

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

БОНДАР Євгенія Юріївна

УДК 621.371.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ШКАЛ ЧАСУ ТА ЧА-
СТОТИ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ЇХ ПОХИБКИ В УМОВАХ ТРОПО-
СФЕРНОГО РАДІОКАНАЛУ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук,
Антіпов Іван Євгенійович
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
професор кафедри основ радіотехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Єрмаков Геннадій Валентинович
Харківський університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба,
начальник кафедри озброєння військ ППО;

кандидат технічних наук,
Широков Ігор Борисович
Севастопольський національний технічний
університет,
доцент кафедри радіотехніки та телекомунікацій.

Захист відбудеться "___" _____ 2010 р. о ____ годині 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 у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розіслано "___" _____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ д-р техн. наук Безрук В. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Високоточна синхронізація територіально рознесених шкал часу та частоти необхідна для рішення багатьох наукових і практичних задач. Вона використовується для задач метрології часу та частоти, супутникової навігації, цифрових систем зв'язку, а також для радіоастрономічних і космічних досліджень, зокрема для визначення параметрів орбіт об'єктів космічного сміття.

За допомогою радіотехнічних систем можуть бути реалізовані різні алгоритми синхронізації: активні (зустрічний, ретрансляційний, опорно-ретрансляційний), напівактивний (однобічний) і пасивний (загального охоплення). Найбільш економічним і задовольняючим вимогам ЕМС є напівактивний і пасивний алгоритми. Для багатьох названих вище завдань вони можуть бути реалізовані за допомогою телевізійних та інших радіотехнічних систем, що працюють у межах прямої видимості. Проте серйозним недоліком напівактивного та пасивного алгоритмів (на відміну від активного) є те, що час поширення сигналу між пунктами, що синхронізуються, і його нестабільністю прямо впливають на похибку синхронізації. Причини нестабільності зумовлені тим, що умови поширення радіохвиль (ПРХ) в атмосфері не можна вважати еквівалентними ПРХ у вакуумі. Якщо мова йде про наносекундний зсув між синхронізованими еталонами (відносна нестабільність яких становить $10^{-13} \dots 10^{-14}$, а в перспективі – $10^{-15} \dots 10^{-16}$), то необхідно враховувати внесок середовища поширення в результуючу похибку синхронізації. Вона виникає через просторово-часову неоднорідність діелектричної проникності тропосфери. Додатковий внесок у похибку синхронізації може вносити багатопроменевість.

Як правило, у більшості відомих моделей ПРХ вся увага приділяється рівню сигналу в точці приймання. В інтересах супутникових навігаційних систем розроблені моделі врахування тропосферної складової затримки (зокрема, модель Хопфілда, Саастмойнена та ін.), але вони застосовні тільки для малих зенітних кутів. У стандарті IEEE 802.16а модель ПРХ, не враховує поточний стан тропосфери і її зміни. Врахування тропосферної затримки і її змін при ПРХ уздовж поверхні Землі у відомих моделях не здійснено.

Тому є актуальною тема дисетаційних досліджень, які направлені на вирішення актуальної науково-прикладної задачі вдосконалення методів синхронізації шкал часу та частоти шляхом врахування тропосферної складової похибки часу поширення для тропосферного радіоканалу, у тому числі, багатопроменевого.

Дане завдання може бути вирішена шляхом розробки та експериментальної перевірки моделі тропосферного поширення радіохвиль, що дозволить урахувати часові затримки, викликані тропосферою та зміною її стану.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Актуальність теми дисертаційної роботи підтверджується її зв'язком із планови-

ми науково-дослідними роботами, проведеними в науково-учбовому центрі кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ). Це – держбюджетні НДР «Розробка апаратно-програмного комплексу прецизійної синхронізації шкал часу і частоти» (номер держреєстрації ДР 0106U011032), «Частотно-часова синхронізація приймально-виносного комплексу зі станцією РТ-70 для підвищення якості спостереження низькоорбітального космічного сміття» (номер держреєстрації ДР 0107U010622) і «Вимірювання і аналіз ехо-сигналів метеорологічних локаційних систем для виявлення причин потепління клімату» (номер держреєстрації ДР 0110U000459), які виконувалися відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України, а також НДР «Спостереження низькоорбітального космічного «сміття» макетом приймального комплексу» (номер держреєстрації ДР 0103U007155), яка виконувалась за контрактом із НКАУ. У цих НДР дисертант була виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є зменшення похибки синхронізації шляхом врахування тропосферної складової похибки та варіацій часу поширення сигналу в тропосфері при зміні метеопараметрів для досліджуваної траси, а також в умовах багатопроменевості.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- розробка аналітичної моделі тропосферного ПРХ, що враховує вплив параметрів тропосфери та градієнта коефіцієнта заломлення на зміну часу поширення, у тому числі і у багатопроменовому каналі для досліджуваної траси;
- чисельне моделювання часу поширення сигналів у тропосфері за допомогою розробленої аналітичної моделі;
- доведення вірогідності розробленої моделі шляхом чисельних і натурних експериментів.

Об'єктом дослідження є процес синхронізації шкал часу та частоти з використанням тропосферного радіоканалу.

Предметом дослідження є методи та моделі оцінки складової похибки синхронізації, обумовлені змінними параметрами тропосфери, які приводять до зміни траєкторії та швидкості поширення радіохвиль, а також багатопроменевістю; способи врахування і зниження цих складових похибки.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач застосовувалися методи теорії поширення радіохвиль, чисельного моделювання на ПЕОМ, математичної статистики, планування експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Запропоновано нову математичну модель для розрахунку часу поширення радіохвиль у тропосфері, що враховує впливи її параметрів на досліджувану трасу.
2. Уперше запропоновано методику визначення часу поширення сигналів у

тропосфері, яка базується на вимірюванні затримки між двома сигналами від загального джерела, що пройшли різні шляхи в тропосфері, у тому числі, по радіорелейних лініях.

3. Уперше теоретично обґрунтовано та експериментально виявлено взаємозв'язок між часом поширення і рівнем сигналу на напівзакритій трасі.

4. Уперше визначені варіації тропосферної складової похибки часу поширення для досліджуваної траси за результатами обробки архівних даних про стан тропосфери протягом декількох десятиків років.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено методику формування бази даних часових затримок, зумовлених тропосферою, для будь-якої траси на підставі архівних метеорологічних даних.

2. Сформовано нову базу даних варіацій часових затримок, зумовлених змінними параметрами тропосфери для досліджуваної траси, що може бути використано при розробці систем синхронізації.

3. Експериментально підтверджено достовірність розробленої моделі, що дозволяє рекомендувати її для прогнозування часових затримок, зумовлених тропосферою.

4. Запропоновано методику обробки результатів вимірювань часу поширення в умовах, коли середньоквадратичне відхилення одиничного вимірювання порівняне з вимірюваною величиною.

