

УДК 621.372

Ф.А. Михеев, Г.Г. Гошин, А.В. Фатеев, М.С. Ройтман

Сверхширокополосный направленный мост для векторного анализатора цепей диапазона СВЧ

Рассмотрена структурная схема векторного анализатора цепей и способы реализации направленного моста для формирования комплексного сигнала, пропорционального коэффициенту отражения. Рассмотренные способы реализации направленного моста исследованы на практике. В результате направленный мост имеет полосу рабочих частот от 20 МГц до 3,5 ГГц и направленность не хуже минус 16 дБ.

Ключевые слова: ВАЦ, направленный мост, симметрирующий трансформатор, делитель, эталонная нагрузка.

Векторный анализатор цепей (ВАЦ) предназначен для частотно-панорамного измерения комплексных S -параметров линейных многополюсных цепей, а также других характеристик нелинейных цепей. Структурная схема двухпортового векторного анализатора цепей приведена на рис. 1.

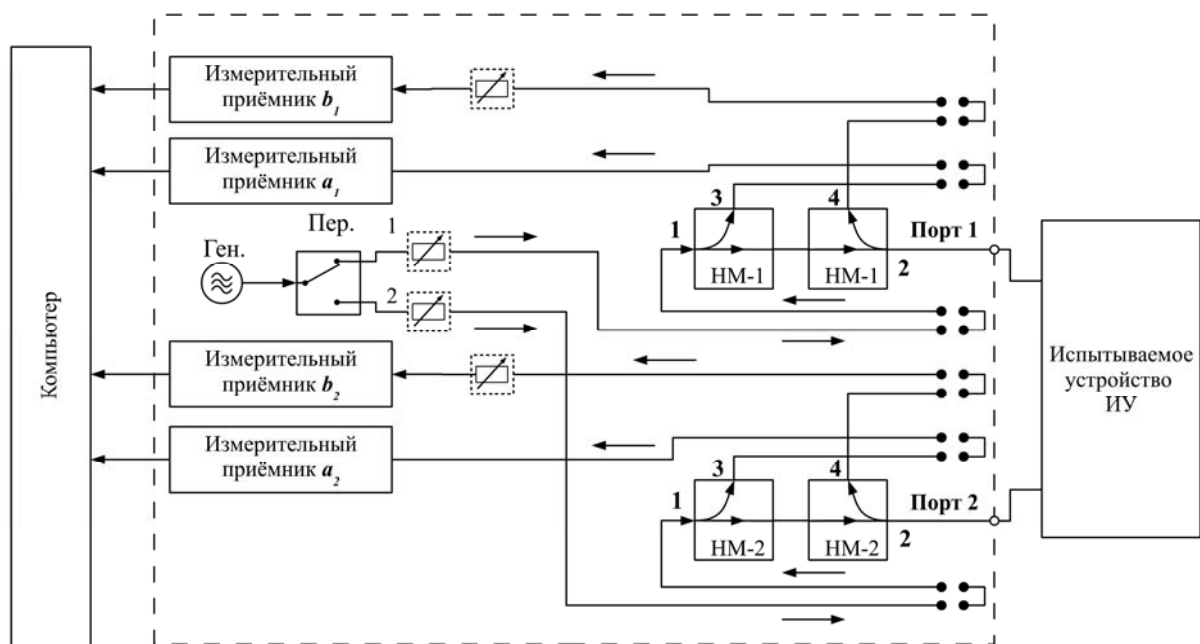


Рис. 1. Структурная схема двухпортового ВАЦ: 1 – входной порт; 2 – тестовый порт; 3 – эталонный порт; 4 – ответвленный порт

Принцип работы ВАЦ основан на воздействии на исследуемый объект перебором по измеряемому диапазону частот тестовыми сигналами переменной частоты и анализе откликов объекта на эти тестовые сигналы, получаемых со входа и/или выхода исследуемого объекта (режим четырёхполюсника) либо только со входа (режим двухполюсника).

