

УДК 621.372

И. Н. БОНДАРЕНКО, А. С. ГНЕСЬ, В. В. ПОКУСАЙ

**РЕЖЕКТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ СВЧ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ
КОМПЕНСАЦИЕЙ**

Повышение стабильности частоты задающих генераторов передающих устройств и гетеродинов приемных устройств предъявляет особые требования к элементам селекции и режекции. Разработ-

чикам радиоэлектронной аппаратуры необходимо решить задачу узкополосной фильтрации сигнала помехи, расположенного по частоте вблизи полезного сигнала. Режекцию нежелательного сигнала необходимо осуществлять таким образом, чтобы искажения спектра полезного сигнала были минимальны. Полоса режекции фильтрующего устройства должна быть сравнима с шириной спектра сигнала помехи, а глубина режекции — обеспечивать существенное подавление помехи.

Большинство режекторных фильтров волноводного, коаксиального или полоскового исполнения имеют конструкцию, представляющую собой передающую линию, к которой подсоединены резонансные элементы, настроенные на частоту режектируемого сигнала. Эквивалентную схему таких фильтров представляют в виде последовательных контуров, которые включены в линию параллельно [1]. Используя такую схему, можно достичь высоких уровней режекции сигнала, но полоса режектируемых частот будет в десятки и даже сотни раз больше полосы пропускания отдельного резонатора, входящего в состав схемы режекторного фильтра при нагруженной добротности, близкой к собственной. Это обусловлено тем, что высокие уровни режекции обеспечиваются только при больших значениях коэффициентов связи резонаторов с передающей линией и использовании многоконтурных систем [1].

Цель работы — разработка и исследование схем СВЧ-фильтров, с помощью которых эффективную режекцию сигнала можно было бы осуществлять в значительно узких полосах частот. В основу их положено более полное использование свойств одиночного резонатора.

Рассмотрим проходной резонатор, выход которого подключен к согласованной нагрузке. С учетом соотношений, приведенных в работе [2], коэффициент передачи T одиночного резонатора запишем так:

$$T = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} \frac{1}{\left[1 + Q_n^2 \left(\frac{2d\omega}{\omega_0}\right)^2\right]}, \quad (1)$$

где $\beta_1 = Q_0/Q_1$, $\beta_2 = Q_0/Q_2$ — коэффициенты связи резонатора с линией передачи со стороны генератора и нагрузки соответственно; Q_0 , Q_1 , Q_2 — собственная и внешние добротности резонатора; $Q_n = \frac{Q_0}{1 + \beta_1 + \beta_2}$ — нагруженная добротность резонатора; $d\omega$ — отклонение частоты сигнала от частоты резонатора ω_0 .

Переходное затухание (в децибелах)

$$L = 10 \lg \left\{ \frac{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} \left[1 + Q_n^2 \left(\frac{2d\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] \right\}.$$

С учетом соотношения (1) и того, что $\beta_2 = Q_0/Q_2 = P_n/P_p$, где P_n , P_p — мощности сигнала, рассеиваемые в нагрузке и резонаторе,

для $K = \frac{P_n + P_p}{P_0}$ (P_0 — мощность сигнала, поступающего на вход резонатора) получим выражение $K = \frac{4\beta_1(1+\beta_2)}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{\left[1 + Q_n^2 \left(\frac{2d\omega}{\omega_0}\right)^2\right]}$. (2)

Пользуясь выражением (2), установим затухания сигнала (в децибелах) в системе резонатор — согласованная нагрузка

$$L = 10 \lg(1 - K) = 10 \lg \left\{ 1 - \frac{4\beta_1(1+\beta_2)}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{\left[1 + Q_n^2 \left(\frac{2d\omega}{\omega_0}\right)^2\right]} \right\}. \quad (3)$$

Максимальное затухание в такой системе при $4\beta_1(1+\beta_2)/(1+\beta_1+\beta_2)^2 = 1$.

Это условие выполняется, если и $\beta_2 = \beta_1 - 1$ и коэффициент связи резонатора по входу не меньше единицы ($\beta_1 \geq 1$).

