

УДК 621.391.3

Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Отрох С. І., Кравченко В. І.

*Державний університет телекомунікацій***МАНІПУЛЯЦІЙНЕ КОДУВАННЯ СИГНАЛЬНИХ N-ВИМІРНИХ
БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СУЗІР'ІВ НА ОСНОВІ ОПТИМАЛЬНИХ ЗА
ЗАВАДОСТІЙКІСТЮ РЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР**

Розглянуті і проаналізовані основні типи сигнальних сузір'їв для передачі високооб'ємної інформації. Сформульовані основні вимоги до маніпуляційного коду. Проведено порівняльний аналіз між сигнальними сузір'ями квадратурно-амплітудно-фазової та кубічно-амплітудно-фазової модуляції. Запропоновано метод підвищення ефективності використання блокових завадостійких кодів в системах зі зворотнім зв'язком для виправлення пакетів помилок.

Ключові слова: *сигнальне сузір'я, маніпуляційне кодування, ізометрія кодування, квадратурно-амплітудно-фазова модуляція, кубічно-амплітудно-фазова модуляція.*

Tolubko V. B., Berkman L. N., Otrikh S. I., Kravchenko V. I.

*State University of Telecommunications***MANIPULATION CODING OF SIGNAL OF N-DIMENSIONAL
MULTI-POSITION CONSTELLATIONS ON THE BASIS OF
OPTIMAL BY NOISE IMMUNITY REGULAR STRUCTURES**

An urgent issue today is the introduction of mobile broadband access equipment on the telecommunications network of the fourth and fifth generation (LTE). In this paper, we consider methods for the optimal inscribing of signal regions. Certain advantages of the main types of signal constellations for the transmission of high-volume information. The main requirements for manipulation codes were defined and a method for distinguishing signals from neighboring points of the constellation was defined. Considered of isometries of two-dimensional and three-dimensional manipulation codes. Codes of signals which have been chosen as pilot are given. A comparative analysis was carried out between signal constellations of quadrature amplitude-phase modulation (QAM) and cubic amplitude-phase modulation (CubeAM). It is offered the method to rise the efficiency using of sectional the hindrance codes in the feedback systems for the correction of error bursts.

Keywords: *signal constellation, manipulation coding, coding isometry, quadrature amplitude-phase modulation, cubic amplitude-phase modulation.*

Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Отрох С. И., Кравченко В. И.

*Государственный университет телекоммуникаций***МАНИПУЛЯЦИОННОЕ КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ N-МЕРНЫХ
МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СОЗВЕЗДИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯРНЫХ СТРУКТУР**

Рассмотрены и проанализированы основные типы сигнальных созвездий для передачи высокообъемной информации. Сформулированы основные требования к манипуляционному коду. Проведен сравнительный анализ между сигнальными созвездиями квадратурно-амплитудно-фазовой и кубическо-амплитудно-фазовой модуляции. Предложен метод повышения эффективности использования блочных помехоустойчивых кодов в системах с обратной связью для исправления пакетов ошибок.

Ключевые слова: *сигнальное созвездие, манипуляционное кодирование, изометрия кодировки, квадратурно-амплитудно-фазовая модуляция, кубическо-амплитудно-фазовая модуляция.*

© Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Отрох С. И., Кравченко В. И., 2017

Вступ. Постановка задачі. При однаковому способі прийому різні сигнальні сузір'я забезпечують різну завадостійкість. Це пов'язано з особливостями розташування границь областей сигналів. Під областю сигналу A розуміється геометричне місце точок простору сигналів, віддалених від сигнальної точки A менш, ніж від всіх інших сигнальних точок сузір'я. Мінімум середньої ймовірності помилки досягається при розміщенні границь областей сигналів на рівних відстанях від сусідніх сигнальних точок. Оптимізація сигнальних сузір'їв зводиться до такого розташування сигнальних точок, при якому області сигналів мають найбільшу величину, найбільш близькі одна до одної за розмірами і наближаються за формою до кіл в двовимірному просторі або шарів в тривимірному просторі. Таке розташування забезпечує однакову ймовірність помилки прийому будь-якого сигналу (області сигналів однакові) і мінімальну середню енергію сигналів (області найбільш щільно упаковані).

