

3. Dzh. Uajt, D. Chojd. Polijetilen, polipropilen i drugiepoliolefiny / Per. s angl. jaz. pod. red. E. S. Cobkallo — Sankt-Peterburg, Profesija, 2006. — 256 s. — Bibliogr.: s. 249–255. — 300 jekz. — ISBN 978-966-96178-2-0
4. Metody roblastnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravlenija : Uchebnik / Pod red. N.D. Egupova, izdanie 2-oe, stereotipnoe. — M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2002.-744s.
5. Barsegjan A.A. Metody i modeli analiza dannyh: OLAP i Data Mining / Barsegjan A.A., Kuprijanov M.S., Stepanenko V.V — SPb.: BHV-Peterburg, 2004.—336s. - ISBN: 5-94157-522-H.
6. Sigeru Omatu, Nejrouravlenie i ego prilozhenija / Sigeru Omatu, Marzuki Halid, Rubija Jusof — M.: IPRZhR, 2000. — 272 s. — ISBN: 5-93108-006-6.

Рецензія/Peer review : 6.1.2015 р. Надрукована/Printed :24.1.2015 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 621.391.8

Д.В. МИХАЛЕВСЬКИЙ, М.Д. ГУЗЬ  
Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РУХУ АБОНЕНТІВ НА ЕФЕКТИВНУ ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ WI-FI

*В даній роботі проведено дослідження впливу ефекту доплерівського зміщення частоти на основний критерій якості каналу передачі для безпроводних мереж стандарту 802.11 Wi-Fi. Для цього, насамперед, проведено аналіз особливостей поширення хвиль у діапазоні 2.4 ГГц та встановлено, що ефект Доплера залежить від характеристик носійної частоти сигналу та швидкості руху приймального обладнання. Тому, будь-які системи передачі із OFDM модуляцією є досить чутливими до переміщень у просторі.*

*Виконано аналіз доплерівського зміщення частоти, як негативного фактора при передачі інформації, так і для методів, які дають змогу використовувати це явище для виявлення об'єктів та їх положення у просторі. Це дало змогу визначити оптимальні умови для проведення досліджень та запропонувати структуру мережі. Після проведення експериментальних досліджень було виявлено, що будь-яке переміщення прийомо-передавального обладнання стандарту 802.11 у просторі, вносить суттєвий вплив на ефективну швидкість передачі інформації у каналі. Найбільша зміна критерію ефективності починається при швидкості руху 1 м/с та більше.*

*Ключові слова: доплерівське зміщення частоти, безпроводний канал, ефективна швидкість передачі інформації.*

D. MICHALEVSKIY, M. GUZ  
Vinnytsia national technical university

### INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THE SUBSCRIBERS MOVEMENT ON EFFECTIVE DATA TRANSFER SPEED IN WI-FI NETWORKS

*Abstract. In this paper, a study of the influence of Doppler frequency shift effect on the main criterion of channel quality of the wireless network standard 802.11n was carried out. However, as the 802.11x family of standards is a wireless technology, it is necessary to pay attention to the losses associated with the mobility of subscribers. In this case, at the input of subscriber's receiver it will be observed the slowly changing signal strength, which depends on the position in space, and the rapid change, which depends on the time and velocity. Exactly the rapid change in signal strength is called the Doppler shift frequency effect.*

*The results of studies proved that using MIMO, the total radiation power of transmitting antennas is less than 100 mW. Any displacement of the transceiver equipment of standard 802.11 makes a significant impact on the effective information transmission rate in the channel.*

*At speeds of 1 m/s it is observed a significant decrease of the efficiency criterion, and at speeds two or more meters per second – the falling reaches value of 1,5... 2 times.*

*Key words: Doppler frequency shift, wireless channel, effective data rate.*

### Вступ

Мережі сімейства стандартів 802.11x характеризуються постійним розвитком в напрямку підвищення головного критерію якості – ефективної швидкості передачі інформації. В загальному випадку, цей критерій має прямо пропорційну залежність від рівня потужності сигналу на вході приймального пристрою та визначає параметр якості сигналу. Як відомо [1], на такий параметр мають вплив наступні фактори: енергетичні параметри і тип модуляції, затухання сигналу у безпроводному середовищі передачі, стан та властивості навколишнього середовища, обмеження потужності сигналу передавачів, зниження рівня ортогональності у сигналах OFDM із-за ефекту багатопроменевого поширення хвиль у приміщеннях, використання методів просторового кодування сигналів (MIMO), наявність ефекту Доплера для рухомих абонентів, інтерференційні та шумові завади і інш.

