

Михайло Паламар, Ігор Осов'як

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ АБОНЕНТІВ У СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕНАЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

У статті розглянуто метод синхронізації абонентів у системі цифрового радіозв'язку з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти на основі комбінації методів сканування та очікування з використанням принципу плинної зміни частот входження в синхронізм, що дозволяє підвищити надійність синхронізації. Метод використано у розробці цифрової УКХ радіостанції з ППРЧ для ТРЗ "Оріон". Приведено результати випробувань, які підтвердили його ефективність за критеріями підвищення надійності синхронізації.

Ключові слова: псевдовипадкове переналаштування робочої частоти, синхронізація, інтервал виклику, синхропосилка.

Вступ. Бурхливий розвиток телекомунікаційних систем в останні десятиліття створює певні труднощі при побудові нових інформаційних мереж з радіодоступом. Електромагнітна обстановка в радіоканалах всіх частотних діапазонів, аж до міліметрового, безперервно ускладнюється і новим радіозасобам доводиться працювати в умовах масованого впливу зовнішніх випадкових, а в певних випадках спеціально створених завад. Зниження достовірності прийнятої інформації внаслідок впливу цих факторів стає суттєвою перешкодою для забезпечення якісного зв'язку. Особливо гостро питання стоїть для радіосистем, призначених для передачі важливої, або таємної інформації, які часто працюють в безпосередній близькості з великою кількістю діючих радіозасобів

різноманітного призначення. Прикладами таких радіосистем можуть бути перш за все військові системи радіозв'язку, радіостанції диспетчерського зв'язку на транспорті, банківські радіомережі передачі інформації, устаткування локальних мереж медичного призначення, системи радіооповіщення населення Міністерства надзвичайних ситуацій і багато інших.

Для забезпечення прийнятної достовірності при передачі інформації в таких системах доводиться застосовувати спеціальні все складніші і дорожчі методи і засоби, як наприклад: збільшувати потужність передавачів, використовувати методи рознесення частот передачі, застосовувати складні завадостійкі види модуляції, використовувати перемішування інформації (скремблювання), впроваджувати в інформаційний потік надлишкову інформацію і застосовувати завадостійке кодування з виправленням помилок і т.п.

В загальному синтез архітектури радіозасобів, вибір способів опрацювання сигналу для абонентського інформаційного обміну, методи найкращого доступу до абонента, оперативність передачі інформації, надійний захист інформації від несанкціонованого доступу і все це в умовах інтенсивного впливу завад для задач надійного захищеного зв'язку вирішені недостатньо ефективно і вимагають додаткових досліджень.

Аналіз та постановка задачі.

Одним із засобів підняття завадостійкості цифрових засобів зв'язку в умовах організованих завад є метод розширення спектру сигналу в ефірі шляхом псевдовипадкового переналаштування робочої частоти (ППРЧ, FHSS). Робоча частота декілька сотень раз в секунду стрибкоподібно змінюється в межах виділеного частотного діапазону відповідно до псевдовипадкової послідовності (ПВП) відомої передавачу та приймачу. Якщо забезпечити комплекс технічних та організаційних заходів, які з певною достовірністю гарантуватимуть невідомість для третьої сторони відповідної ПВП, то ППРЧ можна також розглядати як метод захисту інформації а також як спосіб приховування самого факту зв'язку.

На сьогоднішній день найбільш ефективними з точки зору співвідношення вартості системи та величини досягнутого ефекту є системи повільного ППРЧ [1]. Особливістю повільного ППРЧ є те, що протягом роботи на одній частоті передається декілька бітів інформації.

