

Труды МАИ. 2022. № 127

Trudy MAI, 2022, no. 127

## ЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 621.396

DOI: [10.34759/trd-2022-127-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-09)

# УЛУЧШЕНИЕ И ОБРАБОТКА СЛАБЫХ ЦИФРОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЗКОПОЛОСНОЙ ШУМОВОЙ СТРУКТУРЫ

Али Салах Хафаджа<sup>1</sup>, Александр Германович Ильин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Казанский Национальный Исследовательский Технический университет

им. А. Н. Туполева - КАИ,

Казань, Россия, Республика Татарстан

<sup>1</sup>[alialahelect1985@gmail.com](mailto:alialahelect1985@gmail.com)

<sup>2</sup>[iag29@yandex.ru](mailto:iag29@yandex.ru)

**Аннотация.** Одним из важнейших вопросов в настоящее время является создание систем связи в районах, где нет систем связи и отсутствует экономическая целесообразность создания передовых систем связи. Как это бывает, например, в деревнях и пригородных районах, из-за больших площадей и малочисленности населения в этих районах. Необходимо найти систему связи, способную работать на низком энергетическом уровне в связи с зависимостью этих территорий от возобновляемых источников энергии, таких как солнце, ветер и т. д., что

накладывает ограничения на использование передачи информации с низким уровнем сигнала или отношения сигнал/ шум. Поэтому мы предлагаем систему, использующую импульсные сигналы в процессе передачи информации и при малых отношениях сигнал/шум, чтобы иметь возможность охвата больших площадей при сохранении работоспособности системы связи и сохранении значения помехоустойчивости импульсного сигнала. В работе показано, что за счет использования структурных отличий смеси полезного сигнала и шума и просто узкополосного шума можно значительно повысить надежность приема цифрового сигнала в области малых значений сигнал/шум. Возможность использования уточненной теории узкополосных помех для повышения чувствительности приемного устройства при приеме цифровых сигналов за счет использования фазовых скачков объясняется тем, что узкополосные помехи представляют собой сигналы биения двух боковых полос. Поэтому основной целью работы является исследование возможности повышения помехозащищенности приемных устройств при приеме точно известного радиоимпульса на фоне шумов и помех при малых отношениях сигнал/шум с одновременным повышением пропускной способности информации за счет изменения ширины передаваемых импульсных сигналов за счет использования дополнительного канала на основе фазового детектора.

**Ключевые слова:** фазовый детектор, фазовые скачки, импульсные сигналы, узкополосный шум, отношение сигнал/шум, помехозащищенность, узкополосный сигнал, амплитудная манипуляция (АМн) - On-Off-Keying (ООК)

*Для цитирования:* Хафаджа А.С., Ильин А.Г. Улучшение и обработка слабых цифровых импульсных сигналов с использованием узкополосной шумовой структуры // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-09)

Original article

**ELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING AND COMMUNICATIONS**

**IMPROVING AND PROCESSING OF WEAK DIGITAL PULSE  
SIGNALS USING A NARROW-BAND NOISE STRUCTURE**

**Ali S. Khafaga<sup>1</sup>, Alexandr G. Ilyin<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,  
Kazan, Russia

<sup>1</sup>[alisalaelect1985@gmail.com](mailto:alisalaelect1985@gmail.com)

<sup>2</sup>[iag29@yandex.ru](mailto:iag29@yandex.ru)

**Abstract.** One of the most important issues at present consists in creating communication systems in the places where such systems are unavailable and economic expediency of such systems creation does not make sense, as is sometimes the case of villages or suburban districts due to the large areas and paucity of the population. It is necessary to find a communication system that can operate at a low energy level due to the these areas dependence on the renewable energy sources such as solar, wind, etc., which imposes restrictions on the information transmission application with a low signal-to-noise ratio. Thus, the authors propose a system that employs pulsed signals in the information transmitting process at low signal-to-noise ratios, to be able to encompass large areas

while maintaining the efficiency of the communication system and retaining the noise immunity value of the pulsed signal. The article demonstrates that due to the use of structural differences between the mixture of useful signal and noise and just narrow-band noise allows significant the reliability increasing of digital signal reception in the region of low signal-to-noise ratios. The possibility of using the refined theory of narrowband interference to increase the receiving device sensitivity when receiving digital signals through the use of phase jumps is being explained by the fact that narrowband interference is the beat signals of two sidebands. Thus, the main purpose of the work consists in studying the possibility of noise immunity increasing of the receiving devices. It concerns the cases of receiving an exactly known radio pulse against a background of noise and interference at low signal-to-noise ratios, while simultaneously increasing the transmission of information by changing the width of the transmitted pulse signals through the use of an additional channel based on a phase detector.

**Keywords:** phase jumps, phase detector, pulse signals, narrow-band noise, signal-to-noise ratios, noise immunity, narrow band signal (NB), On – Off- Keying Modulation (OOK)

**For citation:** Khafaga A.S., Ilyin A.G. Improving and processing of weak digital pulse signals using a narrow-band noise structure. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-09)

## Введение

Стратегия развития многих государств заключается в том, чтобы покрыть большие территории системами связи, а также развивать и привлекать людей для проживания в отдаленных и малонаселенных районах: спрос на землю в отдаленных

районах обычно низок из-за отсутствия поблизости минимально необходимой инфраструктуры. По этой причине страны стараются освоить эти огромные территории и лучше их использовать. Одним из наиболее важных требований в настоящее время является создание систем связи на таких территориях, поскольку это обусловлено жизненной необходимостью. Поскольку большинство людей, живущих в этих районах, бедны и не имеют средств для установки передовых систем связи, таких как системы спутниковой связи или башни связи, как в городах, с их недостаточной экономической целесообразностью, по этой причине возникает очень важный вопрос, что будет представлять собой система связи, которая может обеспечить все потребности в этих областях? Важнейшие требования к таким системам связи следующие:

1. Низкая стоимость для отправителя и получателя.
2. Система должна работать с низким отношением сигнал/шум.
3. Охват больших площадей, превышающий таковой у существующих систем.
4. Удовлетворительный объем передаваемой и принимаемой информации, покрывающий потребности этих направлений, особенно при использовании методов автоматизированного управления сельским хозяйством. [1-9]

