

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Варавіна Антона Валерійовича
"Фазова синхронізація частоти твердотільних джерел сигналів в
короткохвильовій частині міліметрового діапазону радіохвиль",
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – "радіофізика"

1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

Розвиток радиоспектроскопії, діелектрометрії, рефрактометрії, фізики плазми та інших напрямків науки і техніки вимагає створення вимірювальних систем з високою роздільною здатністю міліметрового і терагерцового діапазонів, заснованих на сучасній базі радіоелектронних пристроїв. Найбільш ефективно такі вимірювальні системи можуть бути реалізовані на основі пристроїв, які здійснюють одночасне вимірювання амплітуд і фаз сигналів, що пройшли і відбиті від досліджуваних об'єктів в заданому діапазоні частот. Однією з важливих радіофізичних завдань при розробці векторних аналізаторів, спектрометрів та інтерферометрів з високою роздільною здатністю є створення високостабільних генераторів сигналів з фазовою синхронізацією частоти і когерентних приймальних пристроїв міліметрового та терагерцового діапазонів. Це дозволяє забезпечити недоступні в інших ділянках спектру інформативність і стійкість перед перешкодами, одночасно мінімізуючи масогабаритні характеристики і параметри енергоспоживання. Один із способів побудови таких джерел заснований на застосуванні лавинно-пролітних діодів в режимі ефективного перетворення частоти високостабільного низькочастотного сигналу. Аналіз вимог, що пред'являються до сучасних вимірювальних систем з високою роздільною здатністю показав, що подальше поліпшення їх чутливості і роздільної здатності може бути реалізовано з застосуванням фазової синхронізації частоти використовуваних джерел сигналів і методів цифрового синтезу сигналів.

Всі завдання дисертації спрямовані на вирішення важливої наукової задачі сучасної радіофізики – створення систем з високою роздільною здатністю в міліметровому і терагерцовому діапазонах з метою підвищення інформативності та якості фізичних експериментів при вирішенні задач радиоспектроскопії, інтерферометрії високотемпературної плазми і дослідженні електродинамічних характеристик НВЧ пристроїв. Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Варавіна А.В. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність і практичну значимість теми дисертації також свідчить і те, що вона виконувалася в рамках 4 держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, в яких здобувач брав участь як виконавець.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, виглядають досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано і переконливо. Дисертація Варавіна А.В. складається зі вступу, що містить загальну характеристику роботи, чотирьох розділів основного тексту, висновків до роботи, списку використаних джерел та додатка.

У першому розділі проведено огляд літератури з вивчення методів фазової синхронізації частоти електронно-вакуумних і твердотільних генераторів і результатів їх застосування в векторних аналізаторах, спектрометрах і інтерферометрах міліметрового і терагерцового діапазонів. Проведено аналіз схемних рішень і характеристик найбільш поширених векторних аналізаторів: гомодинного з модуляцією частоти, гетеродинних з джерелами сигналів на основі синтезаторів частоти і гетеродинних з гармоніковими джерелами сигналів. Розглянуто методи мікрохвильової діагностики плазми за допомогою гетеродинних інтерферометрів міліметрового і терагерцового діапазонів. Зроблено висновок про необхідність розробки нової методики фазової синхронізації частоти лавинно-пролітних діодних помножувачів і методу однозначного вимірювання фази в режимі реального часу з метою підвищення інформативності та якості фізичних експериментів.

У другому розділі запропоновано і досліджено нова методика фазової синхронізації ЛПД-помножувачів високої кратності множення, яка застосована в гетеродинному векторному аналізаторі і синтезаторах частоти міліметрового діапазону. Дана методика відрізняється від відомих методів синхронізації частоти тим, що для фазової синхронізації частоти НВЧ джерел використовується сигнал різницевої частоти вихідних помножених частот векторного аналізатора, а не частоти задаючих генераторів, що дозволило значно знизити рівень фазових шумів і взаємну нестабільність частот джерел. Показано, що застосування методики синхронізації частот помножувальних джерел, заснованої на порівнянні фаз вихідних сигналів, дозволило досягти в гетеродинному векторному аналізаторі точність вимірювання фази $0,1^\circ$, динамічний діапазон 80 дБ і частотну роздільну здатність ~ 100 Гц. Розроблений цифровий синтезатор частоти чотирьохміліметрового діапазону показав перспективність використання досліджуваних НВЧ джерел з фазової синхронізацією частоти в спектрометрах ЕПР, де були досягнуті відносна нестабільність частоти синтезатора до 2×10^{-10} і мінімальний крок перебудови частоти 10 Гц. Використання розробленого цифрового синтезатора частоти в Державному стандарті одиниці ЕРС і напруги, дозволило знизити відносну похибку еталону до 1×10^{-9} , в результаті чого точність вимірювання еталону була підвищена на три порядки.

