

Д. т. н. Ф. Ф. ДУБРОВКА, к. т. н. П. Я. СТЕПАНЕНКО,
Н. Н. БЕРДАР, А. А. КОРОЦИНСКИЙ

Украина, г. Киев, НТУУ "Киевский политехнический институт",
ДП "Элисаг", ДП "Сатмаш"
E-mail: dubrovka@yahoo.com, chmil@jssaturn.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
18.04 2003 г.

Оппонент к. т. н. А. М. КУПРИЙ
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ПЕРЕСТРОЙКИ

Предложен новый подход и представлены результаты исследования, проектирования, изготовления, настройки и испытания действующих образцов фильтра СВЧ.

Наряду с передачей информации по спутниковым каналам для целей сверхдальней связи используются тропосферные станции, работающие в диапазоне сверхвысоких частот. Необходимость обеспечения устойчивой связи между объектами, находящимися на больших расстояниях друг от друга, выдвигает в число актуальных задач создание станций тропосферной связи с перестройкой частоты. Особенностью такой тропосферной станции является наличие в ее передающем блоке нескольких полосно-пропускающих фильтров с аналоговой перестройкой, рассчитанных на передачу значительных уровней мощности (более 500 Вт). В связи с этим основными требованиями, предъявляемыми к фильтру, являются высокий уровень пропускаемой мощности, минимальные вносимые потери, высокая стабильность параметров фильтра при перестройке частоты и изменении температуры окружающей среды.

Создание высокостабильного полосно-пропускающего фильтра, удовлетворяющего указанным требованиям, предусматривает тщательный анализ и выбор технического решения, проведение с высокой точностью численного моделирования отдельных элементов и структуры в целом, разработку технологии изготовления и наладки действующего образца, а также его испытание на воздействие механических и климатических факторов.

Известны механически перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры в коаксиальном исполнении, широко представленные в литературе и рекламных проспектах, а также отдельные образцы волноводных перестраиваемых фильтров, способных работать в дискретных частотных точках. Из проведенного анализа известных вариантов фильтров, например [1], следует, что вышеизложенные требования могут быть выполнены при использовании волноводных конструкций на высокодобротных объемных резонаторах с механической перестройкой частоты металлическими стержнями.

Главным недостатком известных механически перестраиваемых волноводных фильтров является зна-

чительное изменение ширины полосы пропускания при перестройке. К тому же они имеют сложную систему механической перестройки вследствие необходимости получения градуировочных характеристик резонаторов с одинаковым наклоном. Последнее достигается путем кропотливой настройки и лишь в отдельных частотных точках диапазона перестройки. Вследствие указанных недостатков такие фильтры не могут использоваться в современных тропосферных станциях, где требуется сохранение постоянства абсолютного значения ширины полосы пропускания и высокой крутизны частотной характеристики при перестройке центральной рабочей частоты в значительном диапазоне.

В [1] высказана идея достижения почти постоянной ширины полосы пропускания волноводного фильтра при перестройке, состоящая в получении таких параметров неоднородностей, которые обеспечили бы постоянство нагруженных добротностей резонаторов в требуемом диапазоне частот. На практике, однако, это условие достигается лишь приближенно — вследствие разной крутизны частотных характеристик емкостных и индуктивных неоднородностей, образующих резонаторы с разными величинами нагруженных добротностей. К тому же, поскольку геометрические длины отрезков волноводов, соединяющих резонаторы, не изменяются, то выполнение упомянутого условия может лишь уменьшить скорость изменения ширины полосы пропускания фильтра при перестройке. Необходим был поиск дополнительных условий, выполнение которых позволило бы получить на практике характеристики фильтра, обеспечивающие работоспособность тропосферной станции с перестройкой частоты.

