

ПОЛОСКОВЫЕ ДЕЛИТЕЛИ • СВЧ-МОЩНОСТИ

(Аналитический обзор по материалам отечественной
и зарубежной литературы за 1970—1981 гг.)

1982

1

Ключевые слова: делители мощности, линия полосковая, характеристики частотные, сопротивление балластное, мощность рассеивания, алгоритм расчета.

Рассматриваются 2- и многоканальные делители СВЧ-мощности на полосковых и микрополосковых линиях. Сравняются характеристики различных типов делителей. Анализируются методы расчета частотных характеристик, вопросы выбора величины волновых и балластных сопротивлений. Приводятся параметры 2-канальных делителей в диапазоне частот и сравниваются их частотные характеристики. Даются схемы построения многоканальных делителей для ФАР. Обсуждаются алгоритмы расчета параметров рассеяния многоканальных делителей.

Использованы материалы отечественной и зарубежной литературы (США, ФРГ) за 1970 - 1981 гг.: монографии, журнальные статьи, обзоры.

Материал обзора поможет разработчикам СВЧ-аппаратуры облегчить поиск оптимальных решений при конструировании СВЧ-устройств, в которых применяются делители (сумматоры) мощности.

Авторы: канд.техн.наук В.В.КОНИН, Н.С.СЫЧ
Научный редактор канд.техн.наук Ю.Г.ЕФРЕМОВ

ВВЕДЕНИЕ

Делителем (сумматором) мощности называется устройство, осуществляющее передачу энергии от одного источника СВЧ-мощности к двум и более приемникам (нагрузкам) - режим деления, или передачу мощности СВЧ от двух и более источников в один приемник (нагрузку) - режим суммирования. Поскольку деление и суммирование мощности, как правило, выполняет одно и то же устройство, то в дальнейшем это устройство будем называть делителем мощности (ДМ).

ДМ получили широкое распространение в последние два десятилетия. Это обусловлено двумя причинами: созданием твердотельных источников СВЧ-мощности высокого уровня и интенсивным развитием ФАР.

Получение высокого уровня мощности отдельных твердотельных приборов ограничено физическими свойствами материалов, из которых изготавливаются эти приборы. Поэтому одним из перспективных путей увеличения мощности является сложение мощностей отдельных источников с помощью суммирующих устройств, собранных из 2-канальных ДМ. Для увеличения мощности в $10^2 - 10^5$ раз необходимо применить такое же количество 2-канальных ДМ в суммирующем устройстве. Это накладывает определенные ограничения на применение ДМ и требует тщательного рассмотрения таких характеристик ДМ как: широкополосность, расположение входа и выходов, уровень передаваемой мощности, габариты.

В ФАР делители применяются для передачи СВЧ-энергии от источника к излучателям антенны. Проектирование ДМ для ФАР усложняется тем, что выходы делителей соединяются с нагрузками (излучателями), обладающими переменными коэф-

фициентами отражений. Кроме того, многоканальные ДМ для ФАР должны обеспечивать требуемое распределение мощности между выходными каналами.

В последние годы большое внимание уделяется созданию ДМ на полосковых, микрополосковых и других линиях передачи. Одной из причин распространения ДМ на полосковых линиях является простота их реализации на основе технологии полосковых линий, что позволяет изготавливать устройства с минимальными затратами времени при относительно низкой стоимости и высокой воспроизводимости. Широкое применение делителей вызывает большой интерес к их расчетам и разработке.

1. 2-КАНАЛЬНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

В качестве 2-канальных делителей мощности можно использовать многочисленный класс устройств. Ими могут быть: просто разветвление линий передачи, шестиполусные делители, различные гибридные устройства, ответвители на связанных линиях и т.п. Делители мощности являются наиболее изученным классом СВЧ-устройств.

На рис. 1 показаны устройства, используемые в качестве делителей, на рис. 2 - их частотные характеристики, а в таблице приведены конструктивные и технологические особенности каждого из этих устройств.

Одним из самых распространенных является делитель на кольцевом мосте длиной $3/2 \lambda_0$ (см. рис. 1,а) [1-3]. Такой делитель осуществляет синфазное направленное деление между плечами 2 и 3 при возбуждении его со стороны плеча 1 и противофазное при возбуждении с плеча 4. Коэффициент деления кольцевого моста может достигать 2,5 при соответствующем выборе проводимостей линий кольца. Недостатками кольцевого моста являются неравномерности деления мощности и значительный разброс амплитуд и фаз коэффициентов передачи в диапазоне частот.

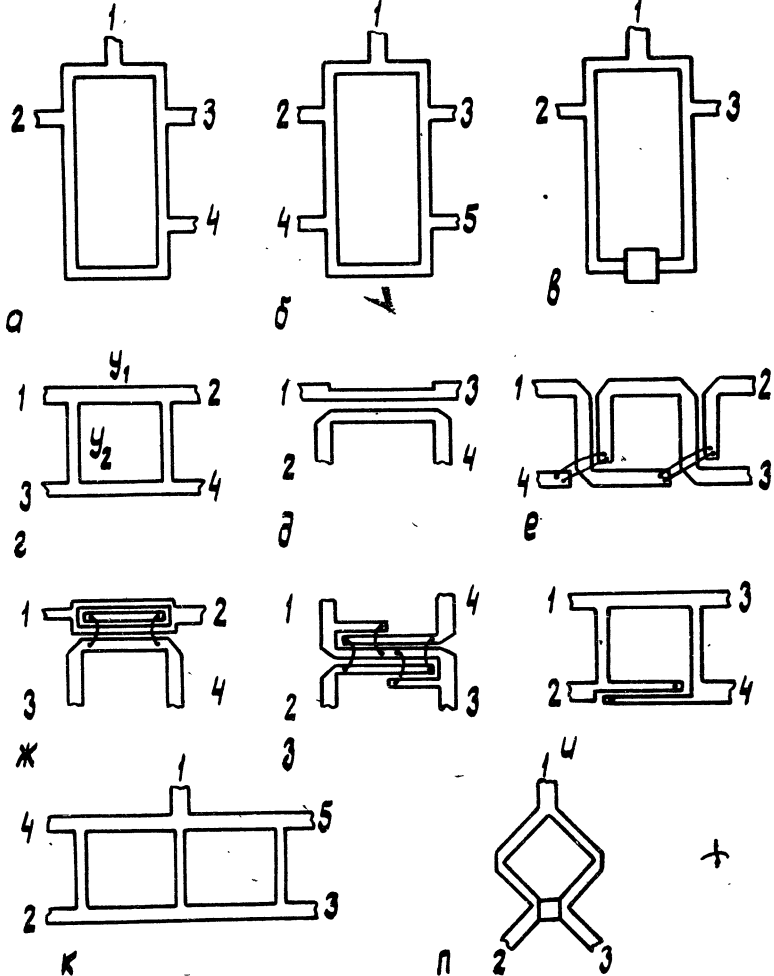


Рис. 1. Устройства, применяемые в качестве делителей мощности:

а, б — кольцевой и модифицированный кольцевой мосты; в, л — 2-канальный синфазный делитель; г — двухщелевный ответвитель; д — ответвитель на связанных линиях; е — двухкаскадный ответвитель; ж, з — ответвители Lange; и — мост с опрокидыванием фазы; к — мост на сочлененных квадратах.

