

63. Обнаружение и распознавание объектов радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.В.Соколова. – М.: «Радиотехника, 2006. – 176 с.

64. Гейстер С.Р. Экспериментальные исследования спектральных портретов винтовых и турбореактивных самолетов в радиолокаторе обзора с непрерывным зондирующим сигналом / С.Р. Гейстер, В.И. Курлович, С.В. Шаляпин. Сб. тр.: «Радиолокация и радиометрия».- 2000.-Вып. 3.-С 90-96.

65. Экспериментальные исследования информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов / М.М. Черных, О.В. Васильев, А.В. Богбанов, А.Н. Савельев, В.Е. Макаев // Радиотехника.- 2000.- № 3.-С. 45-54.

66. Вертолеты / Электронный ресурс <http://www.ukamina.com/books/vertoleti.html>

67. Емельянов Е.В. Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок, измеренная методом открытого квазиоптического резонатора / Е.В. Емельянов, Г.А. Дорофеева // Электроника, Измерительная Техника, Радиотехника и Связь, Доклады ТУСУРа, декабрь 2010.- № 2 (22), Часть 2.- С. 38-40.

68. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели / В.О.Кобак. - М.: Советское радио.- 1975. – 348с.

69. Канарейкин Д. Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин. - М.: Сов. радио, 1966. - 439 с.
70. Bogert B.P. The Quefrequency Alanysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking / B.P. Bogert, M.J.R. Healy, and J.W. Tukey // Proc. of the Symposium on Time Series Analysis (M. Rosenblatt, Ed).- New York: Wiley, 1963, Chapter 15.- P. 209-243.
71. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер, пер. с англ./Под ред. С. Я. Шаца. - М.: Связь, 1979. 416 с.
72. J. Jeong. Kepstrum Analysis and Real-Time Application to Noise Cancellation / Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on SIGNAL PROCESSING, ROBOTICS and AUTOMATION. - С. 149 - 154.
73. Schafer R.W.Echo removal by discrete generalized linear filtering / R.W. Schafer.- Res. Lab. Electron. MIT, Tech. Rep., No 466, 1969.- 142 p.
74. Oppenheim A.V. Homomorphic analysis of speech / A.V. Oppenheim, R.W. Schafer// IEEE Trans. Audio Electroacoust. AU-16 (1968) P. 221–226.
75. Silvia M.T. Use of the kepstrum in signal analysis/ M.T. Silvia, E.A. Robinson// Geoexploration 16. (1978).- P. 55–73.
76. Колмогоров А.Н. Стационарные последовательности в гильбертовом пространстве / А.Н. Колмогоров.- Бюллетень МГУ. Математика. 1941, Т. 2, № 6, С. 3-40.
77. В.И. Луценко Помехи активно-пассивным системам радиолокации, создаваемые излучениями вещательных станций КВ и УКВ диапазонов. / В.И. Луценко, Ло Иян, А.В. Соболяк, И.В. Попов. // VIII Всероссийские Армандовские чтения, IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018. –С. 22-24.
78. Использование полумарковских вложенных процессов для описания нестационарных акустических шумов. / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Ло Иян, А.В. Соболяк // VIII Всероссийские Армандовские чтения, IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки

сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018. –С.25-27.

79. Оптимальное обнаружение сигналов на фоне стационарных негауссовых помех / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, И.В. Попов // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С.121-123.

80. Разрешение -обнаружение -измерение параметров сигналов в негауссовых шумах / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, И.В. Попов // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С.118-120.

81. Мишель К. Отражение радиолокационных эхо-сигналов от морской поверхности (модели и экспериментальные результаты)/ К. Мишель // Зарубежная радиоэлектроника. 1972. № 7. С. 13-26.

82. Транк Дж.В. Радиолокационные характеристики нерелеевских отражений от морской поверхности // Зарубежная радиоэлектроника. 1973. №2. С. 3-19.

83. Транк Дж.В., Георг С.Ф. Обнаружение целей на фоне помех от морской поверхности с негауссовым распределением // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. № 7. С. 17-28.

84. Kulemin G. P. Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter / G.P. Kulemin. Tech. Ed. David K. Barton. -Boston, London: Artech House, 2003. - 417 p.

85. Чабдаров Ш.М. Полигауссовы представления произвольных помех и прием дискретных сигналов / Ш.М. Чабдаров, А.Т. Трофимов // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20, №4. С. 734-745.

86. Новые классы полигауссовых моделей в статистической теории приема сигналов современных радиоэлектронных радиосистем / Ш.М. Чабдаров, А.Ф. Надев, Р.Р. Файзуллин, А.В. Сеньюшин, А.В. Фалин, А.Е. Егоров // Прикладная радиоэлектроника.- Харьков: 2002.- Т. 1, №2.- С. 171-180.

87. Луценко В. И. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от морской поверхности / В.И. Луценко // Успехи современной радиоэлектроники.- 2008.- №4.- С. 59-73.
88. Simulation Statistical Model of Reflection from the "Clear-Sky" / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, S.I. Khomenko, A.Ye. Zatserklyany // Telecommunications and Radio Engineering.- 2005.- V. 63, № 5.- P. 371-380.
89. Анализ нестационарных сигналов и полей с использованием вложенных полумарковских процессов / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, С.А. Масалов, академик В.И. Пустовойт // Доклады Академии Наук.- 2013.- Т. 453, № 2.- С. 1–4.
90. Description and analysis of non-stationary signals by nested semi-Markov processes / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // Journal of Measurement Science and Instrumentation.- 2014.- V.5, No3, (Sept. 2014, Sum No19).- P. 25-32
91. Восстановление информационных параметров природных сред с использованием атомарных и WA–систем функций. Обзор часть I. Применение теории полумарковских полей и финитных функций для описания нестационарных процессов / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, В. И. Луценко, И. В. Луценко, Д. В. Чуриков // Физические основы приборостроения.- 2014.- Т. 3, № 2.- С. 3-17.
92. Использование вложенных полумарковских процессов для описания нестационарных сигналов и полей / В.И. Луценко И.В. Луценко, С.А. Масалов, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника: Сб. научн. Трудов / НАН Украины Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков.- 2012.- Т.3(17). № .- С. 57-64.
93. Кулемин Г.П. Пространственно–временные характеристики обратного рассеяния от земной поверхности / Г.П. Кулемин, Е.А. Горошко, Е.В. Тарнавский // Успехи современной радиоэлектроники.- 2004.- №12.- С. 60-70.
94. Применение фрактального анализа при обработке сельскохозяйственных угодий / В.К. Иванов, Р.Э. Пащенко, А.М. Стадник, С.Е. Яцевич // Успехи современной радиоэлектроники.- 2007.- №5.- С. 48-55.

95. Методы многочастотного радиолокационного дистанционного зондирования лесов / В.К. Иванов, Г.А. Кучук, А.М. Стадник, С.Е. Яцевич // Успехи современной радиоэлектроники.- 2005.- №7.- С. 57-72.
96. Возможности использования многочастотной РСА для послойного зондирования подстилающей поверхности / А.А. Калинин, Б.Г. Кутуза, В.А. Плюшев, С.В. Дручинин // Успехи современной радиоэлектроники.- 2001.- № 311.- С. 31-39.
97. Кулемин Г.П. Взаимосвязь обратного рассеяния радиоволн СВЧ –диапазона с параметрами растительного покрова и открытых почв при дистанционных методах зондирования / Г.П. Кулемин, С.Е. Яцевич // Успехи современной радиоэлектроники.- 2004.- №3.- С. 24-34.
98. Королук В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. - Киев: «Наукова думка», 1976. - 184 с.
99. Давидан И.М. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический прогресс/ И.М. Давидан, Л.И. Лопатухин, В.А. Рожков.- Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 286 с.
100. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики/ Б.А. Козлов, И.А. Ушаков.- М.: Сов. Радио, 1975.- 472с.
101. Рассеяние миллиметровых радиоволн растительными покровами / А.Н. Роечко, Б.Д. Замаев, В.Л. Костина, В.Ф. Тимошенко // Радиофизика и электроника.- 2002.- Т.7, №2.- С. 335-341.
102. Замаев Б.Д. Удельные ЭПР некоторых ландшафтов в миллиметровом диапазоне волн / Б.Д. Замаев, В.Г. Колесников // Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах: Сб. научн. трудов.- Киев.: Наукова думка, 1985.- С.44-49.
103. Волосяк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко. Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. -704 с.
104. Влияние содержания свободной воды на функциональную активность хвои сосны обыкновенной в Предбайкалье [Иркутск] / Л.Д. Копытова и др. //

«Природная и антропогенная динамика наземных экосистем», 11-15 окт. 2005, Иркутск: сб. тр. Всерос. Конф. – Иркутск: 2005. С. 116-119.

105. Структура и функционирование наземных экосистем, их биоразнообразие. Сезонная динамика содержания хлорофилла в растительности степей юга Сибири / В.В. Стасова, Н.М. Чебакова, Е.И. Парфенова, Т.Н. Бугаенко, Ю.С. Чередникова // Всероссийская конференция «Природная и антропогенная динамика наземных экосистем», 11-15 окт. 2005, Иркутск: сб. тр. Всерос. Конф. – Иркутск: 2005. С. 72-74.

106. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами/ Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. - Киев: Наукова думка, 1986. - 229 с.

107. Correlation Between Backscattering Coefficient a Vegetation Water Content / F.V. Kivva, A.N. Roenko, Yu.F. Vasilyev, B.D. Zamaraev // Turkish Journal of Physics.- 1995.- V.19, N 10.- P. 1339-1345.

108. О возможности определения диэлектрической проницаемости верхних слоев подстилающих сред по измеренным коэффициентам отражения при наклонном зондировании плоскими волнами вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ диапазоне / А.С. Шостак, В.В. Загоскин, С.П. Лукьянов, А.С. Карауш // Журнал Радиоэлектроники.- 1999.- №11. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/nov99/4/text.html>

109. Кравченко В.Ф. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко // М. Физматлит, 2015. -448с.

110. Седышев Ю.Н. Бистатические шумовые радиолокаторы с когерентной пространственно- временной обработкой эхо-сигналов и активных помех. / Ю.Н. Седышев, П.Ю. Седышев, В.А. Тютюнник // Прикладная радиоэлектроника, Харьковский национальный Университет Радиоэлектроники (ХНУРЭ). – 2002. - Т. 1, №2.- С. 189-194.

111. Лобочко С.Е. Построение системы обнаружения с использованием излучения УКВ и ТВ–передатчиков / С.Е. Лобочко // Международная научная конференция «Излучение и рассеяние ЭМВ» ИРЭМВ*2003, труды конференции, Таганрог, 2003. – С. 287-290.

112. Lutsenko V.I. Illumination of Air Environment Using Radiation of SB Broadcast Station / V.I. Lutsenko, I.V. Popov // International Radar Symposium IRS 2006, 24-26 May. 2006: conf. proc. – Krakov,. –P.233-236.
113. Попов И.В. Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ диапазона / И.В. Попов, В.И. Луценко, И.В. Луценко. // "Современные проблемы радиоэлектроники" Сборник научных трудов. Под редакцией Громько А. И., Сарафанова А. В.; М. Радио и связь. 2006.-С.25-28.
114. Луценко В.И. Бистатические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связных станций коротковолнового диапазона / В.И. Луценко, И.В. Попов // Радиофизика и электроника: сб. научн. трудов, НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков, 2007. – Т. 12, № 1. – С. 193-204.
115. Lutsenko V.I. Bistatic Radars with Illumination by Ionospheric Signals of High-Frequency Communication Stations / I.V. Popov, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2008. – V. 67, № 4. – P. 285-292.
116. Lutsenko I. V. Illumination of air environment using radiation of SW broadcasting stations / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov // The 5-th European Radar Conference, 30–31 Oct. 2008: conf. proc. – Amsterdam, 2008. – P. 396-399.
117. Вичкань А.В. Пассивная когерентная радиолокация в коротковолновом диапазоне. Часть 1. Обнаружение воздушных целей. / А.В. Вичкань, П.А. Мельяновский, А.И. Шуть // Радиофизика и электроника . - 2010. - Т. 15, №1. - С. 72-77.
118. Луценко В.И. Использование смарт-грид технологий для повышения эффективности применения объектов наземной техники./ В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.-2017.- Т16, №3,4.- С.134-145.
119. Kravchenko V.F. Statistical Model Of The Refractive Index Of The Troposphere / V.F. Kravchenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // Universal Journal Physics' and applied (UJPA)/ - 2014 Universal Journal of Physics and Application Vol. 2(4), P. 206 – 212.
120. Ковадло П.Г. Энергетическая структура оптической атмосферной турбулентности при различных параметрах воздушного потока / П.Г. Ковадло,

А.Ю. Шиховцев // Иркутского государственного университета, Серия «Науки о Земле». -2014. Т. 8. С. 42–55.

121. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко, І. В. Луценко, Д. О. Попов, І. В. Попов, О. В. Соболяк // Космічна наука і технологія. - 2015.- Т. 21, № 3.- С.83-90.

122. Пат. Україна №111262, МПК Н03В 7/14 (2006.01), Н03В 7/06 (2006.01) Відкрита випромінююча система / Кривенко О. В., Луценко В. І., Соболяк О.В. // Заявник і власник Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України.- № а 2014 08410, зявл. 27.04.2014, опубл. дані заявки 21.05.2016, Бюл.№2, опубл. дані про патент 11.04.2016, Бюл.№7.

123. Луценко В.І Використання смарт-грид технологій для підвищення ефективності використання об'єктів наземної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В Соболяк. // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.141-143.

124. Использование свойств магических квадратов для апертурного синтеза / В.И. Луценко, И.В. Луценко, И.В. Попов, А.В. Соболяк, Иян Ло // 8-я Междунар. научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им.А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.215-219.

125. Кривенко Е.В. Смарт антенна для малогабаритных радиосистем миллиметрового диапазона волн / Е.В. Кривенко, В.И. Луценко, А.В. Соболяк // VIII Всероссийские Армандовские чтения IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26.06-28.06. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. –С.19-21.

126. Кравченко В.Ф. Смарт грид технологии - основа модернизации системы водоснабжения / В.Ф. Кравченко, Е.В. Кривенко, С.А. Левченко, В.И. Луценко

С.В. Плюта // Доклады Национальной Академии Наук Беларуси, Технические Науки.- 2015.-Т.59, №3.- С. 102-108.

127. Применение технологий smart grid для устойчивого развития и модернизации систем водоснабжения / В.Ф. Кравченко, Е.В. Кривенко, С.А. Левченко, В.И. Луценко, С.В. Плюта // Известия Национальной академии наук Беларуси Серия Физико-технических наук.-2015.- №4.- С.67-79.

128. Smart grid технология - основа модернизации системы водоснабжения для будущего устойчивого развития общества / В.Ф. Кравченко, Е.В. Кривенко, С.А. Левченко, В.И. Луценко // Физические основы приборостроения.- 2015.-Т.4, №1.- С. 12-29.

129. Математическое моделирование технологий smart-grid для устойчивого развития и модернизации систем водоснабжения. / Кравченко В.Ф, Кривенко Е.В., Левченко С.А, Луценко В.И, Плюта // Национальная академия наук Беларуси Институт и тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Тепло и массоперенос -2016 Сб. научных трудов, Минск.-2016.- С.269-277.

130. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0. Февраль 2012. Авторы: NIST (Национальный институт технологий и стандартизации, США), Государственный коммерческий департамент США. Концепция и дорожная карта по стандартам взаимодействия для Smart Grid.

131. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006 // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.

132. Крылатая противокорабельная ракета П-700 Гранит (ЗМ-45) / Информационно - новостная система «Ракетная техника» // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/granit/granit.shtml>.

133. Противокорабельная ракета Яхонт (Оникс) / Информационно - новостная система «Ракетная техника» // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/jakhont/jakhont.shtml>.

134. Танк Т-14 "Армата" или Т-99 "Приоритет" / Новости ВПК // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vpk.name/library/f/armata.html>

135. Бирюков И.Ю. Анализ приоритетов систем наземной разведки по обнаружению объектов вооружения и военной техники / И.Ю. Бирюков, Ю.М. Бусяк, А.В. Шульга // Інженерні, технічні, програмні засоби, комплекси та системи, Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України.- 2015.- Вип. 2 (26).- С. 81-87.

136. Луценко И.В. Использование электромагнитных полей источников гражданского назначения для диагностики тропосферы и освещения воздушной обстановки / И.В. Луценко // 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ 2008), Международная конференция «Современные перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (СРРСН-2008) 22-24 октября, Харьков 2008 г.: сб. научн. тр. - Харьков, 2008.-Т. 1., Ч. 2.- С. 184-188

137. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации и дистанционного зондирования / А.Г. Лауш, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // 2014 24th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, 2014.- P.1149-1150.

138. Освещение воздушной и надводной обстановки с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем / Лауш А.Г., Луценко В.И., Луценко И.В., Попов Д.О // 5-й Международный Радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Межд.конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии», 14-17-октября: сб. научн. тр. – Харьков.- 2014.- Т.1.- С.45-48

139. Лауш А.Г. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации / А.Г. Лауш, В.И. Луценко, И.В. Луценко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника.- Том 58, № 11 (2015).- С. 14-26.

140. Луценко В. И. Об эффектах, которые могут приводить к возрастанию ЭПР малоразмерных объектов в декаметровом диапазоне / В. И. Луценко, И. С. Тургенев, С. И. Хоменко // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. - Харьков. - 1997. - Т. 2, № 1. - С. 60-63.
141. Луценко В. И. Частотные зависимости ЭПР объектов в декаметровом диапазоне / В. И. Луценко, С. И. Хоменко // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. - Харьков, 1998. - Т. 3, № 2. - С. 33-37.
142. Теоретические основы радиолокации. / Под ред. Я. Д. Ширмана. - М.: Сов. радио, 1970.- 559 с.
143. Мобильная станция дальней радиотехнической разведки «Кольчуга» / Государственное предприятие «Укроборонсервис». // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://ru.uos.ua/produksiya/tehnika-pvo/rls/111>.
144. Украинская "Кольчуга" (станция радиотехнической разведки) / Военное обозрение // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://topwar.ru/13650-azerbaydzhan-prodolzhaet-vooruzhatsya-na-ocheredi-ukrainskaya-kolchuga-m.html>.
145. Комплекс БраМос / [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-397.html>.
146. Перспективные проекты ракет семейства BrahMos / Военное обозрение // [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://topwar.ru/70301-perspektivnye-proekty-raket-semeystva-brahmos.html>.
147. Вялышев А. Шум вокруг нас / А. Вялышев // Наука и жизнь/ [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5206/>
148. Лю Чан Акустический метод зондирования пограничного слоя атмосферы. Современное состояние и перспективы развития / Лю Чан, И.К. Ибраимов, А.Ю. Панченко / Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапартобудування.- Вип.73.- 2018.- С. 17-27.
149. Возимая УКВ радиостанция Р-030 У / [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://ru.uos.ua/produksiya/svyaz-i-asu/186-vozimaya-ukv-radiostantsiya-r-030-u>.

150. Радиостанция Р-163-50К (Арбалет-50К) / [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.cqham.ru/review/showproduct.php?product=290>.
151. Тихонов В. И. Марковские процессы / В.И.Тихонов, М. А. Миронов.- М.: Сов. Радио, 1977.- 488 с.
152. Валеев В.Г. Обнаружение слабых когерентных сигналов в коррелированных негауссовых помехах / В.Г. Валеев, Ю.Г. Сосулин // Радиотехника и электроника. - 1969. - №2. - С. 230-238.
153. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана Учебное пособие для вузов. М.: „Сов. Радио”, 1970. – 560 с.
154. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин, С.В. Москвитин, Д.И. Леховицкий, Л.С. Левченко / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО „МАКВИС”, 1998. – 828 с.
155. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В трех книгах.- кн. 2-я.- изд. 2-е, перераб. и дополнен. М.: «Сов. радио».- 1975.– 392 с.
156. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника.– 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и связь. – 1982. – 624 с.
157. Вычислительные методы в современной радиофизике / В.Ф. Кравченко, О.С. Лабунько, А.М. Лерер, Г.П. Синявский / Под ред. В.Ф. Кравченко . – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 2009. – 464 с.
158. Лазоренко О.В. Сверширокополосные сигналы и процессы / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009 . -576 с.
159. Юман М. Молния / М. Юман . – М.: Мир, 1972. – 327 с.
160. Луценко В.И. Дальность действия систем акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2015.- Том 14, № 2.- С.125-136.
161. Межгосударственный стандарт, ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613 -2:1996). М.: Стандартиформ, 2006. – 42 с.
162. Кравченко В.Ф. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть I. / В.Ф. Кравченко, О.В. Кравченко,

В.И. Пустовойт, Д.В. Чуриков // Радиотехника и электроника.– 2014.– Т.59, № 10.– С. 949-978.

163. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть II. / В.Ф. Кравченко, О.В. Кравченко, В.И. Пустовойт, Д.В. Чуриков, А.В. Юрин // Радиотехника и электроника.– 2014.– Т. 60, № 2.– С. 109-148.

164. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть III. / В.Ф. Кравченко, О.В. Кравченко, Я.Ю. Коновалов, В.И. Пустовойт, Д.В. Чуриков // Радиотехника и электроника.– 2015.– Т. 60, № 7.– С. 663-694.

165. Применение семейств атомарных, Wa_систем и R_функций в современных проблемах радиофизики. Часть IV // В.Ф. Кравченко, О.В. Кравченко, В.И. Пустовойт, Д.В. Чуриков, А.В. Юрин // Радиотехника и электроника Т. 60, № 11. – 2015. – С. 1113-1152.

166. Vishnivetsky O.V. Analysis of Non-Linear Wave Processes Using Wigner Transform / O.V. Vishnivetsky, O.V. Lazorenko, L.F. Chernogor // Russian Radio Physics and Radio Astronomy.- 2007/9.- Т. 12.- 295 с.

167. System spectral analysis of the fractal ultra-wideband signals / L.F. Chernogor, S.G. Kravchenko, O.V. Lazorenko // Вопросы атомной науки и техники.- 2015.- № 4.- С. 244-247.

168. Кравченко В.Ф. Преобразование Кравченко Вигнера в нелинейной цифровой обработке сигналов / В.Ф. Кравченко, О.В. Лазоренко, В.И. Пустовойт // Доклады Академии наук.- 2007.- Т. 416, № 6.- С. 754-758.

169. Ch. Liu Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 2: Diffraction problem / Ch. Liu, A.Yu. Panchenko, M.I. Slipchenko // Telecommunication and Radio Engineering. – 2015. - №74(19) P.1745-1753.

170. Atmospheric radio acoustic sounding systems with controlled array antennas. Part 1. Performance evaluation of controlled AA / Ch. Liu, A.Yu. Panchenko, M.I. Slipchenko, Y.N. Ulyanov / Telecommunication and Radio Engineering. – 2015. - №74(17).

ДОДАТОК А

НАУКОВІ РОБОТИ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ
РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко, І. В. Луценко, Д. О. Попов, І. В. Попов, О. В. Соболяк // Космічна наука і технологія. - 2015.- Т. 21, № 3.- С.83-90.
2. Луценко В.И. Дальность действия систем акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2015.- Т. 14, № 2.- С.125-136.
3. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Е.В. Кривенко, А.В. Соболяк // Физические основы приборостроения.- 2015.- Т.4, №4(17). –С.3-29.
4. Обнаружение сигналов на фоне нестационарных негауссовых помех от подстилающей поверхности / В.Ф. Кравченко О.В. Кравченко В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк. // Физические основы приборостроения.- 2016.- Т.5, №4(21). –С.23-39.
5. Характеристики акустических полей наземных и малоразмерных воздушных объектов акустической разведки / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Мазуренко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2017.- Т.16, №1, 2.- С.18-22.
6. Луценко В.И. Использование смарт-грид технологий для повышения эффективности применения объектов наземной техники / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Прикладная радиоэлектроника.- 2017.- Т16, №3, 4.- С.134-145.
7. The Acousto-Electromagnetic Portrait Signatures For The Aerodynamic And Ground Technology Objects / V. Lutsenko, I. Lutsenko, A. Sobolyak, Y. Luo, Q. Guo, & Y. Zheng // Telecommunication and Radio Engineering.- 2018.- Vol.77, №11. – P.971-993.

8. Луценко В.И. Пассивные акустические системы разведки, дальность их действия и разрешающая способность / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // Интегровані технології та енергозбереження, щоквартальний науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХПІ». - 2014.- № 3.- С. 60-64.
9. Пат. Україна №111262, МПК H03B 7/14 (2006.01), H03B 7/06 (2006.01) Відкрита випромінююча система / Кривенко О. В., Луценко В. І., Соболяк О.В. // Заявник і власник Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України.- № а 2014 08410, заявл. 27.04.2014, опубл. дані заявки 21.05.2016, Бюл.№2, опубл. дані про патент 11.04.2016, Бюл.№7.
10. Луценко В.И. Дальность действия и разрешающая способность пассивных акустических систем разведки / В. И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 5-й Международный Радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Межд. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии», 14-17-октября: сб. научн. тр. – Харьков, 2014.- Т.1.- С. 41-44.
11. Использование свойств магических квадратов для апертурного синтеза / В.И. Луценко, И.В. Луценко, И.В. Попов, А.В. Соболяк, Иян Ло // 8-я Междунар. научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им.А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.215-219.
12. Методика оценки уровня акустических шумов объектов на местности / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 8-я Междунар. научно-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им.А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.220-225.
13. Луценко В.И. Сигнатуры акусто-электромагнитных портретов аэродинамических и наземных объектов техники / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк // 8-я Междунар. научно-техн. конф.