Проведенные теоретические исследования позволили выработать такие условия. Прежде всего, необходимо обеспечить точное равенство геометрических длин резонаторов, в которых движутся перестраиваемые центральную частоту металлические стержни. В этом случае все перестраиваемые стержни могут быть выполнены одинаковыми. Это кардинально упрощает систему механического управления движением стержней и позволяет повысить надежность работы не только самого фильтра, но и станции в целом. Синхронное перемещение одинаковых стержней позволяет достичь высокой точности аналоговой перестройки фильтра и способствует созданию эф-

фективных программ управления перестройкой частоты станции с помощью ЭВМ. Еще одним, не менее важным, условием является обеспечение фазовой коррекции четвертьволновых отрезков волноводов между перестраиваемыми резонаторами. Оба найденных условия позволяют создавать механически перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры, пригодные для применения в передающих устройствах тропосферных станций с высокими тактико-техническими показателями.

Выбор конструкции и разработка математической модели механически перестраиваемого волноводного фильтра

Все три упомянутых выше условия построения высококачественного механически перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра можно выполнить с достаточно высокой степенью точности с помощью соответствующих комбинаций емкостных и индуктивных неоднородностей в прямоугольном волноводе, если их размеры и расстояния между ними найти путем численной оптимизации с использованием строгих математических моделей. При этом первое приближенное условие и методика синтеза фильтра с четвертьволновыми связями, например [1, 2], используются для определения размеров фильтра, подлежащих уточнению.

В результате рассмотрения нескольких вариантов построения фильтра сделан вывод о том, что одна из наиболее технологичных конструкций может быть получена, если неоднородности, образующие резонаторы, расположить на одной металлической пластине, помещенной в разрез стандартного прямоугольного волновода. Тогда элементарная ячейка, составляющая основу конструкции фильтра, принимает вид, показанный на рис. 1. Здесь емкостная неоднородность образована двумя прямоугольными металлическими штырями, расположенными симметрично относительно обеих плоскостей симметрии прямоугольного волновода. Ее физической моделью является отрезок H-волновода с конечной толщиной гребней. В качестве индуктивной неоднородности используется короткая металлическая пластина конечной толщины, соединяющая верхнюю и нижнюю стенки прямоугольного волновода. Толщины емкостных штырей и индуктивных пластин выбраны равными, с тем чтобы изготовить их из одной длинной пластины электроискровым способом.

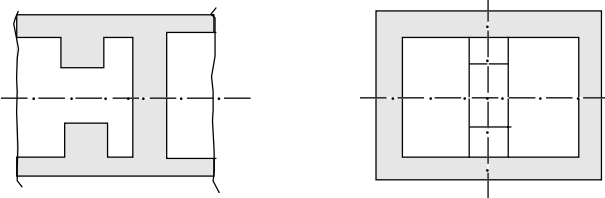


Рис. 1. Элементарная ячейка, составляющая основу конструкции фильтра

Для электродинамического моделирования целесообразно использовать симметрию фильтра относительно плоскостей, проходящих через середины широкой и узкой стенок прямоугольного волновода параллельно его продольной оси, а также симметрию каждого резонатора и фильтра в целом относительно

поперечных плоскостей. Сложность задачи математического моделирования фильтра из комбинации показанных на рис. 1 структур обуславливается достаточно близким расположением неоднородностей и необходимостью учета в каждой из них спектров их собственных волн магнитного и электрического типов. Для вычисления собственных волн волноводов сложных сечений необходимо применение численных методов. Расчет критических волновых чисел и собственных функций H-волновода проведен методом частичных областей с учетом особенности поля на ребре [3].

Решение электродинамической задачи распространения волн в структуре фильтра проведено методом обобщенных матриц рассеяния. Для вычисления обобщенных матриц рассеяния емкостной и индуктивной неоднородностей конечной длины предложен эффективный алгоритм на основе метода интегральных уравнений [4] с учетом симметрии относительно плоскости, проходящей через середину неоднородности перпендикулярно продольной оси волновода. Учет симметрии неоднородности относительно поперечной плоскости позволяет существенно упростить вычисление ее обобщенной матрицы рассеяния.

