

Раздел II. Математическое моделирование физических процессов и устройств

УДК 621.396.67

В.А. Обуховец, А.В. Барна

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭКРАНОВ

Целью работы является разработка методики синтеза частотно-селективных экранов по заданным требованиям к форме частной характеристики. В качестве синтезируемых параметров использованы геометрические размеры, определяющие форму элементов периодической решетки экрана. Отмечается, что успех, качество и скорость решения задачи синтеза (оптимизации параметров экранов) в существенной степени определяются заданием начального приближения. Для правильного выбора начального приближения выполнен значительный объем предварительных вычислительных экспериментов, позволивших предложить наиболее удобную конфигурацию ячейки Флоке экрана и определить «чувствительные» геометрические параметры экрана, перебор значений которых реализуется в процессе оптимизации. Показано, что оптимизацию частотных характеристик экранов более целесообразно выполнять методом интерполяционного синтеза с последующим применением одной из известных процедур оптимизации. На ряде примеров продемонстрировано, что для практических применений достаточно задавать значения частотной характеристики в нескольких контролируемых точках. Обсуждаются проблемы конструирования целевой функции задачи оптимизации и система ограничений на искомое решение. Предлагается ряд параметров, в частности значения диэлектрической проницаемости и толщины слоев, зафиксировать, а регулировке подвергнуть характерные геометрические размеры, определяющие конфигурацию элемента периодической решетки экрана. Представлены результаты синтеза нескольких типов частотно-селективных экранов, каждый из которых представляет собой трехслойную систему из периодических решеток квадратных полосковых элементов с прямоугольными и (или) крестообразными вырезами. Приведены начальные значения искомых параметров и соответствующие им частотные характеристики. Минимизация целевой функции задачи выполнена методом генетических алгоритмов. Результаты оптимизации представлены в виде набора параметров экрана и синтезированной частотной характеристики. Проведена экспериментальная проверка макета частотно-селективного экрана, построенного по результатам решения теоретической задачи. Представлено сравнение результатов расчетов и экспериментов.

Частотно-селективный; синтез; оптимизация; периодическая решетка; микрополосковый элемент; целевая функция.

V.A. Obukhovets, A.V. Barna

GEOMETRY PARAMETERS OF FREQUENCY SELECTIVE SCREENS OPTIMIZATION

The procedure of frequency selective screens synthesis is the aim of the paper. The initial condition is the requirement to the shape of scattering matrix elements frequency dependences. As the synthesized parameters there are used geometric dimensions that define shape of the screen periodic array. It is noted that the success, quality and speed of solving the synthesis problem (calculation of optimized set of screen parameters) is substantially determined by specifying the

initial approximation. To determine the correct choice of the initial approximation there were made a considerable number of preliminary computational experiments allowed to offer the most convenient configuration of the screen Floquet cell and identify "most sensitive" geometric parameters of the screen, which values selection is implemented in the optimization process. It is shown that while frequency characteristics optimization it's more appropriate to use so called interpolation synthesis technique with applying one of the known optimization procedure. Several examples demonstrated that for practical applications is sufficient to put the values of the frequency characteristics in limited number of controlled points. Questions of constructing the objective function of the problem optimization and methods of setting system restrictions on the desired solution. It's recommended to fix a number of parameters, for example, the values of dielectric constant and thickness of the layers, and to determine characteristic geometric dimensions, which define the configuration of the screen element in the periodic array. Synthesis problems results for several types of frequency selective screens, each of them represents itself as three-layer system of periodic lattices square patch with rectangular shape and (or) cruciform recesses. There are shown the initial values of the parameters to be optimized and the corresponding frequency response. Minimizing procedure of the objective function is made by one of genetic algorithm methods. The results of optimization problem solution are presented as a set of parameters and display the synthesized frequency characteristics. There was made an experimental verification of laboratory model of frequency selective screen, built on the results of the theoretical problem solution. A comparison of results of calculations and experiments are discussed.

Frequency-selective; synthesis; optimization; periodic array; microstrip element; the objective function.

Введение. В радиоэлектронных системах широко применяются частотные фильтры, построенные на сосредоточенных элементах или на элементах с распределенными параметрами. Подобные фильтры, как правило, входят в состав электронных схем входных цепей приемных устройств или выходных каскадов передатчиков.

