

УДК 621.396.677.45:629.783

Моделирование излучателя четырехзаходной спиральной антенны для глобальных навигационных спутниковых систем

Р.А. Бекишев

Выполнено моделирование излучателя широкополосной четырехзаходной спиральной антенны для работы с глобальными навигационными спутниковыми системами, в равной степени принимающего сигналы с несущих частот открытых и специализированных каналов этих систем.

Ключевые слова: четырехзаходная спиральная антенна; антенна на полусферической поверхности; антенна для глобальной навигационной спутниковой системы.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС, зарубежное название Global Navigation Satellite System) необходимы для круглосуточного точного местоопределения объектов на поверхности Земли. Местоопределение происходит благодаря сигналам, принимаемым со спутников на высокоэллиптических орбитах наземными навигационными приборами (НП). Основным элементом НП, обеспечивающим прием сигналов, является антенна. Спектр сигналов ГНСС состоит из двух поддиапазонов: условно низкочастотного (НЧ) и высокочастотного (ВЧ). НЧ диапазон имеет среднюю частоту 1240 МГц с общей полосой 12%. ВЧ поддиапазон – частоту 1575 МГц с полосой 9-6%. Общая протяженность спектра ГНСС составляет 33%. Все сигналы имеют правую круговую поляризацию [1-4]. Отметим, что антенны, охватывающие весь частотный диапазон работы ГНСС, отсутствуют [5].

Целью работы является решение следующих задач: выбор типа излучателя антенны, формы и структуры излучателя, размеров излучателя, проведение сравнительного анализа построенных моделей и выбор излучателя, наиболее близко отвечающего указанным требованиям. Вопросы проектирования диаграммообразующей схемы (ДОС) для приведенных излучателей подробно в данной работе не рассматриваются, оценка достижимых параметров собственно антенн с рассмотренными излучателями производится,

с одной стороны в предположении наличия “идеальной” ДОС, и, с другой стороны, возможности практической реализации ДОС для рассмотренных вариантов излучателей.

Из всего перечня имеющихся широкодиапазонных антенн (щелевые волноводные, вибраторные, спиральные, синусоидальные и пр.) выбираются спиральные антенны, способные обеспечить фазовую стабильность сигналов при минимальных габаритных размерах. Спиральные антенны работают в осевом режиме с основным типом ТЕМ-волны, при работе в этом режиме излучаемая ДН имеет круговую поляризацию. Плоские спиральные антенны имеют одинаковые передний и задний лепестки излучения, поэтому такие антенны располагают над экранами для получения одного, главного лепестка ДН. Однако при этом происходит наложение переднего и заднего (отраженного) лепестков, что вносит фазовые искажения и ухудшает ДН. Объемные антенны обладают ДН с ярко выраженным передним лепестком и почти отсутствующим задним. Влиянием экрана на форму главного лепестка ДН можно пренебречь [6].

К антенне предъявляются следующие требования: обеспечение фазовой стабильности принимаемого сигнала в любом направлении и удовлетворительные коэффициенты усиления (K_u) и эллиптичности ($K_{эл}$), прием сигналов НЧ и ВЧ диапазонов, минимизация габаритных размеров. Антенна состоит из излучателя и ДОС. ДОС обеспечивает согласование между фидером и излучателем, и, кроме того, обеспечивает фазовый сдвиг и равномерное распределение мощности передаваемого (принимаемого) сигнала на резонаторы излучателя. Излучатель осуществляет преобразование сигналов, принимаемых от ДОС в электромагнитную волну, распространяющуюся в свободном пространстве. Следовательно, кроме указанных выше требований к антенне, к излучателю предъявляется дополнительное требование - обеспечение приемлемых импедансов для различных мод сигнала, для соответствующего согласования с ДОС.

В качестве излучателя выбирается квазичастотно-независимая спиральная антенна с основанием в виде полусферы [6]. Габаритные размеры излучателя выбраны исходя из нижней и верхней границ частотного диапазона от 1000 до 1800 МГц [1, 6]. Длины волн составляют 29,1 и 18,7 см соответственно. Ограничимся одним активно излучающим витком спирали без существенной потери мощности излучения. Во избежание эффекта стоячей волны излучающий виток заканчивается согласующим трансформатором с короткозамыкателем. Все элементы излучающей структуры выполнены на одном проводнике. Для получения основного типа волны T_1 возбуждение спирали производится от центра к периферии с помощью кабеля, проложенного внутри одного из проводов (заходов)

спирали [7]. Введены четыре захода с целью уменьшения влияния высших типов волн со сдвигом фаз $0, 90, 180, 270^\circ$ [6].

