

УДК 550.388.2

DOI: 10.62955/0135-3748-2026-352

ORCID 0009-0008-2250-461X, 0000-0002-6448-0045

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ РСДН-20 ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В Г. ИРКУТСКЕ (БШФФ)

Ч. Х. Со¹, А.С. Полетаев¹

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, poletaevs@ex.istu.edu

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ESTIMATING AMPLITUDE AND PHASE CHARACTERISTICS OF RSDN-20 SIGNALS FROM MEASUREMENTS IN IRKUTSK

J.H. So¹, A.S. Paletaev¹

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, poletaevs@ex.istu.edu

Аннотация. Проведено сравнение трёх методов определения амплитуды и фазы сигналов РСДН-20: квадратурного детектирования, преобразования Гильберта и спектрального анализа на основе БПФ. Исследование выполнено по данным измерений в г. Иркутске при приёме сигналов передатчиков Новосибирск и Хабаровск на частоте 12,649 кГц. Выполнена оценка точности фазовых измерений и вычислительной эффективности алгоритмов. Показано, что исследуемые методы обеспечивают близкие результаты определения фазы, однако существенно различаются по времени обработки данных.

Ключевые слова: БШФФ, РСДН-20, ОНЧ-сигналы, цифровая обработка сигналов, преобразование Гильберта, квадратурное детектирование, БПФ.

Abstract. A comparison of three methods for estimating the amplitude and phase of RSDN-20 signals is presented: quadrature detection, the Hilbert transform approach, and FFT-based spectral analysis. The study is based on measurements performed in Irkutsk with the use of signals transmitted from Novosibirsk and Khabarovsk at 12.649 kHz. The methods were evaluated in terms of phase estimation accuracy and computational efficiency. The results show that all approaches provide similar phase estimates but differ significantly in processing time.

Keywords: BSFP, RSDN-20, VLF signals, digital signal processing, Hilbert transform, quadrature detection, FFT.

ВВЕДЕНИЕ

Сигналы диапазона очень низких частот (ОНЧ) широко используются для исследования процессов распространения радиоволн в волноводе Земля–ионосфера и диагностики состояния нижней ионосферы [Barr, Jones, Rodger, 2000; Wait, Spies, 1964; Budden, 1985; Helliwell, 1965]. Благодаря малому затуханию в волноводе такие сигналы способны распространяться на расстояния в тысячи километров и обладают высокой чувствительностью к изменениям параметров нижней ионосферы.

Система дальней радионавигации РСДН-20 («Альфа») представляет собой сеть передатчиков ОНЧ-диапазона, излучающих сигналы на строго фиксированных частотах [<http://www.vlf.it/alphatrond/alpha.htm>]. Высокая стабильность частоты и регламентированная временная структура сигналов делают их удобным инструментом для исследования условий распространения радиоволн и мониторинга ионосферных процессов [Полетаев, 2019].

Одной из основных задач обработки сигналов РСДН-20 является определение их амплитудно-фазовых характеристик. Для решения данной задачи могут использоваться различные методы цифровой обработки сигналов, отличающиеся вычислительной сложностью и устойчивостью к шумам. Наиболее распространёнными являются когерентное квадратурное детектирование

[Полетаев, 2019], метод аналитического сигнала на основе преобразования Гильберта [Oppenheim, Schaffer, 2010] и спектральный анализ на основе преобразования Фурье [Cohen 1995].

Целью работы является сравнительный анализ указанных методов по экспериментальным данным, зарегистрированным в г. Иркутске, а также исследование возможности их применения для анализа суточных вариаций сигналов РСДН-20.

СИГНАЛЫ РСДН-20 И ТРАССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

В работе исследовались сигналы системы РСДН-20, зарегистрированные в г. Иркутске при приёме передатчиков Новосибирск и Хабаровск.

На рис. 1 показано расположение передатчиков РСДН-20 и трассы распространения сигналов до пункта приема в г. Иркутске. Трасса Новосибирск–Иркутск имеет протяжённость около 1400 км, а трасса Хабаровск–Иркутск — около 2220 км. Распространение сигналов осуществляется в волноводе Земля–ионосфера, параметры которого зависят от уровня солнечного освещения и состояния нижней ионосферы [Wait, Spies, 1964; Budden, 1985; Корсаков, 2026].

