электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.396.67

Трехканальный волноводный мультиплексор *KU*-диапазона на основе полосовых фильтров с пластиной в *E*-плоскости

Чехутский В.И., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

Научный руководитель: Овечкин В.С.,ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»
main@rl1-11.bmstu.ru

Мультиплексор – устройство, использующееся в радиосистемах для объединения нескольких узкополосных каналов в один широкополосный. По сути, мультиплексор является избирательным сумматором. В рамках данной работы рассматривается волноводный трехканальный мультиплексор *Ku*-диапазона.

Известно несколько вариантов схем построения мультиплексоров, опишем четыре основные схемы [1].

Мультиплексор на основе делителей на две равные части

На рисунке 1 представлена структура мультиплексора на основе делителей на две равные части. Каждый канал состоит из двух полосовых фильтров и двух делителей на две равные части, в качестве которых могут применяться направленные ответвители, мостовые делители, двойные волноводные тройники. Главное преимущество данного варианта построения - направленность, которая сводит к минимуму взаимное влияние каналов друг на друга. Также важным преимуществом является возможность замены имеющихся или добавления дополнительных каналов.

Принцип работы данной схемы поясним на примере первого канала. Сигнал с частотой f_1 делится в ответвителе пополам, при этом сигнал, ответвленный во вторичный канал ответвителя получает фазовый сдвиг 90 °. Далее сигналы в обоих каналах ответвителя проходят через второй ответвитель и еще раз делятся пополам, при этом сигналы, проходя через ответвитель в соседний канал, получают еще один фазовый сдвиг на 90 °. В результате сигналы на выход вторичного канала приходят синфазно и суммируются, а на выход основного канала приходят в противофазе и вычитаются. Сигналы с частотами $f_2 \ldots f_n$ не проходят через полосовые фильтры первого канала,

настроенные на центральную частоту f_1, а отражаются от их входов, при этом получают в направленном ответвителе первого канала фазовый сдвиг на 90° и проходят на выход.

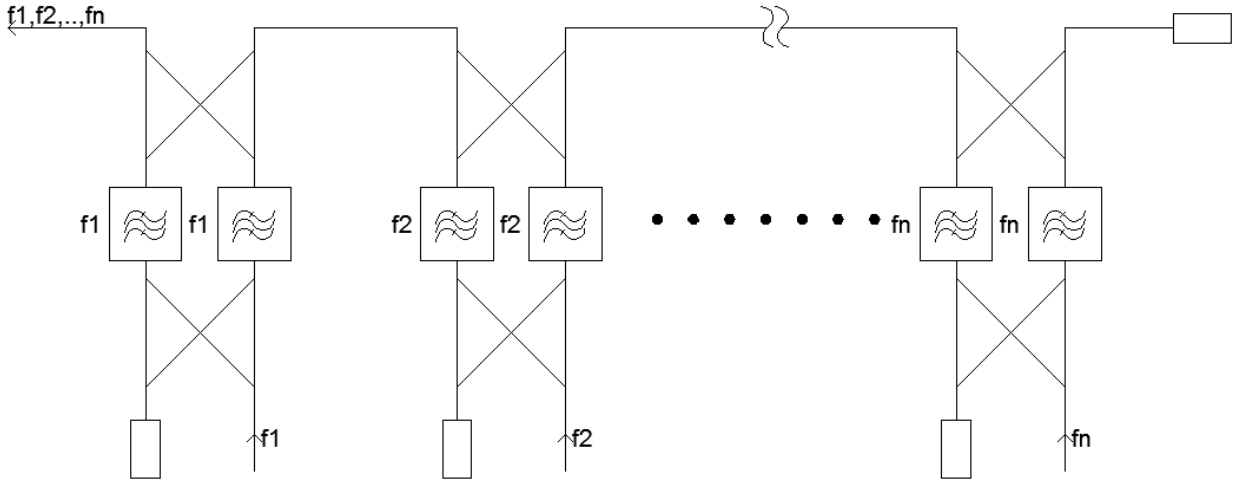

Рис. 1. Схема мультиплексора на основе делителей на две равные части

Главным недостатком данной схемы являются значительные габаритные размеры, которые существенно ограничивают ее применение.

Мультиплексор с циркуляционной связью

Каждый канал, при такой реализации состоит из циркулятора и фильтра, как показано на рисунке 2.

