

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ХАЛІД. Х. АСААД

УДК 621.396.96

**ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТНО-ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ
ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

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: кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Костиря Олександр Олексійович
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
провідний науковий співробітник
кафедри основ радіотехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Єрмаков Геннадій Валентинович
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри бронетанкового озброєння і
військової техніки факультету військової
підготовки;

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 "___" _____ 2013 р. в ___ 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 "___" _____ 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



д-р техн. наук Безрук В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

За останні двадцять років метрологічні характеристики найсучасніших еталонів у таких країнах як Німеччина, Італія, Росія, США, Франція, Японія істотно зросли – до 1×10^{-15} (тут і далі за текстом кількісною характеристикою точності частотних вимірів є значення відносної похибки частоти). Це у свою чергу вимагає підвищення точності звірень еталонів між собою, що й реалізується з використанням різних, у тому числі й космічних технологій. У розвинених країнах світу проблемі постійного вдосконалення науково-технічної бази та організаційної структури систем єдності вимірів часу та частоти приділяється постійна увага. Практично у всіх розвинених країнах існують державні установи, які займаються питаннями забезпечення єдності часо-частотних вимірювань і забезпеченням споживачів еталонними сигналами часу та частоти. Провідні держави створюють глобальні системи частотно-часового забезпечення для вирішення своїх проблем. Ними користуються й інші країни, але в той же час, вони створюють і свої системи, як з міркувань безпеки, так і виходячи з потреб господарства. Прикладами таких систем є системи Великобританії, Німеччини, Франції, Італії, Польщі, територія та кількість населення яких близькі до України, і навіть Швейцарії, яка значно менше згаданих країн.

Підвищення точності відтворення шкал часу і частоти первинними еталонами неминуче вимагає поліпшення якості роботи систем синхронізації. Для споживачів різних груп необхідно забезпечити похибку зберігання місцевої шкали часу щодо національної від значення менше 1 мкс до 1 мс...1с і відносною похибкою дійсного значення частоти від величини, меншої $\pm 1 \times 10^{-12}$, до $1 \times 10^{-6} \dots 1 \times 10^{-9}$. Отже, похибки, внесені системами синхронізації часу та частоти повинні бути істотно меншими наведених значень.

Задача порівняння територіально рознесених зберігачів часу та частоти може вирішуватися за допомогою пасивних систем синхронізації (ПСС), які мають ряд переваг перед іншими системами синхронізації. Основними такими перевагами є:

1. Оперативна і незалежна синхронізація високоточних еталонів часу та частоти.
2. Висока скритність і перешкодозахищеність роботи системи синхронізації.
3. Можливість вирішення задач синхронізації як в окремо взятому регіоні, так і в загальнодержавному масштабі з мінімальними часовими й фінансовими витратами.
4. Електромагнітна сумісність.
5. Екологічна та біологічна безпека.

Актуальність розвитку і застосування ПСС має для України особливо велике значення, оскільки країна в цей час не має власної національної системи синхронізації часу та частоти (ССЧЧ), а для вирішення задач синхронізації стандартів (еталонів) часу і частоти застосовується система GPS (США) і

ГЛОНАСС (Росія). Користування частотно-часовими сервісами цих систем можливе за наявності відповідної апаратури споживачів, яка не виробляється в Україні, і тому не відповідає в повній мірі вимогам до застосування системами урядового, військового та ін. видів захищеного зв'язку. Прямі канали синхронізації споживачів від Державного еталона часу і частоти, що знаходиться в м. Харкові, на сьогодні відсутні, а для Метрологічного центру військових еталонів, який дислокується також в м. Харкові, необхідно мати що найменше два незалежних високоточних канали. Мінімальна похибка синхронізації шкал часу, яка гарантується іноземними виробниками, складає не менше 50 нс. Тому є актуальною науково-прикладна задача розробки альтернативних методів синхронізації, які б забезпечували якісні показники на рівні і навіть кращі за характеристики іноземних систем. Виконання цієї задачі можливе при застосуванні пасивних методів синхронізації і створенні ПСС.

Широке впровадження ПСС можливо, насамперед, при достатній розробці апаратних і алгоритмічних засобів підвищення стабільності їх частотно-часових параметрів, для чого необхідно обґрунтувати вибір методів і алгоритмів роботи ПСС, провести дослідження основних джерел похибок синхронізації, властивих обраному методу та алгоритму, обґрунтувати вибір технічних рішень і процедур обробки результатів вимірювань у процесі звірення еталонів часу і частоти.

Таким чином, є актуальною тема дисертаційної роботи, яка присвячена підвищенню стабільності частотно-часових параметрів пристроїв синхронізації радіотехнічних систем шляхом запровадження нових апаратно-алгоритмічних засобів, які побудовані на застосуванні взаємної кореляційної цифрової обробки прийнятих сигналів спільного стороннього джерела, коли різниця в часі розповсюдження сигналу від джерела до пунктів відома.

Дослідження проводяться з використанням результатів, отриманих на протязі кількох десятиріч науковим колективом під керівництвом проф. Кащєєва Б.Л., а також є логічним продовженням робіт з удосконалення систем синхронізації часу та частоти.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Актуальність теми роботи підтверджується також її зв'язком із плановими НДР, які проводились у Харківському національному університеті радіоелектроніки і у Національному науковому центрі «Інститут метрології», у яких автор брав участь як виконавець:

- № 239 «Розробка альтернативних методів синхронізації, передачі й захисту інформації для використання в Державній інформаційній системі з надзвичайних ситуацій», підтема № 239-5 «Розробка принципів побудови вітчизняного комплексу інформаційно-вимірювальних систем для прогнозування й аналізу наслідків надзвичайних ситуацій» (№ держреєстрації 0109U001635);

- НДР «Забезпечення функціонування Державної служби єдиного часу і еталонних частот (ДСЄЧ) в Україні» (№ держреєстрації 0107U007810).

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає в удосконаленні пасивних систем синхронізації за рахунок вибору апаратних і алгоритмічних рішень, що дозволяють підвищити точність звірення шкал просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести теоретичний аналіз і математичне моделювання систем частотно-часової синхронізації, що використовують сигнали спільних джерел наземного та космічного базування;
- зробити теоретичний аналіз основних джерел похибок і шляхів підвищення стабільності частотно-часових параметрів у системах синхронізації;
- здійснити аналіз похибок синхронізації, викликаних флуктуаціями затримок в антенно-фідерних трактах;
- розробити математичні моделі для дослідження фільтруючих властивостей системи ФАПЧ і впливу затримок в антенно-фідерних трактах на похибки синхронізації;
- розробити схемотехнічні рішення та алгоритми функціонування пристроїв синхронізації, а також алгоритми обробки результатів вимірів;
- провести експериментальну перевірку результатів теоретичних досліджень.

Об'єктом дослідження є процес синхронізації просторово рознесених еталонів часу та частоти з використанням сигналів спільних джерел (ССД).

