
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСПУТНИКОВ

УДК 629.78
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-387-397

ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ И *F*-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ГРУППИРОВОК НАНОСПУТНИКОВ

О. В. Филонин, И. В. Белоконов, П. Н. Николаев, К. С. Насонов

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет),
443086, Самара, Россия
E-mail: phylonin@gmail.com*

Представлены результаты исследований по изучению возможностей лидарного зондирования верхних слоев атмосферы и *F*-слоя ионосферы с помощью разработанных малогабаритных лидаров оптического диапазона, устанавливаемых на наноспутники. Исследования проводились с помощью методов математического моделирования процессов ослабления (поглощения) импульсов лидарного излучения. Показано, что задачу реконструкции пространственного распределения коэффициента поглощения на атмосферных неоднородностях можно свести к обратной задаче радоновского типа и использовать быстродействующие алгоритмы реконструкции сверточного типа.

Ключевые слова: *ионосфера, F-слой, атмосфера, наноспутники, малогабаритный лидар, коэффициент поглощения лидарных импульсов, обратная задача, алгоритмы реконструкции, метод свертки, проекционное отображение*

В настоящее время благодаря обширной системе оперативных и научно-исследовательских спутников получено большое количество информации о газовом составе, прежде всего, стратосферы и мезосферы. В последние годы особое внимание уделяется исследованиям газового состава тропосферы. Такие спутниковые приборы, как MOPITT, TANSO-FTS, OSCO-2 и т.д., позволяют получать информацию о различных парниковых и химически активных газах с различным пространственным разрешением и периодичностью. Новые программы мониторинга газового состава атмосферы реализуются в ESA и NASA.

Данные, полученные при 3-мерном способе зондирования ионосферы и соответствующих методах 3D-реконструкции исследуемых параметров, с помощью лидаров, размещенных на малых космических аппаратах (МКА), которые распределены в пространстве на разных орбитах, могут внести определенный вклад в обобщенную глобальную ассимиляционную модель [1] ионосферы. Эта модель состоит из двух основных блоков:

- физически-обоснованной модели ионосферы;
- ассимиляционного модуля, корректирующего результаты модельных расчетов с помощью массивов экспериментальных данных о полном содержании электронов и ионов.

Физическая модель является основой [2] системы оценивания состояния ионосферы. Поведение плазмы в ней описывается с помощью уравнений гидродинамики. Искомые величины в этих уравнениях являются скорость, температура и концентрация электронов и семи основных типов ионов, а именно: H^+ , He^+ , O^+ , O_2^+ , NO^+ , N^+ , N_2^+ , т.е. данные, которые могут быть получены при прямом лидарном зондировании с использованием МКА. Следует отметить, что основные параметры ионосферы — концентрация электронов, ионный состав, температура, молекулярная концентрация — сложным образом изменяются с изменением высоты. Выделены три основные области максимальной концентрации электронов: D (80 км), E (110 км) и F -слой, который условно делится на слои $F1$ (170 км) и $F2$ (300 км). Значения высот, указанные в скобках, — ориентировочные, на самом деле высота слоев, концентрация и другие параметры подвержены значительным вариациям как регулярным, так и спорадическим. Следовательно, разработка новых методов и средств спутникового мониторинга состояния верхних слоев атмосферы и, например, F -слоя ионосферы с помощью МКА является актуальной задачей.

Анализ результатов лазерного зондирования состоит из двух этапов [3] и относится к классу обратных задач. В атмосферной оптике к классу обратных задач относят методы [4], связанные с определением оптических и микрофизических характеристик по измеренному результату взаимодействия аэрозольных частиц с электромагнитным излучением. Первый и во многом определяющий этап в процессе выявления количественной информации о состоянии атмосферы из результатов лазерного зондирования — решение лидарного уравнения [5] относительно оптических параметров среды. Другим, не менее важным этапом является корректная обработка регистрируемых данных. Это, прежде всего, связано с быстроедействием и разрядностью АЦП, процедурами сжатия динамического диапазона на этапах формирования исходных данных и пр.