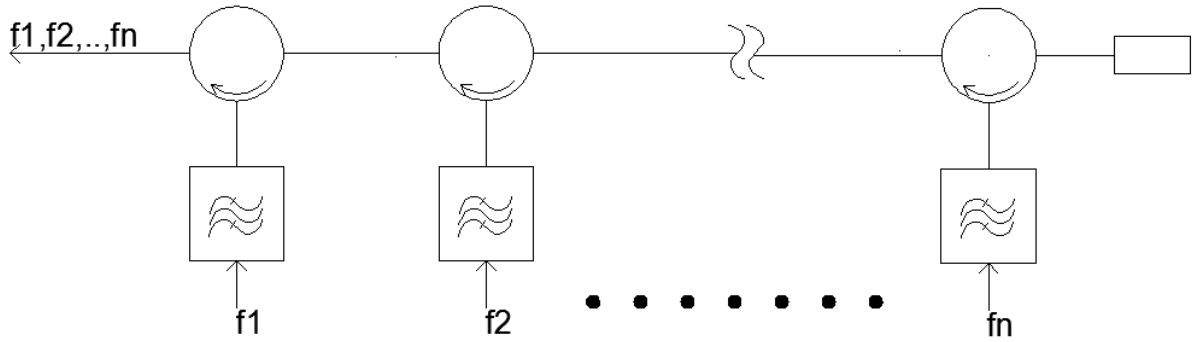

Рис. 2. Схема мультиплексора с циркуляционной связью

Сигнал с частотой f_1поступает в суммарный канал через циркулятор, сигналы с частотами $f_2..f_n$ проходит через циркулятор в первый канал, отражаются от полосового фильтра, а затем уходят в суммарный канал и так далее.

Основным недостатком данной реализации являются потери, вносимые циркуляторами.

Мультиплексор с направленными фильтрами

На рисунке 3 показана схема мультиплексора, на основе направленных фильтров.

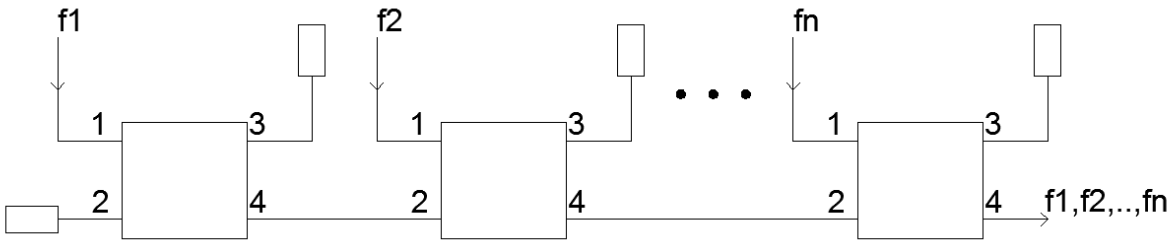

Рис. 3. Мультиплексор с направленными фильтрами

Направленный фильтр – устройство с одним входом и тремя выходами. Принцип работы устройства следующий. На первый выход первого канала приходит сигнал с частотой f_1. Вся мощность в рабочей полосе частот проходит на четвертый выход, на третий выход приходит внеполосная мощность, которая поглощается в согласованной нагрузке. На второй выход при идеальной направленности мощность не поступает. Далее с четвертого выхода первого фильтра сигнал проходит на второй выход второго фильтра. Во втором фильтре этот сигнал суммируется с сигналом частоты f_2, пришедшим с первого входа второго фильтра. Сумма двух сигналов проходит на четвертый выход второго фильтра и так далее.

Мультиплексоры с непосредственной связью через волноводный канал

Реализация мультиплексора, в которой фильтры имеют непосредственную связь, показана на рисунке 4.

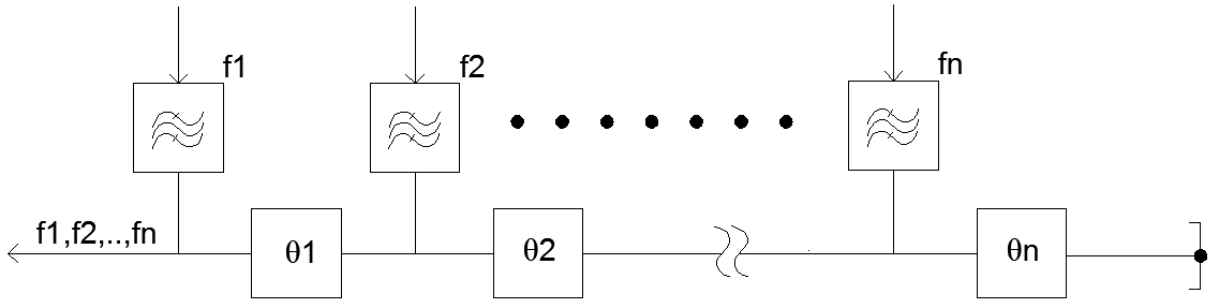

Рис. 4. Мультиплексор с непосредственной связью через волноводный канал

Сигнал, из первого канала с центральной частотой f_1 проходит в суммирующий волновод, где делится пополам. Одна часть мощности проходит непосредственно на выход устройства, а вторая часть мощности после многократных отражений от остальных канальных фильтров и от короткозамыкателя на конце суммируется с первой частью

