

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p.
2. Volakis J., Chen C. C., Fujimoto K. Small antennas: miniaturization techniques & applications. New York: McGraw-Hill, 2012. 428 p.
3. Youla D. C. A new theory in broad-band matching. // IEEE. Trans. circuit theory. 1964. Vol. CT-11, № 1. P. 30–50.
4. Вай Кайчень. Теория и проектирование широкополосных согласующих цепей / пер. с англ.; под ред. Ю. Л. Хотунцева. М.: Связь, 1979. 288 с.
5. Kaya A., Yuksel E. Y. Investigation of a compensated rectangular microstrip antenna with negative capacitor and negative inductor for bandwidth enhancement // IEEE Trans. ant. and prop. 2007. Vol. AP-55, № 5. P. 1275–1282.
6. Sussman-Fort S. E., Rudish R. V. Non-foster impedance matching of electrically-small antennas // IEEE Trans. ant. and prop. 2009. Vol. AP-57, № 8. P. 2230–2241.
7. Hujanen A., Holmberg J., Sten J. C.-E. Bandwidth limitations of impedance matched ideal dipoles // IEEE Trans. ant. and prop. 2005. Vol. AP-53, № 10. P. 3236–3239.
8. Aberle J. T. Two-port representation of an antenna with application to non-foster matching network // IEEE Trans. ant. and prop. 2008. Vol. AP-56, № 5. P. 1218–1222.

D. V. Belenko, A. A. Golovkov, E. I. Mozhaeva
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Investigation of negative capacity converters for broad-band matching of electrically-small antennas

The analysis of the characteristics and stability of negative impedance converter for compensation impedance capacitive component of electrically small whip antenna to increase its gain. The obtained theoretical results are confirmed by experimental research.

Electrically-small antennas, matching, negative reactive element

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2015 г.

УДК 621.37

И. В. Мунина
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Направленные ответвители на связанных линиях с возможностью управления типом направленности

Предложен оригинальный подход к реализации 0-дБ направленных ответвителей с двумя различными типами направленности, проявляющимися в двух различных частотных диапазонах, за счет использования комбинации кольцевых разомкнутых резонаторов и "грибковых" структур. Предложены методы расширения рабочей полосы частот устройства. Представлена конструкция реконфигурируемого ответвителя с возможностью изменения типа направленности с сонаправленного на противоположенный и наоборот, благодаря включению в состав разомкнутого кольцевого резонатора полупроводникового варикапа.

Направленный ответвитель, направленность, управляемость, гальваническая развязка

Направленные ответвители (НО) на связанных линиях передачи представляют собой обширный класс устройств деления и суммирования СВЧ-мощности, активно использующихся в СВЧ-электронике. В частности, НО находят широкое применение в фазовращателях, балансных усилителях и смесителях [1]. Важной характеристикой НО на связанных линиях является пере-

ходное затухание, определяющееся отношением мощностей на входе первичной и на выходе вторичной линий. В настоящей статье рассмотрены высоконаправленные ответвители, также известные как 0-дБ НО, в которых происходит полное переизлучение мощности из первичной линии во вторичную. При этом обеспечивается развязка входного и выходного плеч по постоянному току.

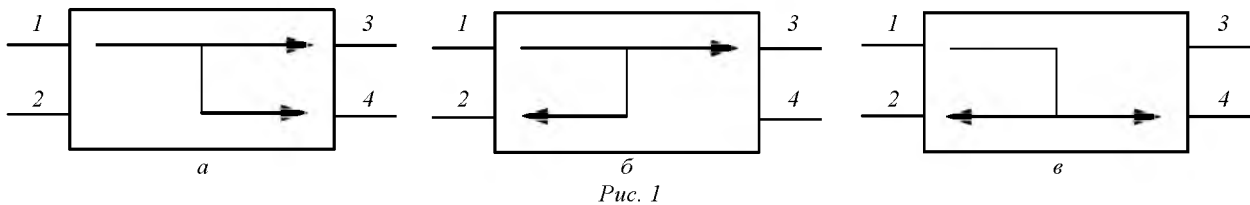


Рис. 1

Помимо этого различают направленные ответвители с тремя различными типами направленности [1], определяемыми направлениями, в которые происходит деление мощности относительно входного плеча. К первому типу относится сонаправленное деление мощности (рис. 1, *a*) (цифрами обозначены плечи ответвителя). В этом случае деление осуществляется за счет разности постоянных распространения четной и нечетной мод в связанных линиях передачи и может наблюдаться только в несимметричных связанных линиях, например в микрополосковых. Для реализации сильно связанного сонаправленного ответвителя, в котором вся мощность передается из первичной линии во вторичную, необходимо обеспечить разность фазовых набегов для четной и нечетной мод, соответствующую целому числу полуволн в линии передачи. Это приводит к значительным габаритам устройства.

