

255 chips and can increase the occupied spectrum by eight times. It is shown that the autocorrelation properties of the sequence degrade when a bit sequence has bits with different signs in binary phase modulation. By employing computer simulation, autocorrelational properties of the coding sequence are studied, as well as its performance in information transmission on the background of the internal noise and external interference. Computer simulation was carried out for a number of desired signal values. Those values were selected to study behavior of the scrambling coding sequence in difficult interference situations; the total noise and interfering signal to desired signal ratio assumed values of 6, 9 and 12 dB. It is proven that synthesized coding sequence permits to substantially improve information transmission quality indicators; even if the above ratio equals 12 dB, the desired signal can be extracted from the mixture of the internal noise and interfering signal and the transmitted bit sequence can be identified. Designed coding sequence is proposed to be used for bit sequences scrambling in practical implementations of telecommunication channels. Further research is aimed to study properties of the coding sequences based on the primitive polynomials of the order higher than eight.

Keywords: telecommunication networks; primitive polynomials; scrambling coding sequences; channel quality indicators; computer simulation; information systems.

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.025560

О. Л. ТУРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент,
Державний університет телекомунікацій, Київ

АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ ФАЗОМОДУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ПІД ЧАС ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У НЕПЕРЕРВНОМУ РЕЖИМІ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЇ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

Проблеми передавання сигналів у сучасних супутникових системах визначаються певними особливостями як побудови самої системи, так і проблемами оброблення приймання та передавання сигналу. Для демодуляторів супутникових модемів, що працюють із неперервним вхідним сигналом, найбільш значущою є проблема синхронізації за частотою несучого коливання. Вказане завдання синхронізації фактично зводиться до оцінювання істинних параметрів сигналу, а саме оцінювання несучої частоти. У статті розглянуто процес оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі. Запропоновано функціональні залежності та на їх основі розроблено алгоритм, який дає змогу здійснити двоетапне оцінювання несучої частоти за правилом максимальної правдоподібності (МП-оцінка) з урахуванням умови невизначеності всіх параметрів сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі з мінімальним інтервалом спостереження.

Досягнення мінімального інтервалу спостереження в поданому алгоритмі оцінювання несучої частоти забезпечується використанням функції швидкого перетворення Фур'є та двома етапами оцінювання: етапом визначення мінімальної дисперсії оцінки несучої частоти та етапом оцінювання максимуму частоти в спектрі сигналу.

Результати моделювання за запропонованим алгоритмом показали практичну реалізуємість поданих функціональних залежностей та актуальність застосування запропонованого алгоритму оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі.

Ключові слова: оцінювання несучої частоти сигналу; мінімально гранична дисперсія оцінки несучої частоти; оцінювання максимуму частоти в спектрі сигналу; функція швидкого перетворення Фур'є.

Вступ

Проблеми передавання сигналів у сучасних супутникових системах визначаються певними особливостями як побудови самої системи, так і проблемами оброблення приймання та передавання сигналу. Необхідно зауважити, що для демодуляції сигналів у сучасних супутникових системах зв'язку є потреба демодулювати сигнали, які передаються як у пакетному, так і в неперервному режимах.

Характерною особливістю супутникового каналу зв'язку є істотна невизначеність сигналу, що приймається по частоті (частотна невизначеність сигналу.) Ця особливість породжується переважним використанням у розглянутих системах фазової модуляції сигналів під час приймання сигналу, призначеного для передавання корисної інформації в неперервному режимі. Для демодуляторів супутникових модемів, що працюють із неперервним вхідним сигналом, найбільш значущою є проблема синхронізації за частотою несучого коливання. Зазначене завдання синхронізації фактично зводиться до оцінювання істинних параметрів сигналу, що приймається, — ν , ϕ , τ , d , знання параметрів яких необхідно для демодуляції сигналу $z(t)$ [1]. Найкращі результати може дати сумісне оцінювання невідомих параметрів сигналу. Однак на практиці реалізувати таке оцінювання в каналі з низькою енергетикою і з великою частотною невизначеністю сигналу, що приймається в неперервному режимі, не є можливим. Тому оцінювання зміщення несучої частоти сигналу, що приймається, відносно номінального значення, проводять до того, як розпочинаються інші процедури синхронізації, а саме: синхронізація за фазою і синхронізація за тактовою частотою [1; 2].

