

DOI: 10.18372/2225-5036.30.18602

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ ІЗ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ВИСОКОЇ КРАТНОСТІ

Лариса Дакова, Сергій Даков, Назарій Блаженний

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій



ДАКОВА Лариса Валеріївна, к.т.н, доцент.

Рік та місце народження: 1985 м. Сімферополь, Україна.

Освіта: Державний педагогічний університет 2009 р.

Посада: доцент кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Наукові інтереси: інформаційні технології, комп'ютерні системи і мережі, автоматизовані системи переробки інформації та управління.

Публікації: більше 20 наукових публікацій.

E-mail: dacova@ukr.net.

Orcid ID: 0000-0001-6104-8217.



ДАКОВ Сергій Юрійович, к.т.н.

Рік та місце народження: 1985 м. Бердянськ.

Освіта: Державний педагогічний університет 2010р.

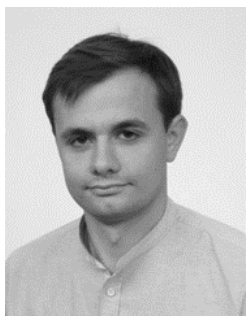
Посада: асистент кафедри асистент кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Наукові інтереси: інформаційні технології, комп'ютерні системи, безпека мереж.

Публікації: більше 20 наукових публікацій.

E-mail: dacov@ukr.net.

Orcid ID: 0000-0001-9413-3709.



БЛАЖЕННИЙ Назарій Валерійович, доцент.

Рік та місце народження: 1996 м. Лохвиця, Полтавська обл.

Освіта: Національний авіаційний університет 2019р., Київський національний економічний університет 2019 р.

Посада: доцент кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Наукові інтереси: радіотехніка, інформаційні технології.

Публікації: більше 20 наукових публікацій.

E-mail: blasennij@ukr.net.

Orcid ID: 0000-0002-3789-2837.

Анотація. Розглянуті некогерентні демодулятори сигналів, які інваріантні, тобто цілком нечутливі до початкової фази сигналу. Показано, що при абсолютній фазовій модуляції прийом сигналів можливий тільки при точно відомій початковій фазі, що надзвичайно обмежує сферу практичного використання абсолютної фазової модуляції. При фазорізницевої модуляції ФРМ-1 з'являється можливість прийому фазомодульованих сигналів з невизначеною початковою фазою. При ФРМ-2 до цього додається можливість прийому фазомодульованих сигналів з невизначеною частотою несучого коливання. Зазначено, що сигнали з ФРМ-2 так як і сигнали з ФРМ-1, можна приймати за допомогою алгоритмів когерентного, оптимального некогерентного й автокореляційного прийому. При когерентному і оптимальному некогерентному методах властивість інваріантності до частоти, не реалізується, оскільки ці методи прийому досягають своїх потенційних можливостей лише при точно відомій частоті несучого коливання, а при відхиленнях частоти сигналу від частоти опорних коливань демодуляторів швидко втрачають працездатність. При дослідженні сигналів з фазорізницевою модуляцією і методів прийому цих сигналів мова йде не про позиційність системи (не про кратність модуляції), обумовленої числом дискретних значень чи сигналу його інформаційного параметра в каналі зв'язку, а про порядок різниці фаз, які використовуються як інформаційний параметр. У статті вводиться поняття порядку різниці фази сигналу. Показано, що перехід до ФРМ-2 дозволяє досягти повної нечутливості не тільки до довільної початкової фази, але і до довільних зрушень частоти. Розглядаються принципи побудови багатопозиційних фазомодульованих сигналів і сигналів з комбінованими способами модуляції. Розроблено загальні алгоритми формування й обробки сигналів з фазорізницевою модуляцією з відповідними структурними схемами.

Ключові слова: зв'язок, багатопозиційні сигнали, фазомодульований сигнал, фазорізницева модуляція, частота несучого коливання, обробка сигналів.

Постановка проблеми

Фазорізницевою модуляцією першого порядку будемо вважати спосіб формування фазомодульованого сигналу, при якому інформація вкладається в значення різниць першого порядку початкової фази посилок. Інформаційним параметром сигналу при ФРМ-1 є різниця фаз [1], що визначається двома посилками сигналу.

