

## СПОСІБ СИНХРОНІЗАЦІЇ АСИНХРОННИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ПОВІЛЬНИМ ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕНАЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

Запропоновано спосіб синхронізації систем з повільним псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти, який є комбінацією методу сканування і методу очікування та використання принципу плинної зміни частот входження у синхронізм. Також пропонується на етапі відновлення бітового синхронізму здійснювати кореляційний аналіз, з метою пошуку сигнатури, в декілька потоків у області одинітних значень.

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

Предложен способ синхронизации систем с медленной псевдослучайной перенастройкой рабочей частоты, который является комбинацией сканирующего метода и метода ожидания, с использованием принципа непрерывной смены частот вхождения в синхронизацию. Также предлагается, на этапе восстановления битовой синхронизации осуществлять корреляционный анализ, с целью поиска сигнатуры, в несколько потоков в области единичных значений.

**Ключевые слова:** псевдослучайная перенастройка рабочей частоты, синхронизация, интервал вызова, синхроросылка.

This article presents a way of synchronizing systems with slow FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). This method is a combination of the methods of scanning and expecting as well as engaging the principle of continuous alteration of frequency of entering the synchronism. Moreover, we suggest that during the stage of timing synchronism restoration it is relevant to apply correlation analysis in a number of flows within the zone of one-bit values in order to search for the signature.

**Keywords:** Frequency hopping spread spectrum, synchronization, calling interval.

### 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). 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 і організаційних мір, які з певною достовірністю гарантуватимуть невідомість для третьої сторони відповідної ПВП, то ППРЧ можна також розглядати як метод захисту інформації, так і спосіб приховування самого факту зв'язку.

На даний час найбільш ефективними з

точки зору співвідношення вартості системи і величини досягнутого ефекту є системи повільного ППРЧ [1]. Особливістю повільного ППРЧ є те, що протягом роботи на одній частоті передається декілька бітів інформації.

У літературі [1-3] описано типові структурні схеми систем ППРЧ. Усюди наявні синтезатори частоти, частота яких задається генераторами ПВП. Відповідно спільною вимогою усіх таких систем є забезпечення синхронізму роботи синтезаторів у частотно-часовій області. Для передавання цифрового потоку необхідне досягнення бітового і кадрового синхронізму.

Спосіб забезпечення початкового синхронізму є фактором, що визначає особливості тієї чи іншої структурної схеми систем з ППРЧ. Незважаючи на велику кіль-

кість відповідних структурних схем, їх усіх можна звести до таких трьох видів[1]:

- Системи з паралельним методом пошуку сигналу передавача. По суті вони є багатоканальним приймачем. 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 у 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.

Загалом приймачу нічого не відомо про особливості інформації, яка передається. Втім, з метою підняття ефективності процесу синхронізації у ряді систем приймаються заходи по наданню інформаційному потоку на стороні передавача певних характеристик, які відомі приймачу. Мова йде про, так звані, методи синхронізації з використанням даних (*data-aided recovery*) [4]. У більшості випадків ці методи ґрунтуються на визначенні кореляції між прийнятим сигналом та сигнатурою, яка передається передавачем, як правило, на початку сеансу зв'язку.

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 у синхронізм і низькою ймовірністю успішного входження при заданому значенні початкової максимальної розбіжності у системних годинниках передавача і приймача [1].

Метою роботи є розробка і дослідження програмно-апаратного алгоритму установки синхронізації у системі ППРЧ, який скорочує час настання синхронізму та стійкий

до деякої неузгодженості системного часу між абонентами.

### **Швидкий спосіб синхронізації без зовнішніх джерел точного часу у частотно-часовій області**

Нами розроблено і реалізовано спосіб синхронізації систем з повільним ППРЧ, який є комбінацією методу сканування і методу очікування з одночасним використанням принципу плинної зміни частот входження у синхронізм [5]. Також запропоновано і реалізовано спосіб відновлення бітової синхронізації з використанням однобітних паралельних обчислень.

Час розбивається на інтервали виклику (ІВ), кожен з яких має свій номер. На початку ІВ генератори ПВП ініціалізуються ключами, які є функцією базового ключа і номеру ІВ.

Передавач перед початком передачі даних передає синхропосилку, яка є послідовністю імпульсів виклику. Імпульси виклику несуть інформацію про номер інтервалу виклику і номер імпульсу виклику з початку синхропосилки. Кожен ІВ передається на іншій частоті, причому набір частот, на яких передаються ІВ, є підмножина 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 у множині значень частот змінюється лише один елемент. В такий спосіб реалізується принцип плинності частот виклику [5].

Потужність множини частот виклику становить  $n$ . Синхропосилка містить усього  $n \times n$  імпульсів виклику.

Приймач до початку прийому даних знаходиться у режимі очікування, особливістю якого є те, що він послідовно сканує частоти у відповідності до свого номеру інтервалу виклику. Номер інтервалу виклику приймача може відрізнитися від номеру інтервалу виклику передавача внаслідок розбіжності у системному часі передавача і прийма-

ча. Як наслідок, множина частот, по якій проводить сканування приймач у режимі очікування може відрізнитися від множини частот виклику. Цю множину надалі називатимемо множиною частот очікування.

