

УДК 621.396.662.072.078

Жебка В. В., асп. (Державний університет телекомунікацій. +380 (98) 728 46 13. [Viktoria-90-G@mail.ru](mailto:Viktoria-90-G@mail.ru))

## ДО ПИТАННЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ КОГЕРЕНТНОГО ПРИЙОМУ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

**Жебка В.В.** До питання розв'язання задачі когерентного прийому багатопозиційних сигналів. Встановлено переваги когерентного прийому сигналів. Показано особливості застосування когерентного методу. Обґрунтовано його актуальність. Досліджено доречність його застосування в певних ситуаціях. Розглянуто когерентний демодулятор та виконано порівняльний аналіз його з некогерентним демодулятором. Встановлено необхідність розробки алгоритмів із застосуванням когерентного методу, зокрема і в багатоканальних модемах. Розглянуто алгоритм когерентного прийому багатопозиційних сигналів. Досліджено знайдений алгоритм та встановлено його універсальність.

**Ключові слова:** когерентний прийом, демодулятор, багатопозиційні сигнали, багатоканальний модем

**Жебка В.В.** К вопросу решения задачи когерентного приема многопозиционных сигналов. Установлено преимущества когерентного приема сигналов. Показаны особенности применения когерентного метода. Обосновано его актуальность. Исследованы уместность его применения в определенных ситуациях. Рассмотрены когерентный демодулятор и выполнен сравнительный анализ его с некогерентным демодулятором. Установлена необходимость разработки алгоритмов с применением когерентного метода, в том числе и в многоканальных модемах. Рассмотрен алгоритм когерентного приема многопозиционных сигналов. Исследован найденный алгоритм и установлена его универсальность.

**Ключевые слова:** когерентный прием, демодулятор, многопозиционные сигналы, многоканальный модем

**Zhebka V. V.** On the issue of solving the problem of coherent detection of multiposition signals. The advantages of coherent reception were obtained. The features of the application coherent method were showed and relevance of it were proved. The practicability of its application in certain situations were investigated. The coherent demodulator was considered and the comparative analysis of it with incoherent demodulator was obtained. The necessity of development of algorithms with using coherent method, as in the multichannel modem was founded. The algorithm of the coherent reception of multipoint signals was considered. The received algorithm was investigated and the flexibility of it was founded.

**Keywords:** coherent reception, demodulator, multipoint signals, multichannel modem

**Вступ.** Всі методи передачі даних можна розбити на два класи: когерентний та некогерентний прийом. Когерентний прийом має порівняно більші переваги ніж некогерентний. Він має ряд особливостей, однією з яких є значний вииграш у відношенні сигнал/перешкода на вході приймача.

Застосування когерентного прийому для двійкових сигналів дозволяє отримати енергетичний вииграш  $\approx 1$  дБ порівняно з оптимальним некогерентним прийомом [1]. Також, як відомо з [2], в багатоканальних модемах для приймання багатопозиційних сигналів доцільно використовувати когерентний прийом оскільки при збільшенні числа варіантів сигналу його ефективність порівняно з некогерентним прийомом зростає і становить 3-5 дБ.

Проте, маючи низку переваг, когерентний прийом не знаходить застосування в техніці передачі даних з використанням частотного методу поділу сигналів, тому що, *по-перше*, побудова пристроїв синфазування прийнятого й опорного сигналів представляє певні труднощі; *по-друге*, для прийому частоти потрібний окремий когерентний приймач [3]. Звичайно когерентний прийом знаходить застосування тоді, коли приймач приймає в даний сеанс роботи (прийому) одну частоту (наприклад, радіолокаційні системи). У поєднанні з цифровим методом поділу частот вказане обмеження можна легко перебороти.

Раніше відомі методи реалізації прийому багатоканальних модемів базувалися в основному на безпосередній обробці фазоманіпульованого сигналу, в той час як в багатоканальних модемах з ортогональними сигналами після розділення каналів мають місце тільки значення проекції кожного каналного сигналу на взаємно-ортогональні опорні коливання з довільною початковою фазою. Використання багатоканального модему з когерентним методом приймання не знайшла розповсюдження в зв'язку з складністю його реалізації.

З появою мікропроцесорної техніки з'явилася можливість реалізації практично будь-яких алгоритмів. Саме тому когерентний метод приймання знову набув актуальності. В зв'язку з цим виникає необхідність розробки універсального алгоритму когерентної обробки

багатопозиційних сигналів в багатоканальних модемах. **Метою статті** є дослідити особливості когерентного прийому та розглянути один з можливих підходів до розробки алгоритму когерентної обробки багатопозиційних сигналів в багатоканальних модемах.

**Основна частина.** В загальній теорії прийому сигналів існує велика кількість оптимальних алгоритмів. Центральне місце в цій теорії займають алгоритми і пристрої когерентної обробки сигналів. Когерентний прийом є оптимальним в умовах, коли варіанти переданого сигналу відомі повністю. Строго когерентний демодулятор часто називають ідеальним приймачем, який служить еталоном для реальних демодуляторів. Крива завадостійкості когерентного демодулятора, тобто теоретична залежність можливості помилки від відношення сигнал/шум, є основою для оцінки якості роботи демодуляторів в реальному часі. В якості такої оцінки, як правило, використовують значення енергетичних втрат реального демодулятора, що показує на скільки децибел необхідно збільшити енергію сигналу на вході реального демодулятора порівняно з ідеальним когерентним, щоб забезпечити при заданому рівні ту ж ймовірність помилки [4]. Для заданої системи сигналів і при заданому інтервалі обробки (інтервалі прийняття рішення) існує мінімальна ймовірність помилки, яка досягається за допомогою ідеального когерентного приймача.

Для демодулятора характерним є поетапний прийом, тобто прийняття рішення по кожній послідовності сигналів окремо. В такому разі система сигналів, яка існувала на одній послідовності і спектральна щільність потужності гаусівського білого шуму повністю визначають потенціальну завадостійкість, тобто ту мінімальну ймовірність помилки, яку можна отримати на вході демодулятора. Якщо ж приймати рішення по декільком послідовностям, тобто приймати сигнал в цілому, то цим можна зменшити ймовірність помилки. Отже, когерентні демодулятори відкривають ієрархію оптимальних демодуляторів і при певних умовах визначають мінімальну можливість ймовірності помилки поетапного прийому.

При когерентній обробці суміш сигналу та шуму порівнюється з ідеальними зразками сигналу, який передається, і вибирається той зразок, який найменше віддалений (мається на увазі евклідова відстань) від прийнятої суміші [5]. Строго когерентний прийом може бути реалізований лише в тому випадку, коли всі можливі варіанти сигналу, який передається, на вході демодулятора відомі точно, тобто сигнал, який приймається апріорно відомий з точністю до інформаційного параметра. Якщо ж в якості варіантів сигналу використовуються відрізки гармонійних коливань з певними значеннями початкових фаз (як при фазовій модуляції (ФМ) та фазорізницевої модуляції (ФРМ)), то в ідеальному приймачі-демодуляторі повинні зберігатися зразки цих коливань, які співпадають по частоті та фазі з сигналами, які приймаються, тобто в приймачі повинні формуватися когерентні з прийнятим сигналом опорні коливання. Звідси і пішли назви – когерентні приймач і демодулятор.

Функціональна схема когерентного приймача наведена на Рис. 1. Вона складається із перемножувача  $\Pi$ , генератора опорних коливань  $\Gamma$  і фільтра нижніх частот  $\Phi НЧ$ . Опорне коливання  $s_0(t)$  при когерентному прийомі представляє собою точну копію переданого сигналу  $s(t)$ . Якщо сигнал  $s(t)$  являє собою коливання з відомою частотою і фазою, то в приймачі використовується синхронний детектор, в якому опорне коливання синхронне з коливанням несучої частоти. Фільтр нижніх частот виконує роль інтегратора, він виділяє на вході напругу, яка практично співпадає з огинаючою входного (високочастотного) сигналу. В когерентному демодуляторі відношення сигналу до завади на виході лінійно залежить від відношення сигналу до завади на вході. Явище зменшення сигналу під впливом завади відсутнє. Лінійні властивості когерентного приймача визначають його високі показники у відношенні завадостійкості.

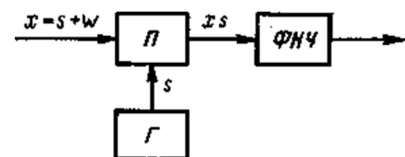


Рис. 1. Структурна схема когерентного приймача

Робота приймача в багатопозиційних системах зводиться до розділення  $m$  сигналів, які відповідають  $m$  позиціям коду. Схему приймача можна представити у вигляді  $m$  каналів,

кожен з яких розрахований на прийом одного певного сигналу. Одним з прикладів багатопозиційної системи є система з частотною маніпуляцією, в якій сигнали представляють собою гармонічні коливання різних частот. Приймач в цій системі містить  $m$  фільтрів, які налаштовані на частоти сигналів, які передаються. За допомогою цих фільтрів і здійснюється розділення сигналів [6].

Створення когерентних з сигналом опорних коливань є непростю задачею. В лініях проведеного та радіозв'язку сигнал піддається декільком перетворенням, в результаті чого на вході демодулятора початкова фаза, а інколи і частота є невідомими величинами. Отже реалізація строго когерентного прийому на сьогодні потребує вдосконалення.

Поки відбувається вдосконалення когерентного методу, фактично в техніці зв'язку реалізуються так звані квазікогерентні демодулятори. Їх суть полягає в тому, що майже точні зразки варіантів сигналу формуються в них з (або з допомогою) прийнятого сигналу шляхом нелінійного (або параметричного) перетворення і вузькосмугової фільтрації останнього. Таке формування можливе в тому випадку, коли початкова фаза несучого коливання змінюється під впливом різних факторів набагато повільніше, ніж інформаційна фаза або різниця фаз. При виконанні цієї умови і не занадто потужній заваді вдається з достатньою точністю передбачити початкову фазу несучого коливання і наблизитися по завадостійкості до ідеального когерентного демодулятора.

Пристрої, які виконують функції формування зразків сигналу при когерентному прийомі, називаються по-різному: пристрої формування когерентних опорних коливань, виділення опорних коливань, відновлення несучої і т.д. В традиційних пристроях виділення опорних коливань когерентне з сигналом коливання формується вузькосмуговим пасивним фільтром або управляючим генератором, який ввімкнений в петлю фазової автопідстройки частоти [6]. Ці пристрої можуть бути реалізовані як на аналоговій, так і на цифровій основі, але на сьогодні аналогова реалізація отримала більше розповсюдження, оскільки реалізація вказаних пристроїв на цифровій основі на сьогодні ще потребує вдосконалення.

Серед спектру когерентних методів (алгоритмів) є як гірші, так і кращі з погляду завадостійкості, складності реалізації та інших показників. Сигнал з ФМ можна приймати тільки когерентним методом, в той час як сигнал з ФРМ можна обробляти різними методами. Якщо ж початкова фаза прийнятих елементів сигналу відома або може бути оцінена за передісторією процесу з високою точністю, то придатні як когерентний, так і некогерентний демодулятори [7]. Проте, порівняно з некогерентним демодулятором, когерентний має більш високу завадостійкість. Переваги когерентного демодулятора залежать від кратності модуляції, розмірності (числа елементів) оброблюваного відрізка сигналу та інших факторів. При прийомі багатопозиційних сигналів з ФРМ та АФРМ (амплітудно-фазо-різницевою модуляцією) переваги когерентного прийому значні. Для ефективної реалізації когерентної обробки необхідна постійна і достатньо мінлива змінна початкова фаза сигналу в каналі, щоб її можна було оцінити більш точно. Якщо початкова фаза прийнятих елементів сигналу невідома або не може бути оцінена за передісторією з високою точністю, то когерентний демодулятор просто непрацездатний. В цьому випадку доречним буде використання некогерентного модулятора, який забезпечить досить високу завадостійкість.

Для ефективної реалізації когерентної обробки сигналів потрібні сталі умови або достатньо повільна зміна початкової фази сигналу в каналі, щоб її можна було оцінити по крайній мірі на порядок більш точно ніж інформаційну фазу. Доцільно дослідити один з можливих підходів до розробки універсального алгоритму когерентної обробки багатопозиційних сигналів у багатоканальних модемах.

Розділення каналних сигналів в демодуляторі когерентного модему здійснюється за допомогою активних фільтрів (кореляторів), в яких вираховуються проекції сигналів на координатні вісі приймача. Алгоритми обчислення синфазної і квадратурної проекції  $(x_n, y_n)$  сигналу  $k$ -го каналу на  $n$ -ій посилювачі мають вигляд:

$$x_n = \int_{(n-1)t}^{nt} S(t) \cdot \cos \omega k t dt, \quad y_n = \int_{(n-1)t}^{nt} S(t) \cdot \sin \omega k t dt, \quad (1)$$

де  $S(t)$  – прийнятий груповий сигнал.

Як відомо із [8; 9], алгоритм оптимального демодулятора полягає у обчисленні відстані між прийнятим і варіантами переданого сигналу і в виборі варіанту з найменшою відстанню. Якщо позначити через  $X_j, Y_j$  проекції  $j$ -го варіанту сигналу, який передається ( $j=1,2,\dots,m$ ) на ті ж опорні коливання, що у виразах (1), то отримаємо

$$x_j^* = \int_{(n-1)t}^{nt} S_j(t) \cdot \cos \omega k t dt, \quad y_j^* = \int_{(n-1)t}^{nt} S_j(t) \cdot \sin \omega k t dt, \quad (2)$$

де  $S_j(t)$   $j$  – варіант сигналу  $k$ -го каналу, то вищесказану відстань можна представити як:

$$d_n = \sqrt{(x_n - x_j^*)^2 + (y_n - y_j^*)^2}, \quad (3)$$

і, відповідно, номер переданого сигналу визначається за формулою:

$$j = \arg \min |(x_n - x_j^*)^2 + (y_n - y_j^*)^2|. \quad (4)$$

Для реалізації алгоритму (4) необхідно по проекціям прийнятого сигналу  $x_n, y_n$ , на деякій множині посилок оцінити значення  $x_j^*, y_j^*$  для всіх варіантів сигналу. Алгоритми оцінювання основані на усередненні тих чи інших параметрів сигналу. При цьому, в якості величин, які усереднюються слід обирати деякі перетворення вихідних параметрів  $x_n, y_n$ , які інваріантні до номеру сигналу, який передається. Таким інваріантним перетворенням є кут між прийнятим та найближчим до нього переданим варіантами сигналу.

Розглянемо метод оцінювання варіантів сигналу, який передається, шляхом усереднення кута між прийнятим і найближчим до нього переданим вектором сигналу.

Обчислимо на  $M$  послідовних середню амплітуду сигналу.

$$A_{cp} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \sqrt{x_n^2 + y_n^2} \quad (5)$$

Визначимо усереднені значення амплітуд всіх варіантів сигналу:

$$A_j = \alpha_j \cdot A_{cp}; j = 1, 2, \dots, m,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, який відповідає  $j$ -му варіанту сигналу, який залежить від типу вибраної конструкції сигналу.

Знаходимо  $\cos \Delta \varphi_n$  і  $\sin \Delta \varphi_n$ , де  $\Delta \varphi$  - кут між прийнятим вектором  $(x_n, y_n)$  і дозволеним вектором (оцінкою), який опинився найближчим до прийнятого  $(x_j^*, y_j^*)$  тобто

$$\cos \Delta \varphi_n = \frac{x_n \cdot x_{j_n}^* + y_n \cdot y_{j_n}^*}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2} \cdot \sqrt{x_{j_n}^{*2} + y_{j_n}^{*2}}}; \quad \sin \Delta \varphi_n = \frac{x_n \cdot x_{j_n}^* - y_n \cdot y_{j_n}^*}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2} \cdot \sqrt{x_{j_n}^{*2} + y_{j_n}^{*2}}}. \quad (6)$$

Тут розуміється, що відомі деякі оцінки проекцій  $x_{j_n}^*, y_{j_n}^*$  варіантів сигналу, на основі яких демодулятор приймає рішення який із сигналів було передано. В якості першочергових оцінок можуть бути використані проекції першої з прийнятих посилок. Усереднюємо отримані  $\cos \Delta \varphi_n$  і  $\sin \Delta \varphi_n$ :

$$\cos \tilde{\Delta} \varphi_n = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \cos \Delta \varphi_n; \quad \sin \tilde{\Delta} \varphi_n = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \sin \Delta \varphi_n. \quad (7)$$

Тепер слід змінити оцінки проекцій сигналу таким чином, щоб фаза відповідних векторів змінилася на  $\tilde{\Delta} \varphi_n$ , а амплітуда стала рівною  $A_j$ .

