

ВПРОВАДЖЕННЯ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВИСОКИХ ПОРЯДКІВ В МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ LTE

Pankratova O. S. Implementation of phase-difference high-order modulation in the mobile network. Prospects of LTE technology development and features of telecommunication networks of the next generation NGN, that ensure providing unlimited range of infocommunication services with flexible management are considered. The most effective types and properties of signal modulation for LTE systems are analyzed. It is proved that phase-difference modulation of first order (PDM-1) is invariant with respect to initial phase signal. An important positive side of PDM-1 is in the fact that the noted property of invariance remains with all the methods of receiving relevant signals. Transition to phase-difference modulation of second order (PDM-2) allows to achieve complete insensitivity not only to the arbitrary initial phase, but also to random shifts of frequency. It is shown that PDM-2 is invariant to frequency of the carrier wave. This unique property of PDM-2 significantly expands the possibilities of digital communication with phase modulation signals.

Keywords: mobile telephony, phase-difference modulation, telecommunications service, modulation invariance, NGN, LTE, control system

Панкратова О. С. Впровадження фазорізницевої модуляції високих порядків в мережі мобільного зв'язку LTE. Розглянуто перспективи розвитку технології LTE та особливості побудови телекомунікаційних мереж зв'язку наступного покоління NGN, в яких забезпечується надання необмеженого спектру інфокомунікаційних послуг з гнучким управлінням. Проаналізовано найбільш ефективні види та властивості модуляції сигналу для систем LTE. Визначені властивості інваріантності фазорізницевої модуляції першого та другого порядків до параметрів сигналів несучої частоти.

Ключові слова: мобільний зв'язок, фазорізницева модуляція, послуги телекомунікацій, інваріантність модуляції, NGN, LTE, система управління

Панкратова О. С. Внедрение фазоразностной модуляции высоких порядков в сети мобильной связи LTE. Рассмотрены перспективы развития технологии LTE и особенности построения телекоммуникационных сетей связи следующего поколения NGN, в которых обеспечивается предоставление неограниченного спектра инфокоммуникационных услуг с гибким управлением. Проанализированы наиболее эффективные виды и свойства модуляции сигнала для систем LTE. Определены свойства инвариантности фазоразностной модуляции первого и второго порядков к параметрам сигналов несущей частоты.

Ключевые слова: мобильная связь, фазоразностная модуляция, услуги телекоммуникаций, инвариантность модуляции, NGN, LTE, система управления

Вступ. Побудова інформаційного суспільства характеризується стрімким підвищенням ролі інформаційно-комунікаційних послуг у сфері діяльності людини, суспільства й держави. Розширення спектру нових послуг потребує впровадження сучасних технологічних рішень і нового обладнання, що приводить до росту й ускладнення мережної інфраструктури.

Динамічне розширення мереж та відповідної номенклатури послуг, що надаються ними, у операторів виникає гостра необхідність оптимізувати витрати на управління та адміністрування мереж. Одним з ефективних шляхів, що дозволяють значно зменшити експлуатаційні витрати, а також забезпечити безвідмовність обладнання, є застосування автоматизованих мережних систем управління (СУ) [1, 2].

Рівень існуючої СУ не відповідає повною мірою сучасним вимогам до них, не дає змоги отримувати інформацію потрібної якості для оперативного прийняття обґрунтованих рішень щодо управління об'єктами, обміну інформацією між суб'єктами СУ, а також не дає можливості оперативно управляти ситуаціями на мережах в автоматизованому режимі.

Доступ до інформаційних ресурсів Глобальної інформаційної інфраструктури (ГІІ) реалізується за допомогою послуг телекомунікацій нового типу – інфокомунікаційних послуг.

Розглянемо розвиток і подальші шляхи розвитку технології LTE (Long-Term Evolution – довгостроковий розвиток) та побудову телекомунікаційних мереж зв'язку наступного покоління NGN, в котрих закладена ідея створення універсальної мережі зв'язку, яка б дозволяла переносити будь-які види інформації, такі як: мова, відео, аудіо, графіка й т.д., а також забезпечує можливість надання необмеженого спектру інфокомунікаційних послуг з гнучким управлінням, персоналізацій та створенням нових послуг. NGN припускає реалізацію універсальної транспортної мережі з розподіленою комутацією, винесення функцій надання послуг у кінцеві мережні вузли та інтеграцію з традиційними мережами телекомунікацій. Визначимо пріоритетне використання NGN, котра за рахунок гнучкості і масштабованості дозволяє легко адаптуватися до новітніх технологій, що надзвичайно актуально для мереж зв'язку України.

