

використанням програмного середовища Mathcad, наведені результати цих моделювань. Вони показали, що запропонований метод є універсальним, має значну збіжність, малу кількість ітерацій, легко відображається на матрично-матричні структури, та підтвердили його перспективність.

Література

1. Анализ и синтез случайных пространственных текстур / [Г.А. Андреев, О.В. Базарский, А.С. Глауберман та ін.] // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 3–33.
2. Харалик Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур / Р.М. Харалик // ТИИЭР. – 1979. – 1.67. – № 5.
3. Krasilenko, V.G., Lazarev, A., Grabovlyak, S., "Using a multi-port architecture of neural-net associative memory based on the equivalency paradigm for parallel cluster image analysis and self-learning," Proc. of SPIE, Vol. 8662, (SPIE, Bellingham, WA 2013), 86620S.
4. Krasilenko, V.G., Kolesnitsky, O.K., & Boguhvalsky, A.K. "Application of non-linear correlation functions and equivalence models in advanced neuronets," Proc. of SPIE, Vol. 3317-32, (SPIE, Bellingham, WA 1997), pp. 211–223.

References

1. Andreev G.A., Bazarskyj O.V., Glauberman A.S., Kolesnikov A.I., Korzhyk Yu.V., Xlyavich Ya.L. Analiz i syntezy sluchajnykh prostranstvennykh tekstur // Zarubezhna radioelektronika. – 1984. - №2. – С. 3-33.
2. Xaralik R.M. Staticheskij i strukturnyj podxody k opisaniyu tekstur // ТИИЭР. – 1979. – 1.67. - №5.
3. Krasilenko, V.G., Lazarev, A., Grabovlyak, S., "Using a multi-port architecture of neural-net associative memory based on the equivalency paradigm for parallel cluster image analysis and self-learning," Proc. of SPIE, Vol. 8662, (SPIE, Bellingham, WA 2013), 86620S.
4. Krasilenko, V.G., Kolesnitsky, O.K., & Boguhvalsky, A.K. "Application of non-linear correlation functions and equivalence models in advanced neuronets," Proc. of SPIE, Vol. 3317-32, (SPIE, Bellingham, WA 1997), pp. 211-223.

Рецензія/Peer review : 7.2.2014 р. Надрукована/Printed :9.4.2014 р.

Рецензент: Філінюк М.А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Проектування комп'ютерної і телекомунікаційної апаратури" Вінницького національного технічного університету

УДК 621.396

І.С. ПЯТИН, Р.В. СОРОКАТИЙ, Ю.В. ЛАВРЕНІУК

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З ДВОПОЗИЦІЙНОЮ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

Розглядається принцип побудови радіотехнічних систем на основі сигналів з розширеним спектром методом прямої послідовності. Розраховується аналітичний вираз і математична модель таких сигналів з двопозиційною фазовою маніпуляцією (BPSK). Наведені спектри таких сигналів, а також структурні схеми побудови модулаторів і демодуляторів на сучасній елементній базі.

Ключові слова: широкосмугові сигнали, двопозиційна фазова маніпуляція, псевдовипадкова послідовність

I.S. PYATIN, R.V. SOROKATYI, Y.V. LAVRENIUK

Khmelnytskyi national university

RESEARCH BROADBAND SIGNALS WITH BINARY PHASE-SHIFT KEYING

Abstract - We consider the principle of operation and construction of radio systems based on spread spectrum signals by direct sequence. These advantages and application. Calculated analytical expression and mathematical model of such signals with binary phase-shift keying (BPSK). The spectrum and autocorrelation function of these signals extending pseudorandom sequence based on signals Barker in the environment Matlab. These structural scheme of the modulators and demodulators for modern base.

