

Обзорная статья
УДК 621.396.62
DOI: [10.34759/trd-2023-129-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-18)

ОЦЕНКА УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ СИГНАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА С СУБДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ

Алексей Сергеевич Подстригаев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, Россия
ap0d@ya.ru

Аннотация. Для исследованного ранее многоканального приемника с субдискретизацией определяется максимальный уровень сложности сигнальной обстановки, при котором возможно его применение. Для этого путем моделирования оценивается количество импульсов, одновременно обрабатываемых с заданным качеством. Критерием качества является вероятность правильной классификации, не превышающая величину 0,8. Для этого вероятность аномальной ошибки определения частотно-временных параметров импульса должна быть не более 0,1. Численный эксперимент показал, что это условие выполняется при количестве наложенных во времени импульсов не более 4...5 (в зависимости от параметров приемника). Расчетным путем показана возможность передачи потока дескрипторов импульсов по интерфейсу 10GE, считая, что в каждом окне анализа формируются дескрипторы пяти

импульсов. Запас пропускной способности канала передачи данных составляет более, чем 6 раз. Результаты могут использоваться для обоснования состава средств широкополосного анализа в зависимости от ожидаемого уровня сложности, выбора параметров многоканального приемника с субдискретизацией и прогнозирования появления в нем аномальных ошибок определения частотно-временных параметров импульсов.

Ключевые слова: приемник с субдискретизацией, субдискретизация, широкополосный приемник, цифровой приемник, частотно-временные параметры, software-defined radio, программно-определяемый приемник, 10-гигабитный Ethernet, дескриптор импульса

Для цитирования: Подстригаев А.С. Оценка уровня сложности сигнальной обстановки для использования многоканального приемника с субдискретизацией // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-18)

Review article

ASSESSMENT OF THE COMPLEXITY LEVEL OF THE SIGNAL ENVIRONMENT FOR THE USE OF A MULTICHANNEL SUB-NYQUIST RECEIVER

Alexey S. Podstrigaev

Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,

Saint Petersburg, Russia

ap0d@ya.ru

Abstract. The modern cognitive radio systems and the spectrum monitoring devices used in spectrum management must perform wideband signal analysis. One of the ways to achieve a wide instantaneous analysis band is to use a multichannel sub-Nyquist receiver. Such a device receives signals from the many Nyquist zones and analyzes their aliases in the first zone. It can disambiguate frequency measurements by aggregating information from several independent channels having different sampling frequencies.

Previously, the author studied errors in determining the time-frequency parameters of pulses time-overlapped in the sub-Nyquist receiver prototype. These studies have shown that this receiver can be used in a complex signal environment. At the same time, the assessment of the maximum level of the signal environment complexity, at which it is possible to use a sub-Nyquist receiver, has yet to be previously performed. This estimation is carried out in the present work by determining the number of pulses simultaneously processed with a given quality.

As a quality criterion, we assume the probability of correct classification should be no worse than 0.8. For this, the abnormal error probability in determining the time-frequency parameters of the pulse should be no more than 0.1. A numerical experiment showed that this condition is satisfied when the number of pulses overlapped in time is not more than 4...5 (depending on the parameters of the receiver).

The calculation shows the possibility of transmitting a stream of pulse descriptor words over the 10GE interface, assuming that five pulse descriptor words are formed in each analysis window (the worst situation). The bandwidth of the transmission channel is more than six times.

In accordance with the previously considered classification of the signal environment, the receiver under study can be used in a signal environment of the third level of complexity and lower.

The results can be used to substantiate the composition of wideband analysis tools depending on the expected complexity level, select the parameters of a multichannel sub-Nyquist receiver, and predict the appearance of abnormal errors in determining the time-frequency parameters of pulses in the receiver.

Keywords: sub-Nyquist receiver, undersampling receiver, undersampling, wideband receiver, digital receiver, time-frequency parameters, software-defined radio, software-defined receiver, 10 Gigabit Ethernet, pulse descriptor word

For citation: Alexey S. Podstrigaev. Assessment of the complexity level of the signal environment for the use of a multichannel sub-Nyquist receiver. *Trudy MAI*, 2023, no. 129.

DOI: [10.34759/trd-2023-129-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-18)

Введение

Непрерывное совершенствование и увеличение количества радиоэлектронных средств усложняет сигнально-помеховую обстановку [1–10]. Существенный вклад в этот процесс вносит, прежде всего, развитие средств радиолокации [11–14] и связи [15–20]. В свою очередь, для организации динамического доступа к свободным участкам спектра в когнитивных радиосистемах [21–24] и оценки правомерности использования радиочастотного спектра средствами радиомониторинга (радиоконтроля) [25–28] развиваются средства широкополосного анализа.

