Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 274–276.

УДК 537.8
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-274
ORCID 0009-0000-3797-1714

СТАТИСТИЧЕСКИ УСТОЙЧИВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

И.В. Кичигин[1], В.П. Ташлыков[1], Д.С. Кушнарёв[1], В.П. Лебедев[1]

[1]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
ivan.kichigin977@mail.iszf.irk.ru

STATISTICALLY ROBUST MITIGATION OF COHERENT AND IMPULSIVE INTERFERENCE IN INCOHERENT SCATTER RADAR DATA PROCESSING

I.V. Kichigin[1], V.P. Tashlykov[1], D.S. Kushnarev[1], V.P. Lebedev[1]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ivan.kichigin977@mail.iszf.irk.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается нарастающая проблема зашумления данных Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) эхо-сигналами от низкоорбитальных спутниковых группировок, в первую очередь, Starlink. При текущей численности группировки (~8600 КА) и планах по ее расширению до 34 400 единиц традиционные подходы к отбраковке целых сканов приводят к неприемлемым потерям полезной информации. Предложен модернизированный адаптивный алгоритм фильтрации, использующий устойчивый метод на основе Q_n. Показано, что применение Q_n-фильтрации обеспечивает высокую статистическую эффективность (82.27 %) по сравнению с классическим методом медианного абсолютного отклонения (*MAD*, 37 %). Внедрение механизма буферизации параметров позволяет сохранять непрерывность данных об ионосфере за счет точечного удаления импульсных помех и защиты статистического профиля сигнала в условиях сверхплотных спутниковых созвездий.

Ключевые слова: Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР), фильтрация помех, статистика Q_n, спутниковые группировки (Starlink).

Abstract. This paper addresses the escalating issue of data contamination at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar (ISR) caused by signals from low-Earth orbit satellite constellations, specifically Starlink. With the current fleet of approximately 8,600 satellites and planned expansions to 34,400, traditional methods of discarding entire integration scans lead to substantial losses of ionospheric data. A modernized adaptive filtering algorithm based on robust Q_n-statistics is proposed. Q_n-statistics demonstrate high statistical efficiency (82.27 %) compared to the classical Median Absolute Deviation (*MAD*, 37 %). The implementation of a parameter buffering mechanism for clean ionospheric states allows the algorithm to perform precise interference excision while maintaining data continuity. The proposed method proves effective against the specific RCS dynamics of Starlink reflections, preserving weak ionospheric signals where standard detection methods fail.

Keywords: Irkutsk ISR, clutter filtration, Q_n-statistics, satellite constellations (Starlink).

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика параметров околоземного космического пространства методом некогерентного рассеяния (НР) радиоволн остается наиболее информативным инструментом современной радиофизики. Физическая природа сигнала НР определяется рассеянием зондирующего излучения на тепловых флуктуациях электронной плотности плазмы.

Согласно теории, квадратурные отсчеты напряжения такого сигнала представляют собой независимые нормально распределенные случайные величины с нулевым средним и дисперсией σ^2, прямо пропорциональной электронной концентрации N_e [Zhou et al., 2024].

Традиционно для оценки мощности сигнала используется арифметическое усреднение мощности. Однако в последние годы наблюдается резкая деградация помеховой обстановки, связанная с развертыванием многотысячных спутниковых группировок.

Сигнатуры пролетов таких объектов, как Starlink, проявляются в данных ИРНР в виде интенсивных импульсных и квазинепрерывных помех, которые с точки зрения статистики являются выбросами. Стандартное усреднение в присутствии даже незначительного процента таких помех приводит к смещению оценок и появлению артефактов на профилях концентрации и температур. Стремительное увеличение числа низкоорбитальных космических аппаратов, в частности группировки Starlink, создает серьезные препятствия для исследований ионосферы методом НР. Как показано в работе [Ивонин, Лебедев, 2025], пересечение траекторий тысяч спутников с областью обзора ИРНР приводит к возникновению интенсивных паразитных сигналов на высотах ~550 км, которые существенно искажают высотные профили N_e.

Актуальность работы обусловлена необходимостью внедрения методов устойчивой статистики, способных обеспечить высокую эффективность (близкую к среднему арифметическому в чистых условиях) и устойчивость к загрязнениям (breakdown point).