Каждая одиночная неоднородность образуется тремя частичными областями и имеет две границы раздела. Поэтому обе неоднородности описываются одинаковыми системами интегральных уравнений, которую получаем в соответствии с [4]. Учитывая идентичность структур полей по обе стороны от неоднородности, для каждой падающей на неоднородность волны трансформируем полученную систему интегральных уравнений в две независимые системы относительно сумм и разностей тангенциальных электрических полей в отверстиях связи.

Чтобы решить эти независимые системы интегральных уравнений, применим метод Галеркина, представляя суммы и разности тангенциальных электрических полей для каждой падающей на неоднородность волны разложениями в ряды по собственным векторным функциям волновода связи. В результате приходим к двум системам линейных алгебраических уравнений со многими правыми частями по числу волн, падающих на неоднородность слева и справа. Решая данные системы, находим распределения тангенциальных электрических полей в отверстиях связи и по ним рассчитываем элементы обобщенной матрицы рассеяния соответствующей неоднородности.

Таким образом, расчет параметров емкостной неоднородности включает нахождение критических волновых чисел и собственных функций H-волновода, вычисление коэффициентов связи H-волновода и прямоугольного волновода, решение систем линейных алгебраических уравнений для случаев расположения в плоскости симметрии неоднородности магнитной и электрической стенок и определение обобщенной матрицы рассеяния.

Наличие вблизи индуктивной неоднородности отрезка H-волновода приводит к появлению в спектрах образующих ее волноводов высших типов волн магнитного и электрического типов, имеющих вариации поля по узкой стенке. Поэтому для вычисления обоб-

щенной матрицы рассеяния индуктивной пластины в прямоугольном волноводе необходимо решение ряда задач дифракции на разветвлении с разными индексами, определяющими вариации полей по обеим поперечным координатам. Обобщенная матрица рассеяния индуктивной неоднородности затем находится путем выбора из общего числа полученных решений тех из них, которые определяются падающими волнами со стороны отрезка П-волновода.

Следующим шагом в решении задачи проектирования фильтра является моделирование резонаторов со стержнями перестройки резонансной частоты. Для упрощения электродинамической задачи круглые перестраиваемые фильтр стержни заменены эквивалентными квадратными. Таким образом, физическая модель перестраиваемого металлическим стержнем резонатора представляет собой две одинаковые, но включенные навстречу, группы из двух неоднородностей с расположенным между ними в плоскости симметрии отрезком П-волновода, причем индуктивные пластины расположены ближе к середине резонатора, чем емкостные штыри.

Обобщенная матрица рассеяния каждого резонатора фильтра находится следующим образом. Вначале находится и запоминается обобщенная матрица рассеяния отрезка П-волновода, затем находится обобщенная матрица рассеяния индуктивной пластины, и обе матрицы объединяются через отрезок линии передачи, равный расстоянию между емкостной и индуктивной неоднородностями. Перестановкой элементов находится обобщенная матрица рассеяния соединения индуктивной и емкостной неоднородностей на выходе резонатора. Затем вычисляется обобщенная матрица рассеяния перестраиваемого стержня. Последовательным объединением обобщенных матриц рассеяния входной составной неоднородности, перестраиваемого стержня и выходной составной неоднородности вычисляем результирующую обобщенную матрицу рассеяния резонатора.

По аналогии с методикой получения обобщенной матрицы рассеяния резонатора составляется математическая модель всего фильтра.

Численные результаты, конструктивное исполнение, технология сборки и данные экспериментальных исследований

По полученным формулам разработаны алгоритмы и программы расчета частотных характеристик отдельных резонаторов и всего фильтра. С помощью разработанной программы методика расчета рассматриваемого перестраиваемого фильтра состоит в следующем.