Предметом дослідження є математична модель ПСС, алгоритми синхронізації з використанням ССД, похибки синхронізації і їхні джерела, процедури обробки результатів вимірів зсувів шкал часу.

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

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено нову математичну модель для дослідження аномальних затримок в антенно-фідерних трактах пристроїв синхронізації. На відміну від відомих результатів встановлено, що джерелом виникнення аномальних затримок є відбиття від опору навантаження та джерела сигналу через неузгодженість їхніх опорів з опором лінії передачі. Найбільшою мірою аномальні затримки проявляються при роботі антенно-фідерних пристроїв на випромінювання. Для зниження аномальних затримок необхідно оптимізувати опір лінії передачі і здійснювати «пілотування» затримок за рахунок застосування спеціалізованої вимірювальної апаратури.

2. Удосконалена математична модель системи фазової автопідстройки частоти. Наукова новизна моделі полягає в тому, що вона, на відміну від відомих, дозволяє досліджувати флуктуаційні характеристики когерентного

гетеродина тракту прийому сигналу й оцінити їхній вплив на похибки синхронізації в ПСС.

3. Вперше проведений порівняльний аналіз сигналів найпоширеніших наземних радіоджерел з метою їхнього використання в якості джерела спільних сигналів при побудові місцевої (регіональної) пасивної системи синхронізації часу та частоти, що дозволяє, на відміну від відомих методик оцінки, враховувати як загально використовувані характеристики - ефективну ширину спектрів сигналів та співвідношенням сигнал/шум, так і вперше отримані кореляційні властивості.

Практичне значення отриманих результатів

1. Експериментально підтверджена можливість використання у якості джерела спільного сигналу передавачів наземного аналогового та цифрового ТБ. Випадкова складова похибки виміру зсуву шкал при використанні сигналу ТБ склала одиниці наносекунд.

2. Розроблені та апробовані нові структурні схеми і алгоритми цифрової обробки результатів вимірів зсуву шкал просторово рознесених стандартів часу та частоти з використанням сигналів спільних джерел.

3. Запропоновано нове технічне рішення реалізації алгоритму загального охоплення (АЗО) при використанні сигналів низько та середньорбітальних телекомунікаційних ШСЗ (захищено патентом).

4. Уперше експериментально доведена можливість зв'язу просторово рознесених мір часу та частоти шляхом взаємної кореляційної обробки прийнятих у пунктах сигналів наземного цифрового телебачення та наземних радіостанцій.

Результати дисертаційної роботи реалізовані в вищевказаних НДР, а також впроваджені в навчальний процес в курсі «Радіонавігаційні мережі та системи синхронізації», акти впровадження містяться в додатках до дисертації.

Обґрунтованість і вірогідність результатів дисертації обумовлена коректним використанням відомих методів аналізу в теоретичних дослідженнях і позитивному результаті порівняння розрахункових даних з даними натурних експериментів.

Особистий внесок здобувача

Автор самостійно одержав основні результати дисертаційної роботи. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати. В [1] здобувачем проведені дослідження залежності максимальних і мінімальних значень аномальної затримки від величини еквівалентного опору. В [2] для проведення досліджень автором розроблена структурна схема експериментальної установки. В [3] здобувачем розроблений алгоритм дослідження фільтруючих властивостей системи фазової автопідстройки когерентного гетеродина. При проведенні досліджень кореляційних характеристик сигналів спільних джерел в [4] здобувачем розроблені методика і отримані результати проведення порівняльного аналізу. В [5] здобувачем розроблений алгоритм статистичної обробки результатів вимірів зсуву шкал просторово рознесених еталонів часу й частоти. При проведенні досліджень в

[6, 8] здобувачем розроблені алгоритми функціонування експериментальних стендів, визначені їх склад і структура. У патенті [7] здобувачем запропонований алгоритм визначення зсуву шкал частоти еталонів.

Апробація результатів дисертації

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

Публікації. Основні результати за темою дисертації опубліковані в 6 статтях у періодичних виданнях, які входять до переліку фахових видань України, стаття [5] опублікована в журналі «Радіоелектроніка, інформатика, управління», який включено до міжнародної науково метричної бази РІНЦ, отримано 1 патент України на корисну модель, опубліковано 8 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 154 с. Список літератури містить 108 робіт вітчизняних і закордонних авторів. У додатки включені акти впровадження результатів роботи. Основний зміст дисертації викладений на 139 сторінках, містить 77 рисунків та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання 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 по темі дисертації.

У **першому розділі** проведений аналіз сучасного частотно-часового забезпечення радіотехнічних систем і поставлені задачі дисертаційної роботи.

У першому підрозділі розглянуті завдання частотно-часового забезпечення і важливість їх вирішення в державі. Проаналізовано вимоги до точності синхронізації для різних категорій споживачів.

У другому підрозділі показана актуальність вирішення питань частотно-часового забезпечення для наземних і космічних радіотехнічних систем.

Найбільш високі вимоги по точності синхронізації пред'являються при веденні шкал Державного і первинного еталонів (похибка звірення шкал частоти на рівні $10^{-13} \dots 10^{-14}$, часу – частки наносекунди), а також при синхронізації стандартів наземних і супутникових радіонавігаційних систем. Синхронізація частоти опорних генераторів цифрових мереж зв'язку повинна забезпечуватися з точністю не гірше 10^{-9} .

У третьому підрозділі проведений порівняльний аналіз основних методів високоточної синхронізації. Розглянутий радіометеорний метод синхронізації, дуплексний з використанням супутникового каналу зв'язку, а також синхронізація за допомогою супутникових радіонавігаційних систем (СРНС). Наведено їхні основні достоїнства і недоліки. Споживачі в Україні вимушено використовують сервіси іноземних СРНС, що не завжди бажано.

У четвертому підрозділі проведено порівняння основних алгоритмів вимірювання зсуву шкал і обґрунтована перевага використання пасивного АЗО. Однак, побудова систем синхронізації часу та частоти з використанням даного алгоритму стримується через недостатню проробку апаратних рішень при створенні пристроїв синхронізації, що, у свою чергу, вимагає розробки алгоритмів їхнього функціонування і впровадження цифрової обробки інформації.

Представлений в 1 розділі аналіз дозволив зробити наступні висновки.

1. Метрологія часу і частоти, функціонування наземних та космічних РНС, геофізичні і астрономічні виміри, робота мереж зв'язку та ін. засновані на синхронізації від єдиних еталонів (стандартів) часу та частоти.

Задача передачі національної шкали часу і частоти в Україні на цей час не вирішена і це необхідно робити з урахуванням постійно зростаючих вимог до точності синхронізації. Тому актуальною є задача апаратно-алгоритмічного покращення частотно-часових характеристик пристроїв синхронізації, які використовуються у радіотехнічних системах різного призначення.

