

## **ОПТИМАЛЬНА ДЕМОДУЛЯЦІЯ ЦИФРОВОГО СИГНАЛУ, ЩО СПОСТЕРІГАЄТЬСЯ НА ФОНІ ПОДІБНОЇ ПОТУЖНОЇ ЗАВАДИ**

### **Анотація:**

*Розглянуті питання оптимізації розділення двох взаємно неортогональних цифрових сигналів.*

### **Аннотация:**

*Рассмотрены вопросы оптимизации разделения двух взаимно неортогональных цифровых сигналов.*

### **Abstract:**

*The questions of optimization of the separation of two mutually nonorthogonal digital signals.*

### **Історія питання**

Заслуговує на увагу той факт, що хоча фундаментальні результати в теорії лінійного розділення цифрових сигналів (ЦС) були опубліковані ще в 1935 році [1], а теорія потенціальної завадостійкості сформувалась в 1956 р. [2], в останні десятиріччя з'явилися результати, які теж слід вважати фундаментальними. Вочевидь, перша вітчизняна монографія з неоптимального (за критерієм мінімуму середньої помилки на біт у корисному повідомленні) кодового розділення з'явилась у 1969 році [3]. Що ж стосується завадостійкості процедур класичної [1] лінійної демодуляції взаємозаважаючих ЦС в умовах впливу адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ), то відповіді на ці питання одержані пізніше [4,5 та ін.] (на окрему увагу заслуговує вичерпна бібліографія в [6]). Перші ж чисельні відповіді на питання про потенційні можливості розділення взаємно неортогональних ЦС в умовах впливу АБГШ представлені, на нашу думку в [5,7,8].

У деякому сенсі роботи [4-8] обумовили подальший розвиток теорії потенційної завадостійкості на якісно новому рівні, під назвами "Multiuser Detection Theory" (MDT) [4,7-9] та "статистична теорія розділення цифрових сигналів" (СТРЦС) [5]. Якщо в постановках задач [2] в моделі спостереження передбачався один ЦС та АБГШ, то в роботах [4,7] та в монографіях [5,8], а також в досить великій кількості робіт, присвячених розв'язанню часткових задач [10-17 та ін.], в спостереженні передбачена деяка кількість взаємозаважаючих сигналів, подібних за структурою. Ці сигнали в загальному випадку припускаються неортогональними по Гільберту на довжині незмінного стану представницького дискретного параметра (ДП), включно до їх лінійної залежності. Очевидно, застосування в багатоканальних системах передачі неортогональних сигналів призводить до суттєвого підвищення ступеня використання його частотного або часового ресурсу, а також забезпечує одночасне користування таким ресурсом більше, ніж одним споживачем (сигнали таких незалежних споживачів взаємно неортогональні).

Зазначимо, що, як свідчить вже набутий досвід синтезу алгоритмів розділення взаємно неортогональних ЦС, складність байесівських алгоритмів, оптимальних за критерієм мінімуму середньої помилки в ДП кожного з взаємозаважаючих сигналів,

характеризується експоненційною залежністю складності від кількості сигналів, що підлягають розділенню [5-9, 14]. Стосовно задачі розділення адитивно об'єднаних ЦС (оптимальних за вищезазначеним критерієм), то прийнятну складність, на жаль, мають алгоритми розділення двох (синхронних або гетерохронних) та трьох ЦС, синхронних за тактовими точками. Інакше доводиться пропонувати застосування різноманітних спрощуючих наближень [4, 8 та ін.], які виключають одержання строго оптимальних рішень. На окрему увагу заслуговують випадки, коли в спостереженні, окрім одного корисного сигналу, присутній ще один – подібний, заважаючий.

Сутність СТРС полягає в двох взаємопов'язаних складових [5]:

По-перше – на основі байєсівського підходу в статистичній теорії демодуляції ЦС – формування апостеріорних мір  $p_i(r/y_t, t)$  станів  $r_i = \overline{0, m_i - 1}; m_i \geq 2; i = \overline{1, M}$  представницьких (інформаційних) параметрів взаємозаважаючих (індивідуальних) ЦС із застосуванням апостеріорного розподілу  $p(r/y_t, t)$  станів  $r$  групового ЦС,  $r = (r_1, \dots, r_M); r = \overline{0, m_r - 1}; m_r = \prod_{i=1}^M m_i$ , що формально утворюється індивідуальними ЦС, із наступним порівнянням в другій вирішуючій схемі. В цьому принципова відмінність СТРС від МДТ, в якій передбачається оцінка  $r^*$  групового ДП, виходячи з умови максимізації  $p(r/y_t, t)$  [7-9].

По-друге – нерозривне, в єдиній постановці, розв'язання задач фільтрації неінформаційних неперервних  $\bar{\lambda}_i, i = \overline{1, M}$  і інформаційних (псевдоінформаційних) параметрів  $r_i, i = \overline{1, M}$  взаємозаважаючих ЦС, коли “м'які” або “жорсткі” оцінки  $r_i^*$  ДП сигналів застосовуються для демодуляції на входах трактів оцінок  $\bar{\lambda}_i^*, i = \overline{1, M}$  неперервних параметрів ЦС, які в свою чергу, необхідні для кореляційної обробки.

