

УДК 621.396.67

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СПИРАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ MIMO-СИСТЕМ

РОЖНОВСКАЯ И.Ю.

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

## RESEARCH OF ANTENNA ARRAY WITH COMBINED HELICAL ELEMENTS FOR MIMO-SYSTEMS

ROZHNOVSKAYA I.YU.

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. O.S. Popov

*Аннотация.* Представлены результаты исследования поляризационных и излучающих свойств антенной решетки с элементами в виде двухзаходного цилиндрического спирального излучателя для MIMO-систем. Показана возможность ее применения в качестве MIMO-антенны для организации поляризационного, углового, пространственного или пространственно-поляризационного разделения каналов в современных беспроводных системах связи.

*Abstract.* The research results of the polarization and radiation properties of the antenna array with combined helical elements for MIMO-systems are represented. The possibility of its application as MIMO-antenna for organization of polarization, angular, space or space-polarization channel diversity in modern wireless communication systems is shown.

Повышение скорости передачи информации в современных системах беспроводной связи достигается за счет применения многоантенных систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) [1] и новых методов формирования и обработки сигналов, позволяющих путем разнесения сигналов на передающей и приемной стороне организовать независимые пространственные каналы [2]. Поэтому MIMO-антенны, которые применяются в современных системах мобильной связи, должны потенциально обеспечивать возможность организации поляризационного, углового, пространственного и др. разнесения каналов [3, 4].

В работах [5...7] в качестве элемента MIMO-антенны предложено использовать двухзаходный цилиндрический спиральный излучатель со встречной намоткой, который позволяет управлять поляризацией излучения [7, 8], получены калибровочные характеристики и показана возможность его использования для организации поляризационного разнесения каналов. Однако остаются не исследованными потенциальные возможности антенной решетки с цилиндрическими спиральными элементами в качестве MIMO-антенны, что и явилось целью данной статьи.

## 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СПИРАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Рассмотрим антенную решетку, состоящую из двух элементов, в качестве которых выступают цилиндрические спирали с противоположной намоткой с одинаковыми геометрическими параметрами. Указанные излучающие элементы размещаются ортогонально над общим плоским проводящим экраном эллиптической формы, как показано на рис. 1.

На рис. 1 ось антенной решетки (АР) совмещена с осью  $Z$  декартовой системы координат, соответственно, экран располагается в плоскости  $XOY$ . Вспомогательные оси  $Z'$  являются осями цилиндрических спиралей со встречной намоткой. Величиной  $d$  обозначено расстояние между осями цилиндрических спиралей со встречной намоткой.

Точки возбуждения спиральных заходов расположены в плоскости экрана на оси  $Y$ , точки возбуждения первого и четвертого заходов удалены от центра АР на расстояние  $d/2 + a$ , а второго и третьего – на расстояние  $d/2 - a$  ( $a$  – радиус спирали).

