

УДК 621.396.662.072.078

Толубко В.Б., д.т.н.; Беркман Л.Н., д.т.н.;
Коршун Н.В., к.т.н.; Хахлюк О.А., здобувач

ОПТИМАЛЬНИЙ ДЕМОДУЛЯТОР ДЛЯ НЕКОГЕРЕНТНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ ІЗ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

Tolybko V.B., Berkman L.N., Korshun N.V., Khakhlyuk O.A. Optimum demodulator for incoherent reception of signals with phase-difference modulation of the second order.

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 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

Толубко В.Б., Беркман Л.Н., Коршун Н.В., Хахлюк О.А. Оптимальный демодулятор для некогерентного приёма сигналов из фазоразностной модуляцией второго порядка.

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 фазорізнницевою модуляцією, для яких еквівалентна енергія максимальна. Досліджено основну методику синтезу алгоритмів оптимального некогерентного прийому сигналів із ФРМ-1, котра розглядає всі можливі ситуації при обробці сигналів на двох посліях. 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 наблизитися до потенціальної завадостійкості даної системи сигналів без оцінювання початкової фази.

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

Толубко В.Б., Беркман Л.Н., Коршун Н.В., Хахлюк А.А. Оптимальный демодулятор для некогерентного приема сигналов с фазоразностной модуляцией второго порядка.

Исследовано системы многопозиционных сигналов на базе которых можно достичь скорости передачи информации близкую к пропускной способности каналов связи. В системах связи, где особенно жесткие требования к помехоустойчивости передачи информации, наиболее эффективным является использование многопозиционных сигналов с фазоразностной модуляцией, для которых эквивалентна энергия максимальна. Исследовано основную методику синтеза алгоритмов оптимального некогерентного приема сигналов с ФРМ-1, которая рассматривает все возможные ситуации при обработке сигналов на двух послыях. Разработан алгоритм оптимального некогерентного приема сигналов с ФРМ-1, пригодный для реализации при любом наборе информационных разниц фазы. Разработан алгоритм оптимального некогерентного приема сигналов с ФРМ-2. Сделан вывод, что оптимальный некогерентный прием сигналов с ФРМ позволяет путем увеличения интервала обработки приблизиться к потенциальной помехоустойчивости данной системы сигналов без оценки начальной фазы.

Ключевые слова: многопозиционный сигнал, ФРМ-2, сигнальные созвездия, некогерентный демодулятор, коэффициент помехоустойчивости

Вступ

Одним з найважливіших завдань в галузі телекомунікацій є забезпечення споживачів інфокомунікаційними 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. Цим вимогам відповідає мережа за технологією LTE з використанням мультиплексування за допомогою ортогональних несучих OFDM [1]. Системи OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) з використанням ортогональних каналних сигналів і багатопозиційної фазорізницевої модуляції є реальним способом подолання комплексу таких факторів, як флуктуаційний шум, лінійні спотворення, що проявляються у вигляді міжканальних перехідних завад і міжсимвольних спотворень, імпульсних завад і короткочасних перерв зв'язку. Актуальною залишається задача синтезу алгоритмів оптимальної обробки багатопозиційних сигналів з амплітудно-фазовою модуляцією в системах OFDM з ортогональними сигналами.

Виклад основного матеріалу дослідження

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 [2].

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-кової 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 вигреш цей незначний. Адже некогерентний демодулятор не вимагає формування когерентних із прийнятими сигналами опорних коливаних 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 (1).

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

$$\begin{aligned} & \left[\int_0^{\tau} x(t) S_i(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{\tau} x(t) S_i^*(t) dt \right]^2 > \\ & > \left[\int_0^{\tau} x(t) S_j(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{\tau} x(t) S_j^*(t) dt \right]^2. \end{aligned} \quad (1)$$

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 (1). При цьому перша з трьох послідовних є відліковою і має довільну, але однакову для усіх варіантів початкову фазу [3, 4].

