

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

КОСТИРЯ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК. 621.396.96

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ТЕХНІКИ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ ПАСИВНИХ
РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ВИСОКОТОЧНОЇ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОЇ
СИНХРОНІЗАЦІЇ**

05.12.17 — радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2015

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор **Должиков Володимир Васильович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри «Основи радіотехніки».

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

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

доктор технічних наук, професор **Васюта Костянтин Станіславович**, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, начальник факультету автоматизованих систем керування та наземного забезпечення польотів авіації.

Захист відбудеться “21” квітня 2015 р. у 13 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 “17” березня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03

доктор технічних наук



Безрук В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах глобалізації світової економіки усе більше зростає потреба у високоточних вимірах часу і частоти, без яких неможливе забезпечення ефективної діяльності всього народногосподарського комплексу будь-якої держави, а також науково-технічної та військово-політичної незалежності.

Практично жодна з існуючих і новостворюваних систем передачі та вилучення інформації, вимірів, контролю та керування будь-якими процесами не може обійтися без обліку і синхронізації часу та частоти. Безпосередньо або опосередковано частотно-часові методи використовуються для дослідження космосу, світового океану і земної кори; при створенні сучасних навігаційних, локаційних систем та систем зв'язку, високоточної зброї і іншої військової техніки; для забезпечення вимірів при вивченні мікро і макро світу та ін.

У зв'язку із цим велика увага у всіх країнах приділяється вирішенню науково-технічної проблеми по створенню та постійному вдосконаленню технічних засобів державних (національних) систем єдиного часу та еталонних частот і їхньої організаційної структури. Це пов'язано з тим, що використання для вирішення задач синхронізації стандартів (еталонів) часу і частоти супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) інших країн, наприклад GPS і ГЛОНАСС (США та Росія, відповідно) у ряді випадків може призвести до негативних наслідків. В особливо відповідальних випадках, таких як синхронізація опорних генераторів мережі урядового зв'язку, частотно-часове забезпечення важливих державних і військових об'єктів і т.д., не можна орієнтуватися на закордонні СРНС, тому що вони з різних причин можуть бути заблоковані або транслювати хибну інформацію. Особливості функціонування радіотехнічних систем єдиного часу в складі національної системи синхронізації, особливо в надзвичайних ситуаціях, вимагають наявності декількох (не менше трьох) каналів частотної і часової синхронізації, що забезпечує надійність і живучість системи в цілому.

Актуальність вирішення зазначеної проблеми має особливо важливе значення і для України, що знайшло відображення в державній Програмі "Створення і розвиток Державної служби єдиного часу та еталонних частот", положенні "Про Державну службу єдиного часу та еталонних частот" і Законі України "Про метрологію та метрологічну діяльність" у редакції від 05.06.2014р. №1314-VII.

Порівняння технічних параметрів систем синхронізації часу і частоти різного призначення показує, що найкращі характеристики з точності мають системи, які використовують активні методи роботи, тобто мають у пунктах синхронізації приймальні та передавальні пристрої. Прикладом реалізації таких систем є система з використанням дуплексного супутникового каналу зв'язку. Однак така система є досить дорогою в реалізації та у процесі експлуатації, тому не знайшла широкого застосування. Найбільше поширення отримали напів-активні системи синхронізації, в яких спеціалізовані станції (мережі станцій), космічні апарати або орбітальні угруповання випромінюють спеціальні сигнали, що дозволяють споживачеві одержати (вилучити) необхідну частотно-часову інформацію.

Як правило, подібні системи вирішують більш широку задачу – координатно-часового забезпечення, маючи у своєму складі синхронно працюючі високостабільні генератори (стандарти часу і частоти). Такі системи будуються як випромінюючі багатопозиційні для того, щоб покрити необхідні території, супутникові системи забезпечують глобальне охоплення земної поверхні. Розробка, створення та експлуатація таких систем пов'язана зі значними матеріальними витратами.

Внаслідок сказаного важливим (актуальним) є дослідження можливості побудови пасивних інформаційно-вимірювальних систем (тобто не потребуючих наявності спеціальних джерел сигналу) як більш простих і менш витратних у створенні та обслуговуванні, а саме, багатопозиційних пасивних систем синхронізації (БПСС). Характерною рисою таких систем є використання сигналу стороннього спільного джерела (ССД) з відомими координатами, прийом якого можливий у пунктах синхронізації, та застосування пасивного методу загального охоплення (ПМЗО) у якості основи функціонування. При цьому можливе використання всього двох пунктів – головного (первинного), по якому відбувається звірення та вторинного – такого, що звіряється.

БПСС у порівнянні з існуючими системами синхронізації мала б ряд переваг, до яких можна віднести наступні.

1. Оперативна та незалежна високоточна синхронізація еталонів часу і частоти.
2. Висока скритність і завадозахищеність роботи системи синхронізації.
3. Можливість вирішення задач синхронізації як в окремо взятому регіоні, так і в загальнодержавному масштабі з мінімальними часовими та фінансовими витратами.

Створення і використання БПСС для багатьох держав, у тому числі й України, є особливо привабливим з фінансової точки зору, тим більше, що Україна в цей час не має повномасштабної національної системи синхронізації часу і частоти (ССЧЧ), а для вирішення задач синхронізації стандартів (еталонів) часу та частоти використовується система GPS (США) і ГЛОНАСС (Росія).

Однак, практична реалізація БПСС неможлива, насамперед, без достатнього розвитку теорії цих систем. Необхідний теоретичний аналіз БПСС із використанням ССД як наземного, так і космічного розташування; теоретичне дослідження похибок синхронізації, що властиві запропонованому методу; теоретичне обґрунтування методів обробки результатів вимірювань у процесі звірення мір часу і частоти; розробка технічних рішень, що дозволяють реалізувати БПСС. Також необхідна практична перевірка результатів теоретичних досліджень шляхом математичного моделювання та експериментальних досліджень лабораторних макетів варіантів систем синхронізації, що пропонуються.

Тому актуальною є тема дисертаційної роботи, спрямованої на вирішення науково-технічної проблеми забезпечення єдності вимірів часу і частоти, присвяченої розвитку теорії та техніки багатопозиційних пасивних радіотехнічних систем високоточної частотно-часової синхронізації з використанням сигналів сторонніх спільних джерел, у якій пропонуються та обґрунтовуються принципи, методи, способи і засоби побудови БПСС, що дозволяють істотно поліпшити

такі їхні показники, як точність синхронізації, скритність, електромагнітна сумісність, економічність і завадозахищеність.

Зв'язок роботи з науковими програмами і напрямками. Дисертаційні дослідження пов'язані з виконанням планових НДР, які проводилися в Харківському національному університеті радіоелектроніки, у Національному науковому центрі "Інститут метрології" (ННЦ ІМ) і в метрологічному центрі військових еталонів Збройних Сил України (ЗС України):

- № Ф25/188 "Розробка каналу синхронізації частоти приймального комплексу ХНУРЕ зі шкалою Державного первинного еталону часу та частоти ННЦ "Інститут Метрології"", № ДР 0108V007885, (виконавець);

- № 199-4 "Розвиток теорії, удосконалення шляхів дослідження та розробка принципів побудови каналів розповсюдження радіохвиль: тропосферного, метеорологічного та прямого бачення", № ДР 0106U003151, (виконавець);

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

- № 260 "Дослідження потенційних можливостей ефективного функціонування мережевих реконфігурованих інформаційно-вимірювальних систем екологічного моніторингу", розділ № 260-4 "Розробка засобів для моніторингу метеорологічної активності і динаміки мезопаузи-нижньої термосфери з використанням сторонніх джерел випромінювання, а також пасивних методів частотно-часової синхронізації в реконфігурованих інформаційно-вимірювальних системах екологічного моніторингу", № ДР 0111U002903, (відповідальний виконавець);

- № 676 "Забезпечення функціонування Державної служби єдиного часу і еталонних частот (ДСЧЧ) в Україні" (№№ ДР 0111U004901, 0107U007810, 0112U008240), що виконувалися в рамках Державної програми розвитку еталонної бази, (виконавець);

- "Дослідження варіантів побудови й функціонування комплексу апаратури Центру метрологічного контролю та розробка програмно-методичного забезпечення його дослідної експлуатації та державних випробувань", № ДР 0114U00411, (виконавець);

- № Н9/2005 – "Виконання робіт зі збереження та забезпечення належного функціонування наукового об'єкта, що становить національне надбання, Багатоцільового геофізичного комплексу для дослідження атмосфери та припливу метеорологічної речовини Харківського національного університету радіоелектроніки", (науковий керівник).

Результати дисертаційної роботи реалізовані в зазначених НДР, а також впроваджені в навчальний процес у курсах, що підтверджується відповідними актами впровадження.

Мета роботи полягає в розвитку теорії і техніки багатопозиційних пасивних радіотехнічних систем синхронізації часу та частоти з використанням сигналів спільних джерел, у розробці методів і способів отримання та обробки ча-

стотно-часової інформації для досягнення високих якісних показників роботи цих систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Порівняльний аналіз відомих активних і напів-активних систем синхронізації часу та частоти, алгоритмів їхньої роботи і особливостей застосування. Обґрунтування переваг пасивних систем синхронізації.

2. Розробка теорії і принципів побудови БПСС часу та частоти, які використовують сигнали спільних джерел наземного та космічного базування, синтез структури і алгоритмів роботи пристроїв прийому та обробки цих сигналів при реалізації національної системи синхронізації.

3. Дослідження джерел похибок синхронізації, що виникають при реалізації ПМЗО, і їхнього впливу на результат звірення шкал просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти.

4. Обґрунтування вибору спільних джерел сигналів з метою мінімізації похибок синхронізації та розробка способів вилучення інформативних ознак прийнятих сигналів сторонніх джерел на основі використання різних сигнальних відмінностей.

5. Розробка методів оцінки часового зсуву шкал еталонів за обвідною та фазою взаємкореляційної функції сигналів сторонніх джерел і вирішення задач співставлення потенційної і реально досяжної точності звірення частотно-часових параметрів БПСС.

6. Обґрунтування нових способів і технічних рішень побудови БПСС, спрямованих на підвищення точності синхронізації, збільшення відстані дії цих систем, підвищення їхньої скритності, завадозахищеності, поліпшення електромагнітної сумісності (ЕМС).

7. Експериментальна перевірка створених моделей, апаратних і алгоритмічних засобів для дослідження ефективності роботи розроблених БПСС.

8. Порівняльний аналіз параметрів розроблених БПСС із параметрами кращих зразків діючих аналогів (GPS і GLONASS) при вирішенні задач частотно-часової синхронізації як доказ практичної цінності виконаної дисертаційної роботи.

Об'єкт дослідження – процес синхронізації в пасивних багатопозиційних радіотехнічних системах синхронізації просторово рознесених еталонів часу і частоти з використанням сигналів сторонніх джерел.

Предмет дослідження – математична модель БПСС, методи і алгоритми синхронізації з використанням ССД, похибки синхронізації і їх джерела, процедури обробки результатів вимірів зсуву шкал часу та частоти.

Методи дослідження засновані: на застосуванні теорії часового, спектрального і кореляційного аналізу при дослідженні причин виникнення, характеру і механізму впливу шумів і завад у БПСС, обґрунтуванні переваг і недоліків при аналізі сигналів сторонніх джерел, а також при обґрунтуванні вибору методів отримання вимірювальної інформації; на математичному моделюванні процесів у пасивних системах синхронізації при виконанні завдань, пов'язаних з реалізацією ПМЗО; на використанні теорії імовірності, математичної статистики та чисельного аналізу для обґрунтування методів і реалізації обробки даних; на

експериментальній перевірці достовірності теоретичних висновків і можливості реалізації запропонованих технічних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні нового типу систем синхронізації часу та частоти - пасивних систем синхронізації, які на відміну від відомих активних і напів-активних систем не потребують випромінювання спеціальних сигналів часової або частотної синхронізації, розробці методів і способів їхньої реалізації. При цьому отримані нові наукові результати:

1. Розвинена теорія БПСС у наступних напрямках:

- розроблена нова узагальнена модель радіотехнічної системи синхронізації часу і частоти, яка на відміну від моделей відомих активних і напів-активних систем є пасивною, що забезпечує скритність її роботи, електромагнітну сумісність із іншими системами, заводо захищеність процесу частотно-часової синхронізації та економічність створення і функціонування;
- уперше запропонована функціональна модель БПСС, у якій на відміну від відомих моделей напів-активних систем зв'язування шкал часу і частоти результуюча похибка синхронізації визначається різницями каналних і апаратурних похибок і не залежить від визначення часу затримки сигналу в передавальному пристрої спільного джерела, що дозволяє знизити випадкову та систематичну складові похибки синхронізації;
- обґрунтовано нове застосування методу зв'язування шкал часу еталонів за доплерівським зсувом частоти при спільній обробці сигналів стороннього джерела в просторово рознесених пунктах системи синхронізації, що дозволяє використовувати для задач синхронізації рухомі спільні джерела, у той час як у відомих методах синхронізації даний ефект вносить невиключену систематичну похибку.

2. Розроблено новий пасивний метод загального охоплення для синхронізації просторово рознесених мір часу і частоти, відмінною рисою якого є розподіл функцій частотно-часової модуляції та передачі сигналу синхронізації, у той час, як у відомих активних і напів-активних методах синхронізації дані функції сполучені в джерелі синхросигналів. Даний метод дозволяє використовувати для задач синхронізації будь-які природні та штучні сторонні джерела, сигнали яких впевнено приймаються в пунктах синхронізації.

