

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**Вдовиченко Єгор Іванович**

УДК 621.396.23

**УДОСКОНАЛЕННЯ РЕТРАНСЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ  
ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Величко Дмитро Анатолійович**,  
Інститут радіофізики і електроніки  
ім. О.Я. Усикова НАН України,  
відділ обробки радіосигналів  
старший науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Антіпов Іван Євгенійович**  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України,  
завідувач кафедри радіоелектронних пристроїв,

доктор технічних наук, професор  
**Баришев Ігор Володимирович**  
Національний аерокосмічний університет  
ім. Н.Є. Жуковського «ХАІ»  
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України,  
професор кафедри проектування радіоелектронних систем  
літальних апаратів

Захист відбудеться « 11 » березня 2013 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61002, г. Харків, пр-т Леніна 14, ХНУРЕ, к. 13.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету за адресою: 61002, г. Харків, пр-т Леніна 14, ХНУРЕ.

Автореферат розісланий «21» січня 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Потреба в інформації про нову продукцію зростає пропорційно квадрату розширення та вдосконалення виробництва. Тому необхідні все більш досконалі методи та пристрої вимірювання параметрів нових й удосконалених технічних об'єктів, технологічних процесів, нові прецизійні системи контролю і управління виробництвом. Актуальність розробки і вдосконалення методів вимірювання, контролю та технічної діагностики в самих різних областях діяльності сучасного суспільства підтверджується тим, що цим успішно займаються багато фірм і різні суспільства. В їх числі Українське та Російське товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики (НКТД), Американське товариство неруйнівного контролю (ASNT), Європейська федерація EFNDT, в якій можна відзначити фірми Saab Marine Electronics Aktiebolag, (Швеція, Гетеборг), Enraf B.V. Röntgenweg (Нідерланди), Anlagen Engineering Consulting (Германія, Нюрнберг), що займаються дослідженнями й розробками радіотехнічних засобів діагностики. Проблемам неруйнівного контролю та технічної діагностики присвячується велика кількість періодичних видань. На міжнародному симпозиумі IEEE EAST-WEST Design & Test Symposium (EWDTS 2011) доповідь [1], пов'язана з тематикою даної дисертації, була відзначена дипломом «For the best Regular Paper on EWDTS'11 Symposium and outstanding contribution in Design & Test».

В Україні вдосконалення засобів виміру, неруйнівного контролю і технічної діагностики набуло особливої актуальності у зв'язку з потребами економіки, необхідністю істотного підвищення енергоефективності, якості та конкурентоспроможності вироблюваної продукції на основі сучасних науково-технічних досягнень.

Одним із засобів, запропонованих у 1998 році для вдосконалення роботи інформаційно-вимірювальних радіосистем діагностики, в яких застосовується новий радіофізичний спосіб отримання інформації, є ретрансляційна вимірювальна система. В ній використовується подвійне поширення радіохвиль і подвійне відбиття від контрольованого об'єкта. Корисний ефект у ретрансляційних системах досягається не тільки за рахунок посилення взаємодії радіохвилі з простором поширення і контрольованим об'єктом, але і за допомогою просторово-часової фільтрації.

У зв'язку з цим актуальною є тема дисертаційних досліджень, яка направлена на розробку методів розвитку та удосконалення ретрансляційної системи діагностики технічних об'єктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з плановими НДР та ДКР:

- НДР «Дослідження радіофізичних та акустичних методів і засобів дистанційної діагностики антропогенних об'єктів та середовища поширення усередині та поблизу енергетичних та промислових підприємств» (Шифр «Діагностика») № ДР 0103U002262. Виконано в Інституті радіофізики та електроніки (ІРЕ) ім. О.Я. Усикова НАН України;
- НДР «Дослідження характеристик сигналів, розсіяних складними відбивачами природного й штучного походження при радіолокаційному й ретрансляційному

зондуванні» (Шифр „Діагностика-2”) № ДР 01.09U009005. Виконано в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України;

- ДКР «Створення єдиної радіопеленгаторної мережі дальньої дії» УИ-ДЯ.464421.001. ДКР виконувалась Харківським національним університетом радіоелектроніки та ЦККБ «Протон»;
- ДКР «Розробка макету пристрою цифрової обробки складних сигналів»; ДКР виконана ЦККБ «Протон».

Автор дисертації є співвиконавцем НДР та ДКР, наведених вище.

**Мета та завдання досліджень.** Метою дисертації є розробка методу перетворень і обробки сигналів ретрансляційної вимірювальної системи, що забезпечує глибоке придушення паразитних компонентів спектру сигналу, які виникають при перетвореннях в ретрансляторі, і квазіоптимального виділення корисного сигналу з суміші сигнал плюс вхідний шум.

Для досягнення поставленої мети треба було вирішити наступні задачі.

- Дослідити статистичні характеристики сигналу ретрансляційної вимірювальної системи.
- Вибрати метод придушення паразитних компонент спектру сигналу, що виникають при перетвореннях у ретрансляторі.
- Удосконалити метод визначення інформаційного параметру – фазового набігу та частоти прийнятого ретрансляційним вимірником коливання з урахуванням отриманих статистичних характеристик.
- Розробити функціональну схему ретрансляційного вимірювача, в якій виконуються необхідні перетворення сигналу, придушення паразитних компонент спектру та вхідних шумів.
- Оцінити статистичні характеристики інформаційного параметру сигналу розробленої ретрансляційної системи діагностики за допомогою імітаційного моделювання роботи апаратури, поширення та розсіяння радіохвиль об'єктом контролю.

**Об'єктом дослідження** є процес придушення паразитних компонент спектру сигналу, що виникають при перетвореннях в ретрансляторі, лінеаризація залежності інформаційного параметра – фазового набігу радіохвилі, що надійшла на вхід приймача вимірювальної системи, від відстані між вимірювачем і розсіювачем та квазіоптимальне виділення корисного сигналу з суміші сигнал плюс вхідний шум.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми перетворень і обробки сигналу, процедури оцінки інформаційного параметра – фазового набігу радіохвилі та її частот, статистичні характеристики сигналів ретрансляційних систем діагностики.

**Методи досліджень** – імітаційне моделювання процесів перетворення радіохвиль і сигналів, засновані на фундаментальних положеннях радіотехніки:

- на використанні байєсівського підходу, застосуванні методу огинаючих при обробці адитивної суми сигналів і паразитних коливань, на припущенні, що сума сигналу і шуму на обмеженому інтервалі є стаціонарним стохастичним процесом;

- на використанні рівняння скалярного поля дифракції Френеля-Кирхгофа при моделюванні процесів подвійного поширення і відбиття радіохвиль;
- на використанні методів теорії дискретних сигналів на кінцевих інтервалах при математичному описі процесів перетворення та обробки сигналів;
- на використанні методів максимальної апостеріорної ймовірності, прямокутних хвиль і цифрової фільтрації при визначенні інформаційного параметра – фазового набігу радіохвилі та частоти вихідного сигналу.

**Достовірність результатів та висновків**, що отримано в дисертаційній роботі, підтверджено коректним використанням строгого математичного апарату, збігом результатів теоретичних досліджень і моделювання, а також їх збігом з залежностями, отриманими експериментально в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному.

1. Вперше досліджено статистичні характеристики сигналу ретрансляційної вимірювальної системи міліметрового діапазону радіохвиль. Встановлено закони розподілу амплітуд, фаз, потужностей сигналів ретрансляційного вимірника при роботі із флуктуючим об'єктом чисельними методами та аналітично. Встановлено, що щільності розподілу амплітуд, фаз і потужностей ретрансляційних сигналів значно ширше відповідних щільностей розподілу радіолокаційних сигналів.
2. На основі статистичного аналізу отримано формули для оцінки фазового набігу й частоти сигналу, який прийнятий ретрансляційною системою. Показано, що переконливі, незміщені й ефективні оцінки фаз і частоти цього сигналу можуть бути отримані методом прямокутних хвиль і методом максимальної апостеріорної ймовірності. Встановлено умови, при яких один із зазначених методів має переваги перед іншим при використанні ретрансляційної системи діагностики.
3. Вперше виконано синтез аналого-цифрової ретрансляційної системи діагностики міліметрового діапазону радіохвиль із супергетеродинним приймачем, у якому реалізується ефективне придушення паразитних компонентів спектра, що виникають при перетвореннях у ретрансляторі та перебувають на малому віддаленні по частоті від корисного частотного компонента й від несучого коливання.
4. Розроблено метод аналого-цифрової обробки прийнятого сигналу, який дозволяє одержати інформацію про часову зміну запізнювання радіохвилі по її фазовому набігу з точністю, близької до потенційно досяжного значення. Метод використовує спеціально сформовані масиви вихідних цифрових даних про параметри коливальних зсуву, перетворених випромінюваного й прийнятого сигналів, а також сформований програмним способом масив перетворюючих коливальних.

