

УДК 681.89: 621.315.05:621.396

## СИСТЕМА ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СКРЫТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Г.Я. Карапетян<sup>1,2</sup>, В.Ф. Катаев<sup>3,\*</sup>, Н.В. Ермолаева<sup>3,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория наноматериалов, Южный федеральный университет,  
Ростов-на-Дону, 344090, Россия

<sup>2</sup>ООО «Сайгиват», Москва, 115191, Россия

<sup>3</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского  
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская область, 347360, Россия

\*e-mail: [kataev.v.f.@gmail.com](mailto:kataev.v.f.@gmail.com)

\*\*e-mail: [ermolnv@mail.ru](mailto:ermolnv@mail.ru)

Поступила в редакцию: 26.02.2024

После доработки: 18.03.2024

Принята к публикации: 19.03.2024

В данной работе описывается система скрытной широкополосной связи с использованием линий задержки на поверхностных акустических волнах (ЛЗ на ПАВ). Рассчитан согласованный фильтр, состоящий из десяти линий задержки на ПАВ. Линии задержки состоят из однонаправленных приемопередающего и отражательного встречно-штыревых преобразователей (ВШП), имеющих полосу рабочих частот 2 МГц, расстояние между центральными частотами в 4 МГц, и работающих в диапазоне частот 905–941 МГц. На основе этих фильтров разработана система скрытной широкополосной связи, позволяющая получать на выходе сигнал в пять раз превышающий уровень шума. Максимальная задержка сигнала составляет 13 мкс, что в два раза больше задержки между ВШП. Расстояние между ВШП можно варьировать в зависимости от частоты ЛЗ. Задавая задержки в ЛЗ таким образом, чтобы суммарная задержка в ЛЗ с одинаковыми частотами всегда была одной и той же, можно создавать различные согласованные фильтры в одном и том же диапазоне частот.

**Ключевые слова:** встречно-штыревой преобразователь (ВШП), поверхностные акустические волны (ПАВ), линия задержки (ЛЗ), параметр S11.

**DOI:** 10.26583/vestnik.2024.322

**EDN QUJRJS**

### ВВЕДЕНИЕ

В технике цифровых систем связи термин «широкополосная система» используется в случае, когда ширина спектра передаваемого сигнала существенно превышает ширину спектра полезного сообщения. В этом случае произведение длительности сигнала  $T$  на его полосу частот  $B$  должно быть много больше единицы ( $BT \gg 1$ ). И чем больше это произведение, тем лучше, поскольку оно определяет, насколько больше корреляционный пик на выходе фильтра по сравнению с входным сигналом. Эта особенность обеспечивает ряд преимуществ широкополосной системы по сравнению с простой системой связи, таких как высокая скрытность и малая чувствительность к интерференционным помехам. Устройства на ПАВ нашли широкое применение в этой области, в частности для

корреляционной обработки сигналов с большими значениями произведения длительности на ширину полосы, т.е. для согласованной фильтрации. Согласованный фильтр содержит либо фазокодомодулированный (ФКМ) встречно-штыревой преобразователь (ВШП), либо ВШП с линейно частотной модуляцией (ЛЧМ) [1–4]. Такие ВШП имеют полосу пропускания намного большую, а коэффициент отражения ПАВ от них значительно меньше, чем для немодулированного ВШП такой же длины. Это обусловлено тем, что в случае ФКМ ПАВ отраженные от ВШП волны складываются не в фазе, взаимно погашая друг друга, а в случае ЛЧМ ПАВ отражаются только от той части ВШП, где его период соответствует длине ПАВ, падающей на него, и число таких ВШП мало. От остальной большей части электродов ВШП ПАВ не отражаются, и их емкость шунтирует ВШП, что также уменьшает коэффициент отражения от такого

ВШП. Поэтому такие фильтры могут работать только на проход, т. е. должны иметь входной и выходной ВШП [5]. Обычно один из ВШП не имеет модуляции и содержит небольшое число электродов для получения полосы частот не менее полосы частот второго ВШП, который имеет ФКМ или ЛЧМ.

В предлагаемой работе приводится описание согласованного фильтра, основанного на использовании отражательных ВШП. Это позволяет увеличить задержку сигнала в фильтре в два раза при том же размере, что увеличивает параметр  $BT$  в два раза и позволяет увеличить во столько же раз отношение сигнал-шум. Такие системы могут быть применены для передачи управляющих команд для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что затруднит их перехват и обнаружение.

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Основным элементом данной системы является согласованный фильтр на основе набора линий задержки (ЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (рис. 1).

Каждая из десяти ЛЗ на ПАВ имеет свою центральную частоту и задержку и содержит однонаправленные с внутренними отражателями [6] приемопередающий встречно-штыревой преобразователь (ВШП) и отражательные ВШП. Все полосы пропускания каждой ЛЗ одинаковы и равны 2 МГц. Центральные частоты, соответственно, равны: 905, 909, 913, 917, 921, 925, 929,

933, 937, 941 МГц. Полоса пропускания каждой ЛЗ равна 2 МГц (рис. 2). Задержки также зависят от номера ЛЗ и выбираются от самой большой для самой низкочастотной линии до самой малой для самой высокочастотной ЛЗ для фильтра на рис. 1,а, а также от самой малой для самой низкочастотной до самой большой для самой высокочастотной на рис. 1,б. Расстояния между ВШП для каждой ЛЗ  $n = 10$ ,  $l_{\min} = 2,68$  мм,  $\Delta l = 1,74$  мм применяются как:

$$l_{n+1} = 2l_{\min} + 2n\Delta l \quad n = 1, 2, 3 \dots n-1$$

$$l_{n-1} = 2l_{\min} + 2 \cdot 9\Delta l - 2n\Delta l,$$

$$l_{n+1} + l_{n-1} = 4 \cdot l_{\min} + 2 \cdot 9\Delta l, \quad (1)$$

$$l_{n+1} + l_n = 4 \cdot 2,68 + 18 \cdot 1,74 = 42,04 \text{ мм}. \quad (2)$$

В каждой ЛЗ приемопередающий ВШП пронумерован от 1–1 до 1–10. Множитель 2 отражает тот факт, что ПАВ проходит расстояние между ВШП дважды: сначала доходит до отражательного ВШП, а затем отражается обратно на приемо-передающий ВШП. Число одноволновых секций во всех приемопередающих ВШП равно 90, которые располагаются через четыре длины ПАВ на центральной частоте ЛЗ друг от друга так, что общая длина ВШП равна 360 длин ПАВ на центральной частоте. Отражательные ВШП содержат по 120 одноволновых секций, имеют общую длину в 240 длин ПАВ на центральной частоте каждой ЛЗ, которые выполнены на подложках  $112^\circ$  УХ среза танталата лития.

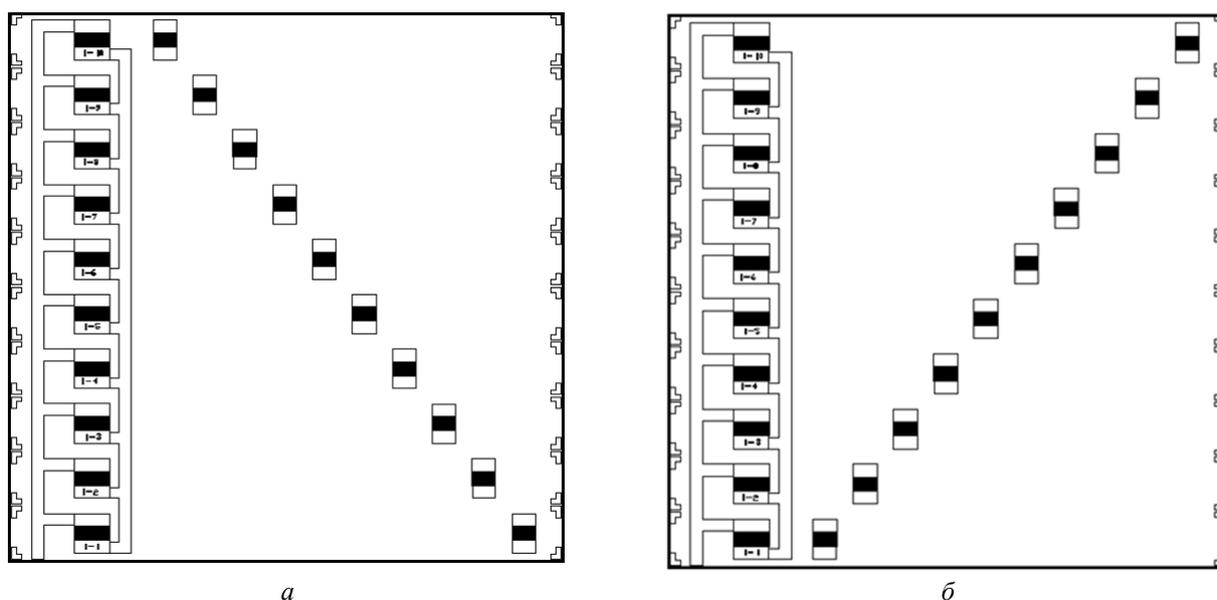


Рис. 1. Топология согласованных фильтров: а – фильтр на выходе передатчика; б – фильтр на входе приемника

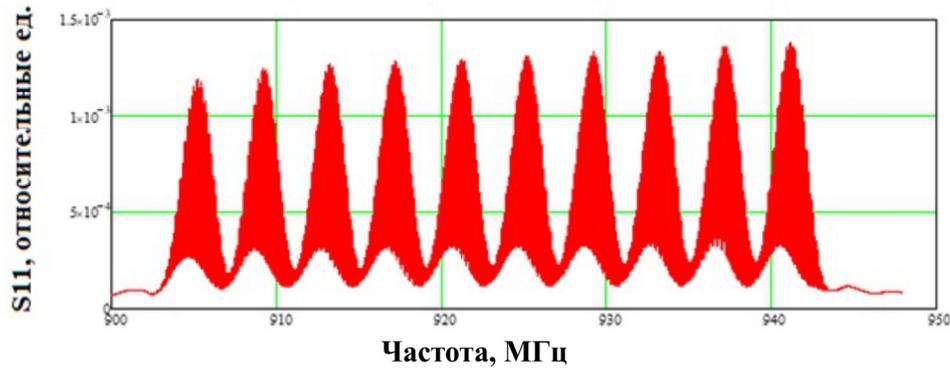


Рис. 2. Частотная зависимость параметра S11 ЛЗ по рис. 1,а

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Как видно из рис. 1, все входные встречно-штыревые преобразователи соединены параллельно. Если подать на них непрерывный сигнал с меняющейся частотой, то приемопередающие ВШП каждой ЛЗ возбуждают ПАВ, кото-

рые, дойдя до отражательного ВШ, отразятся назад к приемопередающему ВШП, что приведет к изрезанности частотной зависимости параметра S11 ЛЗ в области их рабочих частот (см. рис. 2). Фурье-преобразование этой частотной зависимости дает последовательности импульсов во временной области (рис. 3).

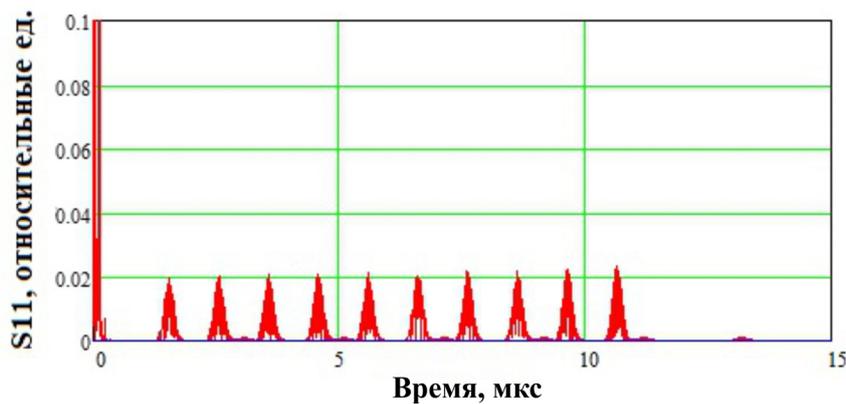


Рис. 3. Временная зависимость параметра S11 ЛЗ по рис. 1а

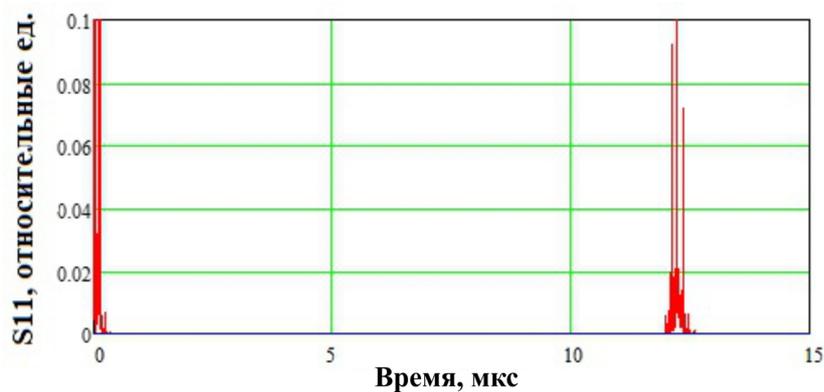


Рис. 4. Сигнал свертки после прохождения фильтров (а) и (б) по рис. 1 без учета шумов

Если этот сигнал (см. рис. 2) подать на ЛЗ, показанную на рис. 1,б, то все расстояния, который пройдут ПАВ в каждой ЛЗ окажутся одинаковыми и будут определяться по формуле (2), так как сумма расстояний, пройденных ПАВ в ЛЗ по рис. 1,а и ЛЗ по рис. 1,б окажутся одинако-

выми. Это означает, что все сигналы в итоге придут на приемопередающие ВШП ЛЗ по рис. 1,б одновременно, что приведет к появлению корреляционного пика (как показано на рис. 4) с амплитудой в 5 раз больше, чем амплитуда последовательности импульсов, представленных

## СИСТЕМА ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СКРЫТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

на рис. 3. Если в канале связи будет шум, который по амплитуде равен амплитуде импульсов на выходе согласованного фильтра (см. рис. 1,а), то эти импульсы не будет видно (рис. 5, 7). Но если этот сигнал попадет на согласованный фильтр по рис. 1,б, то его параметр  $S_{11}$  во временной области будет выглядеть, как показано

на рис. 6, т.е. будет выделен полезный сигнал, не смотря на то, что исходные сигналы не превышали уровень шума.

Таким образом, блок-схема системы скрытной связи будет выглядеть, как показано на рис. 8.

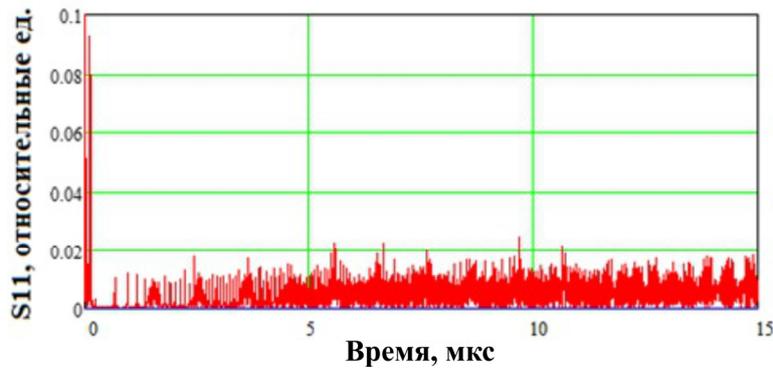


Рис. 5. Сигнал на входе приемника с учетом шумов

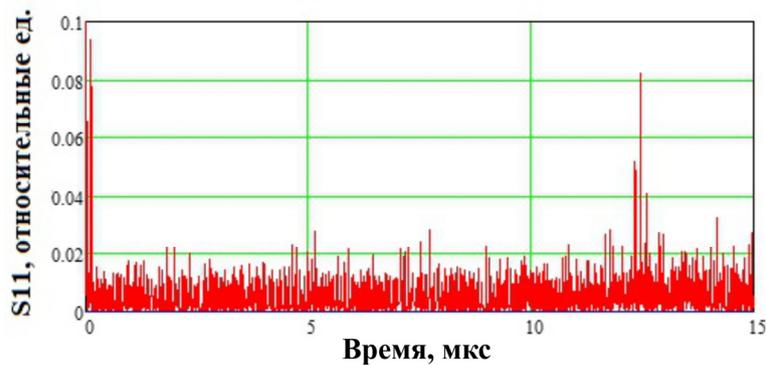


Рис. 6. Сигнал на выходе приемника с учетом шумов

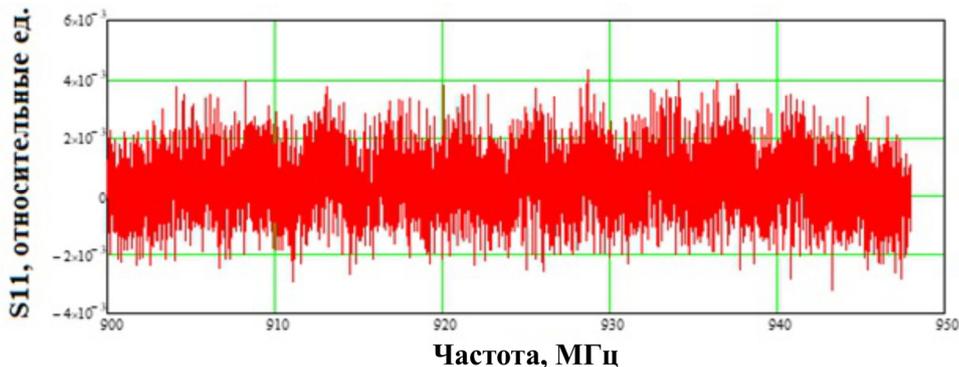


Рис. 7. Сигнал на входе приемника в частотной области

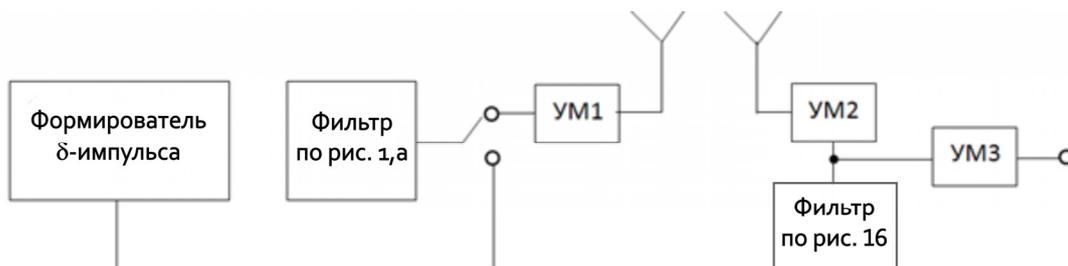


Рис. 8. Блок схема системы скрытной связи

## ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Система работает следующим образом (см. рис. 8). Под действием  $\delta$ -импульса ВШП приемопередающие ВШП фильтра (см. рис. 1,а) возбуждают импульсы ПАВ, которые, отражаясь от отражательных ВШП, снова попадают на приемопередающие ВШП. За время, когда ни один из отраженных импульсов не достиг приемопередающего ВШП, переключатель подсоединяет эти ВШП к антенне через усилитель мощности (УМ) УМ-1, и в эфир идет последовательность импульсов (см. рис. 1,а). Если подобрать амплитуды импульсов таким образом, чтобы они были ниже уровня шума, то этих импульсов не будет видно, и их невозможно будет обнаружить (см. рис. 5). Когда сигнал от передатчика попадет на фильтр (см. рис. 1,б) через усилитель мощности УМ-2, то, как было описано ранее, все импульсы придут на приемопередающие ВШП одновременно, что вызовет появление корреляционного пика, который по амплитуде будет больше уровня шума и не попадет в антенну благодаря УМ-2. На выходе УМ-3 передаваемый сигнал можно будет легко обнаружить. Скорость