

УДК 524.6-77

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА
ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ ВНЕЗЕМНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ**

Дугин Николай Александрович^{1,2,3}, доктор физико-математических наук, профессор кафедры

e-mail: ndugin@yandex.ru

Нечаева Мария Борисовна³, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

e-mail: nech7@yandex.ru

Антипенко Александр Анатольевич², ведущий электроник

e-mail: alexander.antipenko2017@yandex.ru

Святов Кирилл Олегович², бакалавр

e-mail: svkiir@gmail.com

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

² ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³ Особое конструкторское бюро МЭИ, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматривается задача дистанционного исследования ионосферы Земли в спокойном и искусственно возмущённом состояниях методом просвечивания с применением радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ). Основные задачи - получение информации о влиянии ионосферных возмущений на характеристики проходящих через них сигналов, в том числе сигналов навигационных аппаратов с целью прогнозирования сбойных ситуаций в позиционировании наземных объектов. Приведены данные реальных экспериментов, сделанных на двухэлементном РСДБ НИРФИ ННГУ (РТ-15 и РТ-2) на частоте 1.6 ГГц и на трехэлементном комплексе ОКБ МЭИ (два РТ-64 и РТ-12) на частоте 8,4 ГГц.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, ионосфера, турбулентность, просвечивание, источники радиоизлучения, корреляционная функция, спектр мощности.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF IONOSPHERIC DISTURBANCES ON
THE PARAMETERS OF SIGNALS FROM EXTRATERRESTRIAL RADIO SOURCES**

Nikolai A. Dugin^{1,2,3}, Head of the Department of Scientific Research, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

e-mail: ndugin@yandex.ru

Maria B. Nechaeva³, Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

e-mail: nech7@yandex.ru

Alexander A. Antipenko², Leading Electronics Engineer

e-mail: alexander.antipenko2017@yandex.ru

Kirill O. Svyatov², Bachelor's Degree Student

e-mail: svkiir@gmail.com

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

² Radiophysical Research University of Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod

³ Special Design Bureau of Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

Abstract. This work addresses the task of remote investigation of Earth's ionosphere in both quiet and artificially disturbed states using the method of Very Long Baseline Interferometry (VLBI). The primary objectives include obtaining information about the influence of ionospheric disturbances on the characteristics of signals passing through them, including signals from navigation satellites, with the aim of predicting positioning failures for ground-based objects. Experimental data obtained from real experiments performed on a two-element VLBI system at the Scientific Research Institute of Radiophysics of Nizhny Novgorod State University (RT-15 and RT-2 antennas) at 1.6 GHz frequency and on a three-element system at the Special Design Bureau of Moscow Power Engineering Institute (two RT-64 and one RT-12 antennas) at 8.4 GHz frequency are presented.

Keywords: radio interferometer, ionosphere, turbulence, radio occultation, radio emission sources, correlation function, power spectrum.

Введение

Основной задачей данной работы является исследование влияния искусственно возмущенной ионосферы Земли на параметры корреляционного отклика (КО) радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ) на основе вторичной обработки данных нескольких реальных экспериментов.

Теоретические исследования по данной тематике проводились в начале 2000-х годов [1], основные эксперименты начаты в 2011 году на РСДБ сети НИРФИ в кооперации с другими радиоастрономическими обсерваториями. Наблюдались естественные радиоисточники на частоте 0,327 ГГц и сигналы ближних космических аппаратов (КА) на частоте 1,6 ГГц. Базовые расстояния интерферометров достигали 1500 км. Искусственная турбулентность ионосферы вызывалась работой нагревного стенда НИРФИ ННГУ «Сура». Исследовались вариации амплитуды КО и его «размывание» при возникновении турбулентности среды распространения излучения. Основные результаты опубликованы в работах [2-4].

Обработка данных экспериментов

При возобновлении работ по данной тематике в 2023 году эксперименты проводились на двухэлементном РСДБ НИРФИ ННГУ (РТ-15 и РТ-2) на частоте 1.6 ГГц при приеме сигналов навигационных КА и на трехэлементном комплексе ОКБ МЭИ (два РТ-64 и РТ-12) на частоте 8,4 ГГц по сигналам естественных внеземных радиоисточников. Результаты наблюдений КА на РСДБ НИРФИ частично опубликованы в работе [5].