Целью настоящего исследования является разработка алгоритма на основе высокоэффективной статистики Q_n и логики временной буферизации для компенсации потерь данных при длительных помехах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) является уникальной научной установкой

ИСЗФ СО РАН. Это моностатический импульсный радар метрового диапазона, использующий в качестве приемопередающей системы крупногабаритную антенну типа рупор. Радар предназначен для мониторинга параметров ионосферы (электронная концентрация N_e, температуры плазмы T_e, T_i, скорость дрейфа) в диапазоне высот от 100 до 1000 км. Высокая чувствительность системы требует прецизионной фильтрации любых сигналов, эффективная площадь рассеяния (ЭПР) которых превышает уровень рассеяния на флуктуациях плотности.

Для оценки мощности сигнала в условиях помех вместо стандартного отклонения и медианного абсолютного отклонения (*MAD*) предлагается использовать статистику Q_n [Rousseeuw, Croux, 1993]. Математически Q_n определяется как 25-й квантиль (первый квартиль) всех попарных разностей между элементами выборки:

$$Q_n = d \cdot \{|x_i - x_j| : i < j\}_{(k)},$$

где $k \approx \frac{1}{4} C_2^n$, а константа $d \approx 2.2191$ обеспечивает несмещенность оценки при гауссовском распределении.

Преимущества и теоретическое обоснование:

• При гауссовском распределении эффективность Q_n составляет 82 %, что значительно превосходит эффективность *MAD* (37 %). Это позволяет минимизировать статистическую ошибку при отсутствии помех.

• Метод сохраняет устойчивость при загрязнении до 50% выборки.

• В отличие от медианы и ранговых методов, Q_n обладает гладкой ограниченной функцией влияния, что исключает нестабильность при наличии хвостов распределения.

• Алгоритм вычисления Q_n не требует предварительного нахождения среднего или медианы, что устраняет кумулятивную ошибку смещения, характерную для двухстадийных методов.

Для автоматической классификации состояний сигнал+шум и сигнал+шум+помеха используется критерий нормализованной дисперсии [Zhou et al., 1999]. Согласно методологии, для выборки мощностей Z параметр R^2 определяется как

$$R^2(Z) = \frac{N\sigma_Z^2}{\mu_Z^2},$$

где N — объем выборки, σ_Z^2 — дисперсия значений выборки Z, а μ_Z — ее среднее значение.

Для идеального сигнала НР, распределенного по закону χ-квадрат с $2L$ степенями свободы (где L — число накопленных импульсов), ожидаемое значение R^2 составляет $1/L$. Превышение данного порога на величину более 2σ (относительно теоретического распределения) служит признаком для классификации выборки как загрязненной. Использование R^2 позволяет эффективно обнаруживать Starlink-подобные сигнатуры, которые резко увеличивают вариативность выборки.

ОПИСАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО АЛГОРИТМА

Алгоритм обрабатывает входной двумерный массив мощности $P[t_{short}][t_{long}]$, где t_{short} — высотный канал, t_{long} — номер квадратуры. Ключевым элементом контроля является критерий R^2, который определяется как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению переменной мощности $R^2 = \frac{\sigma}{\mu}$. Порог 1.1 служит границей, отделяющей чистые данные ионосферы от зашумленной среды.

Процесс фильтрации с буферизацией параметров происходит по следующему алгоритму.

1. Для текущей высоты рассчитывается коэффициент R^2 (нормированная дисперсия).

2. Если $R^2 > 1.1$ (обнаружена помеха), локальные статистические параметры признаются недостоверными. В этом случае алгоритм использует значения медианы и Q_n из буфера, в который записаны данные с предыдущей чистой высоты.

3. Если $R^2 < 1.1$, рассчитываются локальные значения медианы и Q_n по текущему вектору данных.

4. Производится проверка каждого отсчета. Отсчет удаляется, если выполняется условие $|P - Med| > kQ_n$, где k — коэффициент чувствительности (типично выбирается в диапазоне $3 < k < 5$).

5. После очистки рассчитывается выходной коэффициент R^2. Если $R^2 < 1.1$, текущие значения медианы и Q_n считаются достоверными и сохраняются в буфер для следующей итерации.