сигнала на выходе устройства. Для соблюдения синфазности суммирования требуется задать расстояние между каналами, равное $\frac{n\lambda_в}{2}$, где n – натуральное число.

Первым этапом проектирования данной схемы построения является расчет полосовых фильтров. После этого фильтры устанавливаются в каналы и мультиплексор рассчитывается с ними. При такой последовательности возможна компенсация влияния каналов друг на друга. Недостаток данной схемы заключается в необходимости моделировать схему заново при добавлении каналов или перестройке имеющихся. Кроме того, увеличение каналов более трех-четырех настолько усложняет настройку, что делает такой способ для создания многоканальных мультиплексоров крайне сложным.

Такая реализация является оптимальной с точки зрения массогабаритных параметров, что делает ее наиболее подходящей для систем, в которых эти параметры являются определяющими.

В результате анализа преимуществ и недостатков приведенных выше схем, выбрана схема построения мультиплексора с непосредственной связью через волноводный канал.

Функциональная схема разработанного устройства представлена на рисунке 5.

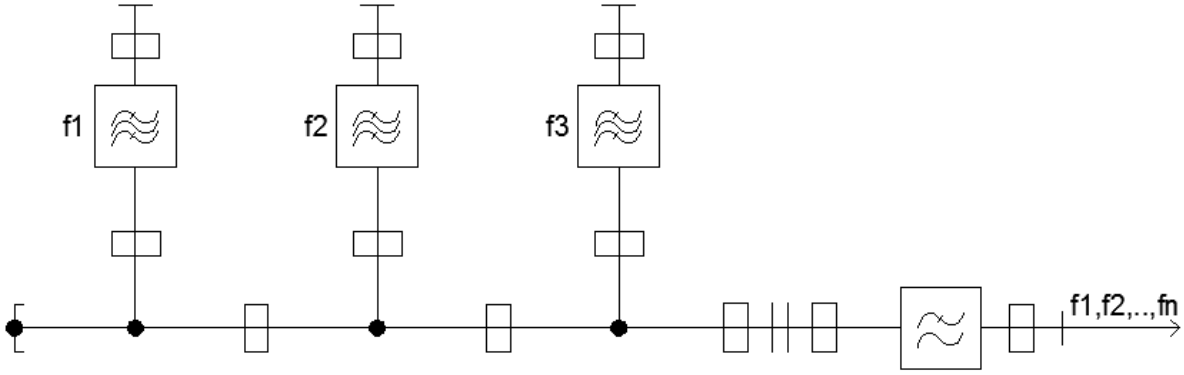

Рис. 5. Схема трехканального мультиплексора *Ku*-диапазона

Для обеспечения подавления соседней станции в каналах мультиплексора установлены полосовые фильтры (ПФ). В качестве ПФ выберем волноводный фильтр с проводящей платиной в *E*-плоскости [2]. Данный тип полосовых фильтров выбран из следующих соображений:

- Наличие в них всего одной прецизионной детали;
- Особенности конструкции устройства, являющейся оптимальной с точки зрения распространения волн в линии передачи;
- Небольшие габаритные размеры устройства;

- Простота и относительная дешевизна изготовления.

Первый фактор является решающим, так как данное устройство работает на частотах, при которых отклонение геометрических размеров элементов устройства в несколько сотых миллиметра от требуемого, приводит к значительному ухудшению электродинамических параметров. Возможности производства не всегда могут обеспечить настолько высокую точность.

Особенностью конструкции данного типа фильтров является разрез посередине широкой стенки волновода. Известно, что структура поля в прямоугольном волноводе такова, что в середине широкой стенки прямоугольного волновода располагаются узлы поверхностных токов, следовательно, щели являются неизлучающими, то есть такой разрез является оптимальным с точки зрения вносимых потерь [4].

На рисунке 6 представлена частотная зависимость *S*-параметров канального полосового фильтра, настроенного на центральную частоту 12,1 ГГц.