Розвиток технології LTE. Безпроводові цифрові комунікації, бурхливо стартувавши, продовжують розвиватися надзвичайно швидко. Цьому сприяє неухильний прогрес в мікроелектроніці, що дозволяє випускати усе більш складні і при цьому, – усе більш дешевші – засоби безпроводового зв'язку. Бум стільникового зв'язку, порівнянний лише із зростанням виробництва персональних комп'ютерів і розвитком Інтернету, не сповільнюється вже більш як чверть століття. Мобільних телефонів у всьому світі вже значно більше, ніж звичайних проводових телефонних апаратів. Швидкими темпами розвиваються персональні і локальні мережі, широко упроваджуються безпроводові мережі регіонального масштабу. Низька вартість, прудкість розгортання, широкі функціональні можливості по передачі даних, телефонії, відео потоків роблять безпроводові мережі одним з основних напрямків розвитку телекомунікаційної індустрії.

Розвиток безпроводового зв'язку супроводжується постійною безперервною зміною технологій, в основі яких лежать стандарти стільникового зв'язку GSM і CDMA, а також стандарти систем передачі даних IEEE 802 (Рис. 1).

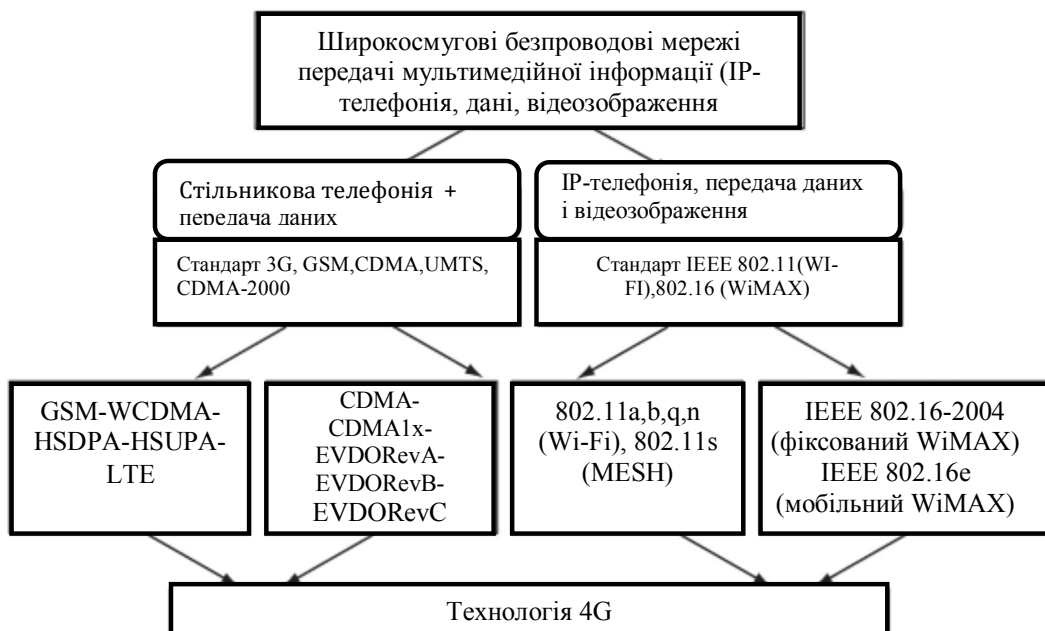


Рис. 1. Основних напрямів розвитку технології широкопasmового зв'язку

Історично технології безпроводового зв'язку розвивалися по двох незалежних напрямках – системи телефонного зв'язку (стільниковий зв'язок) і системи передачі даних (Wi-Fi, WiMAX). Але останнім часом спостерігається явна тенденція до злиття цих функцій. Більш того, об'єм пакетних даних в мережах стільникової зв'язку третього покоління (3G) вже перевищує об'єм голосового трафіку, що пов'язане з впровадженням технологій HSPA. У свою чергу, сучасні мережі передачі інформації обов'язково забезпечують заданий рівень якості послуг (QOS) для різних видів трафіку. Реалізується підтримка пріоритезації окремих

потоків інформації, причому як на мереженому /транспортному рівнях (на рівні TCP/IP), так і на MAC- рівні (стандарти IEEE 802.16). Це дозволяє використовувати їх для надання послуг голосовому зв'язку, передачі мультимедійної інформації і тому подібне

Технологія фіксованого WIMAX (IEEE 802.16-2004) не виправдала надій, що покладалися на неї, по швидкодії, об'єму зони покриття і ціновим характеристикам. Але оператори справедливо чекають якісного прориву від мобільного WIMAX (IEEE 802.16e).

