

УДК 621.391

**Беркман Л. Н.**, докт. техн. наук, проф. (Тел.: +380 (44) 249 25 70. E-mail: berkman@dut.edu.ua)

**Варфоломєєва О. Г.**, техн. наук, доц. (Тел.: +380 (44) 249 25 92. E-mail: o\_g\_var@i.ua)

**Чумак Н. С.**, ст. викладач (Тел.: +380 (44) 249 29 10)

**Похабова І. Е.**, аспірант (Тел.: +380 (44) 249 29 12).

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

## АЛГОРИТМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЙОМУ СКЛАДЕНИХ СИГНАЛІВ У БАГАТОПРОМЕНЕВИХ КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ

**Беркман Л. Н., Варфоломєєва О. Г., Чумак Н. С., Похабова І. Е.** Алгоритми оптимального прийому складених сигналів у багатопроменевих каналах зв'язку. В статті обґрунтовано актуальність розробки алгоритмів оптимального прийому складених сигналів в широкосмугових системах зв'язку. Визначено переваги використання складених сигналів і досліджено алгоритми оптимального прийому складених сигналів в багатопроменевому каналі зв'язку. Запропоновано класифікаційну схему взаємодії методів прийому складених сигналів. Досліджено алгоритми завадостійкості за допомогою методів когерентного прийому і некогерентного прийому з когерентним складанням променів. Визначено алгоритми оптимальної обробки складених сигналів широкосмугових систем зв'язку і наведено структурні схеми оптимальних демодуляторів, які відповідають цим алгоритмам.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, складений сигнал, широкосмугова система, когерентний прийом, некогерентний прийом, щільність імовірності, імовірність помилки

**Беркман Л.Н., Варфоломєєва О.Г., Чумак Н.С., Похабова І.Э.** Алгоритмы оптимального приема составных сигналов в многолучевых каналах связи. В статье обоснована актуальность разработки алгоритмов оптимального приема составных сигналов в широкополосных системах связи. Рассмотрены преимущества использования составных сигналов и исследованы алгоритмы оптимального приема составных сигналов в многолучевом канале связи. Предложена классификационная схема взаимодействия методов приема составных сигналов. Исследованы алгоритмы помехоустойчивости для методов когерентного и некогерентного приема с когерентным сложением лучей. Определены алгоритмы оптимальной обработки составных сигналов широкополосных систем связи и приведены структурные схемы оптимальных демодуляторов, которые соответствуют этим алгоритмам.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, составной сигнал, широкополосная система, когерентный прием, некогерентный прием, плотность вероятности, вероятность ошибки

**Вступ. Постановка задачі.** Багатопроменеве поширення сигналів є одним з основних видів завад при здійсненні безпроводового зв'язку. Теорія алгоритмів обробки сигналів для випадку, коли разом з флуктуаційним шумом і зовнішніми завадами присутні частотно-селективні завмирання, які викликані багатопроменевим розповсюдженням сигналу, знаходиться у стадії розвитку, про що свідчить велике число публікацій в науковій літературі, журналах і монографіях [1...10]. Для подолання негативних явищ, пов'язаних з багатопроменевим поширенням сигналів доцільно використовувати широкосмугові системи зв'язку з складеними сигналами з великою базою, що надає можливість активно боротися з наслідками багатопроменевого поширення і використовувати це явище для підвищення вірності передачі інформації. Згідно загальної 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 багатопроменевому поширенні сигналу і реалізувати повністю інші переваги складеного сигналу. Тому на даний час актуальною задачею є розробка алгоритмів оптимального обробки складених сигналів широкосмугових систем зв'язку, що дозволить з єдиних позицій підходити як до дослідження самих сигналів, так і до методів їх приймання [1...5, 7].

Методи прийому складених сигналів в багатопроменевому каналі зв'язку утворюються як комбінації відповідних методів прийому в цілому по відношенню до променів і по відношенню до елементів складеного сигналу. Класифікаційна схема (Рис. 1) показує взаємодію методів прийому складених сигналів в кожному промені і методів складання променів в багатопроменевому каналі.