Keywords : broadband signals, binary phase-shift keying, pseudo-random sequence

Постановка задачі

Широкопasmові сигнали використовуються в системах рухомого зв'язку та бездротового доступу, у фіксованому і супутниковому зв'язку, навігації, радіолокації тощо. До переваг таких сигналів відносять скритність випромінювання, безпомилкову передачу інформації в умовах багатопроменевого розповсюдження радіохвиль і можливість отримання ансамблю широкопasmових сигналів, що займають спільну смугу частот [1]. Якщо взаємкореляційні функції таких сигналів мають незначний рівень, то вони можуть бути одночасно передані в одній смузі частот без значних взаємних завад. Серед методів розширення спектру знайшли найбільше використання метод прямої послідовності (direct sequence – DS) і метод стрибкоподібної перебудови частоти (frequency hopping – FH).

Для підвищення достовірності прийому сигналу, тобто для збільшення ймовірності безпомилкового розпізнавання сигналу на приймальній стороні в умовах шуму, можна використовувати широкопasmові сигнали. При цьому кожний інформаційний біт, який передається, замінюється деяким кодом –

шумоподібною послідовністю. Результируючий сигнал стає шумоподібним в тому змісті, що тепер його важко відрізнити від природного шуму. Але в силу унікальних автокореляційних властивостей деяких шумоподібних сигналів виявляються важливі переваги, зокрема, автокореляційна функція послідовності має яскраво виражений центральний пік і малі бічні пелюстки. Найбільш відомі з таких послідовностей – сигнали Баркера. Прийнято вважати, що коди Баркера мають найкращі автокореляційні характеристики, що обумовило їх широке використання. Тому дослідження широкосмугових сигналів і радіотехнічних систем, що їх використовують, є актуальною задачею.

Методи розширеного спектру

Спочатку методи розширеного спектру (spread – spectrum – SS) застосовувалися при розробці військових систем управління та зв'язку. До кінця другої світової війни в радіолокації розширення спектру застосовувалося для боротьби з навмисними завадами, а в наступні роки розвиток даної технології пояснювався бажанням створити завадостійкі системи зв'язку. У процесі досліджень розширеного спектру знайшлося й інше застосування – зниження густини енергії, високоточна локація і використання при множинному доступі. Методи розширеного спектру отримали свою назву завдяки тому, що смуга, використовувана для передачі сигналу набагато ширше мінімальної, необхідної для передачі даних.

Сигнал займає широку смугу частот, якщо виконується умова:

$$B = \Delta T_c \cdot \Delta F_c, \quad (1)$$

де B – база сигналу; ΔT_c – тривалість імпульсу; ΔF_c – ширина спектру сигналу.

Система зв'язку називається системою з розширеним спектром у наступних випадках:

- використовується смуга значно ширше мінімальної, необхідної для передачі даних;
- розширення спектру проводиться за допомогою так званого розширюючого або кодового сигналу, який не залежить від переданої інформації.
- відновлення початкових даних приймачем ("звуження спектра") здійснюється шляхом зіставлення отриманого сигналу і синхронізованої копії розширюючого сигналу.

Слід зазначити, що розширення спектру сигналу також відбувається при використанні деяких стандартних схем модуляції, таких як частотна та імпульсно-кодова модуляція. Однак ці схеми не відносяться до методів розширеного спектру, оскільки не задовольняють всім наведеним вище умовам.

Моделювання широкосмугових сигналів засобами Matlab

На рис. 1, а показана двійкова інформаційна послідовність (0, 1). Її еквівалент у вигляді біполярного імпульсного сигналу $b(t)$ приведений на рис. 1, б. Приклад двійкової розширюючої послідовності $g(t)$ наводиться на рис. 1, в. Результат підсумовування по модулю 2 інформаційної та кодової послідовностей, а також добуток $b(t)g(t)$ представлені на рис. 1, г.

