

## **Повышение эффективности матричного приемника в сложной сигнальной обстановке на основе оптоволоконной линии задержки**

**Подстригаев А.С.**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет*

*«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5,*

*Санкт-Петербург, 197376, Россия*

*e-mail: [ap0d@ya.ru](mailto:ap0d@ya.ru)*

***Статья поступила 06.01.2021***

### **Аннотация**

Описано техническое решение на основе оптоволоконной линии задержки, направленное на повышение пропускной способности матричного приемника в сложной сигнальной обстановке. На примере сигнальной обстановки, сформированной импульсными РЛС, показано увеличение количества одновременно обрабатываемых без ошибок сигналов не менее, чем в 2 раза, при использовании одной линии задержки и не менее, чем в 3 раза, при использовании двух линий задержки.

**Ключевые слова:** матричный приемник, оптоволоконная линия задержки, сложная сигнальная обстановка, сложная радиоэлектронная обстановка, широкополосный анализ.

## Введение

Матричный приемник и основанные на его схеме приемники используются для анализа сигналов (преимущественно импульсных) в широкой мгновенной полосе частот. Принцип действия классического матричного приемника основан на ступенчатом разделении диапазона входных частот на узкополосные каналы (рис. 1) [1–8]. Схема включает в себя  $n$  ступеней, в каждой из которых содержатся  $m_i$  параллельно включенных каналов ( $i = \overline{1, n}$ ). Каждый канал с помощью фильтров  $\Phi_{ij}$  ( $j = \overline{1, m_i}$ ) выполняет частотную селекцию, а с помощью смесителей и подключенных к ним гетеродинов  $\Gamma_{ij}$  – перенос сигнала в диапазон промежуточных частот (ПЧ)  $\Delta f_{пр i}$ . Диапазон ПЧ является общим для всех каналов в пределах одной ступени. Выход ПЧ каждой предыдущей ступени соединен со входом последующей. В каналах каждой ступени для обнаружения сигнала и определения частоты установлены обнаружители  $O_{ij}$ . Сигнал в диапазоне  $\Delta f_{пр n}$  с выхода последней ступени поступает на цифровую обработку. Последнюю ступень приемника часто выполняют без преобразования частоты и обнаружителей. В этом случае сигнал обрабатывается многоканальным устройством цифровой обработки. Частота входного сигнала определяется по оцифрованным отсчетам с учетом данных, поступивших от обнаружителей  $O_{ij}$ , которые образуют своеобразную матрицу, давшую название схеме приемника.