Процедури формування розподілів  $p_i(r/y_t, t)$  із застосуванням розподілу  $p(r/y_t, t)$  визначаються законом об'єднання індивідуальних ЦС в груповий і не залежать від конкретного виду  $p(r/y_t, t)$  [5]. А якщо врахувати, що незалежно від моделей спостереження та каналу зв'язку і виду модуляції-демодуляції розподіл  $p(r/y_t, t)$  завжди може бути представлений подібно [2] у еквівалентній експоненційній формі [5 та ін.], то доцільно при розв'язанні задач синтезу спочатку одержувати деякий “базовий” алгоритм демодуляції – “каркас”, який на початковому етапі слід використати для одержання відповіді про потенційну завадостійкість розділення, а надалі – конкретизувати залежно від постановки задачі, насичуючи його процедурами фільтрації (оцінювання) неінформаційних параметрів.

Вищевикладене ґрунтується на тому, що методи формування спільної апостеріорної щільності імовірності дискретно-неперервних марківських параметрів  $\omega(r, \bar{\lambda}/y_t, t)$  і розподілу станів групового ДП  $p(r/y_t, t)$  добре відомі, а вже виконана та подальша розробка цих методів, включаючи приведення до експоненційного представлення, визначає основні відзнаки і головний зміст багатьох розділів статистичної теорії зв'язку, значна роль серед яких належить марківській теорії нелінійної фільтрації (ТНФ) [18-20 та ін.].

Розгортання змісту СТРС стосовно моделей і методів марківської теорії нелінійної фільтрації, елементи та приклад застосування якого наведені відповідно в [5,21], виявляються корисними для практики задачами квазікогерентного (квазікогерентно-некогерентного) прийому-розділення синхронних і асинхронних по тактових точках ЦС, зокрема, виділення корисного ЦС на фоні синхронних і асинхронних маніпульованих завад, характерних для цифрових систем зв'язку.

### Мета статті

Метою статті є огляд вже відомих та одержання із застосуванням СТРС так званих “базових” алгоритмів когерентного (КГ), квазікогерентного (ККГ), та когерентно (квазікогерентно)-некогерентного (автокореляційного) (НКГ) розділення корисного ЦС і неортогональної йому подібної завади, що перевищує корисний сигнал за миттєвою потужністю із подальшим обговоренням їх спільних рис. Під когерентно-некогерентною обробкою тут і далі будемо розуміти ситуацію, коли один з двох взаємозважаючих сигналів демодулюється когерентно (квазікогерентно), а другий – некогерентно (автокореляційно).

Приділена увага досягненням та можливостям СТРС в зазначеній галузі обумовлена наступним.

По-перше, практичне застосування представлених далі алгоритмів розділення дозволить реалізувати принципи повторного використання частот, зайнятих потужними випромінюваннями, наприклад, на вторинній основі. При цьому слід очікувати, що основний користувач за деяких додаткових умов факту повторного використання може навіть не помітити.

По-друге, як свідчить досвід теорії виявлення, оцінка неінформаційних неперервних та інформаційних неперервних або дискретних параметрів потужного випромінювання може виконуватись без урахування наявності малопотужного [18], що кардинально спрощує процедури фільтрації і тим самим полегшує апаратну реалізацію.

### Моделі спостереження

Подальше викладення виконано із застосуванням результатів, представлених раніше в роботах [5,6,10-17,21], а також одержаних авторами безпосередньо методами СТРС при підготовці цієї публікації. При цьому обмежимося тим, що в моделях спостереження вектор неперервних параметрів  $\bar{\lambda}$  спростуємо (тобто, будемо вважати його точно відомим або оцінюваним з необхідною точністю), активні стани ДП корисного і заважаючого сигналу будемо вважати двійковими рівноімовірними і взаємно незалежними, а корисний та заважаючий сигнали синхронними за тактовими точками. Це дозволить викласти матеріал в систематичному, однорідному і завдяки цьому в прозорому для розуміння вигляді, що не заважає його доволіному узагальненню. Припущення про можливість узагальнення “базових” алгоритмів розділення ґрунтується на забезпеченні еквівалентного експоненційного представлення розподілу  $p(r/y_i, t)$  та на відсутності руйнування структури “базового” алгоритму появи процедур фільтрації неінформаційних параметрів  $\bar{\lambda}_i, i = \bar{1}, \bar{M}$ . Такі процедури просто доповнять структуру “базового” алгоритму.

Розглянемо моделі спостереження (тут і далі перший сигнал – корисний, а другий – заважаючий):

1. Два двійкових фазоманіпульованих (ФМ-2) сигнали:

$$y_t = (-1)^{r_1} S_1(t) + (-1)^{r_2} S_2(t) + n(t), \quad (1)$$

де  $r_1, r_2 \in \{0,1\}; t \in [t_{k-1} - t_k]; k = 1,2,\dots$  – номер тактового інтервалу;  $n(t)$  – АБГШ.

2. ФМ-2 сигнал і переривчаста ФМ-2 завада:

$$y_t = (-1)^{r_1} S_1(t) + [(-1)^{r_2} + r_2(1-r_2)/2] S_2(t) + n(t); \quad (2)$$

$$r_1 \in \{0,1\}; r_2 \in \{0,2\}; t \in [t_{k-1} - t_k]; k = \overline{1,2,\dots},$$

де  $r_2 = 2$  стан, який відповідає відсутності завади.

3. Два двостанових частотноманіпульованих (ЧМ-2) сигнали:

$$y_t = (-1)^{r_1} S_{11}(t) + (1-r_1) S_{12}(t) + r_2 S_{21}(t) + (1-r_2) S_{22}(t) + n(t); \quad (3)$$

$$r_1, r_2 \in \{0,1\}; t \in [t_{k-1} - t_k]; k = \overline{1,2,\dots}.$$

Процедури КГ (ККГ) демодуляції. На цьому етапі наведемо одержані в [5,10,12,13,15] процедури демодуляції двох взаємозаважаючих ЦС, коли вектор  $\vec{\lambda}$  їх неперервних параметрів точно відомий, або може бути оцінений шляхом спільного застосування методів СТРС і ТНФ. Для полегшення фізичних трактовок результатів тут і далі будемо вважати, що опорні коливання  $S_1(t), S_2(t)$  – наступного виду  $A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i), i = \overline{1,2}$ .