Ущільнення укладань сигнальних точок. Відомі найщільніші укладання реалізуються, як правило, при розташуванні сигнальних точок у вузлах так званих просторових мереж, що мають регулярну структуру. В одновимірному просторі найщільнішим є рівномірне розміщення сигнальних точок на прямій. У двовимірному випадку розглядається найщільніше укладання рівних кіл на площині, при цьому центри кіл відповідають сигнальним точкам. Приклад такого укладання показаний, на рис. 1.

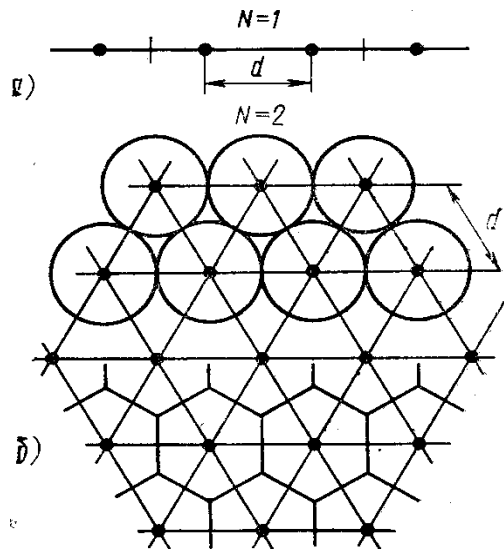


Рис. 1. Оптимальне укладання областей сигналів

Сигнальні точки розташовані на вершинах трикутників, що утворюють регулярну трикутну мережу. У нижній частині рис. 1 показано розташування областей сигналів найщільнішого укладання. Області мають вигляд правильних, щільно упакованих шестикутників. Для побудови сигнальних сузір'їв з кінцевим числом сигналів можна використовувати частину трикутної мережі. Така мережа забезпечує найщільнішу упаковку на площині. Однак тільки для системи з трьох сигналів оптимальність розташування сигнальних точок зберігається, тому що в цьому випадку області всіх сигналів однакові. Така система сигналів утворює симплекс двовимірного простору. В інших випадках області периферійних сигналів відрізняються від областей сигналів усередині сигнального сузір'я. Якщо число сигналів у сигнальному сузір'ї, побудованому на основі мережі найщільнішого укладання, досить велике, то таке розміщення сигнальних точок може бути досить близьким до оптимального. Області сигналів у цьому випадку однакові, за винятком крайніх областей.

Отже, для забезпечення найменшої ймовірності помилки розрізнення сигналів необхідно будувати сузір'я на базі трикутної мережі. Якщо така трикутна 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 (hexagonal amplitude phase modulation – HAP).

Для виконання умови модульності системи передачі, що використовує груповий сигнал OFDM, можливості незалежної оптимізації швидкості передачі в кожному частотному підканалі і, одночасно, безнадлишкового кодування, число точок в сигнальних сузір'ях повинно дорівнювати 2^n , $n=1,2,\dots$. Можливість закриття окремого частотного підканалу у випадку значного шуму в смузі його пропускання накладає обмеження на використання сигнальних сузір'їв з пасивною паузою.

Серед частин трикутної мережі, що мають форму кола і містять 2^n вузлів таких, що центр кола не співпадає з жодним з них, були відібрані ті, що забезпечують найменшу середню відстань вузлів в колі до його центру, що, в свою чергу, відповідає мінімальній середній амплітуді сигналів сузір'я. Для порівняння характеристик завадостійкості сузір'їв HAP з найпоширенішими – сузір'ями типу QAM були також відібрані сузір'я QAM з активною паузою і мінімальною середньою амплітудою, які включають 2^n сигнальних точок, $n=1,2,\dots,7$. Відібрані сузір'я QAM зображені на рис. 2.

