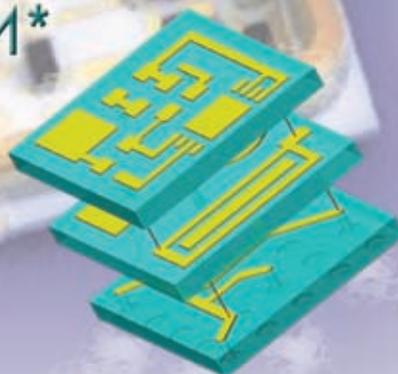


МНОГОСЛОЙНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МИКРОСХЕМЫ НА ОСНОВЕ LTCC-ТЕХНОЛОГИИ*

Специалисты ФГУП "Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи" (РНИИРС) продолжают делиться результатами разработки и изготовления СВЧ-устройств по технологии LTCC. В статье рассматриваются корректоры куполообразной АЧХ, модули усилителей с 3-дБ НО и корректорами АЧХ, а также модули управляемых устройств селекции L-диапазона, выполненных на элементах с распределенными параметрами.



Г.Егоров, С.Капкин, Л.Стедьмахович,
В.Трофименков, В.Хрипко
egoroww@mail.ru

КОРРЕКТОРЫ КУПОЛООБРАЗНОЙ АЧХ

Современные схемы корректоров амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) способны устранять различные искажения АЧХ СВЧ-трактов. На практике чаще всего приходится выравнивать наклонные характеристики. В первой части статьи, посвященной многослойным керамическим микросхемам, изготавливаемым на базе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики, была показана возможность реализации управляемого корректора наклона АЧХ тракта передачи информационного СВЧ-сигнала L-диапазона с регулировкой наклона до 8 дБ в диапазоне рабочих частот, превышающем октаву (0,95–2,15 ГГц). При использовании устройств с направленными ответвителями, выполненными на четвертьволновых связанных линиях, возникает проблема коррекции куполообразной АЧХ, типичной для коэффициента передачи ответвленного канала.

Как известно, короткозамкнутый полуволновый шлейф, включенный параллельно в линию передачи, вызывает провал

коэффициента передачи на центральной частоте [1]. Глубину полученного провала можно регулировать соответствующим выбором сопротивления резистора R, включенного последовательно со шлейфом (рис.1а). Такая схема, включенная параллельно в основную линию передачи, – пример простейшего корректора куполообразной характеристики (ККХ). Но ККХ этого типа не является согласованным [2]. Коррекцию узкополосных провалов можно осуществлять по схеме с подключением шлейфа через емкость связи [3].

Для получения согласованной схемы широкозонного корректора можно воспользоваться хорошо известной двойной балансной схемой, часто используемой при реализации согласованных усилителей, а также таких устройств, как управляемые аттенуаторы [4]. На основе расчета основных характеристик и спроектированной топологии была создана двойная балансная схема ККХ (рис.2). Устройство размером 28x14x1 мм на базе трехполоскового 3-дБ направленного ответвителя (3-дБ НО) реализовано по технологии LTCC на трехслойной структуре [5] (рис.3).

Для оптимизированной топологии ККХ вида, приведенного на рис.2, при ϵ_r керамики 7,8 получены следующие значения

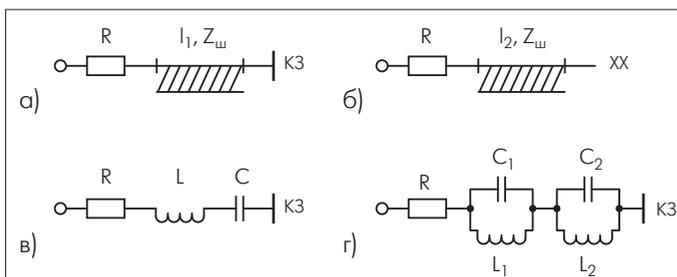


Рис. 1. Схемы корректирующих цепочек на основе: а) полуволнового шлейфа ($l_1 = \lambda/2$); б) четвертьволнового шлейфа ($l_2 = \lambda/4$) и сосредоточенных элементов (в, г)

*Часть 2 статьи: Егоров Г., Капкин С., Стедьмахович Л., Трофименков В., Хрипко В. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №3, с.60–65.