Существуют системы импульсной связи (ООК), отличающиеся простотой конструкции и дешевизной. Однако одним из самых больших недостатков этих систем является то, что они не работают при низком отношении сигнал/шум, а объем передаваемых данных невелик по сравнению с другими системами. В результате слабые сигналы не могут быть обработаны в этой системе. В данной

работе предлагается способ, позволяющий в значительной степени устранить этот недостаток. Предлагаемая в соответствии с указанным способом система приема сигналов отличается простотой и может работать в соответствии со всеми требованиями, которые были упомянуты ранее, и может использоваться в качестве базовой системы для решения задач дальней связи со слабым отношением сигнал/шум при хорошей скорости передачи данных. [10-15]

В системе связи (ООК), показанной на рисунке 1а, информация преобразуется в последовательность импульсов и передается по междугородному каналу. Следовательно, на этот сигнал будет влиять шум, и соотношение сигнал/шум будет уменьшаться при увеличении расстояния передачи, пока не будет достигнуто единичное значение. Поэтому извлечение сигнала с помощью детектора импульсов представляет собой сложную задачу. Работа детектора импульсов становится неудовлетворительной при низких уровнях отношения сигнал/шум, как показано на рисунке 1б, за счет увеличения количества ложных срабатываний при поступлении сигнала на выход детектора импульсов.

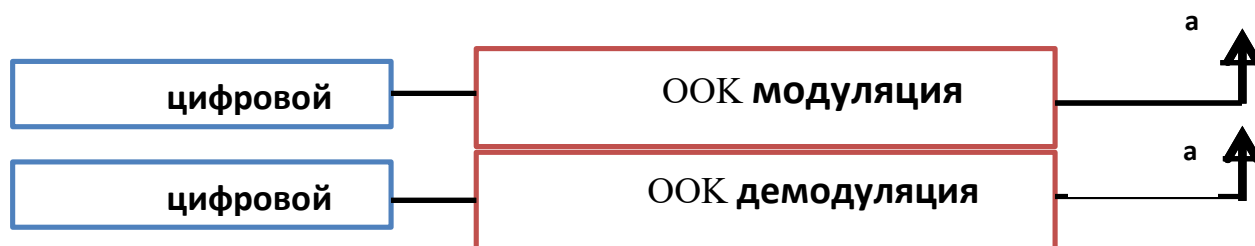


Рис. 1а. Система связи (ООК).

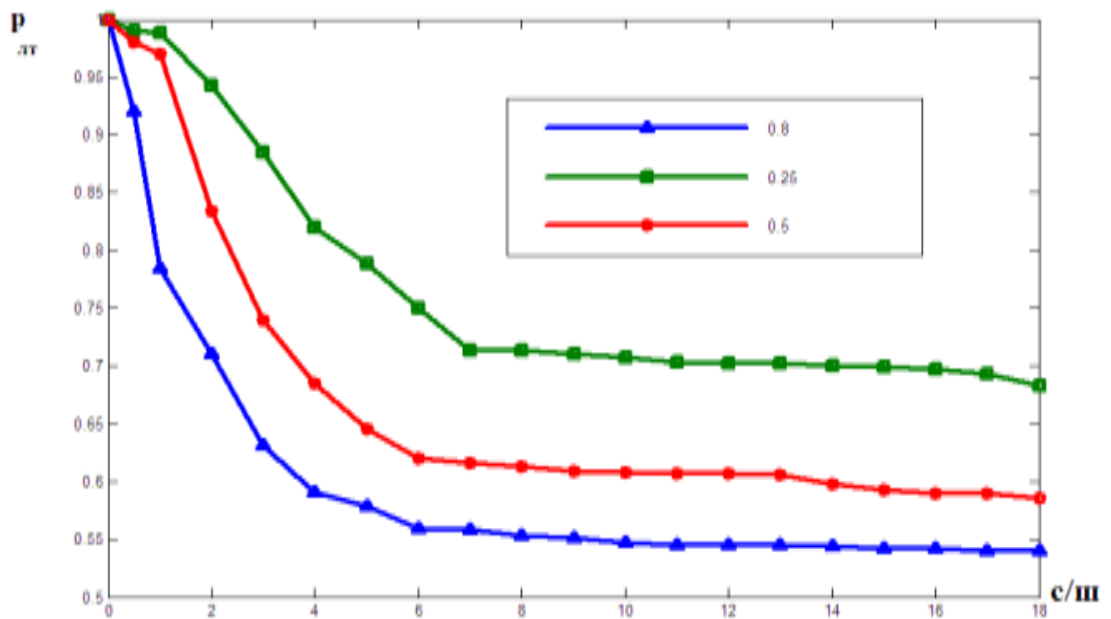


Рис16. Зависимость вероятности ложной тревоги от отношения сигнал/шум.

Следует отметить, что большинство исследователей, как следует из научных источников, отмечают затруднения в задачах приема импульсных сигналов при низких отношениях сигнал/шум, по сути, исчерпав все пути совершенствования этих систем. Тем не менее, необходимо отметить, что, когда отношение сигнал/шум низкое (в интервале 0-3), узкополосный шум обладает свойствами, которые мы можем использовать для уменьшения ложных срабатываний.

Здесь мы присоединяемся к мнению исследователей (Слепяна Д., Ильина А.Г., Ильина Г.Г.) [17], которое можно резюмировать следующим образом: согласно теореме Слепяна Д. [17], при наличии различий в спектрах шума и смеси сигнала и шума, можно повысить помехозащищенность приемных устройств до обнаружения сигнала на фоне помех.

Как ранее показал А.Г. Ильин [1] основная идея повышения помехозащищенности приемного устройства в области малых отношений сигнал/шум заключается в использовании дополнительного приемного канала с преобразователем фазы. Благодаря преобразователю фазы, структурные различия в смеси полезного сигнала и узкополосного шума и просто узкополосного шума преобразуются в спектральные различия. По спектральным различиям с определенной долей вероятности можно сделать вывод, что на входе приемника присутствует только шум.

