

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**Нух Таха Насіф**

УДК 621.396

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ LTE-ADVANCED**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків-2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Лихограй Василь Григорович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
доцент кафедри основ радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Горобець Микола Миколайович,**  
Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Гомозов Андрій Володимирович**  
Харківське представництво генерального замовника-  
Державного космічного агентства України (філія №3),  
начальник Сертифікаційного центру ракетно-космічної  
техніки

Захист відбудеться " 21 " січня 2014 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна,14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, проспект Леніна, 14.

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " грудня 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09

В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В основі реалізації фізичного рівня цифрової радіотехнічної системи передачі інформації (ЦРСП) довгострокової перспективи (LTE – Long Term Evolution) і її покращеної версії – LTE-Advanced партнерського проекту 3G (3GPP - 3rd Generation Partnership Project) є технології просторової обробки сигналів за допомогою багатоелементних антен з багатьма входами - багатьма виходами (MIMO – Multiple Input Multiple Output) і ортогонального частотного мультиплексування (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), які дозволяють істотно підвищити такі важливі параметри ЦРСП як завадозахищеність (зменшення імовірності бітової помилки – ІБП), пропускна спроможність (ПС) і дальність передачі.

Важливою умовою підвищення цих параметрів в ЦРСП LTE і LTE-Advanced є наявність інформації про канал зв'язку (Channel State Information - CSI) на стороні передавача, що припускає оцінку каналної матриці з подальшим просторово-частотним кодуванням на підставі заздалегідь сформованих таблиць найкращих вагових коефіцієнтів для багатоелементних антен, що реалізовано в LTE і LTE-Advanced згідно 3GPP Release 8-10.

У зв'язку з цим актуальною є тема дисертації в області бездротових технологій, направлена на пошук альтернативних шляхів підвищення показників якості в ЦРСП з MIMO LTE-Advanced, зокрема, пропускної спроможності і завадозахищеності, що ґрунтується на формуванні більш сильних з точки зору відношення сигнал-шум (ВСШ) власних незалежних просторових каналів (ВНПК) MIMO, адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку до умов поширення радіохвиль (метод динамічної безперервно діючої замкнутої петлі зворотного зв'язку).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційна робота пов'язана з реалізацією положень "Концепції національної інформаційної політики" і "Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки". Матеріали дисертаційних досліджень зв'язані з плановою держбюджетною науково-дослідною роботою № 260 «Дослідження потенційних можливостей ефективного функціонування мережевих реконфігурованих інформаційно-вимірювальних систем екологічного моніторингу» (№ ДР 0111U002903), яка виконувалася в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) і в якій дисертант був виконавцем.

**Мета роботи** полягає у розробці методів щодо поліпшення показників якості ЦРСП з MIMO LTE-Advanced, які базуються на формуванні більш сильних з точки зору ВСШ власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку.

### **Задачі дослідження:**

– дослідження впливу завмирань в просторових каналах ЦРСП з MIMO LTE-Advanced при багатопроменевому поширенні радіохвиль на підставі математичних моделей: великомасштабних завмирань, Кларка (Кларка-Ганса), Джейкса і променевої моделі радіоканалу та аналіз шляхів підвищення показників якості ЦРСП з MIMO;

–аналіз завадозахищеності (ІБП) ЦРСПІ LTE-Advanced в гаусівському, релеївському та райсівському просторових каналах;

–аналіз пропускної спроможності ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced з урахуванням формування більш сильних з точки зору ВСШ власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку до умов поширення радіохвиль (ПРХ), в порівнянні з методом просторово-частотного кодування за допомогою таблиць найкращих вагових коефіцієнтів багатоелементної антени згідно 3GPP Release 8-10.

–розробка керуючої процедури аналізу енергетично сильних і слабких просторових каналів в ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced;

–аналіз шляхів підвищення пропускної спроможності з урахуванням взаємних зв'язків в багатоелементній антені з МІМО.

**Об'єкт дослідження.** Процеси функціонування ЦРСПІ LTE-Advanced на основі багатоелементних антен в середовищі з МІМО.

**Предмет дослідження.** Моделі та методи, які забезпечують прийнятні на практиці показники якості ЦРСПІ LTE-Advanced, що базуються на використанні просторової обробки сигналів з МІМО.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач був застосований математичний апарат електродинаміки і теорії поширення радіохвиль, теорії антен, теорії оптимізації, теорії імовірності, методи просторово-часової та просторово-частотної обробки сигналів, методи обчислювальної математики і чисельного моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Під час розв'язання поставлених задач автором були отримані такі нові наукові результати:

–запропоновано новий метод підвищення пропускної спроможності в ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced, що відрізняється від запропонованого в 3GPP Release 8-10 формування більш сильних з точки зору ВСШ власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку до умов ПРХ в каналі МІМО (метод динамічної безперервно діючої замкнутої петлі зворотного зв'язку);

–проведено моделювання пропускної спроможності у власних незалежних просторових каналах ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced і отримано новий результат, який свідчить про те, що адаптація з урахуванням CSI має вигірше значення переважно при малих ВСШ;

–на підставі модельних розрахунків отримано нові додаткові можливості підвищення ПС за рахунок зменшення міжелементної відстані в багатоелементній антені МІМО;

–показано, що в схемі МІМО 2x2 формуються сильний і слабкий просторові підканали, які визначаються з урахуванням власних чисел каналної матриці.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені математичні моделі просторової обробки сигналу, які ґрунтуються на формуванні більш сильних з точки зору ВСШ власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням CSI до умов ПРХ і керуюча процедура аналізу енергетично сильних і слабких просторових каналів дозволили виявити додаткові практичні можливості в підвищенні пропускної спроможності і завадозахищеності ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced. Результати дисертації використані в комплексній держбюджетній науково-дослідній роботі № 260

«Дослідження потенційних можливостей ефективного функціонування мережевих реконфігурованих інформаційно-вимірювальних систем екологічного моніторингу» (№ ДР 0111U002903), яка виконувалася в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ), де дисертант був виконавцем. Запропонований метод підвищення пропускної спроможності ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced також використано у навчальному процесі кафедри основ радіотехніки по курсу «Мережі та системи радіодоступу». Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними двома актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача у спільних публікаціях.** У роботах [1-12] автору належать такі наукові результати: у роботі [1] – запропоновано підхід до аналізу безпроводових каналів зв'язку; у роботах [2-3, 7-8] проведено моделювання ПС каналів МІМО з урахуванням інформації про стан каналу зв'язку, в т.ч. за умови формування більш сильних адаптованих власних незалежних просторових каналів; у роботах [4, 10-11] з допомогою запропонованих моделей розрахунку завадозахищеності проведено моделювання імовірності бітової помилки в просторових каналах з райсівськими завмираннями сигналів; у роботі [5] автором проведено аналіз основних характеристик системи зв'язку LTE з МІМО (ПС, ІБП), в т.ч. для просторових каналів з релієвськими та райсівськими завмираннями; у роботі [6] автором розглянуто питання просторової обробки сигналів в системах стільникового зв'язку LTE та WiMAX, де застосовується технологія багатоелементних антен з МІМО; у роботі [9] проведено моделювання часових залежностей сигналу в просторових каналах при багатопробієвому поширенні радіохвиль на підставі статистичних моделей; у роботі [12] автором проведено аналіз шляхів підвищення пропускної спроможності з урахуванням взаємних зв'язків в багатоелементній антені з МІМО.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових семінарах кафедри основ радіотехніки ХНУРЕ, а також на 6 міжнародних наукових конференціях і форумах: 11-ій міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікації та комп'ютерної інженерії» (Львів - Славське 2012); 8-ій та 9-ій міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2012, -2013» (Севастополь 2012, 2013); II-ій міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2012); II-ій міжнародній науково-технічній конференції «Захист інформації і безпека інформаційних систем» (Львів, 2013); міжнародній конференції по теорії і техніці антен ICATT-2013 (Одеса, 2013).

**Публікації.** За темою дисертації надруковано 6 статей у провідних наукових фахових виданнях України, а стаття [2] надрукована в Німеччині в журналі European Science and Technology, а також опубліковано матеріали 6 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях і форумах.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 170 сторінок, з них – перелік використаних

скорочень на 2 сторінках, список використаних джерел на 8 сторінках, який містить 81 найменування, 3 додатки на 14 сторінках та 2 акти впровадження результатів роботи. Дисертація містить 53 рисунки та 3 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дослідження, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, наведено інші необхідні характеристики роботи.

