

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ ПРИ ФОРМУВАННІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

М. І. КОЗЛЕНКО

*Приватний вищий навчальний заклад "Галицька академія"
м. Івано-Франківськ, вул. Вовчинецька, 227*

Проведено исследование эффективности использования полосы частот при формировании широкополосных шумоподобных сигналов в коммуникационных средствах распределенных компьютерных систем и сетей промышленного назначения.

Frequency resource using evenness has been estimated for forming pseudorandom sequences signals and spread spectrum signals formed on the basis of the variable entropy method. It has been evaluated to use the frequency band more evenly than in comparison with traditional methods.

Використання широкосмугових сигналів обґрунтовано зростаючими вимогами до сучасних розподілених комп'ютерних систем та мереж в різних галузях промисловості. Останні досягнення комунікаційних технологій зумовили виникнення нового покоління бездротових комунікаційних засобів таких систем, реалізованих на основі широкосмугових сигналів, що підтверджується значною кількістю публікацій на згадану тему.

Широке використання бездротових технологій при побудові розподілених комп'ютерних систем та мереж промислового призначення, які функціонують в умовах інтенсивних промислових завод, визначає необхідність пошуку нових рішень на методичному, структурному та алгоритмічному рівнях при створенні цифрових засобів реалізації комунікацій.

Традиційно забезпечення високої достовірності обміну даними в комунікаційних каналах ґрунтується на методах формування та оброблення широкосмугових сигналів з великою базою, при цьому найширше застосування отримали засоби реалізовані на основі формування дискретних псевдовипадкових послідовностей та кореляційного опрацювання сигналів. Проте згадані технології мають низку недоліків, які обмежують їх практичну реалізацію, пов'язану з необхідністю застосування складних апаратних та алгоритмічних методів формування псевдовипадкових послідовностей, необхідністю зберігання еталонів сигналів в пристроях оброблення, використанням складних алгоритмів кореляційного опрацювання та переважним використанням неоптимальних методів оброблення синусоїдних сигналів-носіїв. При цьому, як правило, в якості маніпульованих ознак таких сигналів використовують амплітуду, частоту, фазу або комбінації цих ознак.

При формування широкосмугових сигналів має місце суттєва нерівномірність розподілу енергії сигналу за частотами. Отже, різні способи формування широкосмугових сигналів характеризуються різною ефективністю використання частотного ресурсу. Тому існує необхідність дослідження цього параметру та створення нових методів та засобів формування широкосмугових сигналів з покращеними частотними характеристиками.

Традиційні методи (DSSS, FHSS) формування широкосмугових сигналів описані в роботах [1-3]. Методи формування надширокосмугових сигналів описані в роботах [4, 5]. Використання явищ детермінованого динамічного хаосу для цілей формування та оброблення сигналів описано в [6, 7]. В роботах [8, 9] запропоновано новий метод формування та опрацювання широкосмугових шумоподібних сигналів з керованою ентропією де значення ентропії сформованого випадкового сигналу змінюється в залежності від символів вихідного повідомлення. Це дає можливість використовувати ентропію для ідентифікації символів повідомлення і не вимагає використання складних алгоритмів генерування псевдовипадкових послідовностей для розширення спектру сигналів. Опрацювання таких широкосмугових сигналів ґрунтується на статистичному оцінюванні значень ентропії відповідних фрагментів сигналу (символьних інтервалів) з подальшим ухваленням рішення про дискретне значення символу повідомлення, що на відміну від кореляційних методів не потребує зберігання еталонів форми оброблюваних

сигналів. В розробленому методі використовується ентропія сигналу-носія, а не інформаційна ентропія самого повідомлення. Проте, питання ефективності використання частотного ресурсу не розглядалося.

Метою даної роботи є дослідження ефективності використання смуги частот при формування широкосмугових сигналів за різними методами.

Частотний спектральний аналіз [10] сформованих широкосмугових сигналів проведено у відповідності до перетворення Фур'є (1), шляхом розрахунку дискретного перетворення [11] за формулою (2) з подальшим розрахунком спектральної щільності енергії, за допомогою самостійно розробленого у середовище MATLAB 6.5 [12] програмного забезпечення.