Різниці фаз можна представити ще різницями фаз першого порядку (чи просто першими різницями фаз), тому що вони отримані з вихідної послідовності фаз шляхом однократної операції віднімання. Різниці фаз другого порядку (чи просто другими різницями фаз) отримують з вихідної послідовності фаз шляхом двократного застосування операції віднімання. Тому на перший план виступає проблема, розширення можливостей систем цифрового зв'язку з фазомодульованими сигналами. Зазначену проблему необхідно вирішувати на етапі проектування системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що параметр системи є інваріантом перетворень, які виникають під дією завад чи дестабілізуючими факторами [1, 2].

Різниця фази першого порядку є інваріантом перетворення, яке полягає в додаванні до інформаційних фаз посилок сигналу довільної загальної початкової фази [3].

Виходячи з припущення, що фазорізницева модуляція першого порядку інваріантна до початкової фази сигналу та властивість інваріантності фактично зберігається при всіх методах прийому відповідних сигналів [4].

Мета та постановка завдання

Метою статті є підвищення ефективності функціонування алгоритмів формування й обробки сигналів з фазорізницевою модуляцією.

Для досягнення мети необхідно вирішити завдання розробки відповідних структурних схем обробки сигналів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Представимо послідовність посилок, що передаються за допомогою гармонійного ФМ сигналу з початковими фазами:

$$\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n-1}, \phi, \phi_{n+1}, \dots \quad (1.1)$$

Складемо різниці фаз між кожною парою сусідніх посилок:

$$\begin{aligned} \Delta_1^1 \phi &= \phi_1 - \phi_0, \\ \Delta_2^1 \phi &= \phi_2 - \phi_1, \\ &\dots \dots \dots \quad (1.2) \\ \Delta_n^1 \phi &= \phi_n - \phi_{n-1}, \\ \Delta_{n+1}^1 \phi &= \phi_{n+1} - \phi_n, \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

Різниці фаз (1.2) називають ще різницями фаз першого порядку (чи просто першими різницями фаз), тому що вони отримані з вихідної послідовності фаз (1.1) шляхом однократної операції віднімання. Ця обставина підкреслюється верхнім індексом 1 при операторі обчислення різниці Δ . Таким чином, позначення $\Delta_n^1 \phi$ показує, що мова йде про розрахунок різниці фаз першого порядку між n- та (n - 1) посилками сигналу [2]. Послідовність різниць фаз першого порядку, так як і послідовність початкових фаз, розвертається в часі в міру передачі посилок сигналу:

Послідовність різниць фаз першого порядку, так як і послідовність початкових фаз, розвертається в часі в міру передачі посилок сигналу:

$$\Delta_0^1 \phi, \Delta_1^1 \phi, \Delta_2^1 \phi, \dots, \Delta_{n-1}^1 \phi, \Delta_n^1 \phi, \Delta_{n+1}^1 \phi, \dots \quad (1.3)$$

З цієї послідовності чисел можна скласти нові різниці за тим же правилом, за яким з (1.1) складались (1.2):

$$\begin{aligned} \Delta_1^2 \phi &= \Delta_1^1 \phi - \Delta_0^1 \phi, \\ \Delta_2^2 \phi &= \Delta_2^1 \phi - \Delta_1^1 \phi, \\ &\dots \dots \dots \quad (1.4) \\ \Delta_n^2 \phi &= \Delta_n^1 \phi - \Delta_{n-1}^1 \phi, \\ \Delta_{n+1}^2 \phi &= \Delta_{n+1}^1 \phi - \Delta_n^1 \phi, \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

