

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ШИРОКОВ ІГОР БОРИСОВИЧ

УДК 621.396.962.21

**ГОМОДИННІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДНИХ І
ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ РАДІОТЕХНІЧНИХ
СИСТЕМ**

05.12.17 — Радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Севастопольському національному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор

Гімпілевич Юрій Борисович

Севастопольський національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки і телекомунікацій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Яненко Олексій Пилипович,

Національний технічний університет України «КПІ»
(м. Київ), професор кафедри основ радіотехніки

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Хлопов Григорій Іванович,

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України
(м. Харків), завідувач відділом фізичних основ радіолокації

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Плаксін Сергій Вікторович

Інститут транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг»
(м. Дніпропетровськ), завідувач відділу систем керування

Захист відбудеться «30» вересня 2014 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.052.03
в Харківському національному університеті радіоелектроніки
за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного
університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «_____» серпня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03



Безрук В.М

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливу роль в житті сучасного суспільства відіграють радіотехнічні системи (РТС) різного призначення: радіолокація, радіонавігація, радіоуправління, телекомунікації тощо. Основні технічні характеристики цих систем істотним чином залежать від параметрів каналу зв'язку, як основної ланки будь-якої системи, розрахованої на випромінювання і прийом електромагнітних хвиль.

У процесі експлуатації будь-якої РТС її канал зв'язку зазнає впливу широкого класу дестабілізуючих факторів: кліматичних (температура, тиск, вологість); механічних (вітрові навантаження на антени); дії шумів і тощо. Під впливом цих факторів відбувається зміна параметрів каналу зв'язку, що призводить до погіршення якості роботи РТС. Тому всебічне дослідження каналу зв'язку РТС, дослідження особливостей поширення радіохвиль при дії різних дестабілізуючих факторів є важливою народногосподарською задачею. Особливо актуальними такі дослідження є при організації системи телекомунікацій. Треба розуміти, що саме відкритий радіохвильовий канал зв'язку є «вузьким місцем» такої системи.

Питаннями дослідження каналів зв'язку РТС займалося велике число наукових шкіл, цим дослідженням присвячена велика кількість робіт. Аналіз джерел показав, що відомі методи вирішення цієї задачі не дозволяють повною мірою оцінити вплив локальних турбулентностей, що виникають у відкритих каналах зв'язку, на параметри електромагнітного поля. На сьогодні практично всі експериментальні дослідження присвячені вивченню флуктуацій амплітуди прийнятого сигналу, в окремих випадках — амплітуди і кутів приходу радіохвиль. Вказані дослідження є неповними. Експериментальні дослідження флуктуацій набігу фази електромагнітних хвиль мікрохвильового діапазону при проходженні їх через турбулентну атмосферу до цих пір не проводилися. Це пов'язано з тим, що традиційні методи вимірювання фази не можуть бути використані на протяжних трасах, оскільки для організації таких досліджень необхідно на обох кінцях вимірювальної траси отримати синфазні мікрохвильові коливання. Це завдання на сьогоднішній день не вирішено. Разом з тим, організація таких досліджень важлива для науки і цілого ряду практичних застосувань. Це дасть можливість оцінювати характер турбулентності не за непрямими вимірюваннями (амплітуда і кут приходу), а за прямими вимірюваннями амплітуди і набігу фази. Такі дослідження дають можливість розширити знання про поширення радіохвиль, запровадити нові моделі механізмів поширення, зробити відповідні прогнози та дати рекомендації з побудови РТС різного призначення. Таким чином, розвиток методів дослідження амплітудних і, особливо, фазових характеристик каналів зв'язку радіотехнічних систем є важливим науково-практичним завданням.

Актуальність дослідження каналів зв'язку не обмежується лише функціонуванням РТС. Окремим пунктом можна виділити антенні вимірювання, які також передбачають випромінювання і прийом радіохвиль. Гомодинні методи дослідження каналів зв'язку, що розвиваються в роботі, знаходять своє застосування також і в цій галузі. Згадуючи про техніку антен і антенні вимірювання, не можна не сказати про побудову і функціонування фазованих антенних решіток (ФАР). Гомодинні методи вимірювань дозволяють організувати управління ФАР.

Особливої актуальності у сучасному світі набувають задачі контролю парамет-

рів технологічних процесів. Підвищені вимоги до точності вимірювань, що проводяться, примушують розробників шукати нові шляхи вирішення цих задач. Гомодинні методи вимірювань, що розвиваються в роботі, відкривають широку перспективу для успішного вирішення задач контролю параметрів технологічних процесів з підвищеною точністю, з одного боку, й істотним спрощенням конструкції цих засобів контролю, з іншого.

Окремо можна виділити задачу побудови систем радіочастотної ідентифікації (RFID) і позиціонування. Застосування гомодинних методів у цій галузі дозволить вирішити важливу принципову задачу: одночасну обробку сигналів декількох тегів, з одного боку, і підвищення на порядок точності позиціонування об'єктів, з іншого.

Окремим рядком слід згадати про побудову медичного обладнання. При цьому, створення переносного та безконтактного діагностичного устаткування є важливим науково-практичним завданням. Безконтактні методи діагностики стану людини, які легко реалізуються за допомогою гомодинних методів, що розвиваються в роботі, роблять можливість застосування останніх ще актуальнішою в сучасному світі: у справі організації охорони здоров'я, роботі рятувальних служб тощо.

Простота і зрозумілість процесів, що здійснюються при гомодинному перетворенні сигналів, дають можливість спроектувати методи, що розвиваються в роботі, на всі галузі науки і техніки, які мають справу з будь-якими хвильовими процесами. Найбільш характерним прикладом використання гомодинного перетворення сигналів є акустика, що відкриває абсолютно неосяжний пласт застосувань у цій галузі.

Піонерами розробки гомодинних методів електричних вимірювань в галузі мікрохвильової техніки слід вважати: Schafer G. E., Robertson S. D., Mathers G. W., Pound R. V., Tuller W. G., Vernon F. L., Brodwin M. E., Richmond J. H., Engen G. F., Little W. E., Mackey R. C., Dyson J. D., перші роботи яких датуються серединою минулого століття. Окремо слід згадати King R. J., який систематизував усі дослідження, проведені в цій галузі, і видав украй корисну для наукових і технічних працівників монографію [King R. J. *Microwave homodyne systems*. — London, Peter Peregrinus, 1978, 368 p.]. Можна вважати, що саме цей учений і його книга є ідейними натхненниками досліджень, здійснених у даній роботі.

Істотний внесок у розвиток гомодинних методів і засобів вимірювань зробили також вітчизняні вчені: Елізаров О. С., Кошурінов Е. І., Скрипник Ю. О., Яненко О. П., Гімпілевич Ю. Б., Налькін М. Е., Комаров І. В., Варавін А. В., Бондаренко І. К., Дайнега Г. О. Початок 21 століття характеризується досить бурхливим розвитком автодинних методів перетворення сигналів, що є, по суті, окремим випадком гомодинних. Група авторів: Воторопін С. Д., Носков В. Я., Смольський С. М. опублікувала велику кількість робіт у цій галузі. Вищезазначене ще раз підкреслює актуальність досліджень, що проводяться.

Під час виконання науково дослідних робіт з розвитку гомодинних методів виникла необхідність у проведенні комплексу досліджень, спрямованих на заповнення низки прогалин у теорії та практиці гомодинного перетворення сигналів і застосування цих досліджень у вивченні поширення радіохвиль, антенних вимірювань, контролю параметрів технологічних процесів тощо.

У роботі King R.J. показано, що для здійснення досліджень електромагнітного поля можна використовувати подвійний канал поширення радіохвиль, що дозволяє

отримувати сигнали в одній точці вимірювальної траси і вимірювати, таким чином, амплітуду і фазу мікрохвильового сигналу. Проте, проводити такі дослідження можна винятково в лабораторії. Протяжні вимірювальні траси не враховувалися, за визначенням. Тому виникає необхідність у розробці методів і пристроїв, що дозволяють проводити дослідження з поширення радіохвиль у відкритому і протяжному каналі зв'язку. При цьому, необхідно розробити методи і засоби синхронізації опорних генераторів, рознесених у просторі. Без вирішення цієї задачі немає можливості говорити про фазові вимірювання на протяжних каналах зв'язку як таких. Україй актуально, при цьому, розробити також багатоканальний варіант гомодинної вимірювальної установки, зважаючи на той факт, що для реалізації гомодинних методів перетворення сигналів ця задача не є тривіальною. Сказане є справедливим, якщо пригадати, що класичний гомодинний метод вимірювань припускає реалізацію одноканальної вимірювальної установки.

Робота гомодинних перетворювачів сигналів пов'язана з виникненням похибок перетворення, що визначають метрологічні показники перетворювача в цілому. Аналіз літературних джерел виявив, що це питання досліджене в недостатньо. Тому актуальним завданням є всебічний аналіз похибок перетворення при різних типах керуючих сигналів. Актуальним також є вибір типу і розрядності цифрового фазообертача, як однієї з найголовніших ланок гомодинного перетворювача частоти.

Важливим завданням є також якнайповніше висвітлення можливих практичних застосувань гомодинних методів, що розвиваються, в багатьох сферах життя і діяльності людини: у промисловості, медицині, техніці антен і антенних вимірювань тощо.

Розвиток гомодинних методів і засобів дослідження амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС досліджується на базі Севастопольського національного технічного університету з кінця 80-х років минулого століття. Роботи були розпочаті на ініціативній основі. Потім вони органічно впилися в план досліджень кафедри радіотехнічних систем, а потім, після реорганізації, кафедри радіотехніки і телекомунікацій. Автор, у різні часи був провідним, відповідальним виконавцем або керівником робіт, що велися в цій галузі і зараз очолює цей науковий напрям. Під керівництвом автора у 2012 і 2013 рр. за цією тематикою захищено дві кандидатські дисертації.

На початку наших досліджень існувало протиріччя між вимогами практики при вирішенні завдань апаратного аналізу параметрів протяжних радіотрас і можливостями відомих гомодинних методів і засобів, які забезпечують реалізацію цих вимог, як в частині номенклатури завдань, що розглядаються, так і в частині досягнення необхідних метрологічних характеристик. Це протиріччя визначило **актуальну науково технічну проблему**, яка полягає у створенні нових гомодинних методів і засобів апаратного аналізу амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС, що забезпечують розширення функціональних можливостей з підвищенням точності цього аналізу. Тому є актуальною тема дисертаційних досліджень, які спрямовані на розв'язання цієї науково технічної проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження були тісно пов'язані з виконанням планових госпдоговірних і держбюджетних науково-дослідних робіт, які проводились на кафедрі радіотехніки і теле-

комунікацій Севастопольського національного технічного університету в рамках координаційних планів Міністерства освіти і науки України, зокрема, держбюджетна НДР №1.5.6.7. «Вивчення особливостей поширення радіохвиль над морем, в рівнинній і гірській місцевості» (1990 р., № ДР 01860124734 (автор був виконавцем); госпдоговірна НДР №1543 «Дослідження методів мікрохвильового вимірювання параметрів руху деталей комутаційних пристроїв і розробка структурної схеми приладу для безконтактного визначення цих параметрів» (2003 р., № ДР 0102U004845) (автор був виконавцем); госпдоговірна НДР №1550 «Розробка методів контролю вмісту вологи в багатокомпонентній суміші, що завантажується в камеру змішувача технологічної лінії виробництва цеглин» (2005 р., № ДР 01900018234) (автор був керівником роботи); держбюджетна НДР «Перетворювач» «Мікрохвильові перетворювачі і засоби контролю параметрів радіотехнічних систем, технологічних процесів і матеріалів» (2008 р., № ДР 0105U007565 (автор був виконавцем); НДР по гранту Int. Sci. Tech. Center «Development and application of electromagnetic waves propagation in a turbulent anisotropic absorptive medium» Project of, Moscow-Tbilisi (2009 р., № G-1376 (автор був відповідальним виконавцем); держбюджетна НДР «Мікран» «Розробка методів побудови радіометричних аналізаторів параметрів електричних ланцюгів і технологічних процесів» (2011 р., № ДР 0109U001701 (автор був виконавцем); держбюджетна НДР «Метеор» «Дослідження амплітудно-фазових флуктуацій мікрохвильових електромагнітних полів у нижніх шарах атмосфери і методів дистанційного зондування» (2014 р., № ДР 0112U001247) (автор був відповідальним виконавцем).

Мета роботи — розвиток теорії і техніки гомодинних методів і засобів аналізу характеристик радіотехнічних каналів зв'язку, оцінка їх потенційних метрологічних можливостей і створення на цій основі нових високоточних і багатофункціональних вимірювальних систем, що забезпечують сучасні потреби практики в різних галузях науки і техніки.

Основні завдання дослідження.

1. Розробка нових гомодинних методів вимірювань флуктуацій амплітуди, набігу фази і кутів приходу електромагнітної хвилі під час її поширення у відкритому каналі зв'язку і визначення на їх основі механізму поширення радіохвиль.
2. Розробка нового гомодинного методу багатоканального вимірювання параметрів мікрохвильового сигналу на обох кінцях вимірювальної траси поширення радіохвиль.
3. Створення узагальненої математичної моделі мікрохвильового гомодинного перетворювача частоти за умов використання різних законів зміни фази зондуючого сигналу.
4. Визначення амплітуди і початкової фази спектральних компонент зондуючого сигналу при дискретній зміні його фази.
5. Розробка нового методу синхронізації двох низькочастотних опорних генераторів, що входять до складу вимірювальної установки.
6. Числова оцінка впливу турбулентної атмосфери на параметри електромагнітного поля в точці прийому мікрохвильових сигналів.
7. Експериментальне дослідження впливу турбулентної атмосфери на параметри електромагнітного поля в точці прийому мікрохвильових сигналів.

8. Розробка нової системи радіочастотної ідентифікації і позиціонування, що базується на гомодинних методах перетворення сигналів.

9. Розробка нового алгоритму визначення дальності для вирішення завдань позиціонування об'єктів.

10. Розробка нових принципів побудови пристроїв, призначених для контролю параметрів технологічних процесів: вимірювання вмісту вологи в суміші, вимірювання параметрів руху механічних деталей, калібрування доплерівських вимірювачів швидкості.

11. Розробка нових принципів побудови обладнання для антенних вимірювань і управління антенними решітками на основі гомодинних методів.

12. Розробка нових мобільних засобів безконтактного контролю фізичного стану людини: вимірювання частоти биття серця і дихання.