У першому розділі розглянуто особливості застосування нової ЦРСП LTE-Advanced, в основі якої лежить технологія просторової обробки сигналів із багатоелементними антенами (БЕА) на передавальній і приймальній стороні - з багатьма входами й багатьма виходами (MIMO), використання якої дозволяє покращити такі важливі показники якості ЦРСП як спектральна ефективність чи пропускна спроможність (див. табл. 1) і завадозахищеність [4-6].

Таблиця 1

Вимоги до стандартів LTE, LTE-Advanced та IMT-Advanced щодо спектральної ефективності та ПС

	Направлення передачі в каналі	Схема антен MIMO	Стандарти		
			LTE (Ref. 8)	LTE –Advanced (Ref. 10)	IMT-Advanced
Пікова пропускна спроможність (біт/с)	DL (downlink)	8x8	-	1 Gbps	1 Gbps
	UL (uplink)	4x4	-	500 Mbps	-
	DL	4x2	300 Mbps	-	-
	DL	2x2	100 Mbps	-	-
	UL	2x4	75 Mbps	-	-
Пікова спектральна ефективність (біт/с)/Гц	DL	8x8	-	30	15
	UL	4x4	-	15	6.75
	DL	4x2	15	-	-
	UL	2x4	3.75	-	-
	UL	2x2	-	-	-

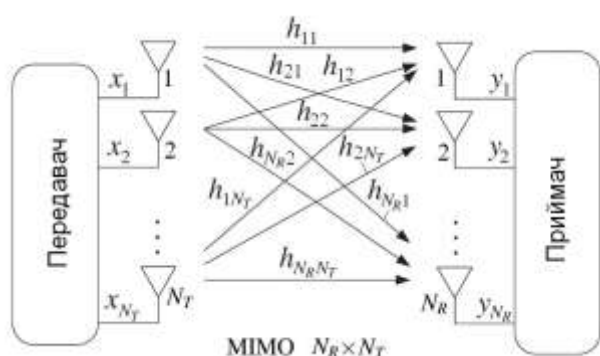


Рис. 1. Схема ЦРСП з MIMO

виходах каналу MIMO (на входах АЕ приймача) сигнали  $y_j$  можна записати в матричному вигляді:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

Нехай ЦРСП з MIMO складається з  $N_T$  передавальних і  $N_R$  приймальних антенних елементів (АЕ), як це показано на рис. 1. На входи каналу MIMO надходять  $i=1..N_T$  незалежних, неперервних, комплекснозначних сигналів, які можна представити у вигляді вектора

$\mathbf{x}^T = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{N_T}]^T$  розмірності  $N_T \times 1$ ,  $()^T$  – операція транспонування. Тоді на  $j=1..N_R$

де  $\mathbf{y}^T = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_{N_R}]$  – вектор вхідних сигналів в АЕ приймача розмірності  $N_R \times 1$ ;  $\mathbf{H}$  – канална матриця, елементи якої комплекснозначні коефіцієнти передачі  $h_{nm}$  від  $m$ -ого входу ( $m$ -ого передавального АЕ) на  $n$ -й вихід ( $n$ -й прийомний АЕ);  $\mathbf{n}^T = [n_1 \quad n_2 \quad \dots \quad n_{N_R}]$  – вектор шуму розмірності  $N_R \times 1$ , елементи якого випадкові процеси з гаусівським розподілом, некорельовані в часі, з нульовими математичним очікуванням та дисперсією.

Важливою умовою підвищення параметрів якості (завадозахищеності, спектральної ефективності) ЦРСП з MIMO LTE-Advanced є наявність інформації про стан каналу зв'язку (Channel State Information - CSI), що припускає оцінку каналної матриці  $\mathbf{H}$  на стороні приймача й передачу цієї інформації по зворотньому каналу на передавач, де здійснюється просторово-частотне кодування з використанням заздалегідь сформованих таблиць найкращих вагових коефіцієнтів БЕА для максимального узгодження переданого сигналу із просторовим каналом між базовою станцією (eNode) і абонентським терміналом (АТ, UE – User Equipment), що, власне, реалізовано в 3GPP Release 8-10 [4,5].

У роботі запропонований альтернативний спосіб підвищення ефективності ЦРСП з MIMO LTE-Advanced, який базується на використанні підканалів з найбільшими значеннями відношення сигнал/шум (ВСШ) за рахунок динамічної безперервно діючої замкнутої петлі зворотного зв'язку (ЗЗ) [2-3]. Покажемо це.

Канальну матрицю  $\mathbf{H}$  можна навести з допомогою сингулярного розкладання

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H, \quad (2)$$

де  $\mathbf{U}$  і  $\mathbf{V}$  – унітарні матриці розмірності відповідно  $N_R \times N_R$  й  $N_T \times N_T$ ;  $\mathbf{\Sigma}$  – матриця розмірності  $N_R \times N_T$ , діагональні елементи якої – власні значення матриці  $\mathbf{H}$  у вигляді  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{N_{\min}}$ ,  $N_{\min} = \min(N_T, N_R)$ , а недіагональні елементи дорівнюють нулю. Власні значення матриці  $\mathbf{H}$  мають фізичний зміст коефіцієнтів передачі просторових каналів.

Після підстановки (2) в (1), можна одержати аналогічне (1) рівняння:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{\Sigma} \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}}, \quad (3)$$

де  $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}$  й  $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{U}^H \mathbf{n}$  – відповідно вектори сигналу й шуму на виході діаграмо-утворюючої схеми (ДУС) приймача,  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{V}^H \mathbf{x}$  – вектор сигналу на вході ДУС передавача.

Згідно (3) передачу по каналу MIMO з CSI можна представити за допомогою узагальненої матриці  $\mathbf{\Sigma}$ , куди входять: ДУС передавача, у вигляді матриці  $\mathbf{V}$ ; безпосередньо канална матриця  $\mathbf{H}$  та ДУС приймача, представлена матрицею  $\mathbf{U}^H$  (рис. 2, а).

Оскільки матриця  $\mathbf{\Sigma}$  діагональна, рівняння (3) еквівалентне системі з  $r = \text{rank}(\mathbf{H}) = N_{\min}$  лінійних рівнянь

$$\tilde{y}_i = \sigma_i \tilde{x}_i + \tilde{n}_i, \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (4)$$

які є  $r$  незалежними просторовими каналами SISO (рис. 2, б) і ще називаються *власними*.

Таким чином, знання передавачем каналної матриці  $\mathbf{H}$ , реалізує замкнуту петлю ЗЗ, що дає можливість будувати адаптивну просторову обробку сигналів не тільки на приймальній, але й на передавальній стороні. На підставі адаптивної попередньої обробки в ДУС передавача на основі обчислення власних векторів матриці  $\mathbf{H}$ , у каналі MIMO неперервно формуються власні незалежні просторові канали SISO.

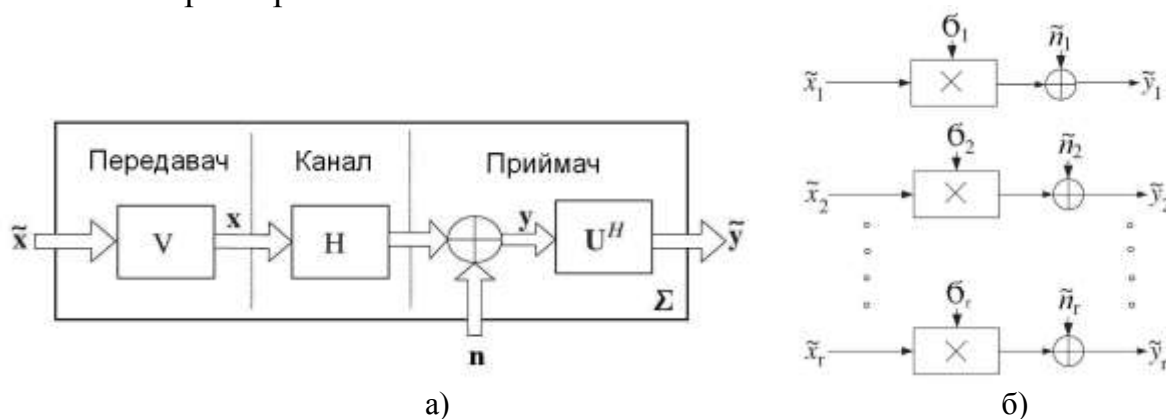


Рис. 2. ЦРСПІ з MIMO LTE-Advanced на основі узагальненої матриці  $\Sigma$  (а) та її власні просторові канали SISO (б)

У роботі запропонований спосіб підвищення пропускної здатності й завадозахищеності (зменшення ймовірності бітової помилки) у ЦРСПІ з MIMO LTE-Advanced, який базується на формуванні більш сильних стосовно ВСПІ власних незалежних просторових каналів (ВНПК), адаптованих з урахуванням CSI до швидко змінюваних умов поширення радіохвиль (ПРХ) у каналі MIMO, що відрізняє його від способу попереднього просторово-частотного кодування з використанням заздалегідь сформованих таблиць найкращих вагових коефіцієнтів для БЕА, запропонованого в 3GPP Release 8-10.