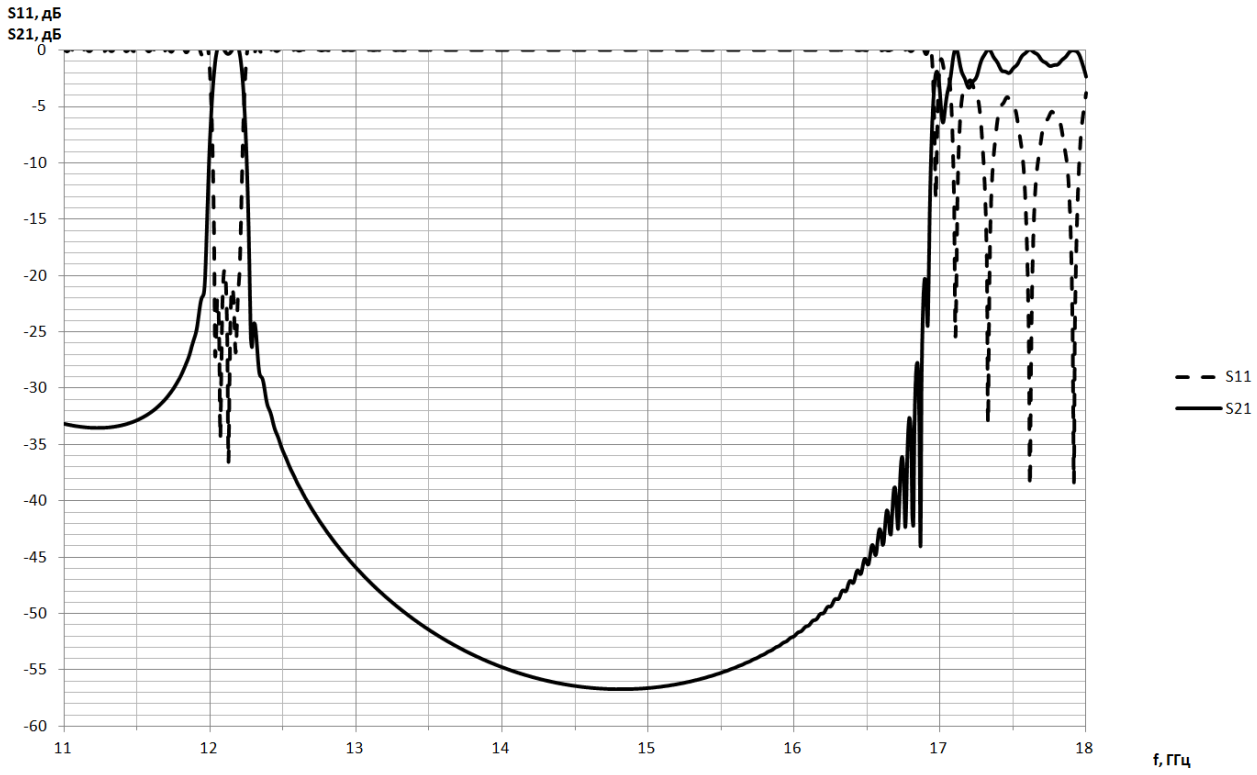

Рис. 6. Частотная зависимость *S*-параметров ПФ, настроенного на центральную частоту 12,1 ГГц

Полосовой фильтр обеспечивает хорошее подавление в полосе заграждения до частоты $f = 1{,}4 \cdot f_0$, где f_0 - центральная частота полосы пропускания ПФ, но имеет паразитную полосу пропускания на более высоких частотах.

Каналы с полосовыми фильтрами объединены посредством волноводного сумматора. Общая конструкция каналов с сумматором в сборе представлена на рисунке 7.

Волноводные каналы с полосовыми фильтрами присоединяются к волноводному сумматору посредством диафрагм связи. Устройство состоит из трех частей: двух корпусных деталей и проводящей пластины. Между каналами должно соблюдаться расстояние кратное $\frac{\lambda_в}{2}$. Для удобства подключения крайние каналы конструктивно дополнены ступенчатыми изгибами на 90 °. Общие геометрические размеры устройства $6{,}6\lambda_0 \times 2{,}5\lambda_0$, где λ_0 - длина волны в свободном пространстве на частоте $f_0 = 12{,}5$ ГГц.

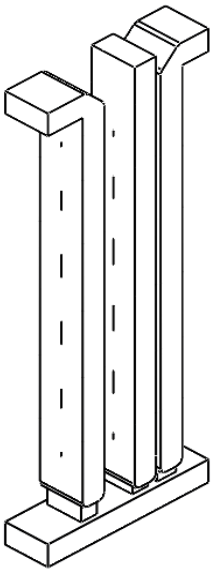

Рис. 7. Внутренний объем каналов с сумматором мультиплексора

Зависимости S-параметров мультиплексора от частоты представлены на рисунке 8.