Проте вимоги кінцевих користувачів до послуг що надаються постійно підвищуються (Рис. 1).

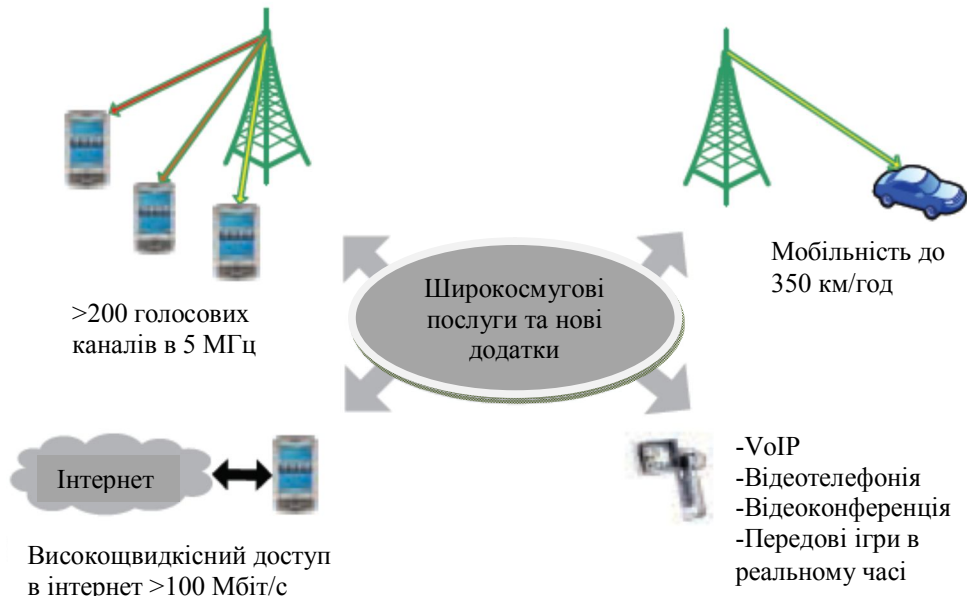


Рис. 2. Широкопasmові послуги і нові застосування, стимулюючі еволюцію систем 3G

Мобільні мережі повинні використовуватися не лише для стільникового зв'язку, але і для передачі відео, мобільного ТБ, музики і роботи з Інтернетом з високими швидкостями і якістю передачі. Саме з цією метою в рамках проекту співпраці в створенні мереж третього покоління 3GPP (3G Partnership Project) була почата розробка технології LTE.

Розробка технології LTE як стандарту офіційно почалося в кінці 2004 року. Основною метою досліджень на початковому етапі був вибір технології фізичного рівня, яка змогла б забезпечити високу швидкість передачі даних. Як основні були запропоновані два варіанти: розвиток існуючого радіо інтерфейсу W-CDMA (використовується в HSPA) і створення нового на основі технології OFDM. В результаті проведених досліджень єдиною відповідною технологією виявилася OFDM, і в травні 2006 року в 3GPP була створена перша специфікація на радіо інтерфейс Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Перші, попередні специфікації LTE створювалися в рамках так званого 3GPP Release 7. А в грудні 2008 року затверджена версія стандартів 3GPP (Release 8), фіксуючі архітектурні і функціональні вимоги до систем LTE. У середині 2009 вийшли у світ перші дослідні системи на основі LTE, а в 2010 уже появились перші комерційні мережі.

В порівнянні з раніше розробленими системами 3G, радіо інтерфейс LTE забезпечує покращені технічні характеристики. Зокрема, в LTE ширина смуги пропускання може варіюватися від 1,4 до 20 МГц (за ранішими джерелами – від 1,25 МГц), що дозволяє задовольнити потреби різних операторів зв'язку, що володіють різними смугами пропускання. При цьому устаткування LTE повинне одночасно підтримувати не менше 200 активних з'єднань (тобто 200 телефонних дзвінків) на кожному 5-мгц соту. LTE дозволяє досягти значних агрегатних швидкостей передачі даних – до 50 Мбіт/с для висхідного з'єднання (від абонента до базової станції) і до 100 Мбіт/с для низхідного з'єднання (від базової станції до абонента) (у смузі 20 МГц). При цьому повинна забезпечуватися підтримка з'єднань для абонентів, рухомих з швидкістю до 350 км/ч. Зона покриття однієї базової

станції – до 30 км в штатному режимі, але можлива робота з сотою радіусом більше 100 км. Підтримуються багатоантенні системи MIMO.

