

О. А. Нагорнюк

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ КОРОТКОТРИВАЛИХ СИГНАЛІВ ІЗ ЧАСТОТНОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

У статті запропоновано спосіб визначення несучої частоти короткотривалих сигналів із частотною маніпуляцією, що ґрунтується на пошуку домінуючих гармонік, різниця значень частот яких близька до частоти рознесення піднесучих. У телекомунікаційних системах із пакетними видами передач закон розподілу символів модулюючої послідовності не завжди є рівномірним, що за обмеженої тривалості сигналу призводить до збільшення похибок визначення параметрів частотної маніпуляції. Зростання похибок пов'язано зі спотворенням амплітудно-частотного спектра сигналу та зниженням імовірності правильної ідентифікації гармонік піднесучих коливань. Для покращення точності визначення несучої частоти в запропонованому способі використовується апріорна інформація про значення частоти рознесення піднесучих коливань та кратності маніпуляції. Розроблений підхід полягає в отриманні амплітудно-частотного спектра сигналу, розрахунку порога пошуку домінуючих гармонік, визначенні їх частот, що відповідають піднесучим коливанням, та обчисленні несучої частоти як середньоарифметичного їх значення. Для розрахунку спектра сигналу застосовано метод модифікованої періодограми Уелча з низькою дисперсією спектральних оцінок. Порог пошуку гармонік визначається автоматично на основі статистичних характеристик амплітудно-частотного спектра. Серед гармонік з амплітудами більше порогового значення визначають такі, різниця частот між якими найближча до частоти рознесення піднесучих. Проведені моделювання в програмному середовищі MATLAB показали, що похибка визначення несучої частоти зменшилася удвічі порівняно з класичним підходом за відношення сигнал/шум від -15 дБ, а розроблений спосіб працездатний у разі ймовірності появи символів модулюючої послідовності від 0,5 до 0,8.

Ключові слова: радіосигнал; частотна маніпуляція; параметр; частота; визначення; автоматизація; періодограма; амплітудно-частотний спектр; імовірність.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Визначення параметрів сигналів є першочерговим завданням, яке вирішується в системах радіомоніторингу. Якість його виконання безпосередньо впливає на результати подальшого розпізнавання, демодуляції та пеленгації джерел радіовипромінювання [1]. У сучасних засобах цифрового радіозв'язку часто використовують радіосигнали з частотною маніпуляцією (ЧМн), сформовані в режимі псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) [2]. Для приймання та демодуляції таких сигналів необхідно знати кратність маніпуляції, символну швидкість, девіацію частоти та несучу частоту. Перші три параметри є однаковими для різних частотних елементів ППРЧ, а несуча частота змінюється з кожним стрибком та має постійно обчислюватися підсистемою визначення параметрів комплексу радіомоніторингу [1]. Розрахунок несучої частоти має низку ускладнень, пов'язаних із широким діапазоном перестроювання робочої частоти, малою тривалістю частотного

елемента та низьким відношенням сигнал/шум (ВСШ). Тому актуальним науково-практичним завданням є удосконалення відомих підходів до визначення несучої частоти ЧМн сигналів з урахуванням особливостей ППРЧ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі методи та способи визначення несучої частоти ЧМн сигналів ґрунтуються на аналізі характеристик амплітудно-частотного спектра (АЧС), гістограми миттєвої частоти та статистичних параметрів переходів через нульовий рівень. Перший підхід має порівняно низьку розрахункову складність та базується на апробованих методах спектрального аналізу [2–4], другий потребує визначення миттєвої частоти сигналу, що значно збільшує кількість обчислювальних операцій [5], точнісні характеристики третього підходу сильно залежать від ВСШ [6–7]. Загальним недоліком методів є висока похибка розрахунку несучої частоти обмежених за тривалістю сигналів із нерівномірним законом розподілу ймовірностей бітового потоку.

Формулювання завдання дослідження. Метою досліджень є підвищення точності визначення несучої частоти короткотривалих ЧМн сигналів із нерівномірним законом розподілу ймовірностей бітового потоку.