Час перебування приймача в режимі очікування на одній частоті в  $n$  раз більший за час, протягом якого на одній частоті перебуває передавач. Як наслідок, подія зустрічі передавача і 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 і приймача на одній частоті приймачем запускається механізм швидкого відновлення бітрової синхронізації і прийому інформації про номер імпульсу виклику та інтервал виклику передавача. На основі цих даних приймач може однозначно прогнозувати момент закінчення синхропосилки і скоректувати розбіжності між своїм значенням номера інтервалу виклику і відповідним значенням передавача. Тобто у приймача будуть наявні всі необхідні передумови для синхронізації свого генератора ПВП до генератора передавача.

На рис. 1 для спрощення ілюстрування число частот виклику вибрано за 6, а також

величина розбіжності у множинах частот виклику і очікування прийнята за одиничне значення. Також, умовно зображено, що робочі частоти змінюються послідовно.

Питання бітрової синхронізації розглядаються в наступному розділі.

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 у режимі очікування потужність перетину множини частот виклику і множини частот очікування позначимо  $m$ .

За умови повного перекриття у часі усіх кадрів виклику під час періоду початкової синхронізації ймовірність події зустрічі передавача і приймача на одній частоті (далі - перекриття) протягом першого блоку виклику становить

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

Імовірність 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

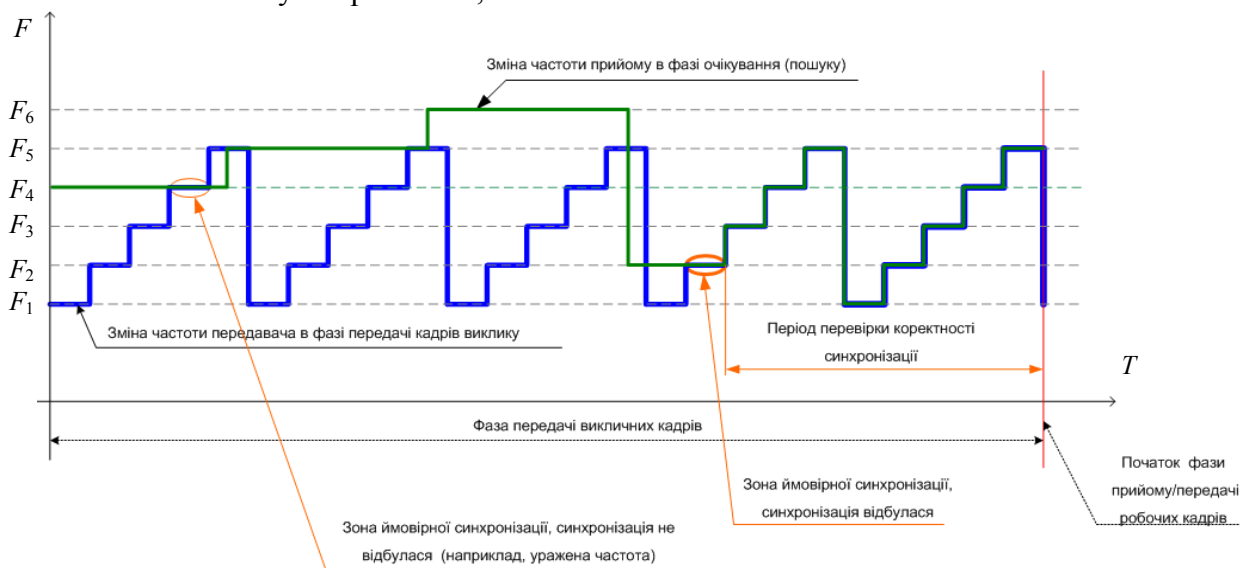


Рис. 1. Частотно-часові діаграми в стадії початкової синхронізації.

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

Ймовірність встановлення синхронізації на множині перших  $k$  блоків становить

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

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

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

### Спосіб бітової синхронізації на основі паралельного кореляційного пошуку сигнатури

За своїм змістом бітова синхронізація є визначення моменту оптимального стробування виходу демодулятора. Квантування слід проводити тоді, коли сигнал на виході демодулятора максимально віддалений від зони міжсимвольних переходів. Тоді ймовірність бітової помилки буде найнижчою. Саме тому ми можемо стверджувати, що варіант стробування, при якому спостерігається максимальна кореляція із еталоном сигнатури і буде моментом оптимального стробування.

При традиційних підходах до кореляційного способу відновлення синхронізації оцінка кореляції проводиться декілька раз за

час, який відповідає тривалості одного символу. Це приводить до необхідності виконувати значну обчислювальну роботу, так як розмірність еталону сигнатури є добутком бітової довжини сигнатури і кількості оцінок на один біт. Крім того, обчислення слід виконувати у тій розрядності, в якій отримуємо вихідне значення демодулятора.