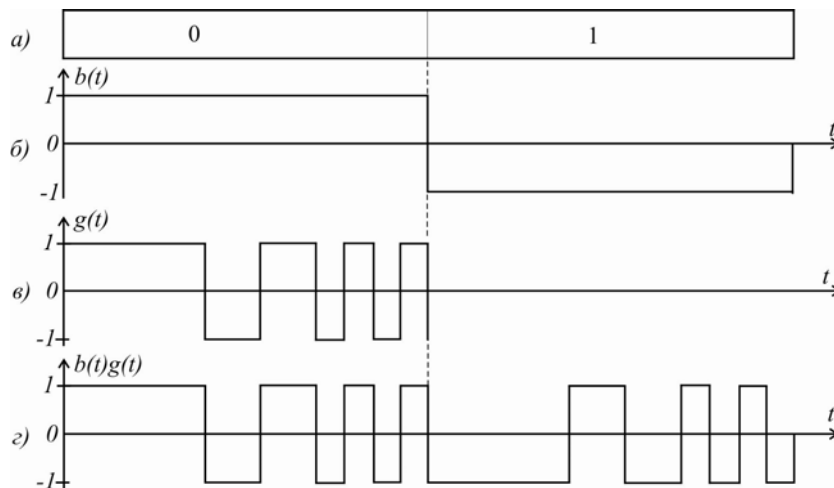


Рис. 1. Часові діаграми отримання сигналу з розширеним спектром

В якості розширюючої спектр послідовності $g(t)$ обраний 13-елементний код Баркера, що зображений на рис.1, в. Коли сигнал $b(t) = -1$, то у сигналі з розширеним спектром відбувається поворот кода Баркера на 180° , як показано на рис.1, г. При порівнянні рис. 1, б і г можна помітити прихованість сигналів з розширеним спектром. Дивлячись на графік, складно виділити повільно змінюваний інформаційний сигнал з мінливої кодової послідовності. Аналогічна складність виникає при відновленні приймачем сигналу, якщо відсутня точна копія кодового сигналу.

Розглянемо приклад формування сигналу з розширеним спектром у середовищі Matlab. У Лістингу 1 приведена програма побудови сигналу з розширеним спектром і модуляції несучої за допомогою двопозиційної фазової маніпуляції (BPSK). Математичну модель сигналу BPSK можна представити

наступним чином:

$$S_{ДФМн} = \begin{cases} A_0 \cos(2\pi f_0 t + \Theta_0), & \text{символ "1"} \\ A_0 \cos(2\pi f_0 t + \Theta_0 + \pi), & \text{символ "0"} \end{cases} \quad (2)$$

Лістинг 1 містить функцію SS(a), яка формує сигнал BPSK. В якості аргументу цієї функції записується розширяюча спектр послідовність $g(t)$ – послідовність Баркера 13 порядку. Часова діаграма сигналу $g(t)$ приведена на рис. 1, в. Сигнал повідомлення $b(t)$ у програмі записаний змінною povidoml = [1 0]. Часова діаграма початкового повідомлення $b(t)$ приведена на рис. 2. Фаза несучої дорівнює π , якщо добуток сигналів $b(t)g(t) = -1$ (або сума по модулю 2 повідомлення і коду є двійковою одиницею). Подібним чином фаза несучої дорівнює нулю, якщо значення $b(t)g(t) = +1$ (або сума по модулю 2 повідомлення і коду дорівнює двійковому нулю).

```

a = [1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1];
[t,s]= SS(a); subplot(2,1,2); plot(t,s)
title('сигнал BPSK') xlim([0 26])
for i=1:length(t)
    if i<=1300 povidoml(i)=1;
    else povidoml(i)=0;
    end; end
subplot(2,1,1); plot(t,povidoml)
title('початкове повідомлення')
xlim([0 26]) ylim([-0.05 1.05])
S=fft(povidoml,4096); sf=abs(fftshift(S));
figure; subplot(2,1,1); plot(sf(1850:2250))
title('Спектр початкового повідомлення')
xlim([0 400])
s1=fft(s,4096); SS1=abs(fftshift(s1));
subplot(2,1,2); plot(SS1(1850:2250))
title('Спектр сигналу з розширеним спектром')
xlim([0 400])

```

Функція SS(a) має наступний вигляд:

```

function [t,s] = SS(a)
N = 100; % число отсчетов на период синуса
A = repmat(a, N, 1);
A = A(:)';
t = (0:length(A)-1)/N;
s0 = sin(2*pi*t);
s = s0.*A;
a1=-1*a;
A1 = repmat(a1, N, 1);
A1 = A1(:)';
t1 = (length(A):2*length(A1)-1)/N;
s1 = sin(2*pi*t1);
s2 = s1.*A1;
t=[t t1];
s=[s s2];
return

```

Лістинг 1

Часові діаграми початкового повідомлення і сигналу, промодульованого розширяючою спектр послідовністю Баркера за програмою Лістинг 1, зображені на рис. 2. На рис. 3 зображені спектри початкового повідомлення і сигналу з розширеним спектром.

