

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

АКРАМ ФАТХІ ХУССЕЙН АЛЬ-АШМАТІ

УДК 621.396.96

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПАСИВНИХ ФАЗОВИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ  
СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗНЕСЕНИХ ЕТАЛОНІВ ЧАСУ ТА  
ЧАСТОТИ**

05.12.17 – радіотехнічні і телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2013

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Коваль Юрій Олександрович**,  
Харківський національний  
Університет радіоелектроніки,  
професор кафедри «Основ радіотехніки».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Величко Анатолій Федорович**,  
Інститут радіофізики і електроніки  
ім. О.Я. Усикова НАН України,  
завідувач відділу;

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Рондін Юрій Петрович**,  
Метрологічний центр військових еталонів  
Збройних сил України,  
старший науковий співробітник науково-  
дослідного відділу військових еталонів.

Захист відбудеться " 21 " січня 2014 р. в 15-00 годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розіслано " 20 " грудня 2013 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



д-р техн. наук Безрук В.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

У кінці 80-х років минулого століття у зв'язку з підвищенням вимог до точності частотно-часової синхронізації з боку основних споживачів (організації Держстандарту, Академії наук і МО СРСР) наукові колективи Харкова (Харківського інституту радіоелектроніки) і Казані (Казанського державного університету), а також розробники промислової апаратури радіометеорної синхронізації приступили до розробки фазового радіометеорного методу синхронізації (ФРМС). За попередніми оцінками ФРМС повинен був забезпечити істотно більш високу точність. Відомим недоліком фазових вимірювань є їх неоднозначність за межами періоду частоти, на якій проводяться вимірювання.

В основу реалізації апаратури ФРМС були покладені результати перших експериментальних оцінок короткочасної нестабільності затримок сигналів при метеорному поширенні радіохвиль (ПРХ). В результаті перших робіт з ФРМС був створений макет ФАЗА (ХНУРЕ) і зразок промислової радіометеорної апаратури синхронізації 17-Н-830 (Російський інститут радіонавігації і часу спільно з ХНУРЕ). Проте із-за недостатньої теоретичної проробки ці зразки фазових радіометеорних систем синхронізації (РМСС) не знайшли практичного застосування. Експериментальні дослідження показали, що похибки синхронізації, в першу чергу, апаратурні систематичні похибки (АСП) виявилися істотно більшими за прогнозовані.

На першому етапі розвитку ФРМС аналіз джерел похибок в основному обмежувався флуктуаційними завадами у вигляді «білого шуму» і короткочасною нестабільністю затримок сигналів при метеорному поширенні радіохвиль (ПРХ). При цьому були використані оцінки нестабільності затримок, отримані експериментально з застосуванням макетів ФАЗА. Результати, на яких ґрунтувались ці оцінки, мали порівняно великий розкид і не дозволили отримати статистично забезпечені характеристики фазової нестабільності метеорного радіоканалу.

Відсутність комплексного аналізу джерел похибок ФРМС призвело до того, що в перших зразках фазових (РМСС) не враховувалися незворотності затримок сигналів у вхідних пристроях (ВП). При виборі основних технічних рішень не приймалися до уваги втрати точності фазових вимірювань сигналів в реальних пристроях (обмежувачі, пристрої обробки і вимірювання параметрів сигналів) порівняно з ідеальними. Не враховувалися також корельовані адитивні і мультиплікативні завади, викликані відповідно багатопроробовістю і зміною рівня сигналів при метеорному ПРХ. В перших роботах по ФРМС недостатня увага приділялася розробці і застосуванню допоміжних пристроїв, що одержали назву імітаторів, для вимірювання похибок (зокрема, АСП) та тестування фазових РМСС. Все це не дозволило до цього часу повною мірою реалізувати потенціал ФРМС.

Фазові методи вимірювань забезпечують найбільшу точність вимірювання інформативних параметрів, в тому числі, і при вирішенні задач частотно-часо-

вого забезпечення. При цьому неминуче присутні похибки вимірювань, аналогічні похибкам інших радіотехнічних систем відповідно з алгоритмами вилучення інформації, що використовуються.

Пасивні методи синхронізації на противагу активним мають ряд суттєвих переваг – забезпечують економічність розробки та експлуатації, скритність і заводо захищеність, електромагнітну сумісність, біологічну та екологічну безпечність. Тому в ХНУРЕ активно ведуться роботи зі створення пасивних систем синхронізації (ПСС) і їх різновиду – фазових ПСС (ФПСС). Пасивні системи синхронізації на основі алгоритму загального охоплення (АЗО) можуть стати альтернативою іноземним СРНС і забезпечити створення додаткових незалежних каналів синхронізації, які не поступаються за якісними показниками іноземним системам.

Одним з найбільш перспективних напрямків вдосконалення АЗО є використання фазових вимірювань. Перевагами фазового принципу побудови є висока потенційна точність визначення часового положення сигналів по фазі носійної частоти, можливість високоточного формування сигналів і гетеродинів від сигналів еталонів. Відомим недоліком фазових методів є їх неоднозначність.

Раніше проведені роботи під керівництвом проф. Кащеєва Б.Л. показали принципову можливість реалізації та потенціал фазових методів синхронізації (ФМС). В ході лабораторних досліджень макетів активної фазової апаратури були отримані значення похибки вимірювання зсуву шкал часу на рівні менше 1 наносекунди. Проте в цих роботах не був вирішений ряд питань, що не дозволило довести до практичного застосування фазові системи синхронізації часу і частоти (ССЧЧ). Цим пояснюються актуальність та обрана мета даної роботи.

Таким чином, є актуальною тема дисертаційної роботи, яка присвячена удосконаленню пасивних фазових систем синхронізації рознесених еталонів часу та частоти, які використовують випромінювання наземних і космічних спільних джерел на основі цифрової квадратурної обробки їх сигналів, що дозволяє знизити похибки оцінки зсуву шкал.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дослідження за темою дисертації пов'язані з плановими НДР ХНУРЕ, зокрема держбюджетної НДР № 239 «Розробка альтернативних методів синхронізації, передачі і захисту інформації для використання в Державній інформаційній системі з надзвичайних ситуацій», підтема № 239-5 «Розробка принципів побудови вітчизняного комплексу інформаційно-вимірювальних систем для прогнозування і аналізу наслідків надзвичайних ситуацій» (№ ДР 0109U001635), а також здобувач приймав участь у НДР Національного наукового центру «Інститут метрології» «Забезпечення функціонування Державної служби єдиного часу і еталонних частот (ДСЧЧ) в Україні» (№ ДР 0111U004901, 0107 U007810).

У вищевказаних НДР здобувач був виконавцем.

### **Мета і задачі дослідження**

Мета роботи полягає в удосконаленні пасивних систем синхронізації за рахунок використання фазових методів вимірювань зсуву шкал просторово рознесених стандартів (еталонів) часу і частоти, що дозволяє покращити

експлуатаційні характеристики системи в цілому, а саме знизити похибки синхронізації.

Виходячи з вищевикладеного, основними задачами досліджень є:

- проведення теоретичного аналізу похибок і невизначеностей вимірювання зсуву шкал часу і частоти при фазових методах синхронізації;
- обґрунтування переваг фазового пасивного методу синхронізації;
- розробка математичних моделей і проведення досліджень шляхом імітаційного моделювання джерел похибок і пристроїв обробки сигналів у фазових пасивних системах синхронізації;
- розробка технічних рішень для виконання завдання частотно-часової синхронізації на основі фазових вимірювань;
- проведення експериментальних досліджень макетів фазової апаратури вимірювання зсуву шкал еталонів (стандартів) часу і частоти.

**Об'єктом дослідження** є процес синхронізації просторово рознесених еталонів часу та частоти з застосуванням фазових методів вимірювання часу затримки сигналів спільних джерел (ССД).

