

# СВЧ фильтры высокой селективности для телекоммуникационных и спутниковых систем

А.А. Довгань, В.О. Огородник

АО «НПП «Алмаз»

**Аннотация:** в работе рассмотрены три конструкции входных фильтров высокой селективности для различных диапазонов частот (Ka, Ku, C), предназначенных для применения в сетях мобильной связи и мультиплексах космических спутников. Представлены фильтры на основе цилиндрических двухмодовых резонаторов, диэлектрических резонаторов из высокочастотной керамики, а также коаксиальный фильтр с предсказанной характеристикой АЧХ и биметаллической температурной компенсацией. Показаны способы достижения высокой избирательности при ограниченных массогабаритных требованиях. Для C-диапазона предложен метод компенсации температурного дрейфа частоты с использованием комбинированного центрального стержня из алюминия и молибдена.

**Ключевые слова:** СВЧ-фильтры, высокая селективность, двухмодовые резонаторы, диэлектрические резонаторы, предсказания, predistortion, температурная компенсация, спутниковая связь, 5G, LTE.

## 1. Введение

В современных системах телекоммуникаций и спутниковой связи предъявляются всё более жёсткие требования к избирательности входных устройств. Увеличение числа каналов, ужесточение электромагнитной совместимости и необходимость эффективного использования частотного ресурса требуют применения фильтров с высокой крутизной скатов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и минимальными искажениями групповой задержки. При этом для космической аппаратуры ключевыми остаются требования к массогабаритным характеристикам, термостабильности и технологичности.

В данной работе представлены три варианта реализации высокоселективных фильтров для разных частотных диапазонов, каждый из которых использует различные типы резонаторов и методы повышения эффективности. Предложенные конструкции ориентированы не только на применение в бортовой аппаратуре спутниковой связи, но и на использование в наземных телекоммуникационных системах, включая входные тракты базовых станций стандартов LTE и 5G, где высокая избирательность и стабильность характеристик являются критически важными.

## 2. Фильтры высокой селективности

### 2.1. Входной фильтр Ka-диапазона 8-го порядка

Фильтр выполнен на цилиндрических резонаторах, работающих в двухмодовом режиме на рабочей моде TE<sub>111</sub> [1]. Использование двухмодовых резонаторов позволяет уменьшить габариты фильтра за счёт сокращения числа резонаторов при сохранении порядка фильтрации. Мода TE<sub>111</sub> обладает относительно высокой добротностью при малых габаритах. Для повышения добротности аналогичным образом можно использовать моды более высокого порядка, такие как TE<sub>112</sub>, TE<sub>113</sub> и т. д., но ценой увеличения габаритов фильтра.

Основные параметры фильтра:

- центральная частота: 18200 МГц;

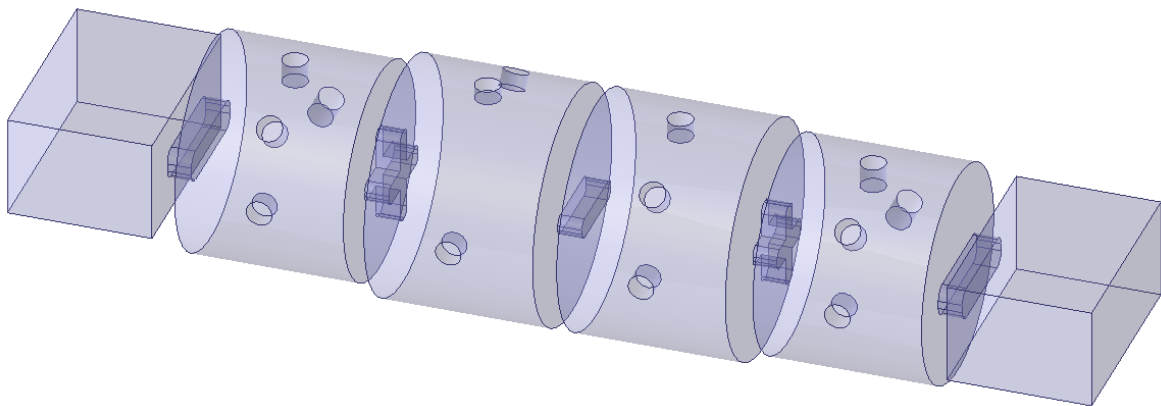
- полоса пропускания: 300 МГц.