В соответствии с техническим заданием на разработку перестраиваемого фильтра по формулам синтеза его эквивалентных параметров [1, 2] вычисляем требуемые нагруженные добротности резонаторов на верхней частоте диапазона перестройки. Путем численных расчетов определяем размеры резонаторов, обеспечивающие найденные требуемые нагруженные добротности. Для этого проводим электродинамический расчет частотных характеристик всех резонаторов при разных параметрах образующих их неоднородностей и расстояний между ними. Из всех вари-

антов размеров неоднородностей и длин отрезков прямоугольного волновода, образующих резонаторы, выбираем те, которые обеспечивают примерное постоянство нагруженных добротностей и почти одинаковые значения резонансных частот резонаторов при перестройке фильтра. Найденные таким образом размеры фильтра используем в процедуре многопараметрической оптимизации. В результате получаем уточненные размеры, обеспечивающие соответствие характеристик перестраиваемого фильтра требованиям технического задания.



Рис. 2. Опытный образец узкополосного пятирезонаторного полосно-пропускающего фильтра

Для экспериментального подтверждения правильности изложенной теории разработаны, изготовлены и испытаны один макетный и десять опытных образцов узкополосного пятирезонаторного полосно-пропускающего фильтра с максимально плоской частотной характеристикой вносимого ослабления (рис. 2).

Конструктивно фильтр выполнен на отрезке стандартного прямоугольного волновода, ширина и высота которого составляют соответственно 48 и 24 мм. Резонаторы и корректирующие неоднородности расположены на сплошной пластине толщиной 8 мм. Пластина впаивается в продольный разрез прямоугольного волновода. (Для снятия напряжения металла волновод перед разрезанием подвергался отжигу.)

Перестройка фильтра осуществляется с помощью круглых стержней, вводимых в каждый резонатор со стороны узкой стенки. Для предотвращения смещения стержней в радиальном направлении используются специально разработанные втулки. Стержни жестко крепятся к прямоугольной подвижной рамке, которая может перемещаться благодаря зубчатой насечке. Тем самым обеспечивается синхронность движения всех стержней внутри резонаторов. Прямоугольная рамка приводится в движение двумя шестернями, жестко закрепленными на валу, который, в свою очередь, управляется шаговым электродвигателем посредством зубчатого редуктора. Для уменьшения механических усилий на вал он выполнен в виде трубки достаточно большого диаметра, установленной с обеих сторон в подшипники качения. Этим значительно уменьшается разброс в поступательном ходе стержней за счет скручивания вала.

С целью сохранения формы частотной характеристики фильтра при многократной перестройке и стабильности установки необходимой частоты все зубчатые передачи выполнены с высокой точностью и соединены с помощью разработанной системы уменьшения люфтов. Для обеспечения высокой точности настройки фильтра в большом числе частотных точек (около 600) передача вращения от шагового электродвигателя к валу привода стержней осуществляется с помощью понижающего редуктора. Шаговый электродвигатель управляется с помощью микропроцессора. Фиксация положения стержней внутри резонаторов при обесточенном шаговом электродвигателе достигается с помощью оригинальной системы торможения, состоящей из миниатюрного электромагнита и устройства управления.

Для уменьшения влияния изменения температуры окружающей среды (от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$) на электродинамические характеристики фильтра перестраивающие стержни выполнены из ковара, а втулки, в которых они перемещаются при перестройке фильтра, тщательно подобраны и отрегулированы на величину оптимального зазора.

Характерной особенностью узкополосных фильтров являются значительные потери в полосе пропускания. Поскольку рассматриваемый фильтр рассчитан на применение в передающем блоке тропосферной станции, большие потери в полосе пропускания недопустимы. С целью уменьшения вносимого фильтром ослабления в полосе пропускания волновод, пластина с резонаторами и перестраивающие стержни выполнены с высокой степенью чистоты и покрыты серебром. Для предотвращения излучения мощности через зазоры перестраивающие стержни перемещаются в бесконтактных ловушках, впаиваемых в отверстия в боковой стенке волновода с наружной стороны. Для уменьшения нагрева фильтра за счет потерь мощности в металлических стенках резонаторов и стержнях перестройки используется радиатор, установленный снизу корпуса. Вся конструкция фильтра вместе с механизмом перемещения стержней помещена в герметичный кожух, защищающий ее от попадания внутрь пыли, воды, морского тумана.