Но в отличие от приема одиночного радиоимпульса, при приеме пачки радиоимпульсов с малой скважностью целесообразнее использовать фазовый детектор вместо преобразователя фазы. При этом на выходе фазового детектора будут происходить резкие изменения напряжения, соответствующие изменению фазы на 180 градусов. Таким образом, наличие одного или нескольких импульсов на выходе фазового детектора в интервале детектирования косвенно свидетельствует об отсутствии одноуровневого сигнала.

Мы обратимся к характеристикам узкополосного шума, чтобы иметь возможность предложить модель для будущего улучшения и увеличения передачи информации на низких уровнях отношения сигнал/шум.

Количество скачков фазы в единицу времени определяется полосой пропускания линейного фильтра. Существование фазовых скачков может быть полезно для вычисления точки перехода от узкополосного к широкополосному шуму. Квазигармоническое колебание можно рассматривать как сигнал на выходе узкополосного линейного фильтра, в случае, если вход подвергается воздействию



широкополосных колебаний с нормальным законом распределения с нулевым средним значением [16]. Изменение фазы высокочастотного заполнения квазигармонического колебания на 180 градусов происходит при прохождении огибающей сигнала через 0. Поэтому, согласно теории биений, нетрудно доказать наличие скачков фазы при прохождении через нуль в узкополосном шуме. Таким образом, количество скачков фазы при пропускании шума через узкополосный фильтр можно рассчитать с помощью полосы пропускания [1]. Из [16] известны все условия для расчета перехода от узкополосного процесса к широкополосному. Таким образом, применяя систему с узкополосным фильтром и с детектором фазы, можно добиться наблюдения скачков фазы высокочастотных колебаний:

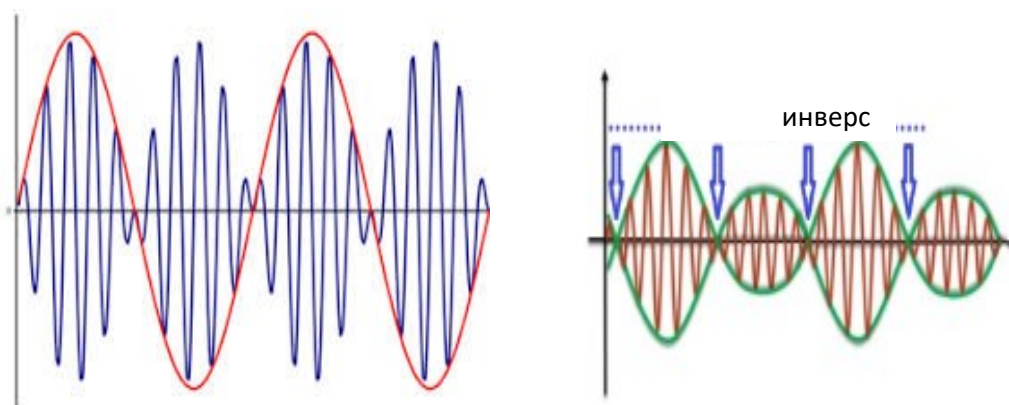


Рис. 2. Фазовые инверсии.

$$\xi(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \gamma(t)), \quad (1)$$

$$C(t) = C_0 + C_0(t), \quad (2)$$

$$A_+(t_k) = C(t_k), \quad (3)$$

Выражение (1) есть квазигармоническое колебание, (2) – огибающая сигнала

$\xi(t)$ ,  $t_k$  – моменты времени, соответствующие пикам сигнала (1),  $A_+(t_k)$  – в общем случае знакопеременная функция «модулирующая» высокочастотные колебания (на рис.2 справа обозначена красной кривой) в моменты  $t_k$ .

Если  $C(t) > 0$ , то  $A_+(t_k) > 0$  и квазигармоническое колебание имеет форму амплитудно-модулированного колебания, то спектр квазигармонического колебания будет состоять из несущего колебания и двух боковых составляющих.

Если  $C(t)$  — знакопеременная функция, то  $A_+(t_k)$  принимает как положительные так и отрицательные значения и огибающая пересекает нулевую линию. Фаза несущей волны изменяется на  $\pi$ . При обратном переходе фаза несущей восстанавливается до исходного значения.

## 2. Исследование прохождения радиоимпульса в канале с широкополосными помехами через фазовый детектор.

В этой главе при анализе статистических характеристик сигналов, прошедших нелинейные преобразования, будут рассматриваться нелинейные фазовые преобразования в условиях узкополосного шума, также будут выявлены некоторых свойства изменения структуры шума при его поступлении на приемник. Узкополосный шум занимает важное место в теории приемных устройств систем

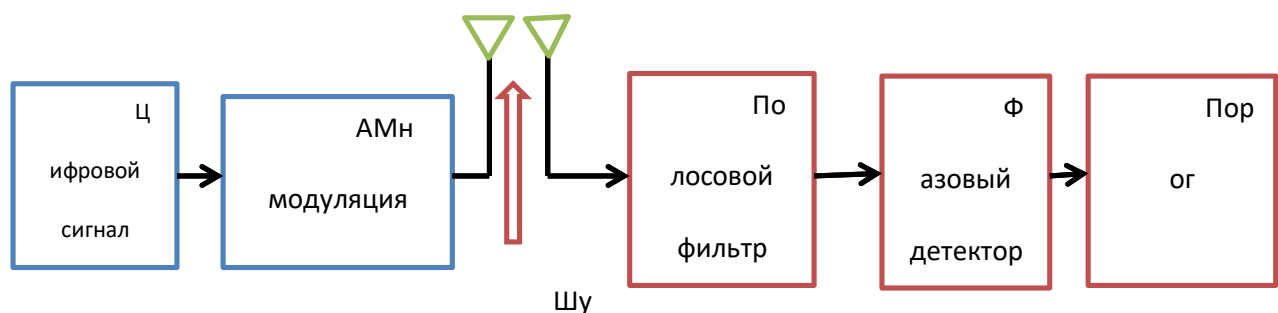


Рис. 3. Канальная схема фазового детектора

различного назначения, поэтому изучению влияния нормальных шумов на такие системы уделяется большое внимание.