Радіоінтерфейс LTE позиціонується як рішення, на яке оператори поступово переходитимуть з нинішніх систем стандартів 3GPP і 3GPP2 [3-6], а його розробка являється важливим етапом в процесі переходу до мереж четвертого покоління 4G. Фактично специфікація LTE вже містить більшу частину функцій, що спочатку призначалися для систем 4G, тому її інколи іменують "технологією 3,9G". Продовженням розвитку технології LTE стали специфікації наступного покоління, так звані LTE-Advanced.

Фазорізницева модуляція. Проаналізуємо найбільш ефективні види модуляції сигналу для систем LTE.

Поняття порядку різниць фази сигналу вводиться наступним чином. Нехай ми маємо послідовність посилок, що передаються за допомогою гармонійного ФМ сигналу з початковими фазами:

$$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1}, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots \quad (1)$$

Складемо різниці фаз між кожною парою сусідніх посилок:

$$\begin{aligned} \Delta_1^1 \varphi &= \varphi_1 - \varphi_0, \\ \Delta_2^1 \varphi &= \varphi_2 - \varphi_1, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta_n^1 \varphi &= \varphi_n - \varphi_{n-1}, \\ \Delta_{n+1}^1 \varphi &= \varphi_{n+1} - \varphi_n, \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Різниці фаз (2) називають ще різницями фаз першого порядку (чи просто першими різницями фаз), тому що вони отримані з вихідної послідовності фаз (1) шляхом однократної операції віднімання. Ця обставина підкреслюється верхнім індексом 1 при операторі обчислення різниці Δ . Таким чином, позначення $\Delta_n^1 \varphi$ показує, що мова йде про розрахунок різниці фаз першого порядку між n -ю та $(n-1)$ -ю посилками сигналу.

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

$$\Delta_0^1 \varphi, \Delta_1^1 \varphi, \Delta_2^1 \varphi, \dots, \Delta_{n-1}^1 \varphi, \Delta_n^1 \varphi, \Delta_{n+1}^1 \varphi, \dots \quad (3)$$

З цієї послідовності чисел можна скласти нові різниці за тим же правилом, за яким з (1) склались (2):

$$\begin{aligned} \Delta_1^2 \varphi &= \Delta_1^1 \varphi - \Delta_0^1 \varphi, \\ \Delta_2^2 \varphi &= \Delta_2^1 \varphi - \Delta_1^1 \varphi, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta_n^2 \varphi &= \Delta_n^1 \varphi - \Delta_{n-1}^1 \varphi, \\ \Delta_{n+1}^2 \varphi &= \Delta_{n+1}^1 \varphi - \Delta_n^1 \varphi, \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Різниці фаз (4) називають різницями другого порядку (чи просто другими різницями фаз), тому що вони отримані з вихідної послідовності фаз (1) шляхом двократної застосування операції віднімання. Ця обставина підкреслюється верхнім індексом 2 при операторі віднімання Δ . Різниці фази другого порядку утворюють часову послідовність, аналогічну послідовностям (1) і (3):

$$\Delta_0^2 \varphi, \Delta_1^2 \varphi, \Delta_2^2 \varphi, \dots, \Delta_{n-1}^2 \varphi, \Delta_n^2 \varphi, \Delta_{n+1}^2 \varphi, \dots \quad (5)$$

Можна й надалі продовжувати обчислення різниць фаз третього та більш високих порядків. Процес формування різниць фази високого порядку ілюструється в Табл. 1.

Табл. 1

φ_0	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6
$\Delta_1^1 \varphi \Delta_2^1 \varphi \Delta_3^1 \varphi \Delta_4^1 \varphi \Delta_5^1 \varphi \Delta_6^1 \varphi$						
$\Delta_2^2 \varphi \Delta_3^2 \varphi \Delta_4^2 \varphi \Delta_5^2 \varphi \Delta_6^2 \varphi$						
$\Delta_3^3 \varphi \Delta_4^3 \varphi \Delta_5^3 \varphi \Delta_6^3 \varphi$						
$\Delta_4^4 \varphi \Delta_5^4 \varphi \Delta_6^4 \varphi$						
$\Delta_5^5 \varphi \Delta_6^5 \varphi$						
$\Delta_6^6 \varphi$						

Кожен елемент цієї таблиці дорівнює різниці двох сусідніх елементів рядку, розміщеного вище.