- «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20-23 сентября: сб. научн. тр.– Российское НТОРЭС им.А.С. Попова. Суздаль. Россия, 2015.- С.226-230.
14. Signatures of Acousto-Electromagnetic Portraits of Aerodynamic and Terrestrial Mechanical Objects / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, A. V. Sobolyak // Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 електрон. опт. диск (CD – ROM).
15. Optimal Reception of Signals Propagating in Media with Absorption and Dispersion / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov, A.V. Sobolyak // Proceedings 2016 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. -Kharkov, Ukraine, June 21-24, 2016 – 1 електрон. опт. диск (CD – ROM).
16. Луценко В.І. Акусто-електромагнітні портрети об'єктів наземної та повітряної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.137-138.
17. Луценко В.І Застосування систем акустичної розвідки для підвищення живучості об'єктів наземної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.139-141.
18. Описание и анализ квазипериодических сигналов распространяющихся в средах с поглощением и дисперсией / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Иян Ло, А.В. Соболяк // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С. 29-31.

19. Луценко В.І Використання смарт-грід технологій для підвищення ефективності використання об'єктів наземної техніки / В.І. Луценко, І.В. Луценко, О.В. Соболяк. // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 12–13 жовтня: зб. наук. праць.- Київ, 2016. – С.141-143.
20. Оптимальное обнаружение сигналов на фоне стационарных негауссовых помех / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, И.В. Попов // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обработка сигналов і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С.121-123.
21. Разрешение – обнаружение - измерение параметров сигналов в негауссовых шумах / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, И.В. Попов // VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Обработка сигналов і негауссівських процесів» (ОСНП-17) пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 24-26 травня: зб. наук. праць. – Черкаси, 2017. – С.118-120.
22. Определение сигнатур акусто-электромагнитных портретов объектов техники на основе их оптических портретов / В.И. Луценко, И.В. Луценко, А.В. Соболяк, Ло Иян, Гоу Цян, Джин Юн. // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018.- С.703-710.
23. Использование полумарковских вложенных процессов для описания нестационарных акустических шумов. / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Ло Иян, А.В. Соболяк // VIII Всероссийские Армандовские чтения, IX научно-практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26-28 июня: сб. научн. тр.– Муром, 2018. –С.25-27.

ОДАТОК Б

РІВНІ ШУМУ. КОЕФІЦІЄНТИ АПРОКСИМАЦІЇ. РОЗРАХУНКОВІ
ЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ

Таблиця Б.1

Типові значення рівнів шуму

Джерело шуму	Рівень звукового тиску, дБ	Щільність потужності звука, Вт/м ²	Полоса частот, Гц	Примітка	Джерело інформації
Повна тиша 0	0	10^{-12}		Пригнічує	1 4 7
Шелест листя	10	10^{-11}		Звуковий комфорт	1 4 7
Шепіт	20	10^{-10}			1 4 7
Дощ	50...70		25 – 1000		1 4 7
Звичайна розмова	60				1 4 7
Кроки людини	60...65	$10^{-6}...3 \cdot 10^{-6}$	500 – 10000		1 2
Вітер	65-77	$3 \cdot 10^{-6}...5 \cdot 10^{-5}$	20 – 1000	Макс-ний рівень	1 2
Нерухома техніка: гусенична колісна	65-72	10^{-5}	30 – 2000	На відстані	1 2
	60-65	10^{-6}	30 – 2000	100м	1 2
Рухома гусенична техніка	80-89	$10^{-4}...10^{-3}$	15...1000	На відстані 100м	1 2
Літак на старті	140	10^2		Поруч	1 0
	100	10^{-2}		На відстані 100м	1 0
Аеродинамічні об'єкти: вертоліт літак	82-89	$10^{-4}...10^{-3}$	100 – 2000	При прольоті	1 2
	72-74		100 – 2000	При прольоті	1 2
Ударна хвиля пулі	70-100	$10^{-5}...10^{-2}$	~600-2000	На відстані 100м	6

Продовження таблиці Б.1

Джерело шуму	Рівень звукового тиску, дБ	Щільність потужності звука, Вт/м ²	Полоса частот, Гц	Дистанція	Джерело інформації
Максимальний рівень звуку при вистрілі із гвинтівки, із пушки.	159	10 ⁴		Поруч	13
	188	10 ⁷		Поруч	13
Вертоліт Літак	82-89	10 ⁻⁴ ...10 ⁻³	100 – 2000	При прольоті	12
	72-74		100 – 2000	При прольоті	12
Постріл: гвинтівка гармата	159	10 ⁴		Поруч	13
	188	10 ⁷		Поруч	13

Таблиця Б.2

Коефіцієнти в регресійних залежностях погонного загасання

Температура, С°	Вологість, %	A	A1	B1	B2	R	SD
10	70	0,314	0,1	0,00161	1,622E-6	0,99996	0,2945
20	70	0,768	0,1	0,00199	9,489E-7	0,9990	0,9793
30	70	0,397	0,1	0,00488	3,060E-7	0,997	1,369
15	20	-4,616	0,3	0,0172	1,097E-6	0,9958	5,47
15	50	0,602	0,1	0,00168	1,796E-6	0,9999	0,390
15	80	0,644	0,1	0,00157	1,086E-6	0,9996	0,672

Тут А, В1, В2 – коефіцієнти параболічної регресії, R – коефіцієнт кореляції рівняння регресії з експериментальними даними, SD – середньоквадратична похибка апроксимації.

Кофіцієнти апроксимації ВЧ частини спектра

Тип об'єкта	Полоса частот, Гц	a	b	R	$n = -\frac{b}{10}$
Вертоліт Мі-24	500...8000	44,0	-39,7	-0,972	3,97
Дизель 800 об./хв	500...8000	22,3	-24,2	-0,941	2,42
Дизель 2000 об./хв	150...2000	30,34	-26,4	-0,887	2,64
Т-34	100...8000	8,27	-20,29	-0,897	2,03
Вистріл	150...8000	2,5	-17,5	-0,922	1,75
Вистріл 200 мм.	150...8000	45,77	-24,49	-0,944	2,45
Вистріл	400...6000	10,5	-22,2	-0,857	2,22
Літак Jet (1-ий горб) від 540 до 2500 Гц	500...2500	55,22	-33,24	-0,800	3,32
Літак Jet (2-ой горб) від 4510 Гц	4500..8000	183,25	-62,1	0,731	6,21

Таблиця Б.4

Коефіцієнти лінійної регресії апроксимації залежності інтегрального загасання в атмосфері від дальності для різних джерел шуму

Джерело звуку	Кофі-ти апроксимаці ї	Літак Jet	Вертоліт Мі-24	Постріл	Дизельний двигун 800 об./хв.	Дизельний двигун 2000 об./хв.
температура=10, вологість=70%	γ_0	-1,66	-0,43	-0,39	-0,078	-0,17
	γ_1	-1,51	-1,00	-0,96	-0,58	-0,68
температура=20, вологість=70%	γ_0	-1,60	-0,39	-0,36	-0,073	-0,15
	γ_1	-2,00	-1,50	-1,46	-1,069	-1,18
температура=15, вологість=20%	γ_0	-6,94	-2,79	-2,40	-0,32	-0,72
	γ_1	-4,69	-3,55	-3,78	-2,49	-3,03

Таблиця Б.5

Розрахункові дальності виявлення для різних атмосферних умов і типів зовнішніх завад

	Літак Jet			Вертоліт Мі-24			Постріл		
	Вплив атмосфери і поверхності								
	без переш код	шелест листя	вітер, дощ	без переш код	шелест листя	вітер, дощ	без переш код	шелест листя	вітер, дощ
темп.=10, вол.=70%	>8 км	>8 км	1,76 км	>8 км	>8 км	0,9 км	>8 км	>8 км	7,45 км
темп.=20, вол.=70%	>8 км	>8 км	1,7 км	>8 км	>8 км	0,87 км	>8 км	>8 км	6,5 км
темп.=15, вол.=20%	7,3 км	5,7 км	1 км	7,7 км	5,93 км	0,66 км	>8 км	>8 км	3,4 км
	Вплив атмосфери								
темп.=10, вол.=70%	>8 км	>8 км	1,88 км	>8 км	>8 км	0,89 км	>8 км	>8 км	>8 км
темп.=20, вол.=70%	>8 км	>8 км	1,77 км	>8 км	>8 км	0,86 км	>8 км	>8 км	>8 км
темп.=15, вол.=20%	>8 км	>8 км	0,95 км	>8 км	>8 км	0,63 км	>8 км	>8 км	8,1 км
	Enginework0800			Enginework2000			Т-34		
	Вплив атмосфери і поверхності								
	без переш код	шелест листя	вітер, дощ	без переш код	шелест листя	вітер, дощ	без переш код	шелест листя	вітер, дощ
темп.=10, вол.=70%	>8 км	7,5 км	<0,5 км	>8 км	7,58 км	<0,5 км	>8 км	7 км	<0,5 км
темп.=20, вол.=70%	>8 км	6,4 км	<0,5 км	>8 км	6,5 км	<0,5 км	>8 км	6,1 км	<0,5 км
темп.=15, вол.=20%	6,4 км	4,3 км	<0,5 км	5,9 км	4 км	<0,5 км	6,2 км	4 км	<0,5 км
	Вплив атмосфери								
темп.=10, вол.=70%	>8 км	>8 км	0,94 км	>8 км	>8 км	0,93 км	>8 км	>8 км	0,88 км
темп.=20, вол.=70%	>8 км	>8 км	0,91 км	>8 км	>8 км	0,9 км	>8 км	>8 км	0,85 км
темп.=15, вол.=20%	>8 км	>8 км	0,8 км	>8 км	>8 км	0,75 км	>8 км	>8 км	0,7 км

ДОДАТОК В

АПАРАТУРА, МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ



а)



б)

Рис. В.1. Зовнішній вигляд шумоміра (а) і диктофона (б).

Таблиця В.1

Технічні характеристики шумоміра JTS-1357

Змінний параметр	Величина
Роздільна здатність	0,1 дБ
Точність	$\pm 1,5$ дБ
Частотний діапазон:	31.5Гц...8.5КГц
Діапазон вимірювань	30...130 дБ
Лінійний діапазон	50 дБ



а)



б)

Рис. В.2. Зовнішній вид БПЛА: а – літакового типу Х-8, розмах крила 2,12 м, розрахункова кількість обертів двигуна 8000-11000 об./хв.; б – квадрокоптер, розрахункова кількість обертів двигуна 6000-10500 об./хв.

Основні технічні характеристики цифрового диктофона Olympus VN-480 PC

Вимірюваний параметр	Величина
Тривалість запису <ul style="list-style-type: none"> • HQ (висока якість) • SP (нормальна якість) • LP (тривала якість) 	біля 177 хвилин біля 267 хвилин біля 493 хвилин
Частота дискретизації: <ul style="list-style-type: none"> • Режим HQ • Режим SP • Режим LP 	16,0 кГц 10,6 кГц 5,75 кГц
Загальні частотні характеристики: <ul style="list-style-type: none"> • Режим HQ • Режим SP • Режим LP 	300...7200 Гц 300...4700 Гц 300...2600 Гц
Підключення до комп'ютера	порт USB
Об'єм пам'яті	64 МБ
Гніздо навушників	опір – 8 Ом
Гніздо мікрофона	опір – 2 кОм

Таблиця В.3

Рівні шуму різних джерел

Назва /тип двигуна	Рівень шуму, дБ	Дальність / висота/ кут, м	Примітки
Форд/дизель	78	1/1,5/0	На снігу, ХХ
Форд/дизель	80	1/1,5/0	На асфальті, ХХ
Газель/бензин	65	1/1,5/0	На асфальті, ХХ
Уаз469	80	1/1,5/180	На асфальті, ХХ
Уаз452	56	1/1,5/0	На асфальті, ХХ
Легковий автомобіль бензин (об'єм 2 л)	70	5/1/270	На асфальті

Продовження таблиці В.3

Назва /тип двигуна	Рівень шуму, дБ	Дальність / висота/ кут, м	Примітки
VolkswagenPassat	66	1/1/180	На снігу, ХХ
БПЛА–квадрокоптер	87	10/1,7/	10м над приймачем
БПЛА –квадрокоптер	81,5	2/1,7	50% потужності
БПЛА –квадрокоптер	87	2/1,7	85% потужності
БПЛА-літакового типу	92	2/1/	На рівні мікрофона в приміщенні
БПЛА- літакового типу	84	4/1/	На рівні мікрофона в приміщенні
Кроки	73...76	-/1,5/-	Сніг наст
Кроки	54...57	-/1,5/-	Сніг цілина
Кроки	58...60	-/1,5/-	Бетон
Вітер	57...61		7...8м/с, навітрена сторона
Вітер	83...86	/1,5	7...8м/с, підвітрена сторона
Зовнішній фон	37	1,5	Вітер ≤ 1 м/с

ХХ – холостий хід

Таблиця В.4

Збільшення рівня шуму при зміні обертів двигуна від холостого ходу до максимальних обертів.