**Практична значимість отриманих результатів** визначається наступним.

1. Вперше синтезовано ретрансляційну вимірювальну систему, що дозволяє реалізувати потенційно досяжні радіотехнічними системами точності виміру, які необхідні для підвищення якості контролю технічних об'єктів і фізичних параметрів середовища всередині й поблизу виробничих приміщень.
2. Методи синтезу ретрансляційної системи діагностики розроблено стосовно до використання сучасної елементної бази аналогової та цифрової електроніки, сучасних систем програмування й вперше реалізованих комплексних аналого-цифрових методів обробки сигналів. Вони можуть бути застосовані при ство-

ренні сучасних вимірювальних, контролюючих і керуючих систем, що потрібні при створенні нових технологічних процесів.

3. На основі імітаційного моделювання отримано результати, що підтверджують високий ступінь придушення паразитних компонентів спектра, які виникають при перетвореннях у ретрансляторі, і вхідних шумів приймача. Підтверджено мале відхилення від лінійного закону залежності фазового набігу радіохвилі ретрансляційної системи від дальності до об'єкту.

Отримані результати впроваджені у дослідження та розробки ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАН України, ЦККБ «Протон» і ХНУРЕ, в навчальні курси з підготовки магістрів і фахівців кафедр ОРТ, АПОТ і РЕС ХНУРЕ, що підтверджено актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, наведені в дисертації, отримано здобувачем самостійно й досить повно викладено у 15 наукових працях, опублікованих здобувачем у співавторстві (статті [2,6,7], тези [1,8,11,14,15]) та самостійно (статті [3,4,5], тези [9,10,12,13]). Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному.

В роботі [1], зазначеної дипломом EWDTs 2011, запропоновано використання білінійного перетворення комплексного коефіцієнту передачі аналогового фільтра-прототипу та розроблено його реалізацію при обробці сигналу ретрансляційного вимірювача; розроблено процедури розрахунку модуля й аргументу комплексного коефіцієнту передачі та схему цифрового фільтру. В роботах [2,8,11] розроблено процедури порівняння характеристик вибіркового масивів при статистичних дослідженнях сигналу; отримано закони розподілів, виконано аналіз і порівняння отриманих розподілів амплітуд, фаз і потужностей сигналів ретрансляційних та радіолокаційних систем. В роботах [6,14] розроблено процедури визначення інформації, яка міститься в спектральній складовій радіохвилі, перетвореної на трасі поширення і при розсіянні на контрольованому об'єкті, похибок вимірювання інформаційного параметру. В роботах [7,15] розроблено уніфіковані процедури моделювання випромінювання, розсіювання та поширення радіохвиль; цифровий спосіб обробки прийнятого та перетвореного сигналу, який застосовує масиви параметрів коливань генератора зсуву, гетеродину й випромінюваного сигналів; досліджено похибки визначення фазового набігу радіохвилі.

**Апробація результатів дисертаційних досліджень.** Наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних 9 міжнародних науково-технічних конференціях: International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006), (Lviv – Slavske, Ukraine, February 28 – March 4, 2006); міжнародній молодіжній науково-технічній конференції студентів, аспірантів і вчених «Молодь і сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій» РТ-2006 (Севастополь, Крим, Україна 2006 р., СевНТУ); 10-му ювілейному міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (Харків, Україна, 2006р. ХНУРЕ); 16-й міжнародній кримській конференції «НВЧ – техніка і телекомунікаційні технології» (Севастополь, Крим, Україна 2006 р., СевНТУ); 1-й міжнародній науковій конференції «Глобальні інформаційні системи. Проблеми і тенденції розвитку» ГІС-2007 (Хар-

ків-Туапсе, Україна-Росія 2006 р., ХНУРЕ); International Young Scientist Workshop on Optics, Photonics and Metamaterials, Kharkov, KNURE, 2009; 9-th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), (Sevastopol, Ukraine, September 9 – 12, 2011); 21-й міжнародній кримській конференції «НВЧ техніка й телекомунікаційні технології» (2011 CriMiKo), (Севастополь, Крим, Україна, 12-16 вересня, 2011р); IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI National Radio Science Meeting (APSURSI), Chicago, Illinois USA, 8-14 July, 2012.

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень отримані здобувачем самостійно та опубліковані в 15 друкованих роботах. З них 6 статей – у фахових виданнях, які входять до затвердженого переліку фахових видань України, 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях і форумах.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 103 найменування. Робота містить 112 машинописних сторінок основного тексту, 38 ілюстрацій, 2 таблиці та додатки на 4 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету і основні завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів роботи, її зв'язок з науковими програмами та планами НДР і ДКР, проведено огляд методів досліджень та особистий внесок здобувача, наведено інформацію про апробацію та публікації результатів досліджень, наведено результати реалізації та впровадження основних положень роботи.

В **першому розділі** наведено аналітичний огляд умов та розроблених методів роботи, задач та існуючих напрямків вдосконалення ретрансляційної системи міліметрового діапазону, обґрунтовано постановку задач дисертації.

Витяг інформації про контрольовані засоби за допомогою РТС засновано на зміні параметрів радіохвиль при поширенні й відбитті від об'єктів. При контролі технічних об'єктів необхідно реєструвати мікронні зсуви, тому в діагностиці застосовують міліметровий діапазон радіохвиль. Звичайний вплив контрольованого об'єкта на радіохвилю, яку використовує радіосистема, відбувається однократно. В ретрансляційних системах вплив контрольованого об'єкта й середовища поширення на радіохвилю підсилюється за рахунок подвійного проходження траєкторії поширення, подвійного відбиття від контрольованого об'єкта й просторово-часової фільтрації. На рис. 1 показано схему ретрансляційної системи, у якій позначено: 1 – радіолокаційний датчик, 2, 3 – антени, 4 – ретранслятор, 5 – лінія передачі даних, 6 – рефлектор, 7 – перешкоджаючий відбивач.

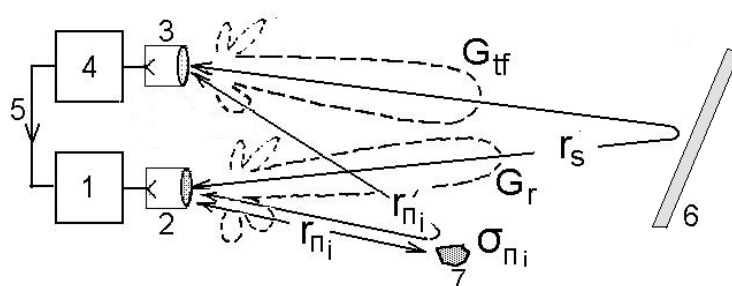


Рис. 1 – Схема ретрансляційної системи

Інформація про поточні перетворення в ретрансляторі передається по спеціальному каналу 5 і використовується для придушення перешкоджаючих і селекції

корисних сигналів (рис. 1). З метою спрощення в ретрансляційній системі застосовується частотний зсув НВЧ сигналу в ретрансляторі й гомодинне перетворення вхідного сигналу в радіолокаційному датчику. Однак відхилення від вимог формування НВЧ коливання, зрушеного по частоті, приводять до появи паразитних компонентів спектру  $A_{02}$  (рис.2): замість одного випромінюваного ЧМ коливання  $e_{\omega}(t)$  приймається сума трьох ЧМ коливань  $e^{(in)}(t) = e^{(in)}_{(\omega-\Omega_c)}(t) + e^{(in)}_{(\omega+\Omega_c)}(t) + e_{\omega}^{(in)}(t)$  з різними несучими частотами.

На рис. 3 показано перетворене результуюче коливання, яке є сумою векторів. Напрямок вектору, що має частоту  $\omega$ , прийнятий в якості базового, від якого відхиляються на величину  $\Phi_{0\omega} + n\pi/2$  вектори  $\vec{A}_{01}$  і  $\vec{A}_{02}$  (рис.3), що обертаються в різних напрямках при зміні відстані між вимірником і об'єктом. Це приводить до похибки  $\varphi_{0\Sigma}$  визначення інформаційного параметра – фазового набігу радіохвилі.

В розділі приведено результати досліджень ретрансляційного зондування на різних частотах. Вивчався найбільш простий спосіб – застосування декількох безперервних не модульованих гармонійних коливань, що мають різні частоти, які випромінюються в послідовні інтервали часу або одночасно. В цьому випадку інформація про контрольований об'єкт розширювалася, але паразитні компоненти спектра  $A_{02}$  (рис. 2) також з'являлися.