Вхідними даними для способу є комплексні відліки сигнальної суміші, отримані на виході радіоприймального пристрою (РПрП), кратність маніпуляції M та частота рознесення піднесучих f_r . Вважається, що сигнал на передавальній стороні сформовано відповідно до визначених вимог [8], він не комбінований та має один із видів багатопозиційної ЧМн.

Математичну модель сигнальної суміші на виході РПрП можна записати в такий спосіб [8]:

$$r(t) = ae^{j\left(2\pi f_c t + \theta + j \sum_{k=1}^K 2\pi f_k g(t-kT)\right)} + \xi(t), \quad (1)$$

де $f_k \in \left\{ (2m-1-M) \frac{f_r}{2}, m=1, \dots, M \right\}, k=1, \dots, K$;

$\{f_k\}_{k=1}^M$ – частоти піднесучих кінцевого алфавіту ЧМн;

f_r – частота рознесення піднесучих;

$g(t)$ – імпульсна характеристика формувального фільтра;

M – кратність маніпуляції;

a – амплітуда сигналу;

f_c – частота несучого коливання;

θ – початкова фаза несучого коливання;

$\xi(t)$ – адитивний гаусівський шум.

Після здійснення операції аналого-цифрового перетворення з частотою дискретизації F_s отримуємо масив комплексних відліків сигналу $r[i]$. Необхідно визначити частоту несучого коливання f_c .

Виклад основного матеріалу. Відомо, що в АЧС ЧМн радіосигналів більшість потужності зосереджено навколо частот гармонік, що відповідають піднесучим коливанням [4, 8]. Дану особливість використано в класичному способі розрахунку

несучої частоти ЧМн сигналів, який полягає у визначенні частот гармонік із максимальною амплітудою та обчисленні несучої частоти як середнього їх значення [9]. Даний підхід працездатний для аналізу ЧМн сигналів, символівна послідовність яких розподілена за рівномірним законом. Однак у короткотривалих ЧМн сигналах (зокрема в каналах, що використовують розширення спектра методом ППРЧ) закон розподілу символів модулюючої послідовності не завжди рівномірний, що призводить до зміни форми АЧС і, як наслідок, збільшення похибки визначення несучої частоти.

На рис. 1 зображено АЧС двопозиційних ЧМн сигналів (ЧМн-2) для випадку рівноймовірного розподілу бітів модулюючої послідовності, а також коли ймовірність появи одного з бітів ("0" або "1") дорівнює 0,7. Видно, що на рис. 1а АЧС має два близькі за величиною максимуми на частотах f_1 та f_2 , а на рис. 1б амплітуда гармоніки АЧС на частоті f_2 у шість разів менша за амплітуду гармоніки на частоті f_1 , що знижує ймовірність її правильного виявлення та збільшує похибку визначення несучої частоти.

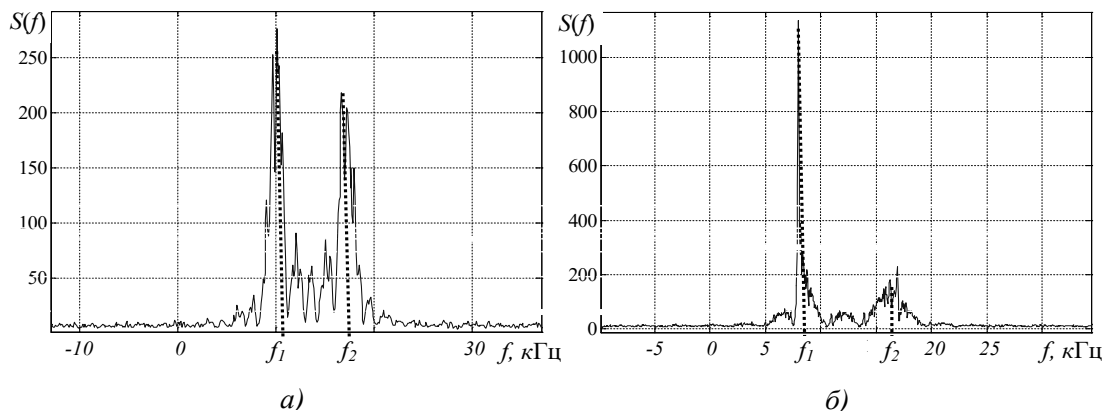


Рис. 1. АЧС ЧМн-2 сигналу: а) біти модулюючої послідовності розподілені за рівномірним законом; б) ймовірність появи бітів у модулюючій послідовності дорівнює 0,7

Для підвищення ймовірності правильного виявлення доміантних гармонік на частотах f_1 та f_2 пропонуємо використати апріорно відоме значення частоти рознесення піднесуних коливань f_r .