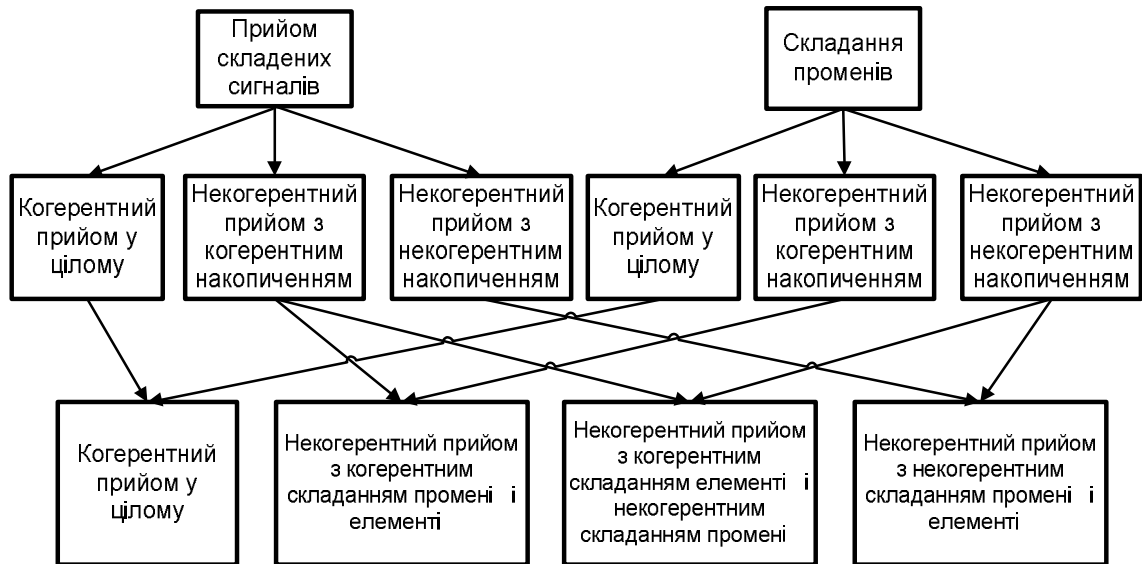


Рис. 1. Класифікаційна схема методів прийому складених сигналів

**Методи прийому складених сигналів в багатопробеновому каналі.** Застосування складених сигналів, що мають автокореляційну функцію певного виду, дозволяє здійснювати роздільний прийом сигналів, які прийшли різними шляхами в багатопробеновому каналі. В такому каналі 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. Поділ променів в даному випадку необхідно лише тому, оскільки це сприяє їх складанню. При деяких методах прийому відбувається складання нерозділених променів.

Задача складання променів аналогічна 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 багатопробеновому каналі зв'язку можуть бути отримані на підставі критерію ідеального спостерігача. Відповідні алгоритми складання променів, звичайно, збігаються з алгоритмами прийому в цілому. Тому методи складання променів класифікуються відповідно до методів прийому в цілому. Методи прийому складених сигналів в багатопробеновому 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 на прикладах когерентного прийому в цілому і некогерентного прийому з когерентним складанням променів і елементів.

При когерентному прийомі в цілому сигнал, що приймається за умови передачі  $r$ -го варіанта ( $r=1, 2, \dots, m$ ) можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N a_{kr} \cos[\omega_{kr}(t - \Delta t_i) + \varphi_{kr} - \varphi_{ik}] + n(t) = \\
 &= \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] + n(t),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $\sum_{k=1}^N a_{kr} \cos[\omega_{kr}t + \varphi_{kr}] = \sum_{k=1}^N s_{kr}(t) = s_r(t)$  – складений сигнал, відповідає передачі  $r$ -го символу і складається з  $N$  взаємоортогональних елементів на інтервалі посилки  $T$ ;

$\varphi_{ik}$  – невизначена фаза  $k$ -го елемента сигналу в  $i$ -му промені;

$L$  – число прийнятих променів;  $\mu_i$  – коефіцієнт передачі по  $i$ -го променя;

$\Delta t_i$  – затримка  $i$ -го променя відносно першого;  $n(t)$  – флуктуаційна завада.

