

85 к.



Издательство « Связь »

Научно-техническое общество  
радиотехники, электроники и связи  
им. А.С. Попова

# АНТЕННЫ

28

$\epsilon_{\phi_1} = 12$ ;  $\epsilon_{d_1} = 9,8$ ;  $\kappa_2 = 0$ ;  $z_0 = 50$  Ом;  $4\pi M_s = 2100$  гс;  $\text{tg } \delta \epsilon_{d_1} = 3 \cdot 10^{-4}$ . На рис. 2 показана зависимость вносимого затухания на частоте  $\omega_0$  в функции от  $\text{tg } \delta \epsilon_{\phi}$  при различных значениях  $\mu_2$ . На рис. 3, 4, 5 приведены частотные характеристики циркулятора при различных

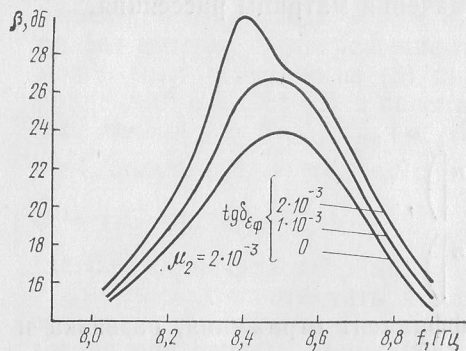


Рис. 4

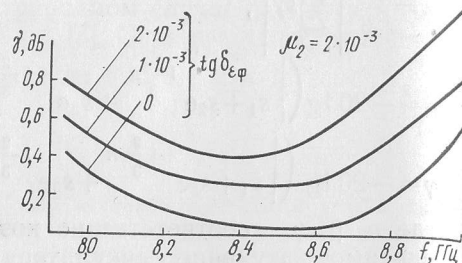


Рис. 5

значениях  $\text{tg } \delta \epsilon_{\phi}$ . Как видно из графиков, диссипативные потери оказывают существенное влияние не только на затухание, но и на  $K_{св}$  и развязку при значениях  $\text{tg } \delta \epsilon_{\phi} > 10^{-3}$ , поэтому их необходимо учитывать при определении оптимальных размеров циркулятора. На основании изложенной в статье методики возможно построение машинной программы определения оптимальных размеров циркулятора, учитывающей влияние поглощения на параметры устройства. В частности, процесс оптимизации может заключаться в минимизации максимального коэффициента отражения в заданной полосе частот при ограничении на максимально допустимое вносимое затухание. Однако обсуждение этих вопросов выходит за рамки настоящей статьи.

**Заключение 1.** Предложенная методика расчета позволяет рассчитывать параметры микрополоскового Y-циркулятора на ферритовой пленке с учетом поглощения, а также может быть использована для расчета широкого класса волноводных устройств.

Полученные формулы дают возможность определять все интересующие разработчика характеристики и могут служить основой для машинного проектирования циркуляторов, предназначенных для интегральных СВЧ схем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейфец С. Б., Расчет микрополоскового циркулятора на ферритовой пленке. — В кн.: Антенны./Под ред. А. А. Пистолькорса. М.: Связь, 1973, вып. 18, 140—146.
2. Никольский В. В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967.
3. Ахиезер Н. И. и Глазман Н. М. Теория линейных операторов в гильбертовом пространстве. М.: Наука, 1966.

Поступила в редакцию 7/IV 1978 г., после доработки 24/II 1979 г.

## Сравнение частотных характеристик полосковых систем распределения мощности СВЧ

**Введение.** Многоканальные полосковые делители или системы распределения мощности (СРМ) выполняются из разветвляющихся линий (СРМ I типа) и двухканальных элементов деления или мостовых устройств (СРМ II типа).