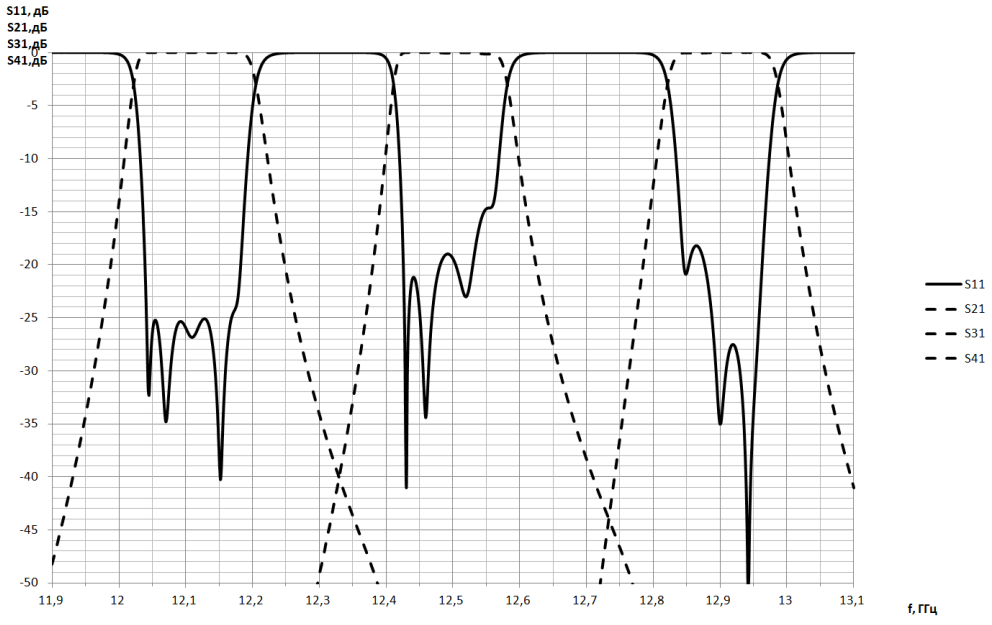

Рис. 8. Частотная зависимость *S*-параметров мультиплексора

Из рисунка видно, что мультиплексор обеспечивает три полосы пропускания: $f_1 = 12{,}05 - 12{,}15$ ГГц, $f_2 = 12{,}43 - 12{,}53$ ГГц и $f_3 = 12{,}85 - 12{,}95$ ГГц. В пределах этих полос возвратные потери не превышают -19 дБ, а прямые не более 0,1 дБ. Вне полосы пропускания, на частотах $f_{cc1} = 12{,}3$ ГГц, $f_{cc2} = 12{,}7$ ГГц получено подавление более 30 дБ.

Как сказано выше, полосовые фильтры, установленные в каналах, обеспечивают подавление внеполосного излучения только до частоты $f = 1{,}4 \cdot f_1$. В большинстве радиосистем, использующих мультиплексоры, требуется подавление сигналов на частотах выше указанной, в частности на частотах соответствующих второй гармонике сигнала. Для решения этой проблемы в суммирующем плече мультиплексора установлен фильтр нижних частот (ФНЧ). Внутренний объем данного ФНЧ реализован в виде, представленном на рисунке 9 [3].

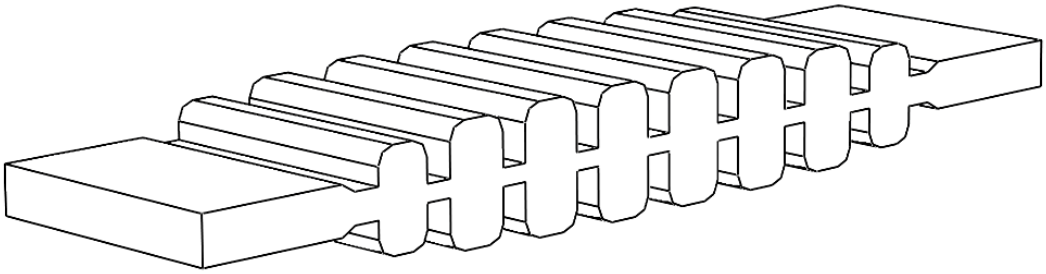

Рис. 9. Внутренний объем ФНЧ

Особенностью конструкции фильтра является его ступенчатая структура, то есть уменьшение размера резонаторов по мере удаления от центра [1]. Частотная зависимость КСВн и прямых потерь фильтра представлена на рисунках 10 и 11 соответственно.