У третьому розділі для вимірювання лінійної інтегральної концентрації електронів високотемпературної плазми в реальному масштабі часу запропоновано новий метод вимірювання фази в двохчастотному гетеродинному інтерферометрі двохміліметрового діапазону на ЛПД-генераторах. Метод заснований на створенні різносного каналу фазових вимірювань і дозволяє вимірювати великі фазові набіги і проводити вимірювання пікової щільності плазми до $10 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ з часовою роздільною здатністю 100 мкс без неоднозначностей вимірювання. Ро-

зроблено та досліджено два типи трьохканальних фазометрів для реалізації методу однозначного вимірювання фази в гетеродинному інтерферометрі. Розроблено методику лінеаризації фазової характеристики фазометрів і алгоритм калібрування. Показано, що запропонована методика дозволила знизити нелінійність фазової характеристики фазометрів в діапазоні 0–360 градусів до значення менше 1 градуса. Проведено випробування фазометрів і апробація методу однозначного вимірювання фази в двочастотному гетеродинному інтерферометрі. Показано, що створення цього каналу дозволило проводити однозначні вимірювання взаємного фазового набігу між вимірювальними каналами в реальному масштабі часу.

У четвертому розділі представлені результати розробки і дослідження двочастотного гетеродинного інтерферометра двохміліметрового діапазону, призначеного для вимірювання лінійної інтегральної концентрації електронів високотемпературної плазми в режимі реального часу. Проведено порівняльні вимірювання інтегральної електронної густини плазми за допомогою двочастотного гетеродинного інтерферометра міліметрового діапазону і методом томпсоновського розсіювання. Показано, що вимірювання щільності за допомогою інтерферометра здійснюються безперервно у всьому інтервалі часу життя плазми на відміну від системи діагностики використовуваної в токамаці. Випробування інтерферометра продемонстрували можливість вимірювання щільності плазми в режимі реального часу до пікової щільності плазми $10 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ з часовою роздільною здатністю 100 мкс без неоднозначностей вимірювання.

3. Достовірність та наукова новизна отриманих результатів.

Достовірність і обґрунтованість результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в даній дисертаційній роботі, не викликає сумнівів і визначається коректністю постановки задач, а також тим, що при їх отриманні використовувалися всебічно апробовані стандартні і оригінальні експериментальні методи для дослідження фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів в розроблених векторному аналізаторі, спектрометрі і інтерферометрі міліметрового діапазону, цифрові методи фазового детектування. Основні експериментальні результати, отримані дисертантом, добре узгоджуються з даними, отриманими ним шляхом математичного моделювання з використанням відомих методів цифрової обробки сигналів.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно впливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору й вирішенню необхідних для повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

До результатів, які мають наукову новизну, можна віднести такі:

1. Теоретичне і експериментальне дослідження методики фазової синхронізації частоти активних ЛПД-помножувачів високої кратності в гетеродинному векторному аналізаторі двохміліметрового діапазону, що забезпечує похибку вимірювання фази $0,1^\circ$, динамічний діапазон 80 дБ і частотну роздільну здатність ~ 100 Гц.

2. Експериментальна реалізація методики фазової синхронізації частоти ЛПД-помножувачів в цифровому синтезаторі частоти як НВЧ джерела квазіоптичного ЕПР-спектрометра міліметрового діапазону, що забезпечує відносну нестабільність частоти синтезатора до 2×10^{-10} і мінімальний крок перебудови частоти 10 Гц.

3. Експериментальна реалізація синтезатора частоти чотирьохміліметрового діапазону. Застосування синтезатора в Державному стандарті одиниці ЕРС і напруги як джерела опромінення матриці контактів Джозефсона підвищило точність еталону на 3 порядки.

4. Експериментальна реалізація методу однозначного вимірювання фази в двочастотних гетеродинних інтерферометрах міліметрового і терагерцового діапазонів. Запропоновано методику лінеаризації фазової характеристики і алгоритми калібрування фазометрів інтерферометра.

4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів в публікаціях.

Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристика яких наведена в пунктах 1-3, дозволяє зробити висновок про їх внутрішню єдність і визначити особистий внесок автора в науку. Він полягає в тому, що здобувач запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуального завдання радіофізики, який полягає в розробці методики фазової синхронізації частоти лавинно-пролітних діодних помножувачів і методу вимірювання фази в режимі реального часу з метою підвищення інформативності та якості фізичних експериментів при вирішенні задач радіоспектроскопії, інтерферометрії високотемпературної плазми і дослідженні електродинамічних характеристик різних НВЧ пристроїв. Завдання вирішене на підставі теоретичних і експериментальних досліджень процесів фазової синхронізації частоти твердотільних джерел НВЧ випромінювання.