© О. Л. Туровський, 2020

Постановка задачі. Для розв'язання завдання оцінювання несучої частоти ФМ сигналу в умовах невизначеності інформації про початкову фазу сигналу φ , про його затримку τ і про передану інформаційну послідовність d у низці праць обґрунтовується доцільність застосування правила максимальної правдоподібності. Відомо, що використання правила максимальної правдоподібності для оцінювання несучої частоти (МП-оцінка) забезпечує асимптотично ефективні і асимптотично незміщені її оцінки [3].

За наявності інформації про параметри $\{d, \varphi, \tau\}$ МП-оцінка ν несучої частоти може забезпечити мінімальну граничну дисперсію, яка визначатиметься нижньою межею Крамера-Рао [3; 4].

У разі великих інтервалів спостереження $(K \gg 1)$ нормована межа Крамера-Рао оцінювання несучої частоти фазомодульованого сигналу може бути подана як функціональна залежність від поодинокого імпульсу E_S сигналу, інтервалу T_S проходження інформаційних імпульсів комплексної обвідної сигналу, що приймається, та інтервалу N_0 , на якому здійснюється оцінювання [4].

Когерентність оброблення сигналу, що передається в неперервному режимі в демодуляторі супутникових систем зв'язку, зумовлює надзвичайно жорсткі вимоги до точності оцінки фази несучого коливання у відповідній петлі демодулятора з фазово-автоматичним підстроюванням частоти (ФАПЧ демодулятор) [1; 3; 4]. Через це смуга петлі B_C зазвичай не повинна перевищувати тисячних долів тактової частоти сигналу, що приймається, — близько $10^{-3} 1/T$ [1; 5]. А для надійного входження системи автопідстроювання в синхронізм дисперсія δ_C^2 оцінки несучої частоти ФМ сигналу не повинна перевищувати B_C^2 . Тобто δ_C^2 має бути не більш як $10^{-5} 1/T^2$ [1]. У подальшому прийемо, що для дисперсії оцінки несучої частоти ФМ сигналу за малих відношень сигнал/шум на біт інформації (від 0 до 12 Дб) має виконуватись така вимога [1; 5]

$$\delta_C^2 T^2 \leq 5 \cdot 10^{-6}. \quad (1)$$

У свою чергу швидкодія систем супутникового зв'язку потребує зменшення часу оцінювання, досягти якого можна зменшивши інтервал спостереження [6]. Одним із шляхів зменшення інтервалу спостереження є використання в алгоритмі оцінювання несучої частоти функції швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [7; 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням визначення оцінки несучої частоти сигналу, що приймається системою зв'язку в неперервному режимі, та розроблення порядку проведення вказаного оцінювання присвячено низку праць.

Автори роботи [9] запропонували алгоритм сумісного оцінювання несучої частоти, її синхронізації та визначення зсуву несучої частоти в каналах із адитивним білим гауссівський шумом. Зазначений алгоритм використовує фільтр частот із наступною вибіркою вхідних імпульсів за важливістю, враховує попередній розподіл параметрів оцінювання та містить рекомендації щодо повторної вибірки для вирішення проблеми виродження і точного настроювання оцінних значень частоти вхідного сигналу. Питання зменшення інтервалу оцінювання в даній роботі не розглядалися.

У статті [10] запропоновано метод здійснення синхронізації послідовності, що розширюється в умовах значного перевищення рівня шуму над рівнем інформаційного сигналу. Для синхронізації використовується службовий канал, який працює на одній частоті з інформаційним. Розподіл каналів проводиться під час формування сигналів квадратурних каналів: синфазний канал використовується для формування фазоманіпульованого сигналу з розширенням спектра, квадратурний канал — для передавання сигналу тактової частоти. У запропонованому авторами алгоритмі синхронізації відсутні дані та процедури обчислення, що враховують інтервал оцінювання.