У другому розділі представлений аналіз статистичних підходів до моделювання завмирань у просторових каналах за допомогою статистичних моделей Кларка (Кларка-Ганса), Джейкса й променевої моделі радіоканалу (ПМРК), що дає можливість на етапі моделювання, одержуючи каналну матрицю  $\mathbf{H}$ , проводити кількісний аналіз якості створюваних ЦРСПІ з MIMO LTE-Advanced [1,9].

На підставі експериментальних даних запропонований загальний підхід оцінки втрат при наявності великомасштабних завмирань на трасі непрямой видимості, що має місце в більшості випадків ПРХ в умовах міста. Великомасштабні завмирання є середні втрати при переміщеннях АТ на відстані  $\gg 10\lambda$  і залежать від макроструктури каналу зв'язку. Для LTE і LTE-Advanced виділяються наступні смуги частот: 450-470 МГц, 470-482 МГц, 2100МГц, 3400-3600МГц і 3600-3800 МГц. На рис.3 наведені залежності втрат від відстані на трасі непрямой видимості при різних відстанях до перешкоди  $r_0$  і показниках ступеня загасання  $n$ .

Як видно із представлених на рис. 3 залежностей, загасання на трасі непрямой видимості для частоти  $f_0=450$  МГц можуть досягати  $L=120$  дБ на відстанях близько 1 км; для діапазону  $f_0=3800$  МГц вони становлять  $L=150$  дБ.



Середовище ПРХ для ЦРСПІ LTE-Advanced – це радіолінії при відсутності прямої видимості, де сигнал, що приймається, є сумою окремих хвиль, відбитих від великої кількості відбивачів і розсіювачів, розташованих випадковим чином навколо АТ, що визначає вид розподілу азимутального спектру потужності (АСП) сигналів, що приходять.

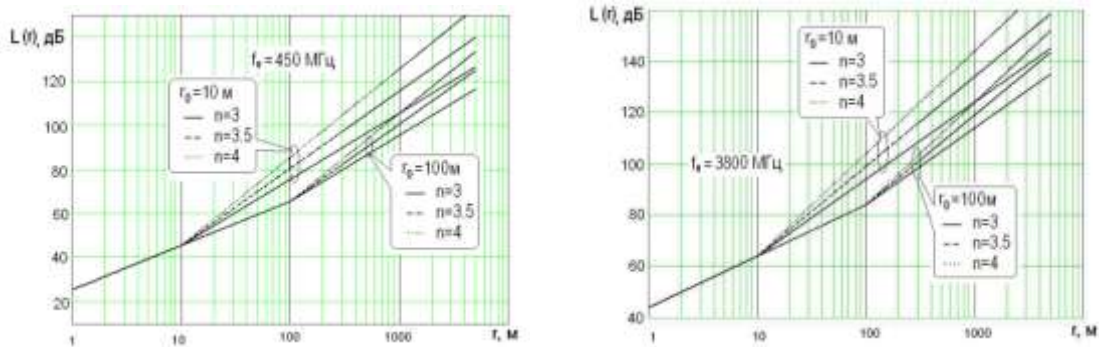


Рис. 3. Втрати при непрямій видимості на частотах  $f_0=450$  МГц і  $f_0=3800$  МГц

В основі багатьох статистичних підходів моделювання завмирань лежить формування доплерівського спектру з наступним Фур'є-перетворенням у часову область; при цьому розподіл АСП залежно від умов може змінюватися від рівномірного до нерівномірного.

У моделі Кларка доплерівський спектр отримано за допомогою фільтрації адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ). Залежно від того, як реалізується доплерівський фільтр (у часовій чи частотній області), модель Кларка має ряд модифікацій. У моделі Кларка-Ганса комплексний АБГШ формується в частотній області, потім піддається фільтрації в доплерівському фільтрі. За допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є зсунутий на частоту Доплера АБГШ перетворюється в часову область.

На рис. 4 представлені результати моделювання завмирань у багатопробеному каналі згідно моделі Кларка-Ганса. Як видно з рис. 4, амплітуди й фази завмирань мають відповідно релеївський і рівномірний розподіл. При збільшенні частоти Доплера до  $f_d=1000$  Гц завмирання можуть досягати  $-30$  дБ.

Завмирання в каналі відповідно до моделі Джейкса (рис. 5) також мають розподіли амплітуди близькі до релеївського, а фази – близькі до рівномірного, але ступінь їхньої схожості значно поступає аналогічним залежностям моделі Кларка-Ганса (див. рис. 4, а). Крім того, тут завмирання мають меншу глибину в порівнянні з моделлю Кларка-Ганса й при  $f_d=1000$  Гц становлять близько  $-20$  дБ (рис. 4,б і рис. 5,б).

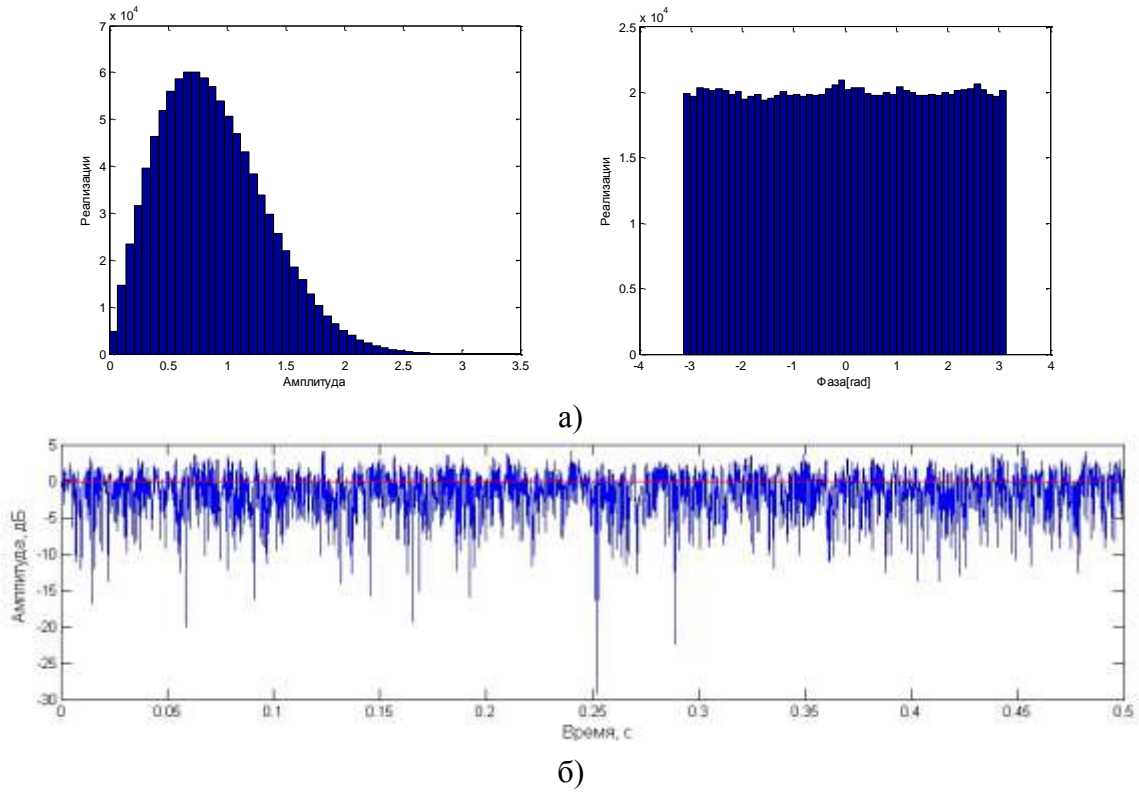


Рис. 4. Розподіл амплітуди й фази (а) і характеристика каналу в тимчасовій області (б) при частоті Доплера  $f_d=1000$ Гц