Назва /тип двигуна	Збільшення шуму, дБ	Дальність / висота, угол, м
Форд/дизель	18	50/1,5/0°
Форд/дизель	11	1/1,5 / 0°
УАЗ 469/бензин	12	1/1,5, бокс
УАЗ 452/бензин	11	1/1,5, бокс
Volkswagen Passat/бензин	3	1/1/180

Таблиця В.5

Залежність рівня шуму від кута спостереження джерела при холостому ході двигуна.

Назва /тип двигуна	Кут відносно автомобіля, град.			
	0	90	180	270
Форд/дизель	81-82	74	71	77-78
Газель/бензин	65	60	51	53
Уаз452	56	54,4	62	56
Уаз469	-	78,8	80	
БТР-4/дизель, 500 л.с., 1000 об./хв	-	70	82	86
Volkswagen Passat	59	59	64	58

Таблиця В.6

Ослаблення випромінювання.

Об'єкт	Дальність, м						Примітки
	1	10	20	30	50	70	
Форд/дизель	0	14	21,5	23	29	31	0 ⁰ , сніг
Форд/дизель	0	11,5	18,5				0 ⁰ , асфальт
Форд/дизель		13	20	23			0 ⁰ , асфальт
	Ослаблення, дБ						

Таблиця В.7

Множник ослаблення випромінювання

Об'єкт	Дальність, м						Примітки
	1	10	20	30	50	70	
Форд/дизель	0	6	4,5	7	5	6	0 ⁰ , сніг
Форд/дизель	0	8,5	7,5				0 ⁰ , асфальт
Форд/дизель	0	7	6	7			0 ⁰ , асфальт
	Множник ослаблення, дБ						

Рівні шуму різних джерел

Назва/тип двигуна	Рівень шуму, дБ	Дальність/висота/ кут, м	Примітки
БТР-4 / дизель, 500 л.с.	71	20/1/180	2500 об./хв., швидкість 0 м/с
БТР-4 / дизель, 500 л.с.	80	10/1/180	2500 об./ хв., швидкість 0 м/с
БТР-4 / дизель, 500 л.с.	86	5/1/270 со сторони вихлопа	1000 об./ хв., швидкість 0 м/с
БТР-4 / дизель, 500 л.с.	82	5/1/180 ззаду	1000 об./ хв., швидкість 0 м/с
БТР-4 / дизель, 500 л.с.	70	5/1/90 збоку	1000 об./ хв., швидкість 0 м/с
БТР-4 / дизель, 500 л.с.	71	50/1/270	1000 об./ хв., швидкість 0 м/с
Т-64БВ, танк, 750 л.с.	72	50/1/200 ззаду і збоку	1000 об./ хв., швидкість 0 м/с
Колона із 2-х БТР-4 з інтервалом 20 м	67	300/30/225-	2500 об./ хв, дизель 500 л. с. швидкість 30 км/ч

Таблиця В.9

Полоси частот поза яких зосереджена задана частина потужності шуму.

Об'єкт	Полоса частот Гц, для заданого рівня потужності,		
	-20 дБ	-30 дБ	-40 дБ
Вітер	2064,5	4842,3	8357,6
Двигун, автомобіль Форд (макс об.)	6624,2	8516,4	9821,8
Двигун БТР-4 (ХХ)	5544,8	7684,7	9765,3
Вистріл, гармата 30мм	3458,8	6513,8	9087,0
Мультироторний БПЛА	6325,4	8120,7	9730,3
БПЛА літакового типу	6968,7	8842,1	9932,2

ДОДАТОК Г
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ТЕХНІКИ

Таблиця Г.1

ЕПР деяких типів вертольотів

Тип вертольота	Країна виробник	Рік випуску	Призначення	Горизонтальна поляризація				Вертикальна поляризація		ЕПР в УКХ діапазоні, дБ/м ²	Частота обертання винта. Гц F1л* К-сть лопатей	
				ЕПР Гвинта, дБ/м2	ЕПР Корпуса, дБ/м2	Резонанса частота. МГц		ЕПР Корпуса, дБ/м2	Резонансна частота корпуса, МГц		ГОЛОВНОГО ГВИНТА	ХВОСТОВОГО ГВИНТА
						Корпуса	Ввинта					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Bell 429	USA	2006	БЦ	26,2	27,7	11,4	13,7	18,6	18,6	14,2	29,6	98,4
Eurocopter UH-72 Lacota	USA	2006	БЦ	26,2	27,7	11,5	13,6	17,2	21,7	13,5	14,8	82,9
Bell ARH-70 Arapaho	USA	2006	У	25,9	27,2	12,1	14,1	13,7	32,8	11,5	30,4	98,4
Bell 210	USA	2004	БЦ	28,3	27,4	11,8	10,7	17,3	21,6	13,4	11,6	62,0
Bell, Agusta BA609 Tiltrotor	USA	2003	БЦ	23,4	27,8	11,3	18,9	19,5	16,7	14,8	30,7	--
Bell UH-1Y Iroquois	USA	2000	БЦ	28,8	28,0	11,0	10,1	19,4	17,0	14,8	21,9	62,7
Schweizer Model 333	USA	2000	БЦ	23,8	22,0	22,0	17,9	16,9	22,5	10,6	29,0	124,9
Bell AH-1Z Viper	USA	2000	У	28,7	30,4	8,4	10,3	19,3	17,2	15,9	11,1	54,7
Sikorsky S-92 Helibus	USA	1998	БЦ	30,3	31,7	7,2	8,5	22,7	11,6	18,3	18,3	97,0
Sikorsky S-92	USA	1998	Т	30,3	30,1	8,7	8,5	22,7	11,6	17,5	18,3	94,7
Bell 427	USA	1997	БЦ	26,4	27,6	11,5	13,4	16,7	23,2	13,2	29,0	93,9

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Load Ranger 2000	USA	1997	БЦ	25,5	26,8	12,7	14,8	17,0	22,4	13,0	16,0	102,2
McD.D. MD 902 Explorer	USA	1997	БЦ	25,7	26,8	12,7	14,5	17,7	20,5	13,4	39,3	--
Аэрокоптер 3А-6 (АК-1)	UKR	1999	БЦ	20,9	23,5	18,5	25,0	13,4	33,8	9,5	40,6	131,0
McDonnell Douglas MD 500E	USA	1982	БЦ	23,5	22,9	20,0	18,6	15,9	25,3	10,5	40,4	118,6
Авіаімпекс Ангел	UKR	2003	БЦ	23,7	22,8	20,1	18,1	14,4	30,2	9,7	29,4	124,9
Миля Mi-34	RUS	1986	БЦ	25,4	24,2	17,2	15,0	15,3	27,3	10,8	32,5	109,7
Eurocopter EC.120 Colibri	FRA	1995	БЦ	25,4	26,6	13,0	15,0	17,4	21,4	13,0	24,4	349,3
MBB Bo.108	DEU	1991	БЦ	25,4	25,9	14,2	15,0	16,0	25,0	12,0	32,5	77,3
Bell ARH-70 Арапахо	USA	2006	У	25,9	27,2	12,1	14,1	13,7	32,8	11,5	30,4	98,4
Bell OH-58D Kiowa Warrior	USA	1982	У	25,9	27,2	12,1	14,1	13,7	32,8	11,5	30,4	98,4
Eurocopter AS.350B-3 Ecureuil	FRA	1997	БЦ	25,9	27,6	11,6	14,0	14,5	29,6	12,1	22,8	87,3
Agusta A.119 Koala	ITA	1995	БЦ	26,0	27,7	11,5	13,9	18,0	19,9	13,9	30,1	81,2
Bell 427	USA	1997	БЦ	26,4	27,6	11,5	13,4	16,7	23,2	13,2	29,0	93,9
AS.565 Panther	FRA	1984	У	26,9	27,0	12,4	12,6	17,1	22,1	13,1	27,2	738,3
Harbin Z-19	CHN	2010	У	26,9	26,9	12,5	12,6	18,5	18,7	13,8	27,2	481,2
Bell 430	USA	1994	БЦ	27,5	29,1	9,8	11,7	17,9	20,2	14,5	25,4	77,3
Westland Lynx AH.Mk.7(9)	UK	1985	У	27,6	29,0	9,8	11,6	17,9	20,1	14,5	25,1	137,6
Changhe WZ-10	CHN	2003	У	27,6	28,4	10,6	11,5	18,2	19,5	14,4	25,0	90,2
Sikorsky H-76 Eagle	USA	1984	БЦ	27,9	27,8	11,3	11,2	19,6	16,6	14,8	18,2	133,1
Bell AH-1F Cobra	USA	1981	У	27,9	29,5	9,3	11,2	18,8	18,2	15,2	12,1	54,7

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Bell 210	USA	2004	БЦ	28,3	27,4	11,8	10,7	17,3	21,6	13,4	11,6	62,0
Камов Ка-50 Черная Акула	RUS	1982	У	28,6	28,0	11,1	10,3	20,3	15,3	15,2	16,8	
Bell AH-1W Super Cobra	USA	1986	У	28,7	28,2	10,8	10,3	19,2	17,4	14,8	11,1	54,7
McDonnell Douglas AH-64 Apache	USA	1984	У	28,7	30,3	8,5	10,3	19,8	16,2	16,1	16,7	116,4
Bell UH-1Y Iroquois	USA	2000	БЦ	28,8	28,0	11,0	10,1	19,4	17,0	14,8	21,9	62,7
Eurocopter AS.532UB Cougar 100	FRA	1996	Т	29,2	30,8	8,0	9,6	20,3	15,2	16,6	20,8	133,1
Камов Ка-32	RUS	1980	БЦ	29,4	26,4	13,3	9,4	21,1	13,9	14,8	15,3	
Sikorsky HH- 60J Jayhawk	USA	1990	БЦ	29,6	31,3	7,6	9,2	20,8	14,5	17,1	14,9	97,0
Eurocopter EC.725 Cougar Мк.ІІ+	FRA	2000	Т	29,6	31,2	7,7	9,3	19,7	16,3	16,5	20,1	103,1
Міль Мі-28	RUS	1982	У	30,1	29,9	8,9	8,7	18,1	19,6	15,1	18,9	84,6
Sikorsky S-92	USA	1998	Т	30,3	30,1	8,7	8,5	22,7	11,6	17,5	18,3	94,7
ЕНІ ЕН.101	UK	1987	Т	30,8	32,5	6,6	8,1	19,6	16,5	17,1	17,5	81,2
Changhe Z-8	CHN	1985	БЦ	30,9	31,1	7,7	7,9	23,1	11,1	18,2	21,5	101,5
Міль Мі- 8АТМШ Термінатор	RUS	1997	У	31,9	30,6	8,2	7,0	21,5	13,3	17,1	15,3	41,5
Міль Мі- 8АМТ (Ми- 171)	RUS	1991	БЦ	31,9	30,6	8,3	7,0	21,5	13,3	17,1	19,1	62,3
Міль Мі-18	RUS	1980	БЦ	31,9	30,7	8,1	7,0	19,8	16,1	16,3	15,3	41,6

В таблиці використані наступні позначення вертольотів: БЦ - багатопільовий, Т - транспортний. У - ударний.