Було розроблено методи зниження похибок за рахунок зміни фазових зсувів у ретрансляторі та комплексної обробки результатів радіоспостереження в різних режимах роботи. Вдалося одержати зниження похибок виміру фазового набігу радіохвилі до  $1^{\circ}$ , однак ретрансляційна система при цьому ускладнювалася. Тому в дисертації необхідно було дослідити шлях, що раніше не розглядався – зниження похибок за рахунок відмови від гомодинного перетворення прийнятого сигналу й використання супергетеродинного приймача в ретрансляційній системі.

Після виводу рівнянь, на основі яких була синтезована вимірювальна ретрансляційна система та розроблена її перша модель, виникло запитання про використання статистичних характеристик з метою підвищення якості визначення інформаційного параметра. Принцип роботи й модель ретрансляційної системи підтверджували, що статистичні характеристики сигналів будуть суттєво відрізнятися від

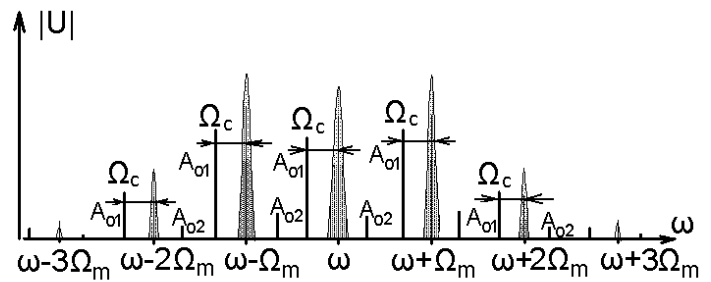


Рис. 2 – Спектр вхідного сигналу при порушеннях вимог до амплітудних характеристик формувача

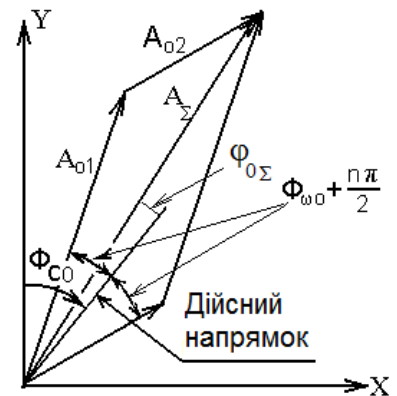


Рис. 3 – Векторна діаграма спектральних компонент



тих, які використовувалися при радіолокаційному зондуванні – прототипі ретрансляційної діагностики. Тому виникла задача дослідження статистичних характеристик сигналів ретрансляційних систем, яка є однією з основних в дисертації.

Фазовий набіг радіохвилі та її частотний зсув є інформаційним параметром у ретрансляційних системах. Раніше способи визначення цих параметрів у присутності шумових впливів з різними законами розподілів у цих системах не розглядалися. Тому необхідно було вибрати спосіб визначення інформаційного параметра прийнятої суміші сигналу й шуму з урахуванням їх статистичних характеристик.

Проведений аналіз дозволив намітити наступні напрямки досліджень і розробок у дисертації:

- дослідити статистичні характеристики сигналу ретрансляційної вимірювальної системи міліметрового діапазону радіохвиль;
- розробити спосіб оцінки фазового набігу й частоти сигналу з урахуванням отриманих статистичних характеристик;
- розробити ретрансляційну систему діагностики міліметрового діапазону хвиль із новим комплексним аналого-цифровим методом обробки сигналів, який забезпечує придушення паразитних компонентів спектра, що виникають у ретрансляторі, і придушення вхідних шумів;
- виконати чисельні експерименти на ЕОМ з метою одержати характеристики розробленої ретрансляційної системи.

**Другий розділ** присвячений дослідженню статистичних характеристик сигналів ретрансляційної системи міліметрового діапазону хвиль [2 – 5, 8 – 13].

Сигнали при моделюванні представлялися сукупністю суми відбиттів від точкових стабільного й флюктуючого відбивачів з ЕПР  $\sigma_{const}$  і  $\sigma_{var}$  відповідно. Далі позначено  $\mu = \sigma_{const} / \bar{\sigma}_{var}$ , де  $\bar{\sigma}_{var}$  – середнє значення ЕПР флюктуючого відбивача. Зміна фази при відбитті від стабільного відбивача приймалася  $\varphi_{0const} = 0$ , від флюктуючого – розподіленім рівномірно  $\varphi_{0var} \in (0 \dots 2\pi)$ . Щільність розподілу ЕПР флюктуючого відбивача приймалася  $p(\sigma_{var}) = (\bar{\sigma}_{var})^{-1} \cdot \exp(-\sigma_{var} / \bar{\sigma}_{var})$ . При моделюванні використовувався безперервний сигнал з гармонійною ЧМ.

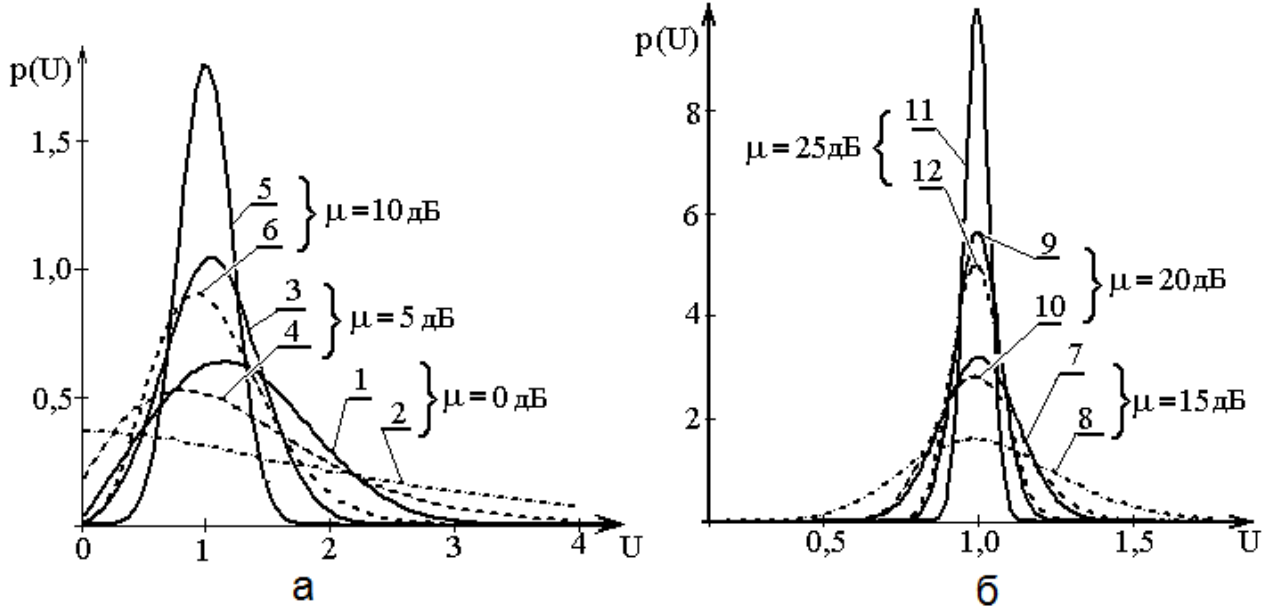
Розглянемо статистичні характеристики на виході каналу виділення фазового набігу, пропорційного несучій частоті.

На рис. 4 наведено отримані за допомогою імітаційного моделювання щільності розподілу амплітуди при радіолокаційному (суцільна лінія) і ретрансляційному (пунктирна лінія) спостереженнях [2, 8, 9]. При одержанні всіх масивів радіолокаційного сигналу щільність розподілу практично точно відповідала відомому закону розподілу амплітуди суми стабільного та випадкового векторів.

На рис. 5 приведено отримані за допомогою імітаційного моделювання щільності розподілу фази сигналу [2, 8, 9]. Позначення залежностей і умови, при яких побудовані залежності на рис. 4 і на рис. 5, однакові, зміна фази сигналу, відбитої стабільним об'єктом, прийнято  $\varphi_{0const} = 0$ .