Розроблений спосіб визначення несучої частоти ЧМн сигналів складається із такої послідовності операцій:

- обчислення АЧС сигналу;
- розрахунок порога пошуку доміантних гармонік;
- визначення частот гармонік, що перевищують встановлений поріг;
- пошук гармонік, різниця частот яких є найближчою до частоти рознесення піднесуних коливань;
- розрахунок несучої частоти.

Схема способу для визначення несучої частоти ЧМн-2 сигналу зображена на рис. 2.

АЧС сигналу $S(f)$ обчислюють методом модифікованої періодограми Уелча (WL), який має низьку дисперсію спектральних оцінок [10] (блок 2). Даний метод ґрунтується на алгоритмі швидкого перетворення Фур'є, що забезпечує легку практичну реалізацію та високу швидкодію. Масив відліків АЧС $S(n)$ формується із дискретністю $F = F_s/N_s$, де N_s – його розмірність.

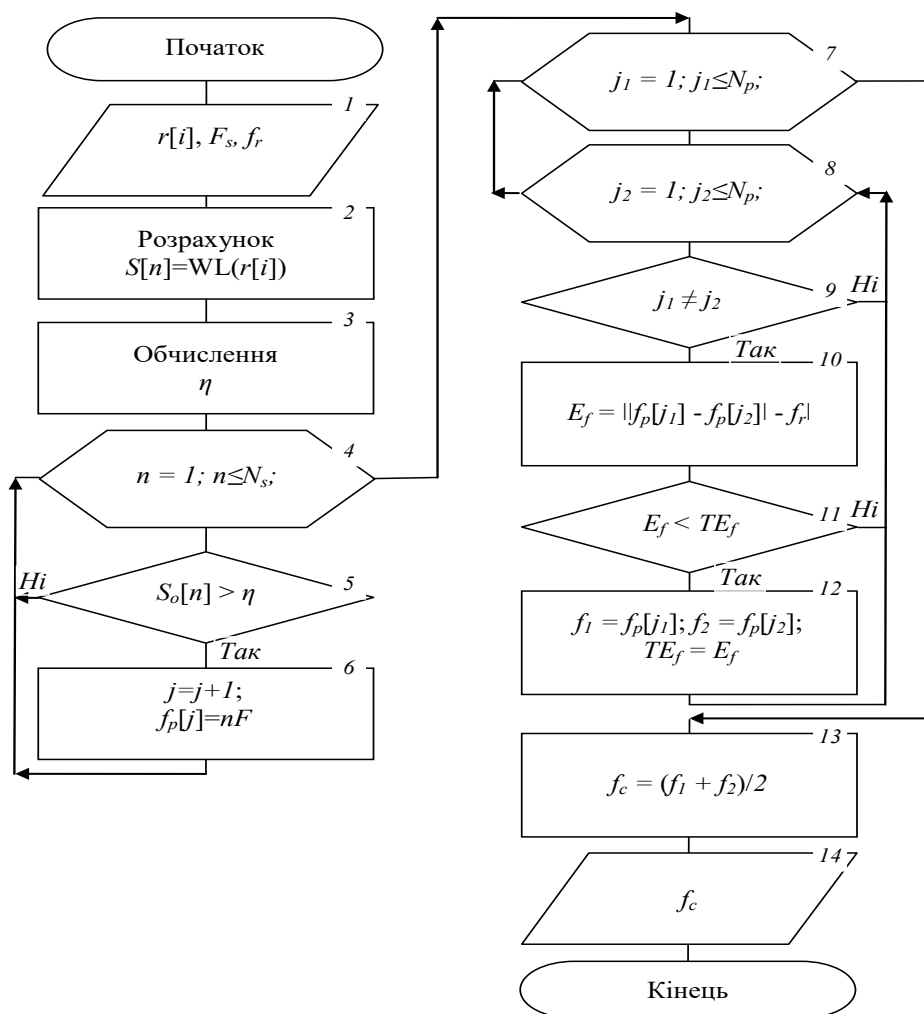


Рис. 2. Схема способу визначення несучої частоти ЧМn-2 радіосигналів

Поріг пошуку домінантних гармонік в АЧС η (блок 3) розраховують за таким виразом:

$$\eta = E(S_o(f)) + k_s STD(S_o(f)), \quad (2)$$

де $E()$ – операція обчислення арифметичного середнього;
 $STD()$ – операція розрахунку середньоквадратичного відхилення;
 $k_s = 1 \dots 3, 5$;
 $S_o(f)$ – АЧС сигналу в діапазоні частот від f_s до f_e :

$$f_s = f_{max} - 2f_r; \quad f_e = f_{max} + 2f_r, \quad (3)$$

де f_{max} – частота гармоніки з максимальною амплітудою в АЧС $S(f)$.

Пошук гармонік, що перевищують встановлений поріг η (блок 4–6), здійснюємо за критерієм

$$\text{if } S_o(f_i) > \eta \text{ then } f_p[j] = f_i, \quad j = 1 \dots N_p, \quad (4)$$

де $f_p[j]$ – масив значень частот домінантних гармонік;
 N_p – кількість гармонік.

У масиві $f_p[j]$ присутні частоти, що відповідають піднесучим коливанням ЧМн сигналу. Їх визначають мінімізацією величини E_f (блок 7–12):

$$E_f = \left| |f_p[j_1] - f_p[j_2]| - f_r \right|; j_1 \neq j_2; j_1 = 1 \dots N_p; j_2 = 1 \dots N_p. \quad (5)$$

Частоти, для яких значення E_f мінімальне, відповідають піднесучим коливанням f_1, f_2 (блок 12), а несучу частоту f_c розраховують як їх арифметичне середнє (блок 13):

$$f_{1_{E_f \rightarrow \min}} = f[j_1]; f_{2_{E_f \rightarrow \min}} = f[j_2]; f_c = \frac{f_1 + f_2}{2}. \quad (6)$$

Отримані вище математичні вирази наведені для двопозиційної ЧМн. Для М-позиційної ЧМн порядок обчислення несучої частоти ідентичний, змінюються лише вирази (5) та (6):

$$E_f = \sum_{m=1}^{M-1} \left| |f_p[j_m] - f_p[j_{m+1}]| - f_r \right|; j_m \neq j_{m+1}; j_m = 1 \dots N_p; \quad (7)$$

$$f_c = \frac{\sum_{m=1}^M f_m}{M}, \quad (8)$$

де f_m – частоти піднесучих коливань, які відповідають мініимальному значенню E_f (7).

Дослідження розробленого способу проводили в програмному середовищі MATLAB. На вхід ЧМн-2 модулятора подавали випадкову послідовність з імовірністю появи бітів від 0,5 до 0,8. Вихідний сигнал переносився на задану несучу частоту, до нього додався білий адитивний гаусівський шум. На кожному кроці параметри модулятора та несуча частота змінювалися за випадковим законом. Несучу частоту сформованого сигналу визначали розробленим та класичним способами. Для кожного значення ВСШ здійснювалося 1000 кроків моделювання, а отримані результати усереднювалися.

Дослідження показали, що похибка визначення несучої частоти запропонованим способом залежить від коефіцієнта k_s , який використовується в розрахунку порога пошуку доміантних гармонік. Значення абсолютної похибки визначення несучої частоти ЧМн-2 сигналу $\Delta \varepsilon$ від ВСШ для $k_s=1 \dots 3, 4$ та ймовірності появи бітів модулюючої послідовності 0,5 і 0,7 зображено на рис. 3.