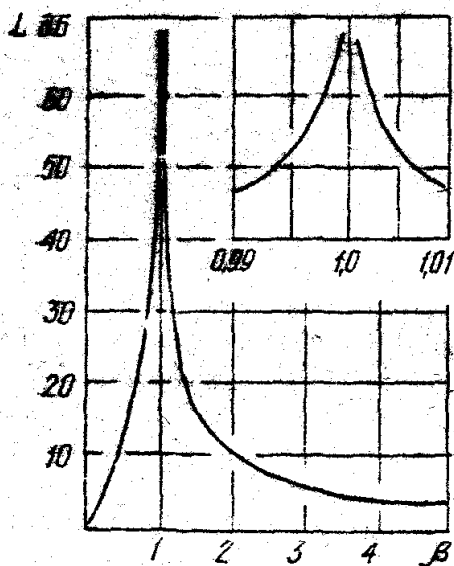


Рис. 1

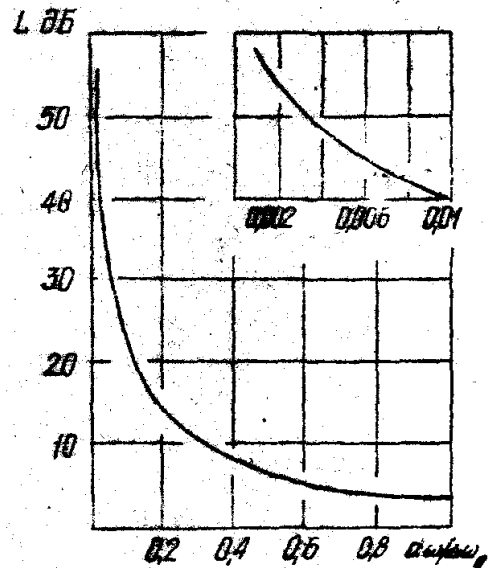


Рис. 2

Для окончательного включения резонатора формулу (3) можно представить в виде $L = 10 \lg \left\{ 1 - \frac{4\beta}{(1+\beta)^2} \frac{1}{\left[1 + Q_n^2 \left(\frac{2d\omega}{\omega_0}\right)^2\right]} \right\}$. (4)

На рис. 1, 2 изображены графики зависимости значения L от β при $d\omega = 0$, L от $d\omega/\Delta\omega_0$ при $\beta = 1$, для окончательного включения резонатора.

Максимальная режекция (рис. 1) на фиксированной частоте достигается при $\beta = 1$. Для обеспечения режекции на уровне ~ 50 дБ необходимо поддерживать значение $\beta = 1$ с точностью до $\pm 0,005$. Рабочая полоса частот составит при этом 0,002 от полосы пропускания резонатора — график $L(d\omega/\Delta\omega_0)$, а на уровне -3 дБ будет равна полосе пропускания резонатора $\Delta\omega_0$.

Возможности узкополосной фильтрации, предоставляемые одиночным резонатором с окончательным включением, можно использо-

вать, если применить схемы, в которых сигнал, отраженный от резонатора, поступает в нагрузку.

Рассмотрим схему (рис. 3,а). Сигнал источника СВЧ-колебаний 1 поступает в плечо I циркулятора 2, к плечу II подсоединен резонатор 3, а плечо III соединено с нагрузкой 4. Подавление сигнала, проходящего через устройство в нагрузку при идеальности характеристик циркулятора 3, описывается соотношением (4) и графиками

(рис. 1, 2). Реальные циркуляторы не обеспечивают развязку более 30 дБ. Для массовых образцов эта величина ~ 20 дБ [3]. Следовательно, на выходе реального устройства (рис. 3,а) будет сиг-

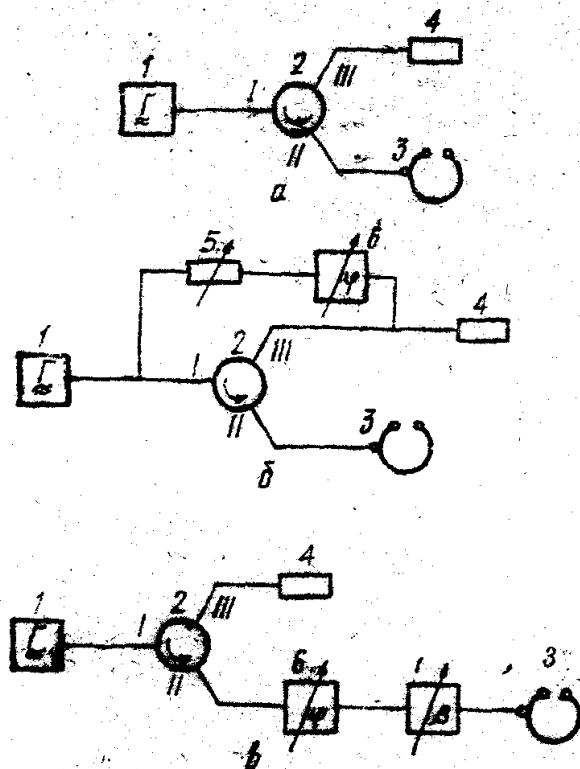


Рис. 3

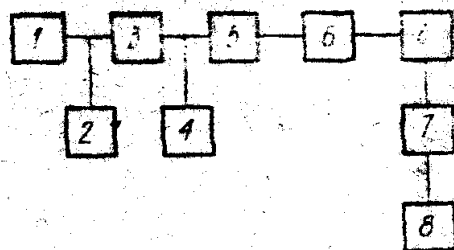


Рис. 4

нал, непосредственно прошедший из плеча I в плечо III циркулятора. Если учесть сложность достижения связи с резонатором очень близкой к единице, а значения $d\omega = 0$, то на выходе устройства также будет сигнал, появившийся за счет отражения от резонатора. Таким образом, на выходе всегда остается неподавленная часть сигнала, величина которой зависит от характеристик циркулятора и резонатора.

Подавление оставшегося сигнала предлагается осуществлять путем создания на выходе устройства дополнительного равноамплитудного и противофазного сигнала, т. е. путем амплитудно-фазовой компенсации. Достигается это ответвлением части сигнала с входа устройства через переменный аттенюатор 5 и перестраиваемый фазовращатель 6 на его выход (рис. 3,б). Аттенюатор и фазовращатель необходимы для подбора амплитуды и фазы компенсирующего сигнала. Если сигнал, прошедший на выход устройства непосредственно через циркулятор, будет на два-три порядка меньше, чем входной сигнал, можно утверждать, что потери из-за ответвления дополнительного компенсирующего сигнала невелики.

Используя сигнал, отраженный от резонатора, для амплитудно-фазовой компенсации сигнала, прошедшего непосредственно из плеча I в плечо III циркулятора, можно уменьшить потери по-

ленного сигнала, а схему устройства упростить (рис. 3,в). Для формирования компенсирующего сигнала между плечом *II* циркулятора и резонатором включается перестраиваемый фазовращатель 6 и устройство перестройки связи 7. Необходимая амплитуда сигнала определяется изменением связи с резонатором (рис. 1), фаза — фазовращателем. Например, развязка между плечом *I*, *III* циркулятора ~ 20 дБ, связи с резонатором соответственно соотношению (4) и графиком (рис. 1,2), 0,8 или 1,2

Экспериментальное исследование фильтров с амплитудно-фазовой компенсацией проводилось в трехсантиметровом диапазоне. Блок-схема измерительной установки изображена на рис. 4. Сигнал высокостабильного перестраиваемого СВЧ-генератора 1, в качестве которого используется стабилизированный отражательный клин-строн с относительной нестабильностью частоты $\sim 10^{-9}$ за 1 ч и выходной мощностью ~ 50 мВт, подается на вход схемы режекторного фильтра 5. Сигнал, проходящий через фильтр на резонансной частоте резонатора, должен быть минимальным. Индикация амплитуды сигнала осуществляется измерительным приемником 7 типа ГБ-10 и подсоединенным к нему осциллографом 8 типа С1-48Б. Затем частота генератора 1 изменяется за пределы рабочей полосы частот фильтра 5, калиброванными аттенуаторами 6 типа ДЗ-33А устанавливается уровень сигнала на входе измерительного приемника, равный уровню сигнала при совпадении частоты генератора с частотой настройки фильтра. С помощью аттенуатора 3 и индикатора мощности 4 выходная мощность измерительного генератора поддерживается постоянной. Разность показаний калиброванных аттенуаторов 6 определяет значение глубины режекции. Значение полос режекции находим путем уменьшения затухания, вносимого аттенуаторами 6, на заданное значение и измерение соответствующих частот перестраиваемого генератора 1 электронно-счетным частотометром 2 типа ЧО-7.

Резонатор фильтра изготавливался из отрезка прямоугольного волновода и отделялся от передающего волновода диафрагмой из медной фольги. Добротность резонатора составляла $\sim 3 \cdot 10^3$. Ферритовый циркулятор, использовавшийся в схеме режекторного фильтра, имел развязку между плечами ~ 20 дБ.

Для схемы, собранной в соответствии с рис. 3, подавление сигнала на резонансной частоте резонатора не превышает 20 дБ, в то время как для двух других схем величина подавления сигнала свыше 95 дБ. Измерения полос режекции на уровне подавления сигнала 3; 30; 50 и 60 дБ дали соответственно $4 \cdot 10^6$; $1,5 \cdot 10^6$; $1,6 \cdot 10^4$ и $8 \cdot 10^3$ Гц.

Список литературы: 1. Модель А. М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. — М.: Связь, 1967. — 352 с. 2. Альтман Дж. Устройства сверхвысоких частот/Пер. с англ. И. В. Лебедева. — М.: Мир, 1968. — 487 с. 3. Карбовский С. Б., Шахгеданов В. Н. Ферритовые циркуляторы и вентили. — М.: Сов. радио, 1970. — 72 с.

Поступила в редколлегию 16.08.83.