13. Розробка нових акустичних методів і засобів, що використовують гомодинні методи перетворення сигналів для вимірювання параметру руху повітряних мас.

14. Створення прототипів приладів, їх експериментальне випробування і впровадження результатів роботи в промисловість.

Об'єктом дослідження є хвильові процеси в каналі зв'язку РТС різного призначення, хвильові процеси, що використовуються для контролю параметрів технологічних процесів та в інших практичних застосуваннях: у медицині, техніці антен, акустиці тощо.

Предметом дослідження є гомодинні методи і засоби визначення флуктуацій амплітуди і набігу фази електромагнітних хвиль в момент поширення по відкритих і закритих каналах зв'язку РТС, а також гомодинні методи перетворення сигналів, що використовуються для контролю параметрів технологічних процесів та інших застосувань.

Методи дослідження. У роботі використані такі методи: спектральний аналіз, застосований для оцінки помилок перетворення сигналів під час гомодинного перетворення; методи лінійної алгебри — для вирішення систем лінійних рівнянь; чисельні ітераційні методи — для вирішення систем нелінійних рівнянь; теорія поширення радіохвиль у турбулентній атмосфері; метод найменших квадратів — для мінімізації похибки за рахунок надмірності; методи теорії вірогідності — для дослідження метрологічних характеристик і аналізу достовірності контролю; метод статистичного моделювання (Монте-Карло) — для аналізу випадкових складових похибок, методи акустики; комп'ютерне моделювання; експериментальні дослідження.

Наукова новизна роботи.

1. Розвинено концепцію організації гомодинних вимірювань для дослідження амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку радіотехнічних систем. У рамках цієї концепції:

— розроблено нові гомодинні методи вимірювання флуктуацій амплітуди, набігу фази і кута приходу радіохвиль, що поширюються у відкритому каналі зв'язку РТС. Відмінність нових методів від існуючих полягає в можливості вимірювання флуктуації набігу фази сигналу. Крім того, при використанні нових методів, на відміну від існуючих, база мікрохвильового інтерферометра може змінюватися довільно, навіть у процесі проведення вимірювань;

— розроблено новий гомодинний метод визначення механізму поширення радіохвиль, що дозволяє констатувати хвильоводний або багатопроменевий характер поширення. Відмінність нового методу від існуючих полягає у вирішенні завдання методом вимірювання набігу фази сигналу;

— розроблено нові гомодинні методи багатоканального вимірювання флуктуацій амплітуди і набігу фази радіохвиль. Відмінність нових гомодинних методів від існуючих полягає у формуванні несучих мікрохвильових коливань з близькими, але не рівними частотами, а також у формуванні в ретрансляторі частотного зсуву з різними частотами. Багатоканальні гомодинні вимірювальні установки раніше були відсутні.

2. Розвинено теорію гомодинного перетворення сигналів у мікрохвильовому змішувачі. У межах цієї теорії:

— розроблено нову узагальнену математичну модель мікрохвильового гомодинного перетворювача зі застосуванням лінійного закону зміни фази зонduючого сигналу, що відрізняється від існуючих тим, що в рамках моделі отримані нові аналітичні співвідношення для розрахунку амплітуд і початкових фаз спектральних компонент сигналу;

— вперше досліджено вплив неточності налаштування діапазону зміни фазового зсуву зонduючого сигналу на похибку гомодинного перетворювача, отримано значення похибок вимірювань. Відмінність отриманого результату від існуючих в тому, що раніше такі похибки не аналізувалися;

— вперше досліджено вплив нелінійності зміни фазового зсуву зонduючого сигналу на похибку гомодинного перетворювача, отримано значення похибок вимірювань. Відмінність отриманого результату від існуючих в тому, що раніше такі похибки не аналізувалися;

— розроблено нову узагальнену математичну модель мікрохвильового гомодинного перетворювача із дискретною зміною фази зонduючого сигналу. Відмінність полягає в тому, що за її допомогою можна оцінити рівень всіх гармонічних складових сигналу;

— вперше обґрунтовано вибір числа ступенів дискретного фазообертача. Відмінність отриманого результату від існуючих полягає в побудові гомодинної системи з урахуванням вимог ціни-якості.

3. Розвинено концепцію синхронізації опорних генераторів у гомодинній вимірювальній системі. У рамках цієї концепції:

— вперше запропоновано передавати синхронізуючий сигнал за допомогою модуляції сигналу несучої частоти. Відмінними особливостями отриманого результату від існуючих є те, що виключається використання зовнішніх джерел синхронізації і залежність від роботи цих служб, з'являється можливість проводити вимірювання в закритих приміщеннях, шахтах тощо;

— вперше теоретично досліджено вплив амплітудних і фазових шумів на параметри синхронізації опорних генераторів. Відмінними особливостями отриманого результату від існуючих є те, що з'явилася можливість реалізувати мінімально-достатнє співвідношення сигнал/шум в каналі синхронізації;

— вперше експериментально досліджено вплив шумів на параметри синхронізації генераторів. Відмінною особливістю отриманого результату від існуючих є те, що дослідження проводилися з використанням емульованого радіоканалу;

4. Досліджено вплив атмосферної турбулентності на параметри амплітудних і фазових флуктуацій електромагнітної хвилі. У рамках цих досліджень:

— отримали подальший розвиток теоретичні дослідження впливу параметрів показника заломлення середовища на величину амплітудних і фазових флуктуацій. Відмінність полягає в тому, що аналітичні формули приведені до вигляду, що дозволяє здійснити числові розрахунки;

— вперше поставлено експеримент з дослідження впливу параметрів атмосфери на флуктуації амплітуди і, особливо, набігу фази мікрохвильового сигналу при його поширенні у відкритому видовженому каналі зв'язку. Відмінною особливістю отриманого результату від існуючих є те, що раніше не було можливості вимірювати флуктуації набігу фази;

5. Досліджено можливості застосування гомодинних методів перетворення сигналів у різних галузях науки та техніки. У межах цих досліджень:

— вперше запропоновано застосування гомодинного методу перетворення сигналів для побудови систем радіочастотної ідентифікації та позиціонування. Відмінними особливостями отриманих результатів від існуючих є те, що з'явилася можливість обробляти сигнали одночасно декількох транспондерів і здійснювати їх позиціонування з точністю до декількох міліметрів;

— вперше запропоновано застосування гомодинного методу перетворення сигналів для контролю параметрів технологічних процесів. Відмінною особливістю отриманого результату від існуючих є те, що, на прикладі вимірювача вмісту вологи в суміші, з'явилася можливість контролювати її вміст з точністю 0,1% за досить простих апаратних реалізацій;

— вперше запропоновано застосування гомодинного методу перетворення сигналів для контролю фізичного стану людини. Відмінною особливістю отриманого результату від існуючих є те, що контроль серцевого ритму і дихання людини здійснюється безконтактно з малою потужністю випромінювання мікрохвильового генератора;

— отримало подальший розвиток застосування гомодинних методів у техніці побудови антенних решіток та антенних вимірювань, у контролі параметрів руху деталей механізмів, у акустиці. Відмінною особливістю отриманих результатів від існуючих є те, що вимірювання здійснюються з високою точністю з малими апаратними витратами, підвищується оперативність контролю.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблені гомодинні методи дослідження амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС орієнтовані на покращення експлуатаційних характеристик останніх. Використання цих методів дозволяє будувати адаптивні РТС, такі, що враховують вплив усіх дестабілізуючих факторів, присутніх, насамперед, у каналах зв'язку РТС. Впровадження таких методів підвищує ефективність використання РТС і знижує витрати на їх регулювання. Особливо актуальними вказані методи дослідження каналів зв'язку стають під час організації систем телекомунікації, що використовують сучасні види багаторівневої амплітудно-фазової модуляції. Можливість

організації вимірювань флуктуацій набігу фази в каналі зв'язку робить пропоновані методи вимірювань незамінними в цій області вимірювань.

2. Застосування гомодинного методу перетворення сигналів дозволяє створювати прилади, з простою апаратною реалізацією, малими габаритами та масою і, в той же час, з високими метрологічними характеристиками. Використання гомодинних методів перетворення сигналів для побудови приладів неруйнівного контролю дозволяє отримувати високі параметри точності контролю технологічних процесів.

3. Реалізація дискретного закону зміни фази зонduючого сигналу дає можливість отримати високу повторюваність результатів перетворення сигналів, з одного боку, і спростити процес управління зсувом фази, з іншого.

4. Гомодинні методи і засоби мають широкий спектр застосувань. Можливість вимірювання фази сигналу допускає побудову фазової РТС, що має підвищені параметри точності. Причому, система може бути не лише радіотехнічною. Гомодинні методи перетворення сигналів можуть застосовуватися за наявності будь-якого хвильового процесу: оптичного, акустичного та ін.

5. Результати теоретичних і експериментальних досліджень реалізовано у вигляді зразків діючих приладів і впроваджено на промислових підприємствах.

Розроблено та впроваджено такі вимірювальні засоби на основі результатів дисертаційних досліджень:

1. Мікрохвильовий вимірювач параметрів руху деталей комутаційних пристроїв. Прилад впроваджено на підприємстві «ТОВ КБ комутаційної апаратури», м. Севастополь, 2003.

2. Вимірювач вмісту вологи в багатоконпонентній суміші, що завантажується в камеру змішувача технологічної лінії виробництва цеглин. Прилад впроваджено на ПП «Агрегат», м. Ялта, 2007.

3. Вимірювач вмісту вологи в нафтопродуктах. Прилад впроваджено у ІК «Крипто», м. Жовті води, 2010.

4. Вимірювач вмісту води в нафтопродуктах впроваджено у ТОВ «Екохімтех», м. Москва, 2011.

5. Фазометричний мікрохвильовий визначник малих відстаней. Прилад використано і впроваджено у ІТСТ «Трансмаг» НАН України, м. Дніпропетровськ, 2011.

6. Фазометричний мікрохвильовий визначник зміни інтегрального складу газового середовища. Прилад використано і впроваджено у ТОВ «Червоний металіст», м. Конотоп, 2012.

7. Пристрій далекомірного позиціонування об'єктів і радіочастотної ідентифікації. Прилад був представлений на міжнародному змаганні у рамках загальноєвропейської Програми допомоги людям з обмеженими фізичними можливостями (Ambient Assisted Living, AAL), Валенсія (Іспанія), Лечче (Італія), 2011 [3].

8. Результати, отримані в дисертаційній роботі, застосовуються у навчальному процесі на кафедрі радіотехніки і телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету. Питання проектування мікрохвильових вимірювальних приладів на основі гомодинних методів перетворення сигналів, розвинені в дисертації, використовуються в процесі викладання дисциплін: «Пристрої надвисоких частот і антени», «Електродинаміка та поширення радіохвиль», «Пристрої мікрохвильового й оптичного діапазону», «Метрологія та радіовимірювання», а також вико-

ристовуються у виконанні дипломних проектів, випускних робіт бакалаврів і магістрів.

Використання результатів дисертаційних досліджень підтверджується 7 актами впровадження.

Особистий внесок пошукача у публікаціях. Основні результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У монографії [1] автором написана частина розділу 20 «Measurement of Speed and Direction of Turbulent Air Movement». У монографії [2] автором написаний розділ 7 «Precision Indoor Objects Positioning based on Phase Measurements of Microwave Signals». У монографії [3] автором написаний розділ 10 «The Multitag Microwave RFID System with Extended Operation Range». Статті в журналах [4—6] написані самостійно. З матеріалів статей, написаних у співавторстві [7—35] використані тільки ті матеріали, які розроблені особисто автором: постановка завдання; основні ідеї; теоретичні дослідження; методики експериментів; узагальнення результатів; розробка експериментальних методик; формулювання висновків. Співавтори здійснювали комп'ютерне моделювання, числові розрахунки й обробку результатів експериментів. Автором отримані патенти [36—44]. Ідеї інших способів і технічних рішень, захищених іншими авторськими свідоцтвами і патентами [45—57] також належать авторові. Співавтори розвивали ідеї та брали участь в оформленні заявок, експериментальних дослідженнях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і висновки дисертації доповідалися й обговорювалися на 157-ми міжнародних науково-технічних конференціях, симпозіумах і семінарах.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 222 наукових працях, зокрема, у 3-х монографіях, виданих за кордоном (США, Німеччина, Хорватія), в 34-х статтях у журналах (один журнал IEEE Transactions on MTT, США), що рецензуються, у 3-х авторських свідоцтвах, у 19-тьох патентах на винаходи. Результати роботи опубліковані також в 6-ти звітах з НДР. У авторефераті вказано 117 найзначніших робіт автора. Всього по базі даних IEEE індексується 80 робіт, по базі даних SCOPUS індексується 77 робіт. Індекс цитування (індекс Хирша) — 5.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел у кількості 356 найменувань, додатку на 7 сторінках. Повний обсяг роботи складає 455 сторінок, зокрема 144 рисунка, 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, виявлено низку невирішених завдань теоретичного і прикладного плану, що стоять перед розробниками засобів вимірювання амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку, РТС, на основі яких сформульовано наукову проблему, мету і завдання дослідження. Охарактеризовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, показано взаємозв'язок вирішуваних завдань з науковими програмами.

У першому розділі зроблено огляд гомодинних методів і засобів перетворення сигналів у вимірювальних системах.

У результаті аналізу встановлено, що теорія гомодинного перетворення сигналів розвинена недостатньо повно. Не показані шляхи вдосконалення вимірювального обладнання, які дозволяють покращити метрологічні характеристики гомодинних вимірювальних систем. Існуючі гомодинні методи і засоби не забезпечують вирішення завдань апаратного аналізу параметрів протяжних радіотрас і дають можливість проводити вимірювання переважно в лабораторних умовах. Встановлено, що найперспективніший шлях отримання зондуючого сигналу шляхом застосування керованого фазообертача слабо висвітлений. Теорія спектральних перетворень сигналів у мікрохвильовому змішувачі гомодинної системи не розвинена, вплив параметрів керованого фазообертача на метрологічні характеристики вимірювальної системи в цілому не вивчений у повному обсязі. На основі аналізу встановлено, що область застосовності гомодинних методів і засобів на сьогодні обмежується переважно трактовими вимірюваннями і, частково, при вирішенні завдань ближньої радіолокації. Разом з тим, використання теорії і практики гомодинних перетворень сигналів у всіх галузях науки і техніки, що мають справу з хвильовими процесами будь-якого роду, має великий інтерес.

Зроблено висновок про те, що наявні прогалини в теорії і практиці гомодинних перетворень, що перешкоджають реалізації сучасних вимог, як у номенклатурі вирішуваних завдань, так і в необхідних метрологічних характеристиках вимірювальної системи, можуть бути заповнені створенням нових методів і засобів апаратного аналізу амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС, що забезпечують розширення функціональних можливостей і підвищення точності цього аналізу.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету і завдання дослідження, які необхідно вирішити для досягнення цілі.

У другому розділі розвинуто концепцію організації гомодинних вимірювань для дослідження амплітудних і фазових характеристик протяжних каналів зв'язку радіотехнічних систем. Концепція вимірювань пояснюється на рис.1.

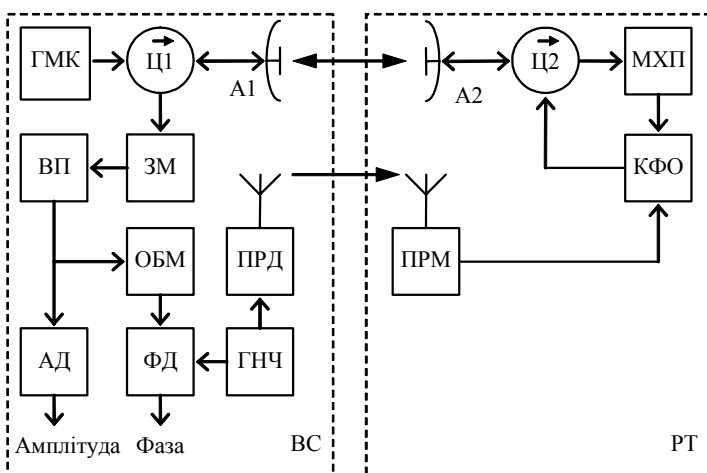


Рис 1.—Структурна схема установки

Мікрохвильові коливання з амплітудою U_0 , частотою f_0 , і початковою фазою φ_0 з виходу генератора мікрохвильових коливань (ГМК) вимірювальної станції (ВС) через циркулятор Ц1 надходять у мікрохвильову антену вимірювальної станції. При цьому у напрямі мікрохвильової антени ретранслятора (РТ) випромінюється електромагнітна хвиля. Прийнятий у ретрансляторі сигнал має вигляд

$$u_{12}(t) = U_0 A_{12} \cos(2\pi f_0 t + k_0 d_{12} + \varphi_0), \quad (1)$$

де A_{12} — загасання електромагнітної хвилі (з урахуванням підсилення мікрохвильових антен) на трасі поширення довжиною d_{12} , $k_0 d_{12}$ — набіг фази електромагнітної хвилі з хвильовим числом k_0 . У місці розташування вимірювальної станції низько-

частотний сигнал з частотою F_{LF} і початковою фазою φ_{LF} від ГНЧ подається на модулятор передавача (ПРД) і випромінюється далі у напрямі ретранслятора модульований радіочастотний сигнал, який приймається приймачем (ПРМ).

На виході приймача формується місцевий опорний низькочастотний сигнал з тією ж частотою F_{LF} і тією ж початковою фазою φ_{LF} .

Прийнятий в ретрансляторі мікрохвильовий сигнал, пройшовши через циркулятор Ц2, підсилюється в мікрохвильовому підсилювачі (МХП) і подається на керований фазообертач (КФО), що реалізовує монотонну зміну фази мікрохвильових коливань. Якщо за період T_{LF} низькочастотного керуючого сигналу реалізується в керуваному фазообертачі зсув фаз від 0 до 2π , то можна говорити про зсув спектру мікрохвильових коливань на, так звану, штучно введену частоту Доплера $\Omega = 2\pi/T_{LF} = 2\pi F_{LF}$. Трансформований за частотою мікрохвильовий сигнал знов надходить до антени ретранслятора і випромінюється у напрямі антени вимірювальної станції. Прийнятий антеною вимірювальної станції мікрохвильовий сигнал має вигляд

$$u_{21}(t) = U_0 A_{12} A_{21} \cos \left[2\pi (f_0 + F_{LF}) t + k_0 d_{12} + k'_0 d_{21} + \varphi_0 + \varphi_{LF} \right], \quad (2)$$

де k'_0 — хвильове число мікрохвильових коливань з урахуванням доплерівського зсуву частоти F_{LF} . Оскільки для прямого і зворотного каналу використовується одна й та ж траса, то $d_{12} = d_{21}$ і $A_{12} = A_{21}$. У загальному випадку множник A_{12} залежить від умов поширення радіохвиль і є багатопараметричною функцією часу, температури повітря, його вологості тощо. Позначимо його як $A(\Sigma)$. Багатопараметричною функцією тих же параметрів є приведена електрична відстань між антенами вимірювальної станції і ретранслятора d_{12}^e . Позначимо таку функцію як $d^e(\Sigma)$. Зміна частоти f_0 на величину частоти Доплера F_{LF} призводить до зміни хвильового числа трансформованого за частотою коливання, що поширюється у напрямку від ретранслятора до вимірювальної станції. Проте, якщо припустити, що $f_0 \gg F_{LF}$, цими змінами величини хвильового числа можна нехтувати, тоді $k'_0 \approx k_0$. У вимірювальній станції повторно прийнятий мікрохвильовий сигнал надходить через циркулятор Ц1 на змішувач (ЗМ), куди також надходить частина енергії початкових коливань з частотою f_0 (за рахунок неідеальності циркулятора). У змішувачі утворюються комбінаційні складові, при цьому корисна різницева складова з частотою F_{LF} виділяється і підсилюється вибірконим підсилювачем (ВП) і подається на амплітудний детектор (АД), а також в підсилювач-обмежувач (ОБМ). Розглянуті аспекти вибіркового підсилення сигналу різницевої частоти. На виході вибіркового підсилювача вимірювальний сигнал можна записати в такій формі

$$u_T(t) = U_{RD} A^2(\Sigma) \cos \left[2\pi F_{LF} t + 2k_0 d^e(\Sigma) + \varphi_{LF} \right], \quad (3)$$

де U_{RD} — приведена амплітуда сигналу, що враховує всі коефіцієнти пропорційності всього тракту, за винятком множника $A^2(\Sigma)$. Початкова частота мікрохвильового коливання f_0 і його початкова фаза φ_0 в змішувачі взаємно віднімаються і у виразі

(3) відсутні. Амплітудний детектор виділяє огинаючу сигналу (3), що характеризує множник ослаблення мікрохвильового сигналу $A^2(\Sigma)$ при його поширенні на відкритій протяжній трасі прямої видимості, а фазовий детектор (ФД) формує сигнал, пропорційний його набігу фази $2k_0 d^e(\Sigma)$.

Таким чином, з'являється можливість здійснювати всебічне вивчення каналу зв'язку РТС. Отримана картина поля радіохвилі, що приймається, в точці розміщення вимірювальної станції виглядає цілком адекватною. При цьому для виробництва фазових вимірювань не потрібно вирішувати задачу створення синфазних мікрохвильових коливань на обох кінцях вимірювальної траси, оскільки це завдання не може бути вирішене, принаймні, сьогодні. Потрібно лише забезпечити формування на обох кінцях траси синфазних низькочастотних коливань. Розглянуто різні шляхи розв'язання цього, більш простого, завдання.

Розглянуто питання створення інтерферометрів з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками. У основу функціонування інтерферометрів покладений гомодинний метод перетворення сигналу. Відповідно до цього методу в каналах інтерферометра генеруються неперервні мікрохвильові коливання з близькими, але не рівними частотами f_{01} і f_{02} . Обговорені аспекти вибору значень цих частот. У кожному каналі інтерферометра виділяється комбінаційна низькочастотна складова різниці початкових і трансформованих у ретрансляторі частот, між якими вимірюється різниця фаз. Частоти цих складових рівні F_{LF} . Оскільки мікрохвильові коливання в каналах інтерферометра не синхронні, то для створення інтерферометра не потрібне використання фазостабільних фідерів, що жорстко зв'язують мікрохвильові вузли інтерферометра між собою. Мікрохвильові вузли (разом з антеною) в кожному каналі інтерферометра об'єднуються в один універсальний мікрохвильовий блок, який можна вільно переміщати в просторі, навіть в процесі проведення експерименту, вирішуючи поставлену задачу вимірювання флуктуацій амплітуди, набігу фази і кутів приходу радіохвиль. Певна оперативність у вільній зміні бази інтерферометра в процесі експерименту відкриває широкі перспективи інтерферометричних вимірювань.

Можливість вимірювання флуктуацій набігу фази дозволяє аналізувати «тонку» структуру поля електромагнітної хвилі в точці прийому і визначати механізм поширення хвилі, будь то хвильовідний або багатопроменевий. Для цих цілей обговорені і обґрунтовані аспекти побудови багатоканального обладнання. При цьому до складу вимірювальної станції включають, як мінімум, чотири однакові приймально-передаючі модулі, не зв'язані, як і раніше, між собою жорсткими фазостабільними фідерами, що функціонують на своїй робочій частоті f_{0i} кожний. Три модулі, що включають мікрохвильові антени, вільно розміщують у площині гіпотетичного фронту хвилі, що надходить. Четвертий модуль розміщують на деякій відомій відстані від цієї площини. Аналізуючи прийнятий першими трьома модулями сигнал, визначають реальне положення фронту хвилі, що надходить, і розраховують значення амплітуди і фази сигналу на виході четвертого модуля (у припущенні, що фронт хвилі плоский), одночасно проводячи його вимірювання. Якщо кореляція між розрахованим і вимірним значеннями велика, то робиться висновок про те, що переважає

хвильовідний характер поширення радіохвиль, якщо низька — то багатопроменевий.

Показано, що інформативність вимірювань можна збільшити, розмістивши на протилежному кінці вимірювальної траси декілька ретрансляторів, кожен з яких формує власне частотний зсув F_{LFj} кожному з прийнятих сигналів з частотами f_{0i} . Таким чином, з'являється можливість виміряти «тонку» структуру поля на обох кінцях вимірювальної траси.

Хорошим рішенням для генерації частот f_{0i} є використання синтезаторів непрямого синтезу частот з зовнішнім високостабільним низькошумним опорним генератором. Прагнення зменшити різницю частот f_{0i} між собою веде до зниження кроку сітки частот синтезатора, що негативно позначається на шумових показниках останнього. Показаний шлях вирішення цієї проблеми, що дозволяє отримати крок сітки частот (10...10000) кГц при частоті порівняння у фазовому детекторі синтезатора, близький до 100 МГц.

Більшість технічних рішень, запропонованих і описаних у розділі, підтримана патентами автора.

Таким чином, розроблено і описано нові методи вимірювання амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку радіотехнічних систем, що дозволяють проводити вимірювання флуктуацій не лише амплітуд сигналів, що приймаються, але і флуктуацій набігів фази сигналів мікрохвильового діапазону при їх поширенні у відкритому і протяжному каналі зв'язку. Раніше проводити такі вимірювання в протяжному каналі зв'язку було неможливим.

У третьому розділі розвинена теорія гомодинного методу перетворення сигналів, що використовувався у вимірюваннях амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС.

Розроблена узагальнена математична модель гомодинного перетворювача частоти, згідно з якою вихідний струм мікрохвильового змішувача описується виразом

$$i_D(t) = gU_R U_T \cos[\theta(t) + \varphi_T], \quad (4)$$

де U_T і φ_T — амплітуда і фаза вимірюваного сигналу; $\theta(t)$ — закон зміни фази зондуючого сигналу; g і U_R деякі постійні величини.

Досліджена класична схема гомодинного перетворення сигналів, згідно з якою початкова фаза зондуючого сигналу змінюється за лінійно-пилоподібним законом. Закон зміни фази можна записати у вигляді

$$\theta(t) = \Omega_1 t + 2\pi \left[\sum_{n=-\infty}^0 1(-t + nT) + \sum_{n=1}^{\infty} -1(t - nT) \right], \quad (5)$$

де $\Omega_1 = 2\pi/T$ — кругова частота, з якою здійснюється періодична зміна фазового зсуву; T — період зміни фазового зсуву; $1(t)$ — одинична функція Хевісайда. Частота різницевої складової має δ -викиди в моменти часу nT . Після виконання ряду тригонометричних перетворень різницева складова струму, є чисто гармонічним коливанням з частотою Ω_1 , амплітуда якого прямо пропорційна амплітуді U_T вимірюваного сигналу, а початкова фаза точно збігається зі значенням зсуву по фазі φ_T ви-

мірюваного сигналу. Причому це відбувається, незважаючи на присутність δ -викидів частоти.

Проаналізовано метрологічні характеристики гомодинного перетворювача за неточних налаштувань діапазону зміни фазового зсуву зонduючого сигналу лінійного фазообертача, що задається величиною $(2\pi + \Delta)$, де Δ — деяка постійна величина. Для $\theta(t)$ отримано

$$\theta(t) = \Omega_2 t + (2\pi + \Delta) \left[\sum_{n=-\infty}^0 1(-t + nT) + \sum_{n=1}^{\infty} -1(t - nT) \right], \quad (6)$$

де $\Omega_2 = (2\pi + \Delta)/T = \Omega_1 + \Delta/T$ — постійна величина. Після підстановки в (4) виразу (6) і проведення спектрального аналізу отримано аналітичні записи для амплітуди і початкової фази першої гармоніки сигналу на виході змішувача

$$I_1 = 2gU_R U_T \left| \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right| \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{1}{4\pi + \Delta}\right)^2 + \frac{2}{(4\pi + \Delta)\Delta} \cos(\Delta + 2\varphi_T)}; \quad (7)$$

$$\psi_1 = \text{angle} \left[\left(\frac{1}{4\pi + \Delta} + \frac{1}{\Delta} \right) (\sin(\Delta + \varphi_T) - \sin \varphi_T), \left(\frac{1}{4\pi + \Delta} - \frac{1}{\Delta} \right) (\cos(\Delta + \varphi_T) - \cos \varphi_T) \right]. \quad (8)$$

З (7) і (8) випливає, що амплітуда і початкова фаза першої гармоніки різницевого струму складним чином залежать від величини Δ і φ_T . Ці обставини призводять до появи похибок при проведенні як амплітудних, так і фазових вимірювань. Після перетворень отримано аналітичні формули для визначення максимальної відносної похибки вимірювання амплітуди першої гармоніки струму

$$\delta I_{1m} = 1 - \left| 1 - \left[\frac{|\Delta|}{(4\pi + \Delta)} \right] \left| \frac{\sin(\Delta/2)}{(\Delta/2)} \right| \right|, \quad (9)$$

і абсолютної похибки вимірювання фазового зсуву

$$\delta\varphi = \varphi_T - \text{angle} \left[\left(\frac{1}{4\pi + \Delta} + \frac{1}{\Delta} \right) (\sin(\Delta + \varphi_T) - \sin \varphi_T), \left(\frac{1}{4\pi + \Delta} - \frac{1}{\Delta} \right) (\cos(\Delta + \varphi_T) - \cos \varphi_T) \right]. \quad (10)$$

Аналізуючи (9) можна зробити висновок, що зі зростанням абсолютної величини неточності установки фазового зсуву відбувається збільшення похибки амплітудних вимірювань. Причому від'ємним значенням Δ відповідає вища похибка. Зокрема при $\Delta = \pi/4$ максимальна похибка вимірювання амплітуди вимірювального сигналу складає 8,28 %, а при $\Delta = -\pi/4$ — 9,05 %. Для того, щоб максимальна похибка вимірювання амплітуди не перевищувала 2 % необхідно налаштувати керований фазообертач так, щоб величина неточності установки фазового зсуву Δ за модулем не перевищувала 12° .