1. Для першої моделі спостереження за вищезазначених умов маємо [5, 10]:

$$r_1^* = \text{rect}[-b_1 + \text{Arth}(\text{th}b_2 \text{th}2R)], \quad (4)$$

де  $r_1^* \in \{0,1\}$  – рішення про стан ДП корисного ЦС;

$\text{rect}(x \geq 0) = 1; \text{rect}(x < 0) = 0$  – вирішуюча функція;

$$b_{1,2} = \frac{2A_{1,2}^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos(\omega_1^* t + \varphi_1^*) dt; \quad R = \frac{A_1^* A_2^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos(\omega_1^* t + \varphi_1^*) \cos(\omega_2^* t + \varphi_2^*) dt,$$

$N_0$  – одностороння щільність потужності АБГШ. Символ (\*) означає оцінку неперервних супутніх параметрів.

На рис. 1 подано структурну схему когерентного демодулятора ФМ-2 на фоні ФМ-2, що реалізує правило (4)

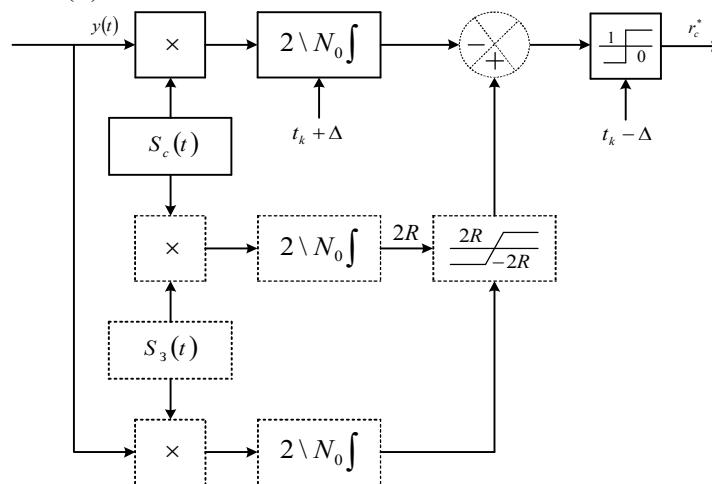


Рис. 1. Структурна схема когерентного демодулятора ФМ-2 на фоні ФМ-2

Якщо відношення сигнал/шум перевищує одиницю ( $h_1^2 \Delta \frac{P_c T}{N_0} > 1$ , де  $P_c$  – миттєва потужність сигналу,  $T = t_k - t_{k-1}$  – довжина тактового інформаційного інтервалу) і додатково  $A_2 \gg A_1$ , то (4) спрощується до виду:

$$r_1^* = \text{rect}[-b_1 + 2R_{12} \text{sign} b_2], \quad (5)$$

де  $\text{sign}(x \geq 0) = 1$ ;  $\text{sign}(x < 0) = -1$

У [5] одержано узагальнене рішення, коли сигнал і завада не співпадають за тактовими точками, тобто гетерохронні.

У [15] подано рішення, яке містить процедури оцінок початкових фаз гетерохронних сигналу і завади. Воно не має самостійної практичної цінності, але доводить, що необхідність виконання процедур фільтрації неперервних параметрів не руйнує, а лише доповнює “базовий” алгоритм. Іншими словами, це є наглядним прикладом того, що СТРС і ТНФ є не тільки непротирічними, але й взаємодоповнюючими теоріями в межах загальної теорії зв’язку.

Рішення [15] завдяки додатковій умові  $A_2 \gg A_1$  може бути дещо спрощене, якщо знехтувати впливом малопотужного корисного сигналу на якість оцінки заважаючого, як це пропонувалось в подібних умовах в [18, 22, 23].

2. Для другої моделі спостереження за вищезазначених умов маємо [5, 11, 12]:

$$r_1^* = \text{rect}[-b_1 + \text{Arth}(K(b_2) \text{th} b_2 \text{th} 2R)]; \quad (6)$$

$$K(b_2) = P_b / [P_b + (1 - P_b) \sqrt{(1 - \text{th}^2 b_2)((1 - \text{th}^2 2R) \exp 2h_2^2)},$$

де  $P_b$  – імовірність випромінення завади,

$$h_2^2 = \frac{A_2^{2*}}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos^2(\omega_2^* t + \varphi_2^*) dt.$$

Якщо  $h_1^2 > 1$ ;  $h_2^2 \gg h_1^2$ , з (6) одержуємо суттєве спрощення:

$$r_1^* = \text{rect}[-b_1 + \text{rect}(b_2 - h_2^2) 2R \text{sign} b_2]. \quad (7)$$

Внутрішня функція  $\text{rect}(\cdot)$  відіграє роль шукача переривчастої завади.