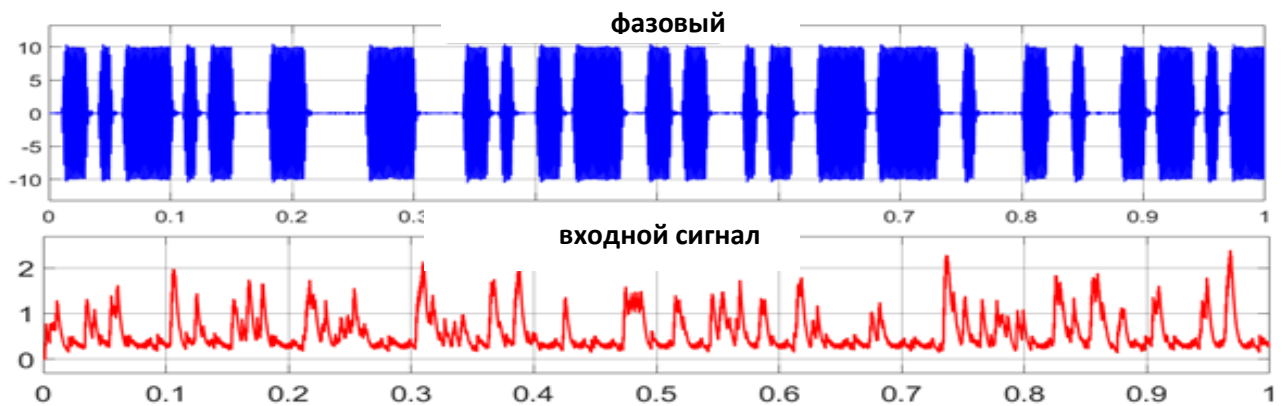


Рис 4. Входной и выходной сигнал фазового детектора

Из графиков выше видно, что каждый приход пачки импульсов приводит к стабилизации напряжения на выходе фазового детектора. Причем, как видно из приведенных выше осциллограмм, амплитуда самих импульсов значительно превышает амплитуду узкополосного шума. В промежутках между пачками радиоимпульсов, т. е. когда на выходе линейного тракта приемника присутствуют только узкополосные помехи, наблюдаются резкие скачки выходного напряжения фазового детектора. Скачки напряжения, скорее всего, соответствуют скачкам

фазы высокочастотной составляющей узкополосного шума. Мы можем наблюдать из графиков, что резкие скачки напряжения возникают при малой энергии узкополосного шума.

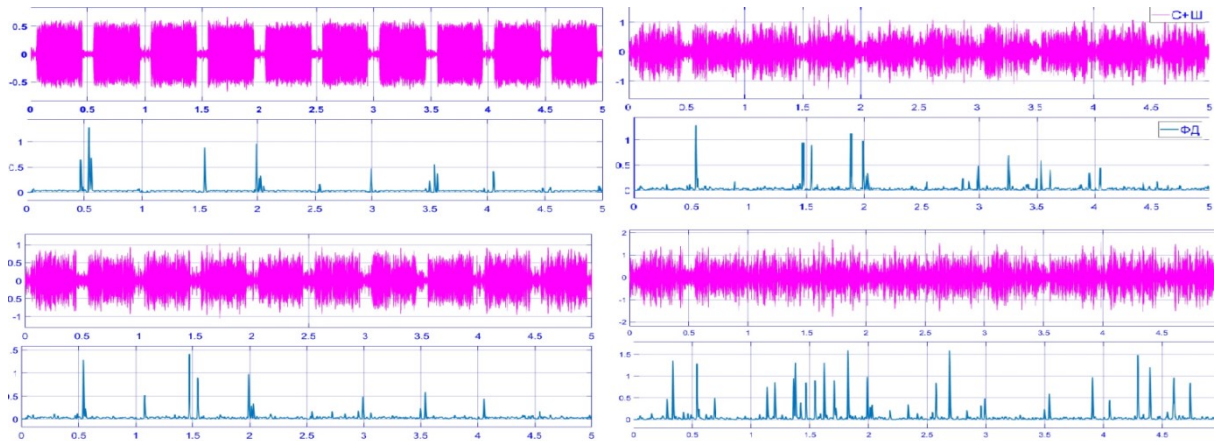


Рис.5 Выходные сигналы, полученные в ходе исследования прохождения смеси пачки видеоимпульсов и узкополосного шума через фазовый детектор.

#### Изменение отношения сигнал/шум.

Делаем вывод, что можно воспользоваться особенностью узкополосного шума на выходе фазового детектора и с его помощью сконструировать приемник сигналов (АМн), способный подавлять шумовые области, в которых происходит изменение фазы, а также можно повысить скорость передачи информации. С

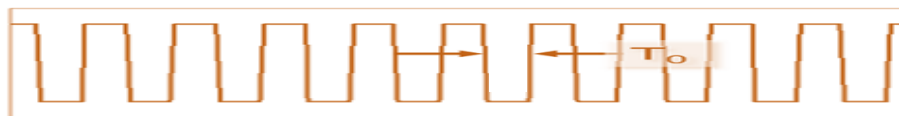


Рис. 6. Серия импульсов (ООК).

целью повышения скорости передачи данных необходимо подобрать минимальную длительность импульсов  $\tau$ , при которой в любом промежутке между двумя импульсами происходит хотя бы одна инверсия фазы.

По выходу фазового детектора были практически вычислены фазовые скачки для узкополосного шумового сигнала и найдена вероятность минимального периода повторения этих скачков.

