

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кравченко Владислав Ігорович

УДК 621.391

**МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЙОМУ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ
СИГНАЛІВ ТЕХНОЛОГІЇ LTE НА БАЗІ МОДУЛЯЦІЇ ВИСОКИХ
ПОРЯДКІВ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному університеті телекомунікацій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Степанов Михайло Миколайович,
Державний університет телекомунікацій,
професор кафедри комп'ютерної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Самков Олександр Всеволодович,
Інститут електродинаміки Національної академії наук України, заступник директора.

кандидат технічних наук, доцент,

Мешков Сергій Іванович,
перший заступник начальника (Воєнно-дипломатична академія імені Євгенія Березняка, Міністерство оборони України).

Захист відбудеться “27” квітня 2018 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.861.01 в Державному університеті телекомунікацій за адресою: 03680, м. Київ, вул. Солом’янська, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету телекомунікацій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом’янська, 7.

Автореферат розісланий “27” березня 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.861.01
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Є.В. Гаврилко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток мобільних технологій дозволяє обробляти все більші об'єми інформації тим самим відкриваючи для користувача мобільного пристрою (смартфона, планшета, нетбука) нові можливості навчання, ведення бізнесу або маніпуляції з різними видами мультимедійних даних.

Найближчим часом технічні вирішення, які забезпечать плавний перехід до мереж мобільного зв'язку 4-го та 5-го поколінь (4G та 5G), допоможуть операторам мобільного зв'язку задовольнити швидкозростаючий попит на мобільні сервіси.

Мобільний зв'язок 4G (Long-Term Evolution, (LTE) розвиває ідеї та технології, які вже застосовуються в стандартах 3G. Проте з розвитком цих технологій знайшла своє втілення і низка оригінальних ідей.

Головна відмінність технологій 4G від технологій попередніх поколінь полягає в тому, що швидкість передавання даних від базової станції перевищує 100 Мбіт/с. Приклад ефективного співіснування мереж 3G із мережами стільникового зв'язку 2G, що забезпечило створення інтегрованих мереж, дав поштовх до гармонійного співіснування систем LTE із системами обох попередніх поколінь. Так, багатомодові пристрої здатні працювати як у мережах LTE, так і в мережах 3G, або мати набір режимів залежно від кон'юнктури ринку. Завдяки стандарту LTE з'явилась нова технологічна платформа радіозв'язку, яка дозволяє операторам досягати вищої пікової пропускної здатності, використовуючи для цього набагато ширші смуги пропускання.

Головна мета LTE полягає в забезпеченні абонентів послугами радіодоступу надзвичайно високої продуктивності з одночасним гарантуванням повної мобільності абонента під час його пересування зі швидкістю автомобіля. Забезпечення можливості передачі даних за швидкостями більше ніж 1 Гбіт/с., з організацією завадозахищеності каналу зв'язку на базі технології OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Згідно з концепцією подальшого розвитку радіотехнологій незабаром оператори зможуть легко переводити свої мережі та своїх користувачів на стандарт LTE. По суті, стандарт LTE є черговим етапом еволюційного розвитку стільникової технології, що бере свій початок від GSM і має такі ключові пункти, як EDGE, UMTS і HSPA.

Рішенню завдання оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE присвячено багато робіт українських та закордонних вчених. Створення методів побудови сталих телекомунікаційних мереж пов'язано з роботами таких вчених, як Варакін Л.Є., Вітербі Е.Д., Лазарєв В.Г., Аріпов М.Н., Стеклов В.К., Беркман Л.Н., Нетес В.А., Якубайтіс Е.А., Козелков С.В., Фінк Л.М., Куо Ф.Ф., Бертсекас Д.В., Галлагер Р., Захаров Г.П., Батіщев Д.І., Поспелов Г.С., Шеннон К., Шнепс М.А., Блек Ю., Девід Е., Болгер Дж. та інші.

Зважаючи на вищенаведене, актуальним питанням є розробка методики оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE на базі модуляції високих порядків для вирішення тематичних завдань, що є

перспективним, важливим і економічно обґрунтованим напрямом розвитку науки і техніки на сучасному етапі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідної роботи (НДР), виконаної у Державному університеті телекомунікацій (ДУТ), а саме: “Розробка рекомендацій щодо побудови ефективного цифрового каналу зв'язку з використанням n-вимірних багатопозиційних групових OFDM-сигналів кубічно-амплітудно-фазової модуляції” (ДР №0118U003890).

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі ДУТ та прийняті до практичного використання у ТОВ «Інвестиційно-фінансова компанія «Символ».

Впровадження результатів підтверджуються відповідними актами, наведеними у додатку до дисертаційної роботи.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методики оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE на базі модуляції високих порядків, здатної суттєво покращити показники ефективності систем передачі інформації.

Відповідно до мети дослідження в дисертаційній роботі необхідно розв'язати та вирішити наступні завдання:

- Вдосконалити часову модель для розрахунку мобільності системи LTE, яка заснована на нечіткій логіці.
- Розробити методику підвищення показників надійності систем LTE.
- Розробити методику розрахунку параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю.
- Розробити методику оптимального прийому багатопозиційних сигналів гексагонального сузір'я на базі модуляції високих порядків за критерієм ідеального спостерігача.
- Оцінити ефективність системи для передачі інформації у великих об'ємах.
- Провести порівняльний аналіз підвищення показників надійності для дубльованої системи, нерезервованої системи, для навантаженого дублювання без відновлення, а також для ненавантаженого дублювання без відновлення.

Об'єкт дослідження – процес оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE.

Предмет дослідження – методика оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE на базі гексагональної амплітудно-фазової модуляції високих порядків.

Методи досліджень. В дисертаційній роботі використовувались методи математичного аналізу й синтезу складних технічних систем. А також було використано сучасні методи обробки сигналів, математичного й функціонального аналізу, формалізації та порівняння. Використовувались постулати теорії зв'язку, теорії ймовірностей і математичної статистики, методи аналізу ієрархій, методи комп'ютерного моделювання. Були використані відомі підходи і методи перевірки результатів дослідження для підтвердження основних теоретичних положень дослідження.

Науковим завданням дисертаційної роботи є розробка методики оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE на базі модуляції високих порядків.

Наукова новизна роботи. Основні результати, що мають наукову новизну та отримані у ході вирішення завдань, що поставлені у дисертаційному дослідженні, полягають у наступному:

- Вдосконалена модель розрахунку ймовірностно-часових характеристик мобільної системи стандарту LTE на нечіткій логіці, яка формалізує вплив дестабілізуючих факторів на її функціонування. Це дозволяє підвищити точність визначення ймовірнісно-часових характеристик.

- Розроблено алгоритм підвищення показників надійності систем мобільного зв'язку стандарту LTE, з використанням дубльованої системи.

