

МНОГОДИАПАЗОННЫЕ ПИРАМИДАЛЬНЫЕ РУПОРНЫЕ АНТЕННЫ С ОДИНАКОВОЙ ШИРИНОЙ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Введение

Для повышения надежности и качества передачи информации в телекоммуникационных системах применяется резервирование аппаратуры. Это решение проблемы гарантии получения потребителем всей передаваемой информации имеет большой недостаток: для подключения дублирующей аппаратуры (или дублирующих блоков) необходим отдельный канал управления и необходимо некоторое время для обеспечения ее работы. На практике возможны ситуации, когда такое положение недопустимо. Прежде всего это относится к чрезвычайным ситуациям, когда все службы работают на пределе возможностей, а потеря управления и связи может иметь катастрофические последствия.

Другой более надежный способ решения проблемы – передача информации одновременно на двух или большем числе частот. Современные методы и средства частотной селекции и разделения сигналов позволяют реализовать подобные системы и обеспечить их защиту от помех самого различного происхождения.

Одновременная работа радиоканалов на двух частотах в некоторых случаях решает проблему "мертвых зон".

В современных телекоммуникационных системах широко используется уплотнение каналов за счет поляризационной развязки между ними. В радиолокации и радиоастрономии используется полное поляризационное зондирование пространства, которое позволяет получить дополнительную информацию по сравнению с традиционными методами без поляризационной селекции сигналов. Эти новые возможности реализуются за счет использования антенн, работающих в ортогональных линейно- или кругополяризованном базисах. При этом часто важно обеспечить одинаковое направление и одинаковую ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны по всем частотным каналам. В телекоммуникационных системах в этом случае обеспечивается идентичность рабочих зон на всех частотных каналах, а в радиолокации и радиоастрономии обеспечивается одинаковое облучение остронаправленных зеркальных антенн и следовательно, одинаковые коэффициенты использования площади излучающего раскрыва.

Задача обеспечения одинаковой ширины главного максимума решается методами антенной техники. Ее разрешимость не вызывает сомнений исходя из принципа электродинамического подобия. Технически решение сводится к созданию комплексированных (совмещенных) антенн с близкими электрическими размерами, близкими амплитудными и фазовыми распределениями источников поля и одинаковой или близкой формой излучающей апертуры.

Цель статьи – теоретическое исследование характеристик направленности многодиапазонных комплексированных пирамидальных рупорных антенн, работающих в ортогональном линейно-поляризованном базисе и обеспечивающих одинаковую ширину главного лепестка диаграммы направленности (ДН) по каждому частотному каналу.

Характеристики направленности многодиапазонных комплексированных пирамидальных рупорных антенн

Как было отмечено выше, в качестве облучателей остронаправленных зеркальных и линзовых антенн широко используются облучатели в виде открытых концов волноводов и рупоров. Такие облучатели используются как в однозеркальных антеннах, например параболических или сферических, так и в многозеркальных. Обычно однозеркальные антенны имеют сравнительно большой угловой растрвор (около 120° и больше для короткофокусных зеркал),

двух- и трех зеркальные – значительно меньше (порядка 30°), так как обычно малое зеркало имеет значительно меньший диаметр и располагается на меньшем расстоянии, чем большое. Таким образом, для выяснения физических особенностей характеристик направленности совмещенных апертурных излучателей необходимо провести расчет для заданной ширины главного лепестка ДН, изменяющейся в широких пределах.

В последние годы особенно большое внимание уделяется исследованию возможностей создания многодиапазонных облучателей, позволяющих обеспечить поляризационную обработку сигнала в каждом частотном диапазоне. Обычно эту проблему можно решить путем использования поляризационно изотропных недеполяризующих квадратных или круглых волноводов или пирамидальных и конических рупоров с двумя развязанными (т.е. ортогональными) выходами по каждому частотному каналу, выполненными на прямоугольных волноводах стандартного поперечного сечения [1]. Применительно к этому случаю задача анализа направленных характеристик многодиапазонного излучателя сводится к расчету ДН кольцевого излучателя квадратной или круглой формы (рис. 1).

Учитывая, что единичным излучателем для антенн апертурного типа является излучатель Гюйгенса, ДН кольцевого излучателя с произвольной формой излучающего раскрыва получаем в виде

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{A} \left[S_2 \iint_{S_2} \dot{A}_2(x, y) e^{ik\vec{r}_s \vec{R}^o} dS - S_1 \iint_{S_1} \dot{A}_1(x, y) e^{ik\vec{r}_s \vec{R}^o} dS \right], \quad (1)$$

где A – нормирующий множитель, $\dot{A}_1(x, y)$ и $\dot{A}_2(x, y)$ – амплитудно-фазовые распределения источников поля во внутреннем и внешнем излучающих раскрывах антенны соответственно, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; \vec{r}_s – радиус-вектор точек на раскрыве, поля в которых интегрируются, \vec{R}^o – орт направления на точку наблюдения в дальней зоне антенны.

Задав амплитудно-фазовые распределения, а также форму и размеры излучающих раскрывов S_1 и S_2 , всегда можно по формуле (1) рассчитать ДН антенны. Можно также из анализа ДН найти такие размеры раскрыва антенны по каждому из каналов, которые обеспечивают заданную ширину главного лепестка ДН.

Таким образом, детальный анализ направленных характеристик многодиапазонных апертурных излучателей возможен только для конкретных вариантов амплитудно-фазовых распределений источников поля (АФР) и формы излучающих раскрывов.

Исследуем диаграммы направленности комплексированного многодиапазонного излучателя в виде системы вложенных друг в друга соосно волноводных и пирамидальных рупорных излучателей с квадратным раскрывом, электрические размеры излучающих раскрывов которых для каждого канала выбраны так, чтобы ширина ДН "по нулям" была одинакова. Как видно из рис. 1, второй, третий и последующие каналы имеют излучающие раскрывы одинаковой квадратной формы, поэтому для выполнения требований равенства ширины их ДН достаточно обеспечить выполнение условий принципа электродинамического подобия.

Рассмотрим случай постоянного АФР поля в раскрыве квадратной формы. В силу граничных условий электродинамики такой излучатель в виде открытого конца коаксиального волновода или рупора реализовать невозможно за исключением случая возбуждения его волной типа ТЕМ, когда ДН имеет воронкообразную форму. Однако эта приближенная модель позволяет существенно упростить задачу, получить ее аналитическое решение и проанализировать характеристики излучения в предельном случае. На практике в реальных волноводных и рупорных антеннах с излучающим раскрывом квадратной формы, возбуждаемых волной H_{10} , этот случай соответствует ДН в плоскости электрического вектора поля излучения антенны.

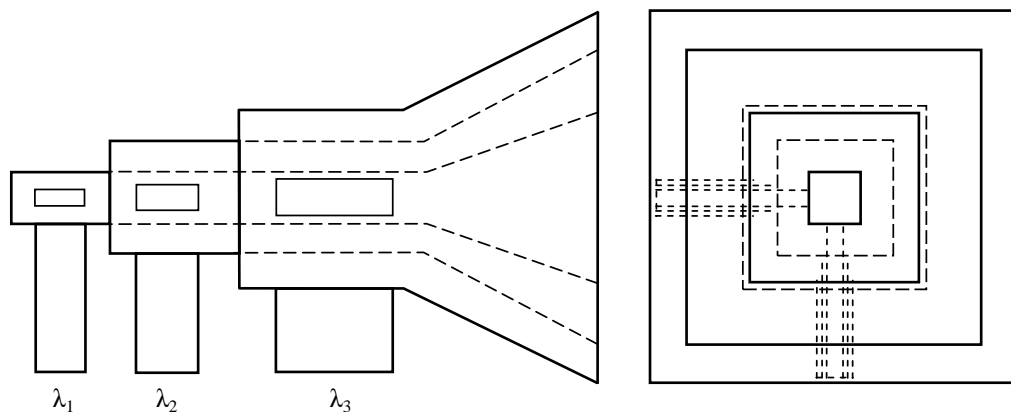


Рис. 1

В случае синфазного раскрыва квадратной формы амплитудные распределения обычно задаются разделяющимися по ортогональным осям координат, т.е. представляются в виде произведения двух функций $A(x, y) = A(x) \cdot A(y)$ и при постоянном амплитудном распределении получаем нормированную ДН внешнего излучателя в явном виде:

$$F_2(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{2(L_2^2 - L_1^2)} \left[L_2^2 \frac{\sin(\pi \frac{L_2}{\lambda_2} \sin \theta)}{\pi \frac{L_2}{\lambda_2} \sin \theta} - L_1^2 \frac{\sin(\pi \frac{L_1}{\lambda_2} \sin \theta)}{\pi \frac{L_1}{\lambda_2} \sin \theta} \right]. \quad (2)$$

Нормированная ДН внутреннего излучателя, т.е. эталонная ДН, имеет вид:

$$F_1(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin(\pi \frac{L_1}{\lambda_1} \sin \theta)}{\pi \frac{L_1}{\lambda_1} \sin \theta}. \quad (3)$$

Ширина главного лепестка ДН по нулям определяется в этом случае из условия

$$\theta_{01} = \arcsin \frac{\lambda_1}{L_1}. \quad (4)$$

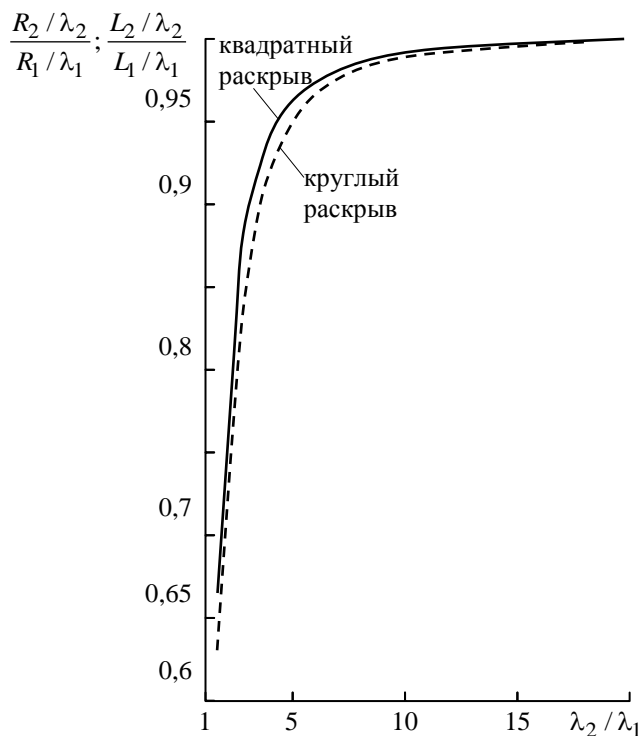
Для удобства записи и дальнейшего анализа введем параметр $\alpha = \frac{L_2 / \lambda_2}{L_1 / \lambda_1}$ и обозначим $n = \lambda_2 / \lambda_1$. Тогда из (2) получаем ДН многодиапазонной антенны в виде

$$F_2(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2(n^2 \alpha^2 - 1)} \left[n^2 \alpha^2 \frac{\sin(\frac{\pi \alpha}{\sin \theta_{01}} \sin \theta)}{\frac{\pi \alpha}{\sin \theta_{01}} \sin \theta} - \frac{\sin(\frac{\pi}{n \cdot \sin \theta_{01}} \sin \theta)}{\frac{\pi}{n \cdot \sin \theta_{01}} \sin \theta} \right]. \quad (5)$$

Найдем далее размеры внешнего квадратного излучателя, обеспечивающие такую же ширину главного лепестка ДН по нулям на волне λ_2 , как и внутренний на волне λ_1 . Положив в (5) $\theta = \theta_{01}$, получаем трансцендентное уравнение для определения размеров внешнего излучателя в виде:

$$\sin \pi \alpha = \frac{\sin \frac{\pi}{n}}{n \alpha} \quad (6)$$

Для детального физического анализа характеристик направленности многодиапазонной антенны с раскрывом квадратной формы необходимо найти его размеры, позволяющие решить поставленную задачу обеспечения одинаковой ширины ДН по каждому частотному каналу. Трансцендентное уравнение (6), из которого можно найти искомые размеры, решалось численно методом последовательных приближений. Рассчитанная зависимость отношения электрических размеров внешнего и внутреннего излучателей от отношения рабочих длин волн приведена на рис. 2. Здесь же для сравнения пунктирной линией приведена аналогичная зависимость относительных радиусов круглых раскрывов конических рупоров от отношения λ_2/λ_1 .



Из рис. 2 видно, что минимальное отношение рабочих длин волн λ_2/λ_1 , при котором обеспечивается одинаковая ширина ДН по обоим смежным частотным каналам, не меньше 1,6. Это существенно меньше значений 2,0 и 3,0 этого отношения для многодиапазонных комплексированных линейных антенн [2]. Физически этот результат объясняется тем, что ДН в этом случае формируется раскрывом кольцевой формы, следовательно, экранируется центральная часть внешней антенны не полностью, как в линейных антеннах. Это приводит не только к тому, что допустимое отношение λ_2/λ_1 меньше, но и L_2/λ_2 ближе к L_1/λ_1 . Кроме того, за счет этого эффекта не полной экранировки внешней антенны внутренней следует ожидать, что уровень боковых лепестков в этом случае будет ниже, чем в линейных антеннах.

Из рис. 2 видно также, что одинаковую ширину главного лепестка ДН при одинаковых значениях отношения λ_2/λ_1 обеспечивают пирамидальные рупорные антенны при несколько больших электрических размерах раскрыва, чем конические рупоры.

Перейдем к анализу ДН исследуемой антенны. На рис. 3, а – е приведены расчеты ДН многодиапазонной пирамидальной рупорной антенны коаксиального типа с раскрывом квадратной формы для $\lambda_2/\lambda_1 = 1,65; 1,7; 1,75; 1,8; 1,85; 1,9; 1,95; 2,0$ и $\lambda_2/\lambda_1 = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20$ для углов $\theta_{01} = 15^\circ; 45^\circ$ и 75° .

Из анализа полученных результатов расчетов следует, что уровень боковых лепестков пирамидальной рупорной многодиапазонной антенны действительно существенно меньше, чем многодиапазонных линейных антенн, но несколько больше, чем комплексированных конических рупорных антенн. Отличие ДН внешней антенны от ДН внутренней (эталонной) также значительно меньше, чем для линейных антенн, причем это отличие тем меньше, чем больше λ_2/λ_1 (для $\lambda_2/\lambda_1 \geq 15 - 20$ это отличие пренебрежимо мало). Видно также, что форма ДН и уровень боковых лепестков существенно изменяются при увеличении ширины главного лепестка ДН. Уже при $\theta_{01} = 30^\circ$ ДН имеет только два боковых лепестка, причем их уровень уменьшается с увеличением θ_{01} . При $\theta_{01} > 45^\circ$ уровни первых и вторых боковых лепестков приближаются по величине друг к другу, а при $\theta_{01} \geq 75^\circ$ первый лепесток меньше второго. При $\theta_{01} = 90^\circ$ один боковой лепесток исчезает. Качественно эти изменения харак-

теристик направленности апертурной антенны близки к соответствующим изменениям ДН линейных антенн, однако количественные характеристики – уровни боковых лепестков — для апертурных антенн существенно ниже.

