

УДК 621.372.8.09

КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВОЛН ВОЛНОВОДА КРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ В УЗКОНАПРАВЛЕННЫЙ ВОЛНОВОЙ ПУЧОК

С. Н. Власов, И. М. Орлова

Предложена конструкция и приведен расчет квазиоптического трансформатора, осуществляющего преобразование волн сверхразмерного волновода кругового сечения с азимутальными индексами $m = 0; 1$ в узконаправленный волновой пучок или в основную волну прямоугольного волновода. Экспериментально осуществлено преобразование волны H_{14} круглого волновода в волну прямоугольного волновода с коэффициентом передачи по мощности 0,7 и в собственную волну квазиоптического зеркального волновода с коэффициентом передачи 0,75.

При использовании МЦР-генераторов, вывод высокочастотной мощности из которых осуществляется волнами высших типов, распространяющихся в сверхразмерных волноводах кругового сечения, возникает необходимость преобразования таких волн в волны низших типов или в квазиоптические волновые пучки. Настоящая работа, представляющая собой расширенное изложение части доклада [1], посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию трансформатора волн волновода кругового сечения, обладающих азимутальными индексами $m = 0; 1$, в волновой пучок. В преобразователе используется излучатель, предложенный в [2] для симметричных типов волн.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Принцип действия трансформатора может быть пояснен из геометрических соображений. Собственную волну волновода кругового сечения представим в виде суперпозиции плоских волн, волновые векторы \mathbf{k} которых согласно концепции Бриллюэна образуют угол

$\theta = \arcsin \frac{x_{mp}}{k}$ с осью z , где $k = 2\pi/\lambda$, а x_{mp} — поперечное волновое число (для H_{mp} -волн $x_{mp} = v'_{mp}/a$, v'_{mp} — корень уравнения $J'_m(v'_{mp}) = 0$; для E_{mn} -волн $x_{mp} = \mu_{mp}/a$, μ_{mp} — корень уравнения $J_m(\mu_{mp}) = 0$, J_m, J'_m — функция Бесселя и ее производная соответственно).

Поле излучения волн с азимутальными индексами $m = 0; 1$ вблизи открытого конца сверхразмерного волновода представляет собой набор расходящихся волн, ограниченных апертурой волновода и составляющих угол θ с осью z . Если волновод имеет козырек, как это показано на рис. 1, излучение будет иметь место в интервале углов $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$. Поле указанного вида преобразуется в узконаправленный волновой пучок с помощью рефлектора — параболического цилиндра, фокальная ось которого совпадает с осью волновода. В геометрическом приближении ширина пучка в плоскости $\varphi = \pi/2$ равна $4F$, где F — фокусное расстоя-

ние параболического цилиндра, а распределение поля близко к равномерному для симметричных волн и косинусоидальному для волн с $m=1$; ширина волнового пучка в плоскости $\varphi=0$ равна $4a \cos \theta$, распределение поля в нем равномерное. Поляризация излучения после параболического зеркала будет линейной. На рис. 1 изображен вектор E в волновом пучке для случая, когда в волноводе распространяется волна H -типа.

Распределение поля на выходе преобразователя, найденное в геометрическом приближении, может быть использовано для вычисления поля излучения с помощью интеграла Кирхгофа. В таком приближении не учитывается дифракция внутри преобразователя.

Поправки к геометрической структуре поля, возникающие вследствие дифракции, можно оценить следующим образом. Будем считать, что на параболический рефлектор попадает излучение с внутренней поверхности волновода и козырька, ограниченное значениями углов $\frac{\pi}{2} < |\varphi| < \pi$,

а функция, описывающая зависимость поля от φ внутри волновода и на козырьке, имеет вид

$$g_{\varphi} = \begin{cases} \text{const} & \left(\frac{\pi}{2} < |\varphi| < \pi \right) \\ 0 & \left(0 < |\varphi| < \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (1a)$$

для H_{0p} -, E_{0p} -волн и

$$g_{\varphi} = \begin{cases} \cos \varphi & \left(\frac{\pi}{2} < |\varphi| < \pi \right) \\ 0 & \left(0 < |\varphi| < \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (1b)$$

для H_{1p} -, E_{1p} -волн.