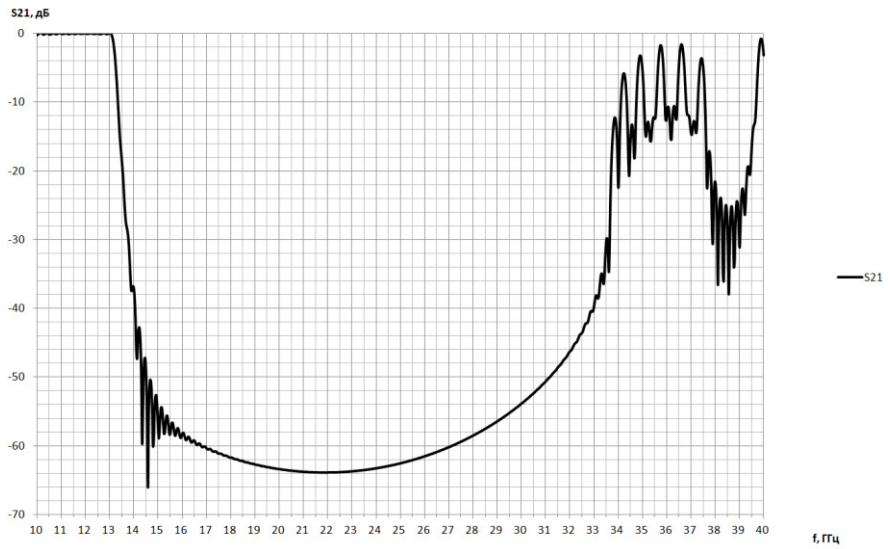

Рис. 10. Частотная зависимость прямых потерь ФНЧ

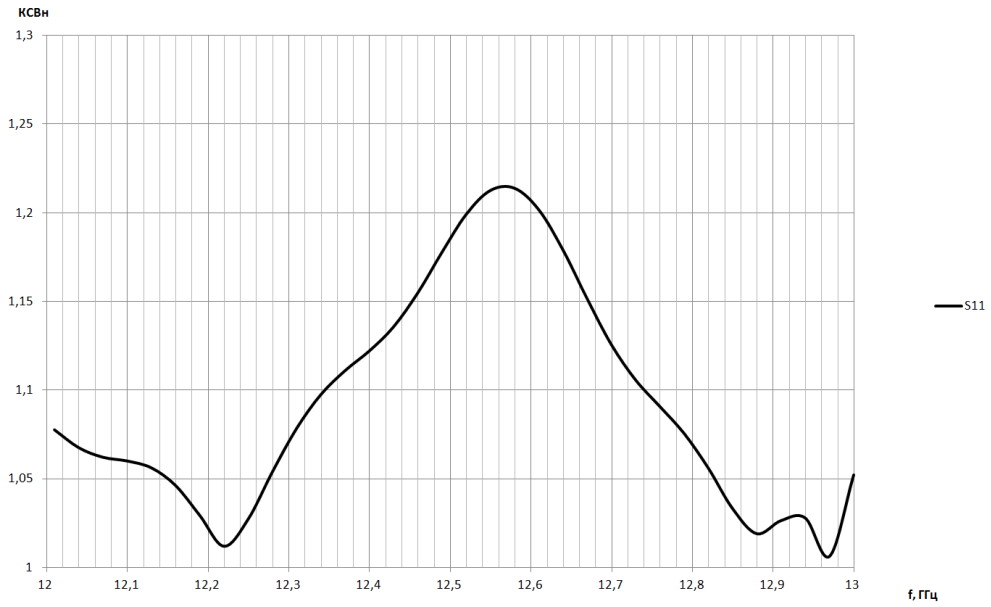

Рис. 11. Частотная зависимость КСВн ФНЧ

Фильтр нижних частот был изготовлен и показал хорошее согласование с результатами моделирования. Изготовленный образец представлен на рисунке 12.