- Вперше розроблено методику оптимального прийому багатопозиційних сигналів гексагонального сузір'я за критерієм ідеального спостерігача на базі модуляції високих порядків, що має найвищу завадостійкість сигналів за двома координатами (x, y) наближену до потенційно можливої.

- Розроблено методику розрахунку параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю на базі алгоритму визначення оптимальних значень сигналу OFDM.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що:

- теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи реалізовані в рамках виконання науково-дослідної роботи (НДР) “Розробка рекомендацій щодо побудови ефективного цифрового каналу зв'язку з використанням n -вимірних багатопозиційних групових OFDM-сигналів кубічно-амплітудно-фазової модуляції” (ДР № 0118U003890) і використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій. Впровадження результатів дослідження підтверджуються відповідними актами, наведеними в додатку до дисертаційної роботи.

- розроблено методику оптимального прийому багатопозиційних сигналів гексагонального сузір'я за критерієм ідеального спостерігача на базі модуляції високих порядків, що має найвищу завадостійкість сигналів за двома координатами (x, y) наближену до потенційно можливої. Методика дозволяє визначити, що використання HAP (Hexagonal amplitude phase modulation) в порівнянні з QAM (Quadrature Amplitude Modulation) дає вигоду більше 3 дБ, а в порівнянні з неоптимальними методами прийому більше ніж на 10 дБ.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною роботою здобувача. В дисертації узагальнено результати досліджень, виконаних автором самостійно, та у співавторстві. Особисто автором здійснена розробка загальної концепції дисертації та вибір об'єктів, визначено мету і задачі роботи, обрано та обґрунтовано методи досліджень. У наукових публікаціях у співавторстві автору належать: провідна роль у виборі та обґрунтуванні напрямку досліджень, постановка задачі на різних етапах виконання роботи, аналіз та інтерпретація одержаних результатів.

В роботах, що написані в співавторстві, особистий внесок здобувачу належить: [6] вдосконалений метод визначення оптимальних параметрів сигналів OFDMA в радіомережах FH-OFDMA; [5] розроблена модель розрахунку мобільності самоорганізуючої бездротової мережі; [13, 15] Розроблено Алгоритм роботи системи з активним резервуванням. [17, 18] Виконано розрахунок завадостійкості багатопозиційних сигнальних сузір'їв та доведено ефективність маніпуляційного кодування багатопозиційних сигналів.

Апробація результатів дисертації. Отримані результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних і науково-технічних конференціях. Основні положення і результати дисертації, практичні висновки і рекомендації, які одержані в ході роботи, апробовані та оприлюднені в ході: Міжнародної науково - технічної конференції «Сучасні інформаційно - телекомунікаційні технології» – 2015., та II Міжнародної науково - технічної конференції студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації» – 2016.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 25 наукових праць, з них 19 наукових статей у фахових виданнях з яких 14 входять до міжнародних наукометричних баз, 3 публікації у матеріалах доповідей науково-технічних конференцій та 3 патенти на корисну модель. В рамках досліджень опубліковано навчальний посібник.

Обсяг і структура дисертації. Зміст дисертації викладено на 144 сторінках, ілюстровано 31 рисунками та 11 таблицями. Матеріали дисертації складаються зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 121 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульована мета та задачі досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами та програмами, показана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, відзначений особистий внесок автора, наведені дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

У **першому розділі** на основі опрацьованих літературних джерел визначено основні тематичні завдання, що можуть покладатися на розробку підвищення якості функціонування систем зв'язку стандарту LTE.

Розділ присвячено вирішенню основних питань щодо розвитку систем доступу на базі технології LTE та наведені визначення і основні характеристики стандарту бездротового зв'язку. Сформульовані основні вимоги до стандарту мобільних мереж четвертого покоління (4G), які задовольняють вимоги стандарту LTE.

В результаті проведених досліджень єдиною відповідною технологією для задоволення потреб користувачів виявилася OFDM – технологія ортогонального частотного ущільнення, що володіє властивостями, які дозволяють забезпечити тенденціям часу. Тобто, LTE базується на основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогональних OFDM носівних, що

трансляються за допомогою багатопроменевих систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) та на еволюційній системній архітектурі мережі SAE (System Architecture Evolution).

Доведено, що максимально досяжні швидкості залежать від швидкості переміщення рухомого об'єкта і відстані до об'єкта. Дані технології можуть застосовуватися як для зв'язку з рухомими терміналами передачі даних, так і для організації транспортного середовища.

Зроблено висновок що технологія LTE здатна забезпечувати швидкість передачі, що перевищує 100 Мбіт/с. для нізхідного і 50 Мбіт/с. для висхідного каналів.

В другому розділі представлено математичну модель розрахунку мобільності децентралізованої мережі на основі нового системного критерію мобільності. Визначено важливі питання при проектуванні мережі за технологією LTE: організація роботи мережі в умовах непередбачуваного переміщення вузлів з гарантуванням доставки повідомлення адресату в будь-якому напрямку, тобто забезпечення зв'язності мережі з урахуванням ретрансляції. Це завдання вирішено шляхом моделювання і оцінки радіопрозорості вузлів при трансформації мережі, розробки рекомендацій з управління мережею для забезпечення якості обслуговування.

Проведено аналіз для кількісної оцінки ступеня мобільності з використанням відношення $[Q_r / Q_{\max}]$, де Q_r - об'єм повідомлень, який реально може обслужити децентралізована мережа за період зміни своєї структури; Q_{\max} - потенційно можливий об'єм повідомлень, який здатний обслужити децентралізовану мережу (ДМ) LTE за той же час в стаціонарному режимі.

При цьому:

$$Q_{\max} = Q_{\max} \cdot T_o. \quad (1)$$

$$Q_r = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i. \quad (2)$$

де T_o - період часу зміни структури ДМ; n - кількість станів, в яких може знаходитись ДМ за середній час T_o ; C_i - пропускна здатність ДМ в i -му стані; t_i - середній час знаходження ДМ в i -му стані.

Радіозасоби ДМ можуть пересуватися в довільні моменти часу, а час пересування і час їх роботи мають випадкову тривалість. Отже, зміни структури ДМ в ході її функціонування можна описати випадковим процесом. Так як для будь-якого розглянутого моменту часу ймовірнісні характеристики цього процесу в майбутньому залежатимуть тільки від того, коли і як система перейшла в цей стан, то такий процес можна вважати марковським.

Ймовірність переходу P_{ij} (ймовірність того, що процес у момент часу $t + \Delta t$ буде перебувати в стані S_j , за умови, що в момент часу t він знаходиться в стані S_i , визначатиметься з виразу:

$$P_{ij} = P \left\{ S_j \left| S_i \right. \right\} = \lambda_{ij} \Delta t + O(t), \quad (3)$$

де λ_{ij} - інтенсивність переходів (середнє число переходів за одиницю часу); Δt - проміжок часу, протягом якого ми спостерігаємо за ДМ в очікуванні переходу з одного стану в інший; $O(t)$ - величина, нескінченно мала в порівнянні з Δt .