Характерной особенностью построения современных радиосистем можно считать стремление «перенести» некоторую часть проблемы обработки сигналов непосредственно в антенну. При этом первичной обработке подвергаются не напряжения и токи в электронной схеме, а поля в элементах антенны [1]. Подобная предварительная обработка сигналов считается предпочтительной, поскольку обеспечивает лучшие значения отношения сигнал/шум.

Примерами логического продолжения указанной тенденции могут служить селективные экраны, размещенные перед антенной. Такие экраны можно рассматривать как пространственные (по месту расположения и их геометрии) фильтры, способные реализовать селективные частотные, поляризационные или угловые характеристики [2–11].

Наиболее популярными следует считать частотно-селективные структуры, экраны, поверхности. Их применяют при создании многочастотных антенн [5, 7, 13, 15], обтекателей, радиопоглощающих материалов [2, 4]. Как правило, подобные экраны изготавливают в виде периодических дифракционных решеток, выполненных по печатной технологии. Решетка может представлять собой перфорированный экран или систему полосковых элементов [4]. Форма и размеры элементов, геометрия решетки, а также параметры подложки определяют основные электрические характеристики экрана.

Проектирование частотно-селективных экранов производится, как правило, в интерактивном режиме в процессе компьютерного моделирования [14–16, 18]. Обычно для создания модели применяют один из двух подходов: с применением эквивалентных схем замещения или на основе решения электродинамической задачи дифракции плоской волны на такой структуре.

Результат проектирования и качество решения определяются в значительной степени квалификацией разработчика, накопленного им опыта, а также быстротой и точностью применяемых алгоритмов. Выполнения требований к частотной характеристике добиваются перебором варьируемых параметров, основанным на опыте и интуиции разработчика.

Рациональный и эффективный процесс проектирования должен опираться не на интуитивный перебор параметров, а на решение задачи синтеза характеристик решетки [17]. Сложность проблемы не позволяет получить аналитическое решение. Подобные задачи принято решать методами математического программирования [19], позволяющими организовать оптимальный итерационный поиск оптимальных параметров решетки.

Постановка задачи синтеза. Исторически сложилось так, что в диапазоне СВЧ теория синтеза развивалась, в основном, применительно к СВЧ-фильтрам, антеннам и антенным решеткам. Из всего многообразия методов синтеза указанных систем можно выделить три класса задач:

- ◆ аппроксимационные задачи, обеспечивающие наилучшее приближение к требуемой форме синтезируемой характеристики (примеры: диаграмма направленности антенны, частотная зависимость параметров фильтра), которая задана в виде некоторой непрерывной функции;
- ◆ интерполяционный синтез, гарантирующий приближение заданной и синтезируемой характеристик в конечном дискретном множестве точек («точечный» синтез);
- ◆ оптимизационные задачи, которые ставят целью добиться наилучших значений выбранных параметров системы при некоторых дополнительных условиях.

В настоящей работе синтез частотно-селективного экрана выполнен интерполяционным методом, в соответствии с которым сформулирована следующая постановка задачи.

Для частотно-селективного экрана с выбранными предварительно количеством слоев и конфигурацией элементов решетки определить оптимальный набор геометрических параметров, обеспечивающих наилучшее приближение требуемой и реализуемой частотных характеристик в M заданных контролируемых точках.

Целевая функция задачи синтеза. Применение методов математического программирования сводится к многократному перебору свободно варьируемых параметров экрана (форма и размеры элементов дифракционной решетки, диэлектрическая проницаемость и толщина подложки). При этом для каждого набора параметров приходится каждый раз полностью выполнять решение электродинамической задачи анализа, сравнивать полученные результаты с требуемыми, при необходимости делать корректировку параметров и повторять решение. Ввиду сложности и громоздкости задачи подобные вычисления могут потребовать неприемлемых вычислительных затрат. Успех решения в значительной степени зависит от выбора алгоритма оптимизации параметров. Даже для наиболее эффективных из них объем вычислительных ресурсов определяется размерностью пространства варьируемых параметров. Поэтому к числу этих параметров целесообразно отнести только те из них, по отношению к которым решаемая задача обладает наибольшей «чувствительностью».