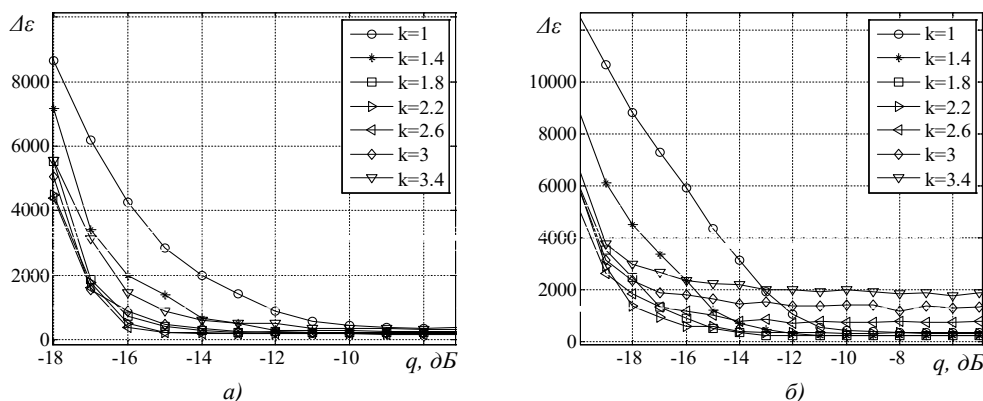


Рис. 3. Залежності абсолютної похибки визначення несучої частоти ЧМн-2 сигналу від ВСШ для значень $k_s=1; 1,4; 1,8; 2,2; 2,6; 3; 3,4$ та ймовірності появи бітів: а) 0,5; б) 0,6

Із рис. 3 видно, що мінімальні похибки визначення несучої частоти ϵ в разі використання у виразі (2) значення параметра k_s від 1,8 до 2,4. Тому в подальшому було застосовано середнє значення із даного діапазону $k_s = 2,2$.

Дослідження ефективності розробленого способу здійснено шляхом його порівняння з класичним способом визначення несучої частоти, який ґрунтується на аналізі АЧС сигналу. Залежності абсолютної похибки визначення несучої частоти двома способами наведено на рис. 4.