У роботі [11] досліджено варіант технічної реалізації швидкодючого алгоритму відновлення несучої частоти методом безпосереднього підстроювання фази опорного генератора з одночасним усуненням неоднозначності фази і виділення кадрової синхронізації з використанням узгоджених фільтрів із послідовностями Баркера. Застосування такого алгоритму передбачає попереднє оцінювання несучої частоти вхідного сигналу, але без визначення та врахування інтервалу оцінювання.

Автор роботи [12] пропонує підхід до зменшення похибки оцінювання несучої і символічної частоти сигналів із цифровою модуляцією методами, що базуються на аналізі частотних характеристик сигналу. В основу підходу покладено розрахунок першої похідної функції спектральної густини та пошук нуля ітераційним методом хибного положення. Такий підхід дозволяє забезпечити відносну точність оцінювання частоти до 10^{-7} за неістотного збільшення кількості обчислювальних операцій, але питання підвищення швидкодії системи та безпосередньо врахування інтервалу оцінювання в даній роботі не розглядається.

У [13] на основі відносних кореляційних характеристик псевдошумової послідовності розроблено алгоритм оцінювання несучої частоти, що використовує преамбулу із вказаною послідовністю. Результати оцінювання зазначеного алгоритму, подані в роботі, показали його відносну ефективність щодо

точності оцінювання, економію щодо ресурсів системи і стійкість за нестійкого стану каналу зв'язку. Питання впливу інтервалу оцінювання несучої на ефективність роботи системи частоти у статті не розглядалися.

У роботах [14; 15] обговорюються питання підвищення точності оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається, збільшення швидкодії системи оцінювання несучої частоти, ресурсозберігання системи приймання сигналу в умовах нестійкого стану каналу приймання вхідного сигналу і низького відношення сигнал/шум. Пропонується використання псевдошумової послідовності у процесі розроблення алгоритму оцінювання та відновлення несучої частоти. Питання зменшення інтервалу оцінювання в зазначених роботах не розглянуто.

Основна частина

Для відшукування МП-оцінки несучої частоти сигналу потрібно максимізувати функцію, яка має такий загальний вигляд [18]:

$$L(\tilde{\nu}) = \sum_k \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |y(\tilde{\nu}, t)|^2 d\tilde{t}. \quad (2)$$

Згідно з результатами, наведеними в [19], вираз для граничної дисперсії, нормованої до квадрата тактової частоти сигналу, що приймається, може бути подано так:

$$\sigma_v^2 T^2 = \frac{2a}{\pi^2 K} \frac{1}{E_S/N_0} \left(1 + \frac{1}{E_S/N_0} \right). \quad (3)$$

Інтеграл виразу (2) визначає енергію сигналу на виході узгодженого фільтра (УФ), заміряну на інтервалі спостереження. Відповідно до теореми Парсеваля можна записати [18;19]:

$$L(\tilde{\nu}) = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 |H_T(f - \tilde{\nu})|^2 df, \quad (4)$$

де $H_T(f) = \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} h(t) \exp(-j2ft) dt$ — перетворення Фур'є від $h(t)$ на інтервалі спостереження; $|S(f)|$ — амплітудний спектр сигналу, що приймається, отриманий на інтервалі T_0 .

Аналіз виразу (4) показує, що на його основі можна побудувати алгоритм оцінювання частоти несучого коливання.

Фактично цей підхід до оцінювання унаочнює структура, подана на рис. 1, в якій реалізовано набір фільтрів, що охоплюють діапазон частот $-\nu_{\max} \leq \tilde{\nu} \leq \nu_{\max}$ [20].

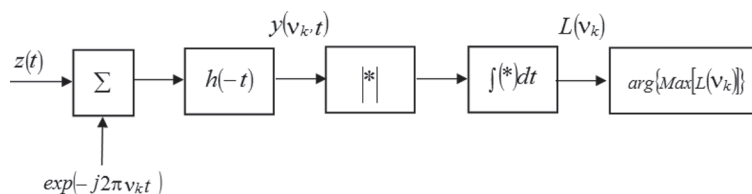


Рис. 1. Структурна схема послідовного обчислення МП-оцінки

А алгоритм оцінювання зводиться до вибору за критерієм максимуму енергії сигналу на виході того чи іншого набору фільтрів.

