

Vishnyakov Renat Yur'evich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: Renat.Vishnyakov@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371885; the department of system analysis and telecommunications; assistant.

Vishnyakov Yuriy Mussovich – e-mail: Jury.Vishnyakov@gmail.com; the dean of college of automation and computer engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.396

А.О. Касьянов, С.Е. Строчков

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ
УСТРОЙСТВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ, ЧАСТОТНОЙ И
ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИИ НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ
ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ТОПОЛОГИЕЙ
ПЕЧАТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Применение интеллектуальной обшивки в перспективных летательных аппаратах (ЛА), объединяющей функции таких подсистем, как антенная, сенсорная и управляемого рассеяния, позволяет существенно снизить энергозатраты авионики ЛА, а введение в ее состав ректенн решает проблему беспроводного энергоснабжения ЛА. Печатные антенны являются высокотехнологичной конструктивной реализацией ректенн. При этом, как правило, ректенна приемной станции ЛА представляет собой отражательную решетку (ОАР). В статье представлены результаты моделирования реконфигурируемых (управляемых) частотно-избирательных поверхностей и печатных ОАР как СВЧ-компонентов интеллектуальной обшивки ЛА.

Реконфигурируемая печатная решетка; частотно-избирательная поверхность; антенный отражатель.

A.O. Kasyanov, S.E. Stochkov

**THE MATHEMATICAL SIMULATION OF MICROWAVE DEVICES
OF SPATIAL, FREQUENCY AND POLARIZATION SELECTION, BASED
ON RECONFIGURABLE MICROSTRIP REFLECTARRAYS**

The solution of the problem of a full-wave simulation of reconfigurable rectennas based on printed lattices has been obtained. Microstrip reflectarrays (RAA) and frequency selective surfaces (FSS) are considered. The possible FSS/RAA application area is discussed and it's shown these EM structures are the very attractive type of array for smart covers components designing at microwaves. Computer simulation is made using mathematical model based on periodical structures theory and integral equation solution. Some numerical and experimental results presented prove the possibility of FSS/RAA application as smart covers microwave module.

Reconfigurable printed lattice; frequency selective surface; microstrip multielement reflective type antenna array.

Введение. В статье рассматривается ряд возможных применений микрополосковых отражательных антенных решеток (ОАР) в качестве элементов интеллектуальных покрытий (ИП) для построения антенных решеток, электронно-управляемых частотных (или угловых) селективных покрытий, поляризационных фильтров, РАДАНТов и т.п. С целью унификации подходов к анализу перечисленных устройств исследовалась достаточно универсальная физическая модель (рис. 1) излучателя плоской периодической ОАР произвольной конфигурации, системы им-

педансных стержней, соединяющих его с экраном в нескольких точках, и планарных импедансных участков, соединяющих отдельные части микрополоскового переизлучателя между собой. В простейшем случае импедансные стержни могут служить простыми короткозамыкателями. Они могут также рассматриваться в качестве моделей меза-планарных полупроводниковых управляющих p - i - n -нагрузок диодов или нагрузок.