Суттю запропонованого нами способу є те, що обчислюється кореляція до еталону сигнатури у декілька паралельних потоків для виборок, що містять одnobітові значення після компаратора, який включено на виході демодулятора. Для кожного потоку стробування компаратора здійснюється з постійним зсувом. Величина зсуву дорівнює тривалості біту, яка розділена на кількість потоків. Це дозволяє для оцінки величини кореляції із 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 і перевищує певне ключове значення і є моментом оптимального стробування (рис. 2).

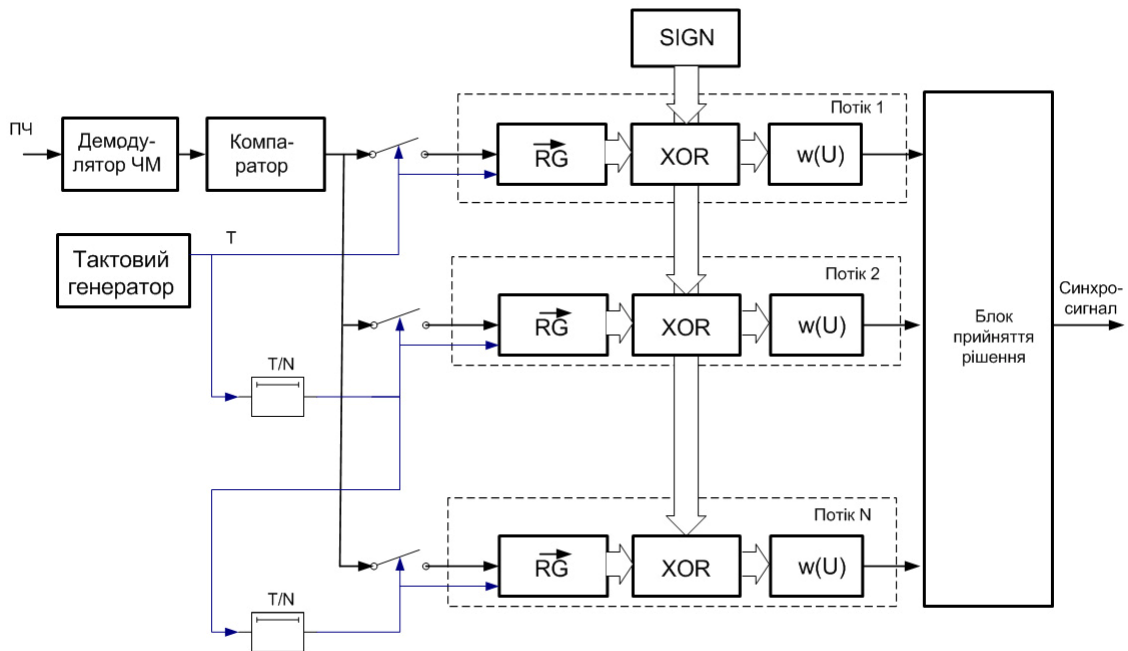


Рис.2. Блок-схема способу відновлення бітової синхронізації. Тут  $T/N$  – елементи затримки,  $RG$  – регістр зсуву,  $SIGN$  – етalon сигнатури,  $XOR$  – обчислювач виключного "АБО",  $w(U)$  – схема визначення хемінгової ваги.

### Практичні результати. Висновки

Запропонований спосіб синхронізації в частотно-часовій області забезпечує значно менший час настання синхронізму у порівнянні з типовими методами сканування і характеризується значно вищою ймовірністю встановлення синхронізації на відміну від систем, які досягають синхронізму методом очікування.

Перехід до паралельних обчислень з використанням однобітної математики для кореляційних способів бітової синхронізації дає вираш у продуктивності системи.

Запропонований спосіб синхронізації було реалізовано у цифровій УКХ радіостанції з ППРЧ, розробленій ПАТ "Тернопільський радіозавод Оріон".

Для швидкості переключення ППРЧ у 400 стрибків за секунду з часом передачі синхросилки протягом 240 мілісекунд на початку сеансу зв'язку настання синхронізму досягається при початкових розузгодженнях системного часу передавача і приймача на 8 хвилин для лабораторних умов, та 4 хвилини для випадку роботи в умовах реального радіоефіру.

Досягнуто час відновлення бітової і кадрової синхронізації 600 мкс для 24-бітних сигнатур з одночасним зменшенням орієнтовно у 8 раз потреб в обчислювальному ресурсі (для *DSP TMS320C5502*) у порівнянні з традиційними кореляційними методами відновлення бітової і кадрової синхронізації

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. – 520с.
2. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 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 M., Aldo N.D'A.* Synchronization techniques for digital receivers. – Plenum Publishing Corporation, 1997.
5. *Піскун С.Ж., Гиндич Б.А., Ерохін В.Ф.* Принципи 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", 20 жовтня 2011 р. – Київ, 2011. – С.163.