

УДК 621.391.3

**Бондарчук А.П., к.т.н.; Варфоломеева О.Г., к.т.н.;**  
**Коршун Н.В., к.т.н.; Чумак О.І., к.т.н.; Дударева Г.О.**

## ЗАДАЧА СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДЕНИХ СИГНАЛІВ ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

**Bondarchuk A.P., Varfolomeeva O.G., Korshun N.V., Chumak A.I., Dudareva H.O. The problem of synthesizing algorithms for optimal processing of composite signals of broadband communication systems.** In the article the solutions of the problem of synthesis of algorithms for optimal processing of composite signals of broadband communication systems are considered, which will allow one to approach both the signals and methods of their reception under different conditions on the ratio of elements inside the composite signal, dictated by real communication channels and real devices of formation. The algorithms of noncoherent reception with incoherent addition of both rays and elements, that is, without taking into account the multipath structure of the signal, are presented.

**Keywords:** synthesis of algorithms, incoherent reception, optimal processing of composite signals, rays, elements.

**Бондарчук А.П., Варфоломеева О.Г., Коршун Н.В., Чумак О.І., Дударева Г.О. Задача синтезу алгоритмів оптимальної обробки складених сигналів широкополосних систем зв'язку.** В статті розглянуто вирішення задачі синтезу алгоритмів оптимальної обробки складених сигналів широкополосних систем зв'язку, що дозволить з єдиних позицій підходити як до дослідження самих сигналів, так і до методів їх приймання при накладенні різних умов на співвідношення елементів всередині складеного сигналу, які диктуються реальними каналами зв'язку й реальними пристроями формування. Представлено алгоритми некогерентного прийому з некогерентним складанням променів, і елементів, тобто без урахування багатопроменевої структури сигналу.

**Ключові слова:** синтез алгоритмів, некогерентний прийом, оптимальна обробка складених сигналів, промені, елементи.

**Бондарчук А.П., Варфоломеева О.Г., Коршун Н.В., Чумак А.И., Дударева А.А. Задача синтеза алгоритмов оптимальной обработки составных сигналов широкополосных систем связи.** В статье рассмотрены решения задачи синтеза алгоритмов оптимальной обработки составных сигналов широкополосных систем связи, что позволит с единых позиций подходить как к исследованию сигналов, так и к методам их приема при наложении различных условий на соотношение элементов внутри составного сигнала, диктуемые реальными каналами связи и реальными устройствами формирования. Представлены алгоритмы некогерентного приема с некогерентным сложением и лучей, и элементов, то есть без учета многолучевой структуры сигнала.

**Ключевые слова:** синтез алгоритмов, некогерентный прием, оптимальная обработка составных сигналов, лучи, элементы.

### Вступ

Враховуючи, що одні і ті ж канали в мережі використовуються як для передачі інформації для користувачів, так і спеціальної, а саме: управління, сигналізації, синхронізації і т. д., то доцільно максимально використовувати канали зв'язку побудовані як за допомогою традиційних технологій, так і інноваційних.

На сьогодні ще недостатньо досліджено сигнали широкополосних систем зв'язку, що мають практичний зміст і враховують багатоваріантний розвиток засобів та сучасних технологій. Багатопроменеве поширення сигналів є одним з основних видів завад при здійсненні зв'язку: флуктуаційний шум, лінійні спотворення, що проявляються у вигляді міжканальних перехідних завад і міжсимвольних спотворень, імпульсних завад і короткочасних перерв зв'язку і т.д.

Подолання цих явищ багатопроменевому поширенню сигналів пасивними методами неефективно. Широкополосні системи зв'язку з складеними сигналами дають можливість активно боротися з наслідками багатопроменевого поширення і використовувати це явище

© Бондарчук А.П., Варфоломеева О.Г., Коршун Н.В., Чумак О.І., Дударева Г.О., 2018

для підвищення вірності передачі інформації. Згідно теорії інформації загальною рисою складених сигналів є велика надмірність. Приймання цих сигналів, як і приймання будь-яких сигналів з надмірністю, можна здійснювати в цілому або поелементно. Тільки при обробці складеного сигналу в цілому можливо, зокрема, здійснити роздільне приймання променів при багатопроменовому поширенні сигналу і реалізувати повністю інші переваги складеного сигналу.

Серед невирішених проблем на сьогодні залишається задача синтезу алгоритмів оптимальної обробки складених сигналів широкосмугових систем зв'язку, що дозволить з єдиних позицій підходити як до дослідження самих сигналів, так і до методів їх приймання при накладенні різних умов на співвідношення елементів всередині складеного сигналу, що диктується реальними каналами зв'язку й реальними пристроями формування [1, 3].