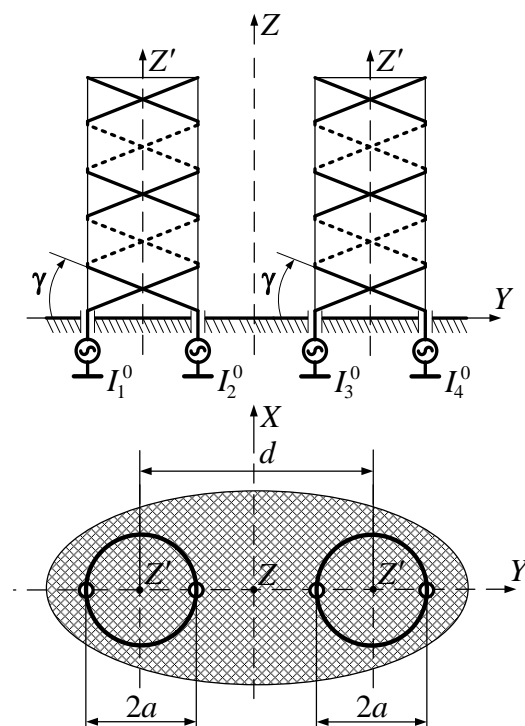


Рисунок 1 – Антенная решётка с элементами в виде цилиндрических спиралей

Направление намотки первого и третьего спиральных заходов выберем правостороннее, соответствующее осевому приращению спирали в положительном направлении оси  $Z'$  при обходе спирали по часовой стрелке. Тогда, направление намотки второго и четвертого спиральных заходов, соответственно, левостороннее. В качестве параметра, описывающего геометрическую конфигурацию спирали, выбран угол  $\alpha$ , изменяющийся в пределах от 0 до  $2\pi n_{\text{сп}}$ . Выбран исследуемый диапазон частот – 2,4 ... 2,7 ГГц, который объединяет в себе нижние частотные диапазоны стандартов Wi-Fi (IEEE 802.11 a/b/g/n) и Wi-MAX (IEEE 802.16e) [9, 10], где используется технология MIMO, и в котором сохраняется режим осевого излучения при равноамплитудном возбуждении всех спиралей и противофазном возбуждении совмещенных спиралей. Будем также считать, что спирали являются регулярными и характеризуются следующими геометрическими параметрами: радиус цилиндрической поверхности, на которую навит спиральный излучатель,  $a = 1,53$  см; угол наклона (подъема) витка спирали относительно плоскости, ортогональной оси цилиндрической поверхности (плоскость экрана),  $\gamma = 14$  град.; количество витков спирали  $n_{\text{сп}} = 7$ ; радиус излучающего проводника спирали  $r_{\text{пр}} = 1$  мм; большая ось эллипса экрана  $d_{\text{max}_1} = 12$  см; малая ось эллипса экрана  $d_{\text{max}_2} = 8$  см; расстояние между элементами АР (попарно совмещенными спиралями) —  $\lambda/2$ , так как известно [11], что при таком расположении элементов линейной АР достигается максимальный коэффициент направленного действия (КНД).

## 2 АНАЛИЗ ИЗЛУЧАЮЩИХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АР С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СПИРАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Для выявления потенциальных возможностей излучения рассматриваемой АР с точки зрения ее применения в MIMO-системах проведен следующий анализ. В качестве анализируемых параметров рассмотрены диаграммы направленности (ДН) исследуемой АР по  $E_{\theta}$  и  $E_{\varphi}$  составляющим поля излучения в ортогональных плоскостях на разных частотах анализируемого диапазона, частотная зависимость коэффициента эллиптичности (КЭ) в осевом направлении излучения, КНД по общему полю и его парциальных поляризационных составляющих, а также входное сопротивление АР. Исследования проводились в электродинамической среде моделирования устройств сверх высоких частот (СВЧ) и антенн FEKO [12], в основе которой лежит обобщенный метод наводимых электродвижущих сил (ЭДС).

Проведенные исследования ДН анализируемой АР по  $E_\theta$  и  $E_\phi$  составляющим поля излучения в ортогональных плоскостях на разных частотах анализируемого диапазона показали, что во всем исследуемом диапазоне частот сохраняется режим осевого излучения, ширина главного лепестка ДН по уровню половинной мощности, аналогично как и в случае совмещенной двухзаходной спиральной антенны [7], незначительно уменьшается с ростом частоты от  $\approx 36$  град. в нижней области частот до  $\approx 30$  град. в верхней.

На рис. 2 представлены ДН по соответствующим составляющим поля излучения в ортогональных плоскостях на средней (2,55 ГГц) частоте исследуемого диапазона. Отметим, что напряженность поля в осевом направлении излучения по  $E_\theta$  компоненте в ортогональной плоскости на 10 дБ меньше, чем в плоскости  $\phi = 0^\circ$ , а по  $E_\phi$  компоненте в ортогональной плоскости на 12 дБ меньше, чем в плоскости  $\phi = 90^\circ$ .