Результати дисертаційної роботи запроваджені у НДР, а також в навчальний процес при підготовці курсу «Спеціальні радіовиміри» та при виконанні дипломної магістерської роботи на кафедрі основ радіотехніки ХНУРЕ, що підтверджується відповідними актами впровадження.

Обґрунтованість та достовірність результатів дисертації зумовлена коректним використанням відомих методів ПРХ у теоретичних дослідженнях і позитивному результаті порівняння даних натурних експериментів і розрахунків, отриманих за запропонованою моделлю.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно одержав основні результати дисертаційної роботи. У роботах, виконаних у співавторстві, авторові належать наступні результати. У патенті [1] здобувачем запропоновано пристрій для компенсації часової нестабільності, що виникає при запуску генератора ультракоротких імпульсів, яка робить внесок в результуючу похибку синхронізації. В [2] здобувачем обґрунтовано вибір надширокосмугового сигналу як оптимального для боротьби із багатопроменевістю в задачах високоточної синхронізації шкал часу та частоти. При дослідженні параметрів антенних систем для каналу прямої видимості в задачах синхронізації в [3] здобувачем виконано числове моделювання імпульсної характеристики антеною системи. Здобувач, аналізуючи час поширення метрових хвиль у приземному шарі атмосфери в [4] розробила модель тропосферного ПРХ, що враховує зміну швидкості поширення сигналу на досліджуваній трасі. При аналізі можли-

востей методу загального охоплення [5] здобувачем було виконано числове моделювання з дослідження кореляційних властивостей телевізійного сигналу та обґрунтування його вибору для системи високоточної синхронізації. В [6] здобувач досліджувала вплив багатопроементності на оцінку часу поширення метрових і дециметрових радіохвиль для задач високоточної синхронізації часу та частоти. В [7] здобувач розробила програмне забезпечення для автоматизації роботи комплексу вимірювань часу ПРХ і оцінки потенційної точності синхронізації стандартів часу та частоти при використанні вимірювального телевізійного сигналу.

Апробація результатів дисертації. Наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: 10-у ювілейному міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті» (Харків, 2006) [10]; 5-ій міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія і вимірювальна техніка (МЕТРОЛОГІЯ-2006)» (Харків, 2006) [13]; 11-у міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті» (Харків, 2007) [14]; 13-у міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті» (Харків, 2009) [21].

Публікації. Усього здобувачем за темою дисертації опубліковано 25 друкованих праць, з них: 6 у спеціалізованих виданнях, затверджених ВАК України, і 18 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, також отримано 1 патент України на пристрій.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел (106 найменувань). Основний зміст дисертації викладено на 138 сторінках, є 52 рисунок і 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Визначено наукову новизну роботи і її практичне значення. Наведено дані про особистий внесок автора в роботах, виконаних в співавторстві, апробацію результатів дисертації та відомості про публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** зроблено аналіз сучасного стану систем синхронізації та поставлено задачі дисертаційної роботи.

У першому підрозділі розглянуті області застосування та актуальність задач синхронізації шкал часу та частоти, основні поняття, терміни і визначення. Проаналізовано вимоги до точності синхронізації, представлено узагальнену структурну схему системи синхронізації часу та частоти, показано переваги і недоліки основних алгоритмів синхронізації: активних (А), пасивного (П), напівактивного (ПА).

У другому підрозділі розглянуто вимоги до відносних похибок синхронізації для різних практичних задач. Так, для синхронізації годин супутникових навігаційних систем вона становить до $10^{-13} \dots 10^{-14}$; для опорних генераторів у цифрових системах зв'язку не гірше 10^{-9} . Для задач спостереження за космічним сміттям вимоги до похибки синхронізації основного і виносного пунктів становлять 10^{-11} за добу.

У третьому підрозділі представлено огляд методів і засобів синхронізації часу та частоти. Розглянуто метод перевезених квантових годинників, метод, що використовує супутникові канали зв'язку, радіометеорний і телевізійний методи синхронізації. Відзначається, що супутникові методи мають хорошу точність, але в Україні немає власних супутникових систем зв'язку або навігації (також як і перевезених квантових годин), а використання закордонних супутникових систем не завжди бажано. Радіометерний метод потребує великої потужності випромінювання в обох синхронізованих пунктах, крім того, апаратура метеорної синхронізації досить дорога.

Основну увагу у четвертому підрозділі приділено похибкам названих методів. Проаналізовано як похибки одиничних вимірювань ($\sigma_{\text{од нс}}$), так і результуючі похибки (з урахуванням періодичності вимірювань ($\sigma_{\text{рез}}$). Результати аналізу представлені в таблиці 1. Варто вказати, що похибка, зумовлена невідомістю тропосферної затримки, не усувається усередненням результатів, принаймні, на невеликих інтервалах спостережень.

Таблиця 1. Порівняння методів синхронізації

Метод / Алгоритм *		Періодичність	Похибка		Основні причини похибки
			$\sigma_{\text{од нс}}$	$\sigma_{\text{рез}}$	
Перевезений квантовий годинник / П		Декілька діб	1...10	-	Велика періодичність вимірів
Супутники зв'язку / П		~ с	1...100	$1 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-7}$	Невідомість тропосферної та іоносферної затримок, багатопроменевість, нутації супутників
GPS, ГЛОНАС	Безпосередній / П	~ с	100... ...1000	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-6}$	
	Диференціальний / ПА	~ година	20...50	$2 \cdot 10^{-5} \dots 8 \cdot 10^{-5}$	
Радіометеорний / А		~ хв.	10...30	$6 \cdot 10^{-8} \dots 2 \cdot 10^{-7}$	Фазова нестабільність
Телевізійний / П, ПА		~ мс	100... ...1000	$1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-9}$	Невідомість тропосферної затримки, багатопроменевість

* Пасивний – П, активний, – А, напівактивний – ПА

Представлений в 1 розділі аналіз дозволив зробити наступні висновки.

1. Високоточна синхронізація шкал часу та частоти є актуальною науковою задачею, причому вимоги до похибки синхронізації постійно підвищуються.

2. Існуючі супутникові зв'язні і навігаційні системи не є власністю України і тому вони не можуть розглядатися як єдині при вирішенні задач, пов'язаних з державною безпекою.

3. Системи синхронізації, які базуються на активних алгоритмах, досить дороги і складні як при побудові, так і при експлуатації.

4. Телевізійний та інші пасивні і напівактивні методи синхронізації в межах прямої видимості можуть забезпечити прийнятну результуючу похибку, особливо якщо буде врахована тропосферна затримка.

Тому для зниження похибки цих алгоритмів при роботі в межах прямої видимості необхідно вирішити наступні задачі: розробити модель ПРХ, що буде враховувати затримку в тропосфері, у тому числі й у багатопроменовому каналі, експериментально підтвердити її адекватність і на підставі моделювання виробити методики і рекомендації із синхронізації в межах прямої видимості.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу і моделюванню поширення радіохвиль в атмосфері стосовно до пасивного та напівактивного алгоритмів синхронізації.