В статті досліджено оптимальні методи прийому складених сигналів в багатопроменовому каналі зв'язку, зокрема, некогерентний метод прийому в цілому з когерентним накопиченням елементів (коли початкова фаза сигналу невідома в місці прийому, але однакова у всіх елементів сигналу); некогерентний метод прийому в цілому з некогерентним накопиченням елементів (коли початкові фази елементів невідомі і змінюються незалежно). Досліджені алгоритми прийому складених сигналів при складанні променів справедливі також і для складених сигналів при рознесеному прийомі.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Можливість поділу променів в системах зв'язку з складеними сигналами обумовлена тим, що функція автокореляції цих сигналів істотно відмінна від нуля в інтервалі, що становить лише дуже малу частину тривалості посилок. Ширина головного максимуму автокореляційної функції пов'язана з шириною смуги частот сигналу наближеним співвідношенням:

$$\Delta t \approx \frac{1}{F} \quad (1)$$

Застосування складених сигналів, що володіють автокореляційною функцією певного виду дозволяє здійснювати роздільний прийом сигналів, що надійшли різними шляхами в багатопроменовому каналі зв'язку. В такому каналі зв'язку кожен з надходжуваних променів несе інформацію про переданий сигнал, і використання всіх променів має підвищити вірність передачі повідомлень. Цього можна досягти шляхом складання роздільно прийнятих променів. Завдання складання променів аналогічно задачі складання сигналів при рознесеному прийомі і задачі прийому сигналів з надмірністю. Це завдання оптимального використання надмірності прийнятих сигналів і вирішується методами прийому в цілому. Розглядаючи окремо прийняті промені як елементи цілого сигналу на основі алгоритмів прийому в цілому, можна побудувати відповідні алгоритми складання променів.

У більш загальному вигляді оптимальні алгоритми прийому складених сигналів в багатопроменовому каналі зв'язку можуть бути отримані на підставі критерію ідеального спостерігача. Методи прийому складених сигналів в багатопроменовому каналі зв'язку утворюються як комбінації відповідних методів прийому в цілому по відношенню до променів і по відношенню до елементів складеного сигналу.

Дослідимо методи прийому складених сигналів в багатопроменовому каналі зв'язку.

*Некогерентний прийом з когерентним складанням елементів і некогерентним складанням променів.* Проаналізуємо алгоритм оптимального прийому при наступних умовах: в місці прийому відомі коефіцієнти передачі променів  $\mu_i$ , невизначені фази сигналу у всіх променях  $\varphi_{ik}$  випадкові і незалежні, але однакові у всіх елементів сигналу в даному промені, тобто  $\varphi_{ik} = \varphi_i$ . Умовна щільність ймовірності при цьому має вигляд:

$$\omega[x(t)/s_r(t), \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_L] = A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T \right] \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{2}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i + \left[ \cos \varphi_i \sum_{k=1}^N \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}(t - \Delta t_i) dt + \sin \varphi_i \sum_{k=1}^N \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}^*(t - \Delta t_i) dt \right] \right\}. \quad (2)$$

Для знаходження оптимального в цій ситуації алгоритму усереднено (2) по всіх  $\varphi_i$ , вважаючи, що фази променів  $\varphi_i$  розподілені рівномірно в інтервалі  $0-2\pi$ . Проводимо усереднення по всіх фазах  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_L$ .

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T \right] \times \prod_{i=1}^L I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{ri} \right], \quad (3)$$

де

$$V_r = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^L \mu_i \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}(t - \Delta t_i) dt \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^L \mu_i \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}^*(t - \Delta t_i) dt \right]^2} \quad (4)$$

$V_r$  геометрична сума векторів - це величина, що обчислюється для кожного променя.

Відповідне правило рішення про прийом  $r$ -го символу має вигляд

$$\sum_{i=1}^L \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{ri} \right] > \sum_{i=1}^L \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{qi} \right]. \quad (5)$$

Відповідно до алгоритму (5) відносно променів виконуються ті ж операції, що і у відношенні елементів складеного сигналу при некогерентному прийомі з некогерентним накопиченням, коли фази елементів випадкові і незалежні.

Таким чином, *оптимальним методом* прийому складених сигналів у багатопробеновому каналі, коли фази сигналів всіх променів випадкові і незалежні, а фази елементів однакові, є *некогерентний прийом з некогерентним складанням променів і когерентним накопиченням елементів*.