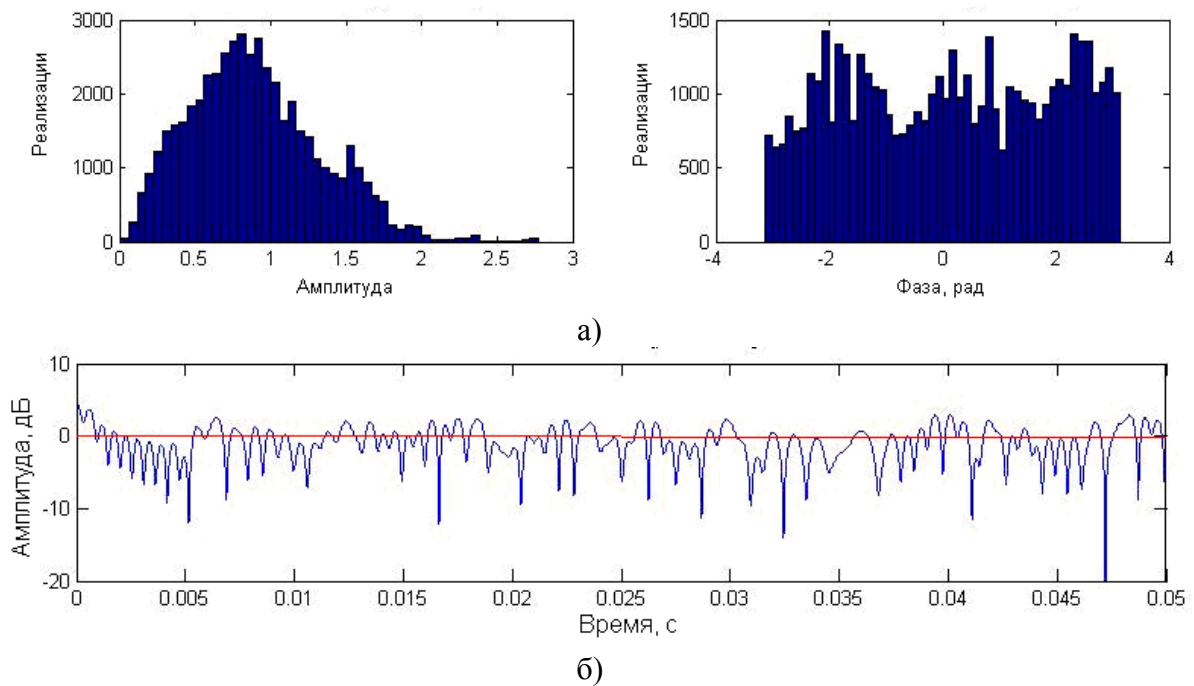


Рис. 5. Розподіл амплітуди й фази а) і характеристика каналу в часовій області б) для моделі Джейкса при частоті Доплера  $f_d=1000$ Гц

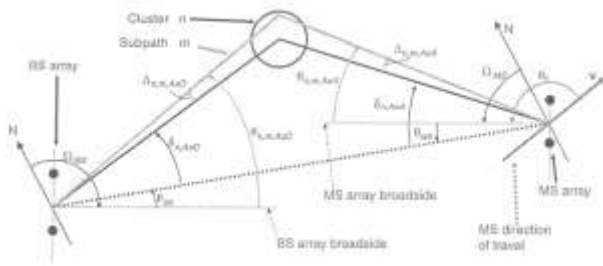


Рис. 6. Променева модель радіоканалу

Променева модель радіоканалу (ПМРК), як і модель Джейкса, отримана в результаті складання плоских хвиль (рис. 6), проте тут азимутальний спектр потужності може бути нерівномірним, що буває корисним при моделюванні ПРХ в умовах міста.

На рис. 7 представлені часові залежності завмирань згідно ПМРК.

Вихідні дані до моделювання обрані з урахуванням робочих діапазонів LTE і LTE-Advanced при швидкостях переміщення АТ  $v=30$  км/ч та  $v=200$  км/ч.

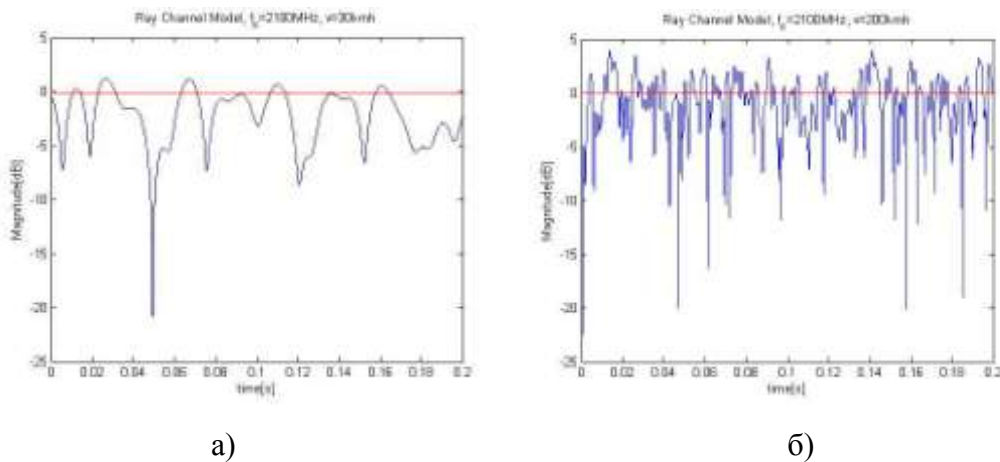


Рис. 7. Часові залежності завмирань згідно ПМРК при  $f_c=2100$  МГц і швидкостях  $v=30$  (а) і  $v=200$  км/год (б)

Як видно з рис. 7, підвищення частоти несучого коливання приводить до зменшення періоду флуктуацій і збільшення глибини завмирань. Згідно ПМРК (рис. 7) глибина завмирань росте зі збільшенням швидкості переміщення АТ (частоти Доплера) і може становити до  $-15$  дБ при  $v=30$  км/год або  $-20\dots-30$  дБ при  $v=200$  км/год на частоті  $f_c=2100$  МГц.

Таким чином, в результаті порівняльного аналізу статистичних моделей показано, що для опису завмирань у каналах МІМО найбільше доцільно використовувати моделі Кларка-Ганса та променево модель радіоканалу, згідно яких глибина завмирань росте зі збільшенням швидкості АТ (частоти Доплера) і може досягати до  $-30$  дБ на швидкостях понад 250 км/ч.

**У третьому розділі** розглянуті просторові багатопроменеві канали з релеївськими й райсівськими завмираннями з точки зору забезпечення в них необхідного рівня завадозахищеності (імовірності бітової помилки) стосовно ЦРСП LTE-Advanced [4-5, 10-11].

Миттєве відношення сигнал/шум (ВСШ) у релеївському каналі SISO дорівнює

$$\rho = \rho_0 |h|^2, \quad (5)$$

де  $\rho_0 = \frac{P_0}{\sigma_0^2}$  – середнє ВСШ,  $P_0$  – середня випромінювана потужність,  $\sigma_0^2 = E n \cdot \bar{n}^*$  – дисперсія випадкового АБГШ,  $|h|$  – амплітуда комплексного коефіцієнта передачі в каналі.

Оскільки амплітуда комплексного коефіцієнта передачі  $|h|$  має релеївський розподіл, функція густини розподілу імовірності випадкового ВСШ  $\rho$  буде мати експонентний вигляд:

$$f(\rho) = \frac{1}{\rho_0} \exp\left(-\frac{\rho}{\rho_0}\right). \quad (6)$$

Імовірність бітової помилки у каналі визначається як відношення середнього числа неправильно прийнятих біт до загального числа переданих. В подальших дослідженнях в якості референтної вибрана ІБП на рівні  $10^{-5} - 10^{-6}$  як така що відповідає сучасному стану заводо захищеності ЦРСШ стосовно передачі різнорідного трафіку [5-6]. Оскільки ВСШ є випадковою величиною, спочатку потрібно знайти ІБП даного виду модуляції для всіх можливих значень ВСШ  $\rho$ , а потім усереднити ІБП, використовуючи функцію густини розподілу імовірності ВСШ (6), обчислюючи інтеграл:

$$BER = \int_0^{\infty} f(\rho) BER(\rho) d\rho. \quad (7)$$

В основі усіх розглянутих нижче підходів визначення ІБП в просторових каналах лежить обчислення інтеграла (7). Так, після підстановки (5-6) в (7), ІБП в релеївському каналі SISO для сигналів з бінарною фазовою модуляцією буде такою [10]:

$$BER = \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_0 + 1}} \right]. \quad (8)$$

Відомо, що канали з некорельованими релеївськими завмираннями є найбільш типовими для міських умов. Миттєве ВСШ при рознесеному прийомі на  $N$  антен у багатопротеневих каналах SIMO  $1 \times N$  з релеївськими некорельованими завмираннями визначається як

$$\rho = \rho_0 \mathbf{H}^H \mathbf{H} = \rho_0 \sum_{p=1}^N |h_p|^2, \quad (9)$$

де  $\mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$  – вектор-стовпець каналних коефіцієнтів передачі,  $(\cdot)^T$  – знак транспонування.