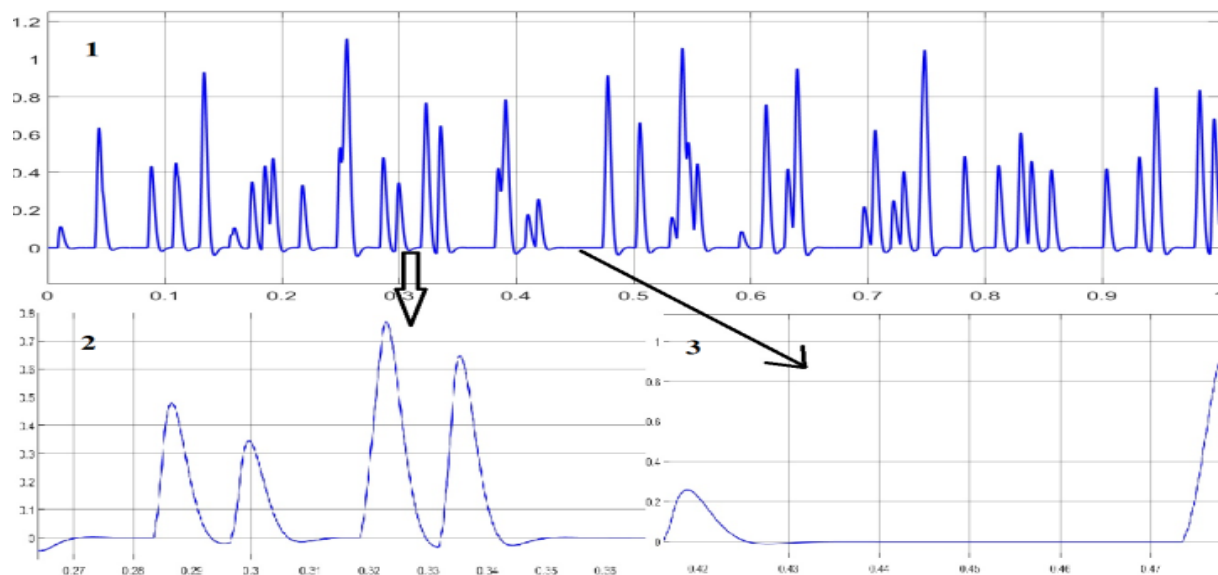


Рис. 7. 1-Результаты: Шум, проходящий через фазовый детектор и фильтр

2-Минимальный период повторения скачков фазы

3-Длительный период без скачков.

Из результатов исследования (рис.6, 7, 8) следует, что при работе в диапазоне частот 433 МГц, наименьший период повторения импульсов равен 0,2мкс., а минимальная длительность интервала  $\tau$  между двумя соседними импульсами, в течение которого наблюдается хотя бы одна инверсия фазы в каждом промежутке между импульсами, равен 0,5 мкс.. Этот интервал можно использовать при проектировании передатчика и приемника в целях повышения скорости передачи данных.

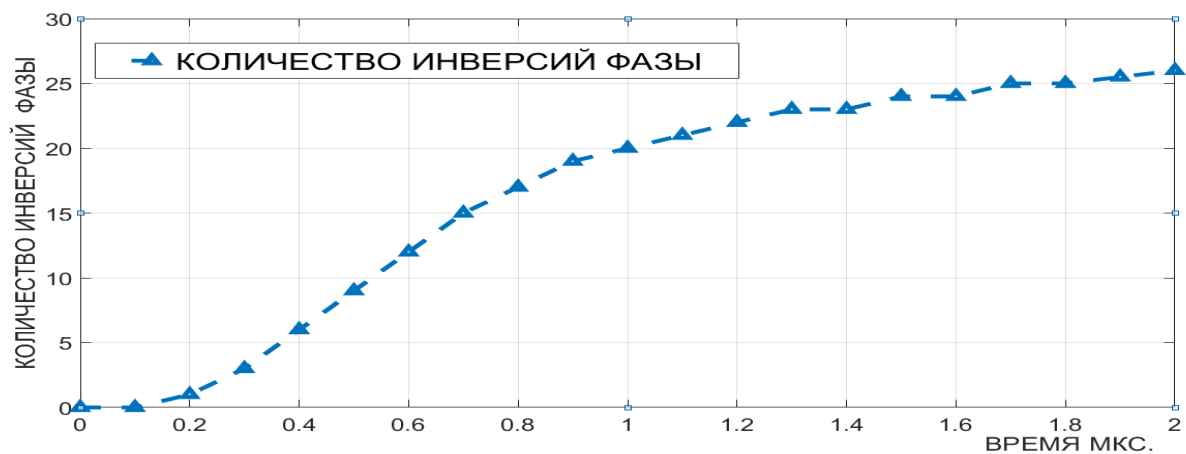


Рис.8. Зависимость количества инверсий от интервала  $\tau$

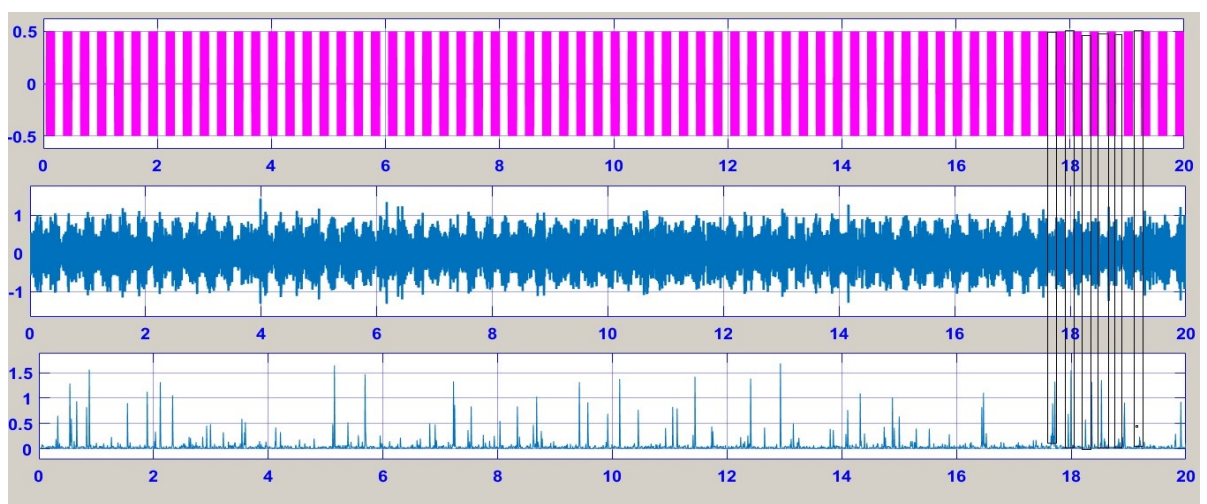


Рис.9. Отправка информации с наименьшим процентом параметра ( $\tau$ ) с одним переходом на бит.