В структуру фильтра введены перекрестные связи, формирующие четыре нуля передачи (transmission zeros):

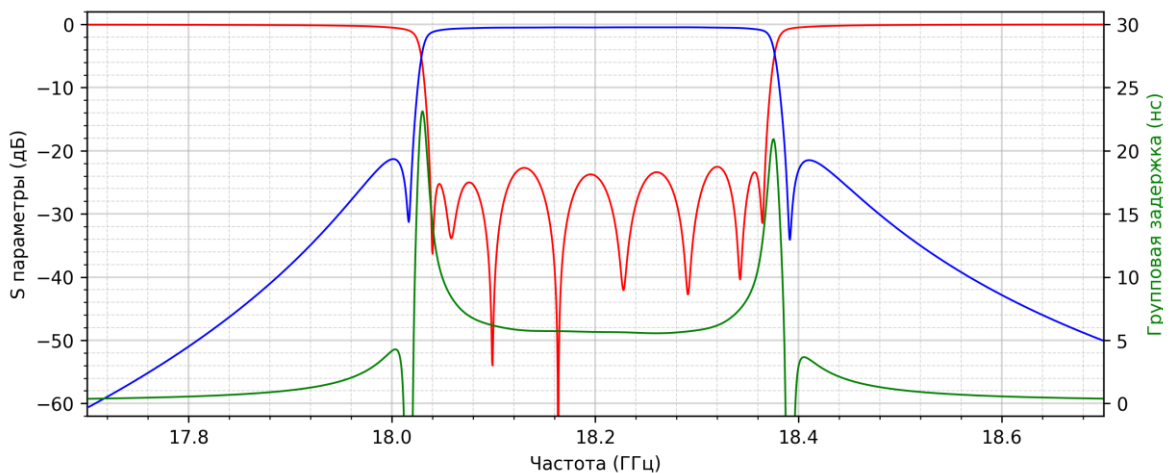
- первая пара нулей передачи обеспечивает повышенную крутизну границ полосы пропускания;

- вторая пара нулей передачи служит для линейризации групповой задержки в полосе пропускания, что критически важно для систем с широкополосной модуляцией.

На рисунке 1 представлена трёхмерная модель фильтра Ка-диапазона с двухмодовыми цилиндрическими резонаторами. На рисунке 2 приведены рассчитанные частотные характеристики: коэффициенты отражения  $S_{11}$ , передачи  $S_{21}$  и групповое время задержки.



**Рисунок 1.** Электродинамическая модель входного фильтра Ка-диапазона.



**Рисунок 2.** Рассчитанные характеристики входного фильтра Ка-диапазона.

## 2.2. Входной фильтр Ки-диапазона 10-го порядка

Фильтр выполнен на диэлектрических резонаторах с использованием высокодобротной СВЧ-керамики [2]. Высокая добротность диэлектрических резонаторов позволяет достичь низких потерь в полосе пропускания и высокой крутизны скатов при относительно небольших габаритах. В качестве СВЧ-керамики в модель заложен высокодобротный керамический диэлектрик танталат бария-магния ( $\text{BaMg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ ), который обладает диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 24$ , высокой добротностью  $Q \cdot f \approx 200\,000$  и более (зависит от технологии спекания и присадок) а

также низким температурным коэффициентом резонансной частоты.

Основные параметры фильтра:

- центральная частота: 11168,75 МГц;
- полоса пропускания: 54 МГц.

Применение диэлектрических резонаторов особенно эффективно в диапазоне Ku, где сочетание высокой добротности и температурной стабильности керамики обеспечивает стабильные характеристики в широком интервале рабочих температур.

На рисунке 3 показана конструкция фильтра Ku-диапазона на диэлектрических резонаторах. На рисунке 4 представлены расчётные характеристики  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  и групповое время задержки.

