

УДК 621.396

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЛИНИИ  
С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

*Рожновская И.Ю.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.*

[irina\\_rozhnovskay@mail.ru](mailto:irina_rozhnovskay@mail.ru)

**ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕДАЧІ РАДІОЛІНІЇ  
З УРАХУВАННЯМ НАПРЯМУ ПРИХОДУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ**

*Рожновська І.Ю.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.*

[irina\\_rozhnovskay@mail.ru](mailto:irina_rozhnovskay@mail.ru)

**RESEARCH OF RADIO LINK TRANSMISSION COEFFICIENTS  
WITH ACCOUNT OF THE ELECTROMAGNETIC WAVES DIRECTION OF ARRIVAL**

*Rozhnovskaya I.Yu.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine.*

[irina\\_rozhnovskay@mail.ru](mailto:irina_rozhnovskay@mail.ru)

**Аннотация.** Проведено исследование коэффициентов передачи радиолинии с учетом направления прихода электромагнитных волн на основе электродинамической модели, которая позволяет учитывать частичное рассогласование антенн с линией передачи, поляризационное рассогласование антенн, их взаимное влияние. Полученные результаты могут быть применены для случая многоантенной системы на входе и выходе радиолинии при анализе пропускной способности ММО-канала с угловым разнесением.

**Ключевые слова:** коэффициент передачи радиолинии, электродинамическая модель, угловое разнесение каналов, двухзаходная цилиндрическая спиральная антенна, ММО-канал.

**Анотація.** Проведено дослідження коефіцієнтів передачі радіолінії з урахуванням напрямку приходу електромагнітних хвиль на основі електродинамічної моделі, яка дозволяє враховувати часткове розузгодження антен з лінією передачі, поляризаційне розузгодження антен, їх взаємний вплив. Отримані результати можуть бути застосовані для випадку багатоантенної системи на вході та виході радіолінії при аналізі пропускної здатності ММО-канала з кутовим рознесенням.

**Ключові слова:** коефіцієнт передачі радіолінії, електродинамічна модель, кутове рознесення каналів, двозахідна циліндрична спіральна антена, ММО-канал.

**Abstract.** The research of radio link transmission coefficients with account of the electromagnetic waves direction of arrival on the basis of the electromagnetic model which allowed considering the partial mismatch of antennas with transmission line, the antenna polarization mismatch, their mutual coupling is presented. The results can be applied to the case of multiantenna system at the radio link input and output in the analysis of MIMO-channel capacity with angular diversity.

**Key words:** radio link transmission coefficient, electromagnetic model, angular channel diversity, combined helical antenna, MIMO-channel.

Активное развитие современных широкополосных беспроводных сетей, таких, например, как локальные сети Wi-Fi, универсальные городские сети WiMAX и др., связанное с появлением новых стандартов и совершенствованием оборудования, направлено на повышение скорости передачи данных [1]. Достижение высоких скоростей передачи данных в сетях, которые характеризуются многолучевым распространением сигналов, возможно благодаря появлению новых методов разнесения каналов [2]. Одним из новых методов разнесения каналов является многоантенная технология ММО (Multiple Input Multiple

Output) [3, 4], в основе которой лежит организация независимых каналов с помощью передовых методов модуляции, кодирования и использования нескольких антенн на передающей и приемной сторонах радиолинии.

Разработка широкополосных беспроводных систем, как правило, обусловлена перечнем проблем, связанных с повышением скорости передачи и помехоустойчивости. Отметим, что при исследовании и проектировании таких систем не достаточное внимание уделяется потенциальным возможностям и конструктивным особенностям антенных систем, которые позволяют организовать тот либо иной метод разнесения каналов, что напрямую влияет на пропускную способность ММО-канала. Так, например, организация поляризационного и углового метода разнесения каналов требует применения специфических конструкций антенных систем [5 – 7], которые в итоге позволят получить выигрыш в пропускной способности систем. Таким образом, одним из актуальных направлений исследований на сегодняшний день в области проектирования новых ММО-систем является электродинамическое моделирование радиоканала с применением различных типов антенн, позволяющих организовать различные методы разнесения каналов.