Тоді ІБП в релеївському каналі з некорельованими завмираннями дорівнює

$$BER = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_0 + 1}} \left[ 1 + \sum_{l=1}^{N-1} \frac{2l-1}{2l} \frac{1}{(\rho_0 + 1)^l} \right], \quad (10)$$

де  $(2l-1)!! = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2l-1)$ ;  $(2l)!! = 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot \dots \cdot 2l$ .

У випадку повністю корельованих завмирань ВСШ дорівнює

$$\rho = \rho_0 N |h|^2, \quad (11)$$

що ідентично випадку прийому на одну антену, яка має в  $N$  раз більше підсилення й, відповідно, ІБП визначається аналогічно (8)

$$BER = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{N\rho_0}{N\rho_0 + 1}} \right). \quad (12)$$

Залежності ІБП від ВСШ при корельованих і некорельованих завмираннях у релієвському каналі SIMO представлені на рис. 8, з якого видно, що випадок некорельованих завмирань забезпечує істотний енергетичний вииграш при заданих показниках завадозахищеності (ІБП), у порівнянні з випадком корельованих завмирань.

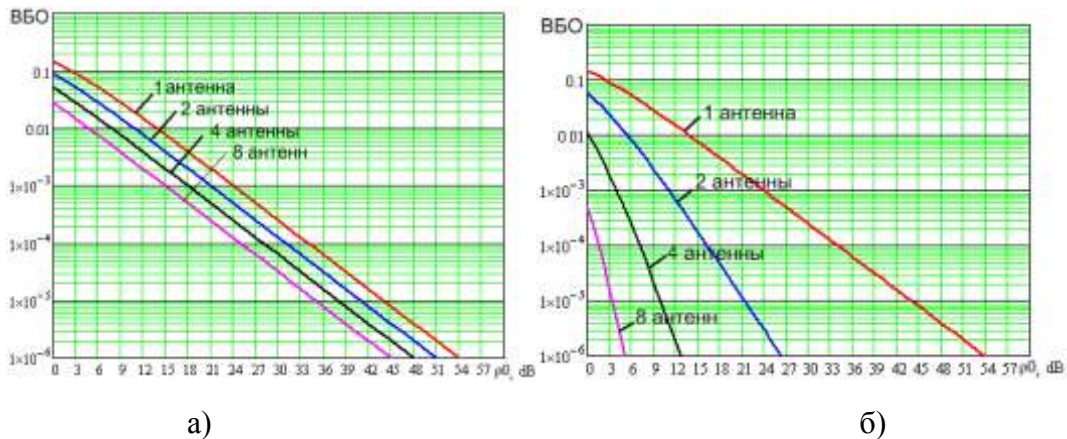


Рис. 8. Залежності ІБП від ВСШ при корельованих а) і некорельованих б) завмираннях у схемах SIMO з 2,4,8 БЕА

Далі розглянуті залежності ІБП в просторових каналах MIMO. При передачі за допомогою MIMO формуються власні підканали, властивості яких визначаються *власними числами* каналної матриці  $\mathbf{H}$ . У найбільш характерному для міських умов багатопроменевому каналі з релієвськими завмираннями власні числа є випадковими й можуть значно відрізнятись між собою. Загалом, для знаходження ІБП в каналах MIMO важливо знати густини ймовірності  $f_{\lambda_i}(\lambda)$  власних чисел  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, K$ ) у власних підканалах, які залежать від добутку каналної матриці  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  ( $M \geq N$ ) або  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  ( $M < N$ ).

З урахуванням густини імовірності  $f_{\lambda_i}(\lambda)$  власних чисел  $\lambda_i$  ( $i=1, 2$ ) отримані вирази для ІБП сильного ( $BER_1$ ) і слабого ( $BER_2$ ) підканалів MIMO 2x2 з бінарною фазовою модуляцією:

$$BER_1 = \frac{1}{2} - \frac{11}{8}\varphi(\rho) + \frac{3}{4}\varphi^3(\rho) - \frac{3}{8}\varphi^5(\rho) + \frac{1}{2}\psi(\rho), \quad (13)$$

$$BER_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\psi(\rho). \quad (14)$$

де  $\varphi(\rho) = \sqrt{\rho/(\rho+1)}$ ,  $\psi(\rho) = \varphi(\rho/2)$ ,  $\rho = \beta\alpha\rho_0$ ,  $\beta = 0.5$  - відносна частина повної потужності,  $\alpha = 2$  - параметр, що залежить від виду модуляції (в даному випадку визначений для BPSK).

З урахуванням (13-14) на рис. 9 побудовані залежності ІБП від ВСШ  $\rho_0$  у релієвському некорельованому каналі MIMO 2x2 для сильного й слабого підканалу. Для порівняння, тут же наведені залежності ІБП для каналів SISO і SIMO 1x2. Як видно з рис. 9, застосування схеми MIMO підвищує завадозахищеність ЦРСШ (приводить до зменшення ІБП). Так, схема MIMO 2x2 при ІБП= $10^{-6}$  забезпечує вииграш в ВСШ приблизно на  $\Delta\rho_0=10$  дБ (з  $\rho_0=27$  дБ до

$\rho_0=17$  дБ) у порівнянні з SIMO 1x2 і на  $\Delta\rho_0=29$  дБ у порівнянні з SISO (див. рис. 9).

Стосовно до ЦРСП з MIMO LTE-Advanced можна запропонувати спосіб зменшення ІБП, який ґрунтується на відключенні частини просторових підканалів з гіршими ВСШ, що, можливо, може привести до деякої втрати ПС.

Згідно (7) також одержані вирази й проведене моделювання ІБП для корельованих і некорельованих завмирань у райсівських просторових каналах SIMO 1xN, результати якого наведено на рис. 10 у вигляді залежностей ІБП як функції ВСШ для випадку SIMO 1x4 і SIMO 1x8 з коефіцієнтами кореляції  $r=1$  і  $r=0.5$ .

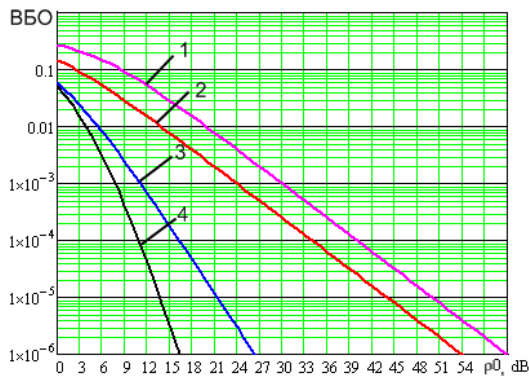


Рис. 9. Залежність ІБП від ВСШ в релєйському некорельованому каналі MIMO 2x2 (1 - слабкий, 4 - сильний підканали), SISO (2), SIMO 1x2 (3)

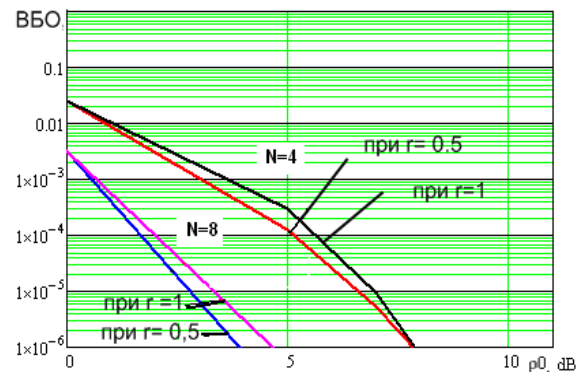


Рис. 10. Залежність ІБП від ВСШ у корельованих райсівських каналах SIMO 1x4 і SIMO 1x8 з коефіцієнтами кореляції  $r=1$  і  $r=0.5$

Як видно з рис. 10, при збільшенні числа АЕ і зменшенні кореляції між ними ІБП зменшується. Так, при переході від SIMO 1x4 до SIMO 1x8 при  $\text{ІБП}=10^{-5}$  досягається вигреш у ВСШ  $\Delta\rho_0=3.5$  дБ. З іншого боку, при переході від SIMO 1x4 до SIMO 1x8 і забезпеченні  $\rho_0=5$  дБ, ІБП зменшується приблизно на 2 порядки й становить  $\text{ІБП}=10^{-6}$ .

У четвертому розділі отримані вирази й наведені результати моделювання спектральної ефективності (пропускної спроможності) ЦРСП з MIMO LTE-Advanced, при умові формування власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням CSI до швидко змінюваних умов ПРХ [2-3, 7-8].

Відповідно до вимог 3GPP Release 8-10, ЦРСП LTE-Advanced конфігурацій MIMO 8x8 і MIMO 4x4 повинні забезпечувати пікову спектральну ефективність  $C=30$  біт/с/Гц по каналу вниз (downlink) і  $C=15$  біт/с/Гц по каналу нагору (uplink), відповідно.

Вираз для ПС із урахуванням адаптивної обробки в ДУС має вигляд [2-3]:

$$C_{\text{П}} \approx \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{N_R} + \frac{1}{\sigma_N^2} \sum_{\mathbf{H}} \mathbf{V}_{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_{\text{XX}} \mathbf{V}_{\mathbf{H}} \Sigma_{\mathbf{H}}^H \right), \quad (15)$$

де  $\mathbf{R}_{\text{XX}} = E \mathbf{x} \mathbf{x}^H$  – автокореляційна матриця вхідного сигналу,  $\mathbf{V}$  – унітарна матриця розмірності  $N_T \times N_T$ ,  $\Sigma$  – діагональна матриця розмірності

$N_R \times N_T$ , елементи якої  $\sigma_i$  це власні значення матриці  $\mathbf{H}$ ,  $\sigma_N^2 = \frac{N_0}{T_s}$  – потужність шуму.

Якщо автокореляційну матрицю вхідного сигналу також навести згідно (2)

$$\mathbf{R}_{XX} = \mathbf{V}_X \mathbf{\Pi} \mathbf{V}_X^H, \quad (16)$$

де  $\mathbf{\Pi} = \text{diag} \{ \eta_i \}$  – діагональна матриця із власними значеннями, що мають фізичний зміст потужності.

Тоді в каналі MIMO можна сформувати оптимальні незалежні віртуальні канали SISO, пропускна спроможність яких

$$C_{\mathbf{H}} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left( 1 + \frac{1}{\sigma_N^2} \sigma_i^2 \eta_i \right), \quad (17)$$

де  $r = N_{\min}$  – кількість ненульових сингулярних значень матриці  $\mathbf{H}$ .

Для максимізації (17) вирішується оптимізаційна процедура водозаповнення Karush-Kuhn-Tucker, відповідно до якої по просторових каналах з коефіцієнтами передачі  $\sigma_i^2$  передаються сигнали різної потужності  $\eta_i$ , причому, чим більший коефіцієнт передачі  $\sigma_i^2$ , тим по такому каналу слід передавати більшу потужність  $\eta_i$  [3].

Згідно 3GPP Release 10 в LTE-Advanced обрана стратегія оптимізації, при якій по  $N_T$  підканалам передаються сигнали рівної потужності  $\sigma_X^2 = \frac{E_s}{T_s}$ . У цьому

випадку кореляційна матриця вхідного сигналу приймає вид  $\mathbf{R}_{XX} = \sigma_X^2 \cdot \mathbf{I}_{N_T}$  і ПС каналу MIMO дорівнює

$$C_{\mathbf{H}} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left( 1 + \sigma_i^2 \frac{\sigma_X^2}{\sigma_N^2} \right). \quad (18)$$

Формула (18) є сумарна ПС по  $r$  незалежним підканалам з різними коефіцієнтами передачі  $\sigma_i^2$ .

На рис. 11 з урахуванням виразів (17) і (18) представлені результати моделювання ПС каналів зв'язку ЦРСП з MIMO LTE-Advanced.

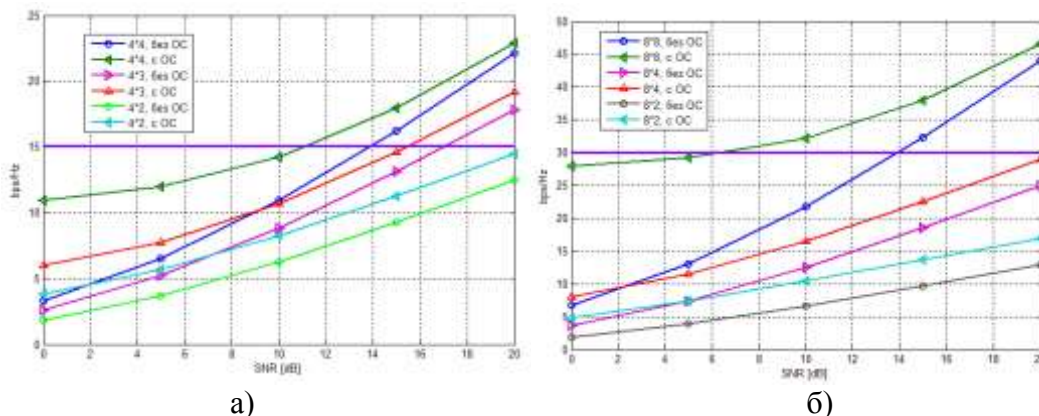


Рис. 11. Залежність ПС від ВСШ для MIMO 4x4 а) і MIMO 8x8 б)

В основі яких формування більш сильних стосовно ВСШ власних незалежних просторових каналів (ВНПК), адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку (CSI) до швидко змінюваних умов

багатопротенового ПРХ (схема ЦРСШ із замкнутою петлею ЗЗ), що відрізняє її від способу попереднього просторово-частотного кодування з використанням таблиць найкращих вагових коефіцієнтів для багатоелементних антен, запропонованого 3GPP Release 10 (схема ЦРСШ із замкнутою петлею ЗЗ без формування ВНК). Для моделювання обрані схеми МІМО 4x4 і МІМО 8x8, що відповідає базовим конфігураціям LTE-Advanced.

Як видно з рис. 11, застосування методу формування власних незалежних просторових каналів у ЦРСШ з МІМО LTE-Advanced дозволить забезпечити ПС  $C=15$  (біт/с)/Гц для МІМО 4x4 вже при ВСШ  $\rho_0=11$  дБ, що на  $\Delta\rho_0=2.8$  дБ краще в порівнянні із попереднім кодуванням 3GPP Release 10, де  $\rho_0=13.8$  дБ. Аналогічно, для МІМО 8x8 пропускна спроможність  $C=30$  (біт/с)/Гц забезпечується вже при ВСШ  $\rho_0=6.3$  дБ, що на  $\Delta\rho_0=7.9$  дБ краще в порівнянні із попереднім кодуванням 3GPP Release 10, де  $\rho_0=14.2$  дБ.

Перехід від МІМО 4x4 до МІМО 8x8 дозволяє збільшити ПС, але призводить до збільшення габаритів БЕА, а значить і самого АТ. Звідси важливо визначити потенційні можливості зменшення габаритів (міжелементної відстані) БЕА і як це впливає на ПС, для чого необхідно врахувати міжелементні взаємні зв'язки (МС - Mutual Coupling) [12].

Для розгляду цього питання скористаємося виразом (18) для ПС ЦРСШ із замкнутою петлею ЗЗ без формування ВНК. У якості БЕА розглянута антенна решітка (АР) з паралельно розташованих (колінеарних) провідних диполів, міжелементні взаємні зв'язки у якій задані за допомогою взаємної матриці:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_T)(\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_T \mathbf{I}_N)^{-1}, \quad (19)$$

де  $\mathbf{Z}$  - матриця взаємних імпедансів,  $Z_A$  – імпеданс ізольованого диполя (коли використовується провідний диполь довжини  $l=\lambda/2$ , його імпеданс дорівнює  $Z_A=73+j42.5$  Ом;  $Z_T$  – вихідний імпеданс приймача, що дорівнює комплексно спряженому  $Z_A$  і забезпечує узгодження імпедансу для передачі максимальної потужності.

Для знаходження матриці взаємних імпедансів  $\mathbf{Z}$  застосований класичний метод наведених ЕРС. На рис. 12 наведені залежності ПС як функції міжелементної відстані між АЕ з урахуванням взаємних зв'язків для МІМО 2x2 і МІМО 4x4.