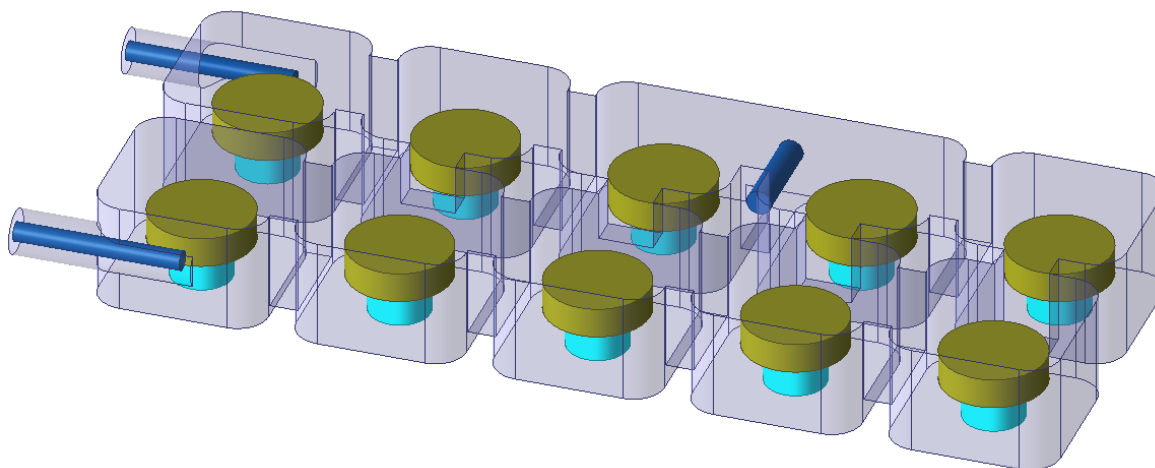


Рисунок 3. Электродинамическая модель входного фильтра Ku-диапазона.

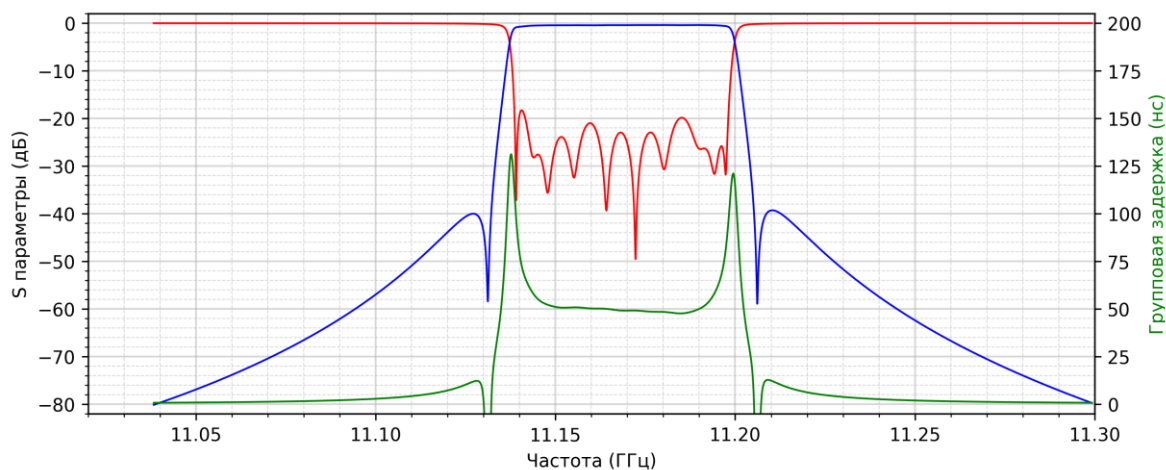


Рисунок 4. Рассчитанные характеристики входного фильтра Ku-диапазона.

### 2.3. Входной фильтр C-диапазона 10-го порядка с предискаженной характеристикой и биметаллической температурной компенсацией

Фильтр выполнен на коаксиальных резонаторах, что обеспечивает компактность конструкции и технологичность изготовления.