Габаритный размер излучателя антенны выбран 55 мм в диаметре с учетом четырех заходов (для одного витка расстояние между двумя максимально удаленными точками проводника захода составляет 29,1 мм). Длина проводника, с учетом согласующего трансформатора, составляет 187 ± 1 мм.

Намотка проводника производится по различным законам намотки спирали. Метод намотки заключается в следующем: на поверхности полусферы намечается образующая кривая, соответствующая выбранному типу спирали, вдоль которой создается углубление для укладки кабеля. В качестве кабеля выбран РК75-1-22. Форма ДН зависит не только от длины излучающего витка и основного типа волны, но и от формы спирали.

Моделирование проводилось с применением спирали Архимеда, спирали Ферма, гиперболической и логарифмической спиралей, внешний вид моделей показан на рис. 1. Ряд более сложных форм намотки спирали не рассматривается, поскольку форма спирали оказывает влияние на ДН при более чем одном витке [8].

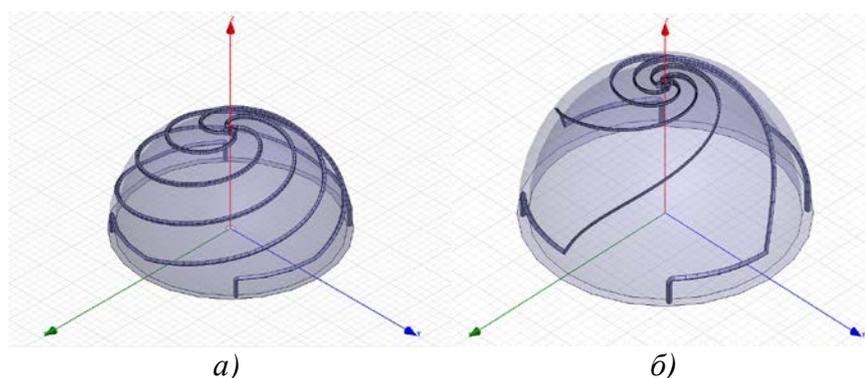


Рис. 1 Излучатель четырехзаходной спиральной антенны на полусферической поверхности:

a – антенна с образующей в виде спирали Архимеда (Ферма); *б* – антенна с образующей в виде логарифмической (гиперболической) спирали

Для построения моделей использовались программы математического моделирования (MathLab6.5, FEKO – ознакомительная версия).

Для выбора конструкции излучателя антенны выполнено сравнение различных моделей (см. табл.) [9]. Сравнение производилось для каждой модели на частотах от 1000 до 1800 МГц с шагом 100 МГц (здесь и далее частот), изменением угла намотки спирали от 5 до 25° через 5° по следующим показателям: K_u (с учетом коэффициента отражения при

идеальной ДОС), Кэл (по углу 80° , при идеальной ДОС), ширина ДН по уровню $\theta_{0,5}$. Сравнение показателей моделей излучателей производилось исходя из предположения о наличии “идеальной” ДОС.

Показатели излучателей антенн с различным типом намотки спирали

Сравниваемые показатели	Угол намотки	Ширина ДН по уровню $\theta_{0,5}$ (град)	Ку в осевом направлении, дБ	Кэл, для угла 80°
Архимедова спираль	5	80	-8,1...-2,7	0,6... 0,5
	10	140	-5,3... 3	0,9... 0,8
	25	105-110	-7,3... 2,5	0,7... 0,6
Спираль Ферма	5	85-90	-9,2...-2,3	0,6... 0,5
	10	120	-5... 2,8	0,85... 0,7
	25	105-110	-7,3... 2,6	0,72... 0,56
Логарифмическая спираль	5	100-115	-6,1... 3,3	0,5
	10	100-120	-6,5... 2	0,6
	25	90-120	-6,7... 4,1	0,6
Гиперболическая спираль	5	100-110	-5,9... 3,1	0,5
	10	105-120	-5,7... 2,6	0,6
	25	100-140	-6,2... 4	0,6

Для вариантов моделей, показанных в таблице, как минимум одна из характеристик ухудшалась при изменении частот и угла намотки спирали. Так, при угле намотки менее 10° Ку составлял в пределах от -8...-5 до +3 дБ, для Кэл значение варьировалось в пределах 0,6...0,5. Ширина ДН по уровню $\theta_{0,5}$ составляла от 100 до 140° .

