

Говорун О.І., Макаренко А.О.

Державний університет телекомунікацій, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ З ВИСОКОЮ ЗАВАДОСТІЙКІСТЮ В СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація: Досліджено системи багатопозиційних сигналів, на базі котрих можна досягнути швидкості передачі інформації близьку до пропускної спроможності каналів зв'язку. В системах зв'язку, де особливо жорсткі вимоги до завадостійкості передачі інформації, найефективнішим є використання багатопозиційних сигналів з фазорізницевою модуляцією, для яких еквівалентна енергія максимальна. Оптимальний некогерентний прийом має статус оптимального при варіантах сигналу з невідомою і рівномірно розподіленою початковою фазою. Під оптимальним некогерентним прийомом розуміють некогерентний метод обробки, що забезпечує мінімум імовірності помилки в прийомі елементу сигналу в каналі з гауссівським білим шумом при випадковій і рівномірно розподіленій початковій фазі прийнятого елемента, (про яку нічого більше не відомо). Всі інші неінформаційні параметри сигналу, крім початкової фази, у першу чергу - частота та інтервал обробки, при оптимальному некогерентному прийомі повинні бути відомі точно. Що стосується амплітуди сигналу, то при використанні сигналів з рівною енергією вона може бути невідомою. Стосовно до ФМ сигналів оптимальний некогерентний метод прийому може бути використаний тільки для визначення переданої різниці фаз (а не абсолютної фази), яка при цьому методі обробки принципово є невідомою. Досліджено основну методику синтезу алгоритмів оптимального некогерентного прийому сигналів із ФРМ-1, котра розглядає всі можливі ситуації при обробці сигналів на двох послідовних етапах. Розроблено алгоритм оптимального некогерентного прийому сигналів із ФРМ-1, придатний для реалізації при будь-якому наборі інформаційних різниць фази. Розроблено алгоритм оптимального некогерентного прийому сигналів із ФРМ-2. Зроблено висновок, що оптимальний некогерентний прийом сигналів із ФРМ дозволяє шляхом збільшення інтервалу обробки наблизиться до потенціальної завадостійкості даної системи сигналів без оцінювання початкової фази.

Ключові слова: багатопозиційний сигнал, ФРМ-2, сигнальні сузір'я, некогерентний демодулятор, коефіцієнт завадостійкості

Hovorun O.I., Makarenko A.O.

State University of Telecommunications, Kyiv

RESEARCH OF METHODS AND MEANS OF SIGNAL MODULATION WITH HIGH INTERFERENCE RESISTANCE IN MODERN MOBILE NETWORKS

Abstract: Systems of multiposition signals are investigated, on the basis of which it is possible to reach the transmission speeds close to the bandwidth of communication channels. In communications systems, where the most stringent requirements for noise immunity are the most effective, it is most efficient to use multi-position signals with phase-difference modulation, for which the equivalent energy is maximal. The optimal incoherent reception has the status of optimal for signal variants with an unknown and uniformly distributed initial phase. Optimal incoherent reception is understood as a non-coherent processing method that ensures the minimum probability of error when receiving signal elements in a channel with Gaussian white noise with a random and uniformly distributed initial phase of the received element (about which nothing else is known). All other non-informative parameters of the signal, except for the initial phase, primarily - the frequency and processing interval, with optimal non-coherent reception, must be known precisely. As for the signal amplitude, when using signals with equal energy, it may be unknown. With regard to FM signals, the optimal incoherent method of reception can be used only to determine the phase of the

transmitted difference (and not the absolute phase), which is fundamentally unknown with this processing method. The main method of synthesis of algorithms for optimal incoherent reception of signals from FRM-1 is considered, which considers all possible situations when processing signals on two parcels. An algorithm for optimal incoherent reception of signals from FDM-1 is developed, suitable for implementation with any set of information phase differences. The algorithm of optimal incoherent reception of signals from FDM-2 is developed. It is concluded that the optimal incoherent reception of signals from the FDM allows, by increasing the processing interval, to approach the potential impedance of the given signal system without evaluating the initial phase.

Keywords: *multiposition signal, FDM-2, signal constellation, incoherent demodulator, coefficient of noise immunity*

1. Постановка проблеми.