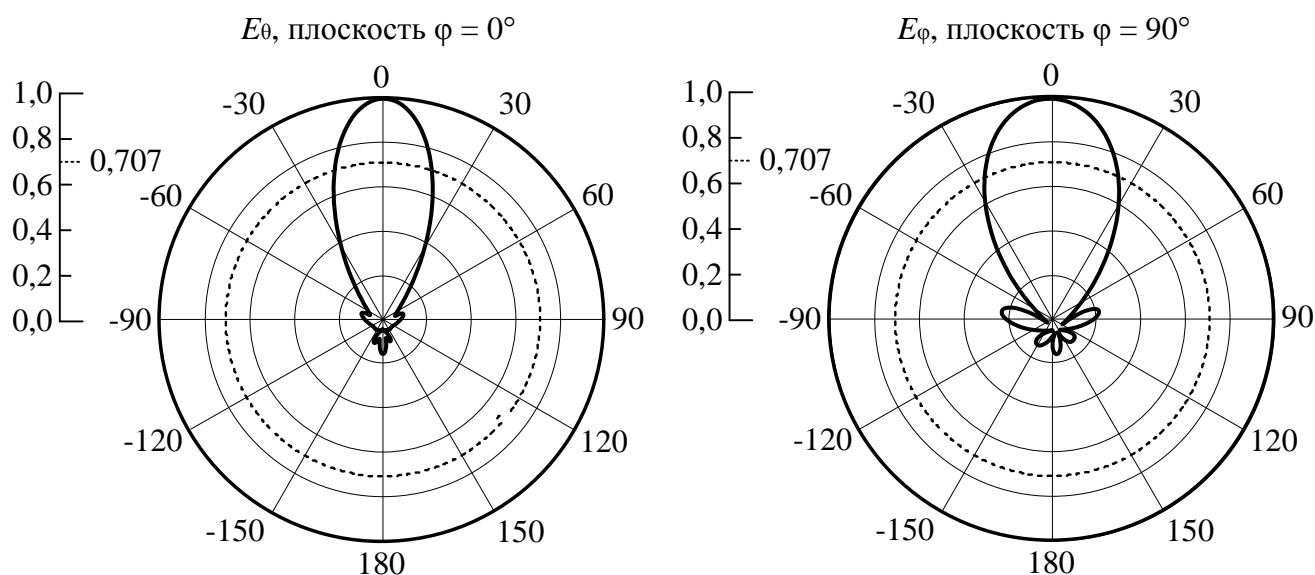


Рисунок 2 – ДН АР на частоте  $f = 2,55$  ГГц

Анализ зависимостей КНД по общему полю и его парциальных поляризационных составляющих от частоты позволяет отметить следующее. В выделенной полосе частот (от 2,4 ГГц до 2,7 ГГц), определяющей режим прямого осевого излучения, изменение КНД носит почти линейный характер. Причем в нижней части частотного диапазона наблюдаются минимальные значения КНД, а в верхней области происходит возрастание на  $\approx 1,7$  дБ, что согласуется с незначительным уменьшением ширины главного лепестка ДН по уровню половинной мощности. Таким образом, увеличение КНД в верхней части частотного диапазона обусловлено уменьшением ширины главного лепестка ДН.

Анализ частотного изменения КЭ в осевом направлении показал, что КЭ практически постоянен во всем исследуемом диапазоне частот и равен нулю  $КЭ \approx 0$ , т. е. при равноамплитудном возбуждении всех элементов и противофазном возбуждении совмещенных спиралей во всем диапазоне частот сохраняется линейная поляризация.

Проведенный анализ характера изменения входного сопротивления АР показал, что активная  $R_{вх}$  и реактивная  $X_{вх}$  составляющие входного сопротивления излучателя характеризуются двумя зонами: зоной постоянных (слабо изменяющихся) значений в нижней части диапазона, которая соответствует зоне слабо изменяющихся значений КНД, и зоной резко возрастающих значений в верхней области диапазона частот. В начале первой зоны составляющие  $R_{вх}$  и  $X_{вх}$  входного сопротивления составляют  $R_{вх} \approx 15...62$  Ом и  $X_{вх} \approx 440...500$  Ом, а с ростом частоты увеличиваются до  $R_{вх} \approx 215...515$  Ом и  $X_{вх} \approx 625...900$  Ом. Для компенсации реактивной составляющей входного сопротивления необходимо использовать согласующие устройства.