Изображённая на рис. 1 структурная схема двухпортового ВАЦ работает следующим образом. Зондирующий сигнал вырабатывается панорамным (по частоте) генератором, в качестве которого чаще всего выступает синтезатор частот. В положении переключателя 1 зондирующий сигнал с эталонного порта 3 направленного моста 1 (НМ-1) поступает на приёмник a_1 и тестового порта 2 на первый порт испытываемого устройства (ИУ). Отраженный от ИУ сигнал, несущий информацию о коэффициенте отражения первого порта ИУ (о параметре s_{11}), поступает на НМ-1 и через его ответвленный порт 4 на приёмник отраженного сигнала b_1 . Прошедший через ИУ сигнал, несущий информацию о коэффициенте передачи ИУ (о параметре s_{21}), поступает на направленный мост 2 и

через его ответвленный порт 4 на приёмник b_2 . Для положения 2 переключателя ситуация будет аналогичной.

Разрабатываемый направленный мост применяется для формирования комплексного сигнала пропорционального коэффициенту отражения от испытуемого устройства. Поэтому от качества данного элемента напрямую зависит точность измерения комплексного коэффициента отражения. Следует отметить, что направленные мосты являются более предпочтительным решением по сравнению с направленными ответвителями на связанных линиях, если необходимо использование области частот ниже 500 МГц.

Основой направленного моста является измерительный мост Уитстона, общая схема которого представлена на рис. 2. Недостаток схемы, изображенной на рис. 2, заключается в том, что по принципу действия диагональ моста (AB), с которой снимается сигнал, не может быть заземлена, так как этим нарушается баланс моста. В то же время преобразующее устройство (детекторная или смесительная головка) обязательно имеет заземленный проводник. С помощью симметрирующего трансформатора симметричное диагональное напряжение может быть преобразовано в несимметричное, т.е. в потенциал относительно земли. Симметрирующий трансформатор, обеспечивающий переход от симметрично возбужденной диагонали к несимметричной коаксиальной линии, в значительной степени определяет диапазонные свойства моста.

Физически направленный мост, схема которого приведена на рис. 3, объединяет в себе такие устройства, как измерительный мост с высокой направленностью, основной частью которого является делитель, находящийся между точками 1–3 (резисторы R_1 и R_2), симметрирующий трансформатор (Тр1) и эталонную прецизионную нагрузку (Z_0).

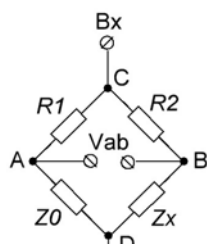


Рис. 2. Схема измерительного моста Уитстона

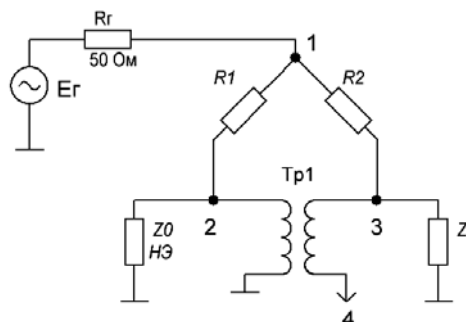


Рис. 3. Схема направленного моста

Из анализа схемы становится очевиден основной недостаток симметрирующего трансформатора – это шунтирование эталонного сопротивления Z_0 одной из катушек, что приводит к разбалансу измерительного моста. Решить данную задачу можно двумя способами:

1. Компенсировать влияние катушки индуктивности симметрирующего трансформатора и реализовать сверхширокополосную эталонную нагрузку.

2. Включить параллельно неизвестному сопротивлению Z_x катушку, частотная зависимость индуктивности которой будет такой же, как у катушки симметрирующего трансформатора.