2. Найбільшу точність забезпечує метод безпосередньої синхронізації, який використовується, як правило, у метрологічних цілях. На практиці для синхронізації просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти застосовується активний метод з зворотньо-ретрансляційним алгоритмом через дуплексні канали зв'язку, а також напівактивний метод з АЗО (СРНС). Останній є більш економічним, забезпечує глобальність і безперервність, однак реалізується на основі іноземних супутникових систем, що несе загрозу інтересам національної безпеки. Це визначає актуальність сформульованої в роботі мети (удосконалення пасивних систем синхронізації) і поставлених задач.

3. Для вирішення основних задач роботи необхідно проаналізувати основні джерела похибок, властивих пасивному методу синхронізації на основі АЗО. Це дозволить обґрунтувати та реалізувати вибір апаратно-алгоритмічних рішень для побудови пристроїв синхронізації.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу джерел похибок і шляхів підвищення стабільності частотно-часових параметрів пристроїв синхронізації радіотехнічних систем.

На підставі розглянутих у першому підрозділі джерел похибок застосована узагальнена модель пасивної системи синхронізації, структура якої наведена на рис. 1, що складається з ряду окремих моделей (шкал еталонів, сигналу спільного джерела $s_0(t)$, каналу поширення радіохвиль (ПРХ), шумів, нестабільності апаратних затримок). Модель дозволяє імітувати результати оцінки зсуву шкал $\widehat{\Delta T}_{\text{АЗО}}(t)$.

Різні джерела похибок, згідно узагальненої моделі, трансформуються в результуючу похибку синхронізації відповідно алгоритму синхронізації, що використовується. Із цього випливає особлива роль, що грають алгоритми виміру зсуву шкал часу і частоти. Принципово відрізняючись від алгоритмів роботи інших систем, алгоритми синхронізації забезпечують зарахування або виключення часу затримки сигналів у каналі ПРХ, визначають рівень апаратних і випадкових похибок.

У другому підрозділі проведений теоретичний аналіз джерел похибок пасивної системи синхронізації, обумовлених неідентичністю і флуктуаціями затримок в антенно-фідерних пристроях (АФП) і похибок, зумовлених похибками цифрового перетворення і обробки результатів вимірів, які є складовими апаратних затримок, що входять в узагальнену модель рис.1.

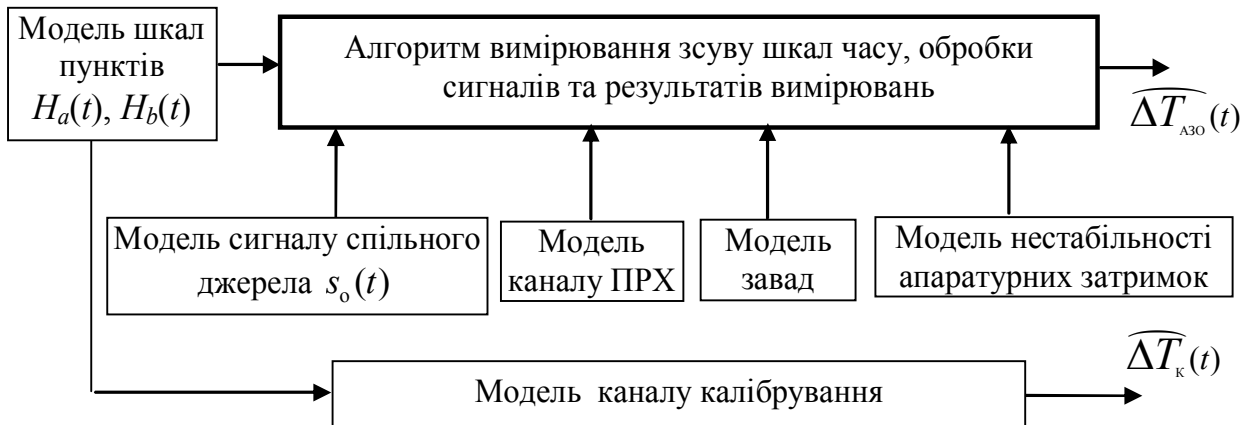


Рис. 1. Структура узагальненої моделі пасивної системи синхронізації

В основу теоретичного аналізу затримок сигналів в АФП покладена структурна схема, наведена на рис. 2. Схема включає: 1 – джерело сигналу відомої форми $s_0(t)$ із внутрішнім опором $\underline{Z}_i$; 2 – довга лінія (кабель) з параметрами: l – довжина; $\underline{Z}_e$ – хвильовий опір; v_ϕ – фазова швидкість;

α – коефіцієнт загасання; $\beta = 2\pi / \lambda = \omega / v_\phi$ – коефіцієнт фази; $\underline{Z}_n$ – опір навантаження; 3 – пристрій вимірювання часового положення (ВЧП) сигналу.

Вихідний сигнал на опорі навантаження лінії позначений $s_n(t)$, реальний час затримки на виході пристрою ВЧП – τ_p ; комплексний коефіцієнт розповсюдження в лінії – $\gamma = \alpha + j\beta$.

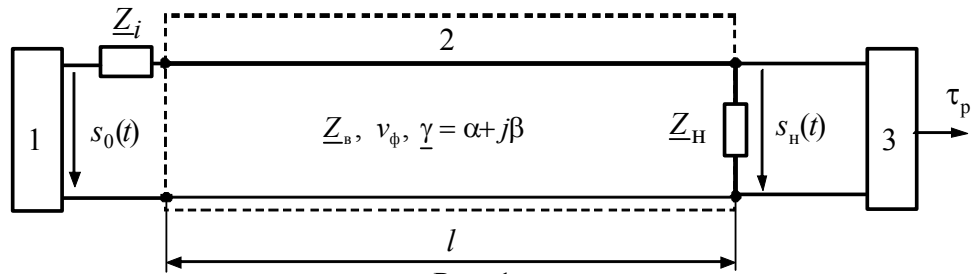


Рис. 2. Структурна схема для аналізу затримок сигналів в АФП

Приблизно оцінити залежність аномальної затримки від нормальної затримки можна за співвідношенням

$$\Delta\tau_a(\tau_0) \approx -\frac{\rho_\Sigma s_0'(-2\tau_0)}{s_0''(0)}, \quad (1)$$

де $\Delta\tau_{an}$ - аномальні затримки в АФП; ρ_Σ - результуючий коефіцієнт відбиття; $s_0'(-2\tau_0)$, $s_0''(0)$ - похідні затриманого сигналу при розкладанні рядом Тейлора поблизу $t = \tau_0$.

З результатів проведених досліджень аномальних затримок антенно-фідерних трактів впливає:

- аномальні затримки $\Delta\tau_{an}$ в АФП, що оцінюються як різниця реальних (τ_p) і ідеальних (τ_0) затримок, викликані спотвореннями сигналів за рахунок їхнього відбиття від опорів навантаження та джерела; аномальні затримки пропорційні результуючому коефіцієнту відбиття ρ_Σ ($\Delta\tau_{an}=0$ при $\rho_\Sigma=0$; $\Delta\tau_{an}>0$ при $\rho_\Sigma>0$; $\Delta\tau_{an}<0$ при $\rho_\Sigma<0$);

- величину аномальної затримки в АФУ можна оцінити розрахунковим шляхом при відомих параметрах сигналу, лінії, опорів навантаження та генератора; аномальна затримка може бути визначена експериментальним шляхом.

