

621.396.67

ББК 32.845

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.А. Гончаров

**Аннотация.** Теоретически исследованы характеристики широкополосных щелевых антенн, применяемые в радиоэлектронных и телекоммуникационных системах. Проведена оценка согласованности идеальной щелевой антенны по входу. Разработана расчетная модель слабонаправленного излучающего элемента. Предложена специальная методика оптимизации коэффициента отражения таких антенн. Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик антенн типа Вивальди.

**Ключевые слова:** методы расчета, квазиоптимальные антенны, согласующие устройства, матрица рассеяния, диаграмма направленности, результаты измерений, эмпирическая зависимость.

## 1. Введение

В настоящее время разработано большое количество методов расчета дискретных и непрерывных антенн [1]. Однако, несмотря на достаточную разработанность теории синтеза антенн, вопрос построения оптимальных излучающих структур остается открытым.

Радиоэлектронное приборостроение как направление исследовано в недостаточной степени по нескольким причинам. В количественном отношении наблюдается экспоненциальный закон роста радиоэлектронных и телекоммуникационных систем. В качественном отношении к современным радиоэлектронным комплексам возрастают требования по эффективности и электромагнитной совместимости. Поэтому можно сказать, что проблема развития антенной техники в СВЧ диапазоне по-прежнему актуальна.

В технике СВЧ существует большое разнообразие конструкций широкополосных антенн. Однако для радиоприемных и радиопередающих устройств сантиметрового

диапазона наиболее распространенным типом малогабаритных антенн являются излучатели бегущей волны, которые конструктивно представляют открытый конец экспоненциально расширяющейся линии передачи. Объектом исследования настоящей работы можно считать широкополосные щелевые излучатели, которые принято называть антеннами Вивальди [2]. Цель настоящей работы заключается в исследовании количественных зависимостей между характеристиками диаграммы направленности и геометрическими параметрами антенны бегущей волны

## 2. Теоретические исследования широкополосных щелевых антенн

Значительный практический интерес представляет задача построения модели антенны в виде оптимальной согласованной неоднородности. С теоретической точки зрения оптимальной антенной можно считать излучатель электромагнитных волн с параметрами наилучшим образом удовлетворяющими заданным требованиям. При реализации обычно имеют дело с квазиоптимальными антеннами. Параметры таких антенн в заданном диапазоне частот и углов уклонения с заданной точностью сходятся с параметрами оптимального излучателя. Основными характеристиками любой антенны являются диаграмма направленности и коэффициент отражения. В таком случае разработку модели щелевой антенны можно разделить на несколько этапов.

На первом этапе необходимо провести оценку согласованности щелевой антенны по входу. Функциональное назначение антенны состоит в согласовании фидерного тракта с открытым пространством. Для оптимизации согласующих свойств необходимо минимизировать неоднородности в раскрыве излучателя. При этом коэффициент отражения в заданной полосе частот будет минимален. В работе [3] для согласующих плавных переходов зависимость коэффициента отражения от длины излучателя, нормированного к длине волны излучения  $\Gamma(L/\lambda)$ , представлена в виде модуля нормированной тригонометрической функции. Связь между круговой частотой  $\omega$  и длиной волны электромагнитных колебаний хорошо известна из курса физики. Исходя из аналогии между щелевой антенной и СВЧ-трансформатором, а также из результатов математического моделирования в прикладном пакете Mathsoft MathCAD найдена интерполяция частотных характеристик экспоненциально расширяющейся щелевой линии

$$\Gamma(\omega) = \left| \frac{c}{\omega \cdot L} \cdot \sin\left(\frac{\omega \cdot L}{c}\right) \right|^k, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота [рад/с],  $c$  – скорость света в вакууме;  $c = 3 \cdot 10^8$  [м/с],  $k$  – степень отклонения закона расширения щели от экспоненциального,  $k = 0 \dots 1$ .