В літературі [1, 2, 3] описано типові структурні схеми систем ППРЧ. В усіх них наявні синтезатори частоти, в яких частота задається генераторами ПВП. Загальною особливістю усіх цих систем є необхідність забезпечення синхронної роботи синтезаторів в частотно-часовій області. Для передачі цифрового потоку необхідне досягнення також бітового та кадрового синхронізму. Метод забезпечення початкової синхронізації є фактором, що визначає особливості тієї чи іншої структурної схеми системи з ППРЧ. Існуючі методи та схемно-алгоритмічні засоби синхронізації можна узагальнено звести до наступних трьох видів [1]:

- Системи з паралельним методом пошуку сигналу передавача. По суті являють собою багатоканальний приймач. На основі аналізу часово-частотного розподілу сигналу передавача приймач отримує інформацію, необхідну і достатню для досягнення синхронізму.
- Системи з послідовним пошуком. До настання синхронізму одноканальний приймач сканує область частот в якій найбільш ймовірна робота передавача в даний момент часу.
- Системи, приймач яких до моменту настання синхронізму очікує сигнал передавача на одній частоті. Після досягнення початкового синхронізму робоча частота приймача змінюється синхронно до зміни робочої частоти передавача [4].

В більшості випадків ці методи ґрунтуються на визначенні кореляції між прийнятим сигналом та сигнатурою, яка передається передавачем, як правило, на початку сеансу зв'язку. Проте усі згадані вище методи синхронізації мають певні недоліки. Насамперед це необхідність зовнішніх засобів часової корекції, складних високоточних тактових генераторів. Також вони характеризуються великим значенням часу входження в синхронізм та низькою ймовірністю успішного входження

при заданому значенні початкової максимальної розбіжності в системних годинниках передавача та приймача [1]. Тому пошук ефективних методів і алгоритмів синхронізації залишається актуальним.

Метою роботи є розроблення і дослідження програмно-апаратного алгоритму установки синхронізації в системі ППРЧ, який скорочує час настання синхронізації та стійкий до певної неузгодженості системного часу між абонентами.

Метод підвищення швидкості синхронізації без зовнішніх джерел точного часу в частотно-часовій області.

Запропонований нами метод синхронізації систем радіозв'язку з повільним ППРЧ є комбінацією методу сканування та методу очікування з одночасним використанням принципу плинної зміни частот входження в синхронізм [5]. В ньому також реалізовано спосіб відновлення бітової синхронізації з використанням одnobітних паралельних обчислень.

Час передачі інформаційного цифрового пакету розбивається на так звані інтервали виклику (ІВ), кожен з яких має свій номер. На початку ІВ генератори ПВП ініціалізуються ключами, які є функцією базового ключа та номеру ІВ.

Передавач перед початком передачі даних передає синхропосилку, яка являє собою послідовність імпульсів виклику. Імпульси виклику несуть інформацію про номер інтервалу виклику та номер імпульсу виклику з початку синхропосилки. Кожен ІВ передається на іншій частоті, причому набір частот, на яких передаються ІВ, являє собою підмножину усіх робочих частот. Цю підмножину частот називатимемо частотами виклику. Набір значень частот виклику однозначно визначаються номером ІВ та базовим ключем. Метод розрахунку частот виклику вибрано таким, що при збільшенні номеру інтервалу виклику на одиницю в множині значень частот змінюється лише один елемент. Таким чином реалізується принцип плинності частот виклику [5].

Потужність множини частот виклику становить n . Синхропосилка містить усього $n*n$ імпульсів виклику. Приймач до початку прийому даних знаходиться в режимі очікування, особливістю якого є те, що він

послідовно сканує частоти у відповідності до свого номеру інтервалу виклику. Номер інтервалу виклику приймача може відрізнятися від номеру інтервалу виклику передавача внаслідок розбіжності в системному часі передавача та приймача. Як наслідок, множина частот, по якій проводить сканування приймач в режимі очікування може відрізнятися від множини частот виклику. Цю множину надалі називатимемо множиною частот очікування.

Час перебування приймача в режимі очікування на одній частоті в n раз більша за час, протягом якого на одній частоті перебуває передавач. Як наслідок, подія зустрічі передавача та приймача на одній частоті носить уже не імовірнісний характер [1], а є гарантованою протягом часу, що не перевищує тривалість синхропосилки у випадку, якщо розбіжність між номером інтервалу виклику передавача та приймача не більша за $n-1$.