Згідно критерію ідеального спостерігача приймач при рівноімовірних символах повинен прийняти рішення про передачу  $r$ -го символу, якщо при всіх  $r \neq q$  ( $q = 1, 2, \dots, m$ ):

$$\omega[x(t)/s_r(t)] > \omega[x(t)/s_q(t)] \quad (2)$$

де  $\omega[x(t)/s_r(t)]$  – умовна щільність імовірності прийому сигналу  $x(t)$  при передачі  $s_r(t)$ , дорівнює щільності імовірності реалізації завади  $n(t)$  вираженої у вигляді наступної різниці:

$$n(t) = x(t) - \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] \quad (3)$$

Щільність імовірності заданої реалізації завади на інтервалі  $(0-T)$  може бути представлена у вигляді:

$$\omega[n(t)] = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi v_0^2 \Delta F}\right)^B} \exp\left[-\frac{1}{v_0^2} \int_0^T n^2(t) dt\right], \quad (4)$$

де  $v_0^2$  – спектральна щільність завади;  $B = 2\Delta FT$  – розмірність простору завади (подвоєний добуток тривалості реалізації на смугу пропускання каналу).

Підставляючи (3) в (4), отримуємо:

$$\begin{aligned} \omega[x(t)/s_r(t)] &= \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi v_0^2 \Delta F}\right)^B} \exp\left[-\frac{1}{v_0^2} P_{np} T - \frac{1}{v_0^2} \int_0^T \mu_i^2 P_r T\right] \times \\ &\times \exp\left\{\frac{2}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt\right\} \times \\ &\times \exp\left\{\frac{1}{v_0^2} \sum_{i,j}^L \mu_i \mu_j \times \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt\right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

де  $P_{np} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$  – потужність прийнятого сигналу;

$$P_r = \frac{1}{T} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} \left\{ \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] \right\}^2 dt \quad \text{– потужність } r\text{-го варіанту сигналу.}$$

Після низки перетворень із врахування (1)...(5) отримаємо наступне оптимальне правило рішення про прийом  $r$ -го символу для систем з активною паузою ( $P_r = P_q$ ) при повністю відомому сигналу

$$\sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt > \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kq} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt. \quad (6)$$

Вираз (6) є алгоритмом когерентного складання променів при когерентному прийомі елементів сигналу. У відповідності з цим алгоритмом кожен промінь приймається когерентно, і потім ці промені складаються з урахуванням коефіцієнта передачі променя  $\mu_i$ .

Блок-схема приймача, що реалізує алгоритм (6), зображена на Рис. 2.