3. Отримала подальший розвиток теорія взаємкореляційної обробки сигналів стороннього джерела в БПСС при фіксації моменту прийому їхніх ідентичних фрагментів на основі визначення часового положення максимумів об'єктивної функції взаємної кореляції (різниці фаз радіочастотного заповнення функції взаємної кореляції) сигналів, прийнятих у просторово рознесених пунктах. Відмінність від відомих методів полягає в тому, що прийняті в пунктах сигнали затримуються відповідно до оцінки різниці їхнього часу приходу щодо сформованої системної шкали часу, що дозволило синтезувати нову структуру оптимального вимірювача. При використанні даного підходу точність частотно-часової синхронізації не залежить від стабільності та повторюваності параметрів сигналів стороннього джерела.

4. Розроблено принципи функціонування пасивної системи синхронізації просторово рознесених мір часу і частоти, новизна полягає у використанні інформації про момент прийому ідентичних фрагментів сигналів стороннього джерела в просторово рознесених пунктах прийому БПСС із відомими з необхідною точністю координатами. Це дозволяє здійснювати частотно-часову синхронізацію, використовуючи сигнали з неповністю відомими параметрами, включаючи шумоподібні.

Практичне значення результатів роботи. Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що теоретично та експериментально підтверджено можливість створення багатопозиційних пасивних радіотехнічних систем частотно-часової синхронізації з використанням сигналів сторонніх спільних джерел наземного і космічного базування, які по точності синхронізації відповідають кращим існуючим напів-активним системам (GPS, GLONASS) при значно кращій скритності роботи, електромагнітній сумісності з іншими системами, економічності та завадозахищеності, що дозволяє вирішити науково-технічну проблему забезпечення єдності частотно-часових вимірів.

1. Синтезовано нову структуру оптимального вимірювача оцінки різниці часу приходу сигналів спільного джерела в пункти синхронізації. Відмінною рисою вимірювача є те, що при реалізації спільної обробки прийнятих у пунктах сигналів стороннього джерела їх стробування здійснюється з урахуванням оцінки різниці моментів їхнього прийому в системній шкалі часу. Даний оптимальний вимірювач є базовим для практичної реалізації БПСС і дозволяє виключити етап виявлення сигналу в байєсовському методі вирішення задачі оптимального оцінювання випадкового параметра.

2. Уперше отримані результати експерименту з оцінки часового положення сигналів на основі фазових вимірювань носійної частоти сигналу аналогового телебачення (ТБ) показали, що середньоквадратичне відхилення шкали часу в режимі «нульової бази» становить частки наносекунди та підтверджує можливість практичної реалізації високоточних фазових БПСС на рівні кращих зразків напів-активних систем.

3. Розроблено структуру побудови і принципи обробки результатів вимірювань, що дозволило вперше провести експериментальні дослідження макета БПСС із використанням сигналів цифрового наземного ТБ (ЦНТБ) формату DVB-T2 у режимі «нульової бази». Випадкова складова похибки виміру зсуву шкал при використанні таких сигналів становить одиниці наносекунд. Створення системи синхронізації з використанням розроблених технічних рішень дозволяє реалізувати місцеву (регіональну) БПСС, наприклад, зв'язати шкали еталона часу і частоти ЗС України (Центр військових еталонів, м. Харків) і державного еталона часу і частоти (ННЦ «Інститут метрології», м. Харків).

4. Запропоновано способи і схемні рішення для практичної реалізації систем синхронізації з використанням сигналів наземних і космічних спільних джерел, на які отримані три патенти на корисні моделі. Дані способи та технічні рішення відображають основні принципи побудови БПСС і демонструють можливість їх реалізації, а саме:

- БПСС із використанням сигналів геостаціонарних штучних супутників Землі (ГС ШСЗ), в якій враховуються добові переміщення супутника, тропосферна та іоносферна складові похибки синхронізації;

- БПСС із використанням сигналів низькоорбітальних і середньоорбітальних ШСЗ, у якій в якості сигнальної ознаки використовуються моменти нульового значення частоти Доплера;

- БПСС із вимірюванням зсуву часових шкал еталонів за зсувом часового положення максимумів функції взаємної кореляції прийнятих у пунктах сигналів.

5. Запропоновано нові технічні рішення для створення пристроїв калібрування БПСС, на які отримані два авторські свідоцтва на винахід. Ці пристрої дозволяють імітувати сигнали спільних джерел, оперативно змінювати параметри цих сигналів, тому з їхньою допомогою можна контролювати працездатність і здійснювати контроль апаратних затримок БПСС:

- пристрій для формування сигналів зі змінними в широких межах параметрами та різними законами частотної модуляції;

- пристрій для формування простих, частотно-модульованих і фазоманіпульованих сигналів з оперативно змінюваними параметрами.

6. Розроблено та експериментально перевірено нові структурні схеми БПСС просторово рознесених стандартів часу і частоти з використанням сигналів спільних джерел наземного та космічного базування, що свідчить про можливість реалізації та працездатність принципів побудови БПСС і досяжність високих показників точності звірення шкал часу еталонів - одиниці наносекунд за вимірами по обвідній сигналу та сотні пікосекунд при фазових вимірах.

7. Розроблено новий пристрій, що дозволяє здійснювати частотну синхронізацію цифрових мереж при використанні сигналу спільного джерела. Даний пристрій забезпечує тривале (кілька діб) зберігання шкали часу при зникненні сигналів зовнішньої синхронізації. Експериментально підтверджено, що при використанні сигналу ГС ШСЗ на носійній частоті 11 ГГц на інтервалі часу спостереження не менше 2 000 с можна одержати оцінку відносного відхилення частоти головного генератора БПСС на рівні $\pm 0,8 \cdot 10^{-13}$.

8. Уперше запропоновано технічне рішення по збільшенню відстані дії БПСС із використанням сигналів ЦНТБ за рахунок взаємної часової прив'язки сигналів телецентрів, що перебувають у сусідніх транляційних зонах. Дане технічне рішення дозволяє зняти обмеження з далекодії БПСС із використанням ССД наземного розташування при розгортанні системи частотно-часової синхронізації на території України.

Вірогідність наукових результатів і висновків, сформульованих у дисертації, підтверджується коректним використанням відомих методів теорії статистичної радіотехніки та математичного апарата кореляційної обробки для оцінки похибки синхронізації просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти, високою відповідністю результатів натурних експериментальних досліджень діючих макетів БПСС отриманим теоретичним даним.

Реалізація роботи.

Результати моделювання і дослідження можливостей використання сигналів телебачення для синхронізації при застосуванні ПМЗО та аналізу кореляційних властивостей сигналів наземного аналогового телебачення реалізовані в НДР № Ф25/188, замовник МОН України.

В НДР № 199-4 (замовник МОН України) реалізовані: аналіз можливостей методу загального охоплення для високоточної синхронізації стандартів часу і частоти в межах прямого бачення; математичне моделювання методів частотно-часової синхронізації для реконфігурованих інформаційно-обчислювальних систем екологічного моніторингу.

Рекомендації з вибору та використання методу і апаратурних рішень для частотно-часової синхронізації в реконфігурованих інформаційно-обчислювальних системах екологічного моніторингу реалізовані в НДР № 260-4, замовник МОН України.

У ході виконання НДР №239, замовник МОН України, реалізовані результати розробки альтернативних методів синхронізації часу і частоти для забезпечення надійного функціонування інформаційно-вимірювальних систем в умовах надзвичайних ситуацій шляхом створення та експериментальних випробувань лабораторних зразків апаратури високоточного звірення шкал часу і частоти з використанням сигналів супутникового мовлення.

У НДР Національного наукового центру «Інститут метрології» (замовник Міністерство економічного розвитку і торгівлі) реалізовані: результати розробки теоретичних основ, моделювання пасивних радіотехнічних систем звірення еталонів часу і частоти, що використовують сигнали спільних джерел, і результати попередньої експериментальної перевірки альтернативного методу зовнішніх звірень; результати по вдосконаленню пасивного методу зовнішніх звірень еталонів часу з використанням сигналів спільних джерел; дослідження нових методів вимірів і засобів вимірювальної техніки по можливості їх використання при проведенні дослідницьких робіт в області вимірів часу і частоти.

При проведенні робіт зі збереження та забезпечення належного функціонування об'єкта, що становить національне надбання (№ Н9/2005), за замовленням МОН України, дисертантом розвинуто методологію використання взаємокореляційної обробки в багатопозиційній пасивній системі синхронізації для фіксації моменту прийому ідентичних фрагментів сигналів стороннього джерела шляхом визначення часового положення максимумів обвідної їх функції взаємної кореляції.

У НДР, що виконувалася Метрологічним центром військових еталонів ЗС України (замовник Міністерство оборони України) реалізовані наступні положення дисертаційної роботи: науково-методичний апарат удосконалення пасивних систем синхронізації шкал часу і частоти з використанням сигналів зовнішніх спільних джерел; пропозиції щодо вдосконалення пасивного методу загального охоплення для синхронізації просторово-рознесених мір часу і частоти; науково-методичний апарат підвищення стабільності частотно-часових параметрів засобів синхронізації радіотехнічних систем; узагальнена модель багатопозиційної пасивної радіотехнічної системи синхронізації шкал часу і частоти з

використанням алгоритму загального охоплення, яка містить основне джерело визначення похибок синхронізації; науково-технічний апарат удосконалення пасивних фазових радіотехнічних систем синхронізації рознесених мір часу і частоти; пропозиції щодо створення апаратного комплексу для експериментальної оцінки ефективності використання методу пасивної синхронізації шкал часу і частоти; організаційно-технічна основа створення автономної системи синхронізації шкал часу і частоти з використанням сигналів ЦНТБ, яка здатна забезпечити єдність і вірогідність вимірів еталонних сигналів часу і частоти, зберігання та відтворення розміру одиниць часу і частоти та передачі їхнього розміру споживачам ЗС України.

Результати дисертації впроваджені в навчальний процес при підготовці та викладанні курсів “ Радіонавігаційні мережі та системи синхронізації “, “Глобальні навігаційні супутникові системи “, “ Основи радіонавігації “.

Особистий внесок здобувача. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать: ідея реалізації методу загального охоплення з використанням взаємкореляційної обробки прийнятих у пунктах сигналів місцевого телецентру [1, 50]; розробка методики експерименту та структурної схеми експериментальної установки [2,3]; ідея використання взаємкореляційної обробки сигналів геостаціонарного супутника при реалізації алгоритму загального охоплення [4]; пропозиції щодо розробки альтернативних пасивних методів синхронізації часу і частоти [5, 50]; вибір напрямків удосконалення засобів і методів метеорних радіолокаційних спостережень [5а]; теоретичний аналіз алгоритму загального охоплення [8, 8а, 50]; розвиток теорії процесів в антенно-фідерних трактах систем синхронізації [9]; теоретичне дослідження похибок синхронізації [10, 50]; порівняльний аналіз методів синхронізації [11, 50]; порівняльний аналіз алгоритмів синхронізації [12]; ідея постановки експерименту і його технічна реалізація [13, 17, 50]; методика дослідження математичної моделі [14]; теоретичний аналіз похибок і невизначеностей фазового методу синхронізації [14а]; методика дослідження кореляційних властивостей сигналів наземних спільних джерел [15]; аналіз каналних похибок синхронізації при використанні сигналів системи функціонального космічного доповнення [16]; ідея відновлюючої інтерполяції і методика вибору інтерполяційної функції [18]; теоретичне обґрунтування, методика проведення експерименту [19]; обґрунтування шляхів підвищення точності синхронізації [20]; пропозиції по збільшенню далекодії пасивної системи синхронізації з використанням сигналів ЦНТБ [21], принцип компенсації нелінійності частотно-настроювальної характеристики керованого генератора [22, 23].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: міжнародних науково-технічних конференціях “Метрологія і вимірювальна техніка“ (МЕТРОЛОГІЯ 2010, 2012, 2014), [29-32,36,44]; міжнародних науково-практичних конференціях “Сучасні проблеми і досягнення в області радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій“ (Запоріжжя, 2008, 2012) [24, 42, 43]; міжнародній техн. конференції “Нові технології - для захисту повітряного простору“ (Харків, 2009) [25]; міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні інфор-

маційно-комунікаційні технології“ (COMINFO'2010 Livadia) (Крим, Ялта, 2010) [28]; міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні інформаційні і електронні технології“ /CIET'2010/ Одеса, 2010 [27]; міжнародних Кримських конференціях “НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології“ (КриМіКо 2011, 2012, 2013) [33, 34, 39-41, 45]; міжнародному радіоелектронному форумі “Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку“ (МРФ-2011) (Харків, 2011) [35], міжнародних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії“, (TCSET' 2010, 2012, 2014), (Львів-Славське, 2010, 2012, 2014) [26, 37, 38, 46].

Публікації. За темою дисертації видано 24 публікації, з яких 22 статті в затверджених періодичних фахових виданнях [1-21,50], стаття [8] перевидана в США, 8 статей [8, 10, 11, 15, 17, 19 - 21] у журналах, які включені до міжнародних наукометричних баз, отримано 2 авторських свідоцтва на винахід [22, 23]. Також є три патенти України на корисні моделі способів [47-49], опубліковано 23 тези доповідей на наукових конференціях [22-46].

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація являє собою рукопис і складається із вступу, 6 розділів, висновку, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації 339 с. Основний зміст дисертації викладений на 275 с., з яких 7 с. повністю займають рисунки і таблиці, містить 115 рис. і 22 табл. Бібліографічний список містить 237 джерел. У додатки включені 4 акти впровадження результатів роботи, опис авторських свідоцтв та патентів.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність наукової проблеми, надаються відомості про зв'язок дисертаційної роботи з науковими напрямками і програмами. Сформульована науково-технічна проблема, представлені відомості про наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, дані про реалізацію результатів роботи. Представлена інформація про наукові публікації автора за темою роботи, особистий внесок автора і апробації результатів досліджень. Також викладений короткий зміст роботи.