У третьому підрозділі проводиться дослідження джерел похибок синхронізації методом математичного моделювання. Моделюється реакція АФП на вплив Sinc- і дзвіноподібного відео та радіоімпульсів, розробляється математична модель системи фазової автопідстройки щодо задачі синхронізації часу та частоти.

З результатів моделювання можна зробити висновки:

- аномальна затримка відеоімпульсів при $|\rho_\Sigma| \ll 1$ пропорційна похідній сигналу і досягає екстремальних значень ($\Delta\tau_{an\max}$, $\Delta\tau_{an\min}$) для відносних довжин кабелю $\tau_0/\tau_u=0,1\dots0,2$; при $\tau_0 \ll 0,1\tau_u$ і $\tau_0 \gg 0,2\tau_u$ аномальними затримками можна знехтувати;

- при ВЧП за обвідною радіоімпульсу залежність амплітуд $\Delta\tau_{\text{ан}}(\tau_0)$ збігається з функцією $\Delta\tau_{\text{ан}}(\tau_0)$ для модулюючого відеоімпульсу;
- при ВЧП за фазою когерентної носійної частоти радіоімпульсу залежність амплітуд $\Delta\tau_{\text{ан}}(\tau_0)$ збігається з формою модулюючого відеоімпульсу, а екстремальні значення аномальних затримок ($\Delta\tau_{\text{анmax}}$, $\Delta\tau_{\text{анmin}}$) не залежать від форми сигналу;
- довжини кабелю, що відповідають нульовим значенням аномальних затримок радіоімпульсів при вимірах по обвідним і фазам, при $|\rho_\Sigma| \ll 1$ відрізняються на величину нормальної затримки $\tau_0 \approx T_0/8$; на таку ж величину відрізняються довжини кабелів, при яких мають місце максимальні й мінімальні відхилення аномальних затримок при вимірах по обвідним і фазам;
- для комплексних значень опорів навантаження та генератора (Z_H, Z_i) залежності $\Delta\tau_{\text{ан}}(\tau_0)$ мають постійну складову, обумовлену дільником напруги і, крім квазігармонічного характеру, додаткову амплітудну модуляцію;
- найбільшою мірою аномальні затримки проявляються при роботі АФП на випромінювання, оскільки, для досягнення прийняттого КПД вихідний опір передавача $R_i \gg R_H$, а опір антени в смузі частот сигналу відрізняється від хвильового не менш чим в 1,1...1,2 рази;
- для зниження аномальних затримок у системах з високоточним ВЧП сигналів, крім оптимізації узгодження кабелю з навантаженням і генератором, необхідно передбачати пілотування затримок в АФП із застосуванням додаткової вимірювальної апаратури.

Математична модель системи ФАПЧ (рис. 3) дозволяє досліджувати вплив флуктуаційних властивостей когерентного гетеродина тракту прийому сигналу на результуючу похибку синхронізації.

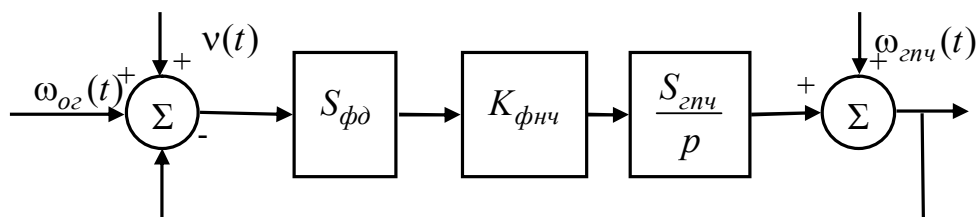


Рис. 3. Математична модель системи ФАПЧ

Четвертий підрозділ присвячений аналізу шляхів підвищення стабільності частотно-часових параметрів пристроїв синхронізації радіотехнічних систем. Пропонуються й далі розглядаються такі шляхи підвищення стабільності:

- використання сигналів наземного аналогового та цифрового телебачення і їх взаємна кореляційна обробка в пунктах синхронізації;
- використання фазових вимірювань при звіреннях мір часу і частоти;
- використання сигналів низькоорбітальних і геостационарних ШСЗ;
- застосування цифрової обробки сигналів з використанням розроблених алгоритмів;

- розробка алгоритмів дослідження складових блоків пристроїв синхронізації на базі їхніх імітаційних моделей.

Третій розділ присвячений розробці апаратних і алгоритмічних рішень по підвищенню стабільності частотно-часових параметрів пристроїв синхронізації.

У першому підрозділі проведені теоретичні дослідження з реалізації АЗО з використанням спільних сигналів наземних радіоджерел. Розглянуті в якості ССД сигнали аналогового телебачення, радіомовлення та цифрового наземного ТБ. Найкращим ССД для побудови регіональної ССЧ є сигнал цифрового ТБ. Даний сигнал має найбільшу ефективну ширину спектра та при рівності інших параметрів забезпечує найменше значення похибки синхронізації. Шумоподібна структура такого сигналу формує однопікову АКФ і, отже, взаємна кореляційна обробка здійснюється в умовах однозначності вимірювань. Тому при використанні сигналу цифрового ТБ слід очікувати найменшого значення похибки звірення шкал просторово рознесених стандартів (еталонів) часу та частоти в порівнянні з іншими розглянутими сигналами.

У другому підрозділі розкриваються рекомендації з побудови пасивних систем синхронізації з використанням сигналів ШСЗ. Використання сигналів ШСЗ дозволяє зняти обмеження по дальності роботи системи синхронізації, які мають місце при реалізації АЗО на основі наземних радіоджерел. З цією метою розглядається можливість використання сигналів геостаціонарних, а також низько і середньо орбітальних ШСЗ. Запропонований спосіб синхронізації часу та частоти з використанням сигналів низько і середньо орбітальних ШСЗ, захищений патентом [7]. У заявленому винаході використані часові відлікові особливості прийнятого сигналу, а саме моменти, коли носійна частота сигналу рухомого спільного джерела має нульові та заздалегідь розраховані значення доплерівського зсуву частоти при прийомі сигналів спільного джерела в пунктах, просторове положення яких (координати) відоме з необхідною для виконання розрахунків точністю. Часовому положенню моменту нульового доплерівського зсуву носійної частоти в одному пункті відповідає момент часу, коли носійна частота сигналу спільного джерела в іншому пункті має відомий, заздалегідь розрахований зсув. Варіант технічної реалізації заявленого способу наведений на рис. 4, де, крім очевидних, прийняті позначення: $\otimes$ - перемножувач; ПЧК - перетворювач частота-код; ЕОП - електронний обчислювальний пристрій.