В работах [8...10] показано, что при электродинамическом моделировании ММО-канала целесообразно использовать модели, в основе которых лежит матрица  $S$ -параметров. В работе [11] проведено исследование пропускной способности радиоканала на основе математической модели коэффициента передачи радиолинии в комплексном виде [12], которая основана на геометрическом представлении элементарных излучателей с учетом их ближнего взаимодействия с помощью обобщенного метода наводимых ЭДС, что позволяет учитывать электродинамические характеристики и потенциальные возможности антенных систем. Результаты такого исследования позволили оценить влияние учета поляризационного рассогласования антенн и их взаимного влияния на пропускную способность радиоканала, но анализ проводился при условии, что передающая и приемная антенны строго направлены друг на друга и в среде распространения отсутствуют отраженные волны. Однако при организации углового разнесения каналов и выборе той или иной антенны для ММО-систем, работающих в условиях многолучевого распространения радиоволн, необходимо учитывать направление прихода электромагнитных волн.

Поэтому **целью данной статьи** является исследование коэффициентов передачи радиолинии на основе электродинамической модели с учетом направления прихода электромагнитных волн.

Для анализа коэффициентов передачи радиолинии посредством электродинамической модели [12] использовалась программная среда моделирования FEKO, которая позволяет адекватно и достаточно точно решать электродинамические задачи с применением метода моментов [13], разновидностью которого является обобщенный метод наводимых ЭДС.

В процессе моделирования исследована радиолиния, состоящая из передающей антенны, среды распространения (свободное пространство) и приемной антенны. На первом этапе моделирования в качестве передающей и приемной антенн использовалась совмещенная двухзаходная цилиндрическая спиральная антенна [14], со следующими геометрическими параметрами: радиус цилиндрической поверхности  $a = 1,53$  см, угол подъема витка (намотки) спирали  $\gamma = 14$  град., количество витков спирали  $n = 7$ , радиус излучающего проводника спирали  $r_{\text{пр}} = 1$  мм, диаметр диска экрана  $d_{\text{экp}} = 16$  см, исследуемый диапазон частот 2,4...2,7 ГГц. На втором этапе моделирования в качестве передающей антенны рассмотрена двухэлементная антенная решетка (АР), состоящая из двух совмещенных двухзаходных цилиндрических спиральных антенн с аналогичными параметрами, которая позволяет формировать двухлепестковую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости [15].

Суть моделирования исследуемой радиолинии заключается в следующем: на вход передающей антенны подавалось напряжение  $\dot{U}$ , а на выходе приемной антенны, которая расположена на расстоянии  $r$  от передающей, подключалась нагрузка с сопротивлением  $\dot{Z}_H$ . В ходе эксперимента измерены комплексные амплитуды токов (амплитуды и фазы) на входе передающей антенны  $\dot{I}_1$  и на нагрузке (выходе) приемной антенны  $\dot{I}_2$  при учете изменения угла поворота приемной антенны относительно передающей в горизонтальной  $\gamma_r$  и в вертикальной  $\gamma_v$  плоскостях в пределах от  $-90$  до  $90$  град., что моделирует изменение направления прихода электромагнитных волн на вход приемной антенны в результате их переотражения в реальном радиоканале.

Результаты моделирования явились исходными данными для определения комплексных коэффициентов передачи  $\dot{S}_{21}$  посредством предложенной в [12] математической модели, которая описывается следующим выражением:

$$\dot{S}_{21} = \frac{\dot{I}_2 \sqrt{R_{22}}}{\dot{I}_1 \sqrt{R_{11}}}, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  – комплексные амплитуды токов на входных зажимах антенн;  $R_{11}, R_{22}$  – активные составляющие собственного входного сопротивления соответствующих антенн.

Полученные согласно выражению (1) значения коэффициента передачи, а точнее его модуль,  $|\dot{S}_{21}|$  сопоставляются с коэффициентом передачи, который рассчитан по следующему выражению [12]

$$|\dot{S}_{21}|^2 = G_1 G_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2, \quad (2)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно;  $\lambda$  – длина волны;  $r$  – расстояние между передающей и приемной антеннами. Не трудно заметить, что выражение (2) получено из уравнения радиоканала, предназначенного для вычисления мощности сигнала на входе приемника при условии полного согласования антенн по входному сопротивлению, по поляризации и направлению прихода электромагнитных волн.

Для удобства анализа полученных значений модуль коэффициента передачи, рассчитанный по электродинамической модели (1), обозначим  $|\dot{S}_{21}|$ , а, по так называемой, «энергетической» модели (2), –  $|\dot{S}_{21}|_e$ .