Таким образом, выходное напряжение фазового детектора можно использовать как дополнительный информационный признак при приеме импульсных радиосигналов. При превышении выходным сигналом фазового детектора заданного порогового напряжения решающее устройство с большой долей вероятности выдаст решение о наличии только шума на входе приемного устройства. В этом случае целесообразно было бы заблокировать работу основного канала и тем самым исключить ошибку категории «ложная тревога». Если напряжение на выходе фазового детектора меньше порогового значения, то на входе приемного устройства присутствует смесь полезного сигнала и шума. При этом решение о наличии или отсутствии полезного сигнала может быть принято по превышению порогового напряжения в основном канале с амплитудным детектором.

### 3 - Практическая часть предлагаемой новой системы

Мы показали возможность использования в локальных системах передачи цифровой информации узкополосных приемных систем с дополнительным

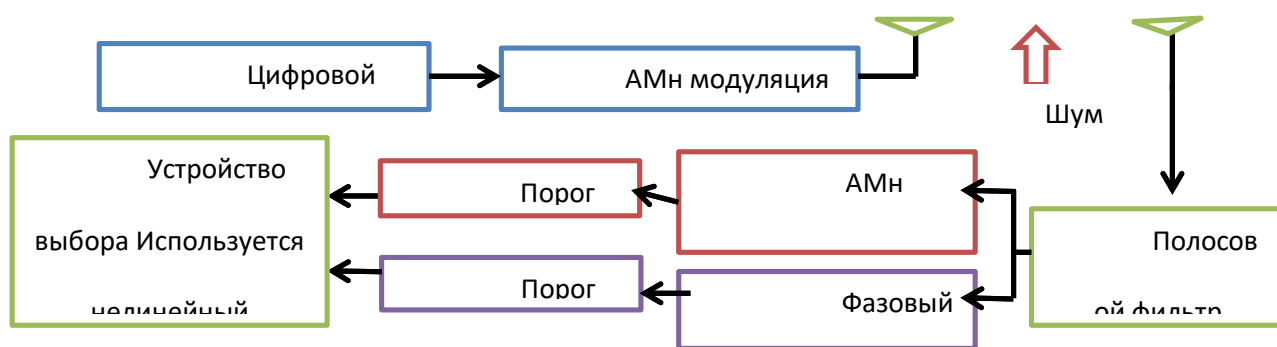


Рис. 10. Структурная схема математической модели

исследования прохождения смеси сигнала и шума через каскады

двухканального приемника

приемным каналом с ограниченной мощностью сигнала на приемном пункте.

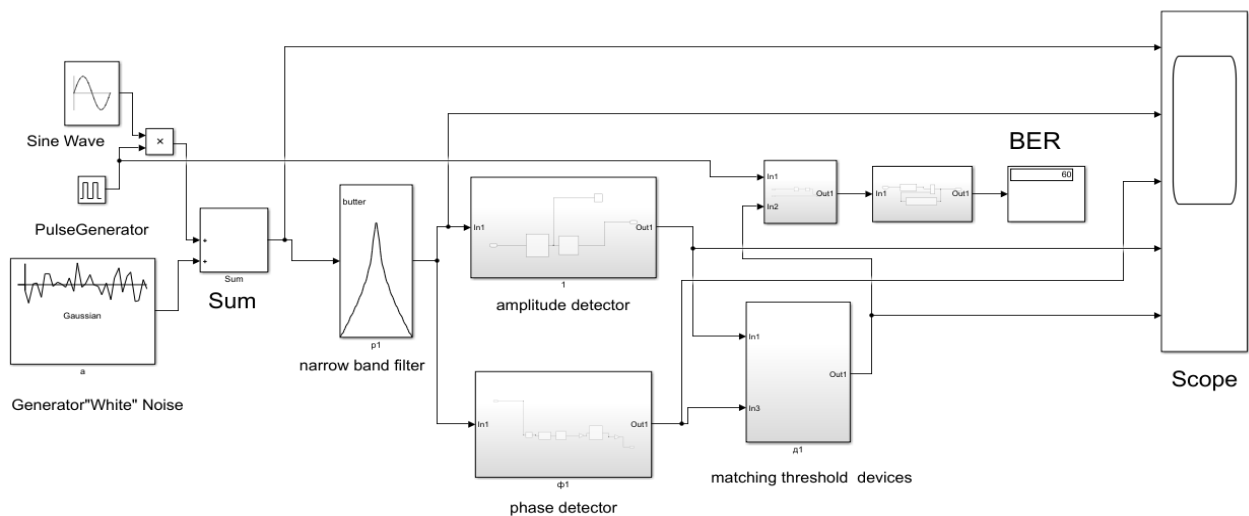


Рис.11 Структурная схема математической модели приемника с дополнительным каналом на основе фазового детектора, реализованная с помощью пакета программ (Simulink MATLAB).

Рассмотрим моделирование прохождения смеси сигнала и шума через каскады двухканального приемника. Для этого была использован пакет программ MATLAB и предложенная система спроектирована через готовые системы в библиотеке MATLAB Simulink. Модель системы передачи и приема информации состоит из генератора импульсных сигналов и генератора белого шума, у которых суммируются выходные сигналы и, получается импульсный сигнал с шумом, как в сигнале, принятом приемником. Первый блок приемника представляет собой практически идеальный узкополосный фильтр с промежуточной частотой, равной частоте передаваемых колебаний. Выходной сигнал с фильтра подается



параллельно на амплитудный и фазовый детекторы, а с выходов обоих детекторов сигналы поступают на ограничитель и далее на нелинейное пороговое устройство.

Алгоритм, реализуемый моделью приемника, достаточно прост: выходное напряжение фазового детектора может быть использовано в качестве дополнительного информационного признака при приеме цифровых радиосигналов. При превышении выходным сигналом фазового детектора заданного порогового напряжения решающее устройство с большой долей вероятности выдаст решение о наличии только шума на входе приемного устройства. В этом случае блокируется работа основного канала и тем самым исключается ошибка категории «ложная тревога». Если напряжение на выходе фазового детектора меньше порогового значения, то на входе приемного устройства присутствует смесь полезного сигнала и шума. При этом решение о наличии или отсутствии полезного сигнала может быть принято по превышению порогового напряжения в основном канале с амплитудным детектором. В состав прибора также входят логические схемы «И», счетчики импульсов, вычислители вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения. Логическая схема «И» получает два сигнала: один непосредственно от генератора радиоимпульсов, а второй от порогового устройства основного канала. В случае совпадения двух сигналов на выходе схемы «И» появляется логическая единица, что свидетельствует о принятии правильного решения. Общее количество импульсов и количество правильно принятых решений подсчитываются соответствующими двоичными счетчиками.