1. Для третьої моделі спостереження, застосовуючи взаємозв’язок між апостеріорним розподілом  $p_1(r/y_t, t)$  станів  $r_1 = \overline{0,1}$  представляючих (інформаційних) параметрів корисного ЦС та апостеріорним розподілом  $p(r/y_t, t)$  станів  $r$  групового ЦС,

$r = (r_1, r_2)$ ;  $r = \overline{0, m_r - 1}$ ;  $m_r = \prod_{i=1}^2 m_i$ ;  $m_1 = m_2 = 2$ , маємо [13]:

$$r_1^* = \text{rect}[b_1^{(1)} - h_1^{2(1)} - b_2^{(1)} + h_2^{2(1)} - \text{Arth} \frac{\text{th}(b_1^{(2)} - h_1^{2(2)} - b_2^{(2)} + h_2^{2(2)})[\exp(2R_1 + 2R_2) - \text{ch}(2R_1 - 2R_2)] + \text{sh}(2R_1 - 2R_2)}{\exp(2R_1 + 2R_2) + \text{ch}(2R_1 - 2R_2) - \text{th}(b_1^{(2)} - h_1^{2(2)} - b_2^{(2)} + h_2^{2(2)}) \text{sh}(2R_1 - 2R_2)}]. \quad (8)$$

де

$$R_{1,2} = \frac{A_{11,21}^* A_{21,22}^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos(\omega_{11,12}^* t + \varphi_{11,12}^*) \cos(\omega_{21,22}^* t + \varphi_{21,22}^*) dt;$$

$$b_1^{(1,2)} = \frac{2A_{11,21}^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos(\omega_{11,21}^* t + \varphi_{11,21}^*) dt; \quad b_2^{(1,2)} = \frac{2A_{12,22}^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos(\omega_{12,22}^* t + \varphi_{12,22}^*) dt;$$

$$h_{1,2}^{2(1)} = \frac{A_{11,12}^{2*}}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos^2(\omega_{11,12}^* t + \varphi_{11,12}^*) dt; \quad h_{1,2}^{2(2)} = \frac{A_{21,22}^{2*}}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos^2(\omega_{21,22}^* t + \varphi_{21,22}^*) dt.$$

За умови  $h_{1,2}^{2(1)} \ll h_{1,2}^{2(2)}, h_{1,2}^{2(2)} \gg 1$  компенсуюча складова  $\text{Arth}(\cdot)$  в (8) спрощується:

$$r_1^* = \text{rect}[b_1^{(1)} - h_1^{2(1)} - b_2^{(1)} + h_2^{2(1)} - 2R_1 \text{rect}(b_1^{(2)} - h_1^{2(2)} - b_2^{(2)} + h_2^{2(2)}) + 2R_2 \text{rect}(b_2^{(2)} - h_2^{2(2)} - b_1^{(2)} + h_1^{2(2)})]. \quad (9)$$

На рис. 2 подано структурну схему когерентного демодулятора ЧМ-2 на фоні ЧМ-2, що реалізує правило (9)

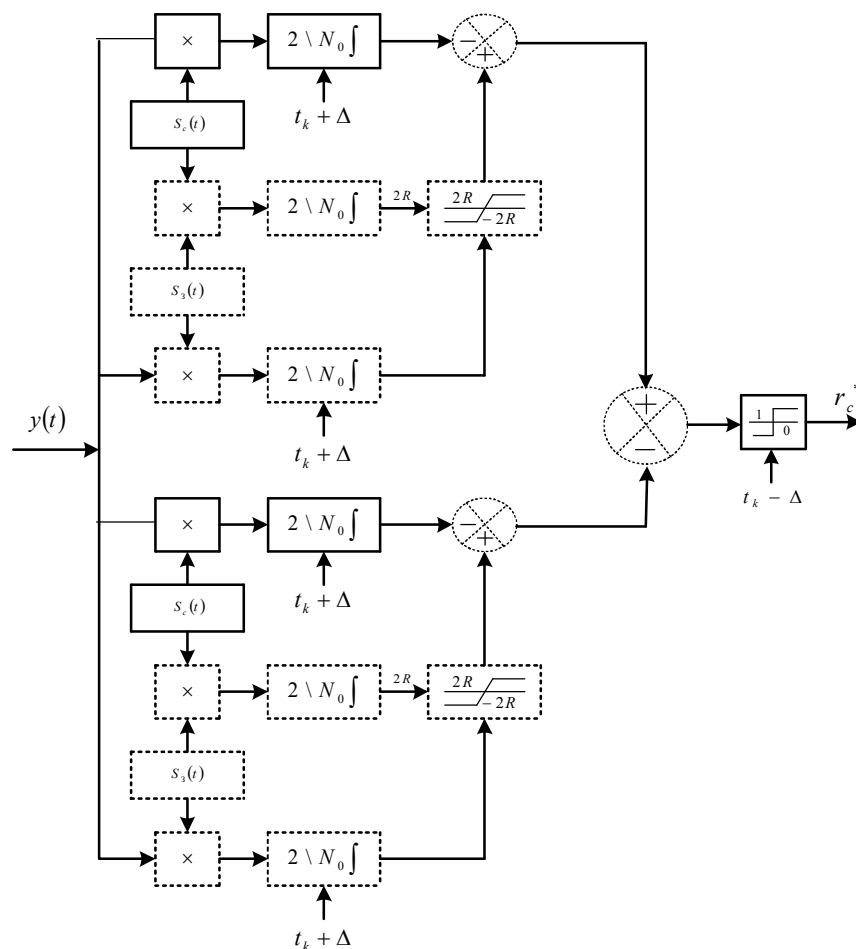


Рис. 2. Структурна схема когерентного демодулятора ЧМ-2 на фоні ЧМ-2

Якщо сигнали в моделі (3) є гетерохронними і навіть не співпадають за довжинами тактових інтервалів, то слід очікувати, що складність процедури розділення буде зростати приблизно в лінійній залежності від кількості субелементів заважаючого сигналу на довжині тактового інтервалу корисного ЦС, як це має місце при оптимальному розділенні фазоманіпульованого корисного ЦС, заважаючого подібного сигналу, що відрізняється від корисного більшою швидкістю маніпуляції [5].

У [24] стосовно формул (8), (9) продемонстровано можливість оцінок неінформаційних неперервних параметрів взаємозважаючих частотноманіпульованих сигналу і завади. У цьому випадку можна бачити, що необхідність виконання таких оцінок структуру “базових” алгоритмів не руйнує.

### Процедури НКГ (автокореляційної) демодуляції

У [18,22,23] із різним ступенем коректності стверджується, що за умови суттєвого перевищення миттєвої потужності заважаючого сигналу над миттєвою потужністю корисного сигналу не тільки оцінка неенергетичних параметрів корисного сигналу, а й оцінка його амплітуди для виконання процедур оцінки параметрів заважаючого сигналу може виявитись непотрібною. Слід при цьому зауважити, що якщо в [22,23] таке твердження не можна вважати достатньо строгим, то в [18, стор. 161, 179] його правомірність доведена для широкого класу випадкових процесів, якими можна описати сигнал та заваду. Це твердження, по-перше, базується на тому, що синтезовані в [18] алгоритми радіометричного виявлення малопотужних випромінювань з довільною статистикою інваріантні за структурою відносно конструкції марківського процесу, яким апроксимуються (тобто, відносно виду коефіцієнтів переносу і дифузії та кількості компонент). При цьому достатньо накладення на заваду такого ж непринципового обмеження – можливості їх апроксимації з будь-яким ступенем точності компонентами деяких багатовимірних марківських дифузійних процесів. По-друге, малопотужний сигнал незалежно від статистики його параметрів не буде суттєво впливати на оцінки моментів випадкових процесів, які описують параметри завади. А тому за додаткових умов тактового синхронізму сигналу і завади, співпадіння їх частот і некогерентного (автокореляційного) прийому корисного сигналу достатньо забезпечити квазікогерентний прийом потужної завади з оцінкою всіх її (інформаційного дискретного і неінформаційних неперервних) параметрів класичними методами ТНФ, а оцінку неінформаційних параметрів сигналу взагалі не виконувати. Через ці самі причини наведені тут алгоритми розділення є своєрідними “каркасами”, які, доповнюючись процедурами фільтрації неперервних параметрів корисного сигналу та завади з довільною статистикою (при ККГ обробці сигналу та завади) або лише процедурами фільтрації параметрів завади (при ККГ обробці завади і НКГ обробці сигналу), залишаються незмінними.

1. Для першої моделі спостереження з рішення [17], як частковий випадок, нескладно одержати прийнятну для даної публікації процедуру автокореляційної демодуляції сигналу відносної фазової модуляції (ВФМ-2) з реалізацією процедури компенсації подібної завади:

$$r_c^* = \text{rect} \{ [-b_{1s}^{(k-1)} + \text{Arth}(\text{th}b_2^{(k-1)} \text{th}2R)] [-b_{1s}^{(k)} + \text{Arth}(\text{th}b_2^{(k)} \text{th}2R)] - b_{1k}^{(k-1)} b_{1k}^{(k)} \}, \quad (10)$$

де

$$b_{1s}^{(k-1)} = \frac{2A_1^*}{N_0} \int_{t_{k-2}}^{t_{k-1}} y_t \cos(\omega^* t + \varphi_2^*) dt; \quad b_{1s}^{(k)} = \frac{2A_1^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos(\omega^* t + \varphi_2^*) dt;$$

$$b_2^{(k-1)} = \frac{2A_2^*}{N_0} \int_{t_{k-2}}^{t_{k-1}} y_t \cos(\omega^* t + \varphi_2^*) dt; \quad b_2^{(k)} = \frac{2A_2^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \cos(\omega^* t + \varphi_2^*) dt;$$

$$b_{1k}^{(k-1)} = \frac{2A_1^*}{N_0} \int_{t_{k-2}}^{t_{k-1}} y_t \sin(\omega^* t + \varphi_2^*) dt; \quad b_{1k}^{(k)} = \frac{2A_1^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y_t \sin(\omega^* t + \varphi_2^*) dt;$$

$$R = \frac{A_1^* A_2^*}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \cos^2(\omega^* t + \varphi_2^*) dt.$$

На рис. 3 подано структурну схему автокореляційного демодулятора ВФМ-2 на фоні ФМ-2, що реалізує правило (10).