Оскільки, сімейство стандартів 802.11x є безпроводною технологією, то необхідно звернути увагу на втрати, що пов'язані із мобільністю абонентів. В такому випадку, на вході приймача абонента, будуть спостерігатись явища повільної зміни потужності сигналу, що залежить від положення у просторі, та швидкої зміни, що залежить від часу та швидкості руху. Саме швидка зміна потужності сигналу отримала назву ефекту доплерівського зміщення частоти.

Найбільш чутливими до ефекту зміщення частоти каналу передачі від швидкості руху приймача є системи що використовують OFDM модуляцію, до яких належать мережі сімейства стандартів 802.11x [2].

Оскільки, для більшості абонентів є характерним переміщення у просторі відносно точки доступу, то враховуючи довжину хвилі стандарту Wi-Fi, що становить близько 12 см, можна стверджувати, про високу імовірність виникнення значних змін характеристик головного критерію якості. Таким чином, є актуальним проведення досліджень для встановлення особливостей поведінки безпроводного каналу стандарту 802.11 від зміни швидкості руху абонентів.

### Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження особливостей поведінки безпроводного каналу стандарту 802.11 від зміни швидкості руху абонентів на основі теоретичних та статистичних експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз існуючих наукових робіт та визначити особливості доплерівського зміщення частот для сигналів частотного діапазону 2.4 ГГц;
- розробити структуру мережі та методик експериментальних досліджень;
- виконати експериментальні дослідження залежності ефективної швидкості передачі інформації від швидкості руху абонентів із використанням статистичної оцінки при застосуванні технології просторового кодування сигналів MIMO.

### Теоретичні відомості

В загальному випадку, для безпроводного каналу передачі інформації, доплерівське зміщення частоти залежить від двох параметрів [3]: носійної частоти та швидкості руху. За результатами досліджень у [3], можна стверджувати, що величина доплерівського зсуву частоти на вході приймача буде змінною для різних кутів прийому. Цей ефект має незначний вплив на системи передачі із вузько-спрямованими антенами. Для мереж стандарту 802.11, найбільш поширеним є використання не спрямованих антен. Тоді, максимальне доплерівське зміщення частоти, для носійних в діапазоні частот 3..60 ГГц та швидкості руху приймача 3..350 км/год, буде знаходитись в діапазоні 10 Гц .. 20 кГц.

Якщо враховувати побудову безпроводних каналів стандарту 802.11 як «точка доступу – абонент» і «абонент – абонент», при яких є рухомими як передавачі так і приймачі, то доплерівське зміщення частоти можна записати як [4]:

$$f = f_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}, \quad (1)$$

де  $f$  – змінена частота носійної сигналу;  $f_0$  – початкова частота носійної сигналу;  $c$  – швидкість світла;  $v$  – швидкість передавача відносно приймача сигналу;  $\varphi$  – кут між напрямком випромінювання сигналу і напрямком руху передавача.

Як видно із наведеної формули, доплерівське зміщення частоти буде мати найбільше значення під час паралельної складової руху, коли абонент віддаляється або наближається відносно точки доступу. В такому випадку, можливе виконання наступних умов:  $\varphi \rightarrow 0$  або  $\varphi \rightarrow 180^\circ$ , та  $v \ll c$ . Тоді змінену частоту сигналу можна записати так [4]:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \varphi\right).$$

Якщо абонент буде рухатись по колу і матиме тангенціальне прискорення, існує імовірність виникнення ситуації, при якій напрям випромінювання хвилі та напрямок руху абонентів знаходяться під кутом  $90^\circ$ , і формула (1) набуде наступний вигляд:

$$f \approx f_0 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

Ефект Доплера вносить, як правило, негативний вплив на параметри безпроводного каналу, і як наслідок виникають помилки при передачі інформації. Але, на даний час, існують методи, які дають змогу використовувати це явище для виявлення об'єктів та їх рухів у приміщеннях. Один із них має назву Wi-Vi [5], особливістю якого є використання двох передавальних антен та однієї приймальної в діапазоні 2,4 ГГц. Оцінка руху об'єктів виконується у два етапи: перший – визначення параметрів середовища приймальною антеною при випромінні сигналів двома передавачами; другий – визначення параметрів середовища при виконанні рухів об'єктів у приміщенні. Порівняння параметрів сигналів на двох етапах дає інформацію про переміщення об'єктів у просторі. Інший метод отримав назву – WiSee [6], що дозволяє визначати рухи об'єктів незалежно від розташування у приміщенні при використанні діапазону частот 5 ГГц. Особливістю такого методу є виділення доплерівського зміщення частоти передавального сигналу для ширини каналу у 20 МГц (якщо взмах руки становить 0,5 м/с, то зміщення частоти буде біля 17 Гц). Крім того, використання

вказаних методів є можливим тільки при використанні технології MIMO [7].