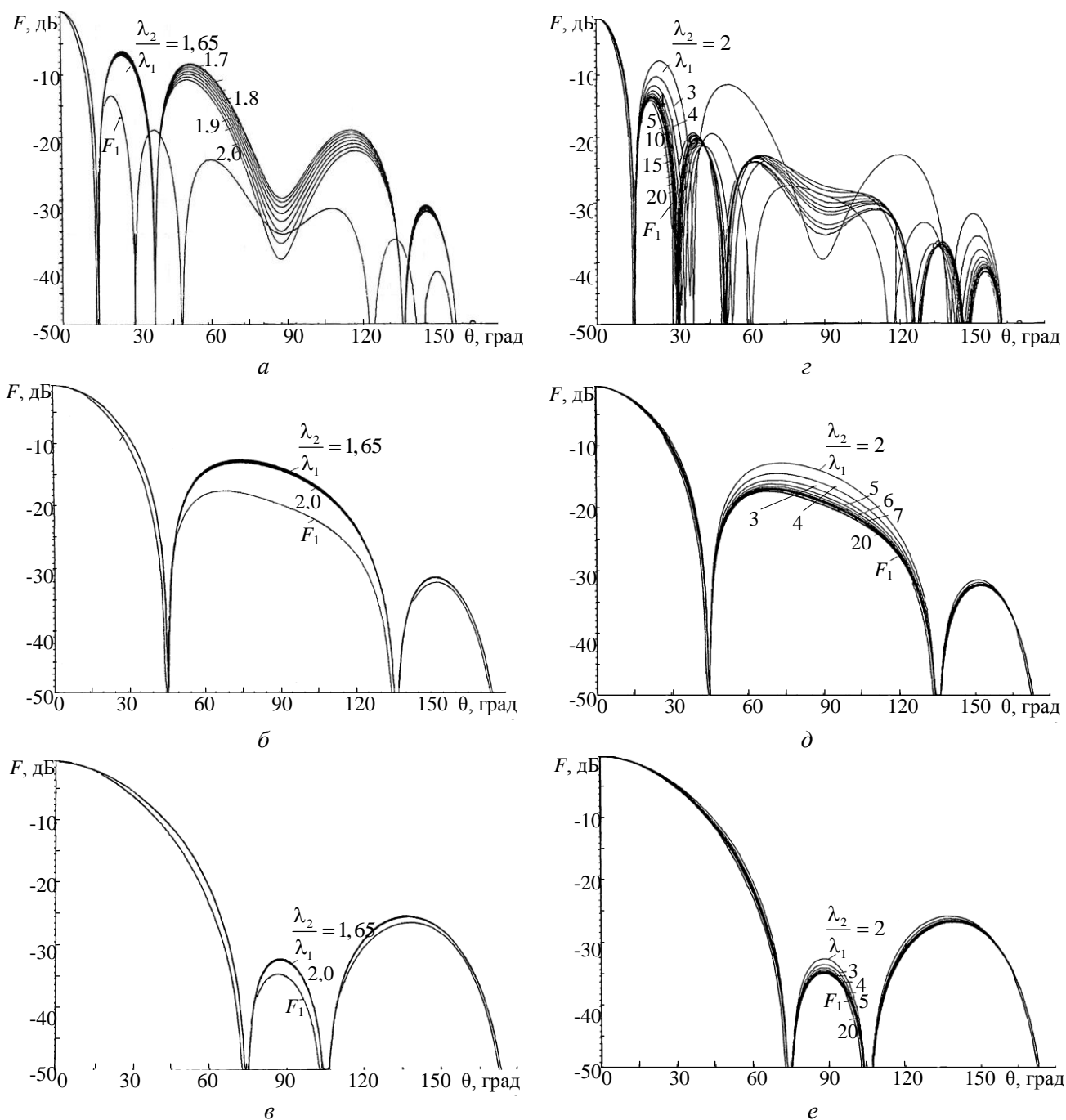


Рис. 3

Зависимости уровней первого и второго боковых лепестков диаграмм направленности многдиапазонных комплексированных пирамидальных рупорных антенн с раскрытием квадратной формы от отношения λ_2/λ_1 представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Видно, что с $\lambda_2/\lambda_1 > 5 - 7$ уровни боковых лепестков изменяются с ростом λ_2/λ_1 мало и монотонно приближаются к уровню соответствующего бокового лепестка эталонной антенны.