В общем случае пространственное изменение оптических параметров на трассе зондирования связано с величиной обратного рассеяния ($P(v, r)$ — регистрируемое значение отраженного сигнала) уравнением

$$P(v, r) = \chi \eta P_0(v) \frac{c \Delta \tau}{2} A r^{-2} [\beta_m(v, r) + \beta_a(v, r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r \alpha(v, r) dr \right\}, \quad (1)$$

где χ — пропускание приемной оптики лидара; η — эффективность фотоприемника; P_0 — мощность лазерного излучения, посылаемого из места расположения лидара; c — скорость света; $\Delta \tau$ — длительность импульса лазерного излучения; A — эффективная площадь приемной оптической системы; β_m и β_a — объемные коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния лазерного излучения в направлении назад; $\alpha(v, r)$ — коэффициент ослабления лазерного излучения.

Строго говоря, в уравнении (1) должно присутствовать слагаемое $P_*(\mathbf{r})$ — мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара и зависящего от положения точки посылки импульсов. Очевидно, что при корректном способе регистрации отраженного сигнала $P(v, r)$ обратную задачу по восстановлению функции коэффициента ослабления вдоль луча $\alpha(v, r)$ можно свести к радоновской обратной задаче. Иными словами, радоновским образом, вдоль данного луча зондирования, фактически является

значение $\int_0^r \alpha(v, r) dr$, а искомой функцией распределения оказывается $\alpha(v, \mathbf{r})$. Следовательно,

для того чтобы определить в общем виде трехмерную функцию $\alpha(v, \mathbf{r})$, необходимо ор-

ганизовать пространственное сканирование заданной зоны атмосферы (ионосферы) в соответствии с теоремой Радона, т.е. иметь множество измеренных значений:

$$\frac{1}{2} \ln \left\{ P(v, r) - \chi \eta P_0(v) \frac{c \Delta \tau}{2} A r^{-2} [\beta_m(v, r) + \beta_a(v, r(\varphi; \theta))] \right\}^{-1} = \int_0^r \alpha(v, r) dr. \quad (2)$$

В данном случае величина $r(\varphi; \theta)$ означает, что зондирующие лучи должны быть заданы (определены) во всех направлениях φ, θ сферической системы координат. Так как на практике это условие выполнить нельзя, то задача по реконструкции функции $\alpha(v, \mathbf{r})$ является обратной некорректной задачей.

Авторами настоящей статьи разработаны метод и система лидарного зондирования планетарных атмосфер с использованием наноспутников (НС) типа 3D 7U CubeSat. Они позволяют реконструировать пространственные распределения, например, локальных значений концентраций газов, пылевых частиц, плазменных образований в верхних слоях атмосферы и пр. на основе положений малоракурсной оптической томографии [6]. Суть предлагаемого подхода сводится к следующему. Средство доставки (СД) производит запуск от одного до шести наноспутников на низкие или средние круговые орбиты. Каждый такой аппарат должен содержать средства коммуникации с СД, гироскопы, малогабаритные двигатели ориентации, лидары, многопроцессорные блоки обработки данных, приемопередатчики для обмена данными с центром управления полетами (ЦУП).

В простейшем случае для обобщенной оценки, например, газового состава атмосферы планеты достаточно одного спутника (рис. 1, а). При движении спутника S по круговой орбите он последовательно проходит орбитальные положения S_1, S_2, S_3, \dots (рис. 1, в). Лидар осуществляет зондирование атмосферы в соответствии с веерной геометрией либо геометрией конусного зондирования (рис. 1, б). Глубина зондирования составляет величину Δr и определяется плотностью атмосферы, мощностью лазерного импульса и т.д. Целесообразно так организовать сканирование, чтобы лидарный луч двигался по спиралеобразной конусной поверхности. Это позволяет получать от каждого лазерного импульса, при регистрации отра-

женного прямо назад потока фотонов, значение $\int_0^r \alpha(v, r) dr$, что соответствует значению ин-

теграла вдоль хорды круга диаметром D , вписанного в зону сканирования. При движении НС по круговой орбите можно получить множество ракурсов, но при относительно ограниченном угле конвергенции ξ , что в дальнейшем потребует процедуры доопределения исходных проекционных данных.