Аналізуючи (10) можна зробити висновок, що неточність налаштування діапазону зміни фазового зсуву зонduючого сигналу значно впливає на похибку вимірювання фазового зсуву вимірюваного сигналу. Із зростанням абсолютної величини неточності установки відбувається збільшення похибки. Причому, від'ємним значенням Δ відповідає вища похибка. Зокрема, при $\Delta = \pi/4$ максимальна похибка вимірювання фазового зсуву вимірюваного сигналу складає $-19,1^\circ$, а при $\Delta = -\pi/4$ — $26,3^\circ$. Для того, щоб максимальна похибка вимірювання фазового зсуву не пере-

вищувала 2° необхідно налаштувати керований фазообертач так, щоб величина неточності установки фазового зсуву Δ за модулем не перевищувала $3,4^\circ$.

Проаналізовано метрологічні характеристики гомодинного перетворювача при відхиленні закону управління фазою зонduючого сигналу від заданого лінійного. Було прийнято, що максимальне відхилення фазового зсуву α від лінійного закону відповідає середині часового інтервалу T , тобто $\theta(T/2) = \pi + \alpha$. При цьому апроксимація $\theta_T(t)$ дає

$$\theta_T(t) = \pi + \alpha + (2\pi/T)[t - (T/2)] - (4\alpha/T^2)[t - (T/2)]^2. \quad (11)$$

Після підстановок і перетворень отриманий аналітичний запис спектральної густини фрагмента вихідного сигналу змішувача

$$I_D(j\omega) = gU_R U_T \int_0^T \cos \left[\pi + \alpha + \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) - \frac{4\alpha}{T^2} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 + \varphi_T \right] e^{-j\omega t} dt. \quad (12)$$

При цьому відносна похибка вимірювання амплітуди визначається як

$$\delta I_1 = 1 - \frac{I_1}{I_{1I}} = 1 - \int_0^T \cos \left[\pi + \alpha + \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) - \frac{4\alpha}{T^2} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 + \varphi_T \right] e^{-j\Omega_1 t} dt. \quad (13)$$

Аналізуючи (13) можна зробити висновок, що зі зростанням абсолютної величини α відбувається збільшення похибки вимірювання амплітуди сигналу. Для того, щоб максимальна похибка вимірювання за амплітудою не перевищувала 2% необхідно налаштувати керований фазообертач так, щоб величина α за модулем не перевищувала 18° .

Аналіз абсолютної похибки вимірювання фазового зсуву при різних значеннях α можна здійснити, використовуючи такий вираз

$$\delta\varphi = \psi_{1I} - \psi_1 = \varphi - \text{angle} \left[\text{Re}(I_D(j\Omega_1)), \text{Im}(I_D(j\Omega_1)) \right]. \quad (14)$$

З (14) випливає, що залежність похибки від φ_T носить осцилюючий характер зі зсувом уздовж вісі ординат. Причому від'ємним α відповідають додатні значення похибки, а додатнім α — від'ємні. Із зростанням абсолютної величини неточності установки відбувається збільшення похибки. Зокрема, при $\alpha = \pi/4$ максимальна похибка вимірювання фазового зсуву вимірюваного сигналу складає $-32,5^\circ$, а при $\alpha = -\pi/4$ — $32,5^\circ$. Для того, щоб максимальна похибка вимірювання фазового зсуву не перевищувала 2° необхідно налаштувати керований фазообертач так, щоб величина α за модулем не перевищувала $2,8^\circ$.

Таким чином, для реалізації високої точності гомодинної радіотехнічної системи потрібно при її побудові використовувати високоточний лінійний керований фазообертач. На практиці ці вимоги важко реалізувати. Такі недоліки як: температурна нестабільність, складність залежності фазового зсуву від керуючої напруги, погана повторюваність виробів, обумовлена значним розкидом параметрів керованих елементів, присутнім практично у всіх конструкціях фазообертачів з плавним регулюванням фазового зсуву. Усунути вказаний недолік можна шляхом переходу від неперервної до дискретної зміни фазового зсуву зонduючого сигналу, здійснюючи тим

самим апроксимацію лінійної функції ступінчастою. Такий підхід дозволяє при налаштуванні керованого фазообертача з високою точністю встановити дискретні значення фазового зсуву на кожному кроці комутації.

Розроблена узагальнена математична модель гомодинного перетворювача частоти при дискретній зміні фази зонduючого сигналу з заданим кроком $\Delta\theta$. Після ряду перетворень отримано в аналітичному вигляді формулу для визначення амплітуд і початкових фаз складових спектру різницевого струму змішувача:

$$I_n = \begin{cases} 0 & \text{при } n \neq qm + 1; n \neq qm - 1; \\ gU_T U_T |\sin(\pi n/m)/(\pi n/m)| & \text{при } n = qm + 1, n = qm - 1. \end{cases} \quad (15)$$

$$\Psi_n = \begin{cases} \text{не определена} & \text{при } n \neq qm + 1; n \neq qm - 1; \\ \varphi_T - \pi n/m + \arg[\sin(\pi n/m)] & \text{при } n = qm + 1, n = qm - 1. \end{cases} \quad (16)$$

q — будь-яке ціле ненегативне число; m — число дискретних значень фазового зсуву. У спектрі вихідного сигналу змішувача присутня перша гармоніка ($q = 0$), а також гармоніки з номерами $m \pm 1$ ($q = 1$), $2m \pm 1$, $3m \pm 1$ і так далі Амплітуди гармонік прямо пропорційні амплітуді вимірюваного сигналу, а початкові фази з точністю до константи збігаються з початковою фазою вимірюваного сигналу. Амплітуди гармонік спектру зменшуються зі зростанням номера гармоніки. Зі збільшенням числа дискретних значень фазового зсуву m частотна відстань між першою гармонікою і найближчою до неї збільшується, що покращує умови для виділення першої гармоніки за допомогою смугово-проникного фільтру. Якщо число дискретних значень фазового зсуву m необмежено збільшувати ($m \rightarrow \infty$), то з (15) і (16) випливає, що в границі в спектрі залишається тільки перша гармоніка з максимальною амплітудою $I_{1\max} = gU_T U_R$ і початковою фазою $\psi_1 = \varphi_T$, що відповідає лінійному закону зміни фазового зсуву.

Обґрунтовано вибір числа m . З проведених розрахунків видно, що вже при числі m , рівному 4, рівень першої гармоніки сигналу складає 90% від теоретично можливого. При подальшому збільшенні числа m до 8-ми приріст рівня складе 8%, з 8-ми до 16-ти — лише 1%. Разом з тим, при збільшенні числа рівнів зростає складність як самого фазообертача, так і схеми управління ним.

Таким чином, проведений розрахунок показав, що при рішенні поставленої задачі існує деяке оптимальне значення числа рівнів дискретного фазообертача, яке задовольняє вимогам якості формованого сигналу, простоти реалізації і достатнього наближення до теоретично можливої границі.

У четвертому розділі досліджено процеси синхронізації опорних низькочастотних генераторів фазової вимірювальної системи з гомодинним перетворенням частоти. Проведений структурний синтез схеми синхронізації опорних генераторів (ОГ) гомодинної вимірювальної системи, згідно до якої низькочастотний сигнал синхронізації передається з одного кінця траси на іншій за допомогою модуляції сигналу радіочастоти. При цьому прийнятий сигнал, що демодулюється, є вхідним сигналом кільця фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) місцевого опорного генератора, керованого напругою (ГУН).

Оцінено вплив амплітудних шумів в каналі зв'язку на похибки синхронізації

опорних генераторів гомодинної вимірювальної системи. Для цього складено диференціальне рівняння, що описує роботу кільця ФАПЧ,

$$\partial \left\{ [\beta \cos(\varphi) - \alpha] p(\varphi) + \partial [p(\varphi)] / \partial \varphi \right\} / \partial \varphi = 0 \quad (17)$$

у якому параметр $\alpha = 4\Delta_0/N$ характеризує величину відносного початкового розладу ОГ і ГУН, а параметр $\beta = 4\Delta\Omega_H/N$ — величину сигнал-шум. У формулах Δ_0 — величина початкового розладу генераторів, $\Delta\Omega_H = S_{VCO}K_{PD}U_S U_{VCO}/2 = S_{VCO}U_{PD\max}$ — смуга утримання системи ФАПЧ, N — спектральна щільність шуму. Розв'язок цього рівняння, одержаний шляхом інтегрування по φ виглядає таким чином

$$p(\varphi) = \left(e^{\varphi\alpha + \beta\cos(\varphi)} \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} e^{-\alpha x - \beta\cos(x)} dx \right) / \left(8\pi e^{-\pi\alpha} \int_0^{\pi/2} \text{ch}(2\alpha x) I_0[2\beta\cos(x)] dx \right), \quad (18)$$

де $I_0[2\beta\cos(x)]$ — модифікована функція Бесселя нульового порядку.

Для перевірки роботи розрахованої системи синхронізації було проведено її чисельне моделювання в пакеті програм MathLab. Моделювання було виконане з часовим кроком 15 мікросекунд на інтервалі 10 секунд. На вхід системи ФАПЧ подавалася суміш сигналу і білого шуму. Смуга шуму обмежувалася смуговим фільтром з центральною частотою 4 кГц і добротністю 100. Порівняння результатів аналітичного розрахунку і комп'ютерного моделювання середньоквадратичного відхилення (СКВ) різниці фаз генераторів, що синхронізуються, при різних відношеннях сигнал-шум S/N на вході системи синхронізації, наведено в таблиці 1, де σ_A — аналітичний розрахунок СКВ різниці фаз генераторів, що синхронізуються; σ_M — СКВ різниці фаз при комп'ютерному моделюванні. Як видно з таблиці 1, результати обчислення і чисельного моделювання СКВ збігаються з точністю до 0,1°.

Таблиця 1 — Порівняння результатів розрахунку і моделювання при дії амплітудних шумів

S/N , дБ	20	26	32	38	44
σ_A , град	0,386	0,193	0,097	0,048	0,024
σ_M , град	0,396	0,199	0,101	0,051	0,026

Оцінено вплив фазових шумів у каналі зв'язку на помилки синхронізації опорних генераторів гомодинної вимірювальної системи. Аналітичне рішення рівняння, що описує роботу системи, виведене з використанням ряду припущень: всі ланки ФАПЧ, окрім ФНЧ, є безінерційними; фазовий детектор є помножувачем; характеристика налаштування керованого генератора є лінійною в межах робочої ділянки; адитивний шум на вході системи ФАПЧ є білим. Результати розрахунків зведені в таблицю 2, в якій ΔF_N — ефективна ширина спектру фазового шуму; F_d — девіація частоти радіосигналу.

Таблиця 2 — Результати розрахунку СКВ різниці фаз при дії фазових шумів

ΔF_N , Гц	7,6	15,3	30,5
$\Delta F_N / F_d$	0,0019	0,0038	0,0076
σ_A , град	0,16	1,1	1,9
S/N_A , дБ	54	48	42

Експериментально досліджено дію шумів, що генеруються в емульованому каналі зв'язку, на процес синхронізації опорних генераторів. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість отримання СКВ різниці фаз опорних генераторів не більш $0,4^\circ$.

Теоретично і експериментально підтверджено, що при відношенні сигнал-шум на виході приймача більше 28 дБ, дією амплітудних і фазових шумів на роботу системи синхронізації можна нехтувати.

У п'ятому розділі проведено теоретичні дослідження щодо впливу неоднорідностей показника заломлення на трасі поширення радіохвиль на рівень амплітудних і фазових флуктуацій.

Оцінено дисперсію амплітудних флуктуацій при різних розмірах неоднорідності показника заломлення для траси довжиною $d_T = 300$ м і довжини хвилі випромінювання $\lambda = 3,2$ см. Виявлено, що існує розмір неоднорідності, відповідний максимуму дисперсії амплітудних флуктуацій, який дорівнює $a = a_0 = 1,37$ м, що відповідає значенню хвильового параметру $\tau = 3,28$. Значення дисперсії амплітудних флуктуацій у цьому випадку рівне $D_\chi = 0,0011$ або СКО $\sigma_\chi = \sqrt{D_\chi} = 0,034$. Відповідно, максимальні флуктуації амплітуди сигналу становитимуть $\pm 0,9$ дБ.

Аналогічно оцінена дисперсія фазових флуктуацій при різних розмірах неоднорідності показника заломлення. Показано, що для однорідності максимальної довжини $a = 300$ м максимальні значення флуктуацій фази в припущенні нормального закону розподілу складуть $\pm 154,4^\circ$

Аналитичні формули для розрахунку поперечних кореляційних функцій амплітудних флуктуацій при довільному значенні хвильового параметру τ приведені до вигляду, що дозволяє здійснити числові розрахунки:

$$R_\chi(\rho) = \left\{ \exp(-\rho^2/a^2) - \frac{1}{j2\tau} \left[\ln \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon_2^n}{n \cdot n!} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon_1^n}{n \cdot n!} \right] \right\} / \left[1 - \frac{1}{\tau} \arctg(\tau) \right]. \quad (19)$$

Проведений розрахунок інтервалу кореляції для $a = a_0 = 1,37$, набуває значення інтервалу кореляції $\rho_\chi = 1,21$ м, яке дещо менше $a_0 = 1,37$ м. Проведений розрахунок поперечних кореляційних функцій фазових флуктуацій для $a_0 = 1,37$, набуває значення інтервалу кореляції $\rho_\phi = 1,51$ м, яке дещо вище a_0 . Розрахунки для неоднорідностей з $a = 300$ м показали, що інтервал кореляції фазових флуктуацій в цьому випадку дуже близький до радіусу кореляції флуктуацій показника заломлення і складає 266,3 м.