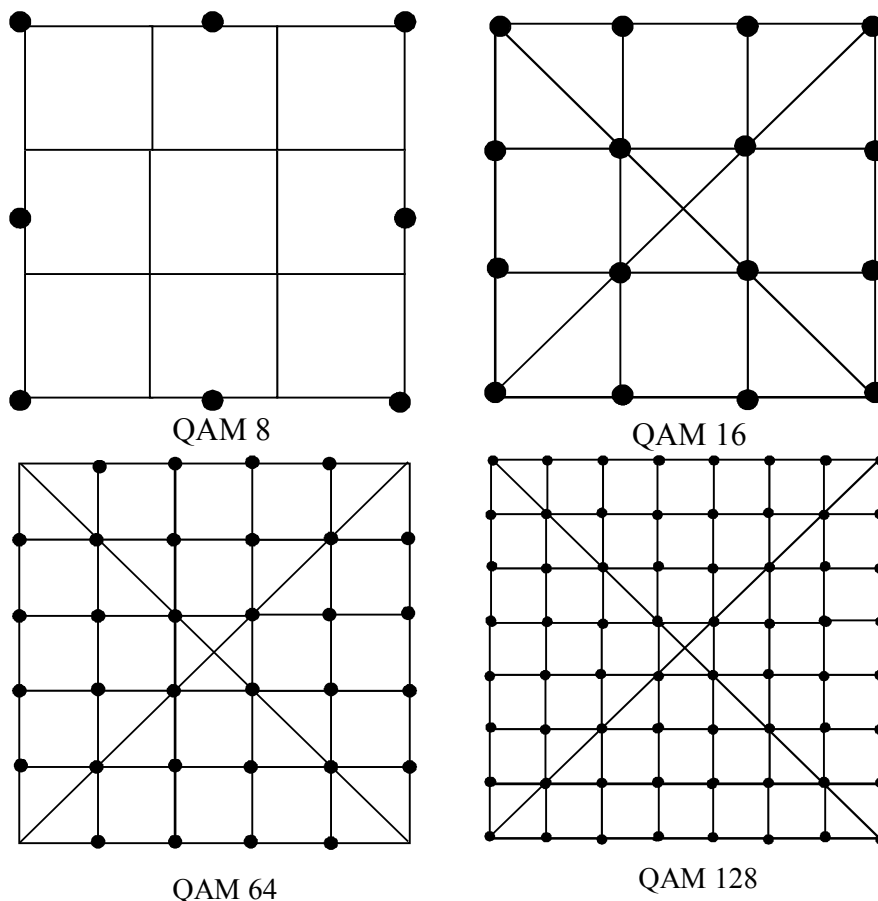


Рис. 2. Сигнальні сузір'я квадратурно-амплітудної Q -фазової модуляції

У тривимірному просторі розглядається найщільніше укладання при вписаному кубі в шар, як показано на рис. 3, де кути куба відповідають сигнальним точкам (відібрані сузір'я для $n=1,2,\dots,7$).

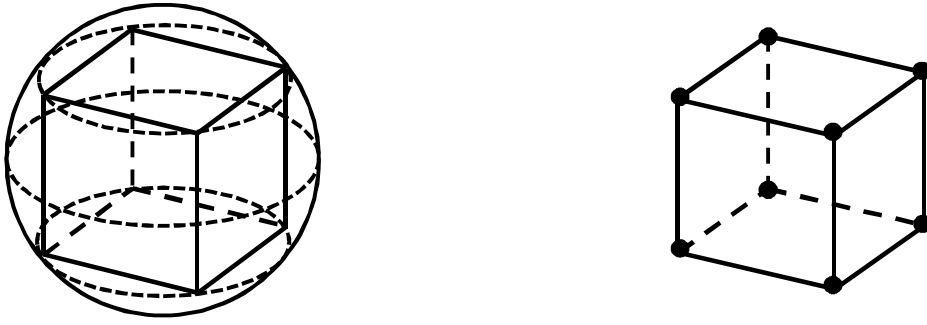


Рис. 3. Оптимальне укладання областей сигналів в тривимірному просторі для восьмипозиційного сигналу кубічно амплітудно фазової модуляції

Однак є більш ідеальні випадки трьохвимірної укладки, наприклад, як зображено на рис. 4 для 16 та 32 позиційних сигналів кубічно амплітудно фазової модуляції.

Сузір'я НАР дають можливість мінімізувати ймовірність помилки розрізнення сигналів за рахунок максимально можливої евклідової відстані між сигнальними точками при заданій середній чи максимальній амплітуді сигналів. Однак, якщо для середньостатистичної сигнальної точки сузір'я QAM існує чотири точки, розташовані на мінімальній евклідовій відстані, то для сузір'я НАР таких точок шість, що приводить до підвищеного (порівняно з QAM) числа інверсій у кодах сусідніх точок і, отже, до більш високої ймовірності помилки в двійковому розряді при однаковій і навіть нижчій ймовірності помилки розрізнення сигналів.



