

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

© 2014 О.В. Филонин, И.В. Белоконов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 19.03.2014

В данной статье рассмотрен метод реконструкции пространственного распределения концентрации электронов в ионосферном слое с помощью колоний навигационных спутников.

Ключевые слова: ионосфера, локальная плотность электронов, математическая модель, обратные задачи, зондирование ионосферы радиоволнами.

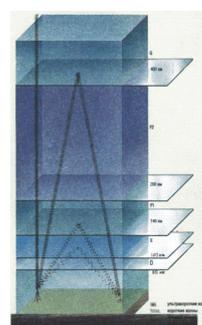
Под ионосферой принято понимать верхнюю часть атмосферы Земли, состоящей из мезосферы, мезопаузы и термосферы, сильно ионизирующейся вследствие облучения космическими лучами, идущими, в первую очередь, от Солнца. Ионосфера состоит из смеси газа нейтральных атомов и молекул (в основном азота N_2 и кислорода O_2) и квазинейтральной плазмы (число отрицательно заряженных частиц лишь примерно равно числу положительно заряженных). Степень ионизации становится существенной уже на высоте 60 километров. Протяженность ионосферы Земли – от 80 км до 1000 км над земной поверхностью (в пределах *АТМОСФЕРЫ* в *РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ВАН АЛЛЕНА*) [1]. Состоит из нескольких условных слоев, которые отличаются степенью концентрации в них электронов. Их принято обозначать по порядку снизу вверх: *D, E, F₁, F₂, G*. С физической точки зрения эти обозначения принято интерпретировать следующим образом:

- слой *D*: дневной слой, отражающий длинные волны;
- слой *E*: суточный слой, отражающий длинные волны;
- слой *F₁*: суточный слой, отражающий короткие волны;
- слой *F₂*: дневной слой, отражающий короткие волны (ночью он соединяется со слоем *F₁*);
- слой *G*: верхняя граница ионосферы.

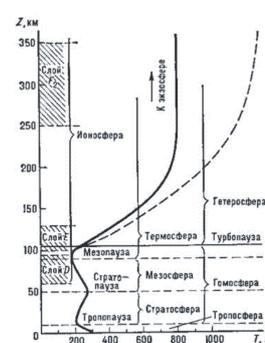
В самых нижних слоях *D* и *E* (слой Хевисайда - Кеннелли) ионизации подвергаются молекулы, в то время как в верхнем слое *F* ионизируются атомы. Длинные радиоволны отражаются от этих слоев, а более короткие проходят сквозь них без

изменений. Способность ионосферы отражать радиоволны делает возможным осуществлять радиовещание с большим радиусом действия на частотах приблизительно до 30 МГц (см. рис. 1 а)).

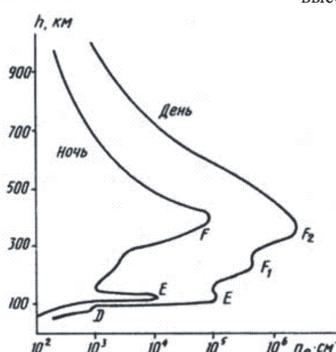
Классические методы изучения ионосферы с Земли сводятся к импульсному зондированию, то есть производится посылка радиоимпульсов и наблюдение их отражений от различных слоев ионосферы с измерением времени запаздывания и изучением интенсивности и формы отраженных сигналов [2]. Измеряя высоты отражения радиоимпульсов на различных частотах, опреде-



а) - характер отражения радиоволн от различных слоев



б) - зависимость распределения эквивалентной температуры от высоты



в) - типовое вертикальное распределение электронной концентрации в ионосфере для дневных и ночных условий

Филонин Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: phylonin@gmail.com

Белоконов Игорь Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий межвузовской кафедрой космических исследований. E-mail: i.belokonov@gmail.com

Рис. 1. Иллюстрации параметров ионосферы

для критические частоты различных областей (критической называется несущая частота радиоимпульса, для которой данная область ионосферы становится прозрачной), можно определять значение электронной концентрации в слоях и характерные высоты для заданных частот, выбирать оптимальные частоты для заданных радиотрасс. С развитием ракетной техники и с наступлением космической эры, появилась возможность непосредственного измерения параметров околоземной космической плазмы, нижней частью которой и является ионосфера [3].