В ряде работ [29, 21] было показано, что для этих средств может использоваться многоканальный приемник с субдискретизацией (МПСД), различные варианты исполнения которого описаны в [30–35]. Однако, в таком приемнике возможно возникновение неоднозначности определения частоты [36], которая при неверном разрешении приводит к аномальным ошибкам [37], характерным для средств широкополосного анализа в целом [37]. Учитывая сложность технической реализации, в [39] для МПСД предложены схема и методика проектирования, а в [40] подробно описаны особенности двухэтапного обнаружения сигнала.

На основе результатов теоретических исследований [39, 40] разработан макет МПСД. В [41] для него исследована точность определения частотно-временных параметров (ЧВП) импульса в условиях подачи на вход приемника только одного импульсного сигнала, а в [42] – множества наложенных во времени импульсов. Эти исследования показали, что МПСД потенциально может использоваться в сложной сигнальной обстановке (СО).

В то же время, оценка максимального уровня сложности СО, при котором возможно применение МПСД, ранее не выполнялась. Эту оценку можно выполнить, определив количество импульсов, одновременно обрабатываемых с заданным качеством.

Цель работы – определение максимального уровня сложности СО, при котором возможно применение МПСД, на основе оценки количества импульсов, одновременно обрабатываемых с заданным качеством.

Обоснование критерия качества обработки

Необходимое качество обработки наложенных во времени импульсов для МПСД может быть задано, например, исходя из вероятности P_M наложения M и более импульсов от однотипных источников радиоизлучения [8, 10]. Искомую вероятность определим из следующих соображений.

На практике в средствах радиолокации и радиомониторинга задаются вероятностью правильного распознавания источника радиоизлучения $P_{\text{расп}} \geq 0,8 \dots 0,9$ [43–46]. Одним из основных этапов процесса распознавания является определение периода повторения импульсов принимаемого сигнала [47]. Далее полагаем, что ошибка определения периода повторения импульсов вносит наибольший вклад в ошибку распознавания, а остальными ошибками за малостью можно пренебречь. Соответственно, вероятность правильного распознавания приблизительно равна вероятности правильного определения периода $P_{\text{пер}}$, т.е.

$$P_{\text{расп}} \approx P_{\text{пер}}.$$

Очевидно, что для верного определения периода импульсной последовательности требуется правильное определение параметров импульсов, исключаящее возникновение аномальных ошибок. Так как такие ошибки ухудшают эффективность выявления периодичности, их появление по своему влиянию на результаты работы алгоритма определения периода повторения импульсов эквивалентно пропускам импульсов. В то же время, влияние пропуска импульсов на вероятность правильного определения периода повторения импульсов для различных алгоритмов подробно исследовано в [48] (рис. 1).

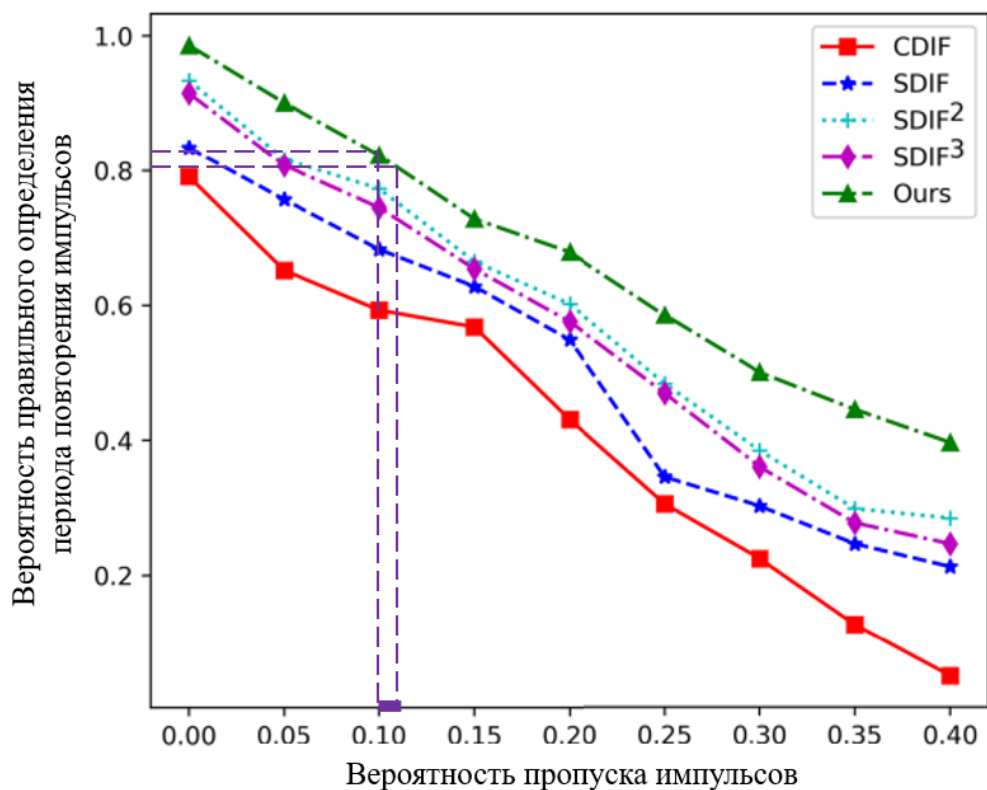


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного определения периода повторения импульсов от вероятности пропуска импульсов для различных вариантов алгоритма определения периода повторения импульсов [48]