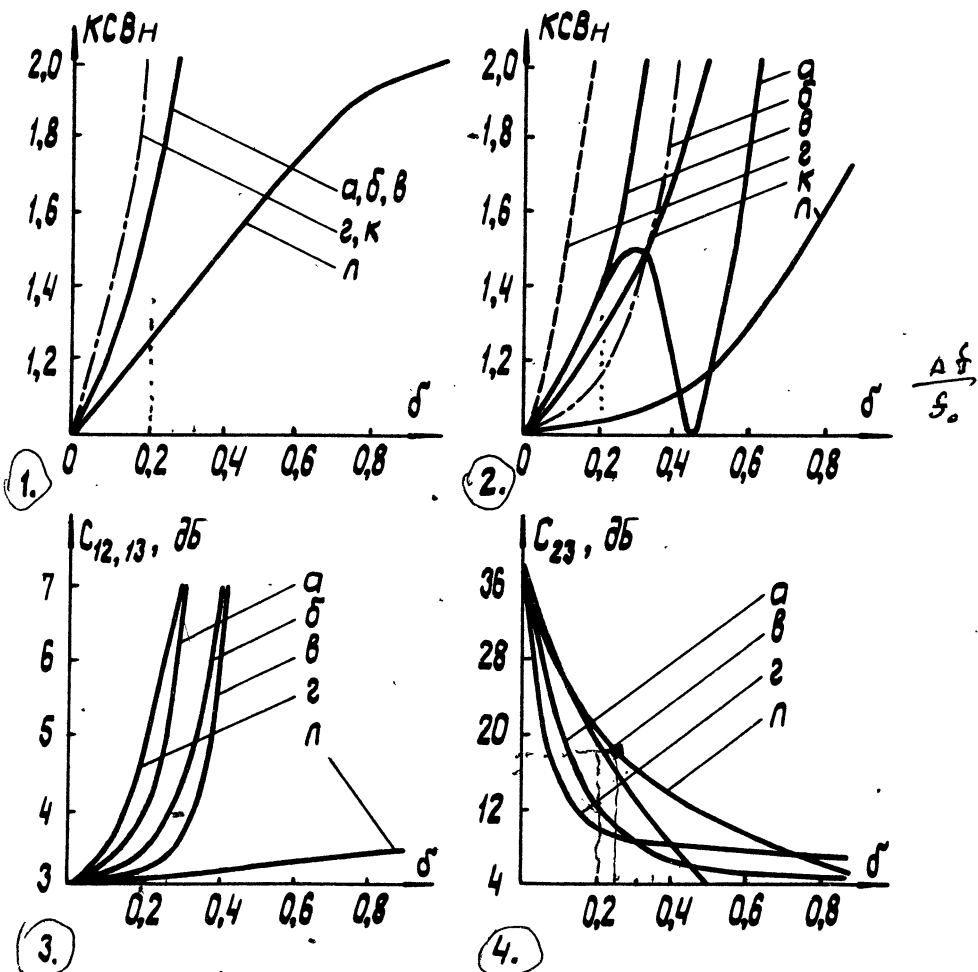


Рис. 2. Частотные характеристики делителей мощности:

1 - KСВн входа; 2 - KСВн выходов; 3 - коэффициент деления $C_{12,13}$; 4 - развязка S_{23} ; (а-л - соответствуют устройствам, приведенным на рис. 1).

Устройства	Полоса частот	Конструктивное выполнение	Балластная нагрузка	Объединение в многократный делитель	Причина потерь в полосу частот
1	2	3	4	5	6
Кольцевой мост (рис. 1,а)	Широкая	Простое	Мощная, внутренняя, внешняя	Загружено	Разбаланс
Симметричный кольцевой мост (рис.1,б)	"	"	"	"	Рассеивание в нагрузке
Синфазный делитель II-го типа (рис.1,в)	"	"	Маломощная внутренняя	Легко	Отражение
Двухшлейфный от-ветвитель (рис.1,г)	Узкая	"	Мощная, внутренняя, внешняя		Отражение, рассеивание в нагрузках

1	2	3	4	5	6
Ответитель на связанных линиях (рис. 1, д)	Широкая	Простое	Мощная, внутренняя, внешняя	Загружено	Рассеивание в нагрузках, разбаланс
2-каскадный ответитель (рис. 1, е)	"	Сложное	"	"	Перемычки
Ответитель 1-го типа (рис. 1, ж)	"	"	"	"	"
Ответитель II-го типа (рис. 1, з)	"	"	"	Легко	"
Мост с "опрокидыванием" фазы (рис. 1, и)	Широкая	Сложное	"	Загружено	Рассеивание в нагрузках, отражение
Мост на сочлененных квадратах (рис. 1, к)	Узкая	Простое	"	Легко	"
Синфазный делитель 1-го типа (рис. 1, л)	Широкая	Простое	Внутренняя маломощная	Легко	Отражение

Лучшими характеристиками обладает так называемый модифицированный кольцевой мост [4,5], в котором (см. рис. 1,б) симметрично плечу 4 (по отношению к плечу 1) добавлено плечо 5. Если к плечам 4 и 5 подключить балластные нагрузки, с величиной сопротивления каждой в 2 раза превышающей величину волнового сопротивления линии, подключенной к плечу 1, то получим делитель лишенный недостатков, присущих кольцевому мосту (см. рис. 2). Видно, что по коэффициенту деления (см.рис. 2,в) модифицированный кольцевой мост широкополосней кольцевого моста. К тому же наличие двух балластных нагрузок позволяет применять его для разделения более высоких уровней мощности.

Синфазный направленный делитель с балластным резистором, включенным через полуволновые отрезки линий (см. рис. 1,в), в 50%-ной полосе частот имеет КСВн такие же, как и кольцевой мост и значительно лучшие коэффициенты передачи [6]. Включение резистора через полуволновые шлейфы позволяет путем укорочения шлейфов совместить минимальное значение КСВн и максимальное значение развязки. Данный делитель при всех своих положительных качествах: малых размерах, хороших частотных характеристиках в широкой полосе частот, простоте изготовления имеет один существенный недостаток. А именно: уровень суммируемой мощности ограничивается балластным резистором, в котором рассеивается часть мощности, если имеется разбаланс амплитуд фаз, или, если один из суммируемых источников выходит из строя.

Например, американская фирма "Hughes" [7] приводит данные о том, что мощность, которую можно передавать по делителю в режиме суммирования, в 100 раз меньше чем мощность, передаваемая по делителю в режиме деления.

Двухшлейфный ответвитель (см. рис. 1,г) осуществляет направленное деление энергии между плечами 2 и 3 при подаче сигнала в плечо 1 [8-11]. При выборе проводимостей четвертьволновых отрезков $Y_1 = 1$, $Y_2 = \sqrt{2}$ на средней частоте сигнал делится между плечами 2 и 3 поровну, а $\Delta\psi = 90^\circ$.

Ответвитель может осуществлять деление энергии в заданном отношении, при этом коэффициент деления не превышает 5, поскольку дальнейшее увеличение коэффициента деления получить нельзя в связи с трудностью реализации высоких волновых отрезков линий. Из данных, приведенных на рис. 2, видно, что двухшлейфный ответвитель является самым узкополосным устройством. Конструктивная реализация ответвителя очень простая. Для расширения полосы пропускания применяют многшлейфные направленные ответвители [12], но это приводит к увеличению потерь и габаритов.

Направленный ответвитель на связанных линиях (см. рис. 1, д) теоретически имеет КСВн любого из плеч, равный 1, и бесконечную развязку независимую от частоты [13-16]. Коэффициент деления может достигать нескольких тысяч. Конструктивная реализация делителя с большими коэффициентами деления достаточно проста. Выполнение же трехдецибелного ответвителя встречает серьезные технологические трудности. При реализации его на несимметричных микрополосковых линиях требуется чрезвычайно малый зазор между проводниками, и поэтому трудно обеспечить стабильность зазора в процессе производства. При создании направленных ответвителей на связанных несимметричных микрополосковых линиях передачи возникает еще одна трудность, связанная с некоторым различием коэффициентов фазы для волн симметричного и антисимметричного возбуждения в пределах участка связи. Выравнивание скоростей этих волн можно достичь нанесением дополнительного диэлектрического слоя на связанные проводники.

Одним из способов получения трехдецибелной связи является каскадное включение двух ответвителей со связью по $-8,34$ дБ (см. рис. 1, е).

Матрица рассеяния такого ответвителя и его частотные свойства приведены в [17]. Показано, что при выполнении связи, равной $-8,34$ дБ в каждом ответвителе, его характеристики такие же, как и у однозвенного. Недостатком данных конструкций является наличие перемычек, соединяющих эти ответвители.