Таким чином, в результаті моделювання показано, що залежність пропускної спроможності як функції міжелементної відстані для МІМО носить флуктуаційний характер. При збільшенні кроку решітки  $\geq 0.8\lambda$  ПС плавно зменшується й асимптотично наближається до значень ПС без урахування взаємних зв'язків. Як видно із представлених залежностей, існує можливість додаткового підвищення ПС при виборі міжелементної відстані в інтервалі  $(0.6-0.8)\lambda$  і нижче  $0.3\lambda$ , що дає відносно збільшення у ПС до 20-30%. Можна припустити, що для підвищення ПС доцільно більш ретельно врахувати взаємні зв'язки, а міжелементну відстань вибрати  $\leq 0.3\lambda$ . Порівняльна оцінка параметрів ПС для МІМО 2x2 і МІМО 4x4 наведені в табл. 2.



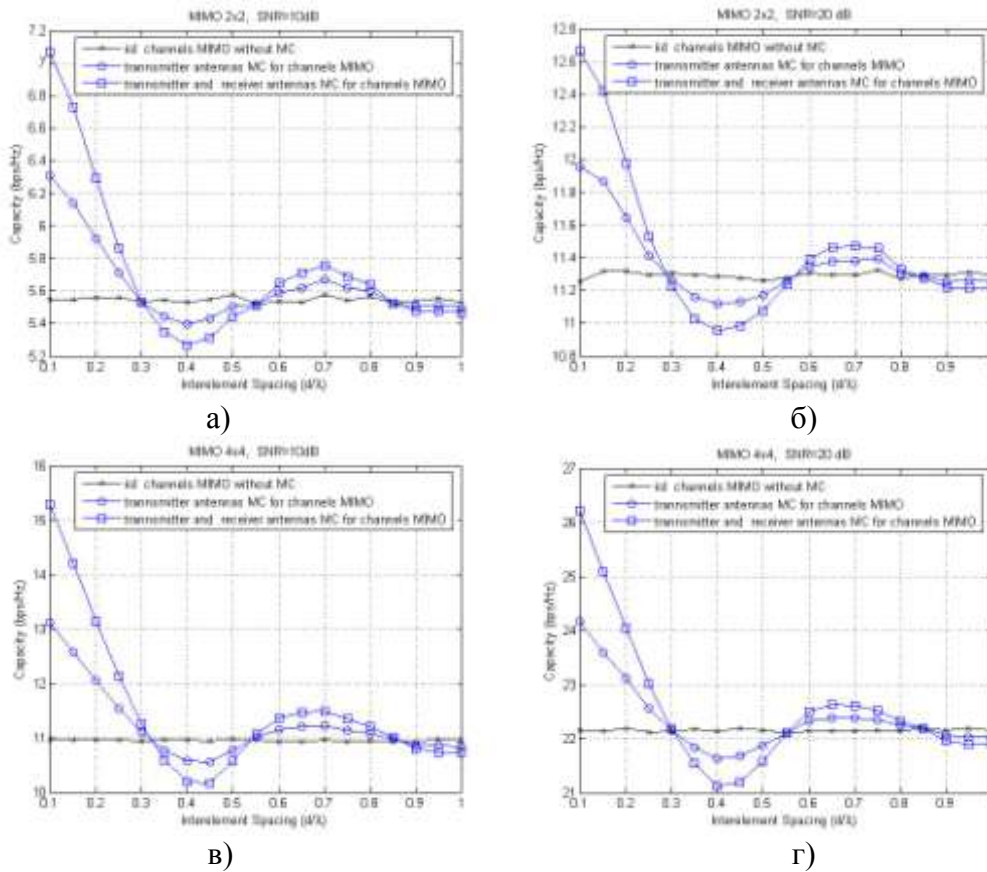


Рис. 12. Залежність ПС від міжелементної відстані для МІМО 2х2 (а,б) і МІМО 4х4 (в,г) при ВСШ=10 дБ (а,в) і ВСШ=20 дБ (б,г)

Таблиця 2

ПС для двохелементної і чотириелементної АР з МІМО

Параметр	$N_T \times N_R = 2 \times 2$	$N_T \times N_R = 4 \times 4$
$C_{\max} \div C_{\min}$ , bps/Hz (SNR=10 dB)	7.1 – 5.2	15.3 – 10.2
$C_{iid}$ (SNR=10 dB)	5.6	11.0
$C_{\max} \div C_{\min}$ , bps/Hz (SNR=20 dB)	12.7 – 11.0	26.2 – 21.0
$C_{iid}$ (SNR=20 dB)	11.3	22.0

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що полягає у поліпшенні параметрів якості (завадозахищеності, спектральної ефективності) ЦРСПІ з МІМО LTE-Advanced, яка ґрунтується на формуванні більш сильних з точки зору ВСШ власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку (CSI) до швидко змінюваних умов багатопробеневого поширення в каналі МІМО (схема ЦРСПІ із замкнутою петлею зворотного зв'язку), що відрізняє її від способу попереднього просторово-частотного кодування з використанням таблиць найкращих вагових коефіцієнтів для багатовіментних антен - 3GPP Release 10. При цьому отримані наступні нові науково-технічні результати:

1. На підставі моделювання каналів зв'язку MIMO в LTE - Advanced, показано, що ПС росте більш інтенсивно при збільшенні числа антенних елементів і наявності власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням CSI до змінюваних умов багатопроменевого поширення радіохвиль. Так, в схемі MIMO 8x8 за наявності власних просторових каналів ПС збільшується від  $C=28$  (біт/с)/Гц при ВСШ  $\rho_0=5$  дБ до  $C=47$  (біт/с)/Гц при ВСШ  $\rho_0=20$  дБ; для LTE - Advanced 3GPP Release 10 ПС збільшується від  $C=6$  (біт/с)/Гц при ВСШ  $\rho_0=5$  дБ до  $C=44$  (біт/с)/Гц при ВСШ  $\rho_0=20$  дБ.

2. Показано, що наявність власних незалежних просторових каналів має виражене значення переважно при малих ВСШ. Так, для MIMO 8x8 при ВСШ  $\rho_0=5$  дБ відмінності в ПС складають  $\Delta C=16$  (біт/с)/Гц на користь ВППК; при ВСШ  $\rho_0=10$  дБ - близько  $\Delta C=10$  (біт/с)/Гц; при ВСШ  $\rho_0=20$  дБ -  $\Delta C=2$  (біт/с)/Гц.

3. Для моделювання ПС з урахуванням власних незалежних просторових каналів розроблена оптимізаційна процедура, що дозволяє вибрати енергетично сильні і ігнорувати енергетично слабкі просторові канали.

4. На підставі модельних розрахунків показана можливість додаткового підвищення ПС у ЦРСШ з багатоелементною антеною у вигляді лінійної решітки при врахуванні взаємних зв'язків шляхом зменшення міжелементної відстані. Для схеми MIMO 4x4 при зменшенні міжелементної відстані від  $0.3\lambda$  до  $0.1\lambda$  ПС змінюється від  $C=10.2$  bps/Hz до  $C=15.3$  bps/Hz для ВСШ  $\rho_0=10$  дБ і від  $C=21.0$  bps/Hz до  $C=26.2$  bps/Hz для ВСШ  $\rho_0=20$  дБ.

5. Проведений порівняльний аналіз методів моделювання завмирань в часовій області і показано, що для опису каналів MIMO більше підходять моделі Кларка-Ганса і променева модель радіоканалу. Глибина завмирань росте зі збільшенням частоти Доплера і може досягати - 30 дБ, що може бути критичним для мобільних АТ на швидкостях понад 250 км/год.

6. Проведено моделювання завадозахищеності (ІБП) в просторових релеївських каналах і показано, що

- у разі некорельованих завмирань збільшення числа антен SIMO з 1 до 8 дозволяє отримати виграв у ВСШ  $\Delta\rho_0=48$  дБ у порівнянні з каналом SISO, тоді як у разі повністю корельованих завмирань виграв у ВСШ  $\Delta\rho_0=9$  дБ (навпаки, для досягнення ІБП= $10^{-6}$  в каналі SIMO 1x8 достатньо забезпечити ВСШ  $\rho_0=8$  дБ, тоді як у разі корельованих завмирань ВСШ буде становити  $\rho_0=45$  дБ);

- у разі некорельованих завмирань в каналах MIMO 2x2 для одержання ІБП= $10^{-6}$  необхідно забезпечити ВСШ  $\rho_0=17$  дБ, що на  $\Delta\rho_0=10$  дБ краще в порівнянні зі схемою SIMO 1x2, де ВСШ становить  $\rho_0=27$  дБ.