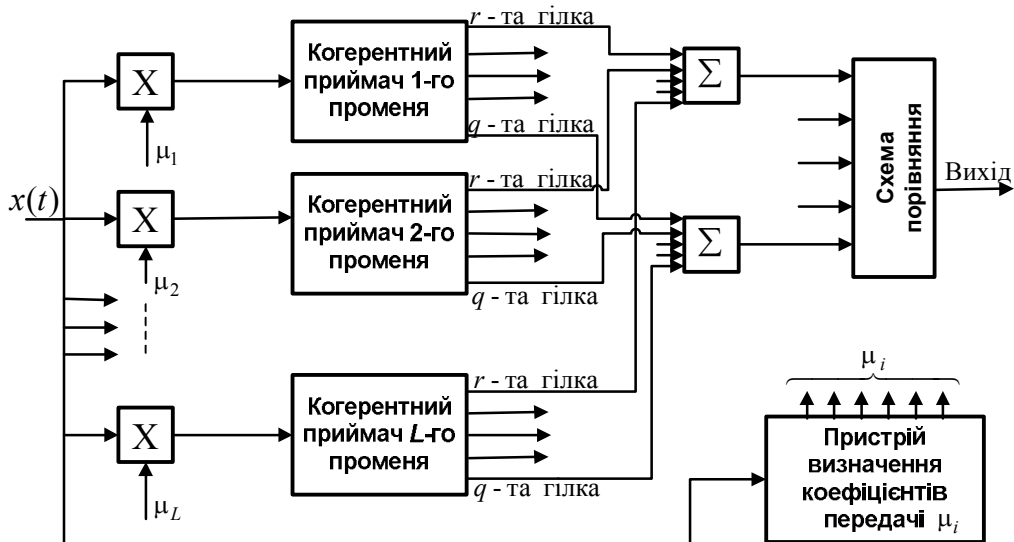


Рис. 2. Блок-схема приймача когерентного прийому в багатопроменевому каналі

Приймач складається з  $L$  когерентних приймачів окремих променів, на входи яких сигнал подається з урахуванням коефіцієнта передачі даного променя.

Сигнали з виходів приймачів, відповідні однойменним варіантам сигналу різних променів, додаються і подаються на схему порівняння. Крім того, приймач містить пристрій визначення коефіцієнтів передачі прийнятих променів.

Якщо обрати межі інтегрування таким чином, щоб час аналізу сигналу  $(0-T)$  був спільним для всіх променів і сусідні посилки сигналу не перекривалися, то алгоритм (6) можна представити також у вигляді:

$$\sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x[(t + \Delta t_i) + \varphi_{ik}] s_{kr}(t) dt > \sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x[(t + \Delta t_i) + \varphi_{ik}] s_{kq}(t) dt, \quad (7)$$

де  $\Delta t_i$  – затримка  $i$ -го променя щодо останнього прийнятого.

Алгоритм (7) відрізняється від звичайного алгоритму когерентного прийому складених сигналів в цілому тим, що в даному випадку аналізується сумарний сигнал, складові якого затримані і сфазовані у відповідності з розташуванням прийнятих променів. На Рис. 3 представлена блок-схема приймача, що реалізує алгоритм (7) у випадку, коли невизначена фаза сигналу в кожному промені однакова для всіх елементів, тобто  $\varphi_{ik} = \varphi_i$ .

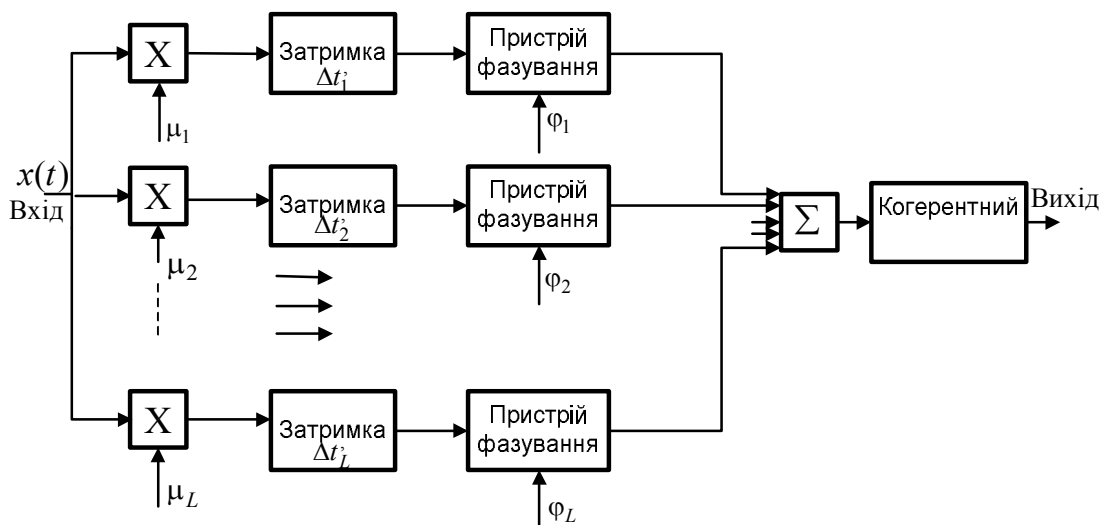


Рис. 3. Блок-схема когерентного приймача при додаванні променів на його вході

Приймач містить  $L$  гілок підстроювання і фазування сигналу по числу прийнятих променів. У кожній гілці сигнал множиться на коефіцієнт передачі променя  $\mu_i$  і затримується на час  $\Delta t_i$  запізнення цього променя щодо останнього; далі вводиться зміщення фази таким чином, щоб всі промені на виході гілок мали однакову невизначену фазу.