У першому розділі «Аналіз методів і систем частотно-часових вимірювань. Обґрунтування методології побудови БПСС» на підставі порівняльного аналізу принципів роботи існуючих інформаційно-вимірювальних систем пропонується новий варіант пасивного методу загального охоплення, що є основою для побудови БПСС [7,12].

Структура напів-активних систем координатно-часового та часо-частотного забезпечення, які найбільш широко застосовуються у цей час, представлена на рис. 1,а. Основним складовим елементом координатно-часових систем є випромінювач навігаційного сигналу, що містить інформацію про координати випромінювача і системний час. Апаратура споживача приймає сигнали випромінювачів і вирішує навігаційну задачу. При цьому здійснюється корекція шкали часу (ШЧ) споживача відносно ШЧ системи з урахуванням запізнення сигналу. У системах частотно-часового забезпечення спеціалізованими станціями або системами теле- і радіомовлення випромінюються сигнали точного часу (частоти), при цьому для підвищення точності синхронізації враховується

час проходження сигналу до споживача. Отже, визначаються, як координати джерела синхросигналу та споживача, так і значення апаратурних і каналних затримок. Вимога наявності зазначеної інформації є універсальною (обов'язковою) для будь-яких систем синхронізації.

Відмінною рисою пасивної системи синхронізації, що пропонується (рис. 1,б), є розподіл функції випромінювання сигналу і його частотно-часової модуляції у первинному джерелі синхросигналів [50]. Для цього функція частотно-часової модуляції (прив'язки) передається «своєму» об'єкту (пункту), а функцію випромінювача сигналу при цьому може виконувати будь-яке довільне джерело, що є радіодоступним для пунктів синхронізації. У ролі «свого» провідного (головного) пункту може виступати державний, первинний, відомчі та інші еталони, які беруть участь у реалізації БПСС. Завдання головного пункту – прийняти сигнал спільного джерела (СД) і «прив'язати» його до шкали свого еталона, який є носієм системного часу. У вторинних пунктах також приймається сигнал СД та фіксуються у відповідності до шкал своїх еталонів.

Оскільки тепер функція частотно-часової модуляції ССД перенесена в пункт А (рис. 1,б), то інформацію про положення ССД щодо шкали системного часу необхідно передавати в пункти, що синхронізуються. Для цього вводяться інформаційні канали з довільною затримкою для обміну інформацією про часове положення ідентичних фрагментів ССД між головним і вторинними пунктами. Ці канали можуть бути як односпрямованими (від головного до вторинних), так і двонаправленими, залежно від особливостей функціонування БПСС.

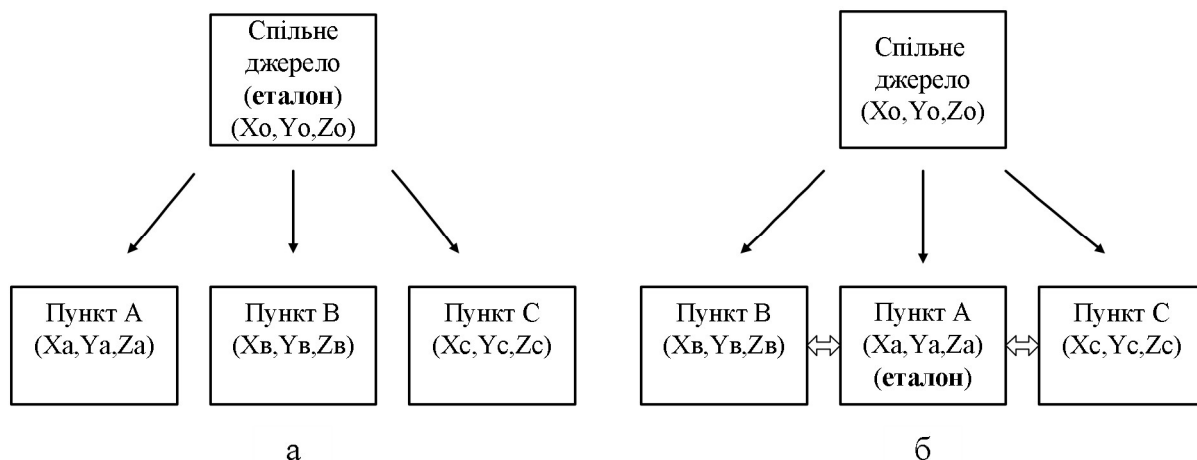


Рис. 1. Структурна схема напів-активної (а) і пасивної (б) систем синхронізації

Таким чином, основні принципи, які покладені в основу функціонування БПСС, що пропонується, полягають у наступному [15]:

- під час сеансу синхронізації ССД впевнено приймається в головному і вторинних пунктах;
- відстані від СД до пунктів, що синхронізуються, або різниця цих відстаней, відома з необхідною для задач синхронізації точністю, тобто відомі просторові координати елементів системи (рис. 1,б) $-x_i, y_i, z_i$, якщо елементи нерухомі, або поточне їхнє положення, якщо вони рухаються;

- у пунктах фіксуються ідентичні фрагменти ССД, тому реєстрація сигналів у вторинних пунктах виконується з урахуванням різниці часу їх приходу стосовно головного пункту;

- відмінність часового положення прийнятого у вторинному пункті сигналу СД від розрахованого значення свідчить про зсув його часової шкали відносно шкали головного пункту.

Перші два принципи аналогічні принципам існуючих систем синхронізації. Реалізація третього принципу пов'язана з необхідністю запису, зберігання і порівняння сигналів, тому базується на методах цифрової взаємкореляційної обробки. Четверте положення, по суті, не є принципом, а визначає підсумковий результат звірення шкал.

БПСС із використанням сигналів наземних або космічних сторонніх джерел має ряд переваг, що зумовлені відсутністю радіовипромінювання у пунктах, що синхронізуються. Тому автоматично вирішується задача електромагнітної сумісності і скритності роботи такої системи, біологічної та екологічної безпеки. Також запропонована система синхронізації часу і частоти є більш економічною, оскільки немає необхідності в розробці, виготовленні та експлуатації радіопередавальних пристроїв, які є найбільш енерго- і матеріалозатратними елементами радіотехнічної системи.

Подібна БПСС може бути використана у якості базової для побудови регіональних і загальнодержавної ССЧЧ. Однак широке використання пасивних систем стримується недостатнім розвитком теоретичного, методологічного та технічного забезпечення.

Тому є актуальною науково-прикладна проблема, що полягає в розробці теоретичних положень, методів і способів створення високоточних пасивних радіотехнічних систем синхронізації часу і частоти, що забезпечує підвищення надійності, вірогідності, безперервності та ефективності отримання частотно-часової інформації. Вирішення цієї проблеми неможливо без розвитку теорії і техніки багатопозиційних пасивних систем часо-частотної синхронізації.

Наступні три розділи роботи присвячені теорії БПСС – розвитку теоретичної основи їхньої побудови та аналізу, дослідженню джерел похибок частотно-часової синхронізації, а також розробці пропозицій по зниженню їхнього впливу. Завершальні два розділи висвітлюють технічні аспекти – розробку принципів технічної реалізації як окремих вузлів, так і різних варіантів систем у цілому, а також експериментальну перевірку результатів теоретичних досліджень шляхом проведення вимірювань на діючих лабораторних макетах пасивних систем синхронізації.

Другий розділ «Розвиток теорії багатопозиційних пасивних систем» присвячений теоретичному обґрунтуванню принципів функціонування систем пасивної синхронізації на основі використання сигналів спільних сторонніх джерел [1,3,4,8,10-12,15,16,17,24,36,43,47,50].

Задача звірення шкал просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти зводиться до визначення, наскільки синхронно працюють ці джерела зразкових коливань. Отже, необхідно оцінити зсув фази сигналу вторинного

еталона $s_B(t_B)$ відносно первинного $s_A(t_A)$ – зсув шкали часу та різницю їхніх частот – зсув частотної шкали.

Оцінювання проводиться в умовах наявності наступної апріорної інформації:

- $s_A(t_A)$ і $s_B(t_B)$ сигнальні корельовані, $n_A(t_A)$ і $n_B(t_B)$ шумові некорельовані складові випадкових процесів;
- час поширення або різниця часу поширення ССД до пунктів синхронізації ($\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}$) відомий з необхідною точністю;
- відомі носійна частота, смуга частот і, як правило, закон модуляції ССД;
- початковий зсув шкал пунктів приблизно відомий, тобто в записуваних фрагментах ССД однозначно присутні взаємно корельовані ділянки ($\Delta t_A \approx \Delta t_B$). Якщо фрагменти не перекриваються, то задачі зв'язування шкал передують задачі виявлення сигналу.

Дійсне та вимірне значення різниці часу запізнення сигналів, а, отже, похибка синхронізації може змінюватися під впливом зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів, це:

- трасові флуктуації часу розповсюдження радіохвиль (РРХ);
- вплив штучних і природних завад;
- багатопроменевість РРХ;
- флуктуації апаратних затримок;
- алгоритмічні (обчислювальні) похибки;
- взаємний хід шкал еталонів.

Наявність перерахованих дестабілізуючих факторів відображає структура узагальненої моделі багатопозиційної пасивної системи синхронізації, що представлена на рис. 2, складові блоки якої і будуть досліджуватися в ході роботи.

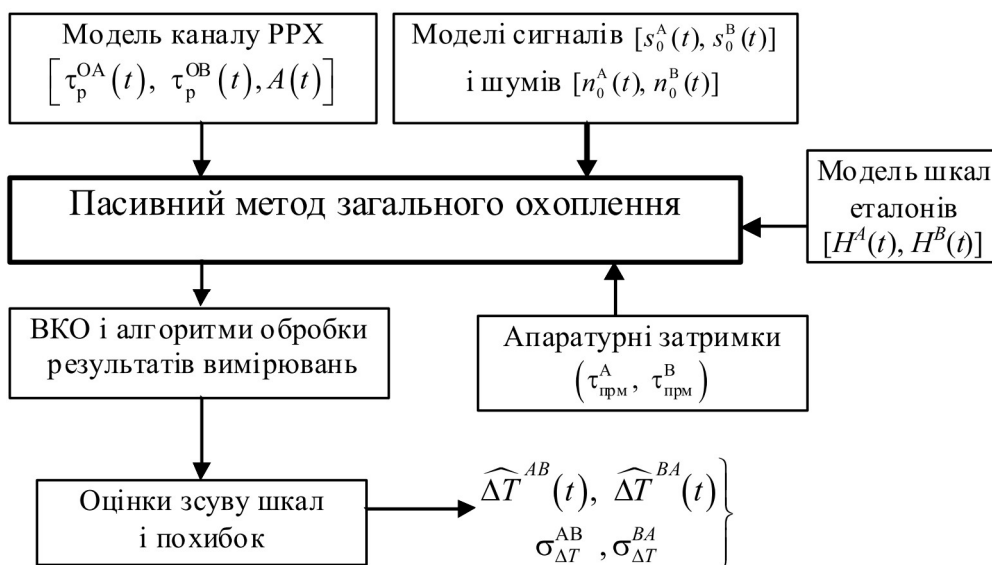


Рис. 2. Структура узагальненої моделі БПСС

На рис. 2 прийняті позначення: $H^A(t)$, $H^B(t)$ – аналітичне представлення шкал часу; $\tau_p^{OA}(t)$, $\tau_p^{OB}(t)$ – залежності затримок сигналів у каналі РРХ від спільного джерела до пункту А і до пункту В від часу; $A(t)$ – зміна загасання сигналу в ка-

налі РРХ; $\widehat{\Delta T}^{AB}(t)$, $\widehat{\Delta T}^{BA}(t)$, $\sigma_{\Delta T}^{AB}$, $\sigma_{\Delta T}^{BA}$ – миттєві оцінки зсуву шкал і середньоквадратичних похибок (СКП) у пунктах **A** та **B** відповідно; $s_0^A(t)$, $s_0^B(t)$, $n_0^A(t)$, $n_0^B(t)$ – відповідно прийняті сигнали та шуми в пунктах; $\tau_{\text{прм}}^A$, $\tau_{\text{прм}}^B$ – затримки сигналів в прийомних трактах апаратури відповідних пунктів.

Узагальнена модель складається з ряду часткових моделей (шкал еталонів, сигналу спільного джерела $s_0(t)$, каналу РРХ, завад, нестабільності апаратурних затримок), які із застосуванням основних алгоритмів (вимірювання зсуву шкал часу, обробки сигналів і результатів вимірювань) дозволяють імітувати результати визначення зсуву шкал між пунктами. Із структури узагальненої моделі БПСС випливає, що в основі її функціонування знаходиться пасивний метод загального охоплення, що пропонується [1,3,8,12,15,16, 24,36, 43].

Реалізація ПМЗО впливає з функціональної моделі БПСС (рис. 3), відповідно з якою до складу системи входять два ідентичних за структурою пункти - **A** (головний) і **B** (вторинний).

На рис. 4 показана часова діаграма, що демонструє принцип роботи ПМЗО та показує механізм виникнення похибок синхронізації. Там же наведені співвідношення для визначення часу запізнення сигналу спільного джерела для напів-активного (індекс ПА) і пасивного (ПМ) методів синхронізації, що дозволяє проаналізувати їх відмінності.

