УДК: 621.391.8
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-421
ORCID: 0000-0002-4849-720X

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В NVIS-КАНАЛЕ

Ю.В. Давыдов[1], Р.Р. Латыпов[1]

[1]Казанский федеральный университет, Казань, Россия

STATISTICAL MODEL FOR DETECTING PULSE SIGNALS IN NVIS CHANNEL

Yu.V. Davydov[1], R.R. Latypov[1]

[1]Kazan Federal University, Kazan, Russia

Аннотация. В работе предлагается метод детектирования импульсных сигналов на основе формирования статистической модели смеси распределений. Детектирование производится разделением шумовой составляющей, основанной на использовании распределения Рэлея, и сигнальной, основанной на распределении Райса. Для повышения качества детектирования применяется итерационный EM-алгоритм, который позволяет с высокой точностью соотнести каждое значение одному из распределений. Таким образом, на основе статистической модели производится выделение полезного сигнала в квазивертикальном ионосферном канале. Представленный метод позволит повысить надежность NVIS-связи в условиях сильных помех и изменяющихся ионосферных условий.

Ключевые слова: модель смеси, распределение Рэлея, распределение Райса, NVIS, EM-алгоритм.

Abstract. This paper proposes a method for detecting pulse signals based on the formation of a statistical model of a mixture of distributions. Detection is achieved by separating the noise component, based on the Rayleigh distribution, from the signal component, based on the Rice distribution. To improve detection quality, an iterative EM algorithm is used, which allows for a high-precision assignment of each point in the obtained file to one of the distributions. Thus, a statistical model is used to detect the useful signal in a quasi-vertical ionospheric channel. The presented method will improve the reliability of NVIS communications under strong interference and changing ionospheric conditions.

Keywords: mixture model, Rayleigh distribution, Rice distribution, NVIS, EM algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

Квазивертикальная ионосферная радиосвязь, известная в зарубежной литературе как Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) обеспечивает покрытие на расстояниях до 200км без «мертвых зон», что делает подобную связь привлекательной для использования в холмистых и горных местностях. NVIS связь обладает рядом особенностей: использование сравнительно низких частот (3-10 МГц), возможность использования передатчиков малой мощности, а также высокая защищенность от пеленгации и перехвата ввиду отсутствия направленного излучения [Witvliet, Alsina-Pages, 2017]. Однако каналы для подобной связи уязвимы к времени суток, солнечной и геомагнитной активности, а также к динамике ионосферных слоёв. Поэтому встает вопрос о детектировании полезного сигнала на фоне различных помех характерных для коротковолнового диапазона частот.

В работе для решения проблемы авторами предлагается статистический метод детектирования импульсных сигналов на основе статистической модели смеси двух распределений: Рэлея и Райса. Метод был апробирован на результатах суточного эксперимента по трансляции импульсных радиосигналов через NVIS канал.

Вообще применение статистических вероятностных моделей широко распространено в радиофизике, в частности при анализе результатов ионосферного зондирования [Егошин, Колчев, 2019], однако авторами сделан упор на специфику NVIS-каналов связи с малой излучаемой мощностью.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕСИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Метод детектирования базируется на представлении принятых сигналов в виде суммы двух компонент: шумовой – все, что не содержит полезного сигнала, и сигнальной – то, что содержит полезный сигнал.

В литературе для анализа ионосферных шумов распространено применение распределения Рэлея. Это связано с неоднородностью отражающих слоев ионосферы и отсутствием выраженных компонент [Recommendation ITU-R P.1057-7].

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

При наличии полезного сигнала в канале возникает доминирующая компонента, и статистика амплитуд сигнала переходит в распределение Райса. Такое рассмотрение согласуется с практикой моделирования замираний в ионосферных каналах, где распределение Райса применяют для описания сигналов с выраженной детерминированной составляющей на фоне общего шума [Allen et al., 2017].

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

Тогда для каждого принятого файла, который содержит импульсные полезные сигналы, можно применить модель смеси распределений Рэлея и Райса. И тогда плотность вероятности для смеси распределений будет иметь вид:

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

Для модели параметром будет являться Ψ={α, b2, ν, σ2}, где:

α – априорная вероятность отсутствия полезного сигнала,

b2 – параметр масштаба распределения Рэлея,

ν – параметр сдвига распределения Райса,

σ2 – параметр масштаба распределения Райса.

Для нахождения параметра Ψ используется итерационный EM-алгоритм (Expectation Maximization). Это алгоритм математической статистики, который позволяет найти оценки максимального правдоподобия параметров вероятностной модели. С каждой итерацией на основе максимального правдоподобия производится расчет неизвестных параметров, и это продолжается до сходимости алгоритма, т.е. до момента при котором с каждой итерацией изменение параметров будет менее заданной точности. Для применения алгоритма входными параметрами будет являться набор амплитуд в принятом файле, и начальные значения для параметра Ψ, которые с каждой итерацией будут пересчитываться. Точность начального задания параметра Ψ позволит лишь незначительно снизить количество итераций. Точность оценки параметра Ψ модели задается исходя из доступных вычислительных ресурсов и требуемой скорости обработки. Выходными параметрами будет являться параметр Ψ, а также апостериорная вероятность принадлежности к распределению Райса для каждого значения амплитуды. Если вероятность для значения выше заданного порога – считается, что значение амплитуды относится к полезному сигналу, иначе – это шум.

ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Для исследования метода был проведен эксперимент по трансляции радиоимпульсов. Расстояние между передающим и приёмным 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). Рабочая частота: 3555кГц, мощность излучения составляла 10Вт. Сам сеанс трансляции представлял собой ежеминутную передачу набора импульсов в течение 24 часов. В результате было получено более 1400 файлов приема. Для каждого файла отдельно формировалась статистическая модель смеси распределений.

Обработка принятых файлов состояла из нескольких этапов:

— Фильтрация сигнала,

Поскольку выбранный КВ-диапазон активно используется в любительской радиосвязи, полезный сигнал выделялся в узкой полосе пропускания в 200Гц.

— Выделение начала и окончания трансляции,

Эксперимент проводился без высокоточной синхронизации передатчика и приемника ГНСС, поэтому для каждого файла с помощью корреляционного анализа выделялся момент начала полезного сигнала и окончания полезного сигнала. Это позволило без использования ГНСС определить точное время для каждого файла и построить единую картину для всех принятых файлов в дальнейшем.

— Применение статистической модели и детектирование импульсов

Для каждого принятого файла на этом этапе формируется статистическая модель смеси распределений. После работы EM-алгоритма будет получена апостериорная вероятность принадлежности каждого значения амплитуды к распределению либо Рэлея (шум), либо Райса (полезный сигнал). Если вероятность для распределения Райса выше заданного порога – считается что это полезный сигнал, иначе – шум. Затем весь набор амплитуд для принятого файла переводится в двоичный формат: 1- есть полезный сигнал, 0 – нет полезного сигнала.

На рис.1 представлена единая картина по детектированию сигналов в течение суток.

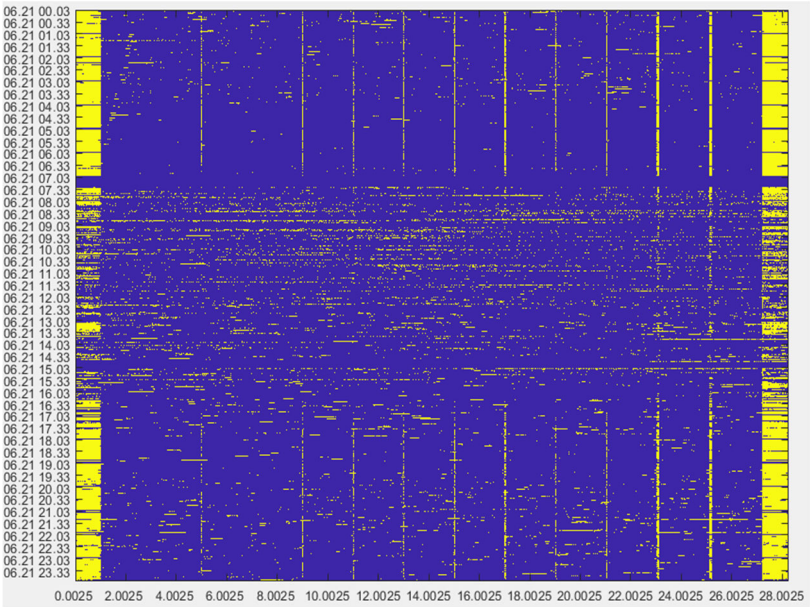

Рис. 1. Единая картина детектирования полезного сигнала в течение суток

Таблица 1. Оценка детектирования импульсов по итогам эксперимента

Длительность импульсов	3мс		5мс		10мс		50мс		100мс		шум
Временной промежуток в часах	Δ, мс	F,%	Δ, мс	F,%	Δ, мс	F,%	Δ, мс	F,%	Δ, мс	F,%	FPR,%
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

Δ, 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.

Поскольку коротковолновая связь в NVIS-канале сильно зависит от времени суток, оценка вероятности детектирования приведена в разные временные интервалы суток. Для удобства анализа данные были разбиты на интервалы по 3 часа. Для каждого интервала были оценены вероятности детектирования импульсов различных длительностей от 3 до 100мс, а также рассчитаны средние ошибки ложного детектирования сигнала при однозначно шумовых значениях. Результат представлен в таблице 1.

Анализ результатов таблицы показывает, что максимальная эффективность метода достигается с 00 по 08 часов утра. В этот момент короткие импульсы определяются с высокой вероятностью, и уровень ложных срабатываний остается достаточно низким. В дневные часы же качество детектирование существенно падает, и вероятность ложных срабатываний достигает своего максимума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен статистический метод для детектирования импульсных сигналов в NVIS-канале. Метод основывается на формировании статистической модели смеси распределений Рэлея (для шумовых отсчетов) и Райса (для полезного сигнала) для принятого сигнала. С помощью EM-алгоритма производится высокоточный расчет параметров модели и результатом является вероятностное определение полезного сигнала в принятом файле. Для апробации был проведен суточный эксперимент по трансляции импульсов длительностью от 3мс до 1с через NVIS-канал. Результаты показали, что в темное время суток (00 по 07 часов утра) достигается высокая вероятность детектирования (до 80%) при низком уровне ложных срабатываний (около 2%). При повышении солнечной активности качество детектирования заметно снижается. Метод позволяет осуществлять автоматизированный мониторинг состояния NVIS-канала в условиях высокого уровня помех и нестационарности коротковолного канала связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Егошин И.А., Колчев А.А., Недопёкин А.Е. Обнаружение сигнала ионозонда с линейной частотной модуляцией в условиях априорной непараметрической неопределённости // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т.62. – №.10. – С.769–778.

Allen, Jeffery, et al. Mid-latitude mobile wideband HF-NVIS channel analysis: Part 1. – 2017. – №. SPAWARTR3075.

Recommendation ITU-R P.1057-7. Probability Distributions Relevant to Radiowave Propagation Modelling. Geneva: ITU, 2022.

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.