

**СИНТЕЗ РЕШЕТКИ ПОПЕРЕЧНЫХ ЩЕЛЕЙ
В ВОЛНОВОДЕ С ЗАМЕДЛЕННОЙ ВОЛНОЙ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
И НАПРАВЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРИ ЧАСТОТНОМ СКАНИРОВАНИИ**

Введение

Волноводно-щелевые системы широко используются при построении антенн с частотным сканированием. Замедление волны в волноводе способствует повышению угло-частотной чувствительности антенны и позволяет исключить интерференционные максимумы высшего порядка из ее диаграммы направленности. Поперечные щели используются для излучения поля с горизонтальной поляризацией. Направленные и энергетические характеристики антенны, формирующие ее коэффициент усиления (КУ), должны удовлетворять определенным требованиям. Для получения высокого КУ в секторе сканирования необходимо иметь высокий уровень коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента полезного действия антенны, однозначно определяемого коэффициентом излучения $|S_{\Sigma}|^2$. Для повышения КНД прежде всего необходимо понижать уровень боковых лепестков (УБЛ). Диаграмма направленности (ДН) антенны, в частности, уровень боковых лепестков, определяется амплитудным (АР) и фазовым (ФР) распределением напряжений на щелях вдоль антенны. Расстояние между щелями d_z в антенне может быть равно длине волны в волноводе λ_g или отличаться от нее. Сами щели могут быть резонансными и нерезонансными. В случае, когда $d_z = \lambda_g$, а сами щели резонансные, антенну называют резонансной и однородной при одинаковой длине щелей. В общем случае при сканировании приходится иметь дело с нерезонансными антеннами. Условимся отличать резонансную длину волны для всей антенны λ_{resA} , когда $d_z = \lambda_g$, от резонансной длины волны λ_{res} одиночной щели.

В однородной антенне бегущей волны АР может быть постоянным, если антенна резонансная, или спадающим по экспоненте от ее начала к концу в нерезонансной антенне. С изменением частоты АР и ДН претерпевают изменения. На частоте, на которой длина одиночной щели близка к резонансной, АР быстро спадает от начала к концу антенны. При этом ДН заметно искажается.

Цель работы – исследование возможности формирования спадающего к краям амплитудного распределения в системе поперечных щелей в прямоугольном волноводе с замедляющей системой, которое позволяет получить как можно более высокий КУ в секторе углов сканирования.

Постановка задачи и ее решение

Рассматривается система симметрично расположенных узких поперечных щелей в широкой стенке прямоугольного волновода с диэлектрическим слоем, параллельным его широким стенкам (рис. 1). Волновод возбуждается основной волной типа LM_{10} единичной амплитуды. Эта волна трансформируется в волну типа H_{10} , когда диэлектрическое заполнение волновода становится однородным. В решении задачи используется приближение постоянного электрического поля поперек щели и аппроксимация функции распределения поля вдоль нее половиной периода синусоиды. Необходимо найти размеры щелей, обеспечивающие спадающее к краям амплитудное распределение напряжений в рассматриваемой системе, которое позволяет получить низкий (менее уровня 0,2) УБЛ в диаграмме направленности

антенны. Желательно, чтобы такой уровень УБЛ сохранялся в как можно более широком секторе углов при частотном сканировании. Важно также получить эффективное излучение (уровень коэффициента излучения больший, чем 0,85) при низком значении КСВН в широком частотном диапазоне.

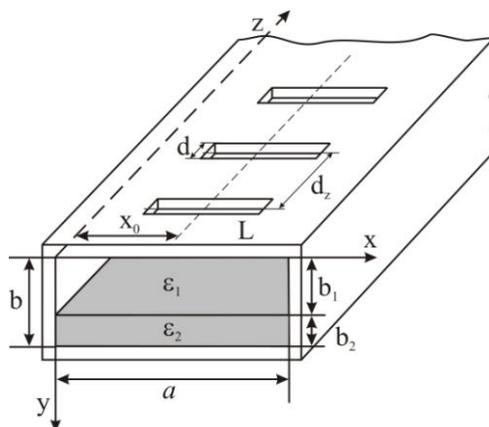


Рис. 1. Антенная решетка с поперечными щелями в волноводе со слоистым диэлектрическим заполнением

Поставленная задача включает в себя такие фрагменты:

1. Решение задачи возбуждения поперечной щелью волновода со слоем диэлектрика, параллельным широким стенкам волновода.
2. Построение программы расчета корней LM – и LE – волн основного и высших типов для указанного выше волновода.
3. Разработка модифицированного метода последовательных приближений (ММП) для определения напряжений на щелях в многоэлементной системе.

Указанные вопросы разрабатывались в предыдущих работах авторов. Амплитудное и фазовое распределения напряжений в щелях вдоль антенны с учетом внутреннего и внешнего взаимодействия щелей определялось с помощью ММП [1] в сочетании с теорией щелевых излучателей [2]. При синтезе спадающего к краям АР вдоль системы использовались данные для резонансных длин одиночных щелей, представленные в работах [3, 4]. При выборе геометрических и электрических параметров исследуемой системы учитывались полученные в [5] условия однолепесткового сканирования в секторе действительных углов для волноводно-щелевой антенны на базе волновода с частичным диэлектрическим заполнением.

В [2] приведено аналитическое выражение для напряжений в резонансной антенне, полученное без учета внешнего взаимного влияния щелей. Оно вполне соответствует действительности в случае продольных щелей, которые слабо взаимодействуют между собой по внешнему пространству, чего нельзя сказать о поперечных щелях. Поэтому интересно выяснить роль внешнего взаимного влияния в системе поперечных щелей на АР и ДН. Проще всего сделать это для системы щелей одинаковой длины.

Анализ полученных результатов

Сначала исследовали однородную антенну, которая состоит из 20 эквидистантных щелей одинаковой длины $L=16$ мм. Резонансная длина волны для них $\lambda_{res}=34$ мм. Расчеты АР, ДН и коэффициентов матрицы рассеяния проводились в диапазоне длин волн от 28,5 мм до 40 мм для систем щелей, показанных на рис.1. Диэлектрический слой расположен у стенки, противоположной той, в которой прорезаны щели. Предполагалось, что $\varepsilon_1 = 1$, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_2 = \varepsilon = 7$. Толщина слоя $t=3$ мм, поперечное сечение волновода $a \times b = 23 \times 10$ мм. Расстояния между щелями были выбраны так, что эквифазное возбуждение

обеспечивалось на длине волны $\lambda = \lambda_{resA} = 32$ мм ($\lambda_g = 23,87$ мм, коэффициент замедления $\nu = 1,34$). На этой длине волны имеет место "эффект нормали": резкое падение коэффициента излучения из-за синфазного сложения отражений от всех щелей (кривая 1 на рис. 2). Наибольший интерес представляет собой область углов, в которой луч отклонен от нормали. Здесь исследуемая антенна является нерезонансной ($d_z \neq \lambda_g$). Поскольку в рассматриваемой системе предполагается частотное сканирование, это значит, что и щели в ней на всех частотах нерезонансные, за исключением единственной частоты для каждой щели, определяемой ее длиной. Расчеты проводились с учетом и без учета взаимной связи излучателей по внешнему пространству (соответственно, рис.2, а, б).

На рис. 2 представлены частотные (в терминах длины волны λ) зависимости коэффициентов излучения $|S_\Sigma|^2$, прохождения $|\Gamma_{12}|^2$ и отражения $|\Gamma_1|^2$ (кривые 1, 2, 3 на рис. 2). Видно, что внешнее взаимное влияние излучателей приводит к заметному увеличению коэффициента отражения на резонансной длине волны антенны $\lambda_{resA} = 32$ мм и некоторому увеличению его вблизи $\lambda_{res} = 34$ мм. Кроме того, коэффициент излучения в диапазоне длин волн от $\lambda = 33$ мм до $\lambda = 37$ мм на рис.2, а ведет себя менее равномерно, чем на рис.2, б.

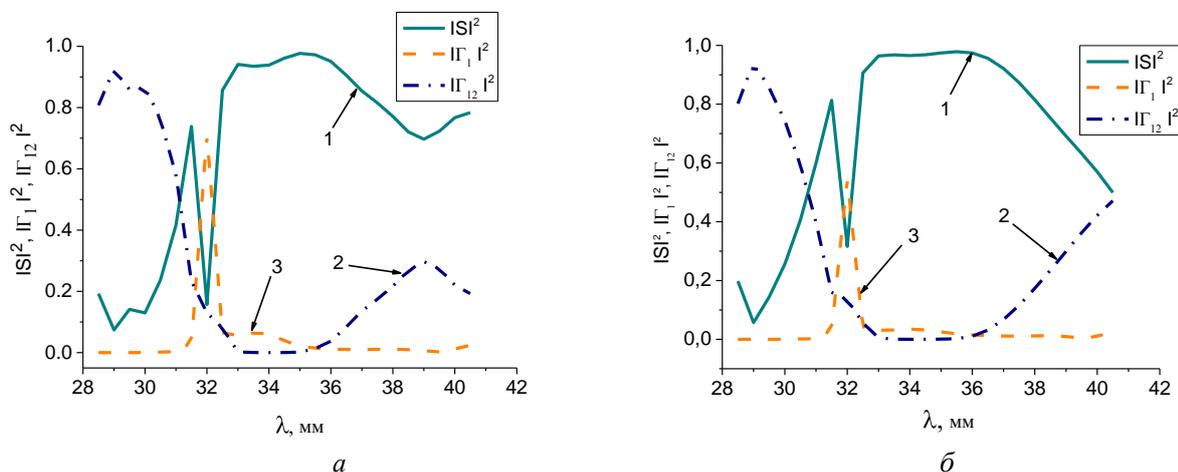


Рис. 2. Зависимость энергетических характеристик системы поперечных щелей одинаковой длины $L = 16$ мм от длины волны

Результаты исследования АР и ДН для системы поперечных щелей одинаковой длины ($L = 16$ мм) с учетом (рис.3, а, рис.4, а) и без учета (рис.3, б, рис.4, б) взаимной связи излучателей по внешнему пространству сводятся к следующему. Известно [2], что при отсутствии внешнего взаимного влияния в резонансной антенне с резонансными щелями одинаковой длины АР должно быть постоянным. Это иллюстрируется кривой 1 на рис. 3, б. Учет взаимодействия приводит к искажению АР (см. кривая 1 на рис. 3, а).

В нерезонансной антенне скорость уменьшения амплитуды зависит от излучательной способности щелей. Самый быстрый спад наблюдается в случае резонансных щелей (кривые 3 для $\lambda_{res} = 34$ мм на рис. 3, а, б), более медленный, когда щели нерезонансные (кривые 2, 4, 5, на тех же рисунках). Как видно из рис.3, а, учет взаимодействия излучателей приводит к тому, что кривые АР становятся менее гладкими, чем на рис.3, б, но порядок расположения кривых АР на фиксированных длинах волн сохраняется.

Расчет ДН с учетом внешнего взаимного влияния излучателей показал, что за счет него особенно сильно искажается ДН системы резонансных щелей одинаковой длины.

В нерезонансной антенне, когда $d_z \neq \lambda_g$, ширина ДН в случае $\lambda_{res} = 34$ мм (кривая 3) на уровне 0,5 увеличивается практически в два раза (рис.4, а) по сравнению с ДН, рассчитанной без учета взаимодействия (рис.4, б). Уровень бокового излучения в ДН превышает значение

0,2 для всех значений длин волн от $\lambda = 32$ мм до $\lambda = 38$ мм (кривые 1 – 5 соответственно на рис.4, а, б).

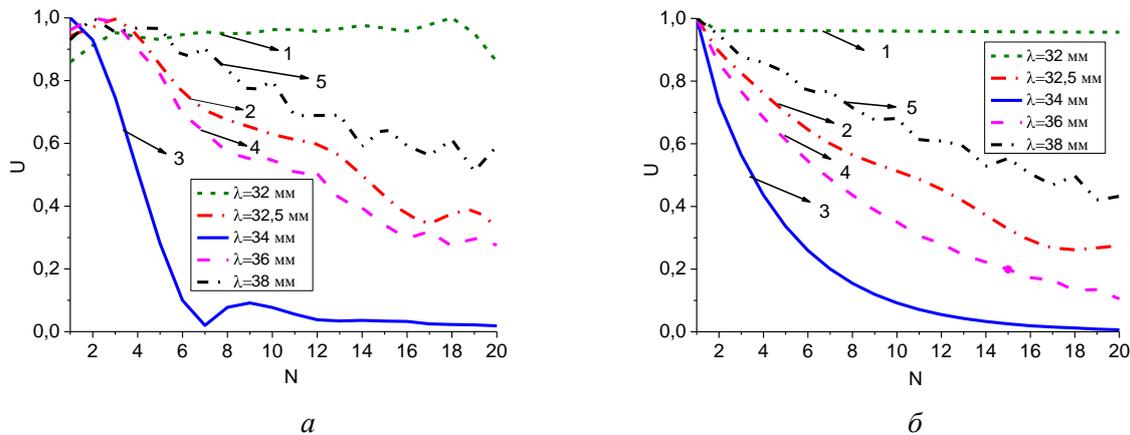


Рис. 3. Амплитудные распределения решетки $N=20$ поперечных щелей с одинаковой длиной излучателей $L=16$ мм для различных значений длин волн ($\lambda = 32$ мм – $\lambda = 38$ мм)

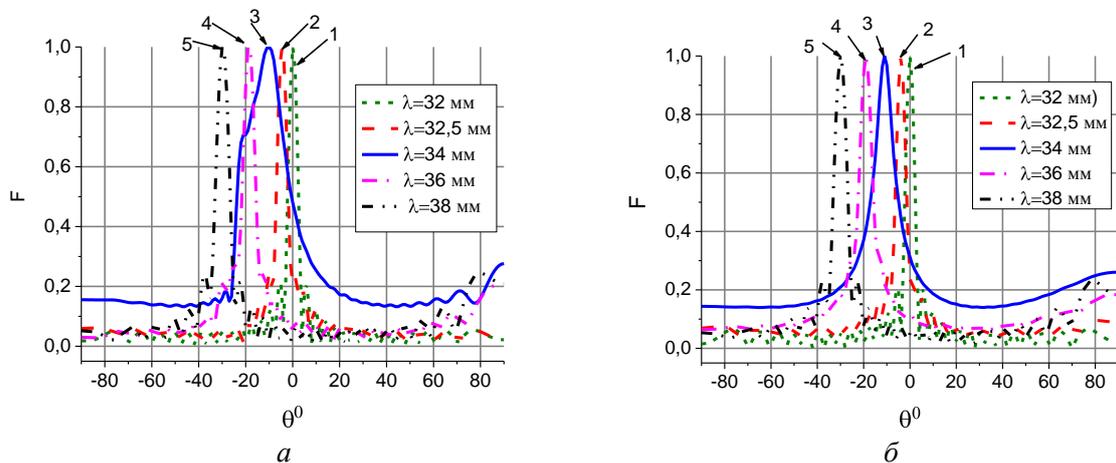


Рис. 4. Диаграммы направленности решетки $N=20$ поперечных щелей с одинаковой длиной излучателей $L=16$ мм для различных значений длин волн ($\lambda = 32$ мм – $\lambda = 38$ мм)

В результате проведенного анализа энергетических и направленных характеристик однородной антенны следует, что внешнее взаимное влияние поперечных щелей надо обязательно учитывать.

Поскольку боковое излучение однородной антенны на всех частотах в секторе сканирования превышает уровень 0,2, необходимо исследовать возможность улучшения ДН подбором длин щелей в неоднородной антенне, создавая спадающее к краям антенны АР.

Для создания такого распределения начинаем с определения числа излучателей в антенне, исходя из заданной ширины диаграммы направленности, затем подбираем длины щелей на выбранной частоте (как правило, соответствующей среднему положению луча в секторе сканирования). При этом заботимся о том, чтобы $|S_{\Sigma}|^2$ антенны в целом был максимальным.

Для определенности выберем сектор сканирования в отрицательной области углов, отсчитываемых от нормали к решетке. Выберем для синтеза АР среднюю частоту в секторе сканирования. Сформируем на этой частоте спадающее к краям антенны АР. Примем за основу такие общие рассуждения.

В начале антенны амплитуда возбуждающей волны (АВВ) самая большая. Чтобы на краю антенны был низкий уровень АР, надо уменьшать излучательную способность (ИС)

щели за счет ее длины, которая меньше резонансной длины щели L_{res} . Для роста функции АР при формировании амплитуд напряжений на последующих щелях их длины надо увеличивать с целью увеличения их ИС. Длины щелей постепенно приближаются к резонансной длине L_{res} . Очевидно, длина щели L должна оставаться меньшей или достаточно близкой к резонансной в средней части антенны, где должен быть максимум АР. Спадание АР во второй половине антенны будет обеспечиваться более быстрым, чем на краю антенны, уменьшением АВВ, которое происходит за счет интенсивного излучения щелей, близких по длине к резонансным. Для ускорения спадания АР на втором краю антенны следует опять использовать нерезонансные щели. При этом надо учитывать связь АВВ и ИС: уменьшение ИС предыдущей щели вызывает увеличение АВВ на последующей щели и наоборот. При учете взаимной связи излучателей этот процесс усложняется. Слабая связь внутри волновода в какой-то степени допустима для щелей, далеких по длине от резонансных. При стремлении длин щелей к резонансной длине все процессы существенно усложняются. Тем не менее, используем приведенную логику как исходное положение при поиске длин щелей в антенне, обеспечивающих в ней заданное АР.

В качестве примера приведем результаты синтеза АР в антенне с 20 излучателями, разнесенными друг от друга на расстояние $d_z = \lambda_g$ при $\lambda = 32$ мм. В качестве средней длины волны в секторе сканирования выберем $\lambda = 36$ мм (полагаем, что длины волн изменяются в диапазоне $\lambda = 34$ мм – $\lambda = 38$ мм).

Алгоритм подбора длин щелей для получения спадающего к краям антенны АР следующий. На первом этапе длины щелей в середине антенны оставляем равными резонансной длине (при $\lambda = 36$ мм $L_{res} = 17$ мм). Длины соседних с ними щелей выбираем соответственно чуть меньше и чуть больше резонансной длины. Длины первых и последних щелей еще больше отличаются от резонансной (первая короче резонансной). Проводим расчет всех характеристик. Следим, чтобы $|S_{\Sigma}|^2$ антенны был максимальным в заданном диапазоне длин волн, АР – примерно симметрично спадало к краям антенны, при этом учитываем тот факт, что первые щели должны излучать достаточно мало, чтобы хватило энергии для излучения последними щелями. На втором и последующих этапах расчета слегка варьируем длины щелей от начала к концу антенны. При этом каждый раз проверяем максимальный уровень $|S_{\Sigma}|^2$ в заданном диапазоне длин волн, наличие примерно симметричного спадания АР к краям антенны и уровень бокового излучения в ДН. Этот уровень не должен превышать значения 0,2 для всех рассчитываемых ДН диаграмм в заданном диапазоне λ . Все это выполняем с учетом внутреннего и внешнего взаимного влияния щелей. Процесс подбора длин щелей продолжаем до тех пор пока не будут получены требуемые характеристики.

Действуя по этому алгоритму, сумели подобрать следующие длины щелей $L_1 - L_{20}$: (12.0 мм, 13.0 мм, 14.0 мм, 14.5 мм, 14.8 мм, 15.2 мм, 15.6 мм, 15.9 мм, 16.3 мм, 16.3 мм, 16.55 мм, 16.6 мм, 16.6 мм, 16.9 мм, 16.8 мм, 17.0 мм, 17.1 мм, 16.7 мм, 16.5 мм, 15.8 мм), которые обеспечили спадающее к краям антенны АР, представленное на рис. 5, для различных длин волн (кривые 1 – 4 соответствуют $\lambda = 33,5$ мм – $\lambda = 38$ мм). На рис.6 (кривые 1 – 4) для тех же длин волн представлены соответствующие ДН. На рис.7 представлены энергетические характеристики такой системы в диапазоне частот. Видно, что удалось определить размеры щелей, обеспечивающих спадающее к краям АР в рассматриваемой системе. Диаграмма направленности антенны с таким АР имеет низкий уровень боковых лепестков (значительно меньше уровня 0,2). Антенна имеет высокий коэффициент излучения (не ниже уровня 0,85), малый уровень коэффициента отражения при частотном сканировании в секторе углов от -29 до -3 градусов в диапазоне длин волн от $\lambda = 33,5$ мм до $\lambda = 38$ мм

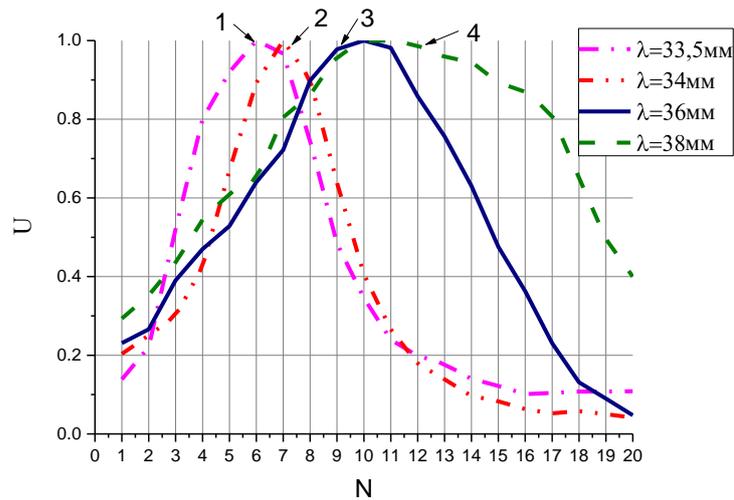


Рис. 5. Амплитудные распределения решетки $N=20$ поперечных щелей с синтезированной длиной излучателей для различных значений длин волн ($\lambda = 33,5 \text{ мм} - \lambda = 38 \text{ мм}$)

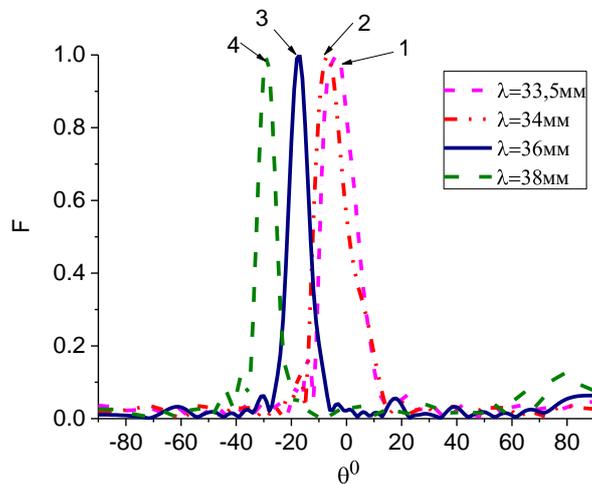


Рис. 6. Диаграммы направленности решетки $N=20$ поперечных щелей с синтезированной длиной излучателей для различных значений длин волн ($\lambda = 33,5 \text{ мм} - \lambda = 38 \text{ мм}$)