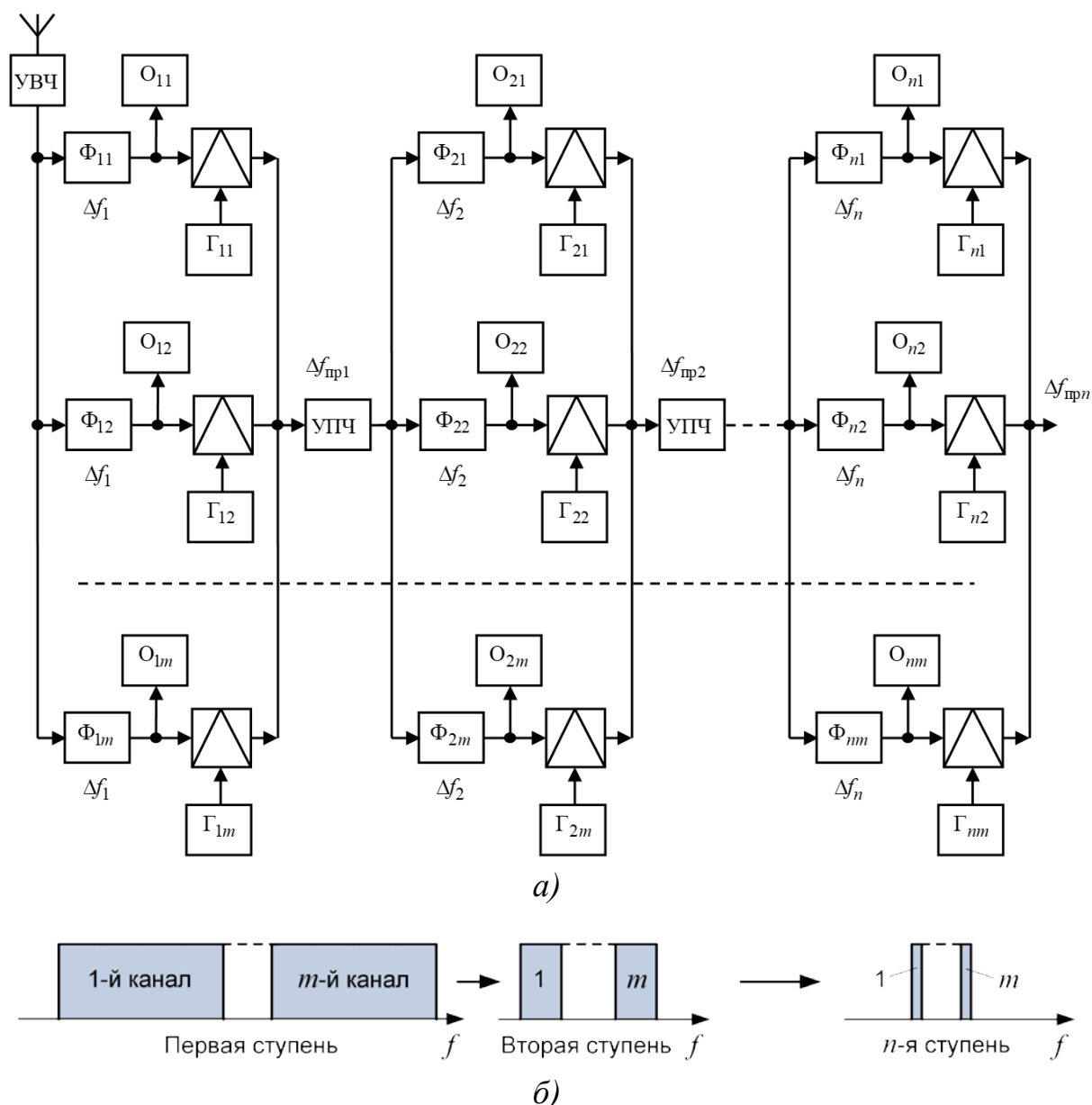


Рис. 1. Структурная схема (а) и частотный план (б) матричного приемника

Одновременное функционирование значительного по составу и характеристикам излучающих радиоэлектронных средств формирует сложную сигнальную обстановку (ССО) [9–12]. Прием множества сигналов приводит к их наложению как в аналоговом тракте матричного приемника, так и в устройстве цифровой обработки. В зависимости от видов и параметров принимаемых сигналов это приводит ко множеству различного рода ошибок и неоднозначностей при измерении частотно-временных параметров [13, 14].

Следует разделять наложение импульсных сигналов и непосредственно импульсов. При наложении даже десятков импульсных сигналов с высокой скважностью их импульсы могут практически не накладываться во времени. Соответственно, ошибки обработки в этом случае практически исключены. И, наоборот, при малой скважности сигналов наложение их импульсов более вероятно. Поэтому наложение импульсных сигналов не всегда затрудняет обработку, а наложение импульсов однозначно требует мер по повышению пропускной способности устройства обработки, снижению ошибок и неоднозначностей измерений. Следует также отметить, что наложение сигналов с малой скважностью требует высокой скорости определения параметров импульсов, разделения потоков и отнесения импульсов к сигналам. Это влечет за собой повышение скорости вычислений, что на практике не всегда возможно.

Ранее в ряде работ эффективность обработки в матричном приемнике при приеме совмещенных по времени импульсов повышалась следующим образом. Пропускная способность по количеству наложенных импульсов увеличивалась за счет введения дополнительного измерителя частоты в каждой ступени приемника [15, 13], параллельной обработки в выходном тракте [16] или введения фиксированной линии задержки на промежуточной частоте и устройства управления [17]. Ошибки и неоднозначности частотных измерений снижались за счет отдельной обработки четных и нечетных каналов первой ступени приемника [16, 13], а также введения дополнительного измерителя частоты [15, 13].

Однако, при расширении диапазона одновременно обрабатываемых частот и росте загруженности радиочастотного диапазона перечисленных мер становится

недостаточно. Еще больше обработку затрудняет наличие в эфире непрерывных (квазинепрерывных) мешающих сигналов и сигналов постановщиков помех [18–23].

Поэтому целью настоящей работы является повышение эффективности матричного приемника в условиях ССО с учетом нового технического решения.

### Широкополосная многоканальная линия задержки

Таким техническим решением является включение на вход приемника широкополосной линии задержки (ЛЗ), работающей во всем диапазоне рабочих частот приемника (рис. 2). ЛЗ подключается через СВЧ-коммутатор К для записи второго из двух наложенных сигналов. Чтобы разделить задержанный и незадержанный сигналы используется делитель мощности, а для компенсации потерь – входной усилитель.

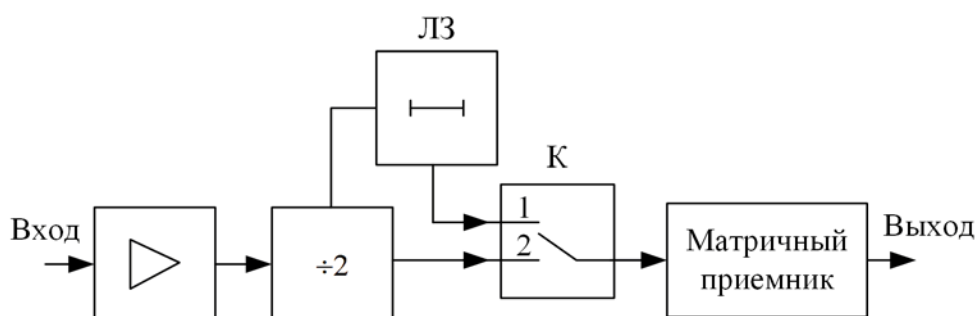


Рис. 2. Схема подключения ЛЗ ко входу матричного приемника

Принцип использования ЛЗ заключается в следующем. Первый импульс поступает на вход приемника, минуя ЛЗ, и обнаруживается в одном из частотных каналов первой ступени приемника. Если за время обработки в другом частотном канале первой ступени происходит обнаружение сигнала, то весь спектр в диапазоне рабочих частот приемника записывается в ЛЗ. Причем запись второго импульса не должна завершаться ранее окончания первого импульса. Также для исключения

потери части импульса запись не должна завершаться ранее окончания второго импульса.