В качестве целевой функции задачи синтеза амплитудно-частотной характеристики экрана удобно выбрать в виде

$$\Phi(x_1, x_2, \dots, x_N) = \int_{f_u}^{f_d} \left| F^{mp\epsilon\delta}(x_1, x_2, \dots, x_N) - F^{peal}(x_1, x_2, \dots, x_N) \right|^2 df, \quad (1)$$

где (x_1, x_2, \dots, x_N) – набор варьируемых параметров экрана; $F^{mp\epsilon\delta}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ и $F^{peal}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – соответственно требуемая и реализуемая частотные характеристики (это могут быть, например, коэффициент отражения S_{11} или коэффициент передачи S_{21}); f_n и f_g – нижняя и верхняя частоты диапазона. Введение целевой функции позволяет математическую формулировку задачи свести к поиску набора параметров (x_1, x_2, \dots, x_N) , обеспечивающих достижение экстремума (в данном случае – минимума) функции $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_N)$.

Необходимо отметить, что выбор вида целевой функции задачи во многом определяет как вычислительные затраты, так и качество получаемого решения [17]. Еще одна особенность формулировки задачи синтеза состоит в наложении некоторых ограничений на будущее решение. Это касается, например, геометрических размеров, определяющих форму элемента решетки. Разумные ограничения должны касаться пределов изменения толщины подложки, значений параметров диэлектрика и т.п. Как показывает опыт, алгоритмы численной оптимизации при наличии ограничений проще всего реализуются с использованием так называемых «штрафных» функций [19]. Их включают в определение целевой функции как дополнительные слагаемые с весовыми коэффициентами, определяющими степень важности учета данного ограничения.

Некоторые параметры структуры приходится фиксировать на начальном этапе решения и блокировать возможные их изменения в процессе поиска экстремума целевой функции. Это касается, например, значений диэлектрической проницаемости и толщины подложки, размеров периодов структуры и т.д.

Приведенные примеры ограничений позволяют значительно сократить количество свободно варьируемых параметров («степеней свободы»), но этот шаг может привести к ухудшению качества получаемого решения и возрастанию значения целевой функции (1).

В таком случае требуется увеличить количество параметров (x_1, x_2, \dots, x_N) . Это заставляет усложнять форму отдельного элемента решетки так, чтобы она определялась большим количеством геометрических параметров, и (или) увеличить количество слоев экрана [15, 22]. При выполнении конкретных расчетов, как правило, интеграл в (1) заменяют суммой отклонений заданной характеристики от реализуемой в *конечном числе точек*. Их выбор и количество определяют быстрое действие алгоритма синтеза и качество полученного решения.

Примеры синтеза. Рассмотрим несколько примеров синтеза частотно-селективных поверхностей. На рис. 1 приведена геометрия одной ячейки Флоке трехслойной микрополосковой решетки. Все три слоя представляют собой периодическую систему из квадратных полосковых элементов с прямоугольными и (или) крестообразными вырезами. Подобная топология элементов решетки соответствует приведенным выше аргументам и выбрана на основе серии предварительных вычислительных экспериментов, направленных на выявление параметров, по отношению к которым синтезируемые характеристики обладают наибольшей «чувствительностью».

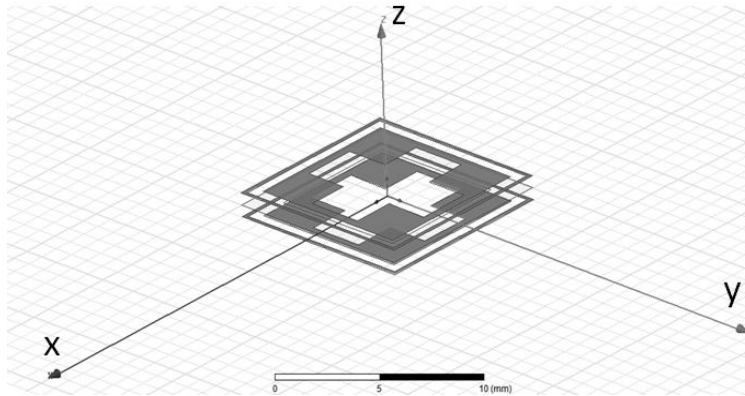


Рис. 1. Конфигурация элементов одного периода экрана

Начальное приближение набора искомых параметров (x_1, x_2, \dots, x_N) представлено в табл. 1.