Другим способом получения сильной связи является ответвитель с параллельным включением двух пар связанных линий — ответвитель Lange (см. рис. 1, ж, з). Основными преимуществами его являются малые размеры, а также большое, по сравнению с другими ответвителями на связанных линиях, расстояние между проводниками [18-21]. Хотя данный ответвитель получил широкое распространение, но из-за перемычек, соединяющих параллельные линии, его конструктивная реализация затруднена. Кроме того, наличие перемычек не позволяет вывести расчетные соотношения, которые устанавливают точную связь между геометрическими размерами ответвителя с его электрическими характеристиками. Программа моделирования характеристик ответвителя с учетом конечной толщины проводников, потерь в проводниках и диэлектрике, взаимного влияния проводников изложена в [22].

Но как бы хорошо ни работал ответвитель Lange, техническая реализация его очень сложна. Были сделаны попытки реализовать на принципе такого ответвителя другие ответвители [23], но все они имели существенный недостаток, связанный с наличием навесных проводников между линиями передачи, которые снижают механическую прочность, надежность и увеличивают стоимость устройства.

Если в схеме кольцевого моста (см. рис. 1, а) заменить участок кольца длиной $3/4 \lambda_0$ на отрезок линии длиной $\lambda/4$ и устройство опрокидывающее фазу на 180° , то получается устройство, работающее в более широкой полосе (см. рис. 2) [24]. На рис. 1, и показано схематическое изображение моста с фазоопрокидывающим устройством. Кольцевой мост с опрокидыванием фазы привлекает внимание своей широкополосностью и другими улучшенными электрическими параметрами по сравнению с другими устройствами. Известны мосты, которые в одной из секций имеют фазовращатель, выполненный на связанных линиях передачи, либо на плосковых волноводах двух типов: симметричном и несимметричном, либо из микрополосковой и щелевой линии [25]. Изготовление таких фазовращателей не очень простое, так как необходимо выполнять отверстия в подложке, паять про-

водники и т.д. Все перечисленные фазовращатели, используемые в кольцевом мосте с "опрокидыванием" фазы, частотно зависимы. Проблема реализации частотно-независимого фазовращателя для общего случая не решена.

В некоторых случаях применяется устройство, симметричное относительно нагрузки. Таким является мост на сочлененных квадратах (см. рис. 1,к) [4]. В данном мосте имеется два балластных сопротивления, которые можно выполнять выносными, что позволяет передавать большие уровни мощности. Рассмотрение частотных зависимостей параметров моста (см. рис. 2) показывает, что его целесообразно применять в узкой полосе частот.

Наибольшее применение в технике СВЧ получил 2-канальный направленный делитель мощности (ДНД 1) (см.рис.1,л). Делитель состоит из двух отрезков линий передачи длиной $\lambda_0/4$ (λ_0 - длина волны в линии передачи) и развязывающего резистора Z_H . В общем случае к плечам 1,2,3 подводятся линии передачи с волновыми сопротивлениями Z_1, Z_2, Z_3 (рис.3). Если сопротивления $Z_1 - Z_5$ выбраны правильно, то ДНД 1 осуществляет деление мощности в требуемом отношении между плечами 2 и 3. При этом в полосе частот до 40% КСВн плеч $\leq 1,2$, а развязка между выходными плечами ≥ 20 дБ.

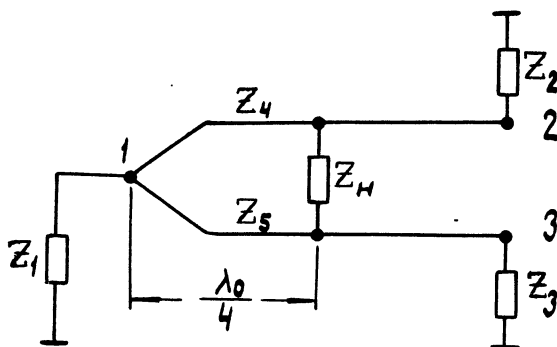


Рис. 3. Схема одноступенчатого 2-канального делителя.

Делитель рассчитывается следующим образом:

Z_1, Z_2 - задаются или выбираются из конструктивных соображений;

$$\begin{aligned} Z_3 &= k^2 Z_2; & Z_5 &= \sqrt{Z_1 Z_3 (1+k^2)} k; \\ Z_4 &= \frac{\sqrt{Z_1 Z_2 (1+k^2)}}{k}; & Z_H &= \frac{Z_4 Z_5}{Z_1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где k - коэффициент деления по напряжению (полю) или отношение напряжений (полей) в выходных плечах;
 k^2 - коэффициент деления по мощности или отношение мощностей в выходных плечах.

При $k = 1$, то есть в случае делителя с равным делением, формулы (1) примут вид:

$$Z_2 = Z_3; \quad Z_4 = Z_5 = \sqrt{2 Z_1 Z_2}; \quad Z_H = \frac{Z_4^2}{Z_1} = 2 Z_2. \quad (2)$$

Такой делитель осуществляет равное деление мощностей из линии с волновым сопротивлением Z_1 между линиями с сопротивлением Z_2 . Если к делителю со всех плеч подключаются линии с одинаковыми волновыми сопротивлениями Z_1 , то уравнения (2) записываются как

$$Z_2 = Z_3 = Z_1; \quad Z_4 = Z_5 = \sqrt{2 Z_1}; \quad Z_H = 2 Z_1.$$

Следует подчеркнуть, что рассмотренный делитель осуществляет неравное (требуемое) деление мощности между линиями (нагрузками) с различными волновыми сопротивлениями [26]. Для передачи энергии в линии с равными волновыми сопротивлениями применяют делитель с двумя ступенями трансформации (рис. 4). Волновые сопротивления отрезков линий в таком делителе рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_0 &= d_1 Z_1; & Z_4 &= \frac{d_2 Z_1}{k} \sqrt{\frac{k^2+1}{d_1}}; \\ Z_5 &= d_2 k Z_1 \sqrt{\frac{k^2+1}{d_1}}; & Z_6 &= d_2 Z_1; \end{aligned}$$

$$Z_7 = k d_2 Z_1; \quad Z_H = \frac{d_2^2}{d_1} Z_1 (1 + k^2). \quad (3)$$

Величины Z_0 , Z_1 , Z_6 задаются или выбираются из конструктивных соображений.

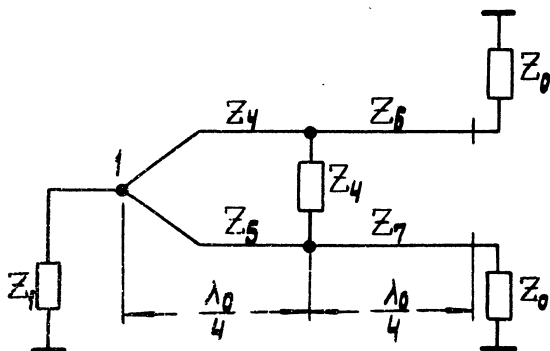


Рис. 4. Схема двухступенчатого 2-канального делителя.

В формулах (3) коэффициенты d_1 и d_2 позволяют выбрать конструктивно реализуемые значения волновых сопротивлений. При этом (если $d_1, d_2 > 0$) идеальные согласования со всех плеч и развязка сохраняются на центральной частоте. Если $d_1 = 1, d_2 = 1/\sqrt{2}$, то из выражения (3) следует частный случай, полученный в [27].

Рассмотренные делители на центральной частоте (частота, при которой длина волны в линии передачи равна λ_0) имеют идеальные характеристики: КСВн со всех плеч равны единице, развязки между выходными каналами максимальные.

Однако на высоких частотах длина волны становится соизмерима с длиной развязывающих резисторов. Это приводит к смещению максимума развязки между выходными каналами и минимума КСВн входа в область более высоких частот. Причем с увеличением длины резистора это смещение увеличивается, возрастают потери и увеличивается КСВн входа.

На рис. 5 приведены графики [28], позволяющие учесть и оценить влияние длины резистора на частотные характеристики 2-канального делителя. Графики показывают положение уровня развязки 20 дБ на оси относительных частотных расстроек σ ($\sigma = \Delta f / \Delta f_0$, f_0 - центральная частота, Δf - абсолютная частотная расстройка) и максимума развязки между выходными каналами в зависимости от относительной длины развязывающего резистора. Смещение развязки в область высоких частот справедливо и для делителя с неравным делением [26].

