

УДК 621.396.67

## **ОБЛУЧАТЕЛЬ С ДВУМЯ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ КРУГОВЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ**

**Д. А. Дёмин, Н. П. Чубинский**

**Московский физико-технический институт (государственный университет)**

Статья получена 3 июня 2014 г.

**Аннотация.** Промоделирован и экспериментально исследован облучатель круговой поляризации, предназначенный для работы с прямофокусным параболическим рефлектором. Особенностью облучателя является использование одномодового волновода со ступенчатой перегородкой в качестве комбинированного поляризатора и поляризационного селектора. Это позволило создать конструктивно простой, но в то же время компактный облучатель. Достигнута высокая развязка между входным и выходным портами (менее  $-25$  дБ).

**Ключевые слова:** облучатель, поляризационный селектор, поляризатор-перегородка.

**Abstract.** In this article, a circular polarized feed antenna for a prime focus parabolic reflector is numerically modeled and experimentally investigated. A remarkable feed antenna feature is a stepped septum inside single-mode waveguide used as combined orthomode transducer and polarizer. The septum polarizer enabled us to make a simple yet compact feed antenna. High isolation between input and output ports is achieved (less than  $-25$  dB).

**Keywords:** feed antenna, orthomode transducer, septum polarizer.

### **Введение**

Существует большое число конструкций облучающих устройств зеркальных антенн, удовлетворяющих различным требованиям. Их описания приводятся в классических монографиях по технике антенн [1-4]. Следуя [2], их можно разделить на следующие основные классы: апертурные антенны (щелевые,

волноводные, рупорные и др.), линейные (диполь, турникетная антенна и др.), антенны бегущей волны (спиральные, диэлектрические стержневые и др.) и различные комбинированные антенны.

Печатные антенны (такие как патч-антенны) имеют малые габариты, весьма конструктивны и технологичны. Однако предельная подводимая мощность к таким антеннам обычно ограничена десятками ватт [2], что не позволяет использовать их с мощными усилителями (выходная мощность 50...200 Вт).

Щелевые и дипольные антенны требуют использования фазосдвигающих цепей для возбуждения ортогональных компонент поля, которые в нашем случае должны быть различными в цепях приёма и передачи. Кроме того, они включают балансные и фильтрующие цепи, ограничивающие развязку между приёмным и передающим трактами. Эти элементы вносят дополнительные потери. Развязка между каналами оказывается частотно зависимой. Кроме того, существуют некоторые сложности в реализации диаграммы направленности (ДН) заданной ширины дипольных и щелевых антенн.

Спиральные антенны имеют круговую поляризацию, однако для дуплексной связи необходимо иметь две спирали с разным направлением намотки. Альтернативный вариант – квадрифилярная антенна [2, 5], поляризацией которой можно управлять с помощью изменения сдвига фазы точек запитки. Такая антенна позволяет получить близкий к единице коэффициент эллиптичности в во всем телесном угле, ограниченном рефлектором. Серьезный недостаток квадрифилярных антенн – малая ширина полосы (единицы процентов). Кроме того, требуются внешние фазосдвигающие цепи питания и поляризационные селекторы, которые не могут быть выполнены в виде печатных микрополосковых элементов для мощностей 50...200 Вт.

Более удобны апертурные облучатели, форма ДН которых (в том числе, и в ортогональных плоскостях) легко регулируется с помощью изменения их выходной апертуры. К этому классу относятся как волноводные антенны, так и рупоры, в том числе и гофрированные. Последние были бы наиболее предпочтительны для использования в облучателе, однако они сложны с

технологической точки зрения. Наиболее простым, но при этом обеспечивающим аксиально-симметричную ДН (правда, в более узкой частотной полосе) является рупор Поттера [2]. Он и был взят за основу облучателя.

Для получения разности фаз  $90^\circ$  между ортогональными компонентами поля используют различные типы поляризаторов. Решетка малоэффективна внутри одномодового волновода, и ее выносят в плоскость выходной апертуры волноводно-рупорного облучателя. Такой поляризатор увеличивает и без того немалую длину облучателя. При этом его поперечные размеры заметно возрастают, а дисперсионные зависимости фазового сдвига уменьшаются. Открытым также остается и вопрос развязки ортогональных мод в такой антенне.

Гораздо более удобен поляризатор в виде асимметричной диэлектрической или металлической перегородки («septum polarizer») внутри одномодового волновода. В данной работе используется 5-ступенчатая металлическая перегородка, конструкция которой описана в [6-9]. Волноводная конструкция поляризатора отлично подходит для питания излучающего рупора. Кроме того, перегородка является еще и поляризационным селектором, что положительно сказывается на габаритах устройства.