Принимая во внимание, что в задачах широкополосного анализа длительность принимаемого импульса априорно неизвестна, должна обеспечиваться возможность адаптивной перестройки времени задержки. Также ЛЗ должна быть широкополосной, иметь небольшие массу и габаритные размеры.

Таким требованиям может отвечать ЛЗ, разработанная на основе средств радиофотоники, успешно применяемых для решения подобных задач [24–28]. На рис. 3 представлена специально разработанная регулируемая оптоволоконная ЛЗ [29].

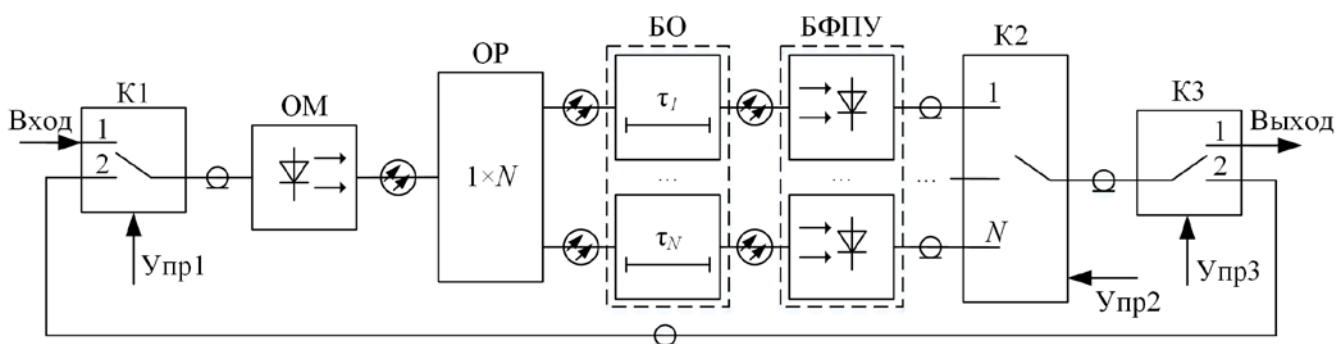


Рис. 3. Структурная схема ЛЗ

ЛЗ работает следующим образом. Входной СВЧ-сигнал попадает на вход 1 входного коммутатора К1 (вход устройства), который передает сигнал на вход оптического модулятора (ОМ). ОМ переносит полезный СВЧ-сигнал на оптическую несущую и передает его на оптический разветвитель (ОР) размерностью  $1 \times N$ . С выходов разветвителя сигнал поступает в банк отрезков оптоволоконна (БО). С выходов оптоволоконных отрезков сигнал поступает на соответствующие входы банка фотоприемных устройств (БФПУ), которые возвращают сигнал в СВЧ-диапазон. С одного из выходов БФПУ сигнал поступает в коммутатор К2. К выходу коммутатора

К2 подключается вход, который соответствует тому отрезку оптоволоконна, в котором превышение задержки минимально по сравнению с длительностью задерживаемого импульса. С выхода коммутатора К2 сигнал поступает на вход коммутатора К3, который передает сигнал на входной коммутатор К1 для прохождения необходимого количества циклов задержки. После достижения необходимой задержки коммутатор К3 направляет сигнал на выход устройства. Синхронное управление коммутаторами выполняется по командам Упр1–Упр3. Для компенсации затухания, вносимого при преобразованиях сигнала из оптического диапазона в СВЧ-диапазон и обратно, в ЛЗ устанавливаются усилители (на схеме условно не показаны).

Задержка, вносимая  $i$ -м отрезком оптоволоконна, определяется как  $t_i = n_g L_i / c$ , где  $n_g$  – показатель преломления сердцевины оптического волокна,  $L_i$  – длина  $i$ -го отрезка оптоволоконна,  $c$  – скорость света в вакууме. Сложение на выходе устройства различных комбинаций  $t_i$  позволяет получать различные итоговые величины задержек. Для расширения диапазона значений вносимой задержки используются отрезки оптоволоконна некратной длины.

### **Оценка эффективности предложенного технического решения**

Оценить эффективность использования ЛЗ на входе матричного приемника можно на основе изменения количества одновременно обрабатываемых сигналов. Из выполненного в [30] анализа известны ориентировочные диапазоны изменения скважности сигнала в зависимости от типа источника радиоизлучения (ИРИ). Результаты этого анализа для РЛС представлены в табл. 1.

Табл. 1. Скважность сигналов РЛС различного назначения [30]

Назначение РЛС	Скважность сигнала РЛС
1. Сопровождение объектов	Десятки...сотни
2. Обзор пространства и поиск объектов	Сотни...десятки тысяч
3. Навигация	Тысячи...сотни тысяч

Использование описанной выше ЛЗ позволяет обрабатывать наложение двух импульсов, обработка же трех и более наложенных импульсов затруднена. На рис. 4 представлена зависимость вероятности  $P_M$  наложения во времени не менее  $M$  импульсов ( $M = 2; 3; 4$ ) в зависимости от количества  $N$  присутствующих в радиоэфире сигналов ИРИ. На рисунке в зависимости от скважности сигналов  $S$  отмечены линии, соответствующие РЛС различного назначения, приведенным в табл. 1.