Из результатов исследования [48] следует, что для вероятности $P_{\text{пер}} \geq 0,8$ требуется, чтобы вероятность пропуска импульсов, а значит, и вероятность аномальной ошибки измерения ЧВП, была не более 0,1 (с некоторым запасом). Полагаем, что аномальные ошибки возникают в условиях наложения M и более импульсов во времени. Тогда необходимо оценить максимальное количество импульсов M , при котором вероятность их наложения $P_M \leq 0,1$.

Определение максимального количества импульсов, одновременно обрабатываемых с заданным качеством

В [42] проведен эксперимент по обработке наложенных во времени импульсов для МПСД со следующими параметрами: минимальная частота дискретизации среди

каналов МПСД $F_{s \min} = 2,42$ ГГц, количество точек БПФ $N_{\text{БПФ}} = 1024$. Результаты эксперимента показали, что для принятых сигналов существуют полосы взаимного воздействия $\Delta F_{\text{ВВ}}$, при попадании в которые возникают аномальные ошибки. Для исключения аномальных ошибок определения ЧВП импульсов в МПСД должно обеспечиваться разнесение между свернутыми частотами в первой зоне Найквиста не менее, чем на 43 МГц.

Соответственно, максимально допустимое количество одновременно обрабатываемых импульсов M можно определить по величине вероятности P_M , которая в данном случае определяется, как вероятность попадания свернутых частот в полосы взаимного воздействия $\Delta F_{\text{ВВ}} = 43$ МГц. Для этого выполнено моделирование в среде MATLAB.

На рис. 2 показан график зависимости вероятности P_M попадания свернутых частот в полосы взаимного воздействия $\Delta F_{\text{ВВ}}$ от количества свернутых частот M при $\Delta F_{\text{ВВ}} = 43$ МГц и различных значениях $F_{s \min}$ и $N_{\text{БПФ}}$. Штриховой линией выделена кривая с параметрами $F_{s \min} = 2420$ МГц и $N_{\text{БПФ}} = 1024$, соответствующая приемнику, экспериментально исследованному в [42]. Максимально допустимое значение вероятности $P_{M \max} = 0,1$ отмечено на рис. 2 пунктирной линией.

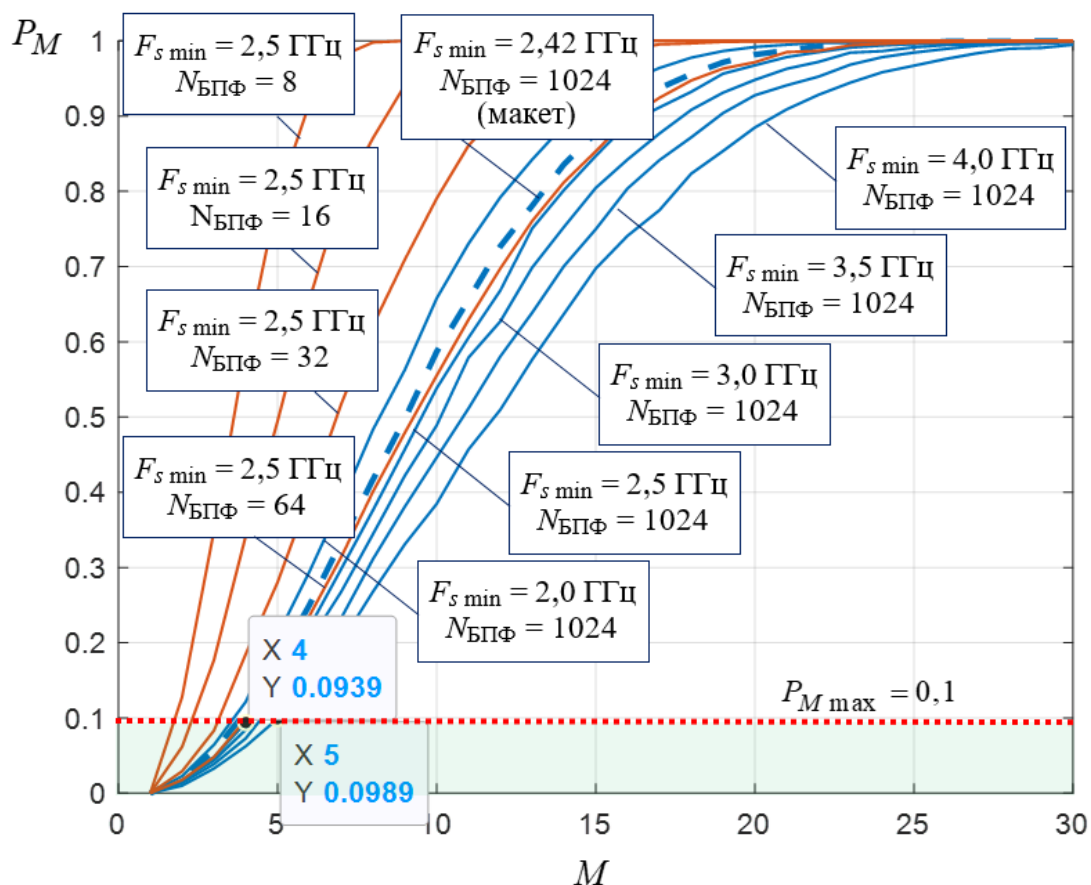


Рис. 2. Зависимость вероятности попадания свернутых частот в полосы взаимного воздействия от количества свернутых частот

Показано, что при $N_{\text{БПФ}} = 1024$ вероятность $P_{M \max}$ не превышает для $M \leq 4$ при $F_{s \min} \geq 2,5$ ГГц, а для $M \leq 5$ при $F_{s \min} \geq 4$ ГГц. Для частоты $F_{s \min} = 2,5$ ГГц показано влияние количества точек БПФ: с уменьшением до $N_{\text{БПФ}} = 64$ график практически не изменяется, однако уже при $N_{\text{БПФ}} = 32$ и ниже величина M при фиксированной вероятности P_M заметно снижается. Этот же эффект сохраняется и для более высоких частот дискретизации.

Таким образом, для вариантов реализации МПСД с $N_{\text{БПФ}} \geq 64$ при $F_{s \min} \geq 2,5$ ГГц и $F_{s \min} \geq 4$ ГГц выполняется обработка соответственно $M \leq 4$ и $M \leq 5$ наложенных импульсов, эффективная по критерию $P_M \leq 0,1$.

Уменьшение $F_{s \min}$ и $N_{\text{БПФ}}$ ниже указанных значений приводит к увеличению вероятности попадания свернутых частот в первую зону Найквиста и, соответственно, в полосы взаимного воздействия. В свою очередь, это ухудшает ошибки определения ЧВП принимаемых импульсов.

Подход к оценке обеспечения требуемой оперативности обработки

Оперативность обработки может быть ограничена пропускной способностью канала передачи дескрипторов импульсов. Причем в наихудшем случае средняя скважность импульсной последовательности $S \rightarrow 1$ и $M = 5$. Тогда в каждом окне анализа формируются дескрипторы пяти импульсов, что соответствует максимально возможному потоку дескрипторов импульсов.

Для того, чтобы оценить возможность обеспечения необходимой пропускной способности канала передачи дескрипторов импульсов, необходимо выполнить расчет максимально возможной скорости передачи дескрипторов для какого-либо канала передачи данных, например, для распространенного канала 10GE (10-гигабитный Ethernet). Затем необходимо оценить требуемую скорость передачи, соответствующую заданной СО ($S \rightarrow 1$ и $M = 5$). В результате сравнения полученных величин можно оценить возможность обеспечения необходимой оперативности обработки в МПСД.

Расчет максимально возможной скорости передачи дескрипторов для канала

10GE

Доступная пользователю полезная пропускная способность интерфейса 10GE составляет чуть менее 10 Гбит/с. Определим число дескрипторов импульсов, которое можно отправить за 1 секунду с учетом такой пропускной способности.

В таблице 1 приведен перечень типовых данных, отправляемых в одном дескрипторе, с указанием размера соответствующих им полей.

Таблица 1

Поле данных	Размер поля, бит
Время прихода	32
Длительность	16
Амплитуда	12
Несущая частота	16
Девиация частоты	16
Флаг непрерывного сигнала	1
Код типа модуляции	3
Служебная информация	8
Всего:	104

Из таблицы 1 видно, что один дескриптор импульса занимает 104 бита или 13 байт. Дескрипторы отправляются по протоколу UDP/IP посылками, упакованными в кадры Ethernet. Каждая посылка содержит несколько дескрипторов. Кадр Ethernet, помимо самих дескрипторов, содержит заголовок Ethernet размером 14 байт, заголовок IP размером 20 байт, заголовок UDP размером 8 байт, заголовок посылки с ее номером и другой служебной информацией, занимающий еще 2 байта, а также контрольную сумму Ethernet-заголовка кадра размером 4 байта. Размер одного кадра Ethernet не должен превышать 1518 байт, следовательно, в нем можно отправить $1518 - (14 + 20 + 8 + 2 + 4) = 1470$ байт полезной информации, что приблизительно соответствует 113 дескрипторам импульсов. Размер одного кадра, таким образом, составляет 1517 байт. Перед отправкой каждого кадра протокол Ethernet требует отправки преамбулы размером 8 байт, а после отправки кадра – межкадрового интервала размером 12 байт.