Чтобы не потерять возможную полезную информацию, проводилась более полная обработка данных. Особой проблемой стало выделение тех параметров, воздействие на которые происходило наиболее сильно. Поскольку точных сведений о таких характеристиках не было, то было решено изучать практически все характеристики интерференционного сигнала.

Основными выбранными параметрами стали:

- 1) амплитуда максимума корреляционной функции – отражает степень когерентности сигналов, принятых двумя антеннами;
- 2) ширина максимума корреляционной функции – связана с масштабом неоднородностей, характеризует “размазывание” из-за турбулентности среды;



3) ширина спектра мощности – отражает динамику неоднородностей из-за доплеровского уширения, и характеризует “размазывание” спектра из-за турбулентности;

4) значение задержки, на которой находится пик корреляционной функции – характеризует фазовый сдвиг между сигналами, принятыми на двух антеннах интерферометра; определяется разницей путей распространения сигналов;

5) дисперсия или среднеквадратичное отклонение (СКО) этих параметров – позволяет отделить величину изменения параметров отклика; большая дисперсия/СКО амплитуды или ширины корреляционного пика указывают на нестабильность ионосферы.

Процедура обработки включала следующие этапы:

1) интерполяция данных: вследствие ограниченной полосы частот исходного сигнала, приводящей к значительному шагу дискретизации по задержке, выполнялось увеличение плотности точек методом кубического сплайна;

2) предобработка сигнала: нормировка по амплитуде, делением на максимум исследуемой функции; анализ первой производной; определение граничных точек по заранее установленному порогу амплитуды; выделение интервала, содержащего основной энергетический пик;

3) далее выполнялась аппроксимация гауссовой функцией.

Данная методика позволила существенно снизить влияние шумовой составляющей и получить искомые параметры сигналов для последующего сравнительного анализа временной динамики и влияния искусственных ионосферных возмущений. Расчеты производились в программной среде MATLAB R2024a по алгоритмам, которые создавались и корректировались в зависимости от задач эксперимента.

Для уверенного обнаружения вариаций пространственной задержки принимаемых сигналов требуется высокая точность измерений. При корреляционной обработке задержка вычисляется по точкам с дискретом, определяемым полосой приема. При работе по сигналам НКА полоса определяется структурой излучаемого аппаратами сигнала и не превышает 10 МГц для ГЛОНАССа и 20-30 МГц для других СРНС, что сильно ограничивает возможности точного измерения задержек. В настоящее время на аппаратуре РСДБ НИРФИ максимально возможная полоса приема 8 МГц, т. е. дискрет задержки 62,5 нс (или 18,75 м). Применение аппроксимации максимума КФ гладкой (гауссовой) функцией позволяет уменьшить погрешность в 4-5 раз. При работе по внеземным радиоисточникам со сплошным спектром излучения на комплексе ОКБ МЭИ полоса приема была 32 МГц, т. е. точность измерений повысилась в 4 раза. Экспериментальные данные характеризовались значительным уровнем шумов и существенно отличались между временными отсчетами. Однако анализ показал, что как корреляционные функции (КФ), так и спектры мощности (СМ) в большинстве случаев демонстрировали хорошо выраженный гауссовый пик, отличающийся кратковременностью во временной области и узкополосностью в частотной.

Некоторые результаты

Эксперимент на РСДБ комплексе ОКБ МЭИ РТ-64 (Медвежьи Озера)— РТ-12 (Медвежьи Озера) — РТ-64 (Калязин) проводился на частоте 8,4 ГГц с базами от 800 м до 152 км. Наблюдения внеземных радиоисточников через возмущенную область включались в штатный график по другим программам исследований. Поэтому чаще всего источники проходили рядом с основной областью нагрева. Предполагалось обнаружить турбулентность выше и ниже основной области (что было предсказуемо), а также возможность «сноса» зоны турбулентности из-за больших горизонтальных скоростей перемещения ионосферных возмущений.