Алгоритм (5) можна замінити близьким в сенсі оптимальності прийому алгоритмом

$$\sum_{i=1}^L \mu_i^2 V_{ri}^2 > \sum_{i=1}^L \mu_i^2 V_{qi}^2. \quad (6)$$

При великих відношеннях сигнал/шум найкраще наближення до оптимального алгоритму (5) дає нерівність

$$\sum_{i=1}^L \mu_i V_{ri} > \sum_{i=1}^L \mu_i V_{qi}. \quad (7)$$

Відповідно до алгоритмів (6) і (7) кожен промінь приймається некогерентно і потім прийняті промені некогерентно складаються (з урахуванням коефіцієнтів передачі променів) лінійно або квадратурно (в залежності від відношення сигнал/шум). Алгоритм прийому

кожного променя в (6) і (7) збігається з алгоритмом виділення одного променя при некогерентному прийомі.

Для реалізації некогерентного прийому з когерентним накопиченням складених сигналів в багатопроменовому каналі зв'язку зручно використовувати узгоджені з сигналом фільтри. Обвідна напруги на виході узгодженого фільтра має піки, пропорційні величинам  $V_r$  в окремих променях (рис.1).

Так як фільтр є лінійним пристроєм, його вихідна буде дорівнювати сумі від кожного променя. При досить вузькій функції автокореляції сигналу всі промені будуть повністю розділені в часі. При цьому легко здійснити вибір самого потужного променя, тобто відлік по найбільшому піку.

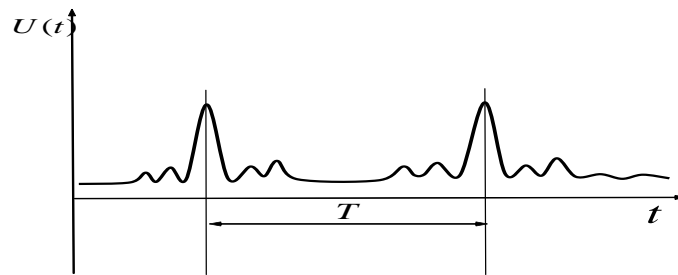


Рис. 1. Обвідна сигналу на виході узгодженого фільтра при багатопроменовому поширенні

Для реалізації алгоритму (6) необхідно продетектувати напругу на виході узгодженого фільтра детектором з квадратурною характеристикою і підсумувати напруги, відповідні пікам обвідної, з вагами, пропорційними  $\mu_i^2$ . Блок-схема приймача, що реалізує алгоритм (6) за допомогою узгоджених фільтрів, наведена на рис.2. Напруга з виходу квадратурного детектора надходить на пристрій визначення максимумів. Відліки напруги, відповідні максимумам обвідної через множники на коефіцієнти  $\mu_i^2$  надходять послідовно на накопичувач-інтегратор. Напруги на виходах інтеграторів після приходу всіх променів порівнюються у схемі порівняння. Коефіцієнти передачі променів визначаються спеціальним пристроєм, який усереднює значення максимумів обвідної.

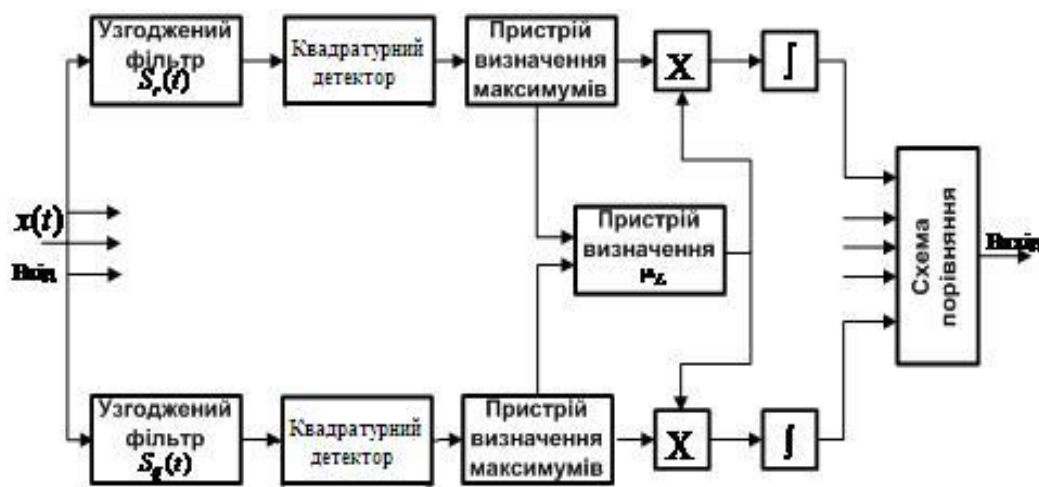


Рис. 2. Блок-схема некогерентного приймача з когерентним складанням елементів сигналу і некогерентним складанням променів, що використовує узгоджені фільтри