Измерения электронной концентрации, проводимые с борта специально запускаемых ракет и по трассам полетов ИСЗ, подтвердили и уточнили ранее полученные наземными методами данные о структуре ионосферы [4], распределении концентрации электронов с высотой над различными районами Земли и позволили получить значения электронной концентрации выше главного максимума – слоя *F*. Ранее это было невозможно сделать методами зондирования по наблюдениям отраженных коротковолновых радиоимпульсов. Показано, что в некоторых районах земного шара существуют достаточно устойчивые области с пониженной электронной концентрацией, регулярные “ионосферные ветры”, в ионосфере возникают своеобразные волновые процессы, переносящие местные возмущения ионосферы на тысячи километров от места их возбуждения, и многое другое.

Создание особо высокочувствительных приемных устройств позволило осуществить на станциях импульсного зондирования ионосферы прием импульсных сигналов, частично отраженных от самых нижних областей ионосферы (станции частичных отражений). Использование мощных импульсных установок в метровом и дециметровом диапазоне волн с применением антенн, позволяющих осуществлять высокую концентрацию излучаемой энергии, дало возможность наблюдать сигналы, рассеянные ионосферой на различных высотах. Изучение особенностей спектров этих сигналов, не когерентно рассеянных электронами и ионами ионосферной плазмы [5] (для этого использовались станции некогерентного рассеяния радиоволн) позволило определить концентрацию электронов и ионов, их эквивалентную температуру на различных высотах вплоть до высот в несколько тысяч километров (рис. 1 б)). Концентрация электрических зарядов (электронная концентрация равна ионной) в земной ионосфере на высоте около 300 км составляет днем около 10^6 см^{-3} [6]. Плазма такой плотности отражает радиоволны длиной более 20 м, а более короткие пропускает.

Исследования состояния верхней ионосферы, в частности получение информации о высотном

распределении электронной концентрации, как правило, осуществлялось с помощью ионозондов установленных на космических летательных аппаратах (КЛА). Кроме того были созданы, в небольшом количестве, установки некогерентного рассеяния радиоволн, которые позволяли определять параметры ионосферной плазмы в диапазоне высот от 70 км до 1500 км. Но данные системы отличаются очень высокой стоимостью и не позволяют решить основную задачу диагностики параметров ионосферы, а именно *получение пространственной информации, например, об электронной плотности во всем шаровом слое ионосферы в реальном времени*. Дополнительным источником данных о состоянии ионосферы стал метод зондирования использующий высокоорбитальные спутниковые системы GPS/Galileo/ГЛОНАСС. В настоящее время насчитывается более 1000 наземных станций и приемников, регистрирующих сигналы навигационных систем. К сожалению, данные измерений с них находятся в базах данных, доступных для любого пользователя интернет на следующие сутки, то есть фактически реализован режим постмониторинга.

Таким образом, задача пространственной реконструкции параметров плазмы ионосферы с помощью современных навигационных систем, в сочетании с высокочувствительными приемниками, в совокупности с высокопроизводительными компьютерами оснащенными оказывается весьма актуальной. На современном этапе техника радиозондирования дает возможность с помощью спутниковых средств проводить зондирование ионосферы в широком диапазоне с применением различных положений приемопередающих систем и применять томографические методы [7], в основе которых лежат обратные некорректные задачи.