Передатчики системы РСДН-20 работают на фиксированных частотах:

$F1 \approx 11,904 \text{ кГц}$, $F2 \approx 12,649 \text{ кГц}$, $F3 \approx 14,881 \text{ кГц}$, $F4 \approx 12,091 \text{ кГц}$

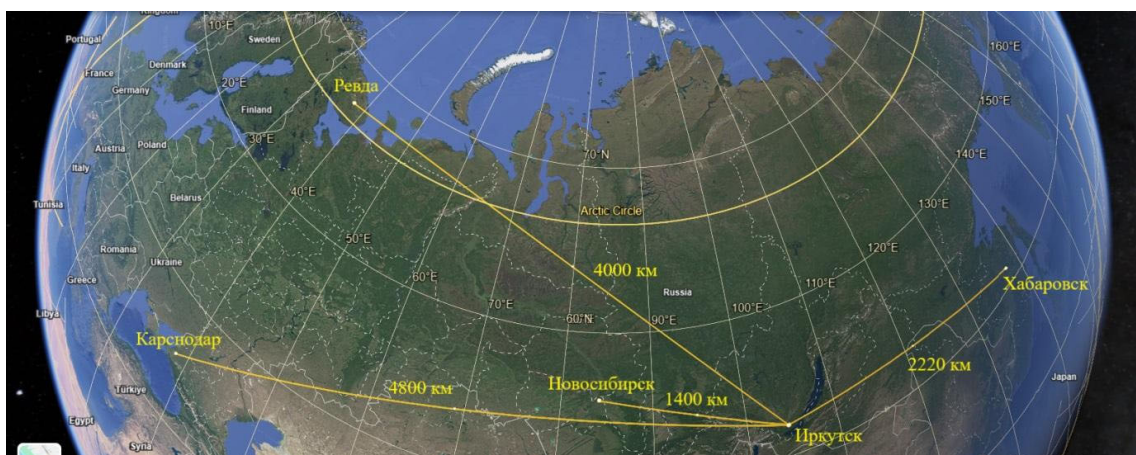


Рис. 1. Трассы распространения радиосигналов передатчиков РСДН-20 при приёме в Иркутске

Принимаемый сигнал может быть представлен в виде

$$S(t) = A(t) \cos(\omega t + \varphi(t)) + n(t) \quad (1)$$

где $A(t)$ — амплитуда сигнала, $\varphi(t)$ — фаза сигнала, $n(t)$ — шумовая составляющая.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Регистрация сигналов осуществлялась с использованием стационарного измерительного комплекса, разработанного в ИРНИТУ для проведения долговременных наблюдений сигналов ОНЧ-диапазона [Полетаев et al., 2018].

На рис. 2 показана структурная схема измерительного комплекса, разработанного в ИРНИТУ. Основным элементом комплекса является ортогональная рамочная антенна, обеспечивающая приём магнитной составляющей электромагнитного поля. Конструкция антенны позволяет уверенно принимать сигналы независимо от направления их прихода и

использовать установку для наблюдения нескольких передатчиков одновременно.

После предварительного усиления сигнал поступает в тракт аналоговой обработки, где выполняются фильтрация и подавление внеполосных помех. Далее производится оцифровка сигнала аналого-цифровым преобразователем, синхронизированным по сигналам GPS/ГЛОНАСС. Использование спутниковой синхронизации обеспечивает высокую стабильность временной шкалы и позволяет выполнять фазовые измерения с высокой точностью.

Цифровая обработка выполнялась с использованием программного обеспечения, разработанного на языке Python. Выбор данного языка обусловлен наличием развитых библиотек научных вычислений NumPy, SciPy и Matplotlib, позволяющих реализовать современные алгоритмы цифровой обработки сигналов и проводить статистический анализ результатов.

