

## КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ НА ДИФРАКЦИОННО-СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

© 2009 г. Г. С. Воробьев, В. О. Журба, А. С. Кривец, Ю. А. Крутько, А. А. Рыбалко

Сумской государственный университет  
Украина, 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2

Поступила в редакцию 22.09.2008 г.  
После доработки 10.12.2008 г.

Описаны схема и принцип работы направленного ответвителя на дифракционно-связанных линиях передачи, излучающие апертуры которых образованы периодическими структурами и диэлектрическими волноводами. Экспериментальные исследования макета ответвителя в диапазоне частот 30–37 ГГц показали, что связь на пространственных волнах позволяет получать значения переходного ослабления в интервале 3–20 дБ при направленности ~30 дБ, что примерно соответствует аналогичным параметрам ответвителя на диэлектрических волноводах. Основным достоинством представленного направленного ответвителя является возможность корректировки в широких пределах его характеристик изменением расстояния между излучающими апертурами.

PACS: 42.82.Et

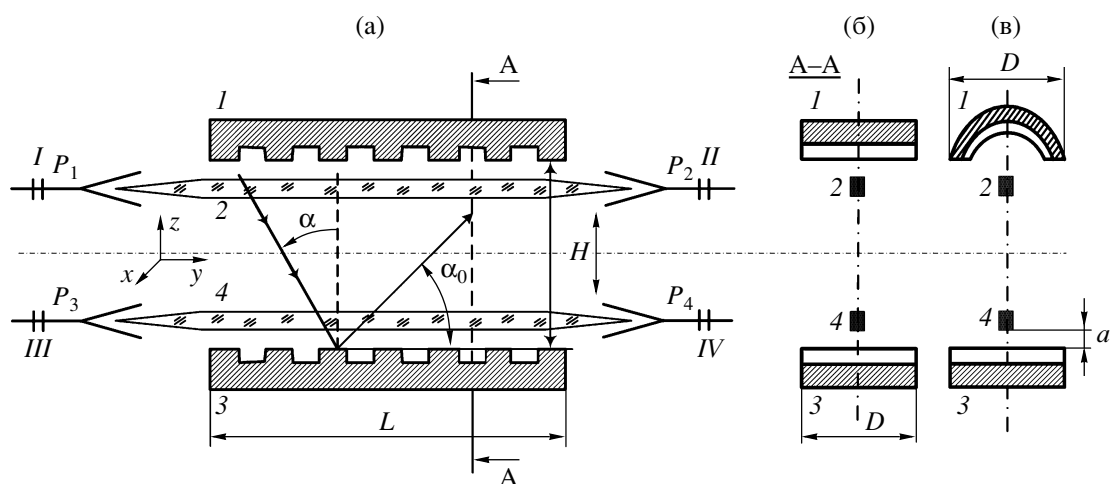
Общий принцип построения направленных ответвителей (н.о.) основывается на использовании двух связанных между собой линий передачи энергии [1, 2], по одной из которых проходит основной поток мощности, а во вспомогательной линии – интерференция и разделение прямых и обратных волн.

К настоящему времени в измерительных схемах миллиметрового и субмиллиметрового (м.с.м.) диапазонов волн в зависимости от предъявляемых

требований используется большое количество модификаций н.о.

Наиболее близкими к предложенному н.о. являются системы, построенные на диэлектрических волноводах (д.в.) или диэлектрических планарных волноводах [3, 4]: с распределенной связью, с локальной связью, с направленным переизлучением во вторичный канал.

В данной работе исследована конструкция н.о. на основе двух дифракционно-связанных линий пе-



**Рис. 1.** Схематическое изображение конструкции н.о. на дифракционно-связанных линиях передачи: **а** – сечение элементов вдоль продольной оси; **б, в** – сечение элементов в плоскости А–А при плоскопараллельной (**а**) и плоскоцилиндрической (**б**) конфигурации отражателей. 1, 3 – периодические структуры, 2, 4 – диэлектрические волноводы; I–IV – плечи направленного ответвителя;  $P_1$  – мощность на входе н.о.,  $P_3$  – мощность обратной ответвленной волны,  $P_2$  и  $P_4$  – передаваемые мощности.