На рис. 3 і 4 також прийняті позначення: ΔT^{AO} , ΔT^{BO} , $\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$ – відповідні зсуви шкал; t_1^A , t_1^B – оцінки часового положення прийнятих у пунктах сигналів спільного джерела; $\tau_{\text{прд}}^O$ – затримки сигналів у передавальному тракті спільного джерела; δ_t^A , δ_t^B – похибки вимірювання часового положення сигналів у пунктах.

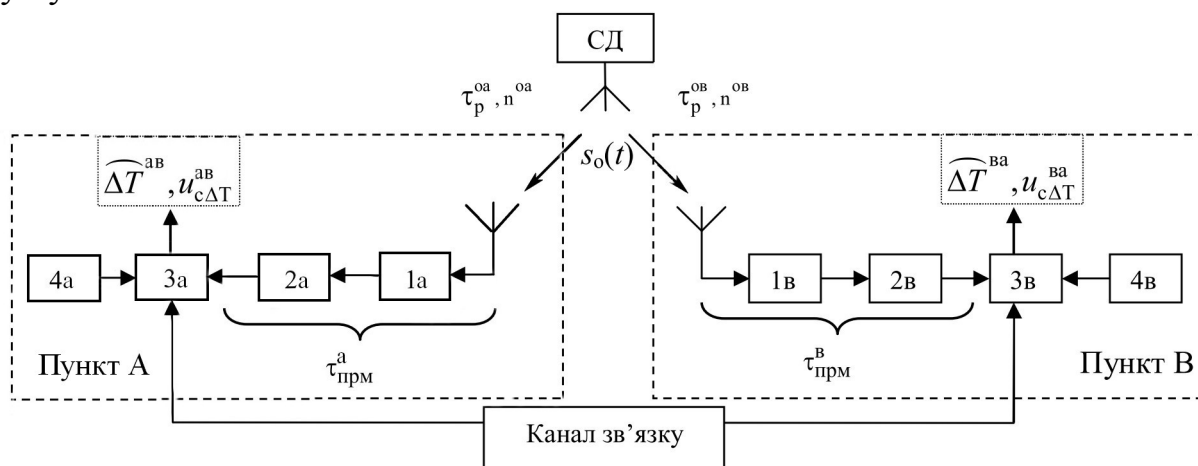


Рис. 3. Функціональна модель БПСС.

До складу функціональної моделі БПСС входять: СД – джерело спільного сигналу; 1 – прийомні пристрої; 2 – пристрої оцінки часового положення сигна-

лів; 3 – пристрої, що реалізують алгоритм вимірювань і методи обробки результатів; 4 – еталони, що звіряються.

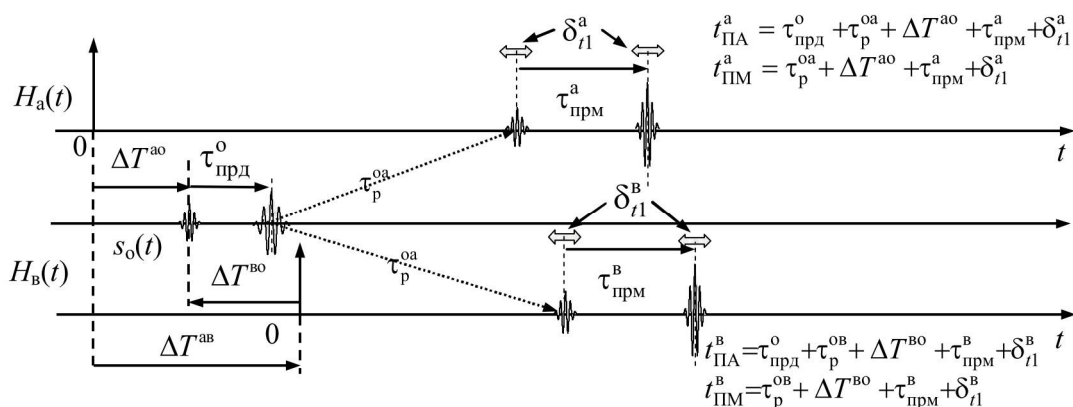


Рис. 4. Часова діаграма ПМЗО

Особливістю реалізації ПМЗО є відсутність похибок оцінки затримок сигналу в передавальному тракті спільного джерела в складі результуючої похибки синхронізації (нижні вирази на рис. 4). Крім того, у результуючу похибку звірення шкал часу входять не повні складові похибок, а їх парні різниці стосовно головного і вторинного пунктів:

$$\Delta T^{AB} = (\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}) + (\Delta T^{AO} - \Delta T^{BO}) + (\tau_{прм}^A - \tau_{прм}^B) + (\delta_t^A - \delta_t^B).$$

У якості теоретичної основи ПМЗО використовується байєсовська методологія оптимального оцінювання випадкового параметра (дискретних значень випадкового параметра), яким є значення часового положення прийнятих сигналів при обробці отриманих масивів даних на підставі апріорного розподілу значень параметра і вибору функції втрат.

На основі байєсовського підходу запропонована структура оптимального вимірювача зсуву шкал (рис. 5) з урахуванням особливостей реалізації ПМЗО, що полягають у тому, що спочатку відбувається рознесений прийом ССД, а спільна обробка прийнятих сигналів виконується після об'єднання інформації. При цьому на основі апріорних даних про різницю часу поширення сигналів шляхом часового стробування фіксуються ідентичні фрагменти ССД, що є відмінною рисою даного вимірювача [50].

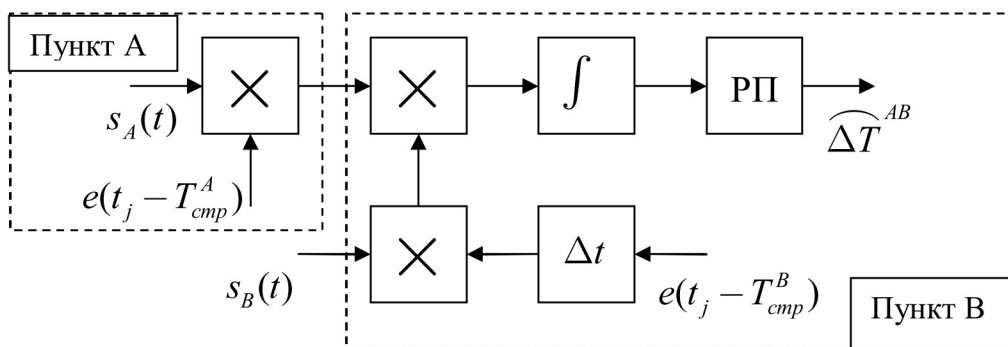


Рис. 5. Структурна схема оптимального вимірювача зсуву шкал пунктів А і В

На рис. 5, окрім очевидних математичних операцій, позначено: $u_B(t) = u_A(t - \Delta t)$; Δt – різниця часу поширення сигналів від СД до пунктів синхронізації; $e(t - T_{cmp})$ – стробуючий імпульс одиничної амплітуди тривалістю T_{cmp} , протягом якого стробується результат інтегрування; РП – рішачий пристрій, який виконує оцінку вимірюваного параметра, у цьому випадку зсуву шкал часу пунктів $\widehat{\Delta T}^{AB}$.

Спосіб синхронізації еталонів часу і частоти із застосуванням взаємкореляційної обробки сигналів спільного джерела та пристрій для його реалізації запатентовані [47].

На рис. 6 наведено графічне пояснення принципу реалізації заявленого способу, який відображає суть роботи ПМЗО. На рис. 6,а умовно показані осцилограми фрагментів прийнятих сигналів. Після обміну записаною в пунктах інформацією обчислюються функції взаємної кореляції сигналів, які можна представити у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} B^{S_A S_B}(\tau) &= K_{OA} K_{OB} R^{S_0} [\tau - (t_1^A - t_1^B)] + K_{OA} B^{S_0 n_B}(\tau) + K_{OB} B^{S_0 n_A}(\tau) \\ B^{S_B S_A}(\tau) &= K_{OA} K_{OB} R^{S_0} [\tau - (t_1^B - t_1^A)] + K_{OA} B^{S_0 n_B}(\tau) + K_{OB} B^{S_0 n_A}(\tau) \end{aligned} \right\},$$

де $R^{S_0}[\tau - (t_1^A - t_1^B)]$ – автокореляційна функція (АКФ) ССД, зсунута в часі на величину зсуву шкал часу пунктів $(t_1^A - t_1^B)$;

$$B^{S_0 n_A}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S^{OA}(t^A) n^A(t^A + \tau) dt, \quad B^{S_0 n_B}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S^{OB}(t^B) n^B(t^B + \tau) dt -$$

взаємкореляційна функція (ВКФ) сигналу спільного джерела з завадою відповідного пункту, що записані в часових шкалах пунктів;

K_{OA}, K_{OB} – коефіцієнти, що враховують ослаблення сигналів на відповідних трасах РРХ.

Оцінка часового положення (ОЧП) прийнятого сигналу здійснюється шляхом визначення місця положення максимуму ВКФ сигналів, записаних у пунктах, щодо шкали часу пункту обробки інформації, тобто цю операцію можна представити як розв'язання системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} [B^{S_A S_B}(\tau)]' &= 0 \\ [B^{S_B S_A}(\tau)]' &= 0 \end{aligned} \right\},$$

тобто, прирівнявши нулю похідні ВКФ, що розраховані у відповідних пунктах.

Якщо зсув шкали часу вторинного пункту відносно головного має нульове значення, то максимум функції взаємної кореляції ССД буде знаходитись в центрі часових стробів. При наявності зсуву, як показано на рис. 6, максимумами ВКФ в пунктах будуть симетрично зсунуті відносно центрів стробів.

Реалізація ПМЗО базується на використанні ССД, у якості яких можуть використовуватися сигнали різних джерел. Найбільш широко розповсюдженими радіоджерелами, які можуть використовуватися в якості спільних, є телецентри, радіомовні станції, телекомунікаційні та радіонавігаційні ШСЗ на різних орбітах. При цьому використовуються різні частотні діапазони і види сигналів.

Порівняльний аналіз сигналів можливих спільних джерел проводиться на основі критерію мінімуму похибки однократного вимірювання часового інтервалу [15]. Аналіз і моделювання похибок синхронізації при використанні

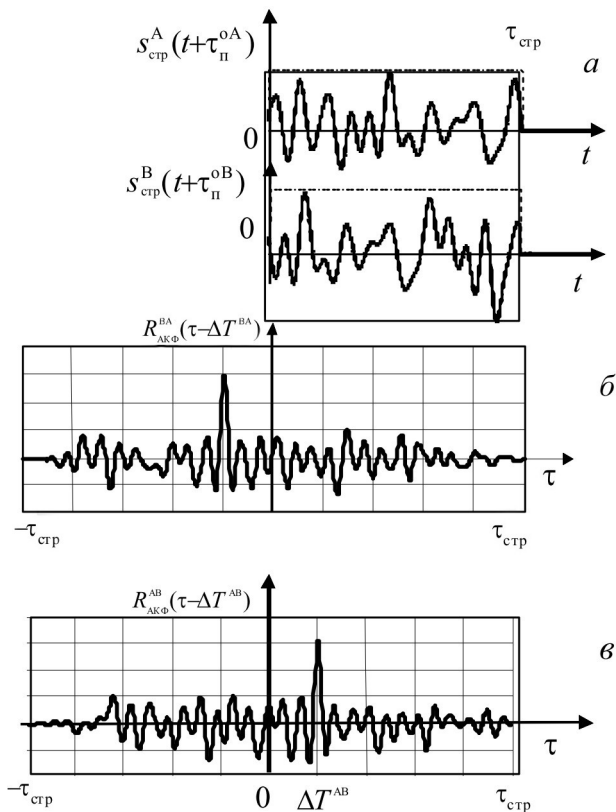


Рис. 6. Графічне пояснення принципу реалізації ПМЗО: а) – осцилограми прийнятих сигналів; б) – вигляд ВКФ в пункті А; в) – вигляд ВКФ в пункті

В

сивних системах». У розділі досліджуються похибки синхронізації, що викликані умовами РРХ, та пропонуються шляхи зменшення впливу цих похибок на результуючу точність системи синхронізації [3,4,6,10,11,25,31, 32, 40].

Мало вивченим джерелом похибок синхронізації при використанні ССД є багатопроменевість РРХ. Найбільшу похибку в ОЧП сигналів вносить дисперсна багатопроменевість, наслідком якої є спотворення форми обвідної та зсув фази когерентної носійної результуючого сигналу. Виконано теоретичний аналіз і моделювання похибок ОЧП сигналів за їх фазами і обвідними у випадку корельованих багатопроменевих завад, які мають різні часові затримки і величини [10].

У якості вихідного виразу для дослідження спотворень обвідної сигналу ви-

ПМЗО дають підставу зробити висновок про доцільність використання сигналів з максимально більшою ефективною шириною спектра. При цьому перевага надається сигналам, що мають шумоподібну структуру, АКФ яких має однопіковий характер. Тобто такі сигнали забезпечують однозначність вимірів з мінімальною похибкою. З розглянутих сигналів наземних джерел найкращим є сигнал цифрового наземного телебачення формату DVB-T2.

Проведені дослідження ПМЗО показали, що основними складовими результуючої похибки синхронізації є апаратурні і каналні (трасові) похибки, які, у свою чергу, також мають ряд складових [8,10,11,16,17]. Апаратурні та каналні похибки мають різну природу виникнення, їх склад також може змінюватися, тому наступні розділи присвячені більш детальному розгляду цих похибок.

Третій розділ «Вплив каналних завад на похибки синхронізації в пасивних системах».