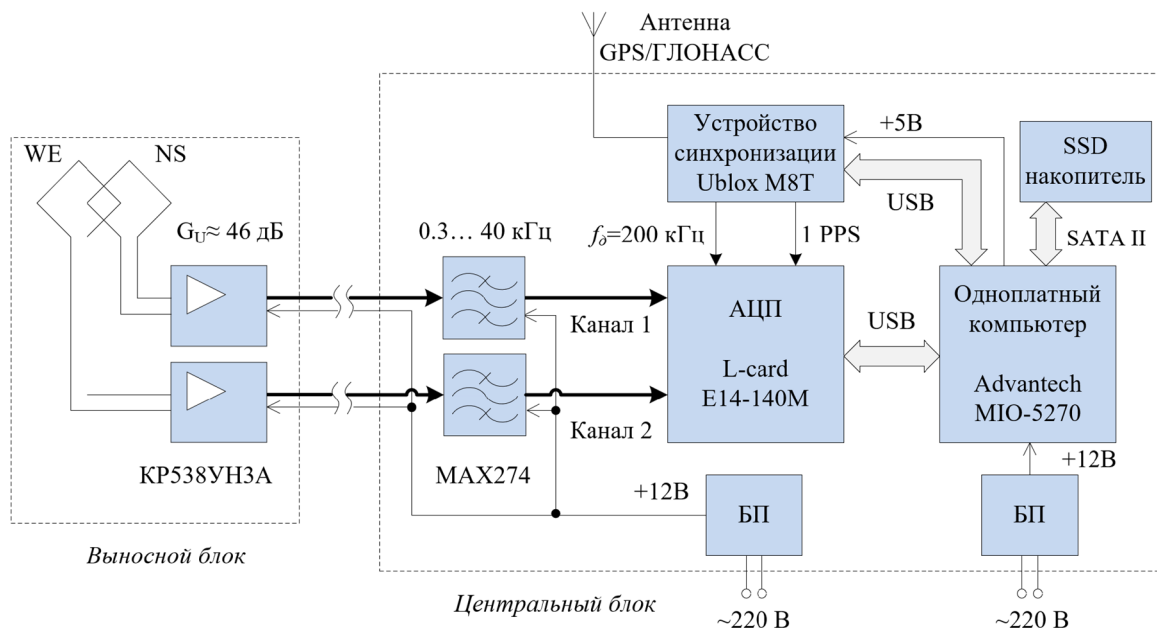


Рис. 2. Структурная схема измерительного комплекса ИРНИТУ

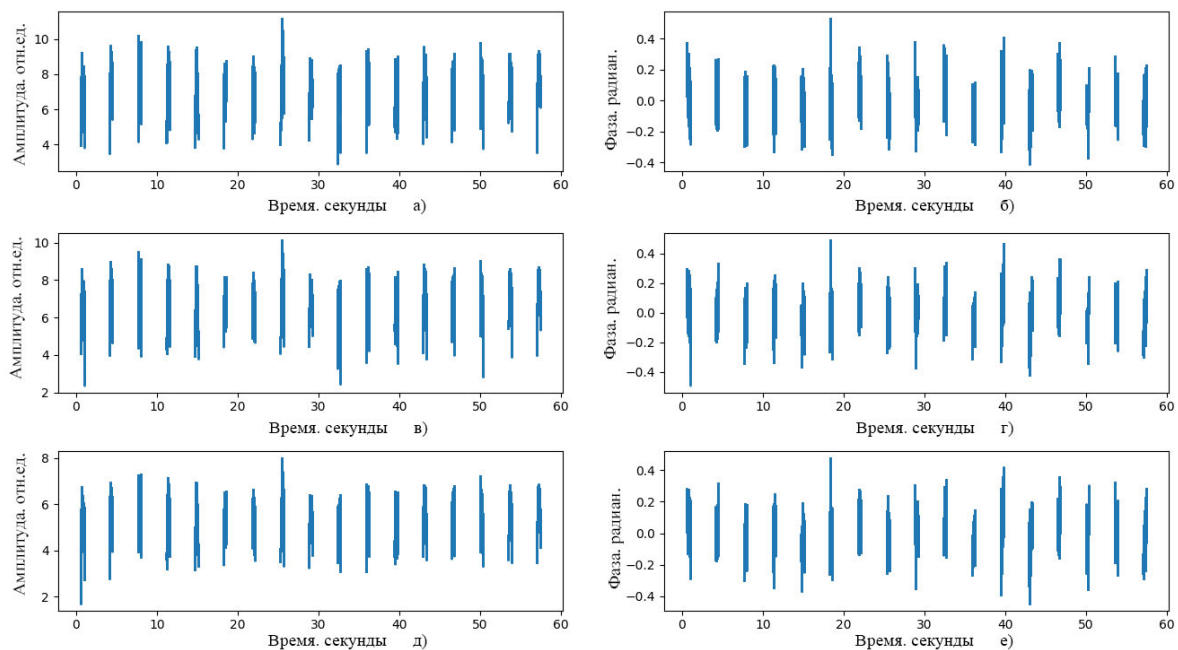


Рис. 3. Амплитуды и фазы сигнала РСДН-20, рассчитанные различными методами, а) и б) - квадратурное детектирование, в) и г) - метод аналитического сигнала, д) и е) - спектральный метод

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

1. Когерентное квадратурное детектирование

Метод основан на умножении входного сигнала на синфазную и квадратурную опорные функции:

$$I(t) = s(t)\cos(\omega t), Q(t) = s(t)\sin(\omega t) \quad (2)$$

После низкочастотной фильтрации вычисляются амплитуда и фаза:

$$A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}, \quad \varphi(t) = \arctg(Q(t)/I(t)) \quad (3)$$

2. Метод аналитического сигнала

В данном методе формируется аналитический сигнал

$$z(t) = x(t) + iH[x(t)] \quad (4)$$

где $H[x(t)]$ — преобразование Гильберта.

Амплитуда и фаза определяются выражениями

$$A(t) = |z(t)|, \varphi(t) = \arg(z(t)) \quad (5)$$

3. Спектральный метод

Спектральный метод основан на вычислении дискретного преобразования Фурье и выделении спектральной составляющей на частоте сигнала.

$$X(f_0) = Ae^{i\varphi} \quad (6)$$

Амплитуда и фаза определяются как

$$A = |X(f_0)|, \varphi = \arg(X(f_0)) \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ МЕТОДОВ