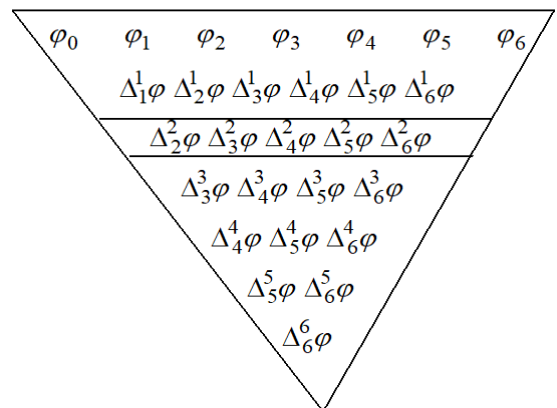
Різниці фаз (1.4) називають різницями другого порядку (чи просто другими різницями фаз), тому що вони отримані з вихідної послідовності фаз (1.1) шляхом двократного застосування операції віднімання [3, 4]. Ця обставина підкреслюється верхнім індексом 2 при операторі віднімання Δ . Різниці фази другого порядку утворюють часову послідовність, аналогічну послідовностям (1.1) і (1.3):

$$\Delta_0^2 \phi, \Delta_1^2 \phi, \Delta_2^2 \phi, \dots, \Delta_{n-1}^2 \phi, \Delta_n^2 \phi, \Delta_{n+1}^2 \phi, \dots \quad (1.5)$$

Можна й надалі продовжувати обчислення різниць фаз третього та більш високих порядків. Ілюструється процес формування різниць фази високого порядку (табл. 1.1). Кожен елемент цієї таблиці дорівнює різниці двох сусідніх елементів рядку, розміщеного вище [5].

Таблиця 1.1

Процес формування різниць фази високого порядку



Зосередимо однак увагу на використанні різниць фаз перших двох порядків.

Зараз можна визначити введenu раніше ФРМ наступним чином: фазорізницевою модуляцією першого порядку називається спосіб формування фазомодульованого сигналу, при якому інформація вкладається в значення різниць першого порядку початкової фази посилок.

Інформаційним параметром сигналу при ФРМ-1 є різниця фаз, що визначається двома послітками сигналу:

$$\Delta_n^1 \phi = \phi_n - \phi_{n-1}, \quad (1.6)$$

звідки випливає, що початкова фаза чергової п-посилки переданого в канал зв'язку сигналу:

$$\phi_n = \phi_{n-1} + \Delta_n^1 \phi. \quad (1.7)$$

Вирази (1.7) і (1.6) визначають загальний алгоритм формування й обробки фазомодульованого сигналу при ФРМ-1, який ілюструється схемою (рис. 1.1, а). На передаючій стороні системи цифрової передачі дискретному інформаційному символу J_n ставиться у відповідність одне з припустимих значень різниці фаз першого порядку $\Delta_n^1 \phi$, потім за допомогою елемента затримки на послітку та суматора відповідно до (1.7) формується початкова фаза наступної n-ї послітки сигналу, який передається [5]. На прийомній стороні після вимірювання початкових фаз двох сусідніх посліток сигналу за допомогою елемента затримки та пристрою віднімання обчислюється інформаційна різниця фаз $\Delta_n^1 \phi$, яка ототожнюється з переданим дискретним символом.

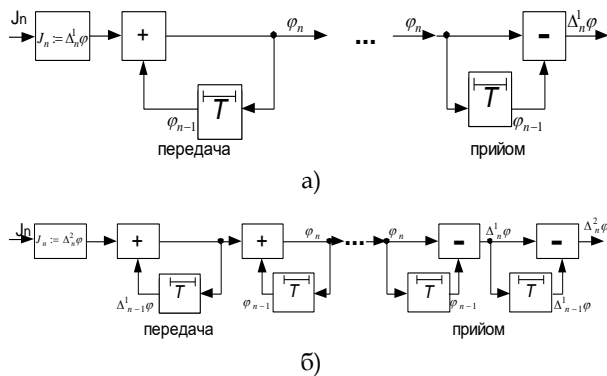


Рис.1.1,а,б. Принципи формування і обробки фазомодульованих сигналів: а) ФРМ-1; б) ФРМ-2

Визначимо фазорізницеву модуляцію другого порядку (ФРМ-2) як спосіб формування ФМ сигналу, при якому інформація вкладається в значення різниць другого порядку початкової фази посліток сигналу [6]. Інформаційним параметром сигналу при ФРМ-2 є різниця між різницями фаз, що визначається трьома послітками:

$$\begin{aligned} \Delta_n^2 \phi &= \Delta_n^1 \phi - \Delta_{n-1}^1 \phi = (\phi_n - \phi_{n-1}) - \\ &- (\phi_{n-1} - \phi_{n-2}) = \phi_n - 2\phi_{n-1} + \phi_{n-2}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