У розділі досліджуються похибки синхронізації, що викликані умовами РРХ, та пропонуються шляхи зменшення впливу цих похибок на результуючу точність системи синхронізації [3,4,6,10,11,25,31, 32, 40].

Мало вивченим джерелом похибок синхронізації при використанні ССД є багатопроменевість РРХ. Найбільшу похибку в ОЧП сигналів вносить дисперсна багатопроменевість, наслідком якої є спотворення форми обвідної та зсув фази когерентної носійної результуючого сигналу. Виконано теоретичний аналіз і моделювання похибок ОЧП сигналів за їх фазами і обвідними у випадку корельованих багатопроменевих завад, які мають різні часові затримки і величини [10].

У якості вихідного виразу для дослідження спотворень обвідної сигналу ви-

користано співвідношення:

$$B_p(t) = |\bar{B}_p(t)| = \left| R_0[t - t_0(t)] + \sum_{i=1}^m \alpha_i R_0[t - t_0(t) - \tau_i(t)] \cdot e^{-j\omega_0 \tau_i(t)} \right| =$$

$$= \sqrt{\left\{ R_0[t - t_0(t)] + \sum_{i=1}^m \alpha_i R_0[t - t_0(t) - \tau_i(t)] \cos[\omega_0 \tau_i(t)] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^m \alpha_i R_0[t - t_0(t) - \tau_i(t)] \sin[-\omega_0 \tau_i(t)] \right\}^2}, \quad (1)$$

де $|\bar{B}_p(t)|$ – модуль комплексної обвідної результуючої ВКФ;

R_0 - автокореляційна функція ССД;

α_i – рівень i -го перевідбитого променя;

$\tau_i(t)$ – затримка i -го перевідбитого променя.

З (1) впливає співвідношення для знаходження абсолютної похибки вимірювання зсуву шкал часу за фазою в умовах багатопроменевого прийому:

$$\delta t_\varphi \approx \frac{\frac{1}{\omega_0} \sum_{i=1}^m \alpha_i \left[R_0(-\tau_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_0^{(n)}(-\tau_i)}{n!} \delta t_\varphi^n \right] \sin(\omega_0 \tau_i)}{R_0(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_0^{(n)}(0)}{n!} \delta t_\varphi^n + \sum_{i=1}^m \alpha_i \left[R_0(-\tau_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_0^{(n)}(-\tau_i)}{n!} \delta t_\varphi^n \right] \cos(\omega_0 \tau_i)}.$$

В результаті досліджень шляхом математичного моделювання визначені механізми та виконана оцінка впливу багатопроменевості РРХ, а також впливу шумових і корельованих завад на результуючу похибку синхронізації БПСС, і, як результат, знайдені шляхи мінімізації наслідків цих явищ. Моделюванням встановлено, що похибки ОЧП сигналу при зміні затримки завади мають коливальний характер з нульовим середнім значенням. При зміні затримки завади максимальні значення похибки ОЧП сигналу за фазою та за обвідною сигналу пропорційні відповідно обвідній АКФ сигналу і її похідній. Для однакових співвідношень сигнал/корельована завада і сигнал/білий шум максимальні значення похибок ОЧП сигналів, зумовлених корельованою завадою, не перевищують похибки ОЧП сигналів при білому шумі.

Побудова БПСС із використанням сигналів наземних джерел припускає роботу в умовах прямого бачення та РРХ у приземних шарах атмосфери. Для високоточних БПСС у цих умовах необхідно враховувати варіації затримок РРХ, пов'язаних зі зміною умов РРХ. Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити значення сезонних варіацій часу поширення, які на трасі довжиною 85 км становлять від 3 до 8 нс, що необхідно враховувати на трасах великої довжини [2,26].

Особливістю використання ССД космічного розташування є те, що дані джерела безупинно переміщуються в просторі під впливом тіл Сонячної системи. Тому на величину каналної похибки суттєво впливає неточність визначення поточних координат супутника. Для зниження цієї складової похибки використовується модель добового переміщення ГС ШСЗ. Дані, отримані з використанням моделі за 2 доби, свідчать про те, що через нутацію ШСЗ похибка визначення різниці часу поширення сигналів від супутника до пунктів залежно від відстані між пунктами може становити від ± 250 нс до $\pm 1,5$ мкс, а відносні похибки визначення частоти сигналу від $\pm 2 \cdot 10^{-11}$ до $\pm 10^{-10}$. Знизити вплив цих похибок можна шляхом їхнього врахування за допомогою моделі або за рахунок усереднення добових результатів вимірювань [4].

При використанні космічних спільних джерел також виникає необхідність визначення каналних затримок, пов'язаних із проходженням сигналу в іоносфері і тропосфері. Для цього використовуються відомі моделі (наприклад, Клобучара, Ionex) та функціональні залежності [16,17].

У четвертому розділі «Зниження впливу апаратних шумів на похибки синхронізації БПСС» наводяться результати аналізу складових похибок синхронізації, які виникають при проходженні сигналів у трактах апаратури, а також зумовлених особливостями обробки інформації при реалізації ПМЗО, що дозволило розробити способи та засоби зменшення впливу цих похибок на якість роботи БПСС [1,3,4,8,8a,9,14,14a,27,29,34,37,39,41,42].

Аналізуються похибки синхронізації, викликані впливом адитивних нормальних шумів. У якості досліджуваних використовуються відео і радіо імпульси із дзвоноюю обвідною та обвідною виду $Sinx/x$. Розроблена модель дозволяє кількісно визначати співвідношення сигнал/шум, при яких виконуються нормальні вимірювання, що дає можливість одержати оцінку інтервалу застосовності взаємокореляційної обробки сигналів стороннього джерела з не повністю відомими параметрами [8].

При ОЧП прийнятих сигналів моделюються випадки узгодженої фільтрації (УФ) та взаємокореляційної обробки (ВКО). Моделі для дослідження похибок при ОЧП сигналу за обвідною представлені на рис. 7. Модель рис. 7,б дозволяє визначити величину співвідношення сигнал/шум (при заданому виді сигналу, характері шуму), за якого гарантовано забезпечується необхідна точність синхронізації. Застосування даних моделей дозволяє порівнювати результати УФ і ВКО при ОЧП прийнятих сигналів, що дає можливість оцінити ефективність БПСС на етапі її розробки.

Функціонування моделей рис.7,а та рис.7,б можна представити у вигляді:

- для узгодженої фільтрації

$$\left[\widehat{\Delta T}_{i,j}^{AB/УФ} \right] = \left[\widehat{t}_{1,i,j}^A \right] - \left[\widehat{t}_{1,i,j}^B \right] - \left[\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB} \right] \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \left[\overline{\Delta T}_i^{УФ} \right] \\ \left[\sigma_{\Delta T_i}^{УФ} \left(\overline{q}_i^A, \overline{q}_i^B \right) \right]; \end{array} \right.$$

- для взаємокореляційної обробки

$$\left[\widehat{\Delta T}_{i,j}^{AB/BKO} \right] = \left[\widehat{t_{i,j}^A} - \widehat{t_{i,j}^B} \right] - \left[\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB} \right] \Rightarrow \begin{cases} \left[\overline{\Delta T}_i^{BKO} \right] \\ \left[\sigma_{\Delta T_i}^{BKO}(\bar{q}_i^A, \bar{q}_i^B) \right] \end{cases}$$

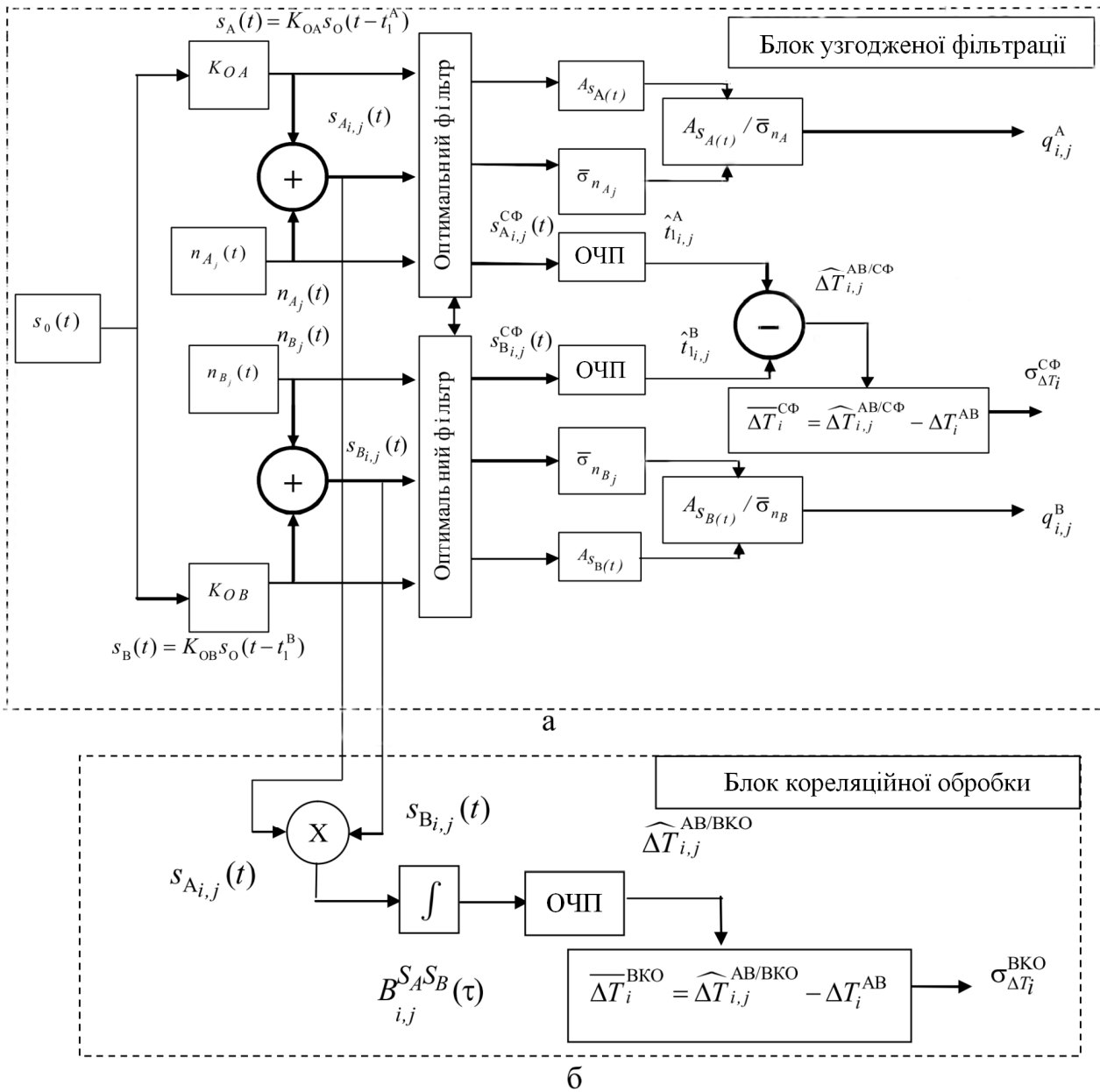


Рис. 7. Моделі для порівняльної оцінки похибок ОЧП для УФ і ВКО сигналів спільного джерела

Проведені теоретичні дослідження похибок синхронізації, викликаних затримками сигналів при проходженні вхідних узгоджувачів (ВУП) апаратури синхронізації. Необхідність теоретичної проробки викликана виникненням флуктуацій затримок у ВУП, що спостерігаються від включення до включення апаратури. Використаний підхід дозволив пояснити причину виникнення аномальних затримок, які є наслідком накладення прямої хвилі та відбитої від неоднорідності в електричному колі. Залежно від величини фазового зсуву між ними результуюче коливання набуває непрогнозованої затримки.

Причинами виникнення неоднорідностей є неузгодженості опорів елементів ВУП через вплив зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів. За отриманими аналітичними виразами для визначення параметрів ВУП виконане моделювання, результати якого добре погоджуються з експериментальними даними [9].

Ще одним джерелом апаратурних затримок БПСС є когерентний гетеродин приймального пристрою, якщо фаза його сигналу має флуктуації щодо фази сигналу еталона. Для дослідження флуктуацій гетеродина використовується відома математична модель на основі системи ФАПЧ, для якої додатково формуються сигнали і шуми.

Пропонується методика знаходження фазових і частотних флуктуацій керованого по частоті генератора, охопленого кільцем ФАПЧ. Розроблена методика дослідження флуктуаційних властивостей когерентного гетеродина дозволяє визначити спектральний склад і оцінити величину фазових шумів, внесених колами перетворення частоти [14].

Особливістю реалізації фазових вимірювань у БПСС є те, що прийняті в пунктах синхронізації сигнали є сигналами з випадковою початковою фазою. Відомим рішенням, що дозволяє вимірювати поточне значення фази прийнятого сигналу, є його квадратурна обробка [14a]. Тому для дослідження фазових систем синхронізації розроблені моделі, що реалізують квадратурну обробку сигналів, одна з таких моделей показана на рис. 8.

За допомогою моделювання досліджуються апаратурні похибки фазової БПСС на прикладі імпульсних радіосигналів довільної форми, прийнятих на тлі адитивних некорельованих і корельованих завад. Результати моделювання показали, що припустимий рівень співвідношення сигнал/шум (умова отримання нормальних вимірів) при квадратурній обробці на 3 дБ вище, ніж для схеми УФ.

