

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.10>

УДК: 621.391.8

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ  
В КВАЗИВЕРТИКАЛЬНОМ ИОНОСФЕРНОМ КАНАЛЕ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СМЕСИ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ РЭЛЕЯ И РАЙСА**

**Ю.В. Давыдов, И.В. Скворцов, Р.Р. Латыпов, Д.В. Давыдов**

**Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420111, Россия, Казань, ул. Кремлевская, 16а**

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2025 г.

**Аннотация.** В статье предложен и апробирован метод детектирования импульсных сигналов в квазивертикальном ионосферном коротковолновом канале на основе статистической модели смеси распределений Рэлея и Райса. Традиционные пороговые методы обнаружения оказываются недостаточно надежными в условиях высокого уровня шумов и нестационарности канала. В предлагаемом методе полученный сигнал рассматривается в виде реализации смеси двух компонент: шумовой (описываемой распределением Рэлея) и сигнальной (описываемой распределением Райса). Экспериментальные результаты подтверждают работоспособность предлагаемого метода детектирования импульсных сигналов в условиях низких значений сигнал/шум и позволяют оценивать вероятность прохождения сигнала в зависимости от времени суток. Предлагаемый метод повышает устойчивость NVIS-связи в условиях сильных помех и динамически изменяющихся ионосферных условий

**Ключевые слова:** ионосферный коротковолновой канал, NVIS, модель смеси, распределение Райса, распределение Рэлея, итерационный алгоритм.

**Финансирование:** Работа выполняется в соответствии со Стратегической программой академического лидерства «Приоритет 2030» Казанского федерального университета Правительства Российской Федерации.

**Автор для переписки:** Давыдов Юрий Владимирович, [davydovkfu@mail.ru](mailto:davydovkfu@mail.ru)

## Введение

Квазивертикальная ионосферная радиосвязь, известная в зарубежной литературе как Near Vertical Incidence Skywave (NVIS), представляет собой специфический режим распространения коротковолновых радиосигналов с почти вертикальным отражением от ионосферы при котором радиоволны, излученные вертикально в небо, отражаются от ионосферы на высотах до 300 км и возвращаются на землю. В отличие от традиционной дальней ионосферной связи, NVIS обеспечивает устойчивое покрытие на расстояниях 100-200 км без «мертвой зоны», что делает ее особенно ценной в условиях пересеченной местности. Ключевые особенности NVIS включают использование сравнительно низких частот (3-10 МГц), возможность применения передатчиков малой мощности, а также высокую устойчивость к пеленгации и перехвату вследствие отсутствия направленного излучения [1].

Несмотря на указанные преимущества, практическое применение NVIS-связи ограничено высокой чувствительностью канала к внешним факторам: времени суток, уровню солнечной и геомагнитной активности, а также динамике ионосферных слоев. Эти особенности приводят к значительной нестационарности канала и затрудняют надежное обнаружение полезного сигнала на фоне интенсивных естественных и техногенных помех характерных для КВ-диапазона.

В данной работе предлагается статистический метод детектирования импульсных сигналов в квазивертикальном ионосферном (NVIS) канале, основанный на вероятностной модели смеси двух распределений: Рэлея – для описания шумовой компоненты, и Райса – для моделирования сигнальной компоненты, содержащей полезный импульс на фоне тех же шумов.

Применение статистических моделей на основе вероятностных распределений широко распространено в радиофизике, в частности при обработке данных ионосферного зондирования [2]. Однако большинство существующих решений ориентированы на сценарии с высоким отношением сигнал/шум и не учитывают специфику каналов связи с малой излучаемой мощностью, характерных для NVIS-систем, где полезный сигнал часто оказывается сопоставим по уровню с фоновыми помехами.

В отличие от задач зондирования, направленных на восстановление параметров ионосферы, в настоящей работе основное внимание уделяется оценке характеристик NVIS-канала, а именно способности передавать импульсы различной длительности (от 1 мс до 1 с). Для этой цели авторами предложен итерационный статистический метод, который последовательно уточняет параметры модели смеси распределений Рэлея и Райса, обеспечивая повышение точности детектирования импульсных сигналов с каждой итерацией.