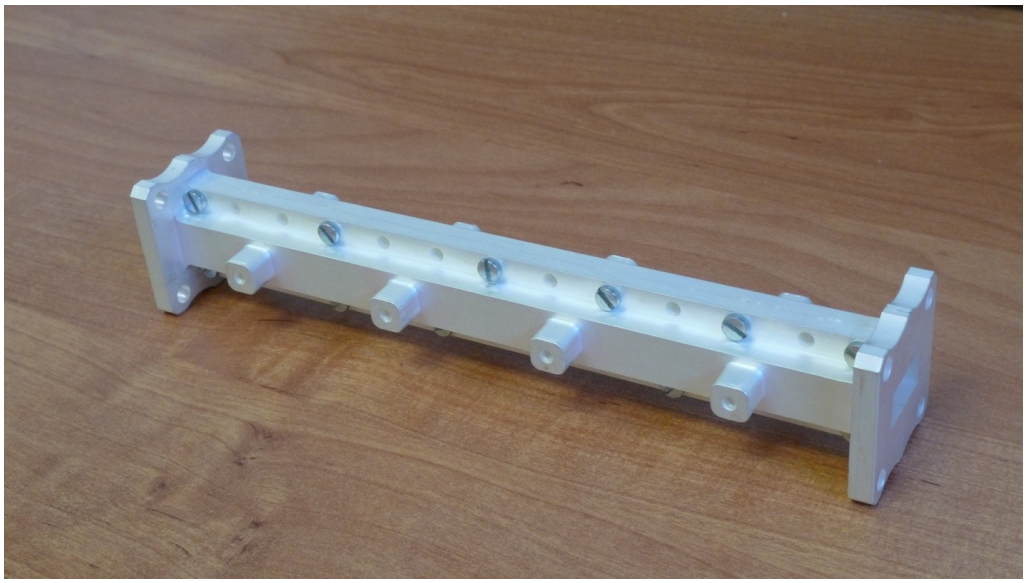

Рис.12. Изготовленный образец ФНЧ

Сравнительная характеристика КСВн и прямых потерь рассчитанного и изготовленного ФНЧ представлена на рисунках 13 и 14:

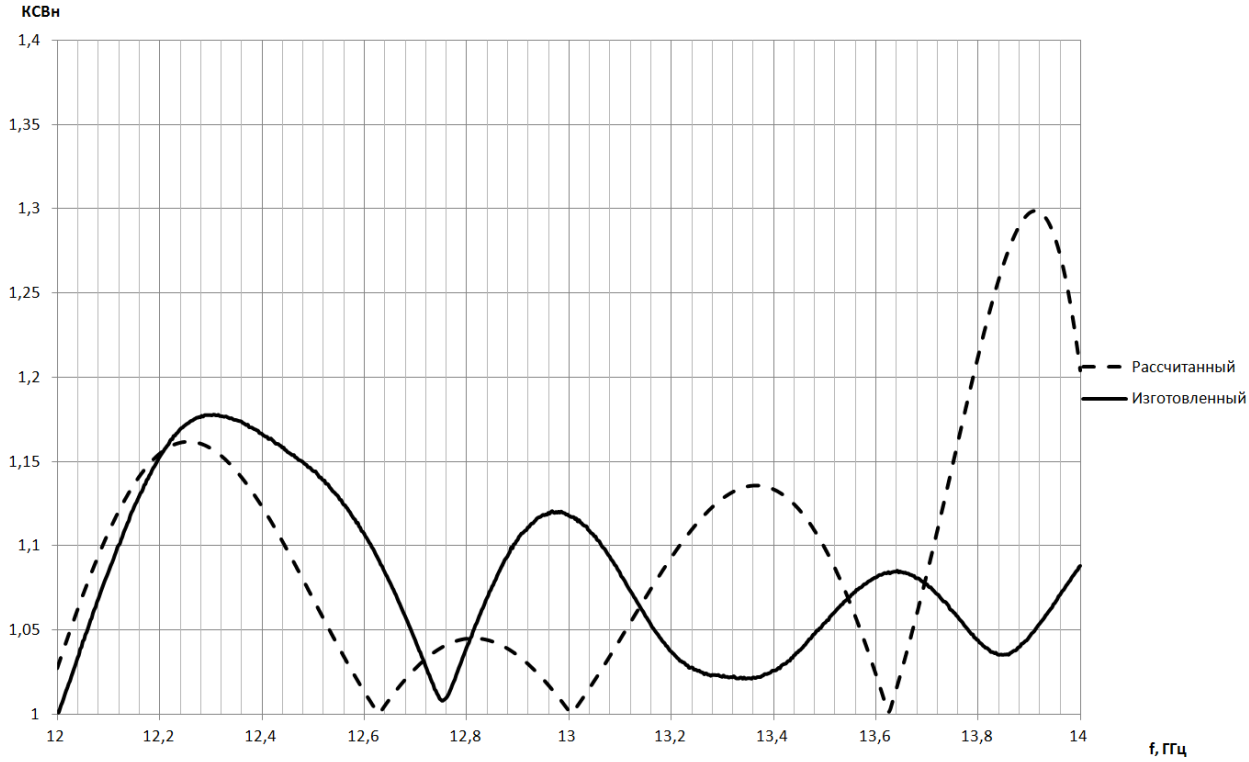

Рис. 13. Частотная зависимость КСВн рассчитанного и изготовленного ФНЧ

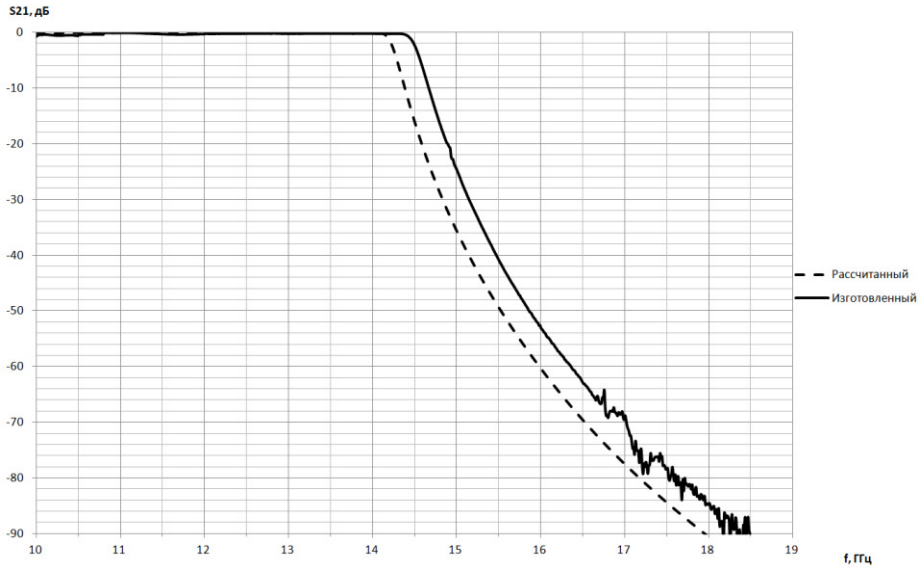

Рис. 14. Частотная зависимость прямых потерь рассчитанного и изготовленного ФНЧ

Смещение АЧХ ФНЧ, изготовленного устройства относительно рассчитанного, имеет место из-за погрешностей изготовления, обусловленных допусками, равными 0,02 мм. Это смещение АЧХ не влияет на функционирование всей системы, так как функцией ФНЧ в данной схеме является подавление сигналов на частотах более $f = 1{,}4 \cdot f_1$, где f_1 - центральная частота полосы пропускания ПФ в первом канале. В полосе пропускания изготовленный ФНЧ обладает требуемыми параметрами (см. рисунок 13).

Изготовление корпусных деталей мультиплексора производится фрезерованием. Такой способ обеспечивает приемлемую точность изготовления, при этом является более экономичным в сравнении с электропрожигом. Материал изделия: Д16 ГОСТ 4784. Материал проводящей пластины для канальных ПФ: лента 29НК-Т-0. Покрытие: серебро по ГОСТ 9.303. Покрытие алюминия серебром применяется для снижения общих потерь устройства.

В результате проектирования получен мультиплексор *Ku*-диапазона, обладающий следующими характеристиками:

- полосы пропускания: $f_1 = 12{,}05 - 12{,}15$ ГГц, $f_2 = 12{,}43 - 12{,}53$ ГГц, $f_3 = 12{,}85 - 12{,}95$ ГГц;
- возвратные потери в полосах пропускания -19 дБ;
- подавление на частотах соседних каналов более 30 дБ;
- неравномерность коэффициента передачи в полосах пропускания не более 0,1 дБ;
- подавление на второй гармонике более 40 дБ;
- размер готового устройства без ФНЧ $6{,}6\lambda_0 \times 2{,}5\lambda_0$, где λ_0 - длина волны в свободном пространстве на частоте $f_0 = 12{,}5$ ГГц.

Список литературы

1. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Applications / Richard J. Cameron, Chandra M. Kudsia, Raafat R. Mansour / 2007. 772 p.
2. Optimized Waveguide E-Plane Metal Insert Filters for Millimeter-Wave Applications // Rudiger Vahldieck, Jens Bornemann, Fritz Arndt, Dietrich Grauerholz / IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 31, No. 1, 1983 / P. 65-68.
3. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. 1. Под ред. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т., М.: Связь, 1971. 349 с.
4. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. Изд. 2-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 416 с.