График построен в соответствии с выражениями, полученными в [30]. При моделировании сделан ряд допущений. В соответствии с классическим подходом [31] средняя заполняемость сигнала  $R = 1/S$  интерпретировалась, как вероятность обнаружения в случайный момент времени импульса от  $i$ -го ИРИ в любой точке его длительности. Также полагалось, что все сигналы имеют одинаковую скважность, а начальные фазы импульсных последовательностей распределены равномерно.



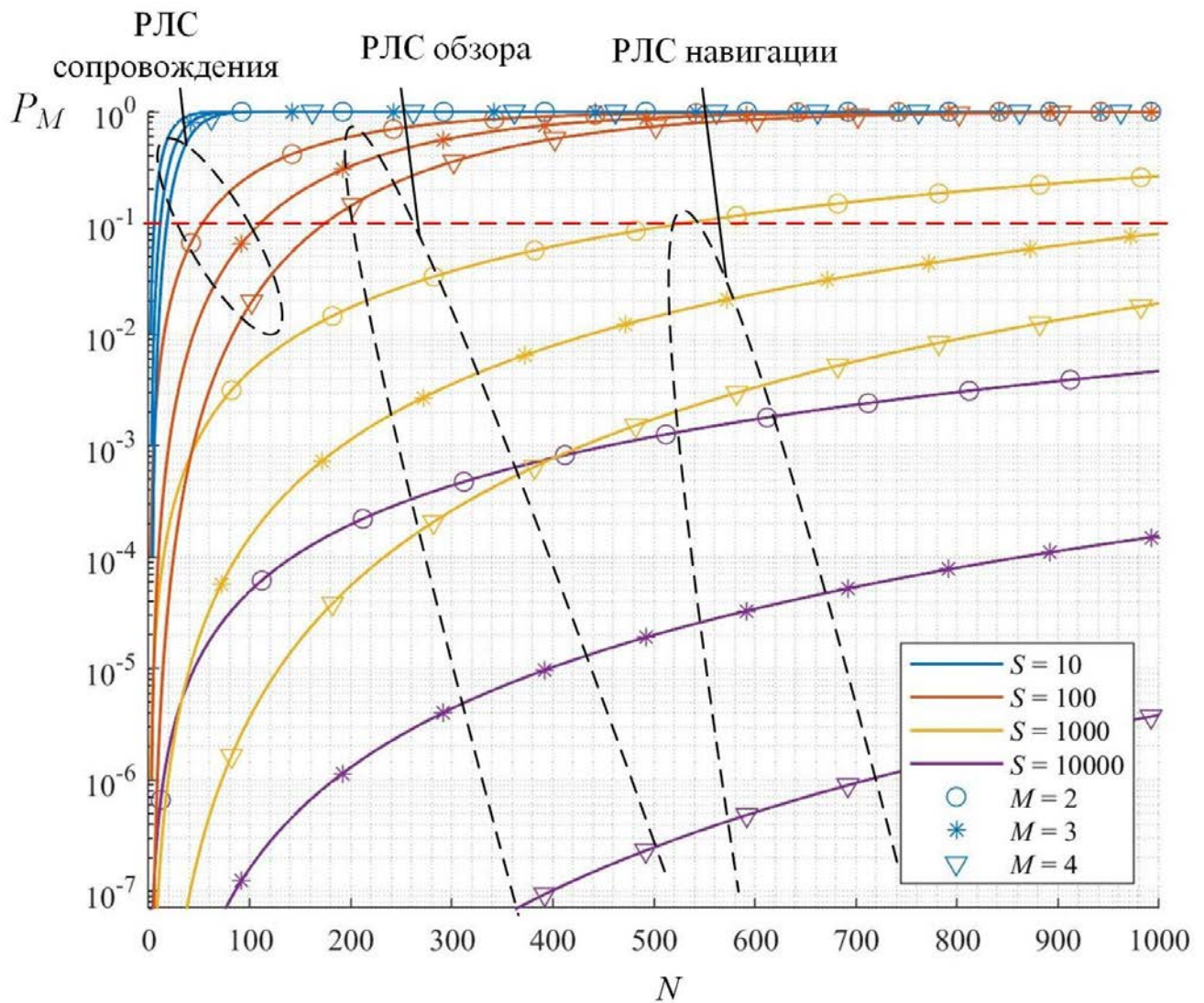


Рис. 4. Вероятность наложения во времени не менее  $M$  импульсов в зависимости от количества ИРИ  $N$  при различной скважности сигналов  $S$

Далее для определенности считаем, что существенные для вторичной обработки ошибки возникают при  $P_M \geq 10\%$  (на рис. 4 эта граница отмечена красной штриховой линией). Тогда при приеме сигналов РЛС сопровождения количество обрабатываемых сигналов возрастает с десятков ( $S = 100$ ,  $M = 2$ ) до более чем сотни штук ( $S = 100$ ,  $M = 3$ ), а при минимальной скважности – с пяти ( $S = 10$ ,  $M = 2$ ) до одиннадцати РЛС ( $S = 10$ ,  $M = 3$ ). При приеме сигналов обзорных РЛС ( $S = 100 \dots 10000$ ,  $M = 2$ ) – с нескольких десятков до сотен...тысяч ( $S = 100 \dots 10000$ ,  $M = 3$ ).