Таким чином, процес зміни структури ДМ, що полягає в переміщенні радіозасобів ДМ до нових місць, можна уявити однорідним марковським процесом з безперервним часом і кінцевою безліччю станів, за допомогою чого можна визначити ступінь мобільності ДМ. Даний підхід дозволяє децентралізовані мережі, побудовані на різних організаційно - технічних принципах, порівняти по новому системному критерію мобільності, і який на відміну від відомих, враховує необхідну пропускну здатність і об'єм переданих повідомлень.

Для опису нечіткого характеру параметрів мережі LTE використано поняття повного ортогонального семантичного простору.

Розроблена модель опису зовнішніх дестабілізуючих факторів (ЗДФ) на параметри мережі LTE за допомогою нечітких класифікаторів. Враховуючи високу міру гетерогенності параметрів довкілля, в роботі були введені агреговані показники, що описують рівні різних типів впливу зовнішнього середовища: γ_1, γ_2, E . Значення кожного показника залежить від відповідної йому множини параметрів.

Кожен з показників відображує деякий тип параметрів довкілля:

- γ_1 відображає вплив соціально-демографічних параметрів, що характеризують населення, яке обслуговується деякою підмережею;
- γ_2 відображає вплив територіальних параметрів, які характеризують місцевість, що обслуговується даною підмережею;
- E відображає вплив подій, які можуть відбуватися в зовнішньому середовищі.

Кожен показник описаний стандартним нечітким чотирьохрівневим класифікатором з терм-множиною значень «Незадовільно» (НЗ), «Задовільно» (З), «Добре» (Д), «Відмінно» (В), які характеризують вплив відповідного чинника на параметри систем LTE. Значення показників розраховуються по наступним співвідношенням:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= H_1(\gamma_1^1, \dots, \gamma_{n_1}^1); \\ \gamma_2 &= H_2(\gamma_1^2, \dots, \gamma_{n_2}^2); \\ E &= H_E(e_1, \dots, e_{n_E}). \end{aligned} \quad (4)$$

де n_1, n_2, n_E - потужності множин параметрів агрегованих показників γ_1, γ_2 і E відповідно, а $H_1(\gamma_1^1, \dots, \gamma_{n_1}^1), H_2(\gamma_1^2, \dots, \gamma_{n_2}^2), H_E(e_1, \dots, e_{n_E})$ - деякі нечіткі функції, які мають на увазі чітке відображення з простору нечітких значень параметрів зовнішнього середовища в простір нечітких значень агрегованого показника.

Для опису впливу агрегованих показників γ_1, γ_2 і E на параметри LTE, розглянуто нечіткий процес вигляду:

$$p_i(t) = p_i(t_0) \cdot (1 + r_i(t)), \quad (5)$$

де t – поточний час; t_0 – початковий відлік часу; $p_i(t)$ – значення i -го параметра у момент часу t , що характеризується трапецеїдальним нечітким числом, заданим в повному ортогональному семантичному просторі (ПОСП) Π_{p_i} ; $r_i(t) \in [-r_{1i}, r_{2i}]$ – розрахунковий коридор зміни $p_i(t)$, що визначався як лінгвістичні змінні, значення якої обчислюється по відповідній базі знань на підставі набутих лінгвістичних значень агрегованих показників зовнішнього впливу довкілля (ЗВД).

Зважаючи на нечіткий опис деяких параметрів, і враховуючи нечіткі показники ЗВД, для опису стану LTE використовувалось поняття нечіткої ситуації, яка описується нечіткою множиною другого рівня. Для визначення критичних ситуацій, або ситуацій близьких до них використані методи нечіткої кластеризації, на основі яких введено чотири класи нечітких ситуацій:

- клас штатних ситуацій (система функціонує нормально);
- клас приграничних ситуацій (почалась робота самовідновлення системи);
- клас граничних ситуацій (система функціонує на межі допустимого режиму);
- клас нештатних ситуацій (система функціонує ненормально).

Визначено, що оцінити вплив мобільності радіозасобів децентралізованої бездротової мережі на динаміку змін пропускної здатності й об'єму переданих даних, можливо використовуючи поняття нечіткої ситуаційної мережі (НСМ), побудована модель зміни нечітких ситуацій для ієрархічної системи, що дало змогу визначати, в якій ситуації знаходитиметься система в наступні моменти часу, якщо на неї впливає деяка дія. При цьому малося на увазі, що дії на ТС можуть бути як з боку довкілля, так і реалізацією деяких КР.

Третій розділ присвячений дослідженню систем LTE з метою поліпшення надійності її функціонування в цілому, а також підвищення якості проектних розробок для такої системи. Проаналізовано системи зв'язку та досліджено їх основні властивості.

Розроблено методику підвищення показників надійності систем LTE, з використанням дубльованої системи, нерезервованої системи, для навантаженого дублювання без відновлення та також для не навантаженого дублювання без відновлення. Встановлено, що дубльована система може знаходитися в одному із трьох станів, котрі позначимо цифрами:

- 0 – система працездатна (обидва елементи працездатні);
- 1 – система працездатна, але один із елементів - відмовив (система схильна до відмови);
- 2 – система непрацездатна (відмовила).

Позначимо ймовірність перерахованих раніше станів через $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$.

Ці ймовірності залежать від початкових станів системи, в якій вона знаходилась коли $t = 0$.

В залежності від призначення дубльованої системи до неї можуть висунуті різноманітні вимоги:

1. Після ввімкнення система повинна безвідмовно працювати певний час; перерви в роботі недопустимі. При цьому необхідно знати ймовірність неперервної безвідмовної роботи системи (ймовірність перший раз не опинитися у стані 2). Іноді кажуть, що для таких систем непрацездатний стан є поглинаючим. При цьому розраховують умову ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі $(0, t)$ за умови, що при $t=0$ основний та резервний елементи працездатні.

2. Необхідно вилучити певний заданий момент часу, коли система працездатна, але перерви у роботі системи не відіграють ніякої ролі. При цьому будуть розглядатися готовність системи та її характеристики: функція готовності $\Gamma(t)$ або коефіцієнт готовності. Інакше кажучи, знаходиться ймовірність не опинитися у стані 2. Цей випадок відрізняється від попереднього тим, що існує можливість переходу зі стану 2 в стан 1.

Розрахуємо формули для функції готовності та ймовірності безвідмовної роботи дубльованої системи з відновленням. Припустимо, що основний та резервний елементи однонадійні, мають показникові розподілення часу безвідмовної роботи та часу відновлення: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, відмова непрацездатних елементів неможлива, відмови виявляються миттєво, як показано на рис. 1.