З (1.8) випливає, що початкова фаза наступної n-ї послітки переданого в канал зв'язку сигналу:

$$\phi_n = \Delta_n^2 \phi + 2\phi_{n-1} - \phi_{n-2}. \quad (1.9)$$

Її також можна представити аналогічно (1.7) у вигляді двох рекурентних співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \phi_n &= \phi_{n-1} + \Delta_n^1 \phi; \\ \Delta_n^1 \phi &= \Delta_{n-1}^1 \phi + \Delta_n^2 \phi \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Формувач початкових фаз посліток сигналу при ФРМ-2, який працює за алгоритмом (1.10), складається з двох послідовно підключених формувачів фази при ФРМ-1, а пристрій обробки – з двох послі-

довно підключених обчислювачів різниць фази першого порядку (рис.1.1,б).

Звернемося до основної властивості ФРМ-1 і ФРМ-2 - властивості інваріантності. Зазвичай, цим терміном позначають нечутливість системи до тих чи інших зовнішніх дій або дестабілізуючих факторів. При цьому деяка характеристика чи параметр системи є інваріантом перетворень, які викликаються дією завад чи дестабілізуючими факторами [4, 7].

За допомогою ФРМ-1, як уже відзначалося, вдається усунути неоднозначність рішення на виході демодулятора, викликану невизначеністю початкової фази прийнятого сигналу. Це пояснюється тим, що різниця фази першого порядку є інваріантом перетворення, яке полягає в додаванні до інформаційних фаз посліток сигналу довільної загальної початкової фази [8]. Дійсно, якщо до інформаційних фаз (n-1)-ї та n-ї посліток сигналу ϕ_{n-1} і ϕ_n додалася довільна і невідома в місці прийому початкова фаза ϕ_0 , то різниця фаз (n-1)-ї та n-ї посліток ніяк не зміниться від такого перетворення:

$$\begin{aligned} \Delta_n \phi &= (\phi_n + \phi_0) - (\phi_{n-1} + \phi_0) = \\ &= \phi_n - \phi_{n-1} = in \text{ var } \phi_0. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Таким чином, фазорізницева модуляція першого порядку інваріантна до початкової фази сигналу. Важлива позитивна сторона ФРМ-1 полягає ще й в тому, що зазначена властивість інваріантності фактично зберігається при всіх методах прийому відповідних сигналів [9]. При оптимальному некогерентному й автокореляційному прийомі не потрібно ніякої інформації про початкову фазу, а при когерентному прийомі початкова фаза повинна бути відома з точністю до фіксованих зсувів, які залежать від кратності модуляції, наприклад з точністю до 180° при однократній ФРМ-1, що цілком можливо здійснити. Можна сказати, що розглянуті некогерентні демодулятори сигналів з ФРМ-1 абсолютно інваріантні, тобто цілком нечутливі до початкової фази сигналу.

Перехід до ФРМ-2 дозволяє досягнути повної нечутливості не тільки до довільної початкової фази, але й до довільних зсувів частоти. Це пояснюється тим, що різниця фази другого порядку є інваріантом перетворення, яке полягає в довільному зсуві частоти несучого коливання. Дійсно, припустимо, що номінальна частота несучого коливання $\omega = m2\pi/T$, де m – ціле число, змінилася на довільну величину $\Delta\omega$. Тоді якщо фаза (n-1)-ї послітки дорівнює $(\phi_{n-1} + \phi_0)$, то фаза n-ї послітки стане рівною $(\phi_{n-1} + \phi_0 + \Delta\omega T)$, а фаза (n+1)-ї послітки $(\phi_{n-1} + \phi_0 + 2\Delta\omega T)$. Неважко тепер побачити, що різниці фази першого порядку:

$$\Delta_{n+1}^1 \phi = \phi_{n+1} - \phi_n + \Delta\omega T;$$

$$\Delta_n^1 \phi = \phi_n - \phi_{n-1} + \Delta\omega T,$$

не залежать від початкової фази ϕ_0 , однак залежать від зсуву частоти $\Delta\omega$, у той час як різниця фази другого порядку не залежить ні від ϕ_0 , ні від $\Delta\omega$:

$$\begin{aligned} \Delta_{n+1}^2 \phi &= \Delta_{n+1}^1 \phi - \Delta_n^1 \phi = \phi_{n+1} - \\ &- 2\phi_n + \phi_{n-1} = in \text{ var } (\phi_0, \Delta\omega). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Сигнали з ФРМ-2 так як і сигнали з ФРМ-1, можна приймати за допомогою алгоритмів когерентного, оптимального некогерентного й автокореля-

ційного прийому. При перших двох методах властивість інваріантності до частоти, природно, не реалізується, оскільки когерентний і оптимальний некогерентний методи прийому досягають своїх потенційних можливостей лише при точно відомій частоті несучого коливання, а при відхиленнях частоти сигналу від частоти опорних коливань демодуляторів швидко втрачають працездатність [10]. Важливою перевагою ФРМ-2 є те, що при відомій частоті сигналу вона володіє такою ж завадостійкістю, як ФРМ-1 при когерентному прийомі, і більш високою завадостійкістю, ніж ФРМ-1 при оптимальному некогерентному прийомі.

Властивість абсолютної інваріантності до частоти несучого коливання досягається при автокореляційному прийомі сигналів із ФРМ-2. У найпростішому випадку однократної ФРМ-2 із другими різницями фази $\Delta 2\phi_1=0, \Delta 2\phi_2=\pi$ алгоритм роботи відповідного демодулятора можна одержати, представивши косинус другої різниці фази прийнятого сигналу через скалярні добутки сусідніх посилок аналогічно тому, як це було зроблено в попередньому параграфі для ФРМ-1. Очевидно, що в даному випадку переданий інформаційний символ J_n визначається знаком косинуса другої різниці фаз $\Delta_n^2 \phi_\xi$ на n -й посліди:

$$j_n = \text{sgn} \cos \Delta_n^2 \phi_\xi = \text{sgn}(\cos \Delta_n^1 \phi_\xi \cos \Delta_{n-1}^1 \phi_\xi + \sin \Delta_n^1 \phi_\xi \sin \Delta_{n-1}^1 \phi_\xi). \quad (1.13)$$

Вхідні в (1.13) косинуси і синуси перших різниць фази надаються формулами векторної алгебри аналогічно (1.14) у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \cos \Delta_n^1 \phi_\xi &= \frac{(X_n X_{n-1})}{|X_n| |X_{n-1}|}, \\ \sin \Delta_n^1 \phi_\xi &= \frac{(X_n X_{n-1}^*)}{|X_n| |X_{n-1}|}; \\ (X_n X_{n-1}) &= \int_0^T x_n(t) x_{n-1}(t); \\ (X_n X_{n-1}^*) &= \int_0^T x_n(t) x_{n-1}^*(t), \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

де $x_n(t)$ та $x_{n-1}(t)$ - n -а і $(n-1)$ -а посліди сигналу на вході демодулятора. Підставивши (1.14) у (1.13), одержимо шуканий алгоритм автокореляційної обробки сигналів з однократною ФРМ-2, котрий, як неважко перевірити, абсолютно інваріантний до частоти несучого коливання [11]. На рис.1.2 відповідний демодулятор представлений у складі найпростішої системи цифрової передачі з ФРМ-2. У цій системі є також модулятор сигналів ФРМ-2, який складається, як і модулятор сигналів ФРМ-1, з генератора несучого коливання, перемножувача та перекодовуючого пристрою. Останній містить елемент затримки двійкового символу на дві посліди і перемножувач двійкових символів ± 1 . Алгоритм роботи даного перекодовуючого пристрою, неважко отримати із співвідношення (1.9). Оскільки при однократній ФРМ-2 всі вхідні в це співвідношення фази рівні або 0, або π , операції їхнього додавання можна замінити додаванням по модулю двох чисел 0 і 1 або перемноженням чисел

1 і -1. В останньому випадку алгоритм перекодування переданих двійкових символів J_n приймає вигляд рекурентного співвідношення:

$$J'_n = J_n J'_{n-2}. \quad (1.15)$$

Приведений алгоритм (1.15), реалізований у схемі (рис. 1.2).