**Предметом дослідження** є математична модель фазової пасивної системи синхронізації, алгоритми роботи ФПСС з використанням ССД, джерела похибок синхронізації і математичні моделі каналів прийому та обробки результатів вимірювань зсувів шкал часу і частоти.

**Методи дослідження** базуються на застосуванні теорії ймовірності та математичної статистики, теорії часового, спектрального і кореляційного аналізу, математичному моделюванні процесів у ФПСС, чисельному аналізі, експериментальних дослідженнях.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

1. Розроблена нова математична модель пасивної фазової системи синхронізації з застосуванням квадратурної обробки сигналів. Відміною від відомих моделей є те, що вона дозволяє оцінити вплив нелінійних ефектів, які виникають внаслідок квадратурних перетворень, на результуючу похибку синхронізації. Визначено, що ці нелінійні ефекти спричиняють зменшення співвідношення сигнал/шум на 3 дБ.

2. Розроблена нова математична модель для дослідження впливу багатопроменевості поширення радіохвиль на похибки пасивної фазової системи синхронізації, яка на відміну від існуючих дозволила виявити факт, що середньоквадратична похибка оцінки часового положення за фазою при рівномірному законі розподілу корельованої завади в межах головної пелюстки кореляційної функції на 3 дБ менша, ніж похибка при «білому шумі» у разі, коли співвідношення сигнал/завада і сигнал/шум рівні та багато більші за 1.

3. Удосконалено математичну модель для дослідження похибок синхронізації, у якій оцінка зсуву шкал виконувалася за місцезнаходженням максимуму обвідної прийнятих сигналів. На відміну від відомої моделі додатково введено фазовий вимірювальний блок, що дозволяє порівнювати похибки фазової синхронізації та синхронізації за обвідною при використанні як узгодженої фільтрації, так і взаємкореляційної обробки сигналів.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Запропоновано захищене патентом використання штучних супутників Землі у якості спільного джерела пасивної радіотехнічної системи синхронізації із зменшенням тропосферної та іоносферної складових похибки синхронізації з кодovими і фазовими вимірами.

2. Фазові вимірювання з використання сигналів геостационарних штучних супутників Землі у якості спільного джерела показали, що середньоквадратичне відхилення оцінки зсуву шкал часу еталонів складає менше наносекунди при попередньому усуненні фазової невизначеності.

3. Експериментально підтверджена можливість зменшення каналної складової похибки фазової системи синхронізації шляхом часткової компенсації іоносферної та тропосферної затримок. Результат експерименту продемонстрував зменшення каналної похибки в 2-3 рази.

4. Експериментально визначено рівень апаратурної складової результуючої похибки фазової системи синхронізації з використанням сигналів супутникової системи функціонального доповнення. Рівень апаратурної похибки за результатами фазових вимірювань часової затримки складає десятки пікосекунд.

Результати дисертаційної роботи реалізовані в планових НДР ХНУРЕ та ННЦ «Інститут метрології», а також впроваджені в навчальний процес в курсі «Радіонавігаційні мережі та системи синхронізації», що підтверджується відповідними актами.

**Обґрунтованість і вірогідність результатів** дисертації обумовлена коректним використанням апарату часочастотних перетворень і теорії ймовірностей, методів частотного і спектрального аналізу, відсутністю протиріччя між результатами виконаних розрахунків і результатами експериментальних досліджень.

### **Особистий внесок здобувача**

Автор самостійно отримав основні результати дисертаційної роботи. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати. В роботі [1] здобувачем проведено аналіз, виконані розрахунки і оцінена похибка синхронізації для режиму фазових вимірювань. В статті [2] здобувачем оцінено вплив корельованих завад на точність вимірювань зсуву шкал часу та частоти за фазою когерентної носійної прийнятих сигналів спільного джерела. В [3] здобувачем проаналізовано вплив затримок сигналів на похибки синхронізації при фазових вимірах. В [4] розглянуто особливості фазових методів синхронізації часу і частоти. В роботі [5] здобувачем проведено теоретичний аналіз переваг і недоліків, які притаманні фазовим методам і алгоритмам високоточної частотно-часової синхронізації. В роботі [6] здобувачем проведено оцінку можливості зниження впливу іоносферної затримки на точність вимірів за фазою. При проведенні досліджень в роботі [7] здобувачем розроблено структуру експериментального стенду, виконано аналіз отриманих результатів. В статті [8] здобувачем розроблена математична модель і досліджені похибки фазового алгоритму загального охоплення для узгодженої фільтрації і взаємкореляційної обробки сигналів. У патенті [9] здобувачем запропоновано враховувати параметри тропосфери та іоносфери для

визначення похибок синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу та частоти.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні результати роботи представлені та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2011) (Харків, 2011) [11]; 8-й міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (МЕТРОЛОГІЯ-2012)» (Харків, 2012) [16]; міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»: (Запоріжжя, 2012) [18]; міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КриМіКо-2011, КриМіКо-2012) [13, 17]; 11-й міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії», (ТСЕТ'2012), (Львів-Славське, 2012) [14]; 15, 16 та 17 міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Харків, 2011, 2012, 2013) [10, 15, 20], 7 та 9 міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2011», «РТ-2013»», (Севастополь, 2011, 2013) [12, 19].

**Публікації.** Основні результати за темою дисертації опубліковані в 8 статтях у періодичних виданнях, які входять до переліку фахових видань України, стаття [6] опублікована в журналі «Радіоелектроніка, інформатика, управління», який включено до міжнародної науково метричної бази РІНЦ, стаття [8] опублікована в журналі «Східно – Європейський журнал передових технологій», що входить до міжнародних науково метричних баз Index Scopus та РІНЦ, отримано 1 патент України на корисну модель, опубліковано 11 тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура дисертаційної роботи.** Дисертація являє собою рукопис і складається із вступу, 4 розділів, висновку, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації 159 с. Список літератури містить 109 робіт вітчизняних і закордонних авторів. У додатки включені акти впровадження результатів роботи. Основний зміст дисертації викладений на 131 с., містить 97 рисунків та 21 таблицю.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень. Визначено наукову новизну роботи і її практичне значення. Наведено дані про особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві, апробації результатів дисертації та інформація про публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** проведений аналіз сучасного стану фазових радіотехнічних систем синхронізації часу та частоти і поставлені задачі дисертаційної роботи.

Розглянуті задачі синхронізації еталонів часу та частоти і як вони вирішуються на теперішній час.

Розглядаються фазові системи навігаційного та частотно-часового забезпечення. Досвід використання таких систем свідчить про те, що фазові вимірювання дають найкращі показники з точності визначення інформаційних параметрів.

Проведений порівняльний аналіз основних методів і алгоритмів синхронізації еталонів часу та частоти. Зроблено висновок, що самим перспективним для застосування є фазовий пасивний метод синхронізації на основі алгоритму загального охоплення.

Проаналізовані джерела похибок синхронізації та розглянуті особливості фазових принципів вимірювань. Переваги фазового методу по високій точності супроводжуються рядом недоліків, які полягають в ускладненні апаратури, що веде за собою її здороження, збільшення масо-габаритних показників, зниження надійності, але на сучасному рівні розвитку схемотехніки погіршення зазначених характеристик не суттєве.

Виконаний у даному розділі аналіз дозволив зробити наступні висновки.

1. Задача високоточної синхронізації просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти є актуальною в багатьох країнах світу, в тому числі, і в нашій державі. На сьогодні ця задача вирішується з використанням іноземних супутникових радіонавігаційних систем на основі фазових вимірювань. Однак в Україні відсутня повномасштабна власна система передачі одиниць часу та частоти, а тому споживачі частотно-часової інформації в переважній більшості користуються сервісами іноземних радіонавігаційних систем. Тому актуальною є задача удосконалення фазових методів синхронізації і створення альтернативної високоточної пасивної системи синхронізації.