У роботі [8] встановлено, що для безпроводного каналу, в якому застосовується технологія MIMO, як математичну модель, можна використовувати імпульсну характеристику фільтра в якій присутні параметри просторового положення і коефіцієнту відбиття. При врахуванні рухомих абонентів у мережі, модель каналу можна записати так:

$$h(t, \tau, d) = \sum_{i=1}^N k_i(d) \delta(1 - \tau_i) \exp(j2\pi f_n(t\zeta_i - \tau_i)),$$

де  $N$  – кількість передавачів та приймачів при використанні MIMO;  $t$  – координата часу;  $d$  – просторова координата;  $k$  – коефіцієнт послаблення сигналу;  $\tau$  – час затримки сигналу у середовищі;  $\zeta$  – коефіцієнт доплерівського зміщення частоти сигналу;  $\delta(t)$  – дельта імпульсна характеристика.

Як показують дослідження у [8], використання технології MIMO дозволяє значно зменшити наявність помилок при передачі інформації у безпроводному каналі, але виключити вплив доплерівського зміщення частоти є практично неможливим.

**Методика досліджень**

Враховуючи вище сказане, для проведення досліджень, було запропоновано структуру мережі стандарту 802.11n у приміщенні розмірами  $L = 17$  м та  $D = 6$  м, як показано на рис. 1.

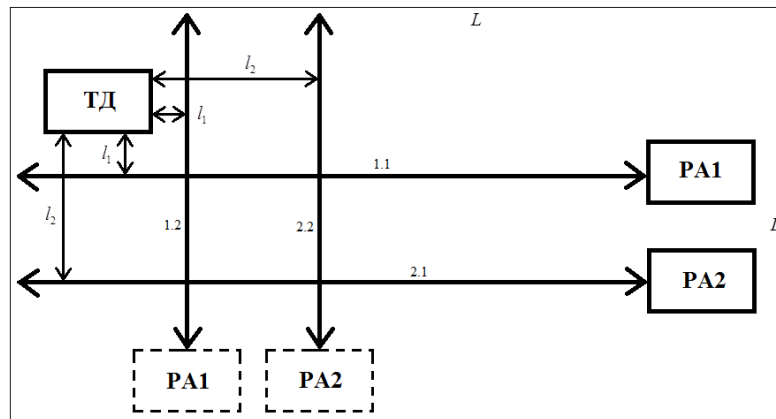


Рис. 1. Схема досліджень

Запропонована структура мережі передбачає наявність точки доступу (ТД) і двох рухомих абонентів РА1 та РА2. Розташування ТД в приміщенні є одним із двох найбільш поширених варіантів. Для кожного абонента створено відповідні маршрути руху: маршрути 1.1 і 1.2 на відстані  $l_1 \approx 0$  м від ТД; маршрути 2.1 і 2.2 на відстані  $l_2 \approx 3$  м від ТД. Основним критерієм для досліджень є ефективна швидкість передачі інформації  $V, Mb/c$  через безпроводний канал стандарту 802.11n, який було встановлено між двома рухомими абонентами із використанням ТД. Цей критерій визначався як середнє значення за час проходження абонентом повної відстані встановлених маршрутів із відповідною швидкістю руху. Вибір двох рухомих абонентів надає найбільш оптимальні умови для проведення досліджень із-за особливостей архітектури стандарту 802.11 [2]. Ще одним врахованим фактором є наявність технології MIMO у ТД, яка повинна забезпечувати покращення характеристик безпроводного каналу в умовах руху абонентів у просторі. В результаті цього, було запропоновано проводити дослідження із застосуванням однієї, двох та трьох випромінюючих антен.

**Результати досліджень**

В першу чергу, розглянемо існування одного рухомого абонента у запропонованій мережі. Результати досліджень наведено на рис. 2.