При приеме сигналов навигационных РЛС  $P_M \geq 10\%$  для  $M = 2$  достигается только при  $N > 550$ . При этом скважность для данного типа ИРИ минимальна ( $S = 1000$ ). С увеличением скважности наложение хотя бы двух импульсов не происходит даже при  $N = 1000$ . Соответственно, на основе графика можно сделать вывод, что даже в наихудшем из рассмотренных случаев, соответствующем приему сигналов только РЛС сопровождения с низкой скважностью, количество обрабатываемых сигналов увеличивается не менее, чем в 2 раза. С увеличением скважности увеличение количества обрабатываемых сигналов достигает десятков раз.

По аналогии со схемой на рис. 1 возможно подключение двух и более ЛЗ на вход приемника. В этом случае возможна обработка до трех наложенных импульсов включительно. Оценить увеличение количества обрабатываемых сигналов можно также по графику, представленному на рис. 4, при переходе от графиков с  $M = 2$  к графикам с  $M = 4$  и  $S = \text{const}$ . Для РЛС сопровождения количество обрабатываемых сигналов возрастает с 5 до 15 при  $S = 10$  и с 53 до 175 при  $S = 100$ , а для обзорных РЛС – также с 53 до 175 при  $S = 100$  и с 531 до более 1000. При приеме сигналов только навигационных РЛС наложение четырех и более импульсов выполняется при  $N \leq 1000$ . Таким образом, при использовании на входе матричного приемника двух ЛЗ в наихудшем из рассматриваемых вариантов сигнальной обстановки количество обрабатываемых сигналов увеличивается не менее, чем в 3 раза.

### **Сравнение с известными техническими решениями**

Схожее техническое решение предложено в работе [17]. В ней первая ступень матричного приемника дополняется функциональным узлом, позволяющим при

одновременном попадании сигналов в два канала первой ступени задержать сигнал в одном канале относительно другого. Но, в отличие от предложенного решения, в работе [17] каждый канал дополняется ЛЗ, работающей в диапазоне ПЧ первой ступени и имеющей фиксированную величину задержки. В части увеличения пропускной способности решения имеют одинаковую эффективность. Однако сравнительными недостатками схемы [17] являются высокая сложность, отсутствие адаптации задержки под длительность принимаемого импульса и необходимость значительной конструктивной доработки при проведении модернизации существующих матричных приемников.

### **Выводы**

Описанное в работе техническое решение направлено на повышение пропускной способности матричного приемника. При использовании одной линии задержки на примере радиоэлектронной обстановки, сформированной импульсными РЛС, показано увеличение количества одновременно обрабатываемых без ошибок сигналов не менее, чем в 2 раза. При использовании двух линий задержки количество одновременно обрабатываемых сигналов увеличивается не менее, чем в 3 раза. Т.к. на практике сигнальная обстановка формируется сигналами с различной скважностью, то количество одновременно обрабатываемых сигналов может быть на порядки выше (см. рис. 4). Таким образом, эффективность матричного приемника в условиях ССО значительно повышается.

У данного технического решения есть, как минимум, два важных для практики преимущества. Во-первых, обеспечивается возможность доработки уже существующего матричного приемника без существенного изменения конструкции.

Во-вторых, при расширении количества одновременно обрабатываемых сигналов сохраняется основное преимущество матричного приемника – высокая чувствительность, как у узкополосного сканирующего приемника, при широкой мгновенной полосе рабочих частот, как у многоканального приемника.

В заключение следует отметить, что представленный подход к повышению пропускной способности за счет использования одной или нескольких линий задержки может быть использован и для других приемников, применяемых в задачах широкополосного анализа. Так, могут быть усовершенствованы приемники следующих типов: с использованием банка частотно-зависимых линий задержки [32, 33], с монобитным аналого-цифровым преобразованием [34–36] и субдискретизацией [37–41].

### **Библиографический список**

1. Tsui J.B.Y. Microwave receivers with electronic warfare applications, Institution of Engineering and Technology, 2005, 460 p.
2. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. - М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.
3. Леньшин А.В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. - Воронеж: Научная книга, 2014. - 590 с.
4. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. - М.: Вузовская книга, 2007. - 356 с.
5. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. - М.: Вузовская книга, 2016. - 190 с.

6. Перунов Ю.М., Мацукевич В.В., Васильев А.А. Зарубежные радиоэлектронные средства. Книга 2: Системы радиоэлектронной борьбы. - М.: Радиотехника, 2010. - 352 с.
7. Kim J., Utomo D.R., Dissanayake A., Han S.K., Lee S.G. The evolution of channelization receiver architecture: principles and design challenges // IEEE Access, 2017, vol. 5. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2772810](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2772810)
8. Мельников Ю.П., Попов С.В. Методы оценки эффективности широкодиапазонного многоканально-функционального («матричного») приемника с многоступенчатым преобразованием частоты // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 3. С. 52 – 61.
9. Коротков В.Ф., Зырянов Р.С. Разделение импульсных последовательностей в смешанном потоке сигналов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 5 – 10. URL: <https://re.eltech.ru/jour/article/view/169>
10. Богданов С.А., Куприянов П.В., Николаев С.В., Петров С.А. Исследование путей расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ в многосигнальном режиме // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 85 – 90. URL: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2018-21-3-85-90>
11. Филатов В.И., Борукаева А.О., Бердииков П.Г., Кулаков Д.В. Разработка методов различения сложных помехоустойчивых сигналов // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104188>
12. Дворников С.В., Конюховский В.С., Симонов А.Н. Способ частотнопространственной селекции радиоизлучений с помощью триортогональной

антенной системы // Информационно-управляющие системы. 2020. № 1. С. 63 – 72.