Таблица 1

D_x , мм	D_y , мм	h, мм	L, мм	a, мм	b, мм	w, мм	c, мм
10	10	0,5	7	9	8,5	1	9,5

В табл. 1 приняты следующие обозначения: D_x , D_y – периоды ячейки; h – расстояние между слоями; L – длина крестообразного выреза; a – размер внешней рамки; b – сторона «квадрата» 1 и 3 слоя; c – размер рамки промежуточного слоя; w – ширина крестообразного выреза. Приведенным начальным значениям варьируемых параметров соответствуют частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения (рис. 2).

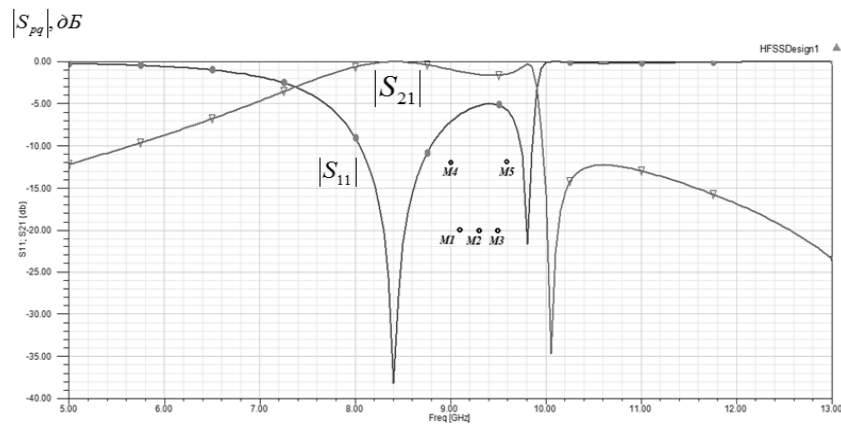


Рис. 2. Частотные характеристики экрана с начальными значениями параметров

Точками $M1 - M5$ на рис. 2 обозначены требуемые значения коэффициента отражения на заданных частотах. Как видно из рис. 2, выбранное начальное приближение для набора варьируемых параметров не способно обеспечить выполнение условий задачи синтеза.

Оптимальный набор параметров после выполнения итерационной процедуры минимизации целевой функции (1) методом генетических алгоритмов [20, 21] приведен в табл. 2.

Таблица 2

Dx , мм	Dy , мм	h , мм	L , мм	a , мм	b , мм	w , мм	c , мм
10	10	0,6	7,5	9,5	8,55	2,95	7,2

Частотные характеристики, соответствующие параметрам табл. 2, представлены на рис. 3.

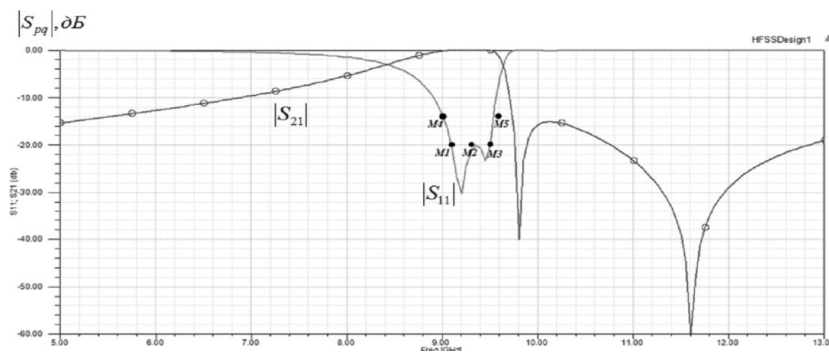


Рис. 3. Частотные характеристики экрана с оптимизированными параметрами

Как следует из приведенного примера, при рациональном выборе относительно небольшого количества контролируемых точек ($M1, M2...M5$) можно получить частотную характеристику, отвечающую заданным требованиям по полосе пропускания и уровню затухания. Для большей детализации требуемой характеристики количество контролируемых точек необходимо увеличивать. Соответственно придется увеличить и количество варьируемых геометрических параметров решеток экрана. Это может потребовать увеличения количества слоев экрана и (или) усложнения геометрии элемента решетки. Если число свободных параметров (x_1, x_2, \dots, x_N) окажется меньше числа контролируемых точек, погрешность синтеза хоть и будет иметь наименьшее значение в среднеквадратическом смысле, тем не менее ее величина возрастет.