При изменении угла намотки от 10 до 15° у моделей с логарифмической и гиперболической спиралью ширину ДН по уровню $\theta_{0,5}$ измерить не представлялось возможным, поскольку для каждой из частот ширина ДН принимала значения от 100 до 140° . У моделей со спиралью Архимеда и спиралью Ферма ширина ДН по уровню $\theta_{0,5}$ составлял $120-140^\circ$. Значения Ку и Кэл изменялись незначительно.

Увеличение угла намотки от 15 до 25° ухудшило показатели Ку и Кэл для намотки по спирали Архимеда по сравнению со спиралью Ферма. Для моделей с логарифмической и гиперболической спиралью показатели Ку и Кэл лучше, чем для спирали Ферма. Но ширина ДН по уровню $\theta_{0,5}$ у логарифмической и гиперболической спиралей принимает значения от 90 до 140° для различных частот, как и для угла намотки спирали $10-15^\circ$.

Малое изменение показателей для моделей с логарифмической и гиперболической спиралью объясняется небольшим изменением линейных размеров проводника при изменении угла намотки спирали, в отличие от моделей с намоткой по спирали Архимеда или Ферма.

Наиболее применяемой оказалась модель со спиралью Архимеда и углом намотки образующей спирали в 10 градусов, т.к. показатели характеристик K_u , $K_{эл}$, ширины ДН по уровню $\theta_{0,5}$ являются лучшими из сравниваемых моделей.

На графике рис. 2 показана зависимость ДН излучателя антенны от угла θ (град). Графики построены из предположения о наличии “идеальной” ДОС. Из графика видно, что угол ДН по уровню $\theta_{0,5} = 140^\circ$. В области -180° значения кривых расходятся, обеспечивая различные уровни мощности заднего лепестка ДН на различных частотах (см. рис. 2). Расхождение кривых ДН начинается при угле 103° .

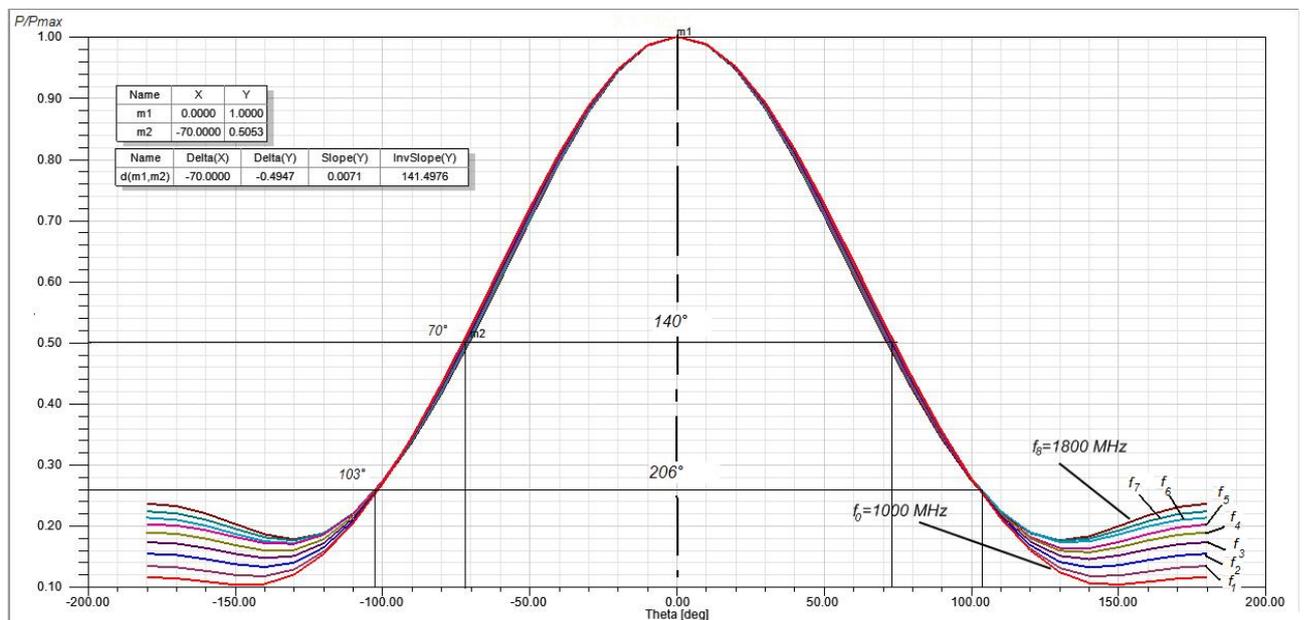


Рис. 2 График зависимости $f=F(\theta)$, приведенный к виду P/P_{\max} :