Корректность выражения (1) можно подтвердить экспериментально. В технике измерений антенно-фидерных устройств согласованность линии связи оценивается с помощью коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН):

$$\text{КСВН}(f) = [1 + \Gamma(2\pi f)]/[1 - \Gamma(2\pi f)], \quad (2)$$

где  $f$  – частота излучаемого сигнала [Гц].

Для излучателя с параметрами  $L = 55$  [мм],  $k = 0,8$  в диапазоне частот от 6 до 18 ГГц аналитические выражения (1) и (2) исследовались графически. Расчетная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты сигнала, приведена на рис. 1. В рамках работ по созданию станции активных помех разработаны излучатели на основе модели экспоненциально расширяющейся щелевой линии. Экспериментальные исследования характеристик антенны Вивальди проводились в безэховой экранированной камере (БЭК) на приборах фирмы Agilent Technology. Измерения изолированного излучателя выполнялись в свободном пространстве методом сравнения с эталонным рупором. Результаты измерений КСВ во всем диапазоне рабочих частот показаны на рис. 1. Видно, что порядки расчетных и экспериментальных данных имеют неплохую сходимость.

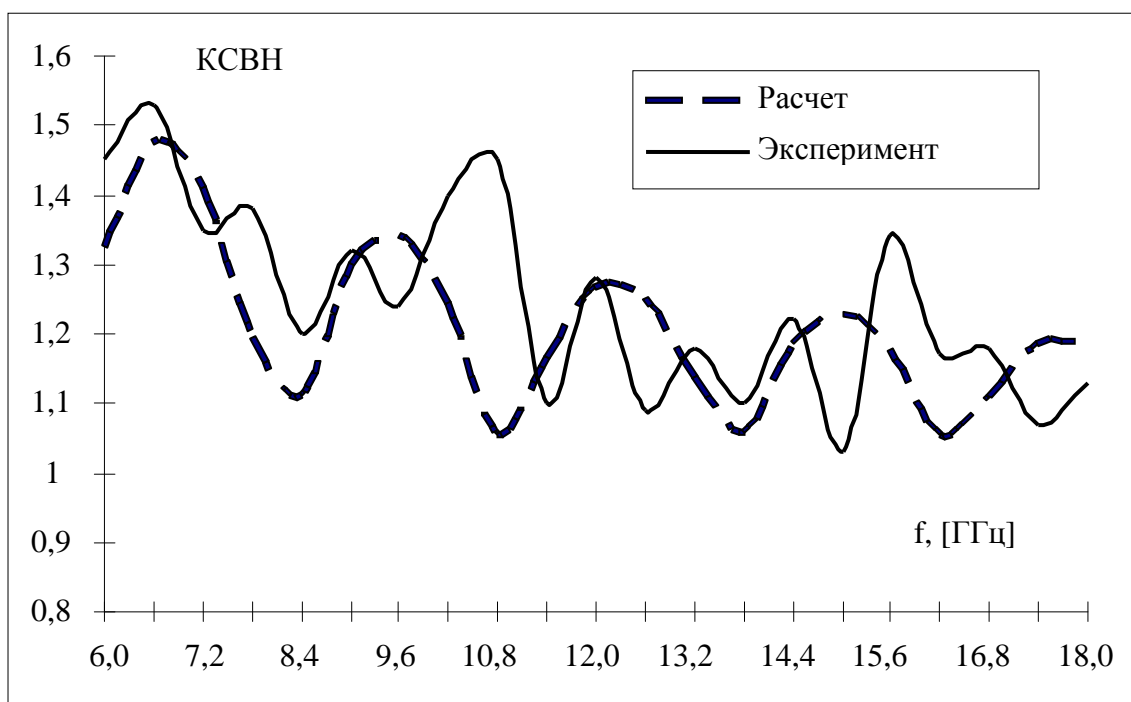


Рис. 1. Результаты теоретических исследований частотных характеристик излучающего элемента