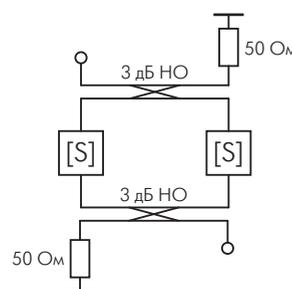


Рис. 2. Двойная балансная схема ККХ

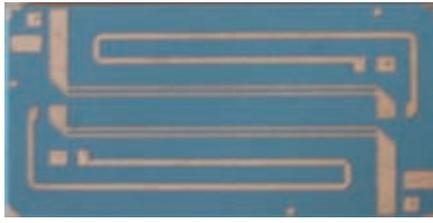


Рис.3. Плата балансного корректора куполообразной АЧХ

параметров корректирующей цепочки (см. рис. 1а): $l_1 = 40$ мм, ширина шлейфа $W_{ш} = 0,2$ мм, толщина подложки $h = 1$ мм, сопротивление резистора R для значений глубины провала в диапазоне 0,5–2 дБ – 200–80 Ом, соответственно. Для приведенных значений сопротивлений R КСВН входа и выхода макета корректора не превышал 1,3. Результаты теоретических расчетов и экспериментальные кривые приведены на рис.4.

УСТРОЙСТВО УСИЛЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ АЧХ

Усилитель с регулируемым корректором АЧХ

До сих пор рассматривались отдельные узлы и устройства на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Примером интегрированного СВЧ-модуля L-диапазона может служить устройство усиления и коррекции АЧХ, выполненное по технологии LTCC на трехслойной структуре (рис.5). Схема устройства содержит входной усилитель и два последовательно соединенных управляемых корректора наклона АЧХ.

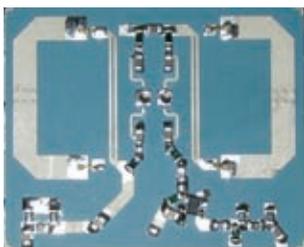


Рис.5. Модуль устройства усиления и коррекции АЧХ

При коэффициенте передачи, соответствующем сопротивлению $p-i-n$ -диодов, при котором наклон АЧХ скорректирован