Основные параметры фильтра:

- центральная частота: 3875 МГц
- полоса пропускания: 45 МГц

Особенностью данного фильтра является применение техники предискажения

АЧХ (predistorion) [3]. Суть этой техники состоит в модификации передаточной функции фильтра таким образом, что при использовании резонаторов с добротностью 3000 достигается селективность, характерная для резонаторов с добротностью 8000. Это позволяет существенно уменьшить габариты фильтра, сделав их сравнимыми с диэлектрическими аналогами для данного диапазона. Платой за это является ухудшение коэффициента стоячей волны (КСВ) и увеличение вносимых потерь. Повышенный КСВ, характерный для таких фильтров, в реальных бортовых системах нивелируется подключением фильтра через ферритовый вентиль. Вентиль обеспечивает согласованную нагрузку, предотвращая отражения от входа фильтра и тем самым исключая их влияние на работу предыдущих каскадов. Кроме того, при построении многоканальных мультиплексоров каскадирование фильтров осуществляется при помощи циркуляторов, которые обеспечивают развязку между каналами и направляют сигнал в соответствующий фильтр без взаимного влияния. Однако, учитывая высокий уровень вносимых потерь, количество фильтров в составе мультиплексора ограничено общей суммой потерь всего каскада.

Для обеспечения стабильности центральной частоты в диапазоне рабочих температур от 0 до 70 °С в фильтре применена биметаллическая температурная компенсация [4]. Центральный стержень коаксиальных резонаторов выполнен составным: частично из алюминия, частично из молибдена. Принцип компенсации основан на различии коэффициентов температурного расширения (КТР) материалов: алюминий имеет высокий КТР ( $\alpha_{Al} \approx 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), молибден обладает низким КТР ( $\alpha_{Mo} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Изменение температуры приводит к изменению геометрических размеров стержня и внешнего проводника, что влияет на резонансную частоту. Подбирая длины алюминиевой и молибденовой частей центрального стержня, можно скомпенсировать суммарный температурный дрейф частоты. Биметаллическая конструкция позволяет обеспечить дрейф частоты, сопоставимый с фильтрами, полностью выполненными из инвара, но при меньшей массе и стоимости.

На рисунке 5 изображена конструкция коаксиального фильтра С-диапазона с составным центральным стержнем. На рисунке 6 представлены расчётные характеристики  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  и групповое время задержки.

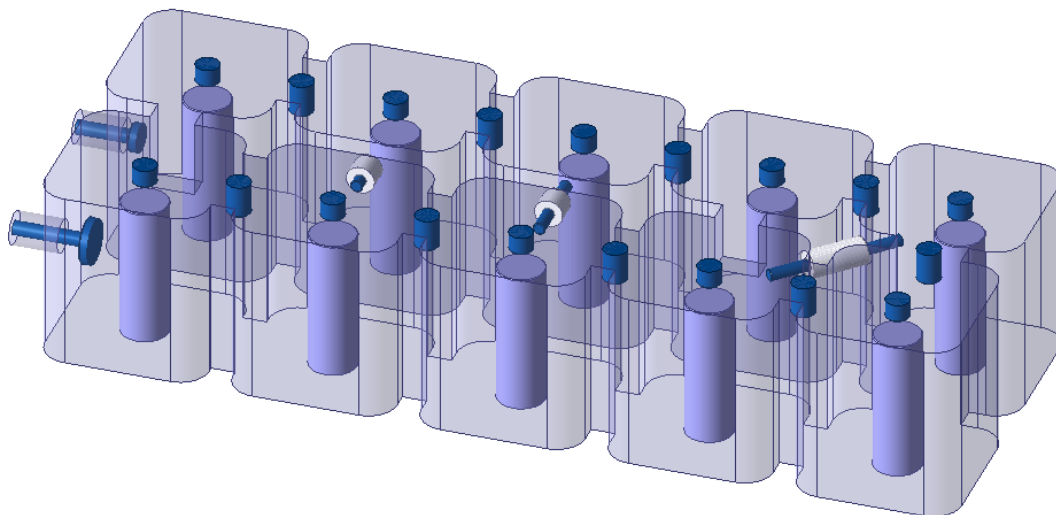


Рисунок 5. Электродинамическая модель входного фильтра С-диапазона.