У випадку зустрічі передавача та приймача на одній частоті приймач запускаються механізм швидкого відновлення бітової синхронізації та прийому інформації про номер імпульсу виклику та інтервал виклику передавача. На основі цих даних приймач може однозначно прогнозувати момент закінчення синхропосилки та скорегувати розбіжності між своїм значенням номера інтервалу виклику та відповідним значенням передавача. Отже у приймача появляються всі необхідні передумови для синхронізації свого генератора ПВП до генератора передавача. Графічна ілюстрація процесу синхронізації приведена на рис.1. Для спрощення ілюстрування число частот виклику відображених на рисунку рівне 6, а величина розбіжності в множинах частот виклику та очікування показана рівною одиничному значенню. Також умовно зображено, що робочі частоти змінюються послідовно, хоч реально – за псевдовипадковим законом.

Інтервал часу, протягом якого передавач проходить усі значення частот з множини частот виклику називатимемо блоком виклику. Синхропосилка містить N блоків виклику. Для деякого моменту часу, коли приймач знаходиться в режимі очікування потужність перетину множини частот виклику та множини частот очікування позначимо як m .

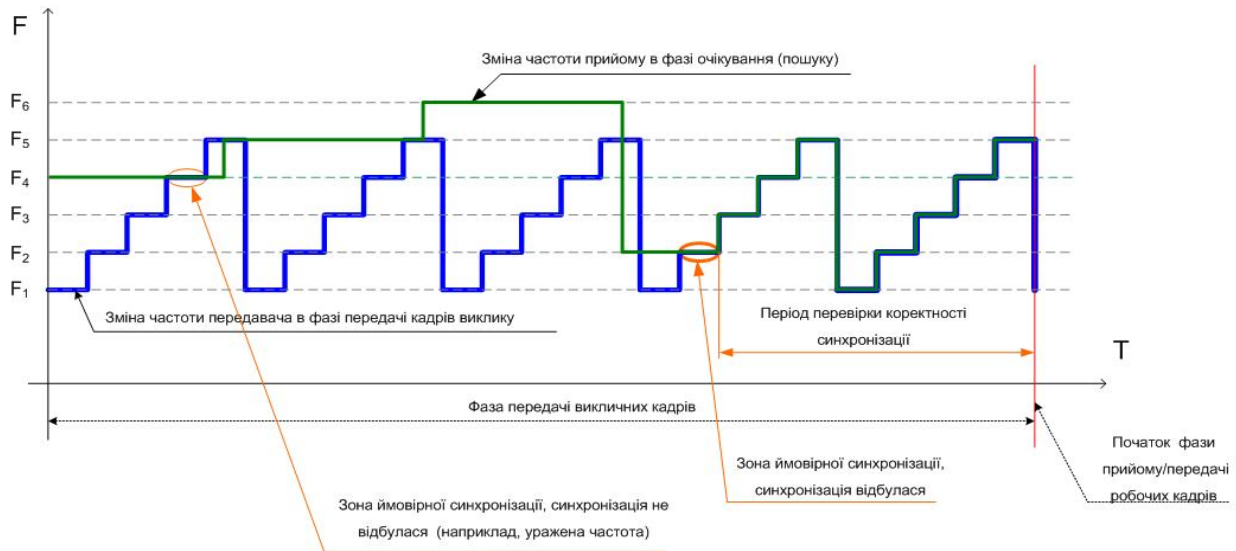


Рисунок 1. Частотно-часові діаграми в стадії початкової синхронізації.

За умови повного перекриття в часі всіх кадрів виклику під час періоду початкової синхронізації ймовірність події зустрічі передавача та приймача на одній частоті (далі – перекриття) протягом першого блоку виклику становить:

$$p(1) = \frac{m}{n} \quad (1)$$

Ймовірність перекриття протягом другого блоку виклику становить

$$p(2) = (1 - p(1)) \left(\frac{m}{n-1} \right) \quad (2)$$

В загальному для i -го блоку

$$p(i) = (1 - p(1)) \dots (1 - p(i-1)) \left(\frac{m}{n-i+1} \right),$$

або

$$p(i) = m \frac{(n-m)!(n-i)!}{n!(n-m-i+1)!} \quad (3)$$

Ймовірність встановлення синхронізації на множині перших k блоків становить

$$P_{S_k} = \sum_{i=1}^k p(i) \quad (4)$$

З урахуванням враження робочих частот $Pf_i, i=1,2,\dots,n$ ця ймовірність становить

$$P_{S_k} = \sum_{i=1}^k (1 - Pf_i) p(i) \quad (5)$$

Після встановлення частотно-часової синхронізації ініціюється процес встановлення бітової синхронізації цифрового пакету.