2. Найбільшу точність забезпечує метод безпосередньої синхронізації, який використовується, як правило, у метрологічних цілях. Найбільше поширення в практичному використанні зараз отримав напівактивний метод з АЗО на основі фазових вимірювань (СРНС). Цей метод є економічним, забезпечує глобальність і безперервність, однак реалізується на основі іноземних супутникових систем, що криє загрозу інтересам національної безпеки. Це визначає актуальність сформульованої в роботі мети (удосконалення пасивних фазових систем синхронізації) і поставлених задач.

3. Для вирішення основних задач роботи необхідно провести теоретичний аналіз джерел похибок фазових методів синхронізації, визначити особливості реалізації алгоритмів і дослідити похибки фазових вимірювань шляхом їх математичного моделювання. Це дозволить обґрунтувати та реалізувати технічні рішення для побудови фазових систем синхронізації та здійснити їх експериментальні дослідження.

**Другий розділ** дисертаційної роботи присвячений теоретичному дослідженню похибок і невизначеностей ФМС.



Класифіковані джерела та визначена структура похибок і невизначеностей вимірювань для ФМС (рис.1), на основі якої у другому підрозділі проведено аналіз джерел апаратурних систематичних похибок та пропонуються шляхи їх визначення. Найбільш дієвим методом, який дозволяє вимірювати АСП, є так зване попереднє «пілотування», або ж калібрування апаратури, у ході якого з допомогою додаткової спеціалізованої апаратури виконуються регулярні контрольні заміри затримок сигналів у вузлах, блоках чи в системі синхронізації в цілому.

Проводиться теоретичний аналіз впливу багатопрореневості поширення радіохвиль на точність фазових систем синхронізації. Найбільшу загрозу для оцінки часового положення (ОЧП) несе дисперсна багатопрореневість, яка призводить до спотворень обвідної та зсуву фази когерентної носійної результуючого сигналу. Дослідження проводяться шляхом імітаційного моделювання на прикладі одночасно діючої однієї зсунутої за фазою корельованої завади з рівнем  $\alpha=0,3$  від основного сигналу та трьох значень зсуву в часі. Розрахунки виконуються для дзвоноподібного радіоімпульсу. Значення відносних похибок ОЧП за фазою та графік зміни повної фази показані на рис. 2. Моделювання показало, що результуючий сигнал отримує фазову модуляцію, у наслідок чого виникає похибка фазових вимірювань як у більшу, так і в меншу сторону, в залежності від того, випереджує чи відстає від сигналу корельована завада. Проведені дослідження показують важливість усунення багатопрореневості ПРХ при розгортанні фазової системи синхронізації.

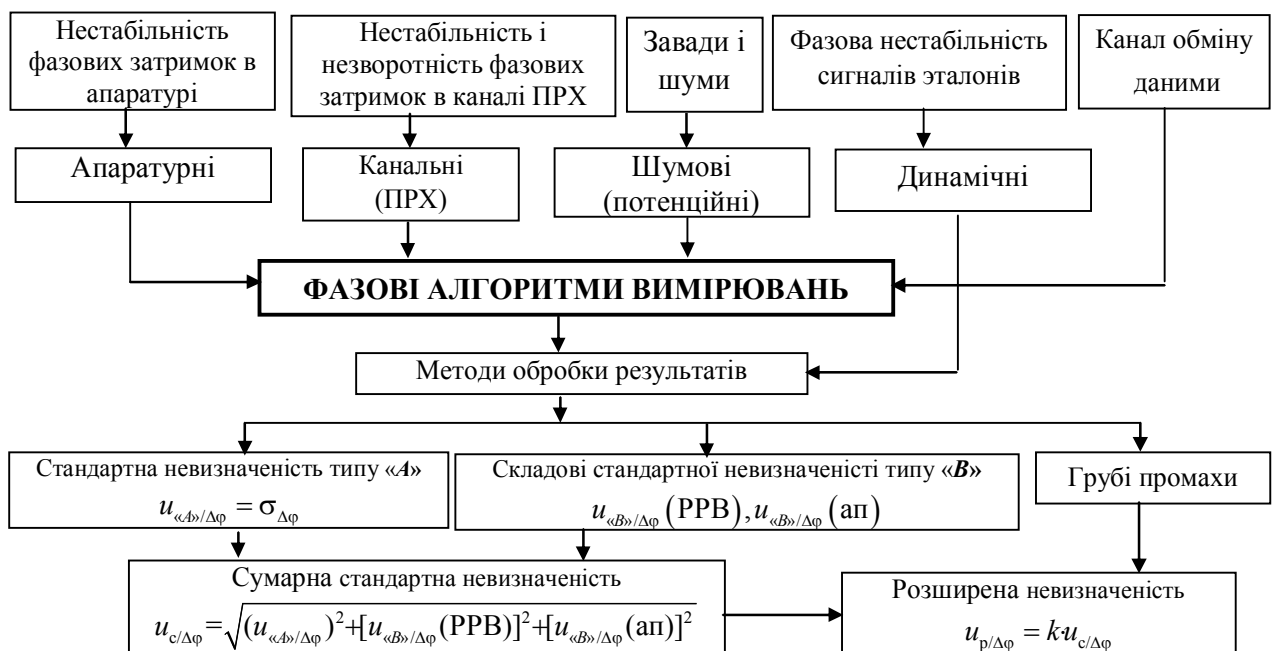


Рис. 1. Структура похибок і невизначеностей вимірювань для ФМС

Досліджується вплив затримки сигналів, яка виникає у вхідних колах, на результуючу похибку синхронізації фазової системи. Для аналізу

використовувалися основні положення теорії довгих ліній. Приводяться розрахункові співвідношення для подальшого математичного моделювання.

Розглядаються особливості реалізації фазових активних і пасивного алгоритмів вимірювань. Наведені формули для знаходження оцінки фазового зсуву шкал, складових результуючої похибки, відносних значень середньої квадратичної похибки (СКП) для цих алгоритмів. Обґрунтовуються переваги фазового пасивного методу синхронізації на основі алгоритму загального охоплення. Основними перевагами фазового АЗО (ФАЗО) є відсутність випромінювання в пунктах, що синхронізуються (це забезпечує скритність, завадостійкість, електромагнітну сумісність, екологічну та інформаційну безпеку), та можливість використання для вимірювань зсуву шкал взаємкореляційної обробки сигналів (ВКО). Застосування ВКО дає можливість використовувати спільні джерела сигналів (СДС) з неповністю відомими параметрами. Але у випадку ФАЗО необхідно, щоб носійна частота сигналу була відома і мала достатню стабільність.