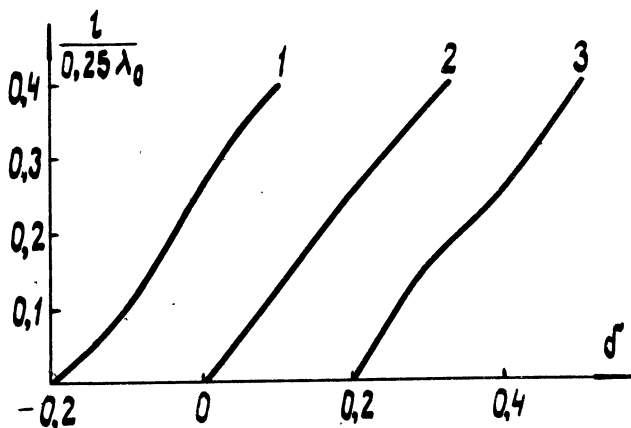


Рис. 5. Влияние длины резистора на частотные свойства 2-канального делителя:

1, 3 - нижняя и верхняя частоты для развязки 20 дБ;
2 - максимум развязки.

Рассмотренные модификации 2-канального делителя наряду с положительными качествами (малые размеры, хорошие частотные характеристики в широкой полосе частот, простота изготовления) в режиме суммирования ограничивают уровень суммируемой мощности. Это ограничение вызвано балластным резистором, в котором рассеивается часть мощности, если имеет место разбаланс амплитуд или один из

суммируемых источников выходит из строя. Увеличение суммируемых мощностей требует увеличения геометрических размеров резистора, что приводит к ухудшению параметров делителя. Для решения проблемы увеличения мощности, передаваемой по делителю, предложена конструкция, описанная в [29].

Делитель для высоких уровней мощности (рис. 6) выполняется на воздушной полосковой линии, внутренние проводники которой крепятся при помощи металлических изоляторов. В изоляторах, соединяющих внутренние проводники входных линий с корпусом, установлены коаксиальные линии передачи. Эти линии соединены последовательно между собой с помощью внутреннего проводника. Свободные концы линий соединяются с двух сторон с балластными нагрузками, величины сопротивлений которых равны волновому сопротивлению этих линий. Такое подключение будет эквивалентно подключению в точках A и B двух сопротивлений, равных по величине входному сопротивлению коаксиальной линии и последовательно соединенных между собой. Это выполняется в том случае, если изолятор не влияет на свойства ДНД.

Металлические изоляторы можно разделить на 2 вида: простые и широкополосные. Простой изолятор представляет собой четвертьволновой отрезок линии. Его входное сопротивление бесконечно большое на центральной частоте, и в точке присоединения к линии он не оказывает шунтирующего действия. При частотной расстройке входное сопротивление изолятора уменьшается, и в линии передачи появляются дополнительные потери за счет отражения. КСВн отрезка линии с простым изолятором в диапазоне частот $\pm 5\%$ достигает 12.

Значительно лучшими характеристиками обладает широкополосный изолятор. Схема такого изолятора и зависимость его КСВн от частоты показана на рис. 7. Видно, что при отношении волновых сопротивлений $\rho_1/\rho_0 = 0,8$, КСВн изолятора в полосе частот с отношением верхней граничной частоты к нижней, равным 2, не превышает 1,05. Подключение таких изоляторов к выходным линиям делителя не будет влиять на его частотные характеристики. В то же время, установив внутри изоляторов (см. рис. 6) коаксиальные линии

передачи и соединив их с балластными сопротивлениями, получим 2-канальный направленный делитель, способный работать на больших уровнях мощности. Балластные сопротивления в зависимости от уровня суммируемых мощностей выполняются с воздушным или жидкостным охлаждением и этот уровень определяется предельной мощностью линии, из которой выполнен делитель. Расстояние между выходными линиями (точки *A* и *B*) можно выбрать малым, и тогда оно не будет влиять на частотные свойства делителя.

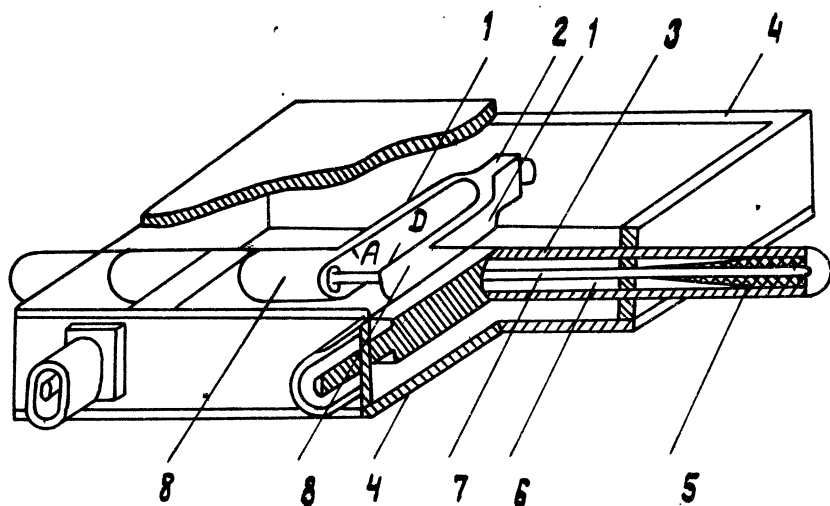


Рис.6. 2-канальный направленный делитель с вынесенными балластными нагрузками:

- 1 - четвертьволновый трансформатор; 2, 8 - входная и выходная линии; 3 - металлический изолятор; 4 - корпус; 5 - коаксиальный разъем; 6 - коаксиальная линия; 7 - центральный проводник.

Применение металлических изоляторов позволяет исключить диэлектрические опоры, которые значительно снижают предельную мощность полосковой линии.

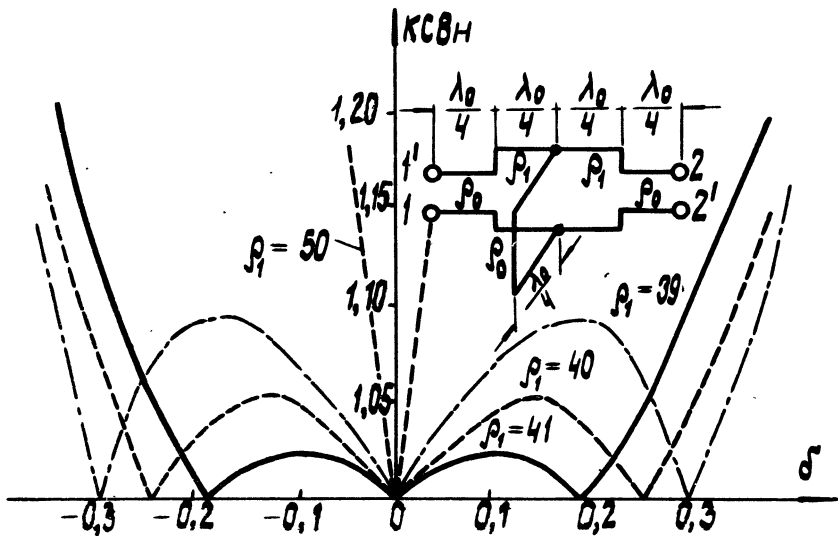


Рис. 7. Частотные характеристики КСВн металлического изолятора для различных волновых сопротивлений.

2-канальный делитель обладает хорошими электрическими характеристиками, и его целесообразно применять для суммирования или разделения мощностей, средний уровень которых лежит в пределах сотен ватт – десятков киловатт.

2. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА

Из многоканальных делителей мощности параллельного типа наибольшее распространение получили делители с количеством выходов 2^N ($N = 1, 2, \dots$). Такие делители состоят из 2-канальных элементов деления (рис. 8) [30] и линий передачи, которые соединяют ряды 2-канальных элементов. В качестве 2-канального элемента может быть использован любой из приведенных на рис. 1. Сравнение характеристик многоканальных делителей, построенных из коль-

цевых мостов, 2-канальных направленных делителей, симметричных кольцевых мостов, мостов на сочлененных квадратах приводится в [28]. В частности, на примере делителя на 16 каналов, выполненного из кольцевых мостов, показывается, что в полосе частот $\pm 10\%$ он имеет разброс фаз между выходными каналами 24° , разброс амплитуд 3,1 дБ. В полосе частот $\pm 15\%$ у этого делителя разброс фаз достигает 36° , амплитуд - 3,5 дБ. В 30%-ной полосе частот КСВн входа делителя $< 1,7$, развязки между выходными каналами > 20 дБ, неравномерность амплитуд коэффициентов передачи 1,8 дБ. С увеличением количества каналов разброс фаз и амплитуд между каналами увеличивается.

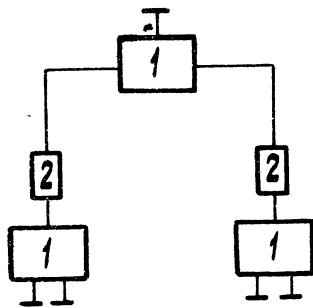
Делители из симметричных мостовых устройств не имеют такого большого разброса фаз и амплитуд между выходными каналами. Характеристики двух типов 8-канальных делителей, построенных из модифицированных кольцевых мостов и мостов из сочлененных квадратов, даны на рис. 9.

Из приведенных результатов видно, что делители, выполненные на мостах из сочлененных квадратов, имеют малые диссипативные потери практически на средней частоте. С увеличением полосы частот потери значительно возрастают, что обусловлено рассеиванием мощности в балластных нагрузках элементов деления.

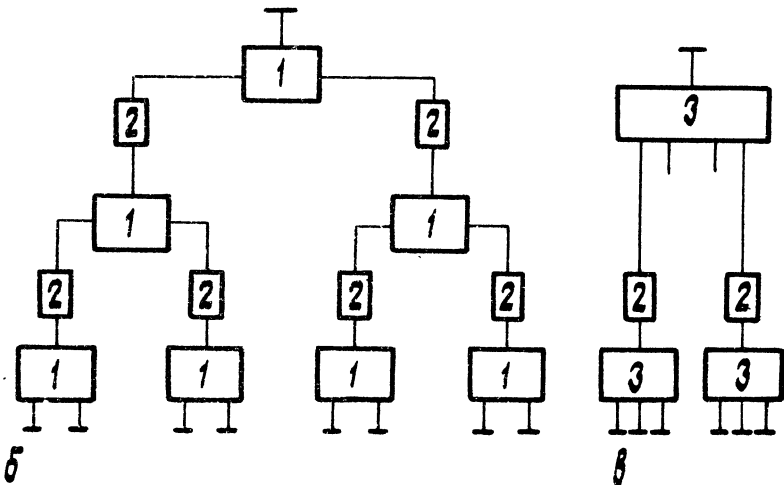
Наиболее широкополосными являются делители, построенные из 2-канальных направленных элементов деления. Простейшим делителем такого типа является 4-канальный. Исследование 4-канального делителя по приближенным формулам приведено в [31,32], по точным - в [33]. Эти исследования показали, что на частотные характеристики делителя (КСВн входа и коэффициент передачи) существенным образом влияют длины соединительных линий между рядами элементов деления. В меньшей мере этому влиянию подвержены КСВн выходов и развязки между выходными каналами. В полосе частот $\pm 50\%$ КСВн выходов $\leq 1,2$, развязка > 10 дБ, КСВн входа и коэффициент передачи по мощности 4-канального делителя связаны соотношением

$$|S_{i2}|^2 = \frac{КСВн}{(1 + КСВн)^2}$$

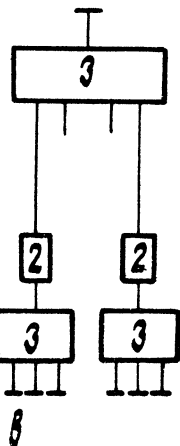
На рис. 10 приведены графики для определения относительной частотной расстройки $\delta = \Delta f / f_0$ и полосы частот, в которой сохраняется заданный КСВн входа при определенных длинах соединительных линий. Например, КСВн = 1,2, при



а



б



в

Рис. 8. Схемы построения многоканальных делителей с количеством выходов 2^n :

а, б, в - 4-канальный, 8-канальный и многоканальный делители соответственно; 1 - 2-канальный элемент деления; 2 - соединительная линия; 3 - многоканальный делитель.

относительных длинах соединительных линий, равных $l/\lambda_0 = 0,6$ (l — геометрическая длина, λ_0 — длина волны в линии на средней частоте), будет обеспечиваться в полосе частот от $f_0 + 10\%$ до $f_0 - 19\%$. Графики пригодны для определения характеристик 2-канальных делителей, в которых длина балластного резистора мала по сравнению с длиной рабочей волны.

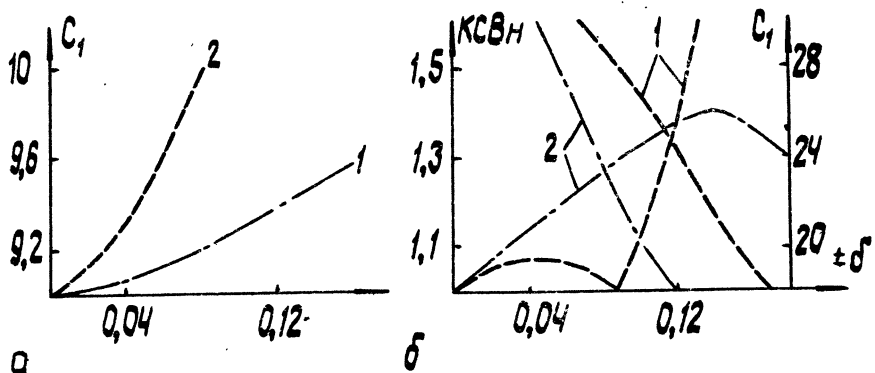


Рис. 9. Частотные характеристики 8-канального делителя:

а — модуль коэффициента передачи; б — КСВн входа и развязка; 1, 2 — делители, выполненные из сочлененных квадратов и модифицированных кольцевых мостов соответственно.

Вопросам исследования широкополосности многоканальных делителей посвящены работы [34–37]. В них анализируются амплитудно- и фазочастотные характеристики делителей на 64 канала с соединительными линиями между рядами элементов деления кратными $0,5\lambda_0$, $0,25\lambda_0$; $0,5\lambda_0$; $0,25\lambda_0$ и их комбинаций. В результате исследований установлено, что широкополосность делителей целесообразно оценивать по уровню коэффициента отражения входа и по линейности коэффициента передачи. По уровню коэффициента отражения 0,1 наиболее широкополосными являются делители с

соединительными линиями $0,5\lambda_0$ и $0,75\lambda_0$ между рядами элементов деления. В полосе частот 32% нелинейность аргумента коэффициента передачи составляет $\pm 0,1^\circ$.

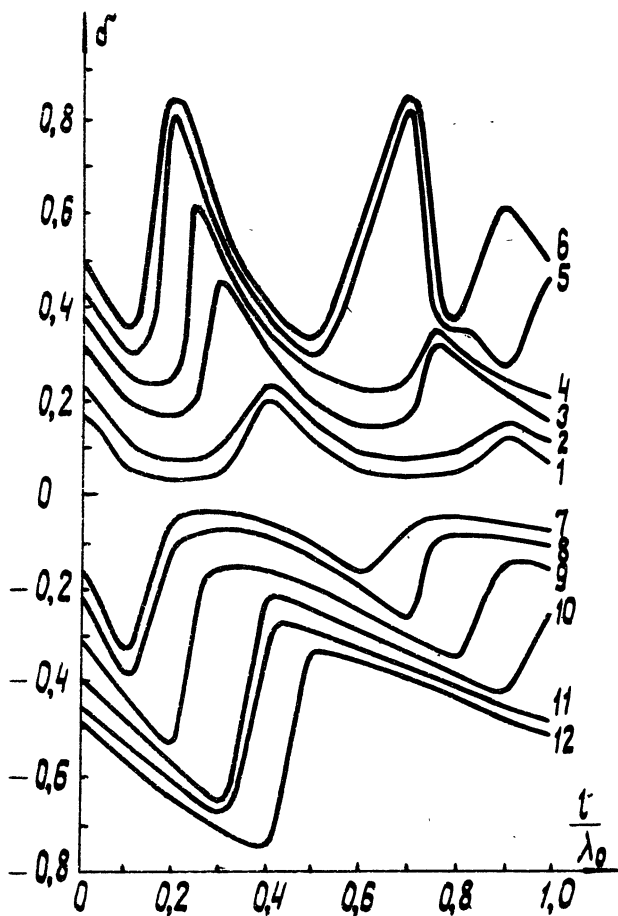


Рис. 10. Зависимости относительной частотной расстройки σ от относительной длины соединительных линий l/λ_0 при заданных уровнях КСВн входа:
 1,7 - КСВн $\leq 1,1$; 2,8 - КСВн $\leq 1,2$; 3,9 - КСВн $\leq 1,4$;
 4,10 - КСВн $\leq 1,6$; 5,11 - КСВн $\leq 1,8$; 6,12 - КСВн ≤ 2 .

По уровню коэффициента отражения 0,2 наиболее широкополосными являются делители с соединительными линиями между рядами $0,25 \lambda_0$ и $0,75 \lambda_0$. Коэффициент отражения 0,2 сохраняется в полосе частот 72%. В этой же полосе делитель с линиями $0,25 \lambda_0$ имеет нелинейность аргумента коэффициента передачи $\pm 0,7^\circ$, а делитель с линиями $0,75 \lambda_0 - \pm 2^\circ$.

Следует отметить, что делитель с линиями передачи между рядами $0,25 \lambda_0$ является самым широкополосным. Например, в полосе частот 126% он имеет модуль коэффициента отражения 0,3, а нелинейность аргумента коэффициента передачи $\pm 1,5^\circ$.

Помимо длин соединительных линий на параметры многоканальных делителей влияют и длины балластных резисторов, если они соизмеримы с длиной волны. Так же как и в 2-канальном делителе увеличение длины балластных резисторов в 2-канальных направленных элементах деления приводит к смещению максимума развязки и полосы малых отражений со стороны входа в область более высоких частот.

Графики, приведенные на рис. 5, приблизительно справедливы и для многоканальных делителей.

Сравнительные характеристики двух делителей на 64 канала: идеального (соединительные линии равны нулю, балластные резисторы точечные) и реального (соединительные линии между рядами 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 4 и 5, 5 и 6 равны $0,59 \lambda_0$; $1,06 \lambda_0$; $0,66 \lambda_0$; $0,48 \lambda_0$; $0,88 \lambda_0$ соответственно, длины балластных резисторов равны $0,25 \lambda_0/4$) приведены в [36]. Идеальный делитель в полосе частот 100% имеет неравномерность АЧХ 0,6 дБ, а нелинейность ФЧХ — единицы градусов. Реальный делитель сохраняет те же параметры в полосе частот 60%. При этом участки линейной ФЧХ и равномерной АЧХ смещены в область более высоких частот вследствие влияния длин балластных резисторов.

Эти результаты свидетельствуют о том, что при проектировании многоканальных делителей на СВЧ учет длин соединительных линий и балластных резисторов является обязательным условием.

Способ построения многоканального делителя (4096 каналов) с малым коэффициентом отражения входа из делителей с меньшим количеством каналов со специально сформированными частотными зависимостями КСВн входов рассмотрен в [37].

Сущность способа заключается в том, что для систем деления (см. рис. 8) при условии, что элементы делителей имеют малые потери, максимальный КСВн входа равен произведению КСВн элементов деления, расположенных в каждом из рядов многоканального делителя. Минимальный КСВн равен единице, если количество рядов три и более. Любое промежуточное значение КСВн между максимумом и минимумом может быть достигнуто путем изменения длин соединительных линий.

На рис. 11 показаны КСВн входа делителей на 64 канала со специально сформированными частотными зависимостями. Длины соединительных линий подобраны таким образом, что в одних и тех же частотных точках максимумы КСВн одного делителя совпадают с минимумами КСВн другого делителя. Элементы деления имеют балластные резисторы с длиной $0,06 \lambda_0$.

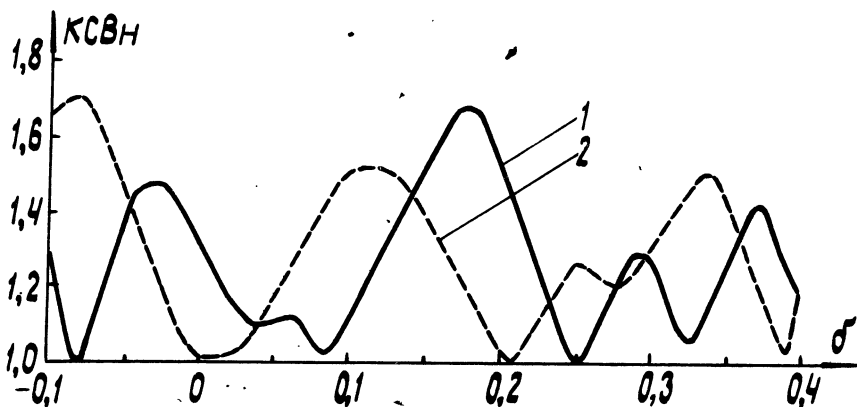


Рис. 11. КСВн входа делителей на 64 канала для различных длин соединительных линий:

1— $0,593 \lambda_0, 1,06 \lambda_0, 0,24 \lambda_0, 0,593 \lambda_0, 1,06 \lambda_0$;
2— $0,6 \lambda_0, 1 \lambda_0, 0,6 \lambda_0, 0,6 \lambda_0, 1 \lambda_0$.

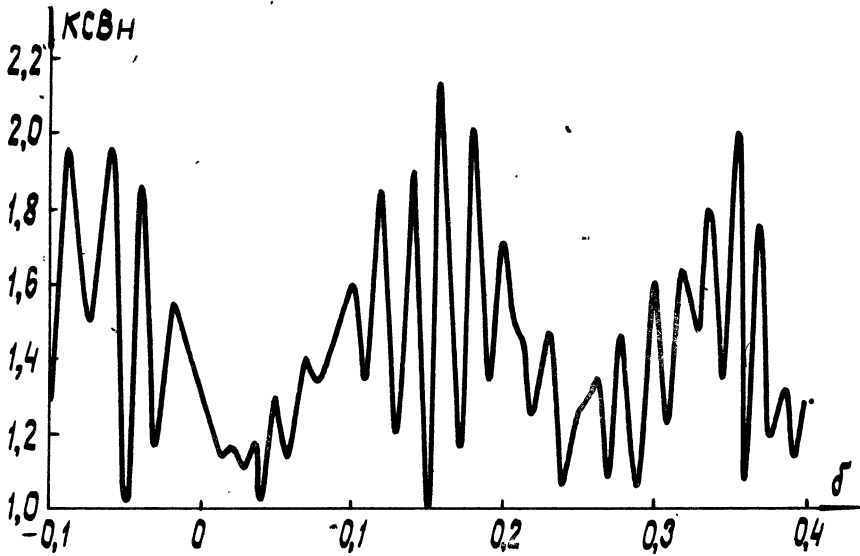


Рис. 12. Частотная зависимость КСВн входа делителя на 4096 каналов.

Результатирующие КСВн входа делителя на 4096 каналов приведены на рис. 12. Его другие параметры следующие: КСВн выходов 1,2; амплитуда коэффициента передачи 36,7–37,9 дБ; отклонение фазы коэффициента передачи от линейного закона $\pm 3^\circ$.

3. ДЕЛИТЕЛИ ПЛАНАРНОГО ТИПА С ПРОИЗВОЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ВЫХОДОВ

Такие делители выполняются по параллельно-последовательной или последовательно-параллельной схеме. Конструкции и методы расчета делителей рассмотрены в [36–40].

Приведем методику расчета делителя с произвольным количеством выходов и синтезированной частотной зависимостью коэффициента отражения входа [37]. В ней наибо-

лее полно показаны все последние достижения в области проектирования делителей такого типа.

Рассмотрим синтез делителя на N каналов с заданным распределением мощности между каналами, состоящего из лучевых делителей на M каналов с равным делением мощности. Синтез осуществляется в таком порядке.