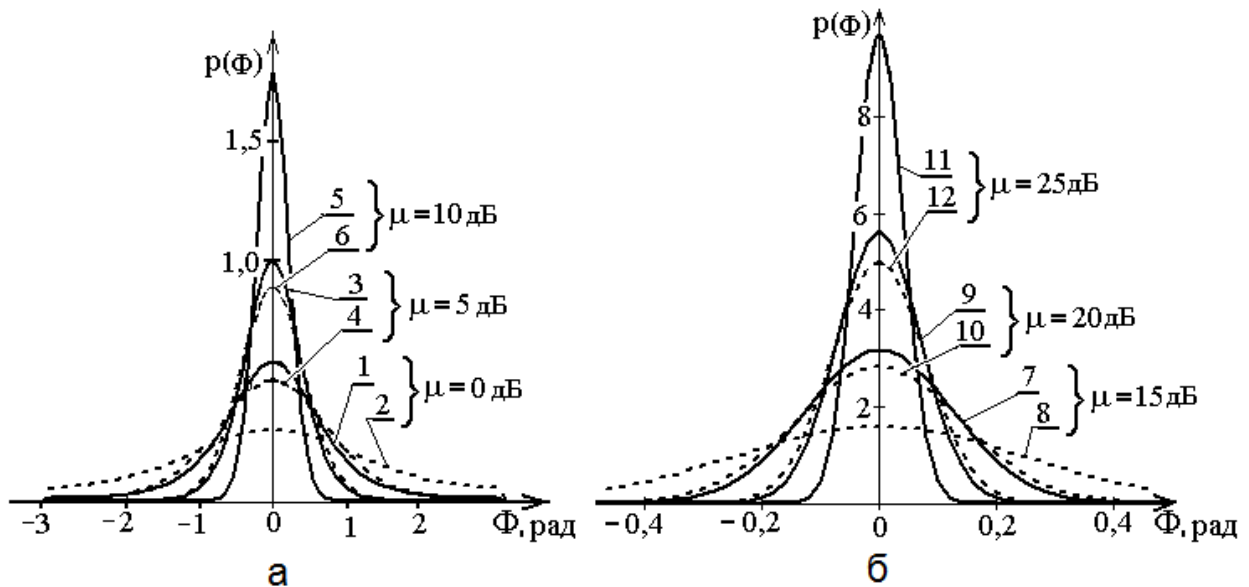
З результатів статистичних випробувань випливає, що в усіх випадках щільність імовірності розподілу амплітуди і фази сигналу ретрансляційного вимірника значно

ширше відповідної до щільності ймовірності радіолокаційного сигналу. При підвищенні відносини  $\mu = \sigma_{const} / \bar{\sigma}_{var}$  щільності розподілу цих параметрів прагнуть до нормального закону. У тих випадках, коли  $\mu > 10\text{дБ}$ , відмінність між модами розподілів радіолокаційного й ретрансляційного сигналів стає малою.



а – мале перевищення  $\sigma_{const}$  над  $\bar{\sigma}_{var}$ , б – велике перевищення  $\sigma_{const}$  над  $\bar{\sigma}_{var}$

Рис. 4 – Щільність розподілу амплітуди прийнятих сигналів



а – мале перевищення  $\sigma_{const}$  над  $\bar{\sigma}_{var}$ , б – велике перевищення  $\sigma_{const}$  над  $\bar{\sigma}_{var}$

Рис.5 – Щільність розподілу фази прийнятих сигналів

Щільності розподілу потужностей радіолокаційного й ретрансляційного сигналів оцінювалися як  $P = U^2/2R$ , де  $R=1$ . Їхній вид при малих співвідношеннях  $\mu = \sigma_{const} / \bar{\sigma}_{var} < 10\text{дБ}$  сильно відрізняється. При підвищенні величини  $\mu > 15\text{дБ}$  відбувається «нормалізація» розподілів. Потужність розподілу ретрансляційного сиг-

налу залишається ширше відповідного розподілу радіолокаційного сигналу, мода розподілу зміщується сильніше, ніж для щільностей розподілу амплітуд відповідних сигналів.

На виході каналів виділення модуляційного компонента фази розподіл амплітуд сигналів аналогічний тим, що приведені на рис. 4, щільність розподілу потужності сигналів також не змінюється. Тому щільності розподілу фази сигналів, які пропорційні частоті, що модулює, підкоряються залежностям, наведеним на рис. 5.

Щільність розподілу фазового набігу радіохвилі була визначена аналітично в [3], отримана формула має вигляд

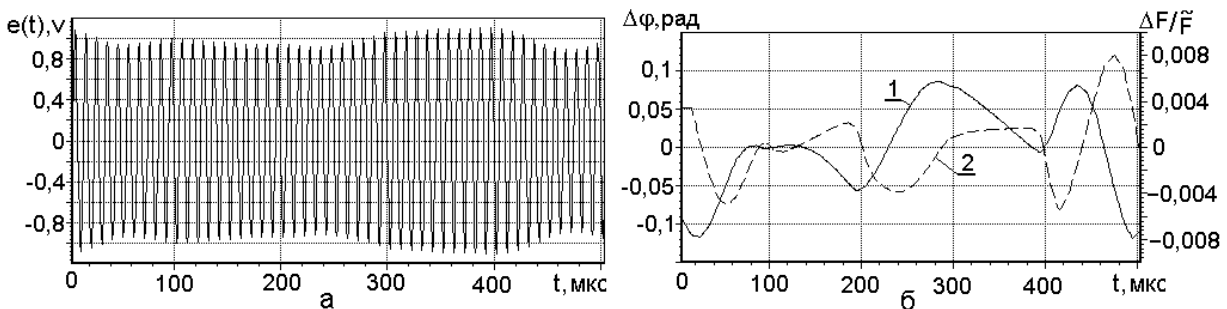
$$p(\varphi_{0\Sigma}) = \frac{1}{4\pi} \cdot e^{-\mu} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\pi}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{0\Sigma}}{2}\right) \times \Phi\left(\sqrt{2\mu} \cos\left(\frac{\varphi_{0\Sigma}}{2}\right)\right) \cdot \exp\left[-\mu \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{0\Sigma}}{2}\right)^2\right], \quad (1)$$

де  $\Phi(x)$  – інтеграл імовірності, інші позначення збігаються з тими, які використані вище. Отриманий теоретично розподіл достатньо добре збігається з розподілом, приведеним на рис. 5. В роботі [3] отримано також інтегральний закон розподілу фази й формули для обчислення початкових моментів цієї величини.

Крім цього в дисертаційній роботі отримано щільність розподілу потужності сигналу, який прийнятий радіолокаційним датчиком (рис. 1) ретрансляційної системи діагностики, інтегральний закон розподілу цієї величини й формули початкових моментів [4]. Теоретичні залежності й розподіли, які отримані в чисельних експериментах, мають гарний збіг.

Таким чином, теоретично та за допомогою імітаційного моделювання визначено статистичні характеристики сигналів, які прийняті ретрансляційною системою. Об'єм і повнота проведених досліджень дозволяють обґрунтувати методи визначення інформаційного параметра цієї системи.

**Третій розділ** присвячений вибору метода прецизійного визначення фази та частоти прийнятого сигналу [6,14]. Порівнюються два методи, які найбільше підходять для використання при цифровій обробці сигналу: метод прямокутних хвиль і метод максимальної апостеріорної ймовірності. Сигнал визначався в результаті моделювання роботи системи. Приклад ділянки  $t_i = 500 \text{ мкс}$  часових залежностей  $e(t)$ ,  $\Delta\varphi(t)$ ,  $\Delta F/\tilde{F}(t)$  на інтервалі  $T_{вим} = 0,01 \text{ сек}$  прийнятого та перетвореного до частоти 100 кГц сигналу системи показаний на рис. 6; співвідношення сигнал/шум



а – квазігармонічний процес, б – миттєві відхилення фази й частоти

Рис. 6 – Часові залежності параметрів прийнятого сигналу.

на рис. 6 близько 20 дБ. На рис. 6б позначено: крива 1 – випадкові відхилення фази, крива 2 – випадкові відхилення  $\Delta F/\tilde{F}$  від оцінок цих параметрів на інтервалі  $T_{вим}$ .