Важно отметить, что непосредственно оценить качество полученной информации в результате автоматизированной томографической реконструкции по данным сигналов низкоорбитальных навигационных и специализированных космических аппаратов [8] можно путем сравнения с данными от других источников информации об ионосфере. К таким системам относятся: спутниковые альтиметры, ионозонды, полученные от космических систем “просветного зондирования” вертикальные профили ионосферы, и данные от радаров некогерентного рассеяния. На рис. 2 приведена структура российской двумерной радиотомографической системы разработанной в ОАО “РОССИЙСКАЯ КОРПОРАЦИЯ РАКЕТНОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ”. На рис. 2 а), в) показана геометрия получения исходных данных способа определения

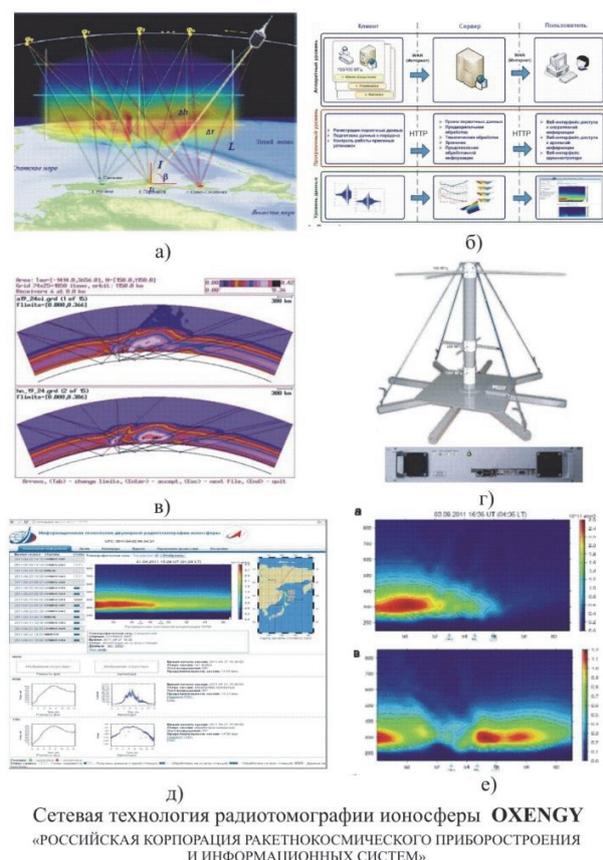


Рис. 2. Структура российской 2D радиотомографической сетевой технологии

электронной концентрации в ионосфере с использованием сигналов от низкоорбитальных спутников (150 и 400 МГц). На рис. 2 б) изображена функциональная схема информационной технологии 2D томографии ионосферы OXENGY. На рис. 2 г) показан приемный программно-аппаратный комплекс для томографии ионосферы второго поколения. На рис. 2 д), е) приведены примеры фрагменты веб-интерфейсов технологии OXENGY и реконструированных томограмм.

Методы спутниковой радиотомографии позволяют в течение короткого интервала времени (15 ÷ 20) минут получить глобальную информацию о структуре ионосферы. Как правило, эта информация представляется в виде сечения распределения электронной плотности практически до высоты орбиты спутника и расстояниях в несколько тысяч километров. Несмотря на это, существует немало методологических проблем [9]. Прежде всего, это касается вычислительных аспектов радиотомографии глобальных ионосферных структур. Математически эта проблема формулируется как задача с неполными данными - некорректная обратная задача. Поэтому применение классических алгоритмов томографии здесь практически невозможно. Использование прямых итерационных алгебраических алгорит-

мов (ART) не всегда позволяет получить высокую точность при реконструкции. Кроме того методы ART являются довольно сложными в техническом плане, так как предполагают вычислительные операции с матрицами большой размерности [10]. Поэтому разработка новых подходов к задаче спутниковой радиотомографии ионосферы и совершенствование методов ее решения, позволяющее улучшить качество реконструкции, также являются достаточно актуальными.

Более эффективно обратные задачи о пространственном распределении электронно-ионной компоненты ионосферы можно решить с помощью орбитальной группировки малых спутников. Впервые такая идея была высказана и достаточно детально обоснована авторами работы [11] для исследования пространственного распределения электронной компоненты для Земли и в работе [12] для анализа состояния других планетарных атмосфер в оптическом диапазоне с помощью группировки миниспутников.