$f_0 \dots f_8$ – частоты в диапазоне 1000–1800 МГц с шагом 100 МГц соответственно.

Показан угол ДН по уровню $\theta_{0,5}=140^\circ$ и угол начала расхождения кривых, равный 206°

На графике рис. 3 показан K_u с учетом отраженной волны, при этом значения K_u варьируются в пределах от -5 до +3 дБi. Верхней кривой соответствует частота 1800 МГц, нижней – 1000 МГц. По графику видно уменьшение усиления сигнала в направлении горизонта по отношению к зениту. При этом значение усиления излучателя в направлении на горизонт варьируется в широких пределах в зависимости от внешних условий [1].

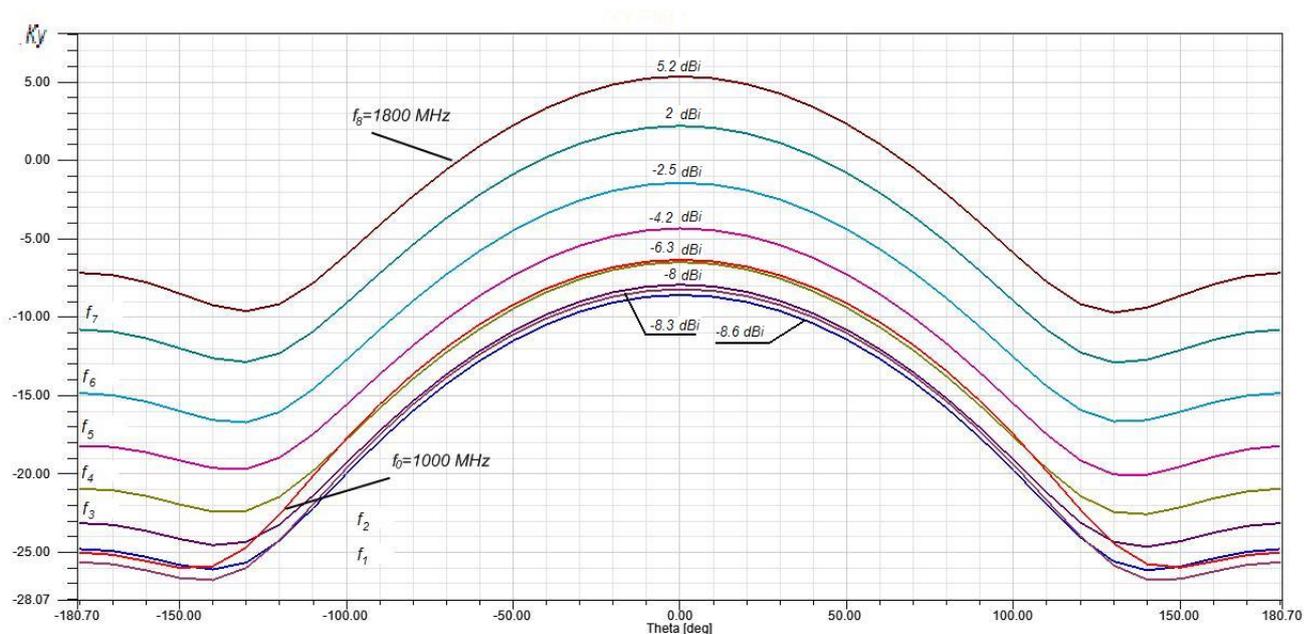


Рис. 3 График зависимости $f=Ku(\theta)$ с учетом отраженной волны:

$f_0...f_8$ – частоты в диапазоне 1000 – 1800 МГц с шагом 100 МГц соответственно.

Показаны значения Ku для соответствующих частот $f_0...f_8$

На графике рис. 4 показан Кэл по уровню -3 дБ с изменением эллиптичности ДН к горизонту по отношению к зениту. По графику видно, что для всего частотного диапазона 1000–1800 МГц Кэл составляет для 80° не менее 0,8, что соответствует минимальным фазовым искажениям принимаемого сигнала как от спутников, находящихся в зените, так и от спутников, находящихся близко к горизонту.

На графике 5 показана диаграмма Вольперта-Смита, построенная для матрицы системы S-параметров излучателя при предположении о наличии “идеальной” ДОС на входе к излучателю. Построение диаграммы Вольперта-Смита проводилось для частотного диапазона 1000-1800 МГц, с шагом 100 МГц, с сопротивлениями источников ветвей 75 Ом.

Сравнивая модели, можно утверждать, что излучателем антенны, наиболее близко удовлетворяющим решению поставленной задачи, является модель излучателя на основе Архимедовой спирали с углом намотки $10-12^\circ$.

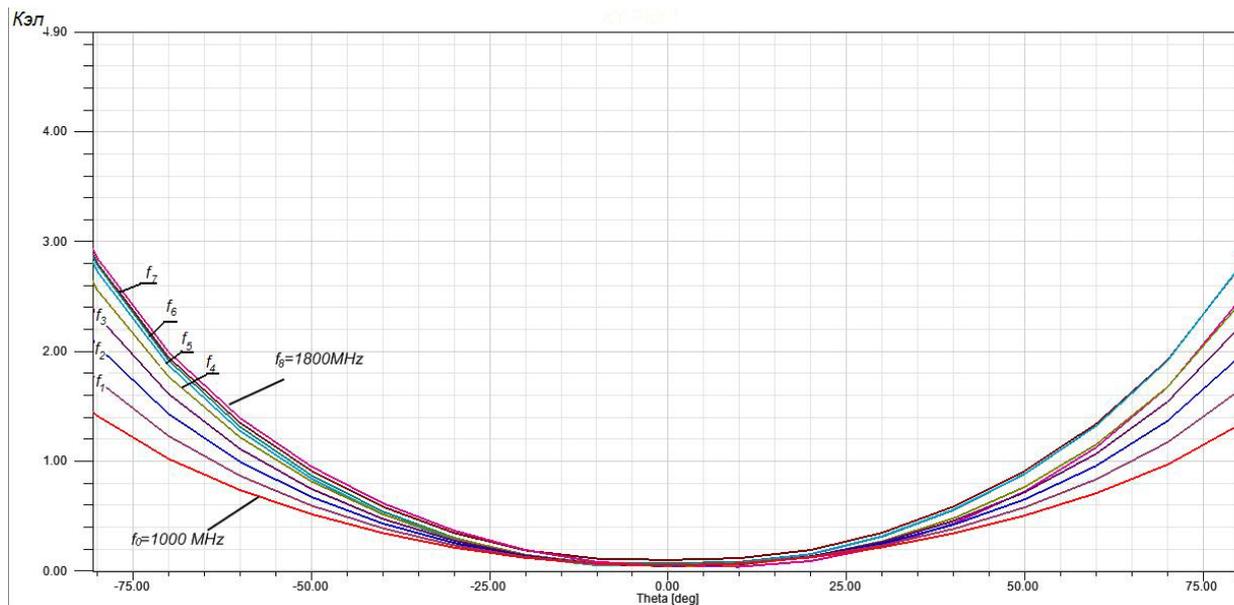


Рис. 4 График зависимости $f=K_{эл}(\theta)$:

$f_0...f_8$ – частоты в диапазоне 1000 – 1800 МГц с шагом 100 МГц соответственно.

По уровню 3 дБ $K_{эл}$ составляет не менее 0,8 во всем диапазоне частот $f_0...f_8$

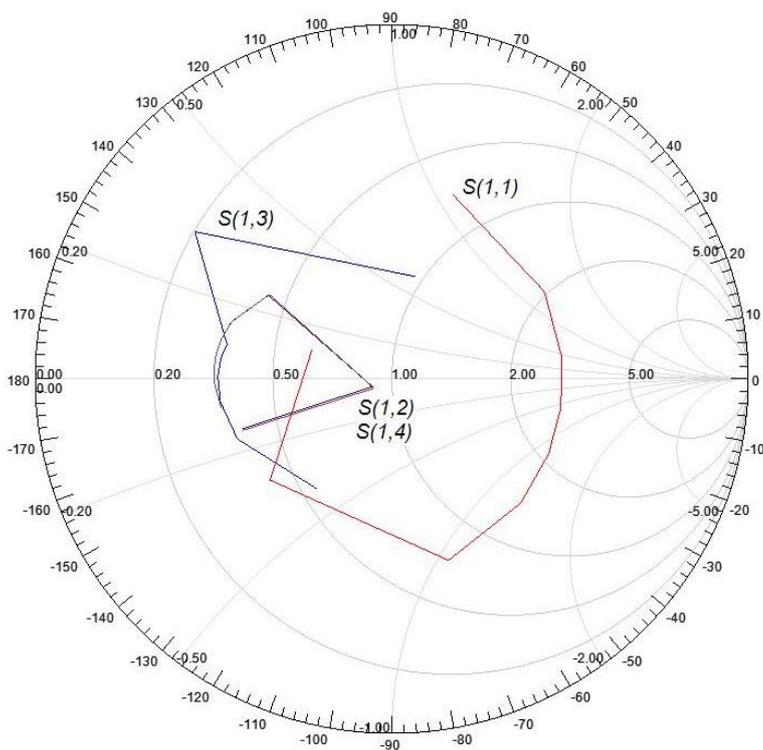


Рис. 5 Диаграмма Вольперта-Смита входного сопротивления, рассмотренная для системы S-параметров излучателя

Таким образом, построена модель излучателя в виде четырехзаходной спиральной антенны, удовлетворяющего требованиям широкодиапазонности антенны (работа в частотном диапазоне 1000–1800 МГц), с малым расхождением характеристик K_u (-5...+3 дБ), $K_{эл}$ (0,8), ДН на всем частотном диапазоне работы антенны (ширина ДН по уровню $\theta_{0,5} \geq 140^\circ$), что обеспечивает фазовую стабильность принимаемого сигнала. Полученная система полученных S-параметров позволяет просинтезировать ряд ДОС, работающих с выбранным излучателем, с обеспечением значения входного КСВ 1,5...2 в требуемом диапазоне частот.

Выводы: на основе выбранного излучателя, в качестве дальнейшего продолжения исследования, может быть построена модель ДОС, способная повысить значение K_u , без существенного изменения $K_{эл}$ и ширины ДН, и обеспечить удовлетворительный уровень КСВ для всего требуемого диапазона частот.

Список литературы

1. Татарников Д.В. Антенны высокочастотного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: автореф. дис. на соискание ст. док. тех. наук / МАИ. - М.: МАИ.-2009. - 39 с.
2. GPS–взгляд изнутри [Электронный адрес] /Хрусталева Д./ Режим доступа:http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_06/stat_118.htm. Дата обращения : 01.12.2010.
3. ИАЦ. Справочник. Современные ГНСС [Электронный адрес]/ Федеральное космическое агентство. Информационно-аналитический центр – Режим доступа: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/guide/mainsystems.php>. Дата обращения: 01.10.2011.
4. Wikipedia/ Патч-антенна /Wikipedia-ru [Электронный адрес]/ Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Патч-антенна.htm>. Дата обращения: 06.11.2011.
5. Обзоры рынка GPS и GLONASS(ГЛОНАСС) навигации/GPS-Club [Электронный адрес] Режим доступа: http://gps-club.ru/gps_think/detail.php?ID=6160.htm. Дата обращения: 05.11.2011.
6. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. - М.: Сов.радио. – 1974. – 224 с.
7. Совмещенная антенна / Б. М. Левин, А. Ф. Яковлев; Патент № 2110123. Россия; заяв. 26.12.1995 ; опубл. 27.04.1998, бюл. № 22. – 1 с. : ил.
8. В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков, М.В. Крутиков. Разработка элементов малогабаритных широкополосных антенных систем сантиметрового диапазона // Материалы НТК «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС».–Омск: Изд-во ОмГТУ.-2010г. – С. 109-117.
9. Банков С.Е., Курушин А.А. Практикум проектирования СВЧ-структур с помощью ФЕКО: - М.: ЗАО «НПП «Родник».-2009.–200 с.

Сведения об авторах

БЕКИШЕВ Роман Александрович, инженер ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», аспирант Омского государственного технического университета.
Космический просп. 24а, г. Омск, 644027; тел.: 8-913-664-79-02; e-mail: berkut-ne@yandex