Зосередимо однак увагу на використанні різниць фаз перших двох порядків.

Зараз можна визначити введену 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 послідовними сигналами:

$$\Delta_n^1 \varphi = \varphi_n - \varphi_{n-1}, \quad (6)$$

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

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \Delta_n^1 \varphi. \quad (7)$$

Вирази (6) і (7) визначають загальний алгоритм формування й обробки фазомодульованого сигналу при ФРМ-1, який ілюструється схемою, приведеною на Рис.3,а.

На передаючій стороні системи цифрової передачі дискретному інформаційному символу J_n ставиться у відповідність одне з припустимих значень різниці фаз першого порядку $\Delta_n^1 \varphi$, потім за допомогою елемента затримки на послітку та суматора відповідно до (7) формується початкова фаза наступної n -ї послілки сигналу, який передається. На прийомній стороні після вимірювання початкових фаз двох сусідніх посилок сигналу за допомогою елемента затримки та пристрою віднімання обчислюється інформаційна різниця фаз $\Delta_n^1 \varphi$, яка ототожнюється з переданим дискретним символом.

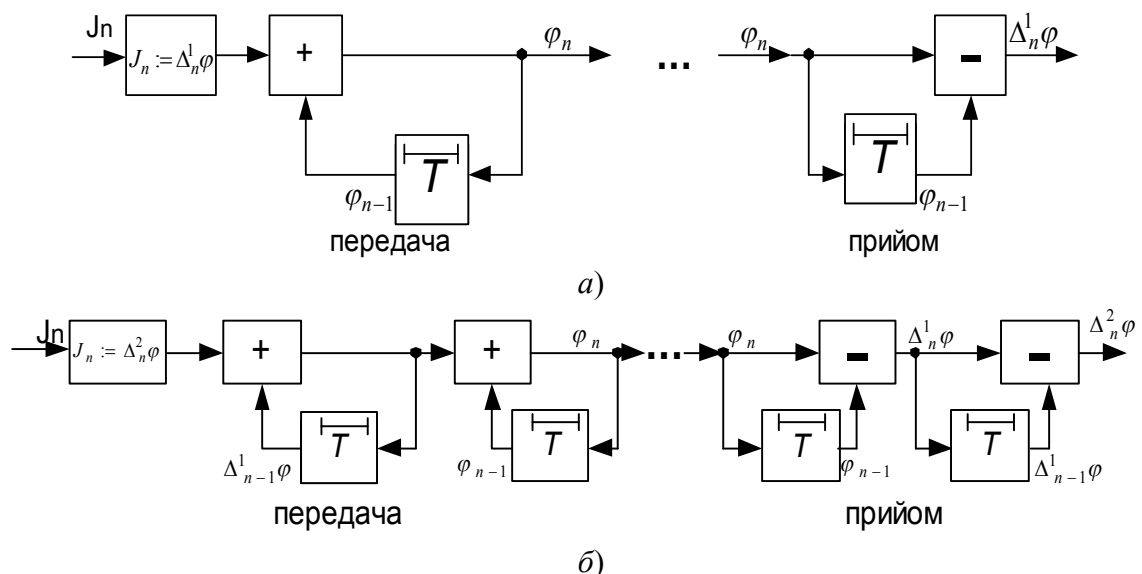


Рис. 3. Принципи формування і обробки фазомодульованих сигналів: а) ФРМ-1; б) ФРМ-2

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

$$\Delta_n^2 \varphi = \Delta_n^1 \varphi - \Delta_{n-1}^1 \varphi = (\varphi_n - \varphi_{n-1}) - (\varphi_{n-1} - \varphi_{n-2}) = \varphi_n - 2\varphi_{n-1} + \varphi_{n-2}. \quad (8)$$

З (8) випливає, що початкова фаза наступної n -ї послідовності переданого в канал сигналу

$$\varphi_n = \Delta_n^2 \varphi + 2\varphi_{n-1} - \varphi_{n-2}. \quad (9)$$

Її також можна представити аналогічно (7) у вигляді двох рекурентних співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_n &= \varphi_{n-1} + \Delta_n^1 \varphi; \\ \Delta_n^1 \varphi &= \Delta_{n-1}^1 \varphi + \Delta_n^2 \varphi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Формувач початкових фаз посилок сигналу при ФРМ-2, який працює за алгоритмом (10), складається з двох послідовно підключених формувачів фази при ФРМ-1, а пристрій обробки – з двох послідовно підключених обчислювачів різниць фази першого порядку (Рис. 3,б).