Непосредственное масштабирование предложенной в [6] конструкции дало бы ширину полосы лишь 1...2%. Одной из задач было расширение ее до 10...15%, поэтому потребовалась дополнительная оптимизация конструкции облучателя.

Численное моделирование и оптимизация параметров АС выполнялась в два этапа: сначала были подобраны параметры поляризационного селектора и облучателя, а финальное моделирование всей АС было выполнено с использованием метода физической оптики на примере параболического осесимметричного рефлектора диаметром  $D = 3,7 \text{ м}$  с относительным фокусным расстоянием  $F/D = 0,4$ .

## Принцип действия ступенчатой поляризующей перегородки

Принцип действия волноводного поляризатора с металлической перегородкой (Рис. 1) описан в работах [6-9]. Поляризатор состоит из полукруглых волноводов 1 и 2, перегородки 3 и круглой секции 4. Возбуждение фундаментальной линейной моды в полукруглых секциях осуществляется с помощью конических штырей А или В. Асимметрия перегородки приводит к тому, что эти линейно поляризованные моды конвертируются в циркулярно поляризованные фундаментальные моды круглой секции 4 непосредственно, без необходимости во внешних балансных и согласующих устройствах.

Рассмотрим, к примеру, формирование круговой поляризации в секции 4 при подведении мощности только к порту А. Поле, соответствующее этому возбуждению, можно представить в виде суммы решений двух задач:

1. порты А и В возбуждаются половинной мощностью противофазно
2. порты А и В возбуждаются половинной мощностью синфазно

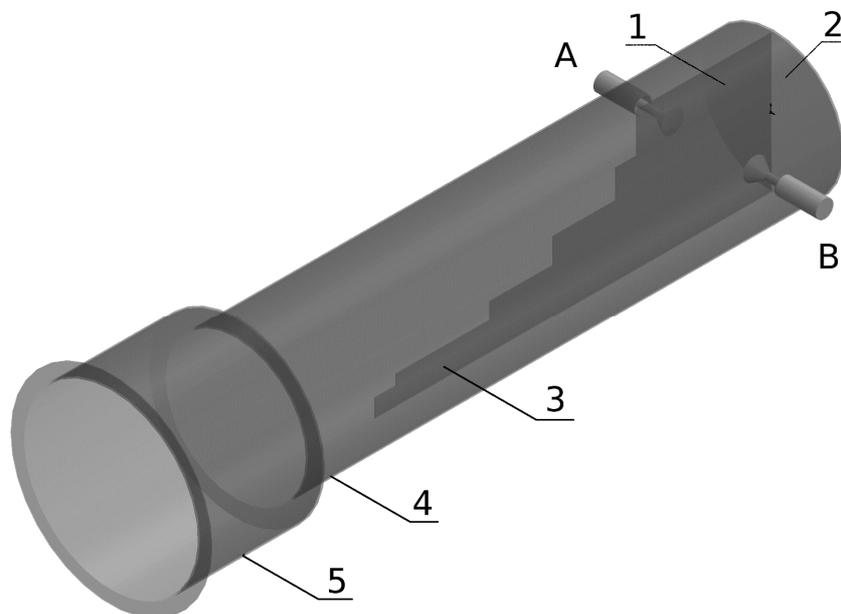


Рис. 1. Конструкция облучательной системы S-диапазона с круговой поляризацией: 1, 2 – полукруглые секции волновода, 3 – область поляризатора, 4 – круглый волновод, 5 – облучатель, А и В – коаксиальные порты.

Электрическое поле при первом способе возбуждения направлено перпендикулярно перегородке (Рис. 2а) и при условии малости толщины

последней фазовая скорость  $v_{\phi\perp}$  этого возбуждения постоянна и не зависит от формы перегородки.

Иная картина наблюдается при синфазном возбуждении портов *A* и *B* (Рис. 2б). Структура поля при таком возбуждении существенно зависит от высот  $h_i$  секций поляризатора. Фазовая скорость  $v_{\phi\parallel i} = v_{\phi\parallel}(h_i)$  таких мод меньше  $v_{\phi\perp}$ . Подбор высот  $h_i$  и длин секций  $l_i$  поляризующей перегородки позволяет получить фазовый сдвиг  $\Delta\phi = 2\pi \sum l_i (1/v_{\phi\parallel i} - 1/v_{\phi\perp}) = 90^\circ$  между линейными модами  $TE_{11\parallel}$  и  $TE_{11\perp}$  круглой секции 4.