На основании рассмотренных конструкций направленных мостов [1–4] можно сделать вывод о том, что реализация сверхширокополосной эталонной нагрузки более сложна, чем применение компенсационной индуктивности. Однако конструкции [2, 3], в которых применена сверхширокополосная эталонная нагрузка, имеют более высокую верхнюю граничную частоту по сравнению с конструкциями, в которых применяется компенсационная индуктивность. На сегодняшний момент известна максимальная верхняя граничная частота 26,5 ГГц для конструкции со сверхширокополосной эталонной нагрузкой и 4 ГГц для конструкции с компенсационной индуктивностью [1, 4]. Это позволяет сделать вывод о том, что в диапазоне частот до 4 ГГц целесообразнее применять конструкцию с компенсационной индуктивностью, а в диапазоне частот до 26,5 ГГц – конструкцию с частотно-независимой эталонной нагрузкой.

Основываясь на результатах, приведённых в [5], была проведена доработка экспериментального образца направленного моста с трансформатором на сосредоточенных параметрах. В топологию печатной платы были добавлены согласующие элементы, оптимизирована эталонная нагрузка и доработан трансформатор. Фотография печатной платы экспериментального образца показана на рис. 4. Доработка симметрирующего трансформатора была выполнена следующим образом: удалена

подложка 2 и уменьшено количество витков обмотки 3 (рис. 5). В результате доработки была увеличена верхняя граница диапазона рабочих частот до 3,5 ГГц и увеличена нижняя граница до 20 МГц.

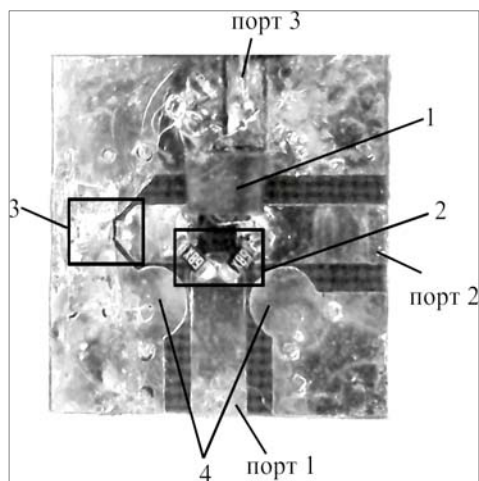


Рис. 4. Фотография печатной платы экспериментального образца: 1 – симметрирующий трансформатор, 2 – делитель, 3 – эталонная нагрузка, 4 – согласующие элементы

В доработанном экспериментальном образце $|s_{31}|$ не хуже -29 дБ, $|s_{21}|=|s_{32}|$ и равны -6 дБ. Частотная зависимость направленности экспериментального образца приведена на рис. 6. Данная доработка реализует первый способ компенсации влияния катушки индуктивности симметрирующего трансформатора посредством сверхширокополосной эталонной нагрузки.

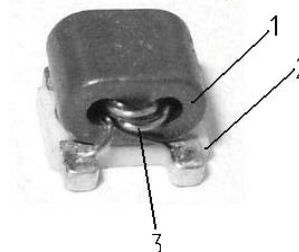


Рис. 5. Фотография симметрирующего трансформатора ETC1-1-13: 1 – сердечник, 2 – подложка, 3 – обмотки

Для реализации второго способа компенсации был перемотан симметрирующий трансформатор доработанного экспериментального образца направленного моста. В трансформаторе было увеличено количество витков обмотки 3 (рис. 5) и намотана дополнительная компенсационная обмотка. В результате доработки была уменьшена верхняя граница диапазона рабочих частот до 2,5 ГГц и уменьшена нижняя граница до 10 МГц. В доработанном экспериментальном образце $|s_{31}|$ не хуже -30 дБ, $|s_{21}|=|s_{32}|$ и равны -6 дБ. Частотная зависимость направленности экспериментального образца приведена на рис. 6.