Одной из самых сложных технологических операций при сборке фильтра является установка начального положения перестраивающих стержней на верхней частоте диапазона. С этой целью разработана специальная оснастка, позволяющая совместить начала стержней в одной плоскости с точностью до двадцати микрометров.

Экспериментальные исследования фильтров показали, что точность их промышленного изготовления недостаточна для неискаженного перемещения частотной характеристики при перестройке. Это привело к необходимости подстройки резонансных частот резонаторов по разработанной методике. Все изготовленные и настроенные по этой методике фильтры показали высокую стабильность параметров в диапазоне рабочих температур.

После испытаний на воздействие механических и климатических факторов все фильтры были экспериментально проверены на соответствие электродинамических параметров требованиям технического за-

дания. На **рис. 3** показаны частотные характеристики вносимого ослабления фильтра на трех рабочих частотах диапазона перестройки. Сплошной линией показана амплитудно-частотная характеристика фильтра, настроенного на верхнюю рабочую частоту. Штриховая и штрих-пунктирная линии соответствуют настройке фильтра на среднюю и нижнюю частоты диапазона, соответственно. Крестиками нанесены измеренные значения вносимого ослабления.

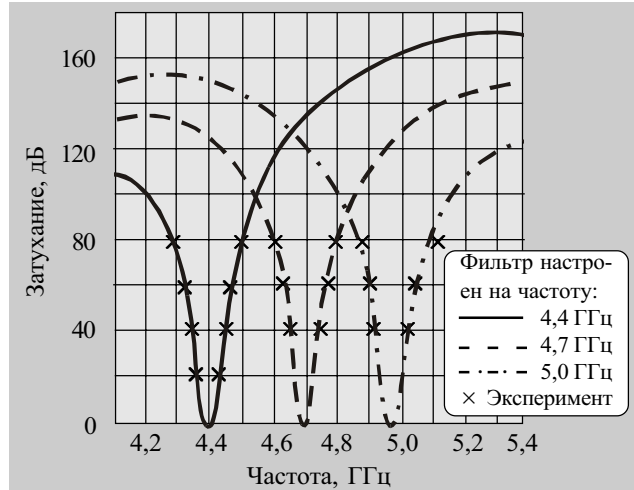


Рис. 3. Частотные характеристики вносимого ослабления фильтра

На **рис. 4** представлены измеренная и расчетная частотные характеристики вносимого ослабления фильтра вблизи его полосы пропускания на верхней частоте диапазона перестройки.

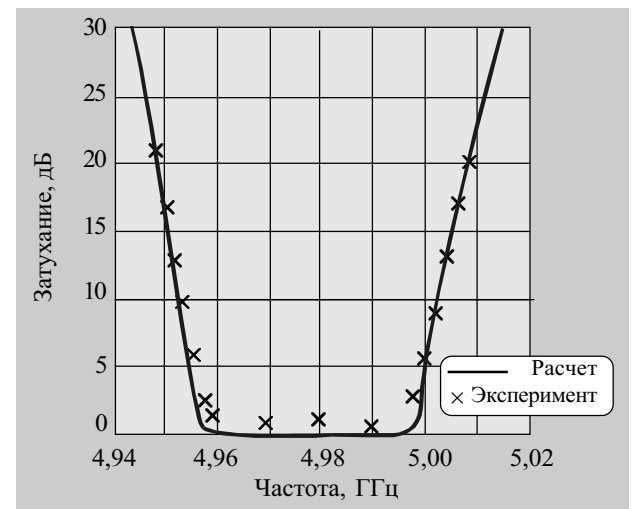


Рис. 4. Измеренная и расчетная частотные характеристики вносимого ослабления фильтра

Из рис. 3 и 4 видно, что теоретические и экспериментальные частотные характеристики фильтра хорошо согласуются во всем диапазоне перестройки. Измеренная полоса пропускания фильтра по уровню 0,5 дБ от уровня вносимого ослабления на центральной частоте равна 26 МГц в диапазоне перестройки 13%. Потери в полосе пропускания во всем диапазоне перестройки не превышают 0,9 дБ. Измеренное значение коэффициента стоячей волны фильтра в полосе про-

пускания максимально на краях диапазона перестройки и не превышает 1,4. Фильтр обеспечивает подавление не менее 50 дБ (85 дБ) при расстройке от центральной частоты на К 60 МГц (К 130 МГц).