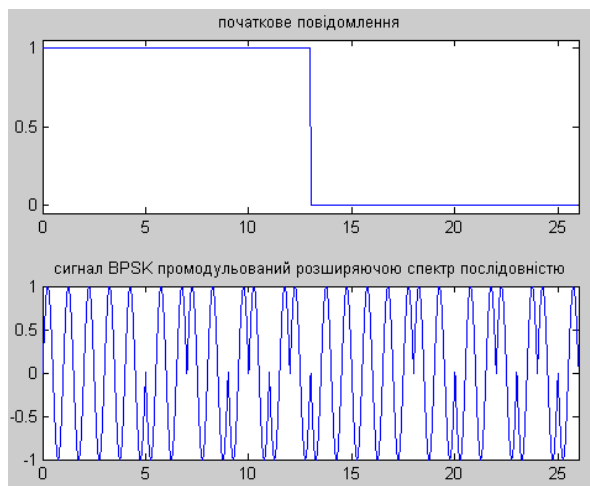


Рис. 2

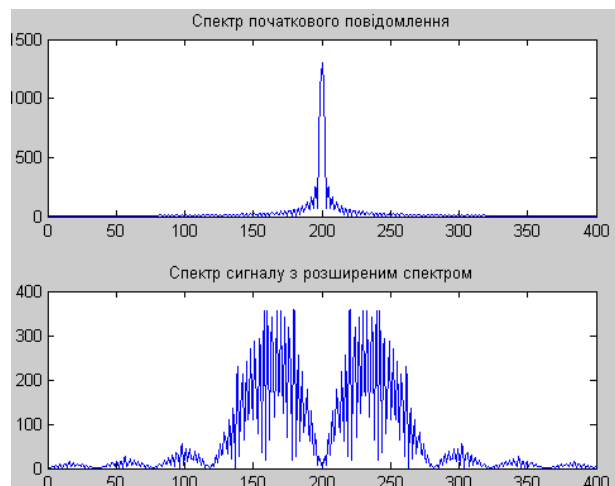


Рис. 3.

Автокореляційна функція (АКФ) сигналу характеризує степінь зв'язку сигналу $s(t)$ з його копією, яка зсунута на величину τ вздовж осі часу. Для визначення АКФ використовують формулу:

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t+\tau)dt \quad (3)$$

Проаналізуємо АКФ розширяючої спектр послідовності Баркера 13 порядку і сигналу з розширеним спектром. Аналітичний вираз сигналів Баркера достатньо складний і не наочний, тому його рідко використовується на практиці. Більш наочно використовувати графічне подання сигналів Баркера. АКФ також краще визначити графічно за допомогою програми Matlab. У Лістингу 2 наведена програма побудови АКФ сигналу Баркера 13 порядку і АКФ сигналу з розширеним спектром