Авторами данной работы разработан метод решения обратной задачи по реконструкции локальных значений концентраций электронной компоненты (ПЭС) в ионосферном слое с помощью орбитальной группировки малых (мини) спутников в радиодиапазоне. Суть предлагаемого подхода можно свести к следующему. На заданной орбите (относительно низкой) создается группировка малых спутников, каждый из которых содержит приемо-передатчик (номиналы частот: 150, 400 МГц), двигатели ориентации ионно-плазменного типа. Кроме того на каждом спутнике необходимо разместить многопроцессорный модуль для предварительной обработки исходных данных, и радиоканал для обмена данными между спутниками и орбитальной или наземной системой сопровождения. В простейшем случае, для задачи реконструкции ПЭС в плоскости орбиты – 2D реконструкция, спутники размещаются на одной орбите, как это показано на рис. 3 а), то есть так, как это было предложено авторами [11], в этом случае группировка должна содержать 36 аппаратов. При этом, как совершенно верно отмечено в работе [11] наиболее приемлемыми способами реконструкции искомым функциональных распределений являются алгебраические методы. Если спутники оснастить приемо-передатчиками, то ситуации изменяется – появляется возможность получить значительно больше хордовых интегральных данных и использовать аппарат мало-ракурсной томографии и, следовательно, повысить точность и достоверность искомым функциональных распределений. При таком подходе группировка может содержать различное количество аппаратов равномерно распределённых на орбите [11], например, 30 ÷ 36 (см. рис. 1 б)).

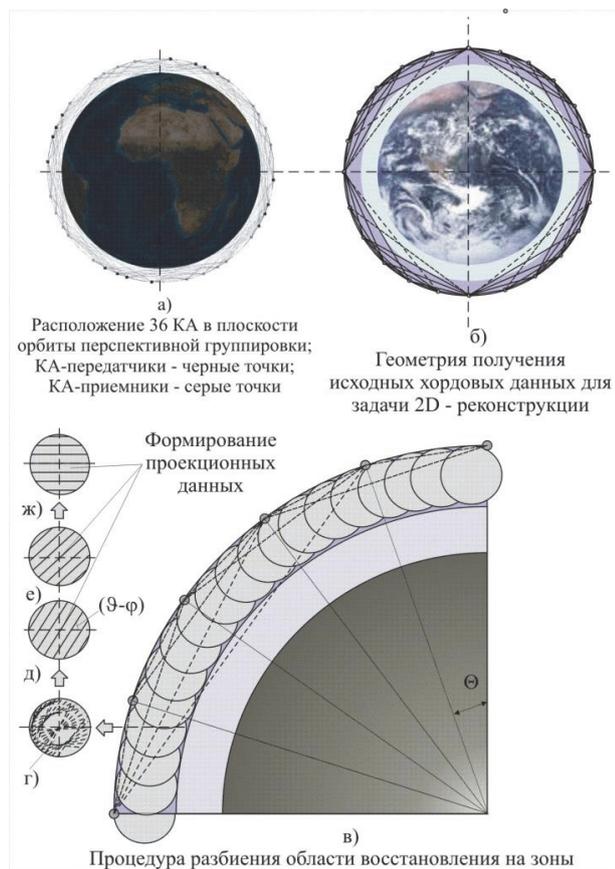


Рис. 3. Геометрия расположения КЛА на орбите

Как уже было отмечено, при “радиопроевечивании” ионосферы интегральной характеристикой является ПЭС, которое представляет собой интеграл электронной концентрации по пути распространения электромагнитной волны и выражается в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$).

Как правило, при исследовании ионосферы для определения распределения ПЭС в заданном сечении на пути распространения сигналов используются две характеристики:

разность фаз между когерентными широко разнесенными по частотам сигналами (частотные измерения);

относительная групповая задержка сигналов различных частот. Последний вариант, к сожалению, может быть применим только для сигналов ГНСС (глобальной спутниковой навигационной системы) – т.е. необходимо наличие наземных станций приёма.

кроме того, возможно применение комбинаций этих характеристик.