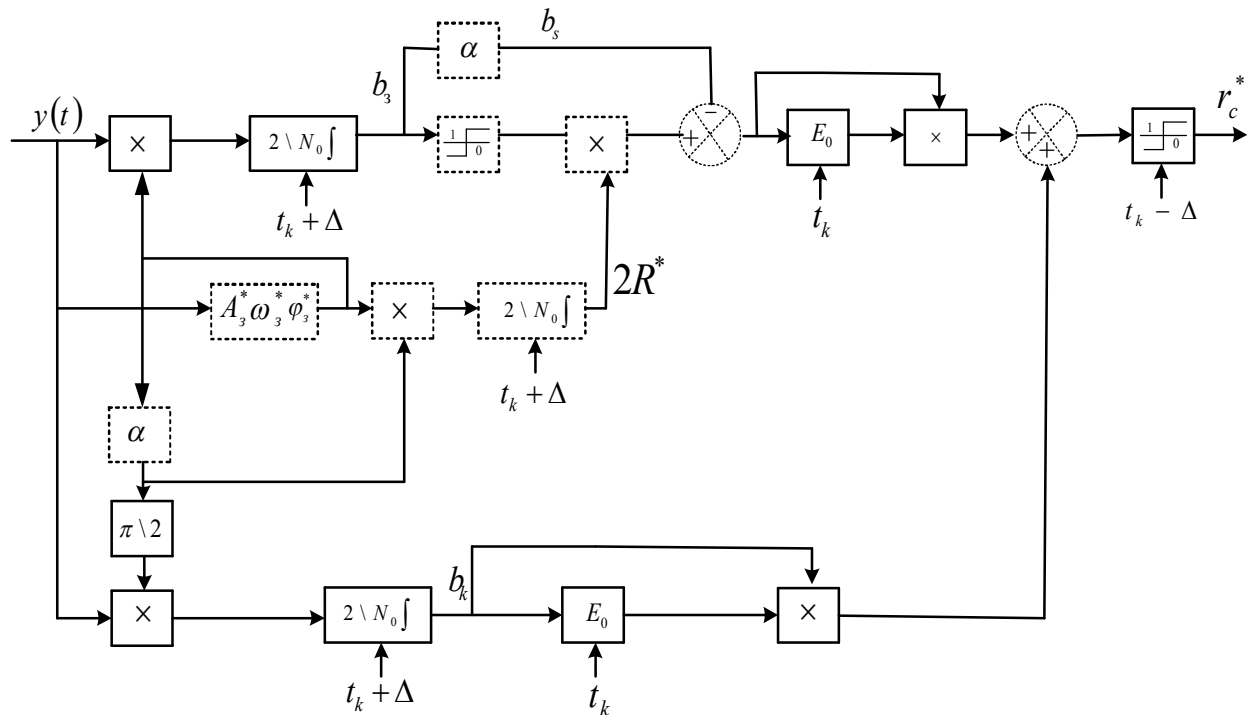


Рис. 3. Структурна схема автокореляційного демодулятора ВФМ-2 на фоні ФМ-2

У зазначених співвідношеннях амплітуда квадратурних складових сигналу вибирається за довільної умови  $A_1^* = \alpha A_2^*$ ,  $0 < \alpha \ll 1$ .

В алгоритмі (10), очевидно, передбачається ККГ обробка завади і автокореляційна обробка корисного сигналу.

Якщо  $A_1 \ll A_2$ , то з (10) одержуємо просте правило:

$$r_c^* = \text{rect} \{ -[ -b_{1s}^{(k-1)} + 2R \text{sign th} b_2^{(k-1)} ] [ -b_{1s}^{(k)} + 2R \text{sign th} b_2^{(k)} ] - b_{1k}^{(k-1)} b_{1k}^{(k)} \}. \quad (11)$$

У [17] наведено більш загальне рішення, коли заважаючий сигнал – чотирьох становий (ФМ-4).

2. Для третьої моделі спостереження із застосуванням процедури представлення апостеріорного розподілу дискретних станів корисного сигналу через апостеріорний розподіл дискретних станів формального групового сигналу одержуємо некогерентний демодулятор сигналу ЧМ-2 з реалізацією процедури компенсації потужної подібної ЧМ-2 завади:



$$r_1^* = \text{rect}[\exp(b_2^{(2)} - h_2^{2(2)})[I_0(B_1) - I_0(B_{2e})]] + \exp(b_1^{(2)} - h_1^{2(2)})[I_0(B_{1e}) - I_0(B_2)]], \quad (12)$$

де  $b_{1,2}^{(2)}; h_{1,2}^{2(2)}$  – визначені позначеннями до вирішуючого правила (8);

$I_0(\cdot)$  – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку;

$$B_{1,2} = \sqrt{b_{1s,2s}^2 + b_{1k,2k}^2};$$

$$B_{1e,2e} = \sqrt{b_{1se,2se}^2 + b_{1k,2k}^2},$$

де

$$b_{1se,2se} = b_{1s,2s} - 2\alpha_{1,2}h_{1,2}^{2(2)};$$

$$\alpha_1 = A_{11}^* / A_{21}^*; \alpha_2 = A_{12}^* / A_{22}^*; 0 < \alpha << 1,$$

а решта позначень відповідає введеним при описі вирішуючого правила (10).

Якщо енергія завади суттєво перевищує енергію корисного сигналу, з (12) одержуємо:

$$r_1^* = \text{rect}[\text{rect}(b_2^{(2)} - h_2^{2(2)})[I_0(B_1) - I_0(B_{2e})]] + \text{rect}(b_2^{(2)} - h_1^{2(2)})[I_0(B_{1e}) - I_0(B_2)]. \quad (13)$$

Зважаючи на те, що функція  $I_0(x)$  монотонна при  $x > 0$ , (13) можна переписати у ще більш спрощеному вигляді:

$$r_1^* = \text{rect}[(b_{1s} - 2\text{rect}(b_1^{(2)} - b_2^{(2)})\alpha_1 h_1^{2(2)})^2 + b_{1k}^2 - (b_{2s} - 2\text{rect}(b_2^{(2)} - b_1^{(2)})\alpha_2 h_2^{2(2)})^2 - b_{2k}^2]. \quad (14)$$

На рис. 4 зображено структурну схему некогерентного демодулятора ЧМ-2 на фоні ЧМ-2, що реалізує вирішуюче правило (14)