При анализе частотных характеристик СРМ I типа сложное разветвление линий передачи рассматривается как многоступенчатый трансформатор между  $N$  выходными и одной входной нагрузками ( $N$  — число выходов СРМ). Методика проектирования СРМ I типа описана в [1] и аналогична расчету многоступенчатого трансформатора. Недостатками СРМ I типа являются большие значения коэффициентов отражения выходов, которые с увеличением числа каналов стремятся к единице, и волновых сопротивлений полосковых линий, что затрудняет практическую реализацию систем. Первый недостаток СРМ устраняется введением в определенные места разветвлений балластных резисторов [2]. Теоретически в разветвленной СРМ с балластными резисторами можно получить требуемый коэффициент отражения входа в заданной полосе частот, развязку между выходными каналами, равную или больше 20 дБ, — в полосе частот 30%, КСВН выхода, равный или меньший 1,2—1,4, — в полосе частот 60%. В практических конструкциях характеристики СРМ, близкие к теоретическим, получаются для волн, превышающих в 30—40 раз длину резисторов.

Системы распределения второго типа, представляющие соединение двухканальных элементов деления или мостовых устройств, получили наибольшее распространение. Тем не менее до недавнего времени, расчет характеристик СРМ представлял сложную задачу, но с появлением эффективных вычислительных алгоритмов [3, 4, 5] решение подобных задач стало возможным с применением ЭВМ.

Целью настоящей работы является сравнение частотных характеристик СРМ II типа, выполненных из различных элементов деления, и выработка практических рекомендаций для проектирования СРМ. Для определенности рассматриваются СРМ параллельного типа с равномерным делением мощности между выходными каналами. СРМ сравниваются по КСВН входа и выходов, развязкам между выходными каналами  $S_{23}$ , дБ, амплитудам коэффициентов передачи  $S_{12}$ , дБ. Указанные параметры рассматриваются как функции относительной частотной расстройки  $\delta = \Delta f/f_0$ , где  $\Delta f$  — приращение частоты;  $f_0$  — центральная частота. Приведенные далее частотные характеристики рассчитаны с помощью циклического алгоритма [4].

**Элементы деления для СРМ.** При выборе элементов деления для СРМ определяющим является уровень передаваемой мощности, практическая реализуемость элементов в многоканальной системе и электрические параметры в полосе частот.

Для СРМ, работающих на нагрузки с переменными коэффициентами отражений, как правило, применяют элементы деления, содержащие балластные нагрузки. В балластных нагрузках рассеивается мощность, отраженная от полезных нагрузок при работе СРМ в неблагоприятном режиме или из-за недостаточного высокого качества изготовления системы. Максимальная мощность, рассеиваемая в балластных нагрузках любого двухканального элемента деления СРМ при самом неблагоприятном режиме работы системы, равна мощности, поступающей на вход элемента деления.

В большинстве случаев, линия передачи выдерживает значительно большие уровни мощности, чем балластные нагрузки. Поэтому при выборе элемента деления необходимо оценивать мощность, поступающую в балластные нагрузки, и способность нагрузок рассеивать эту мощность. Нагрузки в элементах деления могут быть включены последовательно [6] (рис. 1б, в) и параллельно [7, 8, 9] (рис. 1а, г, д). Нагрузки, включенные параллельно, могут рассеивать

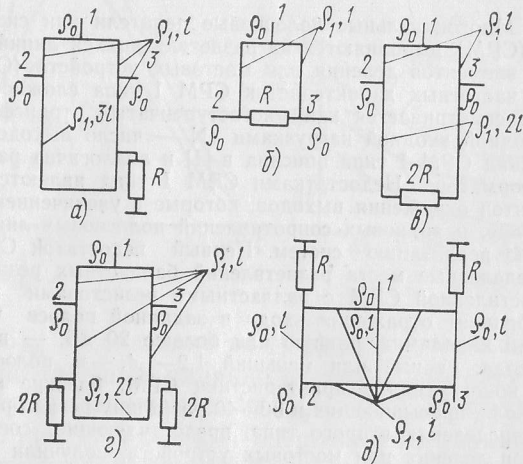


Рис. 1

вать десятки и сотни ватт, а включенные последовательно — единицы ватт.