Розглянемо алгоритм некогерентного прийому з некогерентним складанням елементів при відсутності відомостей про коефіцієнти передачі променів  $\mu_i$ . Для цього необхідно знайти умовну щільність ймовірності  $\omega[x(t)/s_r(t)]$  при невідомих  $\mu_i$  променів шляхом усереднення умовної щільності ймовірності (3) при конкретних  $\mu_i$  при всіх можливих  $\mu_i$

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \omega[x(t)/s_r(t)\mu_1\mu_2\dots\mu_L] \omega[\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_L] d\mu_1, d\mu_2, \dots, d\mu_L. \quad (8)$$

Вважаємо, що коефіцієнти передачі всіх променів  $\mu_i$  незалежні, і знайдемо спочатку правило рішення для релеєвських завмирань в кожному промені. Тоді

$$\omega[\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_L] = \prod_{i=1}^L \frac{2\mu_i}{\mu_{0i}^2} \exp\left(-\frac{\mu_i}{\mu_{0i}^2}\right), \quad (9)$$

де  $\mu_{0i} = \sqrt{\mu_i^2}$  – середнє квадратичне значення коефіцієнта передачі  $i$ -го променя. Підставляючи (3) і (9) в (8),

$$\begin{aligned} \omega[x(t)/s_r(t)] &= A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T \right] \times \\ &\times \prod_{i=1}^L \int_0^\infty \frac{2\mu_i}{\mu_{0i}^2} \exp\left(-\frac{\mu_i}{\mu_{0i}^2} - \frac{1}{v_0^2} \mu_i^2 P_r T\right) I_0\left(\frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{ri}\right) d\mu_i = \\ &= A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T \right] \prod_{i=1}^L \int_0^\infty x_i \exp[-x_i(1+h_{0ir}^2)] \times \\ &\quad \times I_0\left(j \frac{2\mu_{0i}}{v_0^2} V_{ri} x_i\right) dx_i \end{aligned} \quad (10)$$

де  $h_{0ir}^2 = \frac{\mu_{0i}^2 P_r T}{v_0^2}$  – середнє відношення енергії  $r$ -го варіанту сигналу в  $i$ -му промені до спектральної щільності завади.

Інтеграл у виразі (10) є табличним, підставляючи його значення, отримуємо

$$\begin{aligned} \omega[x(t)/s_r(t)] &= A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T \right] \times \\ &\times \prod_{i=1}^L \frac{1}{2} \frac{1}{1+h_{0ir}^2} \exp\left[\frac{\mu_{0i}^2 V_{ri}^2}{v_0^4 (1+h_{0ir}^2)}\right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Відповідне правило рішення про прийом  $r$ -го символу для систем з активною паузою має вид

$$\sum_{i=1}^L \frac{\mu_{0i}^2 V_{ri}^2}{1+h_{0ir}^2} > \sum_{i=1}^L \frac{\mu_{0i}^2 V_{qi}^2}{1+h_{0ir}^2}. \quad (12)$$

Приймачі, які реалізують алгоритм (12), будуть відрізнятися від приймачів, що реалізують алгоритм (6), тільки вагомим коефіцієнтом, з яким складаються окремі промені.

Якщо середньоквадратичні значення коефіцієнтів передачі усіх променів, що складаються, рівні між собою, то правило рішення (12) можна спростити:

$$\sum_{i=1}^L V_{ri}^2 > \sum_{i=1}^L V_{qi}^2. \quad (13)$$

Таким чином, при рівних інтенсивностях променів оптимальною схемою складання при релеєвських завмираннях є схема квадратурного складання. В цьому випадку алгоритм складання променів співпадає з алгоритмом некогерентного складання при рознесеному прийомі  $\sum_{k=1}^N V_{kq}^2$ . Правило рішення(12) зводиться до правила (13) і при нерівних інтенсивностях променів, що приймаються, якщо виконується умова

$$h_{0ir}^2 \gg 1 \text{ при усіх } i. \quad (14)$$

Так як умова (14) зазвичай виконується (з малою інтенсивністю просто не мають сенсу), то можна вважати, що оптимальним правилом некогерентного складання променів при релеєвських завмираннях є правило (13). Для реалізації правила (13) використовуються такі ж приймачі, як і для реалізації (6), однак у цьому випадку всі промені складаються з рівною вагою.