Характерні розміри і ЕПР літаків

Тип літака	Призначення	Довжина літака, м	Висота літака, м	Розмах крила м	Площа крила м ²	Горизонтальна поляризація ЕПР, дБ/м ²		Вертикальна поляризація ЕПР, дБ/м ²	Резонансна частота, МГц			
						Крила	Корпуса		Корпуса	ГП		ВП
										Корпуса	Крила	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Росія												
Іл-18	П	35,9	10,2	37,4	140	36,82	36,47	25,51	4,18	4,01	7,37	
Іл-62	П	53,12	12,4	43,2	279	38,08	39,87	27,20	2,82	3,47	6,07	
Іл-76	ВТ	46,6	14,7	50,5	300	39,43	38,73	28,71	3,22	2,97	5,10	
Іл-114Т	П	26,88	9,32	30	81,9	34,91	33,95	24,76	5,58	5,00	8,04	
Ту-160	Б	54,1	13,1	55,7	232	40,3	40,03	27,71	2,77	2,7	5,73	
				50,7		39,5				2,96		
				35,6		36,4				4,2		
Ту-22М3	Б	42,46	11,1	34,3	183,6	36,07	37,93	26,23	3,53	4,38	6,79	
кут стріловидності 20°				34,3	183,6	36,07				4,38		
кут стріловидності 65°				27,7	175,8	34,2				5,4		
МіГ-29	В	17,32	4,73	11,4	38,06	26,47	30,14	18,86	8,66	13,20	15,86	
МіГ-29М	В	17,32	4,73	11,4	38,06	26,47	30,14	18,86	8,66	13,20	15,86	
МіГ-31	В	22,69	6,15	13,5	61,6	27,95	32,48	21,14	6,61	11,14	12,20	
Су-24	Б											
кут стріловидності 16°		24,59	6,19	17,6	55,2	30,29	33,18	21,20	6,10	8,50	12,11	
кут стріловидності 69°		24,59	6,19	10,4	51	25,68	33,18	21,20	6,10	14,47	12,11	
Су-25	Ш	15,36	4,8	14,4	30,1	28,51	29,09	18,99	9,77	10,45	15,63	
Су-27	В	21,95	5,94	14,7	62,04	28,71	32,19	20,84	6,83	10,20	12,63	
Су-33	В	21,2	5,9	14,7	67,8	28,71	31,89	20,78	7,08	10,20	12,71	
Су-35	В	21,9	5,9	15,3	62,04	29,06	32,17	20,78	6,85	9,80	12,71	
Су-47 Беркут	В	22,6	6,4	16,7	56	29,82	32,45	21,49	6,64	8,98	11,72	
МіГ-29М	В	17,32	4,73	11,4	38,06	26,47	30,14	18,86	8,66	13,20	15,86	

Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Росія											
Су-57 ПАК Т-50	В	19,7	4,8	14	82	28,29	31,25	18,99	7,61	10,71	15,63
Україна											
АН-140	ГП	22,6	8,2	25,5		33,50	32,45	23,64	6,64	5,88	9,15
АН-24	П	23,53	8,32	29,2	74,98	34,67	32,80	23,77	6,37	5,14	9,01
АН-72	ВТ	28,07	8,75	31,89	98,6	35,44	34,33	24,21	5,34	4,70	8,57
АН-22 «Антей»	Т	57,31	12,53	64,4	345	41,54	40,53	27,32	2,62	2,33	5,99
АН-124 Руслан	Т	69,1	21,08	73,3	628	42,67	42,16	31,84	2,17	2,05	3,56
Японія+США											
F-2	В	15,52	4,96	10,8	34,8	26,03	29,18	19,28	9,66	13,89	15,12
США											
Dassault Mirage F1	В	15,23	4,5	8,4	25	23,85	29,02	18,43	9,85	17,86	16,67
F-22 Раптор	В	18,92	5	13,56	78,04	28,01	30,90	19,34	7,93	11,06	15,00
Northrop B-2 Spirit	СБ	20,9	5,1	52,12	460	39,71	31,77	19,52	7,18	2,88	14,71
EMB-145RS	РО	29,87	6,75	20,04	51,2	31,40	34,87	21,95	5,02	7,49	11,11
Боїнг Б-52 «Стратофорт рес»	СБ	49,05	12,4	56,39	371,6	40,39	39,18	27,23	3,06	2,66	6,05
General Dynamics F- 16 Fighting Falcon	В	15,03	5,09	9,45	27,87	24,87	28,90	19,50	9,98	15,87	14,73
з ракетами на кінцях крила				10		25,37				15,00	
Lockheed Martin F-35 Lightning II	ВБ	15,57	4,38	10,67	42,7	25,93	29,21	18,20	9,63	14,06	17,12
Китай											
J-20 (Чорний орел)	В	20,3	4,45	12,9	73	27,58	31,52	18,33	7,39	11,63	16,85

ВТ- воєнно-транспортний, П- пасажирський, Б- бомбардувальник, В- винищувач, Ш-штурмовик, А- літак-амфібія, Т- транспортний, ГП- грузопасажирський, СБ - стратегічний бомбардувальник, РО- літак дальнього радіолокаційного виявлення, ВБ- винищувач - бомбардувальник

Характерні розміри і ЕПР БПЛА літакового типу

БПЛА літального типу	Призначення	Довжина БПЛА, м	Висота БПЛА, м	Розмах крила. Діаметр гвинта/конструкції, м	Горизонтальна поляризація				Вертикальна поляризація	
					ЕПР Крыла/ гвинта/ констр укції дБ/м ²	ЕПР Корпуса, дБ/м ²	резонансная частота. МГц		ЕПР Корпуса, дБ/м ²	резонансна частота корпуса, МГц
							Корпуса	Крила/ Винта/ констр укції		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Україна										
БПЛА ХАІ		0,64	-	2,12	11,9	1,5	234,4	70,75	-	-
Електроліт «АVІА- JET»		0,7	-	1,95	11,2	2,3	214,3	76,92	-	-
Аист		1,2	-	1,8	10,5	6,9	125	83,33	-	-
Бекас		1,6	-	1,9	10,96	9,4	93,75	78,95	-	-
Беркут		4	-	6,4	21,5	17,4	37,5	23,44	-	-
Поиск-2		2,1	-	2,6	13,7	11,8	71,4	57,69	-	-
ХАІ-112		2,7	-	3,5	16,2	13,9	55,6	42,86	-	-
(БАК) “Воробей- М”		-	-	1,05	5,8	-	-	142,9	-	-
(БАС) "ЧиЖ-Л"		-	-	2	11,4	-	-	75	-	-
А-2 Синица	МЦ	0,95	-	1,8	10,5	4,9	157,9	83,33	-	-
А-3 "Ремез"	МЦ	0,78	-	2	11,4	3,2	192,3	75	-	-
А-4 "Альбатрос "	МЦ	1,42	-	2,475	13,2	8,4	105,3	60,60	-	-
Росія										
Дельта		0,7		1,7	9,9	2,27	214,3	88,24	-	-

Продовження таблиці Г.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Израиль										
	МЦ Развед БПЛА									
Hermes 180		4,43	1,8	6	20,9	18,29	33,86	25	10,47	41,67
Hermes 450S		6,1	1,8	10,5	25,8	21,07	24,59	14,29	10,47	41,67
Hermes 1500		9,4	2,4	18	30,5	24,83	15,96	8,33	12,97	31,25
	Развед БПЛА									
IAI Heron		8,5	2,3	16,6	29,8	23,95	17,65	9,04	12,60	32,61
Skylark		1,83	-	2,74	14,1	10,61	81,97	54,74	-	-
США										
MQ-1 Predator	МЦ	8,23	2,21	14,84	28,8	23,67	18,23	10,11	12,25	33,94
Євросоюз										
Barracuda	P	8,25	-	7,22	22,5	23,69	18,18	20,78	-	-

Таблиця Г.4

Характерні розміри і ЕПР БПЛА мультироторного типу

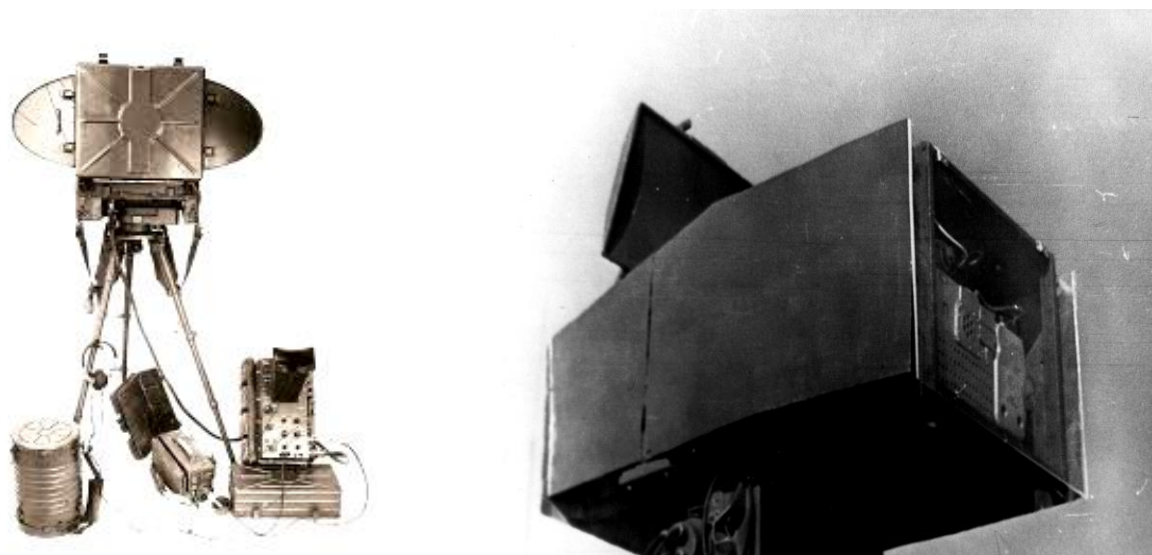
ЕПР БПЛА мультироторного/ вертольотного типу	Довжина вертольота, м	Діаметр гвинта/конструкції, м	Висота конструкції, м	Горизонтальна поляризація				Вертикальна поляризація	
				резонансна частота, МГц		резонансна частота, МГц		ЕПР Корпуса дБ/м ²	резонансна частота, МГц Корпуса
				гвинта/констр укції, дБ/м ²	Корпуса дБ/м ²	Корпуса	гвинта		
Електровертоліт «АВИА-ЭВ1»	1,5	0,74		2,8	8,9	100	202,7	-	-
Мультиротор «АВИА-У3»			1,5	0,5	8,9	-	100	0,5	150
Мультиротор «АВИА-Х4»			1,5	0,5	8,9	-	100	0,5	150
Мультиротор «АВИА-У6»			1,1	0,5	6,2	-	136,4	0,5	150
Мультиротор «АВИА-Hybrid»			1,5	1	8,9	-	100	6,5	75

Таблиця Г.5

Експериментальні (по спектру і кепстру) та розрахункові значення частот модуляції несучого і рульового гвинтів.

Тип вертольоту	Частота модуляції несучого гвинта, Гц			Частота модуляції рульового гвинта, Гц		
	Експеримент		Розрахунок	Експеримент		Розрахунок
	Спектр	Кепстр		Спектр	Кепстр	
McD.D. MD 900 Explorer	36	32,4	39,3	-	-	-
Камов Ка-32К	16	15,1	15,3	-	-	-
КВЗ-АНСАТ	-	-	21,1	-	70,3	96,6
Bell-210	11	-	11	56	-	62
Bell-429	26	-	29	-	-	98
Миль Ми-8АТМШ Термінатор	-	-	15,3	-	-	41,5
Миль Мі-8АМТ (Мі-171)	-	-	19,1	-	-	62,3

ДОДАТОК Д
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІДДЗЕРКАЛЕНЬ ВІД МІСЦЕВОСТІ.
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ І АКУСТИЧНИХ
ШУМІВ



а)

б)

Рис. Д.1. Імпульсні РЛС з циклічним оглядом простору: а) - антени РЛС з довжинами хвиль 2см (а) і 8 мм (б)

Таблиця Д.1

Технічні характеристики імпульсних РЛС зі скануванням

Технічні характеристики	Параметри	
Довжина хвилі, см	0,8	2
Імпульсна потужність, кВт	10	1
Тривалість імпульсу, нс	66	400
Ширина ДН: по азимуту, мрад	10	30
по куту місця, мрад	34	55
Порогова чутливість, Вт	$3 \cdot 10^{-12}$	10^{-12}
Розміри антени по азимуту, см	80	60
Швидкість огляду простору, град/с	360	4;8
Сектор сканування, град	36	240
Частота повторення, кГц	7,5	4
Поляризація	ВП	ВП

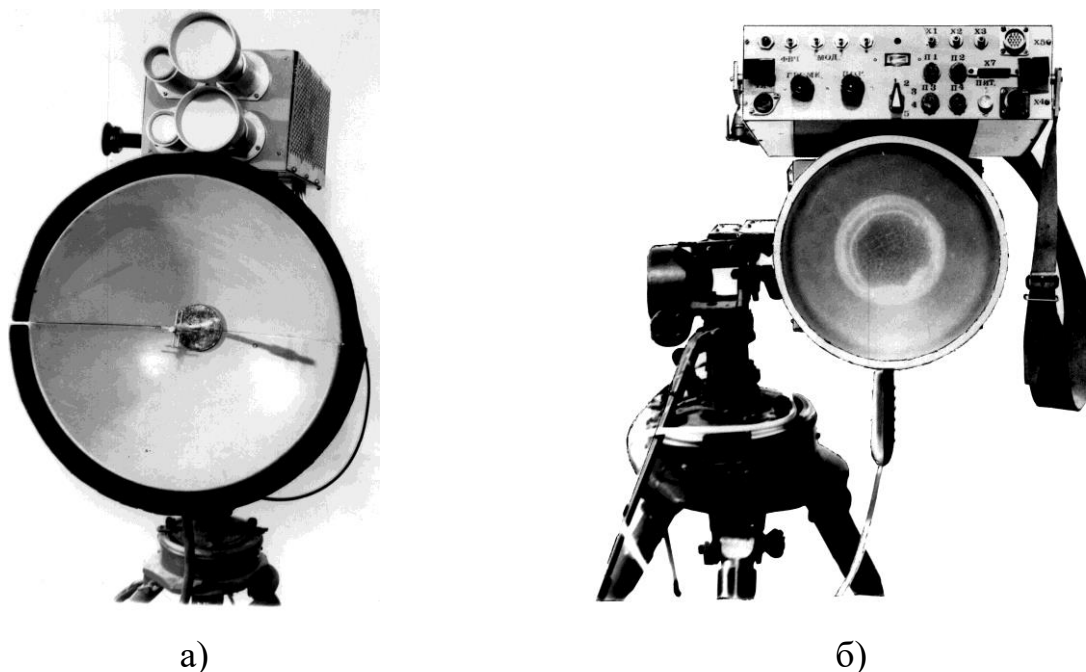


Рис.Д.2. Загальний вигляд вимірювальних комплексів а) - багаточастотний поляриметр $\lambda = 10\text{см}; 8\text{мм}; 4\text{мм}$; б) – РЛС з ЧМ випромінюванням $\lambda = 8\text{мм}$.