DOI: [10.31799/1684-8853-2020-1-63-7](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-1-63-7).

13. Подстригаев А.С., Лихачев В.П. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 2. URL:

<http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text.pdf>

14. Подстригаев А.С. Влияние нелинейности элементов СВЧ тракта на возникновение неоднозначности определения частоты в широкополосном матричном приемнике // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. № 1(10). С. 147 - 150.

15. Подстригаев А.С., Лихачев В.П. Способ определения частоты в матричном приемнике и устройство для его осуществления. Патент RU № 2587645. Бюлл. № 17, 20.06.2016.

16. Подстригаев А.С., Беззуб А.И. Широкополосное приемное устройство станции радиоэлектронной борьбы // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 4. С. 37 – 44.

17. Анохин В.Д., Анохин Е.В., Кильдюшевская В.Г., Симохаммед Ф. Матричный приемник. Патент РФ № 2422845. Бюлл. № 18, 27.02.2011.

18. Алдохина В.Н., Демьянов А.В., Гудаев Р.А., Бык В.С., Викулова Ю.М. Способ распознавания типа объекта в воздушно-космическом пространстве на основе анализа радиотехнических характеристик с учетом информативности признаков // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80373>

19. Лихачев В.П., Семенов В.В., Веселков А.А., Демчук А.А. Обобщенный алгоритм радиотехнического мониторинга РЛС с синтезированной апертурой

антенны // Материалы XVI Международной научно -методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». (Воронеж, 11–12 февраля 2016). - Воронеж: Изд-во Научно-исследовательские публикации, 2016. С. 179 - 184.

20. Макаренко С.И., Новиков Е.А., Михайлов Р.Л. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.html>

21. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Математическая модель функционирования станции активных помех // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=118081>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-07)

22. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62310>

23. Звонарев В.В., Попов А.С., Худик М.Ю. Методика расчета вероятности ошибки посимвольного приема дискретных сообщений при наличии помех // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104213>

24. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. № 1 (10). С. 4 - 20.

25. Аткишкин С.Ф. Обзор радифотонных средств измерения частоты // II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информатика и вычислительная

техника»: сборник статей (Анапа, 27–28 февраля 2020). – Анапа: Военный инновационный технополис "ЭРА", 2020. Т.3. С. 24 - 36.

26. Fadeenko V.B., Pchelkin G.A., Davydov V.V., Glinuchkin A.P., Beloshapkina O.O., Rud V.Y. Features of construction of the scheme of fiber-optic communication system for transmission of analog signals in the frequency range from 0.135 to 40 GHz // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, vol. 1410, no. 1, pp. 012238. DOI: [10.1088/1742-6596/1410/1/012238](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012238)

27. Moroz A.V., Davydov V.V. Fiber-optical system for transmitting heterodyne signals in active phased antenna arrays of radar stations // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, vol. 1368, no. 2, pp. 022024. DOI: [10.1088/1742-6596/1368/2/022024](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/2/022024)

28. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И., Иванов Д.В., Одноблюдов М.А., Царук А.А. Исследование характеристик модулей передатчиков с внутренней и внешней модуляцией в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ радиосигналов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 2. С. 69 - 73. URL: [http://mwelectronics.ru/2016/Papers/PDF\\_2/069-073.pdf](http://mwelectronics.ru/2016/Papers/PDF_2/069-073.pdf)

29. Подстригаев А.С., Галичина А.А., Лукиянов А.С. Способ регулирования задержки СВЧ-сигнала и реализующая его линия задержки. Патент RU № 2716283. Бюлл. № 8, 11.03.2020.

30. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V., Maslov I.V. Probability of Pulse Overlap as a Quantitative Indicator of Signal Environment Complexity // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020. no. 23 (5), pp. 37 - 45. DOI: [10.32603/1993-8985-2020-23-5-37-45](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-5-37-45)



31. Self A.G., Smith B.G. Intercept time and its prediction // IEE Proceedings F - Communications, Radar and Signal Processing, 1985, vol. 132, no. 4, pp. 215 - 220. DOI: [10.1049/ip-f-1.1985.0052](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1985.0052)
32. Егоров Н., Кочемасов В. Мгновенное измерение частоты: методы и средства // Электроника: НТБ. 2017. № 5. С. 136 - 141. DOI: [10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141)
33. Praneetha R, Raju VVSRN, Sreenivasa Rao E., Singh A.K. Simulation and Verification of Digital Delay based Instantaneous Frequency Measurement Technique for Electronic Warfare receivers // International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET), 2015, vol. 3, issue 9, pp. 7 - 14.
34. Tsui J.B.Y., Schamus J.J., Kaneshiro D.H. Monobit receiver // 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IEEE, 1997, vol. 2, pp. 469 - 471.
35. Карманов Ю.Т., Николаев А.Н., Зеленцова Я.Г., Поваляев С.В., Заляцкая И.И. Применение монобитной цифровой технологии обработки радиосигналов в широкодиапазонных радиоэлектронных системах // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2014. Т. 14. № 3. С. 11 - 18. URL: <https://dspace.susu.ru/xmlui/handle/0001.74/4860>
36. Николаев А.Н. Цифровые технологии в широкополосных приемниках СВЧ радиосигналов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2012. Т. 17. № 35 (294). С. 30 - 34. URL: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/644>

37. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of real signals. US Patent № 5099194. Publ. 24.03.1992.
38. McCormick W.S., Tsui J.B.Y. Frequency measurement receiver with means to resolve an ambiguity in multiple frequency estimation. US Patent № 5293114. Publ. 08.03.1994.
39. Beharrell G.P. Digital electronic support measures. EP Patent № 1618407. Bulletin 2013/16, 17.04.2013.
40. Кренев А.Н., Ботов В.А., Горюнцов И.С., Погребной Д.С., Топорков В.К. Способ расширения полосы частот оценки спектров сигналов. Патент RU № 2516763. Бюлл. № 14, 20.05.2014.
41. Кондаков Д.В., Космынин А.Н., Лавров А.П. Алгоритм оценки частот многокомпонентного сигнала в цифровом приёмнике с субдискретизацией // XXIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь»: сборник трудов. - Воронеж: Изд-во Вэлборн, 2017. Т. I. С. 481 - 486.

# **Improving the efficiency of a matrix receiver in a complex signal environment based on a fiber optic delay line**

**Podstrigaev A.S.**

*Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,  
5, Professora Popova str., Saint Petersburg, 197376, Russia*

*e-mail: [ap0d@ya.ru](mailto:ap0d@ya.ru)*

## **Abstract**

A matrix receiver and receivers based on it are used to analyze signals over a wide instantaneous bandwidth. However, in a complex signal environment (CSE), the receiver input pulses are overlapped in time. This leads to errors in determining the time-frequency parameters of the pulses. Therefore, the article aims to improve the efficiency of the matrix receiver in the CSE conditions. For this, it is proposed to connect a broadband fiber-optic delay line to the receiver input. A circuit of the delay line with a delay duration tunable in accordance with the duration of the received pulse is considered. Using the example of the electronic environment generated by pulsed radars, an increase in the number of signals processed simultaneously without errors is shown. The increasing is at least 2 times when using one delay line and at least 3 times when using two delay lines. In practice, the signal environment is formed by radio emission sources with different duty cycles. So, the number of simultaneously processed signals can be orders of magnitude higher. An important for practice advantage of the considered technical solution is the possibility of modifying an already existing matrix receiver without significant design changes. Additionally, when increasing the number of simultaneously processed signals stored main advantage of the matrix receiver – high sensitivity as in narrowband scanning receiver with a broad

instantaneous bandwidth of operating frequencies, like a multi-channel receiver. The presented approach to increasing the throughput due to one or several delay lines can also be used for other receivers used in broadband analysis tasks.

**Keywords:** matrix receiver, fiber optic delay line, complex signal environment, complex electronic environment, wideband analysis.

### References

1. Tsui J.B.Y. *Microwave receivers with electronic warfare applications*, Institution of Engineering and Technology, 2005, 460 p.
2. Kupriyanov A.I., Sakharov A.V. *Radioelektronnyye sistemy v informatsionnom konflikte* (Electronic systems in information conflict), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2003, 528 p.
3. Len'shin A.V. *Bortovye sistemy i kompleksy radioelektronnogo podavleniya* (Onboard systems and complexes of electronic suppression), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2014, 590 p.
4. Kupriyanov A.I., Sakharov A.V. *Teoreticheskie osnovy radioelektronnoi bor'by* (The theoretical foundations of electronic warfare), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2007, 356 p.
5. Perunov Yu.M., Kupriyanov A.I. *Radioelektronnaya bor'ba: radiotekhnicheskaya razvedka* (Electronic warfare: electronic intelligence), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2016, 190 p.
6. Perunov Yu.M., Matsukevich V.V., Vasil'ev A.A. *Zarubezhnye radioelektronnyye sredstva. Sistemy radioelektronnoi bor'by* (Foreign radio-electronic means. Electronic Warfare Systems), Moscow, Radiotekhnika, 2010, Book 2, 352 p.

7. Kim J., Utomo D.R., Dissanayake A., Han S.K., Lee S.G. The evolution of channelization receiver architecture: principles and design challenges, *IEEE Access*, 2017, vol. 5. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2772810](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2772810)
8. Mel'nikov Yu.P., Popov S.V. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2009, vol. 14, no. 3, pp. 52 – 61.
9. Korotkov V.F., Zyryanov R.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2017, no. 3, pp. 5 – 10. URL: <https://re.eltech.ru/jour/article/view/169>
10. Bogdanov S.A., Kupriyanov P.V., Nikolaev S.V., Petrov S.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2018, no. 3, pp. 85 – 90. URL: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2018-21-3-85-90>
11. Filatov V.I., Borukaeva A.O., Berdikov P.G., Kulakov D.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104188>
12. Dvornikov S.V., Konyukhovskii V.S., Simonov A.N. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2020, no. 1, pp. 63 – 72. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-1-63-7](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-1-63-7)
13. Podstrigaev A.S., Likhachev V.P. *Zhurnal radioelektroniki*, 2015, no. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text.pdf>
14. Podstrigaev A.S. *Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh system*, 2016, no. 1 (10), pp. 147 - 150.
15. Podstrigaev A.S., Likhachev V.P. *Patent RU № 2587645*, 20.06.2016.
16. Podstrigaev A.S., Bezzub A.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2014, no. 4, pp. 37 – 44.
17. Anokhin V.D., Anokhin E.V., Kil'dyushevskaya V.G., Simokhammed F. *Patent RF № 2422845*, 27.02.2011.

