

---

**ИЗЛУЧЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

---

**РСДБ-ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРИЁМУ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**Н.А. Дугин<sup>1,2)</sup>, В.Г. Гавриленко<sup>2)</sup>, М.Б. Нечаева<sup>3)</sup>, А.А. Антипенко<sup>1)</sup>,  
А.Ф. Дементьев<sup>1)</sup>, Ю.В. Тихомиров<sup>1,2)</sup>, А.К. Чагунин<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>*Научно-исследовательский радиофизический институт*

<sup>2)</sup>*Нижегородский госуниверситет*

<sup>3)</sup>*Вентспилский международный радиоастрономический центр, Латвия*

В 2010 году в ФГБНУ НИРФИ были начаты РСДБ-эксперименты по приёму сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS [1–3] в частотном диапазоне 1,6 ГГц. В 2011–2012 годах сеть приёмных РСДБ пунктов была расширена за счёт ввода в действие пунктов в Вентспилсе (РТ-32 «Ирбене», Латвия), Евпатории (РТ-70, Украина) и Нижегородском госуниверситете им. Н.И. Лобачевского (РТ-2, Нижний Новгород), и проведена серия международных сеансов наблюдений НКА с базовыми расстояниями комплекса в пределах от 4 до 1500 км.

Основными задачами исследований являются: 1) высокоточное определение положения НКА с целью повышения эффективности глобальных навигационных спутниковых систем и 2) определение влияния среды распространения радиоволн (ионосферы) на характеристики сигналов НКА и, соответственно, на точность навигационных измерений.

Задача точного определения положения НКА глобальных навигационных спутниковых систем крайне важна. РСДБ-измерения угловых координат и скоростей НКА на интерферометрах с различной ориентацией базовых линий в сочетании с дальномерным методом, применяемым в спутниковых навигационных системах, позволит существенно повысить точность определения местоположения НКА.

Основная научная проблема, поставленная в данных экспериментах, – это исследование ионосферной турбулентности (в том числе искусственной) и её влияния на принимаемые в разнесённых пунктах сигналы. Информация о распределении электронов в ионосферной плазме и скорости перемещения неоднородностей электронной концентрации на высоте 180–700 км от поверхности Земли получается из анализа спектра мощности выходного сигнала интерферометра. Кроме исследований состояния ионосферы в спокойном (естественном) состоянии, проведены РСДБ-измерения параметров искусственной ионосферной турбулентности, вызванной воздействием на среду радиоизлучения мощного передатчика. Предполагается также выявление зависимости интенсивности флуктуаций электронной концентрации от режима воздействия. Сведения, полученные при исследовании ионосферы в спокойном состоянии и в искусственно возмущённом, позволяют делать прогнозы о явлениях, которые могут возникнуть в условиях повышенной солнечной или геомагнитной активности.

Во время экспериментов излучение от космического аппарата принималось сетью антенн в РСДБ-режиме. При исследовании возмущённой ионосферы воздействие на среду осуществлялось стендом микроволновой диагностики ионосферы «Сура» (НИРФИ, Россия). Под воздействием радиоизлучения мощностью около 500 кВт, на высоте более 180 км создавалась область искусственной ионосферной турбулентности с поперечным размером около 50 км. Сигналы НКА распространялись через область искусственной турбулентности и принимались одним из телескопов комплекса. Излучение до других радиотелескопов проходило через зону слабой турбулентности или через область, свободную от возмущений. Исходя из опыта проведённых экспериментов, выявлены некоторые особенности при обработке квазишумовых сигналов и в методике проведения наблюдений НКА с помощью комплекса, включающего антенны с различной эффективной площадью.

Начата обработка экспериментальных данных, полученных в марте и апреле 2012 года, с помощью коррелятора НИРФИ-4. Первичная обработка заключается в выполнении перемножения сигналов, принятых в РСДБ-пунктах, с предварительной частотной и фазовой коррекцией и получении корреляционных и спектральных характеристик сигнала интерферометра. Выходным сигналом коррелятора является двумерная функция в осях «амплитуда – частота – задержка».

В результате первичной обработки зарегистрированных данных трёх приёмных пунктов получены спектрально-корреляционные отклики двухэлементного интерферометра «НИРФИ – ННГУ» и трёхэлементного интерферометра «НИРФИ – ННГУ – Ирбене» для 12 навигационных космических аппаратов систем GPS и ГЛОНАСС. Анализ отклика интерферометра на сигналы НКА показал, что при включении стенда амплитуда выходного сигнала уменьшается, спектр при этом размывается по частоте, что связано с флуктуациями фазы сигнала на неоднородностях электронной концентрации в ионосфере в области воздействия.

В дальнейшие планы входит вторичная обработка экспериментальных данных с целью получения информации о параметрах ионосферы, развитие методики измерения координат НКА, выявление зависимости спектральных характеристик выходного сигнала интерферометра от режима воздействия на ионосферу.

Работа частично поддержана грантами РФФИ (10-02-00875), ЕСФ (2009/0231/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/151) и государственным контрактом №П683 от 20 мая 2010 г. (рег. номер 01201061443 от 10.09.2010).

- [1] Дугин Н.А., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В. /В кн.: Труды XVII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: НПФ ООО «Саквоее», 2011. Т.3. С.1858.
- [2] Дугин Н.А., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В. /В кн.: Тезисы IV Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение». – С.-Петербург: ИПА РАН, 2011. С.120.
- [3] Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Тихомиров Ю.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т.54, №3. С.177.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ И СПЕКТРА МИКРОВОЛНОВЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ

В.Е. Поляков<sup>1)</sup>, В.Ф. Мельников<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Нижегородский госуниверситет

<sup>2)</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт

В настоящее время разработаны методы, позволяющие описать поведение характеристик радиоизлучения (интенсивность, спектральный индекс, степень поляризации и т.д.) во вспышечной петле [1–3]. Изучение пространственного распределения параметров радиоизлучения можно использовать для диагностики места ускорения в петле и типа питч-углового распределения инжектируемых в петлю электронов [2], что, в свою очередь, важно для выбора между различными механизмами и моделями ускорения электронов.

Целью данной работы является исследование наблюдаемой динамики наклона частотного спектра и поляризации микроволнового излучения в различных частях вспышечной петли и получение ограничений на тип анизотропии инжектируемых электронов и место их инжекции. Для достижения этой цели: 1) определены физические параметры конкретных вспышечных петель (размер и ориентация петли, плотность и температура плазмы, магнитное поле и др.), 2) проведен анализ временных профилей интенсивности, спектрального индекса и степени поляризации в различных частях петли, 3) выбраны исходные параметры теоретической модели на основе наблюдаемых закономерностей динамики спектрального индекса и степени поляризации, 4) проведено моделирование динамики характеристик радиоизлучения в различных частях магнитной петли, 5) проведено сравнение модельных и наблюдаемых временных профилей.

В работе рассмотрены различные модели функций инжекции ускоренных электронов (место инжекции – в вершине, в основании; питч-угловое распределение – с продольной и поперечной анизотропией, изменяющейся во времени). При проведении моделирования радиоисточник представлялся как магнитная петля в форме полукружности, ориентированной в соответствии с расположением наблюдаемой вспышечной петли на солнечной сфере.

Проведен анализ микроволнового излучения с пространственным разрешением пяти событий (31 мая 2002 г., 12 августа 2002 г., 22 августа 2005 г., 24 августа 2005 г. в 02:51, 24 августа 2005 г. в 04:30) на основе данных наблюдений радиографа Нобеяма.

Проведено сравнение временных профилей спектрального индекса и степени поляризации, рассчитанных для описанных выше моделей, с соответствующими наблюдаемыми профилями.

На рисунке представлены результаты моделирования временных профилей интенсивности (верхняя панель), спектрального индекса (средняя панель) и степени поляризации (нижняя панель) для трех участков петли: двух оснований (левая и правая колонки) и вершины (средняя колонка) для события 12 августа 2002 г.

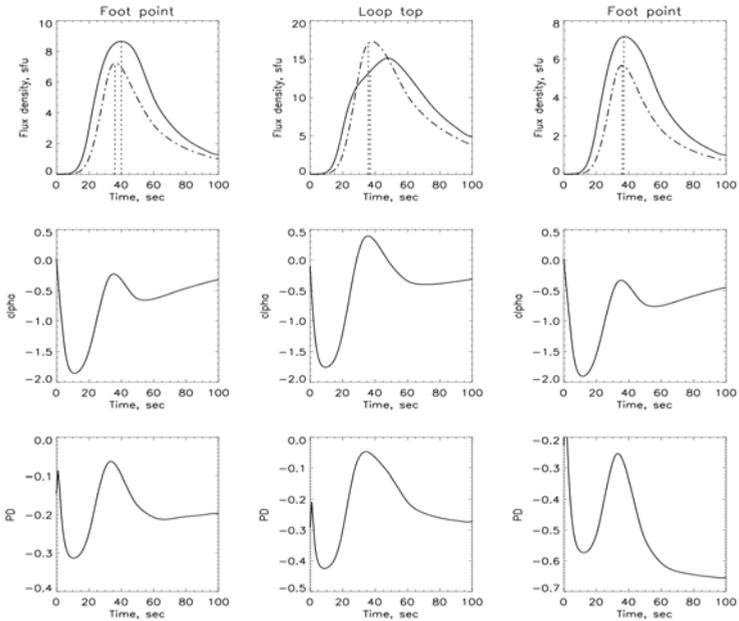


Рис.

В ходе работы получены следующие ограничения на место и тип пич-углового распределения инжектируемых электронов для изученных пяти событий:

31 мая 2002 г. – инжекция в вершине петли с уменьшением ширины гауссова распределения по углу,

12 августа 2002 г., 22 августа 2005 г. – инжекция в основании петли с увеличением угла, описывающего направление инжекции, и малая изотропной компонента в вершине петли,

24 августа 2005 г. с максимумом в 02:51, 24 августа 2005 г. с максимумом в 04:30 – инжекция в вершине петли с продольной анизотропией переходящей в поперечную.

Работа выполнена при поддержке грантов государственной программы «Кадры» № P683/20.05.2010 и РФФИ № 11-02-91175.

[1] Fleishman G.D., Melnikov V.F. // *Astrophys. J.* 2003. V.587, P.823.

[2] Мельников В.Ф., Пятаков Н.П., Горбиков С.П. /В кн.: Тр. Всерос. конф. «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика – 2009». 2009. С.293.

[3] Simões P.J.A., Costa J.E.R. // *Solar Phys.* 2010. V.266. P.109.

## **ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ ПО НАБЛЮДАЕМОМУ СПЕКТРУ И СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**А.С. Моргачев<sup>1,2)</sup>, В.Ф. Мельников<sup>3,2)</sup>,**

*<sup>1)</sup>Нижегородский госуниверситет*

*<sup>2)</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт*

*<sup>3)</sup>Главная астрономическая обсерватория РАН*

Работа посвящена методу определения параметров вспышечных петель и ускоренных нетепловых электронов по наблюдаемому спектру и степени поляризации микроволнового излучения.

Наблюдаемое микроволновое излучение вспышечных петель формируется преимущественно гиросинхротронным (ГС) механизмом ускоренными электронами с энергиями от 10 КэВ до 10 МэВ. Параметры ГС излучения очень чувствительны: а) к виду распределений электронов по энергиям иpitch-углам, б) к величине и направлению магнитного поля, в) к отношению плотности плазмы к составляющей магнитного поля, поперечной лучу зрения, г) к углу между лучом зрения и направлением магнитного поля. Значительное влияние на излучение вспышек в микроволновом диапазоне также может оказывать тепловое тормозное излучение и поглощение заполняющей петлю фоновой плазмы. В связи с этим на основе радиодиагностики существует возможность восстановления таких параметров как: величина и направление магнитного поля, концентрация и температура фоновой плазмы, переменные, характеризующие концентрацию ускоренных электронов, их распределение по энергиям иpitch-углам.

Решение поставленной обратной задачи реализуется следующим образом. На первом этапе создается точное физико-математическое описание связи характеристик радиоизлучения и параметров ускоренных электронов и плазмы в радиоисточнике. Определяемые параметры в радиоисточнике являются переменными данной модели. Следующим этапом необходимо произвести с заданной точностью подгонку параметров (переменных этой системы) под наблюдаемые характеристики радиоизлучения.

Для определения характеристик ГС излучения в данной работе использовалась программа численного расчета, разработанная в [1]. Программа производит расчет интенсивности излучения обыкновенной и необыкновенной волны пространственно однородного участка среды. В нем пользователем задаются значения концентрации ускоренных электронов, магнитного поля, концентрации и температуры фоновой плазмы. Распределение электронов по энергиям определено в виде степенного закона, для которого можно менять диапазон энергий электронов и показатель степени. Распределение электронов поpitch-углам принималось однородным. Возможно также неоднородное распределение с задаваемымpitch-угловым профилем, но на данном этапе работы оно не использовалось.

Подгонка характеристик расчетного радиоизлучения под наблюдаемое сводится к решению системы уравнений, где в правой части каждого уравнения стоит рассчитываемый поток или степень поляризации радиоизлучения на фиксированных частотах для набора восстанавливаемых параметров, а в левой – поток или степень поляризации наблюдаемого излучения.

Для решения этой задачи был применен ранее неиспользуемый для целей радиодиагностики вспыхивающих петель генетический алгоритм поиска глобального экстремума. Данный метод был протестирован при определении заданных пяти параметров вдоль модельной вспыхивающей петли. Результаты восстановления модельных значений концентрации ускоренных электронов, показателя энергетического спектра, магнитного поля, угла зрения и плотности фоновой плазмы приведены на рисунке. На нем сплошной линией изображены задаваемые параметры, а ромбиками – восстановленные значения. Пониженная точность определения концентрации фоновой плазмы при относительно низких ее значениях связано со слабым влиянием эффекта Разина на выбранных частотах, для которых рассчитывалось радиоизлучение.

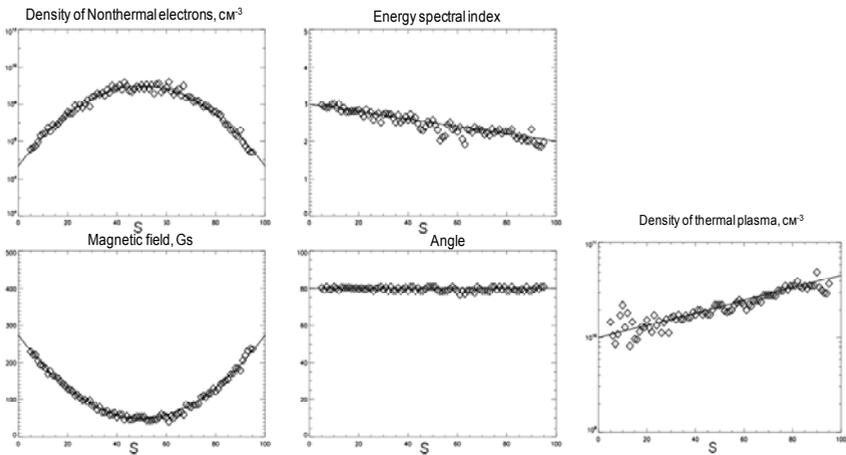


Рис.

Время расчета на персональном компьютере составило около 3 часов. Метод выгодно отличается от предложенного ранее алгоритма «Downhill simplex minimization algorithm» [2], для которого время расчета составляет около 30 часов.

[1] Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. // *Astrophys. J.* 2010. P.1127.

[2] Fleishman G.D., Nita G.M., Gary D.E. // *Astrophys. J.* 2009. P.183.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ НА ФОРМУ ИМПУЛЬСА И ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ФОТОНОВ В МУТНОЙ СРЕДЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

В.Г. Гавриленко, М.С. Жуков, Е.А. Сергеева

*Нижегородский госуниверситет*

Численный метод Монте-Карло позволяет моделировать распространение излучения в сильно рассеивающей и неоднородно поглощающей (мутной) среде [1]. Данный метод основан на многократном расчете случайных траекторий фотонов в исследуемой среде. Траектории моделируются на основании информации о пространственном распределении макроскопических параметров среды: среднего показателя преломления  $n$ , показателя поглощения  $\mu_a$ , показателя рассеяния  $\mu_s$ , и фазовой функции рассеяния  $p(s, s')$ .

В предыдущих работах было показано [2], что возможно проведение информативного моделирования для получения профиля импульса с целью выявления оптических параметров исследуемой среды. Показатели среды соответствуют значениям мягких тканей головного мозга человека [2, 3]. Одной из актуальных задач является исследование влияния неоднородностей поглощения на форму импульса и траектории движения фотонов. Теоретические исследования [4] позволяют рассчитать функцию распределения длин оптических путей (траекторий) для однородной среды.

Было проведено сравнение теоретической функций распределения длин оптических путей и результатов, полученных с помощью Монте-Карло моделирования. Моделировалась как однородная среда с параметрами  $\mu_a=0,01 \text{ мм}^{-1}$ ,  $\mu_s=10 \text{ мм}^{-1}$ ,  $g=0,9$ , так и неоднородная, геометрия которой изображена на рис. 1. Функция распределения длин оптических путей в эксперименте рассчитывалась следующим образом: между источником и приемником располагалась плоскость на расстоянии  $d/2$ , количество фотонов на определенной глубине пересекавших данную плоскость и попавших в детектор запоминалось. Каждый фотон умножался на свой статистический вес. Так находилось распределение длин оптических путей, которые характеризуются статистическим весом. В ходе моделирования было показано, что результаты счета и теоретические данные для среды с однородно распределенным поглощением  $\mu_a$  полностью совпадают (рис. 2). Влияние неоднородности на траектории движения фотонов показано на рис. 3: введение поглощающего слоя толщиной 2 мм, находящегося на глубине 5 мм с показателем поглощения  $3\mu_a$  изменяет распределение длин оптических путей.

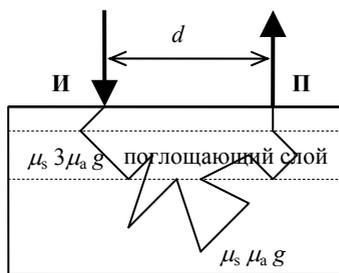


Рис. 1

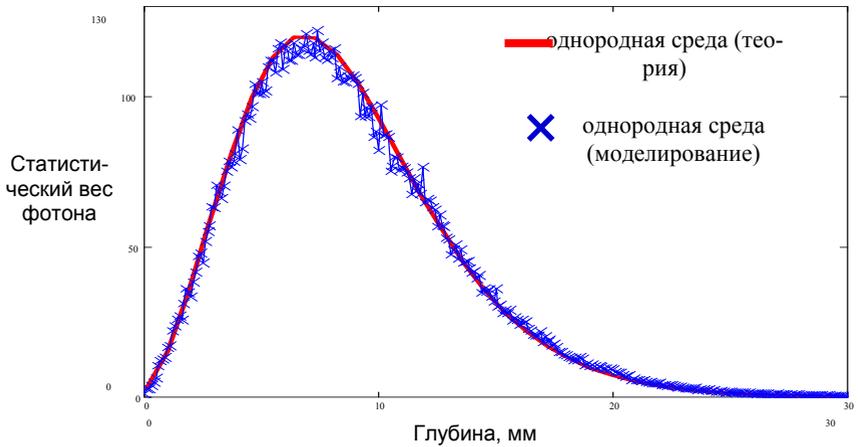


Рис. 2

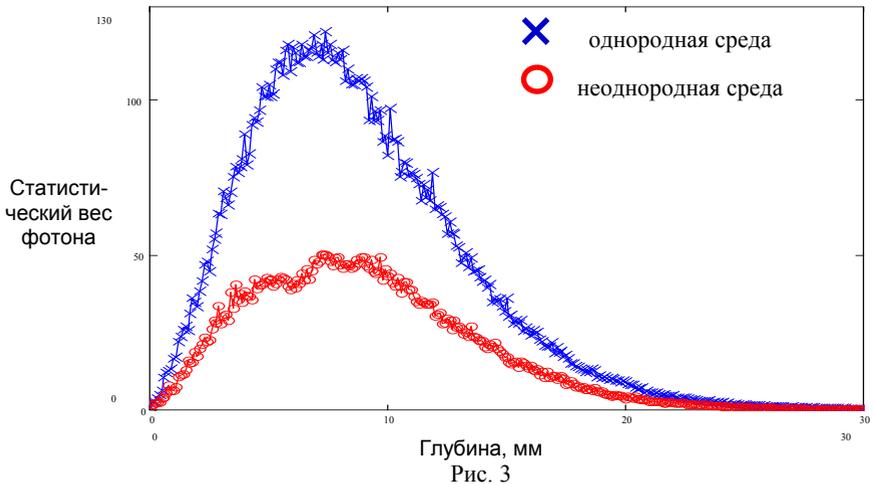


Рис. 3

- [1] Кандидов В.П. // УФН. 1996. Т.166. С.1309.
- [2] Гавриленко В.Г., Жуков М.С. //В кн: Тр. XV-й научн. конф. по радиофизике. /Ред. Якимов А.В. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2011. С.49.
- [3] Tuchin V.V. Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis. – Bellingham, SPIE Press, 2000.
- [4] Feng S., Zeng F. //Appl. Opt. 1995. V.34, No.19. P.3826.

## ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОЩНОЙ КВ-РАДИОВОЛНОЙ Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ

И.А. Болотин, В.Л. Фролов

*Научно-исследовательский радиофизический институт*

С самых ранних экспериментов по воздействию на ионосферу Земли мощными КВ радиоволнами было обнаружено, что наиболее сильные эффекты наблюдаются при воздействии мощными КВ радиоволнами обыкновенной поляризации. Это связано с возможностью резонансного взаимодействия волн О-поляризации с плазмой, в результате чего наблюдается интенсивная генерация искусственной ионосферной турбулентности вблизи точки отражения волны накачки. Поскольку волны Х-поляризации отражаются ниже уровня плазменных резонансов, их взаимодействие с ионосферой ограничивается омическим нагревом плазмы, развитием самофокусировочной неустойчивости и формированием решётки искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) в поле стоячей волны, образованной падающей и отражённой мощными радиоволнами.

В ранних работах было продемонстрировано, что при Х-нагреве, в отличие от О-нагрева, отсутствует генерация декаметровых ИИН [1]. На данный момент известно, что основным механизмом генерации декаметровых неоднородностей является резонансное взаимодействие волн с ионосферной плазмой, что объясняет отсутствие генерации упомянутых неоднородностей при Х-нагреве. Однако в относительно недавней работе [2] были представлены результаты экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия: 69,6° с.ш., 19,2° в.д.), демонстрирующие генерацию декаметровых ИИН при Х-нагреве, не менее интенсивную, чем при О-нагреве. Авторы работы [2] связывают появление эффекта с особыми условиями проведения эксперимента: длительный нагрев, вечерняя ионосфера, близость частоты волны накачки к критической частоте для волн Х-поляризации.

В сентябре 2011 и марте 2012 годов были проведены эксперименты по выявлению возможности генерации декаметровых ИИН при Х-нагреве в среднеширотной ионосфере. Нагрев осуществлялся с помощью стенда «Сура» (Н. Новгород, Россия: 56,15° с.ш., 46,1° в.д.) с выполнением всех описанных в [2] условий. Диагностика осуществлялась методом ракурсного рассеяния с регистрационным пунктом в г. Ростов-на-Дону на частотах, соответствующих (при данной геометрии) рассеянию на декаметровых неоднородностях. Во время проведения эксперимента рассеянный сигнал, регистрировавшийся ранее при О-нагреве, при Х-нагреве зарегистрирован не был. Это свидетельствует о невозможности генерации декаметровых неоднородностей в среднеширотной ионосфере при Х-нагреве. При этом во время эксперимента в пункте в г. Казань на модифицированном ионозонде «Циклон» [3] регистрировался рассеянный сигнал, что свидетельствует о наличии генерации ИИН с размерами  $l_{\perp} \approx 50\text{--}200$  м поперечно силовым линиям геомагнитного поля [4]. Механизм генерации таких неоднородностей неизвестен, однако теперь можно утверждать, что он не связан с резонансным взаимодействием мощной КВ-

радиоволны с ионосферной плазмой. Было установлено, что при X-нагреве времена развития и релаксации ИИН с размерами  $l_{\perp} \approx 50\text{--}200$  м равны соответственно 1 мин. и 3 мин., что примерно равно соответствующим показателям при O-нагреве. Однако интенсивность рассеянного сигнала при X-нагреве оказалась примерно на 6 дБ меньше, чем при O-нагреве.

Одновременно с этим велось наблюдение за крупномасштабными изменениями концентрации плазмы с помощью сигналов спутников GPS [5]. Как известно, при прохождении через возмущённую область сигналы спутников GPS приобретают дополнительный набег фаз, линейно связанный с полным электронным содержанием (Total Electron Content – ТЕС) на линии распространения сигнала. Выделяя на приёмнике значения фаз сигналов, можно построить зависимость ТЕС от времени. На рис. 1 изображён график такой зависимости для спутника, пролетавшего 22 марта 2012 года вблизи от магнитного зенита диаграммы направленности стэнда во время его работы на X-поляризации. Жирными линиями показаны примерные границы

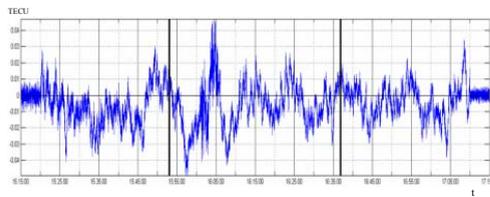


Рис. 1

диаграммы направленности стэнда. Как видно из рисунка, вариации ТЕС составляют 0,04 TECU, что соответствует изменению концентрации  $\Delta N/N \approx 5\text{--}10\%$  при продольных размерах неоднородностей  $l_{\parallel} \approx 10\text{--}20$  км. На рис. 2 изображён вейвлет-спектр вариаций ТЕС. Видно, что максимум вариаций находится по вертикальной оси вблизи значения 10 мин., что соответствует режиму работы стэнда (5 мин. нагрев, 5 мин. пауза), а по горизонтальной оси практически полностью лежит в пределах диаграммы направленности стэнда (примерные границы диаграммы направленности стэнда изображены жирными линиями). Это свидетельствует о том, что данные вариации действительно вызваны воздействием стэнда Сура.

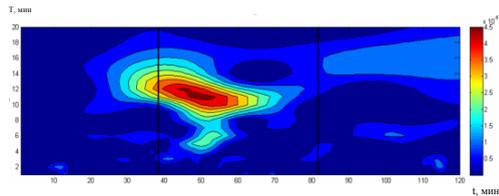


Рис. 2

Таким образом, по X-нагреву можно сделать следующие выводы. При нагреве ионосферы Земли мощными КВ-радиоволнами X-поляризации:

- декаметровые неоднородности не возбуждаются;
- присутствует генерация ИИН с масштабами  $l_{\perp} \approx 50\text{--}200$  м, но менее интенсивная по сравнению с O-нагревом;
- есть крупномасштабные (в масштабах диаграммы направленности стэнда) возмущения.

- [1] Hedberg A., Derblom H., Thide B., Kopka Y., Stubbe P. // Radio Science. 1983. V.19. P.840.  
 [2] Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К., Ритвелд М.Т. // Изв. вузов. Радиофизика, 2010. Т. 53, № 9-10. С.571.  
 [3] Акчурин А.Д., Юсупов К.М. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. «Информатика. Телекоммуникации. Управление». 2010. Вып.5(108). С.49.  
 [4] Болотин И.А., Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Юсупов К.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т.55, №1. С.66.  
 [5] Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006, 480 с.

### СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

С.М. Грач<sup>1,2)</sup>, В.В. Клименко<sup>3)</sup>, И.С. Мозеров<sup>1)</sup>, Е.Н. Сергеев<sup>2)</sup>, А.В. Шиндин<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Нижегородский госуниверситет

<sup>2)</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт

<sup>3)</sup>Институт прикладной физики РАН

В экспериментах, выполненных в сентябре 2010 г. на стенде «Сура» была обнаружена смена знака влияния волны накачки (ВН) на яркость оптического свечения ионосферы (ночного неба) в красной линии атомарного кислорода (уровень  $O(^1D)$ ) с длиной волны  $\lambda = 630$  нм [1]: при уменьшении критической частоты ионосферы  $f_{OF2}$  до значений, на 0,5 МГц превышающих рабочую частоту стенда, наблюдалась смена усиления (генерации) свечения на подавление уровня естественного свечения ночного неба.

Возбужденные атомы кислорода при воздействии мощных радиоволн возникают в результате двух причин: а) диссоциативной рекомбинации с участием электронов и ионов молекулярного кислорода и б) возбуждения атомов кислорода, находящихся в основном состоянии, при столкновениях с электронами с энергией, превышающей потенциал возбуждения уровня  $O(^1D)$   $I=1,96$  эВ. Поэтому нагрев электронов при воздействии мощных радиоволн на F-слой ионосферы оказывает двойное влияние на яркость свечения. Уменьшение коэффициента рекомбинации с ростом температуры должно приводить к уменьшению концентрации возбужденных атомов  $[O(^1D)]$  и, соответственно, уменьшению яркости, тогда как увеличение числа электронов с энергией  $\varepsilon > I$  при нагреве – к увеличению  $[O(^1D)]$  и яркости свечения. Появление электронов с  $\varepsilon > I$  связано с их ускорением плаз-

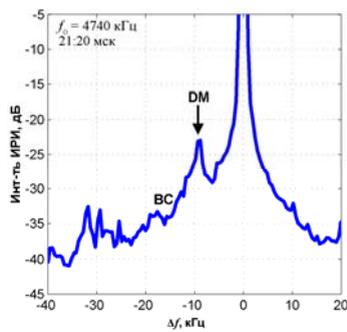


Рис. 1

менными волнами, возбужденными мощной волной О-поляризации. Для диагностики плазменных волн в возмущенной области ионосферы используются измерения искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). ИРИ является продуктом конверсии (рассеяния) плазменных волн в электромагнитные и представляет собой шумовую составляющую малой интенсивности ((-50) – (-80) дБ) в спектре отраженного от ионосферы сигнала мощной волны. Различные спектральные компоненты ИРИ соответствуют различным процессам возбуждения плазменных волн в ионосфере. Пример спектра ИРИ во время непрерывного воздействия ВЧ на ионосферу во время эксперимента 08.09.2010 приведен на рис. 1, где показаны основные спектральные компоненты ИРИ: широкополосная (ВС) и главный спектральный максимум (DM).

На рис. 2 для эксперимента 08.09.2010 показан временной ход яркости свечения, зарегистрированный с помощью фотометра, критической частоты  $f_{OF2}$ , высоты максимума слоя,

высоты отражения ВЧ и интенсивности ИРИ на различных отстройках от частоты ВЧ  $\Delta f = f - f_0$ , соответствующих компонентам DM ( $\Delta f = -10$  кГц) и ВС ( $\Delta f = -5$  кГц и  $\Delta f = -15$  кГц). Время импульсов непрерывного воздействия ВЧ длительностью 2 мин. показано на второй панели и соответствует глубоким провалам в интенсивности ИРИ. Во время 4-минутных пауз непрерывного воздействия излучались короткие (30 мс) импульсы ВЧ, которые не влияли на яркость оптического свечения, но обеспечивали интенсивное ИРИ. Из рисунка ясно видно, что во время смены знака воздействия (около 21:37), заметно (приблизительно на 6 дБ) уменьшается интенсивность ВС-компоненты ИРИ, тогда как интен-

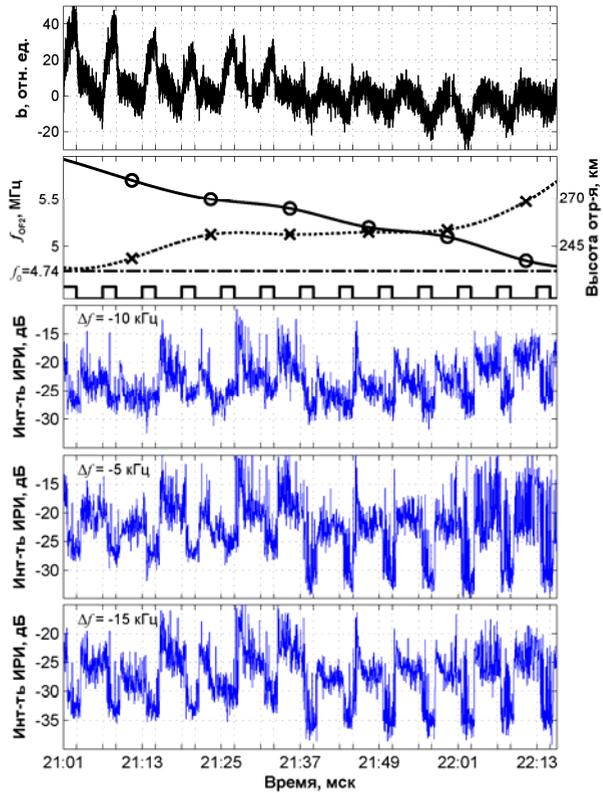


Рис. 2

тенсивность ИРИ увеличивается.

сивность DM-компоненты практически не изменяется. Кроме этого, установлено, что время характерные времена релаксации ИРИ (ВС-компоненты) после выключения ВН уменьшаются приблизительно в 1,5 раза. Указанные факты свидетельствуют о том, что за генерацию ВС-компоненты и ускорение электронов ответственны «одни и те же» плазменные волны, тогда как плазменные волны, ответственные за генерацию DM, не вносят существенного вклада в ускорение.

Работа поддержана грантами РФФИ 11-02-00125 и 12-02-00513.

- [1] Клименко В.В. и др. //Сб. докладов XXIII Всероссийской конференции «Распространение радиоволн». 2011. Т 2. С. 239.

## **ЛЧМ ИОНОЗОНД/РАДИОПЕЛЕНГАТОР – НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН**

**Г.Г. Вертоградов<sup>1</sup>, В.П. Урядов<sup>2</sup>, Е.Г. Вертоградова<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Южный федеральный университет*

*<sup>2</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт*

ЛЧМ ионозонд/радиопеленгатор – новый, не имеющий в мире аналогов, инструмент, позволяющий в реальном времени одновременно измерять все ключевые параметры ионосферного канала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики) во всем диапазоне частоте прохождения коротковолновых радиосигналов. После ввода в эксплуатацию этого инструмента в 2006 г. получен ряд новых научных результатов [1–7]:

На трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия) – Ростов-на-Дону протяженностью 11790 км обнаружены аномальные сигналы и определены механизмы их распространения. Установлено, что аномальные сигналы с задержкой  $\sim 2\text{--}3$  мс относительно прямого сигнала, наблюдаемые с азимутов углов прихода  $\alpha \approx 100^\circ$  и  $\approx 145\text{--}150^\circ$  обусловлены рассеянием радиоволн от горного массива Гималаи и Иранского нагорья соответственно. Аномальный сигнал с азимутами углов прихода  $\alpha \approx 340\text{--}20^\circ$  и задержкой  $\sim 11\text{--}12$  мс относительно прямого сигнала связан с рассеянием рикошетирующих и волноводных мод на мелкомасштабных неоднородностях, локализованных в F-области северной стенки главного ионосферного провала ио-низации. Показано, что за аномальные сигналы с задержками  $\sim 4\text{--}8$  мс относительно прямого сигнала, наблюдаемые в вечерние и ночные часы с азимутов  $\sim 70\text{--}100^\circ$ , ответственны квазипериодические структуры электронной концентрации экваториальной ионосферы с пространственным периодом  $\sim 400\text{--}00$  км, расположенные в окрестности геомагнитного экватора. Азимут угла прихода прямого сигнала  $\alpha = 115^\circ$ .

На трассе Кипр – Ростов-на-Дону протяженностью 1460 км обнаружены аномальные сигналы типа возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ). На основе измерений ДЧХ и УЧХ установлено, что такие аномальные сигналы обусловлены рас-

сеянием радиоволн, излученных ЛЧМ передатчиком на Кипре, от Иранского нагорья, Кавказских и Балканских гор.

На трассе Кипр – Ростов-на-Дону в вечерние и ночные часы обнаружен аномальный сигнал, протяженный по задержке ~ 4 мс и частоте ~ 14-19 МГц, регистрируемый на частотах выше МНЧ 1F прямого сигнала. Этот аномальный сигнал мы связываем с явлением F-рассеяния на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях с размерами ~ 8–10 м. Установлено, что неоднородности, ответственные за рассеяние, занимали обширную область среднеширотной ионосферы ~ 50-55°N, 35-48°E на высотах ~ 250-500 км.

На трассе ИЗМИРАН – СУРА – Ростов-на-Дону обнаружена кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности.

Разработан алгоритм восстановления пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере по данным измерений ДЧХ и УЧХ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ЛЧМ ионо-зонд/радиопеленгатор является мощным инструментом как для исследования механизмов дальнего и сверхдальнего распространения радиоволн, так и для диагностики методом загоризонтной КВ локации различных зон ионосферы Земли (экваториальной, среднеширотной и высокоширотной), получая в реальном времени информацию о состоянии ионосферы в планетарном масштабе, что открывает широкие перспективы для решения фундаментальных и прикладных задач в области физики ионосферы и распространения радиоволн на современном научно-техническом уровне.

Область применения ЛЧМ ионозонда/радиопеленгатора:

- наземная, авиационная и морская радиосвязь;
- радиопеленгация и радионавигация авиационных и морских судов;
- исследования дальнего распространения радиоволн;
- радарные исследования естественной и искусственной ионосферной турбулентности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-02-00177а.

- [1] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Шевченко В.Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т.12, №5. С.25.
- [2] Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т.52, № 4. С. 267.
- [3] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В. Ионосферный зонд-радиопеленгатор. Патент РФ № 2399062 от 15.07.2009 г., опубликовано 10.09.2010 г., бюлл. №25, 16 с.
- [4] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г., Понятов А.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т.53, № 3. С. 176.
- [5] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Вертоградова Е.Г., Кубатко С.В., Валов В.А. //Журнал радиоэлектроники. 2010. №12.
- [6] Вертоградов Г.Г., Кубатко С.В., Урядов В.П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16, №5. С.35.
- [7] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т.55, № 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГЕНЕРИРУЕМЫХ ИМИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Е.А. Ревунова

*Нижегородский государственный педагогический университет*

Магнитные облака солнечного ветра, являясь одним из основных проявлений солнечной активности, вызывают наиболее интенсивные геомагнитные бури. Их отличает монотонное вращение вектора магнитного поля со значительным модулем [1]. Высокая геоэффективность облаков объясняется заметной отрицательной величиной  $B_z < 0$  вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля в солнечно-эклиптической системе координат. Распределение магнитного поля внутри облака успешно описывается простой моделью бессилового цилиндрической поточковой трубки, в которой токи параллельны/ антипараллельны силовым линиям магнитного поля [2]. Распределение геоэффективной  $B_z$  компоненты вектора магнитного поля облака вдоль траектории прохождения через него Земли, определяется параметрами облака: значением поля на оси, углами ориентации облака в пространстве, прицельным параметром (расстояние от оси облака до линии Солнце-Земля), спиральностью и радиусом. Следовательно, и Dst-вариация геомагнитного поля, характеризующая интенсивность геомагнитной бури, вызываемая взаимодействием облака с магнитным полем Земли, зависит от параметров облака. Данная работа посвящена установлению диапазонов значений параметров магнитных облаков отвечающих за генерацию магнитных бурь различной интенсивности. Для этого проведено статистическое исследование влияния параметров магнитных облаков на их геоэффективные свойства.

Изучение влияния параметров магнитных облаков на их геоэффективность выполнялось на модельных магнитных облаках из предварительно созданной базы. Диапазоны изменения параметров модельных облаков были определены анализом параметров реальных магнитных облаков, зарегистрированных на КА ACE и WIND за период с 1998 по 2001 гг. [3]. Так были установлены диапазоны изменения параметров: магнитное поле на оси облака  $B_0$ , 40÷41 нТл с шагом в 9 нТл; радиус облака  $R_0$ , 1500÷4992 Re (радиус Земли) с шагом в 388 Re; полярный и азимутальный углы наклона оси облака  $\epsilon$  и  $\beta$  00÷1800 с шагом в 200; прицельный параметр  $b$  1250÷1252 Re с шагом в 278 Re; средняя скорость облака  $V$  350÷650 км·с<sup>-1</sup>; продолжительность регистрации облака на КА  $L$  10÷30 ч. с шагом 5 ч. В результате была создана 2 000 000 база модельных облаков.

В основу анализа влияния параметров магнитных облаков на интенсивность генерируемых магнитных бурь положена статистическая связь амплитуды  $B_z$  компоненты магнитного поля (в течение трех часов) и Dst-индекса. Соответствие класса геомагнитной бури по Dst-индексу значению  $B_z$  компоненты вектора магнитного поля приведено в общепринятой Табл. 1. Влияния параметров облака на его геоэффективность изучалось на событиях со следующими параметрами:  $L=25$  ч,

$R_0=3444 \text{ Re}$ ,  $V=450 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  (остальные параметры изменялись согласно диапазону и дискретности установленной при создании базы).

Диапазоны значений параметров облака отвечающих конкретному классу геомагнитных бурь, устанавливались по всем отобраным модельным облакам с учетом присутствия в них компоненты магнитного поля  $B_z < 0$  с амплитудами и продолжительностью согласно Табл. 1. Разделение модельных магнитных облаков по каждому из параметров позволяет

определить диапазоны их значений вносящих наибольший вклад в геоэффективные свойства облака.

В результате проведенного исследования влияния параметров магнитных облаков на их геоэффективные свойства установлено, что наибольший вклад в геоэффективность облака вносят угол наклона оси облака к плоскости эклиптики ( $\varepsilon$ ) и значение магнитного поля на его оси. Экстремальные бури генерируются в основном магнитными облаками с большими значениями угла  $\varepsilon$  ( $\pm 70-90^\circ$ ), и высокими отрицательными значениями геоэффективной  $B_z$  компоненты магнитного поля ( $\sim -44 \div -36$  нТл). Облака с небольшими значениями угла  $\varepsilon$  ( $\pm 30^\circ$ ) становятся источником слабых геомагнитных возмущений (Табл. 2).

Табл. 1

Интенсивность бури	Dst <sub>min</sub> , нТл	$B_z$ , нТл
Слабая	-30 – -50	-5
Умеренная	-50 – -100	-10
Сильная	-100 – -200	-15
Экстремальная	-200 – -350	-30

Табл. 2

Диапазоны изменения $\varepsilon$	Слабые бури	Умеренные бури	Сильные бури	Экстремальные бури
$\pm(-10 \div 30)$	77%	50%	44%	-
$\pm(30 \div 70)$	22%	34%	39%	55%
$\pm(70 \div 90)$	1%	18%	17%	45%
Диапазоны изменения $B_0$				
-44 $\div$ -36	2.8%	3%	20%	95.1%
-36 $\div$ -2	4.6%	6.1%	37.4%	7.9%
-26 $\div$ -18	19.4%	22.9%	28.5%	-
-18 $\div$ -8	36.8 %	42%	-	-
-8 $\div$ 1	-	-	-	-

Благодарю Бархатова Н.А. за постановку задачи и полезные рекомендации. Работа поддержана грантом РФФИ 12-05-00425 и программой Министерства образования и науки «Развитие научного потенциала высшей школы, 2012-2014 гг.».

- [1] Иванов К.Г. // УФН. 1974. Т.114, №2. С.382.
- [2] Бархатов Н.А, Калинина Е.А., Левитин А.Е. // Космические исследования. 2009. Т.47, №.4. С.300.
- [3] Zhang J., Liemohn M., Kozyra J., Lynch B. and Zurbuchen T. // J. Geophys. Res. 2004. V.109, No.A09101. P.10.1029.

## **НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА КАК ПРИЧИНА ВНУТРИМАГНИТОСФЕРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ**

**С.Е. Ревунов**

*Нижегородский государственный педагогический университет*

Исследование посвящено параллельному анализу результатов постпроцессинга вейвлет-составляющих низкочастотных (НЧ) возмущений параметров плазменных потоков солнечного ветра и возмущений горизонтальной компоненты геомагнитного поля (диапазона геомагнитных пульсаций), зарегистрированных вдоль меридиональной цепи станций во время различных по силе геомагнитных бурь. Ранее было замечено, что НЧ колебания параметров солнечного ветра проявляются в записях магнитограмм наземных обсерваторий [1]. В настоящем исследовании проверяется гипотеза о том, что часть НЧ внемагнитосферных возмущений, связанных с солнечными плазменными потоками, проникает внутрь магнитосферы и может проявиться в магнитных возмущениях на земной поверхности. Следовательно, они содержат сведения о типе подошедшего к магнитосфере возмущенного солнечного потока.

Основной целью исследования является установление типа подошедшего к магнитосфере возмущенного потока солнечного ветра на основе анализа составляющих вейвлет-спектров компонент геомагнитного поля вдоль высокоширотной части меридиональной цепи станций и параметров околоземной космической среды. Особое внимание уделяется высокоширотной области, т.к. в ней конфигурация силовых линий геомагнитного поля обеспечивает возможность прямого воздействия потоков солнечного ветра на магнитосферу.

В исследовании использованы минутные данные компонент геомагнитного поля с 7 станций IMAGE (<http://www.geo.fmi.fi/image>) в пределах 106–109 геомагнитного меридиана и данные параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля:  $B_z$ ,  $N$ ,  $P$  и  $VB_z$  (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). Интервалы данных отбирались совместно с 72 часовыми интервалами 12 дневных магнитосферных бурь различной интенсивности по показаниям индекса  $Dst$  (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>), зарегистрированных в периоды с 2000 по 2003 гг. В данную выборку попали слабые и умеренные бури ( $Dst > -100$  нТл), сильные бури ( $Dst > -200$  нТл) и экстремальные бури ( $Dst < -200$  нТл).

Обработка данных выполнена с помощью вейвлет-преобразования и последующего постпроцессинга результатов вейвлет-картин. Базовым вейвлетом в численных экспериментах была выбрана функция Добеши четвертого порядка [2]. Масштабные коэффициенты вейвлет-преобразования рассматривались в диапазоне от 4 до 15, что соответствует диапазону исследуемых периодов колебаний от 120 сек до 450 сек. Представляемая в случае использования техники вейвлет-преобразований избыточная спектральная информация сокращается путем нанесения на график только положения максимумов спектра. При этом образуется струк-

тура «вейвлет-скелета», которая позволяет сосредоточиться на ключевых особенностях динамики спектров [3].

Обнаружение НЧ возмущений параметров плазменных потоков солнечного ветра в колебаниях геомагнитного поля выполнено путем сопоставления и количественной оценки согласованности анализируемых скелетов на различных фазах геомагнитной бури (предбуревое состояние, начальная фаза, главная фаза). Вывод о согласованности любой пары скелетов делается на основе вычисления среднеквадратичного отклонения моментов регистрации локальных максимумов спектра.

Выполненное исследование показало следующие закономерности. 1) Предбуревая реакция магнитосферы в возмущениях геомагнитного поля на возмущенные параметры солнечного потока заключается в ее быстром ответе в высоких широтах и запаздывающем в субавроральной зоне. Действительно, область полярной шапки и аврорального овала подвержены прямому воздействию возмущенности переднего края солнечного потока, в то время как субавроральные области возмущаются возникающим при этом внутримангнитосферным источником, вызванным действием потока солнечного ветра. 2) Время реакции магнитосферы в возмущениях геомагнитного поля на начальной фазе бури на всех рассматриваемых широтах одинаково мало. Это возможно, если все станции получения анализируемых данных во время этой фазы попадают в область полярной шапки и регистрируют колебания в потоке солнечного ветра. 3) На главной фазе бури под действием потоков типа областей взаимодействия быстрого солнечного ветра с медленным, реакция магнитосферы в возмущениях геомагнитного поля на возмущенные параметры солнечного потока характеризуется быстрым ответом в высоких широтах и запаздывающим в субавроральной зоне. Под действием потоков типа магнитное облако с турбулентной оболочкой и/или с ударной волной время реакции на всех рассматриваемых широтах одинаково мало. Различие вызвано разной геометрией искривления силовых линий магнитосферы под действием разных потоков.

Таким образом, показано, что динамика составляющих спектров возмущений параметров солнечного ветра, отвечающих плазменным потокам, проявляется в спектрах НЧ диапазона на магнитограммах высокоширотных станций и может использоваться как диагностический инструмент.

Благодарю Бархатова Н.А. за постановку задачи и полезные рекомендации. Работа поддержана грантом РФФИ 12-05-00425 и программой Министерства образования и науки «Развитие научного потенциала высшей школы, 2012-2014 гг.».

- [1] Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. – М.: Наука, 1973, 208 с.
- [2] Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 464 с.
- [3] Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения //УФН, 1996. Т.166, №11. С.1145.

## НЕЛИНЕЙНАЯ СВЯЗЬ ПОЛЯРНЫХ (AU, AL) И СРЕДНЕШИРОТНЫХ (SYM, ASY) ИНДЕКСОВ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГЛАВНОЙ ФАЗЕ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

О.М. Бархатова

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*

Существующие количественные модели магнитосферных и магнито-сферно-ионосферных токовых систем имеют своими входными параметрами индексы геомагнитной активности. В ряде моделей учитывается, что магнитосферный кольцевой ток, западный и восточные электроджеты составляют единую токовую систему [1]. Необходимым условием этого является связь между индексами интенсивности симметричной (SYM) и асимметричной (ASY) частей кольцевого тока, и индексами интенсивности восточного (AU) и западного (AL) электроджетов. Основным результатом поиска линейных зависимостей на главной фазе геомагнитной бури явилось создание трехмерной модели объединенных эквивалентных токовых систем, которая включала бы в себя кольцевой ток и оба авроральных электроджета [2].

В представляемой работе выполнен поиск более сложной нелинейной связи индексов SYM и ASY с индексами AU, AL в периоды главных фаз 30 геомагнитных бурь различной интенсивности. Для установления связи между указанными параметрами используются искусственные нейронные сети (ИНС) Элмана с алгоритмом обратной связи и с алгоритмом нечеткой логики Fuzzy. Установление особенностей обнаруженной нелинейной связи между указанными индексами было проведено путем классификации всех рассматриваемых событий с помощью нейронной сети типа слоя Кохонена [3].

Основные результаты нейросетевых экспериментов по обнаружению нелинейной связи между индексами SYM, ASY и индексами AU, AL заключаются в следующем.

Установлена возможность успешного восстановления индексов AU, AL по данным индексов SYM, ASY. Примеры такого восстановления приведены на рис. 1.

Обнаружена временная задержка в развитии симметричной части магнитного поля кольцевого тока относительно восточного и западного электроджетов. Для SYM-AU величина задержки составляет 30

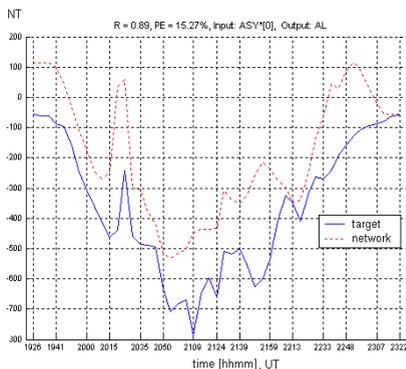


Рис. 1. Восстановление индекса AL по данным индекса ASY.

минут, для SYM-AL – 60 минут.

Обнаружено «смещение» в развитии авроральных электроджетов относительно асимметричной части кольцевого тока: если одна из авроральных токовых систем сильно развита, другая развита слабо. «Смещение» имеет место в сторону пары ASY-AL, что может быть связано с более интенсивным развитием западного электроджета.

Установление причин разного качества восстановления рассматриваемых событий проводилось нейросетевой классификацией всех исследуемых геомагнитных бурь. Рассматриваемые события разделились на два класса: в первый класс попали короткие события с малой интенсивностью, а во второй – длительные и интенсивные события.

При классификации по параметрам SYM и AU в первый класс попадает 80% наиболее часто восстанавливаемых событий; по параметрам SYM и AL в первый класс попадает 90% наиболее часто восстанавливаемых событий.

Согласно полученным результатам можно заключить, что хорошо восстанавливаемые события имеют небольшие амплитуды и длительности и, по нашему мнению, соответствуют «классическому» развитию геомагнитной бури и суббури. Физические ионосферные и магнитосферные процессы для этих событий имеют одну природу и один сценарий развития.

При классификации по параметрам ASY и AU 80% восстанавливаемых событий оказались во втором классе; по параметрам ASY и AL восстанавливаемые события не классифицируются. Около 90% редко восстанавливаемых событий попали во второй класс.

Таким образом, большинство событий, входящих в одну группу, попадают в класс интенсивных и продолжительных событий. Для параметров ASY и AU это «классические» события, которые в восстановлении встречаются часто. Для параметров ASY и AL это «неклассические» события, которые реже всех встречались в восстановлении. Такой результат может подтверждать гипотезу о существовании ионосферно-магнитосферной токовой системы, составными частями которой являются асимметричный кольцевой ток и оба авроральных электроджета.

Благодарю Бархагова Н.А. за постановку задачи и полезные рекомендации. Работа поддержана грантом РФФИ 12-05-00425 и программой Министерства образования и науки «Развитие научного потенциала высшей школы, 2012-2014 гг.».

- [1] Liemohn M. W., Kozyra J. U., Thomsen M. F., Roeder J. L., Lu G., Borovsky J. E., and Cayton T. E.. // *J of Geophysical Research*. 2001. V.106, No.A6. P.10,883.
- [2] Бархагов Н.А., Левитин А.Е., Церковнюк О.М. // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т.48, №4. С.520.
- [3] Медведев В.С., Потёмкин В.Г. *Нейронные сети. MATLAB 6.* – М.: Диалог-МИФИ, 2002, 496 с.

## МАГНИТОГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В ИОНОСФЕРЕ

Н.А. Бархатов

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет  
Нижегородский государственный педагогический университет*

В ионосфере, как проводящей среде, кроме акустикогравитационных волн (АГВ) могут распространяться магнитогравитационные волны (МГВ), скорость которых выше скорости АГВ, но ниже, чем скорость МГД волн [1]. Экспериментальное подтверждение существования МГВ в ионосфере на высотах слоя F2 получено в [2], где проанализированы их дисперсионные соотношения для условий среды с бесконечной проводимостью. В данной работе рассчитаны дисперсионные соотношения для МГВ в ионосфере с конечной проводимостью.

Анализ условий распространения МГВ в среде с конечной проводимостью  $\sigma$  в отсутствие регулярных ветров проводился на основе линеаризованной системы МГД уравнений. Для удобства вычислений рассматривается изотермичная атмосфера и решения ищутся в виде гармонических волн:

$$\partial / \partial t = -i\omega, \quad \partial / \partial x = ik_x, \quad \partial / \partial y = ik_y, \quad \partial / \partial z = ik_z + (2H)^{-1}.$$

Такая зависимость от вертикальной координаты  $z$  характерна для скорости и смещения, в то время как давление и плотность меняются с высотой как  $\sim \exp(ik_z z - z/2H)$ , ( $H$  – высота однородной атмосферы). Последние два условия обычно принимаются для АГВ в отсутствии магнитного поля [3]. Для среды с постоянной проводимостью магнитное возмущение в МГВ имеет ту же зависимость от  $z$ , что и смещение. Окончательно для компонент смещения при условии  $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{g}$  получена система однородных уравнений и дисперсионное уравнение, расщепляющееся на уравнение для модифицированных альвеновских волн  $\omega^2 + Q = 0$  и дисперсионное уравнение для МГВ:

$$\begin{aligned} & (\omega^2 + Q) \left[ \omega^2 - V_s^2 \left( k_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \right] - \omega^2 (V_s^2 + V_{AM}^2) k_{\perp}^2 + \\ & + V_s^2 V_{AM}^2 \left( k_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right) k_{\perp}^2 + V_s^2 \omega_g^2 k_{\perp}^2 = 0 \end{aligned}$$

где  $k_x^2 + k_y^2 = k_{\perp}^2 = k^2 \sin^2 \theta$ ,  $k_z = k \cos \theta$ ,  $k$  – волновое число,  $V_A$  и  $V_s$  – альвеновская и звуковая скорости,

$$V_{AM}^2 = \frac{V_A^2}{1 + i \frac{c^2}{4\pi\sigma\omega} \left( k_{\perp}^2 + k_z^2 - \frac{1}{4H^2} - \frac{ik_z}{H} \right)} - \text{квадрат мо-}$$

дифицированной альвеновской скорости в условиях конечной проводимости,

$$Q = V_{AM}^2 \left( \frac{1}{2H} + ik_z \right)^2, \quad \omega_g^2 = \frac{(\gamma - 1)g}{\gamma H} - \text{квадрат частоты Бранта-Вайсяля.}$$

Расчеты дисперсионных кривых выполнены в безразмерных величинах  $W = \omega / \omega_c$  и  $K = k / k_c$ , где  $\omega_c = H_0 g / V_S^2 (4\pi\rho_0)^{1/2}$  и  $k_c = \omega_c / V_S$  для параметров ионосферы, близких к реальным для высоты 250 км (проводимость  $\sigma = 10^{10} \text{ с}^{-1}$ , магнитное число Рейнольдса  $Re_m = 3 \cdot 10^2$ ,  $T = 10^3 \text{ К}$ ,  $\gamma = 1,4$  – показатель адиабаты,  $\beta = 0,02$ ,  $H = 3 \cdot 10^6 \text{ см}$ ,  $\mathbf{H}_0 = 0,5 \text{ Гс}$ ). Значения этих параметров ионосферы согласуются с ионосферной моделью MSI.

Нами предположено, что МГВ возбуждаются авроральным источником, а затем распространяются к средним широтам вдоль геомагнитного меридиана. Поиск МГВ был проведен сравнительным спектральным анализом колебаний индекса восточного электроджета AU, вариаций критических частот ионосферного слоя F2 на станциях вертикального зондирования ионосферы и вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля по дневным интервалам марта-апреля 2006 г. Сопоставление результатов динамического спектрального анализа ПИВ и геомагнитных возмущений с расчетными характерными частотами и скоростями показало согласованность результатов. Диапазон экспериментальных частот составляет  $10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$  при скорости распространения свыше 2000 м/с. Значения аналитически полученных фазовых скоростей составляют около 4000 м/с для быстрой МГВ моды и около 3000 м/с для медленной моды.

Сопоставление динамических спектров возмущений на станциях вдоль выбранного магнитного меридиана было расширено добавлением данных по еще двум станциям: FUR (48° N, 11° E) и LVV (50° N, 24° E), расположенным слева и справа от предполагаемого меридионального направления распространения волны. Оно продемонстрировало распространение МГВ из авроральной области к низким широтам в пределах магнитных долгот 1,6°–1,9°.

Таким образом, МГВ могут быть ответственны за часть перемещающихся ионосферных возмущений, и существует возможность их использования для мониторинга высокоэнергичных геофизических событий.

Работа поддержана грантом РФФИ 12-05-00425 и программой Министерства образования и науки «Развитие научного потенциала высшей школы, 2012-2014 г.».

- [1] Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме – М.: Энергоиздат, 1982, 136 с.
- [2] Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Григорьев Г.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т.52. С.761.
- [3] Григорьев Г.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т.42. С.3.

## МЕТОДЫ БЕСФАЗОВОЙ ГОЛОГРАФИИ БОЛЬШИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

С.П. Моисеев, А.В. Калинин

*Нижегородский госуниверситет*

Большие полноповоротные антенны с параболическими зеркалами диаметром в несколько десятков метров используются в дальней космической связи и радиоастрономии. Существует задача регулярной диагностики состояния подобных антенных систем, как с целью поддержания требуемых характеристик, так и с целью расширения рабочих частотных диапазонов в верхнюю область, а именно повышения усиления на высоких частотах.

Одним из эффективных методов электромагнитной диагностики является радиоголография. Она позволяет получить наиболее полную информацию о состоянии антенной системы при помощи восстановления комплексного распределения поля в апертуре. Традиционная радиоголография использует информацию о фазе и об амплитуде излучаемого антенной поля. Для проведения соответствующих измерений необходимо использование дополнительного оборудования, такого как вспомогательная антенна и двухканальный приемник, которые не всегда имеются в наличии. Кроме того, работа с миллиметровыми и субмиллиметровыми длинами волн существенно усложняет задачу фазовых измерений. В связи с этим актуален вопрос о восстановлении комплексного распределения поля в апертуре антенны с использованием информации только об амплитуде излучаемого антенной поля. Подобные методики называются бесфазовой радиоголографией.

Цель данной работы – развитие и применение методов бесфазовой радиоголографии для диагностики больших зеркальных антенн. В ходе исследования ставится задача разработки оптимальных и эффективных алгоритмов, которые могут быть практически использованы на действующих крупных антеннах. Предполагается реализация и сравнительный анализ не прямых методов восстановления комплексного поля в апертуре антенны по измеренным данным только об интенсивности поля в дальней зоне антенны.

В рамках выполненных исследований была проведена разработка трёх алгоритмов, реализующих различные методы бесфазовой радиоголографии, и их проверка с помощью численного моделирования. Радиоголографические методы, основанные на минимизации функционала заданной формы [1], были представлены двумя моделями, использующими математические алгоритмы глобальной оптимизации Nelder-Mead'a и BFGS. Итерационные методы, использующие прямое и обратное преобразование Фурье для распределения поля в апертуре и распределений поля в дальней (диаграммы направленности) или промежуточной зоне на каждом шаге, были представлены моделью, основанной на алгоритме Misell'a [2]. Для всех трех алгоритмов в качестве входных данных использовались амплитудные распределения в дальней зоне при различных параметрах дефокусировки.

Алгоритмы, основанные на принципе минимизации функционала заданной формы, были апробированы с данными, полученными методом численного мо-

делирования. Для алгоритма, использующего неградиентный метод оптимизации Nelder-Mead'a, были проведены численные эксперименты по восстановлению фазы для небольшого числа переменных (не более 400). Результаты показали сходимость алгоритма к верному решению, однако с увеличением числа переменных эффективность алгоритма (скорость) существенно падает. Для алгоритма, использующего квазиьютоновский градиентный метод BFGS, были проведены численные эксперименты по восстановлению как фазы при известной информации об амплитуде (до 2000 переменных в задаче), так фазы и амплитуды (до 900 переменных). Результаты численного моделирования алгоритма также подтвердили сходимость к верному решению. Увеличение количества используемых неизвестных в задаче приводит к существенному возрастанию вычислений, однако в отличие от алгоритма, использующего метод Nelder-Mead'a, применение метода BFGS позволяет использовать большие массивы данных и соответственно большее число неизвестных (примерно в 5–6 раз) при близких временах расчёта.

Алгоритм, основанный на методе Misell'a, был исследован как на численной модели, так и с применением экспериментальных данных, полученных на 70-метровой антенне «П-2500» (РТ-70). Ранее на этой антенне были проведены измерения методом традиционной радиоголографии и получены соответствующие результаты восстановления поля в апертуре. Результаты сравнения способностей к восстановлению как бесфазового алгоритма, так и традиционного радиоголографического метода подтвердили надежность бесфазового алгоритма и возможность его применения для исследования характеристик крупных антенн. На рисунке представлен пример восстановления фазы в апертуре бесфазовым способом.

Исследования, проведённые в работе, позволяют делать выводы о том, что алгоритм, основанный на методе BFGS, показывает лучшие результаты восстановления комплексного распределения по сравнению с итерационным алгоритмом при низких отношениях сигнал/шум. Оптимизация метода и использование высокопроизводительных вычислительных систем позволяют существенно расширить возможности его практического применения.

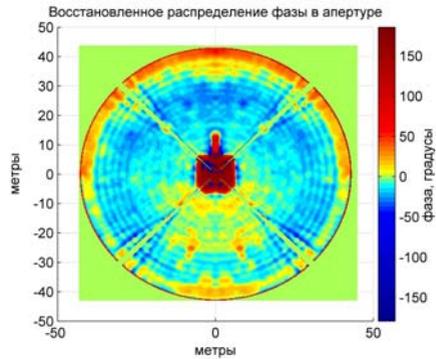


Рис.

[1] Isernia T., Leone G. // *Inverse Problems*. 1995. V. 11, No. 1. P. 183.

[2] Morris D. // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1985. V. AP-33. P. 749.

## ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

**О.А. Егоренков, В.А. Никитенко**

*Филиал Военной академии МО РФ, г. Череповец*

Частотно-временное представление радиоизлучения характеризуется такими параметрами, как частота, длина волны, длительность, амплитуда (мощность), начальная фаза, фазовая скорость, спектр [1]. В качестве подхода к моделированию поляризационного представления радиоизлучения наиболее удобно описание обобщенной эллиптически поляризованной волны в виде двух ортогональных линейно-поляризованных волн. Модель представлена проекциями вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  на координатные оси  $O_x$  и  $O_y$  при совпадении направления распространения с осью  $O_z$  (рис. 1а). В зависимости от значений амплитуд  $E_{xm}$ ,  $E_{ym}$  и фаз  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  ортогонально поляризованных волн с линейной поляризацией формируется необходимая поляризационная структура (рис. 1б).

Значения проекций вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  на координатные оси  $O_x$  и  $O_y$  (для гармонического колебания) определяются выражениями [2]:

$$E_x(t) = E_{xm} \cos(2\pi ft + \phi_x); \quad E_y(t) = E_{ym} \cos(2\pi ft + \phi_y).$$

В свою очередь:

$$E_{xm} = E_m \cos \psi; \quad E_{ym} = E_m \sin \psi; \quad \Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \arctg\left(\frac{2r}{(1-r^2)\sin 2\alpha}\right);$$

$$\psi = \arctg(p); \quad p = \sqrt{\frac{(\sin^2(\alpha) + r^2 \cos^2(\alpha))}{(\cos^2(\alpha) + r^2 \sin^2(\alpha))}},$$

где  $\alpha$  – угол наклона большой полуоси эллипса поляризации;  $r$  – эллиптичность эллипса поляризации.

Электромагнитное поле (ЭМП) обычно разделяют на два взаимосвязанных поля: электрическое и магнитное. Действие ЭМП обладает определенной направленно-

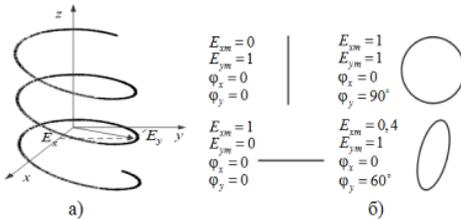


Рис. 1

стью, поэтому для его описания вводят векторные величины  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . В качестве подхода к моделированию пространственно-энергетического представления радиоизлучения традиционно используется вектор Пойнтинга, который характеризует направление и величину плотности потока мощности электромагнитного поля в каждой точке пространства.

Так как в электромагнитном поле вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  перпендикулярны, для описания ЭМВ достаточно одного вектора  $\vec{E}$ .

В качестве обобщенной модели предложено объединение трех описанных выше подходов к представлению радиоизлучения. Для предложенного объединения был выбран математический аппарат пространственной геометрии, основанный на преобразовании систем координат с использованием углов Эйлера [3], однозначно определяющих вращение вокруг координатных осей  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$  с использованием следующих матриц преобразования:

$$\mathbf{A}_x(\psi_x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_x & -\sin \psi_x \\ 0 & \sin \psi_x & \cos \psi_x \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_y(\psi_y) = \begin{pmatrix} \cos \psi_y & 0 & \sin \psi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_y & 0 & \cos \psi_y \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{A}_z(\psi_z) = \begin{pmatrix} \cos \psi_z & -\sin \psi_z & 0 \\ \sin \psi_z & \cos \psi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $\psi_x$ ,  $\psi_y$ ,  $\psi_z$  – углы вращения вокруг координатных осей  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$ .

Непосредственно преобразование имеет вид:

$$\mathbf{A}_z \times \mathbf{A}_x \times \vec{E}^T = \begin{pmatrix} E_x \cos \psi_z - E_y \cos \psi_x \sin \psi_z + E_z \sin \psi_x \sin \psi_z \\ E_x \sin \psi_z + E_y \cos \psi_x \cos \psi_z - E_z \cos \psi_z \sin \psi_x \\ E_y \sin \psi_x + E_z \cos \psi_x \end{pmatrix}.$$

В результате преобразования обобщенная модель радиоизлучения предстаёт в виде представления мгновенного значения вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в трехмерной системе координат (рис. 2), описываемого проекциями вектора  $\vec{E}$  на координатные оси  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$ :

$$E'_x(t) = E_x(t) \cos \theta - E_y(t) \sin \theta \sin \beta;$$

$$E'_y(t) = -E_x(t) \sin \theta - E_y(t) \cos \theta \sin \beta;$$

$$E'_z(t) = E_y(t) \cos \beta.$$

Таким образом, предложенная обобщенная модель обеспечивает описание всех необходимых параметров радиоизлучения, таких как, энергетические, частотные, временные, поляризационные и пространственные.

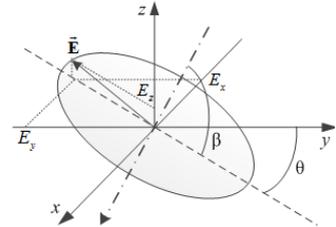


Рис. 2

- [1] Серков В.П. Распространение радиоволн и антенные устройства. – Л.: ВАС, 1981, 468 с.
- [2] Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972.

- [3] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973, 832 с.

## ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

О.А. Егоренков, В.А. Никитенко

*Филиал Военной академии МО РФ, г. Череповец*

Алгебраический подход к обработке сигналов в антенных решетках (АР) позволяет создавать все новые алгоритмы спектрального оценивания. В настоящее время известно большое число указанных методов, в том числе: максимального правдоподобия Кейпона, линейного предсказания (МЛП), максимальной энтропии Берга, Прони, собственно структурные (MUSIC (Multiple Signal Classification), поворота подпространства ESPRIT, минимальной нормы).

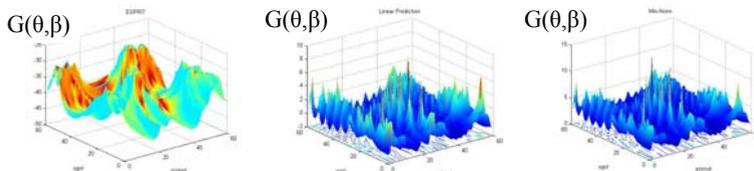
Наибольший интерес у исследователей в последнее время вызывают методы MUSIC, ESPRIT и минимальной нормы. В качестве исходных (базовых) данных в них используется, как правило, корреляционная матрица сигналов, принимаемых  $N$ -элементной АР.

При классификации по способам обзора пространства все методы углового спектрального оценивания можно разделить на группы с последовательным (методы максимального правдоподобия и его разновидности, максимальной энтропии, авторегрессионный, MUSIC, минимальной нормы) и параллельным (методы ROOT-MUSIC, ESPRIT и Прони) пеленгованием источников радиоизлучений (ИРИ).

Для сравнительной оценки методов спектрального анализа используются три показателя [1]. Первый показатель – разрешающая способность. Вторым показателем является величина смещения оценки. Указанные показатели могут оказаться противоречивыми: хорошее разрешение зачастую достигается за счет появления смещения оценки. Третий показатель – вариабельность оценки.

Имеющиеся результаты в литературе [2, 3] основаны на таких важных для оценки эффективности показателях, как: разрешающая способность, точность, устойчивость к дестабилизирующим факторам (вариабельность), вычислительные затраты.

Для сравнения потенциальных возможностей и устойчивости различных методов сверхразрешения было проведено имитационное моделирование работы методов и статистические испытания. Результаты эксперимента проиллюстрированы на рис., на котором – а) ESPRIT; б) Linear Prediction; в) Min-Norm; г) Capon Beamformer; д) MUSIC.



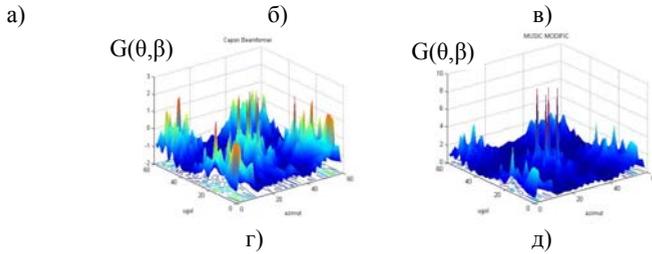


Рис.

Для сравнения возможностей основных методов была проверена их устойчивость к изменению различных параметров РИ (частота, эллиптичность эллипса поляризации, угол наклона большой полуоси эллипса поляризации, отношение сигнал/шум). В качестве имитатора сигналов была использована математическая модель РИ [4]. Результаты моделирования представлены в таблице. Здесь,  $\theta$  – азимут на ИРИ,  $M$  – математическое ожидание измерения азимута указанным методом,  $\sigma$  – СКО измерения азимута.

Табл.

Параметры	Music ( $\theta=30^\circ$ )		Esprit ( $\theta=30^\circ$ )		Capon Beamformer ( $\theta=30^\circ$ )	
	$M$	$\sigma$	$M$	$\sigma$	$M$	$\sigma$
$f$	29,8	0,3	29,7	0,1	29,8	0,2
Эллиптичность	30,5	0,3	29,2	0,4	29,4	0,1
Наклон оси	29	3,2	26,3	6,5	28,6	4,1
ОСШ	30,1	0,3	29,5	0,7	29,9	0,3

На основании проведенного анализа методов оценивания пространственных параметров радиоизлучений можно сделать вывод, что единого, эффективного метода для различных условий сигнально-помеховой обстановки и различных видов сигналов нет, однако с точки зрения потенциальных возможностей и устойчивости наиболее эффективными являются методы MUSIC и Capon Beamformer.

- [1] Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Связь, 2003.
- [2] Дрогалин В. В., Меркулов В. И., Родзивилов В. А., Федоров И. Б., Чернов М. В. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998, № 2. С. 3.
- [3] Гершман А. Б. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 6.
- [4] Егоренков О. А., Симонов А. Н. Разработка математической модели радиоизлучения // СРДР Сер. Б. 2011, № 95.

## СПОСОБ МОНОИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОБЪЕКТОВ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С ЛЧМ СИГНАЛАМИ

И.В. Чеботарь, В.А. Коротков, П.Н. Хазов

Филиал Военной академии МО РФ, г. Череповец

Основным недостатком большинства известных способов измерения радиальной скорости объекта и реализующих их радиолокационных систем (РЛС) с линейно-частотно модулированными (ЛЧМ) сигналами является отсутствие возможности моноимпульсного измерения радиальной скорости объекта одновременно с определением дальности до него.

Целью работы является обеспечение РЛС возможностью моноимпульсного измерения радиальной скорости объекта одновременно с определением дальности до него за счет вычисления разности скоростей изменения частоты зондирующего и отраженного ЛЧМ радиоимпульсов.

У ЛЧМ сигналов несущая частота изменяется в пределах длительности импульса по линейному закону со скоростью  $\Delta f/\tau_u$ , где  $\Delta f$  – девиация угловой частоты.

При отражении ЛЧМ радиоимпульса от движущегося объекта за счет влияния эффекта Доплера изменяется частота радиоимпульса:

$$f_o = \frac{\pm 2V_p}{\lambda},$$

где  $V_p$  – радиальная скорость объекта,  $\lambda$  – длина волны.

Следовательно, меняется и скорость изменения частоты внутри импульса:

$$\gamma = \frac{2f_o}{\tau_u},$$

где  $\tau_u$  – длительность отраженного радиоимпульса.

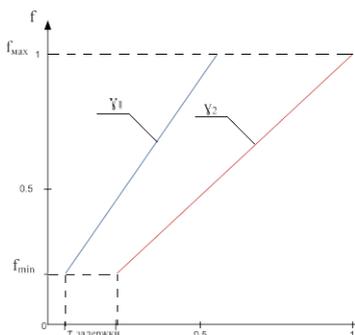


Рис.

Разница между скоростями изменения частоты зондирующего и отраженного импульсов небольшая (настолько, насколько отличается скорость движения объекта от скорости света) (см. рис.).

Таким образом, исходя из свойств ЛЧМ сигнала, можно сделать вывод о том, что скорость изменения частоты  $\gamma_2$  отраженного от объекта радиоимпульса отличается от скорости изменения частоты  $\gamma_1$  зондирующего радиоимпульса (при  $V_p=0$ ).

С учетом этого свойства ЛЧМ сигнала становится возможным измерить разность  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  и определить радиальную скорость объекта. Для этого установлена взаимосвязь между значением  $\gamma_{разн}$  и радиальной скоростью объекта  $V_p$ :

$$V_p = \frac{c}{4} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_1 - \gamma_{\text{разн}}}{\gamma_1} \right) \right].$$

Измерить незначительное отклонение скорости изменения частоты зондирующего импульса от скорости изменения частоты отраженного импульса можно, используя схему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и измеритель частоты.

Полученный на выходе схемы ФАПЧ непрерывный гармонический сигнал можно получить с помощью измерителя частоты и определить частоту биений  $f_0$  зондирующего радиоимпульса  $U_I(t)$ . Подставив измеренное значение  $f_0$  в следующую формулу

$$\gamma = f_0 / \tau_3,$$

можно вычислить скорость изменения частоты как зондирующего, так и отраженного импульса. Искомая разность скоростей изменения частоты зондирующего и отраженного импульсов определяется по формуле:

$$\gamma_{\text{разн}} = \gamma_1 - \gamma_2.$$

Полученное значение  $\gamma_{\text{разн}}$ , после подстановки его в приведенную выше формулу, позволяет рассчитать радиальную скорость объекта.

Таким образом, предлагаемый способ обеспечивает РЛС возможностью моноимпульсного измерения радиальной скорости объекта в реальном масштабе времени одновременно с определением дальности до него.

- [1] <http://www.dissercat.com/content/kriogennaya-sistema-fazovoi-avtopodstroiki-chastoty-dlya-sverkhprovodnikovogo-integralnogo-p>
- [2] Архипов А.И. Способ измерения радиальной скорости цели радиолокационной станцией. // Патент на изобретение № 2251710.
- [3] Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех /Ред. Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981, 416 с.

## **ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СТАНДАРТА WIMAX**

**В.П. Лихачев, В.В. Уткин, Л.Н. Бердинских, И.Ю. Голиков**

*Филиал Военной академии МО РФ, г. Череповец*

В современных комплексах радиомониторинга, целеуказания и огневого поражения необходимо передавать потоки информации различного объема, темпа поступления и формата [1]. Потребители этой информации имеют существенно различные задачи, требующие высоких значений скорости доступа и пропускной способности. Одним из вариантов решения таких задач являются радиостанции, обеспечивающие организацию высокоскоростных открытых и криптографически защищенных радиосетей передачи данных в тактическом звене управления в СВЧ-

диапазоне на стоянке и в движении. Технология высокоскоростной беспроводной передачи данных позволяет строить сети регионального масштаба в диапазонах до 66 ГГц [2].

Базовые станции (БС) сети WiMAX имеют управляемую мощность, высокий коэффициент подавления и автоматически конфигурируют сеть. Поэтому блокирование сети WiMAX возможно, например, только при радиоподавлении большинства БС, что обуславливает необходимость использования антенн с высоким коэффициентом усиления и высокоточного определения местоположения всех БС. В этой связи актуальны исследования особенностей определения с высокой точностью местоположения на поле боя или на позиции источников радиоизлучения (ИРИ).

Параметрами, несущими информацию о местоположении ИРИ стандарта WiMAX, являются взаимное запаздывание их сигналов относительно приемных пунктов (ПП) комплекса радиомониторинга (КРМ).

Оценка электромагнитной доступности ИРИ высокоскоростной беспроводной передачи данных показала, что сигнал радиомоста Agran-640 доступен для КРМ на дальности до 7 км, а сигнал радиостанции P-168MPAE – до 30 км.

Определение моментов начала и конца управляющих сообщений MAC, например, при исходном или базовом соединении – RNG-RSP (отклик диапазона) и при первичном управлении – REG-RSP (отклик регистрации), возможно на основе пространственно-временной обработки сигналов в антенной решетке (АР) каждого приемного пункта [3, 4], что позволит определить время задержки ЭМВ, т.е. разность хода.

Для данных условий и при использовании алгоритма линейной фильтрации оценок координат неподвижного ИРИ стандарта WiMAX получена зависимость точности определения его местоположения, представленная на рисунке. Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма целесообразно предварительно распознавать тип текущего радиосигнала [5, 6], формируемого БС.

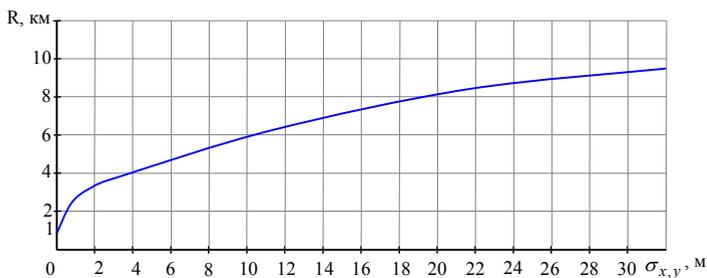


Рис. Зависимость точности определения местоположения от дальности до ИРИ стандарта WiMAX

Таким образом, наличие изменения энергетики сигналов управления БС обуславливает выбор этих интервалов времени для оценки координатно-информативного параметра (КИП) в пунктах приема КРМ. В качестве КИП пред-

ложено использовать моменты начала и конца интервала времени RNG-RSP или REG-RSP непрерывного широкополосного сигнала БС. Оценку КИП следует выполнять путем взаимной корреляционной обработки интервала времени, равного 4,5 мкс и предшествующего сообщению управления размерностью 8 бит, используемому во многих форматах сообщения (REG-RSP, RNG-RSP).

При длительном времени наблюдения сигналов неподвижного ИРИ стандарта WiMAX (не менее 0,1 с) и использовании алгоритма линейной фильтрации оценок координат, можно достичь точности определения его местоположения в десятки метров.

- [1] Куприянов А.И., Сахаров А.В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. – М.: Вузовская книга, 2003, 528 с.
- [2] Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009, 472 с.
- [3] Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993, 416 с.
- [4] Щесняк С.С., Попов М.П. Адаптивные антенны. – СПб: ВИККА им. А.Ф. Можайского, 1995, 612 с.
- [5] Нелюбов Д.М., Нырцов А.Н., Сазонов К.В., Уткин В.В., Чеботарь И.В., Сорокин С.В., Дикарев В.И. Устройство для распознавания радиосигналов. // Патент № 2365923, 15 с.
- [6] Нелюбов Д.М., Нырцов А.Н., Сазонов К.В., Уткин В.В., Чеботарь И.В., Сорокин С.В., Дикарев В.И. Устройство для распознавания радиосигналов. // Патент № 2368075, 15 с.