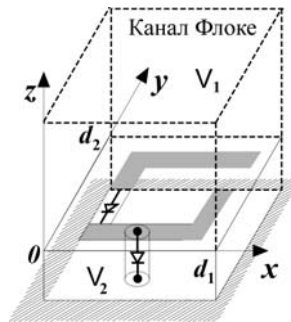


Рис. 1. Схематическое изображение единичной ячейки печатной ОАР

Постановка задачи. В связи с тем, что обычно как антенная, так и сенсорная подсистемы интеллектуального покрытия представляют собой многоэлементные решетки, математическая модель строится на основе концепции периодических структур. Рассматривается электродинамическая задача в следующей постановке. Пусть на плоскую периодическую решетку микрополосковых элементов, расположенную на границе раздела областей V_1 и V_2 (рис. 1), из открытого полупространства V_1 под произвольным углом падает плоская электромагнитная волна линейной поляризации. Введем линейный поляризационный базис (\vec{i}_1, \vec{i}_2) , орт \vec{i}_1 которого соответствует параллельной, а орт \vec{i}_2 — перпендикулярной поляризации. Необходимо по распределениям токов, наведенных падающей волной на конструктивных элементах единичной ячейки решетки (в канале Флоке), рассчитать элементы S_{pq} поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) $[S]$ в поляризационном базисе (\vec{i}_1, \vec{i}_2) . При этом индексы p и q принимают значения 1 или 2 соответственно ортам \vec{i}_1 и \vec{i}_2 . В случае, когда для моделирования полупроводниковых диодов используются импедансные стержни, искомыми являются поверхностные магнитные токи $J_{x,y}^m(x, y)$ на свободной от металла части поверхности решетки и линейные электрические токи $I_z^p(z)$ на стержнях, соединяющих металлическую поверхность излучателя с экраном. Если же моделируются планарные диоды, то в качестве искомой функции выступает распределение поверхностной плотности электрического тока $J_{x,y}^p(x, y)$ как на микрополосковом переизлучателе, так и на импедансных участках, моделирующих эти элементы.

Результаты численного моделирования реконфигурируемых ОАР как устройств пространственной, частотной и поляризационной селекции в составе ИП. Описанная выше математическая модель позволяет исследовать возможности

применения микрополосковых ОАР в качестве функциональных модулей для построения интеллектуальных покрытий, в частности, антенной подсистемы и подсистемы управляемого рассеяния [1]. Возможность использования микрополосковых ОАР в качестве компонентов антенной подсистемы интеллектуального покрытия продемонстрирована авторами в [2], где рассмотрены вопросы построения фокусирующих рефлекторных антенн на базе микрополосковых ОАР. Здесь остановимся на возможности применения печатных решеток при построении линзовых антенн с перестраиваемой топологией печатных элементов, в качестве управляющих элементов которых выступают поверхностно-ориентированные диоды.

Плоские линзовые антенны на основе решеток печатных элементов.

Плоские линзовые антенны используются там, где требуются высокий коэффициент усиления и/или широкоугольное сканирование. К достоинствам фазированных антенных решеток (ФАР), выполненных по проходной схеме, относятся сравнительная простота, удобство в реализации управления формой амплитудного распределения. По сравнению ОАР они обладают такими преимуществами, как: отсутствие эффекта затенения излучающего раскрыва конструктивными элементами облучателя и меньшая чувствительность к погрешностям изготовления и юстировки, кроме того, в них вполне достижимы большие отношения фокусных расстояний к диаметрам радиолинз на основе антенных решеток – F/D .

В выполненных по проходной схеме ФАР облучатель направляет излучаемую мощность на собирающую (коллекторную) антенную решетку приемных элементов. Принятая мощность проходит через систему проходных фазовращателей и после фазирования излучается в нужном направлении другой решеткой излучающих элементов. Таким образом, проходная ФАР фактически эквивалентна линзе с принудительным ходом лучей и с электрически управляемым фазовым распределением возбуждения в раскрыве [3].

Для реализации электронного сканирования с высоким разрешением необходимо излучатели антенной решетки (АР) объединять с фазовращателями (ФВ). В результате создается реконфигурируемая АР. В реконфигурируемой антенной решетке отсутствует диаграммообразующая схема (ДОС) и поэтому в ней удастся избежать от деградации характеристик направленности (ХН) при сканировании. Квазиоптические АР проходного типа со встроенными фазовращателями конструктивно реализуются на основе применения технологий создания твердотельных и микромеханических систем (MEMS). Так, в [4] описана плоская печатная линза, представляющая собой ФАР проходного типа с реконфигурируемыми посредством MEMS-ключей элементами. Реконфигурируемые антенные элементы типа АФА (антенна–фильтр–антенна) выполнены на основе щелевых антенн и переключаемых (реконфигурируемых) полосковых резонаторов (рис. 2). Каждый из них может работать в четырех режимах, как трех- или четырехполосный фильтр и обеспечивать при этом дискретно изменяемый двухбитовый фазовый сдвиг. В результате на основе таких реконфигурируемых «антенна-фильтр-антенна» элементов (АФА-элементов) создаются двухбитовые модули адаптивной печатной ФАР проходного типа с оптической схемой питания (рис. 3).