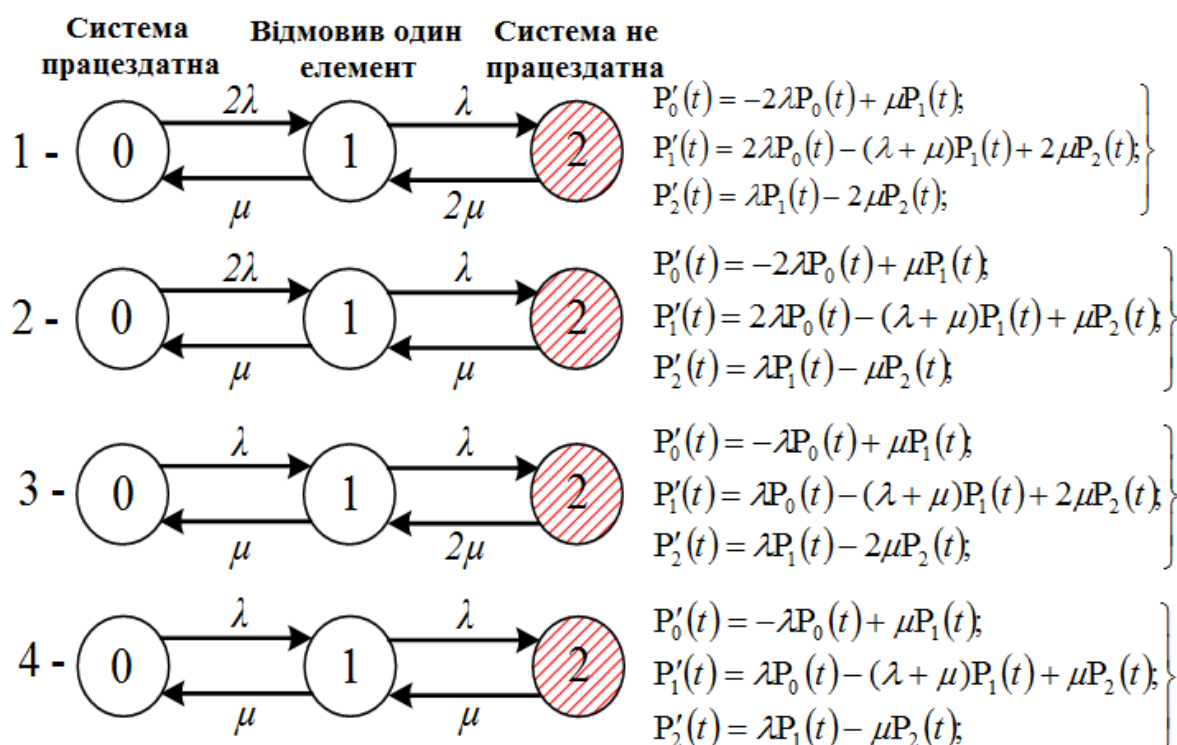


Рис. 1. Графи станів різноманітних варіантів дубльованої системи та їх відповідні диференційні рівняння

На рис. 1 наведені графи станів чотирьох можливих варіантів дубльованої системи з відновленням:

- 1) Навантажений резерв; при відмові елементів вони можуть ремонтуватися як по одному, так і одночасно (відновлення без обмежень);
- 2) Навантажений резерв; елементи, які відмовили можуть ремонтуватися лише по одному (обмежене відновлення);
- 3) Ненавантажений резерв; відновлення проводиться без обмежень;
- 4) Ненавантажений резерв; відновлення по одному елементу (обмежене).

Розроблено шляхи підвищення надійності відновлюваних систем мереж майбутнього та визначено що ненавантажений резерв є найбільш ефективною формою підвищення надійності LTE.

На рис. 2. зображені графіки функцій надійності різновидних систем при $\lambda = 0,01$ 1/ч та $\mu = 0,1$ 1/ч:

$\rho_{1,2}(t)$ — для першого та другого варіантів дубльованої системи (графи станів варіантів наведені на рис.1);

$\rho_{3,4}(t)$ — так само для третього та четвертого варіантів;

$\rho_5(t)$ — для нерезерованої системи;

$\rho_6(t)$ — для навантаженого дублювання без відновлення;

$\rho_7(t)$ — для ненавантаженого дублювання без відновлення.

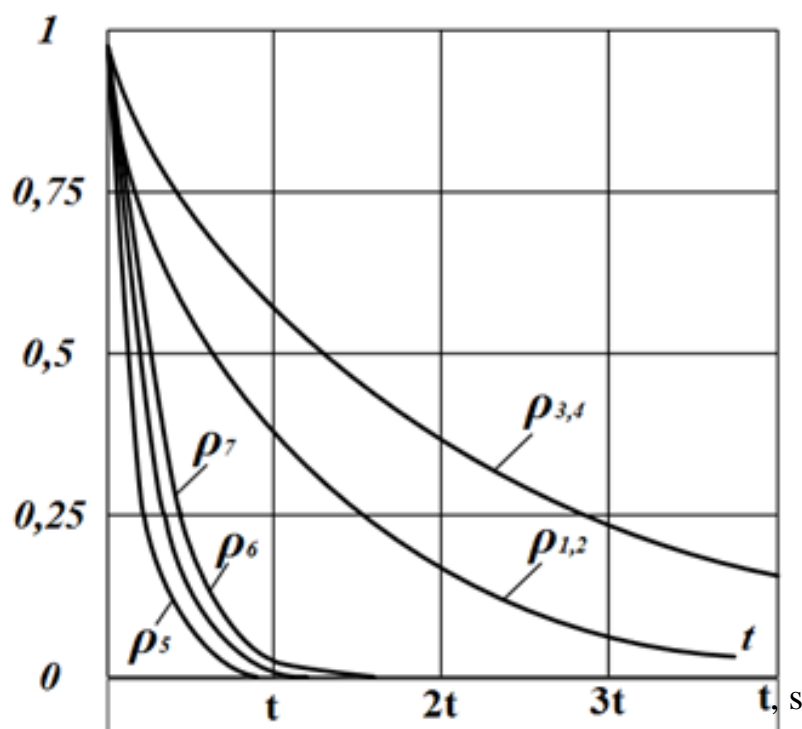


Рис. 2. Графіки функцій готовності

Середній час безвідмовної роботи резервованої відновлювальної системи звязку стандарту LTE визначається так, якщо в початковий момент часу (коли $t=0$)

всі елементи резервованої системи працездатні, тоді середній час безвідмовної роботи являється часом переходу із початкового стану до підмножини непрацездатних станів.

Якщо нерезервовану основну систему умовно розбити на n рівнонадійних ділянок, то ймовірність відмови q ділянки системи буде пов'язана з ймовірністю відмови Q_0 всієї системи наступним співвідношенням: $1 - Q_0 = (1 - q)^n$, звідки $q = 1 - (1 - Q_0)^{\frac{1}{n}}$.