Измерения токов  $\dot{I}_T$  и  $\dot{I}_R$  проведены на средней частоте диапазона  $f = 2,55$  ГГц, передающая антенна возбуждалась равноамплитудно и противофазно, что позволяет сформировать осевой режим излучения с линейно-вертикальной поляризацией. Передающая и приемная антенны согласованы с линией передачи на средней частоте диапазона ( $K_{CB} = 1,05$ ) и расположены на расстоянии  $r = 100$  м друг от друга. В результате моделирования получены комплексные амплитуды токов (амплитуды и фазы) на входе передающей антенны  $\dot{I}_T$  и на выходе приемной антенны  $\dot{I}_R$  при условии поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости (табл. 1) и вертикальной плоскости (табл. 2).

На основании полученных результатов моделирования определим модуль коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}^+|$  по электродинамической модели (1).

Таблица 1 – Зависимость токов на передающей и приемной антеннах от угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости

$\gamma_r$ , град.	$\dot{I}_T$ , мА	$\dot{I}_R$ , мкА
-90	$20 e^{j5^\circ}$	$3,4 e^{j128^\circ}$
-60	$20 e^{j5^\circ}$	$4,9 e^{j139^\circ}$
-30	$20 e^{j5^\circ}$	$10,1 e^{j56^\circ}$
0	$20,9 e^{j0^\circ}$	$23,1 e^{-j117^\circ}$
30	$20 e^{j5^\circ}$	$10 e^{j69^\circ}$
60	$20 e^{j5^\circ}$	$4,9 e^{j144^\circ}$
90	$20 e^{j5^\circ}$	$3,5 e^{j133^\circ}$

Таблица 2 – Зависимость токов на передающей и приемной антеннах от угла поворота приемной антенны в вертикальной плоскости

$\gamma_v$ , град.	$\dot{I}_T$ , мА	$\dot{I}_R$ , мкА
-90	$20 e^{j5^\circ}$	$0,0001 e^{-j119^\circ}$
-60	$20 e^{j5^\circ}$	$2,6 e^{j13^\circ}$
-30	$20 e^{j5^\circ}$	$9,6 e^{j69^\circ}$
0	$20,9 e^{j0^\circ}$	$23,1 e^{-j117^\circ}$
30	$20 e^{j5^\circ}$	$14,1 e^{j66^\circ}$
60	$20 e^{j5^\circ}$	$3,9 e^{j130^\circ}$
90	$20 e^{j5^\circ}$	$1,5 e^{j0^\circ}$

Зависимости модуля коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}^+|$  от изменения угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости (рис. 1) и вертикальной плоскости (рис. 2).

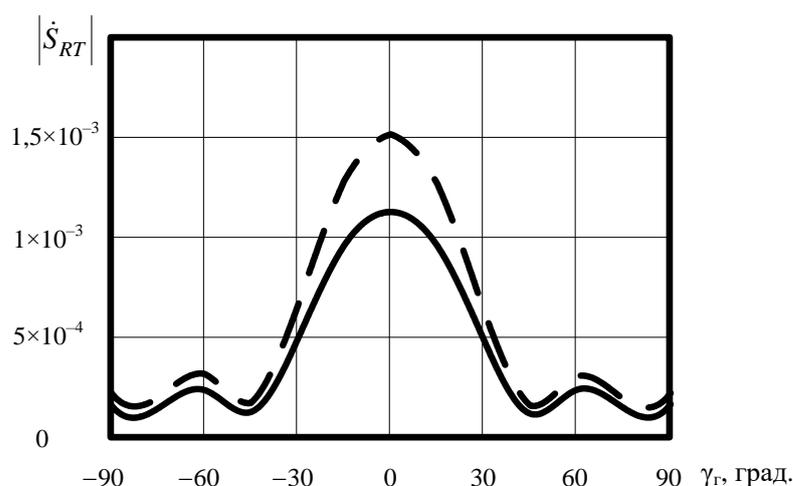


Рисунок 1 – Зависимость модуля коэффициента передачи от угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости

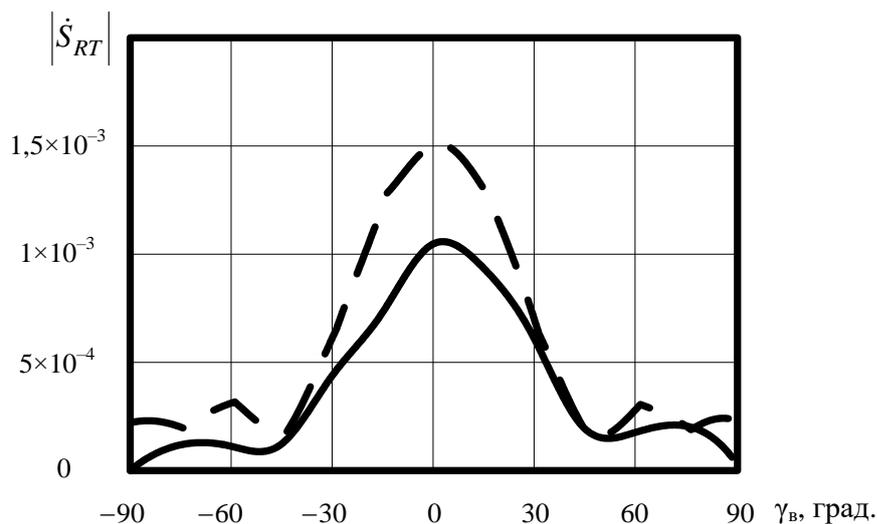


Рисунок 2 – Зависимость модуля коэффициента передачи от угла поворота приемной антенны в вертикальной плоскости

На рис. 1 и 2 сплошной линией показаны кривые изменения модуля коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}^+|$ , полученного согласно электродинамической модели (1), а пунктирной линией — аналогичные зависимости модуля коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}|_3$ , рассчитанного по «энергетической» модели (2). Анализ зависимостей (рис.1 и рис. 2) показывает, что значения модуля коэффициента передачи, который рассчитан по электродинамической модели, меньше, чем значения, рассчитанные по «энергетической» модели. Принимая во внимание выше описанные результаты исследований, можно пояснить отличие характеристик  $|\dot{S}_{RT}^+|$  и  $|\dot{S}_{RT}|_3$  следующим образом: указанные различия обусловлены взаимным влиянием передающей и приемной антенн, частичным рассогласованием по входному сопротивлению, а также имеет место частичное рассогласование по направлению прихода электромагнитных волн.

На следующем этапе исследований проанализируем коэффициенты передачи при изменении угла поворота приемной антенны относительно передающей в горизонтальной плоскости в пределах от  $-90$  до  $90$  град., что моделирует изменение направления прихода электромагнитных волн на вход приемной антенны.

Измерения токов  $\dot{I}_T$  и  $\dot{I}_R$  проведем на средней частоте диапазона  $f = 2,55$  ГГц при условии, что передающая антенна возбуждается равноамплитудно и противофазно ( $180, 0, 0, 180$  град. или  $0, 180, 180, 0$  град.). Такое возбуждение позволяет сформировать двухлепестковую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости с линейно-вертикальной поляризацией излучения [15]. Передающая и приемная антенны согласованы с линией передачи на средней частоте диапазона ( $KCB = 1,05$ ) и расположены на расстоянии  $r = 100$  м друг от друга.

В результате моделирования получены комплексные амплитуды токов (амплитуды и фазы) на входе передающей антенны  $\dot{I}_T$  и на выходе приемной антенны  $\dot{I}_R$  (табл. 3).

Таблица 3 – Зависимость токов на передающей и приемной антеннах от угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости

$\gamma_r$ , град.	$I_T$ , мА	$I_R$ , мкА
-90	$38 e^{j2^\circ}$	$10,9 e^{-j105^\circ}$
-60	$38 e^{j2^\circ}$	$19 e^{-j108^\circ}$
-30	$38 e^{j2^\circ}$	$56,3 e^{-j151^\circ}$
0	$38 e^{j2^\circ}$	$39,6 e^{-j21^\circ}$
30	$38 e^{j2^\circ}$	$56,4 e^{j28^\circ}$
60	$38 e^{j2^\circ}$	$19 e^{j72^\circ}$
90	$38 e^{j2^\circ}$	$10,9 e^{j74^\circ}$

На основании полученных результатов моделирования определим модуль коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}^+|$  по электродинамической модели (1). Зависимость модуля коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}^+|$  от изменения угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости показана на рис. 3 сплошной линией, а пунктирной линией – аналогичная зависимость модуля коэффициента передачи  $|\dot{S}_{RT}|_3$ , рассчитанного по «энергетической» модели (2). Заметим, что для расчета  $|\dot{S}_{RT}|_3$  по формуле (2) угловая зависимость коэффициента усиления антенны определена экспериментальным путем в результате моделирования.