На рис. 1 и 2 показано изменение амплитуды КФ от времени при наблюдении одного и того же источника два дня; стенд работал только во второй день. Эти данные для

инструмента с малой базой (800 м), когда излучение на антенны идет примерно по одной трассе. Видно увеличение вариаций амплитуды при работе стенда (отмечено на графике красным цветом), однако, заметна также одинаковая тенденция к уменьшению амплитуды оба дня. Т.е. определяется влияние на параметры сигнала не только ионосферы, но и нижних слоев атмосферы – тропосферы, которые можно считать разными для антенн на низких высотах.

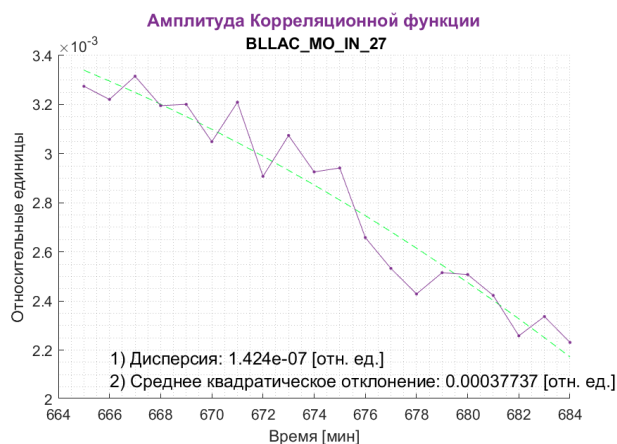


Рисунок 1 – Амплитуда КФ от времени в 1-й день на базе 800 м

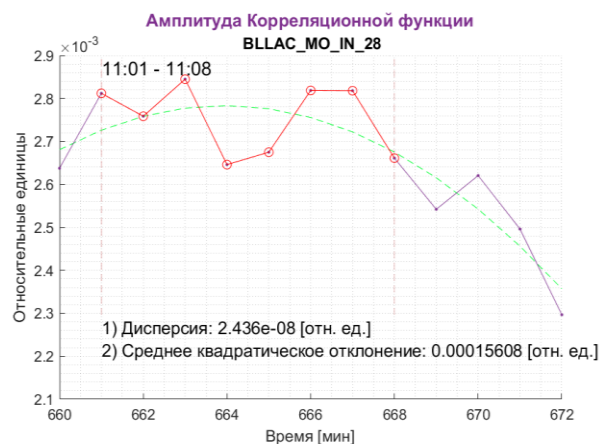


Рисунок 2 – Амплитуда КФ от времени во 2-й день на базе 800 м

На рис. 3 и 4 показаны временные зависимости ширины КФ и пространственной задержки для интерферометра с базой 152 км для источника, время наблюдения за которым наибольшее, а его траектория движения, наблюдаемая из Медвежьих Озер, наиболее близко проходит к зоне возмущения. При работе стенда (возмущении среды) в режиме “излучение-перерыв” с интервалом 5 минут, начинается повышенная нестабильность измеряемых характеристик корреляционного отклика. Видны сильные, практически периодические изменения параметров. Это основная закономерность, отмеченная в данной серии экспериментов. Данный эффект можно объяснить тем, что зона нагревалась довольно продолжительное время с небольшими перерывами, и когда проводилась запись сигналов, ионосфера ещё не успела стабилизироваться.

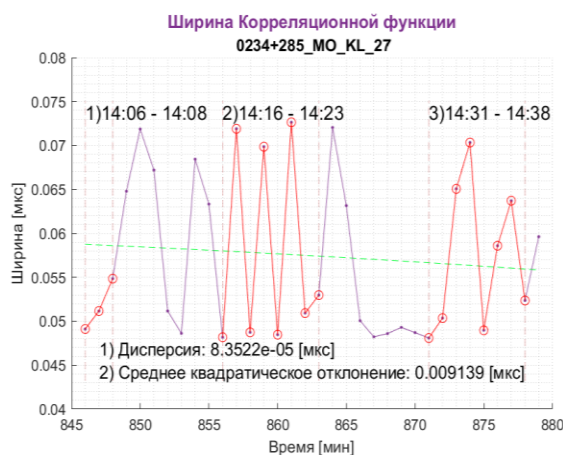


Рисунок 3 – Ширина КФ от времени на базе 152 км

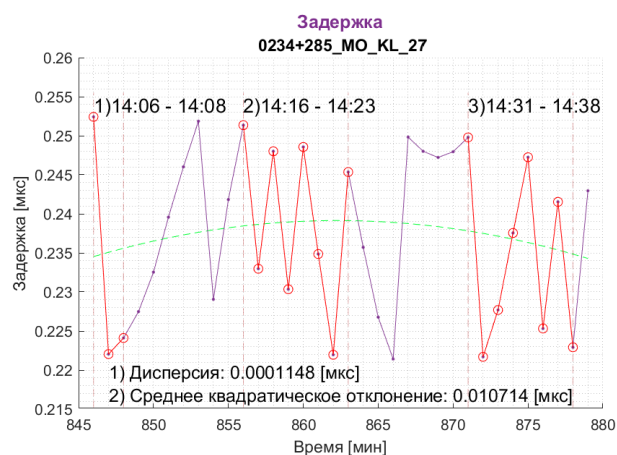


Рисунок 4 – Задержка КФ от времени на базе 152 км

В связи с тем, что источники проходили не точно через зону возмущения, можно сделать вывод, что необходимо увеличить длительность интервала наблюдений в любом

случае. Это подтверждается ранними результатами [2-4], когда интервалы излучения превышали 15 минут.

Заключение

Для ионосферных исследований методом радиопросвечивания использованы радиоинтерферометры с независимым приемом (РСДБ). Методика измерений позволяет определять как параметры ионосферы, так и ее влияние на характеристики сигналов, проходящих через возмущенные области. В качестве источников зондирующих сигналов можно использовать и естественные космические радиоисточники, и сигналы космических аппаратов.

Уникальная научная установка ННГУ — нагревный ионосферный стенд «Сура», позволяет вызывать искусственную турбулентность определенной области ионосферы и проводить измерения параметров сигналов различных радиоисточников, прошедших через эту зону. В дальнейшем, сопоставляя уже полученные данные с результатами новых подобных наблюдений источников при солнечной активности и геофизических возмущениях, возможно создание методов прогноза состояния ионосферы и ее влияния, например, на надежность функционирования навигационных и связных систем.

Проведен численный анализ результатов экспериментальных данных (вторичная обработка). При этом особое внимание было уделено основным параметрам спектрально-корреляционных характеристик отклика интерферометра.

Полученные результаты, показывают наличие влияния ионосферной турбулентности на характеристики корреляционного отклика при длительных наблюдениях. Измерения проводились в различных частотных диапазонах, что увеличивает информативность проводимых исследований. Для более точных результатов планируется провести отдельные эксперименты, когда наблюдаемые объекты будут проходить точно через зону возмущений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: госзадание FSWR-2023-0038.

Список литературы:

1. М.Б. Нечаева. Теоретическое и экспериментальное исследование флуктуаций волновых полей при интерферометрической диагностике турбулентных потоков. Кандидатская диссертация, 2005.
2. Гавриленко В.Г., Дугин Н.А., Нечаева М.Б. Применение метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой для исследований пространственно-временной структуры турбулентности области ионосферы, возмущённой мощным радиоизлучением (теория, подготовка экспериментов) – Препринт № 539. Нижний Новгород, 2011, 24с.
3. Дугин Н.А., Гавриленко В.Г., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В., Калинин А.В., Чагунин А.К. Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ-НИРФИ-Ирбене. Первые результаты. Вестник ННГУ, 2013, часть 1, №1, С.79-85.
4. N. Dugin, A. Antipenko, Vl. Bezrukovs, V. Gavrilenko, A. Dementjev, A. Lesins, M. Nechaeva, I. Shmeld, S. Snegirev, Yu. Tikhomirov, J. Trokss. Radiointerferometric researches of ionosphere at radio raying by signals of space satellites. //Baltic Astronomy, 2013, v.22, №1, pp.25-34.



5. Н.А. Дугин, А.А. Антипенко, К.О. Святков, К.П. Стручев, Ю.В. Тихомиров. Применение РСДБ для исследования влияния искусственной турбулентности ионосферы на параметры сигналов космических аппаратов. Труды XXVIII научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, ННГУ, 14-25 мая 2024г. С. 157-160 (электр.).