#### 4 - Расчеты модели

При распространении радиоволн на большие расстояния происходит снижение плотности мощности электромагнитного поля. Основным фактором потерь на трассе является уменьшение мощности сигнала с расстоянием. Затухание мощности радиоволн подчиняется обратному квадратичному закону плотности мощности: плотность мощности обратно пропорциональна квадрату расстояния. Каждый раз, когда вы удваиваете расстояние, вы получаете только четверть энергии. Это означает, что увеличение выходной мощности на каждые 6 дБм может удвоить расстояние связи. На рис. 12 показана зависимость максимальных потерь от дистанции распространения волны на частоте 433 МГц.

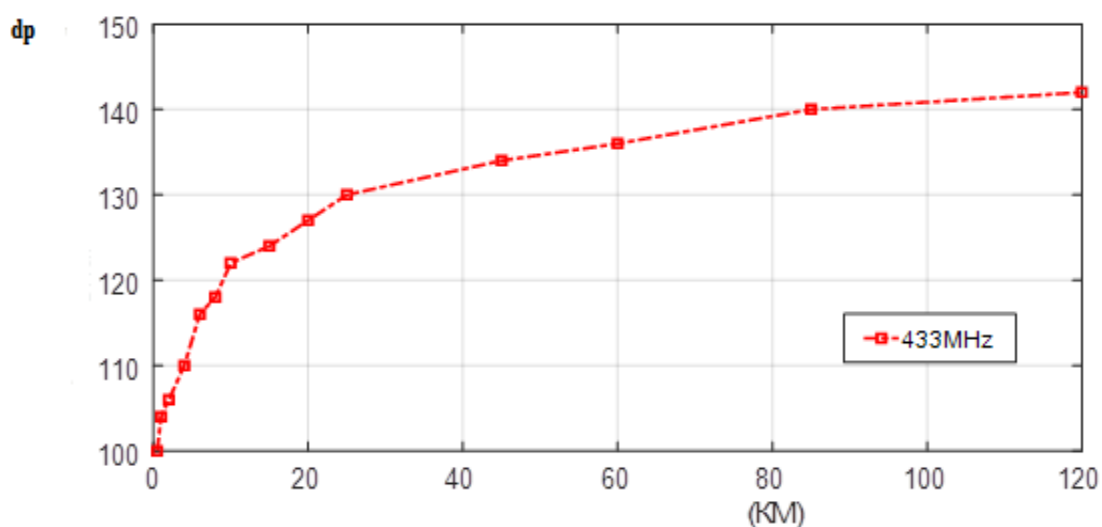


Рис. 12 Зависимость потерь электромагнитной энергии от дистанции распространения на частоте 433 МГц.

Энергопотребление устройств с частотой 433 МГц также относительно низкое и сравнимо с энергопотреблением устройств, работающих на других

частотах. Это делает частоту 433 МГц также подходящей для устройств с батарейным питанием, таких как беспроводная связь дальнего действия.

Проведем расчет максимально возможных потерь при распространении радиоволн, при которых еще возможна работа приемного устройства. Рассчитаем сначала чувствительности одноканального приемника и предлагаемого нами двухканального приемника по стандартным и полученным в ходе исследования данным.

Чувствительность приемника=мощность шума + минимальное отношение сигнал/шум:

$$\text{Чувствительность одноканального приемника} = -115+12=-103\text{дБл};$$

$$\text{Чувствительность двухканального приемника} = -115+1.8=-113.2\text{дБл}.$$

Максимально разрешаемые потери на пути распространения=мощность передачи – чувствительность приемника:

$$\text{Потери для одноканального приемника} = 20-(-103.2)=123.2\text{дБл};$$

$$\text{Потери для двухканального приемника} = 20-(-113.2)=133.2\text{дБл}.$$

Таким образом, видно, что предлагаемая система имеет преимущество, заключающееся в том, что максимально возможные потери при распространении радиоволн, при которых еще возможна работа предлагаемой системы на 10дБл больше, чем потери для одноканального устройства, что приводит к увеличению зоны охвата радиосвязью при использовании рассмотренного в данной статье устройства при сохранении качества передачи данных.

## 5. Заключение

Результаты исследования узкополосных приемных систем с дополнительным приемным каналом показали возможность их использования в локальных системах передачи цифровой информации с ограниченной мощностью сигнала на приемные устройства.

Нелинейный фазовый детектор в дополнительном канале приемника, позволяет использовать структурные различия в сигнале, шуме и шумовой смеси для принятия более достоверного решения о наличии или отсутствии полезного сигнала на входе приемника.

Как показали результаты математического моделирования, использование дополнительного канала с преобразователем фазы на основе фазового детектора позволяет снизить вероятность ложных срабатываний по сравнению с одноканальным приемным устройством.

Предложенная система продемонстрировала гибкость при увеличении полосы пропускания за счет уменьшения длительности импульса  $\tau$  и сохранения помехозащищенности по сравнению с одноканальным амплитудным детектором.

Из результатов работы видно, что мы можем обрабатывать сигналы и передавать изображения и цифровые данные на расстояния большие, чем системы с одноканальным амплитудным детектором.

### Список источников

1. Ильин А.Г. Повышение помехоустойчивости и пропускной способности радиотехнических и оптоэлектронных систем на базе амплитудно-фазового

преобразования сигнала и шумов. - Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н.Туполева, 2005. - 192 с.