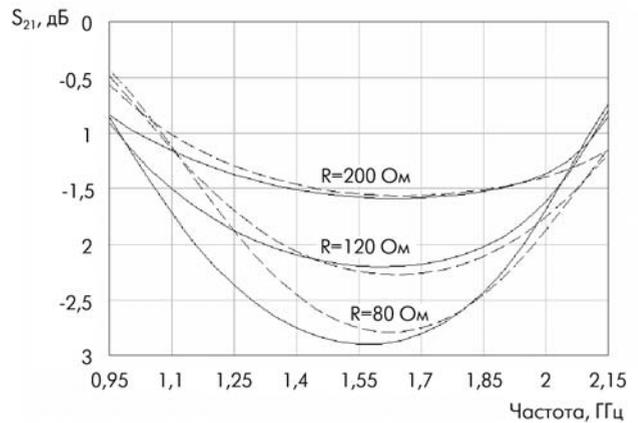


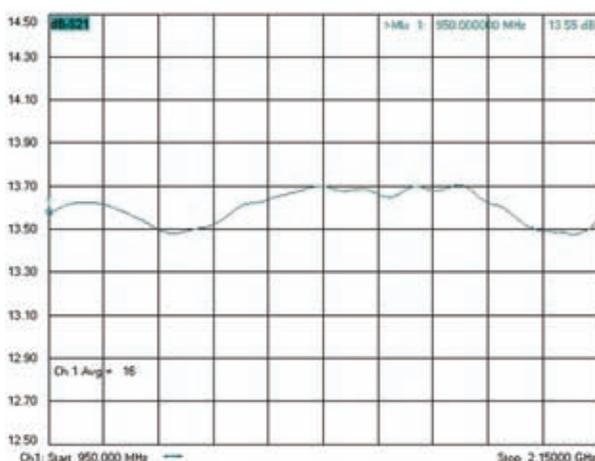
Рис.4. Коэффициент передачи ККХ S_{21}

— результаты расчета
 - - - результаты эксперимента

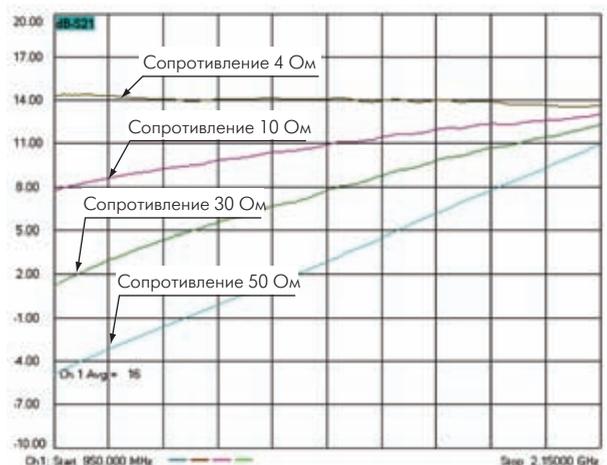
управляемыми корректорами (ровное состояние АЧХ, рис.6а), получены следующие параметры модуля: коэффициент усиления 13,6 дБ, неравномерность АЧХ в полосе частот 0,95–2,15 ГГц – 0,2 дБ, коэффициент шума – не более 2,4 дБ. На рис.6б приведены кривые, соответствующие четырем значениям сопротивления $p-i-n$ -диодов. Кривая, соответствующая открытому состоянию диодов (сопротивление 4 Ом), имеет обратный наклон в 1 дБ. При максимальном сопротивлении диодов (50 Ом) наклон максимален и равен 16 дБ. Таким образом, модуль позволяет регулировать наклон в пределах до 17 дБ, при этом потери на верхней частоте не превышают 3 дБ.

Балансный усилитель с корректором АЧХ

На основе предварительной проработки отдельных узлов, выполненных по технологии LTCC, разработан и изготовлен балансный усилитель, реализованный по типовой структурной схеме (рис.7) с широкополосными входным и выходным квадратурными направленными ответвителями (КНО) на связанных микрополосковых линиях с лицевой связью и с корректором АЧХ. Усилитель проектировался на два диапазона частот – 1500–2400 МГц и 950–2000 МГц. Структура КНО (рис.8)



а)



б)

Рис.6. Коэффициент передачи: а) в ровном положении АЧХ; б) для четырех значений сопротивления $p-i-n$ -диодов

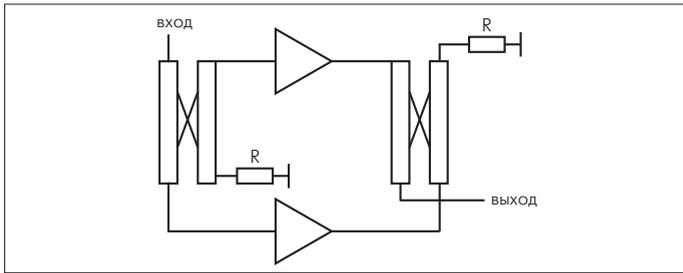


Рис.7. Структурная схема балансного усилителя

рассчитывалась с помощью подпрограммы EM-Sight, входящей в пакет программ Microwave Office. При используемых в расчете значениях $\epsilon_r = 7,8$, толщине диэлектрика между линиями связи 0,14 мм и общей толщине подложки 1,0 мм длина связанных линий усилителя первого диапазона равна 12 мм, второго – 18 мм, ширина линий – 0,37 мм. Измерения характеристик отдельного КНО показали их удовлетворительное соответствие расчетным данным: диссипативные потери не превышали 0,5 дБ, разбаланс каналов составил $\pm 0,65$ дБ, различие фазы коэффициента передачи между каналами – 3 градуса, развязка – не менее 20 дБ. При расчете модуля, состоящего из микросхемы усилителя, резисторов, конденсаторов и других сосредоточенных элементов, с помощью подпрограммы Schematics, также входящей в пакет программ Microwave Office, оспользовался полученный при расчете КНО файл S-параметров.



Рис.8. Структура КНО

КСВН входа и выхода усилителя, изготовленного на основе КНО с длиной связанных линий 12 мм и микросхем СВЧ-усилителя SGA6586 компании Sirenza Microdevices, в полосе пропускания 1500–2400 МГц не превышал 1,3. Коэффициент передачи в диапазоне частот практически соответствовал технической документации на микросхему. Измеренный коэффициент шума усилителя в приведенной полосе частот не превысил 3,8 дБ (см. рис.7). Полоса пропускания усилителя на основе КНО с длиной связанных линий 18 мм и микросхем SGA4286 составила 950–2150 МГц, КСВН входа и выхода – не более 1,4. Рассмотренные усилители выпускаются серийно с хорошей воспроизводимостью электрических характеристик.

