

Возбуждение поверхностной волной двухэлементной фазированной антенной решетки из прямоугольных волноводов

А. В. Грибовский, С. Л. Просвирнин

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: grib@rian.ira.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2005 г.

Рассчитаны амплитудно-частотные характеристики двумерно периодической волноводной фазированной антенной решетки, период которой содержит два прямоугольных волновода различных поперечных сечений. Решетка возбуждается поверхностной волной планарного диэлектрического волновода на металлической подложке. Показана возможность управлять амплитудно-частотной характеристикой антенны путем изменения длины волноводных каналов и способа размещения центров волноводных ячеек в плоскости апертуры решетки.

Плоские фазированные антенные решетки (ФАР) из волноводов с открытыми концами [1] широко применяются в радиолокации, радиосвязи, радиоастрономии. Они также эффективно используются и в качестве облучателей гибридных зеркальных антенн. Возрастающие требования, предъявляемые к ФАР, заставляют исследователей искать новые пути улучшения их характеристик для создания более простых и менее дорогостоящих конструкций. Целью настоящей работы является исследование характеристик модели двухэлементной ФАР из прямоугольных волноводов, возбуждаемой поверхностной волной.

В работах [2, 3] предложен и исследован новый способ возбуждения одноэлементной ФАР из прямоугольных волноводов поверхностной волной планарного диэлектрического волновода. Исследованы некоторые характеристики антенны в зависимости от геометрических параметров волноводов и способа их размещения, а также расстояния между плоскостью апертуры ФАР и диэлектрическим волноводом.

Для решения многих прикладных задач антенной техники широко применяются плоские частотно-избирательные решетки, обеспечивающие работу антенных систем на нескольких частотах. В работах [4, 5] приведены результаты исследований двухэлементных бипериодических решеток из волноводов прямоугольного сечения. Исследование частотной характеристики двухэлементного экрана из отрезков прямоугольных волноводов показало наличие высокодобротных резонансов полного прохождения и полного отражения электромагнитных волн и возможность их получения на вполне определенных частотах с помощью изменения только геометрических параметров экрана. В одноэлементных решетках такие эффекты отсутствуют. Поэтому целесообразно исследовать характеристики двухэлементной ФАР с возбуждением поверхностной волной.

Модель двухэлементной ФАР состоит из двух объектов. Первый объект представляет собой двухэлементный идеально проводящий плоский экран конечной толщины с периодически расположенными в двух неортогональных направлениях волновод-

ными каналами прямоугольного поперечного сечения. Базовая ячейка экрана изображена на рис. 1. Она содержит два произвольно расположенных прямоугольных волновода. Периоды структуры вдоль осей Ox и Oy равны соответственно d_1 и d_2 . Центры волноводных ячеек в общем случае размещены в узлах косоугольной сетки. Их положение определяется углом χ , который отсчитывается против часовой стрелки от оси Ox до оси, соединяющей начало системы координат с центрами волноводных ячеек. Прямоугольной сетке соответствует значение угла χ , равное 90° . Поперечные сечения волноводов равны $a_n \times b_n$, $n = 1, 2$, где a_n – размер волновода вдоль оси Ox , b_n – размер волновода вдоль оси Oy . Размеры волноводов выбраны такими, что в них может распространяться только основная TE_{10} -волна. Положение волноводов на базовой ячейке в плоскости $z = 0$ определяется координатами центров волноводных каналов x_n, y_n .

Второй объект представляет собой диэлектрическую пластину толщиной a_d на металлической подложке, расположенную в плоскости, параллельной плоскости апертуры ФАР (см. рис. 2). Нижний край пластины находится на расстоянии b_d от плоскости раскрытия решетки, ϵ – величина диэлектрической проницаемости материала пластины, $\mu = 1$ – величина магнитной проницаемости. В приближении заданного поля поверхностной волны, распространяющейся в пластине, требуется найти электромагнитное поле в свободном пространстве в области за экраном.

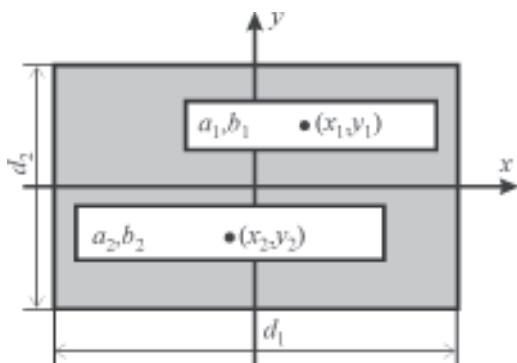


Рис. 1. Базовая ячейка двухэлементного экрана

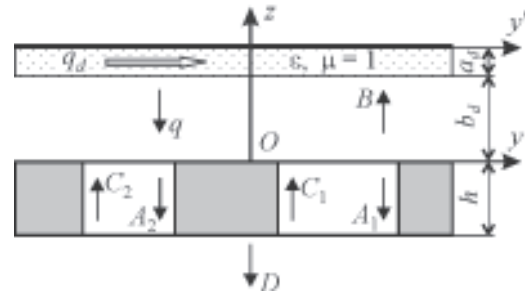


Рис. 2. Сечение базовой ячейки ФАР с пластиной плоскостью $x = 0$

Постановка задачи в приближении заданного поля означает, что электромагнитное поле, рассеянное апертурой решетки, не изменяет параметров поверхностной волны, распространяющейся в диэлектрической пластине.

Как известно [6], в диэлектрическом слое могут распространяться как магнитные (H -тип), так и электрические (E -тип) волны. При одной и той же толщине пластины и длине волны большая часть энергии, переносимая волной H -типа, сосредоточена внутри диэлектрического слоя. Поэтому для возбуждения ФАР выберем волну E -типа, распространяющуюся в пластине вдоль оси Oy' . При этом учтем, что E -волна низшего типа в диэлектрической пластине толщиной a_d на металлической подложке распространяется по тем же законам, что и E -волна в диэлектрической пластине толщиной $2a_d$ без подложки. Электромагнитное поле поверхностной волны, распространяющейся в диэлектрической пластине, имеет только продольную составляющую вектора Герца, поэтому электромагнитное поле поверхностной симметричной E -волны описывается единственной отличной от нуля поперечной компонентой магнитного поля.

Для решения задачи рассеяния поверхностной волны на апертуре двухэлементной ФАР из прямоугольных волноводов воспользуемся операторным методом [7]. Рассмотрим сечение базовой ячейки ФАР с пластиной плоскостью $x = 0$ (см. рис. 2). По-

перечную компоненту электрического поля в области за экраном представим в виде суперпозиции полной системы векторных пространственных TE - и TM -гармоник [5]:

$$\begin{aligned} \bar{E}_t(x, y, z) = & \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} d_{qs}^{(1)} \bar{\Psi}_{qs}^{(1)} e^{-i\Gamma_{qs}z} + \\ & + \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} d_{qs}^{(2)} \bar{\Psi}_{qs}^{(2)} e^{-i\Gamma_{qs}z}, \quad z < -h, \end{aligned} \quad (1)$$

где $d_{qs}^{(1)}$, $d_{qs}^{(2)}$ – неизвестные амплитуды пространственных TE - и TM -гармоник, соответственно; $\bar{\Psi}_{qs}^{(1,2)}$ – полная система векторных функций, ортонормированных на базовой ячейке периодического экрана.

Следуя обозначениям на рис. 2, запишем систему операторных уравнений относительно неизвестных амплитуд волноводных волн и неизвестных амплитуд пространственных гармоник:

$$\begin{aligned} q &= q_d + e_d R e_d B, \\ B &= R_+ q + T_-^{(1)} C_1 + T_-^{(2)} C_2, \\ A_1 &= T_+^{(1)} q + R_-^{(1)} C_1 + P_{21} C_2, \\ A_2 &= T_+^{(2)} q + R_-^{(2)} C_2 + P_{12} C_1, \\ C_1 &= e_1 R_-^{(1)} e_1 A_1 + e_1 P_{21} e_2 A_2, \\ C_2 &= e_2 R_-^{(2)} e_2 A_2 + e_2 P_{12} e_1 A_1, \\ D &= T_-^{(1)} e_1 A_1 + T_-^{(2)} e_2 A_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где q_d – амплитуда поверхностной волны, распространяющейся в диэлектрической пластине; B, q – векторы амплитуд пространственных гармоник, распространяющихся или затухающих в положительном и отрицательном направлениях оси Oz в области между экраном и диэлектрической пластиной; D – вектор амплитуд пространственных гармоник прошедшего поля; $A_{1,2}$, $C_{1,2}$ – амплитуды волноводных волн, распространяющихся или затухающих в положительном и отрицательном направлениях оси Oz ,

в первом и втором волноводах; R – оператор отражения плоских волн от диэлектрической пластины на металлической подложке; R_+ – оператор отражения плоских электромагнитных волн двухэлементной решеткой полубесконечных волноводов со стороны свободного пространства; $T_+^{(1,2)}$ – операторы прохождения плоских волн в первый и второй волноводы решетки полубесконечных волноводов со стороны свободного пространства; $R_-^{(1,2)}$, $T_-^{(1,2)}$ – операторы отражения и прохождения волноводных волн решетки полубесконечных волноводов со стороны первого и второго волноводов, соответственно; P_{12} , P_{21} – операторы преобразования волноводных волн первого волновода в волноводные волны второго волновода и волноводных волн второго волновода в волноводные волны первого; $e_{1,2}$ – операторы, учитывающие изменение фазы электромагнитного поля волноводных волн на длине, равной толщине экрана; e_d – оператор, учитывающий изменение фазы поля пространственных гармоник в области между экраном и диэлектрической пластиной.

Решение системы операторных уравнений (2) относительно неизвестных амплитуд волноводных волн имеет вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= G_6^{-1} \left(T_+^{(1)} (I_1 + P_1 R_+) + G_2 G_5^{-1} T_+^{(2)} (I_1 + P_1 R_+) \right) q_d, \\ A_2 &= G_5^{-1} G_3 A_1 + G_5^{-1} T_+^{(2)} (I_2 + P_1 R_+) q_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} P_1 &= R_d P^{-1}, \quad R_d = e_d R e_d, \quad P = I_1 - R_+ R_d; \\ G_5 &= I_2 - G_4; \quad G_6 = I_2 - G_1 - G_2 G_5^{-1} G_3; \\ G_1 &= T_+^{(1)} P_1 Q_1 + R_-^{(1)} Q_{11} + P_{21} Q_{12}; \\ G_2 &= T_+^{(1)} P_1 Q_2 + R_-^{(1)} Q_{21} + P_{21} Q_{22}; \\ G_3 &= T_+^{(2)} P_1 Q_1 + R_-^{(2)} Q_{12} + P_{12} Q_{11}; \\ G_4 &= T_+^{(2)} P_1 Q_2 + R_-^{(2)} Q_{22} + P_{12} Q_{21}; \\ Q_1 &= T_-^{(1)} Q_{11} + T_-^{(2)} Q_{12}; \quad Q_2 = T_-^{(1)} Q_{21} + T_-^{(2)} Q_{22}; \end{aligned}$$

$$Q_{11} = e_1 R_{11}^{(1)} e_1; \quad Q_{22} = e_2 R_{22}^{(2)} e_2;$$

$$Q_{12} = e_2 P_{12} e_1; \quad Q_{21} = e_1 P_{21} e_2;$$

I_1, I_2 – единичные операторы. Используя выражения (3), можно получить значения амплитуд электромагнитного поля в любой области пространства исследуемой модели без ограничений на ее геометрические параметры.

Были проведены некоторые численные исследования характеристик модели двухэлементной ФАР. Направление распространения поверхностной волны в диэлектрической пластине выбрано вдоль оси Oy' , параллельной оси Oy , а ее амплитуда в плоскости $z = 0$ принята равной единице. Параметры диэлектрической пластины и расстояние от пластины до экрана для всех ниже приведенных данных имели следующие значения: $\epsilon = 3.0$, $a_d = 1.5$ мм, $b_d = 3$ мм. Коэффициент замедления поверхностной волны в диэлектрической пластине находился из дисперсионного уравнения [6]. Кроме того, значения параметров базовой ячейки d_1, d_2 и поперечные размеры волноводных каналов выбраны таким образом, чтобы в свободном пространстве распространялась только одна пространственная гармоника, а в волноводных каналах – только основная волна.

На рис. 3 представлены зависимости модулей амплитуд прохождения TM -волн от частоты для одноэлементной (кривая 1) и двухэлементной (кривая 2) ФАР. Центры базовых ячеек в обеих решетках расположены в узлах прямоугольной сетки. Параметры двухэлементной ФАР имеют значения: $a_1 = 5$ мм; $b_1 = 1$ мм; $x_1 = 0, y_1 = 2$ мм; $a_2 = 4.8$ мм; $b_2 = 1$ мм; $x_2 = 0, y_2 = -2$ мм; $d_1 = d_2 = 6$ мм; $h = 12$ мм. Поперечные размеры волновода одноэлементной ФАР совпадают с поперечными размерами первого волновода двухэлементной ФАР. В данном частотном диапазоне распространяется одна пространственная TM -гармоника в плоскости $\varphi = -90^\circ$, а значение угла ϑ изменяется в пределах $\vartheta = 3.5 \div 40^\circ$.

Углы ϑ и φ определены в сферической системе координат. Как видно из графиков, в двухэлементной ФАР наблюдаются два низкочастотных резонанса электромагнитной волны, прошедшей в область за экран. Причем, первый низкочастотный резонанс наблюдается на частоте ниже критической для обоих волноводных каналов. Эти резонансы были подробно изучены в работе [5]. Было показано, что они связаны либо с противофазным возбуждением колебаний в близко расположенных волноводных каналах различных поперечных сечений, либо наблюдаются в тех случаях, когда по широкой стенке одного из волноводов укладывается больше половины длины волны в свободном пространстве. Детальное изучение спектра электромагнитных волн исследуемой модели ФАР показало, что значительное увеличение модуля амплитуды электромагнитной волны, прошедшей за экран, в этих случаях связано с резонансным преобразованием поверхностной волны планарного диэлектрического волновода в поверхностную волну периодического экрана большой амплитуды, распространяющуюся в том же направлении, что и волна в планарном волноводе. Это явление наблюдалось также в одноэлементной ФАР, однако при других условиях возбуждения.

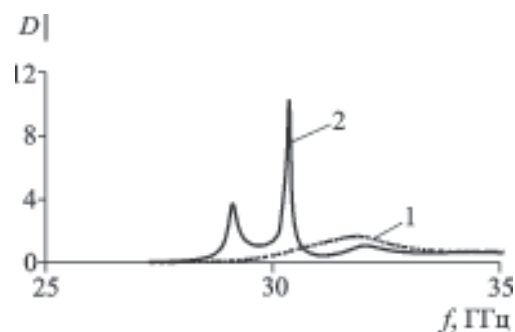


Рис. 3. Частотные зависимости модулей амплитуд электромагнитных волн, прошедших за экран, для одноэлементной (кривая 1) и двухэлементной (кривая 2) ФАР

Как было отмечено выше, частотная характеристика двухэлементного экрана из отрезков прямоугольных волноводов имеет высокочастотные резонансы полного прохождения электромагнитных волн. Получение этих резонансов на вполне определенных частотах с помощью изменения только геометрических параметров экрана, без изменения поперечных размеров волноводных каналов, и использование таких структур в многочастотных антенных системах является перспективным. Поэтому были проведены исследования влияния геометрических параметров ФАР на ее частотную характеристику. На рис. 4 представлены частотные зависимости модулей амплитуд электромагнитных волн, прошедших за экран, для различного способа размещения центров базовых ячеек в плоскости апертуры антенны. Из графиков видно, что резонансы на частотной характеристике ФАР с косоугольной сеткой смещаются в область более высоких частот по сравнению с характеристикой ФАР с прямоугольной сеткой. На рис. 5 представлены аналогичные зависимости для антенны с различной толщиной экранов. Видно, что уменьшение толщины экрана приводит к смещению первого низкочастотного резонанса в область нижних частот, а второго резонанса – в область более высоких частот.

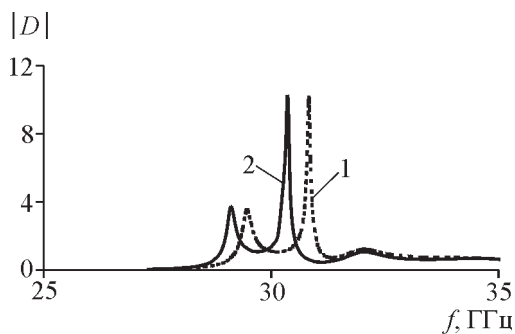


Рис. 4. Частотные зависимости модулей амплитуд электромагнитных волн, прошедших за экран, для различного способа размещения центров базовых ячеек в плоскости апертуры антенны: кривая 1 – $\chi = 70^\circ$, кривая 2 – $\chi = 90^\circ$

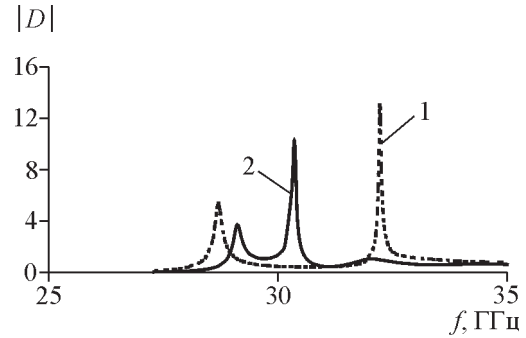


Рис. 5. Частотные зависимости модулей амплитуд электромагнитных волн для антенны с различной толщиной экранов: кривая 1 – $h = 7$ мм, кривая 2 – $h = 12$ мм

Простой и эффективный способ возбуждения ФАР из прямоугольных волноводов с помощью поверхностной волны планарного диэлектрического волновода на металлической подложке избавит от необходимости применения устройств для согласования линии питания с волноводными каналами. Наличие высокочастотных резонансов прохождения электромагнитных волн на частотной характеристике двухэлементного экрана, по сравнению с одноэлементными решетками, и возможность управлять ими, дают основание говорить о перспективности применения ФАР данного типа в различных устройствах, использующихся в радиотехнике и радиоастрономии.

Литература

1. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. – М.: Мир, 1974. – 455 с.
2. Грибовский А. В. Возбуждение поверхностной волной фазированной антенной решетки из прямоугольных волноводов // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, №1. – С. 42-48.
3. Грибовский А. В. Свойства фазированной антенной решетки из прямоугольных волноводов, возбуждаемой поверхностной волной // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, №4. – С. 332-336.
4. Грибовский А. В., Просвирнин С. Л. Возбуждение многоэлементной ФАР из прямоуголь-

ных волноводов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2003. – Т. 6, №1. – С. 27-31.

5. Грибовский А. В., Просвирнин С. Л. Частотно-избирательные свойства многоэлементного экрана с волноводными каналами прямоугольного сечения // Радиофизика и электроника. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 341-346.
6. Взятыйшев В. Ф. Диэлектрические волноводы. – М.: Сов. Радио, 1970. – 216 с.
7. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 240 с.

Збудження поверхневою хвилею двохелементної ФАР з прямокутних хвилеводів

О. В. Грибовський, С. Л. Просвирнін

Розраховано амплітудно-частотні характеристики двовимірної періодичної ФАР, на періоді якої розміщено два прямокутних хвилеводи відмінних поперечних перерізів. Решітка збуджується поверхне-

вою хвилею планарного діелектричного хвилеводу на металевій підкладці. Показана можливість керувати амплітудно-частотною характеристикою антени, міняючи довжину хвилеводних каналів та спосіб розміщення центрів хвилеводних елементів у площині апертури решітки.

Surface Wave Excitation of a Two-Element Phased Array of Rectangular Waveguides

A. V. Gribovsky and S. L. Prosvirnin

Response characteristics of a two-dimensional periodic waveguide phased array whose period consists of two rectangular waveguides of different cross-sections are calculated. The array is excited by the surface wave of a flat waveguide being a singly metal-covered dielectric slab. The control of antenna amplitude-frequency response is shown possible by changing the length of waveguide channels and the position of centers of waveguide cells within the array aperture.