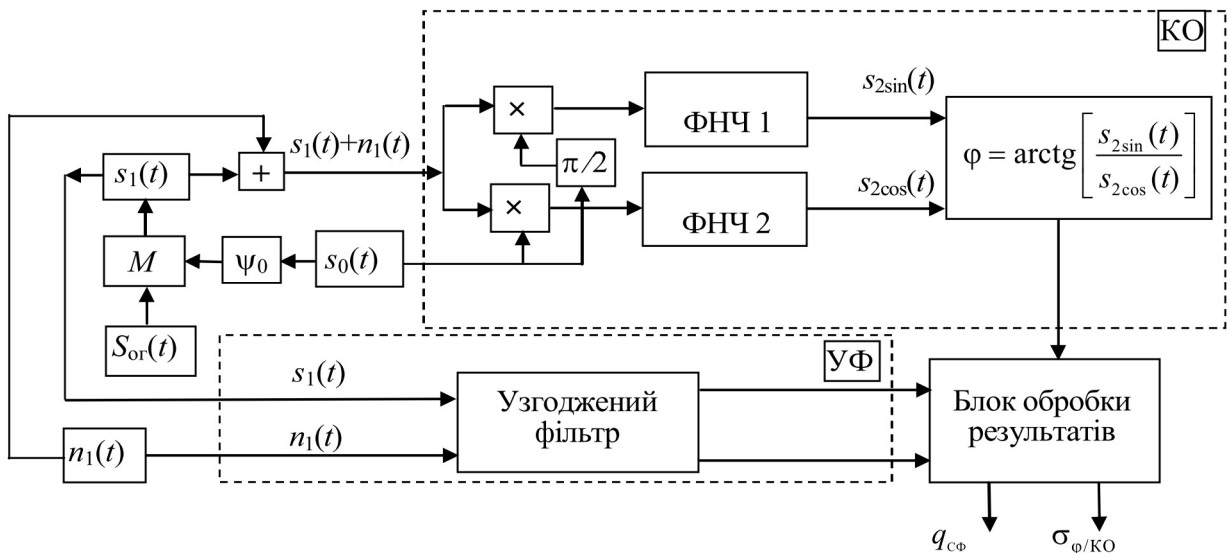


Рис. 8. Модель для дослідження похибок ОЧП фазової БПСС

Результати моделювання для випадків УФ та ВКО дозволили виявити той факт, що величина СКП при фазових вимірах залежить від вибору інтервалу

спостереження ($-\pi < \hat{\psi}_{0i} < \pi$ або $0 < \hat{\psi}_{0i} < 2\pi$). Тому аналіз необхідно виконувати для обох інтервалів і вибрати результат з меншою СКП.

Отримані у ході досліджень результати стали основою для розробки принципів побудови і способів реалізації БПСС, показаних у наступному розділі роботи.

У п'ятому розділі «Техніка багатопозиційних систем синхронізації часу і частоти з використанням сигналів сторонніх джерел» пропонуються схемно-технічні рішення пасивних систем, а також окремих їх вузлів, які забезпечують зменшення похибок синхронізації часу та частоти при використанні наземних і космічних ССД. Окремі варіанти технічної реалізації оформлені у вигляді винаходів та патентів на корисні моделі [3,4,5,13,20-23,28,33,38,47-49].

БПСС на основі наземних джерел має більш високі характеристики точності, що зумовлено більшою потужністю передавачів і їх фіксованим розташуванням.

Пропонується використання у якості спільних джерел трансляторів наземного цифрового телебачення [19]. Недоліком такої системи є обмежена відстань дії, що зумовлено обмеженістю зони впевненого прийому сигналу. Для усунення цього недоліку розроблені пропозиції по збільшенню далекодії системи при використанні сигналів ЦНТБ. Структурна схема такої БПСС представлена на рис. 9. Для збільшення далекодії БПСС пропонується установка додаткових прийомних пунктів (П1-2 на рис. 9) на межі сусідніх трансляційних зон і взаємна прив'язка сигналів спільних джерел (СД1 та СД2 на рис. 9) у цих зонах [21].

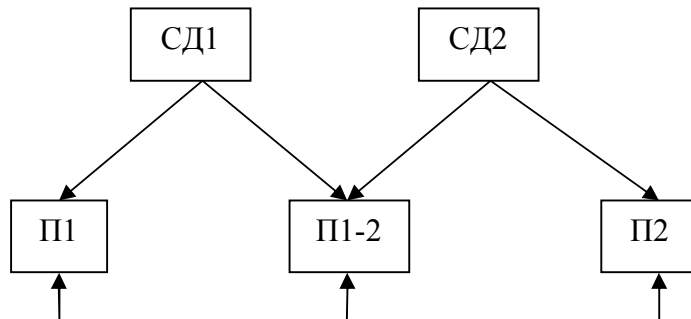


Рис. 9. Структурна схема системи синхронізації з кількома СД

Далекодія БПСС із використанням наземних сторонніх джерел також може бути збільшена за рахунок перевідбиття сигналів від метеорних слідів [13].

Використання сигналів ШСЗ знімає обмеження з далекодії БПСС. При використанні сигналів низько і середньоорбітальних ШСЗ можливе використання додаткових сигнальних ознак, а саме значення доплерівської частоти, у якості відлікових часових моментів для звірення шкал часу.

Пропонується варіант технічної реалізації системи синхронізації (рис. 10), в якій у якості відлікового береться момент часу, коли доплерівський зсув частоти прийнятого сигналу дорівнює нулю або певному значенню. На даний спосіб синхронізації отриманий патент на корисну модель [49]. На рис. 10 позначено: ПЧК – перетворювач частота-код; ЕОП – електронно-обчислювальний пристрій.

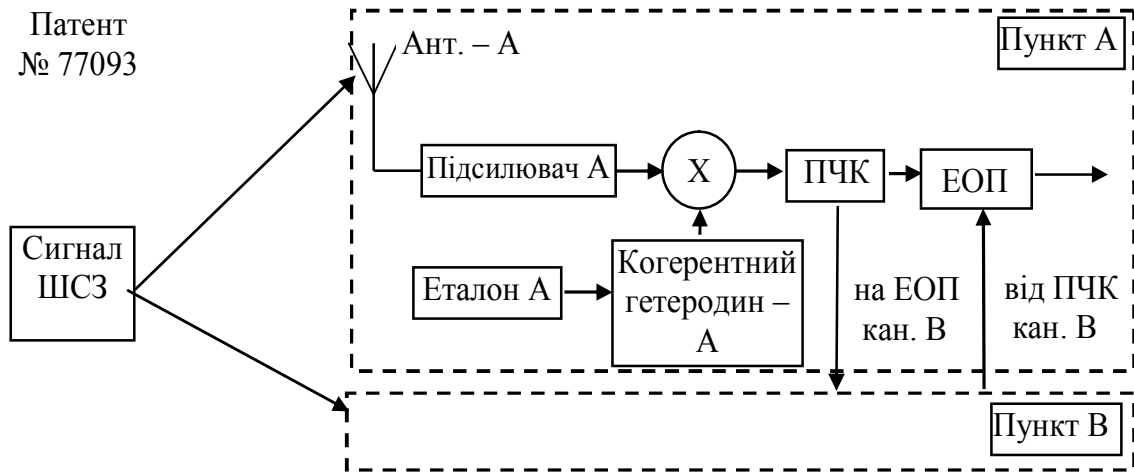


Рис. 10. Структурна схема системи синхронізації за сигналом ШСЗ

Оформлений у вигляді патенту на корисну модель спосіб і пристрій синхронізації з використанням сигналів ГС ШСЗ [48]. Особливість даного технічного рішення полягає в реалізації спрямованого прийому, ОЧП за обвідними та фазами сигналів, а також урахування добове переміщення супутника, затримки сигналів в іоносфері, тропосфері і апаратурі.

Важливим аспектом в роботі БПСС є вимірювання та поточний контроль апаратурних затримок. Оцінка апаратурних затримок виконується за допомогою додаткового технічного пристрою із застосуванням відомого принципу пілотування, коли оцінюється часове положення сигналу, час надходження якого в тракт відомо з необхідною точністю. Реалізація пілотування можлива при наявності свого джерела сигналу, характеристики якого відповідають параметрам ССД. Для формування сигналів з різними видами модуляції запропоновано два пристрої, заявлені як винаходи [22, 23].

Структурна схема одного із заявлених пристроїв наведена на рис. 11. В основу реалізації пристроїв [22, 23] покладений принцип компенсації нелінійності частотно-настроювальної характеристики генератора керованого (ГК) і формування сигналів із заданими законами модуляції. Для цього на початковому етапі роботи пристрою рис. 11 вимірюються різниці частот ГК та опорного генератора (ОпГ) в усьому діапазоні частот ГК. За допомогою перетворювача частотакод (ПЧК) результати вимірювань оцифровуються та порівнюються з розрахованими даними. Сформовані коректуючі коди заносяться в блок оперативної пам'яті (БОП). У відповідності з керуючими кодами та кодами корекції за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) і суматора виробляється напруга, яка забезпечує необхідний закон частотної модуляції ГК.

У пристрої [23] додатково реалізована функція керування законом зміни фази вихідного сигналу. Запропоновані пристрої дозволяють оперативно та у широких межах змінювати параметри вихідних сигналів, що забезпечує можливість перевірки БПСС у процесі її створення, а також проводити контроль працездатності та значень апаратурних затримок у процесі експлуатації.

Розроблено пристрій, що дозволяє здійснювати частотну синхронізацію цифрових мереж при використанні сигналу спільного джерела. Застосування

запропонованого пристрою в цифрових мережах дозволяє на основі адаптивної комбінованої обробки сигналу ТБ і сигналу опорного термостатованого кварцового генератора забезпечити необхідну точність частотно-часової синхронізації при тривалій (до декількох діб) відсутності радіосигналів ГНСС [20].

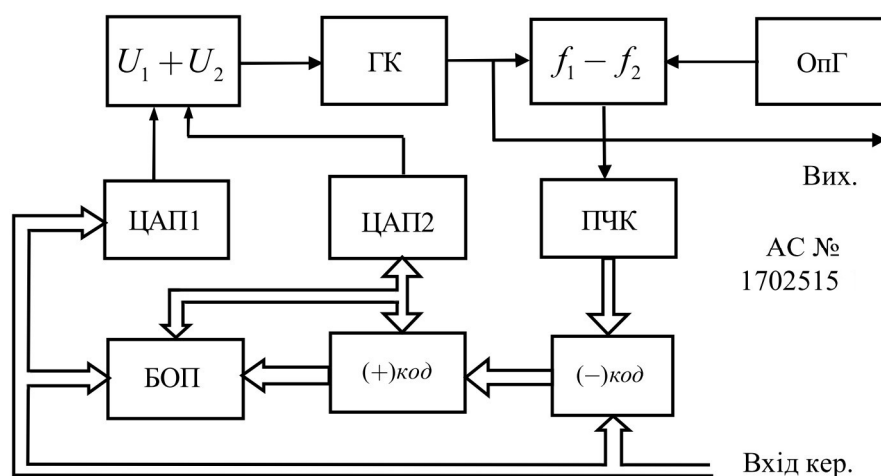


Рис. 11. Структурна схема пристрою пілотування БПСС

Вірогідність і працездатність розроблених принципів, методів і способів побудови БПСС підтверджується експериментальним шляхом, що показано в наступному розділі.

У шостому розділі «Дослідження систем синхронізації часу і частоти з використанням сигналів наземних і космічних сторонніх джерел» представлені результати експериментальної перевірки запропонованих принципів побудови і розроблених схемно-технічних рішень БПСС часу і частоти [3,14a,17-19,25,30,33,35,44-46].

Лабораторні дослідження макета БПСС із використанням сигналу аналогового ТБ при післядетекторній обробці підтвердили можливість досягнення високих потенційних характеристик ПМЗО. СКП одиничних вимірів у режимі «нульової бази» становить 3-5 нс, а СКП середніх значень груп – менше 2 нс [3].

На наступному етапі досліджень проводились звірення шкал еталонів (стандартів) за фазою носійної частоти сигналу місцевого телецентру у режимі «нульової бази». Структурну схему лабораторного стенду наведено на рис. 12. До складу одного каналу системи входять: 1 – селектор каналів метровий; 2 – підсилювач проміжної частоти (ППЧ - 38 МГц); 3 – змішувач; 4 – другий ППЧ (2 МГц). Спільними для прийомних каналів є: гетеродини 5, 6, двоканальний цифровий осцилограф 7, персональний комп'ютер (ПК) – 8.

На рис. 13 показано результат обробки прийнятих сигналів. СКП зсуву шкал на частоті 2 МГц становить 5 нс, що при перерахунку для частоти прийому сигналу 77,25 МГц відповідає значенню 130 пс [14a,50]. Таким чином, експериментально доведено можливість створення високоточної фазової БПСС.

В ході експерименту з використання сигналів ЦНТБ у БПСС повністю підтверджені висновки, зроблені в ході порівняльного аналізу кореляційних властивостей сигналів наземних джерел. Використання шумободібного сигналу, яким

є сигнал цифрового ТБ, забезпечує однозначність ОЧП та високу точність синхронізації, що склала 2,5 нс та не є остаточним граничним значенням [19].

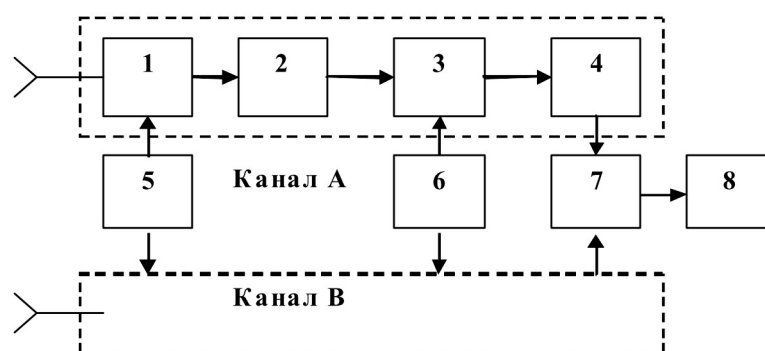


Рис. 12. Структурна схема макета фазової БПСС

Експериментально доведено можливість реалізації БПСС із використанням сигналів ГС ШСЗ [17]. З цією метою застосовувалися серійні GPS приймачі та використовувалися сигнали супутників системи функціонального космічного доповнення. Така побудова експерименту забезпечує можливість перевірки отриманих результатів при роботі апаратури в штатному режимі.