Фрагмент 10-денних вимірів флуктуацій амплітуди і набігу фази на приземній трасі поширення радіохвиль 3-х сантиметрового діапазону показаний на рис. 2.

Експериментально підтверджено, що амплітуда і набіг фази мікрохвильового сигналу в точці прийому флуктують. Встановлено, що зміни набігу фази сигналу більшою мірою залежать від вологості повітря, ніж від інших параметрів. Встановлено, що при відносно рівних погодних умовах добова зміна набігу фази укладається в діапазон $\pm 80^\circ$, що не перевищує граничну теоретичну оцінку для даної траси. Встановлено, що при нестійких погодних умовах, добові флуктуації набігу фази мі-

крохвильового сигналу досягали величини $\pm 130^\circ$, наближаючись, таким чином, до

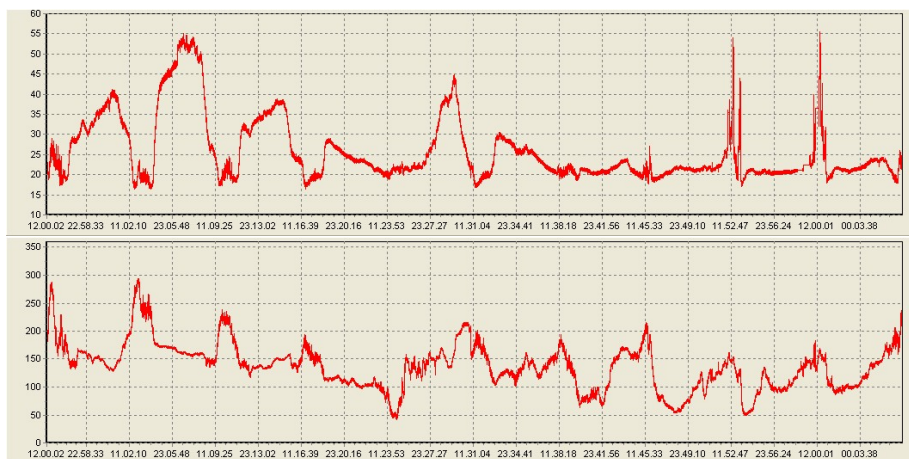


Рис. 2 — Результати 10-денних амплітудних і фазових вимірювань

теоретичної границі в $\pm 154,4^\circ$.

Встановлено, що ширина енергетичного спектру флуктуацій амплітуди і набігу фази мікрохвильового сигналу при його поширенні на відносно коротких трасах не перевищує величини 1 МГц в нічний час і 5 МГц в денний, при відносно рівних погодних умовах.

У шостому розділі розглядаються аспекти застосування гомодинних методів перетворення сигналів у різних галузях науки і техніки, розглядаються варіанти впровадження експериментальних зразків.

Розглянутий варіант системи RFID, що використовує гомодинне перетворення сигналів і що має ряд переваг порівняно з традиційною системою: можливість одночасної обробки сигналів від декількох транспондерів, хороші параметри ЕМС, покращена на 50 дБ енергетика лінії зв'язку і/або збільшена зона дії системи, висока перешкодозахищеність. При моделюванні перетворень сигналів показано, що збільшення числа кроків зміни фази у фазообертачі з 8 до 16 дає збільшення числа одночасно оброблюваних транспондерів з 30 до 70.

Показана можливість застосування гомодинних методів перетворення частоти сигналів у завданнях позиціонування об'єктів. Розвинений далекомірний метод позиціонування об'єктів в закритому приміщенні, де стандартні методи супутникової навігації не працюють за визначенням. Сформульовані вимоги до мікрохвильового і низькочастотного генераторів. Для досягнення точності позиціонування об'єктів 1 мм нестабільність частот цих генераторів не повинна перевищувати 10^{-6} . Обговорені питання використання інтерферометричного методу, розробленого на основі гомодинного, що дозволяє здійснювати привід і посадку літального апарату на злітно-посадкову смугу аж до його повної зупинки. Показано, що інтерферометричний метод позиціонування дозволяє проводити стиковку космічних об'єктів там, де використання стандартних методів навігації або не забезпечує необхідної точності позиціонування, або неможливе.

Обговорена можливість застосування гомодинних методів перетворення частоти сигналів при вирішенні завдань контролю параметрів технологічних процесів. Виявлено, що, як основні контрольовані параметри, можуть виступати швидкість і якісний склад речовини в потоці. Показано, що гомодинні методи вимірювань, не звужуючи рамки застосування, можна використовувати при вирішенні завдань вимірювання і контролю на всіх етапах організації технологічних процесів. Окрім відзначених, контрольованими параметрами можуть бути: товщина матеріалів, товщина шарів діелектриків в багатошарових структурах, рівень рідини і сипких матеріа-

лів, зміна агрегатного стану речовини тощо.

Проведений теоретичний аналіз похибок гомодинних вимірників вологості цементно-пісочних сумішей і вмісту води у водопаливних емульсіях. Експериментально підтверджено, що реальне відхилення вимірюваних значень струму датчика вологості від значень, обчислених по екстраполюючій поліноміальній функції, складає не більше 0,1% в діапазоні зміни вологості суміші від 0 до 10%.

Розглянуті питання побудови вимірювачів малих дистанцій, вимірювачів швидкості переміщення механічних деталей, проблем калібрування доплерівських вимірювачів швидкості. Так, наприклад, при переміщенні рухомої деталі на відстань $X_{\max} = 15$ мм із швидкістю $V = 20$ м/с, досягні статична похибка визначення цього переміщення $\Delta X_{St} = 0,1$ мм і динамічна похибка $\Delta X_{Dn} = 0,2$ мм.

Розглянуті проблеми безконтактного контролю серцевого ритму і дихання людини, що реалізуються на базі гомодинних методів. Показано, що потужність випромінювання мікрохвильового датчика може не перевищувати 1 мВт. На реальних осцилограмах роботи датчика простежується дихання людини (частота спектральної складової близько 0,17 Гц) і серцебиття (частота спектральної складової становить близько 1,3 Гц).

Обговорена можливість застосування гомодинних методів у техніці антенних вимірювань і побудові антенних решіток. Показано, що при організації антенних вимірювань зі складу вимірювальної апаратури можна виключити мікрохвильові фідери. Точність вимірювань, що проводяться, виявляється підвищеною. При побудові антенних решіток, з'являється можливість управління параметрами випромінювання решіток з високою точністю. З'являється можливість вільно змінювати розташування модулів решіток залежно від вирішуваного завдання навіть в процесі їх функціонування.

Гомодинні методи перетворення сигналів можуть застосовуватися у всіх галузях науки і техніки, в яких, для отримання корисної інформації, використовуються хвильові процеси будь-якого роду. При цьому в завданнях акустики і гідроакустики відкриваються широкі перспективи використання гомодинних методів. Описаний підхід до проектування обладнання для тривимірних вимірювань швидкості і напрямку руху повітряних мас, заснований на вимірюваннях фазової затримки акустичної хвилі, що поширюється в турбулентній атмосфері. Розглядаються питання обчислення кумулятивної фази вимірюваного сигналу, що робить можливим підрахунок фазових циклів сигналу. Показано, що досяжний діапазон вимірювання швидкості руху повітряних мас може складати від 0,3 мм/с (роздільна здатність) до 30 м/с з градієнтом до 280 м/с². Підхід до проблеми може бути корисний і в інших практичних застосуваннях: у хімічній промисловості, літакобудуванні (вивчення аеродинаміки корпусу літального апарату) тощо.

У додатку наведені акти впровадження результатів роботи.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему, що полягає в створенні нових гомодинних методів і засобів апаратурного аналізу амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС, що забезпечують розширення функціональних можливостей і підвищення точності цього аналізу. Проблема вирішена за рахунок створення нових гомодинних методів вимірювання флуктуацій амплітуди, набігу фази, кутів приходу радіохвиль і визначення їх механізму поширення, а також створенням нових підходів до проектування РТС різного призначення, систем контролю параметрів технологічних процесів тощо. Ефект від використання нових методів і підходів полягає в можливості проведення вимірювань набігу фази радіохвиль при поширенні в протяжному каналі зв'язку, а також у можливості побудови фазових РТС, що володіють найвищими параметрами точності.

При цьому отримані такі наукові та практичні результати:

1. Показано, що існують прогалини в теорії і практиці гомодинних перетворень, що перешкоджає реалізації сучасних вимог, як в номенклатурі вирішуваних завдань, так і в необхідних метрологічних характеристиках гомодинної вимірювальної системи, вони можуть бути заповнені створенням нових методів і засобів апаратурного аналізу амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку РТС, що забезпечують розширення функціональних можливостей і підвищення точності цього аналізу.

2. Розвинено концепцію вимірювань флуктуацій амплітуди і набігу фази електромагнітних хвиль, що поширюються у відкритому каналі зв'язку, в рамках якої розроблено нові методи вимірювання флуктуацій амплітуди, набігу фази і кутів приходу радіохвиль, а також розроблено новий метод визначення механізму поширення і новий метод багатоканальних вимірювань флуктуацій амплітуди і набігу фази радіохвиль. Розроблені методи відкидають необхідність формування синфазних мікрохвильових коливань на початку і в кінці досліджуваної траси і дозволяють відмовитися від застосування фазостабільних фідерів, даючи можливість вільно змінювати просторове положення мікрохвильових вузлів інтерферометра. Розроблені нові методи формування мікрохвильових сигналів з дрібним кроком сітки частот, необхідні для створення багатоканального гомодинного обладнання для вимірів.

3. Уперше досліджено вплив неточності налаштування діапазону зміни фазового зсуву сигналу на похибку гомодинного перетворення і вплив нелінійності зміни фазового зсуву, що вноситься керованим фазообертачем, на похибку гомодинного перетворення, внаслідок чого отримано аналітичні співвідношення, вимірювання амплітуди, що дозволяють розрахувати відносні похибки, і абсолютні значення похибки вимірювання набігу фази і оцінити потенційні метрологічні можливості гомодинних вимірювальних систем, які на сучасному етапі розвитку елементної бази характеризуються такими значеннями: для амплітудних вимірювань на рівні 2%; для фазових вимірювань на рівні 2°.

4. У результаті спектрального аналізу низькочастотної складової струму, що протікає через нелінійний елемент, розроблено узагальнену математичну модель мікрохвильового гомодинного перетворювача частоти при дискретній зміні фази зондуєчого сигналу. Модель є аналітичними співвідношеннями, що дають можливість розрахувати амплітуди і початкові фази гармонічних складових цього струму для

довільного числа рівнів дискретного фазообертача. Проаналізовано вплив числа рівнів дискретного фазообертача на амплітуду першої гармоніки і показано, що для практичного застосування число рівнів доцільно вибирати відповідно до двійкового закону і це число має бути не менше чотирьох. При цьому рівень першої гармоніки сигналу складає 90% від теоретично можливого. Подальше збільшення числа рівнів не призводить до істотного збільшення рівня першої гармоніки. Так з восьми рівнів рівень першої гармоніки складає 98%, а з шістнадцяти — 99%. Застосування дискретної зміни фазового зсуву робить систему стабільною в роботі, стійкою до дії дестабілізуючих факторів (температури, старіння тощо) і забезпечує повторюваність результатів.

5. Розвинено теорію синхронізації опорних низькочастотних генераторів у гомодинній вимірювальній системі. Розроблено новий метод синхронізації опорних низькочастотних генераторів, що передбачає передачу сигналу синхронізації за допомогою модуляції/демодуляції сигналу несучої радіочастотного діапазону. Оцінено вплив дестабілізуючих факторів на роботу каналу синхронізації гомодинної вимірювальної установки. Доведено, що фазові флуктуації в атмосферному каналі зв'язку практично не позначаються на якості модулюючого сигналу, якщо порівнянна довжина хвилі модулюючого сигналу значно більша за довжину вимірювальної траси. Досліджено дію амплітудних і фазових шумів на роботу системи ФАПЧ. Показано, що реально досяжні значення помилок в синхронізації опорних генераторів можуть досягати значення $0,4^\circ$ при співвідношенні сигнал-шум 20 дБ, а при співвідношенні сигнал-шум 28 дБ похибками синхронізації опорних генераторів можна знехтувати. Вперше експериментально досліджено дію шумів, що генеруються в емульованому каналі зв'язку, на процес синхронізації опорних генераторів. Результати експериментальних досліджень підтвердили теоретичні розрахунки і комп'ютерне моделювання.

6. Теоретично досліджено вплив неоднорідностей показника заломлення на трасі поширення радіохвиль на рівень амплітудних і фазових флуктуацій. Виявлено, що для траси фіксованої довжини існує деякий розмір неоднорідності показника заломлення, відповідний максимуму дисперсії амплітудних флуктуацій, а дисперсія фазових флуктуацій монотонно зростає зі зростанням середнього розміру неоднорідностей показника заломлення середовища. Аналітичні формули для розрахунку поперечних кореляційних функцій амплітудних і фазових флуктуацій приведені до вигляду, що дозволяє здійснити числові розрахунки.

7. Проведено експериментальні дослідження з мікрохвильового поширення на приземній трасі довжиною 300 м і на морській трасі довжиною 1300 м. Експериментально встановлено, що флуктуації набігу фази мікрохвильового сигналу в основному визначаються вологістю повітря і слабо залежать від інших метеорологічних параметрів. При відносно однакових погодних умовах добова зміна набігу фази мікрохвильового сигналу для траси довжиною 300 м укладається в діапазон $\pm 80^\circ$, при різких змінах погоди добові флуктуації набігу фази досягали величини $\pm 130^\circ$. Добова зміна амплітуди мікрохвильового сигналу вкладається в діапазон $\pm 1,5$ дБ. Експериментально доведено, що флуктуації амплітуди і набігу фази мікрохвильового сигналу відповідають теоретичним розрахункам, які складають для амплітуди $\pm 0,9$ дБ, а

для набігу фази досягають границі $\pm 154,4^\circ$.