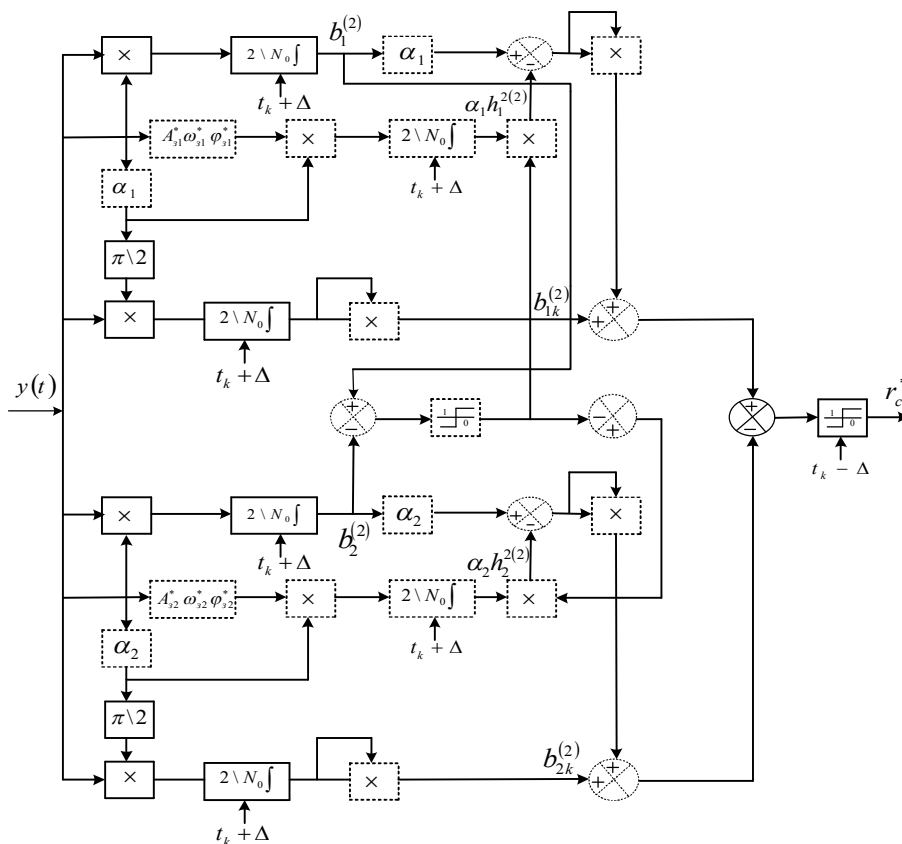


Рис. 4. Структурна схема некогерентного демодулятора ЧМ-2 на фоні ЧМ-2  
Усі наведені точні і наближені алгоритми [4-14] мають спільні риси:

- за відсутності завади вони вироджуються у класичні алгоритми КГ та НКГ (автокореляційного) прийому ЦС, що спостерігається на фоні білого шуму;
- ідеалізована постановка (припущення про точне знання неінформаційних параметрів завади) дозволяє (можливо, вперше) отримати коректну відповідь на питання про потенційну завадозахищеність прийому ЦС того чи іншого виду модуляції, що спостерігається на фоні АБГШ та подібної завади, суттєво потужнішої за корисний сигнал.

Асимптотична оцінка завадозахищеності вищенаведених алгоритмів демодуляції (5), (7), (9) виконана відповідно в роботах [5,10-13,15,]. Чисельно та аналітично доведено, що за умови  $A_1 \ll A_2$  (тобто, за суттєвого перевищення миттєвої потужності заважаючого сигналу над миттєвою потужністю корисного) потенціальна завадостійкість виявляється такою ж, як і за відсутності завади, і за умови точного знання її неінформаційних параметрів визначається лише відношенням сигнал/шум. Користуючись застосованим в вищезазначених роботах підходом, неважко також оцінити асимптотичну завадозахищеність одержаних в цій роботі алгоритмів (11) та (14). Водночас слід чекати, що всі зазначені процедури демодуляції (4-14) є критичними насамперед до точності оцінок всіх (енергетичних та неенергетичних) параметрів завади і точності реалізації [5].

### **Висновки**

Сучасний стан СТРЦС та природне взаємопов'язане розгортання її методів на суміжні методи теорії нелінійної фільтрації дискретно-неперервних марківських процесів дозволяють синтезувати високоефективні процедури демодуляції ЦС, що спостерігаються в адитивній суміші з заважаючими подібними сигналами.

Усі продемонстровані процедури демодуляції мають спільні риси. По-перше, за відсутності завади вони вироджуються у відповідні КГ, ККГ, НКГ (або автокореляційні) класичні демодулятори ФМ-2 або ЧМ-2. По-друге, процедури компенсації завжди здійснюються на виходах кореляційної згортки корисного сигналу, що є зручним з точки зору технічної реалізації.

Байєсівський підхід в СТРЦС, що передбачає наявність (можливість формування) апостеріорного розподілу дискретних станів групового спостереження (що утворюється адитивною сумою сигналу і завад) в узагальненій експоненційній формі, забезпечує можливість синтезу "базових" процедур розділення, строго оптимальних за критерієм мінімуму середньої імовірності помилки на біт корисного сигналу, що не залежать за структурою від процедур формування зазначеного розподілу.

За умови суттєвого перевищення миттєвої потужності заважаючого сигналу над миттєвою потужністю корисного сигналу (на 6-10 дБ, залежно від виду модуляції) необхідність в оцінці енергетичних параметрів корисного сигналу відпадає. При некогерентній демодуляції останнього оцінка його початкової фази, очевидно, теж не потрібна.

Найпростішими виявляються процедури розділення у випадку, коли заважаючий сигнал – один і має місце тактовий синхронізм між сигналом і завадою. Якщо сигнал і завада гетерохронні, складність структури демодулятора зростає, але менше, ніж вдвічі.

Асимптотична завадозахищеність процедур оптимального розділення (за умови суттєвого перевищення потужності завади над корисним сигналом) наближається до потенційної завадостійкості прийому корисного сигналу за відсутності завади.