На рис. 4 показана схема более компактного и при этом обеспечивающего лучшие характеристики сканирования АФА-элемента. Миниатюризация щелевых антенн достигается за счет придания ей гантелеобразной формы [5]. Для полосковых резонаторов, резонансная длина может быть уменьшена за счет расширения линий у разомкнутых концов и уменьшения их ширины в середине [6] такая «антенна-фильтр-антенна» – АР имеет лучшие характеристики при наклонном падении.

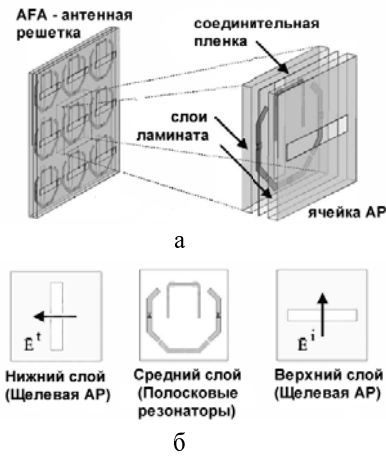


Рис. 2. Схема построения AFA-антенной решетки и ее ячейка (а); топологии трех слоев AFA-элемента антенной решетки (б)

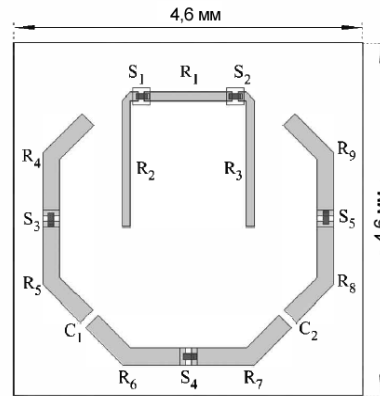


Рис. 3. Реконфигурируемый средний слой, содержащий ПЛП из линейных участков

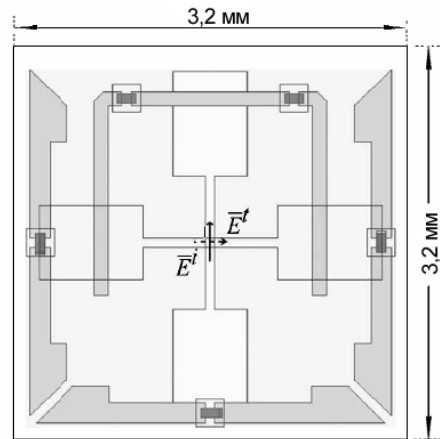


Рис. 4. Компактный AFA-элемент

Частотно-селективные поверхности или структуры (ЧИП). В качестве примера построения на основе таких решеток *реконфигурируемых ЧИП* рассмотрим решетку со свободно установленными печатными элементами в виде квадратных рамок, как показано на рис. 6. На рис. 6 показаны рассчитанные для случая нормального падения плоской волны частотные зависимости модулей диагональных элементов ПМР решеток из таких рамок – S_{22}^0 , где $(\mathbf{i}_1 \ \mathbf{i}_2) = (-\mathbf{i}_y \ \mathbf{i}_x)$ – орты линейного поляризационного базиса (ПБ). При этом сплошной линией изображена частотная характеристика (ЧХ) решетки замкнутых рамок, а пунктирной – разомкнутых. Параметры АР: $d_1 = d_2 = 20$ мм – шаги решеток; $a = 10$ мм – длина стороны квадратной рамки $a/b = 2$ – отношение внешнего и внутреннего диаметров рамки. При этом ширина зазора Δ столь мала, чтобы путем замыкания и разрыва имитировать ключевые состояния управляющего элемента – УЭ – (p - i - n -диода), включенного в зазоре.

