

Ефективна демодуляція QPSK сигналів у каналах з несприятливими умовами радіоприймання

Круглик О. С.¹, Калужний О.Я.², Семенов В. Ю.¹

¹ТОВ «Дельта СПЕ», м. Київ

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: olehius2008@ukr.net

Головним завданням приймача в системах цифрового зв'язку є забезпечення мінімальної бітової похибки при прийманні переданих даних. Тому від якості демодуляції сигналів залежить у значній мірі якість цифрового зв'язку в цілому. Крім того, в каналах з несприятливими умовами радіоприймання, яким характерна швидка зміна параметрів сигналу внаслідок часового та частотного доплерівського розсіювань, а також є невідомими характеристики основного каналу передавання, виникають ситуації, коли більшість модемів не дозволяють забезпечити якісний прийом сигналу. Отже, підвищення ефективності демодуляції було і залишається актуальним завданням для сучасної техніки радіоприймання та оброблення сигналів. Стаття присвячена проблемі приймання сигналів з фазовою маніпуляцією у каналах із несприятливими умовами передачі, оскільки в більшості сучасних систем цифрового зв'язку фазова маніпуляція є основою фізичного рівня передавання. Проведено аналіз існуючих рішень та розглянуто гібридний метод демодуляції сигналів, який поєднує алгоритми прямого оцінювання параметрів сигналу (feedforward) з подальшою синхронізацією параметрів у схемах зі зворотним зв'язком (feedback алгоритми). Початкова оцінка зміщення носійної частоти, фази та часової затримки сигналу виконується по відомій унікальній вставці і отримані оцінки застосовуються при ініціалізації схем зі зворотним зв'язком для миттєвого входу в режим стеження. Виконано порівнювальне моделювання відомих традиційних методів демодуляції та гібридного методу на прикладі сигналу з квадратурною фазовою маніпуляцією (QPSK). Отримані результати підтверджують, що в умовах швидкої зміни параметрів сигналу гібридний алгоритм забезпечує мінімальне значення бітової похибки в залежності від SNR у порівнянні з традиційними методами. Розглянутий підхід синхронізації також можна використовувати для сигналів з іншими видами фазової маніпуляції. Більше того, запропоноване гібридне поєднання алгоритмів feedback і feedforward дозволило застосовувати алгоритми зі зворотним зв'язком до сигналів з пакетним режимом передавання даних.

Ключові слова: демодуляція QPSK сигналів; несприятливі умови радіоприймання; TDMA; частотні спотворення

DOI: [10.20535/RADAP.2019.78.13-18](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.13-18)

Вступ

Для сучасного етапу розвитку засобів зв'язку характерно постійне підвищення вимог щодо швидкості передачі та надійності приймання цифрової інформації. Ключову роль у забезпеченні цих вимог відіграє вдосконалення методів модуляції та демодуляції сигналів, серед яких чільне місце безперечно належить фазовій маніпуляції [1]. Головними чинниками, що стимулюють цей процес, є суттєве розширення робочих смуг сучасних телекомунікаційних мереж, істотне збільшення кількості режимів передачі та значне підвищення вимог щодо умов їх функціонування. У свою чергу, вдосконалення систем демодуляції сигналів тісно пов'язано з необхідністю розвитку відповідних методів синхро-

нізації та підвищення їх стійкості до несприятливих факторів середовища. До таких факторів, зокрема, відносяться швидкі зміни умов передачі сигналів та характеристик зовнішніх завад внаслідок процесів часового розсіювання сигналів та доплерівського розширення їх спектрів. Також техніка демодуляції суттєво залежить від режиму передачі інформації, який може бути пакетним або безперервним. При цьому обидва ці режими в одній системі можуть бути застосовані одночасно, але для різних підсистем, що висуває додаткові вимоги до побудови відповідних уніфікованих блоків демодуляції.

Для ілюстрації сказаного на рис. 1 та 2 наведено діаграми розсіювання сигналів (сигнальні «сузір'я») по виходу приймача модему, робота демодулятора якого основана на класичних методах

feedforward або feedback, з цифровою передачею за методом квадратурної фазової маніпуляції (QPSK). Рис. 1 відповідає каналу з адитивним білим гавсівським шумом (AWGN), в якому має місце не належна частотна та фазова синхронізація сигналів, рис. 2 – наявності міжсимвольної інтерференції (ISI). Цілком зрозуміло, що при таких спотвореннях сигналу на високу якість демодуляції розраховувати важко.