редачи с распределенными источниками излучения, которые образованы периодическими структурами и расположенными вдоль них д.в. На рис. 1 показаны общая схема выполнения н.о. и две возможные конфигурации отражателей: плоскопараллельной формы и плоскоцилиндрической. Возможен вариант выполнения обоих отражателей цилиндрической формы.

Основной тракт н.о. образован периодической структурой 1, вдоль продольной оси которой на расстоянии  $a$  расположен диэлектрический волновод 2. Аналогичным образом выполнен вторичный тракт, который также состоит из периодической структуры 3 и диэлектрического волновода 4. Периодические структуры нанесены на поверхности зеркал плоской или цилиндрической формы с апертурой  $D$ , оси которых расположены параллельно на расстоянии  $H$  и образуют квазиоптическую линию передачи, формирующую пучок пространственных волн. Один из излучателей системы установлен с возможностью плавного перемещения вдоль оси  $z$ , что позволяет изменять расстояние  $H$  и корректировать фазовые характеристики волн.

Принцип работы н.о. с дифракционной связью основан на возбуждении синфазных и противифазных пространственных волн. В результате распространения этих волн вдоль продольной оси н.о. происходит обмен энергией между излучателями и ответвление части мощности во вторичный канал. Подробно результаты теоретических и экспериментальных исследований преобразования волн д.в. в пространственные и пространственных в поверхностные на периодических структурах изложены в [5].

Остановимся на особенностях волновых процессов в предложенном квазиоптическом н.о. (рис. 1). При подаче на вход  $I$  с.в.ч.-сигнала в диэлектрическом волноводе 2 распространяется замедленная волна, которая рассеивается на периодической структуре 1. При этом возникает поле дифракции, которое представляет собой суперпозицию плоских волн, часть из которых уходит в объем н.о. под углами  $\alpha$  в виде пространственных волн, а остальные локализованы вблизи решетки в виде медленных гармоник, распространяющихся к выходу волновода 2. Угол излучения пространственных волн определяется соотношением [5]

$$\alpha = \arccos(1/\beta_{\alpha} + n/k), \quad (1)$$

где  $\beta_{\alpha} = v_{\alpha}/c$  – относительная скорость волны в диэлектрическом волноводе;  $v_{\alpha}$  – фазовая скорость волны;  $c$  – скорость света;  $n = -1, -2, \dots$  – номер пространственной гармоники излучения;  $k = l/\lambda$  – волновое число,  $l$  – период решетки,  $\lambda$  – длина волны

излучения. Преобладания того или иного типа волн можно добиться выбором параметров излучателя: периода структуры, скорости волны в волноводе и прицельного параметра  $a$ .

Второй этап возбуждения системы рис. 1 заключается в падении сформированной под углом  $\alpha$  пространственной волны на структуру 3. В результате дифракции полное поле над периодической структурой состоит из падающего и пространственных гармоник рассеянного поля. Если  $l < \lambda/(1 + \sin\alpha)$ , то отражаться от структуры 3 под углом  $\alpha_0 = 90^\circ - \alpha$  будет только нулевая пространственная гармоника, а остальное поле представляет собой суперпозицию поверхностных пространственных гармоник, распространяющихся вдоль решетки с фазовыми скоростями

$$v_{\hat{\phi}} = kc/(n + k \sin\alpha). \quad (2)$$

При  $v_{\hat{\phi}} \approx v_{\alpha}$  в диэлектрическом волноводе 4 также возбуждается замедленная волна, которая на периодической структуре 3 трансформируется в пространственную волну. При последовательном преобразовании поверхностных волн в пространственные и пространственных в поверхностные вдоль оси отражателей направленного ответвителя формируются синфазные и противифазные волны, в результате интерференции которых часть падающей и отраженной мощности ответвляется во вторичный тракт.

Геометрические размеры рассмотренного н.о. выбираются из неравенств [6], определяющих выполнение законов лучевой оптики в двухзеркальной квазиоптической системе:

$$\frac{d^2}{H\lambda} \ll \left(\frac{H}{d}\right)^2; \quad L/\lambda \geq 10, \quad (3)$$

где  $H$  и  $L$  – расстояние между зеркалами и их длина соответственно;  $d = D/2$  – радиус апертуры зеркал излучателей (расстояние от продольной оси системы до периферии зеркал).

Выполнение первого неравенства позволяет представить поле исследуемой системы в виде параксиальных волновых пучков (рис. 1), во многом аналогичных плоской волне [7]. Второе неравенство сводит к минимуму проявление резонансных явлений вдоль продольной оси  $u$ . Период структуры  $l$  выбирается из соотношения (1) для заданных значений  $\lambda$ ,  $n$ ,  $\beta_{\alpha}$  и  $\alpha$ . Значения прицельного параметра  $a < \lambda$  корректируются экспериментально, путем исследования пространственных характеристик излучающих систем по критерию минимального паразитного воздействия д.в. на поле периодической структуры.

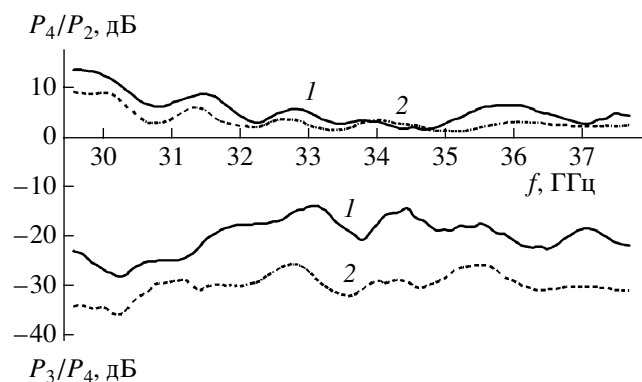


Рис. 2. Характеристики ответвителя при  $H = 65$  мм (1) и  $H = 80$  мм (2).

В случае использования цилиндрических зеркал с квадратичной коррекцией оптимальные значения их радиусов кривизны  $R$  находятся в интервале  $2R/\lambda = 4-6$ . Это обусловлено тем, что при  $2R/\lambda > 6$  фокусирующее действие зеркал уменьшается, а при  $2R/\lambda < 4$  апертура зеркала перехватывает лишь часть излучения системы периодическая структура – диэлектрический волновод.

Приведем пример выбора параметров направленного ответвителя и его элементов в диапазоне частот  $f = 30-37$  ГГц. В качестве источника поверхностной волны использовался полистироловый волновод сечением  $7.2 \times 3.4$  мм<sup>2</sup>, который на длине волны  $\lambda = 9$  мм обеспечивал относительную скорость  $\beta_{\alpha} \approx 0.9$ . Основной лепесток диаграммы излучения ( $n = -1$ ) пространственной волны формировался под углом  $\alpha \approx 70^\circ$ , что из соотношения (1) соответствовало значению  $l = 11.5$  мм. Длина волновода  $L = 150$  мм и радиусы излучающих апертур  $d = 30$  мм обеспечивали выполнение условий (3), а значение  $R = 25$  мм обеспечивало оптимальную фокусировку квазиоптического волнового пучка вдоль оси н.о. при выполнении одного из зеркал цилиндрическим (рис. 1в).

Экспериментальные исследования макета н.о. проводились на установке [8] путем измерения диаграмм направленности излучающих систем и их ближних полей, а также волноводных характеристик как отдельных элементов н.о., так и всей системы в целом. Механическая часть установки позволяла перемещать излучатели н.о. в трех плоскостях с точностью  $\pm 0.1$  мм и, меняя в широких пределах значения  $a$  и  $H$ , настраивать ответвитель по оптимальным значениям выходных параметров.

В качестве примера на рис. 2 приведены характеристики описанной выше конструкции направ-

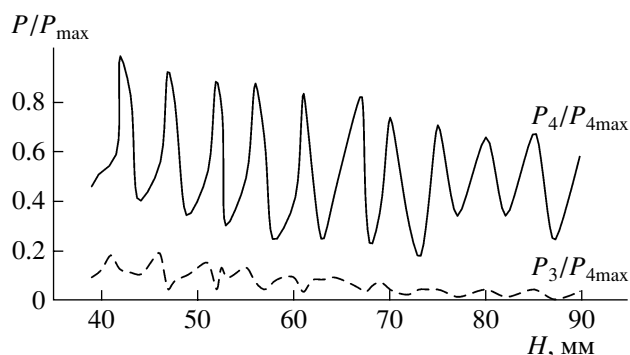


Рис. 3. Относительные значения уровней мощности во вторичном канале с изменением расстояния между зеркалами.  $P_{4\max}$  – максимальное значение мощности, поступающей во вторичный канал.

ленного ответвителя для двух расстояний между излучающими зеркалами.

Из приведенных на рис. 2 характеристик следует, что при расстояниях между излучателями  $H = 65$  мм для заданного интервала частот значения коэффициента ослабления ( $P_4/P_2$ ) находятся в интервале 3–12 дБ, а коэффициенты направленности ( $P_3/P_4$ ) – в интервале 15–25 дБ. Улучшения выходных характеристик н.о. можно достигнуть корректировкой фазы распространяющихся волн при изменении  $H$ , что продемонстрировано графиками кривых 2 на рис. 2:  $P_4/P_2 \approx 3-7$  дБ,  $P_3/P_4 \approx 30$  дБ.

Установлено, что квазиоптические волновые свойства исследуемой системы сохраняются в интервале значений  $H = (5-10)\lambda$ , для которого выполняется неравенство (3).

В частности, на рис. 3 проиллюстрированы относительные зависимости уровней мощности  $P_4/P_{4\max} = f(H)$  и  $P_3/P_{4\max} = f(H)$ , регистрируемых соответственно в плечах IV и III (рис. 1). Из графиков кривых видно, что оптимальными с точки зрения развязки ответвленного и отраженного сигналов являются значения  $H = 60-90$  мм. При значениях  $H > 10\lambda$  происходит рост дифракционных потерь, и система становится критичной к юстировке зеркал.

Сравнивая характеристики представленного н.о. с ответвителями на связанных д.в. [4, 9], можно сделать следующие выводы: параметры н.о. в рабочей полосе частот  $\Delta f = 5$  ГГц сравнимы с параметрами ответвителя на эффекте направленного переизлучения сигнала с участка резкого излома д.в. [9] при значительно более простой конструкции; данный направленный ответвитель имеет две возможности корректировки переходного ослабления (путем изменения прицельного параметра  $a$  и расстояния между излучателями  $H$ ),

что снижает технологические требования на изготовление данной системы в м.с.м.-диапазоне волн.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vorobyov G.S., Petrovsky M.V., Ruban A.I. et al.* // Telecommunications and Radio Engineering. 2007. № 66(20). P. 1839.
2. *Xiao-Ping Chen, Ke Wu* // IEEE Trans. 2008. V. MTT-56. Issue 1. P. 142.
3. *Демчик В.И.* Электродинамика СВЧ: Учебное пособие для вузов. Минск: Университетское, 1992.
4. *Взятыйшев В.Ф., Меркурьев А.Н., Раевский Г.П. и др.* // Труды МЭИ. 1974. Вып. 194. С. 59.
5. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В.П. Шестопалова. Киев: Наук. думка, 1991.
6. *Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Макаренко Б.И. и др.* Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника. М.: Радио и связь, 1984.
7. *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966.
8. *Воробьев Г.С., Кривец А.С., Петровский М.В. и др.* // Вестник Сумского государственного университета. 2002. № 5(38)–6(39). С. 117.
9. Техника субмиллиметровых волн / Под ред. Р.А. Валитова. М.: Сов. радио, 1969.