Сначала были рассчитаны амплитуда и фаза сигнала RSDN-20 за одну минуту на частоте 12,649 кГц, передаваемого с Новосибирской передающей станции, и проведено сравнение алгоритмов. На рис. 3 представлены результаты определения амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 тремя исследуемыми методами.

Визуальный анализ показывает хорошее совпадение фазовых оценок, полученных

различными методами. После удаления линейного тренда остаточные фазовые флуктуации оказываются практически одинаковыми.

Для количественной оценки эффективности вычислялось среднеквадратическое отклонение фазы и время обработки данных. На Таблице 1 показаны СКО фазы и время вычислений, рассчитанные с использованием тремя методами.

Таблица 1. Сравнение методов обработки

Метод	СКО фазы	Время вычисления
Квадратурное детектирование	0,1208	3,57
Метод аналитического сигнала	0,1271	3,31
Спектральный метод	0,1233	61,34

Полученные значения показывают, что все методы обеспечивают близкую точность определения фазы. Наименьшее значение СКО получено для квадратурного метода. При этом метод аналитического сигнала демонстрирует минимальное время обработки.

Спектральный метод обеспечивает сопоставимую точность определения фазы, однако требует существенно больших вычислительных затрат. Время его выполнения оказалось примерно в 17 раз больше времени работы методов квадратурного детектирования и аналитического сигнала.