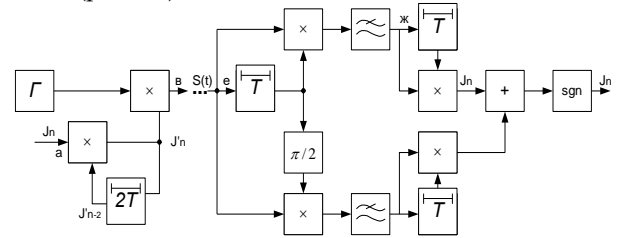


Рис.1.2. Модем системи з однократною ФРМ-2, забезпечуючий інваріантність до частоти несучого коливання

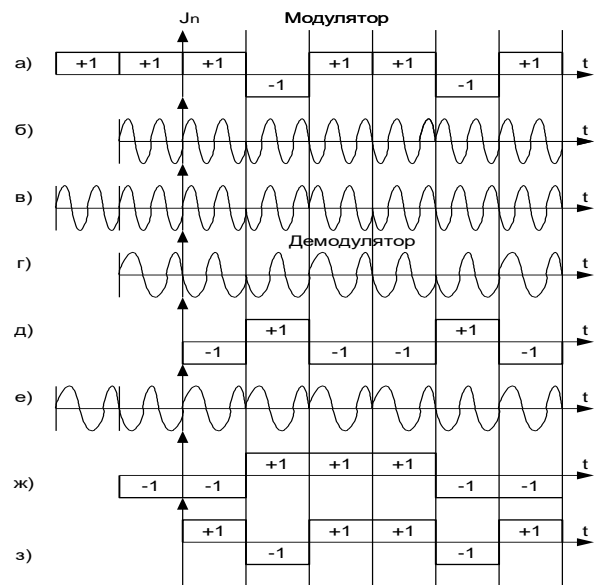


Рис.1.3. Часові діаграми сигналів при ФРМ-1 та ФРМ-2

Припустимо, що в каналі частота несучого коливання змінилася таким чином, що в послідці укладається не ціле число періодів несучого коливання, як було на виході модулятора, а непарне число напівперіодів. Тоді сигнали з ФРМ-1 і ФРМ-2 на вході відповідних демодуляторів будуть мати показаний вигляд (рис.1.3, г) і е відповідно.

На рис.1.3, д приведений вихідний сигнал автокореляційного демодулятора сигналів із ФРМ-1. Виходячи з порівняння діаграм рис.1.3,д і а, при даній зміні частоти несучого коливання автокореляційний демодулятор сигналів із ФРМ-1 видає двійкові символи, протилежні переданим, тобто поводить себе як і когерентний демодулятор сигналів з абсолютною ФМ при невідповідності фаз прийнятого сигналу й опорного коливання [6].

Висновки. Таким чином у статті показано, що фазорізницева модуляція другого порядку інваріантна до частоти несучого коливання. Ця унікальна властивість ФРМ-2 значно розширює можливості систем цифрового зв'язку з фазомодульованими сигналами. При абсолютній ФМ прийом сигналів можливий тільки при точно відомій початковій фазі, що надзвичайно обмежує сферу практичного використання аб-

солотної фазової модуляції. При ФРМ-1 з'являється можливість прийому фазомодульованих сигналів з невизначеною початковою фазою. При ФРМ-2 до цього додається можливість прийому фазомодульованих сигналів з невизначеною частотою несучого коливання.

Список літератури

[1]. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. П. Крючкова, А. Ю. Ткачов. Підвищення показників якості системи управління послугами мережами майбутнього / Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2018. № 3. С. 5-11.

[2]. В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізницевої модуляції високого порядку / Зв'язок. 2016. № 4. С. 5-7.

[3]. В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. О. Орлов. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж / Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2014. № 4. С. 3-8.

[4]. Паршуткин А. В., Маслаков П. А. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех. / Труды СПИИРАН. 2017. 4(53). С. 159-177.