Враховуючи це значення q , можна написати вираз для ймовірності відмови ділянки системи з ланцюгами перемикача, що обслуговують цю ділянку:

$$q_{\epsilon} = \left[1 - (1 - q_{\Pi})(1 - Q_0)^{\frac{1}{n}} \right]. \quad (6)$$

де q_{Π} - ймовірність відмови ланцюгів перемикача.

Згідно з формулою (6) ймовірність відмови $q_{p\epsilon}$ резервованого вузла (ділянки основної системи спільно з резервними елементами) буде мати вигляд:

$$q_{p\epsilon} = \left[1 - (1 - q_{\Pi})(1 - Q_0)^{\frac{1}{n}} \right]^k \quad (7)$$

Так як логічна модель резервованої системи складається з n послідовноз'єднаних резервованих вузлів, то ймовірність відмови усієї резервованої системи визначатиметься як:

$$R = \left\{ 1 - \left[1 - (1 - q_{\Pi})(1 - Q_0)^{\frac{1}{n}} \right]^k \right\}^n. \quad (8)$$

Таким чином, розроблено алгоритм роботи системи з активним резервуванням.

У четвертому розділі запропоновано методику оптимального прийому амплітудно-фазорізницевої модуляції гексагональних сигнальних сузір'їв високих порядків. При цьому різниця фаз розраховується між трьома і більше послілками. При розрахунку різниці фаз між двома послілками забезпечується інваріантність стрибків фази в каналах. Таким чином проявляється інваріативність до зсуву частоти, що є необхідним для систем зв'язку 4-го покоління. Різниця фаз між трьома та більше послілками реалізується в диференційному кодері сигналів.

Методика використовує багаточастотний груповий сигнал з ортогональними несучими. Це дозволяє забезпечити системі властивість інваріантності, щодо завади типу нерівномірності АЧХ, нелінійності ФЧХ, імпульсних завад, короткочасних переривань зв'язку.

Зазначено, що для забезпечення найменшої ймовірності помилки розрізнення сигналів необхідно будувати сузір'я на базі гексогональної мережі. Якщо така мережа будується в полярній координатній площині, де відстань між сигнальною точкою і полюсом відповідає амплітуді, а кут між полярною віссю та вектором, спрямованим з полюсу в сигнальну точку – початковій фазі сигналу, відповідні

сигнали є сигналами сузір'я гексагональної амплітудно-фазової модуляції (НАР) (рис. 3).

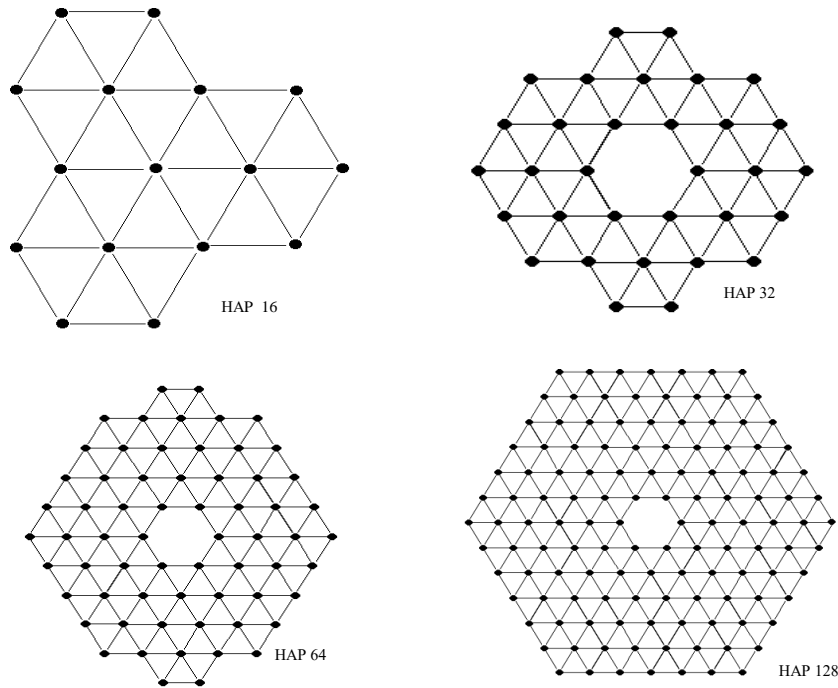


Рис. 3. Сигнальні сузір'я гексагональної амплітудно-фазової модуляції

Розроблено методику оптимального прийому багатопозиційних сигналів гексагонального сузір'я на базі модуляції високих порядків за критерієм ідеального спостерігача

Наприкінці тактового інтервалу n на виходах кожної пари кореляційних фільтрів формуються два значення кореляційних інтегралів (X_{0n}, Y_{0n}) – проєкцій вектора сигналу, прийнятого на тактовому інтервалі n на опорні коливання (11):

$$\left. \begin{aligned} X_{0n}(t) &= \int_{(n-1)T}^{nT} X(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt; \\ Y_{0n}(t) &= \int_{(n-1)T}^{nT} X(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) dt; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Алгоритм оптимального прийому за критерієм ідеального спостерігача для сигналів з рівними апріорними ймовірностями полягає в розрахунку відстані між прийнятим (X_{0n}, Y_{0n}, Z_{0n}) та варіантами переданого сигналу (X_j, Y_j) , виборі рішення на користь варіанта сигналу з найменшою відстанню.

Для сигналів, представлених у вигляді проєкцій на опорні гармоніки (9), вираз приймає наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} i &= \operatorname{argmin}[(X_{0n} - X_j)^2 + (Y_{0n} - Y_j)^2]; \\ X_j &= \int_0^T S_j(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi_j) dt, \\ Y_j &= \int_0^T S_j(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_j) dt. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де X_j , та Y_j - проекції всіх сигналів сузір'я на опорні гармоніки.

Отже, для оптимального прийому можливе використання сигналів з виходів пари активних фільтрів без яких-небудь додаткових перетворень, що задовольняє умові "2". Для схеми прийняття рішень (СПР), що реалізує оптимальний прийом за (10) необхідні зразки всіх сигналів сузір'я (X_j, Y_j).

Для формування зразків сигналів сузір'я з прийнятого сигналу скористаємося методами приведення прийнятого сигналу до одного із сигналів сузір'я (так званий пілот-сигнал) та усереднення його оцінки для компенсації впливу завад. Для цього, використовуючи значення сигналу $a_{n-1} \cos(\omega t + \Delta\varphi_{n-1})$, на користь якого демодулятором було прийняте рішення на попередньому ($n-1$) тактовому інтервалі, обчислюються проекції пілот-сигналу X_1 , та Y_1 згідно виразу:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &:= X_{0n} \\ Y_1 &:= Y_{0n} \end{aligned} \right\} n=1; \\ \left. \begin{aligned} X_1 &:= \frac{a_{n-1}}{a_j} \cdot (X_{0n} \cdot \cos(\Delta\varphi_{n-1}) + Y_{0n} \cdot \sin(\Delta\varphi_{n-1})) \\ Y_1 &:= \frac{a_{n-1}}{a_j} \cdot (Y_{0n} \cdot \cos(\Delta\varphi_{n-1}) - X_{0n} \cdot \sin(\Delta\varphi_{n-1})) \end{aligned} \right\} n \neq 1, \quad (11)$$

де a_j – амплітуди варіантів сигналів сузір'я; $\Delta\varphi_{n-1}$ - різниця фаз між зразками приведенного сигналу і сигналу, на користь якого демодулятором було прийняте рішення на тактовому інтервалі $n-1$.

Зі значень усереднених проекцій пілот-сигналу, у залежності від характеристик каналу, формуються усереднені проекції X_j , та Y_j сигналів сузір'я:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{X}_j &= \frac{a_j}{a_1} [\tilde{X}_1 \cdot \cos(\Delta\phi_j) - \tilde{Y}_1 \cdot \sin(\Delta\phi_j)] \\ \tilde{Y}_j &= \frac{a_j}{a_1} [\tilde{X}_1 \cdot \sin(\Delta\phi_j) + \tilde{Y}_1 \cdot \cos(\Delta\phi_j)] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де a_1 - амплітуда першого варіанту сигналу, а a_j - амплітуда j -сигналу.

Проведено порівняльний аналіз використання багатопозиційних сигнальних сузір'їв квадратурно-амплітудної Q-фазової модуляції (QAM) та гексагонально-амплітудної Q-фазової модуляції (HAP).

Представлено алгоритм когерентної обробки багаточастотного сигналу призначеного для конкретного 16-позиційного гексагонального сигналу (HAP 16) з амплітудно фазовою модуляцією.

Як відомо, застосування когерентного прийому для двійкових сигналів дозволяє одержати енергетичний вигаш ~ 3 дБ у порівнянні з оптимальним некогерентним прийомом. У перспективних багатоканальних модемах ТЧ (тональної частоти) каналу для досягнення високих питомих швидкостей передбачається використовувати багатопозиційний сигнал. Для прийому таких сигналів доцільно використовувати когерентний прийом, оскільки при збільшенні числа варіантів сигналу ефективність когерентного прийому в порівнянні з некогерентним складає 3-5 дБ.

Враховуючи динаміку розвитку мікропроцесорної техніки реалізація багатоканального модему з когерентним методом прийому на базі елементної бази середньої інтеграції не створює складності, що дозволяє реалізувати практично будь-які алгоритми, що лежать в основі таких систем.

Надано пропозиції щодо вибору оптимального багатопозиційного сигналу для каналу зв'язку з визначеним відношенням сигнал/шум.

Визначено оптимальну кількість посилок для гексагональних багатопозиційних сигналів з числом позицій, що дорівнює 16, 32, 64, 128. Графіки залежностей середньої за сузір'ям імовірності помилки у двійковому розряді на виході напівнеперервного каналу зображені на рис. 4.

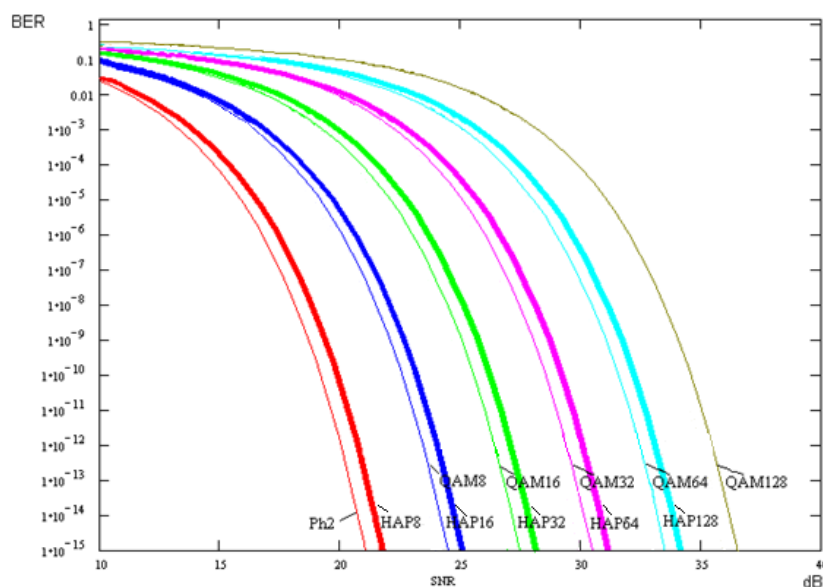


Рис. 4. Абсолютний вигаш у ймовірності помилки у двійковому розряді

На базі досліджень вдосконалено методику визначення оптимальних параметрів OFDM-сигналів в радіомережах, яких на відміну від раніше відомих методів дозволяє підвищити надійність зв'язку (зривів зв'язку) при передаванні особливо цінної інформації в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум, обмеженої кількості частотних каналів і необхідності забезпечення максимально швидкого передавання даних з мінімальним числом перезапитів неприйнятих пакетів. Зменшення числа перезапитів викликає збільшення сукупної швидкості передавання повідомлення в порівнянні з системою з постійними параметрами сигналу.

Сутність методики полягає у визначенні значень параметрів сигналу OFDM засобів радіозв'язку нового покоління для забезпечення надійного зв'язку між приймачем і передавачем сигналів OFDM під час функціонування в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум багаточастотної системи радіозв'язку та забезпечення необхідної якості приймання.

Завдання визначення значень параметрів сигналу OFDM з максимальними показниками надійності зв'язку P_3 зводяться до типової оптимізаційної задачі. Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} P_3 = F_1(v_i, \Delta F, M, n, R, d, P_c, N_A) \rightarrow \max; \\ P_{ном} = F_2(P_c, M, n, R, d, N_A) \leq P_{ном \text{ ДОП}}; \\ v_i = F_3(M, R, N_A) \geq v_i \text{ ДОП}. \end{cases}$$

де n - довжина кодової комбінації, P_c - потужність сигналу, M - розмірність ансамблю сигналів, R - швидкість коригувального коду ($R = k/n$), k - кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною n , d - величина кодової відстані, N_A - кількість активних підносійних, ΔF - ширина спектра сигналу.

Побудовано імітаційну модель системи передавання даних, функціонуючої за алгоритмом багатопараметричної адаптації для систем OFDM в середовищі SystemView. Параметри моделі є такими: вид модуляції - QPSK, число підносійних - 512, тривалість символу OFDM t_c - 48 мкс, тимчасовий дуплекс, канал із завмираннями огинаючої сигналу з розподілом Накагамі. Швидкість стрибків частоти дорівнює 100 перескок/с. Затримка сигналу T - від 150 до 250 мкс. Тривалість завмирань $\phi = 0,4 - 4$ мс, тобто, виконано умову $T + t_c \ll \phi$ і огинаюча сигналу практично не піддавалася змінам за час передачі символу. Проведено порівняння ймовірності помилки від середнього відношення сигнал/шум (ВСШ) для випадку комплексування OFDM на основі розробленого способу і випадку використання OFDM. Порівняння показало, що запропонований алгоритм забезпечив істотний вииграш завадостійкістю, а саме, при середньому значенні ВСШ 20 дБ ймовірність помилки зменшується більш, ніж в 8-10 разів.