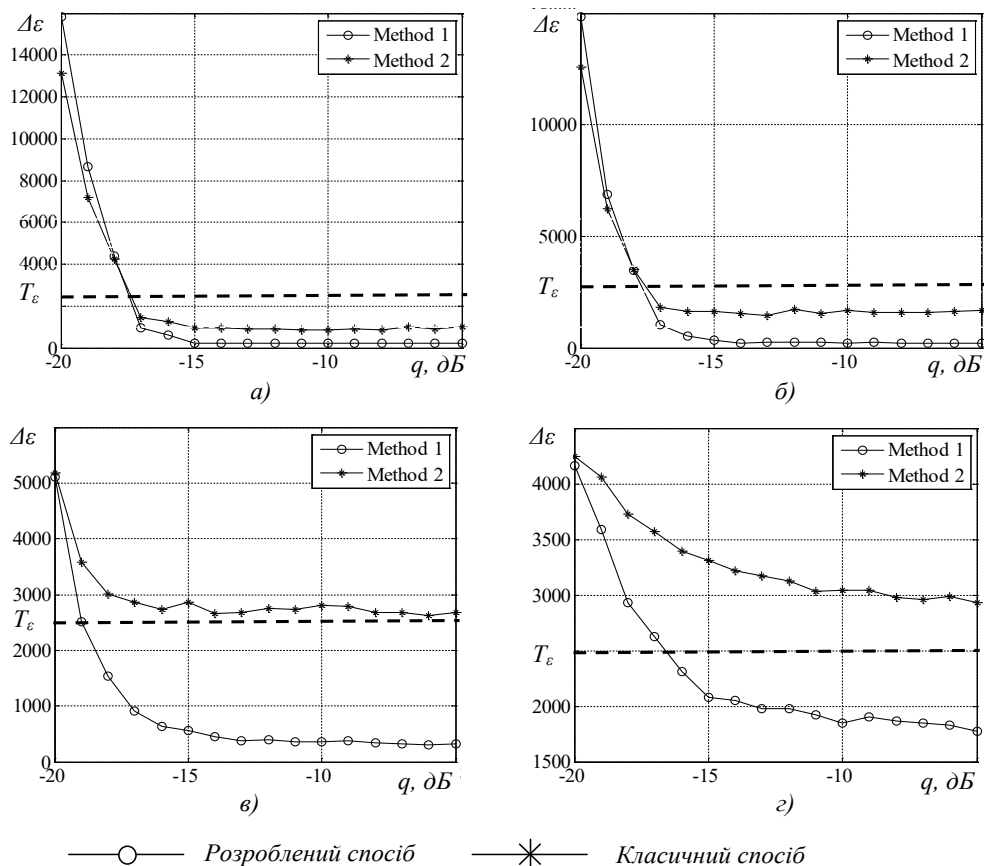


Рис. 4. Абсолютні похибки визначення несучої частоти розробленим та класичним способами для ймовірності появи бітів: а) 0,5; б) 0,6; в) 0,7; г) 0,8

З рис. 4 випливає, що абсолютна похибка визначення несучої частоти класичним способом зростає зі збільшенням ймовірності появи бітів у модулюючій послідовності, а за значення ймовірності більше 0,6 класичний спосіб є непрацездатним, оскільки похибка перевищує встановлений поріг T_ϵ . Абсолютна похибка визначення несучої частоти розробленим способом менше принаймні удвічі від похибки класичного способу за ВСШ від -15 дБ. Вона не перевищує порога T_ϵ за ВСШ від -16 дБ та ймовірності появи бітів від 0,5 до 0,8.

Обчислювальна складність запропонованого підходу залежить від ВСШ сигнальної суміші, оскільки зі зменшенням ВСШ зростає кількість домінуючих гармонік, які перевищують поріг η . У такому разі кількість операцій, розрахованих за формулою (5), дорівнює $N_p^2 - 1$. Моделювання показують, що середня кількість домінуючих гармонік за ВСШ більше -16 дБ не перевищує $N_p = 8$. Тоді розрахунків за виразом (5) буде 63, що значно менше, ніж кількість операцій, реалізованих на попередніх етапах, зокрема для

обчислення АЧС сигналу. Так, алгоритм швидкого перетворення Фур'є розмірністю 4096 вимагає виконання 49152 операцій. Отже, порівняно з класичним способом обчислювальна складність підвищується несуттєво (не більше 0,2%).

Висновки. Підвищення ймовірності появи символів модулюючої послідовності ЧМн радіосигналу призводить до зміни його АЧС та зростання похибки визначення несучої частоти. Для зменшення похибки запропоновано спосіб, що ґрунтується на пошуку домінуючих гармонік в АЧС, різниця частот яких близька до значення частоти рознесення піднесучих коливань. Спосіб потребує апріорної інформації про кратність маніпуляції та частоту рознесення піднесучих, а його обчислювальна складність зростає не більше ніж на 0,2% порівняно із класичним. Похибка визначення несучої частоти розробленим способом у разі ВСШ від -16 дБ не перевищує порогового рівня за ймовірності появи символів модулюючої послідовності від 0,5 до 0,8 та є меншою принаймні удвічі порівняно із класичним підходом.

Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на удосконалення способу з метою забезпечення його роботи в умовах апріорної параметричної невизначеності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. Radio monitoring: automated systems and their components. Springer international publishing AG. London, 2018. 457 p.
 2. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : Монография. Санкт-Петербург, 2013. 166 с.
 3. Technical identification of digital signals. Recommendation ITU-R SM.1600-3. Spectrum management. Geneva, 2017. 32 p.
 4. Нагорнюк О. А., Павлюк В. В. Методика автоматизованого розрахунку параметрів частотної маніпуляції в умовах апріорної невизначеності // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ, 2016. Вип. 2 (26). С. 74–80.
 5. Qin Y., Lv M. A new method of parameter estimation of frequency-hopping signal // 2nd International Conference on Information, Electronics and Computer. Wuhan, 2014. P. 138–141.
 6. Xiong H. Zeng D., Xiong H., He X. Parameter estimation approach of FSK/PSK Radar Signal // Journal of electronic science and technology. China, 2010. P. 341–345.
 7. De Vito L., Dobre O. A. Joint classification and parameter estimation of compressive sampled FSK signals // 20th IMEKO TC4 international symposium and 18th international workshop on ADC modelling and testing. Benevento, 2014. P. 473–479.
 8. Skliar B. Digital communication fundamentals and application. 2nd ed. New-York, 2001. 1072 p.
 9. Benvenuto N., Cherubini G. Algorithms for communications systems and their applications. Chichester, 2003. 1285 p.
 10. Ifeachor E., Jervis B. Digital signal processing: a practical approach. 2nd ed. Harlow, 2002. 933 p.
- 152