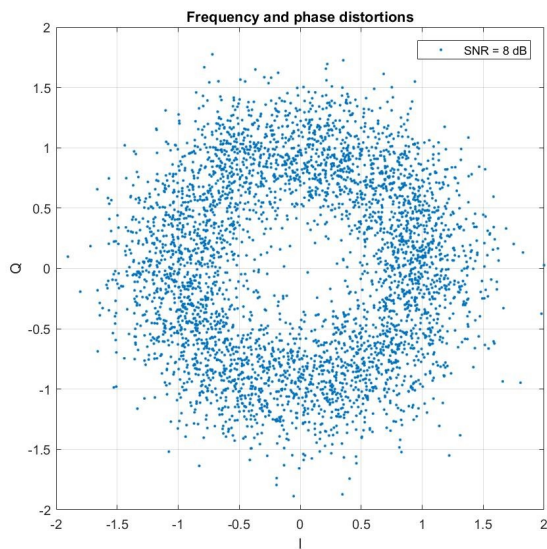


Рис. 1. Сузір'я QPSK сигналу в каналі з частотними та фазовими спотвореннями

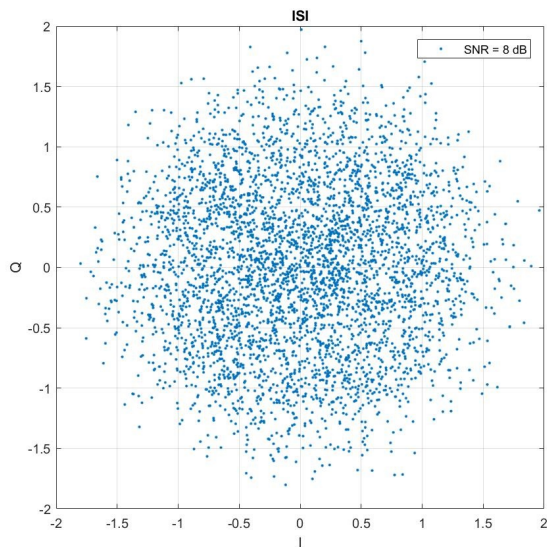


Рис. 2. Сузір'я QPSK сигналу в каналі з ISI

Для боротьби з вказаними несприятливими факторами в сучасних модемах зв'язку застосовуються такі методи як: еквалайзери каналу, синхронізація з прямою оцінкою параметрів сигналів (feedforward), алгоритми синхронізації зі зворотною петлею та автопідстроюванням (feedback). Прикла-

ди алгоритмів feedforward і feedback наведено в роботах [1–3].

Але в каналах зі швидкими змінами умов передачі та у разі необхідності комплексування режимів безперервної та пакетної передачі вказані стандартні методи не завжди спрацьовують.

У даній роботі показано, що ефективним методом подолання цих недоліків може бути гібридний алгоритм демодуляції сигналів, який базується на спільній узгодженій роботі алгоритмів типів feedforward та feedback. Таке поєднання забезпечує найбільш ефективну боротьбу із спотвореннями сигналу в умовах швидкої зміни характеристик каналу передавання. Запропонований підхід базується на частково сліпій оцінці характеристик каналу (оцінка при відомих: модуляції, приблизній носійній частоті і структурі даних, що передаються) та використовує відомі властивості модуляційного формату сигналу. Також запропонована евристична побудова блоку прийняття рішення на основі feedback алгоритмів.

1 Аналіз існуючих рішень

Еквалайзери є добре відомим та дуже поширеним засобом компенсації лінійних спотворень сигналу в каналі, які використовуються в системах зв'язку при відносно невеликій похибці синхронізації. Еквалайзери – це методи компенсації спотворень сигналу відповідно до відомих характеристик каналу передавання. Однак, для компенсації нелінійних спотворень та при швидких змінах характеристик каналу ці засоби не завжди є ефективними. Альтернативними методами синхронізації параметрів сигналу, які не потребують відомих характеристик передавання є feedforward [A1] і feedback [A2] алгоритми.

Feedforward синхронізація [1] – це метод оцінки параметрів сигналу (частоти, фази, часової похибки) на певному проміжку сигналу, зазвичай з відомими характеристиками чи символами, для подальшої синхронізації всього сигналу згідно отриманих оцінок. Головна ідея feedforward алгоритмів [1], [3] – пряма оцінка і синхронізація параметрів окремого пакету даних сигналу, що дозволяє обробляти кожен пакет незалежно від раніше отриманих даних (рис. 3). Оскільки синхронізатор не має пам'яті поміж пакетами даних, то середня квадратична помилка синхронізації однакова для всіх пакетів. Отже, не існує перехідних процесів, тому оцінку звичайно можна вважати "миттєвою". Оцінки синхронізації фази і символної похибки в feedforward алгоритмах отримують шляхом максимізації відповідної цільової функції над поточними значеннями фази, носійної частоти та часової затримки. Якщо така максимізація для щонайменше одного параметру може бути здійснена незалежно від інших параметрів синхронізації, то загальна максимізація

зводиться до кількох одновимірних максимізацій. Перевагою feedforward алгоритмів є швидкість оцінки параметрів з використанням відомої унікальної вставки (так званих пілот-сигналів) або на основі апріорного знання формату сигналу. Недоліком цих алгоритмів є можлива неактуальність оцінки на протязі всього пакету при швидкій зміні характеристик каналу передавання.

Feedback алгоритми [2], [4] базуються на тому, що у петлі зворотного зв'язку використовуються детектори помилок (фази і символної синхронізації), які приблизно визначають знак і величину миттєвої помилки між фактичними значеннями параметрів синхронізації та їх оцінками (рис. 4).

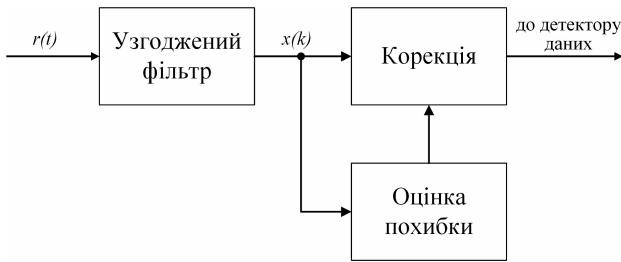


Рис. 3. Feedforward синхронізація

З вихідних сигналів детектора помилок розраховується коефіцієнт корекції, який застосовується до параметрів синхронізації, що зменшує величину помилки попередньої оцінки. На початку прийому сигналу величина помилки оцінки може бути великою, однак внаслідок роботи відповідного зворотного зв'язку через певний час ця величина поступово зменшується. Перевага feedback методу полягає в безперервній оцінці та синхронізації параметрів протягом передавання даних. Однак, основний недолік feedback алгоритмів – це затрата часу на початкове налаштування параметрів. Для сигналів з технологією множинного доступу та часовим розділенням (TDMA) таке налаштування треба виконувати на кожному пакеті даних, що може призвести до втрати інформації.

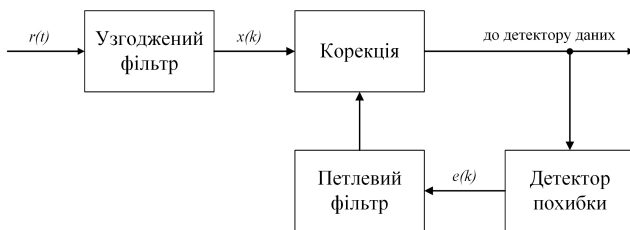


Рис. 4. Feedback синхронізація

Отже, для якісної синхронізації (забезпечення мінімального значення BER з можливістю подальшої обробки інформації) в несприятливих умовах радіоприймання, перелічені методи, в їх класичному розумінні, не завжди є придатними для застосування.

2 Гібридний метод демодуляції сигналів

Розглянемо модель сигналу на вході приймача:

$$r(t) = s(t) + w(t), \quad (1)$$

де

$$s(t) = e^{j(2\pi vt + \theta)} \sum_i c_i g(t - iT - \tau), \quad (2)$$

$w(t)$ – адитивний білий гаусівський шум, $\{c_i\}$ – інформаційні символи, T – тривалість символу, $g(t)$ – характеристика формуючого фільтру. В формулі (2) параметри τ (часова затримка), v (зміщення частоти), θ (зміщення фази) є невідомими. При застосуванні до сигналу (1) узгодженого фільтру та при $t = kT + \tau$, отримуємо дискретний сигнал:

$$x(k) = c_k e^{j[2\pi v(kT + \tau) + \theta]} + n(k), \quad (3)$$

де $n(k)$ – шумова складова. Отже, в приймальній частині необхідно оцінити і компенсувати спотворення $e^{j(2\pi vt + \theta)}$ та τ .

Для боротьби із вказаними спотвореннями, в даній роботі пропонується застосувати алгоритм синхронізації [P1], в якому також використовуються перелічені класичні методи, але не окремо, а у їх поєднанні. Сутність даного методу полягає в тому, що feedforward алгоритми пропонується використовувати для оцінки початкових параметрів сигналу на етапі встановлення з'єднання. Після входження системи у стан супроводу параметрів надалі в основному застосовуються алгоритми feedback. Однак, при цьому алгоритми feedforward також застосовуються, але лише для періодичної корекції системи. Таке гібридне застосування методів feedback і feedforward є ефективним засобом покращення якості демодуляції сигналу.

Параметри гібридного демодулятора підбиралися емпірично, шляхом численних натурних та напівнатурних експериментів. В результаті було знайдено параметри гібридного демодулятора, які забезпечують високу ефективність його роботи в реальних супутникових радіоканалах. Зокрема, на етапі встановлення з'єднання пропонується використовувати такі методи feedforward:

- оцінка зміщення частоти за допомогою модифікованого алгоритму Луїза та Рег'яніні [5]:

$$\hat{\nu} = \frac{1}{\pi T(N+1)} \arg \left\{ \sum_{l=1}^{L_{uw}} \sum_{m=1}^N K(m) \right\}, \quad (4)$$

де

$$K(m) = \frac{1}{L_{uw} - m} \left\{ \sum_{k=m}^{L_{uw}} x(k) \hat{x}^*(k) \times \right. \\ \left. \times x^*(k-m) \hat{x}(k-m) \right\} \quad (5)$$

і L_{uw} – довжина унікальної вставки, $\hat{x}(k)$ – символи унікальної вставки, $N = L_{uw}/2$;

- зміщення фази може бути розраховане за наступною формулою:

$$\hat{\theta} = \arctan \left[\frac{\sum_{k=1}^{L_{uw}} x(k)\hat{x}(k)}{\sum_{k=1}^{L_{uw}} |x(k)|^2} \right], \quad (6)$$

де L_{uw} – довжина унікальної вставки і $\hat{x}(k)$ – символи унікальної вставки;

- часове зміщення обчислюється на основі кореляційної функції:

$$\hat{\tau} = \frac{R(k-1) - R(k+1)}{R(k-1) - 2R(k) + R(k+1)}, \quad (7)$$

де $R(k)$ – коефіцієнт кореляції вхідного сигналу $x(k)$ з відомими символами унікальної вставки $\hat{x}(k)$.

Основою feedback алгоритмів гібридного демодулятора є петля Костаса [6], в якій для оцінки зміщення фази та частоти пропонується використувати детектор:

$$e_{\theta}(k) = \text{Im}(x(k))^3 * \text{Re}(x(k)) - \text{Re}(x(k))^3 * \text{Im}(x(k)). \quad (8)$$

Часову синхронізацію пропонується виконувати за допомогою петлі Гарднера [7] з детектором похибки:

$$e_{\tau}(k) = \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} x(kT - T + \tau_{k-1}) \\ -x(kT + \tau_k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x^*(kT - T/2 + \tau_{k+1}) \end{bmatrix} \right\}, \quad (9)$$

де $x^*(k)$ – комплексне спряження $x(k)$.

3 Результати експериментальних досліджень

Для порівняння, в програмному середовищі Matlab, було проведено моделювання алгоритмів feedforward, feedback та запропонованого гібридного методу. Структура моделі зображена на рис. 5. Параметри системи передавання, що були використані в роботі при виконанні комп'ютерного моделювання, наведені у табл. 1. Функціональна схема запропонованого гібридного методу демодуляції показана на рис. 6.

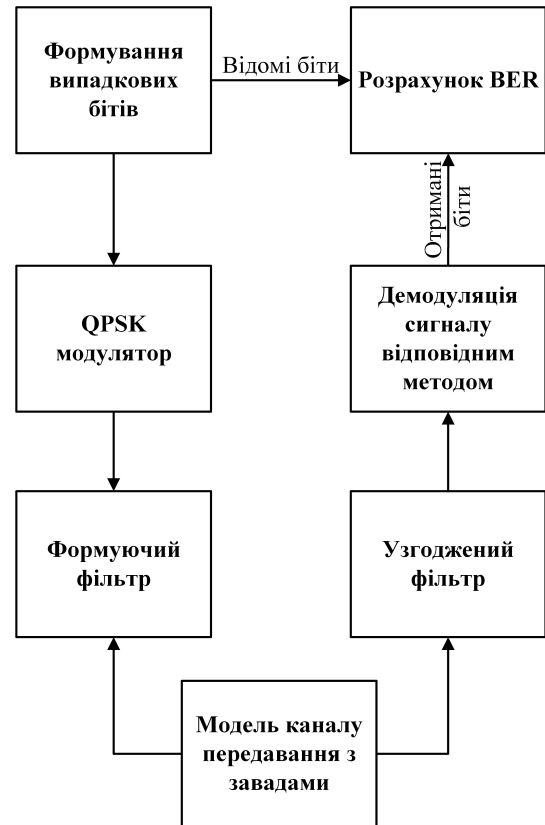


Рис. 5. Структурна схема моделі розрахунку BER для розглянутих методів

Табл. 1 Параметри сигналу

позиційність модуляції	QPSK
тип множинного доступу	TDMA
тип формуючого фільтру і коефіцієнт згладжування	корінь квадратний від припіднятого косинусу, 0.35
відносна частота дискретизації	2 відліки на символ
довжина пакету даних	16384 біт
довжина унікального слова L_{uw}	64 біт
похибка носійної частоти ν	0.0001 % від символної швидкості
похибка символної синхронізації τ	[0:100] % від тривалості символу
SNR	[0:15] дБ

Зміна параметрів відбувалася на протязі всього пакету тестових даних. Розраховані характеристики бітової похибки (Bit Error Rate, BER) в залежності від відношення сигнал-шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) (рис. 7), показують, що запропонований метод демодуляції є більш стійким до змін характеристик каналу ніж відомі класичні підходи і забезпечує найменшу бітову похибку при однакових значеннях SNR в результаті синхронізації.

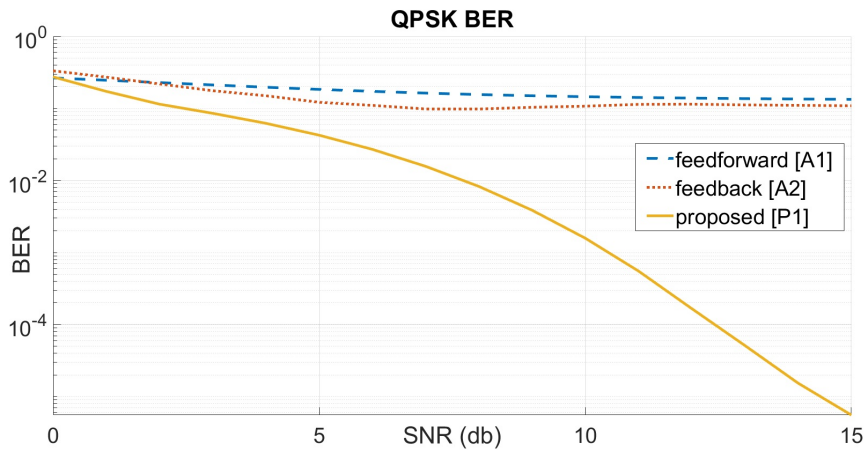


Рис. 7. Залежність бітової похибки від співвідношення сигнал/шум

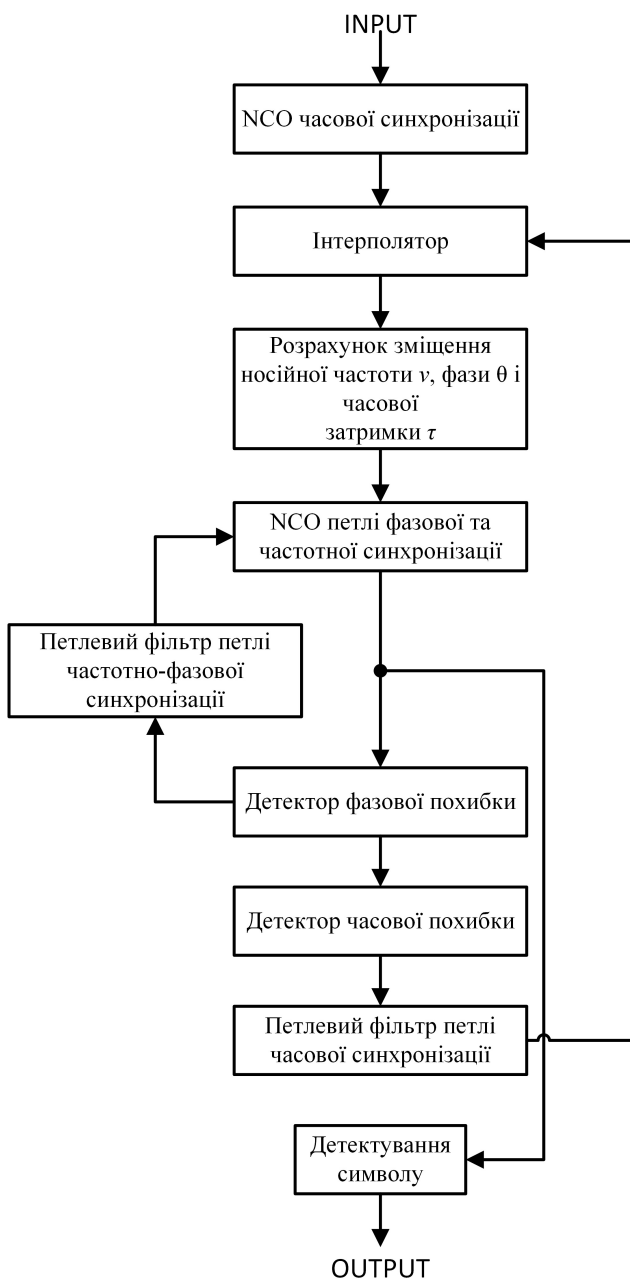


Рис. 6. Функціональна схема методу гібридної синхронізації

З розгляду представлених результатів видно, що для сигналу зі швидкими змінами фази і часової затримки запропонований гібридний алгоритм демодуляції забезпечує значно меншу бітову похибку при однакових умовах приймання у порівнянні зі стандартними методами. Тобто, при фіксованому значенні $BER = 10^{-1}$ запропонований метод має виграв в SNR у всьому діапазоні від 0 до 15 дБ. Зокрема, при $SNR = 5$ dB одержано значення $BER = 0.04$ для запропонованого алгоритму, $BER = 0.12$ для feedback алгоритму і $BER = 0.18$ для feedforward алгоритму.

Висновки

В даній роботі розглянуто завдання демодуляції сигналів з фазовою маніпуляцією у несприятливих умовах радіоприймання. Проаналізовано відомі методи класичної демодуляції, які застосовуються в сучасних модемах зв'язку. Обґрунтовано доцільність застосування у даних умовах гібридних алгоритмів синхронізації та ідентифікації сигналів. В результаті виконаного моделювання показано переваги гібридного методу демодуляції перед традиційними feedforward та feedback алгоритмами. Додатковою перевагою запропонованого методу є також можливість уніфікації підсистеми демодуляції як для безперервного, так й пакетного режимів передачі, зокрема при демодуляції TDMA сигналів.

References

- [1] Kim T. and Min M. (2018) Improved Non-Data-Aided Feedforward Symbol Timing Estimator for Low-Rate Sampling Systems. *IEEE Communications Letters*, Vol. 22, Iss. 5, pp. 1010-1013. DOI: 10.1109/lcomm.2018.2812728

- [2] Gappmair W., Plimon K., Ebert J. and Bergmann M. (2018) Joint recovery of carrier frequency and symbol timing for extremely bandwidth-efficient satellite links. *IET Communications*, Vol. 12, Iss. 1, pp. 44-51. DOI: 10.1049/iet-com.2017.0186
- [3] Wu Z., Zhang Y., Jiang L. and Jian S. (2015) Novel preamble-aided symbol timing estimation for burst communication. *2015 IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. DOI: 10.1109/iccsn.2015.7296158
- [4] Meyr H., Moeneclaey M. and Fechtel S.A. (2001) *Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing*. DOI: 10.1002/0471200573
- [5] Mengali U. and D'Andrea A.N. (1997) *Synchronization Techniques for Digital Receivers*. DOI: 10.1007/978-1-4899-1807-9
- [6] Middlestead R.W. (2017) *Digital Communications with Emphasis on Data Modems*. DOI: 10.1002/9781119011866
- [7] Gardner F. (1986) A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 34, Iss. 5, pp. 423-429. DOI: 10.1109/tcom.1986.1096561

Эффективная демодуляция QPSK сигналов в каналах с неблагоприятными условиями радиоприема

Круглык О. С., Калюжный А. Я., Семенов В. Ю.

Статья посвящена проблеме приема сигналов с фазовой манипуляцией в каналах с неблагоприятными условиями передачи. Проведен анализ существующих решений и рассмотрен гибридный метод демодуляции сигналов, который объединяет алгоритмы прямого оценивания параметров сигнала (feedforward) с последующей синхронизацией параметров в схемах с обратной связью (feedback алгоритмы). Проведено сравнительное моделирование известных традиционных методов демодуляции и гибридного метода на примере сигнала с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK). Полученные результаты подтверждают, что в условиях быстрого изменения параметров сигнала гибридный алгоритм обеспечивает минимальное значение битовой ошибки в зависимости от SNR по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: демодуляция QPSK сигналов; неблагоприятные условия радиоприема; TDMA; частотные искажения

Efficient QPSK signal demodulation in channels with unfavorable conditions of radio reception

Kruhlyk O. S., Kaliuzhnyi O. Ya., Semenov V. Yu.

The main task of the receiver in digital communication systems is to provide a minimum bit error when transmitted data is received. Therefore, the quality of digital communication largely depends on the quality of demodulation of signals in general. In addition, in channels with unfavorable conditions of radio receiving, which are characterized by rapid change in signal parameters due to time and frequency Doppler spread, as well as unknown characteristics of the main transmission channel, there are situations where the most modems don't allow for high-quality receiving of the signal. Thus, increasing the efficiency of demodulation was and remains a relevant task for modern technology of radio receiving and signal processing. The article is devoted to the problem of signal reception with phase manipulation in channels with unfavorable transmission conditions, since in most modern digital communication systems, phase manipulation is the basis of the physical level of transmission. The existing solutions are analyzed and the method of hybrid signal demodulation is considered, which combines the algorithms of feedforward estimation of signal parameters with subsequent synchronization of parameters in feedback schemes. The initial estimates of the carrier frequency offset, phase, and time delay of the signal are calculated according to the known unique insertion and the obtained estimates are used when initializing the feedback circuits for instant entering into tracking mode. A comparative modeling of known traditional methods of demodulation and method of hybrid demodulation is done on an example of a signal with quadrature phase-shift keying (QPSK). Consequently, the obtained results confirm that in the conditions of rapid change of signal parameters the hybrid algorithm provides the minimum value of bit error, depending on SNR, in comparison with traditional methods. The considered synchronization approach can also be used for signals with other types of phase manipulation. Moreover, the proposed hybrid combination of feedback and feedforward algorithms allowed the use of feedback algorithms for signals with packet data transmission.

Key words: QPSK signal demodulation; adverse radio reception conditions; TDMA; feedforward; feedback; ISI; frequency distortion