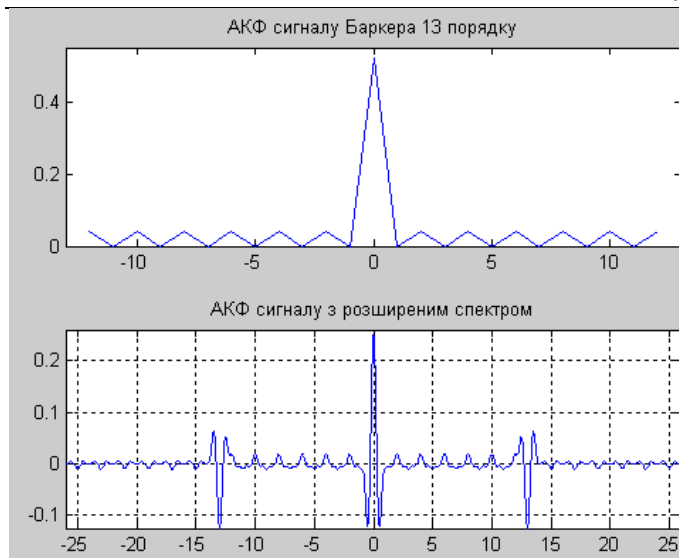


Рис. 4

```

a = [1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1];
[t,s]= SS(a); l=length(t); la=length(a);
for i=1:la
    s1(i)=a(la-i+1); end;
Ka=conv(s1,a); Na=length(Ka);
subplot(2,1,1);
plot(-la+1:1:la-1, (1/Na)*Ka);
title('АКФ сигналу Баркера 13 порядку')
xlim([-13 13]) ylim([0 0.55])
for i=1:l
    s2(i)=s(l-i+1); end;
Ks=conv(s2,s); Ns=length(Ks);
subplot(2,1,2);
plot(-max(t):0.01:max(t), (1/Ns)*Ks);
title('АКФ сигналу з розширеним спектром')
xlim([-26 26]) ylim([-0.125 0.26])
grid on

```

Лістинг 2

Порівняння АКФ сигналу Баркера 13 порядку і АКФ сигналу з розширеним спектром дозволяє зробити висновок, що обидва сигнали мають чіткий максимум АКФ для $\tau = 0$, що обумовлює виділення цього сигналу на тлі завад. Крім того, зроблений висновок, що взаємні кореляційні функції широкосмугових сигналів з різними псевдовипадковими послідовностями подібні до шуму, що не забезпечує їх виявлення. Тобто для виявлення широкосмугового сигналу на тлі завад потрібно, щоб на передаючому і приймальному боці використовувались однакові псевдовипадкові послідовності.

Розширення спектру призводить до того, що сигнал більш рівномірно і менш щільно (порівняно з традиційними схемами модуляції) розподіляється в заданій області спектра. Таким чином, не тільки підвищується завадостійкість сигналу, але і знижується ймовірність його перехоплення. Для того, хто не має в своєму розпорядженні синхронізовану копію розширюючого сигналу, даний сигнал буде губитися в шумі.

Методи розширеного спектру застосовуються в системах зв'язку множинного доступу для управління спільним використанням ресурсу зв'язку великим числом користувачів [2]. Даний метод називається множинним доступом з кодовим розділенням сигналів (CDMA). Однією з особливостей CDMA є збереження конфіденційності зв'язку між користувачами, що мають різні сигнали розширеного спектру.

Радіосигнал з цифровою модуляцією можна подати наступним аналітичним виразом:

$$s(t) = A_0 b(t) \cos(2\pi f_0 t + \Theta_0), \quad (4)$$

де f_0 – частота несучого колювання.

Нехай $R_b(\tau)$ – АКФ сигналу $b(t)$, тоді АКФ сигналу $s(t)$ визначається виразом:

$$R_s(\tau) = \frac{A_0^2}{2} R_b(\tau) \cos(2\pi f_0 \tau).$$

Системи розширення спектру методом прямої послідовності

На рис. 5, а наведена структурна схема системи з прямим розширенням спектра на основі псевдовипадкових послідовностей. У модуляторі здійснюється фазова маніпуляція (PSK) сигналу проміжної частоти двійковим цифровим сигналом повідомлення $b(t)$, що передається у форматі без повернення до нуля (NRZ). PSK сигнал визначається наступним виразом:

$$s(t) = \sqrt{2P_s} b(t) \cos \omega_{nc} t,$$

де $b(t)$ – дворівневий сигнал, що має два стани: $+1$ і -1 ; ω_{nc} – проміжна частота, P_s – потужність сигналу.

В якості сигналу розширення спектру $g(t)$ використовується сигнал псевдовипадкової послідовності (ПВП) з частотою проходження символів $f_0 = 1/T_c$. У результаті повторної модуляції формується PSK сигнал з розширеним спектром:

$$v(t) = b(t)g(t)\sqrt{2P_s} \cos \omega_{nc} t, \quad (5)$$

Спочатку відбувається множення потоку імпульсних даних і розширюючого сигналу, після чого несуча модулюється отриманим сигналом. Якщо надання значень імпульсам бінарної послідовності виконується таким чином: двійковому значенню «0» відповідає значення імпульсу «1», а двійковому значенню «1» відповідає значення імпульсу «-1», то початковий етап модуляції BPSK виконується шляхом підсумовування за модулем 2 двійкової інформаційної послідовності і двійкової розширюючої послідовності (рис. 5, б) [3].

Цей сигнал проміжної частоти далі переноситься вгору на необхідну частоту за допомогою синтезатора радіочастоти (РЧ). Якщо інформаційний сигнал є вузькосмуговим, добуток $b(t)g(t)$ буде приблизно дорівнювати ширині смуги розширюючого сигналу. При виконанні такого добутку формується амплітудно-модульований сигнал з пригніченою несучою, що має дві смуги. Помножувач і модулятор можна поміняти місцями без зміни потенційних характеристик системи.

У межах однієї соти системи рухомого радіозв'язку є декілька абонентів, що одночасно користуються зв'язком, причому кожен з них використовує одну і ту ж несучу частоту і займає одну і ту ж смугу частот.



Рис. 5. Структурні схеми передавача і приймача сигналів з розширеним спектром: а) передавач; б) другий варіант побудови передавача; в) приймач

Як видно з рис. 5, в демодуляція BPSK проходить у два етапи. Перший етап – звуження отриманого сигналу – виконується шляхом визначення кореляції цього сигналу з синхронізованою копією кодового сигналу. Другий етап – демодуляція даних, проводиться за допомогою звичайного демодулятора.

У демодуляторі отриманий сигнал множиться на синхронізовану копію розширюючого сигналу $g(t)$, в результаті чого виходить звужений сигнал. Для відсіювання побічних високочастотних компонентів використовується фільтр з шириною смуги R . Слід зазначити, що будь-який небажаний сигнал, отриманий приймачем, буде розширений шляхом множення на $g(t)$ так само, як передавач розширює початковий сигнал. Перша операція на вході приймача – множення на розширюючий сигнал. Таким чином, завади будуть розширені по всьому діапазону цього сигналу.

Найбільш важливі особливості завадостійкої системи зв'язку з розширеним спектром можна сформулювати наступним чином:

- одноразове множення на $g(t)$ призводить до розширення діапазону сигналу;
- повторне множення і подальше фільтрування відновлюють початковий сигнал;
- початковий сигнал множиться двічі, тоді як сигнал-завада множиться тільки один раз.

Таким чином, на вхід приймача надходить сума M незалежних сигналів з розширеним спектром, що займають одну і ту ж смугу частот:

$$r(t) = \sum_{i=1}^M g_i(t)b_i(t) + I(t) + n(t) \quad (6)$$

де M – число активних користувачів, що знаходяться в мережі; $g_i(t)$ – псевдовипадкова послідовність i -ї пари передавач-приймач; $b_i(t)$ – модульований сигнал; $I(t)$ – завада; $n(t)$ – адитивний білий гаусів шум (АБГШ).

У приймачі користувача, якому призначене повідомлення, є синхронізований в часі сигнал $g_i(t)$, який забезпечує стискання спектра, і являє собою точну копію сигналу псевдовипадкової послідовності відповідного передавача. Отриманий після стискання спектра вузькосмуговий сигнал детектується.

Якщо вибрано ансамбль некорельованих сигналів псевдовипадкової послідовності, то після операції стиснення спектра зберігається лише модульований корисний сигнал. Всі інші сигнали, будучи некорельованими, зберігають широкосмуговість і мають ширину спектра, що перевищує граничну смугу пропускання фільтра демодулятора.

Модулятор сигналу з двопозиційною фазовою маніпуляцією можна побудувати на основі помножувача сигналів, на один вхід якого подати сигнал $b(t)$, а на другий – сигнал несучої частоти. Модулятор сигналу BPSK на основі цифрового синтезатора частоти приведений на рис. 6.