На виході гілок фазування сигнали підсумовуються і подаються на когерентний приймач складених сигналів. Крім того, приймач містить пристрої визначення коефіцієнтів передачі променів  $\mu_i$ , затримок променів  $\Delta t_i$  і невизначених фаз  $\Phi_i$ .

Визначимо алгоритм некогерентного оптимального прийому при наступних умовах: в місці прийому відомі коефіцієнти передачі променів  $\mu_i$ . Невизначені фази елементів сигналу у всіх променях  $\Phi_{ik}$  однакові, але невідомі, тобто  $\Phi_{ik} = \Phi_i$ . У разі нерівності ми робимо їх рівними, створюючи фразування всіх променів (якщо потрібно, то і елементів). Умовна щільність імовірності прийому сигналу  $x(t)$  при передачі  $s_r(t)$ :

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = A \cdot \exp\left[-\frac{1}{v_0^2} P_{np} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T\right] \times \exp\left\{\frac{2}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N \left[ \cos \phi_{ik} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}(t-\Delta t) dt + \sin \phi_{ik} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr}^*(t-\Delta t) dt \right]\right\}, \quad (8)$$

де  $s_{kr}^*(t - \Delta t_i)$  – функція, сполучена по Гільберту з  $s_{kr}(t - \Delta t_i)$ ;  $A = \frac{1}{(\sqrt{2\pi v_0^2 \Delta F})^B}$ ;

$$P_{np} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \text{ – потужність прийнятого сигналу;}$$

$$P_r = \frac{1}{T} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} \left\{ \sum_{k=1}^N s_{kr}[(t - \Delta t_i) - \phi_{ik}] \right\}^2 dt \text{ – потужність } r\text{-го варіанту сигналу.}$$

Для знаходження оптимального в цьому випадку алгоритму прийому усереднимо (8) по всіх можливих значеннях фази  $\phi$  в інтервалі  $0-2\pi$  вважаючи, що всі значення рівноімовірні:

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = \sum_0^{2\pi} \omega[x(t)/s_r(t), \phi] \omega(\phi) d\phi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega[x(t)/s_r(t), \phi] \omega(\phi) d\phi. \quad (9)$$

Після усереднення:

$$\omega[x(t)/s_r(t)] = A_{\text{exp}} \left[ -\frac{1}{v_0^2} P_{np} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T \right] \times I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_r \right], \quad (10)$$

де  $I_0$  – модифікована функція Бесселя нульового порядку,

Правило рішення про прийом  $r$ -го символу для систем з активною паузою:

$$\ln I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_r \right] > \ln I_0 \left[ \frac{2\mu_i}{v_0^2} V_q \right]. \quad (11)$$

Величини  $V_r$  і  $V_q$  є геометричною сумою векторів, відповідних сигналів різних променів, які складаються когерентно, так як мають однакову фазу [8].

Враховуючи, що  $\ln I_0(x)$  при  $x > 0$  є монотонною функцією, правило рішення (11) можна спростити:

$$V_r > V_q. \quad (12)$$

Відповідно до алгоритму (12) відносно променів виконуються ті ж операції, що і у відношенні елементів при некогерентному прийомі з когерентним накопиченням. Таким чином, *оптимальним методом прийому*, коли фази сигналів всіх променів невідомі, але рівні, є *некогерентний прийом з когерентним складанням* променів і елементів.

Величину  $V_r$  можна також представити у вигляді:

$$V_r = \sqrt{\left[ \sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x(t - \Delta t_i) s_{kr}(t) dt \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x(t - \Delta t_i) s_{kr}^*(t) dt \right]^2} \quad (13)$$

Блок-схема приймача, що реалізує алгоритм (12) при обчисленні за формулою (13), аналогічна блок-схемі, зображеної на Рис. 3 із заміною когерентного приймача на некогерентний. Цей приймач може бути реалізований за допомогою будь-якого з розглянутих з методів. Якщо промені, які надходять мають однакову фазу, то необхідність у пристроях фазування променів відпадає.