Таблиця Д.2

Основні параметри вимірювальних РЛС безперервного випромінювання

Характеристика	Багаточастотний поляриметр			РЛС
				ЧМ
Довжина хвилі, см	10	0,8	0,4	0,8
Потужність, мВт	150	100	50	100
Ширина діаграми, град	20	6	6	3
Чутливість дБ/Вт	-120	-120	-115	-160
Смуга аналізу, Гц	4-500	4-5000	4-5000	50-2000
Розв'язка по поляризації, дБ	25	30	25	25

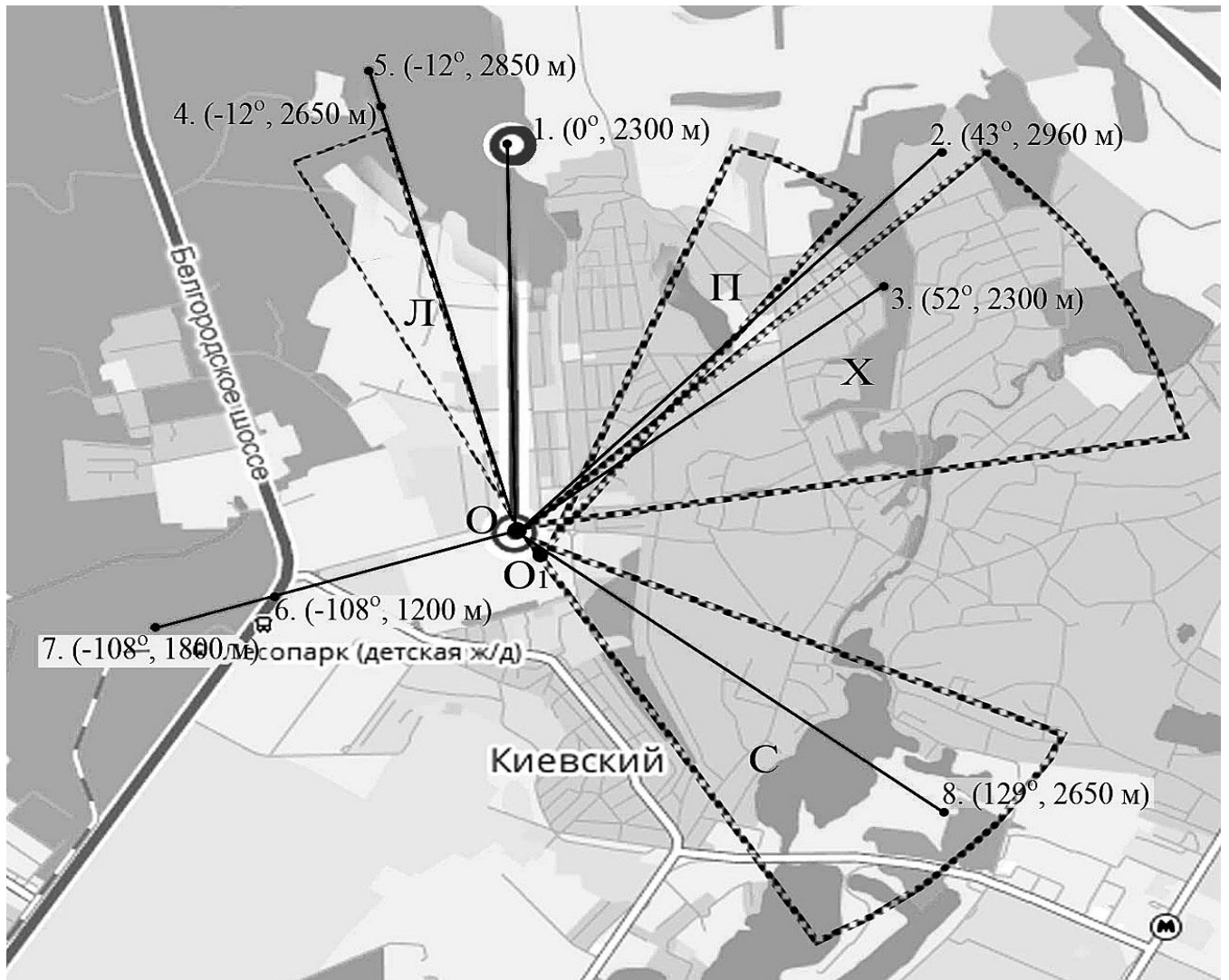


Рис. Д.3. Розміщення вимірювальних систем і досліджуваних ділянок місцевості: 1, 4, 5 - ліс листяний; 2 посадка; 3 - пагорб з травостоєм; 6,7, 8 - ліс листяний; Л - лісовий масив; 3 - зона забудови будинками; Х - пагорб з травостоєм; П - сільськогосподарські угіддя з посадками.

Біля номера кожної з точок вимірювань вказаний її азимут і дальність в метрах. Роздільна здатність по дальності і азимуту становила 10м, 10град для $\lambda=8$ мм и 60 м и 35 град для $\lambda=2$ см.

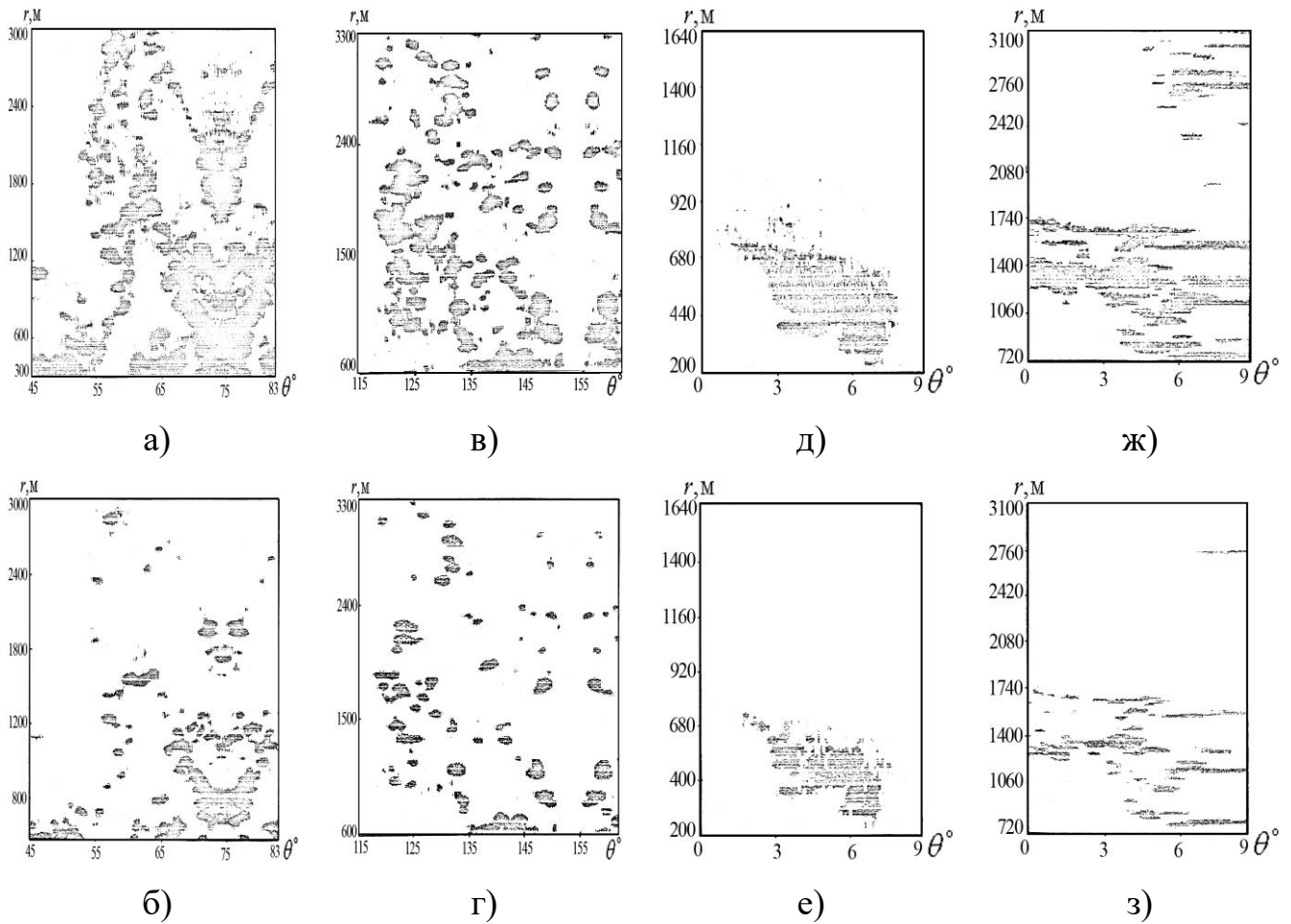


Рис. Д.4. Радіолокаційне зображення місцевості $\lambda = 2\text{см}$: а), б) – пагорб з трав'янистою рослинністю, кут ковзання - $\psi = 3^0 \dots 0.5^0$; в), г) – зона забудови висотними будинками, $\psi = 3^0 \dots 0.5^0$; д), е) – лісовий масив, $\psi = 8^0 \dots 1^0$; ж), з) – сільськогосподарські угіддя з посадками, $\psi = 2.4^0 \dots 0.5^0$; а, в, д, ж - $\Pi = \bar{A}$; б, г, е, з - $\Pi = 4\bar{A}$; Π - порог відображення; \bar{A} - середнє значення по кадру $\{\psi, \theta, r\}$ - кут ковзання, азимут і дальність до ділянки поверхні.

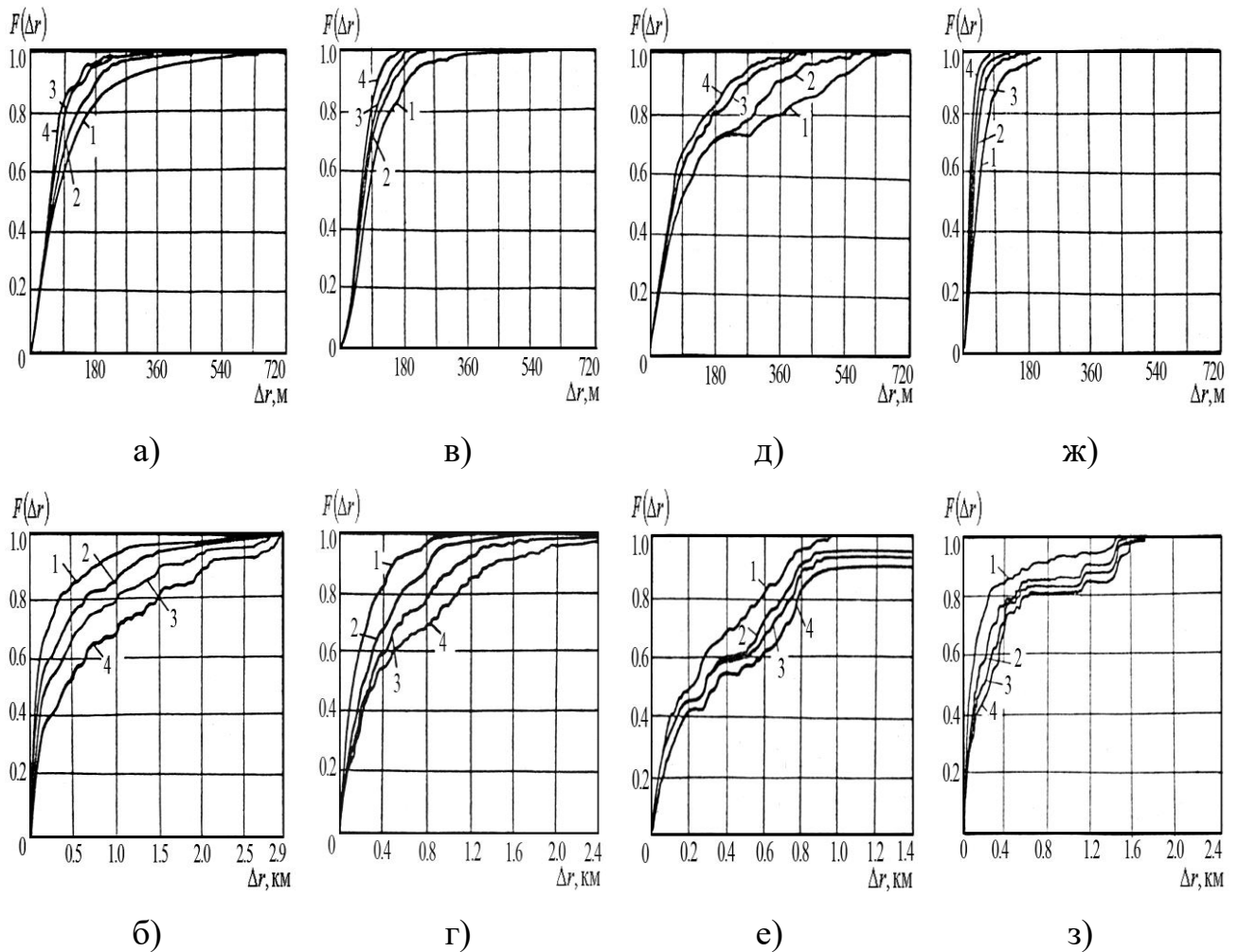


Рис. Д.5. Розподіл розмірів віддзеркалюючих ділянок і відстаней між ними: а), в), д), ж) – розподіл розмірів; б), г), е), з) – розподіл відстаней; а), б) – луг; в), г) – зона забудови; д), е) – лісовий масив; ж), з) – поле; 1- $\Pi / (\overline{A^2})^{0.5} = 1$; 2- $\Pi / (\overline{A^2})^{0.5} = 2$; 3- $\Pi / (\overline{A^2})^{0.5} = 3$; 4- $\Pi / (\overline{A^2})^{0.5} = 4$; Π - поріг.