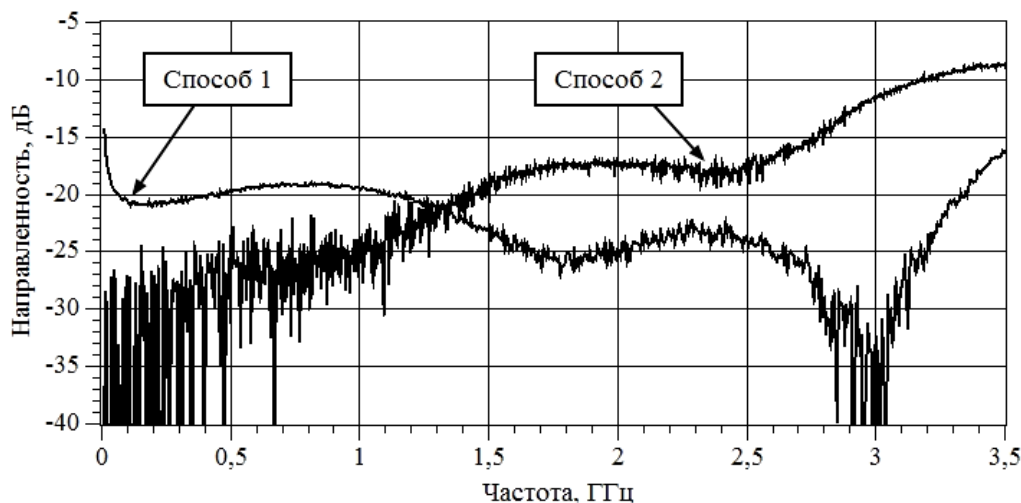


Рис. 6. Частотная зависимость направленности экспериментальных образцов

Сравнивая и анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать о том, что направленный мост, в котором применялась компенсационная индуктивность, имеет более лучшую направленность в диапазоне частот до 1,3 ГГц, чем мост, в котором была реализована сверхширокополосная эталонная нагрузка. Это связано с тем, что при использовании компенсационной индуктивности сопротивления эталонной нагрузки и тестируемого устройства получают практически одинаковыми и за счет этого мост остаётся в балансном состоянии.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07 сентября 2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Хибель М. Основы векторного анализа цепей / М. Хибель; пер. с англ. С.М. Смольского; под ред. У. Филипп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 500 с.
2. Patent US 4,588,970; May 13, 1986. Three section termination for an RF triaxial directional bridge / S. Bruce Donecker, Sebastopol; Julius K. Botka, Santa Rosa, both of Calif, assignor to Hewlett-Packard Company, Palo Alto, Calif.
3. Patent US 7,095,294 B2; Aug. 22, 2006. Directional bridge coupler / Uriel C.Fojas, Santa Rosa, CA (US), assignor to Agilent Technologies, Inc., Palo Alto, CA (US).
4. Patent US 5,150,063; Sep. 22, 1992. Bridge for measuring the reflection coefficient / Wolfgang Burkhard, Baierbrunn., Klaus Danzeisen, Gräfelting, both of Fed. Rep. of Germany., assignor to Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Fed. Rep. of Germany.
5. Михеев Ф.А. Сверхширокополосный направленный мост диапазона ОВЧ / Ф.А. Михеев, А.В. Фатеев // Научная сессия ТУСУР-2011: матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 192–194.

Михеев Филипп Александрович

Инженер ЗАО «НПФ«Микран»
Тел.: (382-2) 90-00-41
Эл. почта: LINFOX@mail2000.ru

Гошин Геннадий Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУРа
Тел.: (382-2) 70-15-18
Эл. почта: goshingg@svch.tusur.ru

Фатеев Алексей Викторович

Аспирант каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: (382-2) 70-15-18
Эл. почта: fateevav@svch.tusur.ru

Ройтман Марсель Самуилович

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных измерительных систем и метрологии НИТПУ
Тел.: (382-2) 41-75-27
Эл. почта: roitmanmarcel@rambler.ru

Miheev Ph.A., Goshin G.G., Fateev A.V., Roitman M.S.

Ultra wide band directional bridge for a VHF vector network analyzer

The article considers the block diagram of a vector network analyzer and ways of implementing directional bridge to form a complex signal which is proportional to the reflection coefficient. The considered ways of implementing directional bridge were investigated in practice. As a result, the directional bridge has a band of operating frequencies from 20 MHz to 3.5 GHz and the directivity is not worse than minus 16 dB.

Keywords: VNA, directional bridge, balanced-to-unbalanced transformer, divider, reference load.