В [7] подтверждена потенциальная возможность управления поляризацией излучения двухзаходного цилиндрического спирального излучателя со встречной намоткой путем изменения амплитуд и фаз токов встречных заходов спирали. Аналогичные исследования проведены для АР, состоящей из двух элементов в качестве цилиндрических спиралей. Результаты исследований показали сохранение характера полученных для цилиндрического спирального излучателя зависимостей, а именно при равноамплитудном возбуждении КЭ равен нулю, а  $\beta = 90$  град., что соответствует линейно-вертикальной поляризации излучения, при изменении амплитуд напряжения изменяется угол наклона плоскости поляризации  $\beta$  и КЭ и практически во всем исследуемом диапазоне частот сохраняется режим осевого излучения. Следует отметить, что при изменении сдвига фаз  $\Delta\psi$  в обоих совмещенных элементах АР на одинаковое значение угол  $\beta$  увеличивается по сравнению с изменением фаз только в одном совмещенном элементе АР. Изменение сдвига фаз  $\Delta\psi$  также приводит к изменению КЭ.

Помимо работы в осевом режиме излучения исследуемая АР позволяет управлять направлением главного лепестка ДН при изменении фаз токов возбуждения элементов АР. Для анализа возможности управления главным лепестком ДН введем понятие угла поворота ДН в горизонтальной плоскости  $\delta$ , град. Результаты исследований на средней частоте диапазона  $f = 2,55$  ГГц представлены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что при изменении фаз токов возбуждения одного из совмещенных спиральных излучателей (при сохранении между ними сдвига фаз в 180 град.) приводит к повороту главного лепестка ДН  $\delta$  в горизонтальной плоскости АР либо в левую (отрицательные значения углов) (см. рис. 3, а), либо в правую (положительные значения углов) (см. рис. 3, б) сторону. Следует отметить, что ДН с приемлемым уровнем боковых лепестков сохраняется в диапазоне поворота луча от  $-8$  до  $8$  град., при увеличении значений угла поворота в одну либо другую сторону наблюдается рост уровня левого или правого бокового лепестка ДН (см. рис. 3).

Таблица 1 – Анализ угла поворота главного лепестка ДН при изменении фаз токов возбуждения элементов АР

Фаза тока возбуждения, град.				Угол поворота главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости, $\delta$ , град.	Характер ДН
Порт 1	Порт 2	Порт 3	Порт 4		
180	0	0	180	-28 (28)	Двухлучевая ДН
180	0	340	160	-24	Рост уровня правого бокового лепестка ДН
180	0	320	140	-20	
180	0	300	120	-16	
180	0	280	100	-12	
180	0	260	80	-8	
180	0	240	60	-6	ДН с приемлемым уровнем боковых лепестков
180	0	220	40	-4	
180	0	200	20	-2	
180	0	180	0	0	
200	20	180	0	3	
220	40	180	0	5	
240	60	180	0	8	
260	80	180	0	12	
280	100	180	0	16	
300	120	180	0	20	
320	140	180	0	24	Рост уровня левого бокового лепестка ДН
340	160	180	0	26	
0	180	180	0	28 (-28)	
					Двухлучевая ДН

При возбуждении портов (спиралей) 180, 0, 0, 180 град. или 0, 180, 180, 0 град., соответственно, угол  $\delta$  достигает своего максимального значения, причём режим осевого излучения (см. рис. 4, а) сменяется формированием двухлучевой ДН (см. рис. 4, б).