На основе разработанных КНО были изготовлены корректоры наклона для компенсации неравномерности коэффициента передачи усилителей и кабельных линий передачи [6] (рис.9).

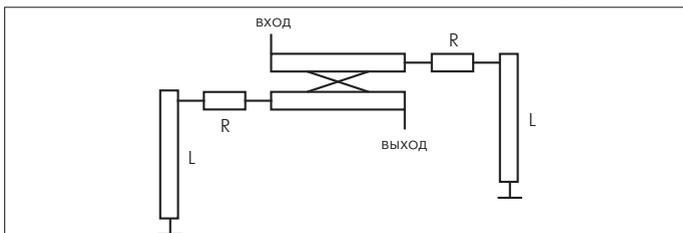


Рис.9. Структурная схема корректора наклона АЧХ

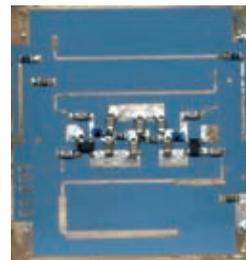


Рис.10. Усилитель с корректором наклона АЧХ

Требуемый наклон частотной характеристики задавался расчетом значений сопротивления резисторов R, длины линии L и ее волнового сопротивления. Корректор наклона встраивался в усилитель, выполненный по структурной схеме, приведенной на рис.7. В результате была достигнута неравномерность коэффициента передачи усилителя не более 1 дБ в диапазоне частот 0,95–2,05 ГГц. Размер платы усилителя с корректором равен 30x30x1 мм (рис.10).

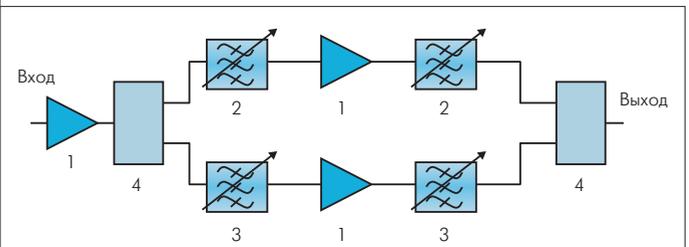


Рис.11. Структурная схема перестраиваемого фильтра диапазона 950–2000 МГц:

- 1 – усилитель MGA81563;**
- 2 – перестраиваемая ячейка фильтра диапазона 950–1400 МГц;**
- 3 – перестраиваемая ячейка фильтра диапазона 1400–2000 МГц;**
- 4 – СВЧ-коммутатор SW439**

УПРАВЛЯЕМЫЕ УСТРОЙСТВА СЕЛЕКЦИИ

Пример более сложного интегрированного СВЧ-модуля, изготовленного по технологии LTCC, – разработанный специалистами РНИИРС перестраиваемый фильтр на диапазоны 950–1400 МГц и 1400–2000 МГц, выполненный по структурной схеме, приведенной на рис.11. Фильтрующие элементы на основе симметричных линий (рис.12) с элементами управления размещены в объеме подложки толщиной 2,4 мм, которая набрана из 12 слоев керамики 951PX толщиной 0,254 мм в "сыром" виде. В качестве конденсаторов C фильтров диапазонов 950–1400 МГц и 1400–2000 МГц использовались, соответственно, варикапы BB833 и BB857 фирмы Siemens. Расчет и оптимизация отдельной ячейки и всего перестраиваемого фильтра проводился с помощью пакета Microwave Office. Применение усилителя на входе позволило снизить коэффициент шума

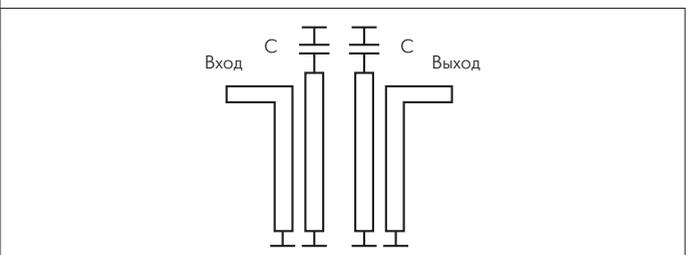


Рис.12. Структурная схема ячеек фильтра

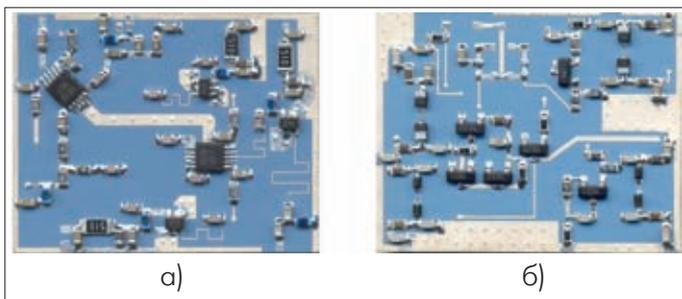


Рис. 13. Перестраиваемый фильтр диапазона 950–2050 МГц: вид сверху (а); вид снизу (б)

фильтра и обеспечить положительный коэффициент передачи устройства.