В основу розробленої моделі покладено класичну модель ПРХ у шаруватій сферичній тропосфері та підхід до аналізу ПРХ у тропосфері, який використовується в GPS. Її відмінності полягають в наступному:

- метою моделювання є не рівень сигналу, а його затримка;
- модель має можливість враховувати зміни параметрів тропосфери між пунктами, тобто в приземному шарі атмосфери;
- урахується подовження шляху обумовленого непостійністю коефіцієнту заломлення уздовж досліджуваної траси;
- береться до уваги можливість складання в пункті приймання двох і більше сигналів з різним рівнем і часом затримки.

Разом з тим, у моделі допускаються наступні спрощення і наближення:

- не враховується рельєф місцевості;
- передбачається, що параметри тропосфери між пунктами, для яких вони задані, змінюються за лінійним законом;
- не враховуються параметри підстилаючої поверхні і розсіювання від неї;
- не враховується розсіювання на неоднорідностях тропосфери.

Вхідними параметрами для моделювання є: геометричні параметри траси, параметри тропосфери (температура, тиск, вологість) у пунктах початку і кінця траси та (якщо можливо) у проміжних пунктах траси, а також закони розподілу амплітуд і часових затримок сигналів при багатопроменовому ПРХ. За відсутності даних про поточний стан тропосфери можуть бути використані статистичні дані для заданого місяця.

У першому підрозділі розглянуто фактори, які впливають на час ПРХ в атмосфері. Першим фактором є вплив коефіцієнта заломлення і його горизонтальної нерівномірності на час ПРХ. Розглянуто модель приземного шару атмосфери з точки зору його впливу на поширення радіохвиль. В основу моделі покладені відомі фізичні співвідношення, що описують поширення радіохвиль у середовищі, діелектрична проникність якої відмінна від одиниці. У цьому випадку час ПРХ не можна вважати рівним відстані поділеній на швидкість світла у вакуумі. Тому одним із джерел похибки визначення часу ПРХ у тропосфері є невідомість її параметрів - температури повітря T , атмосферного тиску p і змісту водяних парів (вологості) e , які будуть змінюватися уздовж траси поширення і, отже, зале-

жати від відстані між пунктами S . Пропонується відому формулу для розрахунку тропосферної затримки $t_{tropo}(p, T, e)$ видозмінити і врахувати залежність всіх метеорологічних параметрів від відстані:

$$t_{tropo}(p, T, e) = \frac{10^{-6} \int_S \left(77.64 \frac{p(S)}{T(S)} - 12.96 \frac{e(S)}{T(S)} + 3.718 \cdot 10^5 \frac{e(S)}{T^2(S)} \right) dS}{c}. \quad (1)$$

Другим фактором, який має вплив на похибку вимірювання часу поширення хвиль в тропосфері, є розподіл коефіцієнта заломлення за висотою, що може відрізнитися від нормального. Це призводить до викривлення і, відповідно, подовження шляху поширення на величину r , яка обчислюється у такий спосіб:

$$r = \frac{S^3}{24} \left(- \frac{dn}{dh} \right)^2, \quad (2)$$

де S – довжина траси, $\frac{dn}{dh}$ – градієнт коефіцієнта заломлення тропосфери.

Слід зазначити, що визначити зміну значення градієнта коефіцієнта заломлення можливо лише експериментальним шляхом. Вирішальним вплив зміни коефіцієнта заломлення з висотою виявляється для «закритих» трас. Крім того, необхідно відзначити, що градієнт коефіцієнта заломлення впливає також на рівень сигналу.

У другому підрозділі розглянуто багатопроменевість. Вона розглядається окремо від двох вищезазначених факторів, тому що, фактично, багатопроменевість впливає не на час ПРХ, а на умови приймання і на форму прийнятого сигналу. Можна виділити два механізми впливу багатопроменевості на оцінку часу поширення. По-перше, це зміна амплітуди прийнятого сигналу, викликана завмираннями, що супроводжуються відповідною зміною співвідношення сигнал/шум. Це призводить до зміни похибки визначення часового положення прийнятого сигналу. По-друге, додавання двох і більше затриманих на різний час сигналів призводить до спотворення форми результуючого прийнятого сигналу і до помилки визначення його часового положення. Ці два фактори можуть діяти одночасно. Строгий аналіз цих взаємозв'язків ускладнений, оскільки профіль затримок достовірно невідомий. У роботі зроблено припущення, що ці самі механізми впливають на рівень сигналу в місті приймання.

У стандарті IEEE 802.16а середній час поширення багатопроменевого сигналу $\bar{\tau}_p$ і похибка його вимірювання σ_τ визначаються за формулами:

$$\bar{\tau}_p = \sum_i P_i \tau_i, \quad (3)$$

$$\sigma_\tau^2 = \sum_i P_i \tau_i^2 - \bar{\tau}_p^2, \quad (4)$$

де P_i – відносна потужність, τ_i – затримка i -го променя.

Для врахування впливу відношення сигнал/шум в пункті приймання модель (3), (4) має бути доповнена врахуванням шумової складової похибки. Тоді оцінка визначення часу поширення складе

$$\hat{\sigma}_\tau = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\tau^2}, \quad (5)$$

де $\sigma_{ш}$ – складова похибки, зумовлена шумами, що визначається як

$$\sigma_{ш} = \frac{1}{q \cdot \Delta \omega_{эфф}}, \quad (6)$$

де $\Delta \omega_{эфф}$ – ефективна смуга частот сигналу, а q - параметр виявлення (власне кажучи, співвідношення сигнал/шум).

Із представлених виразів видно, що при додаванні двох (і більше) сигналів з різним рівнем і часом затримки, середня затримка $\bar{\tau}_p$ буде визначатися затримкою більш сильного з них (3). Відношення сигнал/шум (і, отже, q) також визначатиметься рівнем найбільш сильного сигналу. Звідси можна зробити висновки, що існує взаємозв'язок (нехай і неоднозначний) між параметром виявлення q , похибкою $\hat{\sigma}_\tau$ і самим часом затримки $\bar{\tau}_p$. Виявлення та аналіз цього взаємозв'язку дозволить уточнити профіль затримок.

У третьому підрозділі вищеописані закономірності логічно об'єднані та представлені у формі моделі, структура якої показана на рис. 1. Частина даних для моделювання вважається детермінованою і задається в числовому вигляді. Це параметри траси (довжина, висоти антен), метеорологічні параметри (тиск, температура, вологість і їх розподіл за довжиною траси). Інші параметри (розподіл амплітуд і часових затримок перевідбитих променів) вважаються випадковими та задаються у вигляді закону розподілу. Параметри законів розподілу можуть визначатися експериментально для траси, що аналізується, або задаватися, виходячи з рекомендацій протоколів і стандартів.