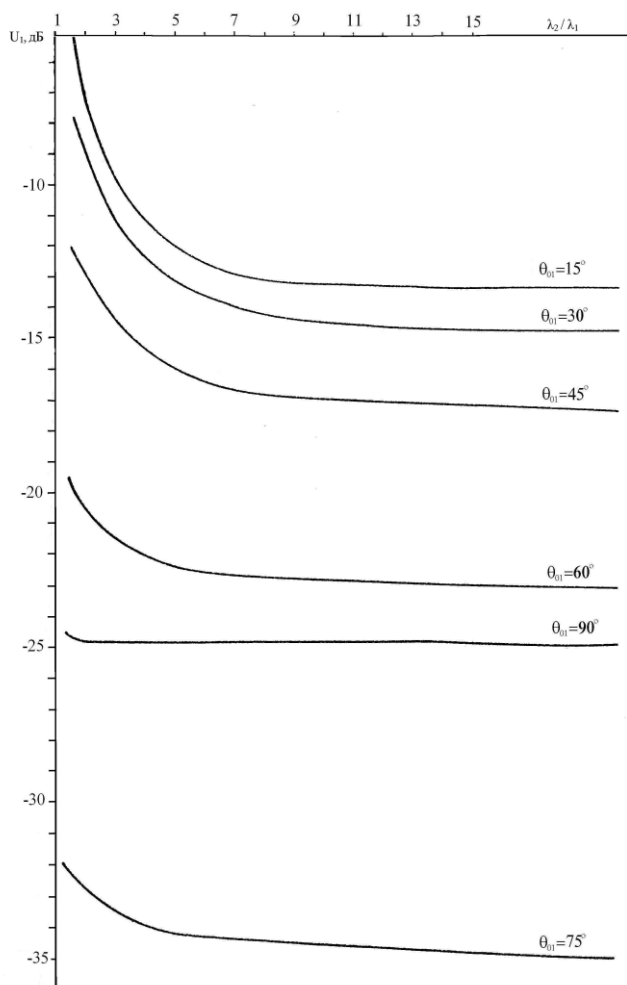


Рис. 4

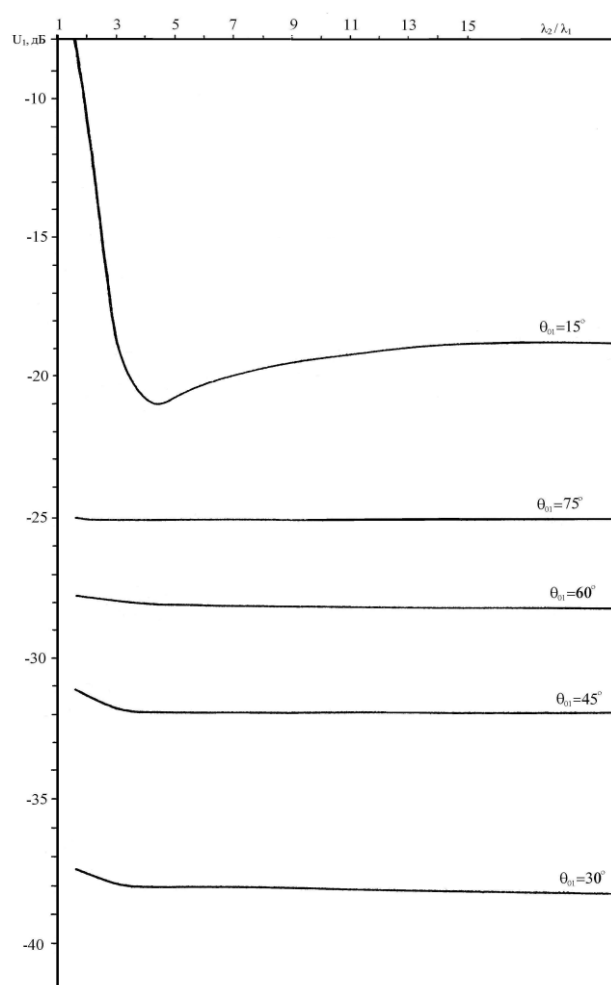


Рис. 5

На рис. 6 приведены ДН пирамидальной и конической рупорных антенн с одинаковой шириной главного лепестка ДН $\theta_{01} = 60^\circ$. Из рисунка видно, что отмеченные выше закономерности изменения направленных характеристик конического рупорного излучателя с круглым раскрывом от ширины главного лепестка ДН и от отношения рабочих длин волн λ_2/λ_1 качественно такие же, как и с квадратным. Однако количественно уровни боковых лепестков излучателей с круглым раскрывом существенно ниже, чем излучателей с квадратным раскрывом. Этот вывод объясняется тем, что форма излучающего раскрыва также оказывает существенное влияние на уровень боковых лепестков ДН, как и амплитудно-фазовые распределения источников поля в излучающем раскрыве антенны. В частности, боковые лепестки ДН антенны с круглым раскрывом меньше, чем с квадратным на 2 – 3 дБ.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что меньший уровень боковых лепестков рупорных антенн с постоянным амплитудно-фазовым распределением источников поля обеспечивается круглым раскрывом при большей ширине главного лепестка ДН. В частности, уровень первого бокового лепестка не превышает значение -15 дБ при ширине ДН $\theta_{01} \geq 45^\circ$, а уровень -20 дБ не превышает при $\theta_{01} \geq 60^\circ$.

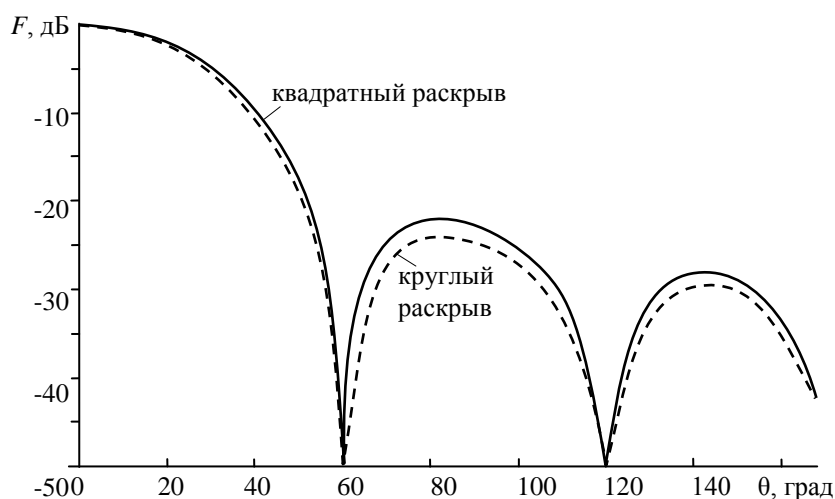


Рис. 6

Выводы

1. Теоретически исследованы возможности создания многофункциональных комплексированных волноводных и пирамидальных рупорных антенн с одинаковой шириной главного лепестка диаграммы направленности по всем частотным каналам, работающих в ортогональном линейно-поляризованном базисе. Доказано, что технически такие антенны могут быть реализованы на вложенных друг в друга соосно поляризационно – изотропных квадратных волноводах и пирамидальных рупорах с раскрытием квадратной формы при независимом возбуждении каждого канала.

2. Показано, что многодиапазонные апертурные антенны с одинаковой шириной главного лепестка диаграммы направленности могут быть реализованы в случае квадратной формы излучающего раскрытия и экранированной излучателем высокочастотного канала его серединой при отношении рабочих длин волн соседних каналов не меньшем 1,6.

3. Исследованы диаграммы направленности коаксиальных раскрытий квадратной формы, обеспечивающих одинаковую ширину главного лепестка диаграммы направленности. Показано, что экранировка излучающего раскрытия приводит к росту боковых лепестков, причем тем большему, чем меньше отношение рабочих длин волн и меньше ширина главного лепестка. При ширине главного лепестка ДН, большей 120° , уровень боковых лепестков не превышает -20 дБ т. е. вполне приемлем для практики. Уровень боковых лепестков коаксиальной антенны с круглым раскрытием ниже на $2 - 3$ дБ.

Список литературы: 1. Горобец Н.Н. К расчету многодиапазонных облучателей в ортогональном линейно-поляризованном базисе // Радиотелескопы и интерферометры: 18-я Всесоюз. радиоастрономическая конф. 14-16 октября 1986 г. : тез. докл. – Иркутск, 1986. – Ч. 2. – С. 199–200. 2. Горобец Н.Н., Горобец В.Н., Елизаренко А.А., Степаненко В.А. Вибраторные антенны с одинаковой шириной главного лепестка диаграммы направленности // Вісник Харк. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. – 2010. – №942. – Вип. 17. – С. 49–54.

Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина
Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта

Поступила в редколлегию 11.02.2013