Вторым типом направленности является противонаправленность (рис. 1, *б*). В этом случае принято считать, что постоянные распространения четной и нечетной мод равны, а различаются только волновые сопротивления. При этом коэффициент связи определяется выражением

$$k = (Z_{0e} - Z_{0o}) / (Z_{0e} + Z_{0o})$$

(Z_{0e} и Z_{0o} – волновые сопротивления четной и нечетной мод соответственно) и максимален для длины участка связи, равной нечетному числу четвертей длины волны.

К третьему типу относят полное ответвление мощности во вторичную линию (рис. 1, *в*). Такие НО используют в случаях, когда необходимо обеспечить развязку по постоянному току между входным и выходными плечами устройства, например в проходных фазовращателях для упрощения цепей подачи смещения.

Для улучшения свойств направленности НО на связанных линиях используют различные подходы. В [2] представлена конструкция высоконаправленного ответвителя, в котором обеспечено равенство волновых сопротивлений и увеличена разность постоянных распространения четной и нечетной мод. НО реализован на отрезках связанных линий, периодически нагруженных на свя-

занные "грибковые" структуры (ГС), каждая из которых представляет собой металлизированную площадку, расположенную под отрезками связанных линий, соединенную с заземленным экраном через металлизированные переходные отверстия. Другой метод представлен в [3]. Вместо ГС использованы периодически расположенные дефекты в заземленном экране. Асимметричный 0-дБ НО может быть также выполнен на основе композитных длинных линий с положительной и отрицательной дисперсиями [4].

В настоящей статье рассмотрен оригинальный подход к реализации высоконаправленных ответвителей с двумя различными типами направленности, наблюдаемыми в различных частотных диапазонах, за счет использования комбинации кольцевого разомкнутого резонатора (КРР) и ГС. Проанализированы методы расширения рабочей полосы частот устройства. Также представлена конструкция реконфигурируемого ответвителя с возможностью изменения типа направленности с сонаправленного на противонаправленный и наоборот благодаря включению в состав КРР полупроводникового варикапа.

Направленный ответвитель с двумя типами направленности. Как отмечено ранее, тип направленности НО связан с соотношением волновых сопротивлений и постоянных распространения четной и нечетной мод в связанных линиях и имеет ограничения при реализации, в том числе и технологические [5]. В [6] предложен метод расчета НО с реактивными элементами (индуктивность или емкость), включенными между связанными линиями. Использование реактивностей позволяет обеспечить согласование по входу при различных фазовых скоростях для четной и нечетной мод, а также дает возможность реализовать все три типа направленности.

Периодическое включение в состав НО на связанных линиях ГС позволяет увеличить разность между постоянными распространения четной и нечетной мод [2]. Это связано с тем, что наличие ГС увеличивает фазовую скорость для четной моды, при этом фазовая скорость нечетной моды остается без изменений. Указанное свойство НО позволяет обеспечить полное переизлучение мощности в выходное плечо в условиях сонаправ-