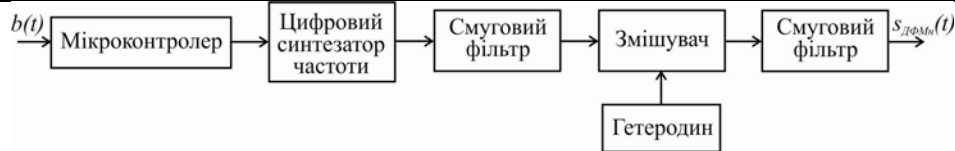


Рис. 6. Модулятор сигналу BPSK

В якості цифрового синтезатора частоти можна використовувати, наприклад, AD9852, що генерує сигнал з частотою до 150 МГц. Для збільшення частоти сигналу використовується перетворювач частоти, що складається з змішувача і гетеродина. Смугові фільтри виділяють потрібну смугу частот.

Для демодуляції сигналу з двопозиційною фазовою маніпуляцією (BPSK) використовують схему Костаса, яка приведена на рис. 7.



Рис. 7. Схема Костаса для демодуляції сигналів BPSK

Для детектування сигналу BPSK необхідно поновити несучу частоту, що виконується за допомогою схеми, подібної до фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ). Частота сигналу опорного генератора приймача відрізняється від генератора несучої передавача (на величину $\Delta\omega$) і відрізняється за фазою на $\Delta\varphi$. Схема Костаса містить цифровий генератор керований напругою, який в режимі синхронізації генерує сигнал з частотою $\Delta\omega$ з постійним фазовим зсувом відносно сигналу передавача. В результаті перемноження даного сигналу з поступаючими на вхід схеми Костаса квадратурними складовими, на виході формуються сигнали $I(t)$ і $Q(t)$ на нульовій частоті. Специфікою схеми Костаса є те, що згенероване сигнальне сузір'я має постійну фазову помилку $\pm\pi/4$. Дану помилку можна скомпенсувати за допомогою схеми, що виконує лінійні операції над квадратурними складовими.

Висновки

Проаналізовані сигнали з двопозиційною фазовою маніпуляцією (BPSK) і розширенням спектру методом прямої послідовності в області часу і в області частоти. Показані структурні схеми передавачів і приймачів таких сигналів, наведені області їх застосування. Завдяки особливим кореляційним властивостям коду Баркера, такі сигнали легко виявляються на тлі завад при однаковій псевдовипадковій послідовності на передаючому і приймальному боці радіоелектронної системи.

Література

1. Быховский М.А. Многочастотные широкополосные сигналы открывают путь к 4G / М.А. Быховский // Мобильные системы – 2007. – № 3. – С. 12–15.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Изд. 2-е, испр. ; [пер. с англ.]. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер. ; [пер. с англ.] / Под ред. В.И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов : [учеб. пособие] / А.Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

References

1. Bikhovskiy M.A. Mnogochastotnie shirokopolosnie signali otkrivaiut put k 4G/ M.A. Bikhovskiy // Mobilnie sistemi – 2007. – №3. – S. 12-15.
2. Skliar B. Tsifrovaia svyaz. Teoreticheskie osnovi i prakticheskoe primeneniye / B. Skliar. Izd. 2-e, ispr.: Per. s angl. – M.: Izdatelskiy dom «Viliams», 2003. – 1104 s.
3. Feer K. Besprovodnaya tsifrovaya svyaz. Metodi modulitsii i rasshirenia spectra / K. Feer. Per. s angl./ Pod red. V.I. Zhuravliova. – M.: Radio i svyaz, 2000. – 520 s.
4. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov: ucheb. Posobie / A.B. Sergienko. – 3-e izd. – SPb.: BHV-Peterburg, 2011. – 768 s.

Рецензія/Peer review : 5.2.2014 р. Надрукована/Printed : 9.4.2014 р.
Рецензент: О.М. Шинкарук, д.т.н., проф. ХНУ