7. Проведено моделювання ІБП в просторових райсівських каналах і показано, що присутність компонента по лінії прямої видимості веде до зменшення ІБП, причому у разі некорельованих завмирань збільшення числа приймальних антен SIMO з 2 до 4 дає виграв у ВСШ  $\Delta\rho_0=5$  дБ при забезпеченні ІБП= $10^{-6}$  і компоненті по лінії прямої видимості  $\gamma=10$  дБ; у разі повністю корельованих завмирань ( $\gamma=1$ ) збільшення числа приймальних антен SIMO з 4 до 8 дає виграв в ВСШ  $\Delta\rho_0=3.1$  дБ при забезпеченні ІБП= $10^{-6}$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Нух Таха Насиф Применение нечеткой логики для повышения безопасности сетей на основе технологии Wi-Fi / И.Е. Антипов, Т.А. Яценко, Нух Таха Насиф // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2011. - Вып. 165.- с.103-107.

2. Nasif N.T. Capacity analysis of deterministic and stochastic multiple input multiple output channel / V.G. Lykhograi, V.S. Vovchenko, N.T. Nasif // European Science and Technology: materials of the international research and practice conference, Wiesbaden, January 31, 2012 p. 261-264.
3. Нух Таха Насиф Пропускная способность случайных каналов ММО / В.Г. Лихограй, В.С. Вовченко, Нух Таха Насиф // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2012. - Вып. 169.- с.182-189.
4. Насиф Н.Т. Адаптивная пространственная обработка сигналов в системах LTE с ММО / В.А. Лошаков, В.Г. Лихограй, Х.Д. Ал-Джанаби, Н.Т. Насиф // Вестник НГУ ХПИ №11, 2013. – С. 100–107.
5. Nasif N.T. Adaptive modulation in LTE technology by using OFDMA and SC-FDMA with MIMO / V.A. Loshakov, H.D. Al-Janabi, Y.T. Hussein, N.T. Nasif // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (ISSN 1729-3774). – 2013. – Vol. 2/9 (62). – P. 8 – 11.
6. Насиф Н.Т. Сравнение технологий беспроводного доступа WiMAX и LTE / Х.Д. Ал-Джанаби, Н.Т. Насиф, В.С. Вовченко // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2013. – Вып. 173. – С. 27–34.
7. Nooh Taha Nasif. Ergodic capacity of MIMO channels with and without channel state information / Vasil Lykhograi, Vovchenko Victoria, Nooh Taha Nasif / Матеріали 11-ої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікації та комп'ютерної інженерії»/TCSET'2012/ – Львів - Славське: НУ «ЛП», 2012, – с. 189
8. Насиф Н.Т. Эргодическая пропускания способность каналов ММО при наличии и отсутствии информации о состоянии канала связи / В.Г. Лихограй, В.С. Вовченко, Н.Т. Насиф // Матеріали 8-ої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2012», Україна, Севастополь 23-27 квітня 2012 р. – С. 114
9. Нух Т.Н. Анализ моделей для опису багатопроменевих каналів зв'язку з ММО / В.Г. Лихограй, В.С. Вовченко, Нух Т.Н. // Матеріали II-ої міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», Україна, Чернівці 25-27 жовтня 2012 р. - С. 34
- 10 Нух Таха Насиф. Анализ вероятности битовой ошибки в релейских каналах связи SISO / В.С. Вовченко, Нух Таха Насиф, А.Г. Видничук // Материалы 9-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, РТ-2013», Украина, Севастополь, 22-26 апреля 2013 г., С.149.
- 11 Нух Таха Насиф. Анализ помехозащищенности систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / Василий Лихограй, Виктория Вовченко, Нух Таха Насиф // Матеріали II-ої міжнародної науково-технічної конференції «Захист інформації і безпека інформаційних систем», Україна, Львів, 30 травня – 1 червня 2013 р., С 54 – 55
- 12 Nooh Taha Nasif. Effect of antenna mutual coupling on MIMO channel capacity / V.G. Lykhograi, A.A. Shcherbina, V.S. Vovchenko, Nooh Taha Nasif // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2013), Ukraine, Odessa, 16-20 September 2013. p.178-180

## АНОТАЦІЯ

**Нух Таха Насіф.** Удосконалення системи зв'язку LTE-Advanced. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2013.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, що полягає у поліпшенні параметрів якості (завадозахищеності, спектральної ефективності) цифрової радіосистеми передачі інформації (ЦРСПІ) з MIMO – LTE-Advanced, яка ґрунтується на формуванні більш сильних з точки зору відношення сигнал шум власних незалежних просторових каналів, адаптованих з урахуванням інформації про канал зв'язку (CSI) до швидко змінюваних умов багатопроменевого поширення в каналі MIMO, що відрізняє її від способу попереднього просторово-частотного кодування з використанням таблиць найкращих вагових коефіцієнтів для багатoelementних антен, запропонованого в 3GPP Release 10.

Для кількісного аналізу якості створюваних ЦРСПІ LTE-Advanced важливим є адекватне математичне моделювання завмирань при багатопроменевому поширенні, зокрема за допомогою статистичних підходів (моделі великомасштабних завмирань, Кларка (Кларка-Ганса), Джейкса і променевої моделі радіоканалу), що дає змогу отримувати характеристики багатопроменевого каналу в часовій області, в т.ч. при зміні характеристик самого багатопроменевого каналу в часі. Також в роботі приділено увагу питанням завадозахищеності в ЦРСПІ LTE-Advanced, для чого проведено теоретичні дослідження поведінки імовірності бітової помилки в релеївських та райсівських просторових каналах.

**Ключові слова:** цифрова радіосистема передавання інформації, технологія MIMO, LTE-Advanced, просторово-частотне кодування, завадозахищеності, спектральної ефективності імовірність бітової помилки, пропускна спроможність, інформація про стан каналу зв'язку (CSI).

## АННОТАЦИЯ

**Нух Таха Насиф.** Усовершенствование системы связи LTE-Advanced. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2013.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи, которая заключается в улучшении параметров качества (помехозащищенности, спектральной эффективности) цифровой радиосистемы передачи информации (ЦРСПИ) с MIMO – LTE-Advanced, которая основывается на формировании более сильных с точки зрения отношения сигнал шум собственных независимых пространственных каналов, адаптированных с учетом информации о канале связи (CSI) к быстро

изменяемым условиям многолучевого распространения в канале MIMO, что отличает ее от способа предварительного пространственно-частотного кодирования с использованием таблиц наилучших весовых коэффициентов для многоэлементных антенн, предложенного в рамках 3GPP Release 10.

Для количественного анализа качества создаваемых ЦРСПИ LTE-Advanced важным является адекватное математическое моделирование замираний при многолучевом распространении, в частности с помощью статистических подходов (модели крупномасштабных замираний, Кларка (Кларка-Ганса), Джейкса и лучевой модели радиоканала), что дает возможность получать характеристики многолучевого канала во временной области, в т.ч. при изменении характеристик самого многолучевого канала во времени. Также в работе уделено внимание вопросам помехозащищенности в ЦРСПИ LTE-Advanced, для чего проведены теоретические исследования поведения вероятности битовой ошибки в релейских и райсовских пространственных каналах.

**Ключевые слова:** цифровая радиосистема передачи информации, MIMO, LTE-Advanced, пространственно- частотное кодирование, вероятность битовой ошибки, пропускная способность, информация о состоянии канала связи (CSI).

## ABSTRACT

**Nooh Taha Nasif.** Improving communication system LTE-Advanced. – The manuscript.

Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree, specialty 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2013.

Dissertation work is sanctified to the decision of the actual scientifically-applied task that consists in the improvement of parameters of quality (jammer resistance, spectral efficiency) of digital radio communication system LTE-Advanced with MIMO, that is base on forming most stronger from the point of view of relation signal to noise ratio (SNR) of the own independent spatial channels adapted taking into account a channel state information (CSI) to the quickly changeable terms of multipath propagation in the MIMO channel, that distinguishes from the method of preliminary spatially-frequency block coding with use of the tables of the best weight coefficients for multielement antennas, offered by 3GPP Release 10.

For the quantitative analysis of quality LTE-Advanced with MIMO is important an adequate mathematical design of fading at multipath propagation, in particular by means of statistical approaches (models of the large-scale fading, Clarke (Clarke-Gans), Jakes and Ray-Based Channel Model), that gives an opportunity to get descriptions of multipath channel in a time domain, including a time varying the multipath channels. Also paid attention to the questions of jammer resistance in LTE-Advanced, theoretical studies of behavior BER for Rayleigh and Rician spatial channels.

**Keywords:** LTE-Advanced, MIMO, space-frequency block coding, jammer resistance, BER, capacity, Channel State Information.

Підп. до друку 19.12.2013.    Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.    Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 1,2.    Облік. вид. арк. 1,0.    Тираж 100 прим.  
Ціна договірна    Зам №2-532

---

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Леніна, 14