

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕНН ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук МУРАВЬЕВ В. В., канд. техн. наук, доц. ТАМЕЛО А. А.,
студенты ЛЕБЕДЕВ В. М., СТЕПУК А. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Появление высокоскоростных телекоммуникационных систем мобильной и персональной связи с сотами большого радиуса и высокой пропускной способностью требует создания базовых станций с многолучевыми антеннами. Многолучевые антенны представляют собой устройства, способные формировать в пространстве несколько диаграмм направленности, каждой из которых соответствует определенный входной канал антенны. Такие антенны имеют большие функциональные возможности и позволяют осуществлять параллельный обзор пространства в широком секторе углов с высокой степенью разрешения, одновременное сканирование несколькими независимыми лучами. Применение данных антенн в спутниковых системах значительно увеличивает зону покрытия. Использование узких лучей на базовой станции позволяет разделить терминалы по пространству и в разных лучах повторять выделенную полосу частот, что повышает число каналов связи.

В режиме приема многолучевые антенны дают возможность работать с 2–3 спутниками одновременно. Для систем тропосферной связи применение многолучевых систем позволяет создать малогабаритные мобильные системы с разнесением лучей по углу места для эффективной борьбы с замираниями сигнала и получить более высокие скорости передачи информации. Применение многолучевых антенн открывает возможность перевода сотовых и тропосферных систем в диапазон 10–20 ГГц, где появляется возможность выделения более широких полос частот и снижаются габариты и вес антенн.

В статье рассматривается моделирование четырехлучевой антенной системы сантиметрового диапазона на основе зеркальной антенны (центральная частота рабочего диапазона – 10 ГГц).

Выбор облучателей. Совершенно очевидно, что облучатель зеркальной антенны является весьма ответственным узлом антенной системы. Желательно, чтобы диаграмма направленности облучателя была однонаправленной, имела осевую симметрию и минимальный уровень боковых лепестков. Облучателями обычно являются вибраторные, щелевые, рупорные антенны. Выберем в качестве облучателя пирамидальный рупор (рис. 1). К достоинствам рупорных облучателей можно отнести простоту конструкции и хорошие диапазонные свойства. Параметры диаграммы направленности (рис. 2) выбранного облучателя следующие:

- ширина главного лепестка ДН:
в плоскости E : $2\theta_{0,5} = 0,40 \text{ рад} = 23^\circ$;
в плоскости H : $2\theta_{0,5} = 0,55 \text{ рад} = 31^\circ$;
- коэффициент направленного действия и коэффициент усиления по мощности: $K_{нд} = 15,0 \text{ дБ}$; $K_p = 13,5 \text{ дБ}$.

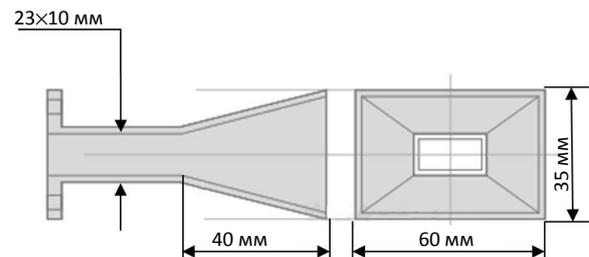


Рис. 1. Пирамидальный рупорный облучатель

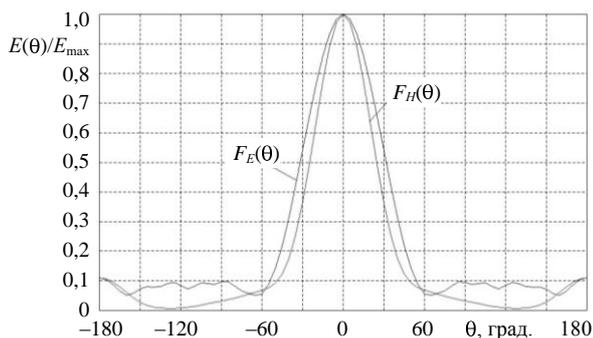


Рис. 2. Диаграмма направленности рупорной антенны в E и H плоскостях

Четырехлучевое излучение можно обеспечить, используя облучатель в виде решетки из четырех пирамидальных рупоров. В ходе исследований было установлено, что требуемый вид диаграммы направленности решетки возможно получить при использовании фазовращателей в фидерном тракте.