Коэффициент передачи СВЧ-модуля изменялся в пределах от 8 дБ на частоте 950 МГц до 14 дБ на частоте 2050 МГц, средняя полоса фильтра составила 60 МГц по уровню 1,5 дБ, коэффициент шума – не более 6 дБ, подавление при отстройке 250 МГц от центральной частоты – не менее 40 дБ. Размеры модуля (рис. 13) – 32х25х2,4 мм.

Важные параметры перестраиваемого фильтра – его динамические характеристики, одна из которых описывается значением IP3 по выходу (Output Third Order Intercept Point). Значение IP3 по выходу перестраиваемой ячейки фильтра при использовании варикапов ВВ833 и ВВ857 в среднем равно 9 дБмВт [7], в случае применения варикапов ВВ555 – в среднем 20 дБмВт.

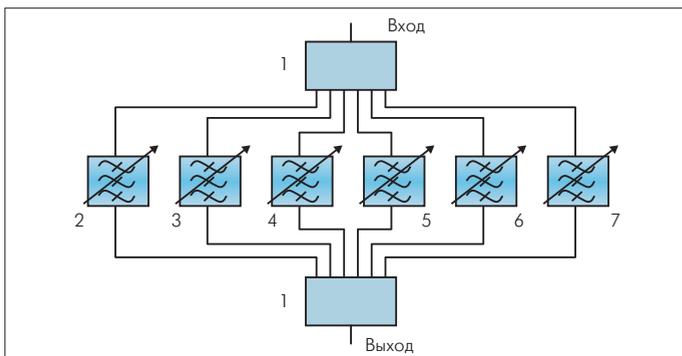


Рис. 14. Структурная схема фильтра на переключаемых секциях. 1 – СВЧ коммутатор НМС253QS24; 2-7 – фильтрующие ячейки

Для увеличения динамических характеристик фильтра предложен вариант на переключаемых секциях пассивных фильтрующих ячеек пятого порядка, перекрывающих диапазон 950–2000 МГц (рис. 14). Центральные частоты фильтрующих ячеек – 1070, 1255, 1425, 1595, 1765, 1935 МГц. Полоса пропускания каждой фильтрующей ячейки по уровню 1 дБ – 240 МГц, минимальные потери в фильтрующей ячейке – 1,5 дБ. Габариты устройства – 40х15х5 мм.

В следующей части статьи вниманию читателей будут представлены результаты разработки и изготовления по технологии LTCC фазовращателей и широкополосных противофазных делителей мощности, реализованных на связанных линиях с лицевой связью, а также ФНЧ на сосре-

доточенных элементах и ППФ на связанных линиях и сосредоточенных элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: Учебник для вузов по специальности "Электронные приборы и устройства". – М.: Высш. шк., 1990.
2. Креницкий А.П., Мещанов В.П. Сверхширокополосные микроволновые устройства. – М: Радио и связь, 2001.
3. СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение/ Под ред. Уотсона Г. – М.: Мир, 1972.
4. Трофименков В.В., Хрипко В.А. Корректор наклона АЧХ L-диапазона, выполненный на трехслойной структуре. – Общие вопросы радиоэлектроники, ФГУП "РНИИРС", 2006, вып.2.
5. Пат. 2238605 РФ. Управляемый микрополосковый корректор наклона амплитудно-частотной характеристики/ Вахтин Ю. В., Капкин С. П., Прищенко А. М., Токарева Н. В. – Открытия. Изобретения, 2004.
6. А.С. №1700647 СССР. Регулируемый корректор амплитудно-частотных искажений/Вахтин Ю.В., Капкин С.П.
6. Капкин С.П., Стельмахович Л.А., Твердохлеб Е.М. Перестраиваемые фильтры L-диапазона. – Общие вопросы радиоэлектроники. – ФГУП "РНИИРС", 2005, вып.1.