**При методі прямокутних хвиль** у якості еталонного сигналу використовується коливання зсуву, а вимірюваним є прийнятий і перетворений сигнал. На рис. 7 приведено часову діаграму реалізації методу прямокутних хвиль, на ній позначено: а, в – вхідний перетворений і еталонний сигнали, б, г – області позитивних і негативних значень фаз вхідних коливань, д – часові інтервали  $t_\phi$  запізнювань позитивних нуль-переходів, е – інвертовані області прямокутних хвиль еталонного коливання, ж – часові інтервали  $t_\phi$  запізнювань позитивного нуль-переходу вхідного сигналу й негативного нуль-переходу еталонного коливання, з – реальний інтервал  $T_{вим}$

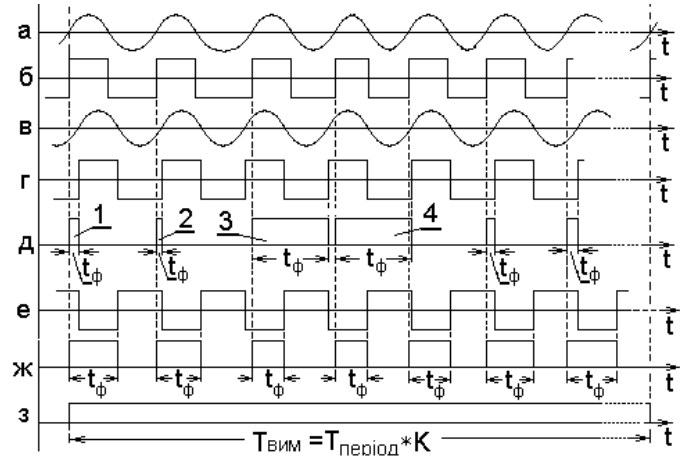


Рис.7 – Діаграма роботи фазометра методом прямокутних хвиль.

виміру, який збігається з 1-м позитивним нуль-переходом після команди «почати вимір» і закінчується при першому позитивному нуль-переході після команди «закінчити вимір» (діаграми а, б, з). Різниця фаз визначається відношенням  $t_\phi/T_{вим}$ . Як видно з діаграм, при малих фазових зсувах (діаграми б и г, інтервали запізнювань 1 і 2) можуть з'явитися порушення порядку чергування позитивних нуль-переходів. Їхнім наслідком є великі фазові інтервали 3 і 4. В результаті з'являються аномальні помилки виміру фазового зсуву. Використання інвертованої послідовності (е) вимагає застосування спеціальних детекторів порушення чергування нуль-переходів і ускладнення програми визначення різниці фаз. Крім того, спосіб добре працює при фазових зсувах, близьких до  $0^\circ$  або  $180^\circ$ .

**При методі максимальної апостеріорної ймовірності** отримана при статистичних випробуваннях вибірка замінюється деякою функцією. В цьому випадку фазу сигналу зручно представити лінійною функцією

$$\tilde{\Phi}(t) = 2\pi\tilde{F} \cdot t + \tilde{\varphi}, \quad (2)$$

де символи з тильдою означають оцінку функції, частоти й початкової фази оброблюваного коливання відповідно. Метод може застосовуватися при наступних умовах. Функції розподілу фази та її похідної повинні бути монотонні. В розділі 2 показано, що ця умова виконується при роботі ретрансляційних систем діагностики. Головним критерієм при заміні реальної зміни фази функцією (2) є її мінімальне відхилення від обмірюваних значень. Математичне очікування  $\xi(t)$  монотонної функції помилки

$$\xi(t) = M \left\{ f \left[ \Phi(t) - \tilde{\Phi}(t) \right] \right\}, \quad (3)$$

де  $\Phi(t)$  – обмірюване значення функції,  $\tilde{\Phi}(t)$  – оцінка функції,  $f$  – монотонна функція, у якості якої часто приймається квадратична функція. В цьому випадку вимірюється два параметри:  $\varphi$  і  $F$ . Поставлена задача вирішується на основі методу максимальної апостеріорної ймовірності, який при адитивному шумі збігається з методом найменших квадратів. В цьому випадку мінімізація помилки визначається з умов  $\partial S/\partial \tilde{F} = 0$  и  $\partial S/\partial \tilde{\varphi} = 0$  для моментів позитивних переходів квазігармонічного коливання через нульовий рівень, коли фаза вхідного коливання  $\Phi(t) = 2\pi \cdot i$ . В результаті отримано наступні формули для визначення оцінок  $\tilde{F}$  и  $\tilde{\varphi}$  – інформаційного параметра, який відноситься тільки до одного коливання [6]

$$\tilde{F} = \frac{(k+1) \left( \sum_{i=0}^{i=k} i \cdot t_i \right) - \sum_{i=0}^{i=k} i \cdot \sum_{i=0}^{i=k} t_i}{(k+1) \left( \sum_{i=0}^{i=k} t_i^2 \right) - \left( \sum_{i=0}^{i=k} t_i \right)^2}, \quad \tilde{\varphi} = 2\pi \cdot \frac{1}{k+1} \cdot \left( \sum_{i=0}^{i=k} i - \tilde{F} \cdot \sum_{i=0}^{i=k} t_i \right), \quad (4)$$

де  $i$  – номер вимірювання,  $k$  – число зареєстрованих переходів через нуль,  $t_i$  – час переходу сигналу через нуль, який відлічується від початку інтервалу виміру  $t = 0 \dots t = T_{вим}$ . Початкова фаза  $\tilde{\varphi}$  пов'язана із точкою  $t = 0$ .

Оцінки різниці фаз двох коливань визначаються по двом оцінкам – лінійним функціям  $\tilde{\Phi}_1(t)$  и  $\tilde{\Phi}_2(t)$  для заданого моменту часу. Оскільки оцінки  $\tilde{F}_1$  и  $\tilde{F}_2$  можуть відрізнятися під впливом шуму, значення різниці фаз на інтервалі виміру може змінюватися. Аномальні помилки при цьому методі не з'являються.

Розглянемо переконливість оцінок частоти й фази при відсутності аномальних помилок. В таблиці 1 приведено середньоквадратичні відхилення цих оцінок, визначені по масивах нуль перетинань при різних  $T_{вим}$ . Частота сигналу й середня частота смугового підсилювача прийняті рівними 100 кГц, сумарне співвідношення сигнал/шум 20 дБ, смуга посилення 5 кГц.

Таблиця 1. Значення середньоквадратичних відхилень оцінок частоти й фази від точного значення при різних методах [6].

Метод вимірювання	$T_{вим}, сек$	0,0025	0,005	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16
Макс.апостер.імовірн	$\sigma_f, Гц$	4,56	1,64	0,59	0,21	0,075	0,027	0,009
Прямокутних хвиль	$\sigma_{f_{сер}}, Гц$	6,20	3,18	1,59	0,80	0,40	0,20	0,10
	$\sigma_f / \sigma_{f_{сер}}$	0,74	0,52	0,37	0,27	0,19	0,13	0,09
Макс.апостер.імовірн	$\sigma_\varphi, град$	2,37	1,71	1,23	0,88	0,62	0,44	0,31
Прямокутних хвиль	$\sigma_{\varphi_{сер}}, град$	1,23	0,88	0,62	0,44	0,31	0,22	0,16
	$\sigma_\varphi / \sigma_{\varphi_{сер}}$	1,95	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	2,01

Як видно з таблиці 1, при збільшенні часу вимірювання в усіх випадках спостерігається регулярне зниження середньоквадратичного значення відхилень оцінок від точних значень. Це значить, що всі отримані оцінки мають властивість спроможності. Щільності розподілів оцінок були симетричні щодо точного значення, що свідчить про їх незміщеність, або, принаймні, асимптотичну незміщеність.

Ефективність оцінок частоти при методі максимальної апостеріорної ймовірності вище, чим при прямому усередненні тривалості періоду. Про це свідчить співвідношення середньоквадратичних значень відхилень оцінок частоти від точних значень. Протилежна картина спостерігається при одержанні оцінок різниці фаз і початкової фази.

Таким чином, при відсутності аномальних помилок метод прямокутних хвиль забезпечує більш точну оцінку середньої різниці фаз, ніж метод максимальної апостеріорної ймовірності визначає оцінку початкової фази. В той же час оцінка частоти прийнятого коливання має більшу точність при методі максимальної апостеріорної ймовірності.

Щільності розподілу фаз, отримані з появою аномальних помилок, приведені на рис. 8. Крива 1 отримана методом максимальної апостеріорної ймовірності, крива 2 – методом прямокутних хвиль. Кожний вимір тривалістю  $T_{вим} = 0,01сек$  записувалося масивом параметрів, який дозволяв визначити моменти переходів через нуль на інтервалі виміру. Кількість масивів, по яких визначалися щільності розподілів, дорівнювалося  $10^5$ . Співвідношення сигнал/шум  $\approx 20дБ$ , точне значення фазового зсуву  $8^0$ . При цьому починають з'являтися аномальні помилки. Кожний масив мав 1000 періодів коливаний  $F = 100кГц$ , число збоїв складало 2..4. При невеликому зменшенні фазового зсуву мода розподілу фази методом прямокутних хвиль іде далеко вправо. Очевидно, що користуватися такими вимірюваннями не можна.