Заметим, что обоим типам измерений присущи недостатки, а именно:

фазовые измерения позволяют с высокой точностью определить относительное ПЭС, содержащее неизвестную константу,

кодовые же измерения сильно зашумлены, что приводит к невозможности определения абсолютного ПЭС с точностью лучше 3 TECU. Для

измерения абсолютного ПЭС авторами [13] предложена схема многочастотных измерений.

Известно [14], что наиболее просто ПЭС можно определить по данным кодовых измерений на двух частотах:

$$ПЭС = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times \left[(P_2 - P_1) + \sigma P \right],$$

где: f_1, f_2 – рабочие частоты, например, навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, P_1, P_2 – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере, σP – ошибка измерения дальности по P-коду.

Однако, вследствие наличия аддитивной константы, возникающей из-за частотно-зависимых задержек в аппаратуре, точность вычислений ПЭС по данной методике недостаточна. Поэтому в ионосферных исследованиях наиболее предпочтительным является использование методики определения ПЭС по фазовым измерениям “псевдодальности” на двух частотах [15, 16]:

$$ПЭС = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times \left[(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const_{1,2} + \sigma L \right],$$

где: $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в

ионосфере, $L_1 = \Delta\varphi / 2\pi, L_2 = \Delta\varphi / 2\pi$ – фазовые измерения приемника, выполненные на частотах f_1, f_2 соответственно, $const_{1,2}$ – постоянная связанная с неоднозначностью фазовых измерений, σL – ошибка измерения фазы.

Восстановление 2D распределения концентрации электронной компоненты удобно выполнять в полярной системе координат (r, α) , начало которой “помещено” в центр Земли. В таком случае используют координаты (h, τ) , где $h = r - R$, то есть высоту над поверхностью Земли (радиус которой R). В таком случае величина $\tau = \alpha R$ – является поперечной координатой системы привязанной к соответствующей поверхностной точке Земли. При таком выборе координат с точностью до размерных множителей фаза пропорциональна линейному интегралу [18]:

$$\int_0^h \frac{N(h, \tau)(R + h) dh}{[R^2 \sin^2 \beta + 2Rh + h^2]^{1/2}} = I(\beta, \tau_i), (1)$$

где τ_i – координаты приёмников, h, β – соот-

ветственно высота и угол места ИСЗ. Если бы фаза могла быть измерена точно, то выражение (1) несложно свести к обычной задаче малоракурсной томографии. Проблема в радиотомографии состоит в том, что абсолютно измерить фазу, то есть определить неизвестную постоянную составляющую довольно сложно. Для этого *необходимы многопозиционные системы регистрации и использование нескольких частот*. В радиотомографических экспериментах, как правило, измеряется непосредственно приведенная доплеровская частота или разность фаз.

Авторами [18] предложен вариант решения обратной задачи для 2D реконструкции ПЭС с использованием приведенной доплеровской частоты – метод фазоразностной радиотомографии. Его содержание сводится к следующему:

- Если возможно провести регистрацию радиоимпульсов на двух близких по отношению друг к другу лучах, так чтобы параметр β был различим, то задачу можно свести к реконструкции распределения N по разности D двух линейных интегралов (1),

- Далее используя методы кусочно-планарной аппроксимации на треугольных элементах и аппроксимации более высоких порядков, разностная система сводится к системе линейных уравнений (метод ART).

- При реконструкции структуры областей, размером порядка тысячи километров, прямоугольная разреженная матрица содержит порядка $(10^6 \div 10^7)$ элементов, что является серьезным недостатком, так как требуются большие вычислительные мощности.

Проведенные авторами [18] численные эксперименты показали возможность восстановления глобальной структуры распределения электронов в ионосфере методом фазоразностной томографии при условии, что *разность фаз может быть зарегистрирована ячейками из трех приемников, разнесёнными на расстояния порядка 10 км*. При этом хорошие результаты были получены с помощью итерационных алгоритмов и процедур обратного проецирования. Точность реконструкции зависит как от метода, так и от числа итераций, и начального приближения. По сведениям авторов [18] (10 ÷ 20) итераций позволяют получить точность реконструкции порядка (5 - 10)%. Понятно, что для восстановления конфигураций локальных неоднородностей ПЭС порядка километра целесообразно использовать методы дифракционной томографии [19].