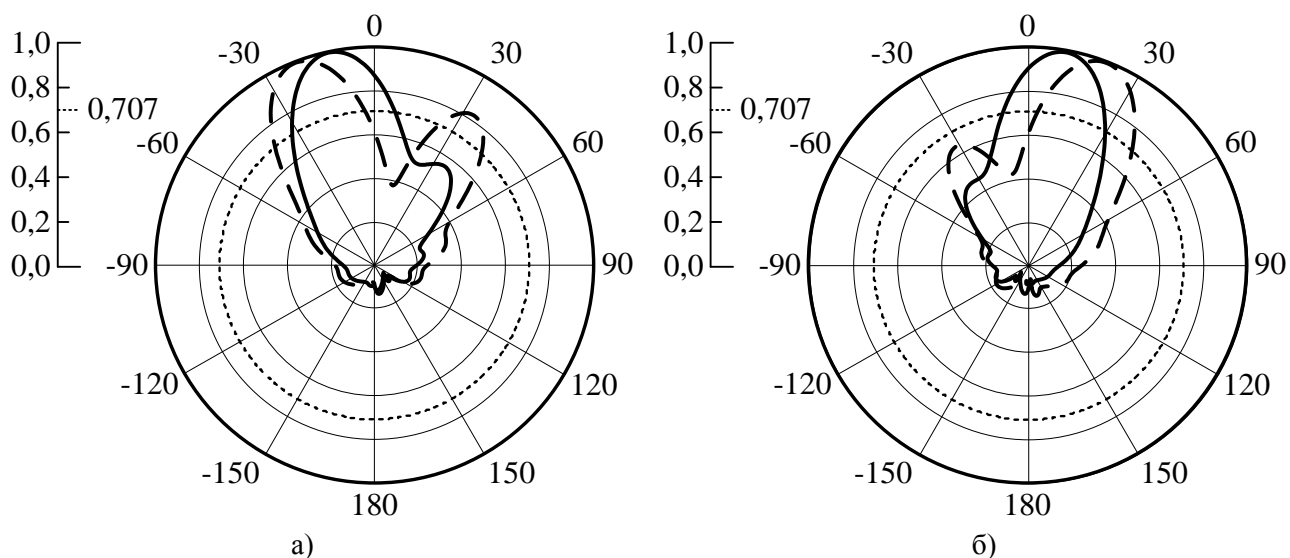


Рисунок 3 – Управление направлением главного лепестка ДН АР при изменении фаз токов питания

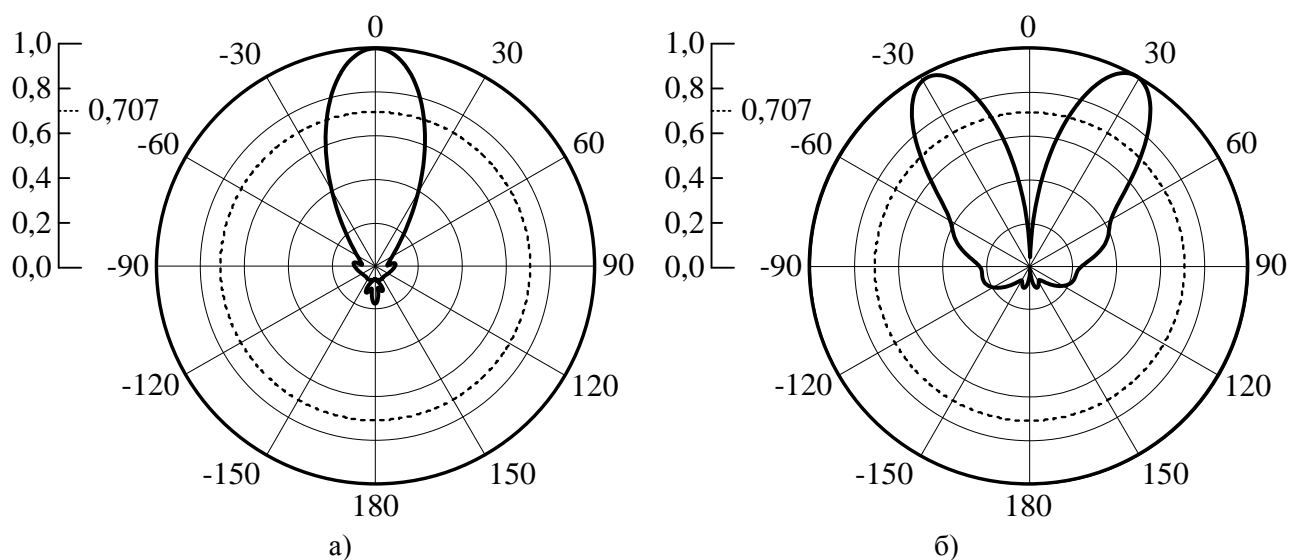


Рисунок 4 – Формирование двухлучевой ДН АР

В процессе исследования выявлено, что при управлении поворотом луча ДН  $\delta$  при всех значениях фаз токов возбуждения угол поворота плоскости поляризации сохраняется  $\beta = 90$  град., что соответствует линейно-вертикальной поляризации излучения, за исключением первого и последнего вариантов возбуждения спиралей (180, 0, 0, 180 град. или 0, 180, 180, 0 град.), когда формируется двухлучевая ДН, угол  $\beta$  изменяет свое значение на 90 град., что соответствует линейно-горизонтальной поляризации излучения.