При однократній ФРМ-2 з різницями фази 0 або π на трьох послідовних мають місце чотири варіанти сигналу, зображені на рис. 1. Ці варіанти можна записати в наступному компактному виді:

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

Кожному з чотирьох сигналів у (2) відповідає зазначене значення різниці фази. Підставимо (2) у (1) і скористаємося позначеннями:

$$X_n = \int_{nT}^{(n+1)T} x(t) \sin \omega t dt, \quad Y_n = \int_{nT}^{(n+1)T} x(t) \cos \omega t dt, \quad (3)$$

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

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= (X_{n-2} + X_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n)^2; \\ V_2 &= (X_{n-2} - X_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} + Y_n)^2; \\ V_3 &= (X_{n-2} - X_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} - Y_n)^2; \\ V_4 &= (X_{n-2} + X_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} - Y_n)^2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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

Алгоритм (4) можна представити в іншому, еквівалентному вигляді, якщо обчислити квадрати сум у (4) і вилучити з отриманих виразів однакові члени – квадрати величин X і Y .

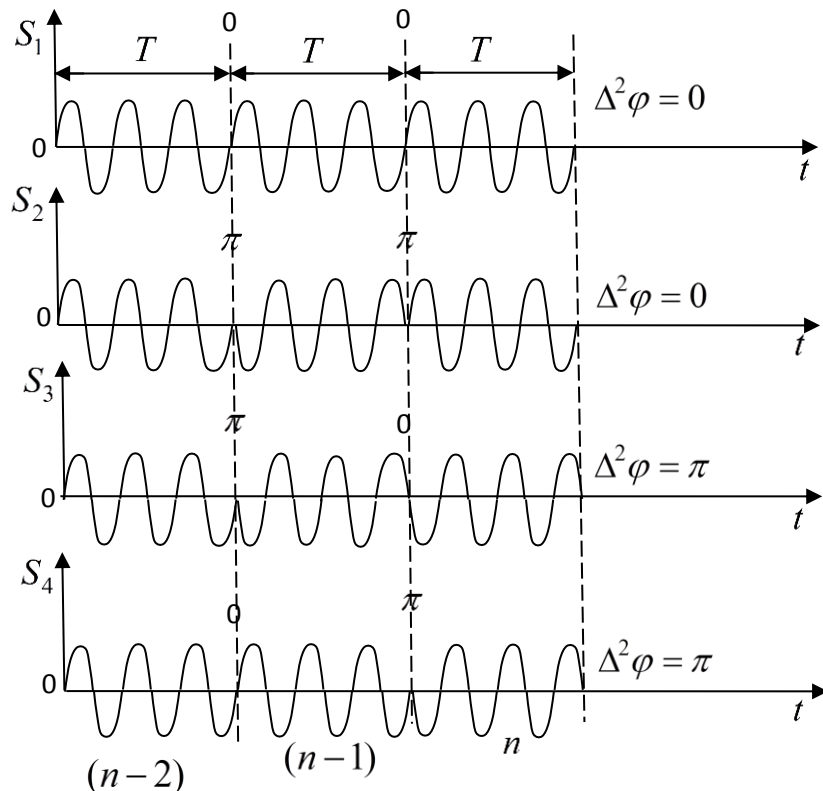


Рис. 1. Варіанти сигналу з однократною ФРМ-2

$$\begin{aligned}
 V_1 &= (X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) + (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) + \\
 &\quad + (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}); \\
 V_2 &= (X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) - (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) - \\
 &\quad - (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}); \\
 V_3 &= -(X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) - (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) + \\
 &\quad + (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}); \\
 V_4 &= -(X_n X_{n-2} + Y_n Y_{n-2}) + (X_n X_{n-1} + Y_n Y_{n-1}) - \\
 &\quad - (X_{n-1} X_{n-2} + Y_{n-1} Y_{n-2}).
 \end{aligned} \tag{5}$$

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_2 , V_3 і V_4 , що задовольняє алгоритму (3) або (4), 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 (4) і (5) і демодулятора за схемою, рис. 2, 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.