Известно [7], что входными данными для задач мониторинга ионосферы являются измерения фазы радиосигнала (фазового пути) при прохождении им пути *от спутника до наземной станции приемника на двух рабочих частотах*. Для

системы GPS эти частоты составляют $f_1 = 1575 \text{ МГц}$ и $f_2 = 1227 \text{ МГц}$. Соответствующие данные L_1 и L_2 – это фазовые пути радиосигналов, измеренные в длинах зондирующих волн.

По этим данным можно определить интеграл от электронной концентрации вдоль траектории луча спутник-приемник (так называемое полное электронное содержание – TEC):

$$\int_l N(\vec{r}) dl = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \times \times \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + const. \quad (2)$$

Для того чтобы вычислить разность фаз между радиоимпульсами при использовании спутниковой группировки нами разработан следующий подход:

После формирования орбитальной группировки равноотстоящих друг от друга спутников - 1, 2, ..., см. рис. 4 а), с каждого спутника, например – 2 запускаются по два миниспутника сателлита 2 \ddot{y} , 2 \ddot{y} содержащих только приёмники радиосигналов. Таким образом, формируются триады спутников, удаление спутников сателлитов от миниспутника порядка нескольких километров.

Дополнительным способом определение разности фаз может служить вычисление разности хода во времени радиоимпульсов от разных спутников проходящих одинаковые расстояния и пересекающихся в одно и той же области пространства. Например, импульс посланный спутником 1, регистрируется спутником 5, и *одновременно*, радиоимпульс от спутника 7, регистрируется спутником 3. Для этого естественно *нужна точная временная синхронизация*, которую можно осуществлять, используя эталонные сигналы от навигационных систем ГЛОНАСС, GPS.

В таком случае функция проекции должна содержать радоновский образ, т.е. удовлетворять условию:

$$g(\vec{p}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}) \delta(\vec{p} - \vec{n}\vec{r}) dl; \quad (3)$$

$$\mathfrak{R}[f(\vec{r})] = \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}) \delta(\vec{p} - \vec{n}\vec{r}) dl,$$

что даёт возможность применять методы малокурсной реконструкции [20].

Рассмотренная выше конфигурация орбитальной группировки позволяет решить обратную задачу по двумерной реконструкции распределения электронной компоненты в заданной зоне – кольце ионосферы следующим образом.

Так как спутники 1, 2, ..., 7 (рис. 4 а)) снабжены приемо-передающими системами, то это даёт возможность увеличить количество хорд в круговых зонах реконструкции (см. рис 3 в, г) и рис. 4 а)), при больших углах конвергенции γ . В свою очередь, это, позволяет, используя методы интерполяции и априорную информацию, сформировать массивы проекционных данных в заданных направлениях проектирования рис. 3 д), е).

Действительно, в приближении геометрии ортогонального проектирования величину интегрального показателя поглощения вдоль заданного направления L (рис. 4.а)) можно определить в виде: $U_\lambda(l_k, \theta_i) = \ln I_0 - \ln I = \int_L U_\lambda(x, y) dL$.

Функцию $U_\lambda(l_k, \theta_i)$ можно считать лучевой суммой вдоль направления L , если выполняется условие: $U_\lambda(l_k, \theta_i) = Rf(l_k, \theta_i)$. В результате при формировании массивов исходных данных используются дискретное представлением функций проекций. В самом деле, для выбранного сечения функция проекции может быть представ-

лена как: $U(r, \phi) = \sum_{m=1}^M U_m b_m(r, \phi)$, где

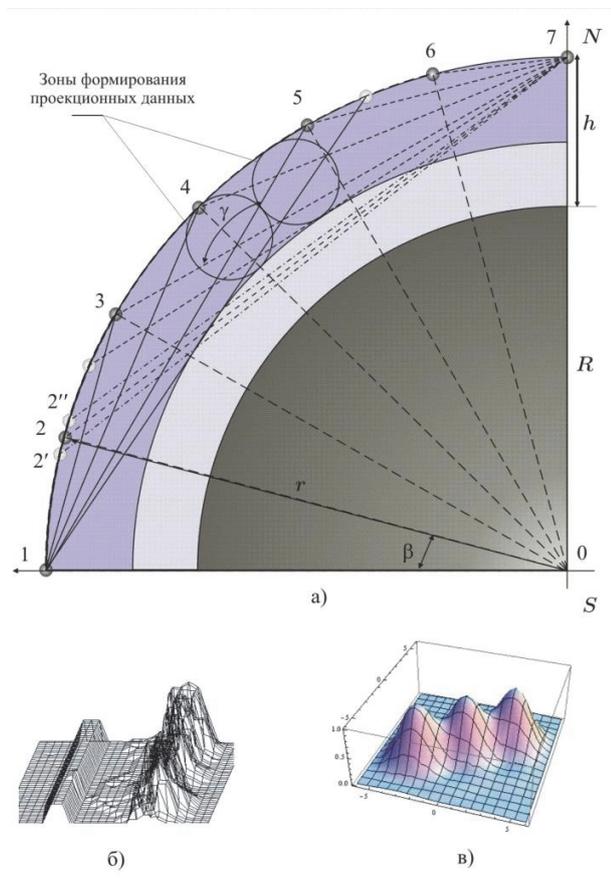


Рис. 4. Исходная геометрия и выбор модельной функции для математического моделирования процедуры 2D -реконструкции

$b_m(r, \phi)$ – базисная функция дискретизации, U_m – вектор значений искомой функции в элементах дискретных данных.

С учетом того, что проекционная матрица R устанавливает зависимость между дискретными значениями искомой функции U_m и её проекционными данными $[RU](l_k, \theta_i)$, то можно записать:

$$[RU](l_k, \theta_i) = \sum_m U_m R_k b_m(r, \phi) = \sum_m R U_m .(4)$$

Решение системы уравнений (4) - функция распределения показателя поглощения энергии радиоимпульса в электронной компоненте ионосферы в выбранном сечении при зондировании внешним источником. Учитывая поглощение и рассеивание фотонов в направлении проектирования, для каждого “отсчета” проекции $[RU](l_k, \theta_i)$, для упрощения опуская базисную функцию [20], можно записать:

$$[RI](l_k, \theta_i) = I_m e^{-\sum_m^{m+n} U_m \Delta L_m} + I_{m+1} e^{-\sum_{m+1}^{m+n} U_{m+1} \Delta L_{m+1}} + \dots + I_{m+n} e^{-U_{m+n} \Delta L_{m+n}} \quad (5)$$

Заметим, что выражение (5) в общем случае не соответствует понятию радоновского образа, более того не выполняется также свойство равенства диаметрально противоположных проекций, т.е.:

$$[Rf](l, \theta) = [Rf](-l, \theta + \pi) = [Rf](l, \theta + 2\pi) \quad (6)$$

Введя обозначение $J_m = I_m e^{-\sum_m^{m+n} U_m \Delta L_m}$, и учитывая формулы (4), (5) и (6), можно записать:

$$[RJ](l_k, \theta_i) = \sum_{m=1}^M J_m R_k b_m(r, \phi) = \sum_{m=1}^M R J_m .(7)$$

Таким образом, теперь выражение (6) удовлетворяет понятию радоновского образа, следовательно, используя (7) можно определить J_m и затем вычислить I_m .

Условие обращения Радона предполагает, что при заданной точности восстановления число исходных двумерных (одномерных) проекций должно обеспечить, согласно теореме о сечениях, полное заполнение Фурье-пространства $F(R, \Theta, \Phi)$, определённого в сферической (полярной) системе координат.