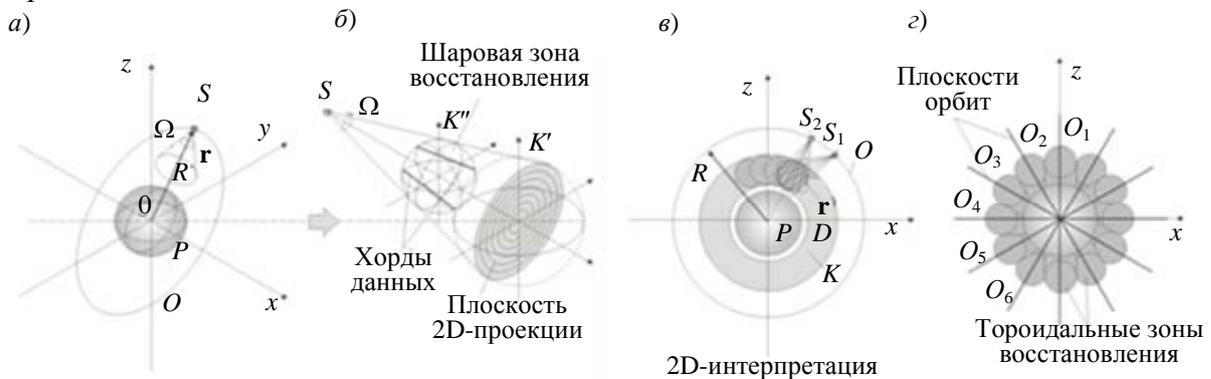


Рис. 1

Заметим, что предложенный метод позволяет непосредственно решать 3D-задачу, т.е. по набору предварительно сформированных двумерных данных (проекций) после операций двумерной свертки выполнять процедуры обратного проецирования. Однако эти процедуры

связаны с большим объемом вычислений — речь идет о трехмерных массивах данных форматом $80 \cdot 10^3$ элементов, что соответствует разрешению $100 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ для условий Земли. В этом смысле для НС была выбрана веерная геометрия зондирования. При этом 2D-система зондирования и соответствующие методы реконструкции были задуманы как исследовательские и позволяющие решить следующий круг задач:

- произвести предварительную обработку данных на борту НС;
- исследовать закономерности преломления зондирующих лучей;
- оценить информационные возможности алгоритмов доопределения исходных наборов данных и алгоритмов свертки;
- определить возможности передачи определенных объемов одномерных данных в ЦУП.

Аналитически реконструкцию искомым функций распределения, например коэффициента ослабления лазерного излучения $\alpha(\mathbf{v}, \mathbf{r})$ можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \hat{R}^{-1}\{p(r, \varphi)\} &= -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \hat{H}\{p'(r \cos(\varphi - \theta), \theta)\} d\theta; \\ \frac{\partial p(l, \theta)}{\partial l} &\equiv p'(l, \theta); \hat{H}\{p'(l, \theta)\} = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{p'(l, \theta)}{l - \tau} d\tau; \nu(l) = -\frac{1}{2\pi}; \\ \hat{H}\{p'(l, \theta)\} &= [p' * \nu](l, \theta), \quad \lim_{a \rightarrow \infty} [p' * \nu_a] = \hat{H}\{p'(l, \theta)\}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $p(r, \varphi)$ — сформированные одномерная или двумерная проекции; \hat{R}^{-1}, \hat{H} — операторы обратного преобразования Радона и Гильберта соответственно; $[p' * \nu](l, \theta)$ — процедура свертки; l, θ — угловые координаты.