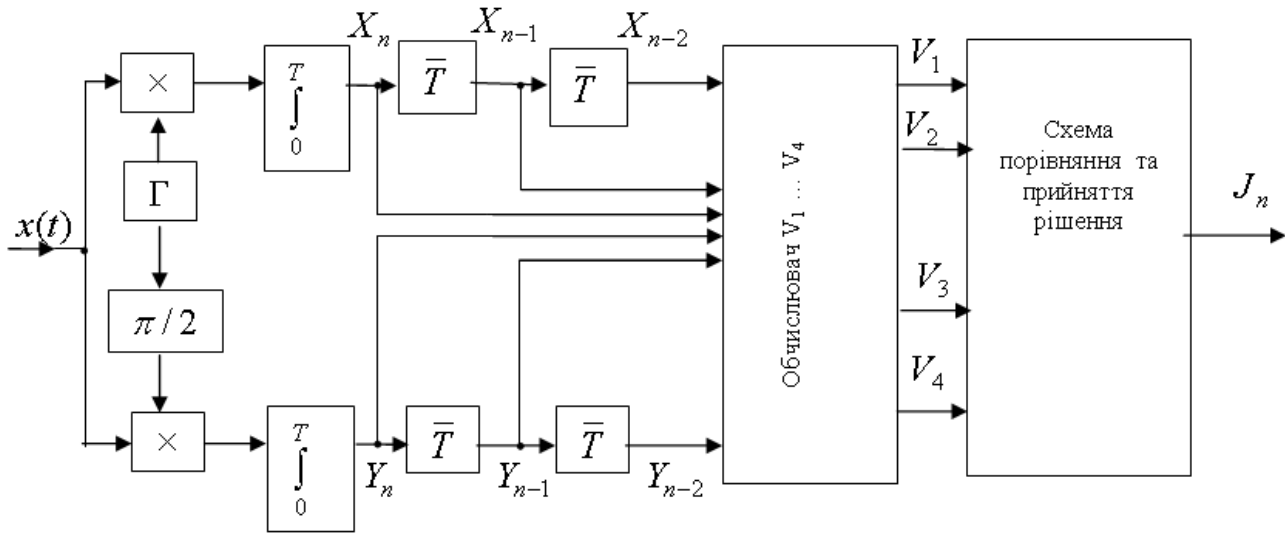


Рис. 2. Оптимальний некогерентний демодулятор сигналів з однократною ФРМ-2

При двократній ФРМ-2 з варіантами різниці фази $0, \pi/2, \pi$ і $3\pi/2$ на трьох послідовних, з яких перша має довільну, але однакову для усіх варіантів початкову фазу, виходить всього 16 варіантів сигналу – по чотири на кожну передану різницю. У шуканому демодуляторі обчислюємо величини:

$$\left. \begin{aligned}
 V_1 &= (X_{n-2} + X_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n)^2, \\
 V_2 &= (X_{n-2} + Y_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} - X_{n-1} - Y_n)^2, \\
 V_3 &= (X_{n-2} - X_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} + Y_n)^2, \\
 V_4 &= (X_{n-2} + Y_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} - X_{n-1} - Y_n)^2,
 \end{aligned} \right\} \Delta^2 \phi_n = 0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned}
 V_5 &= (X_{n-2} + X_{n-1} + Y_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} - X_n)^2, \\
 V_6 &= (X_{n-2} + Y_{n-1} - Y_n)^2 + (Y_{n-2} - X_{n-1} + X_n)^2, \\
 V_7 &= (X_{n-2} - X_{n-1} + Y_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} - X_n)^2, \\
 V_8 &= (X_{n-2} - Y_{n-1} - Y_n)^2 + (Y_{n-2} + X_{n-1} + X_n)^2,
 \end{aligned} \right\} \Delta^2 \phi_n = \pi/2$$

$$\left. \begin{aligned}
 V_9 &= (X_{n-2} + X_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n)^2, \\
 V_{10} &= (X_{n-2} + Y_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} - X_{n-1} - Y_n)^2, \\
 V_{11} &= (X_{n-2} - X_{n-1} - X_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} + Y_n)^2, \\
 V_{12} &= (X_{n-2} - Y_{n-1} + X_n)^2 + (Y_{n-2} + X_{n-1} - Y_n)^2,
 \end{aligned} \right\} \Delta^2 \phi_n = \pi$$

$$\left. \begin{aligned} V_{13} &= (X_{n-2} + X_{n-1} - Y_n)^2 + (Y_{n-2} + Y_{n-1} + X_n)^2, \\ V_{14} &= (X_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n)^2 + (Y_{n-2} - X_{n-1} - X_n)^2, \\ V_{15} &= (X_{n-2} - X_{n-1} - Y_n)^2 + (Y_{n-2} - Y_{n-1} + X_n)^2, \\ V_{16} &= (X_{n-2} - Y_{n-1} + Y_n)^2 + (Y_{n-2} + X_{n-1} - X_n)^2 \end{aligned} \right\} \Delta^2 \varphi_n = 3\pi/2$$

У (6) проти четвірок V_j проставлені відповідні їм варіанти різниць фази. Якщо хоча б одна величина V_i з четвірки виявляється більше всіх інших 15 величин V_j , приймається рішення на користь відповідної різниці. При побудові аналогічного (6) алгоритму для системи з різницями фаз $\Delta\varphi_n = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ число порівнюваних у модуляторі величин значно збільшується.

Схема оптимального некогерентного модулятора сигналів із двократною ФРМ-2 при використанні різниць фази $0, \pi/2$ та $3\pi/2$ відрізняється від схеми, рис. 2., тим, що обчислювач і схема порівняння в даному випадку формують і порівнюють 16 величин (6) і визначають одну з чотирьох переданих різниць фази. Як видно з порівняння алгоритмів (4) і (6), перехід від однократної до двократної ФРМ-2 при оптимальній некогерентній обробці призводить до значного ускладнення демодулятора. Проте, при цифровій реалізації з використанням швидкодіючого процесора й оперативної пам'яті величини (6) можуть бути обчислені послідовно за час однієї n -ї послілки сигналу й ускладнення апаратури виявиться незначним.

Інтерес представляють субоптимальні алгоритми некогерентного прийому сигналів із ФРМ-2, деякі з яких мало поступаються оптимальним за завадостійкістю, але в реалізації значно простіші. Один з методів побудови субоптимальних некогерентних алгоритмів сигналів із ФРМ-2 будь-якої кратності заснований на тому, що множина рішень на виході оптимального некогерентного демодулятора сигналів із ФРМ-1 (тобто дозволена множина перших різниць фази створює алгебраїчне кільце порядку R , яке можна порівняти з ізоморфним кільцем цілих чисел від 0 до $R-1$). Отже, визначення переданого варіанту різниці фази можна здійснити шляхом обчислення різниці (по модулю R) двох R -них чисел, що послідовно з'являються на виході вказаного демодулятора ФРМ-1.

Відповідна схема демодулятора представлена на рис. 3 [4]. Вона включає оптимальний некогерентний демодулятор сигналів із ФРМ першого порядку, пам'ять на час однієї послілки і пристрій відліку по модулю R . Число R залежить від кратності модуляції N і мінімального значення допустимої різниці фази $\Delta^2\varphi_0$: якщо $\Delta^2\varphi_0 = 0$, то $R = 2^N$, якщо $\Delta^2\varphi_0 \neq 0$, то $R = 2\pi / \Delta^2\varphi_0$.

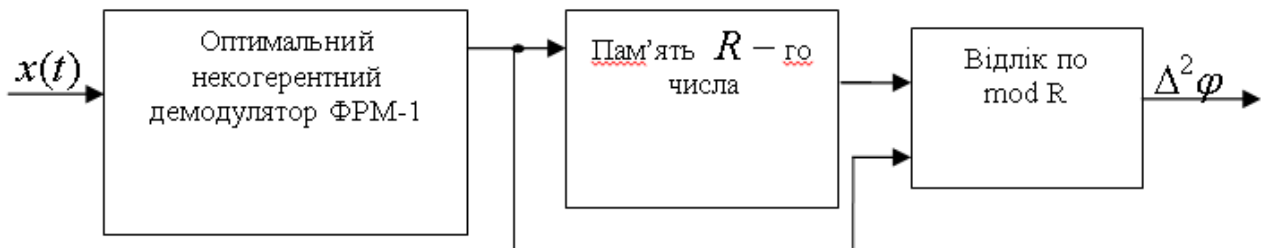


Рис. 3. Некогерентна обробка сигналів з ФРМ-2

Висновки

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 використаної літератури

1. Толубко В.Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5 G на базі фазорізничевої модуляції високих порядків / В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман, С.В. Козелков // Зв'язок - 2016.- №4 С.5-7.
2. Толубко В.Б. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж / В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман, Л.О. Орлов // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №4. – С. 3-8
3. Стеклов В.К. Проектування телекомунікаційних мереж: Підручник для вузів / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман – К.: Техніка, 2002. – 848 с.
4. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: Підручник для вузів / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, С.В. Кільчицький – К.: Техніка, 2004. – 576 с.

Автори статті

Толубко Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, ректор Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна.

Беркман Любов Наумівна – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

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

Хахлюк Олексій Анатолійович – здобувач, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Tolubko Volodymyr Borysovych – sciences doctor (technic), professor, rector of the State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Berkman Lyubov Naumivna - sciences doctor (technic), professor, vice-rector for scientific and pedagogical work, 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.

Khakhlyuk Olexsiy Anatoliyovych – applicant, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію 10.10.2017

Рецензент: д.т.н., проф. Вишнівський В.В.