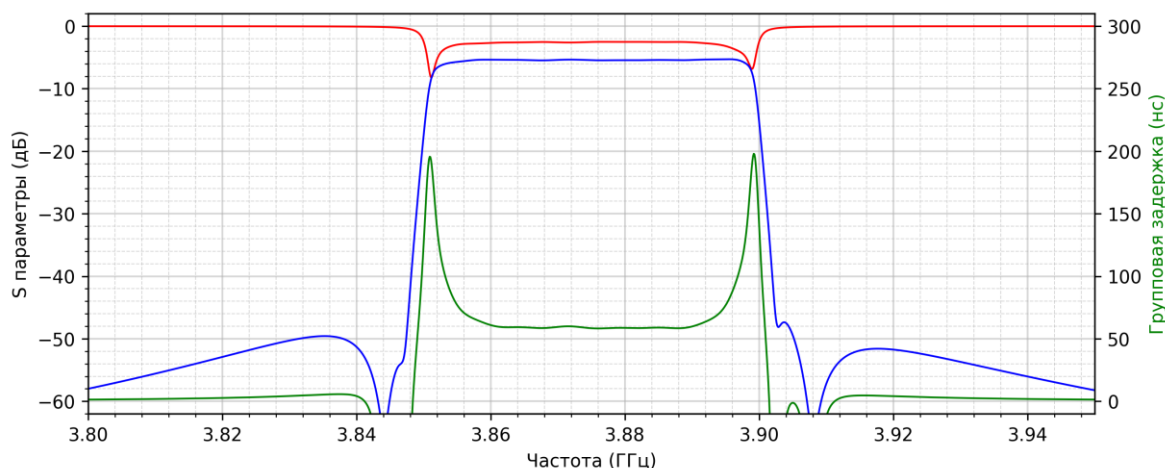


Рисунок 6. Рассчитанные характеристики входного фильтра С-диапазона.

### 3. Заключение

В работе представлены три варианта высокоселективных СВЧ-фильтров для различных частотных диапазонов. Использование двухмодовых цилиндрических резонаторов в Ка-диапазоне позволяет сформировать четыре нуля передачи и обеспечить высокую крутизну АЧХ при линейризации групповой задержки. Диэлектрические резонаторы в Ки-диапазоне обеспечивают высокую добротность и стабильность характеристик. Коаксиальный фильтр С-диапазона с преыскажением и биметаллической температурной компенсацией демонстрирует возможность достижения высокой селективности в компактном исполнении с термостабильностью, сравнимой с инваровыми конструкциями.

Предложенные решения могут найти применение в бортовой аппаратуре спутниковой связи, а также в наземных телекоммуникационных системах с высокими требованиями к избирательности. В частности, фильтр С-диапазона может быть использован в базовых станциях 5G NR (диапазоны n77, n78) и LTE (диапазоны В42, В43, В48). Высокая селективность и линейризованная групповая задержка, обеспечиваемые в представленных конструкциях, позволяют эффективно подавлять внеполосные помехи и сохранять целостность сигналов с высокой скоростью передачи данных, что соответствует требованиям современных телекоммуникационных стандартов.

#### Список литературы

1. Cameron R. J., Kudsia C. M., Mansour R. R. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications. – John Wiley & Sons, 2018.
2. Zhang Y., Yuan J. R., Liang J. L. A ku-band dielectric resonator filter with low spurious couplings for input multiplexer on satellite //2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2020. – С. 1-3.
3. Yu M. et al. Novel adaptive predistortion technique for cross coupled filters //IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003. – IEEE, 2003. – Т. 2. – С. 929-932.
4. Miiller J., Hoft M. Temperature compensation of resonators using different materials and suitable dimensions //2005 European Microwave Conference. – IEEE, 2005. – Т. 1. – С. 4 pp.