Третій підрозділ присвячений розробці алгоритмів цифрової обробки результатів вимірів зсуву шкал часу та частоти при використанні ССД. З використанням відомих методів розроблені алгоритми відновлення безперервної функції за її дискретними відліками, які охоплюють можливі види ВКФ сигналів спільних джерел, прийнятих в пунктах. Поряд зі стандартними алгоритмами реалізований один з еволюційних – алгоритм бджолиного рою (рис. 5), який дозволяє знаходити максимум функції при наявності кількох екстремальних точок, що характерно для знаходження максимального значення кореляційної функції з радіочастотним заповненням.

З використанням відомих підходів і співвідношень розроблені алгоритми статистичної обробки результатів вимірювань, які забезпечують зручність і наочність сприйняття інформації при звіренні шкал еталонів часу і частоти.

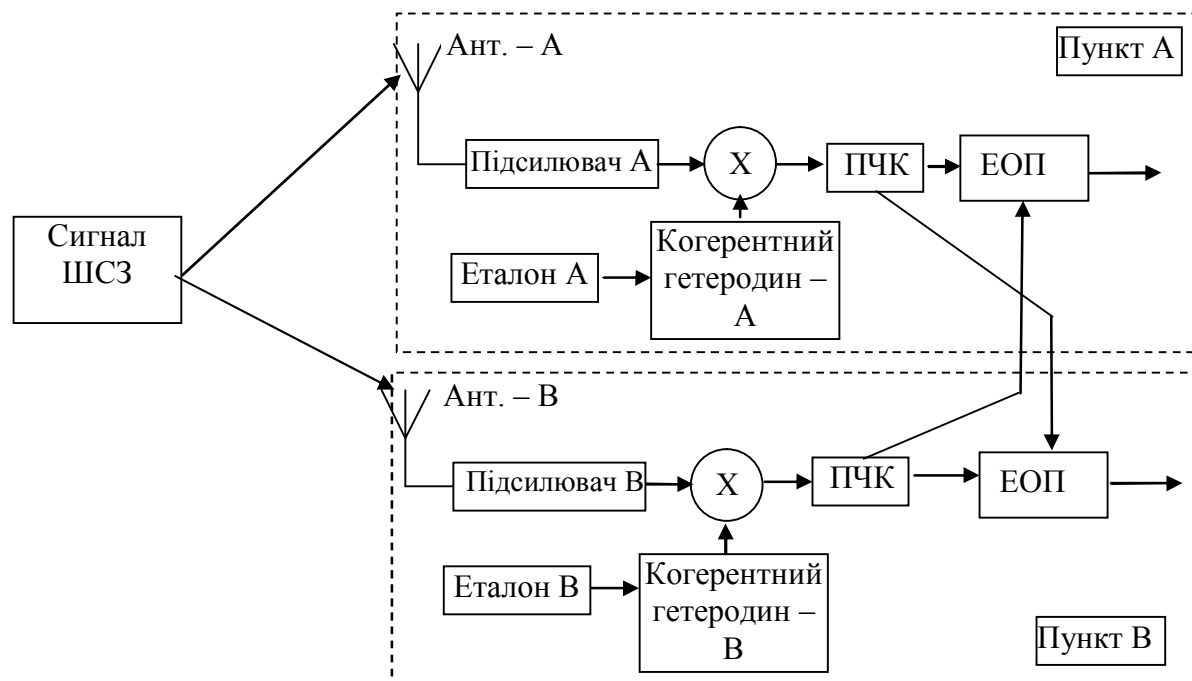


Рис. 4. Структурна схема системи синхронізації

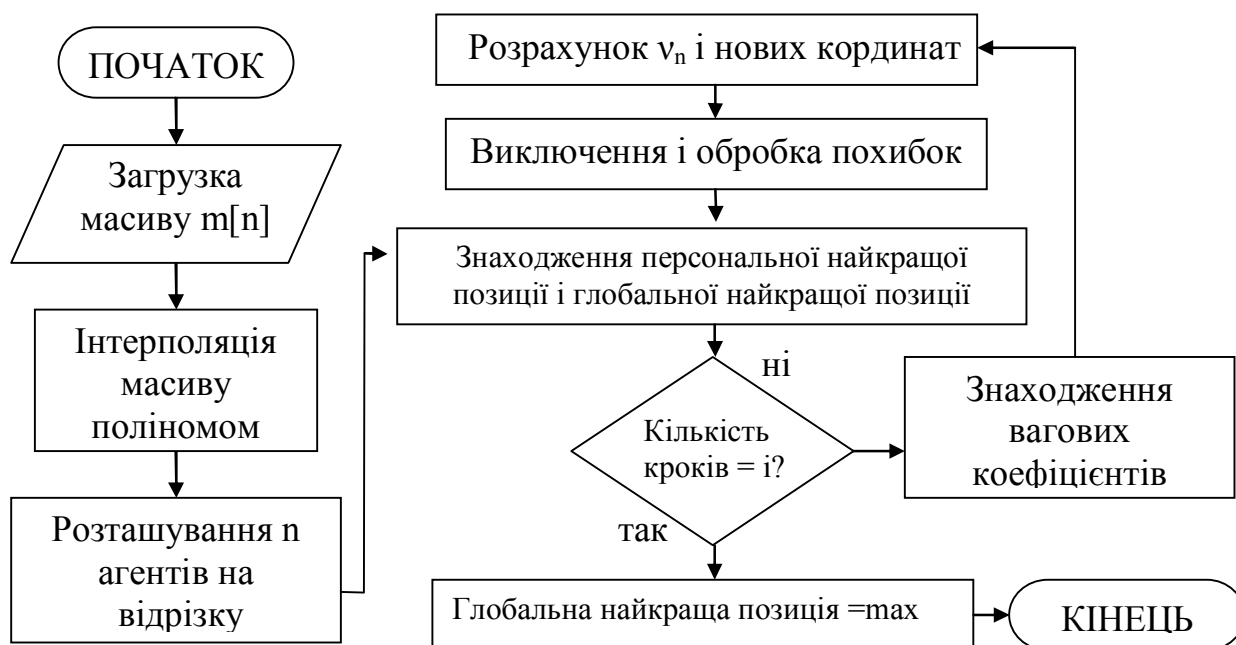


Рис. 5. Алгоритм бджолиного рою

Розроблено алгоритм і визначена обчислювальна похибка цифрової обробки результатів вимірів. На даному етапі досліджень таким значенням похибки (3 пікосекунди) можна знехтувати.

У четвертому підрозділі розглядаються алгоритми дослідження фільтруючих властивостей системи фазової автопідстройки частоти.

Розроблено алгоритм для дослідження фільтруючих властивостей системи ФАПЧ по заданому спектральному розподілу вхідних впливів, а також алгоритм визначення рівня шумових складових у спектрі вихідного сигналу автогенератора (когерентного гетеродина прийомного модуля пристрою синхронізації), охопленого кільцем ФАПЧ, що надалі дозволяє оцінити його вплив на точність синхронізації еталонів часу і частоти.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи наводяться результати експериментальних досліджень лабораторних макетів, що реалізують розроблені апаратно-алгоритмічні рішення та процедури цифрової обробки інформації.