[5]. Туровський О. Л., Кирпач Л. А. Вплив фазової нестабільності генераторів на параметри роботи системи синхронізації несучої частоти на фоні адитивного гауссівського шуму та доплерівського зміщення частоти / Зб. наук. праць ВІКНУ. 2020. №67. С. 62-71.

тивного гауссівського шуму та доплерівського зміщення частоти / Зб. наук. праць ВІКНУ. 2020. №67. С. 62-71.

[6]. Кучер Д. Б., Макогон В.П. Синхронізація в системах с прямим расширением спектра / Инженерный вестник Дона. 2019. №9. С. 31-35.

[7]. Туровський О. Л., Беркман Л. Н., Захаржевський А. Г. Інваріантний підхід до зменшення сталих динамічних похибок фазових систем синхронізації в режимі відслідкування несучої частоти / Зв'язок. 2020. No1(143), С. 44-50.

[8]. Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error / O. Turovsky, L. Berkman, O. Tkachenko [etal.] / Journal of Enterprise Technologies, 2021. 1(9 (109). pp. 66-76. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225514>.

[9]. N. V. Huynh, D. T. Hoang, X. Lu, D. Niyato, P. Wang, and D. I. Kim, "Ambient Backscatter Communications: A Contemporary Survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 20, no. 4, pp. 2889- 2922, 4th Quart., 2018.

[10]. Q. Mao, F. Hu, and Q. Hao, "Deep learning for intelligent wireless networks: a comprehensive survey," IEEE Commun. Survey Tuts., vol. 20, no. 4, pp. 2595-2621, 4th Quart., 2018.

[11]. X. Zhou, M. Sun, G. Y. Li, and B.-H. F. Juang, "Intelligent wireless communications enabled by cognitive radio and machine learning," China Commun., vol. 15, no. 12, pp. 16-48, Dec. 2018.

УДК 621.391

Dakova L., Dakov S., Blazhennyi N. Development of algorithms for optimal reception of signals with high multiple phase distribution modulation

Abstract. The Considered incoherent demodulators of signals, which are invariant, that is, completely insensitive to the initial phase of the signal. It is shown that with absolute phase modulation, signal reception is possible only with a precisely known initial phase, which extremely limits the scope of practical use of absolute phase modulation. With phase-difference modulation of PDM-1, it becomes possible to receive phase-modulated signals with an undefined initial phase. With PDM-2, the possibility of receiving phase-modulated signals with an undefined carrier oscillation frequency is added to this. It is noted that signals from PDM-2, as well as signals from PDM-1, can be received using algorithms of coherent, optimal incoherent and autocorrelation reception. In the case of coherent and optimal incoherent methods, the property of invariance to frequency is not realized, since these reception methods reach their potential only with a precisely known frequency of the carrier oscillation, and when the frequency of the signal deviates from the frequency of the reference oscillations, the demodulators quickly lose their performance. When studying signals with phase-difference modulation and methods of receiving these signals, we are not talking about the positionality of the system (not about the multiplicity of modulation), determined by the number of discrete values or the signal of its information parameter in the communication channel, but about the order of phase differences, which are used as an information parameter. The article introduces the concept of the order of signal phase difference. It is shown that the transition to PDM-2 makes it possible to achieve complete insensitivity not only to an arbitrary initial phase, but also to arbitrary frequency shifts. The principles of construction of multi-position phase-modulated signals and signals with combined modulation methods are considered. General algorithms for the formation and processing of signals with phase-difference modulation with corresponding structural schemes have been developed.

Keywords: communication, multi-position signals, phase-modulated signal, phase-difference modulation, carrier frequency, signal processing.

Дакова Лариса Валеріївна, доцент кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Larisa Dakova, associate professor of the Department of Mobile and Video Information Technologies of the State University of Information and Communication Technologies.

Даков Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, асистент кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Serhii Dakov, candidate of technical sciences, assistant department cybersecurity and protection information Taras Shevchenko National University of Kyiv

Блаженний Назарій Валерійович, доктор філософії, доцент кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Nazarii Blazhennyi, PhD, Associate Professor, Department of Mobile and Video Information Technologies State University information and communication technologies.