2. Ильин А.Г., Хафаджа А.С. Исследование прохождения смеси радиоимпульса и узкополосного шума через фазовый детектор // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162663>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-16)

3. Агеев Ф.И., Вознюк В.В., Худик М.Ю. Повышение помехоустойчивости систем передачи данных фазоманипулированными шумоподобными сигналами в условиях действия помех с различной спектральной структурой на основе целенаправленной модификации спектра сигнала // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158242>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-08)

4. Ilyin A.G., Khafaga A.S.M., Yunusova V. Modeling the Narrowband and Wideband Noise at the Output of Nonlinear Converters // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021. DOI:[10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064)

5. Кузнецов В.С., Волков А.С., Солодков А.В., Сорока В.Г. Моделирование шумоподобной системы связи на основе ансамблей симплексных кодов // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115131>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-9](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-9)

6. Попов А.А. Обнаружение детерминированного сигнала на фоне помехи в пространстве сигналов со свойствами решетки // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2012. Т. 10. № 2. С. 65-71.

7. Миддлтон Д. Об обнаружении стохастических сигналов в аддитивном нормальном шуме // IRE Transactions on Information Theory, 1957, vol. 3 (2), pp. 86-121.
8. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
9. Волков А.С., Солодков А.В., Суслова К.О., Стрельников А.П. Прототипирование помехоустойчивых кодов в системах связи с кодовым разделением каналов // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159789>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-11)
10. Казак П.Г., Шевцов В.А. Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)
11. Борисов В.И. Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. - М.: РадиоСофт, 2008. - 260 с.
12. 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>
13. Голубев В.Н., Зимогляд В.Г. Оценка помехозащищенности главного тракта радиоприемника на основе использования функции распределения вероятностей уровней одиночных помех // Радиотехника. 1986. № 10. С. 2205-2208.
14. Захаров С.И., Корато В.А. Обнаружение гармонического сигнала на фоне стационарной гауссовской помехи с неизвестными параметрами по критерию

максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. 1985. № 3. С. 504-512.

15. Еркин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель В.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62221>

16. Добрушин Р.Л. Одна статистическая задача теории обнаружения сигнала на фоне шума в многоканальной системе, приводящая к устойчивым законам распределения // Теория вероятностей и ее применения. 1958. Т. 3. № 2. С. 173-185.

17. Крутов А. Сверхширокополосная связь UWB. Ч. 1. Технология UWB: принципы функционирования, история развития, отличительные особенности // Беспроводные технологии. 2007. № 1 (6). С. 6-9.

18. Slepian D. Some comments on the detection of Gaussian signals in Gaussian noise // IRE Transactions on Information Theory, 1958, vol. 4 (2), pp. 65-68. DOI:[10.1109/TIT.1958.1057443](https://doi.org/10.1109/TIT.1958.1057443)

19. Ильин А.Г., Хафаджа А.С. Моделирование узкополосных шумов на выходе фазового детектора // XXV Туполевские чтения (Казань, 10-11 ноября 2021): материалы конференции. – Казань: Изд-во «Сагиев», 2021.

20. Kamenskiy A.V. High-speed recursive-separable image processing filters // Computer Optics, 2022, no. 46 (4), pp. 659-665. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1063](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1063)

## References

1. Il'in A.G. *Povyshenie pomekhoustoichivosti i propusknoi sposobnosti radiotekhnicheskikh i optoelektronnykh sistem na baze amplitudno-fazovogo*

*preobrazovaniya signala i shumov* (Increase of noise immunity and transmission capacity of radio engineering and optoelectronic systems based on amplitude-phase transformation of signal and noise), Kazan', Izd-vo KGTU im. A.N.Tupoleva, 2005, 192 p.

2. Il'in A.G., Khafadzha A.S. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162663>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-16)

3. Ageev F.I., Voznyuk V.V., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158242>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-08)

4. Ilyin A.G., Khafaga A.S.M., Yunusova V. Modeling the Narrowband and Wideband Noise at the Output of Nonlinear Converters, *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2021. DOI:[10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416064)

5. Kuznetsov V.S., Volkov A.S., Solodkov A.V., Soroka V.G. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115131>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-9](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-9)

6. Popov A.A. *Visnik Derzhavnogo universitetu informatsiino-komunikatsiinikh tekhnologii*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 65-71.\

7. Middleton D. Ob obnaruzhenii stokhasticheskikh signalov v additivnom normal'nom shume, *IRE Transactions on Information Theory*, 1957, vol. 3 (2), pp. 86-121.

8. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* (Communication systems with noise-like signals), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 384 p.

9. Volkov A.S., Solodkov A.V., Suslova K.O., Strel'nikov A.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159789>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-11)

10. Kazak P.G., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)



11. Borisov V.I. Zinchuk V.M. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi. Veroyatnostno-vremennoi podkhod* (Interference immunity of radio communication systems. Probability-time approach), Moscow, RadioSoft, 2008, 260 p.
12. Zvonarev V.V., Popov A.S., Khudik M.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104213>
13. Golubev V.N., Zimoglyad V.G. *Radiotekhnika*, 1986, no. 10, pp. 2205-2208.
14. Zakharov S.I., Korado V.A. *Radiotekhnika i elektronika*, 1985, no. 3, pp. 504-512.
15. Erkin F.B., Vazhenin N.A., Veitsel' V.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62221>
16. Dobrushin R.L. *Teoriya veroyatnostei i ee primeneniya*, 1958, vol. 3, no. 2, pp. 173-185.
17. Krutov A. *Besprovodnye tekhnologii*, 2007, no. 1 (6), pp. 6-9.
18. Slepian D. Some comments on the detection of Gaussian signals in Gaussian noise, *IRE Transactions on Information Theory*, 1958, vol. 4 (2), pp. 65-68. DOI: [10.1109/TIT.1958.1057443](https://doi.org/10.1109/TIT.1958.1057443)
19. Il'in A.G., Khafadzha A.S. *XXV Tupolevskie chteniya: materialy konferentsii*, Kazan', Izd-vo «Sagiev», 2021.
20. Kamenskiy A.V. High-speed recursive-separable image processing filters, *Computer Optics*, 2022, no. 46 (4), pp. 659-665. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1063](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1063)

Статья поступила в редакцию 30.10.2022

Статья после доработки 03.11.2022

Одобрена после рецензирования 24.11.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 30.10.2022; approved after reviewing on 24.11.2022;  
accepted for publication on 26.12.2022