При возбуждении только порта *A* (сумма решений задач синфазного и противофазного возбуждений) в круглой секции 4 генерируется циркулярно поляризованная фундаментальная мода. Кроме того, при этом происходит компенсация поля в полукруглой секции 2, что определяет высокий коэффициент развязки по входам  $S_{12}$ .

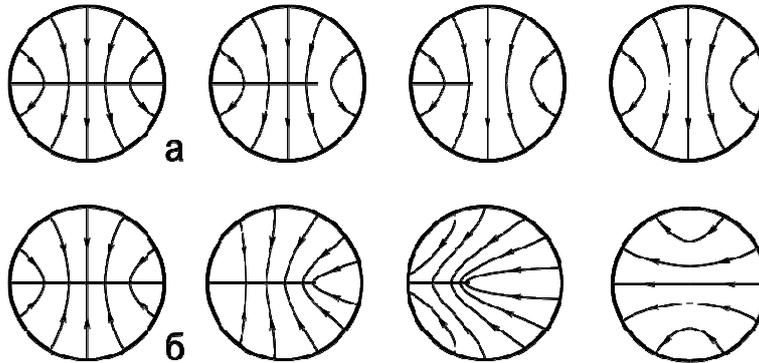


Рис. 2. Схема возбуждения ортогональных мод в круглом волноводе: (а) – противофазное возбуждение портов *A* и *B*, мода  $TE_{11\perp}$ , (б) – синфазное возбуждение портов, мода  $TE_{11\parallel}$

Использование ступенчатой перегородки вместо наклонной, предложенной [7], позволяет расширить рабочую полосу частот [8, 9].

Несомненным преимуществом этого поляризатора является простота: левая и правая поляризации круглой секции 4 получаются с помощью возбуждения разных каналов антенны непосредственно без необходимости в дополнительных внешних цепях. Отличительной особенностью

рассматриваемого поляризатора является высокая развязка между входными портами и близкая к 1 эллиптичность сигнала. Немаловажно и то, что рассматриваемое устройство получается компактным, так как фактически объединяет в себе функции поляризатора и селектора.

### Излучающая секция

Излучающая секция 5 (Рис. 1) формирует ДН с заданной шириной. Возможны различные конструкции: от наиболее простого открытого конца волновода до гофрированных волноводов сложной формы. Простым, но в то же время обеспечивающим аксиальную симметрию ДН является рупор Поттера. Однако использованный в работе рефлектор с фокусным расстоянием  $F/D = 0,4$  накладывает ограничение на ширину ДН облучательной секции ( $2\theta = 130^\circ$  по уровню  $-10\dots-12$  дБ), в то время как рупор Поттера дает существенно более узкую ДН ( $2\theta \approx 40\dots50^\circ$ ). В итоге было принято ограничиться излучающей секцией в виде одномодового волновода со ступенчатым переходом.

### Расчёт параметров облучателя

Расчетные размеры облучателя приведены на Рис. 3. Диаметр основного волновода поляризатора  $D_1 = 0,76\lambda_0$  соответствует одной из незатухающих мод  $TE_{11}$  ( $f_0 = 2,2$  ГГц – средняя частота диапазона). Диаметр выходной секции соответствует распространяющейся моде  $TE_{11}$  и затухающей  $TM_{11}$ . Возбуждение колебаний осуществляется с помощью конусообразных штырей со скругленными кромками (порты  $A$  и  $B$ ), соединенных с разъемами  $N$  типа. Использование конических штырей позволяет расширить рабочий диапазон частот и электрическую прочность промежутка между вершиной штыря и перегородкой, так как длина конического штыря на 20-30% меньше резонансной длины цилиндрического штыря.

На первом шаге определены геометрические параметры поляризатора (высоты и длины секций перегородки) с применением генетического алгоритма. В качестве критерия оптимизации была использована линейная комбинация

коэффициента эллиптичности волны в круглой секции 4 и коэффициента стоячей волны. Полученные в результате оптимизации размеры приведены в таблице на Рис. 3.