1. Число каналов M выбирается таким образом, чтобы их можно было объединить в N групп по a_i каналов в каждой группе. При этом должны соблюдаться следующие условия:

$$\sum_{i=1}^{N+1} a_i = M; \quad \frac{a_i}{M} = P_i; \quad \sum_{i=1}^{N+1} P_i = 1,$$

где i - номер канала делителя с требуемым делением;
 P_i - нормированная мощность в i -м канале делителя.

2. Определяются нормированные значения мощностей в выходных каналах. Эти значения представляются в виде правильных дробей с наименьшим общим знаменателем. Числитель и знаменатель каждой из дробей интерпретируются так: наименьший общий знаменатель есть число M , числитель - число a_i .

3. Определяются каналы i , для которых числители дробей имеют минимальное и максимальное значения ($a_{i \min}$, $a_{i \max}$), и из условий $\frac{R_x}{a_{i \min}} \leq 120 \text{ Ом}$, $\frac{R_x}{a_{i \max}} \geq 10 \text{ Ом}$ выбирается R_x - выходное сопротивление делителя на M каналов, где 120 и 10 Ом максимальное и минимальное сопротивления линии передачи соответственно.

4. Определяется коэффициент трансформации $k_{\text{тр}} = \frac{P_0}{P_x} M$.

5. По заданному рассогласованию, полосе частот с помощью таблиц для ступенчатых переходов [41] определяется минимальное количество четвертьволновых ступеней перехода n_{\min} .

6. Исходя из конструктивных соображений, выбирается количество ступеней в делителе $n > n_{\min}$.

7. С помощью таблиц для ступенчатых переходов по n и Γ определяются нормированные волновые сопротивления ступеней $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$.

8. Производится объединение ступеней каналов делителя в эквивалентные ступени, исходя из возможности реализации волновых сопротивлений и приведения N -канального делителя к СВЧ-цепи, состоящей из 2-канальных разветвлений.

9. Выполняется расчет эквивалентных ступеней $\rho_{эп} = \frac{\rho_x}{\alpha_n} \rho_n$, где α_n - количество объединяемых ветвей.

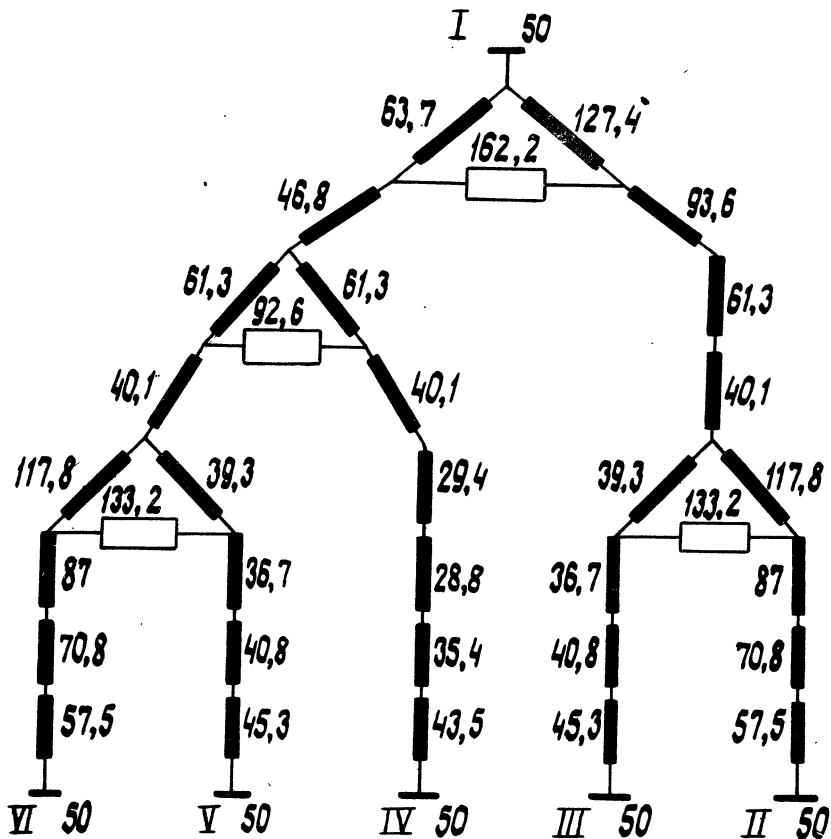


Рис. 13. Схема 5 - канального делителя.

10. Рассчитываются волновые сопротивления трансформаторов, трансформирующие выходные нагрузки делителя с разными сопротивлениями в нагрузки с одинаковыми сопротивлениями или в нагрузки с требуемыми сопротивлениями, если в этом есть необходимость.

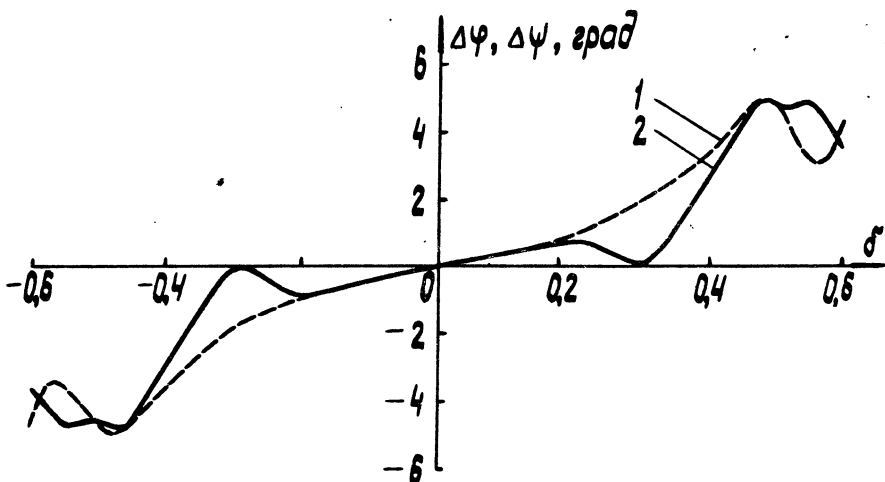


Рис. 14. Фазочастотные характеристики .

5-канального делителя:

1-разброс фаз между выходными каналами; 2-отклонение фазы коэффициента передачи от линейного закона.

11. Производится расчет балластных нагрузок 2-канальных разветвлений $Z_H = \frac{\rho'_2 \rho'_3}{R_1}$, где ρ'_2, ρ'_3 - сопротивления трансформирующих плеч 2-канального разветвления, R_1 - сопротивление, трансформируемое с выходов многоканального делителя на вход 2-канального разветвления.

12. Производится расчет амплитудно-и фазочастотных характеристик. Схема 5-канального делителя, рассчитанная по приведенной методике, показана на рис. 13 (цифрами обозначены номиналы волновых сопротивлений четвертьвол-

новых трансформаторов, развязывающих резисторов и подводящих линий). Распределение мощности между каналами соответствует закону косинус квадрат и равно 1/12, 3/12, 4/12, 3/12, 1/12. При расчете делитель рассматривался как ступенчатый переход с коэффициентом отражения $\Gamma = 0,05$, коэффициентом трансформации $K_{Tr} = 6$ и числом ступеней трансформации $n = 5$. На выходах делителя были использованы трехступенчатые трансформаторы.



Рис. 15. Частотные зависимости КСВн делителя на 5 каналов:

1,2 — КСВн плеча 1 и 5 соответственно.

Характерные частотные параметры делителя даны на рис. 14–15. Параметр $\Delta\psi^\circ$ (см. рис. 14) характеризует разброс фаз между выходными каналами в диапазоне относительной частотной расстройки $\delta = \Delta f/f_0$ (Δf — абсолютная частотная расстройка, f_0 — средняя частота). Отметим, что при одинаковой геометрической длине каналов электрическая длина их различна и с ростом относительной частотной расстройки увеличивается.

ВЫВОДЫ.

В результате анализа приведенного материала можно сделать вывод, что распределение и сложение СВЧ-мощности можно производить с помощью различных устройств, начиная с простых разветвлений линий передачи и кончая кольцевыми

Мостами с опрокидыванием фазы. Целесообразность применения ДМ того или иного типа определяется требованиями, предъявляемыми к ним. Так, для ДМ и систем распределения мощности (СРМ), предназначенных для работы в полосе частот 1–5%, пригодны любые из устройств, приведенных в таблице. 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 и делитель, описанный в [29].

В ДМ и СРМ, используемых в полосе частот 10–15%, необходимо избегать применения кольцевых мостов и мостов на сочлененных квадратах.

Широкополосные ДМ и СРМ предпочтительно выполнять на направленных 2-канальных делителях (см. рис. 1, л) или на симметричных кольцевых мостах. При больших мощностях целесообразно применять 2-канальный направленный делитель, описанный в [29].

ЛИТЕРАТУРА

1. Малорацкий Л.Г. К анализу гибридного кольца. — Радиотехника, 1967, т. 22, с. 27–32.
2. Черне Х.И., Малорацкий Л.Г. Характеристики кольцевых схем с рассогласованными нагрузками. — Радиотехника, 1970, № 3, т. 25, с. 30–36.
3. Ситнянский Б.Д. Кольцевые направленные ответвители. — Известия вузов. Радиоэлектроника, 1981, вып. 5, с. 76–78.
4. Заенцев В.В., Катушкина В.М. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний. — М.: Сов. радио, 1980.
5. Горбачев А.П. и др. Широкополосные многоканальные делители СВЧ-диапазона; Сб. науч. тр./Новосиб. электротехн. ин-та. — Новосибирск: НЭТИ, 1975, вып. 7.

6. Заикин Б.М., Моцоголов А.А. К расчету шести-полосных СВЧ-кольцевых схем. - Теоретическая электротехника, 1969, № 8, с. 140-145.
7. Power Dividers. - Microwaves, 1981, N 7, p.23.
8. Vogel R.W. Effects of the T-junction Discontinuity on the Design of Microstrip Directional Couplers. - IEEE Trans., 1973, vol. MTT-21, N 3, p.86.
9. Gordon P. Riblet. A Directional Coupler with Very Flat Coupling. - IEEE Trans., 1978, vol. MTT-26, N 2, p.70-74.
10. Шауро Г.С. Исследование широкополосности характеристик кольцевых и шлейфовых делителей, сумматоров с неравномерным делением мощности. - Деп. рукопись в ЦНИИ "Электроника", 12 окт. 1981, № 6598-ДР.
11. Шауро Г.С., Глазков Г.Н. Широкополосность характеристик кольцевых и шлейфовых делителей и сумматоров СВЧ-мощности с трансформацией сопротивлений. - Электронная техника, Сер.1. Электроника СВЧ, 1979, вып. 2, с. 19-26.
12. Adel A.M., Saleh. Planar Multiport Quadrature-Like Power-Dividers/ Combiners.- IEEE Trans., 1981, vol. MTT-29, N 4, p. 332-337.
13. Иселевич Я.Ш. Расчет полосковых направленных ответвителей на связанных линиях с потерями. - Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехническая, 1971, вып. 21, с. 69-75.

14. Малорацкий Л.Г. Направленные ответвители на связанных линиях с потерями. - Радиоэлектроника, 1972, т. 27, с. 48-51.
15. Шапошников А.А. Широкополосные направленные ответвители ТЕМ-волны. - Электронная техника. Сер. 1, 1974, № 7, с. 60-66.
16. Pavlidis D., Haus L. The Design and Performance of Three - Line Microstrip Couplers. - IEEE Trans., 1976, vol. MTT-24, N 10, p. 631-640.
17. Заикин Б.М., Конин В.В. и др. Расчет на ЭЦВМ параметров рассеяния устройств на связанных линиях. - Морское приборостроение, 1972, вып. 4, с. 16-21.
18. Tulaja V., Schick B. An Interdigitated 3-dB Coupler with Three Strips. - IEEE Trans., 1978, vol. MTT-26, N 9, p. 643-645.
19. Ефремов Ю.Г. и др. Расчет направленного ответвителя на четырех связанных линиях. - Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1976, № 2, т. XIX, с. 36-38.
20. Presser A. Interdigitated Microstrip Coupler Design. - IEEE Trans., 1978, vol. MTT-26, N 10, p. 801-805.
21. Wangh R., Lacombe D. "Unfolding" the Lange Coupler. - IEEE Trans., 1972, vol. MTT-20, N 11, p. 777-779.
22. Donald D. Design More Accurate Interdigitated Couplers. - Microwaves, 1976, vol. 15, N 5, p. 34-38.
23. Milley J.E. Looking for 3 to 8 dB Microstrip Coupler. - Microwaves, 1974, vol. 13, N 3, p. 58-62.

24. Бакуменко В.М. Широкополосные гибридные соединения СВЧ-диапазона. - В сб.: Антенно-фидерные и измерительные устройства СВЧ. - Харьков; Изд-во ХГУ, 1971.

25. Andrew H. Kwon. Design of Microstrip Transmission Line.- Microwave J., 1976, vol. 19, N 1, p.61-64.

26. Бутырина Л.А. и др. Двухканальный делитель с произвольным делением мощности СВЧ. - Деп. рукопись в ВИНТИ, 3 нояб. 1981, № 5073-81.

27. Parad L.I., Moynihan R.L. Split-Tee Power Divider. - IEEE Trans., 1965, vol. MTT-13, N 1, p.91-95.

28. Конин В.В. Сравнение частотных характеристик полосковых систем распределения мощности. - В кн.: Антенны/ Под ред. А.А.Пистолькорса. Вып. 28. - М.: Связь, 1980, с. 131-137.

29. А.с. 886107(СССР). Полосковый делитель мощности/ Б.М.Заикин, В.В.Конин, Н.С.Сыч. - Оpubл. в Б.И. 3.03.81.МКИ Н01р 5/12.

30. Заикин Б.М. и др. Метод определения параметров рассеяния фазированных антенных решеток. - Кибернетика и вычислительная техника, 1974, № 26, с. 53-58.

31. Белянина Е.К., Синьков Ю.А. Равноамплитудные и равнофазные двух- и четырехканальные делители СВЧ-мощности на микрополосковых линиях передачи. - Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехническая, 1973, вып. 1, с. 28-40.

32. Малорацкий Л.Г., Черне Х.И. Анализ схемы соединения кольцевых делителей мощности. - В кн.: Антенны/ Под ред. А.А.Пистолькорса. Вып. 17. - М.: Связь, 1973.

33. Заикин Б.М. и др. Новое в разработках СВЧ - устройств. - Киев: О-во "Знание" УССР, 1979.

34. Бова Н.Т. и др. Математическое моделирование параметров рассеяния делителя (сумматора) мощности СВЧ.- Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1973, т. ХУ1, № 10, с. 137.

35. Конин В.В. и др. Частотные характеристики коэффициентов передачи каналов систем распределения мощности СВЧ. - Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1978, № 6, т. XXI, с. 157-159.

36. Бова Н.Т., Конин В.В. Анализ АЧХ и ФЧХ делителей мощности СВЧ. - Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1980, № 2, т. XXIII, с. 148-150.

37. Конин В.В. Анализ амплитудных и фазочастотных характеристик многоканальных делителей мощности СВЧ. - Киев: О-во "Знание". УССР, 1981.

38. A l s t a d t e r D., H o u s e m a n E.O. Strip Transmission Line Corporate Feed Structures for Antenna Arrays. - IRE National Convention Record, 1959, p. III, March.

39. Бутырина Л.А. и др. Разработка метода и моделирования прогрессивного делителя СВЧ. - В кн.: Автоматизация проектирования в электронике. Киев: Техніка, 1975, № 11, с. 113-119.

40. Котляр М.Я., Беллон О.О. Широкополосные делители мощности на полосковых линиях с произвольным числом плеч. - Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1975, № 2, т. ХУШ, с. 61-66.

41. Фельдштейн Л.Л. и др. Справочник по элементам волноводной техники. - М.: Сов. радио, 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. 2-канальные делители мощности	4
2. Многоканальные делители мощности параллельного типа	18
3. Делители планарного типа с произвольным количеством выходов	25
Выводы	29
Литература	30