Разложим поле в ряд по φ и к каждой из угловых гармоник, пропорциональных $e^{im\varphi}$, применим формулу [3]:

$$f_2(z - a \operatorname{ctg} \theta) = \exp \left\{ -ikz \cos \theta - 2i \left[\sqrt{k^2 a^2 \sin^2 \theta - m^2} - m \arcsin d_m - \frac{\pi}{4} \right] \right\} \sqrt{\frac{ik \sin \theta}{4\pi b_m}} \int_{-l_1}^{l_1} f_1(z' + a \operatorname{ctg} \theta) \times \exp \left[-\frac{ik \sin^3 \theta}{4 b_m} (z - z')^2 \right] dz', \quad (2)$$

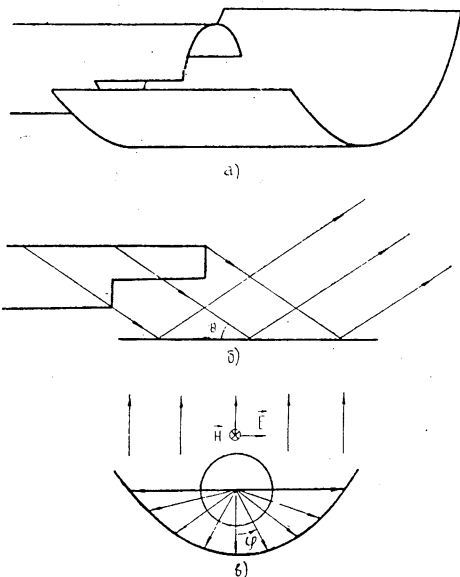


Рис. 1. Квазиоптический преобразователь волн H_{0p} , H_{1p} в волновой пучок.

где $b_m = a \sqrt{1 - \frac{m^2}{k^2 a^2}}$, $d_m = \sqrt{1 - \frac{m^2}{k^2 a^2 \sin^2 \theta}}$, а f_1 и f_2 —

функции координаты z , описывающие распределение поля m -й гармоники на цилиндре радиуса a в волнах, распространяющихся к оси z и от оси z соответственно под углом $\theta = \arccos(h/k)$, h — постоянная распространения волны в волноводе. В (2) предполагается, что f_1 отлично от нуля только при $-l_1 < z' + a \operatorname{ctg} \theta < l_1$, а f_1 и f_2 мало меняются на раз-
мерах порядка длины волны.

Если зависимость полей от φ с достаточной степенью точности описывается суперпозицией гармоник с $m \ll ka \sin \theta$, так что для каждой из них зависимостью b_m и d_m от φ можно пренебречь, то при распространении поля с поверхности волновода на поверхность вблизи параболического зеркала существенных искажений не возникает. При распространении полей типа (1) искажениями с точностью $\approx 5 \div 10\%$ можно пренебречь при $x_{mp} \approx 10$, поскольку в этом случае уже в первых пяти гармониках ($m = 0, \pm 1, \pm 2$) содержится более 95% энергии пучка.

Дифракционные поправки к распределению поля по координате z , найденному в геометрооптическом приближении, будут малы, если для каждой из гармоник с $m \ll ka$ выполняется условие

$$\frac{4a^2}{\lambda(F+a)} \cos^2 \theta \sin \theta \gg 1, \quad (3)$$

при нарушении условия (3) расплывание пучка по z внутри излучателя можно учесть, используя формулу (2) и задавая первоначальное распределение поля не на параболическом зеркале, а на поверхности волновода и козырька.

Оценим величины коэффициентов трансформации получившихся распределений в основную моду прямоугольного волновода и в гауссов пучок, ограничиваясь рассмотрением преобразователей с одним промежуточным фазовым корректором [5, 6]. Коэффициент трансформации в этом случае мог бы быть равным единице только для бесконечного корректора при преобразовании полей, удовлетворяющих соотношениям, выведенным в [5]. В нашем случае эти соотношения не выполняются, и поэтому коэффициенты преобразования меньше единицы. Для оценки эффективности преобразования снизу и подбора корректоров целесообразно применить упрощенную методику, основанную на аппроксимации поперечного распределения поля в волновом пучке, идущем от параболического зеркала, гауссовыми функциями $\exp(-r^2/\omega)$; Π -образному распределению поля с шириной $2d$ соответствует $\omega = 0,94 d$, косинусоидальному распределению $\cos(\pi x/2d)$ шириной $2d$ соответствует $\omega = 0,70 d$ [10]. При такой аппроксимации наибольший коэффициент преобразования достигается при использовании квадратичных корректоров (линз или зеркал), а отличие коэффициента трансформации от единицы вызвано отличием реальной структуры поля от гауссовой. В соответствии с таким расчетом максимальный коэффициент преобразования в случае оптимального подбора корректора может составлять при трансформации волн H_{0p} и H_{1p} в собственную волну прямоугольного волновода 0,7 и 0,8. Коэффициенты трансформации в гауссов пучок составляют для H_{0p} - и H_{1p} -волн 0,8 и 0,9 соответственно. Заметим, что величина потерь трансформации сравнима с точностью аппроксимации полей на параболическом зеркале Π -образным и косинусоидальным распределением. Для увеличения коэффициента преобразования необходимо не только использование неквадратичных корректоров, но и более корректный учет дифракции внутри преобразователя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Квазиоптические трансформаторы описанного выше типа были использованы а) для согласования основной волны рупора, переходящего в одномодовый волновод, с волной H_{14} волновода кругового сечения; б) для преобразования волны H_{03} круглого волновода в собственную волну зеркальной квазиоптической линии передачи. Эксперимент проводился на длине волны $\lambda = 5,1$ мм. Диаметр волновода равнялся 32 мм.

а) Согласование основной волны рупора с волной H_{14} осуществлялось по схеме, изображенной на рис. 2. Рупор с раскрывом 42×36 мм имел длину 250 мм и переходил в стандартный одномодовый волновод $3,6 \times 1,8$ мм. Фокусное расстояние параболического цилиндра равнялось 31 мм. Для согласования использовались вспомогательные корректирующие зеркала.

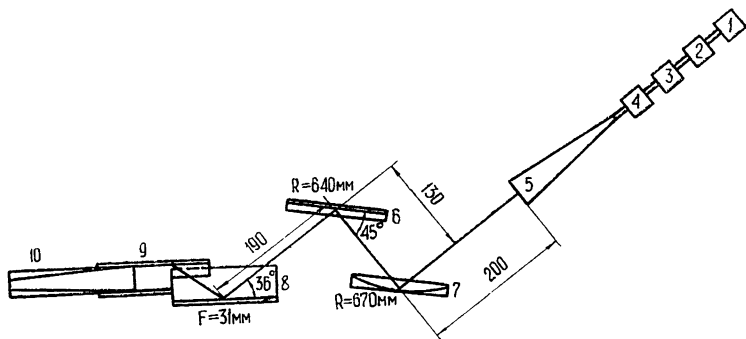


Рис. 2. Схема возбуждения основной волны рупора волны H_{14} круглого волновода:

1 — генератор, 2 — волномер, 3 — аттенюатор, 4 — измерительная линия, 5 — рупор, 6, 7 — корректирующие зеркала, 8 — параболический цилиндр, 9 — волновод с конической втулкой, 10 — коническая втулка.

Для настройки на максимальное возбуждение волны H_{14} использовался проходной цилиндрический резонатор с типом колебаний H_{141} . Индикатором максимального возбуждения колебаний в резонаторе служил детектор, связанный с резонатором одномодовым волноводом, возбуждаемым через отверстие связи на цилиндрической поверхности резонатора. После настройки на максимальное возбуждение волны резонатор из тракта исключался.

На рис. 3 приведено распределение $E_{\varphi}^2(R)$ на апертуре волновода кругового сечения в плоскости, перпендикулярной линиям электрического поля, снятое шупом — одномодовым волноводом без фланца. Следует отметить высокую чистоту возбуждения такой сложной волны, как волна H_{14} , посредством квазиоптического преобразователя.

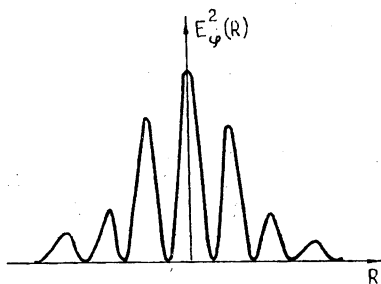


Рис. 3. Распределение интенсивности поля волны H_{14} в круглом волноводе, возбуждаемой посредством квазиоптического трансформатора.

Для определения величины коэффициента преобразования основной волны рупора в волну H_{14} волновода кругового сечения был использован метод нахождения матрицы рассеяния четырехполюсника [5] путем измерения комплексного коэффициента отражения на его выходе. В рассматриваемой системе с помощью измерительной линии, присоединенной

непосредственно к рупору, определялся комплексный коэффициент отражения при перемещении отражающего поршня в круглом волноводе. Предложенный метод нахождения коэффициента преобразования как коэффициента передачи четырехполюсника по мощности справедлив, если поршень отражает полностью измеряемую волну, не препятствует излучению паразитных волн из волновода и не переизлучает основную волну в паразитные волны. В эксперименте в качестве поршня использовалась втулка, представляющая собой конический переход с диаметра 32 мм на диаметр 16 мм, имевший длину 250 мм. При этом преобразование на конусе волны H_{14} в паразитные волны составляло, по оценке, единицы процентов.

Конический переход отражал полностью не только измеряемую волну, но и те паразитные волны, постоянные распространения которых меньше постоянной распространения волны H_{14} , что существенно затруднило бы интерпретацию результатов эксперимента, если бы возбужденные паразитные волн в круглом волноводе было значительным. Однако точки, изображающие комплексный коэффициент отражения в полярной системе координат, легли на замкнутую кривую, близкую к эллипсу, имеющему небольшой эксцентриситет и центр, совпадающий с началом координат.

Такая форма кривой свидетельствует о том, что от поршня отражается или возникает на нем с заметной амплитудой лишь одна паразитная волна: модуль коэффициента отражения максимален, когда в одномодовом волноводе измерительной линии поля отраженных волн—основной и паразитной—оказываются в фазе, минимален—если они в противофазе. Совпадение центра эллипса с началом координат вполне естественно, поскольку для используемых размеров рупора и волновода кругового сечения коэффициенты s_{11} и s_{22} матрицы рассеяния эквивалентного четырехполюсника малы. В описанном эксперименте большая полуось эллипса равнялась 0,78, малая—0,62, что соответствует коэффициенту отражения волны H_{14} по напряжению $\approx 0,70$. Этой величине вследствие малости коэффициентов s_{11} и s_{22} равен и искомый коэффициент преобразования по мощности.

Омические потери мощности в рупоре, на поверхностях зеркал и в круглом волноводе составляли, по оценкам, единицы процентов. Измеренное значение величины коэффициента преобразования находится в хорошем соответствии с расчетом.

б) Согласование сверхразмерного и квазиоптического волноводов изучалось в системе, состоящей из круглого волновода, трансформатора волны H_{03} в волновой пучок и зеркальной перископической линии передачи (рис. 4). Линия была конфокальной, с расстояниями между одинаковыми зеркалами 100 см, между центрами зеркал в паре 13 см, с размерами зеркал, соответствующими френелевскому параметру $C = 4$. Фокусное расстояние параболического цилиндра в этом эксперименте равнялось 16 мм. Линия возбуждалась без промежуточных согласующих зеркал, так как при взаимном расположении преобразователя и линии, изображенном на рис. 4, пучок при приближении к первой паре зеркал имел размеры и кривизну фазового фронта, близкие к соответствующим величинам собственной волны квазиоптической линии. Волна H_{03} в волноводе кругового сечения возбуждалась рупором и преобразователем, как изображено на рис. 4. Настройка на максимальное возбуждение волны H_{03} осуществлялась при помощи вспомогательного резонатора с типом колебаний H_{031} , связанного через отверстие в цилиндрической стенке одномодовым волноводом с детектором. Вспомогательный резонатор после настройки системы из тракта исключался. На выходе зер-

кальная линия согласовалась с рупором системой из трех зеркал с потерями 1 дБ. Полные потери в системе равнялись 5,3 дБ. Потери на возбуждение волны H_{03} определялись путем измерения прохождения мощности в симметричной системе рупор—преобразователь—круглый волновод—преобразователь—рупор и составляли 3 дБ на один возбудитель. При этом потери на возбуждение зеркальной линии квазиоптическим преобразователем составляли 1,3 дБ, что соответствует величине коэффициента преобразования $\approx 0,75$.

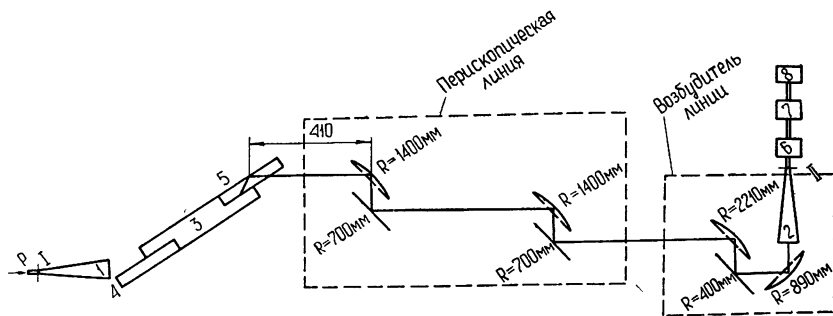


Рис. 4. Схема возбуждения зеркальной квазиоптической линии передачи:
1, 2 — рупоры, 3 — круглый волновод, 4, 5 — параболические цилиндры, 6 — аттенюатор,
7 — детектор, 8 — усилитель.

Таким образом, у исследованных волновых трансформаторов коэффициент преобразования волн составляет всего 0,7—0,75 по мощности. Он может быть повышен при более точном подборе параметров преобразователя, основанном на учете дифракции внутри излучателя. Такой расчет может быть произведен лишь численными методами. Однако уже разработанные преобразователи могут успешно конкурировать по величине коэффициента трансформации с волновыми трансформаторами других типов в тех случаях, когда возникает необходимость в преобразовании высших типов волн, причем преимущество описанных здесь устройств растет с укорочением длины волны до $\lambda = 1$ мм, поскольку характеристики других преобразователей ухудшаются.

Авторы признательны М. И. Петелину за дискуссию, В. С. Авербаху и Н. М. Шероновой за предоставление элементов квазиоптического волновода и В. М. Перепелице за помощь при измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Власов, Л. И. Загрядская, Н. Ф. Ковалев, И. М. Орлова, М. И. Петелин, Докл. на V Всесоюзном симпозиуме по дифракции и распространению радиоволн, Л., 1970.
2. Л. И. Пангонис, М. В. Персиков, Радиотехника и электроника, 15, 2300 (1970).
3. Н. А. Зиничев, Дипломная работа, ГГУ, Горький, 1970.
4. С. Н. Власов, И. М. Орлова, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 15, № 12, 1913 (1972).
5. Н. Г. Бондаренко, В. И. Таланов, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 7, № 2, 313 (1964).
6. Р. Б. Ваганов, Радиотехника и электроника, 18, № 1, 187 (1973).
7. В. С. Авербах, С. Н. Власов, Э. М. Попова, Н. М. Шеронова, Радиотехника и электроника, 11, № 4, 750 (1966).

8. Х. Когельник, Т. Ли, ТИИЭР, 54, № 10, 95 (1966).
9. Э. Гинзтон, Измерения на сантиметровых волнах, ИЛ, М., 1960.
10. Р. Б. Ваганов, Квадратичная фазовая коррекция в волноводной квазиоптике, Препринт ИРЭ АН СССР, М., 1972.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
26 марта 1973 г.

A QUASI-OPTICAL CONVERTER OF WAVES IN A CIRCULAR-SECTION WAVEGUIDE INTO A NARROW-DIRECTED WAVE BEAM

S. N. Vlasov, I. M. Orlova

A design is suggested and the calculation is made of a quasi-optical converter producing the wave transformation in a super-dimensional circular-section waveguide with azimuthal indices $m = 0.1$ into a narrow-directed wave beam or into the fundamental of a rectangular waveguide. The transformation of the wave $H_{1,1}$ in a circular waveguide into a wave of a rectangular one with the power transformation coefficient 0.7 and into the fundamental of a quasi-optical mirror waveguide with the transformation coefficient 0.75 is made in the experiment.