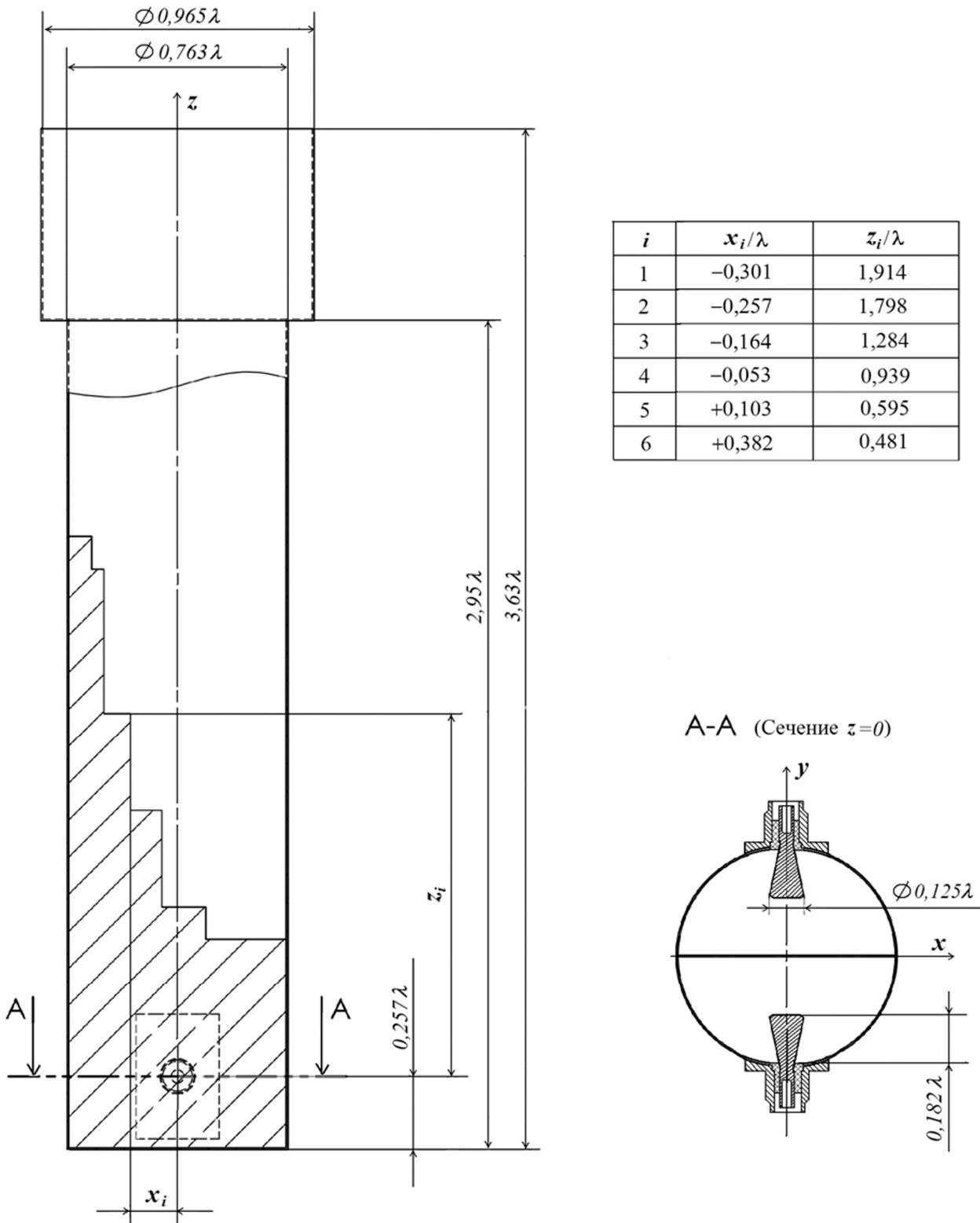


Рис. 3. Геометрические параметры облучателя

На втором шаге был определён диаметр излучающей секции 5 (Рис. 1)  $D_2 = 130$  мм для обеспечения необходимой ширины ДН ( $\approx 130^\circ$  для рефлектора с относительным фокусным расстоянием  $F / D = 0,4$ ).

На следующем шаге проведена дополнительная оптимизация развязки между портами  $S_{12}$  с помощью варьирования длины основной секции волновода 4  $L_1$  и излучающей секции 5  $L_2$ . На Рис. 4 представлена зависимость  $S_{12}(\lambda_0)$  от длины волноводной секции. Эта зависимость, однако, относится к случаю узкополосного согласования. После минимизации развязки в требуемой полосе частот были определены параметры волновода:  $L_1 = 400$  мм,  $L_2 = 93$  мм.