Дисертація Варавіна А.В. є завершеною науково-дослідною роботою, виконаною відповідно до вимог, які висуваються до кандидатських дисертацій. Дисертація написана зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується коректно, структура роботи представляється логічною.

Основні результати опубліковані в 10 статтях у профільних наукових виданнях, три з них опубліковані в рейтингових міжнародних журналах. Основні положення дисертації пройшли апробацію на 12 міжнародних наукових конференціях, а також на наукових семінарах. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автореферату відповідає тексту дисертації.

5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування

Наукова і практична значимість результатів дисертаційної роботи Варавіна А.В. полягає в тому, що отримані в ній теоретичні і експериментальні результати дозволяють розширити фізичні уявлення про закономірності і особливості

застосування методів синхронізації частоти джерел сигналів в вимірювальних системах з високою роздільною здатністю стосовно завдань інтерферометрії високотемпературної плазми, радіоспектроскопії і векторних вимірювань в міліметровому і субміліметровому діапазонах.

Запропонована автором методика фазової синхронізації частоти активних ЛПД-помножувачів може бути використана при розробці когерентних приймально-передавальних пристроїв для застосування в спектроскопії і радіолокаторах високої роздільної здатності міліметрового діапазону. Запропонований метод вимірювання фази може бути використаний в радіохвильових вимірювальних приладах неруйнівного контролю характеристик об'єктів в режимі реального часу. Розроблені методи лінеаризації характеристик цифрових фазових детекторів на програмованих логічних матрицях можуть бути використані в радіолокаційних фазометричних системах і в діагностиці плазми.

Дисертаційна робота являє наукову і практичну цінність для фахівців в галузі радіометрії, радіоспектроскопії, діелектрометрії, фізики плазми та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

6. Недоліки та зауваження

Дисертаційна робота Варавіна А.В. не вільна від недоліків.

У першому розділі дисертації при описі схеми на Рис. 1.1 наведені вирази (1.1 і 1.2) для входних сигналів U_1 і U_2 , проте на рисунку вони не показані. На Рис. 1.4 використано скорочення «МШУ» та «АРУ», однак вони не розшифровані у тексті роботи. У підрозділі 1.4.1 є помилкове посилання на вираз 1.12.

У другому розділі не наведено пояснень того, які одиниці вимірювань відкладено вздовж осі y на Рис. 2.22, де показано ЕПР відгук від дослідженого зразка. Те ж стосується й осі x на Рис. 2.23. На Рис. 2.19 не показано значення вихідної частоти синтезатора частоти.

У третьому розділі роботи Рис. 3.7 повністю дублює Рис. 2.13 з другого розділу. У підрозділі 3.4.4 недостатньо повно вказані причини необхідності розробки фазових детекторів на програмованих логічних матрицях-ПЛМ.

У тексті дисертаційної роботи використовується лабораторний жаргон і невдалі звороти типу "у схемі однозначного інтерферометра" - стор.100.

Занадто велике число аббревіатур ускладнює сприйняття матеріалу.

7. Загальні висновки

Перераховані недоліки не можуть змінити загального позитивного враження, зробленого дисертацією. Здобувач виконав великий обсяг цікавих і актуальних досліджень, запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуального завдання радіофізики, який полягає у встановленні фізичних закономірностей і особливостей застосування методів синхронізації частоти джерел сигналів в вимірювальних системах з високою роздільною здатністю стосовно завдань інтерферометрії високотемпературної плазми, радіоспектроскопії і векторних вимірювань в міліметровому і субміліметровому діапазонах. Дисертант отримав науково-обґрунтовані результати.

тати дослідження фізичних процесів фазової синхронізації частоти твердотільних джерел НВЧ випромінювання. Ці результати є новими і мають як наукове, так і прикладне значення для розробників елементної бази в мікрохвильовому, терагерцевому і оптичному діапазонах хвиль.

За тематикою проведених досліджень, змістом і результатами дисертація Варавіна А.В. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно подані на конференціях і симпозіумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Вважаю, що за актуальністю, обсягом та новизною рецензована дисертаційна робота “Фазова синхронізація частоти твердотільних джерел сигналів в короткохвильовій частині міліметрового діапазону радіохвиль” відповідає вимогам, зазначених у п. 11 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Варавін Антон Валерійович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.03 – радіофізика

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри квантової радіофізики
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна

19 листопада 2019 року



НАЧАЛЬНИК СЛУЖБИ УПРАВЛІННЯ
ПЕРСОНАЛОМ

В.Н. Маслов

[Handwritten signature]