При реалізації обговорених процедур демодуляції визначну роль відіграє ступінь точності оцінки всіх (інформаційних і неінформаційних, дискретних та неперервних) параметрів завади.

Вищевикладене дає підставу сподіватись на застосування процедур розділення взаємозаважаючих ЦС при розробці перспективних заводо захищених засобів та ліній радіозв'язку, зокрема при реалізації перспективних програм повторного використання частотного ресурсу.

#### Література:

1. *Агеев Д.В.* Основы теории линейной селекции / Д.В. Агеев // Научно-технический сборник. – 1935. – № 40. – С. 8-28.
2. *Котельников В.А.* Теория потенциальной помехоустойчивости / В.А. Котельников. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 152 с.
3. *Теория и применение псевдослучайных сигналов:* / [Алексеев А.И., Шереметьев А.Г., Тузов Г.И., Глазов Б.И.]. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
4. *Lupas R.* Linear Multiuser Detectors for Synchronous Code-Division Multiple-Access Channels / R. Lupas, S. Verdu. – С.: IEEE Trans. On Inf. Theory, 1989. – 123-135 p.
5. *Бураченко Д.Л.* Оптимальное разделение цифровых сигналов многих пользователей в линиях и сетях связи в условиях помех / Д.Л. Бураченко – Л.: ВАС, 1990. – 302 с.
6. *Verdu S.* Fifty Years of Shannon Theory / S. Verdu – С.: IEEE Trans. Inf. Theory, 1986. – 2057-2077 p.
7. *Verdu S.* Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiply Access Channels / S. Verdu – С.: IEEE Trans. Inf. Theory, 1986. – 85-96 p.
8. *Verdu S.* Multiuser detection / S. Verdu – С.: Cambridge University Press, 1998. – 101-124 p.
9. *Гепко И.А.* Многопользовательский прием в CDMA: теория и методы / И.А. Гепко // Зв'язок. – 2000. – № 4 – С. 17–23.
10. *Бураченко Д.Л.* Алгоритм разделения аддитивных неортогональных синхронных сигналов / Д.Л. Бураченко, В.Ф. Ерохин // Радиотехника. – 1985. – № 12. – С. 58-59.
11. *Бураченко Д.Л.* Потенциальная помехоустойчивость демодуляции цифрового сигнала с компенсацией структурной прерывистой помехи / Д.Л. Бураченко, В.Ф. Ерохин // Радиотехника. – 1989. – № 9. – С. 61-62.
12. *Ерохин В.Ф.* Демодуляция конфликтующих цифровых сигналов / В.Ф. Ерохин – К.: КВИУС–ИК им. В.М. Глушкова АН Украины, 1993. – 133 с.
13. *Ерохин В.Ф.* Метод синтезу алгоритмів оптимального розділення двостанових взаємозаважаючих цифрових сигналів частотної маніпуляції / В.Ф. Ерохін, В.М. Раєвський // Зб. наук. праць – 2004. – № 4. – С. 38-47.
14. *Ерохин В.Ф.* Оптимальное разделение сигналов частотной манипуляции с непрерывной фазой / В.Ф. Ерохин, Д.А. Люлин, В.В. Мельничук // Наукові праці КВІУЗ – 1998. – № 2. – С. 56-65.
15. *Ерохин В.Ф.* Синтез алгоритма разделения гетерохронных ЦС / В.Ф. Ерохин, Д.А. Люлин // Электронное моделирование. – 1999. – № 5. – С. 46-54.

16. *Єрохін В.Ф.* Оптимальний прийом сигналу двостанової фазової маніпуляції в умовах заважаючого впливу сигналу частотної маніпуляції / В.Ф. Єрохін, В.Г. Міщенко, С.М. Злотницький // Зб. наук. праць – 2000. – № 1. – С. 111-117.
17. *Єрохін В.Ф.* Алгоритм демодуляції, що забезпечує повторне використання частот цифрового радіомовлення / В.Ф. Єрохін, І.М. Крутофіст // Захист інформації. – 2005. – № 25. – С. 42-47.
18. *Сосулин Ю.Г.* Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов / Ю.Г. Сосулин // Сов. радио. – 1978. – № 53. – С. 320.
19. *Тихонов В.И.* Оптимальная фильтрация дискретно-непрерывных процессов / В.И. Тихонов, В. Н. Харисов, В.А. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, №7. – С. 1441-1451.
20. *Тихонов В.И.* Теория, методы анализа и синтеза радиоэлектронных систем / В.И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1989. – 610 с.
21. *Єрохін В.Ф.* Сумісна фільтрація дискретно-неперервних та неперервних марківських процесів / В. Ф. Єрохін, О. Г. Соловей // Радіотехніка. – 2007. – № 149. – С. 156-163.
21. *НД* Радіовиявлювачі вимірювальні. Методи та засоби випробувань – К.: ДССЗЗІ, 2001 – 32 с.
22. *Хворостенко Н.П.* Экстракторы сигналов ФТ / Н. П. Хворостенко // Радиотехника. – 1978. – Т. 33, № 1. – С. 37-42.
23. *Милстайн Л.Б.* Методы подавления помех в системах радиосвязи с широкополосными сигналами / Л.Б. Милстайн // ТИИЭР – 1988. – Т. 76, № 6.– С. 19-36.
24. *Єрохін В.Ф.* Подолання апріорної невизначеності параметрів при демодуляції взаємозважаючих частотноманіпульованих цифрових сигналів / В.Ф. Єрохін, В.М. Раєвський // Радіотехніка. – 2006. – № 144. – С. 208-216.