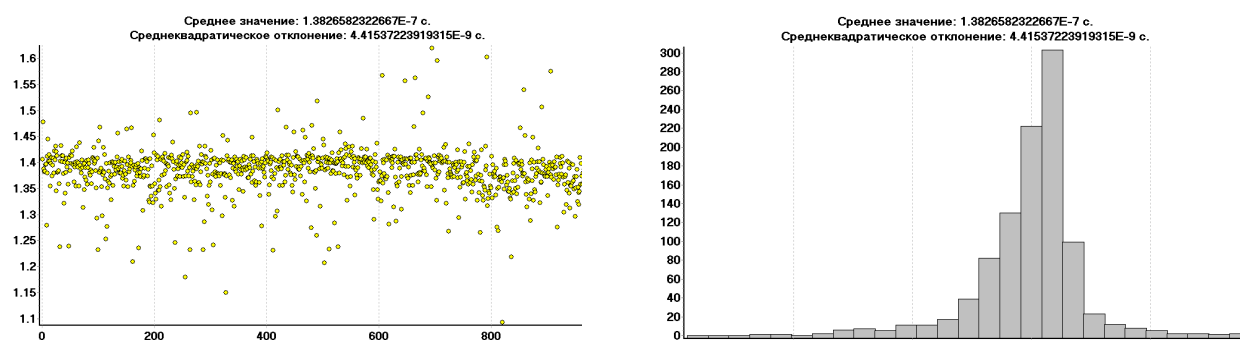


Рис. 13. Результати звірення шкал за фазою носійної частоти: а) – масив даних вимірювання зсуву шкал; б) – гістограма результатів вимірювань

Зменшення впливу добових переміщень ГС ШСЗ досягається за рахунок використання моделі нутацій, наведеної в 3-му розділі. Як засвідчив експеримент, підсилення штатної GPS антени не забезпечує стійкий прийом сигналів ГС ШСЗ, які знаходяться на вдвічі більшій відстані, ніж супутники ГНСС. Тому у подальших дослідженнях використовувалися спрямовані антени, що забезпечило збільшення співвідношення сигнал/шум на вході приймача більше ніж на 20 дБ та впевнений прийом сигналів.

Відпрацьована методика визначення іоносферної і тропосферної складових похибки синхронізації при використанні сигналів ГС ШСЗ. Максимальне значення додаткової затримки на момент експерименту склало 30 нс, що свідчить про необхідність враховувати ці похибки у високоточних БПСС [16].

За результатами фазових вимірювань визначене середнє значення різниці апаратурних затримок прийомних каналів ідентичної серійної апаратури, рівне 16 нс. При цьому значення затримки сигналу в приймачі є невідомим, тому що такі вимірювання можливі щодо приймача з каліброваною затримкою [16].

Показані результати експерименту по можливому збільшенню далекодії системи за рахунок перевідбиття сигналів наземного спільного джерела від метеорних слідів [13].

Результати виконаних експериментальних досліджень підтверджують вірогідність отриманих теоретичних висновків і дозволяють вирішувати питання практичної реалізації БПСС.

У **Висновках** приводяться найбільш важливі наукові і практичні результати, що отримані в результаті виконання роботи.

У **Додатках** представлені акти про впровадження результатів роботи, авторські свідоцтва та патенти.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна проблема теоретичного обґрунтування та розробки (створення) системи синхронізації часу і частоти нового типу – багатопозиційної пасивної радіотехнічної системи високоточної синхронізації часу і частоти, що має підвищену надійність та вірогідність, безперервність передачі частотно-часової інформації. Ефект від використання нових методів і підходів також полягає у можливості забезпечення єдності частотно-часових вимірювань в Україні на рівні характеристик ГНСС.

Отримано наступні найбільш важливі наукові і практичні результати.

1. На основі порівняльного аналізу принципів побудови та функціонування існуючих інформаційно-вимірювальних систем запропоновано, обґрунтовано і розроблено принципи побудови БПСС, відмінною рисою яких є відсутність власних джерел сигналів, що дозволяє забезпечити економічність, скритність, завадозахищеність, ЕМС, екологічну та біологічну безпеку роботи БПСС. Зокрема, при створенні БПСС в Україні передбачається можливим максимально використати наявні технічні засоби звірення мір часу та частоти.

2. Розроблено новий пасивний метод загального охоплення для синхронізації просторово рознесених мір часу і частоти, що полягає у фіксації ідентичних фрагментів сигналу стороннього джерела щодо шкал часу пунктів синхронізації з обліком їхнього часового запізнення в каналі РРХ і прийомній апаратурі. Синтезовано оптимальний вимірювач для оцінки зсуву шкал часу звірюваних еталонів, що використовує особливості реалізації пасивного методу синхронізації. Для реалізації методу можуть використовуватися сигнали довільних природних і штучних джерел, місце розташування яких відомо з необхідною для задач синхронізації точністю. Побудова БПСС із використанням розробленого методу загального охоплення дозволяє забезпечити високоточну синхронізацію шкал часу просторово рознесених еталонів на рівні $2\div 5$ нс при вимірюваннях за обвідною сигналу та ~ 100 пс за фазовими вимірюваннями, що дорівнює точності диференціального методу звірення шкал за сигналами ГНСС GPS і ГЛОНАСС.

3. Розроблено новий спосіб звірення шкал просторово рознесених мір часу і частоти при реалізації ПМЗО, що базується на використанні цифрової взаємкореляційної обробки сигналів спільного джерела, прийнятих у пунктах синхронізації, і дозволяє використовувати сигнали з неповністю відомими параметрами, у тому числі і шумоподібні. Цифрова форма запису сигналів дозволяє

здійснювати обмін даними, накопичувати інформацію, виконувати її статистичну обробку, що забезпечує високу точність частотно-часової синхронізації. Випадкова складова похибки вимірювання зсуву шкал у ході експериментальних досліджень макета БПСС із використанням сигналів наземного цифрового ТБ формату DVB-T2 у режимі «нульової бази» знаходиться в межах 2,5 нс.

4. Отримано аналітичні вирази похибок оцінки часового положення прийнятих сигналів спільного джерела, на основі яких розроблені математичні моделі імітації наявності та зміни шумів, завад, використання різних видів сигналів сторонніх джерел при реалізації різних способів обробки частотно-часової інформації. Застосування розроблених моделей дозволяє оптимізувати структуру та параметри МПСС на етапі її проектування з метою одержання необхідних споживачам характеристик точності системи.

5. Показано, що є можливою реалізація (створення) високоточної фазової БПСС на рівні кращих світових досягнень в області частотно-часової синхронізації. У результаті експериментальних досліджень з оцінки часового положення сигналів на основі фазових вимірювань носійної частоти аналогового ТБ отримано середньоквадратичну похибку у режимі «нульової бази» на рівні 130 пс.

6. Запропоновані способи та схемні рішення дозволяють реалізувати БПСС із використанням наземних або космічних спільних джерел, тобто побудувати місцеву (регіональну) або загальнодержавну систему синхронізації часу і частоти. Способи і технічні рішення, які відображають основні принципи побудови БПСС і демонструють можливість їх реалізації, оформлені у вигляді трьох патентів на корисні моделі.

7. Запропоновано нові технічні рішення, які при створенні пристроїв пілотування апаратних затримок БПСС дозволяють формувати сигнали з різними видами модуляції, керувати в широких межах параметрами цих сигналів і можуть застосовуватися для налагодження БПСС при створенні, а також для їхнього калібрування та контролю зміни апаратних затримок у процесі експлуатації. На ці технічні рішення отримано два авторські свідоцтва на винахід.

8. Для збільшення далекодії БПСС із використанням сигналів ЦНТБ розроблено технічне рішення, за допомогою якого виконується взаємна часова прив'язка сигналів телецентрів, що перебувають у сусідніх трансляційних зонах. Запропоноване технічне рішення дає можливість реалізувати БПСС із використанням ССД наземного розташування, що дозволяє забезпечити споживачів України високоточною частотно-часовою інформацією.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Коваль Ю.А. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости [текст]/ Коваль Ю.А., Костыря А.А., Обельченко В.В. и др. // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. - № 1(20). —С. 21-30.

2. Антипов И.Е. Анализ времени распространения метровых волн в приземном слое для задач высокоточной синхронизации времени и частоты [текст]/ Ан-

типов И.Е., Бондарь Е.Ю., Костыря А.А., Иванова Е.А. // Східно-Європейський журнал передових технологій. Вип. 2/3 (38). Х.: 2009. — С.22-25.

3. Коваль Ю.А. Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала [текст]/ Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова и др. // Системи управління, навігації та зв'язку, 2009, випуск 2(10). — С. 40-45.

4. Коваль Ю.А. Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения [текст] / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря и др. // Східно - Європейський журнал передових технологій. Вип. 4/10 (40). Х.: 2009. — С. 25-29.

5. Коваль Ю.А. История и современное состояние исследований кафедры ОРТ ХНУРЭ по высокоточной синхронизации времени и частоты [текст]/ Ю. А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова и др. // Радиотехника. Всеукр. межвед. научно-техн. сб. 2010. Вып. 160. Х.: ХНУРЭ, 2010. — С. 25-39.

5а. Антипов И.Е. Современные средства и методы радиолокационных метеорных исследований [текст]/ И.Е. Антипов, А.А. Костыря, А.И. Шкарлет // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. Вып.160. Х.: ХНУРЭ, 2010. — С. 39-46.

6. Костыря А.А. Оценки минимальной погрешности синхронизации времени и частоты по сигналу местного телецентра [текст]/ Системи обробки інформації, 2010, випуск 2(83). — С. 102-105.

7. А.А. Костыря. Современное состояние и тенденции развития систем синхронизации времени и частоты [текст]/ Системи управління, навігації та зв'язку, 2010, випуск 2(104). — С. 26-29.

8. Коваль Ю.А. Моделирование систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников [текст]/ Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря, Б.А. Ал – Твежри // Известия вузов. Радиоэлектроника. - 2011. - Вып. № 2 (том 54). — С. 12-21.

8а. Yu. Koval, Modeling frequency-time synchronization systems that use signals of common sources / Yu. Koval, E. Ivanova, A. Kostyrja and B. Al-Tvejri // Radioelectronics and Communications Systems, 2011, Volume 54, Number 2, Pages 68-76.

9. Коваль Ю.А. Аномальные задержки антенно-фидерных трактов систем с высокоточным измерением временного положения сигналов [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.Ю. Приймак и др. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Вып.165. Х.: ХНУРЭ, 2011. — С.37-45.

10. Коваль Ю.А. Погрешность оценки временного положения сигналов в многолучевых каналах [текст] / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря и др. // Східно-Європейський журнал передових технологій. Випуск 3/12(51). Харків, 2011. — С.51-60.

11. Коваль Ю.А. Оценивание неопределенности измерений при сличениях эталонов времени и частоты радиотехническими методами [текст]/ Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, В.Ю. Приймак // Системи обробки інформації.

Вип. 1 (99), Х.: ХУПС. 2012. — С. 30-33.

12. Коваль Ю.А. Методы и алгоритмы высокоточной частотно-временной синхронизации [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, С.А. Плехно, Х.Х. Асаад // Зв'язок. Загально галузевий науково-виробничий журнал. № 1(97), 2012. – С. 52-59.

13. Антипов И.Е. Об использовании высоких частот в метеорной радиолокации [текст] / И.Е. Антипов, А.А. Костыря, А.И. Шкарлет // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Вып.168. Х.: ХНУРЭ, 2012. — С.12-15.

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

14а. Коваль Ю.А. Погрешности и неопределенности фазовых радиотехнических методов синхронизации разнесенных эталонов времени [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова, А.Ф. Хусейн. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. № 169, 2012. – С. 27-36.

15. Коваль Ю.А. Выбор общего источника сигнала для региональной системы синхронизации времени и частоты [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, О.А. Соляник и др. // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. Випуск 2(27). Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. — С.63-69.

16. Коваль Ю.А. Учет канальных погрешностей пассивной системы синхронизации времени и частоты при использовании сигналов геостационарных ИСЗ [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.Ю. Приймак и др. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. № 170, 2012. – С. 210-216.

17. Коваль Ю.А. Анализ и экспериментальные оценки неопределенности измерений сдвига шкал времени с применением сигналов системы SBAS [текст] / Ю.А. Коваль, С.А. Плехно, А.А. Костыря и др. // Системи обробки інформації. Вип. 3 (110), Х.: ХУПС. 2013. — С. 107-111.

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

19. Костыря А.А. Экспериментальные исследования потенциальной точности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов цифрового наземного телевидения [текст] / А.А. Костыря, В.Н. Науменко, С.А. Плехно, С.И. Ушаков // Східно-Європейський журнал передових технологій. Випуск 1/9(67). Харків, 2014. — С.24-28.

20. Гриненко Т.А. Пристрій підтримання синхронізації за телевізійним сигналом для цифрової мережі АСУ ТП [текст] / Т.А. Гриненко, О.О. Костыря, О.П. Нарезній // Метрологія та прилади. Вип. № 3. Х.: 2014. – С. 44 –50.