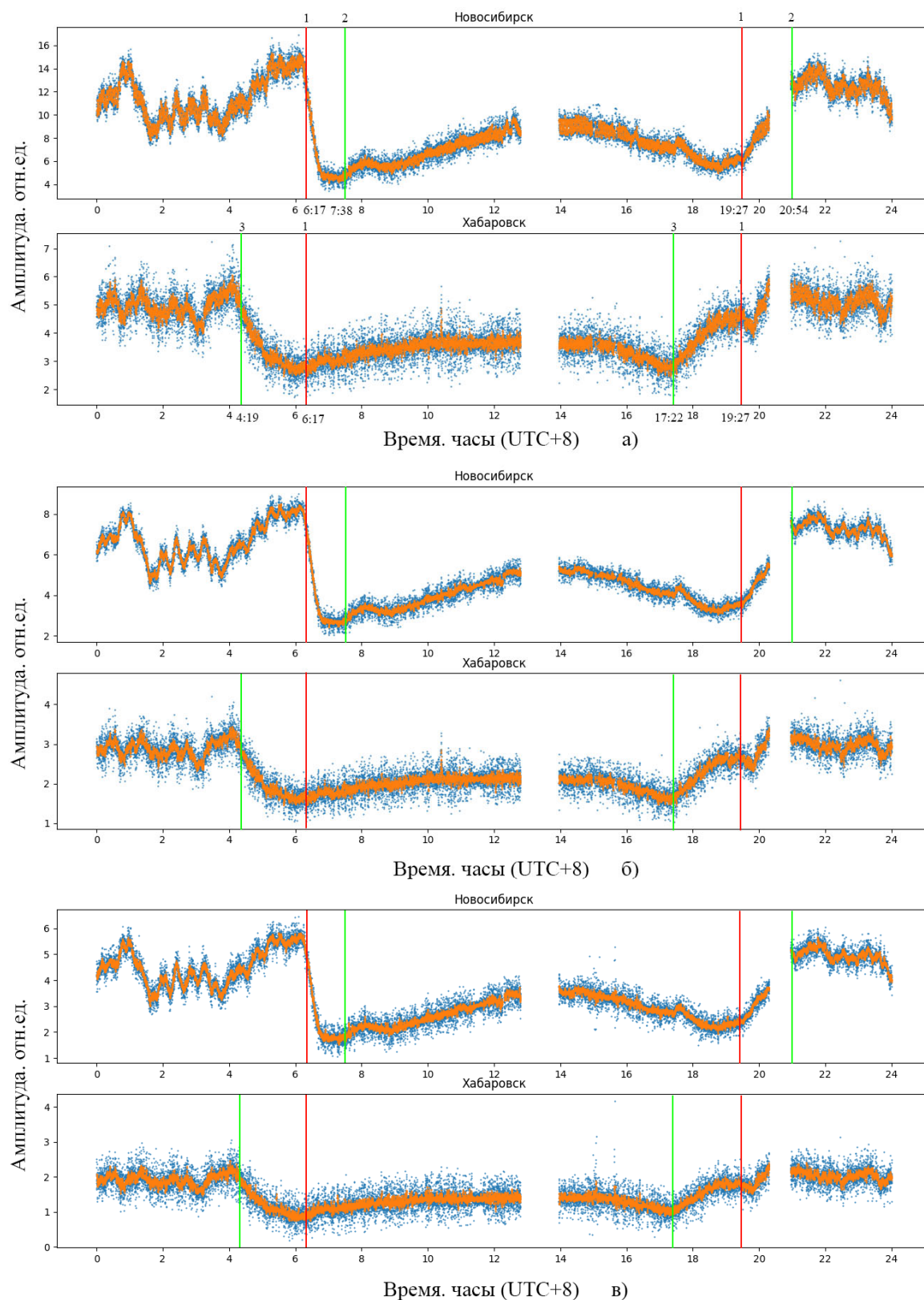


Рис. 4. Вариации амплитуды сигнала РСДН-20 передатчиков Новосибирск и Хабаровск, 12,649 кГц, 27-03-2026, рассчитанные различными методами, а) - квадратурное детектирование, б) - метод аналитического сигнала, в) - спектральный метод, Оранжевые-медиана, синие-флуктуации, 1,2,3-гражданские сумерки и заход солнца в Иркутске, Новосибирске и Хабаровске

Далее мы рассчитали суточные вариации амплитуды сигналов RSDN-20 на частоте 12,649 кГц, передаваемых из Новосибирска и Хабаровска, сравнили характеристики трех алгоритмов.

Для оценки применимости исследуемых методов к задачам мониторинга состояния волновода Земля–ионосфера выполнен анализ суточных вариаций амплитуды сигналов РСДН-20 за 27 марта 2026 года.

На рис. 4 представлены суточные вариации амплитуды сигнала частоты 12,649 кГц, зарегистрированные в г. Иркутске для передатчиков Новосибирск и Хабаровск. Для всех трёх методов наблюдается сходная картина суточных вариаций. Изменения амплитуды происходят вблизи моментов прохождения солнечного терминатора через трассу распространения.