Таким образом, можно считать, что фактический размер кадра составляет 1537 байт или 12 296 бит. Значит, по данному интерфейсу можно отправить не более $v_{дEth} = 10 \text{ Гбит/с} / 12296 \text{ бит} \times 113 \text{ дескр.} \approx 92 \text{ млн дескр./с.}$

Расчет скорости передачи для заданной СО

Дескриптор формируется по результатам обработки окна анализа, если в этом окне обнаружен задний фронт импульса (или длительность импульса превысила значительное пороговое значение, после которого он считается участком непрерывного). После создания дескриптор сразу добавляется в очередь отправки. Длительность окна анализа в рассмотренном макете составляет $\tau_a = 341,3 \text{ нс}$ [40–42]. Соответственно, количество дескрипторов импульсов, формируемых в СО с параметрами $M = 5$ и $S \rightarrow 1$ в единицу времени, определяется как $v_{дССО} = M/\tau_a \approx 14,7 \text{ млн дескр./с.}$

Полученное значение $v_{дССО}$ позволяет сделать вывод о том, что на практике обеспечивается запас пропускной способности канала передачи дескрипторов импульсов более, чем в 6 раз ($v_{дEth} = 6,26v_{дССО}$). Соответственно, для МПСД обеспечивается необходимый уровень оперативности обработки в заданной СО.

Оценка уровня сложности сигнальной обстановки

В [10] предложена классификация сложности СО по критериям P_M и M :

- уровень 1 (низкая сложность): $P_M < 0,1$ при $M \geq 2$;
- уровень 2 (средняя сложность): $P_M \geq 0,1$ при $2 \leq M \leq 3$;
- уровень 3 (высокая сложность): $P_M \geq 0,1$ при $4 \leq M \leq 5$;

- уровень 4 (очень высокая сложность): $P_M \geq 0,1$ при $M \geq 6$.

Выше показана возможность обработки $M \leq 4$ наложенных во времени импульсов при $N_{\text{БПФ}} \geq 64$ и $F_{s \text{ min}} \geq 2,5$ ГГц, а при увеличении минимальной частоты дискретизации до $F_{s \text{ min}} \geq 4$ ГГц – до $M \leq 5$. Также показано, что при использовании широко распространенного интерфейса 10GE даже в условиях СО с параметрами $S \rightarrow 1$ и $M = 5$ (в каждом окне анализа формируется пять дескрипторов импульсов) отсутствует ограничение пропускной способности канала передачи дескрипторов импульсов. Соответственно, обеспечивается необходимая для описанной СО оперативность обработки без пропусков импульсов и отложенных вычислений.

Таким образом, в соответствии с рассмотренной в [10] классификацией, МПСД может использоваться в СО третьего уровня сложности и ниже.

Заключение

Полученная теоретическая оценка максимального уровня сложности СО, при котором возможно применение МПСД, может использоваться для решения следующих практических задач:

- обоснование состава средств широкополосного анализа в зависимости от ожидаемого уровня сложности СО;
- оптимальный выбор параметров обработки в МПСД ($N_{\text{БПФ}}$ и $F_{s \text{ min}}$) по критерию «эффективность – стоимость»;
- прогнозирование появления аномальных ошибок определения ЧВП импульсов при работе МПСД в условиях превышения заданного уровня сложности

СО.

Представленный в работе расчет требуемой оперативности обработки принятых импульсов может быть использован для аналогичных оценок оперативности работы других средств первичного анализа.

Список источников

1. Подстригаев А.С., Смоляков А.В., Лихачев В.П. Программно-определяемые средства широкополосного анализа сигналов на основе технологии субдискретизации. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. - 184 с.

2. 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>

3. 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>

4. Подстригаев А.С. Анализ ведения радиотехнической разведки в условиях сложной сигнальной обстановки // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. № 1 (10). С. 49-52.

5. Дворников С.В., Конюховский В.С., Симонов А.Н. Способ частотно-пространственной селекции радиоизлучений с помощью триортогональной антенной

системы // Информационно-управляющие системы. 2020. № 1. С. 63-72. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-1-63-72.

6. Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 15-20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.

7. Sviatkina V., Kuptsov V., Davydov V., Rud V. On possibility of using of spectral analysis for control the energy distribution of electromagnetic waves in radar channels // Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. Virtual, Samara, 2020, pp. 9253166. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253166.

8. 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.

9. 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>.