У першому підрозділі представлені результати експериментальних досліджень лабораторного макета для звірення шкал еталонів за сигналами аналогового наземного телебачення, які підтверджують обґрунтованість запропонованих апаратно-алгоритмічних рішень по побудові пристроїв синхронізації часу та частоти. Реалізація пасивного методу в сполученні з АЗО дозволяє забезпечити наносекундну точність синхронізації в зоні впевненого прийому сигналів наземного телебачення. При використанні елементів вимірювального сигналу аналогового ТБ отримана потенційна СКП визначення часового положення максимуму ВКФ в декілька одиниць наносекунд.

Експериментальні дослідження, результати яких представлені в другому підрозділі, продемонстрували можливість створення системи високоточної часо-частотної синхронізації в зоні впевненого прийому сигналів місцевого телецентру на основі виміру різниці миттєвих значень фази носійної частоти сигналів спільного джерела. Структурна схема лабораторного стенду для звірення шкал еталонів (стандартів) по фазі носійної частоти сигналу місцевого телецентру в режимі «нульової бази» наведена на рис. 6. До складу стенду входять: 1, 9 - селектор каналів метровий, 2, 9 - підсилювач проміжної частоти (ППЧ - 38 МГц), 3, 10 - змішувач, 4, 11 - другий ППЧ (2 МГц), 5 - двох канальний цифровий осцилограф, 6 - гетеродин, 7 - ПЕОМ.

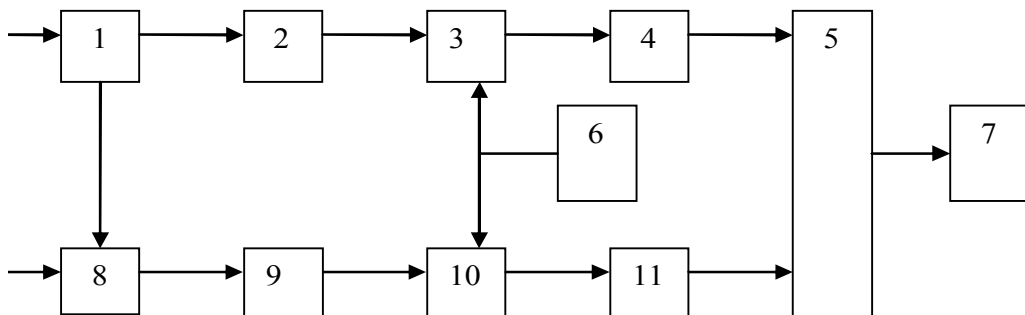
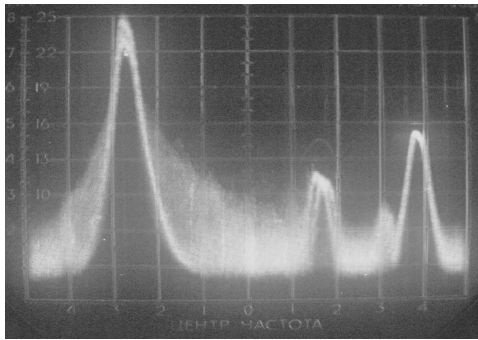


Рис. 6. Структурна схема лабораторного стенду

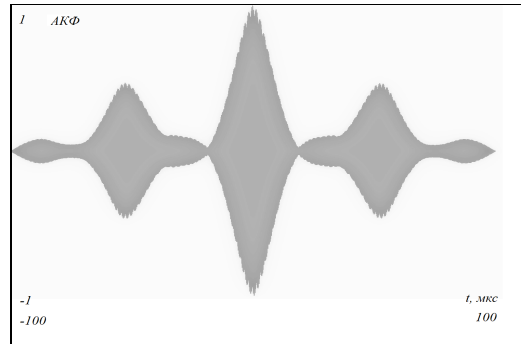
Потенційна точність синхронізації при реалізації фазових вимірювань отримана на рівні часток наносекунди. Розроблену апаратуру надалі необхідно

дооснастити блоком калібрування антенно-фідерного тракту та прийомного каналу в цілому.

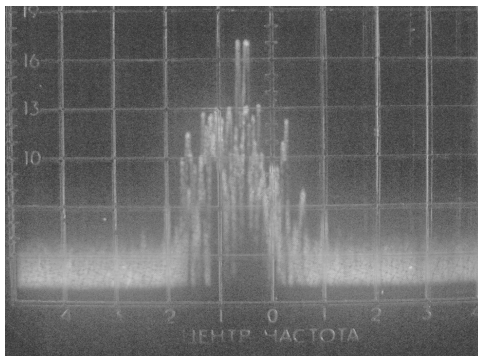
У третьому підрозділі з використанням експериментальних даних досліджені кореляційні властивості сигналів найпоширеніших наземних радіоджерел. Розроблено та виготовлено експериментальний стенд, що дозволяє приймати і оцифровувати сигнали в широкому частотному діапазоні. Спектрограми прийнятих сигналів і їх автокореляційні функції зображені на рис. 7.



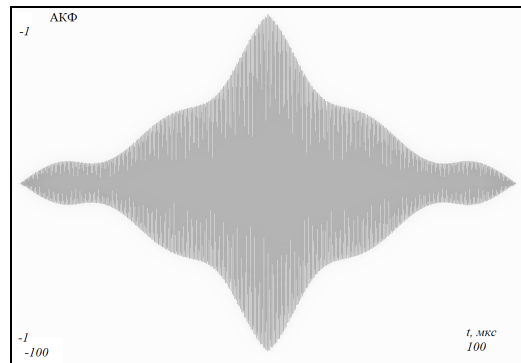
а) - спектр сигналу аналогового ТБ



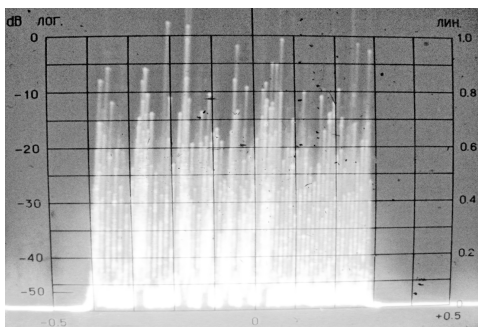
б) - АКФ сигналу аналогового ТБ



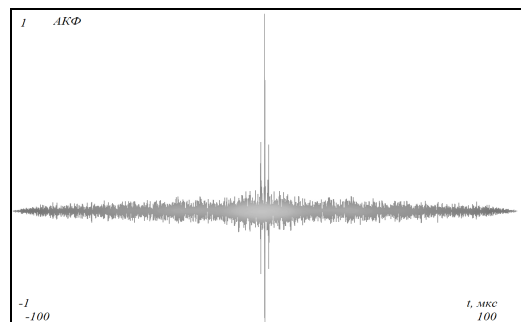
в) - спектр сигналу ЧМ радіостанції



г) - АКФ ЧМ сигналу промчастоти



д) - спектр сигналу цифрового ТБ



е) - АКФ сигналу цифрового ТБ

Рис. 7. Спектрограми і АКФ сигналів спільних джерел

Проаналізовані особливості використання цих сигналів при реалізації АЗО. Зроблено висновок про перспективність використання сигналу цифрового наземного ТБ.