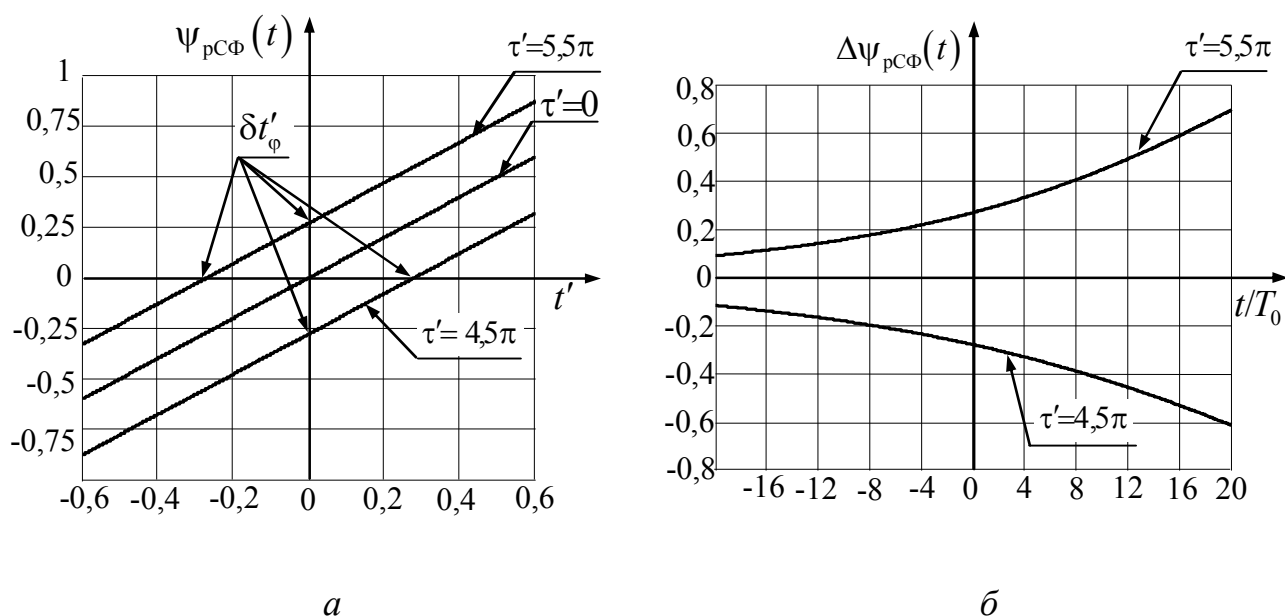


Рис. 2. Закони зміни повної фази (а) та її відхилення від лінійного закону (б) для результуючого сигналу у випадку одного променя з рівнем  $\alpha=0,3$

**Третій розділ** присвячений розробці математичних моделей для дослідження похибок пасивного ФМС, апаратних і алгоритмічних рішень по підвищенню стабільності частотно-часових параметрів пристроїв синхронізації.

Проведені дослідження похибок фазових вимірювань у залежності від зміни співвідношення сигнал/шум. Для цього розроблені дві математичних моделі. В першій моделі проводиться оцінка фази в районі максимуму сигналу часовим методом на виході узгодженого фільтру (рис. 3). Модель дозволяє оцінити середнє квадратичне відхилення (СКВ)  $\sigma_{\phi/\text{сф}}$  для різних співвідношень сигнал/шум і заданих значень фази сигналу  $\psi_0$ . В другій моделі застосовано квадратурну обробку (КО) сигналів і узгоджену фільтрацію (УФ) (рис. 4).

Друга модель дає змогу визначати співвідношення сигнал/шум при узгодженій фільтрації та СКВ у разі КО для різних значень  $\psi_0$ .

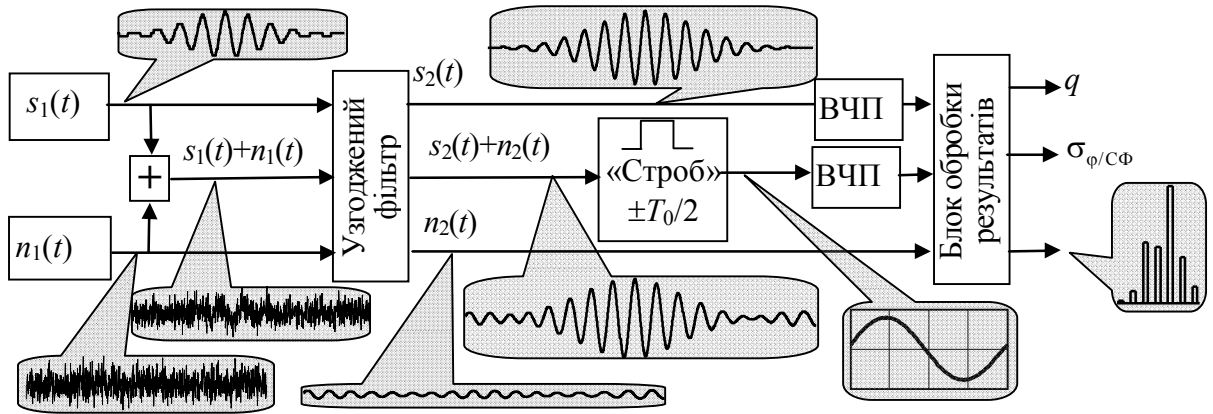


Рис. 3. Структура моделі № 1

Шляхом математичного моделювання досліджується вплив багатопроменевості каналу ПРХ на похибки синхронізації фазових систем. У якості досліджуваних сигналів використовуються *Sinc* і дзвіноподібний радіоімпульси з однаковою носійною частотою. Результати моделювання за точними співвідношеннями порівнюються з розрахунками за приблизними виразами на основі розкладання в ряд Тейлора результуючого сигналу поблизу максимуму основного сигналу. Результати моделювання свідчать про наступне. Похибка оцінки часового положення (ОЧП) за фазою носійної дзвіноподібного радіоімпульсу повністю співпадає з аналогічними залежностями для *Sinc* радіоімпульсу, тобто екстремальні значення цієї похибки не залежать від виду обвідної радіосигналу. Залежність абсолютної похибки ОЧП за фазою носійної частоти як для *Sinc*, так и для дзвіноподібного радіоімпульсу співпадають з обвідною основного сигналу.

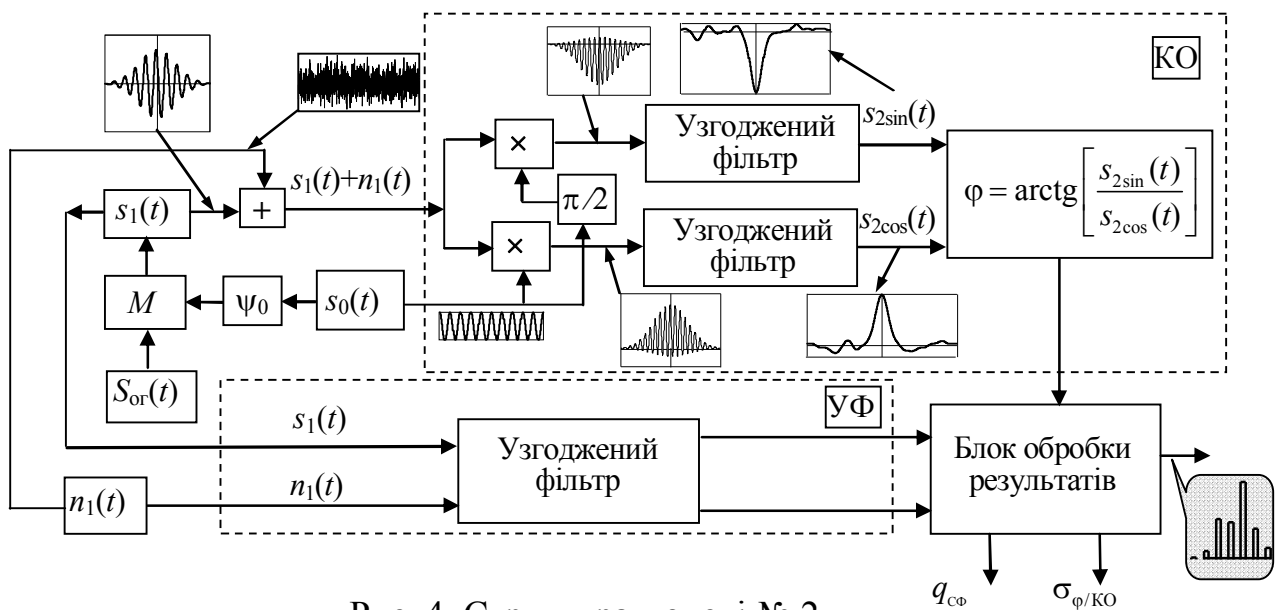


Рис. 4. Структура моделі № 2

Виконується моделювання затримок у входних пристроях фазової системи синхронізації. З результатів моделювання випливає, що залежність аномальної фазової затримки від відносної нормальної затримки лінії носить коливальний характер, амплітуда коливань пропорційна значенню результуючого коефіцієнту відбиття і змінюється аналогічно обвідній основного сигналу. Розрахунки за наближеними формулами узгоджуються з результатами математичного моделювання за точними співвідношеннями.