Рис. 4. Оптимальне укладання областей сигналів в тривимірному просторі для 16 та 32 позиційного сигналу кубічно-амплітудно-фазової модуляції

Тому актуальною є розробка маніпуляційних кодів для сузір'їв НАР, дослідження завадостійкості двійкових каналів, побудованих на їх основі і порівняння з аналогічними каналами на основі QAM.

Синтез маніпуляційних кодів для сузір'їв гексагональної амплітудно-фазової модуляції. Маніпуляційний код повинен відповідати таким вимогам: безнадлишковості і забезпечення найменшої можливої хемінгової відстані між кодами сигнальних точок, розташованих на мінімальній евклідовій відстані. При виконанні цих вимог найбільш імовірній помилці розрізнення сигналів, пов'язаній з розрізненням сигналів сусідніх точок сузір'я, буде відповідати помилка у двійковій комбінації, що має найменшу кратність.

Оскільки оптимальність прийому багатопозиційних сигналів за правилом Котельнікова і максимальна завадостійкість сигнальних сузір'їв на основі просторових мереж, що мають регулярну структуру, зберігаються при умові рівних ймовірностей передачі усіх сигналів сузір'я, маніпуляційний код має бути рівномірним, що забезпечує безнадлишковість кодування рівноімовірних сигналів і відсутність ефектів вставок і випадань на виході дискретного каналу. З теорії комбінаторики відомо, що кількість розташувань n елементів

без повторень, якими є маніпуляційні коди, складає $n!$, що робить застосування методу перебору при побудові маніпуляційних кодів ускладненим. Отже, для вирішення задачі застосуємо метод синтезу.

Найменшим елементом сузір'я НАР є трикутник, вершинам якого відповідають сигнальні точки, які можуть бути закодовані щонайменше двома двійковими розрядами a та b . Перебираючи всі можливі комбінації значень a та b , так, щоб коди точок були різними, впевнюємося, що незалежно від цих значень, двом сторонам трикутника відповідають інверсії в одному з розрядів кодів точок, а одній стороні – інверсія в обох розрядах. Інверсні розряди на рис. 5 виділені. Неперервні сторони трикутника на рис. 5 відповідають інверсії в одному розряді кодів точок у суміжних вершинах, а пунктирна – інверсіям в обох розрядах. Код ab (інверсія a і b) доповнює маніпуляційний код трьохсигнального сузір'я до безнадлишкового. Також, методом перебору визначаємо точку сигнального сузір'я, відповідаючи якій цей код забезпечує відповідність мінімально можливого числа інверсій в кодах точок, розташованих на мінімальній евклідовій відстані (див. рис. 6). Підставляючи значення розрядів a і b отримуємо еквівалентні за властивостями безнадлишкові маніпуляційні коди сузір'я, зображеного на рис. 6. Безнадлишковість цих кодів дає можливість використовувати їх в якості елементів для побудови кодів сузір'їв з більшою кількістю точок.

Порівняльний аналіз сузір'їв QAM і НАР. Відмітимо, що сузір'я, зображене на рис. 6 та його маніпуляційні коди можуть бути отримані шляхом ізометрії з сузір'я подвійної фазової модуляції, яке одночасно також є сузір'ям QAM4. На відміну від НАР, для сузір'їв QAM існує універсальна методика побудови маніпуляційних кодів. Ця методика полягає в незалежному кодуванні груп розрядів відомими одновимірними кодами вздовж координатних векторів.

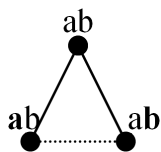


Рис. 5. Елементарне сузір'я НАР

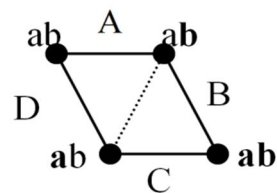


Рис. 6. Елементарне безнадлишкове сузір'я НАР

На рис. 7 зображено фрагмент з шістнадцяти точок сузір'я QAM, в кодах яких старші розряди закодовано вздовж вектора ординат, а молодші – вздовж вектора абсцис двохзначними кодами Грея.