Подано 29.07.2019

А. А. Нагорнюк**СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ КРАТКОВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

В статье предложен способ определения несущей частоты кратковременных сигналов с частотной манипуляцией, основанный на поиске доминантных гармоник, разность значений частот которых близка к частоте разнесения поднесущих. В телекоммуникационных системах с пакетными видами передач закон распределения символов модулирующей последовательности не всегда равномерный, что при ограниченной длительности сигнала приводит к увеличению погрешностей определения параметров частотной манипуляции. Рост погрешностей связан с искажением амплитудно-частотного спектра сигнала и снижением вероятности правильной идентификации гармоник поднесущих колебаний. Для улучшения точности определения несущей частоты в предложенном способе используется априорная информация о значении частоты разнесения поднесущих колебаний и кратности манипуляции. Разработанный подход заключается в получении амплитудно-частотного спектра сигнала, расчете порога поиска доминантных гармоник, определении их частот, соответствующих поднесущим колебаниям, и вычислении несущей частоты как их среднеарифметического значения. Для расчета спектра сигнала применен метод модифицированной периодограммы Уэлча с низкой дисперсией спектральных оценок. Порог поиска гармоник определяется автоматически на основе статистических характеристик амплитудно-частотного спектра. Среди гармоник с амплитудами больше порогового значения определяют такие, разность частот между которыми наиболее близка к частоте разнесения поднесущих. Проведенные моделирования в программной среде MATLAB показали, что погрешность определения несущей частоты уменьшилась вдвое по сравнению с классическим подходом при отношении сигнал/шум от -15 дБ, а предложенный способ работоспособен для вероятности появления символов модулирующей последовательности от 0,5 до 0,8.

Ключевые слова: радиосигнал; частотная манипуляция; параметр; частота; определение; автоматизация; периодограмма; амплитудно-частотный спектр; вероятность.

О. А. Nahorniuk**METHOD OF AUTOMATIC DETERMINATION OF THE CARRIER FREQUENCY OF SHORT-TIME FREQUENCY-SHIFT KEYING SIGNALS**

Method for determination of the carrier frequency of short-time frequency-shift keying signals based on searching for dominant harmonics whose frequency difference is close to the subcarrier spacing frequency is proposed in the article. In telecommunication systems with burst transmissions, the symbol distribution law of the modulating sequence is not always uniform, which under a limited signal duration leads to an increase in the errors in determining the frequency-shift keying parameters. The increase in errors is due to distortion of the amplitude-frequency spectrum of the signal and a decrease in the probability of the correct identification of

the subcarrier oscillations harmonics. To improve the accuracy of determining the carrier frequency proposed method uses a priori information about the value of the spacing frequency of the subcarrier oscillations and the multiplicity of frequency-shift keying. The developed approach consists in obtaining the amplitude-frequency spectrum of the signal, calculating the search threshold of dominant harmonics, determining their frequencies which correspond to subcarrier oscillations, and calculating the carrier frequency as their arithmetic mean value. To calculate the signal spectrum was used the modified Welch periodogram method with has a low dispersion of spectral estimates. The harmonic search threshold is determined automatically based on the statistical characteristics of the amplitude-frequency spectrum. Among harmonics with amplitudes greater than the threshold value, those are determined that the frequency difference between which is closest to the subcarrier spacing frequency. The simulations performed in the MATLAB software environment showed that the error in determining the carrier frequency was halved compared to the classical approach under signal-to-noise ratio from -15 dB, and the developed method was efficient if the symbol appearance probability were from 0,5 to 0,8.

Keywords: *radio signal; frequency-shift keying; parameter; frequency; determination; automation; periodogram; amplitude-frequency spectrum; probability.*