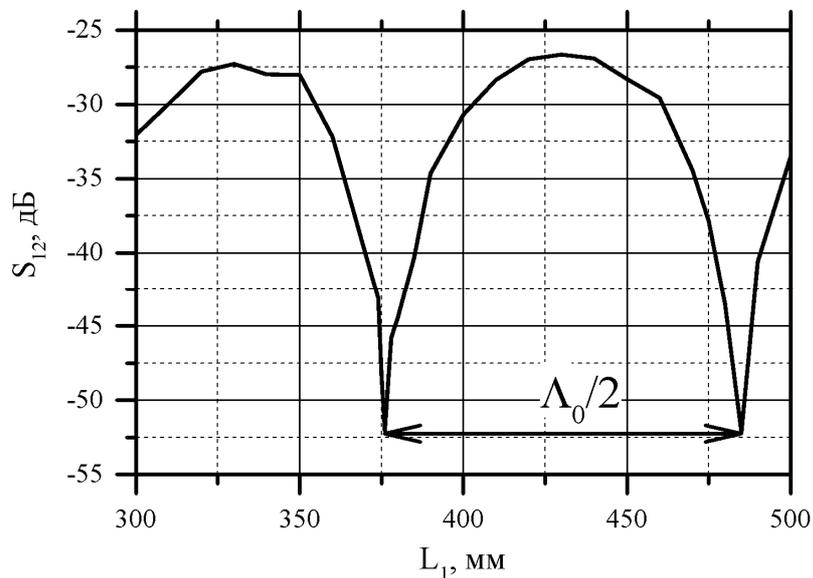


Рис. 4. Зависимость развязки между входным и выходным портами от длины волноводной секции 4 на частоте  $f_0 = 2,2$  ГГц ( $\Lambda_0$  – длина волны в волноводе).

На заключительном этапе были подобраны параметры возбуждающих конусообразных штырей и определены окончательные частотные зависимости входных параметров антенны  $S_{11}$  и  $S_{12}$  и ДН облучателя (рис. 5, 6, 7).

### Экспериментальное исследование облучателя

Облучатель изготовлен из листовой меди толщиной 0,8 мм с помощью пайки мягким припоем на оправке, его размеры приведены на Рис. 3 (геометрию перегородки см. на таблице Рис. 3). Контроль и настройка входных параметров осуществлялась с помощью векторного анализатора цепей MS6444А и

заклучалась в подборе расстояния от конусообразных штырей до задней стенки облучателя и их длины. Изменение длины штырей сильно влияет на входной импеданс антенны. Настройка была осуществлена таким образом, чтобы  $S_{11}$  был по возможности наименьшим на частотных каналах приема и передачи (2,10...2,11 ГГц и 2,28...2,29 ГГц, Рис. 5).

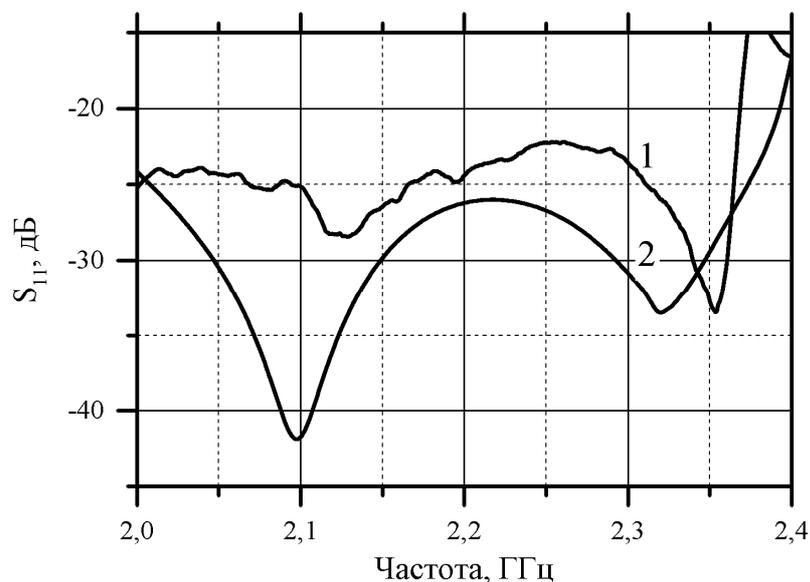


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от частоты (1 – измеренные, 2 – расчетные данные)

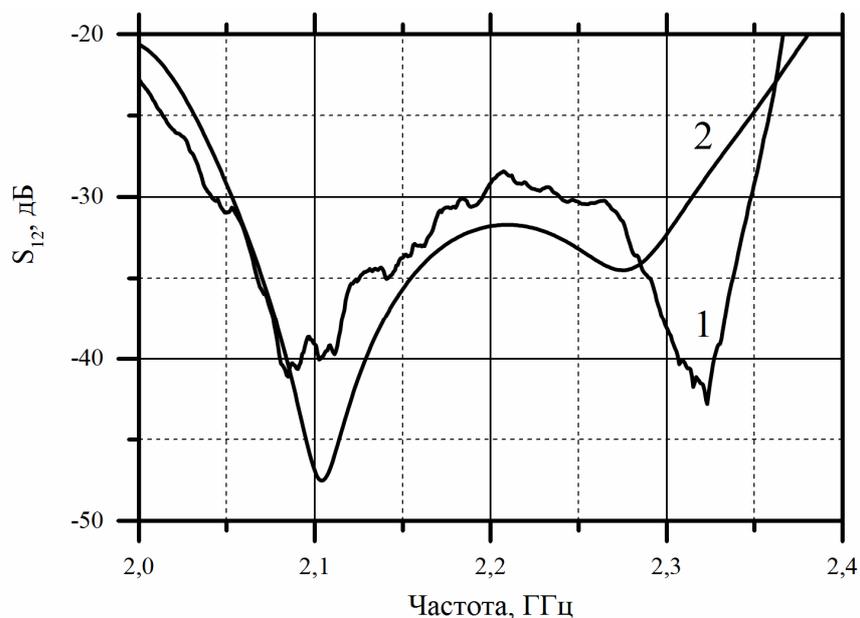


Рис. 6. Развязка между портами облучателя. 1 – измеренные, 2 – расчетные данные.

Развязка между каналами  $S_{12}$  практически нечувствительна как к положению штырей относительно задней стенки волновода, так и к их длине. На нее в большой мере влияют как параметры самого поляризатора (высота и длина секций, их количество, см. Рис. 6), так и отражение от выходной секции облучателя (Рис. 4).

Дополнительно улучшить развязку  $S_{12}$  можно, размещая на оси антенны небольшой металлический диск в выходной секции облучателя. Сообщалось [10], что при надлежащем подборе его диаметра и положения можно добиться полной изоляции каналов на заданной частоте. Подстройка с помощью этой методики позволила улучшить развязку между каналами.

Измерения диаграммы направленности облучателя производились в безэховой камере с помощью эталонной дипольной антенны и векторного анализатора цепей. Результаты измерений и расчетов приведены на Рис. 7.

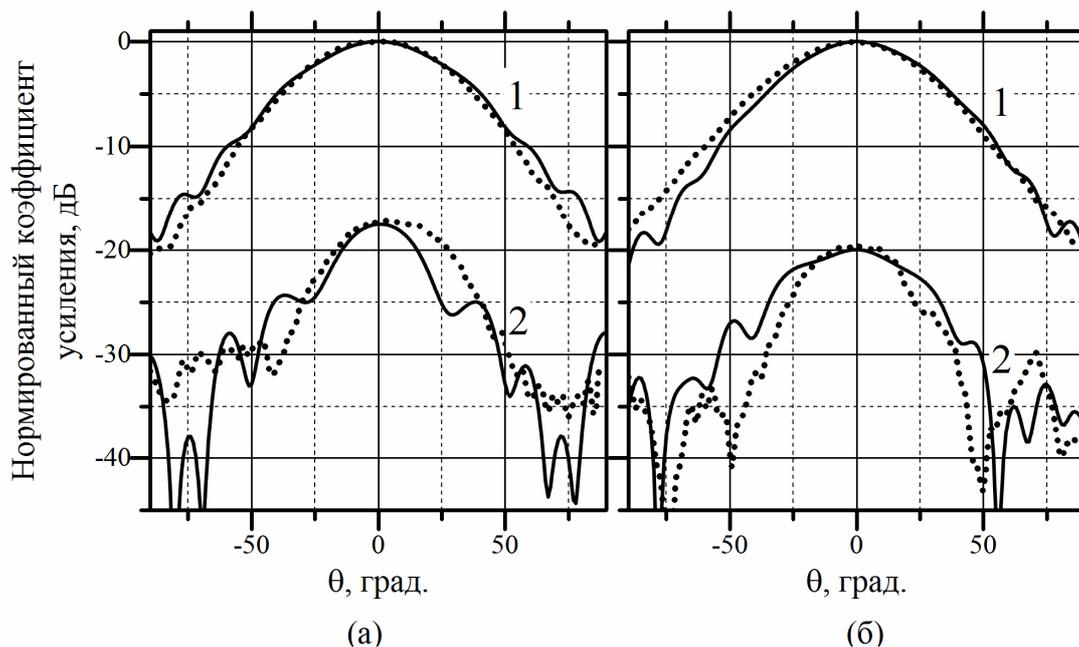


Рис. 7. Диаграмма направленности облучателя. (а) – для частоты приема ( $f_r=2,3$  ГГц), (б) – для частоты передачи ( $f_t=2,1$  ГГц). 1 – основная, 2 – кросс-поляризация. Сплошная линия – расчетные данные, пунктирная – измеренные.