Таким чином, можна дістати правило обчислення оцінки несучої частоти сигналу, що приймається, за правилом максимальної правдоподібності (МП-оцінку):

$$\tilde{\nu}_0 = \arg \left\{ \max_{-\nu_{\max} \leq \tilde{\nu} \leq \nu_{\max}} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 |H_T(f - \tilde{\nu})|^2 df \right\} \right\}, \quad (5)$$

де $\tilde{\nu}_0$ — оцінка, яку відшукуємо.

Уведемо заміну змінних і перепишемо (5) у вигляді

$$\tilde{\nu}_0 = \arg \left\{ \max_{-\nu_{\max} \leq \tilde{\nu} \leq \nu_{\max}} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f + \tilde{\nu})|^2 |H_T(f)|^2 df \right\} \right\}. \quad (6)$$

Припустимо, що інтервал спостереження багато більший за довжину імпульсної характеристики УФ. Тобто, модуль спектра $|H_T(f)|$ можна апроксимувати характеристикою $H(f)$. Оскільки фільтр Найквіста є частотно-обмеженим, правило (6) можна переписати у вигляді

$$\tilde{\nu}_0 = \arg \left\{ \max_{-v_{\max} \leq \tilde{\nu} \leq v_{\max}} \left\{ \int_{\frac{1+a}{2T}}^{\frac{1+a}{2T}} |S(f + \tilde{\nu})|^2 |H(f)|^2 df \right\} \right\}. \quad (7)$$

Зауважимо, що вираз (7) можна пояснити як вибір максимуму в згортці амплітудного спектра сигналу, що приймається, здобутого на інтервалі спостереження з амплітудно-частотною характеристикою узгодженого фільтра (АЧХ УФ). Для отримання оцінки несучої частоти сигналу, що приймається, достатньо відшукати максимум згортки (7) за всіма частотами, що входять у діапазон $-v_{\max} \leq \tilde{\nu} \leq v_{\max}$.

Покажемо, що обрахування МП-оцінки несучої частоти фазомодульованого сигналу може бути реалізовано на основі використання ШПФ [18; 21].

Нехай довжина ШПФ дорівнює N_f , а частота дискретизації сигналу, що приймається, дорівнює F_d .

Інтеграл (7) можна подати у вигляді

$$\int_{\frac{1+a}{2T}}^{\frac{1+a}{2T}} |S(f + \tilde{\nu})|^2 |H(f)| df \approx \sum_{k=-M_1}^{M_1} |S(m\Delta f + k\Delta f)| H(k\Delta f) \Delta f, \quad (8)$$

де $\Delta a = \frac{F_d}{N_f}$; $M_1 = \left\lfloor \frac{1+a}{2F_d T} N_f \right\rfloor$; $m = -N_{\max}, \dots, 0, 1, \dots, N_{\max}$; $N_{\max} = \left\lfloor \frac{v_{\max}}{F_d} N_f \right\rfloor$; $\lfloor * \rfloor$ — операція округлення до цілого.

На основі (7) дістанемо

$$\tilde{\nu}_0 = \arg \left\{ \max_{-v_{\max} \leq \tilde{\nu} \leq v_{\max}} \left\{ \sum_{k=-M_1}^{M_1} |S_{m+k}| H_k \right\} \right\} \frac{F_d}{N_f}, \quad (9)$$

де $|S_{m+k}|$ — відлік амплітудного спектра сигналу, що приймається, обчисленого за допомогою ШПФ, $|S_{m+k}| = |S(k\Delta f + m\Delta f)|$; H_k — відлік АЧХ УФ, $H_k = H(k\Delta f)$.

Вираз (9) визначає правило обрахування МП-оцінки несучої частоти фазомодульованого сигналу на основі ШПФ [18,21].

Таким чином, обчислення МП-оцінки несучої частоти ФМ сигналу за відсутності інформації про передану інформаційну послідовність, про початкову фазу сигналу і тактову синхронізацію зводиться до обрахування згортки амплітудного спектра сигналу, що приймається, за допомогою ШПФ з АЧХ СФ.

Аналіз виразу (9) показує, що на його основі можна здобути будь-яку як завгодно малу дисперсію оцінки несучої частоти. Однак із виразу (3) випливає, що отримання оцінок з дисперсією, що задовольняє умову (1), можливе при достатньо великих інтервалах спостережень. Зокрема, при $E_S/N_0 = 0$ дБ і $a = 0,4$ маємо $K \geq 3,2 \cdot 10^4$, або, що одне й те саме, у разі достатньо великих інтервалів ШПФ.

Одним із методів зменшення інтервалу спостереження є введення двоетапної процедури оцінювання несучої частоти ФМ сигналу.

Із цією метою пропонується використати метод множення фази сигналу, що приймається, який, як відомо для фазової модуляції, зумовлює зняття модуляції і появу в спектрі сигналу чітко вираженого спектрального максимуму.

Метод множення фази застосовується в схемах відновлення фази несучого коливання когерентних демодуляторів ФМ сигналу [5; 19; 20]. Однак ця процедура зняття модуляції ефективна у разі малої початкової помилки за частотою несучого коливання.

Тому можемо зафіксувати інтервал спостереження у такий спосіб, щоб реалізувати МП-оцінку відповідно до (9) і яка б давала достатньо малу дисперсію оцінки несучої частоти — $\delta_v^2 T^2 \ll 1$. Аналіз виразу (3) показав, що дане співвідношення виконується навіть при відношенні E_S/N_0 , що дорівнює 0 дБ вже для K порядку кількох сотень інтервалів тактової частоти сигналу, що приймається. Потім по базі отриманої оцінки виконаємо операцію множення фази сигналу, що приймається, і проведемо оцінювання частоти максимуму в спектрі демодульованого сигналу.

Тобто запропонована процедура полягатиме в такому.

На першому етапі здійснюється нагромадження відліків z_n комплексної обвідної сигналу, що приймається, і обраховується МП-оцінка $\tilde{\nu}_0$ (згідно з правилом (9)) несучої частоти сигналу, що приймається.

На другому етапі виконуються:

- перетворення нагромаджених відліків z_n до вигляду $\tilde{z}_n = z_n \exp\left(-j2\pi\tilde{\nu}_0 \frac{n}{F_d}\right)$;

- фільтрація відліків за допомогою фільтра нижніх частот (ФНЧ), у функції якого входить зменшення впливу завад на процедуру множення фази сигналу $x_n = \sum_k z_{n-k} \tilde{g}(k)$, де $g(\cdot)$ — імпульсна характеристика даного ФНЧ;

- операція множення фази $y_n = (x_n)M_\varphi$, яка зумовлює зняття модуляції.

Після зняття модуляції здійснюється оцінювання частоти максимуму в спектрі сигналу y_n .

Певні результати оцінювання максимуму в спектрі сигналу, здобуті в ході моделювання під час реалізації процедури множення фази для сигналу спектра ФМ-2, зображено на рис. 2. На даних залежностях подано нормовані спектри сигналів, отримані навколо точки M_P для $N_f = 2048$ і $k = -50, \dots, 50$. На зазначеній залежності чітко відстежуються спектральні максимуми, шляхом оцінювання частоти яких обраховується оцінка другого етапу.

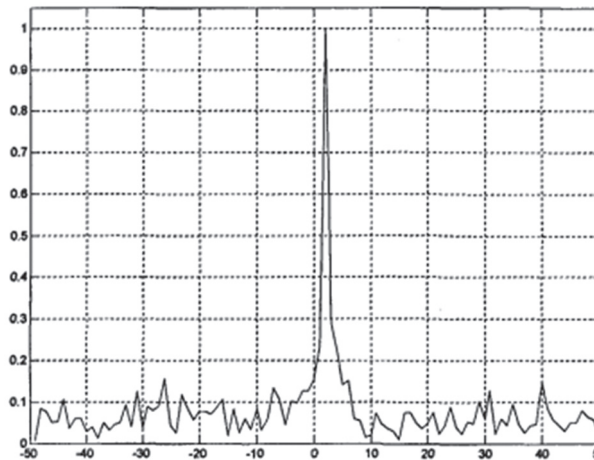


Рис. 2. Нормативний амплітудний спектр сигналу на виході схеми множення фази (вид модуляції ФМ-2, $E_s/N_0 = 3$ дБ, $\nu = 0$, $m = k - 1024$)

Висновки

У статті визначено функціональні залежності та на їх основі розроблено алгоритм оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку.

Вказаний алгоритм дає змогу здійснити двоетапне оцінювання несучої частоти за правилом максимальної правдоподібності з урахуванням умови невизначеності всіх параметрів сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі з мінімальним інтервалом спостереження.

Досягнення мінімального інтервалу спостереження в поданому алгоритмі оцінювання несучої частоти забезпечується використанням функції швидкого перетворення Фур'є та двома етапами оцінювання: етапом визначення мінімальної дисперсії оцінки несучої частоти та етапом оцінювання максимуму частоти в спектрі сигналу.

Здобуті в роботі результати моделювання за запропонованим алгоритмом показали практичну реалізуємість поданих функціональних залежностей та актуальність застосування запропонованого алгоритму оцінювання несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в неперервному режимі.

Список використаної літератури

1. Горбатий І. В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу: монографія. Львів: СПОЛОМ, 2011. 612 с.
2. Шестаков А. Л., Семенов А. С., Ибраева О. Л. Оценка несущей частоты случайной последовательности импульсов методом Прони // Вестник ЮУрГУ. 2009. №37(170). С. 106–115.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва: Радио и связь, 1989. 656 с.
4. Tong Zhao, Tianyao Huang. Cramer-Rao Lower Bounds for the Joint Delay-Doppler Estimation of an Extended Target // IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), 14–16 Dec. 2015. Orlando, FL, USA. Orlando, 2015. P. 17–24.
5. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing. Boston: Prentice Hall, 2010. 992 p.

6. Михайлов, Н. В., Чистяков В. В. Приемники спутниковой навигации космического базирования : архитектура и первичная обработка сигналов. Воронеж: изд-во «Научная книга», 2014. 124 с.
7. Miguel Angel Platas-Garza, José Antonio de la O Serna. Dynamic Harmonic Analysis Through Taylor–Fourier Transform // Instrumentation and Measurement IEEE Transactions. 2011. Vol. 60, № 3. P. 804–813.
8. Ruipeng Diao, Qingfeng Meng, Yumei Liang. An windowed frequency domain interpolation algorithms for damped sinusoidal signals // Signal and Image Processing Applications (ICSIPA) 2013 IEEE International Conference. 2013. P. 297–301.
9. Nasir A. A., Durrani S., Kennedy R. A. Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer–rao bounds // IEEE Trans. Commun. 2012. №60(5). P.1407–1419.
10. Тихомиров А. В., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю. Синхронизация в системах с прямым расширением спектра // Инженерный вестник Дона. 2019. №9(60). С. 69–70.
11. Быстродействующий алгоритм восстановления несущей частоты и фазовой синхронизации в модемах с QPSK модуляцией / А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, Е. К. Кошелев, В. И. Бондар // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. №1. С. 28–36.
12. Назорнюк О. А. Покращення точності оцінювання несучої та символної частоти сигналів з цифровою модуляцією // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць ЖВІ НАУ. 2013. Вип. 8. С. 62–70.
13. Исследование алгоритма оценки смещения несущей частоты, использующего преамбулу с псевдошумовой последовательностью / Куизфенг Джинг, Уейжи Жонг, Юпинг Лу, Ксиаоджу Ян // Известия высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 2013. Т. 56, N 1. С. 34–42.
14. Juan A. M., Cecilia G. G. Block synchronization algorithms for UWB–OFDM systems // Digit. Signal Process. 2011. Vol. 21(2). P. 187–295.
15. Weizhi Zhong, Yuping Lu, Xiaoju Yan. Research on carrier frequency offset estimation algorithm based on PN sequence preamble in OFDM system // Radioelectronics and Communications Systems. 2013. Vol. 56. P. 29–35.
16. Леман Э. Теория точечного оценивания. Москва: Наука, 1991. 448 с.
17. D’Amico A., Mengali U., Tononecco L. Cramer-Rao Bound for Clock Drift in UWB Ranging Systems // IEEE Wireless Communication Letters. 2013. №2(6). P. 591–594.
18. Фомин А. И. Синхронизация цифровых радиосистем передачи информации. Москва: Сайнс-Пресс, 2008. 280 с.
19. Залманзон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 1989. 496 с.