По результатам решения задачи оптимизации значений геометрических параметров, приведенных в табл. 2, был разработан и экспериментально исследован макет частотно-селективного экрана. На рис. 4 представлены расчетная и экспериментальная частотные зависимости модуля коэффициента отражения S_{11} от частоты.

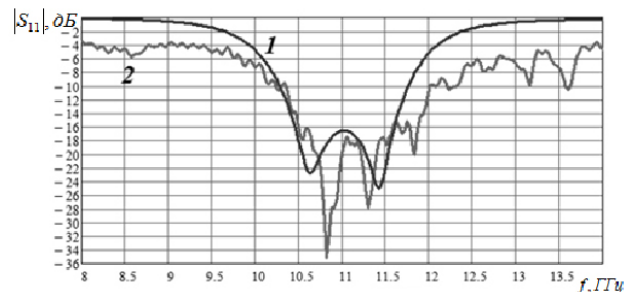


Рис. 4. Расчетная (1) и экспериментально измеренная (2) зависимости $|S_{11}|$ от частоты

Как следует из приведенных результатов, несмотря на то, что исследуемый лабораторный макет имеет ограниченные размеры, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

Выводы. Выбор геометрии решетки частотно-селективной структуры и топологии ее элементов, обладающих необходимым количеством «степеней свободы», позволяет синтезировать ЧСС с заданными частотными характеристиками достаточно сложной формы, определяемой набором значений в некотором ограниченном множестве контролируемых точек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кравченко В.Ф., Сиренко Ю.К., Сиренко К.Ю.* Преобразование и излучение электромагнитных волн открытыми резонансными структурами. – М.: Физматлит, 2011. – 317 с.
2. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения // Антенны. – 2005. – № 9. – С. 4-12.
3. *Mitra Raj, Pelletti Chiara.* Challenges in designing frequency selective surfaces to yield wide-angle response over a wide frequency band // Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts, Guangzhou, China. – 2014. – P. 1230.
4. *Rubin B.J.* Scattering from a periodic array of apertures or plates where conductors have arbitrary shape, thickness, and resistivity // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34, No. 11.
5. *Ranga Yogesh, Matekovits Ladislau, Weily Andrew R., Karu P.* A constant gain ultra-wideband antenna with a multi-layer frequency selective Surface // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2013. – Vol. 38. – P. 119-125.
6. *Behdad Nader, Al-Joumayly Mudar, Salehi Mohsen.* A low-profile third-order bandpass frequency selective surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 57, No. 2. – P. 460-466.
7. *Ranga Yogesh, Matekovits StuLadislau, Karu P. Esselle, Weily Andrew R.* Multioctave frequency selective surface reflector for ultrawideband antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 219-222.
8. *Baisakhiya Sanjay, Sivasamy Ramprabhu, Kanagasabai Malathi, Periaswamy Malathi.* Novel compact UWB frequency selective surface for angular and polarization independent operation // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2013. – Vol. 40. – P. 71-79.
9. *Li Yuqing, Pei Zhiping, Qu Shaobo, Xu Zhuo, Wang Jiafu, Zhou Hang, Gu Chao, Yu Fei.* The design of a broad band third-order frequency-selective surfaces // PIERS Proceedings, Suzhou, China, September 12. – 2011. – P. 476-479.
10. *Zhou H., Qu S.-B., Wang J.-F., Lin B.-Q., Ma H., Xu Z., Bai P., Peng W.-D.* Ultra-wideband frequency selective surface // Electronics Letters. – 2012. – Vol. 48, No. 1. – P. 37-44.
11. *Zhang J. C., Yin Y. Z., Ma J. P.* Frequency selective surfaces with fractal four legged elements // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2009. – Vol. 8. – P. 1-8.
12. *Rubin B. J.* General solution for propagation, radiation and scattering in arbitrary 3D inhomogeneous structures // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 1992. – Vol. 34, No. 1.
13. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Разработка микрополосковых отражательных антенных решеток для фокусировки и поляризационной фильтрации на СВЧ // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 4. – С. 27-33.
14. *Sercu Jeannick, Fache Niels, Libbercht Franck, De Zutter Daniel.* Full wave space-domain of open microstrip discontinuities including the singular-current-edge behavior // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1993. – Vol. 41, No. 9.
15. *Загоровский В.И., Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Электродинамический анализ многослойных микрополосковых отражательных антенных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 4 (59). – С. 4-11.
16. *Espelid T.O., Overholt K.J.* An algorithm for automatic integration of infinite oscillating tails // Num. Algorithms. – 1994. – Vol. 8. – P. 83-101.
17. *Бахрах Л.Д.* и др. Синтез излучающих систем. – М.: Сов. радио. – 1974. – 230 с.
18. *Hasegawa T., Tori T.* An automatic integration of oscillatory functions by the Chebyshev series expansion // J. Computer Appl. Math. – 1987. – Vol. 17. – P. 21-29.

19. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ. / под ред. М.Л. Быховского. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
20. Johnson J. Michael, Rahmat-Samii Yahya. Genetic algorithms in engineering electromagnetics // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 1997. – Vol. 39, No. 4. – P. 7-21.
21. Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. – М.: Оркада, 2012. – 240 с.
22. Обуховец В.А. Расчет полей фазированных антенных решеток с многослойным укрытием // *Антенны*. – 2015. – № 8. – С. 20-25.

REFERENCES

1. Kravchenko V.F., Sirenko Yu.K., Sirenko K.Yu. Preobrazovanie i izluchenie elektromagnitnykh voln otkrytymi rezonansnymi strukturami [The transformation and radiation of electromagnetic waves open resonant structures]. Moscow: Fizmatlit. 2011, 317 p.
2. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Osnovnye oblasti primeneniya [Frequency-selective surface. Main applications], *Antenny* [Antennas], 2005, No. 9, pp. 4-12.
3. Mittra Raj, Pelletti Chiara. Challenges in designing frequency selective surfaces to yield wide-angle response over a wide frequency band, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts, Guangzhou, China*, 2014, pp. 1230.
4. Rubin B.J. Scattering from a periodic array of apertures or plates where conductors have arbitrary shape, thickness, and resistivity, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1986, Vol. 34, No. 11.
5. Ranga Yogesh, Matekovits Ladislau, Weily Andrew R., Karu P. A constant gain ultra-wideband antenna with a multi-layer frequency selective Surface, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2013, Vol. 38, pp. 119-125.
6. Behdad Nader, Al-Joumayly Mudar, Salehi Mohsen. A low-profile third-order bandpass frequency selective surface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, Vol. 57, No. 2, pp. 460-466.
7. Ranga Yogesh, Matekovits StuLadislau, Karu P. Esselle, Weily Andrew R. Multioctave frequency selective surface reflector for ultrawideband antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 219-222.
8. Baisakhiya Sanjay, Sivasamy Ramprabhu, Kanagasabai Malathi, Periaswamy Malathi. Novel compact UWB frequency selective surface for angular and polarization independent operation, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2013, Vol. 40, pp. 71-79.
9. Li Yuqing, Pei Zhiping, Qu Shaobo, Xu Zhuo, Wang Jiafu, Zhou Hang, Gu Chao, Yu Fei. The design of a broad band third-order frequency-selective surfaces, *PIERS Proceedings, Suzhou, China, September 12, 2011*, pp. 476-479.
10. Zhou H., Qu S.-B., Wang J.-F., Lin B.-Q., Ma H., Xu Z., Bai P., Peng W.-D. Ultra-wideband frequency selective surface, *Electronics Letters*, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 37-44.
11. Zhang J. C., Yin Y. Z., Ma J. P. Frequency selective surfaces with fractal four legged elements, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2009, Vol. 8, pp. 1-8.
12. Rubin B. J. General solution for propagation, radiation and scattering in arbitrary 3D inhomogeneous structures, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1992, Vol. 34, No. 1.
13. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Razrabotka mikropoloskovykh otrazhatel'nykh antenykh reshetok dlya fokusirovki i polarizatsionnoy fil'tratsii na SVCh [Development of reflective microstrip antenna arrays for focusing and polarization filtering at microwave frequencies], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2006, No. 4, pp. 27-33.
14. Sercu Jeannick, Fache Niels, Libbercht Franck, De Zutter Daniel. Full wave space-domain of open microstrip discontinuities including the singular-current-edge behavior, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1993, Vol. 41, No. 9.
15. Zagorovskiy V.I., Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Elektrodinamicheskii analiz mnogosloynnykh mikropoloskovykh otrazhatel'nykh antenykh reshetok [Electrodynamic analysis of multi-layer reflective microstrip antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 4 (59), pp. 4-11.
16. Espelid T.O., Overholt K.J. An algorithm for automatic integration of infinite oscillating tails, *Num. Algorithms*, 1994, Vol. 8, pp. 83-101.

17. *Bakhrakh L.D. i dr. Sintez izluchayushchikh system [Synthesis of radiating systems].* Moscow: Sov. radio, 1974, 230 p.
18. *Hasegawa T., Tori T.* An automatic integration of oscillatory functions by the Chebyshev series expansion, *J. Computer Appl. Math.*, 1987, Vol. 17, pp. 21-29.
19. *Khimel'blau D.* Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye [Applied nonlinear programming]: Translation from English, Ed. by M.L. Bykhovskogo. Moscow: Mir, 1975, 534 p.
20. *Johnson J. Michael, Rahmat-Samii Yahya.* Genetic algorithms in engineering electromagnetics, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1997, Vol. 39, No. 4, pp. 7-21.
21. *Bankov S.E., Gutsayt E.M., Kurushin A.A.* Reshenie opticheskikh i SVCh zadach s pomoshch'yu HFSS [The solution of optical and microwave problems using HFSS]. Moscow: Orkada, 2012, 240 p.
22. *Obukhovets V.A.* Raschet poley fazirovannykh antennoykh reshetok s mnogosloynym ukrytiem [The calculation of the fields of phased arrays with a multi-layer cover], *Antenny [Antennas]*, 2015, No. 8, pp. 20-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Х.Ш. Кульбикаян.

Обуховец Виктор Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vao@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: 88634322626; кафедра антенн и радиопередающих устройств; д.т.н.; профессор.

Барна Александр Викторович – кафедра антенн и радиопередающих устройств; студент.

Obukhovets Victor Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: vao@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia, phone: +78634322626, the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng.sc.; professor.

Barna Alexander Victorovich – the department of antennas and radio transmitters; student.

УДК 629.7.028.6

Х.Е.А. Махьюб, Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко

ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАНАЛА В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МАССИВ-ММО

Рассмотрена модель канала связи с учетом неидеальности генераторного оборудования, использующая систему массив-ММО для базовых станций и малогабаритную антенну в оборудовании пользователя. Выполнено исследование модели канала системы массив-ММО с неидеальным оборудованием базовой станции и абонентского устройства для системы связи 5-го поколения и проанализированы пропускная способность и точность оценки канала систем массив-ММО с неидеальным оборудованием базовой станции и абонентского устройства с использованием пакета MatLab. Используемая модель канала связи учитывает искажения оборудования на каждой антенне с помощью аддитивного искажающего шума, пропорционального мощности сигнала в этой антенне. Исходными данными для анализа спектральной эффективности канала связи являются: количество антенн на базовой станции, уровни искажения оборудования базовой станции и абонентского устройства, коэффициент корреляции между соседними антеннами, соотношение сигнал/шум, длительность пилот-сигнала, время моделирования и шаг по времени и мощности передатчика. Проведенный анализ показал, что использование системы массив-ММО в беспроводных сетях 5-го поколения позволяет достичь относительно высокую спектральную эффективность и эффективность энергопотребления. Показано, что искажения параметров и характеристик оборудования влияют на точность оценки канала и ограничивают пропускную способность каждого абонентского устройства по восходящей и нисходящей.