Спосіб бітової синхронізації на основі паралельного кореляційного пошуку сигнатури.

По своїй суті бітова синхронізація є визначення моменту оптимального стробування виходу демодулятора. Квантування слід проводити тоді, коли сигнал на виході демодулятора максимально віддалений від зони міжсимвольних переходів. В такому випадку ймовірність бітової помилки буде найнижчою. Саме тому можна стверджувати, що варіант стробування, при якому спостерігається максимальна кореляція з еталоном сигнатури і буде моментом оптимального стробування.

При традиційних підходах до кореляційного способу відновлення синхронізації оцінка кореляції проводиться декілька разів за час, що відповідає тривалості одного символу. Це приводить до значних обчислювальних затрат, так як розмірність еталону сигнатури є добутком бітової довжини сигнатури та кількості оцінок на один біт. Крім того, обчислення слід виконувати в тій розрядності, в якій отримуємо вихідне значення демодулятора.

Суттю запропонованого методу є те, що ми обчислюємо кореляцію до еталону сигнатури в декілька паралельних потоків для вибірок, що містять однобітові значення після компаратора, який включено на виході демодулятора. Для кожного потоку стробування компаратора здійснюється з постійним зсувом. Величина зсуву рівна тривалості біту, яка розділена на кількість потоків. Це дозволяє для оцінки величини кореляції з еталоном сигнатури використати операцію побітового виключного “АБО” з наступним визначенням хемінгової ваги одержаного результату.

Одержане значення є інверсією кореляції. Момент стробування потоку, який дав максимум кореляції та перевищує певне ключове значення і є моментом оптимального стробування (рис. 2).