ДН аксиально симметрична: ее ширина по уровню  $-10$  дБ составляет в ортогональных плоскостях  $112^\circ$  и  $111^\circ$  (на частоте  $2,12$  ГГц) и  $107^\circ$  и  $108^\circ$  (на

частоте 2,28 ГГц). ДН не претерпевает существенных изменений в диапазоне 2,1...2,3 ГГц. Величина кросс-поляризации не превышает уровня  $-15$  дБ, что также хорошо согласуется с данными расчета.

### Моделирование параметров антенной системы

Было также проведено моделирование АС, включающей предлагаемый облучатель и параболический рефлектор диаметром  $D = 3,7$  м с относительным фокусным расстоянием  $F / D = 0,4$ , результаты которого представлены на рис. 8. Усиление антенной системы составляет  $G_0 = 37,1$  дБи, ширина ДН по уровню  $-3$  дБ равна  $2\theta_0 = 2,6^\circ$ , а уровень боковых лепестков не превышает  $-30$  дБ, что соответствует коэффициенту использования поверхности  $e = G \cdot (\lambda / \pi d)^2 \approx 0,7$  (рис. 8, на вставке изображена ДН основной поляризации вблизи максимума).

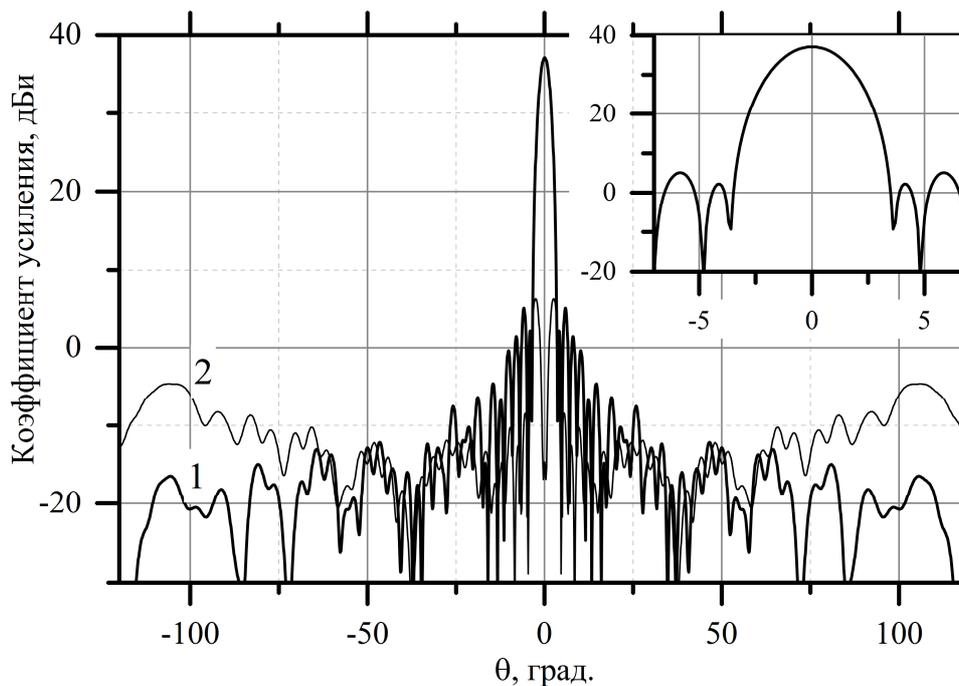


Рис. 8. Коэффициент усиления рефлекторной антенны диаметром  $D = 3,7$  м, относительным фокусным расстоянием  $F / D = 0,4$  с описанным облучателем на частоте 2,2 ГГц. Кривая 1 – основная, 2 – кросс-поляризация.

На рис. 9 приведена зависимость коэффициента усиления АС в зависимости от относительного фокусного расстояния. Усиление АС достигает максимума при  $F / D = 0,5$  и составляет  $G_{max} = 37,3$  дБи.