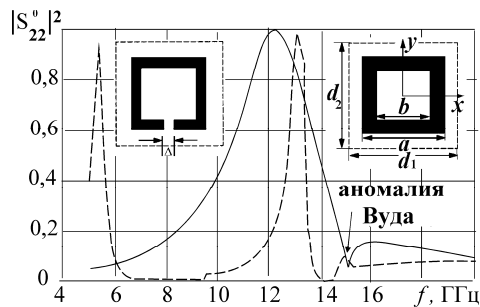


Рис. 6. ЧХ решеток печатных рамок со свободно установленными элементами

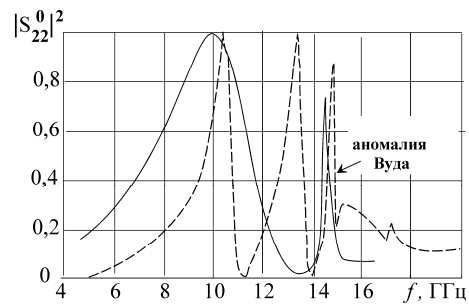


Рис. 7. ЧХ решеток печатных рамок на диэлектрических подложках

Как видно из сравнения графиков, изображенных сплошной и пунктирной линиями, изменения состояния включенного в зазоре $p-i-n$ -диода с открытого на запертое приводит: во-первых, к увеличению числа резонансов полного отражения решетки печатных рамок, сопровождающемуся увеличением добротности в каждом из резонансов такой колебательной системы, и, во-вторых, сдвигу частоты основного резонанса в область более высоких частот. В отличие от перфорированных экранов, при построении ЧИП на основе печатных решеток их элементы требуется наносить на поверхность несущего диэлектрического слоя (подложки). На рис. 7 приведены ЧХ коэффициентов отражения по мощности решеток из печатных рамок, расположенных на поверхности тонкой подложки, толщиной $h = 1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,5$. Решетки имеют те же параметры, что и в предыдущем примере. Как видно из сравнения графиков, изображенных на рис. 6 и 7 сплошными линиями, введение подложки для решетки из замкнутых печатных рамочных элементов привело к снижению резонансной частоты полного отражения примерно на 18 %. В то же время, как следует из сравнения графиков, изображенных на рис. 6 и рис. 7 пунктирными линиями, после введения подложки в решетке из разомкнутых печатных рамок произошло перераспределение энергии отраженных ею волн между двумя резонансами полного отражения, наблюдающимися в одноволновом диапазоне периодичности. Такая ЧИП в окрестности каждого из резонансов полного отражения имеет практически одинаковую ширину полосы заграждения. Кроме того, в этом случае частота более низкочастотного резонанса ЧИП f_1 существенно возросла по сравнению с предыдущим примером. Также следует обратить внимание на то, что в этом случае более высокочастотный резонанс полного отражения в решетке разомкнутых петлевых печатных элементов наблюдается на той частоте f_2 , где аналогичная ЧИП из замкнутых квадратных рамок оказывается почти радиопрозрачной. Следовательно, если в местах разрыва печатных петель разместить управляющие СВЧ-элементы переключательного типа, например, $p-i-n$ -диоды, то на частоте f_2 такая управляемая ЧИП под воздействием модулирующего низкочастотного сигнала может переводиться из электродинамического состояния радиопрозрачности в полностью непрозрачное для возбуждающих ее электромагнитных волн состояние.

Устройства пространственной селекции (угловые фильтры – УФ). Периодические решетки, обладающие свойством частотной селекции, могут использоваться и для селекции по углу (угловые фильтры). Угловые фильтры применяются при

построении сканирующих антенных решеток [7]. С их помощью удается устранить побочные главные максимумы в диаграммах направленности антенных решеток с повышенными межэлементными расстояниями, что способствует уменьшению числа излучателей решетки и снижению стоимости. При построении угловых фильтров можно использовать рассмотренные выше конструкции ЧИП. При фиксированном угле падения поведение характеристик рассеяния углового фильтра в полосе частот ничем не отличается от аналогичных зависимостей обычной ЧИП, а при фиксированной частоте ЧИП ведет себя в секторе углов падения подобно угловому фильтру.