Заключение

Предложен новый подход к построению волноводных программируемых механически перестраиваемых полосно-пропускающих фильтров, отличающихся стабильностью характеристик и постоянством полосы пропускания при перестройке в широком диапазоне частот. Его суть в комбинации индуктивных и емкостных неоднородностей и соответствующем сочетании значений их электродинамических параметров. Дескриптором фильтра служит обобщенная матрица рассеяния, полученная с использованием метода интегральных уравнений для решения задач дифракции электромагнитных волн на отдельных неоднородностях, образующих резонаторы, с учетом их симметрии.

Разработанная математическая модель пригодна для проектирования широкого класса волноводных механически перестраиваемых полосно-пропускаю-

щих фильтров на повышенный уровень мощности. Экспериментальные исследования опытных образцов подтвердили высокую адекватность математической модели, что может полностью исключить необходимость какой-либо подстройки фильтра при обеспечении высокой точности его изготовления.

Отличные характеристики разработанного волноводного программируемого механически перестраиваемого фильтра с почти постоянной шириной полосы пропускания в широком диапазоне перестройки открывают возможности создания принципиально новых передающих станций систем связи.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев Д. П., Гак И. И., Цимблер И. И. Механически перестраиваемые приборы СВЧ и разделительные фильтры.— М.: Связь, 1973.
2. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники.— М.: Сов. радио, 1967.
3. Волноводы сложных сечений / Г. Ф. Заргано, В. П. Ляпин, В. С. Михалевский и др.— М.: Радио и связь, 1986.
4. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Миттры.— М.: Мир, 1977.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Основные принципы построения информационно-аналитической системы Национального космического агентства Украины. *В. И. Колесник, В. В. Смаглюк, Д. В. Смаглюк, К. Ф. Волох, А. Д. Куцарь (Украина, г. Киев)*
- Радиометрия СВЧ-диапазона: медицинские аспекты использования. *М. В. Колисниченко, В. П. Куценко, Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко (Украина, г. Киев)*
- Моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов. *П. А. Емцев (Украина, г. Киев)*
- Малогабаритный полосовой электромеханический фильтр. *Паэранд Ю. Э. (Украина, г. Алчевск)*
- Экономичный метод приближенной минимизации ДНФ булевых функций. *С. Ю. Лузин, О. Б. Полубасов (Россия, г. С.-Петербург)*
- Высокоэффективный алгоритм управления термостатом. *А. М. Ахиезер, В. И. Мещеряков (Украина, г. Одесса)*
- Камера тепла и холода. *А. Х. Дунаенко, В. Д. Фотий, А. А. Ащеулов (Украина, г. Черновцы)*
- Возможности критериального подхода при выборе режима работы термоэлектрического устройства. *В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. В. Быкадоров (Украина, г. Одесса)*
- Экспериментальное исследование эффективности проволочного радиатора новой конструкции. *Л. М. Хольвинская, Т. Ю. Николаенко, Ю. Е. Николаенко (Украина, г. Киев)*
- Тепловой режим изотермической печатной платы с регулируемой температурой. *В. М. Батуркин (Украина, г. Киев)*
- Исследование температурного поля накопителя на жестких магнитных дисках. *Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец, В. С. Грабовский (Украина, г. Киев)*
- Распределение температуры анизотропной пластины в случае ее оптической прозрачности. *А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул (Украина, г. Черновцы)*
- Исследование свойств поликремния на изоляторе при криогенных температурах для создания сенсоров. *А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, С. Н. Матвиенко, Ю. Н. Ховерко (Украина, г. Львов)*
- Моделирование электрофизических свойств полупроводниковых материалов для детекторов ионизирующих излучений. *А. И. Кондрик, Г. П. Ковтун (Украина, г. Харьков)*



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции