ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭА

УДК 621/372/54

DOI 10.33286/978-5-6041917-2-9.325-335

СНИЖЕНИЕ ВНОСИМЫХ ПОТЕРЬ – ОДНА ИЗ ГЛАВНЫХ МИРОВЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ПАВ

А.С. Багдасарян^{1, 2, 4}, Ю.В. Гуляев¹, С.А. Доберштейн³, Т.В. Сеницына⁴

¹Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт радио, Москва, Российская Федерация

³Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

⁴ООО «БУТИС», Москва, Российская Федерация

Представлены последние достижения по созданию фильтров на ПАВ с малыми потерями на кольцевых структурах с ОМПО и однонаправленных ВШП с МПО, на повторяющихся, резонаторных двухмодовых и лестничных структурах. Для каждого подхода рассмотрены количественные и качественные характеристики.

Ключевые слова: техника ПАВ, ПАВ-фильтры, малые вносимые потери.

DECREASING INSERTION LOSS – ONE OF MAJOR WORLD TRENDS OF SAW TECHNOLOGY PROGRESS

A. S. Bagdasaryan^{1, 2, 4}, Yu. V. Gulyaev¹, S. A. Dobershtein³, T. V. Sinitsina⁴

¹Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics, Moscow, Russian Federation

²Radio Research and Development Institute, Moscow, Russian Federation

³Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

⁴LLC “BUTIS”, Moscow, Russian Federation

This paper presents the last achievements in creating the low-loss SAW filters on the ring structures with the RMSC and unidirectional IDTs with MSC, on the repetition, resonator double mode and ladder structures. The quantitative and qualitative characteristics are considered for each approach.

Keywords: SAW technology, SAW filters, low insertion loss.

Введение

Современная техника ПАВ – это разнообразные устройства, выполняющие как одну из главных функций обработки сигналов: фильтрацию, задержку во времени, частотное формирование, изменение амплитуды и фазы, так и множество других функций с новыми возможностями. К первой группе относятся полосовые фильтры, линии задержки, резонаторы, аттенюаторы и фазовращатели [1]. Ко второй группе можно отнести балансные фильтры с преобразованием импедансов, ПАВ-микросборки и модули, совмещенные с электронными усилителями и смесителями, радиометки, объединенные с датчиками различных физических величин [2]. Кроме расширения диапазона рабочих частот, одной из главных мировых тенденций развития указанных устройств на ПАВ является уменьшение вносимых потерь (ВП) [1]. Снижение ВП в устройствах на ПАВ уменьшает собственные шумы РЭА, увеличивает её динамический диапазон, расширяет сферы применения устройств на ПАВ и

определяет их конкурентоспособность с другими известными технологиями. В данной статье рассмотрены различные подходы к созданию фильтров на ПАВ с малыми потерями, представлены современные количественные и качественные характеристики как зарубежных, так и отечественных разработчиков, и производителей подобной техники ПАВ.

Основные подходы к реализации фильтров на ПАВ со сверхмалыми вносимыми потерями около 1 дБ

ВП в фильтрах на ПАВ обусловлены следующими причинами [1; 3]: потери на двунаправленность излучения ПАВ (6 дБ); потери на рассогласование с нагрузками по входу и выходу (1–10 дБ); потери на проводимость металлической пленки электродов преобразователей ПАВ (1–3 дБ); потери на распространение ПАВ в пьезоэлектрике (0,8–3 дБ); потери в элементах согласования (1–3 дБ); потери взвешивания преобразователей ПАВ (0,8–1,5 дБ). Для решения проблемы малых потерь необходимо минимизировать каждую составляющую из указанных причин. Для этого проводят конструктивную, топологическую и технологическую оптимизацию фильтра на ПАВ.

Ещё в середине 80-х годов прошлого столетия одной из приоритетных задач считалось уменьшение вносимых потерь в фильтрах на ПАВ до 1 дБ [3]. Это относилось к фильтрам, у которых в топологии локализована акустическая энергия за счет устранения потерь на двунаправленность излучения ПАВ встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) и на электрическое рассогласование с нагрузками по входу и выходу. Наилучшие результаты (ВП = 1 – 2 дБ) здесь были получены на однонаправленных многофазных ВШП и ВШП группового типа со сложными цепями согласования по входу и выходу [4; 5].

В настоящее время это не считается уникальной характеристикой. ВП около 1 дБ уверенно достигаются в кольцевых структурах с отражательными многополосковыми ответвителями (ОМПО) и на однонаправленных ВШП с МПО на сравнительно низких частотах до 200 МГц [6; 7]. В подобных структурах используется самосогласование, тем самым устраняются потери в элементах согласования. Этот эффект основан на компенсации статической емкости входных и выходных ВШП реактивной проводимостью излучения ПАВ в полосе пропускания при выборе определенного числа пар электродов. В результате осуществляется самосогласование фильтра с нагрузками без внешних согласующих элементов.

На рис. 1 показаны топология и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) самосогласованного кольцевого фильтра с ОМПО на центральную частоту $f_0 = 45$ МГц с относительной полосой пропускания $\Delta f/f_0 = 1,87\%$ на срезе УХ/128° LiNbO₃. Фильтр обеспечил ВП = 0,8 дБ, затухание в полосе задерживания около 30 дБ в тракте 75 Ом [6].

На рис. 2 показаны топология и АЧХ самосогласованного фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО на $f_0 = 70$ МГц при $\Delta f/f_0 = 3,5\%$, выполненного на срезе УХ/128° LiNbO₃. Фильтр показал ВП = 1 дБ, затухание в полосе задерживания около 10 дБ в тракте 50 Ом [7].

Рис. 1. Топология и АЧХ кольцевого фильтра с ОМПО

Рис. 2. Топология и АЧХ фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО

Реализация малых ВП на представленных структурах на высоких частотах имеет ряд сложностей, главная из которых заключается в том, что в топологии ВШП и ОМПО, МПО одновременно используются электроды разной ширины: широкие $\lambda/4$ и узкие $\lambda/6$, где λ – длина ПАВ на f_0 . Фотолитография подобных структур на высоких частотах при малых размерах электродов затруднительна, и получить малые ВП в этом случае проблематично.

На высоких частотах используют структуры приблизительно с одинаковой шириной электродов $\lambda/4$ во всей топологии: повторяющиеся структуры [8; 9], резонаторные двухмодовые структуры [10–12] и резонаторные лестничные структуры [13–15]. В этих структурах вносимые потери около 1 дБ достигаются уже и в гигагерцовом диапазоне.

Достоинство повторяющихся структур (группа входных ВШП вложена в группу выходных ВШП) – простота изготовления и потенциальная возможность получения малых ВП. При полном согласовании в данных фильтрах теоретически можно достичь весьма малого уровня ВП, определяемого по формуле [8]:

$$ВП = 10 \lg[(M + 1) / M], \text{ дБ},$$

где M – число входных ВШП, $M + 1$ – число выходных ВШП.

На рис. 3 приведены топология и АЧХ самосооглавленного фильтра на повторяющейся структуре (9 повторений ВШП) на $f_0 = 600$ МГц при $\Delta f/f_0 = 4,4\%$ на срезе УХ/36° LiTaO₃. В фильтре получены ВП = 1–2 дБ, затухание в полосе задерживания около 20 дБ в тракте 50 Ом [9].

В резонаторных двухмодовых структурах акустическая энергия локализуется в пространстве (резонансной полости) между двумя отражательными решетками (ОР), подобно известному резонатору Фабри-Перо. Наибольшее распространение нашли трехпреобразовательные структуры [10–12]. Принцип действия описывается взаимодействием 2 продольных мод – симметричной и антисимметричной. В трехпреобразовательной структуре используют 1-ю и 3-ю моды, отсюда название этих фильтров – резонаторные двухмодовые фильтры (double mode SAW filters – DMS-фильтры).

Рис. 3. Топология и АЧХ фильтра на повторяющейся структуре

Топология и АЧХ самосогласованного DMS-фильтра на $f_0 = 835$ МГц при $\Delta f/f_0 = 4\%$ на срезе УХ/64° LiNbO₃ представлена на рис. 4. Фильтр обеспечил ВП = 1 дБ, затухание в полосе задержания около 20 дБ в тракте 50 Ом [10].

Рис. 4. Топология и АЧХ DMS-фильтра

Резонаторные лестничные структуры выполняются на импедансных элементах (ИЭ), в которых используются импедансные характеристики одноходовых ПАВ-резонаторов с ОР или резонаторов на протяженных ВШП [13–15]. Данные резонаторы представляются эквивалентными LCR-резонаторам с последовательными и параллельными резонансами, а фильтры строятся по лестничным схемам с последовательным и параллельным соединениями ИЭ.

Главное достоинство лестничных структур на ИЭ заключается в том, что в подобных фильтрах не используются напрямую акустические тракты распространения ПАВ. Коэффициент передачи в полосе пропускания определяется очень малыми активными сопротивлениями эквивалентных LCR-резонаторов в последовательных ветвях и очень большими сопротивлениями этих резонаторов в параллельных ветвях. В результате чего даже при сравнительно небольших добротностях эквивалентных ИЭ в лестничных фильтрах легко достигаются ВП < 1 дБ. На рис. 5 показаны топология однозвенного и АЧХ двухзвенного лестничного фильтра на ИЭ в виде протяженных ВШП на $f_0 = 845$ МГц при $\Delta f/f_0 = 4\%$ на срезе УХ/64° LiNbO₃. Фильтр имеет ВП около 1 дБ, затухание в полосе задерживания 30 дБ в тракте 50 Ом [14].

Рис. 5. Условная топология и АЧХ лестничного фильтра на ИЭ из протяженных ВШП

Примеры практической реализации фильтров на ПАВ с малыми потерями и высокой избирательностью

Рассмотренные фильтры на ПАВ имеют очень малые ВП. Представляет интерес использовать это существенное преимущество и различные методы повышения затухания в полосе задерживания для реализации высокоизбирательных фильтров на ПАВ без значительного увеличения ВП.

На рис. 6 показаны топология и АЧХ кольцевого фильтра с ОМПО на $f_0 = 172,5$ МГц с полосой пропускания 2,6 МГц по уровню -2 дБ на срезе УХ/128° LiNbO₃ в SMD-корпусе QLCC 10/10-1 (9,1x7,1x1,8 мм). В топологии фильтра применено фазовое взвешивание (ФВ) с малыми потерями входного и выходного ВШП. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП = 1,5 дБ, затухание в полосе задерживания более 55 дБ при отстройке $\pm 8,6$ МГц от f_0 [6]. Фильтр используется во входных каскадах мобильных приемопередатчиков диапазона 146–174 МГц.

Рис. 6. Топология и АЧХ кольцевого фильтра с ОМПО с ФВ

На рис. 7 представлена топология и АЧХ фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО на $f_0 = 44,4$ МГц с полосой пропускания 3,4 МГц по уровню -2 дБ на срезе УХ/41° LiNbO₃ в SMD-корпусе 5155.28-1 К (29,0 x 18,9 x 4,4 мм). Для увеличения избирательности использована двухканальная топология с ФВ центральных ВШП. Фильтр обеспечил ВП = 3,2 дБ, затухание в полосе задерживания 60 дБ при отстройках ± 9 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [16]. Фильтр используется в каскадах промежуточной частоты (ПЧ) для фильтрации широкополосных сигналов.

Рис. 7. Топология и АЧХ двухканального фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО с ФВ

Топология и АЧХ фильтра на повторяющейся структуре на $f_0 = 878$ МГц с полосой пропускания 20 МГц на срезе УХ/36° LiTaO₃ в SMD-корпусе размерами 5x5x1,8 мм приведены на рис. 8. В топологии фильтра использовано 13 повторений ВШП (7 входных ВШП вложены в 6 выходных ВШП). Для увеличения избирательности во входных и выходных ВШП применено взвешивание удалением электродов (ВУЭ) с малыми потерями. В тракте 50 Ом фильтр показал вносимые потери 1,6 дБ, затухание в полосе задерживания 25–35 дБ при отстройках ± 79 МГц от f_0 [17]. Фильтр используется в мобильных телефонах стандарта GSM.

Рис. 8. Топология и АЧХ фильтра на повторяющейся структуре с ВУЭ

На рис. 9 показаны топология и АЧХ DMS-фильтра на $f_0 = 896$ МГц с полосой пропускания 21,8 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/42° LiTaO₃ в SMD-корпусе 3x3x1,5 мм. Для увеличения избирательности использована оптимизированная двухканальная топология с неодинаковым числом электродов в центральном и боковых ВШП входного и выходного каналов [18]. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП около 3 дБ, затухание в полосе задерживания более 45 дБ при отстройках ± 45 МГц от f_0 [19]. Фильтр разработан для каскадов ПЧ СВЧ радиоприемных устройств.

Рис. 9. Оптимизированная двухканальная топология и АЧХ DMS-фильтра

На рис. 10 представлены топология и АЧХ DMS-фильтра на $f_0 = 903$ МГц с полосой пропускания 14,8 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/36° LiTaO₃ в SMD-корпусе размерами 3x3x1,2 мм. Для увеличения избирательности и улучшения прямоугольности АЧХ фильтра использована двухканальная топология с ФВ центральных ВШП и определенным соотношением между периодом электродов входных, центральных ВШП и ОР. Фильтр обеспечил ВП = 2,4 дБ, затухание в полосе задерживания 65 дБ при отстройках ± 35 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [12]. Фильтр используется в мобильных телефонах.

Рис. 10. Двухканальная топология и АЧХ DMS-фильтра с ФВ

Условная топология и АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на $f_0 = 900$ МГц с полосой пропускания 18 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/42° LiTaO₃ в SMD-корпусе размерами 3,8x3,8x1,2 мм даны на рис. 11. Для увеличения избирательности используется одно Г-образное звено, но с разными ИЭ (ПАВ-резонаторами) в последовательных и параллельных ветвях. Фильтр обеспечил ВП около 1 дБ, затухание в полосе задерживания >50 дБ при отстройке ± 50 МГц от f_0 [15] в тракте 50 Ом. Фильтр используется в аппаратуре мобильной связи.

Рис. 11. Условная топология и АЧХ лестничного фильтра на ИЭ

Фильтры на ПАВ с малыми потерями на частоты > 1 ГГц

Представленные подходы к реализации ПАВ-фильтров с малыми потерями и высокой избирательностью позволяют успешно их использовать в гигагерцовом диапазоне, достигая высоких характеристик ПАВ-устройств, близких к предельным. В гигагерцовом диапазоне факторами, ограничивающими применение техники ПАВ, являются потери на распространение и разрешающая способность технологического оборудования. Как известно, потери на распространение ПАВ $\propto f_0^2$: $\alpha \sim f_0^2$. В то же время размеры ПАВ-фильтра s обратно пропорциональны f_0 : $s \sim 1/f_0$. Тогда увеличение потерь в гигагерцовом диапазоне для ПАВ-устройств не так существенно. Разрешающая способность современного высокотехнологичного оборудования составляет 0,5 мкм. Следовательно, ширина электродов в топологии ПАВ-фильтров должна быть не меньше этой величины.

Ниже приведены характеристики последних разработок фильтров на ПАВ с малыми потерями ведущих мировых производителей техники ПАВ из России, Тайваня, США, Германии. На рис. 12 приведена условная структурная схема и АЧХ импедансного фильтра на $f_0 = 2170$ МГц с полосой пропускания 82 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/46° LiTaO₃ в корпусе 3x3x1,2 мм. На рис. 12 R1, R2, R3 – резонаторы на ПАВ в виде ВШП с большим числом электродов и малым числом электродов в ОР с многослойным напылением Ti-Al-Ti-Al, облегчающим выдерживание большой мощности входного сигнала. Фильтр имеет ВП = 1,8 дБ, затухание в полосе задерживания 40 дБ при отстройках ± 230 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [20]. Фильтр позволяет обрабатывать сигналы с уровнем входной мощности до 2,3 Вт и используется в системах связи, радиолокационной и телекоммуникационной аппаратуре.

Рис. 12. Структурная схема и АЧХ импедансного фильтра на $f_0 = 2170$ МГц

Большая скорость распространения вытекающей ПАВ $V = 4700$ м/с и высокий $k^2 = 11\%$ (k -коэффициент электромеханической связи) на срезе УХ/64° LiNbO₃ позволили на $f_0 = 1590$ МГц использовать ширину электродов 0,7 мкм и обеспечить $\Delta f/f_0 = 4\%$. АЧХ DMS фильтра на $f_0 = 1590$ МГц с полосой пропускания 59 МГц по уровню $-1,2$ дБ на срезе УХ/64° LiNbO₃ в SMD-корпусе размерами 3х3х1,2 мм приведена на рис. 13. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП = 2,3 дБ, затухание в полосе задерживания 50 дБ при отстройках ± 150 МГц от f_0 [21]. Фильтр разработан для входных каскадов мобильной связи и систем навигации.

Рис. 13. АЧХ DMS фильтра на $f_0 = 1590$ МГц

Расширить полосу пропускания, увеличив $\Delta f/f_0$ до 6,7 %, возможно за счет использования среза УХ/49° LiNbO₃ с большой $V = 4700$ м/с и высоким $k^2 = 16\%$ для вытекающей ПАВ. При этом ширина электродов на $f_0 = 1225$ МГц составила 1 мкм. На рис. 14 показана АЧХ DMS фильтра на $f_0 = 1225$ МГц с полосой пропускания 82 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/49° LiNbO₃ в SMD корпусе размерами 3х3х1,2 мм. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП = 3 дБ, затухание в полосе задерживания 50 дБ при отстройках ± 200 МГц от f_0 [22]. Фильтр разработан для входных каскадов аппаратуры связи и систем навигации.

Лидерами по ВП при избирательности до 40 дБ в гигагерцовом диапазоне остаются лестничные фильтры на ИЭ с небольшим, до четырех, числом звеньев. На частоты 1200–1600 МГц при использовании вытекающей ПАВ на срезе УХ/42° LiTaO₃ с $V = 4200$ м/с и $k^2 = 6\%$ ширина электродов составляет 0,65–0,87 мкм, а $\Delta f/f_0 = 2,2\text{--}3\%$. На рис. 15 представлена АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на $f_0 = 1227$ МГц с полосой пропускания 37,6 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/42° LiTaO₃ в SMD корпусе размерами 3х3х1,2 мм. Фильтр обеспечил ВП = 1,0 дБ, затухание в полосе задерживания около 40 дБ при отстройках ± 110 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [23]. Фильтр разработан для входных каскадов аппаратуры мобильной связи и каскадов ПЧ различной аппаратуры связи.

Рис. 14. АЧХ DMS фильтра на $f_0 = 1225$ МГц

Рис. 15. АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на $f_0 = 1227$ МГц

АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на $f_0 = 1601,5$ МГц с полосой пропускания 36,5 МГц по уровню -3 дБ на срезе $UX/42^\circ$ LiTaO₃ в SMD корпусе размерами 3x3x1,1 мм изображена на рис. 16. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП = 1,5 дБ, затухание в полосе задерживания 40–50 дБ при отстройках ± 200 МГц от f_0 [24]. Фильтр разработан для входных каскадов систем навигации.

Рис. 16. АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на $f_0 = 1601,5$ МГц

Подобные ПАВ-фильтры являются компонентами многостандартных модулей смартфонов текущего поколения. ПАВ-фильтры, корпусированные по технологии WLP (Wafer Level Package) с размерами кристалла 1,4x1,1x0,35 мм, входят в состав таких модулей с толщиной менее 1 мм, изготовленных по технологии LTCC. Интеграция ПАВ-, WLP- и LTCC-технологий является по сути уникальной платформой для дуплексоров, мультиплексоров и входных модулей с усилителями и переключателями смартфонов ближайших поколений – самой массовой позиции использования техники ПАВ [1; 2]. Такая платформа по степени миниатюризации и функциональности превосходит аналоги на LC, коаксиальных и керамических резонаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника ПАВ: ближайшие перспективы / А.С. Багдасарян, Ю.В. Гуляев, С.А. Доберштейн, Т.В. Сеницына // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 3 (34). С. 72–84.
2. Интеллектуальные устройства на ПАВ: новые возможности / А.С. Багдасарян, Ю.В. Гуляев, С.А. Доберштейн, Т.В. Сеницына, С.А. Багдасарян // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 2 (37). С. 64–73.
3. *Hartmann C.S.* Future High Volume Applications of SAW Devices // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, 1985. P. 64–73.
4. Unidirectional Acoustic Surface Wave Filters with 2 dB Insertion Loss / C.S. Hartmann, R.C. Rosenfeld, R.B. Brown // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1974. P. 425–428.
5. *Yamanouchi K., Nyffeler F.M.* Low Insertion Loss Acoustic Surface Wave Filter using Group-Type Unidirectional Interdigital Transducer // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1975. P. 317–321.
6. *Doberstein S., Malyukhov V.* SAW Ring Filters with Insertion Loss of 1 dB // IEEE Transaction on UFFC. 1997. Vol. 44, no. 3. P. 590–596.
7. Wideband Three-Transducer SAW Filters Using Unidirectional IDTs on U-shaped MSCs with Insertion Loss of 1 dB / S. Doberstein, V. Malyukhov, V. Razgonyaev // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. P. 43–46.
8. *Lewis M.* SAW Filters Employing Interdigitated Interdigital Transducers, IIDT // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1982. P. 12–17.
9. Low Loss SAW Filter for Antenna Duplexer / M. Hikita et al. // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1983. P. 77–83.
10. Wideband Low Loss Double Mode SAW Filters / T. Morita [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 95–104.
11. Сеницына Т.В., Багдасарян А.С., Егоров Р.В. ПАВ-фильтры на основе продольно-связанных структур // Электронная промышленность. 2004. С. 14–19.
12. Low Loss and High Rejection RF SAW Filter using Improved Design Techniques / Y. Fujita [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1998. P. 399–402.
13. Development of Low-Loss Band-Pass Filters using SAW Resonators for Portable Telephones / O. Ikata [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 111–115.
14. *Багдасарян А.С., Каранетян Г.Я.* Импедансные фильтры на поверхностных акустических волнах. М: Международная программа образования, 1998. 79 с.
15. *Kondratiev S.N., Thorvaldsson T.* High Rejection Impedance Element SAW Filters Realized on Quartz and 42° - LiTaO₃ Substrates // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. P. 109–112.
16. *Доберштейн С.А.* Разработка низкочастотных ПАВ-фильтров и высокочастотных ПАВ-микросборок в отечественных корпусах под поверхностный монтаж // Техника радиосвязи. 2015. Вып. 1 (24). С. 92–103.
17. IIDT type Low-Loss SAW Filters with Improved Stopband Rejection in the Range of 1 to 2 GHz / H. Yatsuda [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 67–70.
18. Резонаторный фильтр на ПАВ: пат. 161759 Рос. Федерация / С.А. Доберштейн. № 2015154375/08. Заявл. 17.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 1.
19. *Доберштейн С.А.* Балансные резонаторные СВЧ ПАВ-фильтры на продольных модах с малыми потерями // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 4 (39). С. 72–78.

20. Багдасарян А.С., Сеницына Т.В. Фильтры на ПАВ, выдерживающие входную мощность радиосигнала 1–2 Вт, для телекоммуникационной аппаратуры // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 3 (30). С. 80–89.

21. URL: www.rfm.com: официальный сайт компании RFM.

22. URL: www.taisaw.com: официальный сайт компании TAI-SAW Technology.

23. URL: www.vectron.com: официальный сайт компании Vectron International.

24. URL: www.epcos.com: официальный сайт компании EPCOS.