## **1. Описание метода детектирования сигнала на основе смеси распределений Рэлея и Райса**

Оценка прохождения сигнала через радиоканал основана на представлении принятого сигнала в виде суммы двух компонент: шумовой, включающей внутренние шумы приемного тракта, естественные и техногенные помехи радиоканала и сигнальной, представляющей сумму полезного сигнала и тех же шумов.

Для рассмотрения шумов в ионосферном канале принято использовать распределение Рэлея [3]:

$$f(z|\sigma) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), \\ z \geq 0, \sigma > 0.$$

Это обусловлено неоднородностью структуры отражающих слоев ионосферы, вследствие чего в отсутствие акцентированных внешних радиосигналов ни одна из компонент не превалирует над остальными.

При наличии полезного сигнала в канале возникает доминирующая компонента, и статистика амплитуды принимаемого сигнала перестает подчиняться распределению Рэля, переходя к распределению Райса. Такой переход согласуется с общепринятой практикой моделирования замираний в ионосферных каналах, где распределение Райса широко используется для описания сигналов с выраженной детерминированной составляющей на фоне шума [4]:

$$f(z|v,\sigma) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(z^2 + v^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{zv}{\sigma^2}\right),$$

$$z \geq 0, v \geq 0, \sigma \geq 0.$$

Таким образом, если рассмотреть принятый файл, содержащий отсчеты, в которых присутствуют как участки чистого шума, так и участки, содержащие полезный сигнал на фоне того же шума, то к таким данным применима статистическая модель смеси распределений Рэля и Райса.

Плотность вероятности этой смеси имеет вид [5]:

$$f(s|\Psi) = \alpha f_{\text{Rayl}}(s|b^2) + (1-\alpha) f_{\text{Rice}}(s|v, \sigma^2).$$

Для данной статистической модели параметрами будут являться  $\Psi = \{\alpha, b^2, v, \sigma^2\}$ , где:

$\alpha$  – априорная вероятность отсутствия полезного сигнала,

$b^2$  – параметр масштаба распределения Рэля,

$v$  – параметр сдвига распределения Райса,

$\sigma^2$  – параметр масштаба распределения Райса.

Зная неизвестные параметры статистической модели, можно вычислить апостериорную вероятность наличия полезного сигнала для наблюдаемых значений амплитуды приема.

Для нахождения оценок  $\Psi$  используется итерационный EM алгоритм (Expectation Maximization), который в общем случае гарантирует возрастание правдоподобия статистической модели [6]. Алгоритм выполняется до достижения заданного разрешения на изменение параметров с каждой итерации. Входными параметрами являются набор случайных величин, а также начальные значения параметров, которые затем будут определяться более точно с каждой итерацией. В конечном итоге алгоритм определит наиболее подходящие параметры смеси для текущих отсчетов.

EM алгоритм для статистической модели смеси Рэлея-Райса:

$$\begin{aligned} \{s_n\}^N \Psi^0 &= \{\alpha^0, (b^2)^0, v^0, (\sigma^2)^0\} \\ p(w_1|s, \Psi^m) &= \frac{\alpha f_{\text{Rayl}}(s|b^2)}{\alpha f_{\text{Rayl}}(s|b^2) + (1-\alpha) f_{\text{Rice}}(s|v, \sigma^2)} \\ p(w_2|s, \Psi^m) &= \frac{(1-\alpha) f_{\text{Rice}}(s|v, \sigma^2)}{\alpha f_{\text{Rayl}}(s|b^2) + (1-\alpha) f_{\text{Rice}}(s|v, \sigma^2)} \\ \alpha^{m+1} &\leftarrow \frac{1}{N} \sum_{s_n} p(w_1|s_n, \Psi^k) \\ (b^2)^{m+1} &\leftarrow \frac{\sum_{s_n} p(w_1|s_n, \Psi^k) s_n^2}{2 \sum_{s_n} p(w_1|s_n, \Psi^k)} \\ v^{m+1} &\leftarrow \frac{\sum_{s_n} p(w_2|s_n, \Psi^k) s_n \frac{I_1\left(\frac{s_n v}{\sigma^2}\right)}{I_0\left(\frac{s_n v}{\sigma^2}\right)}}{\sum_{s_n} p(w_2|s_n, \Psi^k)} \\ (\sigma^2)^{m+1} &\leftarrow \frac{\sum_{s_n} p(w_2|s_n, \Psi^k) \left[ s_n^2 + (v^k)^2 - 2 s_n v^k \frac{I_1\left(\frac{s_n v}{\sigma^2}\right)}{I_0\left(\frac{s_n v}{\sigma^2}\right)} \right]}{2 \sum_{s_n} p(w_2|s_n, \Psi^k)} \\ \Psi &= \{\alpha^{m+1}, (b^2)^{m+1}, v^{m+1}, (\sigma^2)^{m+1}\}. \end{aligned}$$