Пристрої і комплекси, побудовані за даним методом, можуть застосовуватися в будь-яких системах OFDM, що функціонують в багатопроблемних каналах, таких як системи зв'язку LTE, IEEE 802.16n та ін.

ВИСНОВКИ

Сукупність досягнутих наукових результатів, отриманих під час проведення дисертаційного дослідження, дозволила вирішити наукове завдання з розробки методики оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE на базі модуляції високих порядків.

Основні результати роботи полягають у наступному:

- Удосконалена нечітка часова модель розрахунку мобільності системи LTE, яка формалізує вплив дестабілізуючих факторів на її функціонування, що дозволяє підвищити точність визначення імовірісно-часових характеристик та

дозволить сформувати модель оцінки стану мережі використовуючи лексикографічну систему представлення інформації.

- Розроблено алгоритм підвищення показників надійності систем LTE, з використанням дубльованої системи. Проведено порівняльний аналіз підвищення показників надійності систем зв'язку технології LTE для дубльованої системи, нерезервованої системи, для навантаженого дублювання без відновлення, а також для не навантаженого дублювання без відновлення. Доведено, що ненавантажений резерв є найбільш ефективною формою підвищення надійності системи з урахуванням вартості елементів резервування.

- Вперше розроблена методика оптимального прийому багатопозиційних сигналів гексагонального сузір'я за критерієм ідеального спостерігача на базі модуляції високих порядків, що має найвищу завадостійкість сигналів за двома координатами (x , y) наближену до потенційного можливої. Визначено, що використання NAP в порівнянні з QAM, дає вигоду більше 3 дБ завдяки запропонованому методу оптимального прийому амплітудно-фазорізнцевої модуляції гексагональних сигнальних сузір'їв з розрахунком різниці фаз між трьома і більше послідовними.

- Розроблено методику розрахунку параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю на базі алгоритму визначення оптимальних значень сигналу OFDM. Розроблений вдосконалений метод, на відміну від раніше відомих методів, дозволяє підвищити надійність зв'язку при передаванні особливо цінної інформації сигналами OFDM в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум, обмеженої кількості частотних каналів і необхідності забезпечення максимально швидкого передавання даних з мінімальним числом перезапитів неприйнятих пакетів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, що входять до міжнародних науко-метричних баз

1. Кравченко В.И. Анализ производительности беспроводных сетей при произвольной длине пакетов данных / Э.Д. Амирханов, В.И. Кравченко // Международный журнал «Научное обозрение». – 2015. – № 9. – С. 30-37.

2. Кравченко В.И. Визначення середнього часу обслуговування пакету у мережі / Е.Д. Амірханов, В.І. Кравченко // Міжнародний науковий журнал «Науковий огляд». – 2016. – №2. – С. 43-60.

3. Кравченко В.И. Аналіз технологій передачі даних, що використовуються для розробки студії телемовлення в Інтернеті / Е.Д. Амірханов, В.І. Кравченко // Міжнародний науковий журнал «Науковий огляд». – 2016. – №4. – С. 111-120.

4. Кравченко В.И. Аналіз технічного стану основних засобів, що застосовуються для побудови студії Інтернет телебачення / Е.Д. Амірханов, В. І. Кравченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2016. – №6. – С. 191-195.

5. Кравченко В.И. Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої бездротової мережі / В.Г. Сайко, В.О. Бреславський,

Л.М. Грищенко, В.І. Кравченко // «Телекомунікаційні та інформаційні технології». – 2016. – №2. – С. 17-27.

6. Кравченко В.І. Визначення оптимальних параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю для когнітивних радіомереж FH-OFDMA / В.Г. Сайко, О.В. Дікарєв, Д.О. Лисенко, Л.М. Грищенко, Л.В. Дакова, В.І. Кравченко // «Телекомунікаційні та інформаційні технології» – 2016. – №3. – С. 22-30.

7. Кравченко В.І. Метод визначення оптимальних параметрів вікон прозорості в терагерцовому діапазоні / В.Г. Сайко, Д.О. Лисенко, Л.М. Грищенко., Л.В. Дакова, В.І. Кравченко // «Телекомунікаційні та інформаційні технології». – 2017. – №1. – С. 11-17.

8. Кравченко В.І. Шляхи підвищення надійності відновлюваних систем мереж майбутнього (Future Networks) / С.І. Отрох, В.І. Кравченко, О.І. Голубенко, М.В. Загряжська, В.В. Скрипнік // «Телекомунікаційні та інформаційні технології». – 2017. – №4. – С. 71-80.

9. Кравченко В.І. Маніпуляційне кодування сигнальних n -вимірних багатопозиційних сузір'їв на основі оптимальних за завадостійкістю регулярних структур / С.І. Отрох, В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман, В.І. Кравченко // «Телекомунікаційні та інформаційні технології». – 2017. – №3. – С. 5-11.

Статті у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК України

10. Кравченко В.І. Огляд сімейств кільцевих кодів / В.Г. Сайко, О.В. Дікарєв, Л.Н. Грищенко, В.І. Кравченко // «Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку». – 2016. – №2. – С. 31-36.

11. Кравченко В.І. Розробка економічних критеріїв для порівняння конкурентоспроможних варіантів інформаційних систем / В.Л. Пархоменко, В.Г. Сайко, В.І. Кравченко // «Зв'язок». – 2016. – №5. – С. 23-27.

12. Кравченко В.І. Використання розподілених транспортних радіомереж терагерцового діапазону для побудови мереж мобільного зв'язку нового покоління / В.Г. Сайко, Т.М. Наритник, В.Я. Казіміренко, Л.В. Дакова, Л.М. Грищенко, В.І. Кравченко // «Зв'язок». – 2016. – №6. – С. 16-22.

13. Кравченко В.І. Канал широкосмугового радіодоступу в терагерцовому діапазоні для радіосистем виявлення прихованих об'єктів / В.Г. Сайко, В.Я. Казіміренко, Л.М. Грищенко, В.І. Кравченко // «Сучасний захист інформації». – 2017. – №2. – С. 72-78.

14. Кравченко В.І. Алгоритм адаптації радіосистеми до середньостатистичних змін параметрів радіоканалу терагерцового діапазону / В.Г. Сайко, Д.О. Лисенко, Л.М. Грищенко, Л.В. Дакова, В.І. Кравченко // «Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку». – 2017. – №1. – С. 12-18.