Также следует заметить, что на других частотах диапазона сохраняется аналогичная зависимость угла поворота луча ДН  $\delta$  при изменении фаз токов возбуждения, изменяются только значения углов  $\delta$ .

Таким образом, проведенные исследования характеристик АР, состоящей из двух элементов, в качестве которых выступают двухзаходные цилиндрические спиральные излучатели с одинаковыми геометрическими параметрами, показали возможность формирования режима прямого осевого излучения с линейной поляризацией во всем исследуемом диапазоне частот при равноамплитудном возбуждении всех спиралей и противофазном возбуждении совмещенных спиралей, а также возможность управлять направлением главного лепестка ДН с помощью изменения фаз питания элементов АР и формировать двухлучевую ДН. Результаты проведенных исследований позволили выявить по-

тенциальные частотные и поляризационные свойства анализируемой AP, а также показали возможность ее использования в качестве MIMO-антенны для организации поляризационного, углового, пространственного и пространственно-поляризационного разделения каналов в современных беспроводных системах связи.

К основным направлениям дальнейших исследований электродинамических особенностей MIMO-систем планируется отнести:

- анализ пропускной способности MIMO-систем с поляризационным, пространственным и угловым разнесением при применении антенных систем на основе цилиндрических спиральных излучателей;
- исследование эффективности MIMO-систем с учетом потенциальных свойств различных антенных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tse D. Fundamentals of Wireless Communication / Tse D., Viswanath P. – Cambridge University Press, 2005. – 564 p.
2. 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.
3. Saunders S.R. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems / S.R. Saunders, A. Aragon-Zavala. — John Wiley & Sons Ltd, 2007. — 553 p.
4. Проценко М.Б. Исследование электродинамических методов разнесения для MIMO технологий / М.Б. Проценко, И.Ю. Рожновская – Матеріали V Міжнародного науково-технічного симпозиуму «Нові технології в телекомунікаціях», (17-21 січня 2012 р.). – Карпати, Вишків. – 2012. – С. 25.
5. Рожновская И.Ю. Выбор антенны при реализации MIMO-технологий для беспроводных телекоммуникационных систем / И.Ю. Рожновская, М.Б. Проценко – Материалы 8-й Международной молодежной НТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012», 23 –27 апреля 2012 г. – Севастополь, Украина. – 2012. – С. 147.
6. Protsenko M.B. Research of combined helical antenna characteristics for MIMO-technology / M.B. Protsenko, I.Yu. Rozhnovskaya – Proc. of the 6<sup>th</sup> Inter. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September, 17 - 21. – Sevastopol, Ukraine, 2012. – P. 158–160.
7. Рожновская И.Ю. Потенциальные свойства двухзаходного цилиндрического спирального излучателя в качестве элемента MIMO-антенны / И.Ю. Рожновская // Цифрові технології. – 2013. – Т. № 14. – С. 32–39
8. Юрцев О.А. Спиральные антенны / Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
9. Wi-Fi CERTIFIED 802.11n draft 2.0: Longer-Range, Faster-Throughput, Multimedia-Grade Wi-Fi Networks. – Wi-Fi Alliance, 2007. – 18 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.wi-fi.org/.../WFA\\_802\\_11n\\_Industry](http://www.wi-fi.org/.../WFA_802_11n_Industry).
10. IEEE 802.16 Standards: Broadband Wireless Metropolitan Area Networks (MANs) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>.
11. Orfanidis S.J. Electromagnetic Waves and Antennas [Электронный ресурс] / S.J. Orfanidis. – Rutgers University, 2008. – 778 p.
12. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2008. – 246 с.