Звернемося до основної властивості ФРМ-1 і ФРМ-2 – властивості інваріантності. У техніці 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 завод чи дестабілізуючими факторами.

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 посилок сигналу довільної загальної початкової фази. Дійсно, якщо до інформаційних фаз $(n-1)$ -ї та n -ї посилок 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 посилок ніяк не зміниться від такого перетворення:

$$\Delta_n \varphi = (\varphi_n + \varphi_0) - (\varphi_{n-1} + \varphi_0) = \varphi_n - \varphi_{n-1} = \text{in var } \varphi_0.$$

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. 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 послідовності дорівнює $(\varphi_{n-1} + \varphi_0)$, то фаза n -ї послідовності стане рівною $(\varphi_{n-1} + \varphi_0 + \Delta\omega T)$, а фаза $(n+1)$ -ї послідовності $(\varphi_{n-1} + \varphi_0 + 2\Delta\omega T)$.

Неважко тепер побачити, що різниці фази першого порядку

$$\Delta_{n+1}^1 \varphi = \varphi_{n+1} - \varphi_n + \Delta\omega T; \quad \Delta_n^1 \varphi = \varphi_n - \varphi_{n-1} + \Delta\omega T$$

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 $\Delta\omega$:

$$\Delta_{n+1}^2 \varphi = \Delta_{n+1}^1 \varphi - \Delta_n^1 \varphi = \varphi_{n+1} - 2\varphi_n + \varphi_{n-1} = \text{in var}(\varphi_0, \Delta\omega).$$

Таким чином, 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 абсолютної 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.

Висновки. Розглянуто розвиток, і подальші шляхи розвитку технології LTE, та побудову телекомунікаційних мереж зв'язку наступного покоління NGN, в яких закладена ідея створення універсальної мережі зв'язку, яка б дозволяла переносити будь-які види інформації, а також забезпечувати можливість надання необмеженого спектру інфокомунікаційних послуг з гнучким управлінням. Проаналізовано найбільш ефективні види та їх властивості модуляції сигналу для систем LTE. Доведено що 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. Фазорізницева модуляція другого порядку інваріантна до частоти несучого коливання. Ця унікальна властивість ФРМ-2 значно розширює можливості систем цифрового зв'язку з фазомодульованими сигналами.

Література

1. Стеклов В.К., Кільчицький Є.В. Основи управління мережами та послугами телекомунікацій / В. К. Стеклов, Є. В. Кільчицький. – Київ : Техніка, 2002. – 438 с.
2. Лещенко О. О. Застосування методів оптимізації в системах управління сучасними телекомунікаційними мережами / О. О. Лещенко, Т. В. Майсак // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – №4(28). – С. 37-45.
3. Долговременное развитие радиотехнологии [Електронний ресурс] // – Режим доступу : 3GPP//www.3gpp.org/Highlights/LTE/LTE.htm.
4. Вишнеvский В. Технологии сотовой связи LTE – почти 4G / В. Вишнеvский, А. Красилов, И. Шахнович // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. – №1. – С. 62-72.
5. Вишнеvский В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В. Вишнеvский, А. Портной, И. Шахнович. – Москва : Техносфера, 2009. – С. 263-281.
6. Тихвинский В. О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук. – Москва : Эко – Трендз, 2010. – 284 с.

Автор статті

Панкратова Ольга Сергіївна – начальник навчальної лабораторії кафедри застосування космічних систем та геоінформаційного забезпечення, Національний університет оборони України імені Івана Черняховського. Тел.: +380 (68) 352 10 99. E-mail: olgapank@ukr.net

Author of the article

Pankratova Ol'ha Serhiyivna – a chief of educational laboratory, the application of the space systems and heoinformation providing department, Ivan Chernyakhovskyy National University of Defense of Ukraine. Tel.: +380 (68) 352 10 99. E-mail: olgapank@ukr.net

Дата надходження в редакцію: 30.01.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л. Н. Беркман