Блок-схема гілки приймача для обчислення величини  $V_r$  відповідно до (13) наведено на Рис. 4. Приймач у загальному вигляді повинен містити пристрої визначення  $\mu_i$ ,  $\Delta t_i$  і генератор сигналів  $(t - \Delta t_i)$ .

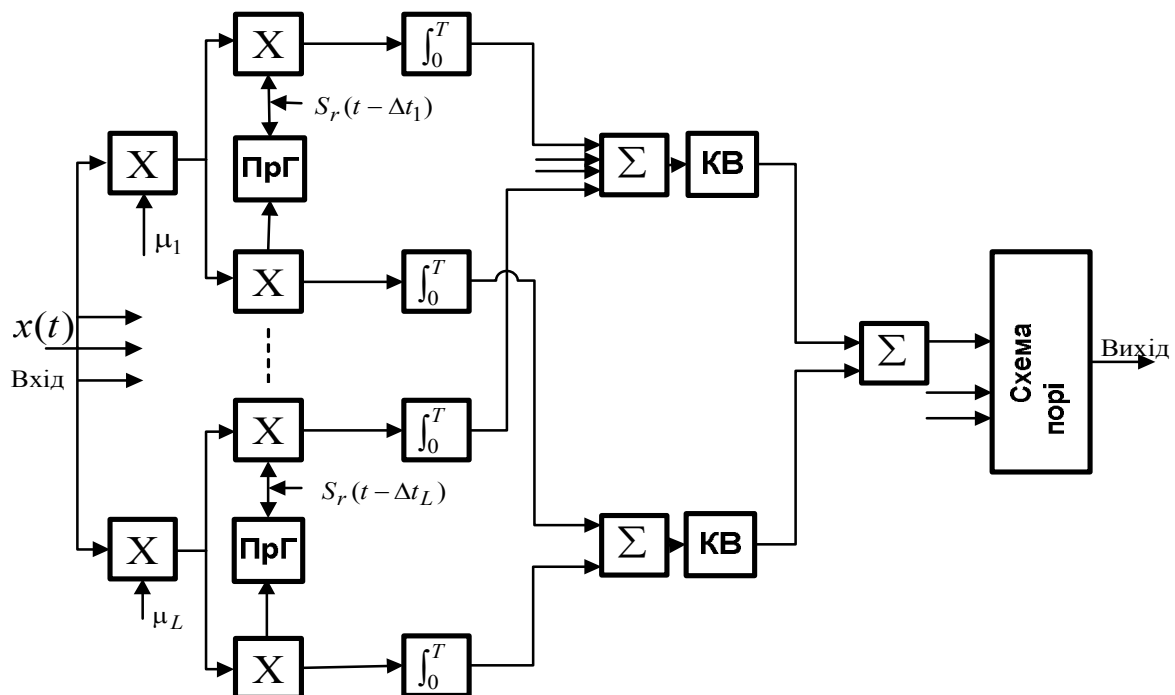


Рис. 4. Блок-схема некогерентного приймача з когерентним складанням променів і елементів сигналу

Розглянемо вирази для імовірностей помилки при когерентному і оптимальному некогерентному методах прийому деяких видів складених сигналів у двійкових системах, відповідно перетворивши відомі вирази для поелементного прийому [4, 8].

*Когерентний метод прийому в цілому.* Вираз імовірності помилки для даного випадку:

$$\rho_{км} = F\left(\gamma\sqrt{Nh_k}\right), \quad (14)$$

де  $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$ ;

$\gamma$  – коефіцієнт, що дорівнює  $\sqrt{2}$  для систем з протилежними сигналами; 1 – для систем з ортогональними сигналами з активною паузою;  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  – для систем з пасивною паузою.