Таблиця Д.3

Радіолокаційні характеристики ділянок місцевості

Тип місцевості	Довжина хвилі,	ρ	γ^2 , дБ
Зона забудови будинками. Лісовий масив	2	0,17	30
Пагорб, вкритий травою	2	0,25	27
Сільгоспугіддя	2	0,3	2
Зони посадок	0,8	0,17	5

Таблиця Д.4

Розміри ділянок, що віддзеркалюють, проміжків між ними при різних рівнях забезпеченості, а також інтервал кореляції Δr .

Поріг, дБ	Розміри ділянок, що віддзеркалюють, м			Проміжки між ділянками, м			Інтервал, Δr м
	0	6	12	0	6	12	$R(\Delta r) =$
Забезпеченість	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5 / 0,9
Лісовий масив	80/489	67/236	58/204	204/720	276/800	336/1066	93/307
Зона забудови	76/178	58/124	53/102	142/533	245/924	373/1600	40 / 133
Луг	71/231	56/138	53/124	71/675	124/1066	391/1991	47 / 207
Поле	40/98	22/53	18/40	58/583	102/1079	233/1400	20 / 147

Таблиця Д.5

Характерні розміри ділянок, що віддзеркалюють на різних рівнях забезпеченості при експоненційній апроксимації розподілу розмірів.

Поріг, дБ	розміри ділянок, що віддзеркалюють, м			Проміжки між ділянками, м		
	0	6	12	0	6	12
Забезпеченість	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9	0,5/0,9
Лісовий масив	115,4/ 212,4	96,7/ 102,5	83,7/ 88,6	294,3/ 312,7	398,1/ 347,4	484,7/ 463,0
Зона забудови	109,6/ 77,3	83,7/ 53,9	76,5/ 44,3	204,9/ 231,5	353,5/ 401,3	538,1/ 694,9
Луг	102,4/ 100,3	80,8/ 59,9	76,5/ 53,9	102,4/ 293,1	178,9/ 463,0	564,1/ 864,7
Поле	57,7/ 42,6	31,7/ 23,0	26,0/ 17,4	83,7/ 253,2	147,2/ 468,6	336,1/ 608,0

Показники ступеня при апроксимації просторових спектрів різних ділянок місцевості.

Тип місцевості	№ Кри-вої	Діапазон частот, $10\lg(1000\chi)$ M^{-1}	Показник ступеня, n	Коефіцієнт кореляції, R	Діапазон частот, $10\lg(1000\chi)$, M^{-1}	Показник ступеня, n	Коефіцієнт кореляції, R
Лісовий масив	1	0...11	2,28	-0,98	11...17	6,14	-0,99
Зона забудови	2	0...11	1,36	-0,96	11...17	5,48	-0,98
поле	3	0...17	1,53	-0,97			
луг	4	0...17	1,46	-0,98			

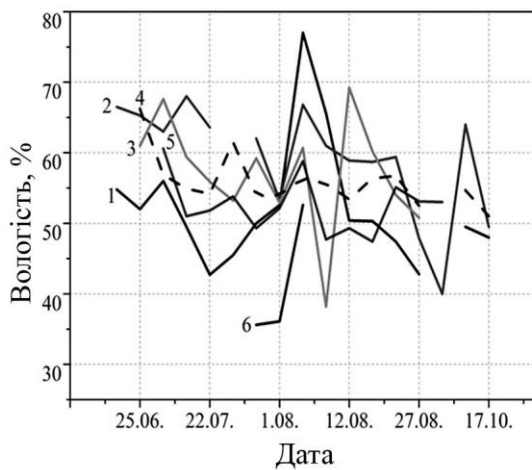


Рис. Д.6. Залежність вологості листя протягом сезону:

1 - береза; 2 - липа; 3 - клен; 4 - дуб;
5 - ясен; 6 - ялина.

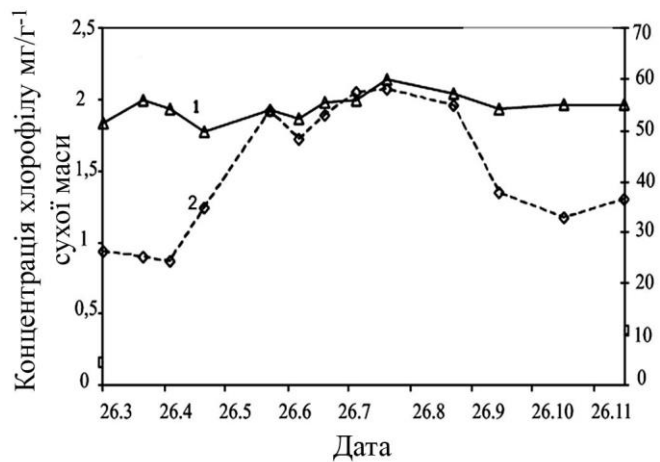


Рис. Д.7. Річна динаміка вмісту вільної води - 1 і хлорофілу – 2 в хвої сосни [104].

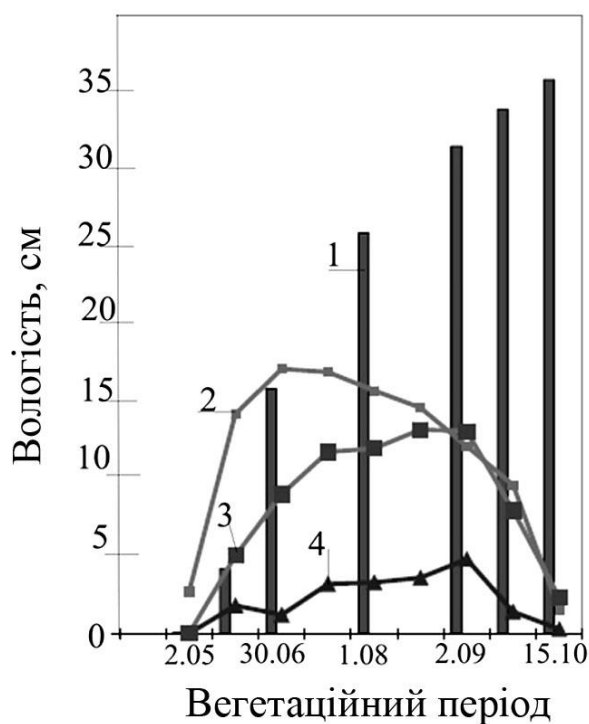


Рис. Д.8. Динаміка зеленої фіто маси, хлорофілового індексу і метеопараметрів (середньої температури повітря і опадів) за вегетаційний період 2003 р. [105]: 1-кількість опадів; 2 температура; 3 кількість біомаси; 4 хлорофільний індекс.

Таблиця Д.7

Значення коефіцієнтів апроксимації для поглинання і відбиття від листя.

Параметр	β_1	σ_{β_1}	β_2	σ_{β_2}	Коефіцієнт кореляції, R	К-сть точок, N
Коеф. загасання, $L[\text{дБ}]$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,804	78
Коеф. відбиття, $\Gamma[\text{дБ}]$	$3,34 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,788	90



Рис. Д.9. Мультимедійний, всехвильовий, цифровий радіоприймач DEGEN DE-1 127 з MP3 плеєром і диктофоном.

Таблиця Д.8

Технічні характеристики приймача DEGEN, моделях: DE-1127

№	Характеристика	Величина	Примітка
1	FM, МГц або	64.0...108.0 87.0...108.0	Встановлюється в меню
2	AM, для Європи і Азії КГц або для Північної Америки	522...1710 520...1710	9 КHz крок настройки 10 КHz крок настройки
4	SW, МГц	2.30...23.00	
5	Чутливість, обмежена шумом: FM, мкВ, MW, мВ/м SW, мкВ	 < 5 < 2.5 < 50	
6	Вибірковість, дБ	> 40	
7	Цифрове управління гучністю	31 рівень	

Характеристики КХ станцій підсвічування іоносферною хвилею.

Назва станції	Час (UTC)	Частота, кГц	Потуж- ність, кВт		Коорди- нати	Кут на Харків
Radio Taiwan International	15 : 07	7385	100		25°4'N, 121°31'E	125°
Radio Taiwan International	15 : 10	7385	100		25°4'N, 121°31'E	125°
Voice Of Tajik	19 : 33	7245	100		37°32'N, 68°42'E	94°
China Radio International	19 : 40	7265	500		39°21'N, 75°45'E	97°
China Radio International	19 : 44	7385	500		39°21'N, 75°45'E	97°
China Radio International	19 : 46	7395	500		39°21'N, 75°45'E	97°
Voice Of Turkey	19 : 53	9460	500		39°29'N, 32°51'E	200°
China Radio International	20 : 00	9600	500		39°21'N, 75°45'E	97°
Radio Romania International	05 : 43	9620	300		47°15'N, 27°26'E	258°
Radyoya Denge Kurdistane	05 : 47	11600	300		47°17'N, 29°24'E	252°
Radio Dabanga	05 : 51	13800	250		18°43'N, 47°37'E	156°
Radio Saudi	05 : 57	15170	500		24°30'N, 46°23'E	154°

Продовження таблиці Д.9.

China Radio International	06 : 02	17520	500		39°21'N, 75°45'E	97°
Radyoya Denge Kurdistan	09 : 26	11600	300		47°17'N, 29°24'E	252°
China Radio International	09 : 31	15665	500		43°35'N, 87°30'E	115°
China Radio International	09 : 34	17490	500		39°21'N, 75°45'E	97°
China Radio International	09 : 37	17570	500		43°35'N, 87°30'E	115°
Radio Farda	09 : 39	17880	100		49°41'N, 8°30'E	266°
Radio Romania International	13 : 41	11950	3000		47°15'N, 27°26'E	258°
PBS Xinjiang	13 : 44	13670	100		44°08'N, 86°53'E	115°
Athmeeya Yatra Radio	13 : 47	15350	250		52°38'N, 12°54'E	291°
China Radio International	13 : 50	17650	500		39°21'N, 75°45'E	97°
VO ISLAMIC REP.IRAN	21 : 26	7285	500		29°28'N, 60°53'E	118°
China Radio International	21 : 28	7415	500		39°21'N, 75°45'E	97°
China Radio International	21 : 31	9430	500		43°35'N, 87°30'E	115°

Характеристики спектрів сплесків і пауз

Процес	Паузи				Сплески			
	F_{00} , Гц	S_0 дБ	ΔF_0 Гц	n_0	F_{01} , Гц	S_0 дБ	$2\Delta F_1$ Гц	n_1
Вітер 3..5м/с	-	-72	-	0	200	-42	200	2,6
Вітер 5...8м/с	-	-62	-	0	400	-27	800	4,0
Кроки по насту				2,3				1,8