Знайдемо тепер правило рішення при некогерентному складенню променів, якщо завмирання в кожному промені незалежні і підпорядковані узагальненому розподілу Релея. У цьому випадку

$$\omega[\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_L] = \prod_{i=1}^L \frac{2\mu_i}{\mu_{\phi i}^2} \exp\left[-\frac{\mu_i^2 + \mu_{pi}^2}{\mu_{\phi i}^2}\right] I_0\left[2\frac{\mu_i^2 + \mu_{pi}^2}{\mu_{\phi i}^2}\right], \quad (15)$$

де  $\mu_{pi}$  – регулярна складова коефіцієнта передачі  $i$ -го променя;  $\mu_{\phi i}^2 = \mu_{0i}^2 - \mu_{pi}^2$  – середнє значення квадрата флуктуючих частин коефіцієнта передачі. Підставляючи (3) і (15) в (8),

$$\begin{aligned} \omega[x(t)/s_r(t)] &= A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T \right] \times \\ &\times \prod_{i=1}^L \int_0^{\infty} \frac{2\mu_i}{\mu_{\phi i}^2} \exp\left(-\frac{\mu_i^2 + \mu_{pi}^2}{\mu_{\phi i}^2} - \frac{1}{v_0^2} \mu_i^2 P_r T\right) \times \\ &\times I_0\left(\frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{ri}\right) I_0\left(2\frac{\mu_i \mu_{pi}}{\mu_{\phi i}^2}\right) d\mu_i = A_{\exp} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T \right] \times \\ &\times \prod_{i=1}^L \exp(-k_i^2) \int_0^{\infty} x_i^2 \exp[-x_i^2(1+h_{\phi ir}^2)] \times \\ &\times I_0\left(j\frac{2V_{ri}\mu_{\phi i}}{v_0^2} x_i\right) I_0[j2k_i x_i] dx_i \end{aligned} \quad (16)$$

де:  $x_i^2 = \frac{\mu_i^2}{\mu_{\phi i}^2}$ ;  $k_i^2 = \frac{\mu_{pi}^2}{\mu_{\phi i}^2}$ ;  $\mu_{\phi i} = \sqrt{\mu_{\phi i}^2}$ ;  $h_{\phi ir}^2 = \frac{\mu_{\phi i}^2 P_r T}{v_0^2}$  – середнє значення флуктуючих частин

енергії  $r$ -го варіанту сигналу в  $j$ -му промені до спектральної щільності завади. Інтеграл у виразі (16) є табличним, підставляючи його значення, отримуємо

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = A_{\text{exp}} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T \right] \prod_{i=1}^L \frac{1}{2} \frac{1}{1+h_{\phi ir}^2} \times \exp \left[ \frac{V_{ri}^2 \overline{\mu_{\phi i}^2} - v_0^4 k_i^2 h_{\phi ir}^2}{v_0^4 (1+h_{\phi ir}^2)} \right] I_0 \left[ \frac{2k_i^2 \overline{\mu_{\phi i}^2} V_{ri}}{v_0^2 (1+h_{\phi ir}^2)} \right]. \quad (17)$$

Відповідно до (17) правило рішення про прийом  $r$ -го символу для систем з активною паузою має вид

$$\sum_{i=1}^L \left\{ \frac{\overline{\mu_{\phi i}^2} V_{ri}^2}{v_0^4 (1+h_{\phi ir}^2)} + \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_{pi} V_{ri}}{v_0^2 (1+h_{\phi ir}^2)} \right] \right\} >> \sum_{i=1}^L \left\{ \frac{\overline{\mu_{\phi i}^2} V_{qi}^2}{v_0^4 (1+h_{\phi iq}^2)} + \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_{pi} V_{qi}}{v_0^2 (1+h_{\phi iq}^2)} \right] \right\}. \quad (18)$$

Алгоритм (18) при рівних параметрах променів збігається з алгоритмом рознесеного прийому при завмираннях, що підкоряються узагальненому розподілу Релея. Як і слід було очікувати, правило рішення (18) є комбінацією правил рішення при релеєвських завмираннях (12) і при відсутності завмирань (5). При релеєвських завмираннях, тобто при  $\mu_{pi} = 0$ , (3.63) переходить в правило рішення (12); при відсутності завмирань, тобто при  $\overline{\mu_{\phi i}^2} = 0$ , (3.63) переходить в правило рішення (5).