21. Бойко В. Питання створення автономної системи частотно-часового забезпечення споживачів Збройних Сил України на основі використання

методу пасивної синхронізації шкал часу і частоти [текст] / Бойко В., Гаврилов А., Костиця О., Рондін Ю. // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. Вип. № 5. Харків, 2014. - С. 67–70.

22. В.А. Лошаков, В.А. Голубев, А.А. Костиця, С.А. Тельнов. Формирователь частотно-модулированных сигналов. АС № 1702515 от 1.09.1991г.

23. В.А. Лошаков, В.А. Голубев, А.А. Костиця, С.А. Тельнов Устройство формирования сигналов с угловой модуляцией. АС № 1821895 от 12.10.1992 г.

24. Коваль Ю.А. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости [текст] / Коваль Ю.А., Бондарь Е.Ю., Костиця А.А., Иванова Е.А. // IV Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. — С. 99-100.

25. Коваль Ю.А. Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала [текст] / Коваль Ю.А., Костиця А.А., Иванова Е.А. и др. // V наукова конференція „Новітні технології – для захисту повітряного простору”. Х.: ХУПС, 2009. – С. 158.

26. Ivan Antipov. About the Time Measurement of Radio-Waves Propagation in Atmosphere at Nanoseconds Accuracy/ Ivan Antipov, Alexandr Kostyrja, Eugenia Bondar' // Xth International Conference TCSET'2010 „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. — p. 161.

27. Коваль Ю.А. Математическая модель алгоритма общего охвата в системах синхронизации времени и частоты [текст] / Коваль Ю.А., Костиця А.А., Иванова Е.А. // 11-я Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии» / СИЭТ'2010/ Одесса, 2010. – С. 214 .

28. Коваль Ю.А. О возможности использования сигналов геостационарных ИСЗ для синхронизации сетей связи [текст] / Коваль Ю.А., Костиця А.А., Иванова Е.А., Шелковенков Д.А. // VI міжнародна науково-технічна конференція „Сучасні інформаційно-комунікаційні технології”, АР Крим, Ялта-Лівадія, 2010. — С.75-77.

29. Коваль Ю.А. Разработка и исследование имитационной модели систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костиця, Е.А. Иванова и др. // VII міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)”, Харків, 2010. — С. 132-135.

30. Коваль Ю.А. Экспериментальные исследования точности сличения шкал времени в режиме нулевой базы при использовании сигналов эфирного и кабельного телевидения [текст] / С.Г. Кундюков, Ю.А. Коваль, А.А. Костиця и др. // VII міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)”, Харків, 2010. — С. 136-139.

31. Коваль Ю.А. Исследование пороговых эффектов при сличении шкал

времени для различных методов оценки временного положения сигналов [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова и др. // VII міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка”, Харків, 2010. — С. 140-143.

32. Коваль Ю.А. Возможности повышения точности и помехозащищенности сравнения эталонов времени за счет использования GPS-подобных сигналов геостационарных ИСЗ дифференциальных систем SBAS. [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова и др. // VII міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)”, Харків, 2010. — С. 144-147.

33. Коваль Ю.А. Частотно-временная синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS. [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова и др. // 21-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2011) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2011. — С.392-393.

34. Коваль Ю.А. Модель канала время-частотной синхронизации [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.В. Обельченко и др. // 21-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2011) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2011. — С.425-426.

35. Костыря А.А. Разработка лабораторного стенда для сличения шкал эталонов по фазе несущей частоты сигнала местного телецентра [текст] / А.А. Костыря, О.А. Соляник, С.Ф. Семьонов и др. // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». (МРФ-2011). Том 1, часть 2. Харьков, 2011. – С. 93-96.

36. Костыря А.А. Моделирование аппаратных погрешностей системы синхронизации времени и частоты [текст] / А.А. Костыря, С.А. Плехно, В.Н. Науменко // IX міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2014)”, Харків, 2014. — С. 134-136.

37. Kostyrja, A.A.; Plekhno, S.A.; Khalid-H-Asaad Simulation of System Phase-Locked-Loop Frequency Control. // XIth International Conference TCSET'2012 „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. — p. 56.

38. Koval, Y.A.; Kostyrja, A.A.; Al-Tvejri, B.A.; Pryimak, V.Y. Criteria for Comparison of Synchronization Algorithms Spaced Measures Time and Frequency. // XIth International Conference TCSET'2012 „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. — p. 117.

39. Костыря А.А. Исследование флюктуационных свойств когерентного гетеродина системы синхронизации времени и частоты [текст] / 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.

40. Коваль Ю.А. Оценивание погрешностей и неопределенностей измерений в системах синхронизации [текст] / Ю.А. Коваль, А.А. Костыря,

В.Ю. Приймак, Б.А.Ал-Твежри //22-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2012) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. Т. 1. Севастополь: Вебер, 2012. — С. 332-333.

41. Коваль Ю.А. Пороговые эффекты при фазовых измерениях временного положения сигналов [текст] /Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, Е.А. Иванова, А.Ф. Хусейн //22-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2012) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. Т. 2. Севастополь: Вебер, 2012. — С. 809-810.

42. Коваль Ю.А. Моделирование пассивных систем синхронизации, использующих квадратурную обработку огибающих сигналов [текст] /Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.Ю. Приймак, Б.А. Ал-Твежри //VI Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”. Тези доповідей - Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. — С. 71-72.

43. Коваль Ю.А. Выбор общего источника сигнала для региональной системы синхронизации времени и частоты [текст] / 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.

44. Костыря А.А. Программная реализация статистической обработки результатов измерений сдвига шкал времени при использовании алгоритма общего охвата [текст] /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.

45. Коваль Ю.А. Экспериментальные исследования потенциальной точности сличения шкал времени с применением сигналов системы SBAS [текст] /Ю.А. Коваль, А.А. Костыря, В.Ю. Приймак, С.А. Плехно //23-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2013) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. Т. 1. Севастополь: Вебер, 2013. — С. 296-297.

46. Alexander Kostyria, Sergey Plehno, Vitaliy Naumenko, Sergey Ushakov. Experimental estimation of potential accuracy synchronization of time and frequency standards by using signals of digital TV. // International Conference TCSET'2014 „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. — p. 794.

47. Коваль Ю.О., Костыря О.О., Приймак В.Ю., А.Ф. Хусейн. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу й частоти. Патент на корисну модель №76698 від 10.01.2013. Бюл. № 1.

48. Коваль Ю.О., Костыря О.О., Плехно С.О., Ал-Твежри Б.А. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу та частоти. Патент на корисну модель №77652 від 25.02.2013. Бюл. № 4.

49. Коваль Ю.О., Костыря О.О., Науменко В.Н., Асаад Х.Х. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів

часу та частоти. Патент на корисну модель. №77093 від 25.01.2013. Бюл. № 2.

50. Должиков В.В. Исследования макета пассивной системы синхронизации по фазе несущей частоты аналогового телевизионного сигнала/ В.В. Должиков, А. А. Костыря, В.Н. Науменко, С.А. Плехно, С.И. Ушаков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 178. Харьков, 2014 — С. 111 - 118.

АНОТАЦІЯ

Костыря О.О. Розвиток теорії і техніки багатопозиційних пасивних радіотехнічних систем високоточної частотно-часової синхронізації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи. - Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

Підвищення точності, надійності, безперервності та ефективності кординадно-часового та частотного забезпечення з використанням ГНСС перебуває під пильною увагою світового наукового співтовариства, про що свідчать як публікації, так і виконувані роботи з розгортання систем функціонального космічного доповнення. Однак розв'язання зазначених завдань можливо за допомогою пасивних систем, які мають ряд безперечних переваг – економічність, завадозахищеність, скритність, надійність, безпечність, електромагнітна сумісність. Широке впровадження пасивних систем стримується недостатнім розвитком теорії і практики їх побудови. З метою подолання зазначеного протиріччя в дисертації вирішена актуальна науково-технічна проблема розробки теоретичних положень, методів і способів створення високоточних пасивних радіотехнічних систем синхронізації часу та частоти, що забезпечує підвищення надійності, достовірності, безперервності та ефективності отримання частотно-часової інформації.

Результати експериментальних досліджень розроблених багатопозиційних пасивних систем синхронізації свідчать про можливість реалізації та працездатність принципів побудови, спроможність досягнення високих показників з точності звірення шкал часу еталонів - одиниці наносекунд при вимірах за обвідною сигналу і сотні пікосекунд при фазових вимірах, що знаходиться на рівні показників GPS і ГЛОНАСС в режимі диференціальної корекції. Побудова пасивної системи синхронізації з використанням сигналів спільних джерел як наземного, так і космічного базування, дозволяє отримати високу надійність функціонування системи в цілому та забезпечити єдність частотно-часових вимірювань в Україні.

Ключові слова: взаємкореляційна обробка, багатопозиційна пасивна система синхронізації, оцінка часового положення, пасивний метод загального охоплення, похибки синхронізації, сигнал стороннього джерела, синхронізація часу і частоти.

АННОТАЦИЯ

Костыря А.А. Развитие теории и техники многопозиционных пассивных радиотехнических систем высокоточной частотно-временной синхронизации. – Рукопись.

Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.17 — радиотехнические и телевизионные системы. — Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015.

Повышение точности, надежности, непрерывности и эффективности координатно-временного и частотного обеспечения с использованием ГНСС находится под пристальным вниманием мирового научного сообщества, о чем свидетельствуют как публикации, так и выполняемые работы по развертыванию систем функционального космического дополнения. Однако решение указанных задач возможно с помощью пассивных систем, которые имеют ряд бесспорных преимуществ - экономичность, помехозащищенность, скрытность, надежность, безопасность, электромагнитная совместимость. Широкое внедрение пассивных систем сдерживается недостаточным развитием теории и практики их построения. С целью преодоления указанного противоречия в диссертации решена актуальная научно-техническая проблема разработки теоретических положений, методов и способов создания высокоточных пассивных радиотехнических систем синхронизации времени и частоты с использованием сигналов общих сторонних источников, что обеспечивает повышение достоверности, надежности, непрерывности и эффективности получения частотно-временной информации.

Для решения указанной проблемы на основе сравнительного анализа известных систем синхронизации времени и частоты синтезирована общая структура и оптимальный измеритель многопозиционной пассивной системы синхронизации, в качестве информативного параметра которой используется временной момент приема идентичных фрагментов сигнала общего стороннего источника. Оценка временного положения сигналов, принятых в пространственно разнесенных синхронизируемых пунктах, осуществляется по огибающей или фазе взаимокорреляционной функции этих сигналов на основе разработанного пассивного метода общего охвата. Исследуются основные источники погрешностей, присущие данному методу синхронизации, предлагаются технические решения, обеспечивающие реализацию разработанных методов и способов частотно-временной синхронизации.

Результаты экспериментальных исследований разработанных пассивных систем синхронизации свидетельствует о реализуемости и работоспособности принципов построения, возможности достижения высоких точностных показателей сличения шкал времени эталонов – единицы наносекунд при измерениях по огибающей сигнала и сотни пикосекунд при фазовых измерениях, что соответствует характеристикам по точности GPS и ГЛОНАСС в режиме дифференциальной коррекции. При этом в качестве общих источников использовались наземные телецентры, а также искусственные спутники Земли на геостационарных орбитах. Рассматриваются особенности применения указанных и

других общих источников, разработаны предложения по снижению случайных и систематических составляющих погрешностей синхронизации.

Применение пассивных систем синхронизации с использованием сигналов общих источников как наземного, так и космического базирования, позволяет обеспечить высокую надежность функционирования системы единого времени в целом. Эффект от использования новых методов и подходов также состоит в возможности обеспечения единства частотно-временных измерений в Украине на уровне характеристик ГНСС. Разработанные принципы построения многопозиционных пассивных систем синхронизации позволяют максимально использовать имеющиеся технические средства сличения мер времени и частоты.

Ключевые слова: взаимокорреляционная обработка, многопозиционная пассивная система синхронизации, оценка временного положения, пассивный метод общего охвата, погрешности синхронизации, сигнал стороннего источника, синхронизация времени и частоты.

ABSTRACTS

Kostyria A. A. Development of theory and technology in the multi positional of passive radio systems high-precision time-frequency synchronization. – The manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical Sciences on specially 05.12.17 - radio and television systems. - Kharkov national University of Radioelectronics, Kharkov, 2015.

The work is devoted to the development of the theory and techniques of passive multi-radio systems for high precision time and frequency synchronization using signals of third-party sources and is aimed at solving scientific and technical problems of development of theoretical principles, methods and ways of creating high-precision passive radio systems synchronization of time and frequency that provides improved reliability, accuracy, continuity and efficiency for time-frequency information. Offers principles, methods, ways and means of building these systems, which allows to obtain the synchronization accuracy on the level of existing foreign systems to ensure secrecy, electromagnetic compatibility, efficiency and noise immunity.

The results of experimental studies of the developed multi-positional synchronization systems suggest the possibility of implementation and prices get of principles, the ability to achieve high performance with precise performance comparison of the time scales of standards - units of nanoseconds when the measurement signal envelope and hundreds of picoseconds in the phase measurements which surpasses SRNS GPS and GLONASS at the same measurement intervals. Construction using signals common sources both terrestrial and space-based ensures high reliability of the whole system.

Keywords: the cross-correlation function, multi positional passive systems of synchronization, estimation of temporary provisions, passive method of synchronization, synchronization error, signal an external source, synchronization of time and frequency.

Підп. до друку 23.12.14. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Спосіб друку – ризографія
Умов. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим.
Зам. № 2-115. Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

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