В качестве примера, доказывающего справедливость приведенных выше рассуждений, вновь обратимся к ЧИП на основе печатных рамок, топологии элементов которой показаны на врезках рис. 6. Рассмотрим угловые зависимости диагональных элементов ПМР этих решеток. Печатные решетки замкнутых и разомкнутых петлевых элементов выполнены на поверхности диэлектрической подложки. Параметры решеток: $d_1 = d_2 = 20$ мм – шаги решеток; $a = 16$ мм – длина стороны квадратной рамки $a/b = 2$ – отношение внешнего и внутреннего диаметров рамочных элементов. При этом ширина зазора Δ столь мала, чтобы путем замыкания и разрыва имитировать ключевые состояния управляющего элемента ($p-i-n$ -диода), включенного в зазоре. На рис. 8,а приведены рассчитанные на частоте $f = 7,8$ ГГц угловые зависимости коэффициента отражения по мощности двух печатных решеток из: замкнутых (сплошная линия) и разомкнутых (пунктир) петель. Решетки возбуждаются линейно поляризованной плоской волной параллельной поляризации, плоскость падения которой совпадает с плоскостью xOz декартовой системы координат. Как видно из графиков, в одноволновой области периодичности каждая из решеток при определенных (критических) углах падения $\theta_{кр}^o$ оказывается полностью радиопрозрачной. Причем значение критического угла решетки из замкнутых петель существенно отличается от $\theta_{кр}^o$ для аналогичной решетки, составленной из разомкнутых рамок: примерно 14^o и 40^o соответственно.

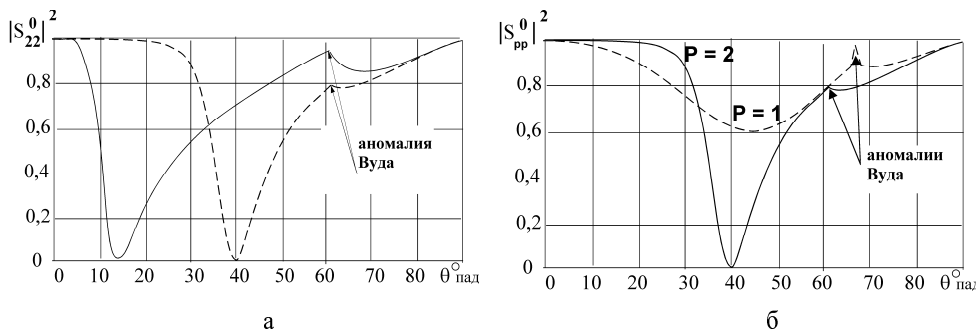


Рис. 8. Угловые зависимости элементов ПМР печатных пространственных фильтров

При этом добротность резонансной системы изменяется незначительно. В то же время, в случае, когда решетка разомкнутых рамочных элементов возбуждается волной перпендикулярной поляризации, то ее резонансная кривая, во-первых, расширяется, а во-вторых, существенно возрастает коэффициент отражения по мощности при $\theta = \theta_{кр}^o$, как показано на рис. 8,б.

Результаты численного исследования микрополосковых отражательных антенных решеток с импедансными включениями. В качестве численного примера рассмотрим решение задачи о рассеянии плоской волны на решетке из свободно установленных печатных колец квадратной формы. Пусть плоская волна, возбуждающая дифракционную решетку, падает на нее по нормали. Линейный поляризационный базис выбран так, что орт \mathbf{i}_1 ориентирован вдоль X , орт \mathbf{i}_2 – вдоль Y . Топология единичной ячейки решетки показана на рис. 9. Как видно из рисунка, помимо кольца – 1, в состав каждого элемента решетки входит квадратный микрополосковый переизлучатель – 2. Каждое из колец содержит импедансное включение – 3.

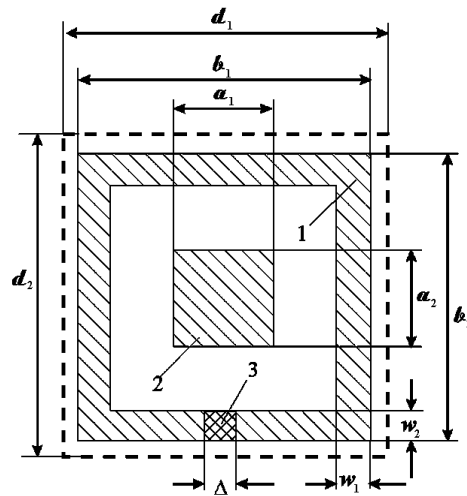


Рис. 9. Схематическое изображение топологии управляемой печатной ЧИП

Как отмечалось выше, если подобная ОАР составлена из короткозамкнутых колец, в её одноволновой области имеется только один резонанс полного отражения. Если кольца разорваны, переходим в многорезонансный режим. Таким образом, если имеется возможность как-либо реконфигурировать топологию колец от замкнутой до разомкнутой, то можно управлять режимами отражения от такой частотно-избирательной решетки. Введение в её состав квадратных печатных элементов позволяет снизить угловую чувствительность такой решетки. Электронного управления характеристиками рассеяния этой решетки можно добиться, вводя в состав колец УЭ, в качестве которых можно использовать, например, поверхностно-ориентированные p - i - n -диоды. Как отмечалось выше, такие поверхностно-ориентированные УЭ можно смоделировать импедансными включениями.

На рис. 10,а и рис. 10,б представлены ЧХ такой решетки с импедансными включениями. Параметры решетки: $d_1 = d_2 = 10$ мм – шаги решетки по осям X и Y соответственно; $a_1 = a_2 = 3$ мм; $b_1 = b_2 = 3$ мм; $w_1 = w_2 = 1$ мм. Решетка возбуждается нормально падающей плоской электромагнитной волной, вектор поляризации которой ориентирован вдоль оси X . Импедансное включение можно охарактеризовать такими параметрами: Δ – размер и Z_{inc} – импеданс включения. Далее везде величина Δ остается постоянной и равной 1 мм.

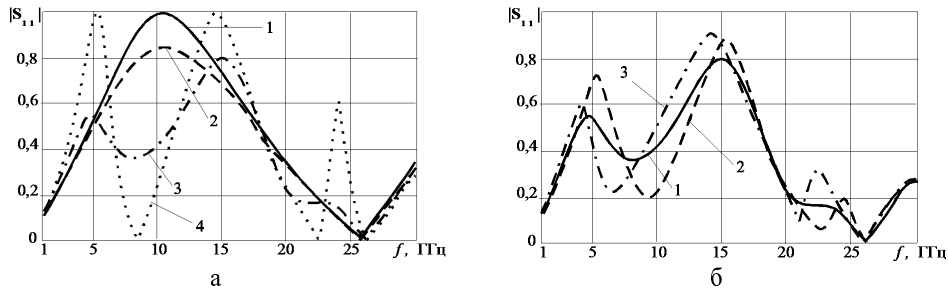


Рис. 10. ЧХ элементов ПМР управляемой ОАР на основе МПЭ с топологиями рис. 9

На рис. 10,а приведены ЧХ модуля S_{11} для случая, когда импеданс включения является активным $Z_{inc} = R$. Кривая 1 соответствует случаю, когда $R = 0$, кривая 2 – $R = 100$ Ом, кривая 3 – $R = 1$ кОм и кривая 4 – $R = 10$ кОм. При этом графики, изображенные кривыми 1 и 4, соответствующие случаям замкнутых и разомкнутых колец, совпадают с аналогичными зависимостями, приведенными в [9]. На рис. 10,б можно проследить влияние включений с комплексным поверхностным сопротивлением $Z_{inc} = R + jX$ на ЧХ такой решетки. Для всех частотных зависимостей, изображенных на рис. 10,б, величина R остается постоянной и равной 1 кОм. В качестве параметра здесь используется величина X . Для кривой 1 она равна нулю, для кривой 2 – $X = 1$ кОм, а для кривой 3 – $X = -1$ кОм.

Выводы. Таким образом, с помощью метода интегральных уравнений разработана математическая модель печатной отражательной антенной решетки с импедансными включениями. Модель реализована в виде комплекса вычислительных программ. Результаты расчета характеристик рассеяния микрополосковых ОАР с импедансными включениями позволили: во-первых, убедиться в достоверности полученных численных решений и, во-вторых, исследовать свойства ряда конструкций отражательных антенных решеток из печатных переизлучателей с управляемыми элементами. Разработанная модель и проведенные численные исследования могут быть полезны при построении СВЧ- и КВЧ-компонентов подсистемы управления рассеянием волн *интеллектуального радиоэлектронного покрытия*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Отражательные антенные решетки как микроволновые компоненты интеллектуальных покрытий // Антенны. – М.: ИПРЖР, 2001. – Вып. 4 (50). – С. 12-16.
2. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Конструктивный синтез зеркальной антенны с рефлектором в виде плоской решетки печатных излучателей // Антенны. – М.: ИПРЖР, 1999. – Вып. 2 (43). – С. 10-17.
3. Чистюхин В.В., Кашаев Н.К. Разработка методики оптимизации по числу элементов многолучевой проходной апланатической решетки // Известия вузов. Электроника. – 1997. – № 2. – С. 87-91.
4. Cheng C.C., Abbaspour-Tamijani A. Study of 2-bit Antenna-Filter-Antenna Elements for Reconfigurable Millimeter-Wave Lens Arrays // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – December, 2006. – Vol. 54, № 12. – P. 4498-4506.
5. Tu W.H., Chang K. Miniaturized CPW-fed slot antenna using stepped impedance resonator // IEEE AP-S Int. Symp. – Jul. 2005. – Vol. 4A, № 3-8. – P. 351-354.

6. *M. Sagawa, M. Makimoto, and S. Yamashita, "Geometrical structures and fundamental characteristics of microwave stepped-impedance resonators" // IEEE Trans. MTT. – Vol. 45, № 7.*
7. Сканирующие антенные системы СВЧ: Пер. с англ. / Под ред. Г.Т. Маркова, А.Ф. Чаплина. Т. 1-3. – М.: Сов. радио, 1966-1971.
8. *Михайлов Г.Д., Сергеев В.И., Соломин Э.А., Воронов В.А. Методы и средства уменьшения радиолокационной заметности антенных систем // Зарубежная радиоэлектроника. Спец. вып. «Проблемные вопросы уменьшения РЛЗ объектов». – 1994. – № 5. – С. 54-59.*
9. *J. Shaker, L. Shafai, H. Moheb, Analysis of frequency selective surfaces with open and short circuited elements // Proc. 8th IEE Int. Conf. on Ant. and Propag., Edinburgh, UK, 1993. – P. 261-264.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Касьянов Александр Олегович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: kasao@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634388844; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор.

Строчков Сергей Евгеньевич – e-mail: s-sterg@yandex.ru; тел.: +79185547954; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Kasyanov Alexandr Olegovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: kasao@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634388844; the department of antennas and radio transmitters; professor.

Stochkov Sergej Evgen'evich – e-mail: s-sterg@yandex.ru; phone: +79185547954; the department of antennas and radio transmitters; postgraduate student.

УДК 656.25

С.М. Ковалев, В.П. Терновой

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА

Статья посвящена аспектам использования информационного обмена в качестве основы для анализа динамики в автоматизированных системах управления железнодорожным транспортом. Впервые предлагается метод прогнозирования динамики таких систем на основе временных рядов телекоммуникационного трафика. Предложен комбинированный метод прогнозирования, состоящий из этапов нелинейного анализа и линейного прогнозирования. Предложен алгоритм локального прогнозирования телетрафика, позволяющий принимать управляющие решения в рассматриваемом классе систем.

Нелинейный анализ; прогнозирование телекоммуникационного трафика; автоматизированные системы управления на железнодорожном транспорте.

S.M. Kovalev, V.P. Ternovoy

PREDICTION OF THE DYNAMICS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS RAIL-BASED NONLINEAR ANALYSIS TELECOMMUNICATIONS TRAFFIC

Article is dedicated aspects of use of an information exchange as a basis for dynamics analysis in the automated control systems of railway transportation. The new method of dynamics forecasting of such systems on the basis of telecommunication traffic time series is offered. The com-