Реалізація алгоритму (18) досить складна і в залежності від співвідношення між флюктуючими і регулярною складовою коефіцієнтів передачі доцільно використовувати правило рішення (12). Це правило зводяться до квадратурного складання променів. Використовуючи апроксимацію  $\ln I_0(x) \approx x^2$ , алгоритм (18) можна представити

$$\sum_{i=1}^L \left[ \frac{\overline{\mu_{\phi i}^2}}{1+h_{\phi ir}^2} + \frac{4\mu_{pi}^2}{(1+h_{\phi ir}^2)^2} \right] V_{ri}^2 > \sum_{i=1}^L \left[ \frac{\overline{\mu_{\phi i}^2}}{1+h_{\phi iq}^2} + \frac{4\mu_{pi}^2}{(1+h_{\phi iq}^2)^2} \right] V_{qi}^2, \quad (19)$$

$h_{\phi ir}^2 \gg 1$  приводиться до виду

$$\sum_{i=1}^L \left( 1 + \frac{4}{h_{\phi ir}^2} \frac{\mu_{pi}^2}{\overline{\mu_{\phi i}^2}} \right) V_{ri}^2 > \sum_{i=1}^L \left( 1 + \frac{4}{h_{\phi iq}^2} \frac{\mu_{pi}^2}{\overline{\mu_{\phi i}^2}} \right) V_{qi}^2. \quad (20)$$

При великих відношеннях сигнал/шум, при  $h_{\phi ir}^2 \gg 1$  та апроксимації  $\ln I_0(x) \approx x$  отримаємо

$$\sum_{i=1}^L \left( V_{ri}^2 + \frac{2v_0^2 \mu_{pi}}{\overline{\mu_{\phi i}^2}} V_{ri} \right) V_{ri}^2 > \sum_{i=1}^L \left( V_{qi}^2 + \frac{2v_0^2 \mu_{pi}}{\overline{\mu_{\phi i}^2}} V_{qi} \right) V_{qi}^2. \quad (21)$$

Як відомо, за допомогою методу максимальної правдоподібності отримані оптимальні алгоритми для рознесеного прийому при незалежних завмираннях з невідомою статистикою. Оптимальним в цьому випадку є квадратурне складання з рівною вагою за правилом (13). Цей результат справедливий і для некогерентного складання променів при невідомій статистиці їх завмирань. Таким чином, при некогерентному складанню променів у всіх випадках оптимальним або близьким до нього є квадратурне складання за правилом (13).

*Некогерентний прийом з некогерентним складанням і променів і елементів.* При некогерентному прийомі з некогерентним накопиченням елементів не відбувається поділу променів. Тому спочатку виводиться загальний алгоритм некогерентної обробки сигналу в цілому в багатопробному каналі, що за певних умов цей алгоритм призводить до ефекту, аналогічного складанню променів.

Отже, знайдемо алгоритм оптимального прийому складених сигналів при наступних умовах: в місці прийому відомі коефіцієнти передачі променів, а невизначені фази елементів

сигналу в усіх випадках  $\varphi_{ik}$  випадкові і незалежні при всіх  $i$  та  $k$ , в тому числі і для елементів одного променя. Для знаходження оптимального в цій ситуації алгоритму усереднимо (3) по всіх  $\varphi_{ik}$ . Причому будемо вважати, що всі  $\varphi_{ik}$  мають рівномірний розподіл в інтервалі  $0-2\pi$ . Після усереднення

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = A_{\text{exp}} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T \right] \times \prod_{i=1}^L \prod_{k=1}^N I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{kri} \right], \quad (22)$$

де

$$V_{kri} = \sqrt{\left[ \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}(t - \Delta t_i) dt \right]^2 + \left[ \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}^*(t - \Delta t_i) dt \right]^2}$$

величина, що обчислюється для кожного елемента в кожному промені. Відповідне правило рішення про прийом  $r$ -го символу для систем з активною паузою має вид

$$\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^N \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{kri} \right] > \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^N \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_{kqi} \right]. \quad (23)$$

Таким чином, оптимальним методом прийому складених сигналів в багатопроменевому каналі зв'язку в умовах, коли фази елементів сигналу у всіх променях випадкові і незалежні, є некогерентний прийом з некогерентним складанням і променів і елементів [2].

Алгоритм (23) можна замінити близьким в сенсі оптимальності прийому алгоритмом

$$\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^N 2\mu_i^2 V_{kri}^2 > \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^N 2\mu_i^2 V_{kqi}^2. \quad (24)$$

Умова виключення взаємовпливу променів виконується для різних сигналів при різних умовах. Зокрема, для послідовного складеного сигналу ця умова виконується тільки тоді, коли елементи сигналу в одному промені мають загальну невизначену фазу. При цьому недоцільно застосовувати некогерентний прийом з некогерентним накопиченням і променів і елементів (при реалізації його у виді (24)). У цьому випадку реалізацію легше здійснити некогерентним прийомом з некогерентним складанням променів і когерентним накопиченням елементів.