Проводиться імітаційне моделювання фазових вимірювань зсуву шкал з використанням квадратурної обробки ССД. Моделювання виконується для УФ та ВКО сигналів спільного джерела, які приймаються в пунктах системи синхронізації.

В основі моделі лежить фазовий принцип АЗО, часова діаграма якого приведена на рис. 5.

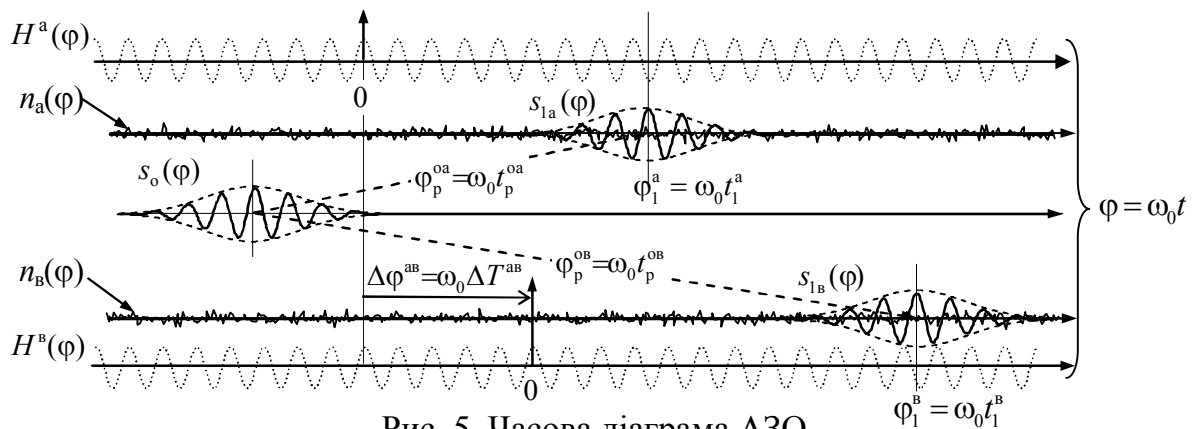


Рис. 5. Часова діаграма АЗО

Можливість застосування ВКО для фазових вимірювань ілюструє рис.6. На рис. 5 і 6 позначені:  $\omega_0$ ,  $\varphi = \omega_0 t$  - носійна частота і повна фаза сигналу спільного джерела;  $s(\varphi)$  - імпульсний вузькосмуговий радіосигнал спільного джерела;  $H_a(\varphi)$ ,  $H_b(\varphi)$  - шкали часу в пунктах **a** і **в**;  $\varphi_p^{oa} = \omega_0 t_p^{oa}$ ,  $\varphi_p^{ob} = \omega_0 t_p^{ob}$  - фазові затримки сигналів в каналі ПРХ;  $\Delta\varphi^{ab} = \omega_0 \Delta T^{ab}$  - фазовий зсув шкал пунктів **a** і **в**;  $s_{1a}(\varphi)$ ,  $s_{1b}(\varphi)$  - прийняті в пунктах радіосигнали;  $\varphi_1^a = \omega_0 t_1^a$ ,  $\varphi_1^b = \omega_0 t_1^b$  - фазові затримки прийнятих в пунктах сигналів;  $n_a(\varphi)$ ,  $n_b(\varphi)$  - завади в пунктах;  $R_{\text{ПРХ}}^{ab}(\varphi_\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{1a}(\varphi) s_{1b}(\varphi - \varphi_\tau) d\varphi$  -

взаємкореляційна функція (ВКФ) прийнятих в пунктах радіосигналів ( $\varphi_\tau = \omega_0 \tau$ ). Модель розроблена в пакеті Matchcad-14 і складається з блоку формування сигналів і завад (рис.3), а також блоків обробки сигналів і статистичної оцінки результатів вимірювань - з використанням УФ (рис.8) і ВКО (рис.9).

З результатів моделювання випливає, що значення порогових співвідношень сигнал/завада, які отримані в результаті моделювання для КО, приблизно на 3 дБ перевищують теоретичні значення. При однакових значеннях  $\Delta\varphi$  значення порогових співвідношень сигнал/завада для УФ  $q_{\text{пор.СФ}}$  більші за співвідношення для ВКО  $q_{\text{пор.ВКО}}$  також на 3 дБ.

Практично виключити вплив значень  $\Delta\varphi$  на порогові ефекти можливо, якщо проводити паралельно обробку не тільки для інтервалу спостереження  $-\pi < \Delta\varphi < \pi$ , а і для інтервалу  $0 < \Delta\varphi < 2\pi$ .

При  $q \gg q_{\text{пор}}$  СКВ вимірювання зсуву шкал в АЗО для КО, традиційної УФ і даних теорії майже співпадають.

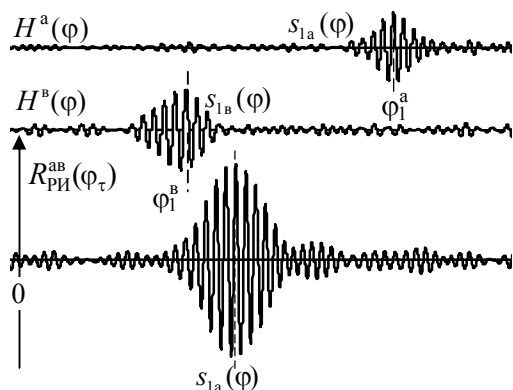


Рис.6. Використання ВКО у фазових вимірюваннях

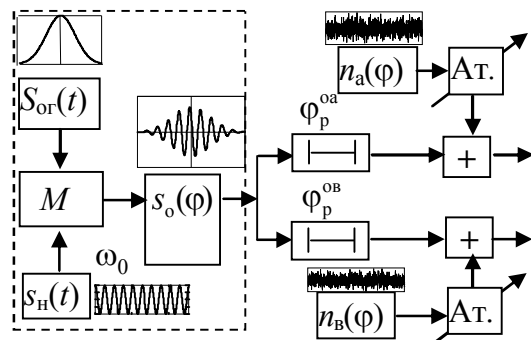


Рис.7. Блок формування сигналів і завад

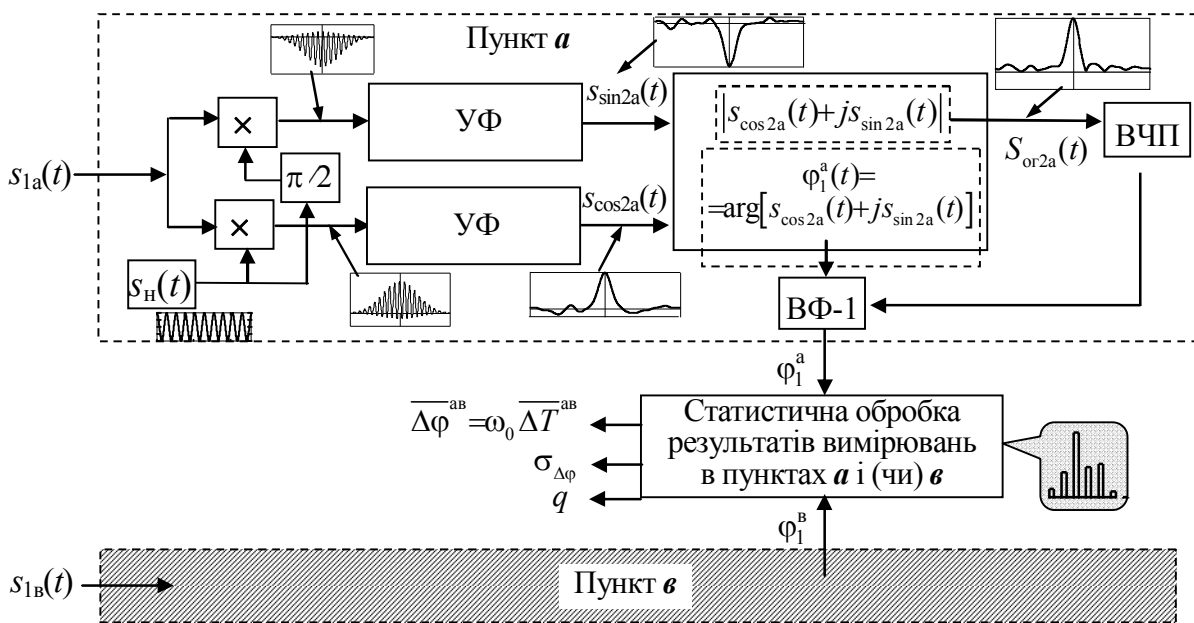


Рис.8. Блок узгодженої фільтрації

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи наводяться результати з розробки та експериментальної перевірки технічних рішень по створенню фазових систем синхронізації.