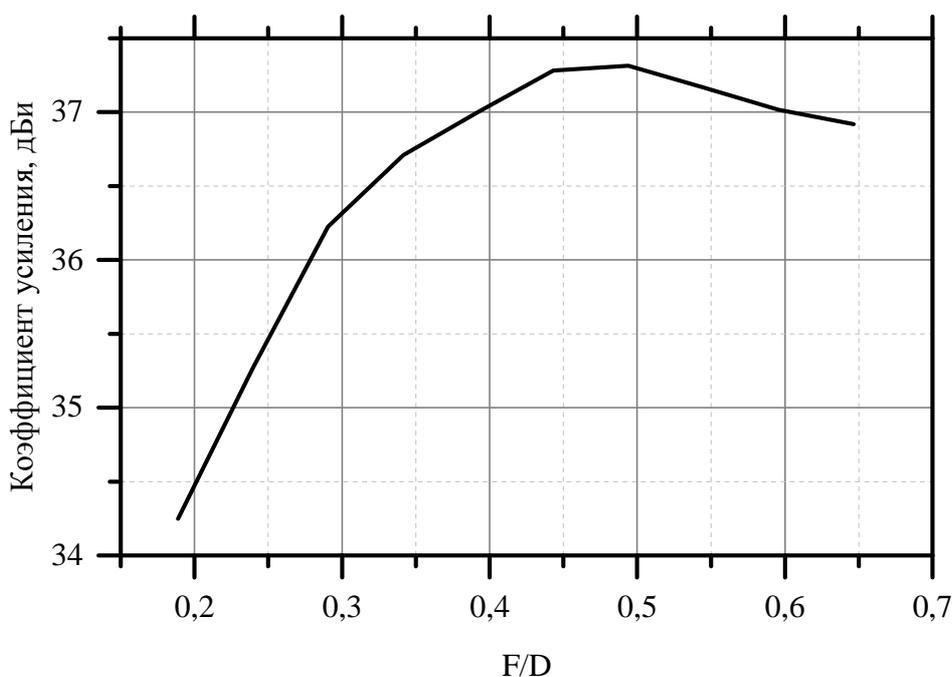


Рис. 9. Зависимость максимального коэффициента усиления АС от ее относительного фокусного расстояния  $F / D$ .

### Заключение

1. Рассчитан и изготовлен облучатель круговой поляризации на основе ступенчатой поляризующей перегородки в круглом волноводе.
2. Отличительная особенность облучателя – компактность (за счет объединения в одном устройстве поляризатора и поляризационного селектора) и простота конструкции. Облучатель подключается портами А и В к приемопередатчику коаксиальными кабелями непосредственно, без необходимости в согласующих и балансных цепях.
3. Ширина полосы облучателя 14% (2,05...2,35 ГГц для изготовленной модели).
4. Достигнутая величина развязки по входам между каналами основной и кроссполяризации –25 дБ в диапазоне частот 2,05...2,3 ГГц находится в хорошем согласии с результатами эксперимента.
5. Диаграмма направленности изготовленного облучателя антенны стабильна в рабочем диапазоне частот и спадает до уровня –10 дБ на краю зеркала. Величина кросс-поляризации в дальней зоне менее –15 дБ.

6. Рассчитанные параметры АС, состоящей из облучателя и зеркала, следующие: коэффициент усиления при средней частоте 2,2 ГГц 37,1 дБи (ширина ДН  $\approx 2,6^\circ$ , КИП  $e \approx 0,7$ ), уровень боковых лепестков менее  $-30$  дБ.

### Литература

- [1] Т. А. Milligan, *Modern Antenna Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] С. А. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Г. З. Айзенберг, О. И. Ямпольский и О. Н. Терёшин, *Антенны УКВ*, М.: Связь, 1977.
- [4] Д. М. Сазонов, *Антенны и устройства СВЧ*, М.: Высшая школа, 1988, р. 434.
- [5] С. Е. Банков и др., "Многопроводные квадрифилярные антенны", *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2010. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep10/1/text.pdf>
- [6] M. Franco, "A High-Performance Dual-Mode Feed Horn for Parabolic Reflectors with a Stepped-Septum Polarizer in a Circular Waveguide [Antenna Designer's Notebook]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 142-146, 2011.
- [7] D. Davis, O. Digiondomenico and J. Kempic, "A new type of circularly polarized antenna element," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 5, pp. 26-33, 1967.
- [8] M. Chen and G. Tsandoulas, "A wide-band square-waveguide array polarizer," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21, no. 3, pp. 389-391, 1973.
- [9] R. Behe and P. Brachat, "Compact duplexer-polarizer with semicircular waveguide [antenna feed]," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, no. 8, pp. 1222-1224, 1991.
- [10] D. Dmitriev, "Stepped Dual Mode Horn with improved septum for 23cm band," 2007. [электронный ресурс]. URL:<http://www.ok1dfc.com/eme/technic/septum/ra3aq.pdf>.