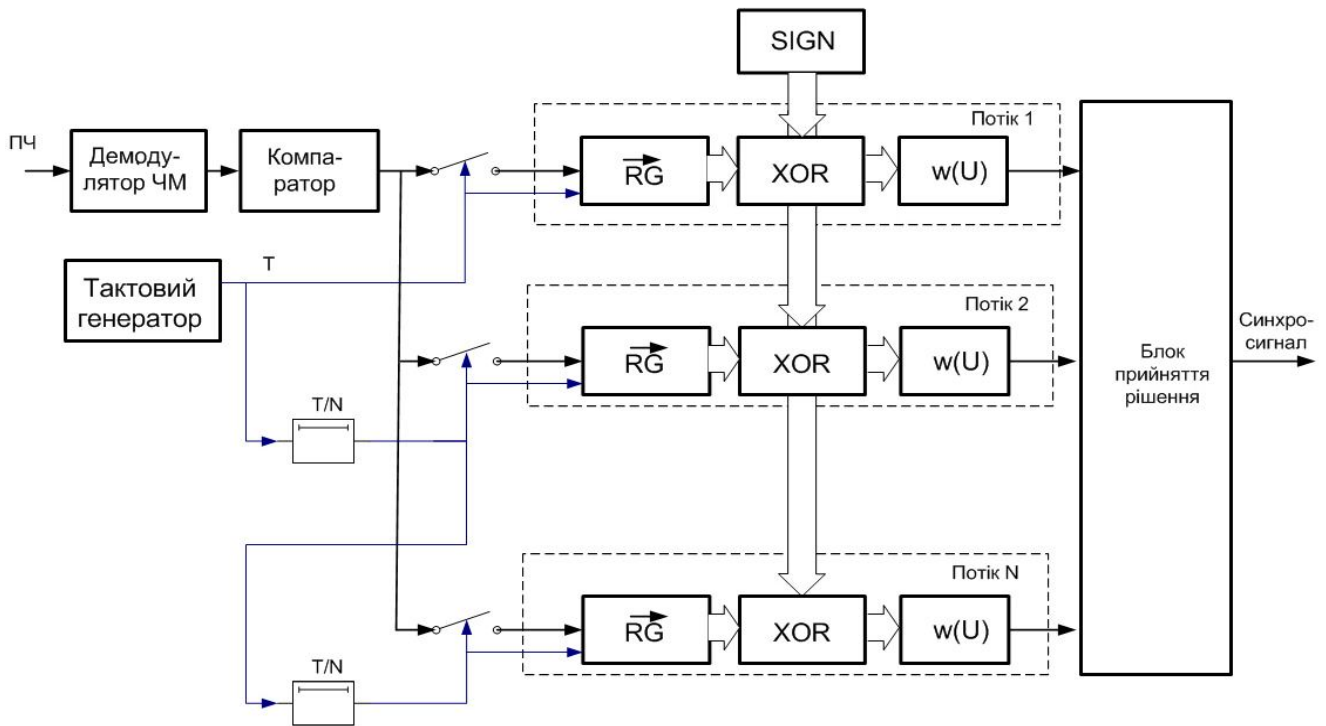


Рисунок 2. Блок-схема пропонуваного способу відновлення бітової синхронізації. Тут T/N – елементи затримки, RG – регістр зсуву, SIGN - еталон сигнатури, XOR – обчислювач виключного АБО, w(U) - схема визначення хемінгової ваги.

Практичні результати. Висновки.

Запропонований спосіб синхронізації в частотно-часовій області забезпечує значно менший час настання синхронізму в порівнянні з типовими методами сканування та характеризується значно вищою ймовірністю встановлення синхронізації в порівнянні з системами, які досягають синхронізму методом очікування. Перехід до паралельних обчислень з використанням однобітної математики для кореляційних способів бітової синхронізації дає вииграш в продуктивності системи.

Запропонований спосіб синхронізації реалізовано у цифровій УКХ радіостанції з ППРЧ, що розробляється у ПАТ Тернопільський радіозавод “Оріон”. На рис. 3 приведена функціональна схема блока керування і цифрової обробки сигналів радіостанції з ППРЧ.

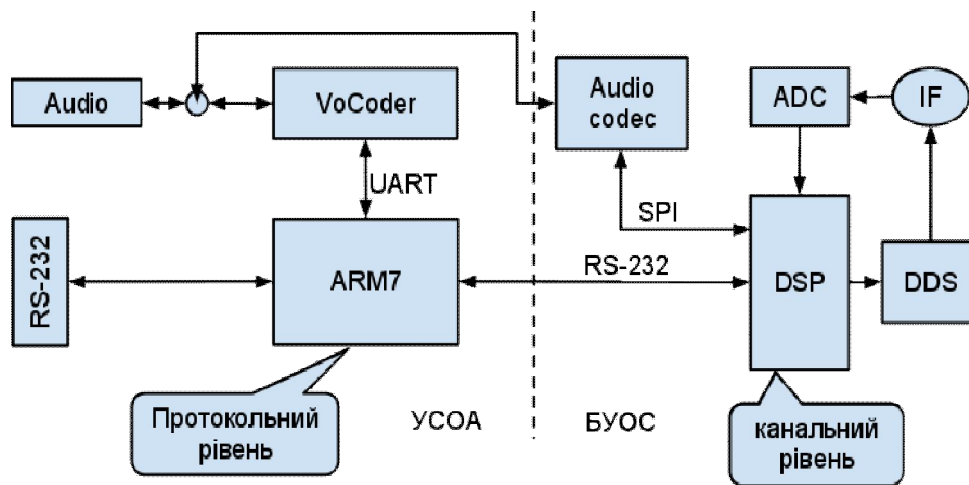


Рисунок 3. Функціональна схема блока керування і цифрової обробки сигналів радіостанції з ППРЧ.

Вигляд модуля блока керування і цифрової обробки сигналів та радіостанції з ППРЧ показані на рис. 4.