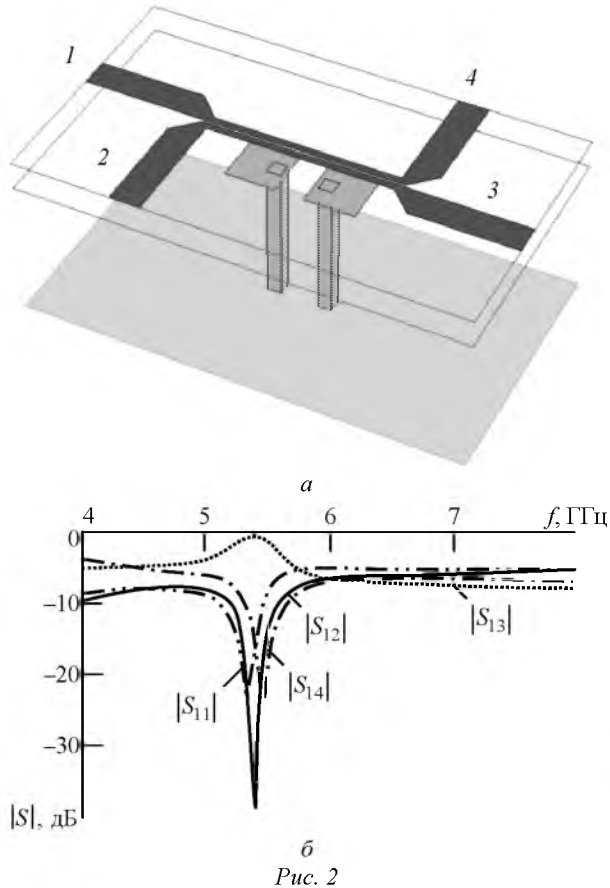


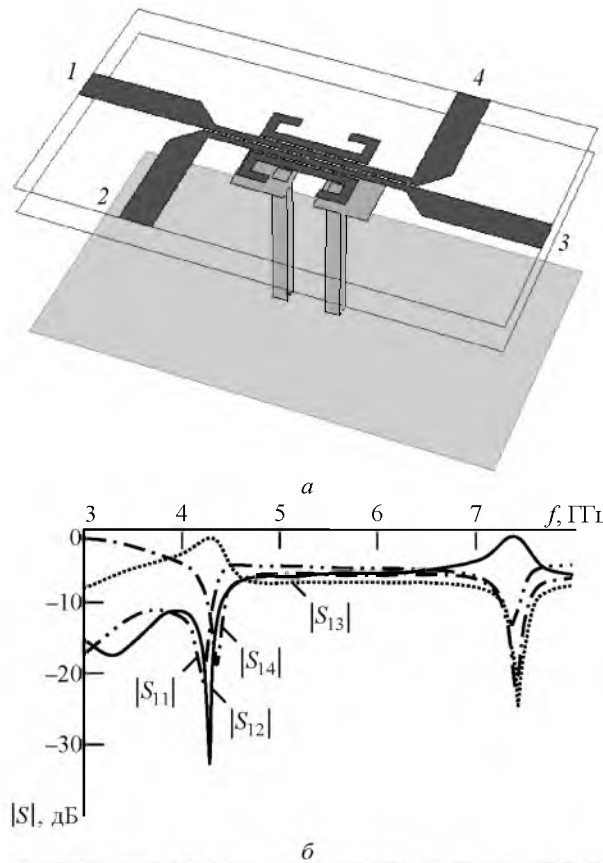
Рис. 2

ленного режима ответвления. На рис. 2, а представлена конструкция НО, нагруженного на две связанных ГС. Структура выполнена в двух диэлектрических слоях коммерчески доступного диэлектрика Rogers RO3010 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 11.2$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0.0022$ с толщинами $h_1 = 130$ мкм и $h_2 = 1280$ мкм. В верхнем слое расположены отрезки связанных линий, а в нижнем – обкладки с металлизированными переходными отверстиями. Характеристики 0-дБ сонаправленного ответвителя, полученные в результате электродинамического моделирования, представлены на рис. 2, б. На частоте 5.4 ГГц происходит полное переизлучение мощности в плечо 3. Уровень вносимых потерь на центральной частоте составляет 0.7 дБ.

Свойства НО могут кардинально измениться при дополнительном включении в область связи других реактивных структур – КРР (рис. 3). КРР, расположенные симметрично относительно отрезка связанных линий, представляют собой последовательные резонансные контуры, обладающие полосно-заграждающими свойствами на резонансной частоте, что обеспечивает на частоте

резонанса КРР полное переизлучение входной мощности во вторичную линию в направлении плеча 2 (рис. 3, а). Таким образом, при добавлении в состав НО одновременно двух различных типов структур обеспечивается два типа направленности в двух различных частотных диапазонах.