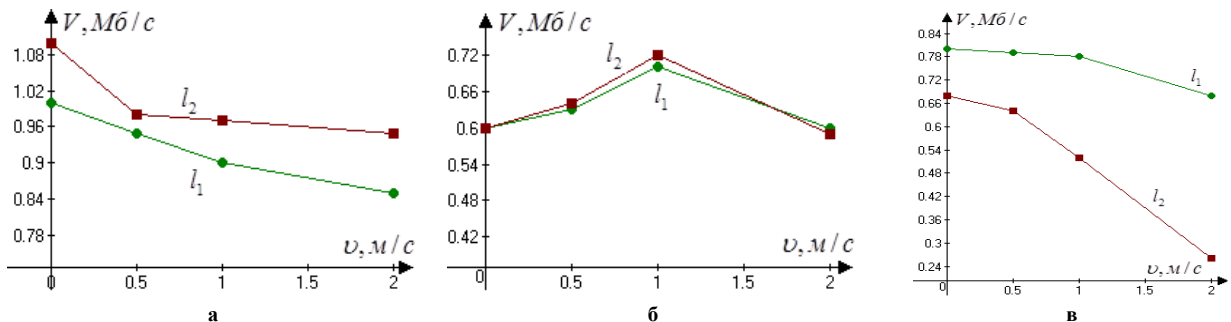


Рис. 2. Залежність швидкості передачі інформації від швидкості руху для одного абонента при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

Як видно із графіків, спостерігається падіння ефективності передачі інформації від збільшення швидкості руху абонента. Найбільший вплив ефекту Доплера спостерігається при використанні однієї антени. Крім того, було встановлено, що незначне зменшення швидкості передачі для однієї і двох антен відносно трьох, виникає внаслідок обмеження сумарної потужності випромінювання ТД, що становить не більше 100 мВт для  $n$ -кількості випромінювачів.

Далі розглянемо типові випадки для можливих напрямків руху абонентів у приміщенні на основі маршрутів 1,1 і 2,1, що являють собою: зустрічний рух, протилежно-напрявлений рух, паралельний рух. Результати досліджень наведено на рис. 3, рис. 4 та рис. 5 відповідно.

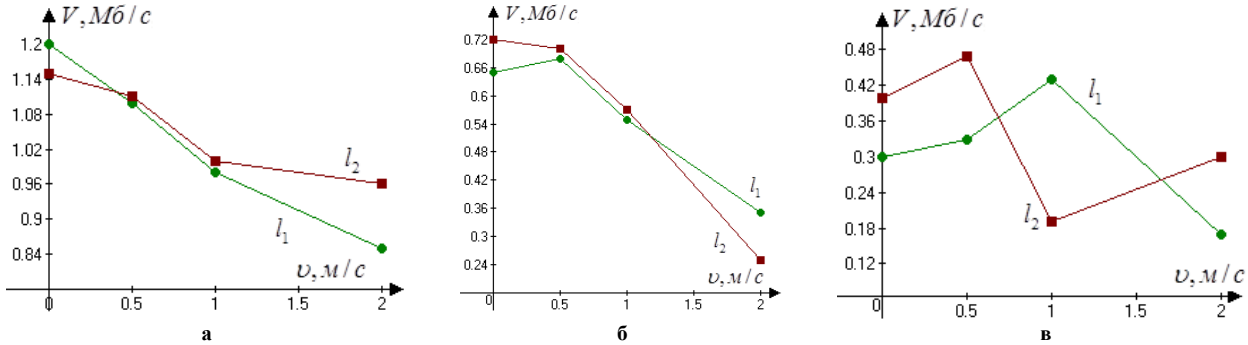


Рис. 3. Залежність швидкості передачі інформації від швидкості руху для зустрічного руху двох абонентів при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

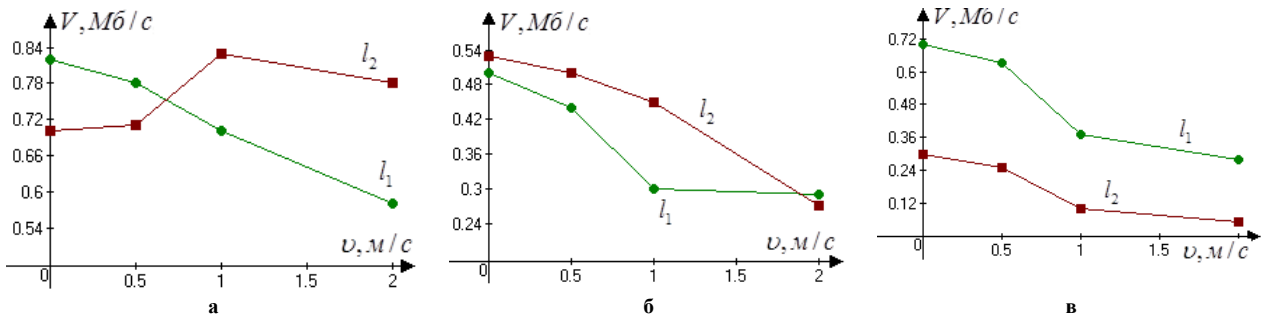


Рис. 4. Залежність швидкості передачі інформації від швидкості руху для протилежно-напрявленого руху двох абонентів при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

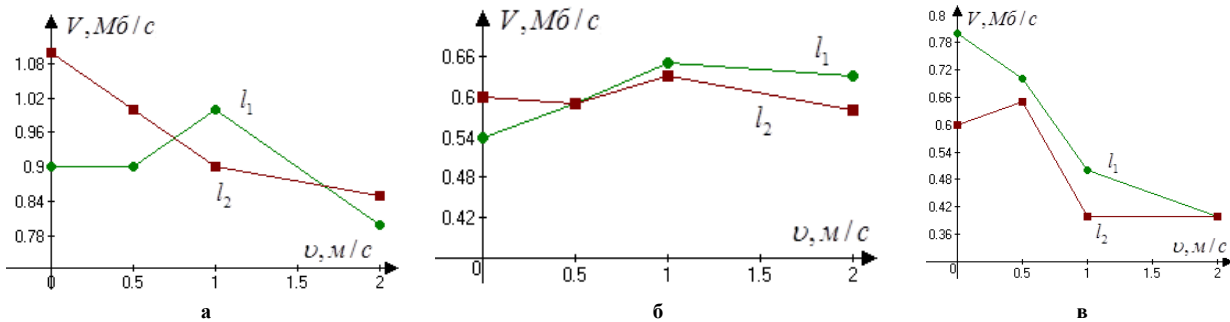


Рис. 5. Залежність швидкості передачі інформації від швидкості руху для паралельного руху двох абонентів при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

Останній випадок – перпендикулярний рух для двох абонентів, так як на даному етапі можна припустити, що існує імовірність появи руху абонентів із тангенційним прискоренням, при якому доплерівське зміщення частот буде мати мінімальне значення. Це передбачає використання маршрутів, для руху абонентів, розташованих під кутом  $90^\circ$  один до одного, як показано на рис. 1. Результати досліджень наведено на рис. 6.

### Висновки

Отже в даній роботі було проведено дослідження впливу ефекту доплерівського зміщення частоти на основний критерій якості безпроводної мережі стандарту 802.11n. Для систем передачі Wi-Fi які працюють у не ліцензованих діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц, збільшення кількості помилок на приймальній стороні збільшується при досягненні абонентами швидкості від 0,5 м/с і вище.

На основі запропонованої структури мережі та проведених експериментальних досліджень. було встановлено:

- при використанні технології MIMO, сумарна потужність випромінювання передавальних антен становить не більше 100 мВт, крім того, чим більша кількість використовуваних антен, тим вища стабільність параметрів каналу при передачі інформації;

- будь-яке переміщення прийомо-передавального обладнання стандарту 802.11 у просторі вносить суттєвий вплив на ефективну швидкість передачі інформації у каналі.
- при швидкостях руху 1 м/с спостерігається значне зменшення критерію ефективності, а при двох і більше – падіння досягає у 1,5..2 рази.