Для систем з однократною ФРМ:

$$\rho_{км} = 2F\left(\sqrt{2}\sqrt{Nh_k}\right), \quad (15)$$

*Некогерентний прийом з когерентним накопиченням.* При прийомі ортогональних в посиленому сенсі сигналів з активною паузою [9] імовірність помилки дорівнює:

$$\rho_{опт} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{Nh_k^2}{2}\right), \quad (16)$$

при прийомі сигналів з однократною ФРМ:

$$\rho_{ФРМ} = \frac{1}{2} \exp\left(-Nh_k^2\right). \quad (17)$$

*У багатопозиційних системах* з числом варіантів сигналу  $m$  імовірності помилки будуть визначатися наступними виразами, для двох видів прийому.

*Когерентний прийом в цілому* при прийомі ортогональних сигналів з активною паузою:

$$\rho_{опт} \approx \sqrt{m-1} \exp\left(-\frac{Nh_k^{\text{пютого}}}{2} - 1,4\right). \quad (18)$$

При прийомі складених сигналів з багатократною ФРМ

$$\rho_{ФРМ} \approx 2F\left(\sqrt{2}\sqrt{N}h_k \sin\left|\frac{\pi}{2^n}\right|\right), \quad (19)$$

де  $n$  – кратність системи,  $m = 2^n$ .

*Некогерентний прийом з когерентним накопиченням* при прийомі ортогональних сигналів з активною паузою [10]:

$$\rho_{опт} = \sum_{n=1}^{m-1} (-1)^{n+1} C_{m-1}^n \frac{1}{n+1} \exp\left(-\frac{n}{n+1}Nh_k^2\right), \quad (21)$$

де  $C_{m-1}^n = \frac{(m-1)!}{n!(m-1-n)!}$ .

Тому можемо зробити висновок, що у відповідності з виразами (15)...(20) імовірність помилки при когерентному та некогерентному з когерентним накопиченням методах прийому при рівній енергії складених сигналів не залежить від бази і смуги частоти сигналу.

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

– когерентний метод прийому, коли фази сигналів всіх променів відомі. Відповідно алгоритму кожен промінь приймається когерентно, і потім ці промені складаються з урахуванням коефіцієнта передачі променя  $\mu_i$ ;

– 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;

– імовірності помилки при різних методах прийому складених сигналів при флуктуаційних завадах. Встановлено, що завадостійкість методу когерентного прийому в цілому й некогерентного прийому з когерентним накопиченням не залежить від бази сигналу.

### **Література.**

1. Беркман Л. Н. Методы когерентного приема многопозиционных АФМ сигналов многоканальных модемов / Л. Н. Беркман // Сб. научных трудов (Центральный научно-исследовательский институт связи). – 1987. – С. 44-50.

2. Варакин Л. Е. Интеллектуальная сеть: эволюция сетей и услуг связи / Л. Е. Варакин // Электросвязь. – 1992. – № 1. – С. 22-24.

3. Варфоломеева О. Г. Методика розрахунку пропускної спроможності каналів системи управління телекомунікаційними мережами / О. Г. Варфоломеева, С. І. Мніщенко, О. І. Чумак // Достижения в телекоммуникациях за 10 лет независимости Украины : сборник докладов V международной научно-практической конференции (Часть 1), Одесса, 21-22 августа 2001 г. – С. 79-80.

4. Витерби Э. Д. Принципы когерентной связи / Э. Д. Витерби. – Москва : Сов. радио, 1970. – 392 с.

5. Гинзбург В. В. Использование многоканальных модемов для высокоскоростной передачи дискретной информации / В. В. Гинзбург, В. С. Гиршов, Ю. Б. Окунев // Электросвязь. – 1984. – №10. – С. 42-47.

6. Невдяев Л. М. Мобильная связь 3-го поколения / Л. М. Невдяев. – Москва : МЦНТИ, 2000. – 208 с.

7. Окунев Ю. Б. Теория фазоразностной модуляции / Ю. Б. Окунев. – Москва : Связь, 1979. – 215 с.

8. Поповський В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, В. Ф. Олійник та ін.]. – Харків : СМІТ, 2006. – 564 с.

9. Стеклов В. К. Оптимізація параметрів багатоканальних модемів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, О. І. Чумак // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2002. – №2. – С. 124-131.

10. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – Київ : Техніка, 2002. – 792 с.

Дата надходження в редакцію: 10.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М. М. Климаш