Одним з найважливіших завдань в галузі телекомунікацій є забезпечення споживачів телекомунікаційними послугами, які включають в себе не тільки традиційні послуги зв'язку, але і так звані послуги контенту. Це можливо тільки за наявності надійної і високошвидкісної мережі, яка має забезпечити цифрову передачу інформації з заданою якістю як в фіксованому, так і в мобільному фрагменті мережі.

У галузі телекомунікацій, зв'язок на фізичному рівні є найбільш фундаментальним способом забезпечення з'єднання з численними мультиплексами і маршрутизаторами в всеохопній мережі, такої як Інтернет. Фізичний рівень забезпечує зв'язок між двома безпосередньо підключеними вузлами, незалежно від того, з'єднані вони провідником, як у стандарті IEEE 802.3, або через безпроводове з'єднання, як у стандартах IEEE 802.11 [1 - 3]. Актуальною залишається задача синтезу алгоритмів оптимальної обробки багатопозиційних сигналів з амплітудно-фазовою модуляцією в сучасних мобільних мережах.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз науково-технічної літератури доводить, що проблемам дослідження синтезу алгоритмів оптимальної обробки багатопозиційних сигналів з амплітудно-фазовою модуляцією присвятили багато робіт вітчизняні та зарубіжні вчені такі як: Толубко В.Б., Стеклов В.К., Беркман Л.Н., Климаш М.М., Науменко М.І., Нетес В.А., Блек Ю., Гандел Р., Девід Е., Болгер Дж., Сігалл А. та інші [1 - 7].

Проте, у відомій сьогодні науково-технічній літературі недостатньо досліджені методи та засоби модуляції сигналу з високою завадостійкістю в сучасних мобільних мережах, що мають практичний зміст і враховують багатоваріантний розвиток засобів та сучасних технологій.

3. Мета і задачі дослідження.

Зважаючи на результати аналізу та наявні рішення в сфері поєднання алгоритмів оптимальної обробки багатопозиційних сигналів та мобільних мереж визначимо, що метою даної публікації є дослідження ефективності конвергенції амплітудно-фазової модуляції в сучасних мобільних мережах, що дозволить надавати широкий спектр послуг великій кількості користувачів практично в будь-якій точці виділеної території.

4. Результати дослідження

У телекомунікаційній мережі, такої як Інтернет, кінцеві системи обмінюються даними одна з одною через мережу, яка в основному є сукупністю каналів зв'язку, з'єднаних через мультиплекси і маршрутизатори. Майже у всіх випадках зв'язок між кінцевими системами буде здійснюватися у формі пакетів. У багаторівневій архітектурі мережевий рівень і рівні над ним забезпечують наскрізне з'єднання між кінцевими системами. Рівень каналу даних, однак, забезпечує зв'язок між двома безпосередньо підключеними вузлами, де вузол може бути кінцевою системою або проміжним мультиплексором. Канальний рівень відповідає за передачу фізичних кадрів між двома безпосередньо підключеними або суміжними вузлами.

Кадр - це не що інше, як послідовність бітів s ; для передачу кадру між двома сусідніми вузлами каналний рівень використовує послуги фізичного рівня, який відповідає за фізичне передачу окремих бітів [1, 2].

Розглянемо передачу цифрових даних лише на фізичному рівні. Це може бути досягнуто різними методами, одним із яких є цифрова фазова модуляція (DPM). Іноді цифрова фазова модуляція використовується як синонім фазової маніпуляції (PSK), яка є лише окремим випадком DPM.

На фізичному рівні передача цифрових даних між двома безпосередньо підключеними вузлами здійснюється одним із двох основних способів. Перший спосіб полягає у використанні базової смуги зв'язку, за якої цифрові дані передаються без зміни частотного спектру цифрового сигналу повідомлення або цифрового сигналу основної смуги. Таким чином, цифровий зв'язок базової смуги (також відомий як передача імпульсу основної смуги) є прямим передавачем цифрового сигналу основної смуги, який генерується шляхом безпосереднього представлення цифрових символів в одній із різних форм електричних імпульсів. Цифрова передача основної смуги здійснюється через канали, які зазвичай є низькочастотними за своєю природою. Другий спосіб передачу цифрових даних - смуговий зв'язок, за допомогою якого цифрові дані, що передаються, використовуються для генерації цифрового сигналу смуги пропускання, який потім передається на приймач.