Блок обробки містить у собі розрахунки з уточнення параметрів законів розподілу на підставі взаємозв'язку рівня сигналу і часу поширення, що дозволить скорегувати часовий профіль затримок.

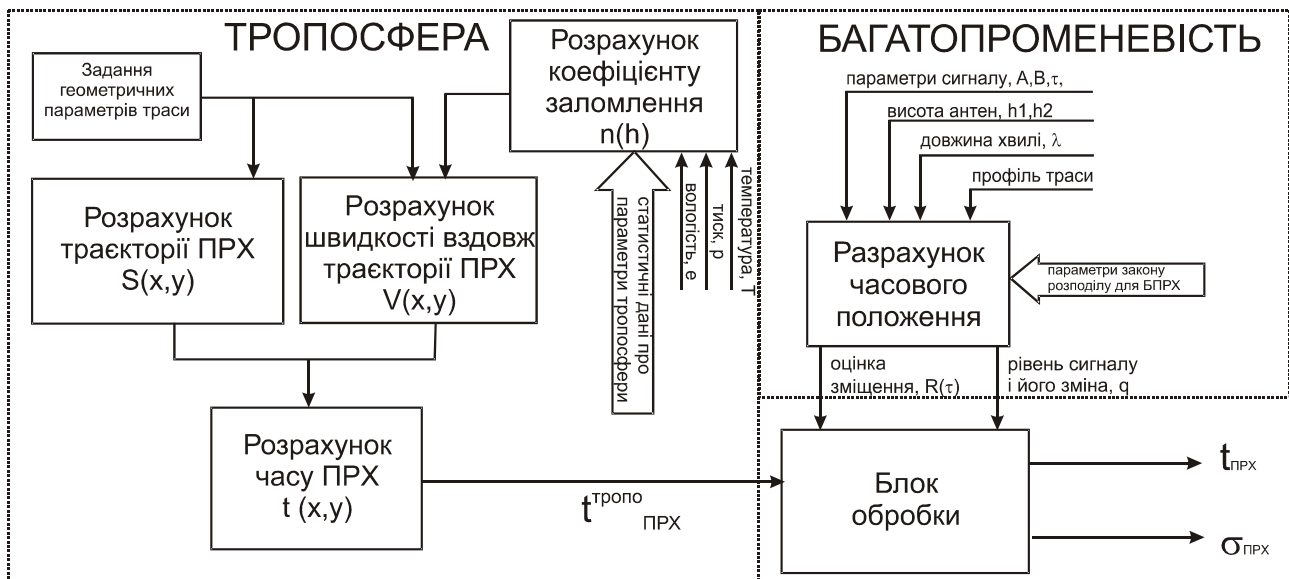


Рис. 1. Структура моделі

У четвертому підрозділі представлені результати моделювання для трас різної довжини. Для трас коротше 1 км впливом тропосфери можна знехтувати, оскільки варіації затримки при зміні метеопараметрів не перевищують 1 нс. Розрахунки, виконані з використанням моделі для трас завдовжки 85 км за 1952-2002 р.р., показали, що сезонні варіації часу ПРХ можуть досягати 30 ... 40 нс. Сформовано базу даних затримок за вказані роки. Результати за 2000 р. показані на рис. 2.

Аналіз впливу багатопроменевості показав, що для простих сигналів помилка у визначенні їхнього часового положення може досягати половини тривалості. Водночас, для сигналів з великою базою, зокрема, надширокосмугових (НШС) сигналів, вплив багатопроменевості практично виключається. У роботі розглянуті також елементи ТВ сигналу, що мають хороші кореляційні властивості: синхроімпульси, 18 і 21 рядки з вимірювальними сигналами, і 6 рядок з еталонним сигналом часу та частоти. На рис. 3 показана автокореляційна функція (АКФ) 21 вимірювального рядка ТВ сигналу.

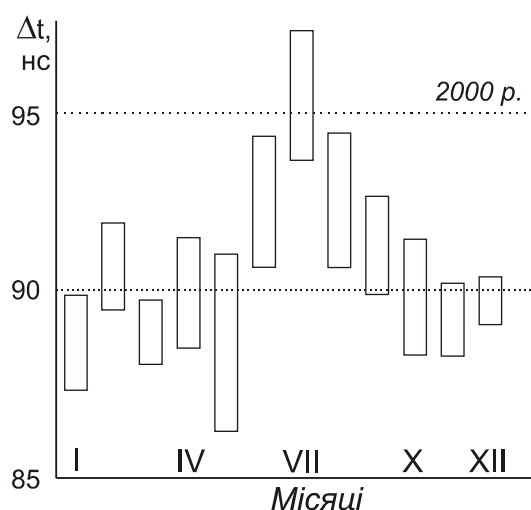


Рис. 2. Сезонні варіації тропосферної затримки для 2000 р.

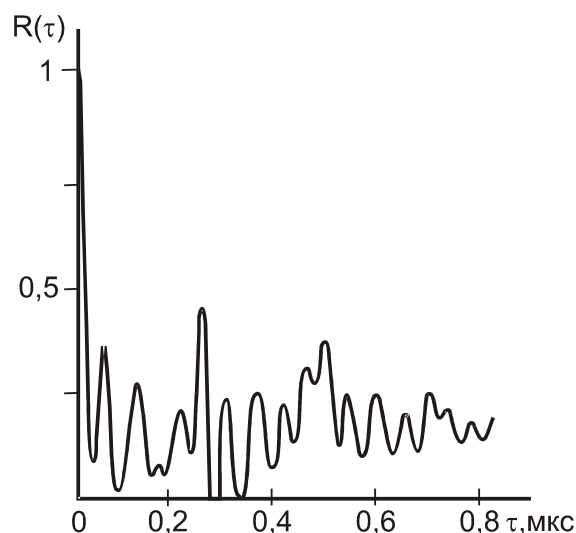


Рис. 3. АКФ 21 вимірювального рядка ТВ сигналу

Отже, у другому розділі проаналізовано фактори, які впливають на час ПРХ в тропосфері та розроблено модель тропосферного ПРХ, що враховує ці фактори. Розроблена модель дозволяє розрахувати час поширення сигналу вздовж досліджуваної трасі з урахуванням відомих параметрів тропосфери і оцінити зміщення, що вноситься багатопроменим ПРХ в оцінку часу поширення (часового положення сигналу). Оцінку невідомих параметрів моделі пропонується визначати за рівнем прийнятого сигналу під час вимірювань.

Третій розділ присвячений вибору засобів і методів експериментальної перевірки моделі, а також опису розробленої за участю автора експериментальної установки для вимірювання часу ПРХ в тропосфері.