НО реализован в двух диэлектрических слоях Rogers RO3010 и представляет собой отрезок несимметричных связанных линий с боковой связью, выполненный в микрополосковом исполнении. По результатам электродинамического моделирования устройства (рис. 3, б) сонаправленное ответвление мощности обеспечивается на частоте 4.3 ГГц, а противоположное – на частоте 7.4 ГГц. Уровень вносимых потерь не более 1 дБ на рабочих частотах. Достаточно большие потери вызыва-



б



Рис. 3

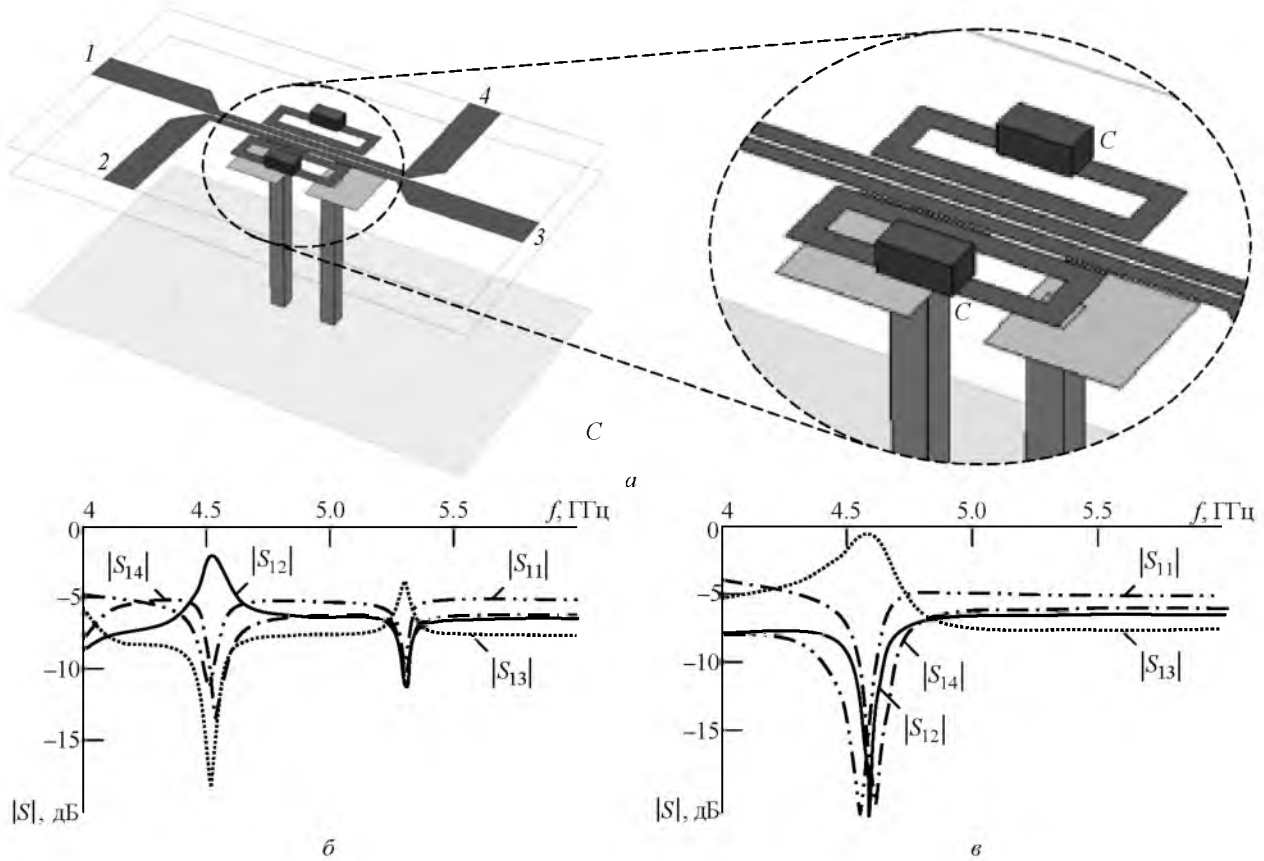


Рис. 4

ны резонансным характером входящих в состав НО элементов. Использование резонансных контуров ограничивает относительную рабочую полосу частот, которая составляет не более 5 % по уровню -10 дБ коэффициентов отражения и развязки. Фотография экспериментального образца НО представлена на рис. 3, в. Для расширения рабочей полосы частот вместо одиночных КРР могут быть использованы несколько связанных КРР и увеличено количество ГС [7].