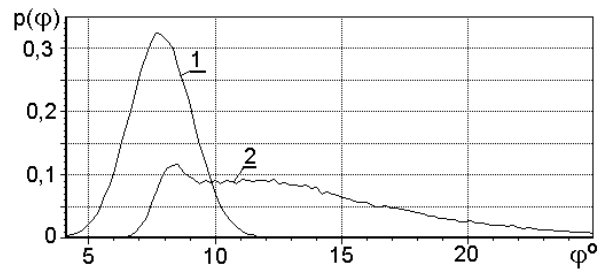


Рис.8 – Щільності розподілів фаз із появою аномальних помилок

Таким чином, переконливі, незміщені й ефективні оцінки фаз і частоти сигналу можуть бути отримані методом прямокутних хвиль і методом максимальної апостеріорної ймовірності. Встановлено, що при методі прямокутних хвиль можуть з'являтися аномальні помилки визначення оцінок різниці фаз. При одержанні оцінок фази в умовах відсутності аномальних помилок метод прямокутних хвиль ефективніший методу максимальної апостеріорної ймовірності. При оцінці частоти більш ефективний метод максимальної апостеріорної ймовірності. З появою аномальних помилок метод прямокутних хвиль практично втрачає працездатність, метод максимальної апостеріорної ймовірності зберігає свої властивості.

**В четвертому розділі** досліджено селекцію сигналу і визначення його інформаційного параметру – фазового набігу і частоти цифровими методами; виконано чисельні експерименти на ЕОМ.

Витягти з високою точністю фазовий набіг радіохвилі міліметрового діапазону зі вхідного сигналу можна після виділення корисного спектрального компонента аналоговими способами, при реалізації яких система значно ускладнюється. Ця мета може бути досягнута комплексними аналого-цифровими методами за допомогою нової ретрансляційної системи [7], спрощена функціональна схема якої приведена на рис. 9. На ній позначено: 1, 2 – НВЧ генератори випромінюваного сигналу та гетеродину; 3, 4 – направлені відгалужувачі, 5, 6 – НВЧ змішувачі, 7, 8 – смугові підсилювачі, 9, 10, 11 – АЦП, 12 – циркулятор, 13, 14 – антени, 15 – рефлектор, 16 – ретранслятор, 17 – пристрій обробки та керування, за допомогою якого може бути реалізований режим багаточастотної діагностики.

Вхідний сигнал міліметрового діапазону спочатку треба перетворити до проміжної частоти й підсилити до рівня, при якому мікросхеми можуть ефективно виконувати аналого-цифрове перетворення. Потім на всьому вимірювальному інтервалі  $T_{вим}$  сигнал піддається дискретизації й має вигляд

$$s_{дискр}(t) = \sum_{k=0}^{k=N} s(k \cdot \tau) \cdot \delta(t - k \cdot \tau), \quad (5)$$

де  $\tau$  – часовий крок між сусідніми точками вимірів напруги;  $N = T_{вим} / \tau$  – кількість точок на інтервалі;  $\delta(t - k \cdot \tau)$  – дельта функція.

Обробка полягає у визначенні спектральної складової, яка містить інформацію про перетворення радіохвилі на трасі поширення та у ретрансляторі. При числі відліків  $N + 1$  коефіцієнти Фур'є  $a_{дискр(\omega)}$  й  $b_{дискр(\omega)}$  спектральної складової із частотою  $\omega$  можна виразити

$$a_{дискр(\omega)} = \frac{2}{N+1} \cdot \sum_{k=0}^N s_{дискр}(k\tau) \cdot \cos \omega t, \quad b_{дискр(\omega)} = \frac{2}{N+1} \cdot \sum_{k=0}^N s_{дискр}(k\tau) \cdot \sin \omega t. \quad (6)$$

При цьому спектральна складова з частотою  $\omega$  має вигляд

$$e_{filtr}(t) = U_{filtr} \cos(\omega \cdot t + \psi_{filtr}), \quad (7)$$

де  $U_{filtr} = \sqrt{a_{дискр(\omega)}^2 + b_{дискр(\omega)}^2}$ ,  $\psi_{filtr} = \arctg(b_{дискр(\omega)} / a_{дискр(\omega)})$ .

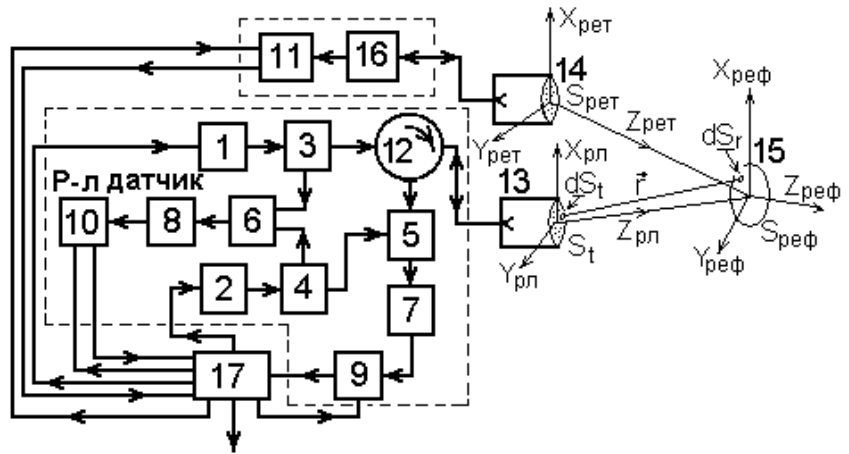


Рис.9 – Схема ретрансляційної системи із супергетеродинним приймачем і цифровою обробкою.

Фаза  $\psi_{filtr}$  буде містити фазовий набіг радіохвилі, параметри коливань зсуву в ретрансляторі й коливань гетеродину, якщо частота  $\omega$  буде збігатися з частотою бічного компонента перетвореного сигналу. Звичайно, за час поширення радіохвилі параметри зазначених коливань змінюються, і при обробці виникає похибка за рахунок флуктуацій частоти коливань і зміни їх початкових фаз. Ретрансляційна система діагностики працює на невеликих відстанях, запізнювання прийнятого сигналу щодо випромінюваного визначається десятками наносекунд, а вимірвальний інтервал вимірюється тисячами мікросекунд. Навіть період проміжної частоти значно перевищує час поширення радіохвилі. В цих умовах при обробці використовуються наступні масиви [7]. Масив параметрів коливання зсуву, масив перетвореного до проміжної частоти випромінюваного коливання та сформований програмним способом масив параметрів перетворюючого коливання. Якщо потрібно, масив перетворюючого коливання формується на основі 3-х або більшого числа гармонік. Вимоги до смуги фільтрації визначаються в такий спосіб.

Якщо витягається тільки одна гармоніка прийнятого сигналу та смуга селекції еквівалентного аналого-цифрового фільтра мінімальна, фазова характеристика фільтра при  $T_{вим} = 0,01сек, F_{np} = 5МГц$ , частоті виділюваної гармоніки  $F = 4,9МГц$  має вигляд, показаний на рис.10, на якому позначено: 1 – амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), 2 – фазочастотна характеристика (ФЧХ). Як видно з рис. 10, при зміні частоти сигналу відбувається швидка зміна фазового набігу. Середній нахил ФЧХ при прийнятих умовах рівний  $1,8^0/Гц$ . Оскільки відношення  $T_{вим}$  до часу запізнювання радіохвилі становить десятки тисяч, то зміни за час запізнювання параметрів випромінюваного й прийнятого коливань визначаються тільки радіотрасою і об'єктом, що відбиває.

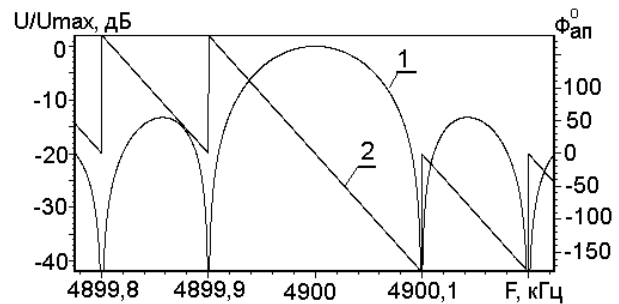


Рис. 10 – АЧХ и ФЧХ еквівалентного фільтра

Характеристики нової системи визначалися за допомогою імітаційного моделювання. При цьому враховувалися процеси, що відбуваються в апаратурі та при поширенні та розсіюванні радіохвиль. Сформований сигнал із хвилею  $\lambda = 5мм$  випромінювався елементами антени 13, розсіювався рефлектором 15 і приймався антеною ретранслятора 14 (рис. 9). Моделювання електромагнітних полів визначалися за допомогою програм, розроблених в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України на основі рівняння скалярного поля дифракції Френеля-Кирхгофа, яке при оцінці  $E_{ds}$ ,

(рис. 9) має вигляд

$$\vec{E}_{ds} = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_i} \left\{ \sum_v \vec{E}_{ds_i} (x_{ds_i}, y_{ds_i}, z_{ds_i}, \omega_v) \frac{e^{-jk_v r}}{r} \left[ \left( jk_v + \frac{1}{r} \right) \cos(\vec{n}, \vec{r}) + jk_v \cos(\vec{n}, \vec{P}) \right] \right\} dS_i, \quad (8)$$



де  $\vec{E}_{ds_i}(x_{ds_i}, y_{ds_i}, z_{ds_i}, \omega_\nu)$  – щільність амплітуди поля спектрального компонента із частотою  $\omega_\nu$  на елементі поверхні  $dS_i$ , що має координати  $x_{ds_i}, y_{ds_i}, z_{ds_i}$ ,  $k_\nu$  — хвильове число спектрального компонента з індексом  $\nu$ ,  $r = |\vec{r}|$  – відстань від збуджуючого елемента  $dS_i(x_{ds_i}, y_{ds_i}, z_{ds_i})$  до елемента  $dS_r(x_{ds_r}, y_{ds_r}, z_{ds_r})$ , у центрі якого поле визначається,  $(\vec{n}, \vec{r})$  – кут між нормаллю до випромінюючої поверхні та ортом вектора  $\vec{r}$  (рис.10),  $(\vec{n}, \vec{P})$  – кут між тією ж нормаллю та вектором Умова-Пойтинга поля на апертурі.

Коливання, що надійшли на поверхню антени, підсумовувалися в опромінювачі та збуджували вхідний сигнал.

У випадках, коли були присутні перешкоджаючі компоненти спектра в ретрансляторі й були відсутні вхідні шуми апаратури, за рахунок селекції, яку дозволяла реалізувати схема із супергетеродинним перетворенням, спостерігалось практично повне придушення відхилень від лінійного закону залежності фазового набігу радіохвилі від дальності.

В присутності шумів були отримані розподіли амплітуди (рис.11) і фази (рис. 12) відфільтрованої гармоніки, на них позначено: 1 – експериментальні щільності ймовірностей, 2 – щільність нормального закону розподілу. На підставі отриманих результатів за допомогою загальновідомих формул визначено співвідношення сигнал/шум на виході цифрової системи обробки прийнятого сигналу; воно становить близько 38,5 дБ.

Оцінка шумового компонента коливання, виконана на основі прийнятої при імітаційному моделюванні щільності шуму, еквівалентної смуги пропускання й вхідному резистивному опорі, практично збігається з отриманим у дослідях значенням. Похибки оцінки інформаційного параметра перебувають поблизу потенційно досяжної величини при обраному інтервалі виміру.

Таким чином, досліджений комплексний шлях удосконалювання ретрансляційного вимірника, що включає аналогове супергетеродинне перетворення вхідного сигналу й селекцію корисного компонента спектра цифровими методами. Розроблений комплексний метод моделювання роботи ретрансляційного вимірника. Встановлено, що запропонований метод дозволяє практично повністю придушити відхилень від лінійного закону залежності фазового набігу радіохвилі від дальності, а

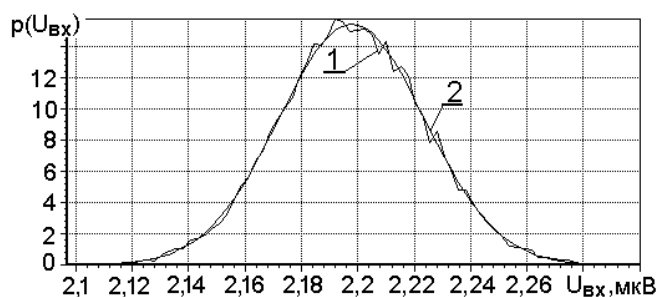


Рис. 11 – Розподіл амплітуди

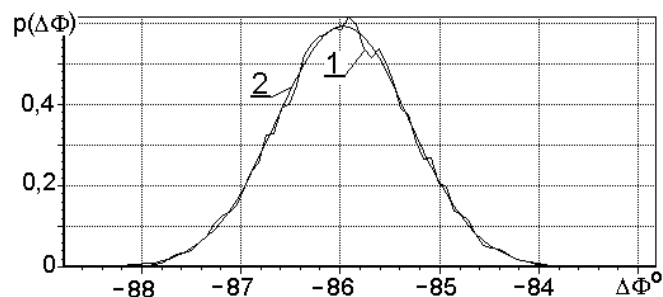


Рис. 12 – Розподіл фази

також в кілька разів знизити похибки вимірювання інформаційного параметра та одержати результат, близький до потенційно досяжного значення.

**В додатках** до дисертації представлені акти впровадження.

## **ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача вдосконалення ретрансляційної системи діагностики технічних об'єктів, яка полягає в розробці комплексного методу аналогових і цифрових перетворень сигналів міліметрового діапазону хвиль, формуванні масивів параметрів коливань зсуву в ретрансляторі, випромінюваного і прийнятого сигналів, спеціально визначеного програмним способом масиву параметрів перетворюючих коливань, і в цифровій обробці інформації; метод забезпечує високе придушення вхідних шумів і паразитних компонентів спектра, які виникають в ретрансляторі, та квазіоптимальне виділення інформаційного параметру – фазового набігу і частотного зсуву радіохвилі.

1. Вперше експериментально й теоретично визначено диференціальні і інтегральні закони розподілу амплітуд, фаз, потужностей сигналів ретрансляційного вимірника при роботі із флуктуючим об'єктом. Визначено, що розподіли монотонні; отримано формули початкових моментів. Вперше встановлено, що щільності розподілу амплітуд, фаз і потужностей ретрансляційних сигналів значно ширше щільностей розподілу радіолокаційних сигналів.
2. Вперше на основі статистичного аналізу отримано формули для оцінки фазового набігу й частоти сигналу, прийнятого ретрансляційною системою. Встановлено, що переконливі, незміщені й ефективні оцінки фаз і частоти сигналу можуть бути отримані методом прямокутних хвиль і методом максимальної апостеріорної ймовірності.
3. Встановлено, що при методі прямокутних хвиль можуть з'являтися аномальні помилки визначення оцінок різниці фаз. При одержанні оцінок фази в умовах відсутності аномальних помилок метод прямокутних хвиль ефективніший методу максимальної апостеріорної ймовірності. При оцінці зсуву частоти більш ефективний метод максимальної апостеріорної ймовірності. З появою аномальних помилок метод прямокутних хвиль практично втрачає працездатність, метод максимальної апостеріорної ймовірності зберігає свої властивості.
4. Розроблений метод прецизійного визначення фази та частоти коливань ретрансляційної системи діагностики, які потрібні при цифровій обробці прийнятого сигналу: коливання зсуву в ретрансляторі, випромінюваного та прийнятого сигналів і спеціально сформованих програмним способом перетворюючих коливань, які використовуються при селекції прийнятого сигналу і визначенні його інформаційного параметру – фазового набігу і частотного зсуву радіохвилі.
5. Розроблено аналого-цифрову ретрансляційну систему діагностики міліметрового діапазону радіохвиль, в якій реалізується ефективно придушення паразитних компонентів спектра, що виникають при перетвореннях у ретрансляторі, і вхідних шумів апаратури. Розроблено метод комплексної аналого-цифрової обробки, який дозволяє одержати оцінку запізнювання радіохвилі з точністю, близької до потенційно досяжного значення.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Velichko D.A. A Calculation of Parasitic Signal Components Digital Filtration for the Retransmission Meter on the basis of FPGA / D.A. Velichko, I.I. Vdovychenko // Proc. of 9-th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, September 9 – 12, 2011. – P.335-336.
2. Вдовиченко Е.И. Распределения параметров сигнала ретрансляционного измерителя при флуктуациях отражателя / Е.И. Вдовиченко, А.Ф. Величко, Д.А. Величко // Радиотехника, 2007. – Вып. 150. – С.104-111.
3. Вдовиченко Е.И. Статистические свойства фазы сигнала ретрансляционного измерителя при диагностике флуктуирующего объекта / Е.И. Вдовиченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2007. – №5(65). – С.11-15.
4. Вдовиченко Е.И. Статистические характеристики мощности сигнала, отражённого флуктуирующим объектом, при ретрансляционном методе диагностики / Е.И. Вдовиченко // Системи обробки інформації. Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – Харків, 2007. – Вып. 5(63). – С.125-127.
5. Vdovychenko Y.I. Retransmission meter signal amplitude density of distribution during monitoring a fluctuating reflector / Y.I. Vdovychenko // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – Т.8, №2. – С.224-227.
6. Величко А.Ф. Определение усредненной разности фаз и разности частот в ретрансляционных измерителях / А.Ф. Величко, Д.А. Величко, Е.И. Вдовиченко // Радиотехника, 2011. – Вып. 164. – С.21-29.
7. Величко А.Ф. Селекция сигнала и определение фазового набега радиоволны цифровыми методами в ретрансляционных системах диагностики / А.Ф. Величко, Д.А. Величко, Е.И. Вдовиченко // Радиотехника, 2011. – Вып. 165. – С.258-267.
8. Vdovychenko Y.I. Signal Characteristics of the Retransmission Meter During Monitoring a Fluctuating Reflector / Y.I. Vdovychenko, A.F. Velichko, D.A. Velichko // Proc. of the International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006), Lviv – Slavske, Ukraine, February 28 – March 4, 2006. – P.46-48.
9. Вдовиченко Е.И. Амплитудные флуктуации сигналов радиолокационного и ретрансляционного датчиков с частотной модуляцией / Е.И. Вдовиченко // Материалы 10-го Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», Харьков, ХНУРЭ, 2006. – С.25.
10. Вдовиченко Е.И. Контроль ретрансляционным методом флуктуирующего отражателя при вариациях его геометрических координат / Е.И. Вдовиченко // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и учёных. – Севастополь, СевНТУ, 2006. – С.113.
11. Вдовиченко Е.И. Распределение фазы сигнала, отраженного флуктуирующим отражателем, при ретрансляционном методе измерения / Е.И. Вдовиченко, Д.А. Величко // Материалы 16-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006), Севастополь, Крым, Украина, 11–15 сентября, 2006. – С.843-844.

12. Вдовиченко Е.И. Сравнительный анализ флуктуаций мощности сигналов радиолокационного и ретрансляционного измерителей / Е.И. Вдовиченко // Сборник материалов 1-й Международной конференции «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», Харьков, ХНУРЭ, 2006 . – С.476-477.
13. Vdovychenko Y.I. Comparative Analysis of Retransmission Meter Signal Distributions with Pierson's Distributions / Y.I. Vdovychenko // Abstracts of International Young Scientist Workshop on Optics, Photonics and Metamaterials, Kharkov, KNURE, 2009. – P.31-32.
14. Величко Д.А. Статистические характеристики погрешностей измерения фазового набега и сдвига частоты сигнала ретрансляционного измерителя / Д.А. Величко, С.А. Величко, Е.И. Вдовиченко // Материалы 21-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011), Севастополь, Крым, Украина, 12-16 сентября, 2011. – С.875-876.
15. Velychko D.A. Inaccuracies Decrease in Retransmission Meter with Homodyne Conversion / D.A. Velychko, I.I. Vdovychenko // Proc. of 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI National Radio Science Meeting (APSURSI), Chicago, Illinois USA, 8-14 July, 2012. – P.1-2.

### АНОТАЦІЯ

Вдовиченко Є. І. Удосконалення ретрансляційної системи діагностики технічних об'єктів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012.

В дисертації розроблено комплексний метод аналогових і цифрових перетворень сигналів міліметрового діапазону хвиль, формування цифрових масивів сигналів і цифрової обробки інформації; метод забезпечує високе придушення паразитних компонентів спектра, квазіоптимальне виділення корисного сигналу із суміші сигнал плюс вхідний шум і визначення його інформаційного параметра – фазового набігу й частотного зсуву радіохвилі. Метод дозволяє одержати оцінку запізнювання радіохвилі з точністю, близькою до потенційно досяжного значення.

Експериментально й теоретично визначено закони розподілу амплітуд, фаз, потужностей сигналів ретрансляційного вимірника при роботі із флуктуючим об'єктом, отримано формули початкових моментів. Встановлено, що щільності розподілу амплітуд, фаз і потужностей ретрансляційних сигналів значно ширше відповідних щільностей розподілу радіолокаційних сигналів. Отримано формули для оцінки фазового набігу й частоти прийнятого сигналу. Встановлено, що переконливі, незміщені й ефективні оцінки фаз і частоти сигналу можуть бути отримані методом максимальної апостеріорної ймовірності та методом прямокутних хвиль, який втрачає працездатність із появою аномальних помилок.

**Ключові слова:** радіотехнічні системи, сигнал, спектр, фаза, характеристика, приглушення, ретранслятор.

## АННОТАЦИЯ

Вдовиченко Е.И. Совершенствование ретрансляционной системы диагностики технических объектов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

В диссертации разработан комплексный метод совершенствования ретрансляционной системы диагностики миллиметрового диапазона радиоволн, который включает аналоговые и цифровые преобразования сигналов, формирование массивов параметров колебаний сдвига в ретрансляторе, излучаемого и принятого сигналов, определение с помощью современных систем программирования массива цифровых параметров, используемых при обработке входного сигнала. Метод обеспечивает высокое подавление паразитных компонент спектра, возникающих при преобразовании СВЧ сигнала в ретрансляторе, квазиоптимальное выделение полезного сигнала из смеси сигнал плюс входной шум и определение его информационного параметра – фазового набега и частотного сдвига радиоволны. Метод позволяет получить оценку запаздывания радиоволны с точностью, близкой к потенциально достижимому значению.

Приведены результаты исследований статистических характеристик сигналов ретрансляционных систем диагностики: дифференциальные и интегральные законы распределения амплитуд, фаз, мощностей сигналов ретрансляционного измерителя при работе с флуктуирующим объектом, формулы начальных моментов, сравнение со статистическими характеристиками сигналов радиолокационных систем. Установлено, что плотности распределения амплитуд, фаз и мощностей ретрансляционных сигналов значительно шире соответствующих плотностей распределения радиолокационных сигналов.

На основе статистического анализа получены формулы для оценки фазового набега и частотного сдвига радиоволны, принятой ретрансляционной системой диагностики. Показано, что состоятельные, несмещенные и эффективные оценки фаз и частоты сигнала могут быть получены методом прямоугольных волн и методом максимальной апостериорной вероятности. Приведены данные об условиях появления аномальных ошибок при использовании метода прямоугольных волн. Определено, что в условиях отсутствия аномальных ошибок метод прямоугольных волн при оценке фазового набега более эффективен, чем метод максимальной апостериорной вероятности. При оценке сдвига частоты более эффективен метод максимальной апостериорной вероятности. С появлением аномальных ошибок метод прямоугольных волн практически теряет работоспособность, метод максимальной апостериорной вероятности сохраняет свои свойства.

Приведена разработанная в диссертации функциональная схема аналого-цифровой ретрансляционной системы диагностики миллиметрового диапазона волн, результаты имитационного моделирования работы этой системы, распределения амплитуды и фазового набега принятой радиоволны.

**Ключевые слова:** радиотехнические системы, сигнал, спектр, фаза, характеристика, подавление, ретранслятор.

**ABSTRACT**

Vdovychenko I.I. Advancement of retransmitting system for diagnostics of technical objects. - Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree on speciality 05.12.17 – radio technical and television systems – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2012.

Dissertation is devoted to the development of analogue transformations method for signals of millimeter wave range, to digital formation of digital signal transformation arrays and digital signal processing; the method provides high suppression of parasitic spectrum components, and the quasi-optimal signals selection from a mixture of the input signal plus noise, and its informational parameter – phase incursion and a frequency shift of the radio wave. The method allows to obtain an estimation of radio wave retardation with a potentially achievable accuracy.

The laws of distribution for signal amplitudes, phases, powers of the retransmission meter during monitoring of fluctuating object have been determined experimentally and theoretically, and formulas have been obtained for the initial moments. It has been established that densities of distribution of amplitudes, phases, and powers for the retransmitting signals are significantly wider than the corresponding densities of distribution of radar signals. Formulas for the received signal phase incursion and frequency estimation have been obtained. It has been established that consistent, unbiased, and effective estimations of the signal phase and frequency may be obtained using posteriori probability method and using method of rectangular waves, which loses its functionality during anomalous errors appearance.

**Keywords:** radio engineering system, interfering reflections, spectrum, characteristic, suppression, retransmitter unit.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 020-13.  
Підписано до друку 19.01.13. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у СПД ФО Бровін О.В.  
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30  
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру  
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

---

---

**СТИЛЬ·**  
**ИЗДАТ**  
ТИПОГРАФИЯ  
[www.stil-izdat.com](http://www.stil-izdat.com)