Аналогичные закономерности ранее наблюдались при исследовании влияния освещённости трасс на характеристики ОНЧ-сигналов [Козакова et al., 2023]. На трассе Новосибирск–Иркутск наблюдается резкое уменьшение амплитуды около времени восхода Солнца, после чего сигнал переходит в дневной режим распространения. Для трассы Хабаровск–Иркутск переход имеет более плавный характер, что связано с различиями в геометрии освещения трассы.

Следует отметить, что несмотря на различие абсолютных значений амплитуды, обусловленное особенностями нормировки алгоритмов, все методы воспроизводят одинаковую структуру суточного хода сигнала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что все исследованные методы фактически реализуют выделение комплексной огибающей узкополосного сигнала и поэтому обеспечивают близкие результаты оценки фазы.

Наименьшее значение СКО получено для квадратурного детектирования (0,1208 рад), однако различия между алгоритмами не превышают нескольких процентов и находятся в пределах статистической погрешности измерений.

С практической точки зрения наиболее предпочтительным является метод аналитического сигнала, который обеспечивает сопоставимую точность фазовых измерений при минимальном времени обработки данных.

Сравнение суточных вариаций амплитуды подтверждает, что все методы одинаково хорошо воспроизводят изменения условий распространения в волноводе Земля–ионосфера. Наблюдаемые минимумы и максимумы амплитуды согласуются с моментами прохождения солнечного терминатора и изменением модовой структуры волновода.

Полученные результаты согласуются с данными ОНЧ-наблюдений, демонстрирующими чувствительность параметров сигналов к изменениям ионизации нижней ионосферы во время солнечных вспышек и других гелиогеофизических возмущений [Ряховский et al., 2023].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение трёх методов определения амплитудно-фазовых характеристик сигналов РСДН-20: когерентного квадратурного детектирования, метода аналитического сигнала и спектрального метода на основе БПФ.

Показано, что после удаления линейного фазового тренда все методы обеспечивают близкие результаты определения фазы. Среднеквадратическое отклонение фазовых оценок составило 0,1208 рад для квадратурного метода, 0,1271 рад для метода аналитического сигнала и 0,1233 рад для спектрального метода.

Установлено, что методы квадратурного детектирования и аналитического сигнала обладают существенно меньшими вычислительными затратами по сравнению со спектральным методом.

Показано, что все исследованные методы воспроизводят одинаковые закономерности суточных вариаций амплитуды сигналов РСДН-20 на трассах Новосибирск–Иркутск и Хабаровск–Иркутск. Наблюдаемые изменения амплитуды связаны с прохождением солнечного терминатора и изменением параметров волновода Земля–ионосфера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козакова Е.Н., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ачкасов Н.С. Влияние освещённости трасс на амплитудные характеристики сигналов СДВ-диапазона // Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 2. – С. 154–162.
- Корсаков А.А. Вариации параметров ОНЧ-радиосигналов при распространении в волноводе Земля–ионосфера над территорией Северной Евразии в зависимости от солнечной активности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Иркутск, 2026. – 212 с.
- Полетаев А.С. Когерентное детектирование СДВ радиосигналов, распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Иркутск, 2019. – 217 с.
- Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А. Приемный тракт сверхдлинноволнового интерферометра // Датчики и системы. – 2018. – № 6 (226). – С. 51–60.
- Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г. Оценка ионизации нижней ионосферы во время солнечных вспышек по данным ОНЧ-наблюдений // Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 4. – С. 422–428.
- Barr R., Jones D.L., Rodger C.J. ELF and VLF Radio Waves // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62. – P. 1689–1718.
- Budden K.G. The Propagation of Radio Waves. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 669 p.
- Cohen L. Time-Frequency Analysis. – Prentice Hall, 1995. – 299 p.
- Helliwell R.A. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. – Stanford University Press, 1965. – 349 p.
- Oppenheim A.V., Schaffer R.W. Discrete-Time Signal Processing. – Pearson, 2010. – 1120 p.
- Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the Earth-Ionosphere Waveguide for VLF Radio Waves. – NBS Technical Note 300. – Boulder, 1964. – 84 p.
- The Russian VLF NAVAID System, Alpha, RSDN-20.