

УДК 550.388.1

## МЕТОДИКА МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ: СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Суворова Мария Евгеньевна<sup>1</sup>, аспирант

e-mail: [suvorovamaria21@yandex.ru](mailto:suvorovamaria21@yandex.ru)

Шиндин Алексей Владимирович<sup>1,2</sup>, кандидат физико-математических наук, директор

e-mail: [shindin@rf.unn.ru](mailto:shindin@rf.unn.ru)

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** Описан метод многочастотного доплеровского зондирования (МДЗ) для диагностики ионосферных возмущений с высоким пространственным разрешением. Приводятся результаты его полноволнового численного моделирования. Показано, как численное моделирование позволяет оптимизировать методику цифровой обработки сигнала в реальном эксперименте. Предлагается подход, заключающийся в использовании метода МДЗ совместно с традиционными методами диагностики регулярной ионосферы, для обеспечения краткосрочного прогноза коротковолновой радиосвязи на транспорте.

**Ключевые слова:** многочастотное доплеровское зондирование, диагностика ионосферы, профиль электронной концентрации, численное моделирование.

## METHOD OF MULTI-FREQUENCY DOPPLER PROBING OF THE IONOSPHERE FOR DIAGNOSTICS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION: COMPARISON OF THE RESULTS OF REAL AND NUMERICAL EXPERIMENTS

Suvorova Maria Evgenievna<sup>1</sup>, Doctoral Student

e-mail: [suvorovamaria21@yandex.ru](mailto:suvorovamaria21@yandex.ru)

Shindin Aleksei Vladimirovich<sup>1,2</sup>, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Director

e-mail: [shindin@rf.unn.ru](mailto:shindin@rf.unn.ru)

<sup>1</sup> Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** A multifrequency Doppler sounding (MDS) method for diagnosing ionospheric disturbances with high spatial resolution is described. The results of its full-wave numerical simulations, are presented. It is shown how numerical modeling allows one to optimize the technique of digital signal processing in a real experiment. An approach is proposed that consists

in using the MDS method together with traditional methods for diagnosing the regular ionosphere to provide a short-term forecast of short-wave radio communications in transport.

**Keywords:** multi-frequency Doppler sounding, ionospheric diagnostics, electron density profile, numerical modeling.

Первым проявлением нелинейного взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой был открытый в 1933 г. Люксембург-Горьковский эффект [1]. В 70-е годы XX века было показано, что излучение мощных КВ радиопередатчиков может непосредственно влиять на распространение радиоволн через возмущенную область ионосферы. Потенциальная возможность контролировать распространение радиоволн привела к бурному старту экспериментальных исследований во всем мире по активному воздействию на ионосферу. Параллельно начали развиваться методы дистанционной и *in situ* диагностики ионосферы: импульсное и линейно-частотно модулированное (ЛЧМ) зондирование ионосферы, двухчастотный прием когерентного спутникового сигнала, ракетные запуски и т.д.

Разработанный в 1980-х годах в ИЗМИРАН [2] и усовершенствованный в 2000-х годах в НИРФИ метод многочастотного доплеровского зондирования (МДЗ) является одним из методов активной диагностики ионосферы. Усовершенствования НИРФИ связаны с применением для зондирования коротких (длительностью до 200 мкс) импульсов и широкополосных радиоприемных устройств для регистрации сигнала, что обеспечило уменьшение высотного разрешения зондирования до 200 м и временного разрешения зондирования до 100 мс [3]. Приведенные характеристики на текущий момент являются лучшими среди всех методов дистанционной диагностики, включая метод диагностики с помощью радара некогерентного рассеяния (с предельным высотным разрешением 1 – 2 км), но, в отличие от последнего, область зондирования в методе МДЗ определяется шириной спектра отраженного от ионосферы зондирующего импульса и характерным размером ионосферного слоя. Большую ширину спектра можно обеспечить путем уменьшения длительности импульса, увеличением мощности зондирующего излучения, а также используя импульсы на нескольких разнесенных частотах. Для типичных условий экспериментов на стенде СУРА (длительность импульса 100 мкс, мощность зондирования ~300 кВт), диапазон высот зондирования составляет 10 – 15 км (для ширины спектра 1 МГц) в области отражения зондирующего излучения. Другим значительным ограничением метода является то, что восстановление профиля электронной концентрации получается в ходе решения обратной задачи, строго говоря являющейся некорректной. В этой связи возникает задача математической верификации метода МДЗ и определения границ его применимости в условиях зашумленности эфира и наличия узкополосных помех в полосе приема зондирующего излучения.

Метод МДЗ в усовершенствованной НИРФИ форме заключается в излучении коротких зондирующих импульсов на двух частотах в рабочем диапазоне стенда СУРА. Поскольку основной интерес представляет применение метода совместно с воздействием на ионосферу, то, (в случае стенда СУРА), в режим работы передатчиков вносятся следующие изменения: непрерывное воздействие заменяется на квазинепрерывное с паузами длительностью 30 – 50 мс. В середине пауз размещаются зондирующие импульсы. Поскольку стенд СУРА располагает тремя передатчиками, то второй передатчик дублирует первый (для увеличения мощности воздействия), а третий излучает только зондирующие импульсы на частоте, сдвинутой относительно частоты первых двух передатчиков на величину порядка 200 кГц вниз. Это необходимо для расширения спектра зондирующего излучения и, следовательно, расширения высотной области зондирования. Длительность



зондирующих импульсов выбирается достаточно короткой, чтобы, во-первых, также увеличить ширину спектра, и, во-вторых, чтобы зондирующее излучение само не привело к созданию искусственной ионосферной турбулентности. С другой стороны, амплитуда отраженных от ионосферы импульсов должна обеспечить достаточно большое соотношение сигнал/шум на приемнике и перекрытие спектров от всех трех передатчиков. Ключевая идея метода состоит в использовании каждой спектральной компоненты зондирующего излучения в качестве отдельной пробной волны. Фазовый спектр принимаемого сигнала будет определяться временными задержками прихода каждой спектральной компоненты, которые в свою очередь зависят от высоты отражения. Изменения фазы отдельных компонент регистрируемого сигнала между двумя излученными (диагностическими) импульсами определяются вариациями высоты отражения соответствующих спектральных компонент и связаны с ними интегральным уравнением. Вариации высоты отражения могут быть получены путем решения обратной задачи. Для того, чтобы иметь возможность работать со спектральными компонентами в цикле цифровой обработки отраженного сигнала используется операция расчета фазового спектра (Рисунок 1).

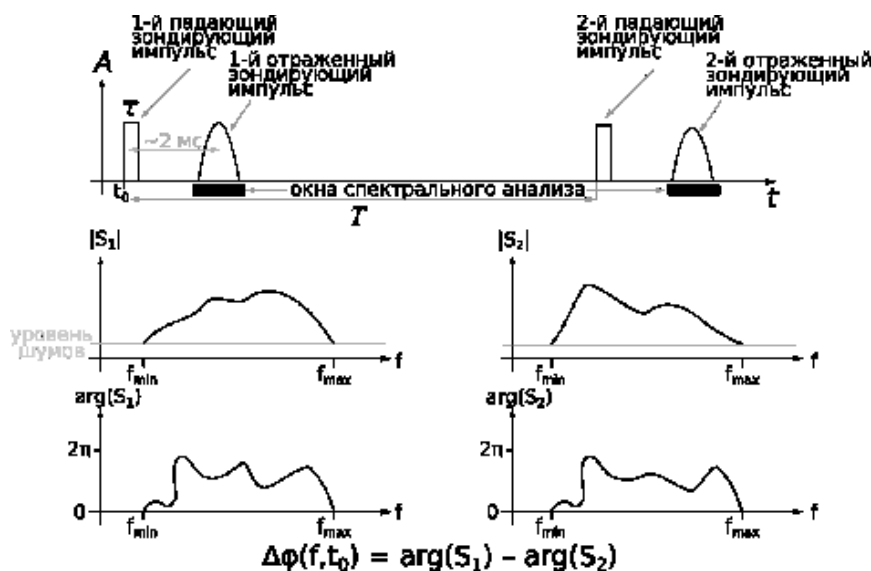


Рисунок 1 – Временная схема излучения и обработки двух последовательных импульсов в методе МДЗ

В статье приведены результаты численного эксперимента по моделированию отражения 100 мкс радиоимпульса от модельной динамически изменяющейся (по заданному закону) изотропной и неоднородной ионосферы методом конечных разностей во временной области (FDTD) [4]. В качестве падающей волны использовался короткий радиоимпульс с шириной спектра ~900 кГц. Используемый модельный профиль электронной концентрации представлял собой стационарный параболический слой, к которому добавлялось локальное возмущение в виде функции Гаусса, максимальная амплитуда которого составляет 10% от величины электронной концентрации невозмущенного плазменного слоя на высоте отражения волны накачки и с характерным временем нарастания и релаксации (Рисунок 2).

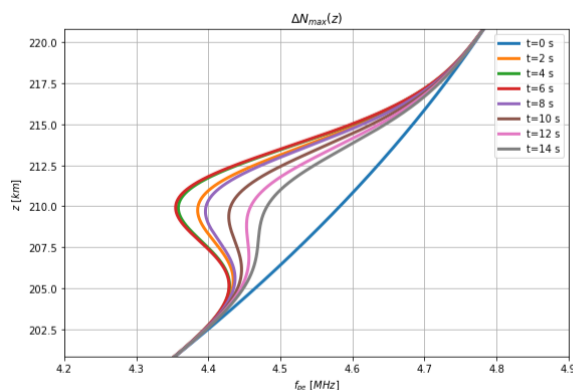


Рисунок 2 – Профили электронной концентрации в разные моменты времени, использованные в численном моделировании методом FDTD

В численном эксперименте FDTD использовался для вычисления комплексной амплитуды отраженного сигнала в точке вблизи нижней границы счетной области. Пространственный шаг счетной области составлял 6 м, временной шаг – 8 нс (частота дискретизации 125 МГц). Для того, чтобы приблизить результаты численного эксперимента к реальному, полученную запись сигнала приводили к квадратурной форме через перенос на промежуточную частоту (ПЧ), равной средней частоте зондирующих импульсов, и последующей децимации и сужения полосы до 1 МГц, что соответствует характеристикам реальных приемных устройств, задействованных в экспериментах. Далее процедура обработки данных повторяла цикл цифровой обработки сигнала в методе МДЗ. На выходе мы получаем данные об изменении высоты отражения для каждой из пробных волн (спектральных компонент).

Полученные данные вариации высоты отражения удобно представлять в виде тепловой карты (см. Рисунок 3). Верификация метода осуществлялась путем сравнения тепловой карты вариаций высот модельного (аналитического) динамического распределения электронной концентрации (Рисунок 3 (а)) и тепловой карты, полученной входе численного эксперимента и цикла цифровой обработки сигнала метода МДЗ (Рисунок 3 (б)). Сравнивая результаты, мы приходим к выводу, что в отсутствие шумов в сигнале, ошибка по высоте составляет величину порядка 20 м.

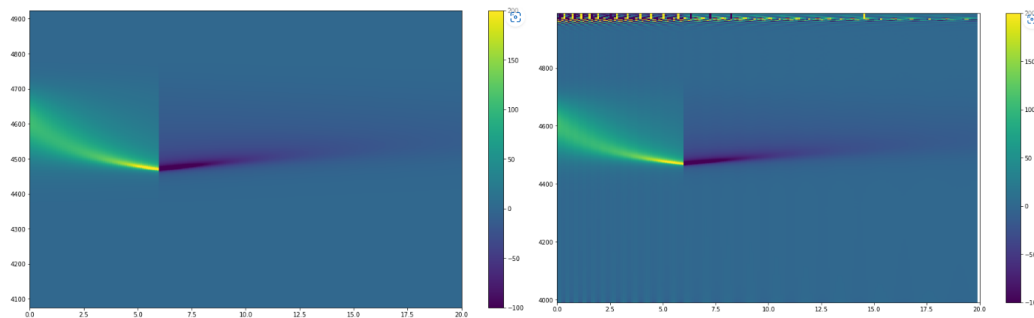


Рисунок 3 – Вариации высоты отражения зондирующего излучения в зависимости от частоты и времени. Панель слева – входная модель. Панель справа – результат численного эксперимента.

Горизонтальная ось – время в с. Вертикальная ось – частота в кГц

Затем численный эксперимент повторялся с добавлением в сигнал шумовой составляющей различной амплитуды. Из рисунка 4 видно, что при соотношении сигнал/шум 80 дБ на тепловая карта в значительной степени искажена, причем максимум искажений находится в области низких частот.

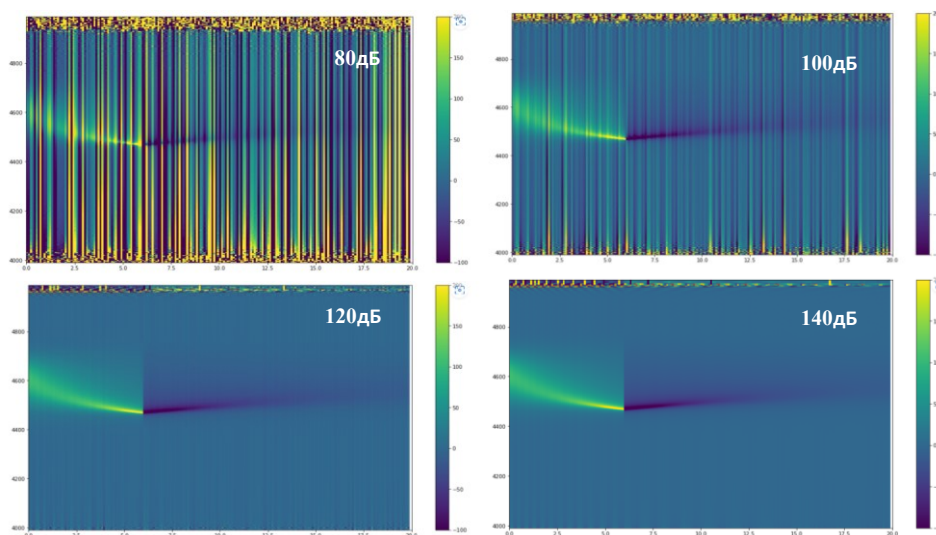


Рисунок 4 – Горизонтальная ось – время в с. Вертикальная ось – частота в кГц

До настоящего времени метод многочастотного доплеровского зондирования применяется только в экспериментах на стенде СУРА, хотя был также апробирован в ходе экспериментальных кампаний на стендах HAARP (2014 г., шт. Аляска, США) и Arecibo observatory (2018 г., Пуэрто-Рико, США). Во многом это объясняется сложностью в процедуре обработки данных и интерпретации получаемых этим методом результатов. Кроме того, данный метод предполагает применение современных широкополосных радиоприемных устройств и активно использует методы цифровой обработки сигналов.

В результате численного моделирования были выявлены следующие особенности метода МДЗ: требование монотонности и гладкости для функций, описывающих сам профиль и изменение профиля электронной концентрации в определенной области частот; принципиальная невозможность получения абсолютных значений на выходе (только вариации величин); в случае, если нужны абсолютные значения (например, при восстановлении профиля), требуется заложить в расчет некий опорный профиль электронной концентрации, относительно которого и будут рассчитываться изменения высот отражения. Последняя особенность метода приводит к непрерывному накоплению вычислительной ошибки в случае решения задачи восстановления профиля, что приводит к необходимости периодической привязки расчетов к опорным профилям. Также стоит отметить принципиальное ограничение на регистрируемые вертикальные движения высот отражений спектральных компонент: за время между двумя последовательными импульсами фазовый набег каждой компоненты не может превышать  $2\pi$  радиан.

Несмотря на все описанные ограничения, метод МДЗ является перспективным для исследования искусственных ионосферных возмущений, что в первую очередь определяется беспрецедентно высоким пространственно-временным разрешением. В дальнейшем планируется закончить верификацию метода и провести совместные эксперименты с использованием во время квазинепрерывного нагрева стендом СУРА одновременно метода МДЗ и быстрого вертикального зондирования, дающего профиль электронной концентрации за 1 с.

А.В. Шиндин выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FSWR-2023-0038 базовой части Государственного задания за доступ к вычислительной технике НИРФИ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения №21-72-10131.



### Список литературы:

1. Ютло У., Коэн Р. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн // УФН. 1973. Т. 109. Вып. 2. С. 371 – 373.
2. Ким В.Ю. Обратная задача многочастотной доплеровской диагностики искусственного возмущения электронной концентрации в ионосфере. ИЗМИРАН Москва. 1984. С. 15.
3. Shindin A.V.; Sergeev E.N.; Grach S.M.; Milikh G.M.; Bernhardt P.; Siefring C.; McCarrick M.J.; Legostaeva Y.K. HF-Induced Modifications of the Electron Density Profile in the Earth's Ionosphere Using the Pump Frequencies near the Fourth Electron Gyroharmonic // Remote Sensing. – 2021. – V. 13. – № 23. – С. 4895.
4. Dennis M. Sullivan, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method. 2013. doi:10.1002/9781118646700