Как известно, СРМ на  $N$  каналов состоят из  $N-1$  элементов деления. На конструкцию СРМ обычно накладываются определенные ограничения. Поэтому элементы деления должны размещаться в устройствах определенных конструкций и не должны создавать технологические трудности при изготовлении. Наиболее полно таким требованиям отвечают элементы, выполненные из четвертьволновых отрезков линий с волновыми сопротивлениями 30—100 Ом.

Электрические параметры элементов деления связаны с характеристиками СРМ в целом. Эта связь очень проста при узких полосах пропускания 1—3%. В узкой полосе частот важнейший параметр СРМ — коэффициент передачи канала, определяется как произведение коэффициентов передачи соответствующих каналов элементов деления, КСВН входа и выходов близки к единице, развязки между выходными каналами больше 30 дБ. В широкой полосе частот (больше 5%) между элементами СРМ имеют место многократные переотражения и связь между параметрами элементов и характеристиками системы выражается сложными математическими зависимостями [4]. В этом случае о пригодности элемента деления для построения многоканальной системы можно судить только после исследования характеристик СРМ в целом.

На основании названных выше критериев оценки элементов деления в дальнейшем анализируются СРМ, построенные из кольцевых мостов (рис. 1а), двухканальных направленных делителей (рис. 1б, в), симметричных кольцевых мостов (рис. 1г), мостов на сочлененных квадратах (рис. 1д). На рис. 1 обозначено: 1 — входы элементов деления; 2, 3 — выходы элементов деления;  $\rho_1 = \sqrt{2\rho_0}$  — волновые сопротивления линий передачи;  $l = \lambda_0/4$  — длины линий передачи ( $\lambda_0$  — длина волны на центральной частоте);  $R, 2R$  — сопротивления балластных нагрузок.

Частотные характеристики СРМ. В таблице приведено распределение фаз и амплитуд между 16 выходами СРМ, выполненной из кольцевых мостов. При относительных частотных расстройках  $\delta = \pm 0,1$  СРМ имеет разброс фаз между каналами 24° и разброс амплитуд 3,1 дБ. При относительных частотных расстройках  $\delta = \pm 0,15$  разброс фаз на выходах системы достигает 36°, а амплитуд — 3,5 дБ. Другие характеристики СРМ при  $\delta = \pm 0,15$ : КСВН входа меньше, равен 1,7; развязки между выходными каналами больше, равны 20 дБ; неравномерность амплитуд коэффициентов передачи — 1,8 дБ.

Таблица

Наименование параметра	Значение параметра							
	1	2	3	4	5	6	7	
$C_{it}$ , дБ, при $\delta = \pm 0,1$ $\delta = \pm 0,15$	10,4	11,3	11,3	12	11,3	12	12	
	10,2	11	11	12	11	12	12	
$\Delta\varphi^\circ$ при $\delta = \pm 0,1$ $\delta = \pm 0,15$	0	6	6	12	6	12	12	
	0	8	8	17	8	17	17	
Значение параметра								
8	9	10	11	12	13	14	15	16
12,4	11,3	12	12	12,7	12	12,7	12,7	13,5
12,9	11	12	12	12,9	12	12,9	12,9	13,7
18	6	12	12	18	12	18	18	24
26	8	17	17	26	17	26	26	36

Отметим, что с увеличением числа каналов разброс амплитуд и фаз коэффициентов передачи возрастает. Недостатками СРМ на кольцевых мостах являются значительные разбросы амплитуд и

фаз коэффициентов передачи каналов, большая неравномерность амплитуд коэффициентов передачи в полосе частот. Достоинство СРМ — способность передавать значительные уровни мощности, поскольку имеется возможность выполнить балластные нагрузки кольцевых мостов выносными.