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt, \quad (1)$$

де $S_x(f)$ - комплексна спектральна щільність амплітуд, В/Гц
 $x(t)$ - досліджуваний сигнал,
 f - частота, Гц
 t - час, с.

$$S_x(k \cdot F) = T_s \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n \cdot T_s) \exp(-j2\pi nk/N), \quad (2)$$

де $S_x(kF)$ - дискретизована щільність амплітуд сигналу, В/Гц
 $x(nT_s)$ - дискретизований досліджуваний сигнал, В
 N - кількість відліків сигналу
 T_s - інтервал дискретизації в часі, $T_s = 1/f_s$, с
 f_s - частота дискретизації, Гц
 k - частотний індекс, $k = 0, 1, \dots, N-1$,
 n - часовий індекс, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Інтервал дискретизації за частотою складає величину $F = 1/NT_s$ Гц, або $\Omega = 2\pi/NT_s$ рад/с. Спектральна щільність енергії $\Psi_x(f) = |S_x(f)|^2$ визначається в дискретизованому вигляді на частотах kF як $\Psi_x(kF) = |S_x(kF)|^2$, а значення повної енергії

$$E_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_x(f) df \text{ сигналу можна отримати через дискретні значення як } E_x = \frac{1}{NT_s} \sum_{k=0}^{N-1} |S_x(kF)|^2.$$

Для кількісної оцінки ефективності використання частотної смуги доцільно використати коефіцієнт $K_{\text{еф.вук}}$, який показує відношення енергії досліджуваного сигналу до можливої енергії сигналу в разі, якщо його спектральна щільність енергії рівномірна, і її рівень дорівнює максимальному значенню щільності досліджуваного сигналу:

$$K_{\text{еф.вук}} = \frac{E_x}{E_{\text{max}}}, \quad (3)$$

де E_{max} - максимально можлива енергія сигналу, в разі рівномірної спектральної щільності,

E_x - енергія досліджуваного сигналу $x(t)$.

Однобічна спектральна щільність енергії змодельованого частотно модульованого за лінійним законом сигналу представлено на рис. 1. Параметри сигналу наступні: тривалість 13 с, енергія 13 Дж, база 11,14 дБ, форма модульованого сигналу синусоїдна, протягом тривалості сигналу значення частоти модульованого сигналу змінюється від 1 до 2 Гц. Як можна побачити, використання частотної смуги каналу є відносно рівномірним, з наявністю локальних екстремумів, що розташовані на частотах кратних до оберненої тривалості сигналу. У даному випадку, максимальне значення щільності енергії сигналу

складає 18,47 Дж/Гц, а потенційне значення енергії в смузі частот 1 Гц, відповідно 18,47 Дж, отже, значення коефіцієнту дорівнює $13 \text{ Дж} / 18,47 \text{ Дж} = 0,704$.

Спектральна щільність енергії змодельованого МС сигналу наведена на рис. 2. Параметри сигналу повністю аналогічні розглянутому вище. Сигнал є адитивною сумішшю 13-ти синусоїдних складових з однаковою початковою фазою в смузі частот 1 Гц, з відстанню між ними 1/13 Гц. Як можна побачити, використання частотного ресурсу є суттєво нерівномірним. Значення коефіцієнту складає близько 0,4.

Спектральна щільність енергії змодельованого сигналу FHSS подано на рис. 3. Як можна побачити, характерним є те, що енергія сигналу відносно рівномірно розподілена у частотній області, значення коефіцієнту складає 0,62, проте, слід зауважити, що спектрограма представлена рис. 3 розрахована протягом усієї тривалості символного інтервалу (для поданого сигналу тривалість 16 с).

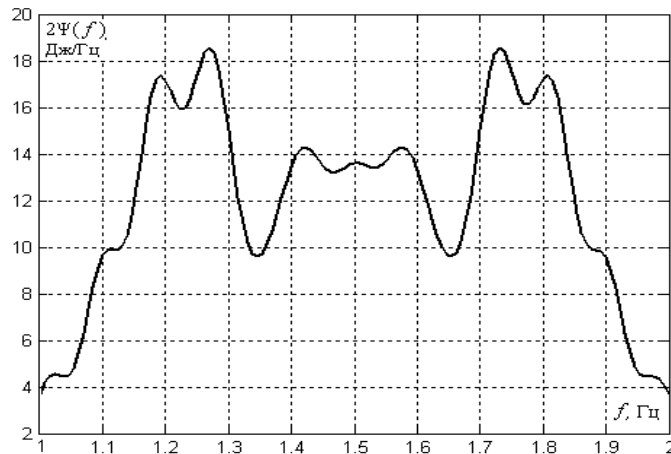


Рис. 1. Спектральна щільність енергії FM сигналу.

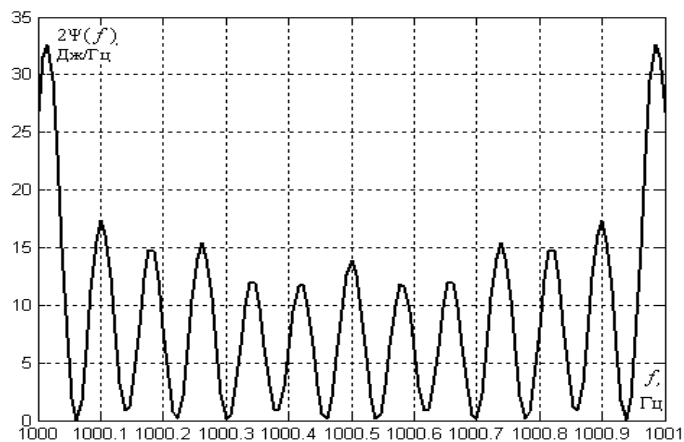


Рис. 2. Спектральна щільність енергії МС сигналу.

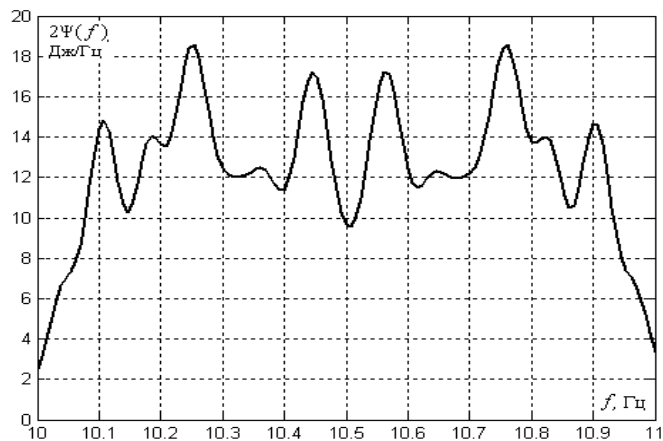


Рис. 3. Спектральна щільність енергії FHSS сигналу.

Якщо ж розгляд обмежити тривалістю елементарного сигналу (для даного випадку 4 с), то можна побачити, що протягом його тривалості використовується тільки одне значення частоти, а енергія на всіх решта частотах практично відсутня, що пояснюється принципом формування таких сигналів (див. рис. 4). Щільність енергії першого елементарного сигналу показана суцільною лінією, щільності решти сигналів - пунктирною. Таким чином, використання частотного ресурсу для таких сигналів слід вважати суттєво нерівномірним. Коефіцієнт використання для розглянутого сигналу складає близько 0,25.

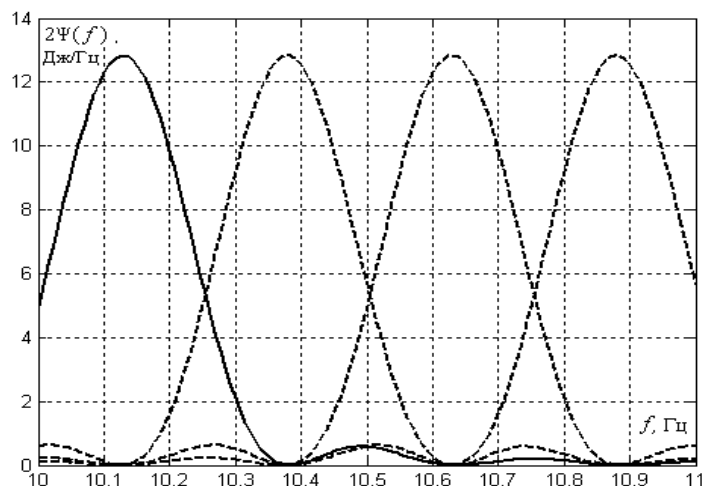


Рис. 4. Спектральні щільності енергії елементарних сигналів FHSS

Однобічна спектральна щільність енергії одного з варіантів змодельованого DSSS сигналу, сформованого за допомогою 13-бітового коду Баркера наведена на рис. 5. Параметри сигналу наступні: тривалість сигналу 13 с, тривалість елементарного сигналу 1 с, енергія 13 Дж, база 11,14 дБ. Графічне представлення наведено для смуги частот від 0 до 1 Гц, що відповідає інтервалу до першого нуля спектральної щільності енергії елементарного сигналу.

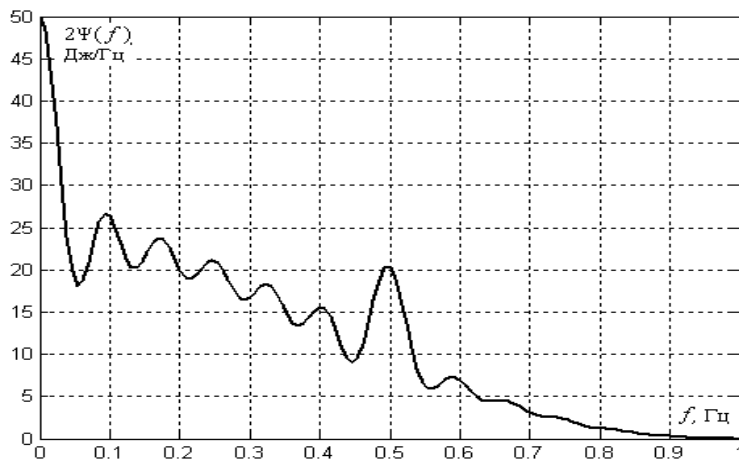


Рис. 5. Спектральна щільність енергії DSSS сигналу Баркера.

Як можна побачити з рис. 5, використання частотного ресурсу є нерівномірним. Значення коефіцієнту складає 0,26. Низьке значення коефіцієнту, в даному випадку, пояснюється наявністю значного рівня постійної складової, обумовленої незбалансованістю сигналу Баркера з довжиною 13.

Спектральна щільність енергії сигналів з керованою ентропією аналогічна до щільності випадкового сигналу з характеристиками наближеними до характеристик "білого шуму" і є рівномірною. На рис. 6 подано ідеалізований графік однобічної спектральної щільності для такого фільтрованого сигналу в смузі від 0 до 1 Гц. Параметри обрані такі: тривалість сигналу 13 с, енергія 13 Дж. У порівнянні з результатами, що представлені на рис. 1 – 5 можна зробити висновок, що у цьому випадку використання

частотного ресурсу є суттєво рівномірнішим і для ідеалізованого випадку дорівнює одиниці. Проте, оцінки спектрів змодельованих сигналів показують, що спектральна щільність хоча і може бути апроксимована такою залежністю, вона містить випадкові відхилення від ідеалізованої кривої. Для змодельованого сигналу, щільність енергії якого, представлено на рис. 7, значення коефіцієнту складає близько $13/16 = 0,81$.

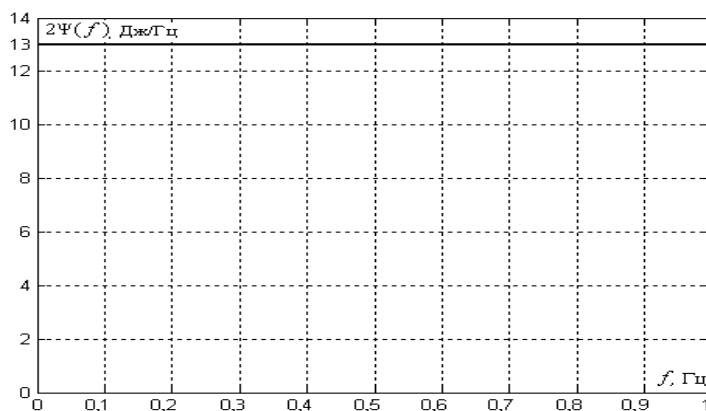


Рис. 6. Ідеалізована спектральна щільність енергії випадкового сигналу з параметрами наближеними до "білого" шуму.

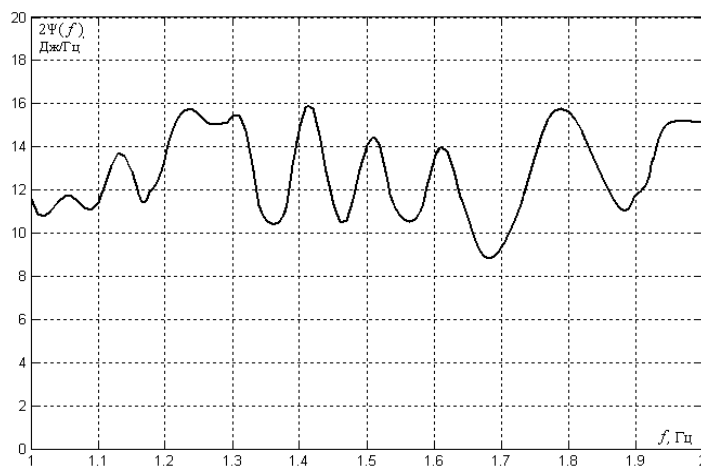


Рис. 7. Спектральна щільність енергії випадкового сигналу з параметрами наближеними до "білого" шуму.

Як відомо з [3], усі позитивні якості широкосмугових сигналів проявляються тим виразніше, чим рівномірніше є розподіл енергії за частотами. Отже, слід очікувати покращення характеристик обміну даними між комунікаційними засобами комп'ютерних систем саме для випадку застосування останніх розглянутих сигналів.

Отримані коефіцієнти для різних типів сигналів подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти ефективності використання частотного ресурсу

Тип сигналу	FM	MC	FHSS	DSSS	Зм.ен тропія
$K_{\text{эф.вик}}$	0,704	0,4	0,62	0,26	0,81

Отже, в роботі отримано числові характеристики ефективності використання частотного ресурсу при формуванні широкосмугових сигналів за найбільш поширеними методами.

Основними перспективними напрямками подальшого дослідження є вдосконалення процедури оцінювання ентропії, з метою мінімізації помилки та суттєвого прискорення обчислень при цифровому опрацюванні сигналів, підвищення ефективності процедури демодуляції, реалізація методів ефективної бітової синхронізації тощо.

Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Бернард. – Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1004 с. : ил. – Парал. тит. англ.
2. Прокис Дж. Цифровая связь / Прокис Дж.: Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 598 с.
3. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Варакин Л. Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Шахнович И. Сверхширокополосная связь. Второе рождение ? / Шахнович И. // Электроника: НТБ. – 2001. – № 4. – С. 8 – 15.
5. Бунин С. Назад к Герцу ? / Бунин С. // Радио. – 1990. – №7. – М. : Патриот, 1990. – С. 17 – 20.
6. Дубровский В. Анализ возможностей применения хаоса в современных системах связи [Электронный ресурс] / В. Дубровский . – Режим доступа: http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/haos2.html
7. Бельский Ю. Л. Передача информации с помощью детерминированного хаоса / Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С. // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38. – № 7. – С. 1310 – 1315.
8. Пат. 81017 Україна, МПК(2006) H04B 1/69. Спосіб передавання та приймання інформації / Мельничук С. І., Козленко М. І. (Україна). – заявка № а 2005 08893; заявл. 19.09.2005; опубл. 26.11.2007, Бюл. № 19.
9. Козленко М. І. Формування та обробка широкосмугових сигналів на основі випадкових процесів зі змінною ентропією розподілу імовірностей станів / Козленко М. І., Мельничук С. І. // Наукові вісті інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – 2006. – № 1(9). – Івано-Франківськ: Інститут менеджменту та економіки "Галицька академія", 2006. – С. 28 – 31.
10. Криксунов В. Г. Спектральний аналіз електричних сигналів / Криксунов В. Г. – Київ: Техніка, 1971. – 196 с.
11. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов: Справочник / Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
12. Ануфриев И. Е. MATLAB 7 / Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.: ил. – ISBN 5-94157-494-0.