У четвертому підрозділі наведені результати експерименту з використанням сигналу супутникової системи функціонального доповнення (SBAS) як спільного джерела для пунктів, рознесених на відстань 4 км, що підтвердив принципову можливість використання сигналів ГС ШСЗ для реалізації АЗО.

Статистична обробка залежностей зсуву шкал часу $\Delta T_{\text{СК}}(t)$ (рис. 8) дозволила оцінити середні значення зсуву шкал $\overline{\Delta T}$ та їх СКО:

- за фазовими спостереженнями $\overline{\Delta T}^{\text{фаз}} = 88,75$ нс, $\sigma^{\text{фаз}} = 4,86$ нс;
- за кодовими спостереженнями $\overline{\Delta T}^{\text{код}} = 25,6$ нс, $\sigma^{\text{фаз}} = 22,6$ нс.

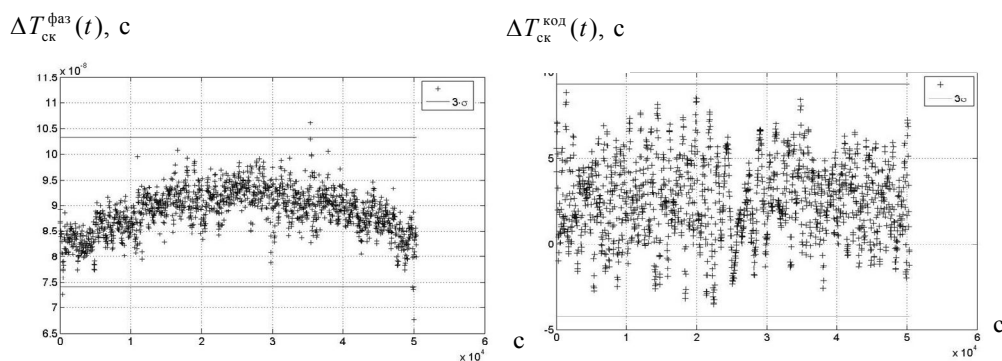


Рисунок 8. Розраховані залежності $\Delta T_{\text{СК}}(t)$

Практична реалізація системи синхронізації з використанням сигналів ГС ШСЗ вимагає подальшої теоретичної проробки, а також пошуку та розробки схемно-технічних рішень.

ВИСНОВКИ

Дисертація є дослідженням, у якому отримане нове рішення актуальної науково-прикладної задачі удосконалення пасивних методів синхронізації шкал часу та частоти за рахунок використання нових апаратно-алгоритмічних засобів, які побудовані на застосуванні взаємної кореляційної цифрової обробки прийнятих сигналів спільного стороннього довільного джерела при відомій різниці часу поширення сигналу від джерела до пунктів, це дозволило отримати потенційне значення похибки синхронізації шкал часу на рівні одиниць наносекунд проти 50 нс, які забезпечують СРНС. При цьому отримані наступні нові результати:

В області теорії:

1. Розроблено нову математичну модель та проведений аналіз похибок синхронізації, пов'язаних з неідентичністю та флуктуаціями сигналів в антенно-фідерних трактах.

2. Удосконалено математичну модель для дослідження флуктуаційних характеристик когерентного гетеродина прийомного тракту пристрою синхронізації з використанням системи ФАПЧ.

3. Виконано порівняльний аналіз кореляційних властивостей сигналів найбільш поширених наземних радіоджерел. Зроблений висновок про перспективність використання сигналів цифрового телебачення.

В області практичних розробок і експериментальних досліджень:

1. Розроблені та апробовані алгоритми цифрової обробки результатів вимірів зсуву шкал часу і частоти при реалізації АЗО. При цьому здійснюється взаємна кореляційна обробка прийнятих у пунктах сигналів і різні методи оцінки часового положення максимуму ВКФ.

2. Запропоновано нове технічне рішення реалізації АЗО з використанням сигналів низько і середньо орбітальних ШСЗ, яке захищене патентом.

3. Розроблено практичні рекомендації та запропоновані варіанти технічної реалізації з побудови елементів пасивних систем високоточної синхронізації із застосуванням сигналів наземних і космічних спільних джерел.

4. Результати експериментальних досліджень у режимі «нульової бази» з використанням телевізійних сигналів підтвердили правильність запропонованих апаратно-алгоритмічних рішень, стійкість і високу точність процедур цифрової обробки результатів вимірів. Випадкова складова похибки звірення при використанні вимірювального сигналу аналогового ТБ по оцінках СКП склала одиниці наносекунд; а при вимірах по фазі носійної частоти - частки наносекунди.

5. Проведені експериментальні дослідження на короткій базі (4 км) з використанням сигналів супутникової системи SBAS підтвердили принципову можливість використання сигналів ГС ШСЗ для реалізації АЗО. Подальші дослідження необхідно направити на дослідження похибок, що супроводжують використання сигналів СРНС.

Результати дисертаційної роботи реалізовані в 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 ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Асаад Х.Х. Аномальне задержки антенно-фидерных трактов систем с высокоточным измерением временного положения сигналов /Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, В.Ю.Приймак, О.А.Соляник, С.Ф. Семенов, Х.Х.Асаад, А.Ф.Хусейн // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. Вып.165. Х.: ХНУРЕ, 2011. — С.37-45.

2. Асаад Х.Х. Использование источников общего сигнала для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты. /Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // Зв'язок. Загально галузевий науково-виробничий журнал. № 1(97), 2012. – С. 45-52.

3. Асаад Х.Х. Исследование фильтрующих свойств системы фазовой автоподстройки применительно к задаче синхронизации времени и частоты / А.А.Костыря, В.Н.Науменко, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. № 169, Х.: ХНУРЭ, 2012. – С. 16-21.

4. Асаад Х.Х. Учет канальных погрешностей пассивной системы синхронизации времени и частоты при использовании сигналов геостационарных ИСЗ / Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, В.Ю.Приймак, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. № 170, Х.: ХНУРЭ, 2012. – С. 210-216.

5. Асаад Х.Х. Выбор общего источника сигнала для региональной системы синхронизации времени и частоты/ Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, О.А.Соляник, С.Ф. Семенов, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. Випуск 2(27). Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. - С.63-69.

6. Асаад Х.Х. Применение интерполирующих алгоритмов для получения оценок сдвига шкал эталонов времени и частоты при синхронизации по общему источнику сигналов / А.А.Костыря, В.Н.Науменко, С.А. Плехно, А.А.Сомов, Х.Х.Асаад // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. № 173, Х.: ХНУРЭ, 2013. – С. 88-95.