Недостающие проекционные данные (сами проекции) получают путём процедур интерпо-

ляции в Фурье – пространстве по кольцевым гармоникам, где предварительно размещены одномерные спектры проекций, полученные указанным выше образом в заданных направлениях проецирования $(\vartheta - \varphi)$, с учётом априорных данных и свойств симметрии функций. В результате вычисления одномерных обратных преобразований Фурье от доопределённых функций проекций, формируется полный набор проекций для задачи малоракурсной реконструкции. Подробно такого рода процедуры описаны в работах [20, 21]. В качестве априорной информации используются данные полученные с помощью других методов зондирования – ионные зонды, данные фазоразностной томографии в геометрии орбитальная группировка – сеть наземных приемных станций и пр. На рис. 4 б) показано проекционное изображение вычисленного распределения электронной плотности, полученное в системе информационной технологии 2D томографии ионосферы OXENGY [8, 11]. Несложный анализ данного изображения позволяет предложить модельную функцию для оценки точности алгоритмов реконструкции. В данном случае можно выбрать в качестве такой функции несколько эллиптических гауссиан размещённых в зоне данного сечения, так как это показано на рис. 4 в).

На рис. 5 приведены результаты математического моделирования предложенной методики реконструкции функций распределения электронной плотности в кольцевом сечении ионосферы. Реконструкция была произведена с помощью алгоритмов свертки, виды ядер показаны на рис. 5 а), б).

Вывод: предложенный подход позволяет решить обратную задачу по реконструкции параметров ионосферы к малоракурсному варианту об-

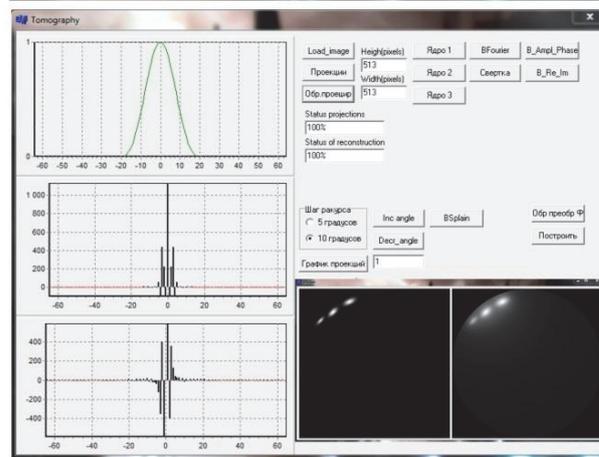
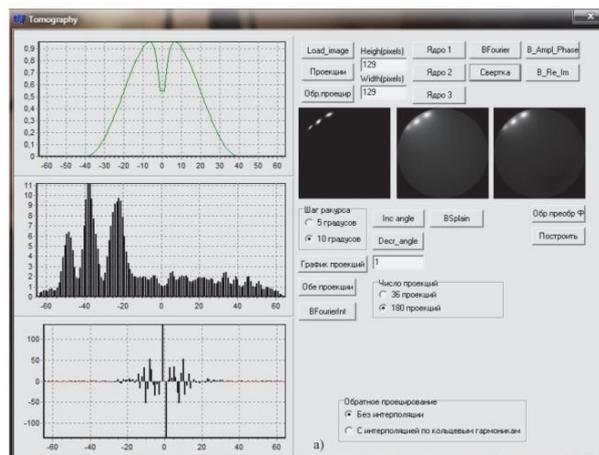


Рис. 5. Иллюстрации работы ППП ION-E по реконструкции функций распределения электронной плотности

ратной задачи Радона и использовать быстродействующие алгоритмы свёртки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант: № 13-08-97015-р_поволжье_a.

SPACE RESEARCH OPPORTUNITIES FOR RECONSTRUCTION OF ELECTRONIC COMPONENTS IONOSPHERE BY MEANS OF UTILIZATIONS OF NAVIGATION SATELLITES

© 2014 O.V. Phylonin, I.V. Belokonov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

This paper presents a method of reconstruction of the spatial distribution of the electron density in the ionosphere layer with by means of utilizations of navigation satellites.

Keywords: ionosphere, the local electron density, the mathematical model, inverse problems, ionosphere sounding radio waves.

Oleg Phylonin, Doctor of Technical Sciences, Professor.

E-mail: phylonin@gmail.com

Igor Belokonov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at the Department of Space Research.

E-mail: ibelokonov@gmail.com