Реконфигурируемый 0-дБ направленный ответвитель. Рассмотренный НО с двумя различными типами направленности взят за основу реконфигурируемого НО, в котором в одном и том же частотном диапазоне возможно изменение типа направленности с сонаправленного на противоположенный и наоборот. Для этого в зазор КРР включен полупроводниковый варикап. При подаче на него напряжения изменяется его емкость, что смещает резонансную частоту КРР. Резонансная частота КРР определяет рабочую частоту f_0 НО, на которой осуществляется противоположенное ответвление мощности. Сдвиг резонансной частоты КРР относительно f_0 позволяет добиться сонаправленного ответвления мощности на той же рабочей частоте. В высоко-

направленном реконфигурируемом НО в качестве перестраиваемого элемента выбран варикап Microsemi (KV1993A) (рис. 4, а – С), значение емкости которого изменяется от 0.60 до 0.35 пФ при приложении напряжения от 1 до 8 В. При емкости варикапа 0.35 пФ входная мощность из плеча 1 передается в выходное плечо 2. В случае когда емкость варикапа равна 0.4 пФ, выходным является плечо 3. Результаты электродинамического моделирования структуры в двух состояниях показаны на рис. 4, б и в.

В настоящей статье изложена концепция реализации высоконаправленных ответвителей СВЧ-мощности на связанных линиях с различными типами направленности. Исследовано влияние резонансных структур (КРР и ГС) на характеристики НО на связанных линиях. Результаты электродинамического моделирования многослойных конструкций высоконаправленных ответвителей подтверждают корректность предложенного подхода. Дополнительная степень свободы реализована в реконфигурируемом НО с возможностью управления типом направленности при полном переизлучении мощности в выбранное выходное плечо.

Автор выражает признательность профессору И. Б. Вендик за плодотворные дискуссии и помощь в постановке задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ: учеб. пособие / под ред. Д. М. Сазонова. М.: Высш. шк., 1981. 295 с.
2. Hsu S.-K., Tsai C.-H., Wu T.-L. A novel miniaturized forward-wave directional coupler with periodical mushroom-shaped ground plane // IEEE Trans. microw. theory tech. 2010. Vol. MTT-58, № 8. P. 2277–2283.
3. Hsu S.-K., Yen J.-C., Wu T.-L. A novel compact forward-wave directional coupler design using periodical patterned ground structure // IEEE Trans. microw. theory tech. 2011. Vol. 59, № 5. P. 1249–1257.
4. Backward couplers using coupled composite right/left handed transmission lines / I. A. Mocanu, M. G. Banciu, N. Militaru et al. // Proc. of 8th Int. conf. on communications. Bucharest, 10–12 June 2010. Bucharest: IEEE, 2010. Vol. 1. P. 267–271.
5. Mongia R., Bahl I. J., Bhartia P. RF and microwave coupled-line circuits. Norwood: Artech house, 1999. 544 p.
6. Прудюс И. Н., Оборжицкий В. И. Новый подход к аналитическому расчету полосковых направленных ответвителей с полной симметрией структуры // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54, № 9. С. 12–23.
7. Munina I., Vendik I., Crnojevic-Bengin V. Design of 0-dB reconfigurable directional coupler using metamaterial structure // 7th Int. Congress on advanced electromagnetic materials in microwaves and optics. Bordeaux, 16–21 Sept. 2013. Bordeaux: IEEE, 2013. P. 139–141.

I. V. Munina

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Coupled line directional couplers with controlling type of directivity

The original design approach for 0-dB directional coupler with forward and backward coupling in two different frequency bands is proposed. The device is realized by loading the coupled line based directional coupler by split ring and mushroom resonators. Under discussion is the reconfigurable directional coupler with control of the type of directivity from forward to backward one and vice versa, provided by changing the capacitance of the varactor, inserted into the gaps of split ring resonators.

Directional coupler, directivity, control, DC blocking

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2015 г.

УДК 621.396.677

С. В. Балландович, Г. А. Костиков, Л. М. Любина, М. И. Сугак
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
 Н. В. Самбуров
 ОАО "Тайфун" (Калуга)

Характеристики широкополосной вибраторной фазированной антенной решетки дециметрового диапазона

Приведены результаты проектирования широкополосной эквидистантной фазированной антенной решетки (ФАР) дециметрового диапазона, построенной на основе вибраторных излучателей. Представлены частотные зависимости коэффициентов отражения в тракте питания элементов в составе бесконечной ФАР, а также частотные и динамические зависимости коэффициента усиления для широкополосной ФАР, состоящей из конечного числа элементов.

Фазированная антенная решетка, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, сканирование луча, динамические характеристики

Перспективным направлением развития радиолокационных станций (РЛС) дециметрового диапазона является создание широкополосных фазированных антенных решеток (ФАР) с дву-

мерным широкоугольным качанием луча, позволяющих совместить функции различных систем, в частности, систем радиолокации и связи [1].