У першому підрозділі розглянуті теоретично можливі активні і пасивні методи вимірювання часу ПРХ на трасі Харків-Балаклійський науково-дослідний полігон (БНДП). Як показано вище, очікувана нестабільність часу ПРХ, зумовлена тропосферою, становить кілька десятків наносекунд. Отже, похибка вимірювань повинна бути не гіршою. Таку похибку можна забезпечити, якщо: 1) обидва пункти обладнані високостабільними генераторами; 2) стабільність генераторів забезпечується їхньою взаємною синхронізацією методом, похибка якого істотно менше, ніж очікувана нестабільність часу поширення; 3) на досліджуваній трасі реалізовано локаційний режим. Розглянуті алгоритми зведені в таблицю 2. На жаль, їх практична реалізація виявилася неможливою через високу вартість та організаційні складності. Тому було вибрано пасивний алгоритм із загальним джерелом (варіант 4 в таблиці), і вперше для задач високоточної синхронізації було запропоновано методику, засновану на вимірюванні часу затримки між двома сигналами від загального джерела, які пройшли різні шляхи в тропосфері.

Таблиця 2. Алгоритми вимірювання часу ПРХ

№	Алгоритм	Етало-ни	Передавачі	Обмін інформацією
1	Активний з високостабільними еталонами	2	1	+
2	Активний з еталонами, що синхронізуються	2	1	+
3	Активний локаційний	-	1	-
4	Пасивний із загальним джерелом	-	-	+

«+» - потрібен, «-» - не потрібен

Як загальне джерело використовувався обласний телецентр (Харків), сигнал якого надходить в місце приймання як безпосередньо, так і через радіорелейну лінію і районний ретранслятор (Ізюм). На рис. 4 показано структурну схему, а на рис. 5 – розміщення передавального і приймального пункту, а також ланцюжок ретрансляторів на місцевості.

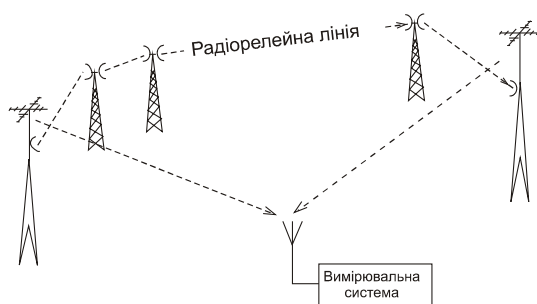


Рис. 4. Структурна схема експерименту

За опорний елемент для проведення вимірювань було обрано полінійний синхронізуючий імпульс (ПСІ) ТВ сигналу, що дозволило здійснювати близько 15000 вимірювань за секунду. За попередньою оцінкою СКВ похибки одиничного вимірювання в цьому випадку становить близько 200 ... 300 нс і виявити на цьому тлі зміни затримки в десятки-одиниці нс можна тільки усереднивши велику кількість одиничних вимірю-

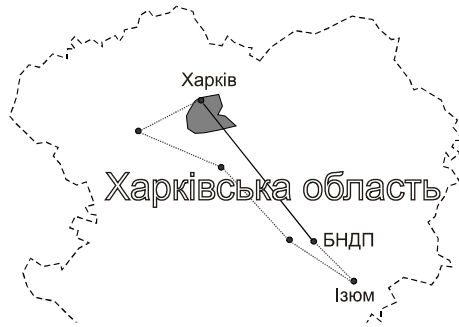


Рис. 5. Розміщення передавального і приймального пунктів

метрову ТВ антену, обладнану антенним підсилювачем. Антена була встановлена на щоглі заввишки 35 метрів, що забезпечувало впевнене приймання сигналів від обох телецентрів.

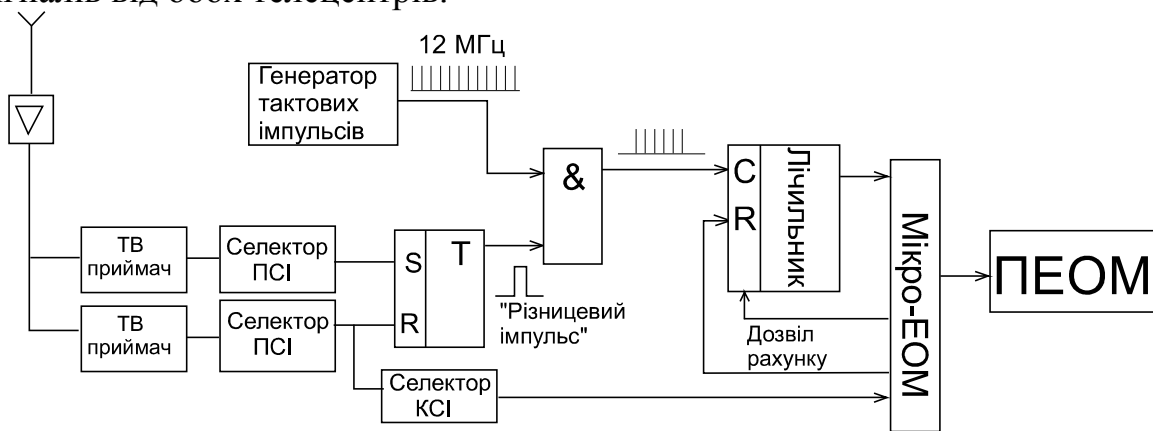


Рис. 6. Структурна схема експериментальної установки

Два ТВ приймача були налаштовані на частоти відповідних телеканалів, селектори ПСІ виділяли їхні синхросигнали. Кожен ПСІ першого (верхнього за схемою) телеканалу встановлює тригер, кожен ПСІ другого телеканалу скидає його. Внаслідок цього, на виході тригера формувався імпульс, який відповідав часу запізнювання одного сигналу щодо іншого, а на виході елемента «І» - необхідна кількість рахункових імпульсів, які відповідали цьому часу. Мікро-ЕОМ забезпечувала керування рахунком, виконувала усереднення результатів вимірювань по кожному полю ТВ сигналу (20 мс) і здійснювала передавання цих даних через USB-інтерфейс в ПЕОМ з частотою 50 вимірювань за секунду. Далі на жорсткому диску комп'ютера створювався файл хвилинних результатів вимірювань, що складається з 3000 одиничних вимірювань, які піддавалися вторинній обробці.

За 4 місяці було проведено понад 1000 годин вимірювань. Первинні результати, як і передбачалося, мали досить великий розкид. На рис. 7 представлена гістограма розподілу значень вимірювань протягом хвилини.

вань.