ПАВ в танталате лития составляет 3300 м/с, поэтому длительность последовательности импульсов будет соответствовать 13 мкс. Таким образом, можно передавать последовательность импульсов через каждые 26 мкс. Если будет появляться корреляционный пик, это будет соответствовать единице (1). Если сделать аналогичный фильтр по рис. 1, но в другом диапазоне, который не перекрывается с данным частотным диапазоном, импульсы, соответствующие нулю (0), можно передавать в промежутке между импульсами, соответствующими единице (1). Таким образом, будет получен двоичный код различных команд, который будет скрыт под шумами и не сможет быть обнаружен, в результате перехват управления БПЛА не будет возможен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана система скрытой широкополосной связи с полосой пропускания 36 МГц, в которой получено превышение полезного сигнала (корреляционного пика) над шумами в пять раз. Максимальная задержка сигнала составила 13 мкс, что в два раза больше задержки между ВШП. Важно также отметить, что расстояния между ВШП могут меняться в зависимости от частоты ЛЗ, не обязательно последовательно увеличиваясь или уменьшаясь с повышением рабочих частот ЛЗ. Можно задавать задержки в ЛЗ таким образом, чтобы суммарная задержка в ЛЗ с одинаковыми частотами всегда была одна и та же. Это позволит создавать различные согласованные фильтры в одном и том же диапазоне частот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Морган Д.* Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1991. 415 с.
2. *Morgan D.* Surface Acoustic Wave Filters: With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2007. 429 p.
3. *Карпетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Днепровский В.Г., Ермолаева Н.В.* Устройство считывания изображений на поверхностных акустических волнах с помощью веерных встречно-штыревых преобразователей на подложке из сульфида кадмия // Вестник НИЯУ МИФИ, 2016. Т. 5. № 2. С. 110–115.
4. *Кислицын В.О., Середин Б.М., Карпетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Ермолаева Н.В.* Исследование радиочастотных идентификационных меток на поверхностных акустических волнах // Вестник НИЯУ МИФИ, 2023. Т. 12, № 2. С. 120–130.
5. *Кислицын В.О., Карпетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Середин Б.М., Ермолаева Н.В.* Датчик температуры на поверхностных акустических волнах на основе линии задержки и резонатора // Вестник НИЯУ МИФИ, 2022. Т. 11. № 6. С. 450–456.
6. *Багдасарян Н.А., Багдасарян С.А., Карпетьян Г.Я.* Однонаправленный преобразователь поверхностных акустических волн. Патент РФ № 2195069, опубл. 20.12.2002.

## BROADBAND COMMUNICATION SYSTEM FOR COVERT TRANSMISSION OF INFORMATION

*G.Ya. Karapetyan<sup>1,2</sup>, V.F. Kataev<sup>3,\*</sup>, N.V. Ermolaeva<sup>3,\*\*</sup>*

<sup>1</sup>*Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia*

<sup>2</sup>*LLC «SAIGIVAT», Moscow, 115191, Russia*

<sup>3</sup>*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, 347360, Russia*

\**e-mail: kataev.v.f.@gmail.com*

\*\**e-mail: ermolv@mail.ru*

Received February 26, 2024; revised March 18, 2024; accepted March 19, 2024

This paper describes a covert broadband communication system using surface acoustic wave delay lines (SAW delay lines). A matched filter consisting of ten SAW delay lines is designed. The delay lines consist of unidirectional transmit-receive and reflective interdigital converters (IDCs), having an operating frequency band of 2 MHz, a distance between central frequencies of 4 MHz, and operating in the frequency range 905 – 941 MHz. Based on these filters, a covert broadband communication system has been developed, which makes it possible to obtain an output signal 5 times higher than the noise level. The maximum signal delay is 13  $\mu$ s, which is twice the delay between IDTs. The distance between the IDTs can be varied depending on the LS frequency. By setting delays in the LP in such a way that the total delay in the LP with the same frequencies is always the same, it is possible to create different matched filters in the same frequency range.

*Keywords:* Inter-digital transducer, surface acoustic waves, delay line, parameter S11.

### REFERENCES

1. *Morgan D.* Ustrojstva obrabotki signalov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah [Signal processing devices based on surface acoustic waves]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 415 p.
2. *Morgan D.* Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing Academic Press is an imprint of Elsevier, 2007. 429 p.
3. *Karapet'yan G.Ya., Kataev V.F., Dneprovskij V.G., Ermolaeva N.V.* Ustrojstvo schityvaniya izobrazhenij na poverhnostnyh akusticheskikh volnah s pomoshch'yu veermyh vstrechno-shtyrevykh preobrazovatelej na podlozhke iz sul'fida kadmiya [Surface acoustic wave image reader using fan-shaped interdigital transducers on a cadmium sulfide substrate]. Vestnik NIYaU MIFI, 2016. Vol. 5. No. 2. Pp. 110–115 (in Russian).
4. *Kislicyn V.O., Seredin B.M., Karapet'yan G.Ya., Kataev V.F., Ermolaeva N.V.* Issledovanie radiochastotnyh identifikacionnyh metok na poverhnostnyh akusticheskikh volnah [Study of radio frequency identification tags on surface acoustic waves] // Vestnik NIYaU MIFI, 2023. Vol. 12. No. 2. Pp. 120–130 (in Russian).
5. *Kislicyn V.O., Karapet'yan G.Ya., Kataev V.F., Seredin B.M., Ermolaeva N.V.* Datchik temperatury na poverhnostnyh akusticheskikh volnah na osnove linii zaderzhki i rezonatora [Surface acoustic wave temperature sensor based on a delay line and a resonator]. Vestnik NIYaU MIFI, 2022. Vol. 11. No. 6. Pp. 450–456 (in Russian).
6. *Bagdasaryan N.A., Bagdasaryan S.A., Karapetyan G.Ya.* Odonapravlenyj preobrazovatel' poverhnostnyh akusticheskikh voln. [Unidirectional transducer of surface acoustic waves]. Patent RF. No. 2195069, 2002.