Пропонується технічне рішення, по якому отримано патент на корисну модель. Це технічне рішення завдяки введенню нових ознак забезпечує звірення еталонів часу і частоти з високими показниками точності, завадостійкості та оперативності. Такі технічні результати досягнуті за рахунок використання антен із спрямованими діаграмами, квадратурної обробки і

визначення часового положення за обвідними і фазами когерентних GPS - подібних сигналів супутникової системи функціонального доповнення (SBAS), а також врахування нутації ГС, затримок в апаратурі, параметрів іоносфери і тропосфери при визначенні зсуву шкал.

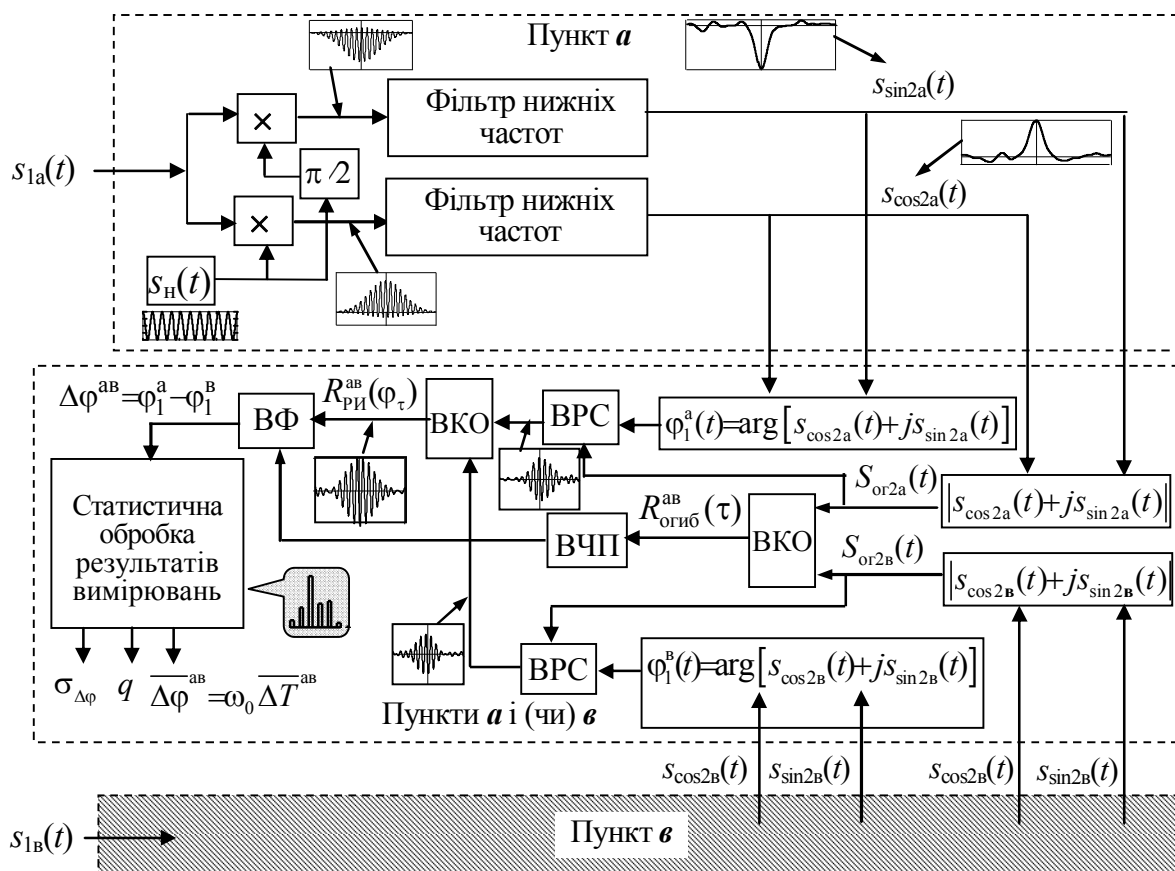


Рис.9. Блок взаємкореляційної обробки

Експериментальні дослідження, результати яких представлені в другому підрозділі, продемонстрували можливість створення системи високоточної часо-частотної синхронізації з використанням фазових вимірювань при прийомі сигналів ГС ШСЗ. В підрозділі наведені дані про три експерименти: у режимі «нульової» бази, на «короткій» 4 км базі та з використанням спрямованих антен. Основна проблема, яка була виявлена у ході першого експерименту – це суттєвий вплив добового орбітального переміщення ГС ШСЗ на точність визначення ефемеридних параметрів супутника на момент сеансу синхронізації. Для цього у другому експерименті застосована математична модель супутникової «нутації», що в результаті дало змогу отримати потенційне значення похибки синхронізації за фазовими вимірюваннями менше наносекунди. У третьому експерименті для прийому сигналів ГС ШСЗ використовувалися спрямовані антени. Це дозволило покращити співвідношення сигнал/шум на вході приймача сигналів в 1,5 – 2 рази, стійкість прийому сигналу покращилась, зникли перериви в сеансах запису інформації,

однак залишкова некомпенсованість «нутацій» дає похибку синхронізації 1...10 нс.

Наведені дані про застосування відомих методик для розрахунку іоносферної та тропосферної затримок сигналів ГС ШСЗ з метою зменшення каналної похибки синхронізації пасивної фазової системи. Розрахунки іоносферної затримки проводилися з використанням реальної навігаційної інформації та з застосуванням моделей Клобучара (*Klobuchar*) і *IONEX*. Модель *IONEX* дає кращу точність приблизно на 20%, однак її недоліком є неможливість отримання іоносферних карт в реальному масштабі часу. Також за допомогою відомого співвідношення проведені розрахунки та оцінена поправка на затримку сигналу супутника в тропосфері. За даними експерименту СКВ поправка складає 7,3 нс, максимальне значення затримки складає 30 нс, мінімальне – 13 нс, що свідчить про необхідність урахування цієї поправки при реалізації високоточної системи синхронізації.

Продемонстровані результати експерименту з визначення апаратурної похибки вимірювання зсуву шкал при використанні сигналів системи SBAS як спільного джерела для пунктів, що синхронізуються. Експеримент проводився в режимі «нульової бази», сигнал на приймачі подавався зі спільної спрямованої антени. Таким чином, похибки «нутації» та каналні похибки ПРХ були однакові і при розрахунку результуючої похибки синхронізації взаємно компенсувалися. Такий експеримент дозволив визначити внесок апаратурної похибки на точність синхронізації. Результати експерименту показали, що ця похибка за фазовими вимірами складає  $1.4 \cdot 10^{-11}$  с, а за кодovими вимірами –  $3.4 \cdot 10^{-10}$  с.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є дослідженням, у якому отримане нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі удосконалення пасивних фазових радіотехнічних систем синхронізації просторово рознесених еталонів часу і частоти за рахунок використання цифрової квадратурної обробки прийнятих в пунктах сигналів спільних джерел наземного або космічного розташування. При цьому отримані наступні нові результати:

В області теорії:

1. Розроблена нова математична модель пасивної фазової системи синхронізації з застосуванням квадратурної обробки сигналів, яка дозволяє оцінити вплив нелінійних ефектів, що виникають внаслідок квадратурних перетворень, на результуючу похибку синхронізації. Визначено, що нелінійні ефекти спричиняють зменшення співвідношення сигнал/шум на 3 дБ.

2. Розроблена нова математична модель для дослідження впливу багатопроменевості поширення радіохвиль на похибки пасивної фазової системи синхронізації, яка дозволила виявити факт, що середньоквадратична похибка оцінки часового положення за фазою при рівномірному законі розподілу корельованої завади в межах головної пелюстки кореляційної функції на 3 дБ менша, ніж похибка при «білому шумі» у разі, коли співвідношення сигнал/завада і сигнал/шум рівні та багато більші за 1.

3. Удосконалено математичну модель для дослідження похибок синхронізації, у якій оцінка зсуву шкал виконувалася за місцезнаходженням максимуму обвідної прийнятих сигналів. Додатково введено фазовий вимірювальний блок, що дозволяє порівнювати похибки фазової синхронізації та синхронізації за обвідною при використанні як узгодженої фільтрації, так і взаємнокореляційної обробки сигналів.

В області практичних розробок і експериментальних досліджень:

1. Запропоновано захищений патентом спосіб використання штучних супутників Землі у якості спільного джерела пасивної радіотехнічної системи синхронізації із зменшенням тропосферної та іоносферної складових похибки синхронізації з кодовими і фазовими вимірами.

2. Фазові вимірювання з використання сигналів геостационарних штучних супутників Землі у якості спільного джерела показали, що середньоквадратичне відхилення оцінки зсуву шкал часу еталонів складає менше наносекунди при попередньому усуненні фазової невизначеності.

3. Експериментально перевірена можливість зменшення каналної складової похибки фазової системи синхронізації шляхом часткової компенсації іоносферної та тропосферної затримок. Результат експерименту продемонстрував зменшення каналної похибки в 2-3 рази.

4. Експериментально визначено рівень апаратурної складової результуючої похибки фазової системи синхронізації з використання сигналів супутникової системи функціонального доповнення. Рівень апаратурної похибки за результатами фазових вимірювань часової затримки складає десятки пікосекунд.

Результати дисертаційної роботи реалізовані в держбюджетних НДР, які проводились у Харківському національному університеті радіоелектроніки та у Національному науковому центрі «Інститут метрології», а також впроваджені в навчальний процес в курсі «Радіонавігаційні мережі та системи синхронізації», що підтверджується відповідними актами.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хуссейн А. Ф. Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS [Текст] / Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Костыря А.А., Ал – Твежри Б.А. , Хуссейн А. Ф., Иванова Е.А., Асаад Х. Х.//Радиотехника: Всеукр. межвед. научн. -техн. сб. – 2011. – №. 165. – С. -46-55.

2. Хуссейн А. Ф. Погрешности оценки временного положения сигналов в многолучевых каналах/ Коваль Ю.А, Иванова Е.А., Костыря А.А., Твежри Б.А. Приймак В.Ю., Е.А, Хуссейн А. Ф. [Текст] //Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2011. – №. 3/12 (51). – С. 51-60.

3. Хуссейн А.Ф. Аномальные задержки в антенно-фидерных трактах систем, основанных на высокоточном измерении временного положения сигналов [Текст] / Коваль Ю.А., Приймак В.Ю., Костыря А.А., Соляник О.А., Семенов С.Ф., Х.Х. Асаад, А. Ф. Хуссейн//Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2011. Вып. №. 165. С. 37 — 45.

4. Хуссейн А. Ф. Методы и алгоритмы высокоточной частотно-временной



синхронизации [Текст] / Коваль Ю.А., Костыря А.А., Ал-Твежри Б.А., Хуссейн А.Ф. // Зв'язок. – 2012, №1. – С. -42-59.

5. Хуссейн А.Ф. Погрешности и неопределенности фазовых радиотехнических методов синхронизации разнесенных эталонов времени [Текст] / Коваль Ю.А., Костыря А.А., Иванова Е.А., Хуссейн А.Ф. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2012. Вып. №. 169. – С. 27–37.

6. Хуссейн А.Ф. Возможности снижения ионосферной составляющей погрешности синхронизации при использовании сигналов системы SBAS [Текст] / Ю. А. Коваль, В. Ю. Приймак, А.Ф.Хуссейн (Радіоелектроніка, інформатика, управління. - ЗНТУ. 2013, №1, с.40-45.)

7. Хуссейн А. Ф. Анализ и экспериментальные оценки неопределенности измерений сдвига шкал времени с применением сигналов системы SBAS [Текст] /Коваль Ю.А, Приймак В. Ю., Плехно С.А., Костыря А.А., Хуссейн А. Ф. // Системи обробки інформації. – 2013. – №. 3 (110). – С. 107-111.

8. Хуссейн А.Ф. Моделирование фазовых пассивных систем синхронизации, использующих квадратурную обработку сигналов [Текст] / Приймак В. Ю., Хуссейн А. Ф. // Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2013. – №. 3/9 (63). – С. 7-12.

9. Спосіб частотного – часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу й частоти: пат. 76698 Україна, МПК(2013.01). G 04 G 7/00. [Текст] / Коваль Ю.О., Приймак В. Ю., Хуссейн А.Ф., Костыря А.А.; заявник та патентовласник Харк. націон. ун-т. радіелектроніки; опубл. 10.01.13, Бюл. №1.

10. Хуссейн А. Ф. Стенд для оценки качества синхронизации с применением GPS-сигналов и направленных антенн [Текст] / Приймак В. Ю., Ал-Твежри Б. А., Хуссейн А. Ф. //Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 15-й междунар. молодежный форум, 18-20 апреля 2011 г.: тезисы докл. ЧЗ. – Х:, 2011. – С. 177–178.

11. Хуссейн А.Ф. Реализация алгоритма общего охвата для частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ [Текст] / Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Приймак В. Ю., Хуссейн А.Ф., Плехно С.А.// Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспектива развития» (МРФ-2011): междунар. радиоэлектр. форум, 19-22 окт. 2011 г.: тезисы докл. – Т1, Ч2, С. 83-84.

12. Хуссейн А.Ф. Влияние коррелированных помех на погрешности навигационных и частотно-временных измерений [Текст] / Приймак В. Ю., Хуссейн А. Ф., Асаад Х.Х // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. 7-ая международная молодежная научно-техническая конференция РТ-2011. Севастополь, 11-15 сентября 2011 г.: тезисы докл. – Т1, Ч2, С. 60.

13. Hussein A.F. Model of the channel time-frequency synchronization / Koval J.A, Obelchenko V.V, Kostyrja A. A., Al-Tvejri B.A, Hussein A.F. // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2011 21-th International Crimean Conference Issue Date: 12-16 Sept. 2011. On page(s): 425 – 426.

14. Akram Hussein. Channel error and uncertainty comparisons of standards of

time with signals of geostationary satellites / Yury Koval, Viacheslav Pryimak (Юрий Коваль, Вячеслав Приймак, Акрам Хуссейн Канальные погрешности и неопределенности сличения эталонов времени с применением сигналов геостационарных спутников) // Proceedings of the XI<sup>th</sup> International Conference TCSET'2012 "MODERN PROBLEMS OF RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTR SCIENCE", Lviv-Slavske, Ukraine Februaire 21-24, 2012. – Т1, Ч2, Р. 312.

15. Хуссейн А.Ф. Моделирование погрешностей фазовых измерений временного положения сигналов [Текст] / Листов Д.С., Хуссейн А.Ф. //Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 16-й междунар. молодежный форум, 17-19 апреля 2012 г.: тезисы докл. Т. 3. – Х., 2012. – С. 128–129.

16. Хуссейн А.Ф. Моделирование фазовых измерений сдвига шкал при использовании квадратурной обработки общих сигналов [Текст] / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.Ф. Хуссейн//Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія –2012): міжнар. наук. – техн. конф., 12-14 жовт.2012 р.: тези доп., Т1, - Х., 2012. – С. 119-123.

17. Хуссейн А. Ф. Пороговые эффекты при фазовых измерениях временного положения сигналов [Текст] / Коваль Ю. А., Костыря А.А., Иванова Е.А., Хуссейн А. Ф. //22-я Международная Крымская конференция"СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012): міжнар. наук. – техн. конф., 10-14 сент. 2012 р. тези докл., Т1, - Крым, Севастополь, 2012. – С.809,810.

18. Хуссейн А. Ф. Возможности снижения ионосферной составляющей погрешности синхронизации при использовании сигналов системы SBAS [Текст] / Коваль Ю. А., Приймак В. Ю, Хуссейн А. Ф. // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VI міжнар. наук.-практ. конф. 19 - 21 вересня 2012 р. тези. доп.– Запоріжжя: ЗНТУ, 2012 – С 55 - 56.

19 . Хуссейн А.Ф. Стенд для время-частотной синхронизации с использованием сигналов системы SBAS [Текст] / Приймак В.Ю., Плехно С. А., Ал-Твежри Б.А., Хуссейн А. Ф. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. 8-ая международная молодежная научно-техническая конференция РТ-2013. Севастополь, 22–26 апреля 2013 г.: тезисы докл. – Т. 3 – С 142 - 143.

20. Хуссейн А.Ф. Применение модели тропосферы в пассивной системе синхронизации с использованием системы SBAS [Текст] / Приймак В. Ю., Хуссейн А.Ф. //Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 17-й междунар. молодежный форум, 25-27 апреля 2013 г.: тезисы докл. Т.. – Х., 2013. – С. 142-143.

## АНОТАЦІЯ

**Акрам Фатхі Хуссейн Аль-Ашматі Удосконалення пасивних фазових радіотехнічних систем синхронізації рознесених еталонів часу і частоти. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2013.

Дисертація є дослідженням, у якому отримане нове рішення актуальної науково-прикладної задачі удосконалення пасивних фазових радіотехнічних систем синхронізації просторово рознесених еталонів часу і частоти за рахунок використання цифрової квадратурної обробки прийнятих в пунктах сигналів спільних джерел наземного або космічного розташування. Це дозволило отримати потенційне значення похибки синхронізації шкал часу за фазовими вимірами при використанні сигналів ГС ШСЗ менше однієї наносекунди і дає перспективи для створення високоточної ФПСС.

Практична цінність роботи полягає у наступному. Розроблені практичні рекомендації та запропоновані варіанти технічної реалізації з побудови пасивних фазових систем синхронізації, проведені експериментальні дослідження елементів систем високоточної синхронізації з застосуванням сигналів наземних та космічних спільних джерел.

Ключові слова: фазова пасивна система синхронізації, шкала часу та частоти, алгоритм, взаємна кореляційна функція, цифрова обробка сигналів, похибка синхронізації.

## АННОТАЦИЯ

**Акрам Фатхи Хуссейн Аль-Ашмати Усовершенствование пассивных фазовых радиотехнических систем синхронизации разнесенных эталонов времени и частоты. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2013.

Диссертация является исследованием, в котором получено новое решение актуальной научно-прикладной задачи усовершенствования пассивных фазовых радиотехнических систем синхронизации пространственно разнесенных эталонов времени и частоты за счет использования цифровой квадратурной обработки принятых в пунктах сигналов общих источников наземного или космического расположения. При этом получены следующие новые результаты:

В области теории:

1. Разработана новая математическая модель пассивной фазовой системы синхронизации с применением квадратурной обработки сигналов, которая позволяет оценить влияние нелинейных эффектов, возникающих вследствие квадратурных преобразований, на результирующую погрешность синхронизации. Определено, что нелинейные эффекты вызывают уменьшение соотношения сигнал/шум на 3 дБ.

2. Разработана новая математическая модель для исследования влияния многолучевости распространения радиоволн на погрешности пассивной фазовой системы синхронизации, которая позволила выявить факт, что среднеквадратичная погрешность оценки временного положения по фазе при равномерном законе распределения коррелированной помехи в пределах главного лепестка корреляционной функции на 3 дБ меньше, чем погрешность при «белом шуме» в случае, когда соотношение сигнал/помеха и сигнал/шум одного уровня и много больше 1.

3. Усовершенствована математическая модель для исследования погрешностей синхронизации, в которой оценка смещения шкал выполнялась по местонахождению максимума огибающей принятых сигналов. Дополнительно введен фазовый измерительный блок, что позволяет сравнивать погрешности фазовой синхронизации и синхронизации по огибающей при использовании как согласованной фильтрации, так и взаимокорреляционной обработки сигналов.

В области практических разработок и экспериментальных исследований:

1. Предложено защищенное патентом использование искусственных спутников Земли в качестве общего источника пассивной радиотехнической системы синхронизации с уменьшением тропосферной и ионосферной составляющих погрешности синхронизации с кодовыми и фазовыми измерениями.

2. Фазовые измерения с использованием сигналов геостационарных искусственных спутников Земли в качестве общего источника показали, что среднеквадратичное отклонение оценки смещения шкал времени эталонов составляет менее наносекунды при предшествующем устранении фазовой неопределенности.

3. Экспериментально проверена возможность уменьшения канальной составляющей погрешности фазовой системы синхронизации путем частичной компенсации ионосферной и тропосферной задержек. Результат эксперимента продемонстрировал уменьшение канальной погрешности в 2-3 раза.

4. Экспериментально определено уровень аппаратурной составляющей результирующей погрешности фазовой системы синхронизации с использованием сигналов спутниковой системы функционального дополнения. Уровень аппаратурной погрешности по результатам фазовых измерений временной задержки составляет десятки пикосекунд.

Результаты диссертационной работы реализованы в госбюджетных НИР, проводимых в Харьковском национальном университете радиоэлектроники и в Национальном научном центре «Институт метрологии», а также внедрены в учебный процесс в курсе «Радионавигационные сети и системы синхронизации», что подтверждается соответствующими актами.

Ключевые слова: пассивная фазовая система синхронизации, шкала времени и частоты, входное устройство, алгоритм, согласованная фильтрация, взаимная корреляционная функция, цифровая обработка сигналов, квадратурная обработка, погрешность синхронизации.

**ABSTRACT**

**Akram Fathi Hussein Al-Ashmati Improvement of the passive phase of radio systems synchronization posted standards of time and frequency. – A Manuscript.**

Thesis for the candidate's degree by specialty 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkov national university of radio electronics, Kharkov, 2013.

The dissertation is a study in which there is a new solution of actual scientific and applied tasks of improvement of passive phase radio-technical systems of synchronization of spatially separated standards of time and frequency through the use of digital quadrature processing adopted in paragraphs signals common sources of ground or space location. It is possible to obtain the potential value of the error of synchronization of time scales with phase measurements when using signals HS satellites less than one nanosecond and provides prospects for creating high-precision phase passive system synchronization.

The practical value of work consists in the following. Practical recommendations and options for the technical implementation by building a passive phase synchronization systems, experimental studies of elements of high-precision synchronization with the use of signals of a terrestrial and space public sources.

The Keywords: passive phase system synchronization, time scale and frequency, input device, algorithm, mutual correlation function, digital signal processing, quadrature handling, synchronization error.

Підп. до друку 11.12.13. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> . Спосіб друку – ризографія  
Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим.  
Зам. № 2-911. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.  
Харків, просп. Леніна, 14