7. Асаад Х.Х. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу та частоти / Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, В.Н.Науменко, Х.Х.Асаад // Патент на корисну модель №77093 від 25.01.2013. Бюл. № 2.

8. Асаад Х.Х. Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS/ Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, Е.И.Иванова, Х.Х.Асаад, Б.А.Ал-Твежри, А.Ф.Хусейн // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. Вып.165. Х.: ХНУРЭ, 2011. — С.46-55.

9. Асаад Х.Х. Разработка лабораторного стенда для сличения шкал эталонов по фазе несущей частоты сигнала местного телецентра. / А.А.Костыря, О.А.Соляник, С.Ф. Семенов, Е.П.Ермолаев, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад //4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». (МРФ-2011). Том 1, часть 2. Харьков, 2011. – С. 93-96.

10. Асаад Х.Х. Разработка принципов построения фазовой системы сличения мер времени и частоты / С.А. Плехно, Б.А.Ал-Твежри, Х.Х.Асаад // Материалы 15-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: – 2011. – С. 221.

11. Асаад Х.Х. Влияние коррелированных помех на погрешности навигационных и частотно – временных измерений / В.Ю.Приймак, Х.Х.Асаад, А.Ф.Хусейн // Сборник материалов 7-й международной молодежной НТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2011)». – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – С.60.

12. Khalid.H.Asaad' Simulation of System Phase-Locked-Loop Frequency Control / Kostyrja A.A., Pryimak V.Y., Plekhno S.A., Khalid.H.Asaad // XIth

International Conference TCSET'2012 „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. - С. 56.

13. Асаад Х.Х. Программная реализация алгоритма общего охвата / С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // Материалы 16-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: – 2012. – С. 87-88.

14. Асаад Х.Х. Исследование флюктуационных свойств когерентного гетеродина системы синхронизации времени и частоты / А.А.Костыря, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад //22-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2012) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. Т. 1. Севастополь: Вебер, 2012.- С. 139-140.

15. Асаад Х.Х. Выбор общего источника сигнала для региональной системы синхронизации времени и частоты / Ю.А.Коваль, А.А.Костыря, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // VI Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки. телекомунікацій та інформаційних технологій”. Тези доповідей - Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. - С. 136-138.

16. Асаад Х.Х. Программная реализация статистической обработки результатов измерений сдвига шкал времени при использовании алгоритма общего охвата / А.А.Костыря, Е.П.Ермолаев, С.А. Плехно, Х.Х.Асаад // VIII міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2012)”, Харків, 2012. - С. 89-91.

АНОТАЦІЯ

Халід. Х. Асаад Підвищення стабільності частотно-часових параметрів пристроїв синхронізації радіотехнічних систем. – 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 отримано нове рішення актуальної науково-прикладної задачі, що полягає в удосконаленні пасивних методів синхронізації шкал часу та частоти шляхом запровадження нових апаратно-алгоритмічних засобів, які побудовані на застосуванні взаємної кореляційної цифрової обробки прийнятих сигналів спільного стороннього джерела, коли різниця в часі розповсюдження сигналу від джерела до пунктів відома, це дозволило отримати потенційне значення похибки синхронізації шкал часу на рівні одиниць наносекунд проти 50 нс, які забезпечують СРНС.

Практична цінність роботи полягає в наступному. Розроблені практичні рекомендації та запропоновані варіанти технічної реалізації з побудови елементів пасивних систем високоточної синхронізації з застосуванням сигналів наземних та космічних спільних джерел.

Ключові слова: пасивна система синхронізації, шкала часу та частоти, антенно-фідерний пристрій, система фазової автопідстройки частоти, алгоритм, взаємна кореляційна функція, цифрова обробка сигналів, похибка синхронізації.

АННОТАЦИЯ

Халид. Х. Асаад Повышение стабильности частотно-временных параметров устройств синхронизации радиотехнических систем. – 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 методов синхронизации шкал времени и частоты за счет использования новых аппаратно-алгоритмических средств, которые построены на применении взаимокорреляционной цифровой обработки принятых в пунктах сигналов общего стороннего произвольного источника при известной разности времени распространения сигнала от источника к пунктам. Это позволило получить потенциальное значение погрешности синхронизации шкал времени на уровне единиц наносекунд против 50 нс, которые обеспечивают СРНС.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

В области теории:

1. Разработана новая математическая модель и проведен анализ погрешностей синхронизации, вызванных неидентичностью и флуктуациями сигналов в антенно-фидерных трактах.
2. Усовершенствована математическая модель для исследования флуктуационных характеристик когерентного гетеродина приемного тракта устройства синхронизации с использованием системы ФАПЧ.
3. Проведен сравнительный анализ корреляционных свойств сигналов наиболее распространенных наземных радиоисточников. Сделан вывод о перспективности использования сигналов цифрового телевидения.

В области практических разработок и экспериментальных исследований:

1. Разработаны и апробированы алгоритмы цифровой обработки результатов измерений сдвига шкал времени и частоты при реализации алгоритма общего охвата (АОО).
2. Предложено новое техническое решение реализации АОО с использованием сигналов низко и средне орбитальных ИСЗ, которое защищено патентом.
3. Разработаны практические рекомендации и предложены варианты технической реализации по построению элементов пассивных систем высокоточной синхронизации с применением сигналов наземных и космических общих источников.
4. Результаты экспериментальных исследований в режиме нулевой базы с использованием телевизионных сигналов подтвердили правильность предложенных аппаратно-алгоритмических решений, устойчивость и высокую точность процедур цифровой обработки результатов измерений.

5. Проведенные экспериментальные исследования с использованием сигналов системы SBAS подтвердили принципиальную возможность использования сигналов ГС ИСЗ для реализации АОО.

Ключевые слова: пассивная система синхронизации, шкала времени и частоты, антенно-фидерное устройство, система фазовой автоподстройки частоты, алгоритм, взаимная корреляционная функция, цифровая обработка сигналов, погрешность синхронизации.

ABSTRACT

Khalid. H. Asaad " Increase of stability of frequency and time parameters of synchronization devices of radio systems". – 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 kind of research in which a new solution of actual scientific and practical problem is received. There is a new solution of actual scientific and applied tasks of improving the passive methods of synchronized scales of time and frequency through the use of new hardware and algorithmic solutions that are built on the use of mutually correlation digital processing undertaken in paragraphs signals

The basic result of the thesis is the theoretical research and develop approaches to determine the effect of anomalous signals delays in antenna-feeder paths and coherent fluctuations lo receiving channel signal on the total error of time and frequency synchronization.

The practical value of work is determined primarily by its clear, practical orientation. Recommendations and options for the technical implementation of the constructive elements of passive systems of high-precision synchronization with the use of signals of a terrestrial and space public sources.

The Keywords: the passive system synchronization, time scale and frequency, antenna-feeder device, the system of phase-locked loop algorithm, mutual correlation function, digital signal processing, and error of synchronization.

Підп. до друку 25.10.13. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. 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