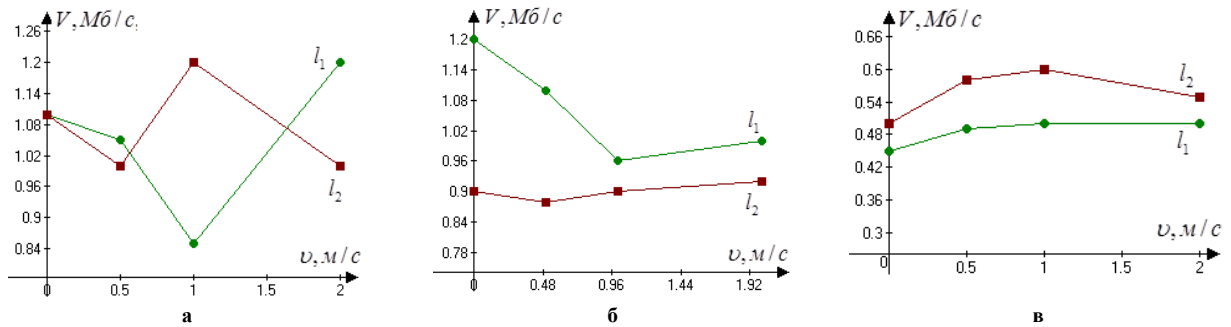


Рис. 6. Залежність швидкості передачі інформації від швидкості руху для перпендикулярного руху двох абонентів при використанні: трьох антен (а); двох антен (б); однієї антени (в)

### Література

1. Скорость передачи, межканальные и межсимвольные искажения / А.К. Сундучков, Е.А. Фадеева, А.В. Яцук, К.С. Сундучков // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2010. – № 680. – С. 102-109.
2. CWP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide: Exam PW0-270 / D.A. Wescott, D.D. Coleman, P. Mackenzie, B. Miller – Wiley Technology Pub., 2011. – P. 712.
3. Жоую П. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона / П. Жоую, Х. Фарук // Электроника. – 2010. – №3. – С. 86-94.
4. Ландау Л. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. 2. Теория поля / Л. Ландау, Е. Лифшиц. – М: Наука, 1988г. – 512с.
5. Adib F. See Through Walls with Wi-Fi! / F. Adib, D. Katabi // SIGCOMM'13 (August 12-16). 2013. – ACM: Hong Kong, China. – Pp. 75-86.
6. Whole-Home Gesture Recognition Using Wireless Signals / Qifan Pu, Sidhant Gupta, Shyamnath Gollakota, Shwetak Patel // MobiCom'13 (September 30-October 4), – ACM: Miami, FL, USA. – Pp. 27-38.
7. 802.11ac MU-MIMO: Bridging the MIMO Gap in Wi-Fi / Qualcomm Atheros Inc. – January, 2015. – 14p.
8. Вершинин А.С. Модель физического уровня системы / А.С. Вершинин, Д.А. Коротков, Е.П. Ворошилин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), часть 1. – С. 78-84.

### References

1. Skorost' peredachy, mezhkanal'nie y mezhsimvol'nie yskazheniya / A.K. Sunduchkov, E.A. Fadeeva, A.V. Yatsuk, K.S. Sunduchkov // Visn. Nats. un-tu "L'viv. politekhnika". – 2010. – # 680. – С. 102-109.
2. CWP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide: Exam PW0-270 / D.A. Wescott, D.D. Coleman, P. Mackenzie, B. Miller – Wiley Technology Pub., 2011. – P. 712.
3. Zhouyu P. Vvedeniye v shirokopolosnie systemi svyazy myllymetrovoho dyapazona / P. Zhouyu, Kh. Faruk // Электроника. – 2010. – #3. – S. 86-94.
4. Landau L. Teoretycheskaya fizyka: Ucheb. posobyey. V 10 t. T. 2. Teoryya polya / L. Landau, E. Lyfshyts. – M: Nauka, 1988h. – 512s.
5. Adib F. See Through Walls with Wi-Fi! / F. Adib, D. Katabi // SIGCOMM'13 (August 12-16). 2013. – ACM: Hong Kong, China. – Pp. 75-86.
6. Whole-Home Gesture Recognition Using Wireless Signals / Qifan Pu, Sidhant Gupta, Shyamnath Gollakota, Shwetak Patel // MobiCom'13 (September 30-October 4), – ACM: Miami, FL, USA. – Pp. 27-38.
7. 802.11ac MU-MIMO: Bridging the MIMO Gap in Wi-Fi / Qualcomm Atheros Inc. – January, 2015. – 14p.
8. Vershynyn A.S. Model' fizycheskoho urovnya systemi / A.S. Vershynyn, D.A. Korotkov, E.P. Voroshylyn // Dokladi TUSURa. – 2011. – # 2 (24), chast' 1. – С. 78-84.

Рецензія/Peer review : 16.1.2015 р.

Надрукована/Printed :24.1.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією