

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

БАСЕМ АБДУЛЛА МОХАММЕД АЛ-ТВЕЖРІ

УДК 621.396.96

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ ЗСУВУ ШКАЛ В  
РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЧАСУ ТА ЧАСТОТИ**

05.12.17 – радіотехнічні і телевізійні системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертація є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

**Коваль Юрій Олександрович**,

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри «Основ радіотехніки»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Величко Анатолій Федорович**,

Інституту радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України,  
завідувач відділу;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

**Ткаченко Андрій Олексійович**,

Національний технічний університет "Харківський політехнічний  
інститут", доцент кафедри інформатики та інтелектуальної  
власності

Захист відбудеться «\_\_\_\_\_» грудня 2013 року о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14, ауд. 13.

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

Автореферат розіслано «\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2013 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради



д-р техн. наук Безрук В.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Активний розвиток ракетно-космічної галузі, наземних і космічних телекомунікаційних і радіонавігаційних систем, вирішення різних наукових і практичних завдань вимагає постійного вдосконалення часо-частотного забезпечення. За останні 50 років відносна похибка первинних еталонів зменшилася з  $10^{-10}$  до  $10^{-15}$ , тобто точність зростає в середньому на порядок кожні 10 років.

В теперішній час основним для звірення еталонів часу і вирішення інших завдань синхронізації є метод, заснований на використанні супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) GPS (США) і ГЛОНАСС (Росія). У стадії розробки знаходиться Європейська СРНС (GALILEO), в створенні якої бере участь і Україна, і СРНС Китаю COMPASS / BEIDOU. Сигнали СРНС використовують також для частотно-часової синхронізації в інших галузях науки і техніки.

У розвинених країнах світу проблеми постійного вдосконалення науково-технічної бази і організаційної структури систем єдності вимірювань часу і частоти приділяється постійна увага. В Україні роботи по вдосконаленню і розвитку методів синхронізації мають особливу актуальність, оскільки Україна не має в своєму розпорядженні власних СРНС і супутників зв'язку, які б забезпечували необхідну точність звірення шкал часу.

Питання розвитку методів синхронізації включені до Національної космічної програми України і програми створення і розвитку державної служби часу і частоти (ДСЧЧ). До теперішнього часу арсенал методів синхронізації і варіанти їх технічної реалізації істотно розширився.

Методи синхронізації відносно до алгоритмів можна поділити на три групи.

До першої групи належать методи, які реалізуються за допомогою одностороннього алгоритму (ОА) і називаються напівактивними. В ОА відбувається одностороння передача даних, а зсув шкал можна визначити, якщо відомо час затримки сигналів між пунктами.

Друга група включає методи, які реалізуються із застосуванням групи алгоритмів – ретрансляційного, зустрічного, опорно-ретрансляційного. Такі методи базуються на двосторонній передачі інформації. При цьому час затримки сигналів між пунктами може бути невідомим, потрібні тільки його висока стабільність і зворотність. Такі методи називаються активними.

У методах третьої групи використовується спільне джерело, сигнали якого приймаються в рознесених пунктах, а зсув шкал визначається з урахуванням відомої різниці затримок сигналів між спільним джерелом і пунктами, що синхронізуються. Ці методи основані на алгоритмі загального охоплення (АЗО) і відносяться до пасивних, оскільки відсутнє випромінювання в пунктах.

Кожен з методів має специфічні джерела похибок, які обумовлені особливостями каналу проходження сигналу, алгоритмами порівняння, апаратною реалізацією, релятивістськими ефектами та ін.

Монопольне положення, яке займають СРНС в області синхронізації, відіграє негативну роль. До негативних наслідків можуть привести, наприклад, ситуації, коли СРНС будуть заблоковані або переведені в режим трансляції помилкової інформації. Окрім залежності від іноземних систем, до недоліків використання

СРНС для синхронізації відносяться: мале співвідношення сигнал/завада, недостатня оперативність, низька завадостійкість, похибка синхронізації шкал часу складає 50 і більше наносекунд.

Дослідження, які проводились в ХНУРЕ під керівництвом проф. Б.Л. Кащеєва, показали можливість досягнення точності синхронізації шкал часу з використанням активного методу радіометеорної синхронізації на рівні 20 наносекунд. Подальше продовження досліджень за участю автора роботи із застосуванням пасивних методів дозволило отримати потенційні значення похибки синхронізації на рівні одиниць наносекунд, тобто очікувані характеристики майбутньої системи мають бути кращими за ті, що отримані активними методами. При цьому застосування пасивних методів має суттєві переваги – не виникають питання електромагнітної сумісності, біологічної та екологічної безпеки, система є скритною і завадо захищеною, її розробка і експлуатація суттєво дешевше, ніж активної радіо метеорної апаратури.

На сьогодні Україна в області синхронізації часу і частоти повністю залежить від іноземних СРНС, а тому є необхідність в розробці альтернативних пасивних методів синхронізації. Таким чином, є актуальною тема дисертаційних досліджень, яка полягає в удосконаленні методів вимірювань зсуву шкал в радіотехнічних системах синхронізації часу та частоти, які не поступаються, а за деякими показниками перевершують СРНС.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації пов'язані з виконанням планових НДР Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної тематики: № 239 «Розробка альтернативних методів синхронізації, передачі і захисту інформації для використання в Державній інформаційній системі з надзвичайних ситуацій», підтема № 239-5 «Розробка принципів побудови вітчизняного комплексу інформаційно-вимірювальних систем для прогнозування і аналізу наслідків надзвичайних ситуацій» (№ ДР 0109U001635). Здобувач також приймав участь у НДР «Забезпечення функціонування Державної служби єдиного часу і еталонних частот (ДСЧЧ) в Україні» (№№ ДР 0111U004901, 0107 U007810), які виконувались у ННЦ «Інститут метрології».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методів вимірювання зсуву шкал в радіотехнічних системах синхронізації часу і частоти за допомогою комплексного аналізу джерел похибок вимірювань і пошуку шляхів зниження основних складових похибок.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- аналіз сучасного стану систем синхронізації і обґрунтування актуальності вдосконалення альтернативних принципів їх побудови;
- комплексний аналіз джерел похибок вимірювання зсуву шкал методами, які використовують основні алгоритми синхронізації; аналіз невизначеностей вимірювань для основних алгоритмів;
- розробка критеріїв для порівняння основних методів та алгоритмів і обґрунтування переваг пасивного АЗО із застосуванням сигналів спільних джерел наземного і космічного базування;
- моделювання похибок систем синхронізації на основі пасивного

алгоритму для різних методів обробки сигналів;

- аналіз і моделювання похибок систем синхронізації на основі пасивного алгоритму, викликаних багатопроменевістю каналу поширення радіохвиль;
- експериментальні дослідження з використанням в якості спільного джерела сигналів супутникової системи функціонального доповнення SBAS.

**Об'єкт дослідження.** Процес синхронізації часу та частоти.

**Предмет дослідження.** Методи та алгоритми вимірювання зсуву шкал в системах синхронізації часу і частоти, джерела похибок основних алгоритмів синхронізації, невизначеності результатів вимірювань зсуву шкал.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач для комплексного аналізу основних алгоритмів застосовувалися методи теорії поширення радіохвиль, прийому, фільтрації, вимірювання прецизійної часової затримки сигналів, методи теорії ймовірності і математичної статистики виявлення і оцінювання параметрів сигналів, математичного імітаційного моделювання, статистичної обробки результатів вимірювань, які ґрунтуються на використанні байєсівського підходу, методи експериментальних досліджень.

**Достовірність результатів та висновків,** що отримані в дисертаційній роботі, підтверджено коректним використанням строгого математичного апарата, збігом результатів теоретичних досліджень і моделювання, а також експериментальною перевіркою можливостей звірення з використанням сигналів супутникової системи функціонального доповнення (SBAS).

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Для дослідження методів синхронізації удосконалено структуру узагальненої моделі каналу синхронізації, яка включає алгоритми вимірювання зсуву шкал часу, обробки результатів, а також підмоделі каналу поширення радіохвиль, завад і апаратних затримок. На відміну від моделі, що використовувалася раніше, удосконалена модель дозволяє оцінити вплив на похибки синхронізації як адитивних, так і корельованих завад при узгодженій фільтрації та взаємкореляційній обробці сигналів спільного джерела.

2. На основі комплексного аналізу основних алгоритмів вимірювання зсуву шкал: пасивного (безпосередній, взаємний) і активних (зустрічний, ретрансляційний, опорно-ретрансляційний) виявлені шляхи удосконалення пасивних методів вимірювання зсуву шкал просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти, які на відміну від відомих базуються на взаємкореляційній обробці прийнятих в пунктах сигналів.

3. Вперше оцінена можливість використання квадратурної обробки сигналів при застосуванні пасивного алгоритму в системах синхронізації у випадку вимірювання часового положення сигналів за їх обвідними. Відмінністю є те, що аналізується вплив нелінійних ефектів, які виникають у ході квадратурної обробки, на похибки синхронізації. Оцінка проведена з допомогою моделі, яка дозволяє імітувати два варіанти квадратурної обробки сигналів в даних системах синхронізації: узгоджену фільтрацію і взаємкореляційну обробку з використанням різних методів оцінки часового положення сигналів.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Використання сигналів супутникової системи функціонального доповнення

SBAS як спільного джерела показало, що потенційна завадова похибка за оцінками СКП складає одиниці наносекунд при кодових вимірах і менше наносекунди при фазових вимірах.

2. Використання сигналів супутникової системи функціонального доповнення (SBAS) в режимі «нульової бази» з використанням GPS приймачів, які синхронізовані між собою, показало, що потенційне значення невизначеності типу А при фазових вимірах складає тисячну долю наносекунди ( $1.4 \cdot 10^{-11}$  с), а при кодових вимірах менше наносекунди ( $3.4 \cdot 10^{-10}$  с).

3. Запропонований спосіб синхронізації часу і частоти на основі взаємкореляційної обробки прийнятих в пунктах сигналів спільного наземного або космічного джерела (захищений патентом).

Результати дисертаційної роботи реалізовано в НДР ХНУРЕ і НДР ННЦ «Інституту метрології», а також впроваджено в навчальний процес в курс «Радіонавігаційні мережі та системи синхронізації», що підтверджується відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, наведені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно і досить повно викладено у 19 наукових працях, опублікованих здобувачем у співавторстві. Особистий внесок здобувача у статтях, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному: В роботі [1-2] отримані основні результати розробки та використання моделі системи, яка використовує сигнал спільного джерела для синхронізації територіально рознесених стандартів часу та частоти. В роботах [3, 10] здобувачем розглянута можливість використання сигналів телекомунікаційних геостаціонарних супутників для звірення шкал часу та частоти рознесених у просторі еталонів, а також виконана статистична обробка результатів вимірювань. Розроблено стенд для оцінки якості синхронізації з використанням GPS – сигналів та направлених антен. В роботах [4, 11, 12] розглянуто вплив корельованих завад на оцінку похибки синхронізації. В роботі [5] здобувачем проведено аналіз основних методів і алгоритмів високоточної частотно-часової синхронізації. В роботах [6, 18] здобувачем проведено оцінку невизначеностей вимірювань при звірненні еталонів часу та частоти радіотехнічними методами. В роботах [7, 15] здобувачем для порівняння методів і алгоритмів синхронізації розроблені єдині окремі і загальні критерії порівняння. При проведенні досліджень в роботі [8] для експериментальної оцінки стандартної невизначеності типу **A**, викликаною шумами, та апаратурною складовою стандартної невизначеності типу **B** у випадку використання для звірення сигналів системи SBAS проведено експеримент в режимі нульової бази. У патенті [9] здобувачем запропоновано варіант технічної реалізації способу частотного – часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу та частоти. В роботах [16, 17, 18] здобувачем розглянуті похибки вимірювання часового положення сигналів при використанні квадратурної обробки, а також проведено моделювання похибок звірення шкал часу та частоти при використанні квадратурної обробки обвідних сигналів спільного джерела.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 7 міжнародних науково-технічних конференціях і форумах: міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка.

Стан та перспективи розвитку » (МРФ-2011) (Харків, 2011); 8-й міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірвальна техніка (МЕТРОЛОГІЯ-2012)» (Харків, 2012); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»: (Запоріжжя, 2012); міжнародній Кримський конференції «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КриМіКо-2011, КриМіКо-2012); 11-й міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії», (TCSET'2012), (Львів-Славське, 2012); 15 і 16 Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Харків, 2011, 2012).

**Публікації.** За темою дисертації надруковано 7 статей у провідних наукових фахових виданнях України, стаття [1] видана англійською мовою в міжнародному журналі *Radioelectronics and Communications Systems*, який входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, опубліковано 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, отримано 1 патент України на корисну модель.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 109 найменувань, що займають в цілому 158 сторінок. В дисертації подано 102 ілюстрації ( з них 5 на окремих сторінках), 31 таблиця, список використаних джерел на 12 сторінках та додатки на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми та наукових задач; сформульовано мету дисертаційної роботи; відображено об'єкт, предмет, наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів роботи; відображено особистий внесок здобувача; наведено дані про реалізацію, апробацію та публікації результатів досліджень.

**У першому розділі** сформульовано задачу вимірювання зсуву шкал територіально рознесених еталонів часу та частоти, розглянуто джерела похибок при синхронізації. Цілий ряд джерел похибок є традиційним для більшості видів радіотехнічних систем. Це внутрішні шуми апаратури і завади каналу зв'язку, нестабільності апаратурних затримок, динаміка вимірюваної величини, невірогідність передачі інформації. Перераховані види похибок мають загальноприйняті назви: завадові (сигнальні або потенційні), апаратурні, динамічні. До специфічних джерел похибок можна віднести нестабільність сигналів еталонів, нестабільність і невзаємність затримки сигналів в каналі. Аналізуючи принципи побудови і джерела похибок методів синхронізації слід виділити алгоритми вимірювань зсуву шкал часу. Принципово відрізняючись від алгоритмів роботи в інших системах, алгоритми вимірювань зсувів шкал забезпечують облік або виключення часу затримки сигналів синхронізації в середовищі поширення.

Розглянуто основні методи синхронізації з урахуванням сучасного стану і перспектив частотно-часового забезпечення в Україні. Синхронізація часу та частоти в мережах зв'язку, в тому числі урядового і військового, в банківській сфері та ін.

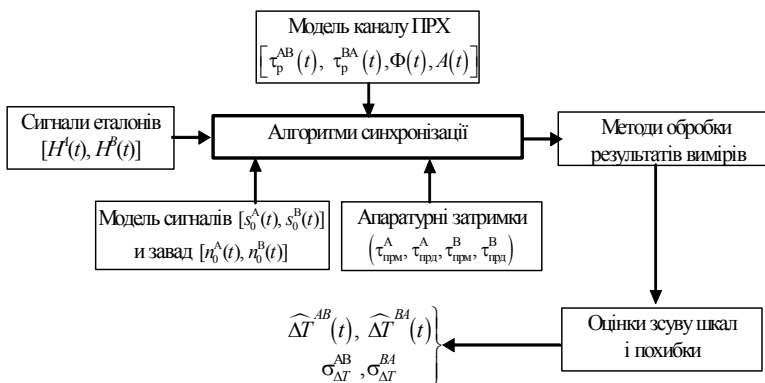
здійснюється від СРНС Росії та США. Проведено порівняльний аналіз відомих алгоритмів синхронізації. Це дало можливість виділити основні недоліки та переваги цих методів, що необхідно враховувати при розв'язанні конкретних задач синхронізації.

Україна не має своєї власної СРНС, а використання активних систем передбачає значні капіталовкладення для їх реалізації, вирішення задач електромагнітної сумісності, біологічної і екологічної безпеки та ін. Тому розробка альтернативних пасивних систем синхронізації часу та частоти територіально рознесених у просторі еталонів є актуальною та важливою задачею для України.

**Другий розділ** присвячено теоретичному аналізу існуючих алгоритмів синхронізації, розробці адекватної узагальненої моделі каналу синхронізації (УМКС) та критеріїв порівняння алгоритмів синхронізації [5, 18].

УМКС заснована на обліку всіх відомих джерел похибок: внутрішні шуми апаратури і перешкоди каналу зв'язку; нестабільність і невзаємність затримки сигналів в каналі поширення радіохвиль (ПРХ); нестабільність і невзаємність (для пристроїв, що беруть участь, як у випромінюванні, так і в прийомі сигналів) затримки сигналів в трактах апаратури; динаміка вимірюваної інформації; невірогідність передачі інформації; нестабільності сигналів еталонів і пристроїв прив'язки до цих сигналів. На підставі розглянутих в роботі джерел похибок запропонована УМКС, структура якої наведена на рис.1. УМКС включає алгоритми вимірювання зсуву шкал часу і обробки результатів, а також підмоделі каналу ПРХ, завод і апаратурних затримок.

На рис. 1 прийняті позначення:  $H^A(t)$ ,  $H^B(t)$  – аналітичне представлення шкал часу;  $\tau_p^{AB}(t)$ ,  $\tau_p^{BA}(t)$  – залежності затримок сигналів в каналі ПРХ з пункту А в пункт В і навпаки від часу;  $A(t)$  – зміна затухання в каналі ПРХ;  $\Phi(t)$  – функція включення каналу;  $\widehat{\Delta T}^{AB}(t)$ ,  $\widehat{\Delta T}^{BA}(t)$ ,  $\sigma_{\Delta T}^{AB}$ ,  $\sigma_{\Delta T}^{BA}$  – миттєві оцінки зсувів шкал і середньо квадра-



тичних похибок в пунктах А і В відповідно;

$s_0^A(t)$ ,  $s_0^B(t)$ ,  $n_0^A(t)$ ,  $n_0^B(t)$  – відповідно випромінювані сигнали і завади в пунктах;  $\tau_{прм}^A$ ,  $\tau_{прд}^A$ ,  $\tau_{прм}^B$ ,  $\tau_{прд}^B$  – затримки сигналів в приймальних і передавальних трактах апаратури відповідних пунктів.

Рис. 1. Структура УМКС

Для оцінки реальної точності синхронізації в УМКС доцільно включити моделі пристроїв (формування, випромінювання, прийому і обробки сигналів), що визначають систематичні похибки вимірювань.



Основні алгоритми синхронізації, з точки зору наявності випромінювання сигналів в пунктах, можна розділити на три види:

1) ОА, в якому для синхронізації двох пунктів сигнали випромінюються лише з одного пункту (рис. 2);

2) група активних алгоритмів, при реалізації яких мають місце випромінювання сигналів в кожному з пунктів (рис. 3);

3) АЗО, заснований на прийомі в пунктах сигналу спільного джерела (СД) (рис. 4);

Комплексний аналіз алгоритмів для загального випадку (непостійності затримок сигналів в каналі ПРХ і в апаратурі, а також наявність завад) дозволяє розробити критерії порівняння алгоритмів, а також синтезувати комбіновані, модифіковані і нові алгоритми. Найбільшу увагу приділено АЗО, основною перевагою якого є відсутність випромінювання в пунктах, що синхронізуються, та забезпечує скритність, електромагнітну сумісність, економічність, а також екологічну та інформаційну безпеку. До переваг АЗО також можна віднести можливість використання для вимірювання зсуву шкал сигналів спільних джерел з не повністю відомими параметрами.

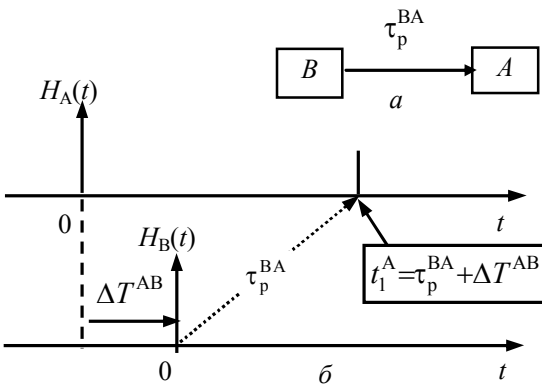


Рис. 2. Структурна схема та часова діаграма ОА

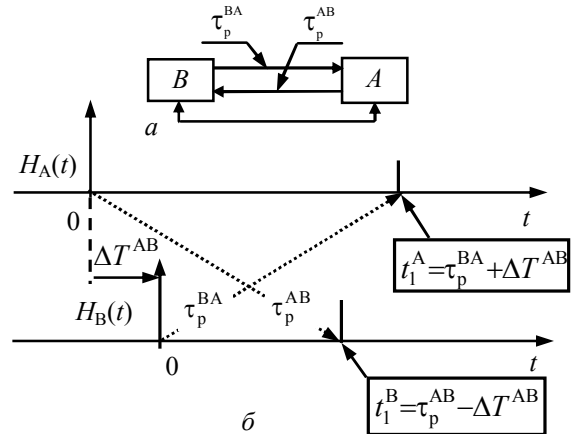


Рис. 3. Структурна схема та часова діаграма активного алгоритму

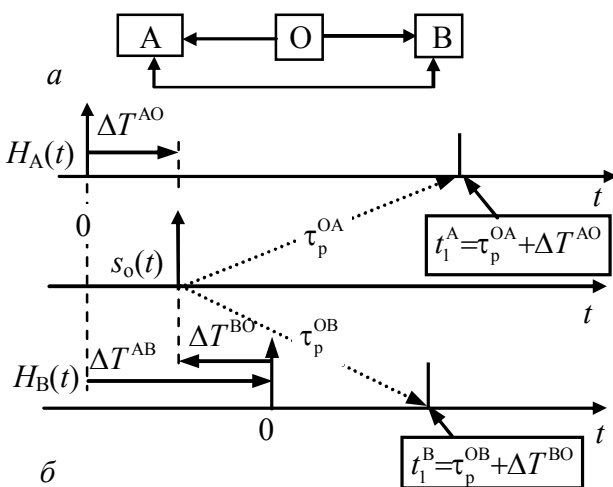


Рис. 4. Структурна схема (а) і часова діаграма (б) АЗО

У АЗО використовується додаткове СД, сигнали якого приймаються в пунктах, що зв'язуються. На рис. 4 введені нові позначення:  $s_0(t)$  – сигнал СД;  $t_1^B$  – визначене часове положення сигналу в пункті В;  $\tau_p^{OA}$ ,  $\tau_p^{OB}$  – затримка сигналу в каналі ПРХ від СД до пунктів А і В відповідно;  $\Delta T^{AO}$ ,  $\Delta T^{BO}$  – зсуви шкал пунктів А і В відносно уявної шкали СД;  $\tau_{прд}^O$  – затримка сигналу в передавачі СД;  $\delta_i^B$  – абсолютне значення завадової похибки вимірювання часового положення сигналу в пункті В.

Рівняння для визначення дійсного значення і оцінки зсуву шкал для АЗО мають вигляд:

$$\Delta T^{AB} = (t_1^A - t_1^B) - (\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}) - (\tau_{\text{прм}}^A + \tau_{\text{прм}}^B) - (\delta_t^A - \delta_t^B);$$

$$\widehat{\Delta T}^{AB} = (t_1^A - t_1^B) - (\widehat{\tau}_p^{OA} - \widehat{\tau}_p^{OB}) - (\widehat{\tau}_{\text{прм}}^A + \widehat{\tau}_{\text{прм}}^B). \quad (1)$$

Аналіз сумарної абсолютної похибки вимірювання і її складових, показало, що у випадку АЗО затримка  $\tau_{\text{прд}}^O$  і нестабільність сигналу  $s_0(t)$  не впливають на похибку синхронізації. Відмінною особливістю АЗО є можливість використання для визначення  $(t_1^A - t_1^B)$  не лише узгодженою фільтрації (УФ), але і взаємкореляційної обробки (ВКО).

АЗО реалізуються в СРНС ГЛОНАСС і GPS («common-view»), а також в РСДБ. У системах ГЛОНАСС і GPS додатковим джерелом є стандарт часу на борту супутника. У РСДБ роль додаткових джерел грають високостабільні сигнали космічного походження (пульсари, квазари). Перевагами АЗО є відсутність випромінювання в пунктах і вимог до стабільності сигналу СД, а недоліком – високі вимоги до оцінки різниці затримок  $(\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob})$ .

Сумарну похибку для АЗО можна записати у вигляді:

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{кан}) = [(\tau_p^{oa} - \widehat{\tau}_p^{oa}) - (\tau_p^{ob} - \widehat{\tau}_p^{ob})]; \quad (2)$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{ап}) = (\tau_{\text{прм}}^a - \widehat{\tau}_{\text{прм}}^a) - (\tau_{\text{прм}}^b - \widehat{\tau}_{\text{прм}}^b); \quad (3)$$

$$\delta_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = (\delta_t^a - \delta_t^b), \quad (4)$$

де  $\widehat{\tau}_p^{oa}$ ,  $\widehat{\tau}_p^{ob}$  – оцінки затримок в каналі ПРХ.

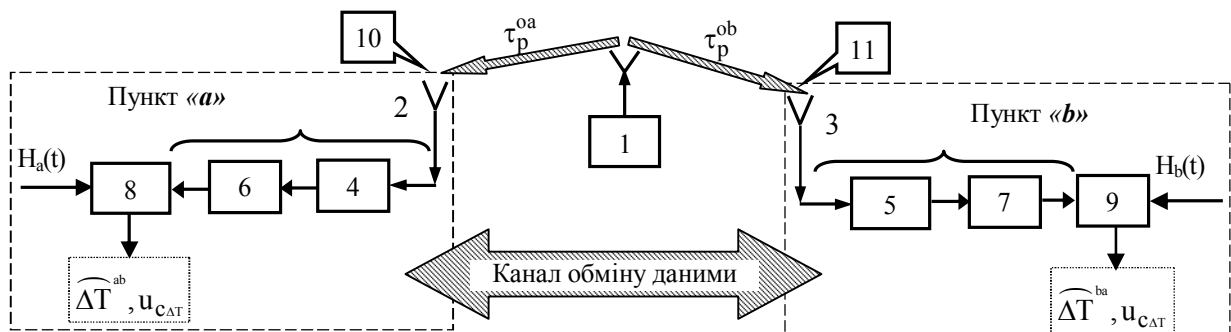


Рис. 5. Структурна схема системи звірення, що реалізує АЗО

Позначення: 1 – джерело спільного сигналу  $s_0(t)$ ; 2, 3 – антени; 4, 5 – приймальні пристрої; 6, 7 – пристрої оцінки часового положення сигналів; 8, 9 – пристрої, що реалізують алгоритм вимірювань і методи обробки результатів; 10, 11 – джерела завад.

Враховуючи випадковий характер і некорельованість завад в пунктах, можна оцінити СКВ:

$$\text{для ЗА} \rightarrow \sigma_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(\text{с/п}) = 0,5 \sqrt{(\sigma_t^a)^2 + (\sigma_t^b)^2}; \quad (5)$$

$$\text{для АЗО} \rightarrow \sigma_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(\text{с/п}) = \sqrt{(\sigma_t^a)^2 + (\sigma_t^b)^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_t^a, \sigma_t^b$  – СКВ оцінки часового положення (ОЧП) сигналів в пунктах.

Для порівняння алгоритмів і методів синхронізації пропонується використати критерії [7, 15]:

- 1) енергетичні показники;
- 2) необхідність обміну результатами вимірювань;
- 3) вимоги до параметрів каналу ПРХ;
- 4) можливості модифікації і синтезу комбінованих алгоритмів;
- 5) вимоги до параметрів сигналів і способів їх обробки;
- 6) методи обробки результатів вимірювань.

Ці критерії також можуть бути застосовані до методів і систем синхронізації, для яких доцільно ввести узагальнений показник якості і додаткові критерії порівняння:

- 1) оперативність, продуктивність - час одиничного вимірювання і період між одиничними вимірюваннями;
- 2) можливості вимірювання або компенсації апаратурних затримок;
- 3) експериментальні і модельні методи оцінки параметрів каналу ПРХ;
- 4) особливості технічної реалізації (параметри радіоканалу, сигналів і способів їх обробки; способи вимірювання або компенсації апаратурних затримок, канали обміну результатами вимірювань та ін.);
- 5) економічні показники.

Враховуючи сучасні вимоги до екології і електромагнітної сумісності радіотехнічних систем, істотно зросла роль енергетичних показників і до систем синхронізації. Активні алгоритми і АЗО неможливо порівняти за енергетичними показниками, оскільки останній не вимагає випромінювання сигналів пунктами, що синхронізуються. Відсутність власних випромінювань є дуже серйозною перевагою АЗО.

Разом з похибками, в роботі розглянуті невизначеності вимірювань зсуву шкал [6, 18].

Оскільки СКВ, спричинені завадовою похибкою, визначаються при статистичній обробці результатів вимірювань зсуву шкал, ця оцінка похибки відповідає стандартній невизначеності типу **A**.

$$u_{A/\Delta T}^{ab} = u_{A/\Delta T}^{ba}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ab}(\text{с/п}) = \sigma_{\Delta T}^{ba}(\text{с/п}).$$

Канальну і апаратурну похибку неможливо визначити шляхом статистичної обробки результатів вимірювань. Тому ці похибки формують невизначеність типу **B**.

Для оцінки стандартної каналної невизначеності  $u_B(\text{кан})$  застосовні моделі каналу ПРХ та інші незалежні канали калібрування, а для апаратурної

невизначеності  $u_B(\text{ап})$  - вимірювання («пілотування») апаратних затримок або проведення вимірювань в режимі «нульової бази».

У третьому розділі дисертаційної роботи на основі теоретичного аналізу удосконалено структуру узагальненої моделі системи синхронізації та досліджено її складові [1, 2, 13, 14].

Узагальнена модель складається з ряду підмоделей (шкал еталонів, сигналу загального джерела, каналу ПРХ, шуму і завад, нестабільності апаратних затримок), які з застосуванням основних алгоритмів (вимірювання зсуву шкал часу, обробки сигналів та результатів вимірювань) дозволяють імітувати результати вимірювання зсуву шкал. Узагальнена модель дозволяє вирішувати задачі: співставлення потенційних і реальних похибок синхронізації для існуючих систем; досягнення максимальної точності у створюваних системах за рахунок вибору основних технічних рішень; оцінки нових технічних рішень і принципів побудови апаратури. Проведено декомпозицію узагальненої моделі та моделювання її основних складових. Модель для врахування випадкових похибок синхронізації пасивної системи синхронізації на основі АЗО розроблена на базі пакету Matlab. При моделюванні можливо використовувати сигнал довільної форми та адитивні шуми. Модель складається з трьох основних блоків: блок генерації сигналів і шумів, блок УФ та блок ВКО.

У першому блоці генерується один загальний сигнал, який приймається в пунктах  $A$  і  $B$  із заданою затримкою та рівнем, і адитивні завади довільного виду. На виході першого блоку отримуємо набір сигналів та шумів:  $s_{A,j}(t), s_{B,j}(t), n_{A,j}(t), n_{B,j}(t), s_0(t)$ . Після додавання шуму і спільного сигналу реалізується УФ або ВКО суміші сигналів і шумів, а також оцінюються часові положення (у разі УФ – у кожному пункті, у разі ВКО – за ВКФ).

Отримані в результаті моделювання залежності відносної СКП  $\sigma_{\Delta T}^{AB} \omega_{\text{эф}}$  ( $\omega_{\text{эф}}$  – ефективна частота сигналу) для випадків УФ і ВКО наведено на рис. 6.

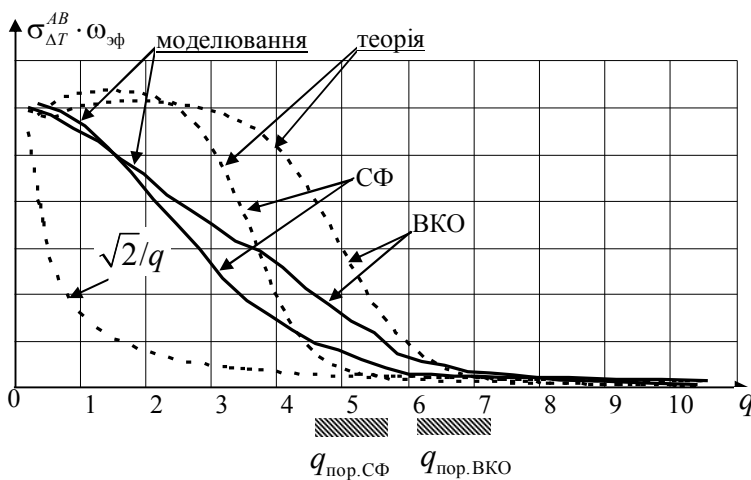


Рис.6. Залежність відносного СКП  $\sigma_{\Delta T} \omega_{\text{эф}}(q_A, q_B)$  для випадків УФ і ВКО

Застосування моделі дозволяє для заданого сигналу, виду шуму і числа елементів розрізнення  $M = T_c \omega_{\text{эф}}$  ( $T_c$  – інтервал спостереження) робити кількісні оцінки для співвідношень сигнал/шум, що гарантують нормальні виміри. Це дає можливість оцінити межі застосування ВКО для сигналів з не повністю відомими параметрами. Розроблену модель можна використовувати і для інших алгоритмів синхронізації.

Моделювання показало, що при певних значеннях  $q_{\text{пор}}$  мають місце, так звані, порогові ефекти. У випадку  $q < q_{\text{пор}}$  похибки різко зростають і стають аномальними. Для УФ порогові ефекти з'являється при менших значеннях  $q_{\text{пор}}$ , ніж при ВКО (рис.6), –  $q_{\text{пор.СФ}} < q_{\text{пор.ВКО}}$ .

У разі корельованих завад, викликаних багатопроменевістю каналу, крім моделювання проведено теоретичні дослідження впливу цих завад на похибку оцінки часового положення сигналів по обвідній і фазі їх когерентної носійної частоти. Отримано аналітичні та модельні оцінки похибок, а також проведено порівняння з похибками для адитивного нормального шуму [4, 11, 12].

Також в роботі оцінюється можливість застосування квадратурної обробки сигналів (КОС) в пасивних системах синхронізації для випадку вимірювання часового положення (ВЧП) сигналів за обвідними [16, 17, 19]. Для цього розроблено модель, що складається з ряду блоків. Останні дозволяють імітувати, як КОС для випадку ВЧП сигналів по обвідним, так і застосування двох варіантів КОС в даних системах - УФ сигналів в кожному з пунктів і ВКО сигналів, що приймаються в пунктах. У роботі наводяться принципи побудови моделі і результати моделювання.

Модель, розроблена в пакеті Mathcad 14, складається з блоків, які відповідають основним етапам обробки сигналів в пасивних системах синхронізації і наведені на рис. 7, рис.8. Ідентичними для блоків "КОС+УФ" і "КОС+ВКО" є: лінії, що імітують затримки в каналі ПРХ,  $\tau_p^{oa}$ ,  $\tau_p^{ob}$ ; генератори завад  $p^a(t)$ ,  $p^b(t)$ ; атенюатори АТ і суматори "+", які формують адитивну суміш затриманого спільного сигналу і завад  $s_1^a(t)$ ,  $s_1^b(t)$ ; елементи пристроїв КОС - перемножувачі « $\times$ » і фазообертачі на  $\pi/2$ ; формувачі обвідних  $S_{or}^a(t) = |s_{\cos}^a(t) + js_{\sin}^a(t)|$ ,  $S_{or}^b(t) = |s_{\cos}^b(t) + js_{\sin}^b(t)|$ ; ВЧП сигналів; алгоритми статистичної обробки результатів вимірювань.

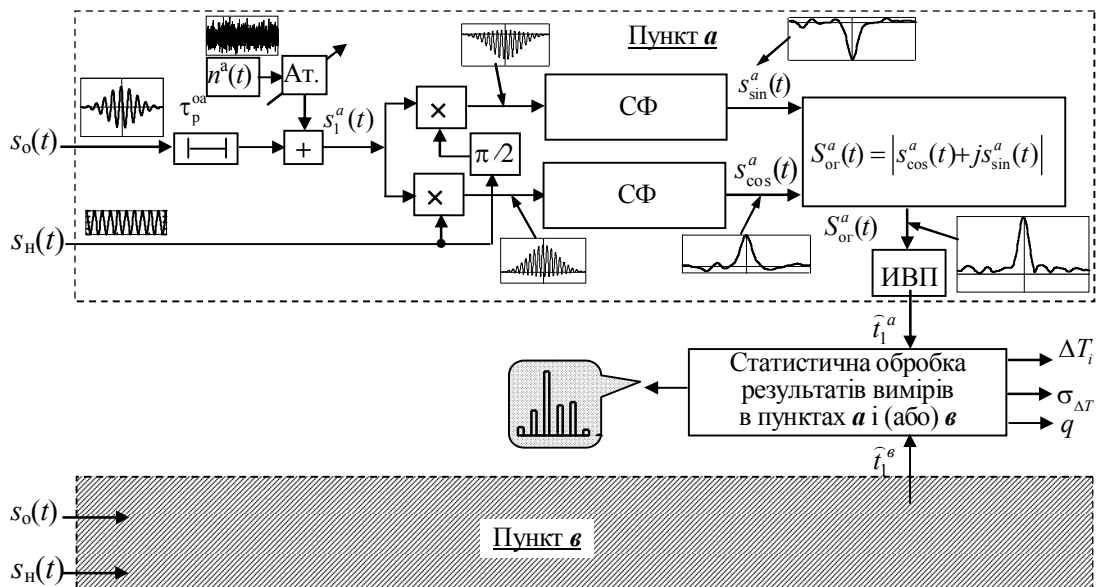


Рис. 7. Структура блоку моделювання «КОС+УФ»

Блоки "КОС+УФ" і "КОС+ВКО" відрізняються пристроями обробки в квадратурних каналах. У блоці "КОС+УФ" це УФ, а у блоці "КОС+ВКО" - фільтри нижніх частот для фільтрації сигналів подвійної частоти  $2\omega_0$ . Блок "КОС+ВКО" відрізняється також наявністю пристрою для ВКО неоптимально оброблених обвідних сигналів в пунктах  $S_{or}^a(t)$ ,  $S_{or}^e(t)$ .

Результатами моделювання пасивної системи синхронізації для випадків "КОС+УФ" і "КОС+ВКО" є середні значення зсувів шкал  $\overline{\Delta T}$  і СКВ вимірювань  $\sigma_{\Delta T}$ , а також гістограми, що дозволяють перевірити гіпотези про закони розподілу. Оскільки нелінійність КОС призводить до більшого відношення сигнал/шум на виході, ніж у разі УФ, для аналізу використовуються значення  $q_{CF}$  за результатами моделювання УФ обвідною.

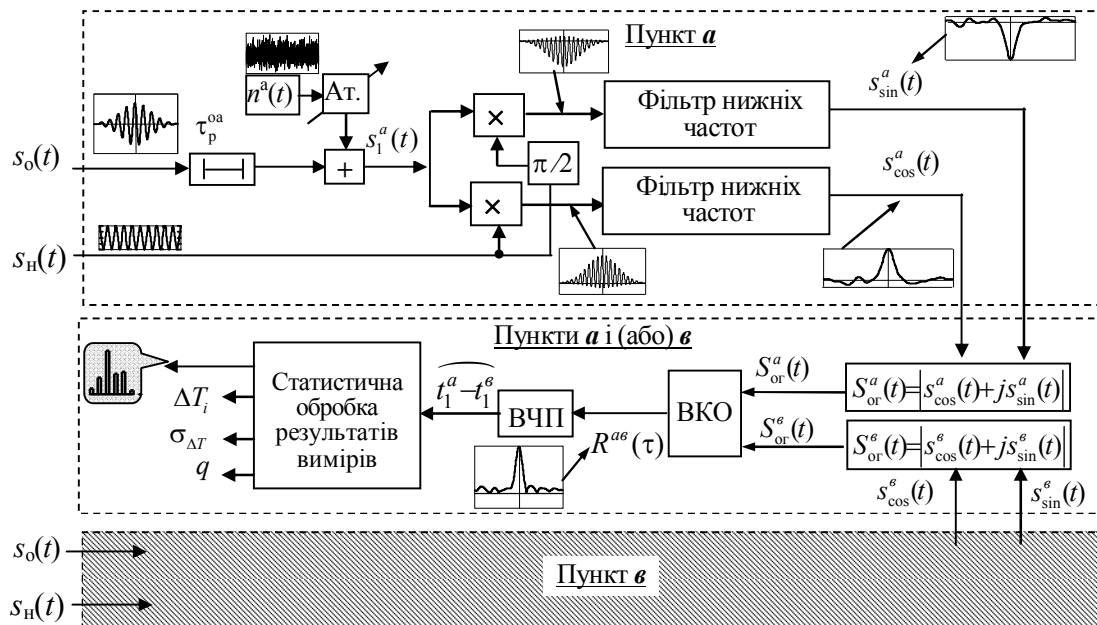


Рис. 8. Структура блоку моделювання «КОС+ВКО»

Моделювання підтвердило наявність порогових ефектів, які проявляються в різкому збільшенні СКВ вимірювання зсуву шкал  $\sigma_{\Delta T}$  при зменшенні відношення сигнал/шум нижче деякого порогового значення  $q_{пор}$  (рис.9). Хоча порогові ефекти теоретично обґрунтовані для ВЧП сигналів після УФ, проте модельні значення  $q_{пор}$  для пасивних систем синхронізації у разі КОС ( $q_{пор}/\langle\text{КОС+СФ}\rangle$  і  $q_{пор}/\langle\text{КОС+ВКО}\rangle$  рис. 9) приблизно на 3 дБ перевищують теоретичні значення.

При  $q < q_{пор}$  залежності  $\sigma_t \Delta \omega_{\text{эф}}(q)$  для КОС істотно відрізняються від теоретичних. У разі  $q > q_{пор}$  точність вимірювання зсуву шкал в АЗО для двох випадків КОС і УФ практично співпадає. Представляє інтерес розвиток моделі для випадків фазових вимірювань, корельованих мультиплікативних завад, викликаних зміною коефіцієнта затухання і багатоприменевістю в каналі ПРХ.

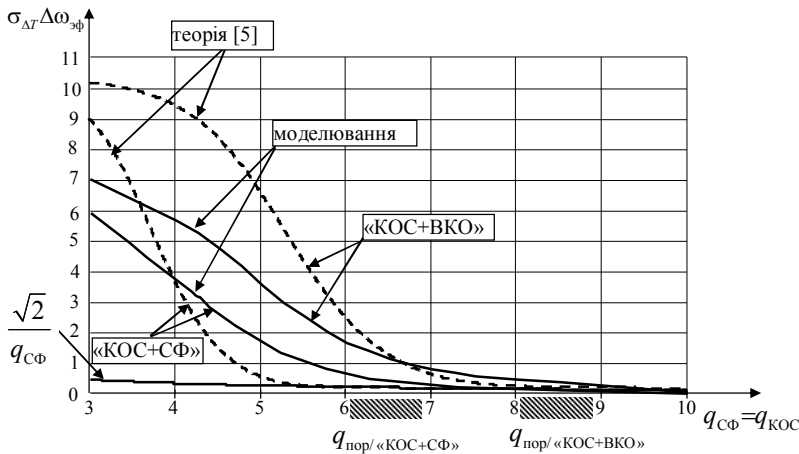


Рис. 9. Залежності СКВ вимірювання зсуву шкал в пасивних системах синхронізації від співвідношення сигнал/завада

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи присвячено питанням практичної реалізації АЗО з використанням сигналів системи SBAS [3, 8, 9].

Для експериментальної оцінки стандартної невизначеності типу А, яка викликана шумами, і апаратурною складовою стандартної невизначеності типу В у разі використання для звірення сигналів системи SBAS проведений експеримент в режимі нульової бази. Схема вимірювального стенду зображена на рис. 10, позначені:

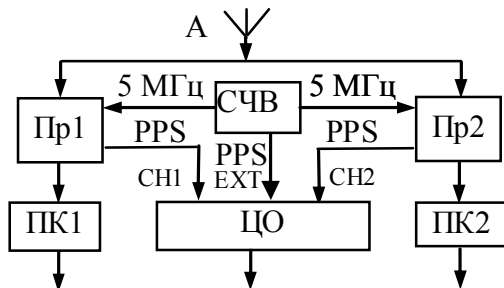


Рис. 10. Структурна схема вимірювального стенду

СЧЧ - стандарт частоти і часу; Пр1, Пр2 - приймачі NOVATEL OEM628, що мають режим зовнішньої синхронізації; ПК1, ПК2 - персональні комп'ютери; А - антено-фідерний тракт з антенним дільником, ЦО - двоканальний цифровий осцилограф. Для прийому сигналів використовується загальний тракт антенного фідера. Використання загального опорного генератора (СЧЧ) дозволяє виключити похибку, викликану нестабільністю генератора.

При включенні приймачів формуються шкали часу в кожному пункті. При цьому кожна секунду формується часова мітка - імпульс PPS. Зведення шкал приймача може проводитися двома способами - з використанням системи GPS, шляхом рішення навігаційної задачі, і виміром розбіжностей PPS приймачів відносно часової мітки PPS, яка формується стандартом частоти. У цьому експерименті для визначення розбіжностей шкал часу приймачів використовується другий спосіб.

На вхід двоканального осцилографа подаються сигнали PPS з приймачів Пр1 і Пр2, при цьому синхронізація осцилографа здійснюється від PPS СЧЧ. Визначена розбіжність шкал вводиться як розбіжність шкали приймача відносно шкали стандарту  $\Delta t_{np}$ . На рис. 11 приведена осцилограма не зведених шкал, на рис. 12 шкали зведені за допомогою системи GPS.

За умови перевищення відношення сигнал/шум відповідних порогових значень КОС може бути використана в пасивних системах синхронізації для вимірювань зсуву шкал за обвідними спільних сигналів у випадках "КОС+УФ" і "КОС+ВКО".

Перевагою КОС у разі "КОС+ВКО" є істотно менший об'єм інформації, якою обмінюються пункти.

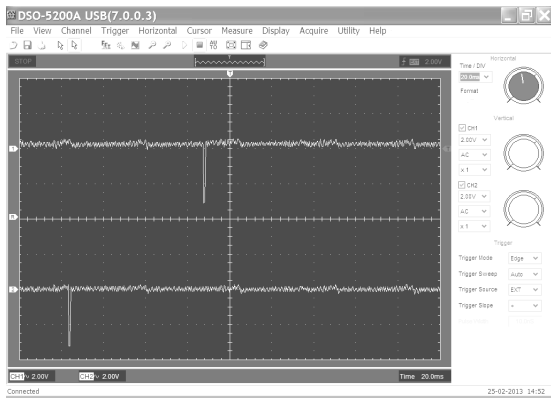


Рис. 11. Осцилограма не зведених шкал часу

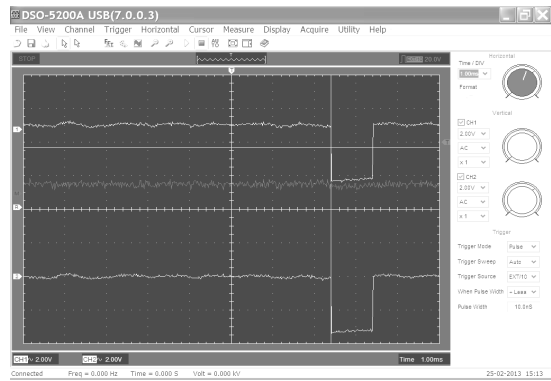


Рис. 12. Осцилограма зведених шкал часу

Після зведення шкал відключаються усі канали, в яких приймаються сигнали середньоорбітальних навігаційних супутників. Якщо цього не зробити шкала приймача постійно синхронізуватиметься з шкалою GPS. Виміри робилися кожну секунду і записувалися у форматі RINEX. Записувалися наступні дані: номер супутника, що приймався; псевдовідстань по кодових і фазових вимірах; доплеревський зсув частоти; рівень сигнал/шум. Після вимірювань дані конвертуються і формуються масиви даних для обробки в пакеті MATLAB. Вимірювання проводилися в ХНУРЭ для геостаціонарних супутників системи SBAS PRN S120 на 172 GPS добу. На рис. 13 приведені гістограми різниць псевдовідстаней за кодovими і фазовими вимірами.

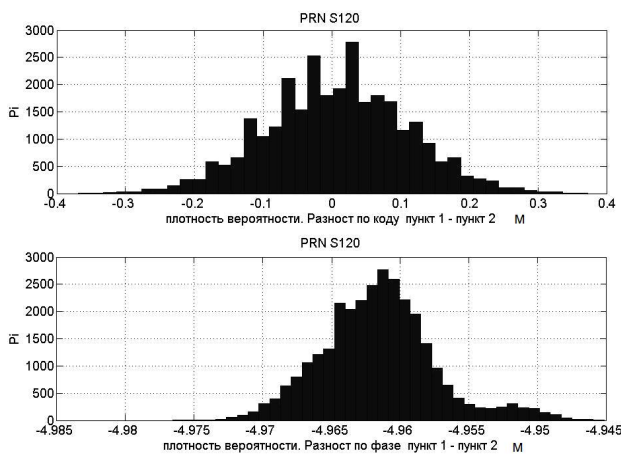


Рис. 13. Гістограми різниць псевдовідстаней

Результати статистичної обробки вимірювань наведені в табл. 1.

Для обліку впливу шумів антен прийом сигналів здійснювався за допомогою різних антенно-фідерних трактів рис.14. При цьому використовувалися штатні антени, що мають кругову діаграму спрямованості. Результати вимірювань різниць псевдовідстаней надані у виді гістограми на рис. 15. У табл. 2 представлені результати вимірювань.

Таблиця 1

### Результати статистичної обробки даних

Вид вимірювань	Середнє значення апаратурної невизначеності типу <b>B</b>		Оцінка $u_{A/\Delta T}$	
	М	с	М	с
Фазові	-4.9	$-1.6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Кодові	$7 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-11}$	0.1	$3.4 \cdot 10^{-10}$



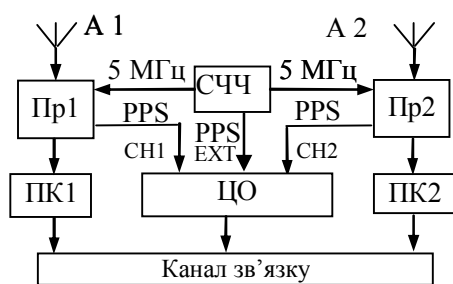


Рис. 14. Структурна схема вимірювального стенду з різними антено-фідерними трактами

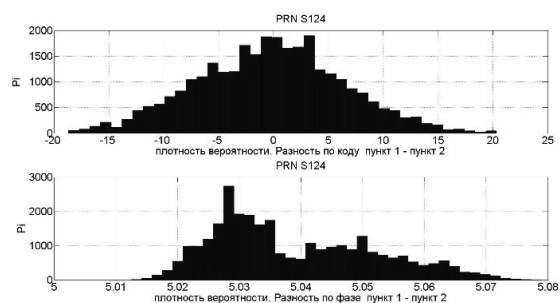


Рис. 15. Гістограма за результатами вимірювань різниці псевдовідстаней

У третьому випадку використовувалися спрямовані спіральні антени. Це дозволило збільшити рівень сигналу на вході приймального тракту і зменшити вплив багатопроменевості. У табл. 3 зведені результати статистичної обробки.

Результати експерименту із застосуванням сигналів системи SBAS в режимі нульової бази показали, що потенційна невизначеність типу А  $u_{A/\Delta T}$  по фазових вимірах складає  $1.4 \cdot 10^{-11}$  с, а по кодових вимірах -  $3.4 \cdot 10^{-10}$  с. Такі малі значення  $u_{A/\Delta T}$  пояснюються використанням режиму «нульової бази», в якому відсутні каналні похибки та похибки, спричинені «нутаціями» ГС ШСЗ.

Таблиця 2

#### Результати статистичної обробки

Вид вимірювань	Середнє значення апаратурної невизначеності типу <b>B</b>		Оцінка $u_{A/\Delta T}$	
	м	с	м	с
Фазові	4	$-1.34 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-11}$
Кодові	-1.29	$-4.3 \cdot 10^{-9}$	2.3	$8 \cdot 10^{-9}$

Таблиця 3

#### Результати статистичної обробки

Вид вимірювань	Середнє значення апаратурної невизначеності типу <b>B</b>		Оцінка $u_{A/\Delta T}$	
	м	с	м	с
Фазові	2.3	$7.9 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-11}$
Кодові	0.5	$1.8 \cdot 10^{-9}$	1.4	$4 \cdot 10^{-9}$

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що полягає в удосконаленні пасивних методів вимірювань зсуву шкал часу в радіотехнічних системах синхронізації за рахунок застосування оновленого пасивного методу на основі алгоритму загального охоплення з використанням сигналів спільного джерела космічного базування. Це дало можливість отримати потенційне значення похибки синхронізації шкал часу в одиниці наносекунд і при створенні пасивної системи синхронізації її характеристики мають бути в кілька разів кращими за ті, що забезпечують СРНС. Під час розв'язання поставленої задачі отримано такі наукові результати.

1. Удосконалено структуру узагальненої моделі каналу синхронізації, яка включає алгоритми вимірювання зсуву шкал часу, обробки результатів, а також підмоделі каналу поширення радіохвиль, завад і апаратних затримок.

2. На основі комплексного аналізу основних алгоритмів вимірювання зсуву шкал: пасивного (безпосередній, взаємний) і активних (зустрічний, ретрансляційний, опорно-ретрансляційний) виявлені шляхи (способи) удосконалення методів вимірювання зсуву шкал просторово рознесених еталонів (стандартів) часу та частоти;

3. Набула подальшого розвитку модель пристроїв обробки (УФ або ВКО) спільного сигналу, що приймається в пунктах разом із адитивними шумами і корельованими завадами. Модель дозволяє для довільного загального сигналу і різних співвідношень сигнал/шум і сигнал/корельована завада оцінити СКП вимірювання зсуву шкал часу пасивного алгоритму синхронізації.

4. Обґрунтовано застосування квадратурної обробки сигналів при використанні пасивного алгоритму в системах синхронізації у випадку вимірювання часового положення сигналів за їх обвідними. Розроблена модель, яка дозволяє імітувати два варіанти квадратурної обробки сигналів в даних системах синхронізації: узгоджену фільтрацію і взаємокореляційну обробку.

5. За допомогою експериментальних досліджень показано, що при застосуванні GPS-подібних сигналів системи функціонального доповнення SBAS в якості спільних джерел при реалізації пасивного алгоритму потенційні значення СКП становлять близько одиниць наносекунд при кодових вимірюваннях і менше наносекунд при фазових вимірюваннях.

6. Показано шляхом експериментальних досліджень при реалізації алгоритму загального охоплення в режимі «нульової бази» з використанням GPS приймачів, які синхронізовані між собою, що потенційна невизначеність типу А при фазових вимірюваннях складає десятки пікосекунд ( $1.4 \cdot 10^{-11}$  с), а при кодових вимірюваннях менше наносекунд ( $3.4 \cdot 10^{-10}$  с).

7. Запропонований спосіб синхронізації часу і частоти на основі взаємокореляційної обробки прийнятих в пунктах сигналів спільного наземного або космічного джерела (захищений патентом).

Результати дисертаційної роботи реалізовано в НДР ХНУРЕ і ННЦ «Інститут метрології», а також впроваджено в навчальний процес в курс «Радіонавігаційні мережі та системи синхронізації», що підтверджується відповідними актами.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ал–Твежри Б.А. Моделирование систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников / Ю.А. Коваль, Е.А.Иванова, А.А. Костыря, Б.А. Ал – Твежри // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – №. 2. С. 12-21.
2. Al-Tvejri B. 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. Allerton Press, Inc. – Vol. 54. – No. 2, 2011. ISSN 0735-2727 pp. 68-76.
3. Ал – Твежри Б.А. Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря, , А.Ф. Хусейн, Х.Х.Асаад //Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2011.– №. 165. – С. 46-55.
4. Ал – Твежри Б.А. Влияние коррелированных помех в многолучевых каналах на погрешность оценки временного положения сигналов/ Ю.А. Коваль, Е.А.Иванова, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, В.Ю. Приймак, А.Ф. Хусейн //Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2011. – №. 3/12 (51). – С. 51-60.
5. Ал-Твежри Б.А. Методы и алгоритмы высокоточной частотно-временной синхронизации / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хусейн // Зв'язок. – 2012, №1. – С. 42-59.
6. Ал-Твежри Б.А. Оценивание неопределенности измерений при сличениях эталонов времени и частоты радиотехническими методами / Ю.А.Коваль, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, В.Ю. Приймак //Системи обробки інформації. – Харків.: ХУПС, 2012. – Вип. 21 (99). С. 30–33.
7. Ал-Твежри Б.А. Критерии сравнения радиотехнических методов и алгоритмов синхронизации разнесенных эталонов времени и частоты / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, Б.А. Ал-Твежри //Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2012. Вып. №. 169. С. 37 – 47.
8. Ал-Твежри Б.А. Анализ и экспериментальные оценки неопределенности измерений сдвига шкал времени с применением сигналов системы SBAS/ Ю.А.Коваль, В.Ю. Приймак, С.А. Плехно, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хусейн // Системи обробки інформації. – 2013. – №. 3 (110). – С. 107-111.
9. Спосіб частотного – часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу та частоти: пат. 77652 Україна, МПК. / Ю.О.Коваль, Б.А.Ал-Твежри, О.О. Костиря, С.О. Плехно; заявник та патентовласник Харк. націон. ун-т. радіелектроніки; опубл. 25.02.13, Бюл. №4.
10. Ал-Твежри Б.А. Стенд для оценки качества синхронизации с применением GPS-сигналов и направленных антенн / В. Ю. Приймак, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хуссейн //Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 15-й междунар. молодежный форум, 18-20 апреля 2011 г.: тезисы докл. ЧЗ. – X.; 2011. – С. 177–178.
11. Ал-Твежри Б.А. Разработка принципов построения фазовой системы сличения мер времени и частоты / С.А. Плехно, Б.А. Ал-Твежри, Х.Х. Асаад //Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 15-й междунар. молодежный форум, 18-20 апреля 2011 г.: тезисы докл. ЧЗ. – X.; 2011. – С. 221–222.

12. Ал-Твежри Б.А. Влияние канальных и аппаратурных коррелированных помех на погрешность частотно-временной синхронизации / Ю.А. Коваль, Е.А.Иванова, В.Ю. Приймак, Б.А. Ал-Твежри // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспектива развития» (МРФ-2011): междунар. радиоэлектр. форум, 19-22 окт. 2011 г.: тезисы докл. – Т1, Ч2, С. 89-90.

13. Ал-Твежри Б.А. Модель канала частотно-временной синхронизации / Ю.А. Коваль., В.В. Обельченко, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри, А.Ф. Хуссейн// "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011): 21-а Кримська міжнар. наук. – техн. конф., 12-16 вер. 2011 р. тези доп., Т1, - Крим, Севастополь, 2011. – С. 425 – 427.

14. Al-Tvejri B.A. Model of the channel time-frequency synchronization / J.A. Koval, V.V. Obelchenko, A.A. Kostyrja, B.A. Al-Tvejri, A.F. Hussein // IEEE Catalog Number: CFP11788-PRT; ISBN: 978-1-4577-0883-1. V.1, P. 425-427.

15. Basim Al-Tvezhri Criteria for comparison of synchronization algorithms spaced measures time and frequency/ Yuriy Koval, Alexander Kostyrya, Viacheslav Pryimak, Basim Al-Tvezhri // Proceedings of the XI<sup>th</sup> International Conference TCSET'2012 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science", Lviv-Slavske, Ukraine February 21-24, 2012. –P. 117.

16. Ал-Твежри Б.А. Погрешности измерения временного положения сигналов при квадратурной обработке / А.И. Рубанович, Б. А. Ал-Твежри //Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 16-й междунар. молодежный форум, 17-19 апреля 2012 г.: тезисы докл. Т. 3. – X.; 2012. – С. 144–145.

17. Ал-Твежри Б.А. Моделирование погрешностей сравнения мер времени при использовании квадратурной обработки огибающих общих сигналов / Ю.А.Коваль, Е.А. Иванова, Б.А. Ал-Твежри // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2012): міжнар. наук. – техн. конф., 12-14 жовт. 2012 р.: тези доп., Т1, - X., 2010. – С. 115-118.

18. Ал-Твежри Б.А. Оценивание погрешностей и неопределенностей измерений в системах синхронизации / Ю. А. Коваль, А.А. Костыря, В. Ю. Приймак, Б. А. Ал-Твежри // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012): міжнар. наук. – техн. конф., 10-14 вер. 2012 р. тези доп., Т1, - Крим, Севастополь, 2012. – С. 332-333.

19. Ал-Твежри Б.А. Моделирование пассивных систем синхронизации, использующих квадратурную обработку огибающих сигналов / Ю.А. Коваль, А.А.Костыря, В. Ю. Приймак, Б. А. Ал-Твежри // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VI міжнар. наук.-практ. конф. 19 - 21 вересня 2012 р. тези. доп.– Запоріжжя: ЗНТУ, 2012 – С. 71 - 72.

## АНОТАЦІЯ

**Басем Абдулла Мохаммед Ал-Твежрі Удосконалення методів вимірювань зсуву шкал в радіотехнічних системах синхронізації часу та частоти – Рукопис.**

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

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що

полягає в удосконаленні методів вимірювань зсуву шкал часу в радіотехнічних системах синхронізації за рахунок застосування оновленого пасивного методу на основі алгоритму загального охоплення з використанням сигналів спільного джерела космічного базування. Це дало можливість отримати потенційне значення похибки синхронізації шкал часу в одиниці наносекунд і при створенні пасивної системи синхронізації її характеристики мають бути в кілька разів кращими за ті, що забезпечують СРНС.

Для синхронізації віддалених пунктів запатентований спосіб синхронізації часу та частоти на основі взаємкореляційної обробки прийнятих у пунктах сигналів спільного наземного або космічного джерела.

Отримала подальший розвиток модель пристроїв обробки (УФ або ВКО) спільного сигналу, що приймається в пунктах разом з адитивними шумами та корельованими завадами. Модель дозволяє для довільного спільного сигналу і різних співвідношень сигнал/шум і сигнал/корельована завада оцінити СКП виміру зсуву шкал часу пасивного алгоритму синхронізації.

Проведено теоретичні дослідження та моделювання впливу нормальних адитивних шумів і корельованих завад, викликаних багатопроменевістю каналу ПРХ, на похибку оцінки часового положення по обвідній та фазі когерентної носійної прийнятих сигналів.

Виконано експериментальні дослідження, пов'язані з практичною реалізацією пасивного алгоритму, де як спільне джерело використані GPS-сигнали системи SBAS.

**Ключові слова:** алгоритми синхронізації, алгоритм загального охоплення, шкала часу, радіотехнічні системи, синхронізація, похибка.

## АННОТАЦИЯ

**Басем Абдулла Мохаммед Ал–Твежри Усовершенствование методов измерений сдвига шкал в радиотехнических системах синхронизации времени и частоты.** – Рукопись.

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

В диссертационной работе решена актуальную научно-прикладную задачу, которая заключается в усовершенствовании методов измерений сдвига шкал времени в радиотехнических системах синхронизации за счет применения обновленного пассивного метода на основе алгоритма общего охвата с использованием сигналов общего источника космического базирования. Это позволило получить потенциальное значение погрешности синхронизации шкал времени на уровне единиц наносекунд и при создании пассивной системы синхронизации ее характеристики должны быть в несколько раз лучшими за те, что обеспечивают СРНС.

В работе рассмотрены основные методы синхронизации с учетом современного состояния и перспектив частотно-временного обеспечения, сформулирована задача измерения сдвига шкал территориально разнесенных эталонов времени в общем случае и в случае использования алгоритма общего охвата (АОО). Проведен сравнительный анализ алгоритмов синхронизации. Наибольшее внимание уделено АОО. Основным преимуществом данного алгоритма является отсутствие излучения в пунктах, которое

обеспечивает скрытность, электромагнитную совместимость, экологическую и информационную безопасность. К преимуществам АОО можно отнести возможность использования для измерения сдвига шкал ВКО сигналов, которые принимаются в пунктах.

В работе приобрела дальнейшее развитие модель устройств обработки (СФ или ВКО) общего сигнала, который принимается в пунктах вместе с аддитивными шумами и коррелированными помехами. Модель позволяет для произвольного общего сигнала и разных соотношений сигнал/шум и сигнал/коррелированная помеха оценить СКП измерение сдвига шкал времени пассивного алгоритма синхронизации.

Обосновано применение квадратурной обработки сигналов при использовании пассивного алгоритма в системах синхронизации в случае измерения временного положения сигналов по их огибающим. Разработана модель, которая позволяет имитировать два варианта квадратурной обработки сигналов в данных системах синхронизации: согласованную фильтрацию и взаимокорреляционную обработку.

В ходе экспериментальных исследований показано, что при применении GPS-подобных сигналов системы функционального дополнения SBAS в качестве общих источников при реализации пассивного алгоритма потенциальные значения СКП составляют единицы наносекунд при кодовых измерениях и меньше наносекунды при фазовых измерениях.

Путем экспериментальных исследований показано, что при реализации алгоритма общего охвата в режиме «нулевой базы» с использованием GPS приемников, которые синхронизированы между собой и принимают сигналы SBAS, потенциальная неопределенность типа А при фазовых измерениях составляет десятки пикосекунд ( $1.4 \cdot 10^{-11}$  с), а при кодовых измерениях меньше наносекунды ( $3.4 \cdot 10^{-10}$  с). В условиях наличия канальных погрешностей и погрешностей, вызванных "нutationами" ГС ИСЗ, эта неопределенность существенно возрастет.

**Ключевые слова:** алгоритмы синхронизации, алгоритм общего охвата, шкала времени, радиотехнические системы, синхронизация, погрешность.

## ABSTRACT

**Basem Abdullah Mohammed Al-Twejri Development of methods of measuring scales offset in the radiotechnical systems of synchronization of time and frequency.** – The manuscript. An engineering sciences Ph. doctorate dissertation on specialty 05.12.17 – radio engineering and television systems. The Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, 2013.

Now, when Ukraine in branch of synchronization of standards of time and frequency, completely depends on foreign navigating systems, as alternative methods of synchronization of time and frequency realization of system on the basis of passive algorithm of the common-view(ACV) with use of new kinds of signals and their processings can act. Dissertation is directed on the analysis of possibilities of use ACV for realization of systems of synchronization of time and frequency.

In dissertation the problem of measurement of shift of scales of territorially carried standards of time and frequency generally and in case of common view (CV) is formulated. The basic existing methods of synchronization with the account of a current

state and prospects are considered is frequency – time maintenance in Ukraine. The comparative analysis of algorithms of synchronization is carried out.

Theoretical researches and modeling of influence of the correlated hindrances caused multipath of channel are conducted in work, on an error of an estimation of time position on bending around and a phase coherent bearing accepted signals.

The experimental researches related to practical realization of passive algorithm are executed, where as a general source GPS- is used GPS-signals of the differential systems of SBAS.

**Keywords:** algorithms of synchronization, algorithm overall coverage, time scale, radar systems, radiotechnical systems, error.

Підп. до друку 21.10.13. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим.  
Зам. № 2-912. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

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