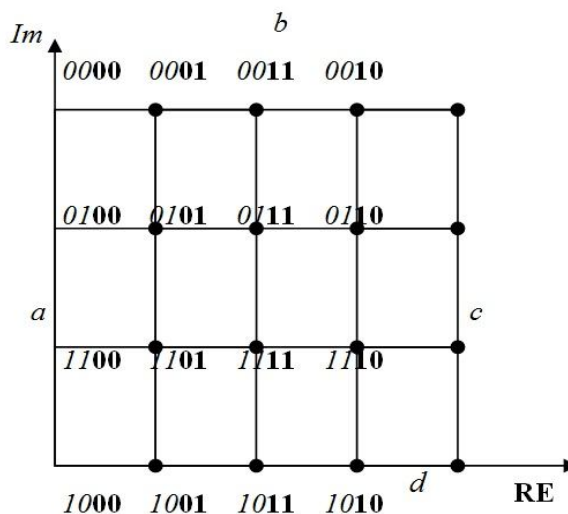


Рис. 7. Двовимірне маніпуляційне кодування

Ізометрією фрагмента сузір'я, зображеного на рис. 7 (заміною прямого кута між координатними векторами на кут $\pi/3$, тобто проекцією сузір'я в афінну систему координат) отримуємо фрагмент сузір'я НАР, еквівалентний побудованому методом композиції елементарних чотириточкових сузір'їв (рис. 8).

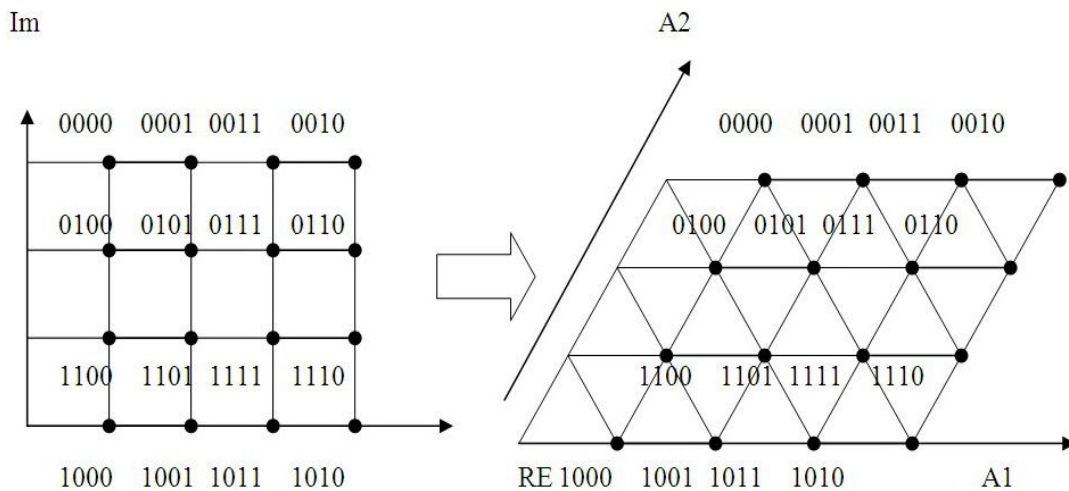


Рис. 8. Ізометрія двовимірного маніпуляційного коду

В більшості випадків форма сигнального сузір'я близька до кола і число сигнальних точок, розташованих вздовж координатних векторів, не дорівнює 2^n , отже метод ізометрії може бути застосований лише до фрагментів сузір'їв. Як пілотний сигнал для кожного сузір'я, вибирався сигнал з амплітудою, найближчою до середньої амплітуди сузір'я. Такий вибір забезпечує максимальне наближення $K1, K2, k1$ та $k2$ до одиниці, що зменшує похибки при математичних операціях, які пов'язані з обмеженою розрядністю процесорів.

Коди сигналів, які вибрано у якості пілотних, приведені в табл. 1:

Коди пілот-сигналів		Табл. 1	
Назва сигнального сузір'я	Код пілот-сигналу	Назва сигнального сузір'я	Код пілот-сигналу
НАР 8	0	НАР 64	19
QAM 8	1	QAM 64	11
CubeAM 8	3	CubeAM 64	10
НАР 16	7	НАР 128	37
QAM 16	1	QAM 128	57
CubeAM 16	5	CubeAM 128	83
НАР 32	3	НАР 256	78
QAM 32	9	QAM 256	115
CubeAM 32	7	CubeAM 256	102

Висновки. Розроблено сигнальні сузір'я на основі оптимальних за завадостійкістю двовимірних регулярних структур. Було розглянуто ізометрію тривимірного маніпуляційного коду та проведено порівняльний аналіз відносно двовимірного, в результаті чого CubeAM показала більш продуктивний рівень приймання та передачі високооб'ємної інформації в сучасних системах передачі даних (LTE). Запропоновані коди сигналів, які було обрано у якості пілотних. Проведено порівняльний аналіз між сигнальними сузір'ями квадратурно-амплітудно-фазової модуляції (QAM) та кубічно-амплітудно-фазової модуляції (CubeAM) та зроблено висновок щодо ефективності просторового сигнального сузір'я кубічно-амплітудно-фазової модуляції, оскільки вона має найщільніше укладання. Виходячи

з аналізу авторами запропоновано метод підвищення ефективності використання блокових завадостійких кодів в системах зі зворотнім зв'язком для виправлення пакетів помилок.

Список використаної літератури

1. Гостев В. И. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами / В. И. Гостев, В. К. Стеклов. – Київ: Радіоаматор, 1998. – 704.
2. Емельянов Г. А. Передача дискретной информации / Г. А. Емельянов, В. О. Шварцман. – Москва: Радио и связь, 1982. – 240 с.
3. Толубко В. Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізницевої модуляції високого порядку / В. Б. Толубко, Л. Б. Беркман, С. В. Козелков. – Зв'язок. – 2016. – №4. – С. 3-7.
4. Толубко В. Б. Порівняльна характеристика завадостійкості систем при використанні n -вимірних багатопозиційних сигналів / В. Б. Толубко, Л. Б. Беркман, С. І. Отрох, Є. П. Гороховський, В. О. Ярош – Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку – 2017. – №2(46) – С. 5-11.

References

1. Gostiev V. I., Steklov V. K. "Systems of automatic control with digital regulators." *Kyiv: Radioamator* (1998): 704.
2. Emel'yanov G. A., Shwarczman V. O. "Discrete information transmission." *Moskva: Radio i svyaz'* (1982): 240.
3. Tolubko V. B., Berkman L. N., Kozelkov S. V. "Forming of multiposition signal of 5G technologie on a base of high order phase-difference modulation." *Zviyazok 4* (2016): 3-7.
4. Tolubko V. B., Berkman L. N., Otrokh S. I., Horokhovskiy Ye. P., Yarosh V. O. "Comparative description of the hindrance of systems using N -dimensional multy-position signals." *Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviyazku 2* (2017): 5-11.

Автори статті

Толубко Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, ректор Державного університету телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (44) 248 85 97. E-mail: v.tolubko@dut.edu.ua

Беркман Любов Наумівна – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (50) 179 42 67. E-mail: berkman@dut.edu.ua

Отрох Сергій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (63) 591 94 09. E-mail: sotrokh@ukrtelecom.ua

Кравченко Владислав Ігорович – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav_kravchenko@mail.ua

Authors of the article

Tolubko Volodymyr Borysovych – sciences doctor (technic), professor, rector of the State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (44) 248 85 97. E-mail: v.tolubko@dut.edu.ua

Berkman Liubov Naumivna – sciences doctor (technic), professor, vice-rector for scientific and pedagogical work, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (50) 179 42 67. E-mail: berkman@dut.edu.ua

Otrokh Serhii Ivanovych – candidate of science (technic), head of the department of mobile video and information technologies, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (63) 591 94 09. E-mail: sotrokh@ukrtelecom.ua

Kravchenko Vladyslav Ihorovych – post-graduate student of the department of mobile video and information technologies, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav_kravchenko@mail.ua

Дата надходження
в редакцію: 17.06.2017 р.

Рецензент:
доктор технічних наук, професор М. М. Климаш
Національний університет «Львівська політехніка»