Для проведення вимірювань була розроблена і створена експериментальна вимірювальна система. Її структурна схема представлена на рис. 6. Приймання здійснювалося на деци-

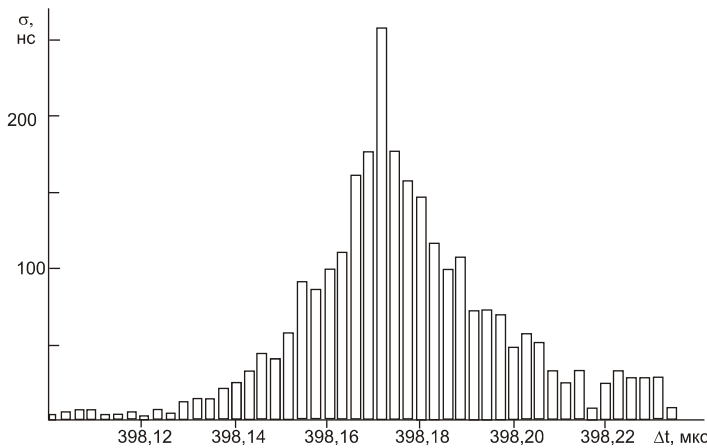


Рис. 7. Гістограма розподілу значень вимірювань протягом хвилини

Отже, на підставі аналізу способів експериментальної перевірки розробленої моделі запропоновано нову методику, що базується на використанні сигналу від загального джерела, який досягає точки приймання різними шляхами. Розроблено структурну схему вимірювальної системи для екс-

периментальної перевірки моделі та алгоритм її роботи. Вибрано трасу для провчення вимірювань. Вказану систему зібрано, налагоджено і встановлено в пункті проведення вимірювань.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи наводяться результати обробки експериментальних спостережень і зіставлення їх з результатами моделювання.

У першому підрозділі представлені алгоритми первинної обробки результатів вимірювань. Наводяться параметри віконних функцій, призначених для «відсіювання» випадкових викидів в результатах.

У другому підрозділі представлені алгоритми вторинної обробки, що включають процедури згладжування, в тому числі робастними алгоритмами.

Найбільший інтерес викликають самі отримані результати, які представлені у третьому розділі. По-перше, результати експерименту підтверджують модельні розрахунки. У 85% добових спостережень розбіжність між модельними і експериментальними даними не перевищує кількох наносекунд (відносна похибка $\sim 10^{-6}$). Це дозволяє стверджувати, що розроблена модель адекватно описує фізичний процес.

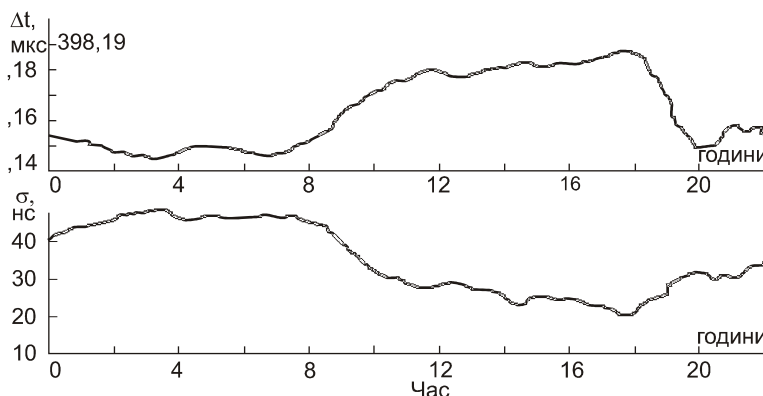


Рис.8. Добовий хід виміряної часової затримки

Як і передбачалося, при аналізі експериментальних даних виявлено закономірність, що підтверджує взаємозв'язок між часом поширення і похибкою одиничного вимірювання. На рис. 8 представлено добовий хід вимірюваної затримки і похибка одиничного вимірювання, а на рис. 9 – взаємозв'язок між ними.

Для спостережуваної зале-

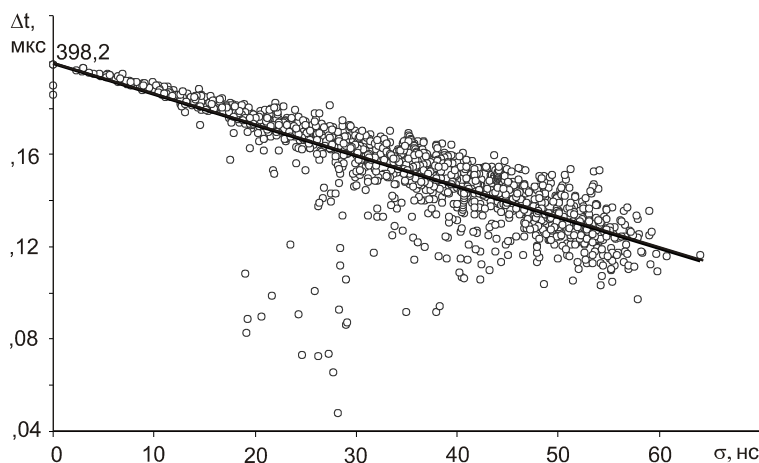


Рис. 9. Залежність СКВ одиничного вимірювання від часової затримки

жності можна скласти такий аналітичний вираз

$$\Delta t = 398,2 - 0,12\sigma, \quad (7)$$

що дозволить уточнювати значення затримки за рівнем сигналу. Для інших трас та інших умов залежність (7) може мати інший вигляд.

Отже, якщо синхронізація пасивним або напівактивним алгоритмами з використанням ТВ сигналу здійснюється без урахування стану тропосфери і багатопроменевості, то її похибка зростає з відстанню і для трас завдовжки 100 км може перевищувати 100 нс. Зроблені в роботі оцінки дозволяють стверджувати, що застосування запропонованої моделі та методики обробки з урахуванням рівня сигналу дасть змогу зменшити цю складову похибки (для тієї самої траси) до 20 нс.

ВИСНОВКИ

Дисертація є дослідженням, в якому отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі удосконалення методів синхронізації шкал часу і частоти з метою зниження їхньої похибки в умовах тропосферного радіоканалу, яке відрізняється від відомих рішень пошуком і урахуванням взаємозв'язку між часом поширення і рівнем сигналу в пункті приймання, а також урахуванням непостійності метеопараметрів для досліджуваної траси. Одержано наступні нові результати:

В області теорії:

1. Запропоновано нову математичну модель для розрахунку часу поширення радіохвиль у тропосфері, яка враховує вплив всіх параметрів тропосфери для досліджуваної траси. Вхідними даними для моделі є: геометричні параметри траси і параметри тропосфери.

2. Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено взаємозв'язок між часом поширення і рівнем сигналу.

3. Вперше запропоновано методику визначення часу поширення сигналів в тропосфері, засновану на вимірюванні затримки між двома сигналами від загального джерела, які пройшли різні шляхи в тропосфері, в тому числі по радіорелейних лініях. Дану методику можна застосовувати в будь-якій місцевості, де є радіорелейні лінії.

4. За результатами обробки архівних даних про стан тропосфери протягом декількох десятків років вперше визначено варіації тропосферної складової похибки часу поширення.

В області практичних розробок і експериментальних досліджень:

1. Розроблено методику формування бази даних часових затримок, зумовлених тропосферою, для будь-якої траси на підставі архівних метеорологічних даних.

2. Сформовано нову базу даних варіацій часових затримок, зумовлених змінними параметрами тропосфери для досліджуваної траси, яка показує, що сезонна варіація затримок становить 30 ... 40 нс, що може бути використано при розробці систем синхронізації.

3. Експериментально підтверджено вірогідність розробленої моделі, яка в 85% випадків визначає час ПРХ з похибкою менше кількох наносекунд, що дозволяє рекомендувати її для прогнозування часових затримок, зумовлених тропосферою.

4. Запропоновано методику обробки результатів вимірювань часу поширення в умовах, коли середньоквадратичне відхилення одиничного вимірювання порівняне з вимірюваною величиною.

Результати дисертаційної роботи запроваджені у НДР, а також в навчальний процес при підготовці курсу «Спеціальні радіовимірювання» та при виконанні дипломної магістерської роботи на кафедрі основ радіотехніки ХНУ-РЕ, що підтверджується відповідними актами впровадження.

Одним з напрямків подальших досліджень може стати вдосконалення моделі з врахуванням в ній рельєфу місцевості, а також розвиток моделі для всіх пунктів України та країн СНД, обладнаних радіорелейними лініями з метою високоточної синхронізації. Запропонована методика може знайти застосування і для вирішення зворотної задачі – визначення параметрів нижнього шару атмосфери за виміряними затримками.

Іншим напрямом може бути розвиток теорії НШС сигналів для цих цілей. Як показали попередні дослідження на невеликих відстанях, НШС сигнали дозволяють забезпечити субнаносекундну похибку синхронізації.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пристрій для синхронізації/звіряння шкал частоти/часу рознесених у просторі зберігачів : пат. 34493 України: G04G 11/00 / Є.Ю. Бондар, Г.В. Нестеренко; заявник і патентовласник Харків, нац. ун-т радіоелектроніки. – заявл. 27.03.08 ; опубл. 11.08.08 , Бюл. № 15.

2. Бондарь Е. Ю. Сверхширокополосный сигнал и канал прямой видимости в задачах высокоточного сличения шкал времени / Е. Ю. Бондарь, Г. В. Нестеренко // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2008. – Вып. 152. – С. 78 – 83.

3. Бондарь Е. Ю. Исследование и оптимизация параметров антенных систем для сверхширокополосного канала прямой видимости в задачах

сличения/синхронизации шкал времени / Е. Ю. Бондарь, Г. В. Нестеренко // Вісник державного університету інформаційно – комунікаційних технологій. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 256 – 261.

4. Бондарь Е. Ю. Анализ времени распространения метровых волн в приземном слое для задач высокоточной синхронизации времени и частоты / Е. Ю. Бондарь, И. Е. Антипов, А. А. Костыря, Е. А. Иванова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/3 (38). – С. 22 – 25.

5. Бондарь Е. Ю. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов частоты / Е. Ю. Бондарь, Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, В. В. Обельченко, Е. А. Иванова, Е. П. Ермолаев, М. В. Милях // Радіоелектроніка Інформатика Управління: – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – № 1 (20). – С. 21 – 30.

6. Бондарь Е. Ю. Исследование влияния многолучевости на оценку времени распространения метровых и дециметровых радиоволн для задач высокоточной синхронизации времени и частоты / Е. Ю. Бондарь, И. Е. Антипов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/7 (40). – С. 60 – 64.

7. Бондарь Е. Ю. Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала / Милях, С. И. Носов // Системы управления, навигации и связи. – 2009. – № 2(10). – С. 40 – 45.

8. Бондарь Е. Ю. Проблемные вопросы экспериментальной оценки точностных и надежностных характеристик навигационного обеспечения по сигналам GNSS/EGNOS на территории Украины / Е. Ю. Бондарь, А. И. Дохов, А. А. Жалило // 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». МРФ-2005. Сборник научных трудов. Том. II. Международная конференция «Системы локации и навигации». – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2005. – 584 с. – С. 523 – 527.

9. Bondar Eugenia Formation in KhNURE of the Scientific-Educational Laboratory of Processing and Analysis of Measuring information of GPS/EGNOS Reference Stations, Navigation and Geodetic User Receivars / Eugenia Bondar, Vladimir Shokalo, Alexey Zhalilo, Alexander Dohov, Georgiy Nesterenko, Natalya Sadanova // International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (TCSET'2006), Proceedings of the International Conference TCSET'2006, Lviv, Puplishing House of Lviv Polytechnic, 2006, p.p. 1-4.

10. Бондарь Е. Ю. О путях улучшения метрологических характеристик средств измерений взаимного сдвига шкал времени и частоты / Е. Ю. Бондарь // 10-ый юбилейный международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2006. – 716 с. – С. 53.

11. Бондарь Е. Ю. Исследование стабильности канала прямой видимости в городских условиях / Е. Ю. Бондарь, И. Е. Антипов, Ю. А. Коваль, Г. В. Нестеренко, А. А. Ткачук // 7-ая Международная научно-практическая конференция

“Современные информационные и электронные технологии” «СИЭТ-2006», 22-26 мая 2006 г., Одесса, том 1. С. 214.

12. Bondar E. Ya. The using of Ultrawideband canal in problem of time scale comparison / E.Ya. Bondar, G.V. Nesterenko // The Third International Conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals “UWBUSIS’06”, 18-22 September, 2006, Sevastopol, p.376 – 378.

13. Бондарь Е. Ю. О возможности применения сверхширокополосных ретрансляторов в задачах высокоточного сличения шкал времени / Е. Ю. Бондарь, Г. В. Нестеренко, А. А. Ткачук // 5 Международная научно-техническая конференция «Метрология и измерительная техника (МЕТРОЛОГИЯ-2006)», 10-12 октября, Харьков, том 1. С. 128–130.

14. Бондарь Е. Ю. Особенности использования сверхширокополосных ретрансляторов в задачах сличения шкал времени / Е. Ю. Бондарь // 11-ый Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума. – Харьков, 2007. Ч.1. – 434 с. – С. 27.

15. Бондарь Е. Ю. Передача сверхширокополосных сигналов сличения времени в каналах с ретрансляцией / Е. Ю. Бондарь, Г. В. Нестеренко // 8-ая Международная научно-практическая конференция “Современные информационные и электронные технологии” «СИЭТ-2007», 21-25 мая 2007 г., Одесса, Украина. С. 232.

16. Бондарь Е. Ю. Об использовании сверхширокополосного радиоканала прямой видимости в задачах высокоточного сличения шкал времени / Е. Ю. Бондарь, Г. В. Нестеренко // 17-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2007). Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.: Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2007. – 940 с. – С. 257 – 258.

17. Бондарь Е. Ю. Исследование сверхширокополосного канала с логопериодическими антеннами в задачах сличения шкал времени / Е. Ю. Бондарь, Г. В. Нестеренко // 2-ая Международная научная конференция «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития»: Сб. материалов конференции – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – 533 с. – С. 103 – 104.

18. Бондарь Е. Ю. Исследование импульсных характеристик широкополосных антенн для задач сличения шкал времени / Е. Ю. Бондарь // 12-ый Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума Ч.1. – Харьков: ХНУРЕ, 2008. – 432 с. – С. 70.

19. Бондарь Е. Ю. Обобщенная комбинированная модель системы сличения шкал времени для сверхширокополосного канала прямой видимости / Е. Ю. Бондарь // 9-ая Международная научно-практическая конференция “Современные информационные и электронные технологии” «СИЭТ-2008», 19–23 мая 2008 г., Одесса, Украина, том 1. С. 250.

20. Бондарь Е. Ю. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости / Е. Ю. Бондарь, Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, Е. А. Иванова // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних

технологій: Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції (24 – 26 вересня 2008 р., м. Запоріжжя) – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 227 с. – С. 99 – 100.

21. Бондарь Е. Ю. О влиянии метеорологических факторов на время распространения сигнала в тропосфере / Е. Ю. Бондарь // 13-ый Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума Ч.1. - Харьков: ХНУРЕ, 2009. – 452 с. – С. 30.

22. Бондарь Е. Ю. Оценка пороговых эффектов в радиотехнических системах синхронизации времени и частоты, использующих алгоритм общего охвата / Е. Ю. Бондарь, Е. А. Иванова, А. К. Воронцова // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2009): материалы 5-й междунар. научн.-техн. конф. / Севастопольский нац. технический ун-т. Севастополь, 20-25 апреля 2009 г. – Севастополь: изд-во «Вебер», 2009. – 351 с. – С. 125.

23. Бондарь Е. Ю. Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала / Е. Ю. Бондарь, А. А. Костыря, Ю. А. Коваль, Е. А. Иванова, Е. П. Ермолаев, М. В. Милях, С. И. Носов // 5-ая научная конференция Харьковского университета воздушных сил им. Ивана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» : Тезиси докладов- Харьков: ХУПС, 2009. – 267 с. – С. 158.

24. Bondar' Eugenia About the Time Measurement of Radio-Waves Propagation in Atmosphere at Nanoseconds Accuracy / Eugenia Bondar', Ivan Antipov, Alexandr Kostyrja //International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (TCSET'2010), Proceedings of the International Conference TCSET'2010, Lviv, PUBLISHING HOUSE OF LVIV POLYTECHNIC, 2010, p.p. 161.

25. Бондарь Е. Ю. Результаты экспериментального измерения времени распространения дециметровых волн в тропосфере / Е. Ю. Бондарь, А. Л. Полчанинов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2010»: Материалы 6-ой междунар. молодежной научн.-техн. конф., 19-24 апреля 2010 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – 519 с. – С. 179.

АНОТАЦІЯ

Бондар Є. Ю. Удосконалення методів синхронізації шкал часу та частоти з метою зменшення їх похибки в умовах тропосферного радіоканалу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2010.

Дисертація є дослідженням, у якому отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі, що полягає в удосконаленні методів синхронізації шкал часу та частоти шляхом зменшення їхньої похибки в умовах тропосферного радіоканалу.

Основний результат дисертаційної роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні зв'язку між часом ПРХ і рівнем сигналу та експериментального підтвердження цього зв'язку, розробці й експериментальній перевірці моделі

для розрахунку часу ПРХ у тропосфері, яка враховує зміну метеопараметрів уздовж досліджуваної траси.

Практична цінність роботи визначається в першу чергу багатим експериментальним матеріалом про час поширення дециметрових радіохвиль в тропосфері і відповідного йому рівню сигналу. Проведені експерименти підтвердили вірогідність розроблених в дисертації наукових положень. Її результати впроваджені у науково-дослідних роботах, а також в навчальному процесі.

Ключові слова: високоточна синхронізація, шкала часу та частоти, пасивний алгоритм, час поширення радіохвиль, коефіцієнт заломлення, неоднорідності тропосфери, телевізійний сигнал, радіорелейна лінія, похибка синхронізації.

АННОТАЦИЯ

Бондарь Е. Ю. Усовершенствование методов синхронизации шкал времени и частоты с целью снижения их погрешности в условиях тропосферного радиоканала. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2010.

Диссертация является исследованием, в котором получено новое решение актуальной научно–прикладной задачи усовершенствования методов синхронизации шкал времени и частоты с целью снижения их погрешности в условиях тропосферного радиоканала, которое отличается от известных решений поиском и учётом взаимосвязи между временем распространения и уровнем сигнала в пункте приёма, а также учётом непостоянства метеопараметров для исследуемой трассы.

Основной результат диссертационной работы заключается в теоретическом обосновании взаимосвязи времени РРВ и уровня сигнала и её экспериментальном подтверждении. Это даёт возможность, измеряя уровень сигнала, определять ожидаемое при нём время распространения. Выявленная закономерность даёт возможность учитывать тропосферную составляющую погрешности при синхронизации времени и частоты для полупассивного и пассивного алгоритмов.

Предложена и экспериментально подтверждена модель для расчета времени РРВ в тропосфере, которая учитывает изменяющиеся метеопараметры для исследуемой трассы. Показано, что применение предложенной модели и методики обработки с учётом уровня сигнала позволит уменьшить составляющие погрешности, обусловленные тропосферой и многолучевостью со 100 до 20 нс для трасс длиной около 100 км.

Практическая ценность работы в первую очередь определяется богатым экспериментальным материалом по времени распространения дециметровых радиоволн в тропосфере и измерениями соответствующего ему уровню сигнала.

Проведенные эксперименты подтвердили достоверность разработанных в диссертации научных положений. Ее результаты внедрены при выполнении

научно-исследовательских работ, а также в учебный процесс.

Ключевые слова: высокоточная синхронизация, шкала времени и частоты, пассивный алгоритм, время распространения радиоволн, коэффициент преломления, неоднородности тропосферы, телевизионный сигнал, радиорелейная линия, точность синхронизации.

ABSTRACT

Bondar E. Y. "Improvement of the time and frequency scale synchronization methods in order to decrease the errors related to conditions of tropospheric radio-channel". – a Manuscript.

Thesis for the candidate's degree by speciality 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkov national university of radio electronics, Kharkov, 2010.

The dissertation is a kind of research in which a new solution of actual scientific and practical problem is received. The problem includes improvement of the time and frequency scale synchronization methods in order to decrease the errors related to conditions of tropospheric radio-channel. This solution differs from the known ones in search and taking into account the interrelation between time of distribution and signal level at the reception point, and also taking into consideration the inconstancy of meteorological parameters along the line.

The basic result contains theoretical reasoning of interrelation between time of propagation of radio-waves and signal level. It makes possible the following: to measure level of a signal and to define the time of its expected propagation. The rule which is found will make possible considering tropospheric component of the error at synchronization of time and frequency for semi-active and passive algorithms.

The Keywords: high-precision synchronisation, time scale and frequency, passive algorithm, radio-waves propagation time, factor of refraction, heterogeneity of troposphere, television signal, radio relay line, accuracy of synchronisation.

Підп. до друку 16.08.10.
Умов. друк. арк. 1,2
Зам. № 2-749

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$
Тираж 100 прим.
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

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