Для паралельного складеного сигналу умова виключення взаємовпливу променів виконується при будь-яких співвідношеннях фаз елементів. При використанні цього сигналу в ряді випадків (наприклад, при неможливості забезпечити синфазність елементів у місці передачі або в каналі зв'язку) може виявитися доцільною реалізація некогерентного прийому з некогерентним складанням і променів, і елементів.

Для паралельного багаточастотного складеного сигналу алгоритм (24) можна спростити. Якщо ввести захисний проміжок, то в інтервал прийому  $0-T$  не будуть потрапляти перекриваючі частини сусідніх посилок. При цьому у виразах для  $V_{kri}$  час інтегрування  $0-T$  буде загальним для всіх променів. Тоді для паралельного багаточастотного сигналу з незалежними невизначеними фазами елементів

$$V_{kri} = \sqrt{\left[ \int_0^T x(t) \cos(\omega_{kr}t - \omega_{kr}\Delta t_i) dt \right]^2 + \left[ \int_0^T x(t) \sin(\omega_{kr}t - \omega_{kr}\Delta t_i) dt \right]^2}, \quad (25)$$

що еквівалентно з точки зору алгоритму некогерентного прийому виразом



$$V_{kri} = \sqrt{\left[ \int_0^T x(t) \cos \omega_{kr} t dt \right]^2 + \left[ \int_0^T x(t) \sin \omega_{kr} t dt \right]^2}, \quad (26)$$

в якому фаза елемента місцевого сигналу  $\omega_{kr}\Delta t_i$  віднесена до невизначеної фази надходжуваного елемента.

Відповідно до (26) величина  $V_{kri}$  не залежить від  $i$  і є загальною для всіх променів. При цьому алгоритм (24) приймає вид

$$\sum_{i=1}^L \mu_i^2 \sum_{k=1}^N V_{kr}^2 > \sum_{i=1}^L \mu_i^2 \sum_{k=1}^N V_{kq}^2, \quad (27)$$

що еквівалентно

$$\sum_{k=1}^N V_{kr}^2 > \sum_{k=1}^N V_{kq}^2. \quad (28)$$

Таким чином, для реалізації некогерентного прийому з некогерентним складанням променів і елементів достатньо обчислити величини  $V_{kr}$  для всіх елементів паралельного сигналу, тобто реалізувати некогерентний прийом з некогерентним накопиченням без урахування багатопроменевої структури сигналу [1, 4].

Дослідимо чи реалізація алгоритму (28) дійсно еквівалентна некогерентного складання елементів в роздільно прийнятих променях. Сигнал, який надходить при відсутності зовнішньої завади можна записати наступним чином:

$$x(t) = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^N a_{ki} \cos(\omega_{kr} t + \phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i). \quad (29)$$

Обчислимо величину  $V_{kr}^2$  для одного елемента (через запроваджений захисний проміжок перекриття сусідніх посилок відсутнє). Крім того, елементи сигналу ортогональні на інтервалі  $0-T$ :

$$\begin{aligned} V_{kr}^2 &= \left[ \int_0^T x(t) \cos \omega_{kr} t dt \right]^2 + \left[ \int_0^T x(t) \sin \omega_{kr} t dt \right]^2 = \\ &= \left[ \sum_{i=1}^L a_{ki} \cos(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^L a_{ki} \sin(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i) \right]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^L a_{ki}^2 \cos^2(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i) + \sum_{i=1}^L \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^L a_{ki} a_{kj} \cos(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i) \times \\ &\quad \times \cos(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_j) + \sum_{i=1}^L a_{ki}^2 \sin^2(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i) + \\ &\quad + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^L \sum_{j=1}^L a_{ki} a_{kj} \sin(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_i) \sin(\phi_k - \omega_{kr} \Delta t_j) = \\ &= \sum_{i=1}^L a_{ki}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^L \sum_{j=1}^L a_{ki} a_{kj} \cos \omega_{kr} (\Delta t_i - \Delta t_j). \end{aligned} \quad (30)$$

Далі,

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N V_{kr}^2 &= \sum_{k=1}^N \left( \sum_{i=1}^L a_{ki}^2 \right) + \sum_{k=1}^N \left[ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^L \sum_{j=1}^L a_{ki} a_{kj} \cos \omega_{kr} (\Delta t_i - \Delta t_j) \right] = \\ &= \sum_{k=1}^N \left( \sum_{i=1}^L a_{ki}^2 \right) + \sum_{i=1}^L \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^L \left[ \sum_{k=1}^N a_{ki} a_{kj} \cos \omega_{kr} (\Delta t_i - \Delta t_j) \right]. \end{aligned} \quad (31)$$