У цифровій системі зв'язку інформація, яка надсилається від передавача до приймача, завжди кодується у формі цифрових даних. Якщо інформація для надсилання готова в цифровому форматі, то відправнику не потрібно докладати додаткових зусиль при використанні цифрової системи зв'язку. Проте, якщо інформація, яку потрібно надіслати, є аналоговою, наприклад, голос у дзвінку за протоколом Інтернет (або VoIP) між двома кінцевими користувачами, відправник несе відповідальність за перетворення аналогової інформації (голосу) у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворення. Очевидно, що приймачу потрібно буде звернути процес, побудувавши аналоговий сигнал із отриманого цифрового сигналу.

На рис. 1 представлена блок-схема типової цифрової системи зв'язку. Повідомлення, яке потрібно надіслати, може бути з аналогового джерела (наприклад, голос) або з цифрового джерела (наприклад, комп'ютерні дані). Аналого-цифровий (A/D) перетворювач дискретизує та квантує аналоговий сигнал і представляє вибірки в цифровій формі (біт 1 або 0) [1, 3].

Кодер джерела приймає цифровий сигнал і кодує його в більш короткий цифровий сигнал. Це називається вихідним кодуванням, яке зменшує надлишковість, отже, швидкість передачі. Це, у свою чергу, зменшує вимоги до пропускну здатності системи. Канальний кодер приймає вихідний цифровий сигнал вихідного кодера та кодує його в довший цифровий сигнал. Надлишковість навмисно додається до кодованого цифрового сигналу, щоб деякі помилки, викликані шумом або перешкодами під час передачі через канал, могли бути виправлені в приймачі. Найчастіше передача відбувається у високочастотній смузі пропускання. Таким чином, модулятор додає закодовані цифрові символи до носія. Іноді передача відбувається в базовій смузі; модулятор - це модулятор базової смуги частот, або формататор, який форматує закодовані цифрові символи у форму сигналу, придатну для передачі. Зазвичай після модулятора стоїть підсилювач потужності. Для високочастотної передачі модуляція і демодуляція зазвичай виконуються на проміжній частоті (ПЧ). У цьому випадку між модулятором і підсилювачем потужності вставляється перетворювач частоти з підвищенням частоти. Якщо ПЧ занадто низька порівняно з несучою частотою, необхідні кілька етапів перетворення несучої частоти. Для безпроводових систем антена є кінцевою частиною передавача. Середовище передачі зазвичай називається каналом, де шум додає до сигналу, а ефекти завмирання та ослаблення проявляються як складний мультиплікативний фактор сигналу. Термін «шум» тут має широкий зміст і включає всі випадкові електричні перешкоди ззовні або зсередини системи. Канал також зазвичай має обмежену смугу частот, тому його можна розглядати як фільтр. У приймачі відбувається практично зворотна обробка сигналу. Спочатку отриманий слабкий сигнал посилюється (і, якщо необхідно,

перетворюється з пониженням частоти) і демодулюється. Потім додаткову надлишковість прибирає декодер каналу, і декодер джерела відновлює вихідний сигнал перед тим, як його відправити користувачеві. Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) потрібен для аналогових сигналів [4 - 6].



Рис. 1. Блок-схема типової цифрової системи зв'язку

Блок-схема на рис. 1 є лише типовою конфігурацією системи. Справжня конфігурація системи може бути складнішою. Для багатокористувацької системи перед модулятором вставляється каскад мультиплексування. Для системи з кількома станціями каскад керування з множинним доступом вставляється перед передавачем. У систему також можна додати інші функції, такі як розподіл частот і шифрування. Реальна система також може бути простішою. Вихідне кодування та кодування каналів можуть не знадобитися в простій системі. Насправді лише модулятор, канал, демодулятор і підсилювачі є важливими у всіх системах зв'язку (з антенами для безпроводових систем).