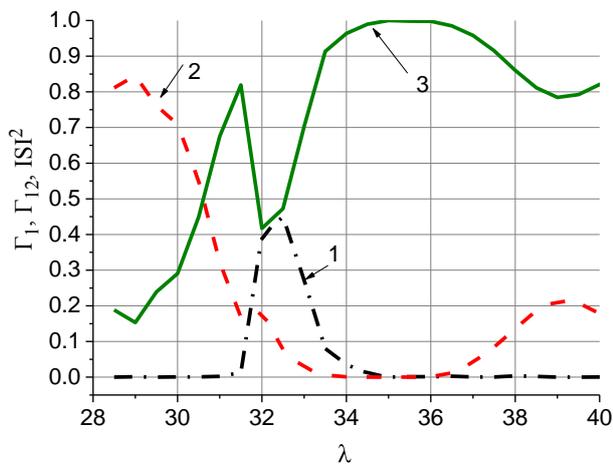


Рис. 7. Зависимость от длины волны энергетических характеристик системы поперечных щелей с синтезированной длиной излучателей от длины волны

Выводы

Проведенные исследования сводятся к следующим результатам.

1. В линейной волноводно-щелевой антенне, образованной системой поперечных щелей, прорезанных в широкой стенке прямоугольного волновода с замедляющей структурой, можно создать спадающее к краям амплитудное распределение путем специального выбора длин щелей.

2. Предложена методика выбора длин щелей, с использованием которой удалось обеспечить низкий (не выше 0,12) уровень боковых лепестков ДН в широком секторе углов сканирования (от -3 до -29 градусов) при высоком (не ниже уровня 0,85) коэффициенте излучения антенны (тестовые расчеты проведены для 20 щелей).

3. Для того чтобы АР не сильно изменялось в секторе сканирования, расчет длин щелей следует проводить на средней частоте. При более коротких длинах волн АР быстрее спадает к краям, на более длинных – медленнее, чем на средней частоте, что приводит к соответствующему изменению ширины диаграммы направленности.

4. В процессе выбора длин щелей проявилась такая закономерность: сначала располагаются укороченные щели, затем их длина растет, приближаясь к резонансной, а в конце антенны щели опять становятся нерезонансными. Поскольку фаза напряжения на щели имеет разный знак у укороченных и удлиненных щелей, следует пробными расчетами выяснять вопрос, какие щели (короче или длиннее резонансной) больше подходят для достижения поставленной цели.

Список литературы: 1. Яцук, Л.П., Блинова, Н.К., Жиронкина, А.В. Математическая модель линейной системы щелей в волноводе с произвольной отражающей нагрузкой // Радиотехника. – Москва, 1992. – № 7-8. – С.73-78. 2. Фельд, Я. Н., Бененсон, Л. С. Антенно-фидерные устройства. Ч. 2. – Москва : Изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1959. – 551 с. 3. Блинова, Н.К., Ляховский, А.А., Яцук, Л.П. Поперечная щель в волноводе с диэлектрической замедляющей системой // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13, №1. – С.85-91. 4. Blinova, N.K. Yatsuk, L.P., Lyakhovsky, A.A. Multielement systems of slots in waveguides with partial dielectric filling // Proceedings of Third International Workshop ULTRAWIDEBAND AND ULTRASHORT IMPULSE SIGNALS (UWBUSIS 2006). – 2006. – P.229-231. 5. Яцук, Л.П., Блинова, Н.К., Ляховский, А.А., Ляховский, А.Ф. Закономерности частотного сканирования в волноводно-щелевой антенне, возбуждаемой замедленной волной // Физические основы приборостроения. – Москва, 2012. – Т1, №1. – С.7-15.

*Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина*

Поступила в редколлегию 12.10.2015