Для EM алгоритма входной информацией будет набор значений  $\{s_n\}^N$ , а также начальные, заданные произвольно, параметры  $\Psi^0$  (точность начального задания параметров позволит незначительно уменьшить количество итераций). Затем на шагах 1 и 2 производится расчет апостериорных вероятностей принадлежности каждого значения данных к одному из классов модели (распределению Рэлея или распределению Райса) для заданных параметров. На шагах 3-6 производится перерасчет параметров. В результате получается новый набор параметров  $\Psi$ . Шаги 1-6 повторяются с целью повышения правдоподобия. На практике осуществляется сравнение изменения значений параметров. Если с новой итерацией изменение параметров меньше заданного разрешения, то расчет параметров останавливается и считается, что алгоритм достиг заданной точности. Тогда для значений, где апостериорная вероятность выше некоторого заданного порога можно сделать вывод о наличии полезного сигнала.

То есть набор данных для одного файла приема представлен как случайные величины, которые распределены по закону Рэлея либо Райса в зависимости от некоторой априорной вероятности. С помощью итерационного EM алгоритма производится расчет параметров распределений с заданной точностью. Значения, для которых апостериорная вероятность принадлежности к распределению Райса выше порога, определяются как «полезный сигнал», а остальные определяются как «шум». Точность оценки параметров модели определяется исходя из доступных вычислительных ресурсов и требуемой скорости обработки.

## 2. Описание эксперимента

Для реализации предложенного механизма был проведен эксперимент по передаче радиоимпульсов через квазивертикальный ионосферный канал. Передающий пункт располагался вблизи поселка Алексеевское Республики Татарстан, а приемный – на радиофизическом полигоне Казанского федерального университета в деревне Ореховка. Расстояние между передающим и приемным

пунктами составило около 120 км. В обоих пунктах использовались антенны типа «Inverted V» с диаграммой направленности, ориентированной вверх, что обеспечивает условия, необходимые для исследования квазивертикального ионосферного распространения (NVIS).

Сеанс трансляции включал ежеминутную передачу последовательности радиоимпульсов переменной длительности (от 1 мс до 1 с) в течение примерно 24 часов. Длительность каждой посылки составляла около 30 секунд и включала идентифицирующие односекундные импульсы в начале и конце, а также короткие тестовые импульсы с фиксированными интервалами между ними. Передача осуществлялась на частоте 3555 кГц с излучаемой мощностью порядка 10 Вт. Принятые сигналы записывались и сохранялись на приемном пункте для последующей обработки. Формат радиоимпульсов показан на рисунке 1.

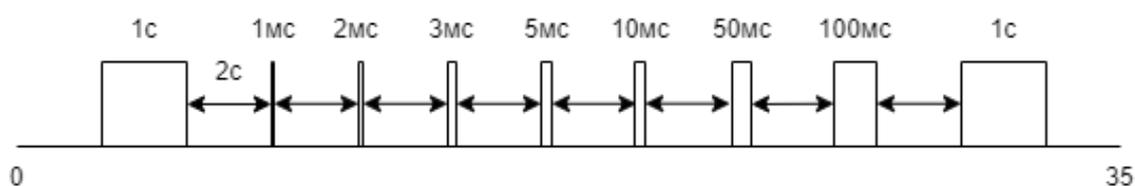


Рис. 1. Формат радиоимпульсов.

В результате было получено более 1400 файлов приема. Каждый файл обрабатывался индивидуально.

### 3. Анализ результатов детектирования импульсов в зависимости от времени суток

Выбранный радиочастотный диапазон (3555 кГц) активно используется в любительской КВ связи, что обуславливает высокий уровень посторонних помех. Для их подавления на первом этапе обработки из каждого приемного файла выделялась узкая полоса пропускания шириной 200 Гц, охватывающая несущую частоту передачи. После фильтрации к полученному сигналу применялась предложенная статистическая модель смеси распределений Рэлея и Райса для детектирования полезного сигнала.

Ввиду отсутствия точной ГНСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система) синхронизации между передающим и приемным пунктами временные метки начала и окончания передачи в записях не совпадают, что ограничивает возможность анализа абсолютных временных задержек в канале [7]. Для оценки временных задержек прихода радиосигналов применялся метод постобработки на основе взаимокорреляционной функции [8]. В каждом приемном файле вычислялась взаимокорреляция между принятым сигналом и эталонным односекундным импульсом, что позволило точно определить моменты начала и окончания посылки. Поскольку структура передаваемой посылки фиксирована, в корреляционной функции четко проявляются два максимума, соответствующие начальному и конечному секундным импульсам. Таким образом, для каждого файла выделялся временной интервал от первого до второго максимума корреляции, что обеспечивало единообразное позиционирование полезного сигнала перед последующей статистической обработкой (рис. 2). Односекундные импульсы в принятых файлах определяются с высокой точностью вне зависимости от времени суток и солнечной активности, что позволило применить этот метод для всех файлов приема в течение суток.

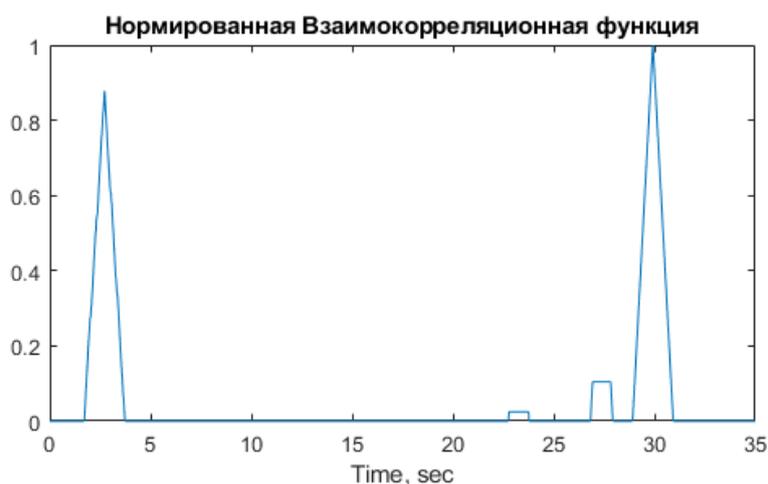


Рис. 2. Взаимокорреляционная функция принятого файла с односекундным импульсом.

На основе обработанных данных формируется обобщенная временная картина результатов приема за все время эксперимента (рис. 3).

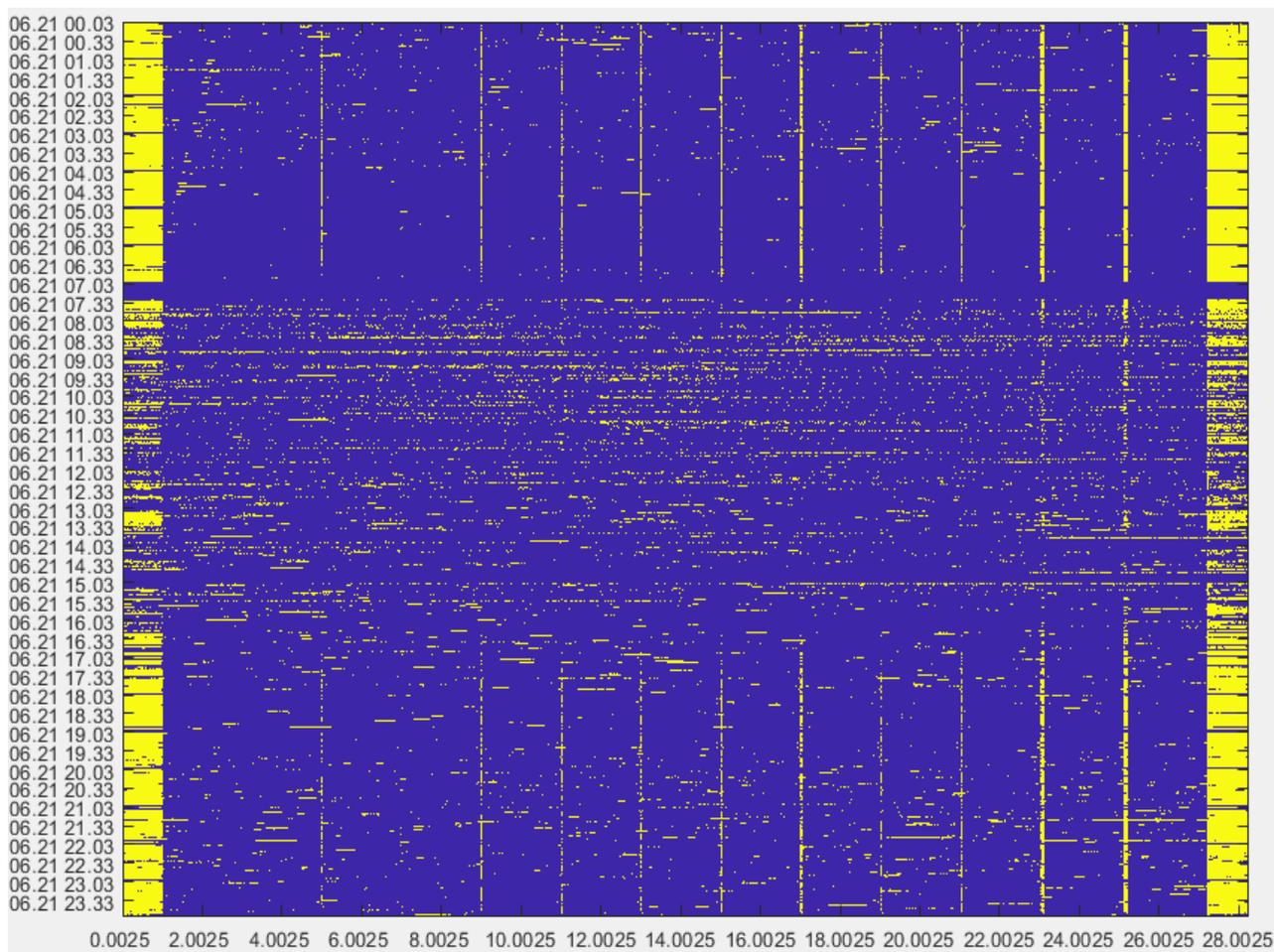


Рис. 3. Определение полезного сигнала на основе статистической модели за сутки.

Поскольку коротковолновая связь в режиме NVIS сильно зависит от времени суток и уровня солнечной активности, оценка вероятности детектирования сигнала проведена в разные временные интервалы суток: до полудня (рис. 4) и после полуночи (рис. 5). Для анализа полученных результатов данные были разбиты на временные интервалы по 3 часа. В каждом интервале проводилась оценка эффективности детектирования импульсов различной длительности, а также рассчитывалась погрешность в оценке их длительности. Кроме того, для характеристики ложных срабатываний алгоритма использовалась средняя частота событий, при которых алгоритм регистрировал наличие полезного сигнала в условиях его фактического отсутствия.

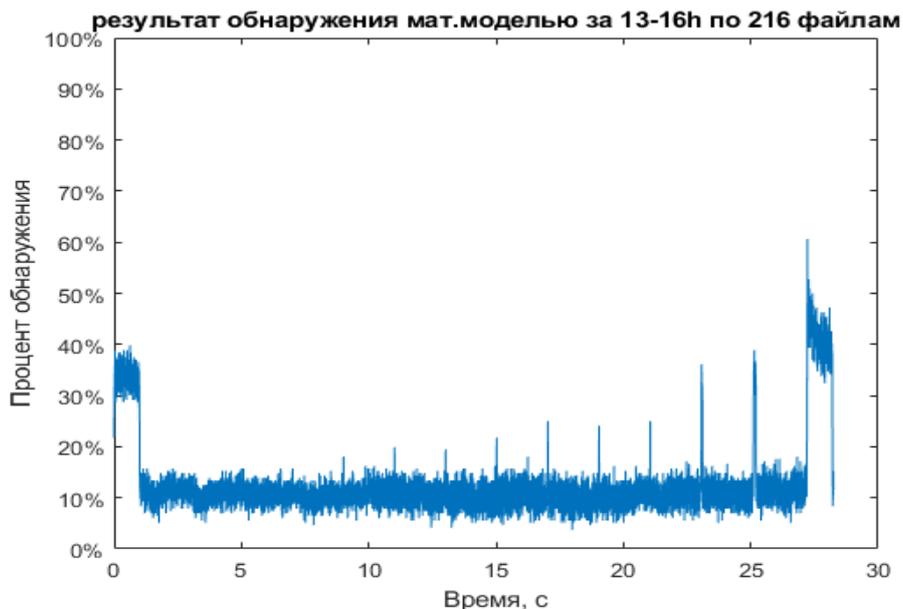


Рис. 4. Вероятность определений полезного сигнала до полудня во время высокой солнечной активности.

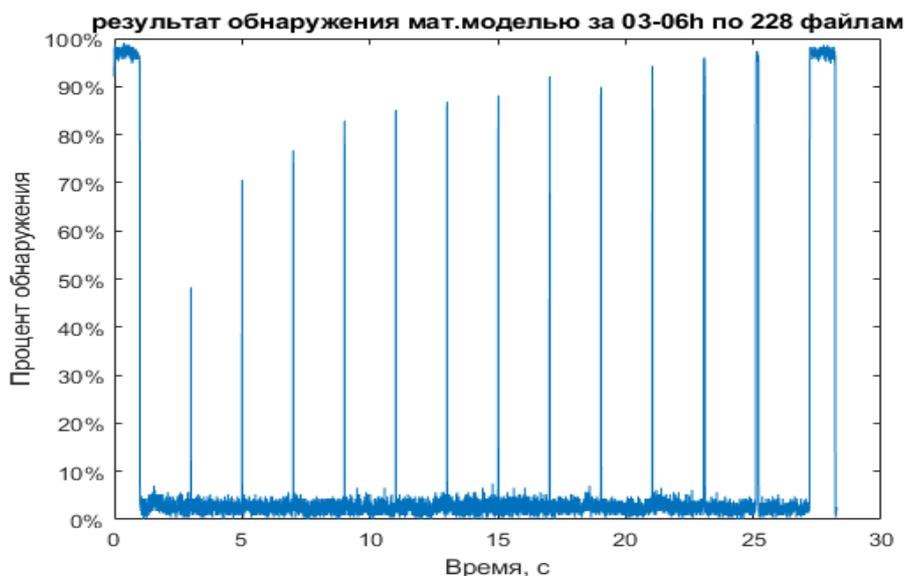


Рис. 5. Вероятность определений полезного сигнала после полуночи в отсутствие солнца.

Результаты анализа различных временных интервалов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Оценка характеристик импульсов, полученная EM алгоритмом.

Длительность импульсов	3 мс		5 мс		10 мс		50 мс		100 мс		шум
	$\Delta$ , мс	F, %									
00-02	0.5	66.8	3.5	72.6	4	77.9	5	84.2	7.5	83.7	2.06
03-05	0.5	70	2.5	79.5	2.5	85.3	5	87.3	5	87.4	1.31
06-08	0.5	43.8	2.5	45	5	54	15	66.6	15	71	15.80
09-11	1875	25.8	1877	26	1670	27	12	38	50	42	20.16
12-14	327	19.8	910	20.4	560	22.6	20	30	50	32.8	13.3
15-17	0.5	18.9	2.5	27.4	7.5	32.6	15	40	15	43	5.42
18-20	0.5	53.2	2.5	67.9	5	74.2	7.5	79.5	5	80	3.38
21-23	0.5	47.7	2.5	58.8	7.5	68.3	10	74.1	7.5	76	3.79

$\Delta$  мс – разница в определении импульсов между реальным значением и полученным после обработки алгоритмом в миллисекундах;

F, % – процент детектирования импульсов в выбранном временном промежутке;

FPR, % – процент ошибок 2ого рода, то есть ложного детектирования сигнала при однозначно шумовых значениях.

Анализ данных в Таблице 1 показывает, что максимальная эффективность алгоритма достигается в промежутке с 00:00 и примерно до 07:00. В этот период пятимиллисекундные импульсы обнаруживаются в 79 % случаев, а уровень ложных срабатываний остается низким – около 2 %. Напротив, в дневные часы, когда солнечная активность максимальна (08:00-14:00), качество детектирования резко снижается, что подтверждается существенным падением процента обнаружения и ростом ошибок, отраженными в соответствующих строках таблицы.

## Заключение

В работе реализована статистическая модель детектирования маломощных импульсных сигналов в квазивертикальном ионосферном (NVIS) канале на основе смеси распределений Райса, описывающего отсчеты, содержащие полезный сигнал, и Рэлея, описывающего чисто шумовые отсчеты. Для оценки параметров модели применен итерационный EM алгоритм, точность которого определяется количеством итераций и критерием сходимости. Предложенный метод был апробирован в ходе 24-часового эксперимента по ежеминутной передаче импульсов длительностью от 1 мс до 1 с на частоте 3555 кГц с

излучаемой мощностью около 10 Вт, в результате которого было получено более 1400 приемных записей. Результаты показали, что эффективность детектирования существенно зависит от времени суток: в ночные и предрассветные часы (00:00-07:00) достигается высокая вероятность обнаружения (до 80 % и выше для импульсов длительностью  $\geq 10$  мс) при низком уровне ложных срабатываний ( $\sim 2$  %), тогда как в дневные часы (08:00-14:00) при повышенной солнечной активности качество детектирования резко снижается. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного метода и его пригодность для автоматизированного мониторинга состояния NVIS-канала в реальных условиях несмотря на высокий уровень помех и нестационарность коротковолнового эфира.

**Финансирование:** Работа выполняется в соответствии со Стратегической программой академического лидерства «Приоритет 2030» Казанского федерального университета Правительства Российской Федерации.

### Литература

1. Witvliet, B. A., and R. M. Alsina-Pagès. Radio communication via Near Vertical Incidence Skywave propagation: an overview // Telecommunication systems. – 2017. – Т.66. – №.2. – С.295-309.
2. Егшин И.А., Колчев А.А., Недопекин А.Е. Обнаружение сигнала ионозонда с линейной частотной модуляцией в условиях априорной непараметрической неопределенности // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т.62. – №.10. – С.769–778.
3. Recommendation ITU-R P.1057-7. Probability Distributions Relevant to Radiowave Propagation Modelling. Geneva: ITU, 2022.
4. Allen, Jeffery, et al. Mid-latitude mobile wideband HF-NVIS channel analysis: Part 1. – 2017. – №. SPAWARTR3075.
5. Hastie, T. et al. The Elements of Statistical Learning. New York, NY, USA: Springer New York Inc., 2001.

6. D. Barber, Bayesian Reasoning and Machine Learning. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
7. MacGougan G. D. Poor receiving conditions effect on the GPS positioning accuracy//In Proceedings of ION GNSS 2012. – Neshvil, 2012, S.204-216.
8. Ворошилин Е. П., Миронов М. В., Громов В. А. Определение времени задержки приема сигналов группировкой пространственно-разнесенных малых космических аппаратов //Матер. докл. Всерос. радиофизических научных чтений-конференций памяти НА Арманда. – 2010. – С. 75.

**Для цитирования:**

Давыдов Ю.В., Скворцов И.В., Латыпов Р.Р., Давыдов Д.В. Детектирование импульсных сигналов в квазивертикальном ионосферном канале на основе статистической модели смеси распределений Рэлея и Райса. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.10>