10. Подстригаев А.С., Смоляков А.В., Лихачев В.П. Выбор приемника для широкополосного анализа сигнальной обстановки на основе оценки ее сложности // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 1. С. 143–153. DOI: 10.18127/j00338486-202201-19.

11. Купряшкин И.Ф., Соколик Н.В. Алгоритм обработки сигналов в радиолокационной системе с непрерывным частотно-модулированным излучением в

интересах обнаружения малозаметных воздушных объектов, оценки их дальности и скорости движения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. № 1. С. 39 - 55. URL: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47>.

12. Воробьев Е.Н., Веремьев В.И., Холодняк Д.В. Распознавание винтомоторных летательных аппаратов в пассивной бистатической РЛС // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 75 - 82. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2018-21-6-75-82>.

13. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением: монография. - М.: Радиотехника, 2020. - 280 с.

14. Биусова В.А., Кочетов А.В., Комаров Г.В., Панфилов П.С., Парусов В.А. Автомобильная сверхкороткоимпульсная радиолокационная станция обеспечения безопасности движения и контроля дорожной обстановки // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 9. С. 26-30. DOI: 10.21778/2218-5453-2019-9-26-30.

15. Асадуллин Р.Н. и др. Реализация точек доступа Wi-Fi, интегрированных в имеющиеся элементы городской инфраструктуры // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (7). С. 6-11. DOI: 10.18127/j00338486-201906(7)-02.

16. Ногов О.А. Планирование сеансов при управлении ретрансляцией и связью с использованием МКСП «Луч» // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40269>.

17. 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)

18. Бахтин А.А., Волков А.С., Солодков А.В., Баскаков А.Е. Разработка модели сегмента сети SDN для стандарта 5G // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=122307>. DOI: 10.34759/trd-2021-117-07.

19. Дворников С.В., Дворников С.С., Манаенко С.С., Пшеничников А.В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 87-93.

20. Ивануткин А.Г., Данилин М.А., Пресняков М.Ю. Подход к выбору показателей эффективности связи и радиотехнического обеспечения полетов авиации // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67818>.

21. Axell E., Leus G., Larsson E., Poor H. Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances // IEEE Signal Processing Magazine, 2012, no. 29 (3), pp. 101-116. DOI: [10.1109/msp.2012.2183771](https://doi.org/10.1109/msp.2012.2183771).

22. Aswathy G.P., Gopakumar K. Sub-Nyquist wideband spectrum sensing techniques for cognitive radio: A review and proposed techniques // AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2019, vol. 104, pp. 44-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.03.004>.

23. Бахтин А.А., Волков А.С., Солодков А.В., Свиридов И.А. Система распознавания модуляции сигналов на основе нейронной сети с использованием ПЛИС // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=162660>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-13.

24. Ma Y., Gao Y., Liang Y. C., Cui S. Reliable and efficient sub-Nyquist wideband spectrum sensing in cooperative cognitive radio networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, vol. 34, no. 10, pp. 2750-2762. DOI: [10.1109/JSAC.2016.2605998](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2605998).
25. Кизима С.В. Объекты и средства радиоконтроля. Совместное развитие технологий радиосвязи и радиоконтроля // Электросвязь. 2018. № 11. С. 68-74. URL: <https://radian-m.ru/docs/article/2018ESV11.pdf>.
26. 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>.
27. Лихачев В.П., Семенов В.В., Веселков А.А., Демчук А.А. Обобщенный алгоритм радиотехнического мониторинга РЛС с синтезированной апертурой антенны // XVI Международная научно-методическая конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии»: сборник трудов (Воронеж, 11-12 февраля 2016). - Воронеж: Изд-во Научно-исследовательские публикации, 2016. С. 179-184.
28. Масалкин А.А., Колесник А.В., Проценко П.А. Методика планирования применения средств системы спутникового радиоконтроля // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105700>.
29. Rashidi M., Haghighi K., Owrang A., Viberg M. A wideband spectrum sensing method for cognitive radio using sub-Nyquist sampling // 2011 Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting (DSP/SPE), IEEE, 2011, pp. 30-35. DOI: 10.1109/DSP-SPE.2011.5739182.

30. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of real signals. Patent US 5099194 A, 24.03.1992.
31. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of complex signals. Patent US 5099243, 24.03.1992.
32. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Instantaneous frequency measurement receiver with bandwidth improvement through phase shifted sampling of real signals. Patent US 5109188, 28.04.1992.
33. McCormick W.S., Tsui J.B.Y. Frequency measurement receiver with means to resolve an ambiguity in multiple frequency estimation. Patent US 5293114, 08.03.1994.
34. Beharrell G.P. Digital electronic support measures. Patent EP 1618407, 17.04.2013.
35. Кренев А.Н., Ботов В.А., Горюнцов И.С., Погребной Д.С., Топорков В.К. Способ расширения полосы частот оценки спектров сигналов. Патент на изобретение RU № 2516763, 20.05.2014.
36. Подстригаев А.С. Классификация неоднозначности определения частоты в цифровом приемнике с субдискретизацией // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 4. С. 369-376. DOI: 10.31857/S0033849422040131.
37. Подстригаев А.С. Классификация и способы устранения аномальных ошибок измерения частотно-временных параметров сигналов в широкополосных приемниках // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2022. № 15 (2). С. 223-237. DOI: 10.17516/1999-494X-0385. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145437>.

38. Куприянов А.И. Аномальные ошибки при определении параметров сигналов средствами радиотехнической разведки // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 2. № 2. С. 5-11.
39. Подстригаев А.С. Методика проектирования сверхширокополосного цифрового приемника с субдискретизацией // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 10. С. 11-17. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17. URL: <http://media-publisher.ru/wp-content/uploads/Nom-10-2021-s.pdf>.
40. Смоляков А.В., Подстригаев А.С. Характеристики обнаружения цифрового приемника с субдискретизацией // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 95-107. DOI: 10.18127/j00338486-202109-09.
41. Смоляков А.В., Подстригаев А.С. Экспериментальное исследование точности определения частотно-временных параметров импульса в цифровом приемнике с субдискретизацией при односигнальном воздействии // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=162661>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-14.
42. Подстригаев А.С., Смоляков А.В. Экспериментальное исследование точности определения частотно-временных параметров импульса в цифровом приемнике с субдискретизацией при многосигнальном воздействии // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165560>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-15.
43. Горбунова А.А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=25366>.
44. Казачков Е.А., Матюгин С.Н., Попов И.В., Шаронов В.В. Обнаружение и классификация малоразмерных объектов на изображениях, полученных

радиолокационными станциями с синтезированной апертурой // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 1. С. 93-99. DOI: 10.38013/2542-0542-2018-1-93-99. URL: <http://journal.almaz-antey.ru/jour/article/view/51>.

45. Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Нейросетевой метод распознавания видов модуляции радиосигналов с использованием кумулянтов высокого порядка // Т-Сomm-Телекоммуникации и Транспорт. 2012. №. 9. С. 9-12.

46. Чиров Д.С. Стецюк А.Н. Нейросетевой метод идентификации источников радиоизлучения комплексом радиомониторинга воздушного базирования // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 4. С. 950-953.

47. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Информационное обеспечение радиоэлектронных средств в условиях конфликта. - М.: ИПРЖР, 2001. – 456 с.

48. Ge Z., Sun X., Ren W., Chen W., Xu G. Improved algorithm of radar pulse repetition interval deinterleaving based on pulse correlation // IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 30126-30134. DOI:[10.1109/ACCESS.2019.2901013](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901013)

References

1. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V., Likhachev V.P. *Programmno-opredelyaemye sredstva shirokopolosnogo analiza signalov na osnove tekhnologii subdiskretizatsii* (Software-defined tools for broadband signal analysis based on undersampling technology), Saint Petersburg, Izd-vo SPbGETU «LETI», 2021, 184 p.

2. 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>

3. 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>
4. Podstrigaev A.S. *Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh system*, 2016, no. 1 (10), pp. 49-52.
5. Dvornikov S.V., Konyukhovskii V.S., Simonov A.N. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2020, no. 1, pp. 63-72. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-1-63-72.
6. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Zheglov K.D. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2022, vol. 16, no. 11, pp. 15-20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.
7. Sviatkina V., Kuptsov V., Davydov V., Rud V. On possibility of using of spectral analysis for control the energy distribution of electromagnetic waves in radar channels, *Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*, Virtual, Samara, 2020, pp. 9253166. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253166.
8. 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.
9. Makarenko S.I., Novikov E.A., Mikhailov R.L. *Zhurnal radioelektroniki*, 2014, no. 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.html>.
10. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V., Likhachev V.P. *Radiotekhnika*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 143–153. DOI: 10.18127/j00338486-202201-19.

11. Kupryashkin I.F., Sokolik N.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2019, no. 1, pp. 39 - 55. URL: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-1-39-47>.
12. Vorob'ev E.N., Verem'ev V.I., Kholodnyak D.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2018, no. 6, pp. 75 - 82. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2018-21-6-75-82>.
13. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P., Ryazantsev L.B. *Malogabaritnye mnogofunktsional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* (Small-sized multifunctional radar with continuous frequency-modulated radiation), Moscow, Radiotekhnika, 2020, 280 p.
14. Biyusova V.A., Kochetov A.V., Komarov G.V., Panfilov P.S., Parusov V.A. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 9, pp. 26-30. DOI: 10.21778/2218-5453-2019-9-26-30.
15. Asadullin R.N. et al. *Radiotekhnika*, 2019, vol. 83, no. 6 (7), pp. 6-11. DOI: 10.18127/j00338486-201906(7)-02.
16. Nogov O.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 66. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=40269>.
17. 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
18. Bakhtin A.A., Volkov A.S., Solodkov A.V., Baskakov A.E. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=122307>. DOI: 10.34759/trd-2021-117-07.
19. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Manaenko S.S., Pshenichnikov A.V. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 87-93.

20. Ivanutkin A.G., Danilin M.A., Presnyakov M.Yu. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67818>.
21. Axell E., Leus G., Larsson E., Poor H. Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, no. 29 (3), pp. 101-116. DOI:10.1109/msp.2012.2183771.
22. Aswathy G.P., Gopakumar K. Sub-Nyquist wideband spectrum sensing techniques for cognitive radio: A review and proposed techniques, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2019, vol. 104, pp. 44-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.03.004>.
23. Bakhtin A.A., Volkov A.S., Solodkov A.V., Sviridov I.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162660>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-13.
24. Ma Y., Gao Y., Liang Y. C., Cui S. Reliable and efficient sub-Nyquist wideband spectrum sensing in cooperative cognitive radio networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, vol. 34, no. 10, pp. 2750-2762. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2605998.
25. Kizima S.V. *Elektrosvyaz'*, 2018, no. 11, pp. 68-74. URL: <https://radian-m.ru/docs/article/2018ESV11.pdf>.
26. 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>.
27. Likhachev V.P., Semenov V.V., Veselkov A.A., Demchuk A.A. *XVI Mezhdunarodnaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»*: sbornik trudov. Voronezh, Izd-vo Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2016, pp. 179-184.

28. Masalkin A.A., Kolesnik A.V., Protsenko P.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105700>.
29. Rashidi M., Haghighi K., Owrang A., Viberg M. A wideband spectrum sensing method for cognitive radio using sub-Nyquist sampling, *2011 Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting (DSP/SPE)*, IEEE, 2011, pp. 30-35. DOI: 10.1109/DSP-SPE.2011.5739182.
30. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of real signals. *Patent US 5099194 A*, 24.03.1992.
31. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of complex signals. *Patent US 5099243*, 24.03.1992.
32. Sanderson R.B., Tsui J.B.Y. Instantaneous frequency measurement receiver with bandwidth improvement through phase shifted sampling of real signals. *Patent US 5109188*, 28.04.1992.
33. McCormick W.S., Tsui J.B.Y. Frequency measurement receiver with means to resolve an ambiguity in multiple frequency estimation. *Patent US 5293114*, 08.03.1994.
34. Beharrell G.P. Digital electronic support measures. *Patent EP 1618407*, 17.04.2013.
35. Krenev A.N., Botov V.A., Goryuntsov I.S., Pogrebnoi D.S., Toporkov V.K. *Patent na izobretenie RU 2516763*, 20.05.2014.
36. Podstrigaev A.S. *Radiotekhnika i elektronika*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 369-376. DOI: 10.31857/S0033849422040131.

37. Podstrigaev A.S. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2022, no. 15 (2), pp. 223-237. DOI: 10.17516/1999-494X-0385. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145437>.
38. Kupriyanov A.I. *Voprosy radioelektroniki*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 5-11.
39. Podstrigaev A.S. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2021, vol. 15, no. 10, pp. 11-17. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17. URL: <http://media-publisher.ru/wp-content/uploads/Nom-10-2021-s.pdf>.
40. Smolyakov A.V., Podstrigaev A.S. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 9, pp. 95-107. DOI: 10.18127/j00338486-202109-09.
41. Smolyakov A.V., Podstrigaev A.S. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162661>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-14.
42. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165560>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-15.
43. Gorbunova A.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 45. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25366>.
44. Kazachkov E.A., Matyugin S.N., Popov I.V., Sharonov V.V. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*, 2018, no. 1, pp. 93-99. DOI: 10.38013/2542-0542-2018-1-93-99. URL: <http://journal.almaz-antey.ru/jour/article/view/51>.
45. Adzhemov S.S., Tereshonok M.V., Chirov D.S. *T-Comm-Telekommunikatsii i Transport*, 2012, no. 9, pp. 9-12.
46. Chirov D.S., Stetsyuk A.N. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 950-953.

47. Radzievskii V.G., Sirota A.A. *Informatsionnoe obespechenie radioelektronnykh sredstv v usloviyakh konflikta* (Information support of radio-electronic means in conflict conditions), Moscow, IPRZhR, 2001, 456 p.

48. Ge Z., Sun X., Ren W., Chen W., Xu G. Improved algorithm of radar pulse repetition interval deinterleaving based on pulse correlation, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 30126-30134. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2901013

Статья поступила в редакцию 20.03.2023

Одобрена после рецензирования 28.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 20.03.2023; approved after reviewing on 28.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023