В качестве фазовращателей в диапазоне СВЧ широкое применение нашли полупроводниковые (pin-диодные) и ферритовые фазовращатели. Типовые характеристики полупроводниковых фазовращателей приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Характеристики фазовращателя

Рабочая частота, Гц	1010
Процент изменения фазы, %	±4
Число разрядов	2
Рабочая мощность, Вт	10
Потери, дБ	1,1
Быстродействие, с	10–6
Мощность управления, Вт	0,1
Количество pin-диодов	3,0

Результаты компьютерного моделирования показали (рис. 3), что такая конструкция действительно обеспечивает четырехлучевое излучение. Решетка облучателей дает следующие значения коэффициента направленного действия и коэффициента усиления по мощности: $K_{нд} = 17,8$ дБ; $K_p = 16,0$ дБ.

Решетка с каскадным расположением облучателей. Альтернативой решетке, в которой все элементы расположены в одной плоскости, может являться так называемая каскадная или террасная конструкция (рис. 4), которая подробно рассмотрена в [2]. По сути, это антенная решетка с пространственным расположением

элементов, которые смещены в пространстве относительно друг друга вдоль оси излучения. Результатом этого смещения являются разные фазы поля различных элементов в точке наблюдения. Подобный подход позволяет, например, избежать использования фазовращателей.

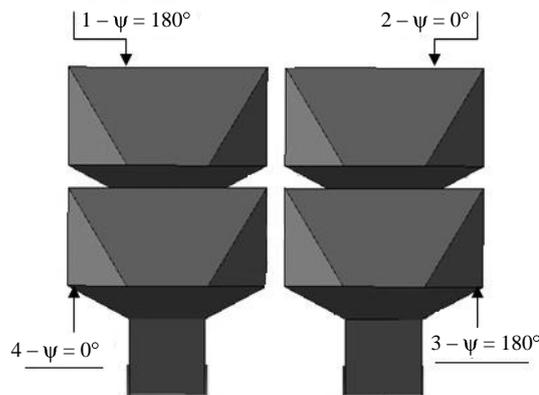


Рис. 3. Решетка облучателей и относительный сдвиг начальных фаз возбуждения

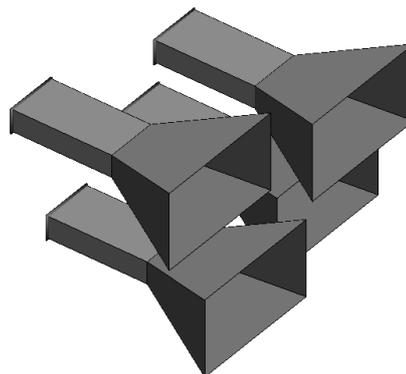


Рис. 4. Каскадная схема решетки облучателей

Также в [2] отмечается, что существует некое оптимальное значение сдвига, при котором значение КНД решетки достигает максимального значения. Террасное расположение элементов позволяет снизить отрицательный эффект от взаимного влияния друг на друга излучения соседних элементов. В результате при многолучевом излучении достигается гораздо меньшее, чем при использовании плоской решетки, различие КНД отдельных лучей.

Однозеркальная антенна. В зеркальных антеннах в качестве формы зеркала часто используют полный парабоид вращения. Мы же рассмотрим вариант антенны с зеркалом в виде симметричной вырезки из такого пара-

болоида (рис. 5). Параметры прямоугольной вырезки выбраны исходя из особенностей тропосферного распространения радиоволн: $L_x = 1,03$ м; $L_y = 1,75$ м. Также использование подобной формы зеркала помогает снизить уровень мощности, возвращаемой в фидерный тракт, из-за того, что облучатель находится в фокусе зеркала.

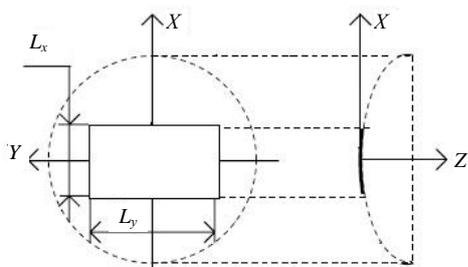


Рис. 5. Симметричная вырезка из параболоида вращения

Для обеспечения более выраженного многолучевого характера излучения необходимо сместить решетку облучателей вдоль фокальной оси на 10–20 см, тем самым увеличив фазовую ошибку. На рис. 6 изображена однозеркальная антенна с симметричной вырезкой из параболоида вращения и решеткой облучателей, где сдвиг фазы, с которой возбуждаются излучатели, задается фазовращателем. Решетка расположена на расстоянии 0,9 м от параболоида. На рис. 7 показана трехмерная диаграмма направленности, полученная по результатам компьютерного расчета модели. Видно, что излучение антенны имеет четыре главных луча. Лучи отклонены на 5° по углу θ .

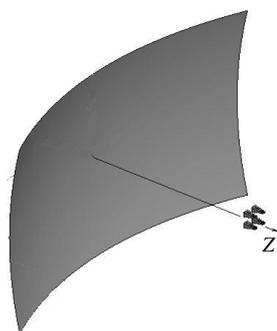


Рис. 6. Однозеркальная антенна с решеткой облучателей

В случае использования решетки с террасным расположением излучателей диаграмма имеет тот же вид, однако при этом, как и предполагалось, обеспечиваются лучшие энергетические параметры:

- коэффициент направленного действия и коэффициент усиления по мощности соответственно равны: $K_{нд} = 26,0$ дБ; $K_p = 23,5$ дБ;
- при использовании решетки с террасным расположением облучателей коэффициент направленного действия и коэффициент усиления по мощности равны: $K_{нд} = 28,5$ дБ; $K_p = 25,7$ дБ.

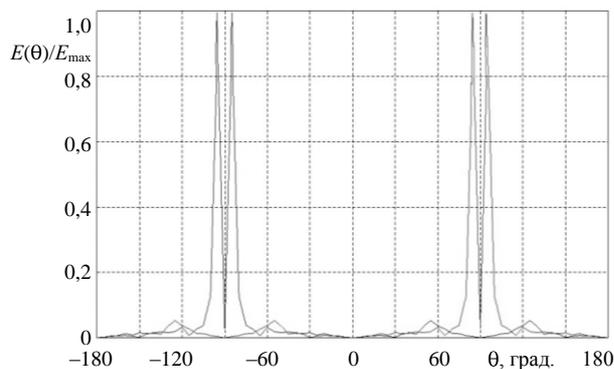


Рис. 7. Диаграмма направленности однозеркальной антенны

Здесь стоит отметить существенный недостаток однозеркальных антенн. Он заключается в том, что к облучателю необходимо подводить возбуждающую линию большой волновой и физической длины. Эта линия находится в поле волны, отраженной от зеркала, затеняет часть раскрытия, на ней происходит рассеяние поля, что ведет к росту боковых лепестков диаграммы направленности. Кроме того, в зеркальных антеннах с механическим сканированием перемещение облучателя относительно фокуса требует перемещения и линии передач, что ведет к усложнению конструкции антенны. Этот недостаток отсутствует в двухзеркальной конструкции.

Расчет и моделирование двухзеркальной антенны типа Кассегрена. Двухзеркальная антенна состоит из трех основных элементов: главного зеркала (рефлектора), вспомогательного зеркала (контррефлектора) и облучателя. Контррефлектор часто представляет собой гиперболоид вращения. В данной статье рассмотрим антенну, построенную по схеме Кассегрена. В роли рефлектора выступает рассмотренная ранее симметричная вырезка из параболоида вращения. Антенна (рис. 8) имеет следующие размеры:

- размеры рефлектора: $L_x = 1,03$ м; $L_y = 1,75$ м;
- диаметр малого зеркала: $D_m = 0,5$ м.

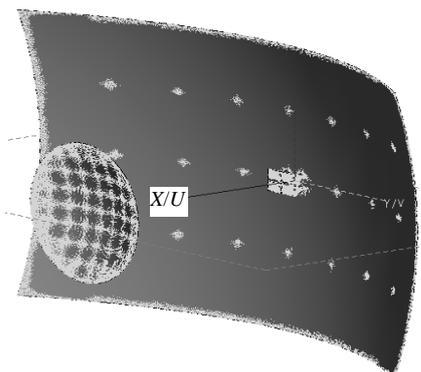


Рис. 8. Двухзеркальная антенна типа Кассегрена

Моделирование показало, что антенна также обеспечивает четырехлучевое излучение (рис. 9) с параметрами: коэффициент направленного действия и коэффициент усиления по мощности: $K_{нд} = 18$ дБ; $K_p = 16$ дБ.

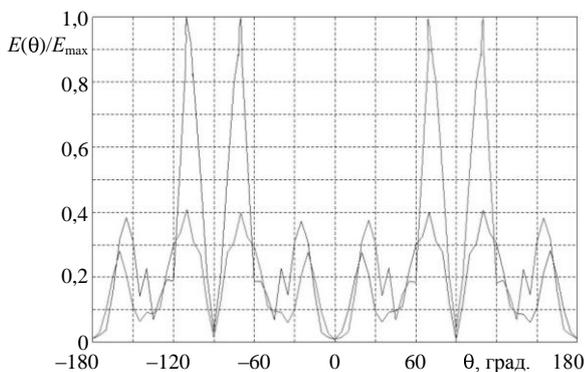


Рис. 9. Диаграмма направленности двухзеркальной антенны

Видно, что по сравнению с однозеркальной конструкцией двухзеркальная обеспечивает меньшие $K_{нд}$ и K_p . Это можно объяснить влиянием на излучение антенны зеркала-контррефлектора. Малое зеркало затеняет значительно большую область перед апертурой главного зеркала, чем облучатель в однозеркальной антенне, что является причиной снижения уровня главного максимума. В свою очередь, отражения от края контррефлектора и затекание токов за малое зеркало способствуют повышению уровня боковых лепестков диаграммы направленности.

Расширение рабочего диапазона частот.

Рабочий диапазон частот зеркальной антенны определяется рабочим диапазоном ее облучателя. Так, пирамидальные рупорные антенны позволяют вести работу обычно в диапазоне шириной в несколько единиц гигагерц (напри-

мер, рассмотренная ранее конструкция обеспечивает одномодовый режим для частот 8–12 ГГц). При необходимости работы в диапазоне шириной 10–20 ГГц возможно применение широкополосных рупоров специальной конструкции, так называемых гребневых рупоров или рупоров на основе Н-образного волновода (рис. 10).

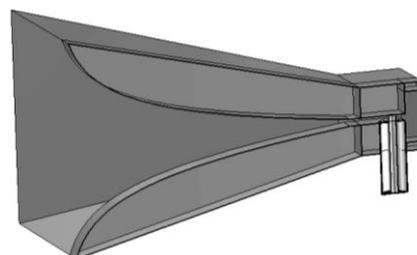


Рис. 10. Конструкция рупора на основе Н-образного волновода (в разрезе)

Н-образный волновод сам по себе способен работать в более широком диапазоне частот по сравнению с аналогичным прямоугольным волноводом. Применение коаксиально-волноводного перехода для питания антенны позволяет еще больше расширить рабочий диапазон, так как переход предотвращает возбуждение первого высшего типа колебаний, следующего за основным.

В рупорной части антенны ребра волновода продлеваются в раскрыв, причем их высота постепенно уменьшается (обычно по экспоненциальному закону). В связи с тем, что электромагнитное поле в такой конструкции имеет максимальную концентрацию в зазоре между ребрами, то ее использование обеспечивает плавную трансформацию волнового сопротивления фидерной линии в сопротивление свободного пространства. Становится возможным согласование антенны в значительно более широком, чем для обычных рупорных антенн, диапазоне частот.

Моделирование и электродинамический анализ излучающей конструкции, представленной на рис. 10 (имеющей волновые размеры, сравнимые с волновыми размерами рассмотренных ранее пирамидальных рупоров), показали, что удовлетворительные рабочие параметры антенна обеспечивает в диапазоне 4,5–19,0 ГГц. На рис. 11 приведена трехмерная диаграмма направленности рупора на частоте

10 ГГц. На этой частоте антенна имеет коэффициент направленного действия, равный 14,5 дБ.

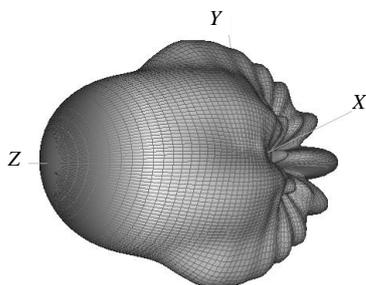


Рис. 11. Диаграмма направленности H-образного рупора

При использовании решетки, состоящей из таких рупоров, в качестве облучателя однозеркальной антенны, рассмотренной ранее, вид диаграммы направленности сохраняется (рис. 12, 13), однако уровень боковых лепестков уменьшается до -32 дБ.

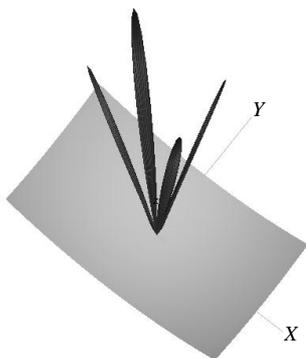


Рис. 12. Диаграмма направленности (трехмерный вид) однозеркальной антенны при облучении решеткой H-образных рупоров

Значительное улучшение направленности можно объяснить выбором облучателя. В силу лучшего согласования, а также особенностей фазового распределения на раскрытие, гребневые рупоры по сравнению с простыми рупорами имеют более узкую диаграмму направленности главного лепестка и меньший уровень боковых лепестков.

Диаграмма направленности двухзеркальной антенны при облучении рупорами H-образного сечения также не претерпевает заметных каче-

ственных изменений. Однако, что существенно, в обоих случаях расширяется рабочий диапазон, в котором можно осуществлять работу данной антенной системы.

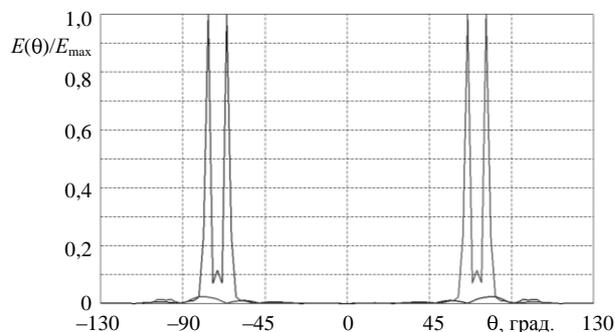


Рис. 13. Диаграмма направленности однозеркальной антенны при облучении решеткой H-образных рупоров

ВЫВОДЫ

На основании моделирования многолучевых антенн установлено, что в однозеркальной антенне с террасным расположением четырех облучателей можно достичь коэффициента направленного действия, равного 28,5 дБ.

Применяя облучатели на основе H-образного волновода, можно в 3–3,5 раза расширить рабочий диапазон частот антенны и уменьшить уровень боковых лепестков до -32 дБ.

Исследованиями также установлено, что использование двухзеркальной антенны в качестве многолучевой приводит к уменьшению коэффициента направленного действия и увеличению уровня боковых лепестков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Устройства СВЧ и антенны** / Д. И. Воскресенский [и др.]. – М.: Радиотехника, 2006 – 378 с.
2. **Majorova, E. K.** A multielement array in the radio telescope focus / E. K. Majorova, V. B. Khaikin // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 2000. – № 50. – С. 91–103.

Поступила 06.06.2012