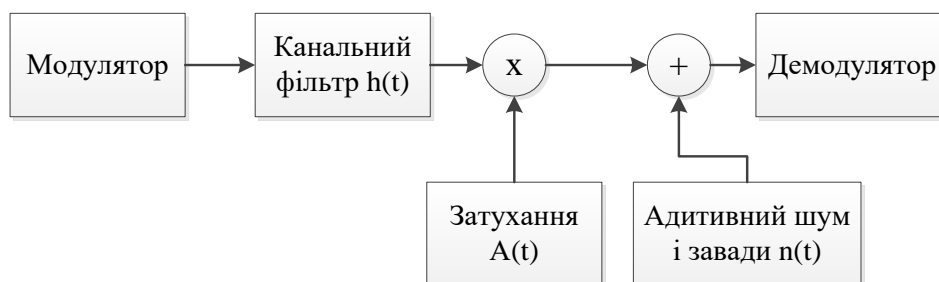


Рис. 2. Модель цифрової системи зв'язку для модуляції та демодуляції

З метою опису методів модуляції та демодуляції та аналізу їх продуктивності часто використовується спрощена модель системи, показана на рис. 2 [7 - 8]. Ця модель виключає нерелевантні блоки щодо модуляції, щоб релевантні блоки виділялися. Однак нещодавно розроблені модемні методи поєднують модуляцію та каналним кодуванням. У цих випадках каналний кодер є частиною модулятора, а каналний декодер є частиною демодулятора. З рис. 2 отриманий сигнал на вході демодулятора можна виразити у вигляді

$$r(t) = A(t)[s(t) * h(t)] + n(t) \quad (1)$$

де * позначає згортку. На рис. 2 канал описано трьома елементами. Перший – фільтр каналів. Через той факт, що сигнал $s(t)$ від модулятора повинен пройти передавач, канал (середовище передачі) і приймач, перш ніж досягти демодулятора, каналний фільтр, отже, є складеним фільтром, функція передачі якого

$$H(t) = H_T(t)H_C(t)H_R(t) \quad (2)$$

де $H_T(t)$, $H_C(t)$, $H_R(t)$ є передавальною функцією передавача, каналу та приймача відповідно. Еквівалентно імпульсна характеристика каналного фільтра

$$h(t) = h_T(t) * h_C(t) * h_R(t) \quad (3)$$

де $h_T(t)$, $h_C(t)$, $h_R(t)$ – імпульсні характеристики передавача, каналу та приймача відповідно. Другим елементом є фактор $A(t)$, який, як правило, є комплексним. Цей фактор представляє замирання в деяких типах каналів, таких як мобільний радіоканал. Третім елементом є додатковий шум і перешкода $n(t)$.

Оптимальний некогерентний прийом має статус оптимального при варіантах сигналу з невідомою і рівномірно розподіленою початковою фазою. Під оптимальним некогерентним прийомом розуміють некогерентний метод обробки, що забезпечує мінімум імовірності помилки в прийомі елементу сигналу в каналі з гауссівським білим шумом при випадковій і рівномірно розподіленій початковій фазі прийнятого елемента, (про яку нічого більше не відомо). Всі інші неінформаційні параметри сигналу, крім початкової фази, у першу чергу – частота та інтервал обробки, при оптимальному некогерентному прийомі повинні бути відомі точно. Що стосується амплітуди сигналу, то при використанні сигналів з рівною енергією вона може бути невідомою. Стосовно до ФМ сигналів оптимальний некогерентний метод прийому може бути використаний тільки для визначення переданої різниці фаз (а не абсолютної фази), яка при цьому методі обробки принципово є невідомою [1, 8].

Якщо початкова фаза прийнятих елементів сигналу невідома або не може бути оцінена за передісторією процесу з високою точністю, то когерентний (або квазікогерентний) демодулятор просто непрацездатний, у той час як некогерентний модулятор забезпечує досить високу завадостійкість і знаходиться поза конкуренцією. 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. Причому когерентний має більш високу завадостійкість. Наскільки має переваги в цих умовах когерентний демодулятор – залежить від кратності модуляції, розмірності оброблюваного відрізка сигналу та інших факторів. Програш у завадостійкості оптимального некогерентного прийому когерентному зростає в міру збільшення позиційності і розмірності оброблюваного сигналу. Зокрема, при чотирьохпозиційній ФРМ програш більший, ніж при двопозиційній ФРМ; при прийомі сигнально-кодової конструкції в цілому програш більший, ніж при поелементному прийомі.

До некогерентного прийому звертаються тоді, коли, наприклад, у каналі з постійними параметрами когерентний прийом сигналів з однократною ФРМ має більшу завадостійкість, ніж оптимальний некогерентний, однак виграш цей незначний. Адже некогерентний демодулятор не вимагає формування когерентних із прийнятими сигналами опорних коливаний і, відповідно, простіший за когерентний. Остання обставина в ряді випадків є вирішальною при виборі між когерентними й оптимальним некогерентним методами прийому. Крім оптимального некогерентного методу існують різні субоптимальні, близькі до нього по завадостійкості, але все-таки програють некогерентному методу прийому, який реалізуються ще простіше.

Синтез алгоритмів оптимального некогерентного прийому сигналів із ФРМ-2 проведемо за загальним алгоритмом оптимальної некогерентної обробки (4).

При некогерентному прийомі ймовірність помилки буде мінімальною, коли демодулятор прийме рішення про передачу такого сигналу S_i , для якого при усіх $j \neq i$ виконується нерівність:

$$\left[\int_0^\tau x(t) S_i(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^\tau x(t) S_i^*(t) dt \right]^2 > \left[\int_0^\tau x(t) S_j(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^\tau x(t) S_j^*(t) dt \right]^2. \quad (4)$$

Тут S_j^* перетворений по Гільберту сигнал S_j .

У даному випадку тривалість інтервалу обробки сигналу дорівнює трьом послідовним ($\tau = 3T$), так як передана друга різниця фаз в загальному випадку визначається не менш ніж трьома послідовними сигналами. Таким чином, необхідно записати всі можливі варіанти сигналу з

ФРМ-2 на трьох послідовних і підставити ці варіанти в (4). При цьому перша з трьох послідовних є відліковою і має довільну, але однакову для усіх варіантів початкову фазу [9, 10].

При однократній ФРМ-2 з різницями фази 0 або π на трьох послідовних мають місце чотири варіанти сигналу, зображені на рис. 3. Ці варіанти можна записати в наступному компактному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} S_1(t) &= a \sin \omega t & \Delta^2 \phi &= 0; \\ S_2(t) &= a \sin \omega t \operatorname{sgn} \sin(\pi t/T) & \Delta^2 \phi &= 0; \\ S_3(t) &= a \sin \omega t \operatorname{sgn} \sin(\pi t/2T + \pi/2) & \Delta^2 \phi &= \pi; \\ S_4(t) &= a \sin \omega t \operatorname{sgn} \sin(\pi t/2T) & \Delta^2 \phi &= \pi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Кожному з чотирьох сигналів у (5) відповідає зазначене значення різниці фази. Підставимо (5) у (4) і скористаємося позначеннями:

$$X_n = \int_{nT}^{(n+1)T} x(t) \sin \omega t dt, \quad Y_n = \int_{nT}^{(n+1)T} x(t) \cos \omega t dt, \quad (6)$$

одержимо, що в шуканому демодуляторі повинні обчислюватися наступні чотири величини:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= (X_{n-2} + X_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n)^2; \\ V_2 &= (X_{n-2} - X_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} + Y_n)^2; \\ V_3 &= (X_{n-2} - X_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} - Y_n)^2; \\ V_4 &= (X_{n-2} + X_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} - Y_n)^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

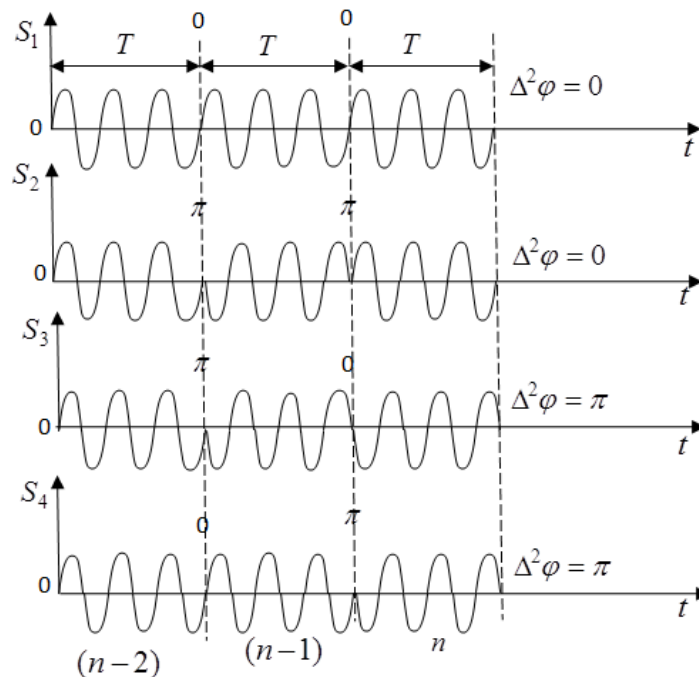


Рис. 3. Варіанти сигналу з однократною ФРМ-2

Рішення приймається наступним чином: якщо найбільшою є V_1 або V_2 , то переданою вважається різниця фаз $\Delta^2 \phi_n = 0$; якщо ж найбільшою виявляється V_3 або V_4 , то переданою вважається $\Delta^2 \phi_n = \pi$.

Алгоритм (8) можна представити в іншому, еквівалентному вигляді, якщо обчислити квадрати сум у (8) і вилучити з отриманих виразів однакові члени – квадрати величин X і Y .

$$\begin{aligned} V_1 &= (X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) + (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) + \\ &+ (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= (X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) - (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) - \\
 &\quad - (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}); \\
 V_3 &= -(X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) - (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) + \\
 &\quad + (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}); \\
 V_4 &= -(X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) + (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) - \\
 &\quad - (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Схема демодулятора, що відповідає синтезованому алгоритму, представлена на рис. 2. Ця схема, крім звичайних для когерентних демодуляторів коректорів, генератора опорних коливань з довільною фазою і ліній затримки, містить формувач величин $V_1 - V_4$, що задовольняє алгоритму (6) або (7), і схему порівняння. Остання виносить рішення про переданий двійковий символ.

Для здійснення строго оптимального некогерентного прийому в даному демодуляторі частота опорного коливання повинна співпадати з несучою частотою прийнятого сигналу, тобто цей демодулятор неінваріантний до частоти сигналу і його завадостійкість зменшується при зсувах частоти.

Властивість алгоритмів (7) і (8) і демодулятора за схемою, рис. 4, полягає в тому, що при відсутності розстройки частоти завадостійкість демодулятора вища за завадостійкість оптимального некогерентного демодулятора сигналів із ФРМ-1 і майже не відрізняється від завадостійкості когерентного демодулятора сигналів з однократною ФРМ-1. Це дозволяє зробити висновок про збільшення завадостійкості при подовженні інтервалу оптимальної некогерентної обробки безнадлишкових сигналів.

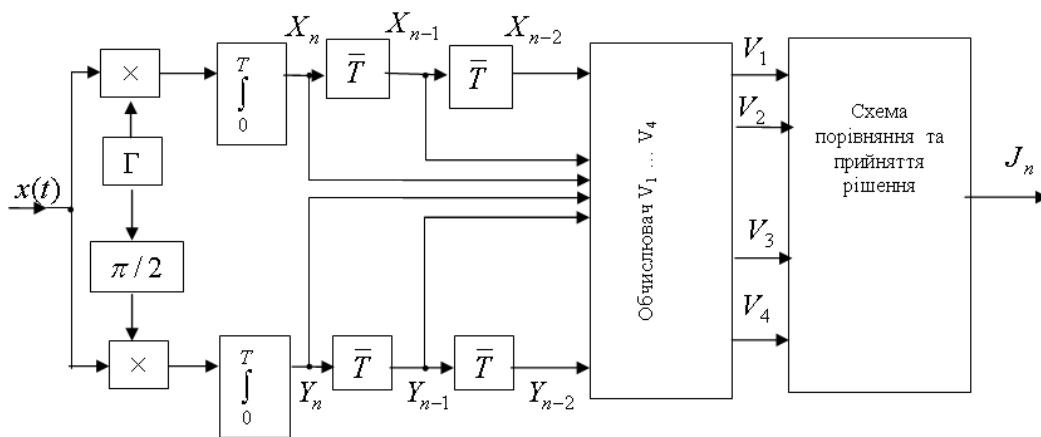


Рис. 4. Оптимальний некогерентний демодулятор сигналів з однократною ФРМ-2

5. Висновки і перспективи подальших досліджень.

Отже, властивість алгоритму оптимального демодулятора для некогерентного прийому сигналів із ФРМ другого порядку полягає в тому, що при відсутності розстройки частоти завадостійкість демодулятора вища за завадостійкість оптимального некогерентного демодулятора сигналів із ФРМ-1 і майже не відрізняється від завадостійкості когерентного демодулятора сигналів з однократною ФРМ-1. Це дозволяє зробити висновок про збільшення завадостійкості при подовженні інтервалу оптимальної некогерентної обробки безнадлишкових сигналів.

Список використаних джерел

1. Толубко В.Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізницевої модуляції високих порядків / В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман // Зв'язок - 2016.- №4 С. 5-7.

2. Макаренко А.О. Методи підвищення ефективності роботи безпроводових телекомунікаційних мереж / А.О. Макаренко та ін. // Наукові записки УНДІЗ – 2019. – № 3(55). – С. 74-79.
3. Макаренко А.О. Інтелектуальна система керування мережею для вирішення проблеми автономного моніторингу 5G-технологій / А.О. Макаренко, А.В. Березнюк, С.Г. Лазебний, Н.В. Руденко // Зв'язок – 2021. – № 2(150). – С. 3-9.
4. Makarenko A. High-altitude configuration of non-terrestrial telecommunication network using optical wireless technologies / Yana Kremenetska, Anatoliy Makarenko, Andrii Bereznyuk, Serhii Lazebnyi, Natalia Rudenko, Olexander Vlasov // International Journal of Communication Networks and Information Security, 2021, 13(3), pp. 394–400.
5. Кременецька Я.А. Багаторівнева модель наземних і неназемних телекомунікацій із застосуванням технологій оптичного безпроводового зв'язку / Я.А. Кременецька, А.О. Макаренко, С.Г. Лазебний, В.І. Кравченко, К.Д. Бутолін // Зв'язок. – 2021. - №5 (153) – С. 34-39.
6. Yang M. Probabilistically Coded Modulation Formats for 5G Mobile Fronthaul Networks / Yang M. et. al // Зв'язок. – 2021. - №5 (153) – С. 34-39.
7. Pfeiffer T. "Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures", IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 7, no. 11, pp. B38-B45, Nov. 2015.
8. Толубко В.Б. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж / В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №4. – С. 3-8
9. Стеклов В.К. Проектування телекомунікаційних мереж: Підручник для вузів / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман – К.: Техніка, 2002. – 848 с.
10. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: Підручник для вузів / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, Є.В. Кільчицький – К.: Техніка, 2004. – 576 с.

References

1. Tolubko V.B. Formation of a multi-position signal of 5G technologies based on high-order phase-difference modulation / V.B. Tolubko, L.N. Berkman // Communication - 2016. - No. 4, pp. 5-7.
2. Makarenko A.O. Methods of increasing the efficiency of wireless telecommunication networks / A.O. Makarenko and others. // Scientific notes of UNDIZ - 2019. - No. 3(55). - С. 74-79.
3. Makarenko A.O. Intelligent network management system for solving the problem of autonomous monitoring of 5G technologies / A.O. Makarenko, A.V. Bereznyuk, S.G. Lazebnyi, N.V. Rudenko // Communication - 2021. - No. 2(150). - P. 3-9.
4. Makarenko A. High-altitude configuration of non-terrestrial telecommunication network using optical wireless technologies / Yana Kremenetska, Anatoliy Makarenko, Andrii Bereznyuk, Serhii Lazebnyi, Natalia Rudenko, Olexander Vlasov // International Journal of Communication Networks and Information Security, 2021, 13(3), pp. 394–400.
5. Kremenetska Ya.A. A multi-level model of terrestrial and non-terrestrial telecommunications using optical wireless communication technologies / Ya.A. Kremenetska, A.O. Makarenko, S.G. Lazebnyi, V.I. Kravchenko, K.D. Butolin // Communication. – 2021. - No. 5 (153) – P. 34-39.
6. Yang M. Probabilistically Coded Modulation Formats for 5G Mobile Fronthaul Networks / Yang M. et. al // Communication. – 2021. - No. 5 (153) – P. 34-39.
7. Pfeiffer T. "Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures", IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 7, no. 11, pp. B38-B45, Nov. 2015.
8. Tolubko V.B. Multi-criteria optimization of parameters of software-configured networks / V.B. Tolubko, L.N. Berkman // Telecommunications and information technologies. - 2014. - No. 4. - P. 3-8
9. Steklov V.K. Designing telecommunication networks: Textbook for universities / V.K. Steklov, L.N. Berkman - K.: Technika, 2002. - 848 p.
10. Steklov V.K. Optimization and modeling of communication devices and systems: Textbook for universities / V.K. Steklov, L.N. Berkman, E.V. Kilchytskyi - K.: Technika, 2004. - 576 p.