15. Кравченко В.І. Методика підвищення надійності мереж майбутнього з використанням алгоритму визначення оптимального числа об'єктів резервування / С.І. Отрох, В.І. Кравченко, М.В. Загряжська, О.І. Голубенко, В.В. Скрипнік //

«Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку». – 2017. – № 4. – С. 24-29.

16. Кравченко В.І. Анализ тенденций развития элементной базы сетей будущего поколения для работы современных мобильных устройств сети связи четвертого поколения (LTE) на примере нейронного процессора Kirin 970 / С.І. Отрох, В.І. Кравченко, О.І. Голубенко // «Зв'язок». – 2017. – № 4 – С. 47-49.

17. Кравченко В.І. Методологія розрахунку завадостійкості багатопозиційних сигнальних сузір'їв / С.І. Отрох, В.В. Дубровський, В.І. Кравченко, О.І. Голубенко // «Зв'язок». – № 5. – С. 26-30.

18. Кравченко В.І. Розробка структурної схеми демодулятора багатопозиційних просторових OFDM-сигналів / С.І. Отрох, В.І. Кравченко // «Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку». – 2017. – № 3. – С. 11-19.

Матеріали й тези доповідей на конференціях

19. Кравченко В. И. Использование терагерцового диапазона при развертывании мультисервисной сети широкополосного доступа / В. Г. Сайко, В. Я. Казимиренко, В. И. Кравченко, В. А. Беславский, Т. Н. Нарытник // Материалы международной научно – технической конференции «Современные информационно – телекоммуникационные технологии» Том 2. – 2015. – С. 27.

20. Кравченко В. И. Бизнес - модели и варианты инвестирования для использования лицензируемых видов общего доступа / В. И. Кравченко // Збірник матеріалів II Міжнародної науково - технічної конференції студентства та молоді «Світ телекомунікації та інформатизації» – 2016. – С. 55.

21. Кравченко В. И. Методика оценки влияния изменений скорости движения мобильного абонента на качество приема сигнала / В. И. Кравченко // Материалы международной научно – технической конференции «Современные информационно – телекоммуникационные технологии» Том 2. – 2015. – С. 90.

22. Kravchenko V. Noise Immunity Calculation Methodology for Multi-Positional Signal Constellations / Vladimir Tolubko, Sergei Otrokh, Lyubov Berkman, Oleksandr Pliushch and Vladislav Kravchenko // 14th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018): Conference Proceedings. – Lviv, 20-24 of February, 2018. – P.#436.

Патенти на корисну модель

23. Патент на корисну модель 114470 Україна, u 2016 09334 Спосіб визначення оптимальних значень параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю в радіомережах FH-OFDMA / Сайко В.Г., Дікарев О.В., Грищенко Л.М., Кравченко В.І., Лисенко Д.О., Дакова Л.В. Заявник і патентовласник Державний університет телекомунікацій; Патент опубліковано 10.03. 2017 // бюл. № 5/2017.

24. Патент на корисну модель 117124 Україна, u 2017 01217 Спосіб підвищення ефективності використання вікон прозорості в терагерцовому

діапазоні / Сайко В. Г., Ємельяненко Б. М., Грищенко Л. М., Кравченко В. І., Лисенко Д. О., Дакова Л. В. Заявник і патентовласник Державний університет телекомунікацій; Патент опубліковано 12.06.2017, бюл. № 11/2017.

25. Патент на корисну модель 119146 Україна, u 2017 03604 Мікрохвильова система широкосмугового безпроводового доступу UMDS-PP-MP / Сайко В. Г., Казіміренко В. Я., Грищенко Л. М., Кравченко В. І., Заявник і патентовласник Державний університет телекомунікацій; Патент опубліковано 11.09.2017, бюл. № 17/2017.

АНОТАЦІЯ

Кравченко В.І. «Методика оптимального прийому багатопозиційних сигналів технології LTE на базі модуляції високих порядків». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Державний університет телекомунікацій, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці методики підвищення якості функціонування систем зв'язку стандарту LTE.

Вдосконалено часову модель для розрахунку мобільності системи LTE, яка заснована на нечіткій логіці та формалізує вплив дестабілізуючих факторів на її функціонування.

Розроблено алгоритм підвищення показників надійності систем мобільного зв'язку стандарту LTE, з використанням дубльованої системи.

Розроблено методику оптимального прийому багатопозиційних сигналів гексагонального сузір'я за критерієм ідеального спостерігача на базі модуляції високих порядків, що має найвищу завадостійкість сигналів за двома координатами (x, y) наближену до потенційно можливої.

Розроблено методику розрахунку параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю на базі алгоритму визначення оптимальних значень сигналу OFDM.

Ключові слова: LTE, сигнальні сузір'я, модуляція високих порядків, OFDM, багатопозиційні сигнали, HARQ.

АННОТАЦИЯ

Кравченко В.И. «Методика оптимального приема многопозиционных сигналов технологии LTE на базе модуляции высоких порядков». - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 - радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. - Государственный университет телекоммуникаций, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке методики повышения качества функционирования систем связи стандарта LTE.

Усовершенствована временная модель для расчета мобильности системы LTE, которая основана на нечеткой логике и формализует влияние дестабилизирующих факторов на ее функционирование.

Разработан алгоритм повышения показателей надежности систем мобильной связи стандарта LTE, с использованием дублированной системы.

Разработана методика оптимального приема многопозиционных сигналов гексагонального созвездия по критерию идеального наблюдателя на базе модуляции высоких порядков, имеющий самую высокую помехоустойчивость сигналов по двум координатам (x, y) приближенную к потенциально возможной.

Разработана методика расчета параметров сигналов с повышенной помехоустойчивостью на базе алгоритма определения оптимальных значений сигнала OFDM.

Ключевые слова: LTE, сигнальные созвездия, модуляция высоких порядков, OFDM, многопозиционные сигналы, HAR.

ANNOTATION

Kravchenko V.I. «The technique of optimal reception of multi-position signals of LTE technology based on high order modulation». - As a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.12.13 - radio engineering devices and telecommunications facilities. - State University of Telecommunications, Kiev, 2018.

The thesis is devoted to the development of methods for improving the quality of LTE communication systems.

The temporary model for calculating the mobility of the LTE system is improved, which is based on fuzzy logic and formalizes the influence of destabilizing factors on its functioning.

An algorithm has been developed to improve the reliability of mobile communication systems of the LTE standard, using a duplicated system.

A technique for the optimal reception of multi-position signals of a hexagonal constellation by the criterion of an ideal observer on the basis of high-order modulation is developed, which has the highest noise immunity of signals with respect to two coordinates (x, y) close to the potential one.

A technique for calculating the parameters of signals with increased noise immunity based on the algorithm for determining the optimum values of the OFDM signal is developed.

Key words: LTE, signal constellations, high order modulation, OFDM, multiposition signals, HAR.