СРМ, выполненные из двухканальных направленных делителей, имеют идентичные коэффициенты передачи каналов теоретически в неограниченной полосе частот. На рис. 2 приведены некоторые характеристики СРМ на 512 каналов, построенной из делителей, представленных на рис. 1в: 1 — огибающая максимумов КСВН входа; 2 — огибающая минимумов коэффициентов передачи; 3 — развязка между выходными каналами, связанными двухканальным делителем. Кривая 3 в интервале  $\delta = -0,04 \div 0,04$  имеет экстремум ( $C \rightarrow \infty$ ) при  $\delta = 0$ . Нелинейность фазы коэффициента передачи при  $\delta = \pm 0,1$  меньше, равна  $1^\circ$ , КСВН выходов при  $\delta = -0,21 \div 0,15$  меньше, равен 1,5. Недостатком СРМ является резкое нарастание КСВН входа при расстройке относительно средней частоты ( $\delta = 0$ ) на 10—15% ( $\delta = \pm 0,1 \div \pm 0,15$ ).

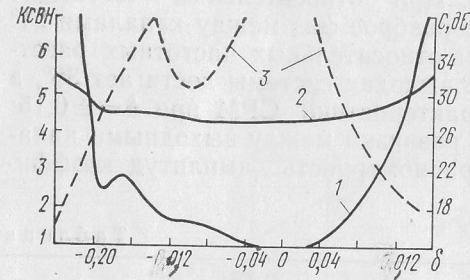


Рис. 2

Следствием этого является неравномерность амплитуды коэффициента передачи в полосе частот.

Выполненные из направленных двухканальных делителей вида рис. 1б СРМ имеют более широкую полосу пропускания при низком КСВН входа. На рис. 3 приведены характеристики СРМ на 4096 каналов: 1 — огибающая максимумов КСВН входа; 2 — развязка

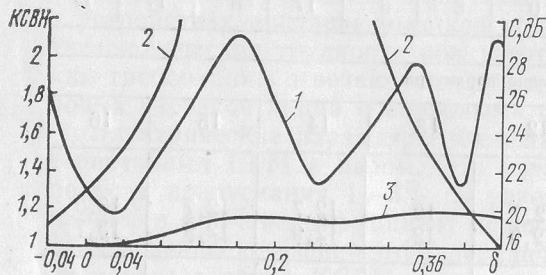


Рис. 3

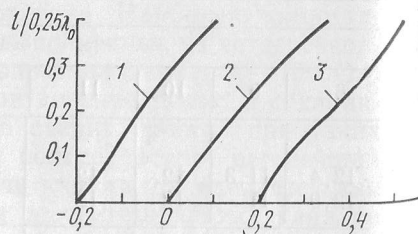


Рис. 4

между выходными каналами, связанными двухканальным делителем; 3 — КСВН выходов. Амплитуда коэффициента передачи канала находится в пределах 36,8—37,9 дБ при изменении  $\delta$  от  $-0,04$  до  $0,44$ ; нелинейность фазы коэффициента передачи при изменении  $\delta$  от  $-0,04$  до  $0,44$  меньше, равна  $1^\circ$ ; потери мощности в балластных

резисторах меньше, равны 1,4 дБ. При расчете характеристик СРМ учитывались длины балластных резисторов в элементах деления. Этим объясняется смещение максимума развязки в область более высоких частот (рис. 3, кривая 2) и наличие диссипативных потерь в коэффициентах передачи каналов. Длина резистора в двухканальных делителях СРМ была принята  $0,25\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0$  — длина волны, при которой двухканальный делитель с «точечным» резистором имеет минимум КСВН входа и максимум развязки между выходными каналами.

В практических конструкциях СРМ, выполненных из двухканальных делителей вида рис. 1б, смещение максимума развязки и положение уровня развязки 20 дБ в зависимости от относительной длины резистора  $[l_{\text{рез}}/(\lambda_0/4)]$  можно определять с помощью графиков (рис. 4), на которых кривые 1 и 3 показывают положение уровня развязки 20 дБ на оси относительных расстроек  $\delta$  в зависимости от относительной длины резистора, кривая 2 показывает положение максимума развязки на оси относительных расстроек  $\delta$  в зависимости от относительной длины резистора.