8. Доведено можливість застосування гомодинних методів в різних галузях науки і техніки, там, де передбачається використання хвильових процесів будь-якого роду. Показано, що використання каналу зв'язку як основної інформативної ланки, дозволяє будувати фазову гомодинну систему, роздільна здатність якої визначається частками робочої довжини хвилі випромінювання мікрохвильового сигналу. Особливо актуальне застосування гомодинних методів для контролю параметрів технологічних процесів: вимірювання якісного складу речовини, вимірювання швидкості руху потоку речовини і деталей механізмів, вимірювання товщини радіопрозорих матеріалів (яку неможливо виміряти звичними механічними засобами), наприклад, товщину стін або покриттів і тому подібного. При цьому, на прикладі контролю вмісту вологи в багатокомпонентній суміші показано, що реальне відхилення виміряних значень струму датчика вологості від значень, обчислених за екстраполюючою поліноміальною функцією, складало не більше 0,1% в діапазоні зміни вологості суміші від 0 до 10%.

9. Доведено, що гомодинні методи дозволяють істотно покращити традиційні технічні властивості систем RFID і позиціонування і, крім того, реалізувати принципово нові. Зокрема, зчитувач такої системи спроможний обробляти сигнали декількох транспондерів, що одночасно перебувають у радіусі дії системи, сигнали транспондерів не пригнічують один одного.

Показано, що використання інтерферометричного методу, реалізованого гомодинним методом перетворення сигналів, дозволяє здійснювати привід і посадку літальних апаратів на злітно-посадкову смугу аж до їх повної зупинки і/або проводити стикування космічних об'єктів там, де використання стандартних методів навігації або не забезпечує необхідної точності позиціонування, або неможливе в принципі.

10. Описано підхід до проектування обладнання для тривимірних вимірювань швидкості і напрямку руху повітряних мас, заснований на вимірюваннях фазової затримки акустичної хвилі, що розповсюджується в турбулентній атмосфері. Перетворення електричних сигналів, що формуються на виході стандартних акустичних перетворювачів, гомодинним методом дає можливість контролювати повітряні потоки в динамічному діапазоні від 0,3 мм/с до 30 м/с і більше з градієнтом зміни швидкості до 280 м/с².

11. Обґрунтовано застосування гомодинних методів у побудові діагностичного медичного обладнання, для організації антенних вимірювань, управління роботою антенних решіток.

12. Результати теоретичних досліджень використані у розробці приладів різного призначення, що застосовуються в науці, промисловості, медицині тощо. На сьогодні впроваджені: вимірювач переміщення рухомих деталей силового комутаційного обладнання, вимірювач вологості багатокомпонентної суміші, вимірювач вмісту води у водопаливній емульсії, вимірювач змін інтегрального складу газового середовища в шахтах, вимірювач взаємного розташування блоків системи магнітолевітуючого транспорту, пристрій контролю переміщення пацієнтів у медичних установах. Це підтверджується 7 відповідними актами впровадження.

РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1]. Shirokov I. B. Measurement of Speed and Direction of Turbulent Air Movement / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich // In book Geoscience and Remote Sensing, New Achievements, In-Teh, Vucovar, Croatia, 2010. — 508 p. / P. 379-396.
- [2]. Shirokov I. B. Precision Indoor Objects Positioning based on Phase Measurements of Microwave Signals / I. B. Shirokov // In book Evaluating AAL Systems Through Competitive Benchmarking, Indoor Localization and Tracking, S. Chessa and S. Knauth (Eds.): Communications in Computer and Information Science, 309, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. — 107 p. / P. 80—91.
- [3]. Shirokov I. B. The Multitag Microwave RFID System with Extended Operation Range / I. B. Shirokov // In book Chipless and Convention Radio Frequency Identification: Systems for Ubiquitous Tagging, IGI Global, 2012. — 344p. / P. 197—217.
- [4]. Shirokov I. B. The Multitag Microwave RFID System / I. B. Shirokov // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 57, Issue 5, Part 2, May 2009. — P. 1362 — 1369.
- [5]. Широков И. Б. Вычисление среднего арифметического значения аналогового сигнала средствами микроконтроллеров / И. Б. Широков // Міжнародний НТ журнал Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. № 2 2005.— С. 62—67.
- [6]. Широков И. Б. Распределенная антенная решетка пассивного радиолокатора / И. Б. Широков // Сб. научн. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ, Севастополь, 2004. Вып. 2(5). — С. 129—134.
- [7]. Широков И. Б. Контроль перемещения объектов в задачах складского учёта / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, Е. А. Редькина // Сб. научн. трудов академии ВМС им. П.С. Нахимова, Севастополь, Вып. 3 (15). 2013. — С. 98—104.
- [8]. Широков И. Б. Микроволновый измеритель состава газовой среды / И.Б. Широков, Сердюк И. В. Коваль Н. В. // Вісник СевНТУ. Вип. 131, Серія: Інформатика, електроніка, зв'язок: зб. наук. пр. / СевНТУ. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2012. — С.180—184.
- [9]. Широков И. Б. Исследование влияния шумов в радиоканале на работу системы синхронизации опорных генераторов / И. Б. Широков, И. В. Сердюк // Сборник научных трудов «Радиотехника». — Харьков: ХНУРЕ, 2011. — Вып. 166. — С. 245—253.
- [10]. Гимпилевич Ю. Б. Обобщенная математическая модель гомодинного преобразователя частоты при дискретном изменении фазы зондирующего сигнала / Ю. Б. Гимпилевич, И. Б. Широков, С. Н. Поливкин // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. Харьков, 2010. Вып. 161. — С. 119-125.
- [11]. Гимпилевич Ю. Б. Исследование амплитудных и фазовых флуктуаций электромагнитной волны, вызываемых атмосферной турбулентностью / Ю. Б. Гимпилевич, И. Б. Широков // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. Апрель 2010.— Т. 53. — № 4. — С. 28—36.
- [12]. Широков И. Б. Исследование воздействия фазового шума на систему синхронизации генераторов через атмосферный канал связи / И. Б. Широков,

- И. В. Сердюк // Сб. научн. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ, Севастополь, 2010. Вып.1 (1) С. 48 — 53.
- [13]. Широков И. Б.. Моделирование воздействия аддитивного шума на систему синхронизации генераторов через атмосферный канал связи / И.Б. Широков, И.В. Сердюк // Сб. научн. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ, Севастополь, 2008. Вып.2 (15) С. 69 — 73.
- [14]. Gimpilevich Yu. B. Generalized mathematical model of homodyne frequency conversion method under a periodic variation in sounding signal phase shift / Yu. B. Gimpilevich, I. B. Shirokov // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). 2007, Vol. 66, Issue 12.— P. 1057—1065.
- [15]. Широков И. Б.. Анализ работы системы фазовой автоподстройки частоты первого порядка при синхронизации двух генераторов через атмосферный канал связи с аддитивным шумом / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, Д. В. Сеницын // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП: Сб. науч. тр. Севастополь: Изд-во СНУЯЕтаП, 2007. — С. 214 — 224.
- [16]. Shirokov I. B. The analysis of metrological features of the homodyne method of frequency transformation / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich, G. V. Jandieri // *Georgian Engineering News*, No 2, 2007. — P. 38—45.
- [17]. Широков И. Б. Использование гомодинных методов для обнаружения подводных объектов на контролируемой акватории / И. Б. Широков, Сербин А. М. // Сб. научн. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ, Севастополь, 2006. — Вып.1 (9). — С. 157—163
- [18]. Гимпилевич Ю. Б. Обобщенная математическая модель гомодинного метода преобразования частоты при периодическом изменении фазового сдвига зондирующего сигнала / Ю. Б. Гимпилевич, И. Б. Широков // *Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* — Харьков, 2006. — Вып. 145. — С. 185—189.
- [19]. Гимпилевич Ю. Б. Гомодинное преобразование частоты при неточной установке диапазона изменения фазового сдвига зондирующего сигнала / Ю. Б. Гимпилевич, И. Б. Широков // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2006, Т.49, № 10.— С. 54—63
- [20]. Гимпилевич Ю. Б. Влияние нелинейности изменения фазового сдвига зондирующего сигнала на погрешность гомодинного преобразователя частоты / Ю. Б. Гимпилевич, И. Б. Широков // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2006, Т.49, № 12.— С. 20—28
- [21]. Широков И. Б. Контроль параметров вещества в пищевой промышленности радиоволновыми гомодинными методами / И.Б. Широков, С.Н. Поливкин // НТРЖ ОО «Белорусской инженерной академии» «Инженерный вестник», 1(21)/3, Минск, 2006. — С. 296—298.
- [22]. Широков И. Б. Исследование микрополосковых узлов микроволнового гомодинного преобразователя / И.Б. Широков, И.В.Сердюк, М.Л. Арутюнян // *Вестник СевГТУ*. Вып. №74: Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — С. 148 — 153.
- [23]. Широков И. Б. Гомодинный СВЧ измеритель влажности многокомпонентной смеси / И.Б. Широков, С. Р. Зиборов, С.Н. Поливкин // *Вестник СевГТУ* № 74,

Севастополь, 2006. — С. 154—162.

- [24]. Широков И. Б. Цифровой измеритель атмосферного давления / И. Б. Широков, О. В. Шабалина, А. М. Сербин, М. А. Дурманов // Вестник СевГТУ № 68, Севастополь, 2005. — С. 165—173.
- [25]. Широков И. Б. Использование гомодинных методов в задачах навигации в прибрежной зоне / И. Б. Широков, В.В. Бондюк, А.М. Сербин // Сб. научн. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ, Севастополь, Вып.1(7) 2005. — С. 38—43.
- [26]. Широков И. Б. Измерение дальности фазовым методом / И. Б. Широков, В. В. Бондюк // Сб. научн. трудов СВМИ им. П.С. Нахимова ВМС ВСУ, Севастополь, Вып.1(4), 2004. — С. 152—155.
- [27]. Широков И. Б. Выбор разрядности дискретного фазовращателя в задачах исследования характеристик канала связи гомодинными методами / И. Б. Широков, С. Н. Поливкин // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2004. Вып. 137. — С. 36—43.
- [28]. Широков И. Б. Устранение погрешности измерения скорости потока вещества путем учета изменения его электрофизических параметров / И.Б. Широков, С.Н. Поливкин // Міжнародний НТ журнал Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. № 1, 2004. — С. 155—158
- [29]. Зиборов С.Р. Бесконтактный измеритель перемещений подвижной детали / С.Р. Зиборов, И. Б. Широков // Вестник СевГТУ № 58, Севастополь, 2004. — С. 73—81.
- [30]. Широков И. Б. Калибровка доплеровских измерителей скорости / И.Б. Широков, В. М.Иськів // НТВ «Безпека дорожнього руху України», №3(18), 2004. — С. 76—79.
- [31]. Широков И. Б. Повышение стабильности частоты микроволнового генератора / И. Б. Широков, Д. В. Сеницын, С.Н Поливкин // Вестник СевГТУ № 68, Севастополь, 2005.— С. 159—165.
- [32]. Широков И. Б. Широкополосный управляемый СВЧ фазовращатель / И. Б Широков, С. Р. Зиборов, Д. В. Сеницын // Вестник СевГТУ № 60, Севастополь, 2004. — С.140—146.
- [33]. Широков И. Б. Экологический мониторинг: измерение радиуса зон загрязнения приземного слоя атмосферы вблизи промышленных объектов / И. Б. Широков, О. В. Шабалина // РАН, Научно- аналитический журнал «Инженерная экология» № 5 2004, С.51 — 58.
- [34]. Широков И. Б. К вопросу измерения флуктуаций амплитуды и набега фазы радиоволн / И. Б. Широков, С. А. Шабан // Міжнародний НТ журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». — №1, 2002. — С. 72—77.
- [35]. Широков И. Б. Алгоритм быстрого вычисления среднего значения квадрата аналогового сигнала / И. Б. Широков, С. Р. Зиборов // Вестник СевГТУ № 41, Севастополь, 2002. — С. 101—107.
- [36]. Патент № 102751 Україна, МПК H03F 3/189, H03F 3/19, H03F 3/04. Однопортовый резонансный транзисторный підсилювач Широкова / І. Б. Широков, Заявитель Широков І. Б. — № a201114351, заявл. 05.12.2011, опубл. 12.08.2013, Бюл.

№ 15. — 6 с.

- [37]. Патент № 100897 Україна, МПК G01R 29/08, G01S 13/00. Спосіб збільшення дальності дії системи багатоабонентної радіочастотної ідентифікації / Широков І. Б. Заявитель Широков І. Б. — № а201100198, заявл. 05.01.2011, опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3. — 6 с.
- [38]. Патент № 100816, Україна, МПК G01N 22/00, G01F 13/00. Спосіб визначення відсоткового вмісту води в суміші діелектрик-вода при зміні вмісту води в суміші в широких межах / І. Б. Широков, Заявитель Широков І. Б. — № а201113955, заявл. 28.11.2011, опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2. — 7 с.
- [39]. Патент № 94529 Україна, МПК G01S 13/32. Спосіб вимірювання дальності / І. Б. Широков, Заявитель Широков І. Б. — № а201003481, заявл. 25.03.2010, оп. 10.05.2011, Бюл. № 9. — 5 с.
- [40]. Патент № 93645 Україна, МПК G01S 13/32. Спосіб виміру відстані від вимірювальної станції до ретранслятора / І. Б. Широков, Заявитель Широков І. Б. — № а201008070 заявл. 29.06.2010, оп. 25.02.2011, Бюл. № 4. — 7 с.
- [41]. Патент № 91956 Україна, МПК А61В 5/02, Е21F 11/00, Н04В 5/00. Датчик перманентного контролю серцевого ритму шахтаря / Широков І. Б.; Заявитель Широков І. Б. — № а201003125, заявл. 18.03.2010, опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. — 5 с.
- [42]. Патент № 91937 Україна, МПК Н03М 1/00, Н04L 25/00. Спосіб багатоабонентної радіочастотної ідентифікації / Широков І. Б. Заявитель Широков І. Б. — № а200902165, заявл. 12.03.2009, опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. — 5 с.
- [43]. Патент № 79787, Україна, МПК G08G 5/00. Спосіб автоматичного вирівнювання подовжньої осі літального апарата відносно осі злітно-посадкової смуги / Широков І. Б., Заявитель Широков І. Б. — № 20041210295, заяв. 14.12.2004, оп. 25.07.2007, Бюл. № 11. — 7 с.
- [44]. Патент № 76110 Україна, МПК G01R 29/08. Спосіб визначення механізму поширення радіохвиль / Широков І. Б.; Заявитель та патентовласник Севастопольський Державний Технічний Університет. — № 2003010059; заяв. 02.01.2003, опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
- [45]. Патент № 104534 Україна, МПК Н03F 3/189, Н03F 3/19, Н03F 3/04. Каскадний однопортовий резонансний транзисторний підсилювач / І. Б. Широков, Д. В. Лялюк, Заявитель Широков І. Б. — № а201215021, заявл. 27.12.2012, опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. — 5 с.
- [46]. Патент № 104437 Україна, МПК G01S 13/32. Спосіб вимірювання дальності / І. Б. Широков, І. В. Каминін, Заявитель Широков І. Б. — № а201105991, заявл. 13.05.2011, опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. — 6 с.
- [47]. Патент № 103421 Україна, МПК Н03L 7/00, Н04L 27/00. Спосіб формування мікрохвильових сигналів з малим кроком сітки частот / Широков І. Б., Білокінь Д. С. Заявитель та патентовласник Широков І. Б. — № а201207955б заяв. 27.06.2012, опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19.
- [48]. Патент № 97737 Україна, МПК G01R 29/08, G01S 3/46. Спосіб визначення кута приходу радіохвиль / Широков І. Б., Скорик І. В., Каминін І. В. Заявитель та патентовласник Широков І. Б. — № а201012537, заяв. 25.10.2010, оп. 12.03.2012, Бюл. № 5.

- [49]. Патент № 95712, Україна, МПК G01N 22/00, A 62 B 15/00, E 21 F 17/00; Спосіб контролю змін інтегрального складу газового середовища / Широков І. Б., Сердюк І. В.; Коваль Н. В.; Заявитель Широков І.Б. — № а201003124, заяв. 18.03.2010; опубл. 25.08.2011, Бюл.№ 16. — 8 с.
- [50]. Патент № 91951, Україна, МПК G01R 29/08, G01R 25/00, H04B 7/00, G01S 3/14, G01S 3/00, H01Q 3/00. Пристрій для виміру флуктуацій набігу фази та кутів приходу мікрохвиль / Широков І. Б. Сердюк І. В.; Заявитель та патентовласник Широков І. Б., Сердюк І. В. — № а200909683 заяв. 22.09.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. — 6 с.
- [51]. Патент № 82190, Україна, МПК G01N 22/00, G01F 13/00, G01F 1/66. Пристрій для визначення швидкості і якісного складу речовини / Широков І.Б., Поливкин С.Н. Заявитель Севастопольский национальный технический университет. — № 20041109058, Заявл. 05.11. 2004, опубл 25.03.2008, Бюл. № 6. — 7 с.
- [52]. Патент № 76182, Україна, МПК G01N 22/00, G01F 13/00. Спосіб визначення швидкості і якісного складу речовини в потоці / Широков І. Б., Поливкин С.Н.; Заявитель Широков І. Б. — № 2004021397, заявл. 26.02.2004, опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7. — 7 с.
- [53]. Патент № 58814А, Україна, МПК G01R 29/08. Спосіб вимірювання флуктуацій набігання фази і кутів приходу радіохвиль / Широков І. Б., Шабан С. А.; Заявитель та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. — №2002108629 заяв. 30.10.2002, опубл. 15.08.2003, Бюл. № 8.
- [54]. Патент № 53184, Україна, МПК G01N 22/00 A62B 15/00. Вимірник змін інтегрального складу повітря в шахті // Широков І. Б. Сердюк І.В.; Заявитель Широков І.Б. — № u201003863, заяв. 6.04.2010; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 18. — 3 с.
- [55]. А.С.1730689 (СССР), МПК H01P 1/185. Фазовращатель / Широков И. Б., Павленко С. Е.; Заявитель Севастопольский приборостроительный институт. — № 4628928; заяв. 30.12.88, опубл. 30.04.1992, Бюл. № 16.
- [56]. А.С.1718149 (СССР), МПК G01R 29/08. Способ определения угла прихода радиоволн / Широков И. Б., Лобкова Л. М., Иськив В. М.; Заявитель Севастопольский приборостроительный институт. — № 4648969; заяв. 09.02.1989, опубл. 07.03.1992, Бюл. № 9.
- [57]. А.С.1486942 (СССР), МПК G01R 19/04, 25/00. Устройство для измерения амплитуды и разности фаз / Широков И. Б., Лобкова Л. М., Слезкин В. Г.; Заявитель Севастопольский приборостроительный институт. — № 4283326; заявл. 05.06.1987, оп. 15.06.1989, Бюл. № 22.
- [58]. Shirokov I. B. Microwave Autodyne Sensor for Monitoring of Cardiac Rhythm of Mines Workers / I. B. Shirokov // IEEE Proc. of 4th IFIP International Conference on New Technologies Mobility and Security, Paris, France, 7—10 February, 2011. — 4 p.
- [59]. Shirokov I. B. Experimental Investigation of Amplitude and Phase Progression Fluctuation on Microwave Line-of-Sight Link / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich // IEEE Proc. of AP-S & CNC/USNC/URSI Symposium, Toronto, Ontario, Canada, 11-17 July, 2010. — 4 p.
- [60]. Shirokov I. B. Simulation and Spectral analysis of frequency converter of device for 3D measurements of turbulent air movement / I. B. Shirokov, I. Skorik, I. Kamynin //

- IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'10), Honolulu, Hawaii, USA, 25-30 July, 2010 — P. 1074—1076.
- [61]. Shirokov I. B. Microwave Propagation in a Surface Atmosphere Layer on Land-Sea Boundary / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich, G. V. Jandieri // IEEE Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference, APMC'10. Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 7-10 December, 2010. — P. 2123—2126.
- [62]. Shirokov I. B. Use of Homodyne Methods of Microwave Phase Measurements in a Task of Precision Indoor Positioning / I. B. Shirokov // IEEE Proc. of Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), ETH Zurich, Campus Science City (Hoenggerberg), Switzerland, 15-17 September, 2010. — 3 p.
- [63]. Shirokov I. B. Near-field amplitude and phase measurements in antenna aperture plane / I. B. Shirokov // 5th Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Ground and Space Applications, TTC'10, at the European Space Technology Centre (ESTEC) in Noordwijk, The Netherlands, 21-23 September, 2010. — 5 p.
- [64]. Shirokov I. B. Correction of Target Data Taking into Consideration the Troposphere Refractivity / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich, G. V. Jandieri, I. V. Serdyuk // IEEE Proc. Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'09, , Cape Town, South Africa, Vol. 2, 12-17 July, 2009. — P. 745—748.
- [65]. Shirokov I. B. The Investigation of Phase Synchronization of Reference Oscillators through Atmospheric Channel / I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk // IEEE Proc. Of 4th International Waveform Diversity & Design Conference, Radisson Resort Worldgate, Kissimmee, FL, USA, 8-13 February, 2009. — P. 277—281.
- [66]. Shirokov I. B. The Investigation of Phase Synchronization of Reference Oscillators through Atmospheric Channel / I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk // The third European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 23-27 March, 2009. — P. 323—326.
- [67]. Shirokov I. B. Investigation of synchronization system in a framework of measurements of microwave phase progression on an opened links / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich, I. V. Serdyuk // IEEE Proc. of International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems COMCAS'09, Tel Aviv, Israel, 9-11 November, 2009, P.1-4.
- [68]. Shirokov I. B. The Measurement of Angle-of-arrival of Microwave in a Task of Precision Landing of Aircraft / I. B. Shirokov Ponyatenko A. Kulish O. // Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS'08, Cambridge, MA, USA, 2-6 July, 2008. — P. 153—159.
- [69]. Shirokov I. B. Estimation of an Error on Phase Progression Measurement on Microwave Line-of-Sight Link / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich, G. V. Jandieri // IEEE Proc. of Loughborough Antennas & Propagation Conference, Loughborough, UK, 17-18 March 2008. — P. 81—84.
- [70]. Shirokov I. B. Investigation of reference oscillator frequency instability influence on the accuracy of homodyne measurements of Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links / I. B. Shirokov, I.V. Serdyuk, // XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science Union Radio Scientifique Internationale (URSI). Chicago, Illinois, USA, 07-16 August, 2008. — 4 p.

- [71]. Shirokov I. B. The Elimination of Error of Measurement of Substance Flow Speed by the Accounting of Variation of its Electrophysical Parameters / I. B. Shirokov, S. N. Polivkin, Gimpilevich Yu. B., Serdyuk I. V. // IEEE Proc. of 25th Convention Of Electrical And Electronics Engineers In Israel, Eilat, Israel, 2-5 December, 2008. — P. 475—478.
- [72]. Shirokov I. B. The Compensating of Medium Parameters Influence on 3D measurement of Speed and Direction of Turbulent Air Movement / I. B. Shirokov, S. N. Polivkin, Yu. B. Gimpilevich, I. V. Serdyuk // IEEE 25th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Eilat, Israel, 2-5 December, 2008. — P. 471—474.
- [73]. Shirokov I. B. The Device for 3D Measurement of Speed and Direction of Turbulent Air Movement / I. B. Shirokov, S. N. Polivkin, A. Korobitsyn, V. K. Dyurba // IEEE Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'07, Barcelona, Spain, 23-27 July, 2007.— P. 635—638.
- [74]. Shirokov I. B. The simulation of phase synchronization of reference oscillators through atmospheric channel / I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk // 2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007) EICC, Edinburgh, UK, 11-16 November, 2007.— 6 p.
- [75]. Shirokov I. B. The Positioning of Space Objects Based on Microwave Angle-of-Arrival Measurements / I. B. Shirokov // The 4th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, Darmstadt, Germany, 11-14 September, 2007. — 7 p.
- [76]. Shirokov I. B. Measurements of the Radius of Atmosphere Surface Layer Pollution near the Plant with Microwave / I. B. Shirokov // IEEE Proc. Int. Conf. Urban URS Joint Event'07, Paris, France, 11-14 April, 2007.— 5 p.
- [77]. Shirokov I. B. Object Positioning based on New Approach to Microwave Angle-of-Arrival Measurements / I. B. Shirokov // Proc. Int. Conf. The 10h World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, FL, USA, Vol. IV, 16-19 July, 2006. — P. 257-259.
- [78]. Shirokov I. B. The Phase Synchronization of Reference Oscillators Through Atmospheric Channel / I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk, G. V. Jandieri, D. V. Sinitsyn // IEEE Proc. of Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'06, Denver, Colorado, USA, 31 July-4 Aug, 2006. —Vol.II. — P. 1029—1031.
- [79]. Shirokov I. B. Multipath Angle-Of-Arrival, Amplitude, and Phase Progression Measurements on Microwave Line-of-Sight Links / I. B. Shirokov, G. V. Jandieri, D. V. Sinitsyn, D. I. Martynjuk // IEEE Proc. of First European Conf. on Antennas and Propagation. — Nice, France, EuCAP'06, November, 2006. — 6 p.
- [80]. Shirokov I. B. The 3D Measurement of Speed and Direction of Turbulent Air Movement / I. B. Shirokov, O. V. Shabalina, F. E. Palgov // IEEE Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'06, Denver, Colorado, USA 31 July – 4 August, 2006.— Vol. II.— P. 3470—3473.
- [81]. Shirokov I. B. Theoretical Modeling and Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links in Relation with Natural Medium Conditions / I. B. Shirokov, S. Shaban, S. Polivkin, D. Sinitsyn // IGARSS'03, Conf. Proc. Toulouse, France, Vol. VII. 21-25 July, 2003. — P.

4177—4179.

- [82]. Shirokov I. B. The Determination of Microwave Propagation Mechanism on Line-of-Sight Links / I. B. Shirokov // IEEE Proc. Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'03 Toulouse, France, Vol. VII, 21-25 July, 2003. — P. 4175—4176.
- [83]. Shirokov I. B. Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links / I. B. Shirokov, S. A. Shaban // IEEE Proc. Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'02, Toronto, Canada, 24-28 June, 2002. — Vol. VI.— P. 3559—3560.
- [84]. Shirokov I. B. New Approach to Equipment for Angle-of-Arrival Measurements on Microwave / I. B. Shirokov // IEEE Proc. Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing IGARSS'02, Toronto, Canada, 24-28 June, 2002. — Vol. V.— P. 2626—2627.
- [85]. Shirokov I. B. Amplitude and Phase Progression Measurements on Microwave Line-of-Sight Links / I. B. Shirokov, M.V. Ivashina // IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'01), Sydney, Australia, 9-13 July, 2001.— Vol. VII.— P. 3144—3145.
- [86]. Широков И. Б. Многоканальный гомодинный измеритель флуктуаций амплитуды и набега фазы микроволнового сигнала / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, Е. А. Редькина, Н. И. Абрамашвили // IEEE матер. 23-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, Крым, Украина, 9-13 сентября 2013.— С. 971—973.
- [87]. Широков И. Б. Высокостабильный опорный генератор для синтезатора частот гомодинной системы / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, И. Ф. Филиппов // IEEE матер. 23-й междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 9-13 сентября 2013. — С. 990—991.
- [88]. Широков И. Б. Обзор транспондеров для системы позиционирования объектов / И. Б. Широков, И. В. Камынин, Д. С. Белоконь // IEEE матер. 22-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, Крым, Украина. 10-14 сентября 2012. — С. 879-880.
- [89]. Широков И. Б. Формирование микроволновых сигналов с малым шагом сетки частот / И. Б. Широков, Д. С. Белоконь // IEEE матер. 22-й междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 10-14 сентября 2012. — С. 346—347.
- [90]. Широков И. Б. Измерение расстояния до объекта / И. Б. Широков, Камынин И. В. // IEEE матер. 21-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 12-16 сентября, 2011. — С. 931—932.
- [91]. Широков И. Б. Микроволновая система контроля изменения состояния газовой среды в шахтах / И.Б. Широков, Коваль Н. В., Коваль Е. В. // IEEE матер. 20-й междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 13-17 сентября 2010. — С. 1081—1082.
- [92]. Широков И. Б. Локальное позиционирование объектов / И. Б. Широков И. В. Камынин, И. В. Скорик // IEEE матер. 20-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 13-17 сентября 2010. — С. 1059—1060.

- [93]. Широков И. Б. Гомодинный микроволновый измеритель влажности многокомпонентной смеси / И. Б. Широков, С. Н. Поливкин // IEEE матер. 19-й междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 14-18 сентября 2009. — Т. 2. — С. 847—848.
- [94]. Широков И. Б. Моделирование влияния фазового шума на работу системы синхронизации генераторов / И. Б. Широков, И. В. Сердюк // IEEE матер. 19-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 4-18 сентября 2009. — Т. 2. — С. 830 — 831.
- [95]. Широков И. Б. Многоабонентная система радиочастотной идентификации / И. Б. Широков, М. А. Дурманов // IEEE матер. 17-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 10-14 сентября 2007. — С. 756—757.
- [96]. Широков И. Б. Анализ энергетики линии связи при исследовании распространения радиоволн гомодинным методом / И. Б. Широков, И. В. Сердюк // IEEE матер. 17-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 10-14 сентября 2007.— С. 830—832.
- [97]. Широков И. Б. Моделирование процессов синхронизации двух опорных генераторов через атмосферный канал связи / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, Д. В. Сеницын, Д. Мартынюк // IEEE Матер. 16-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Крым, Украина, 11-15 сентября, 2006. — Т.1. — С. 383 — 385.
- [98]. Широков И. Б. Позиционирование подвижного объекта на плоскости гомодинным методом / И. Б. Широков, Кошовский Я. И., Зимин С. М. // IEEE матер. 16-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 11-15 сентября, 2006. — Т.1. — С. 891—892.
- [99]. Широков И. Б. Применение гомодинных измерителей параметров вещества в пищевой промышленности / И. Б. Широков, С. Н. Поливкин // IEEE матер. 16-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 11-15 сентября, 2006. — Т.1. — С. 859-860.
- [100]. Широков И. Б. Измерение малых доплеровских сдвигов частоты микроволновым гомодинным измерителем скорости / И.Б. Широков, А. М. Сербин, М. Л. Арутюнян, Ф. Е. Пальгов // IEEE матер. 16-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 11-15 сентября, 2006. — Т.1. — С. 827—828.
- [101]. Широков И. Б. Компенсация погрешности измерения скорости потока вещества путем учета его физических параметров / И. Б. Широков, С. Н. Поливкин, И. В. Сердюк // IEEE матер. 15-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 12-16 сентября 2005. — Т. 2. — С. 813—814
- [102]. Широков И. Б. Контроль содержания влаги в сыпучих материалах микроволновыми методами / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, М. Арутюнян, Д. С. Стрельцов // I IEEE матер. 15-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 12-16 сентября 2005. — Т. 2. — С. 817—818.
- [103]. Широков И. Б. Принципы реализации и область применения гомодинных ме-

- тодов измерений / И. Б. Широков, Д. В. Сеницын, О. В. Шабалина // IEEE матер. 14-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 13-17 сентября 2004. — С. 635—637.
- [104]. Широков И. Б. К вопросу устранения неоднозначности фазового микроволнового измерителя малых дистанций / И. Б. Широков // IEEE матер. 11-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 10-14 сентября 2001 г., Севастополь, Крым, Украина: материалы конф. — Севастополь, 2001. — С. 662—663.
- [105]. Широков И. Б. Микроволновый измеритель малых дистанций / И. Б. Широков, И. А. Тарелкин, Е. А. Хайрединов // IEEE матер. 10-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 11-15 сентября 2000. — С. 536—537.
- [106]. Широков И. Б. Измерение уровня жидкости микроволновым методом / И. Б. Широков // IEEE матер. 9-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 13-16 сентября 1999. — С. 425—426.
- [107]. Широков И. Б. Цифровые методы формирования диаграммы направленности приемной антенной решетки / И. Б. Широков // IEEE матер. 8-й междунар. конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина, 14-17 сентября 1998 — Т. 2. — С. 478—479.
- [108]. Широков И. Б. Современный подход к синтезу антенной решетки / И. Б. Широков // IEEE матер. 7-й Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Крым, Украина 15-18 сентября 1997. — Т. 2. — С. 521—523.
- [109]. Shirokov I. B. Positioning and identification of the objects in warehouse accounting / I. B. Shirokov, I. Serdyuk, I. Filippov // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Lviv-Slavske, Ukraine, 25 February-1 March, 2014. — P. 805.
- [110]. Shirokov I. B. Developing of Homodyne Detection at Equipment Design for Experimental Investigation of Microwave Propagation / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Lviv-Slavske, Ukraine, 21-24 February, 2012. — P. 32—35.
- [111]. Shirokov I. B. The Modelling of Atmospheric Channel with the Phase Noise / I. B. Shirokov, Yu. B. Gimpilevich, I. V. Serdyuk / IEEE Proc. of Intern. Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Lviv-Slavske, Ukraine, 23-27 February, 2010. — P. 92.
- [112]. Широков И. Б. Взаимное позиционирование космических объектов микроволновыми методами в ближней зоне / И. Б. Широков // Междунар. научн. практ. конф. «Космические исследования в государствах участниках СНГ: интеграция, потенциал развития и правовой аспект», Совет федерации Федерального собрания Российской Федерации, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, 3-5 октября 2011. — 5 с.
- [113]. Shirokov I. B. The device for remote monitoring of human's heartbeat / I. B. Shirokov, A. V. Slesareva, A. L. Korepanov // IEEE Proc. of Int Workshop

- “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals”, Sevastopol, Ukraine, 6-10 September, 2010, P. 195—196.
- [114]. Shirokov I. B. Wearable Microwave Autodyne Sensor for Monitoring of Heart Rhythm and Breath / I. B. Shirokov // IEEE Proc. of Int. Workshop “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals”, Sevastopol, Ukraine, 17-21 September, 2012. — P. 126—128.
- [115]. Shirokov I. B. The solving of ecological monitoring task with microwave / I. B. Shirokov Shabalina O. V. // IEEE Proc. Int. Workshop “Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals,” Sevastopol, Ukraine, 19-22 September, 2004. — P. 190—192.
- [116]. Широков И. Б. Гомодинный измеритель флуктуаций амплитуды и набега фазы микроволнового сигнала / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, М. А. Дурманов, Н. В. Коваль // Матер. VI Междунар. научн.-технич. конф. «Проблемы телекоммуникаций», Киев, Украина, 24-27 апреля 2012. — С. 359—361.
- [117]. Shirokov I. B. The Method of Determination of the Amplitude and Phase Distribution in Antenna Aperture Plane / I. B. Shirokov // IEEE IV International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'03, Sevastopol, Ukraine, September 8-12, 2003. — Vol. I. — P. 387—388.

Широков И. Б. Измерительный комплекс для исследования статистических характеристик антенн в линейном ортогональном поляризованном базисе / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 — Радиоизмерительные приборы (включая радиоспектрометры). — Севастополь, 1984. — 24 с.

АНОТАЦІЯ

Широков І.Б. Гомодинні методи та засоби вимірювання амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку радіотехнічних систем. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 — радіотехнічні та телевізійні системи. — Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

У дисертації вирішена актуальна наукова проблема, що полягає у створенні нових гомодинних методів і засобів апаратурного аналізу амплітудних і фазових характеристик каналів зв'язку радіотехнічних систем. Розроблено нові методи вимірювання флуктуацій амплітуди, набігу фази і кутів приходу радіохвиль. Досліджено метрологічні особливості гомодинного перетворювача. Розроблено новий метод синхронізації опорних низькочастотних генераторів. Досліджено вплив неоднорідностей показника заломлення на рівень амплітудних і фазових флуктуацій. Проведено експериментальні дослідження з мікрохвильового поширення на приземній і морській трасах. Показано можливість застосування гомодинних методів для контролю параметрів технологічних процесів, побудови систем RFID і позиціонування. Описано підхід до проектування обладнання для тривимірних вимірювань швидкості і напрямку руху повітряних мас. Описано застосування гомодинних методів у побудові діагностичного медичного обладнання, для організації антенних вимірювань, управлінні роботою антенних решіток. Результати теоретичних досліджень викори-

стані у розробці приладів різного призначення, що застосовуються в науці, промисловості, медицині.

Ключові слова: гомодинне перетворення, набіг фази, флуктуації амплітуди, флуктуації фази, зонduючий сигнал, спектральний аналіз, амплітудно-фазовий розподіл електромагнітного поля, кут приходу радіохвиль.

АННОТАЦІЯ

Широков И.Б. Гомодинные методы и средства измерения амплитудных и фазовых характеристик каналов связи радиотехнических систем. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.17 — радиотехнические и телевизионные системы. — Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема, заключающаяся в необходимости создания новых гомодинных методов и средств аппаратурного анализа амплитудных и фазовых характеристик каналов связи радиотехнических систем, обеспечивающих расширение функциональных возможностей и повышение точности этого анализа.

Развита концепция измерений амплитудных и фазовых флуктуаций электромагнитной волны. В рамках этой концепции разработаны новые методы измерения флуктуаций амплитуды, набега фазы и углов прихода радиоволн, распространяющихся в открытом канале связи. Разработан новый метод определения механизма распространения радиоволн. Развита концепция организации многоканальных измерений флуктуаций амплитуды и набега фазы радиоволн.

Разработана обобщенная математическая модель классического гомодинного преобразователя сигналов. Исследовано влияние неточности установки диапазона изменения фазового сдвига сигнала на погрешность гомодинного преобразования. Исследовано влияние нелинейности изменения фазового сдвига зондирующего сигнала на погрешность гомодинного преобразования. Разработана обобщенная математическая модель микроволнового гомодинного преобразователя при дискретном изменении фазы зондирующего сигнала, обоснован выбор числа ступеней дискретного фазовращателя. Доказано, что применение дискретного фазовращателя делает систему стабильной в работе, устойчивой к воздействию дестабилизирующих факторов (температуры, старению и др.) и обеспечивает повторяемость результатов.

Развита теория синхронизации опорных низкочастотных генераторов в гомодинной измерительной системе. Разработан новый метод синхронизации опорных низкочастотных генераторов, предполагающий передачу сигнала синхронизации посредством модуляции/демодуляции сигнала несущей радиочастотного диапазона. Осуществлена оценка влияния дестабилизирующих факторов на работу канала синхронизации гомодинной измерительной установки. Доказано, что фазовые флуктуации в атмосферном канале связи практически не сказываются на качестве модулирующего сигнала, если сопоставимая длина волны модулирующего сигнала значительно больше длины измерительной трассы. Исследовано воздействие амплитудных и фазовых шумов на работу систему фазовой автоподстройки частоты. Показано, что ошибками синхронизации опорных генераторов, при известных допущениях,

можно пренебречь. Экспериментально исследовано воздействие шумов, генерируемых в эмулируемом канале связи, на процесс синхронизации опорных генераторов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические расчеты и компьютерное моделирование.

Исследовано влияние неоднородностей показателя преломления на трассе распространения радиоволн на уровень амплитудных и фазовых флуктуаций. Аналитические формулы для расчета поперечных корреляционных функций амплитудных и фазовых флуктуаций приведены к виду, позволяющему осуществить числовые расчеты. Проведены экспериментальные исследования по микроволновому распространению на приземной и морской трассах. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические расчеты.

Доказана возможность применения гомодинных методов в различных областях науки и техники, там, где предполагается использование волновых процессов любого рода. Показано, что использование канала связи как основного информативного звена, позволяет строить фазовую гомодинную систему, обладающую наивысшей точностью функционирования.

Показана возможность контроля содержания воды в многокомпонентной смеси или водотопливной эмульсии путем измерения набега фазы микроволнового сигнала, распространяющегося через смесь. Показано, что гомодинные методы позволяют с высокой точностью определять другие технологические параметры производства: скорость движения потока вещества и деталей механизмов, толщину радиопрозрачных материалов и т.п.

Доказано, что гомодинные методы позволяют существенно улучшить традиционные технические свойства систем RFID и позиционирования и, кроме того, реализовать принципиально новые. В частности, считыватель такой системы в состоянии обрабатывать сигналы нескольких транспондеров, одновременно находящихся в радиусе действия системы, их сигналы не подавляют друг друга. Показано, что использование интерферометрического метода, реализованного гомодинным методом преобразования сигналов, позволяет осуществлять привод и посадку летательных аппаратов на взлетно-посадочную полосу вплоть до его полной остановки и/или производить стыковку космических объектов там, где использование стандартных методов навигации либо не обеспечивает требуемой точности позиционирования, либо невозможно в принципе.

Описан подход к проектированию оборудования для трехмерных измерений скорости и направления движения воздушных масс, основанный на измерениях фазовой задержки акустической волны, распространяющейся в турбулентной атмосфере. Описано применение гомодинных методов при построении диагностического медицинского оборудования, при организации антенных измерений, управлении работой антенных решеток.

Результаты теоретических исследований использованы при разработке приборов различного назначения, применяемых в науке, промышленности, медицине и др.

Ключевые слова: гомодинное преобразование, набег фазы, флуктуации амплитуды, флуктуации фазы, зондирующий сигнал, спектральный анализ, амплитудно-фазовое распределение электромагнитного поля, угол прихода радиоволн.

SUMMARY

Shirokov I.B. Homodyne methods and instruments for measurements of amplitude and phase characteristics of communication links of radio engineering systems. — The Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree in speciality 05.12.17 — Radio Engineering and Television Systems. – Kharkov National Radio Electronic University, Kharkov, 2014.

In the thesis the actual scientific-technical problem consisting in necessity of creation of new homodyne methods and instruments of the hardware analysis of amplitude and phase characteristics of communication links of radio engineering systems is solved. New methods of measurement of fluctuations of amplitude, phase progression and angles-of-arrival of radio-waves are developed. Metrological features of homodyne converter are investigated. The new method of synchronization of basic low-frequency generators is developed. Influence inhomogeneities of refraction factor on level of amplitude and phase fluctuations is investigated. Experimental researches on microwave propagation on ground and sea links were spent. The possibilities of use of homodyne methods for the control of parameters of technological processes, design of systems of RFID and positioning are shown. The approach to designing of the equipment for three-dimensional measurements of speed and direction of air movement is described. The use of homodyne methods at the design of diagnostic medical equipment, at the creation of antenna measurements, at management of operation of antenna arrays is described. Results of theoretical researches are used by working out of the devices of different function applied in science, industry, medicine, etc.

Keywords: homodyne transformation, phase progression, amplitude fluctuation, phase fluctuation, test signal, spectral analysis, amplitude-phase distribution of electromagnetic field, angle-of-arrival of radio-waves.

Підп. до друку 25.07.2014. Формат 60x90 ¹/₁₆
Спосіб друку – ризографія
Умов. друк. арк. 1,9 Тираж 100 прим.
Зам. № _____ Ціна договірна.

99011, м. Севастополь, вул. Кулакова, б. 59

Віддруковано у типографії «Printex»