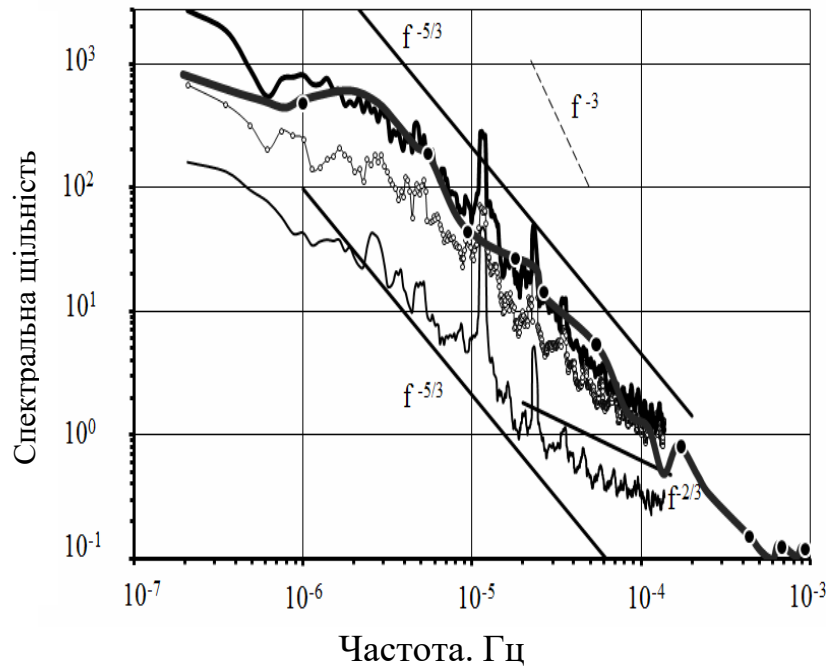
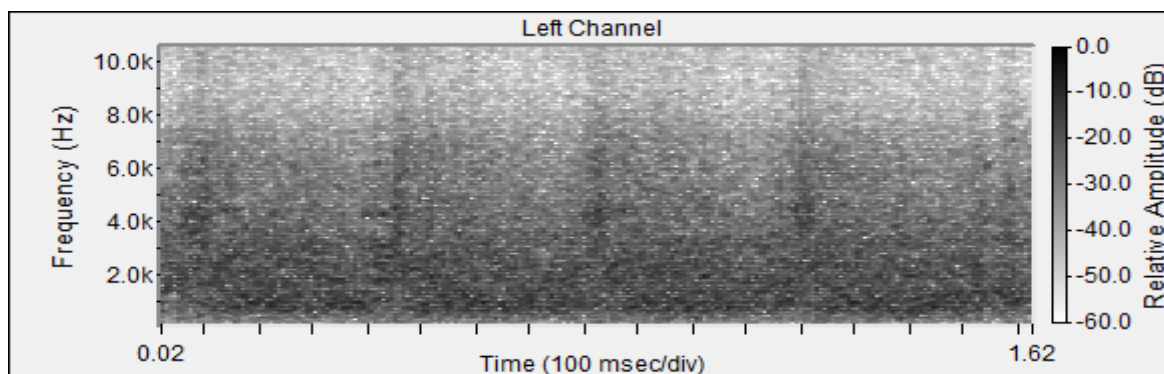
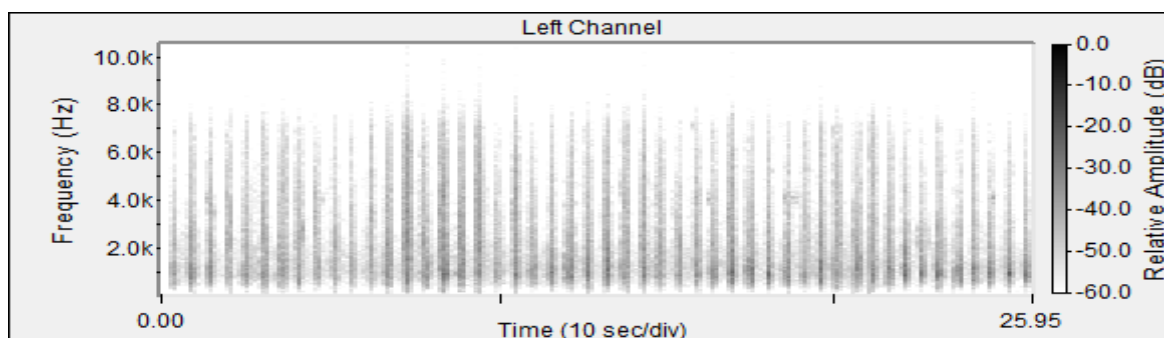
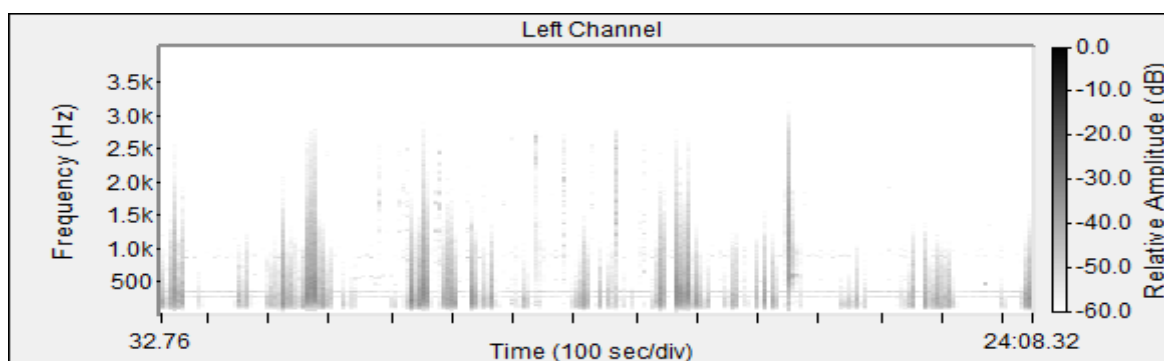
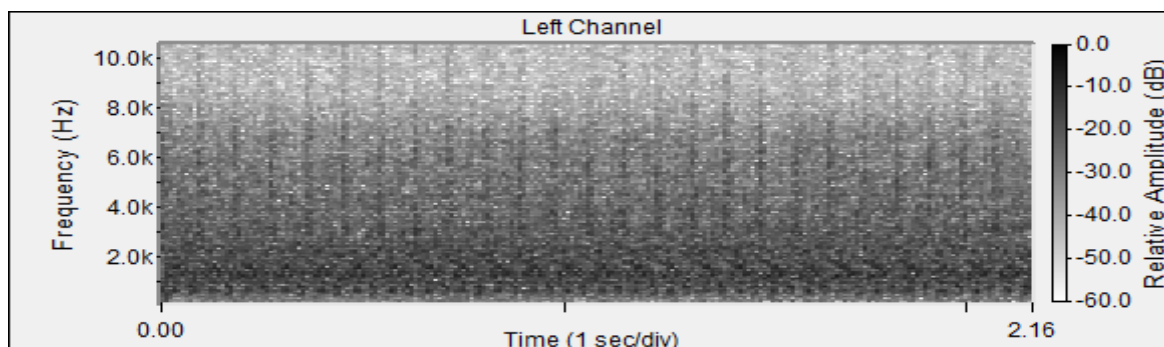


Рис. Д.10. [120] Енергетичні спектри пульсацій швидкості вітру на різних висотах 1 висота 8м, 2- 121м, 3-125м, 4- 301м



Гармата-пострілів



Кулеметна черга

Рис. Д.11. Спектрограми акустичних шумів: 1 вітер, 2 кроки людини по сніжному насту, 3,4 - звуки пострілів: 3 гармати, 4 кулемета.

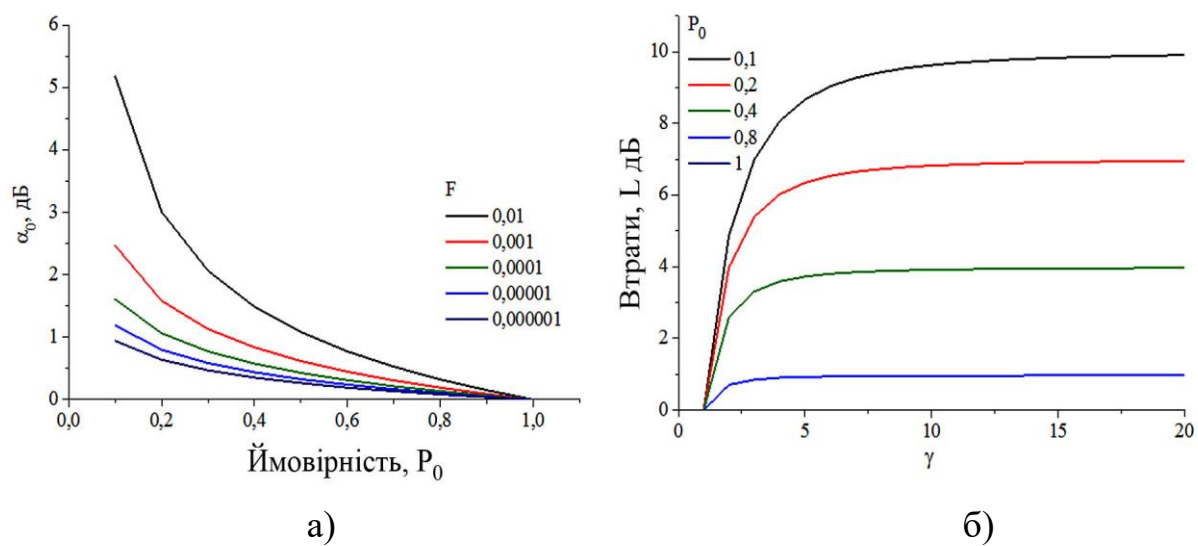


Рис. Д.12. Втрати в співвідношенні сигнал / шум виникають за рахунок негаусовості: а) поправка α_0 , б) додаткові втрати L

ДОДАТОК Є
ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА
СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ

Таблиця Є.1

Основні характеристики приладів спостереження й прицілювання БТТ

[135]

Оптико-технічні характеристики	Приціли		Прибори спостереження					
	ПП-61 АМ	1ПЗ-2	денні			нічні		
			ТПКУ-2Б	ТНП-Б; ТНПО-115; ТНП-165;	ТКН-1С	ТКН-3	ТВНО-2Б	ТВНЕ-4Б
Збільшення, крат. пост./панкрат.	2,6	1,2/3,0	5	-	2,75	3,0/2,2	1,0	1,0
Перископіч- ність, мм	285	285	200	200	200	200	200	200
Дальність прицілюван- ня, бачення, м (день/ніч)	2000	2000	3000	смот- ровые	-/300	4000/ 400	-/100	-/120

Середнє значення ЕПР об'єктів в резонансній області.

Об'єкт	Призначення	Горизонтальна поляризація		Вертикальна поляризація
		ЕПР в резонансній області		
		Корпус, дБ/м ²	Винт, дБ/м ²	Корпус, дБ/м ²
Вертоліт	БЦ	27,3	26,3	18,3
	У	28,6	27,5	17,4
	Т	31,5	30,3	21,4
		Корпус, дБ/м ²	Крило, дБ/м ²	Корпус, дБ/м ²
Літак	Ш	26,7	25,4	17,2
	Б	35,6	36,6	23,6
	В	30,5	26,7	19,8
	П	37,6	36,9	26,6
		Корпус з пушкою, дБ/м ²	Корпус, дБ/м ²	Корпус, дБ/м ²
Танк		25,3	16,0	13,4

В таблиці використані наступні позначення: У - ударний, Т - транспортний, БЦ - багатоцільовий, Ш - штурмовик, В - винищувач, Б -бомбардувальник. П - пасажирський.

Таблиця Є.3

Технічні характеристики радіостанцій

Радіостанція Р-030У УКХ діапазону [149]		
1.	Діапазон частот	30-110 МГц
2.	Потужність	30 Вт \pm 5 Вт (на навантаженні 50 Ом)
3.	Нестабільність частоти	Не більше $1 \cdot 10^{-6}$
4.	Девіація частоти	(5,6 \pm 1,2) кГц
5.	Рівень власних шумів	130 дБ
6.	Чутливість приймача	0,5 мкВ
7.	Співвідношення сигнал/шум	12 дБ
8.	Дальність зв'язку	20-30км
Радіостанція Р-163-50К КХ діапазону [150]		
1.	Діапазон частот	2-30 МГц
2.	Потужність	50 Вт
3.	Нестабільність частоти	$4,5 \cdot 10^{-7}$
4.	Чутливість приймача	3 мкВ
5.	Співвідношення сигнал/шум	12дБ
6.	Дальність зв'язку	50-300км

Таблиця Є.4

Дальності дії датчиків виявлення.

Датчики	Оптичні ТПКУ-2Б, ТКН-3 [1]	ІК ТКН-3 [1]	РТС КХ и УКХ діапа- зонів [27]		Пасивні акустичні РТС [35, 36]	
			Активні	Активно- пасивні	тихо	Вітер, дощ
Об'єкти	день	ніч				
Наземні	3,0км;4,0км	0,4 км	0,4...1,0 км	0,3...0,7км	6,0км	0,5км
Повітряні (літа- ки, вертольоти)	-	-	2...20км	1...3км	7.3км	0,7км
Постріл	-	-	-	-	8км	3,4км
БПЛА	-	-	1...8 км	0,5...1,5 км	6,0 км	-