Сума у квадратних дужках другого доданка виразу (31) є значення автокореляційної функції використовуваного сигналу при  $\tau \approx (\Delta t_i - \Delta t_j)$ . При використанні сигналів з вузькою автокореляційною функцією і при достатньо великому числу елементів складеного сигналу другий доданок в (31) буде малий в порівнянні з першим. Тоді

$$\sum_{k=1}^N V_{0r}^2 = \sum_{i=1}^L \left( \sum_{k=1}^N a_{ki}^2 \right) = \sum_{i=1}^L \left( \sum_{k=1}^N V_{ki}^2 \right)_i \quad (32)$$

Таким чином, некогерентний прийом з некогерентним накопиченням елементів багаточастотного, паралельного сигналу в багатопроменевому каналі зв'язку відповідно до (28) еквівалентний прийому елементів окремих променів з наступним складанням їх по всіх променях, тобто *некогерентного прийому з некогерентним складанням і променів, і елементів*.

Виходячи із спільності методів прийому, для послідовного складеного сигналу теж повинна існувати можливість побудови алгоритму некогерентного прийому з некогерентним складанням променів і елементів виду (28). Однак цей сигнал відрізняється від паралельного багаточастотного тим, що в багатопроменевому каналі зв'язку порушується ортогональність його елементів.

### Висновки

1. При дослідженні алгоритмів оптимального прийому складених сигналів у багатопроменевому каналі визначено:

- коли фази невідомі, але рівні – це *некогерентний прийом з когерентним складанням променів і елементів*. Показник  $V_r$  є геометричною сумою векторів, відповідних сигналів різних променів, які складаються когерентно;

- коли фази елементів сигналу у всіх променях випадкові і незалежні - це некогерентний прийом з некогерентним складанням і променів, і елементів, тобто без урахування багатопроменевої структури сигналу;

- коли фази сигналів всіх променів випадкові і незалежні, а фази елементів однакові – це *некогерентний прийом з некогерентним складанням променів і когерентним накопиченням елементів*.

2. Досліджено умову виключення взаємовпливу променів для різних сигналів при різних умовах. Для послідовного складеного сигналу ця умова виконується тільки тоді, коли елементи сигналу в одному промені мають загальну невизначену фазу. При цьому недоцільно застосовувати некогерентний прийом з некогерентним накопиченням і променів, і елементів. Коли фази сигналів всіх променів випадкові і незалежні, а фази елементів однакові, у цьому випадку реалізацію легше здійснити некогерентним прийомом з некогерентним складанням променів і когерентним накопиченням елементів. Для паралельного складеного сигналу умова виключення взаємовпливу променів виконується при будь-яких співвідношеннях фаз елементів. При використанні цього сигналу в ряді випадків (наприклад, при неможливості забезпечити синфазність елементів у місці передачі або в каналі зв'язку) може бути доцільною реалізація некогерентного прийому з некогерентним складанням і променів, і елементів.

**Список використаної літератури**

1. Толубко В.Б. Методи оптимізації: Підручник для вищих навчальних закладів за напрямом «Телекомунікації» / В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман. - Київ: ДУТ, 2016. – 442 с.
2. Стеклов В.К. Теорія електричного зв'язку: підручник / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – Київ: Техніка, 2006 – 548 с.
3. Стеклов В.К. Проектування телекомунікаційних мереж. – Підручник для ВНЗ. / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. - Київ: Техніка, 2002. – 792 с.
4. Стеклов В.К. Особливості вибору методу обробки сигналів управління мережами зв'язку / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, О.І. Чумак // Зв'язок. - 2002. - №2(34). - С. 16 - 20.

**Автори статті**

**Бондарчук Андрій Петрович** - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету Інформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Варфоломеева Оксана Григорівна** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Коршун Наталія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету Телекомунікацій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Чумак Олександр Ілліч** - кандидат технічних наук, доцент, начальник факультету Воєнно-дипломатичної академії ім. Є. Березняка, Київ, Україна.

**Дударева Ганна Олександрівна** – асистент кафедри Телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Authors of the article**

**Bondarchuk Andriy Petrovych** - candidate of Science (technic), assistant professor, head of the Faculty of Information technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Varfolomeeva Oksana Gryhorivna** - candidate of Science (technic), associate professor, associate professor of department of the Telecommunication systems and networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Korshun Nataliya Volodymyrivna** - candidate of Science (technic), assistant professor, head of the Faculty of Telecommunications, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Chumak Oleksandr Illich** - candidate of Science (technic), assistant professor, head of the Faculty of Military Diplomatic Academy.

**Dudareva Hanna Oleksandrivna** – assistant of the Department of telecommunication technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 11.01.2018

Рецензент: д.т.н., проф. Л.Н. Беркман