18. Aldokhina V.N., Dem'yanov A.V., Gudaev R.A., Byk V.S., Vikulova Yu.M. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80373>
19. Likhachev V.P., Semenov V.V., Veselkov A.A., Demchuk A.A. *Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno -metodicheskoi konferentsii «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»*, Voronezh, Izd-vo Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2016, pp. 179 - 184.
20. Makarenko S.I., Novikov E.A., Mikhailov R.L. *Zhurnal radioelektroniki*, 2014, no. 10, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.html>
21. Maklashov V.A., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118081>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-07](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-07)
22. Yudin V.N., Kamnev E.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62310>
23. Zvonarev V.V., Popov A.S., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104213>
24. Belkin M.E., Kudzh S.A., Sigov A.S. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*, 2016, no. 1 (10), pp. 4 - 20.
25. Atkishkin S.F. *II Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoi nauki po napravleniyu «Informatika i vychislitel'naya tekhnika»*, Anapa, Voennyi innovatsionnyi tekhnopolis "ERA", 2020, vol. 3, pp. 24 - 36.
26. Fadeenko V.B., Pchelkin G.A., Davydov V.V., Glinuchkin A.P., Beloshapkina O.O., Rud V.Y. Features of construction of the scheme of fiber-optic communication system for transmission of analog signals in the frequency range from 0.135 to 40 GHz, *Journal of*

- Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, vol. 1410, no. 1, pp. 012238. DOI: [10.1088/1742-6596/1410/1/012238](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012238)
27. Moroz A.V., Davydov V.V. Fiber-optical system for transmitting heterodyne signals in active phased antenna arrays of radar stations, *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, vol. 1368, no. 2, pp. 022024. DOI: [10.1088/1742-6596/1368/2/022024](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/2/022024)
28. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I., Ivanov D.V., Odnoblyudov M.A., Tsaruk A.A. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2016, vol. 2, pp. 69 - 73. URL: [http://mwelectronics.ru/2016/Papers/PDF\\_2/069-073.pdf](http://mwelectronics.ru/2016/Papers/PDF_2/069-073.pdf)
29. Podstrigaev A.S., Galichina A.A., Lukiyarov A.S. *Patent RU № 2716283*, 11.03.2020.
30. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V., Maslov I.V. Probability of Pulse Overlap as a Quantitative Indicator of Signal Environment Complexity, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, no. 23 (5), pp. 37 - 45. DOI: [10.32603/1993-8985-2020-23-5-37-45](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-5-37-45)
31. Self A.G., Smith B.G. Intercept time and its prediction, *IEE Proceedings F - Communications, Radar and Signal Processing*, 1985, vol. 132, no. 4, pp. 215 - 220. DOI: [10.1049/ip-f-1.1985.0052](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1985.0052)
32. Egorov N., Kochemasov V. *Elektronika: NTB*, 2017, no. 5, pp. 136 - 141. DOI: [10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141)
33. Praneetha R, Raju VVSRN, Sreenivasa Rao E., Singh A.K. Simulation and Verification of Digital Delay based Instantaneous Frequency Measurement Technique for Electronic Warfare receivers, *International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET)*, 2015, vol. 3, issue 9, pp. 7 - 14.

34. Tsui J.B.Y., Schamus J.J., Kaneshiro D.H. Monobit receiver, *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, IEEE, 1997, vol. 2, pp. 469 - 471.
35. Karmanov Yu.T., Nikolaev A.N., Zelentsova Ya.G., Povalyaev S.V., Zalyatskaya I.I. *Vestnik YuUrGU. Ser. «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 11 - 18. URL: <https://dspace.susu.ru/xmlui/handle/0001.74/4860>
36. Nikolaev A.N. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*, 2012, vol. 17, no. 35 (294), pp. 30 - 34. URL: <https://vestnik.susu.ru/ctcr/article/view/644>
37. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of real signals, *US Patent № 5099194*, 24.03.1992.
38. McCormick W.S., Tsui J.B.Y. Frequency measurement receiver with means to resolve an ambiguity in multiple frequency estimation, *US Patent № 5293114*, 08.03.1994.
39. Beharrell G.P. Digital electronic support measures, *EP Patent № 1618407*, 17.04.2013.
40. Krenov A.N., Botov V.A., Goryuntsov I.S., Pogrebnoi D.S., Toporkov V.K. *Patent RU № 2516763*, 20.05.2014.
41. Kondakov D.V., Kosmynin A.N., Lavrov A.P. *XXIII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'»*, Voronezh, Izd-vo Velborn, 2017, vol. I, pp. 481 - 486.