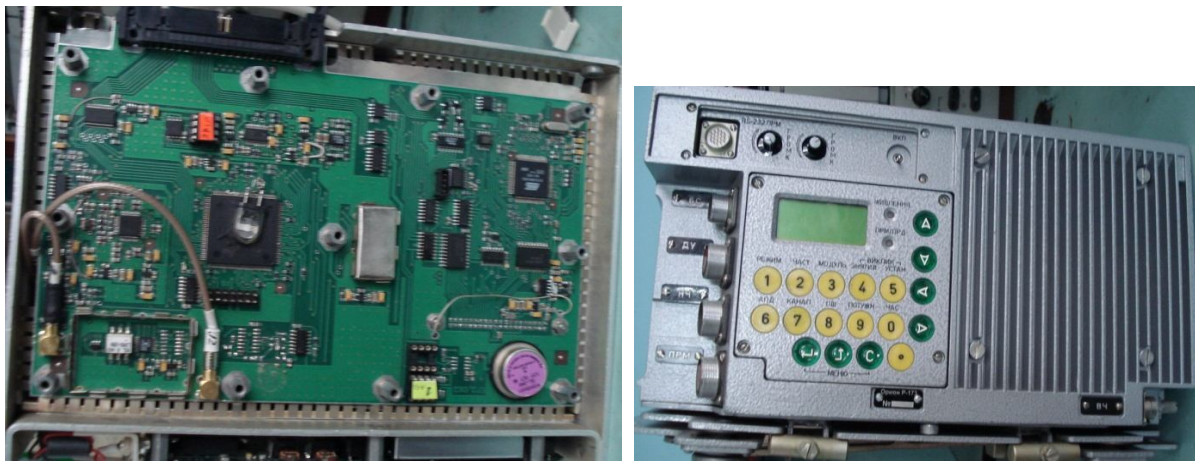


Рисунок 4. Модуль блока керування і цифрової обробки сигналів та вигляд радіостанції з ППРЧ.

Для швидкості переключення ППРЧ в 400 стрибків за секунду з часом передачі синхропосилки протягом 240 мілісекунд на початку сеансу зв'язку настання синхронізації досягається при початкових розузгодженнях системного часу передавача та приймача до 8 хвилин для лабораторних умов, та 4 хвилин для випадку роботи в умовах реального радіо ефіру.

Завдяки запропонованому методу досягнуто часу відновлення бітової та кадрової синхронізації 600 мкс для 24-бітних сигнатур з

одночасним зменшенням орієнтовно у 8 раз потреб в обчислювальному ресурсі (для типу DSP TMS320C5502, що використовується) у порівнянні з традиційними кореляційними методами відновлення бітової та кадрової синхронізації.

Література

1. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер. англ. / Под ред. Журавлева. М: – Радио и связь, 2000. – 520с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104с.
3. Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М: – Радио и связь, 2000, с.218-250.
4. Umberto Mengali, D'Aldo N. Synchronization Techniques for Digital Receivers. Plenum Publishing Corporation , 1997.
5. Піскун С.Ж., Гиндич Б. А.. Принцип побудови алгоритмів синхронізації для декаметрових радіоліній з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти. // VI-й науково-практичний семінар “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, Київ, 2011, с. 163.

Mykhaylo Palamar, Ihor Osov'yak

**IMPROVEMENT OF THE ABONENTS SYNCHRONIZATION
RELIABILITY IN COMMUNICATION SYSTEM WITH
PSEUDO-RANDOM CHANGE OF THE OPERATING FREQUENCY**

The article discusses a method of the subscribers synchronization in digital radio communication system with pseudo-random changing of the operating frequency. This method is based on a combination of scanning methods and expectation methods, with the use of the principle of the shift frequency to input of synchronization. This principle enhances the reliability of synchronization. The method is used in the development of digital FM radio with FHSS mode, and it was used for Ternopil radio plant "Orion". The results of tests are presented, which confirmed its effectiveness criteria for improving of the synchronization reliability.

Keywords: *pseudo-random changing of the operating frequency, synchronization, interval call, synchronous reference*