Из сопоставления характеристик трех типов СРМ следует, что системы, выполненные из двухканальных делителей, представленных на рис. 1б, имеют наилучшие параметры в широкой полосе частот. Однако балластные резисторы элементов деления этих СРМ могут рассеивать единицы ватт, что ограничивает применение подобных систем для передачи большой мощности в нагрузки с переменными коэффициентами отражения.

Интересно сопоставить характеристики СРМ, выполненных на мостовых устройствах (рис. 1г, д). Балластные нагрузки в этих устройствах включены по параллельной схеме, а сами устройства обладают симметрией относительно входов. На рис. 5а приведены амплитуды коэффициентов передачи каналов, а на рис. 5б развязки между выходными каналами и КСВН входов трех типов восьмиканальных делителей: 1 — соответствуют делителям, выполненным на мостах из сочлененных квадратов; 2 — соответ-

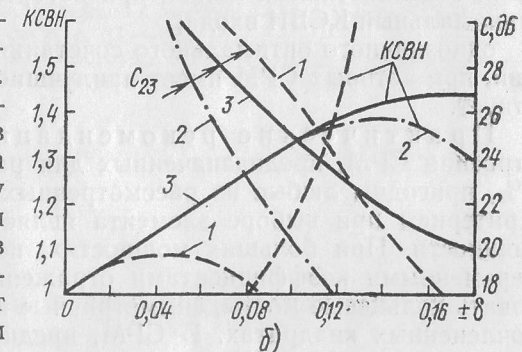
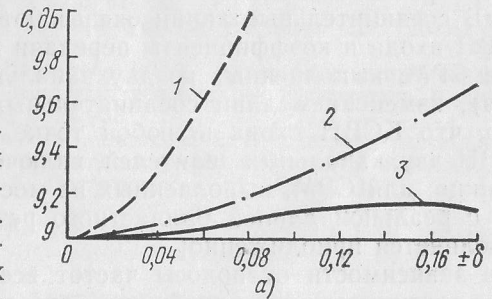


Рис. 5

вует делителям, выполненным на симметричных кольцевых мостах;  $\beta$  (даны для сравнения) — делителям, выполненным из элементов, представленных на рис. 1б с точечными балластными резисторами.

Из представленных результатов следует, что делители, выполненные на мостах из сочлененных квадратов, имеют малые диссипативные потери в полосе частот, составляющей единицы процентов. С увеличением полосы частот диссипативные потери существенно возрастают. Это обусловлено рассеиванием мощности в балластных нагрузках.

В делителях, выполненных на симметричных кольцевых мостах, диссипативные потери достигают 0,4 дБ в полосе частот 30%.

Из рассмотрения кривых  $\beta$  следует, что в делителях, выполненных из элементов, представленных на рис. 1б с точечными резисторами, диссипативных потерь за счет рассеивания мощности в резисторах нет. Однако расчеты показали, что с увеличением длины резистора от 0 до  $0,3\lambda_0/4$  диссипативные потери в восьмиканальных делителях возрастают от 0 до 0,3 дБ в полосе частот 35%.

Приведенные выше результаты расчета частотных характеристик соответствуют СРМ, элементы деления которых соединены отрезками линий передачи определенной длины. При других длинах соединительных линий меняется вид характеристик.