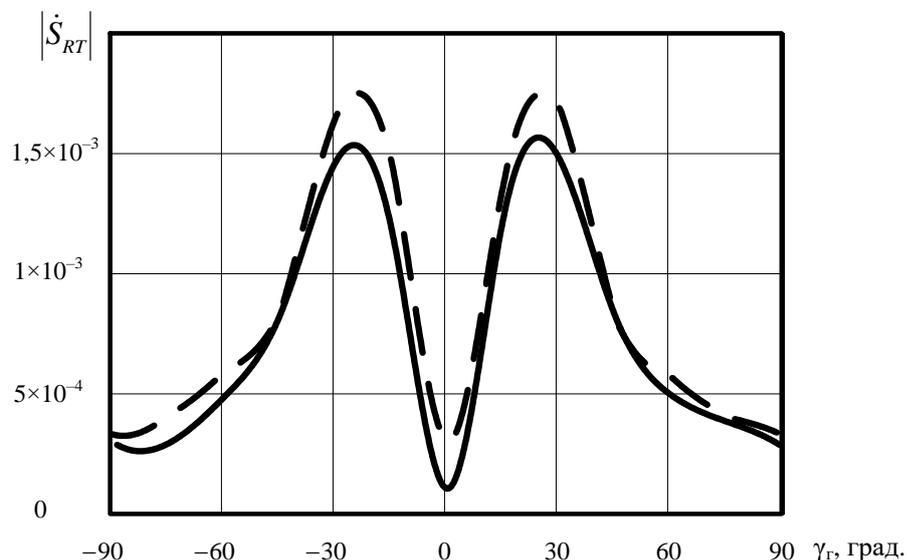


Рисунок 3 – Зависимость модуля коэффициента передачи от угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, показывает, что значения модуля коэффициента передачи, который рассчитан по электродинамической модели, меньше, чем значения, рассчитанные по «энергетической» модели. Принимая во внимание выше

описанные результаты исследований, можно пояснить отличие характеристик  $|\dot{S}_{RT}^+|$  и  $|\dot{S}_{RT}|$ , представленных на рис. 3, следующим образом: аналогично предыдущему случаю, указанные различия обусловлены взаимным влиянием передающей и приемной антенн, частичным рассогласованием по входному сопротивлению, а также имеет место рассогласование по углу прихода электромагнитных волн.

Таким образом, анализ радиоканала с помощью электродинамической модели (для случая, когда передающая антенна формирует осевой режим излучения и случая формирования двухлепестковой диаграммы направленности) показывает, что учет направления прихода электромагнитных волн на вход приемной антенны приводит к снижению коэффициентов передачи по отношению к случаю использования «энергетической» модели. Такой результат исследований с большой долей вероятности позволяет утверждать, что согласование антенн по направлению прихода электромагнитных волн на этапе проектирования радиосистем позволит повысить реальную пропускную способность радиоканала.

Основываясь на результатах данной статьи, можно сделать вывод, что коэффициент передачи в конкретном канале зависит от согласования передающей и приемной антенн по направлению прихода электромагнитных волн, согласования по входному сопротивлению и согласованию по поляризации излучения антенн.

К направлениям дальнейших исследований в данной области следует отнести анализ пропускной способности ММО-канала, организованного различными методами разнесения каналов, с помощью электродинамической модели.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Вишневский В.М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
2. Bizaki, H. K. *MIMO Systems, Theory and Applications*. N.p.: InTech, 2011.
3. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
4. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма: учеб. пособ. / М.С. Немировский, О.А. Шорин, А.И. Бабин, А.Л. Сартаков; под ред. М.С. Немировского, О.А. Шорина. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 400 с.
5. Li, X., and Z. Nie. "Effect of Array Orientation on Performance of MIMO Wireless Channels." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 3 (2004): 368-71.
6. Мартыничук А.А. Повышение пропускной способности ММО системы путем использования поляризационно-ортогональных антенн / А.А. Мартыничук, А.А. Назмутдинов // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 4-й Междунар. радиоэлектронный форум, (18-21 окт. 2011 г.): сб. науч. трудов. – Харьков, 2011. – Т.2 – С. 248.
7. Nishimori, K., Y. Makise, M. Ida, R. Kudo, and K. Tsunekawa. "Channel Capacity Measurement of 8x2 MIMO Transmission by Antenna Configurations in an Actual Cellular Environment." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 54.№ 11 (2006): 3285-291.
8. Hallbjorner, P. "The Significance of Radiation Efficiencies When Using S-Parameters to Calculate the Received Signal Correlation From Two Antennas." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 4 (2005): 97-99.
9. Morris, M. L., and M. A. Jensen. "Network Model for MIMO Systems with Coupled Antennas and Noisy Amplifiers." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 53.№ 1 (2005): 545-52.
10. Проценко М.Б. Электродинамическое описание радиоканала на основе матрицы S-параметров / М.Б. Проценко, И.Ю. Рожновская // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2011. – № 1. – С. 25-32.
11. Рожновская И.Ю. Численный анализ пропускной способности радиоканала на основе электродинамической модели / И.Ю. Рожновская // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – № 2. – С. 104-111.