Такая двойная проверка (рис. 1) защищает алгоритм от вмешательства аномально мощных спутниковых эхо-сигналов, не позволяя им искажать пороги детекции на соседних высотных каналах.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма Q_n-фильтрации с буфером

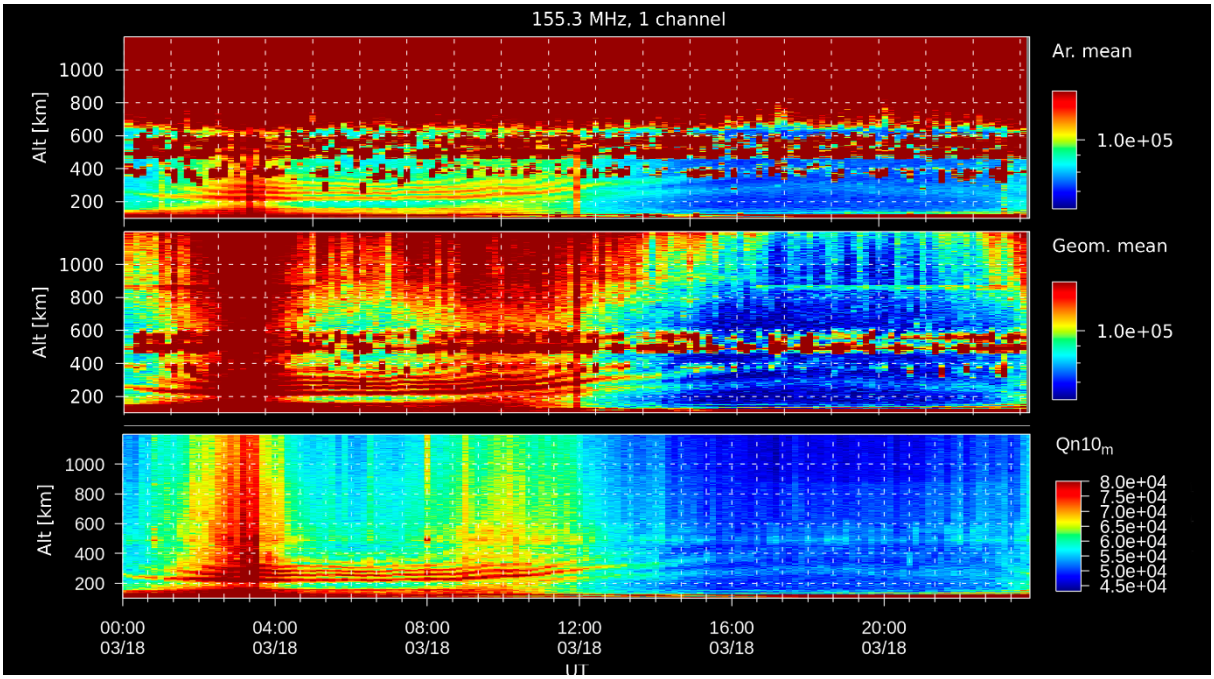

Рис. 2. Суточный ход профиля мощности до и после фильтрации

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Применение алгоритма к реальным данным ИРНР позволило достичь следующих результатов.

1. Алгоритм осуществляет селективное вырезание помех от Starlink или других КО на уровне отдельных импульсов. Это сохраняет основную часть интервала накопления, в отличие от методов полного исключения реализаций сигнала.

2. Благодаря эффективности Q_n-статистики (82.27 %) метод успешно разделяет слабые ионосферные сигналы и шум, предотвращая ошибочное удаление данных в периоды низкой электронной концентрации.

3. Буферизация параметров обеспечивает устойчивость обработки в случаях, когда помехи полностью перекрывают отдельные высотные интервалы, позволяя переносить статистические характеристики через зашумленные слои.

Внедрение Q_n-фильтрации с адаптивным буфером (рис. 2) значительно повышает достоверность восстановления параметров плазмы, обеспечивая надежную работу ИРНР в условиях растущей плотности спутниковых созвездий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ивонин В.А., Лебедев В.П. Исследование ЭПР спутников группировки STARLINK по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния // Труды конференции РРВ-29. Казань, 2025. С. 375–378.

Rousseeuw P.J., Croux C. Alternatives to the Median Absolute Deviation // J. American Statistical Association. 1993. V. 88, N 424. P. 1273–1283.

Zhou Q., Li Y., Gong Y. Variance estimations in the presence of intermittent interference and their applications to incoherent scatter radar signal processing // Atmos. Meas. Tech. 2024. V. 17. P. 4197–4209.

Zhou Q., Zhou Q.N., Mathews J.D. Arithmetic average, geometric average and ranking – Application to incoherent scatter radar data processing // Radio Sci. 1999. V. 34. P. 1227–1237.