Исследование влияния длин соединительных линий на характеристики СРМ в полосе частот показало следующее:

при развязках между выходными каналами больше, равно 15 дБ соединительные линии оказывают существенное влияние на КСВН входа и коэффициенты передачи каналов СРМ;

в СРМ, выполненных из двухканальных делителей (см. рис. 1б, в), изменением длин соединительных линий можно добиться того, что КСВН входа в любой точке равен или произведению КСВН двухканальных делителей, включенных друг за другом, или единице; для СРМ, выполненных из мостовых устройств и делителей с реальной длиной балластного резистора, изложенное выше выполняется приближенно;

в зависимости от полосы частот всегда существует несколько длин соединительных линий, при которых в СРМ можно получить минимальный КСВН входа;

однозначного оптимального сочетания длин соединительных линий, при которых СРМ имеет наилучшие характеристики, не существует.

Практические рекомендации и выводы. Для построения СРМ, предназначенных для работы в полосе частот 1—3%, пригодны любые из рассмотренных выше элементов деления. Критерием при выборе элемента является уровень передаваемой мощности. При больших мощностях, передаваемых в нагрузки с переменными коэффициентами отражений, рекомендуется использовать кольцевые мосты, симметричные кольцевые мосты, мосты на сочлененных квадратах. В СРМ, предназначенных для работы в полосе частот 10—15%, необходимо избегать применения кольцевых мостов и мостов на сочлененных квадратах.

Широкополосные СРМ (полоса пропускания больше 10—15%) предпочтительно выполнять на направленных двухканальных делителях, представленных на рис. 1б, в, или симметричных кольцевых мостах. При этом необходимо оценивать мощность, рассеивающуюся в балластных нагрузках.

Из рассмотрения характеристик различных СРМ следует, что наиболее сильную частотную зависимость имеют КСВН входа и коэффициенты передачи каналов. Другие характеристики СРМ: КСВН выходов, развязки между выходными каналами отличаются от аналогичных параметров элементов деления, из которых выполнены системы, незначительно. Это дает основание сформулировать следующее положение: при расчете характеристик СРМ достаточно рассчитать только КСВН входа и коэффициенты передачи каналов, а другие характеристики систем с достаточной для практики точностью можно принимать такими же, как у элементов деления, из которых выполнена система.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alstadter D., Houseman E. O. Strip transmission line corporate feed structures for antenna arrays. — IRE National Convention Record, march, 1959, N 3, p. 113—116.
2. Котляр М. Я., Беллон О. О. Широкополосные делители мощности на плосковых линиях с произвольным числом плеч. — Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника, 1975, т. 18, № 2, с. 61—65.
3. Бова Н. Т., Толстик Ю. В. Методы анализа устройств СВЧ. Киев: Техника, 1976.
4. Заикин Б. М., Конин В. В., Платонова Ж. К. Метод определения параметров рассеяния фазированных антенных решеток. — Кибернетика и вычислительная техника, 1974, № 26, с. 53—58.
5. Сестрорецкий Б. В., Вешникова И. Е., Белянина Е. К. Алгоритм расчета многоканального делителя с симметричной системой разветвления мощности. — В кн.: Антенны/Под ред. А. А. Пистолькорса. М.: Связь, 1976, вып. 24, с. 40—52.
6. Заикин Б. М., Моцоглов А. А. К расчету шестиполосных СВЧ кольцевых схем. — Электротехника, изд. Львовского Университета, 1968, № 8, с. 140—144.
7. Заикин Б. М., Моцоглов А. А. Алгоритм расчета на ЭВМ параметров кольцевого моста СВЧ с произвольным делением энергии. — Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника, 1969, т. 12, № 8, с. 870—876.
8. Катушкина В. М., Модель З. И. Мостовые схемы сложения мощностей любого числа УКВ генераторов и передатчиков. — Электросвязь, 1959, № 7, с. 17—25.
9. Пат. № 1473179 (Франция).

Поступила в редакцию 24/1 1978 г., после доработки — 12/1 1979 г.

УДК 621.396.677

А. М. СОМОВ

### Шумовая температура и шумовая добротность синфазных антенных решеток

Постановка вопроса. В настоящее время антенные решетки находят все более широкое применение в технике связи. Применение решеток, по-видимому, перспективно и в системах космической связи, особенно при использова-