На втором этапе требуется исследовать направленные свойства щелевого излучателя. Диаграммой направленности называется закон распределения излучаемого антенной поля в дальней зоне. Направленные свойства антенны можно исследовать как теоретически, так и экспериментально. Обычно при моделировании диаграммы направленности антенны стремятся минимизировать затраты машинного времени. Проверку результатов моделирования проводят при минимально возможном количестве измерений. За основу модели слабонаправленного излучателя (антенны Вивальди) следует принять стандартную математическую функцию. С учетом того, что в заданной точке пространства мощность электромагнитной волны пропорциональна квадрату напряженности поля, аппроксимированная функцией Бесселя первого рода нулевого порядка диаграмма направленности должна выглядеть следующим образом

$$F(\theta, \varphi) = \left[ J_0\left(\frac{\theta}{\Delta\theta}\right) J_0\left(\frac{\varphi}{\Delta\varphi}\right) \right]^2, \quad (3)$$

где  $J_0(\theta)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\theta, \varphi$  – углы отклонения от нормали;  $\Delta\theta$  – ширина диаграммы направленности в H-плоскости;  $\Delta\varphi$  – ширина диаграммы направленности в E-плоскости.

Третий этап исследования по большей части методический. Поэтому несомненный практический интерес представляет разработка метода оптимизации обоснованной модели микрополоскового излучателя. Здесь под моделью подразумевается совокупность каких-либо параметров. Рассмотрим задачу оптимизации частотных характеристик антенн Вивальди в микрополосковом исполнении. По мнению автора весьма перспективным является основанный на моделировании и оптимизации подход к проектированию полосковых излучателей. Использование микрополосковых линий при проектировании СВЧ излучателей, прежде всего, обусловлено проблемой комплексной миниатюризации современной радиоэлектронной аппаратуры.

Помимо малых размеров к микрополосковым излучателям также предъявляется требование хорошего согласования по входу во всем диапазоне рабочих частот. Выбор наилучшей антенны из известных типов, компромиссно удовлетворяющих этим требованиям, весьма ограничен. В рамках НИР [4] рассматривались три вида излучателей: открытый конец волновода, логопериодические антенны, щелевые антенны. Исследования макетов излучателей велись параллельно. Наилучший результат был получен на макете щелевого излучателя (антенны типа Вивальди). Хорошие диапазонные свойства антенн Вивальди позволяют использовать их без дополнительных согласующих устройств.

Идеальный излучающий элемент должен быть абсолютно согласован с источником возбуждения в заданной полосе рабочих частот. Рассогласование с источником возбуждения приводит к снижению усиления реальной антенны. Поэтому следует уделить внимание вопросу оптимизации коэффициента отражения щелевой антенны. Для обеспечения согласования такой антенны оптимизируется представленная в виде матрицы рассеяния двухполюсника модель. Под оптимизацией матрицы рассеяния двухполюсника подразумевается минимизация коэффициента отражения. Для оценки согласованности антенны в широкой полосе частот предлагается метод интегральных оценок характеристик излучающих элементов. Формулировку метода интегральных оценок можно записать следующим образом:  $\mathbf{A}(x) = \{A_1(x), A_2(x), A_3(x)\}$ ,  $f(x) = \iiint_{A_i(x)} F[\mathbf{A}(x)] dA_1 dA_2 dA_3 \rightarrow \min$ .

Поясним суть метода. Допустим, требуется минимизировать функцию нескольких переменных по одному параметру. Для щелевой антенны такой функцией может быть зависимость коэффициента отражения от длины области излучения  $L$  и длины волны излучаемого сигнала  $\lambda$

$$\Gamma(L, \lambda) = \left| \frac{\lambda}{2\pi L} \sin\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right) \right|. \quad (4)$$

Минимум результирующей целевой функции находится с помощью классических методов поиска экстремума. Допустим, необходимо найти длину излучающего участка антенны Вивальди, при которой коэффициент отражения минимален в среднем по диапазону. Тогда по остальным параметрам эта функция интегрируется. При этом минимизируемая целевая функция будет выглядеть следующим образом

$$f(L) = \int_{\lambda_b}^{\lambda_n} \Gamma[\lambda(L)] d\lambda \rightarrow \min. \quad (5)$$

где  $\lambda_n$  – максимальная длина волны в заданном диапазоне,  $\lambda_b$  – длина волны, минимальная по диапазону.

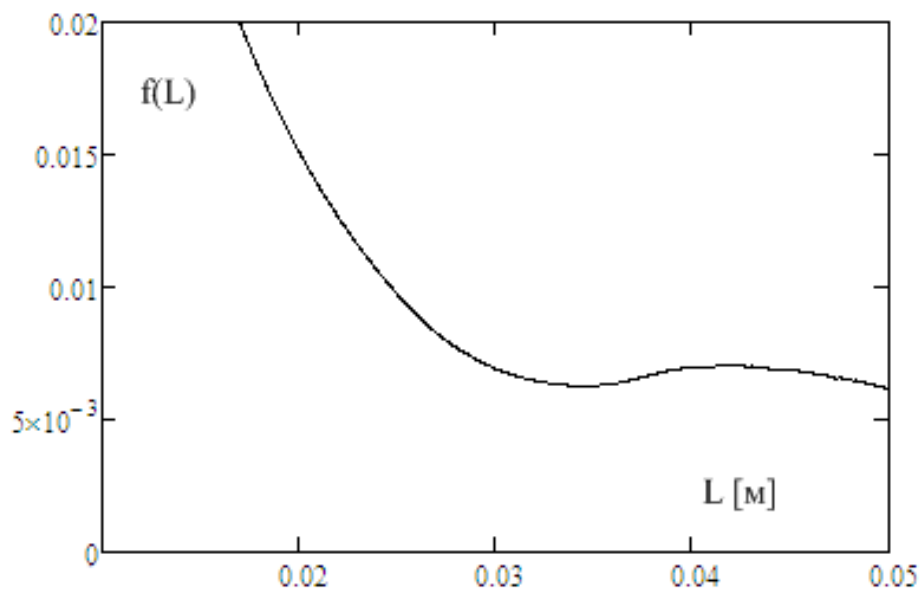


Рис. 2. График функции согласованности щелевой антенны

Заключительным этапом любого научного исследования является макетирование. Однако, альтернативой макетированию можно считать вычислительный эксперимент. Поэтому, в процессе оптимизации согласования широко используются быстродействующие вычислительные машины. По мнению автора наиболее практичным инструментом исследования многоэкстремальных функций является прикладной пакет Mathsoft MathCAD. Моделирование выражения (5) проводилось при следующих исходных данных: максимальная длина излучающей области щелевой антенны  $L_{\max} = 0,05$  [м], длина волны максимальная в заданном диапазоне  $\lambda_{\text{н}} = 0,075$  [м], минимальная по диапазону длина волны  $\lambda_{\text{в}} = 0,017$  [м]. Графоаналитическая интерпретация приведенной зависимости показана на рис. 1. Видно, что при заданных ограничениях минимум целевой функции находится в точке  $f(0,034) = 0,006$ . Таким образом, оптимальная длина области излучения щелевой антенны равна  $L = 0,034$  [м].

### 3. Инженерный расчет широкополосных и малогабаритных антенн

В работах [1, 3, 5] описаны самые разнообразные расчетные модели и методики проектирования щелевых антенн. Недостатками этих методик можно считать то, что все они используют требующий больших вычислительных затрат метод конечных элементов, либо предназначены для конкретной конструкции щелевой антенны. Четвертым этапом в данной работе является нахождение общей расчетной модели для широкого класса антенн бегущей волны. Конструкция таких антенн должна обеспечивать плавную трансформацию структуры

излучаемого поля. В соответствии с теорией согласующих переходов [3] щелевая линия на участке излучения  $L$  должна расширяться экспоненциально по закону

$$y(x) = y_0 \exp(R \cdot x/L), \quad (6)$$

где  $R = \ln(Z_0/Z)$ ,  $Z_0 = 120 \cdot \pi$  [Ом] – волновое сопротивление открытого пространства,  $Z$  – волновое сопротивление фидерной линии.

При выборе геометрических размеров щелевой линии учитываются следующие обстоятельства. Ясно, что ширина диаграммы направленности определяется углом расширения щелевой линии. Поэтому для расширения главного лепестка диаграммы направленности антенны длину области излучения  $L$  следует уменьшать. С другой стороны уменьшение  $L$  приводит к рассогласованию излучателя с внешним пространством в нижней части частотного диапазона. Оптимальную величину длины области излучения можно считать равной длине волны  $L = \lambda_n = 3 \cdot 10^8 / f_n$  на нижней частоте рабочего диапазона.

Исходя из приведенных выше соображений и результатов измерений [4] можно записать эмпирическую зависимость ширины диаграммы направленности антенны по уровню  $-3$  дБ от нормированной моды излучения  $\lambda/L$  для двух ортогональных плоскостей

$$\Delta\theta(\lambda) = \frac{\lambda/L}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)} \approx \frac{0,77}{\alpha} (k\lambda/L)^A, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – угол расширения щелевой линии,  $k$  – коэффициент перекрытия по диапазону,  $k = f_b/f_n$ ,  $A$  – корректирующий коэффициент.

В таком случае диаграмму направленности щелевой антенны можно аппроксимировать с помощью функции Бесселя первого рода нулевого порядка. Тогда расчетная модель антенны бегущей волны представлена нормированной диаграммой направленности [дБ] и имеет следующий вид

$$F(\theta) = 20 \lg [J_0(0,761(\theta/\Delta\theta(\lambda))^B)], \quad (8)$$

где  $J_0(\theta)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $\Delta\theta$  – ширина диаграммы направленности антенны по уровню  $-3$  дБ,  $B$  – корректирующий коэффициент.

На последнем этапе проводится проверка полученного решения. Аналитическая зависимость (7) исследовалась расчетно-графическим методом в системе автоматизированного проектирования Mathsoft MathCAD. Правильность решения оценивалась путем сравнения результатов анализа и измерений. Результаты измерений были заимствованы из научно-исследовательской экспериментальной работы [4].

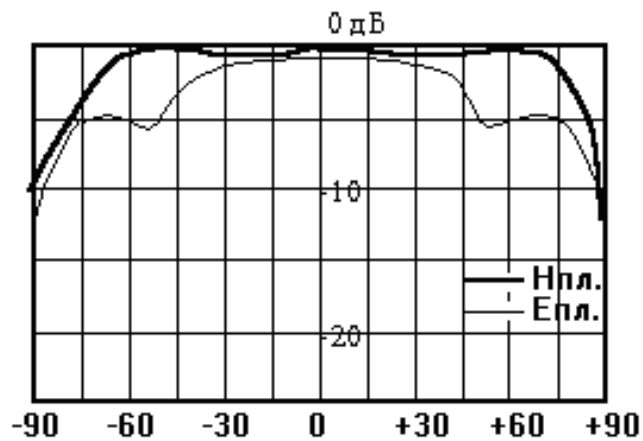


Рис.3. Диаграмма направленности изолированного излучателя  
( $f = 4.0$  ГГц)

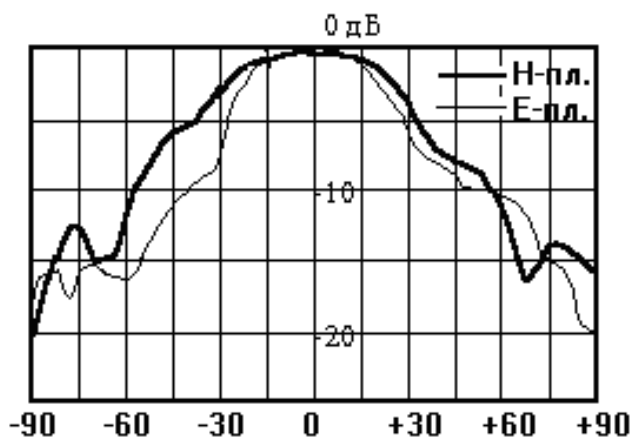


Рис.4. Диаграмма направленности изолированного излучателя  
( $f = 8.0$  ГГц)

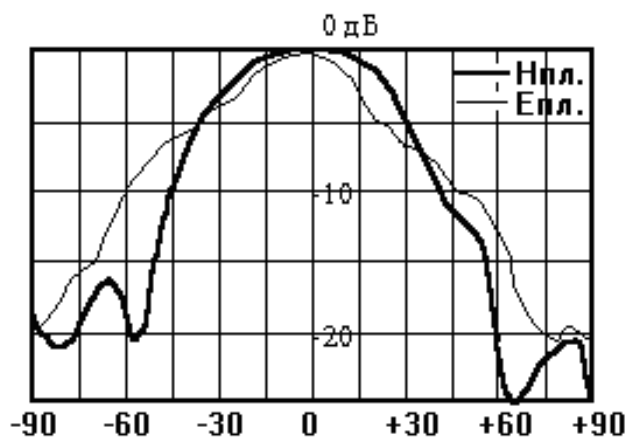


Рис.5. Диаграмма направленности изолированного излучателя  
( $f = 12.0$  ГГц)



В рамках НИР [4] был изготовлен макет щелевой антенны и выполнены измерения её диаграммы направленности. Измерения антенны с углом расширения щели  $45^\circ$  и длиной области излучения  $7,5$  [см] проводились в безэховой экранированной камере методом сравнения с эталонным рупором. Результаты измерений диаграммы направленности щелевой антенны в двух ортогональных плоскостях показаны на рис. 3, 4, 5. Корректность аппроксимации (8) можно оценить экспериментально с помощью довольно известного метода наименьших квадратов. Анализ показал, что хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных выполняется при  $A = 0,7$ ,  $B = 2$  для Н-плоскости и при  $A = 0,3$ ,  $B = 1$  для Е-плоскости.

#### **4. Заключение**

Основными результатами данной работы можно считать следующие положения. При проведении теоретических исследований характеристик щелевых антенн разработана электродинамическая модель. Такую модель можно использовать при описании излучательных и отражательных свойств оптимальных согласованных неоднородностей. При проектировании антенн, как правило, имеют дело с их квазиоптимальной моделью. Оптимизация параметров щелевых излучателей обычно проводится с помощью специально разработанных методов.

В результате экспериментальных исследований антенны бегущей волны в широкой полосе частот построена аппроксимация её направленных характеристик. По результатам моделирования и анализа изолированного излучателя установлена эмпирическая зависимость ширины диаграммы направленности от диапазонных и конструктивных параметров. При моделировании волновых процессов выгоднее работать со стандартными функциями, например с функцией Бесселя первого рода нулевого порядка. Использование простых математических моделей дает выигрыш по времени, которое необходимо для проведения исследования поля антенны в дальней зоне. Таким образом, наиболее рациональным подходом к проектированию широкополосных щелевых антенн является оптимальное сочетание измерений и расчетов.

#### **Библиографический список**

1. Раевский С. Б., Белов Ю. Г., Денисенко А. А., Ермолаев А. И. и др. Математические методы прикладной электродинамики. Коллективная монография. – М.: Радиотехника, 2007. – 88 с.

2. Альхарири М. Двухсторонний широкополосный излучатель Вивальди. – М.: Антенны, 2006, №8, с. 44
3. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
4. Казанцев Г. В. Исследование возможности построения активных многолучевых антенных решеток для широкополосных малогабаритных цифровых приемо-передающих устройств // Отчет по научно-исследовательской экспериментальной работе. – М.: ЦНИРТИ. 1996.
5. Касьянов А. О., Обуховец В. А. Численное моделирование микрополосковых антенных решеток из продольных широкополосных излучателей. – М.: Антенны, 2007, №1.

#### **Сведения об авторе**

Гончаров Владимир Анатольевич, инженер ФГУП «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга», г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, тел.: 8(916) 927-19-83, e-mail: nio7@list.ru.