12. Проценко М.Б. Электродинамическая модель коэффициента передачи радиолинии / М.Б. Проценко, И.Ю. Рожновская // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – № 1. – С. 27-32.
13. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. — М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2008. – 246 с.
14. Рожновская И.Ю. Потенциальные свойства двухзаходного цилиндрического спирального излучателя в качестве элемента МИМО-антенны / И.Ю. Рожновская // Цифрові технології. – 2013. – № 14. – С. 32-38.
15. Рожновская И.Ю. Исследование антенной решетки с цилиндрическими спиральными элементами для МИМО-систем / И.Ю. Рожновская // Цифрові технології. – 2014. – № 15. – С. 42-47.

REFERENCES:

1. Vishnevskij, V. M., S. L. Portnoj, and I. V. Shahnovich. *Encyclopedia of WiMAX. Path to 4G*. Moscow: Technosphere, 2009.
2. Bizaki, H. K. *MIMO Systems, Theory and Applications*. N.p.: InTech, 2011.
3. Tihvinskij, V. O., S. V. Terent'ev, and A. B. Jurchuk. *Mobile Network LTE: Technology and Architecture*. Moscow: Eco-Trends, 2010.
4. Nemirovskij, M. S., O. A. Shorin, A. I. Babin, and A. L. Sartakov. *Wireless Technologies on the Last Mile to the Last Inch*. Moscow: Eco-Trends, 2010.
5. Li, X., and Z. Nie. "Effect of Array Orientation on Performance of MIMO Wireless Channels." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 3 (2004): 368-71.
6. Martynchuk, A. A., and A. A. Nazmutdinov. *Improving the Capacity of MIMO Systems by Using Orthogonal Polarization Antennas*. Proc. of Applied Electronics. Status and Prospects of 4-th Intern. Radio Electronics Forum, Kharkiv. Vol. 2. Kharkiv: n.p., 2011. 248. Web. 21 Oct. 2011.
7. Nishimori, K., Y. Makise, M. Ida, R. Kudo, and K. Tsunekawa. "Channel Capacity Measurement of 8x2 MIMO Transmission by Antenna Configurations in an Actual Cellular Environment." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 54.№11 (2006): 3285-291.
8. Hallbjorner, P. "The Significance of Radiation Efficiencies When Using S-Parameters to Calculate the Received Signal Correlation From Two Antennas." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 4 (2005): 97-99.
9. Morris, M. L., and M. A. Jensen. "Network Model for MIMO Systems with Coupled Antennas and Noisy Amplifiers." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 53.№1 (2005): 545-52.
10. Protsenko, M. B., and I. Yu. Rozhnovskaya. "Electromagnetic Description of Radio Channel in Terms of Matrix of S-Parameters." *Proc. of the O.S. Popov ONAT 1* (2011): 25-32.
11. Rozhnovskaya, I. Yu. "Numerical Analysis of Radiochannel Capacity on The Basis of The Electromagnetic Model." *Proc. of the O.S. Popov ONAT 2* (2012): 104-11.
12. Protsenko, M. B., and I. Yu. Rozhnovskaya. "Electromagnetic Model of Radio Link Transmission Coefficient." *Proc. of the O.S. Popov ONAT 1* (2012): 27-32.
13. Bankov, S. E., and A. A. Kurushin. *Calculation of Radiating Structures Using FEKO*. Moscow: Company Spring, 2008.
14. Rozhnovskaya, I. Yu. "Potential Properties of The Combined Helical Radiator as MIMO-antenna Element." *Digital Technologies* 14 (2013): 32-38.
15. Rozhnovskaya, I. Yu. "Research of Antenna Array with Combined Helical Elements for MIMO-Systems." *Digital Technologies* 15 (2014): 42-47.