Уточнені оцінки проекцій  $j$ -го варіанту  $x_j^{**}, y_j^{**}$  дорівнюють:

$$x_j^{**} = A_j \cdot \cos(\varphi_j^* + \tilde{\Delta} \varphi_n); \quad y_j^{**} = A_j \cdot \sin(\varphi_j^* + \tilde{\Delta} \varphi_n); \quad (8)$$

або після тригонометричних перетворень:

$$x_j^{**} = A_j \cdot (\cos \varphi_j^* \cdot \cos \tilde{\Delta} \varphi_n - \sin \varphi_j^* \cdot \sin \tilde{\Delta} \varphi_n); \quad y_j^{**} = A_j \cdot (\sin \varphi_j^* \cos \tilde{\Delta} \varphi_n + \cos \varphi_j^* \sin \tilde{\Delta} \varphi_n). \quad (9)$$

Розкривши значення  $\cos \varphi_j^*$ ,  $\sin \varphi_j^*$  у виразі (9) отримаємо:

$$x_j^{**} = \alpha_j \cdot (x_j^* \cdot \cos \tilde{\Delta} \varphi_n + y_j^* \cdot \sin \tilde{\Delta} \varphi_n); \quad y_j^{**} = \alpha_j \cdot (y_j^* \cos \tilde{\Delta} \varphi_n - x_j^* \sin \tilde{\Delta} \varphi_n), \quad (10)$$

де  $\alpha_j$  – коефіцієнт, який приймає визначене значення, в залежності від номеру вектора і вибраної конструкції сигналу.

**Висновок.** Досліджений в статті алгоритм когерентного прийому багатопозиційних сигналів в багатоканальних модемах не є алгоритмом максимально правдоподібного оцінювання. Розглянутий алгоритм, на відміну від інших алгоритмів, є універсальним, тобто його можна застосовувати для будь-якої системи багатопозиційних сигналів. При зміні системи сигналів змінюються лише коефіцієнти  $\alpha_j$  в формулі (10). Цей алгоритм орієнтований на реалізацію демодулятора з допомогою мікропроцесорів. Проте в ньому є недолік такий, що в результаті нелінійного перетворення (6) оцінки проєкцій варіантів сигналу не є ефективними. Для отримання ефективних оцінок варіантів сигналу ( $x_j^*$ ,  $y_j^*$ ) слід скористатися правилом максимальної правдоподібності, яке в поєднанні з правилом вибору (4) дасть оптимальний алгоритм когерентної обробки групових сигналів багатоканальних модемів.

Застосування когерентного методу відкриває значні можливості і нові шляхи його застосування. А оскільки на сьогодні є всі передумови та можливості його використання, то значення даного методу зростає. Отже, на сьогодні когерентний метод є актуальним і потребує розробки та вдосконалення алгоритмів, які ґрунтуються на основі використання вказаного методу.

#### Література:

1. Шварцман В. О. Каналы передачи данных / В. О. Шварцман. – Москва : Связь, 1970.
2. Бенкет В.Л. АФМ Сигналы в системах передачи дискретных сообщений / В. Л. Бенкет, Л. А. Лысенко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – №9. – С. 49-63.
3. Панов А.Ф. Спосіб реалізації когерентного прийому / А.Ф. Панов, В.Г. Сніцар, В.О. Чорний / Вісник ЖДТУ. – 2005. – №2(33). – С. 89-94.
4. Окунев Ю. Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами / Ю.Б. Окунев. – Москва : Радио и связь, 1991. – 295 с.
5. Багатоканальні модеми : монографія / [Л. Н. Беркман, І. С. Щербина, О.І. Чумак, Л.В. Рудик] ; під наук. ред. С. Є. Захаренка. – К.: Зв'язок, 2006. – 149 с.
6. Зюко А. Г. Теория передачи сигналов : учебник для ВУЗ-ов/ А. Г. Зюко, Ю. Ф. Коробов. – Москва : Связь, 1972. – 282 с.
7. Кривуца В. Г. Аналіз методів оптимальної обробки багатопозиційних сигналів / В. Г. Кривуца, Л. Н. Беркман, П. П. Яцук / Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – №1. – С. 5-10.
8. Оптимальные по быстродействию системы ФАП / [Д. А. Худолий, В. К. Стеклов, И. А. Тарасенко, В. П. Охрушак] // Зв'язок. – 1998. – №4. – С. 41-45.
9. Шварцман В.О., Емельянов Г.А. Теория передачи дискретной информации / В. О. Шварцман, Г. А. Емельянов // Москва : Связь, 1986. – 424 с.