А. Л. Туровский

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ ФАЗОМОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Проблемы передачи сигналов в современных спутниковых системах определяются определенными особенностями как построения самой системы, так и проблемами обработки приема и передачи сигнала. Для демодуляторов спутниковых модемов, работающих с непрерывным входным сигналом, наиболее значимой является проблема синхронизации по частоте несущего колебания. Указанная задача синхронизации фактически сводится к оценке истинных параметров сигнала, а именно оценке несущей частоты. В статье рассмотрен процесс оценки несущей частоты сигнала спутниковой системой связи в непрерывном режиме. Предложены функциональные зависимости и на их основе разработан алгоритм, позволяющий осуществить двухэтапную оценку несущей частоты по правилу максимального правдоподобия (МП-оценка) с учетом условия неопределенности всех параметров сигнала, который принимается спутниковой системой связи в непрерывном режиме с минимальным интервалом наблюдения.

Достижения минимального интервала наблюдения в представленном алгоритме оценки несущей частоты обеспечивается использованием функции быстрого преобразования Фурье и двумя этапами оценки: этапом определения минимальной дисперсии оценки несущей частоты и этапом оценки максимума частоты в спектре сигнала.

Результаты моделирования по предложенному алгоритму показали практическую реализуемость представленных функциональных зависимостей и актуальность применения предложенного алгоритма оценки несущей частоты сигнала спутниковой системой связи в непрерывном режиме.

Ключевые слова: оценка несущей частоты сигнала; минимально предельная дисперсия оценки несущей частоты; оценка максимума частоты в спектре сигнала; функция быстрого преобразования Фурье.

A. Turovskyi

**ALGORITHM FOR EVALUATION OF THE CARRIER FREQUENCY OF THE PHASOMODULATED SIGNAL
OF THE SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM WHEN TRANSMITTING IN CONTINUOUS MODE USING
THE FAST FURIE TRANSFORMATION FUNCTION**

Problems of signal transmission in modern satellite systems are determined by certain features of both the construction of the system itself and the problems of signal reception and transmission processing. For demodulators of satellite modems operating with a continuous input signal, the most significant problem is the synchronization of the carrier frequency. This synchronization task is actually reduced to estimating the true parameters of the signal, namely the estimation of the carrier frequency. This paper considers the process of estimating the carrier frequency of a signal received by a satellite communication system in a continuous mode. Functional dependences are proposed and, based on them, an algorithm for estimating the carrier frequency of a signal received by a satellite communication system in a continuous mode according to the rule of maximum likelihood (MP-estimation) with a minimum observation interval is developed. This algorithm allows a two-stage estimation of the carrier frequency according to the rule of maximum likelihood, taking into account the condition of uncertainty of all parameters of the signal received by the satellite communication system in a continuous mode with a minimum observation interval. Ensuring the minimum observation interval in the given carrier estimation algorithm is ensured by using the fast Fourier transform function and two estimation stages: the stage of determining the minimum variance of the carrier frequency estimation and the stage of estimating the maximum frequency in the signal spectrum.

The results of modeling according to the proposed algorithm presented in the work showed the practical feasibility of the presented functional dependencies and the relevance of the proposed algorithm for estimating the carrier frequency of the signal received by the satellite communication system in continuous mode.

Keywords: signal carrier frequency estimation; minimum limiting variance of carrier frequency estimation; estimation of maximum frequency in the signal spectrum; fast Fourier transform function.