Для исходных проекционных данных невозможно реализовать процедуры последовательного воздействия операторов на функции проекций:

$$\alpha(\mathbf{v}, \mathbf{r}) = \hat{B} \hat{H} \hat{D}(p(\mathbf{r}, \varphi)). \quad (4)$$

Для задач такого типа принято заменять процедуру (4) на процедуры свертки функций проекций с подобранной фильтрующей функцией (ядром k) и обратным проецированием отфильтрованных проекционных данных [6], т.е.

$$\hat{H} \hat{D}(p(\mathbf{r}, \varphi)) \approx \int_D p(r; (\theta - \varphi)) k((r - l); (\theta - \varphi)) \equiv \hat{C} p(\mathbf{r}, \varphi), \quad \alpha(\mathbf{v}, \mathbf{r}) \approx \hat{B} \hat{C} p(\mathbf{r}, \varphi),$$

где \hat{C} — оператор свертки.

Важно отметить, что для *веерной геометрии* формирования исходных проекционных данных функцию проекции определим как интеграл [7] от некоторой искомой функции $f(r, \varphi) \Leftrightarrow \alpha(\mathbf{v}, \mathbf{r})$, вдоль хорды зондирования, с параметрами (σ, β) , т.е. как радоновский образ:

$$g(\sigma, \beta) = \hat{R}\{f(r, \varphi) \circ (D \sin \sigma, \beta + \sigma)\},$$

где знак „ \circ “ в данном случае — выборка хорд (лучей) с заданными параметрами (σ, β) .

Для данной геометрии формула обращения Радона (как подробно показано в работе [7]) имеет следующий вид:

$$f(r, \varphi) = \left(1/4\pi^2\right) \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 1/(\sigma' - \sigma) G(\sigma, \beta, \sigma') d\sigma d\beta.$$

Здесь подынтегральные функции определяются как

$$G(\sigma, \beta, \sigma') = \begin{cases} \frac{\sigma' - \sigma}{\sin(\sigma' - \sigma)} \left[\frac{1}{W} g_1(\sigma, \beta) - \frac{1}{W} g_2(\sigma, \beta) \right] & \text{при } |\sigma| \leq \delta; \\ 0 & \text{при } |\sigma| > \delta; \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma' = \operatorname{arctg} \left[\frac{r \cos(\beta - \varphi)}{D + r \sin(\beta - \varphi)} \right]; \quad -\frac{\pi}{2} < \sigma' < \frac{\pi}{2};$$

$$W = \left\{ [r \cos(\beta - \varphi)]^2 + [D + r \sin(\beta - \varphi)]^2 \right\}^{1/2},$$

где δ имеет смысл единичной функции.

Для процедур фильтрации проекций целесообразно использовать динамические ядра типа

$$h(z) = \begin{cases} 1 - (1 - \alpha) \frac{\pi^2 z}{2a} \Omega_0 \left(\frac{\pi z}{a} \right), & z \leq a; \\ 1 - (1 - \alpha) \frac{2\pi z}{a} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_{2k-1} \left(\frac{\pi z}{a} \right)}{2k-1} \left[1 + (-1)^k U_{2k-1} \left(\frac{a}{y} \right) \right], & z > a, \end{cases}$$

где Ω_0 — функция, обладающая одним максимумом с „усеченным“ спектром Фурье; $J_n(z)$ — функция Бесселя n -го порядка; $U_n(z)$ — полиномы Чебышева 2-го рода; параметры α , a подбираются для каждого типа искомого распределения параметров методами математического моделирования.

В качестве ядра свертки предложено использовать следующую более простую функцию:

$$k(l) = (\operatorname{sinc}(4l) - a \cdot \operatorname{sinc}(2l - \pi) - a \cdot \operatorname{sinc}(2l + \pi)) \cdot \operatorname{sinc}(l)^2. \quad (6)$$

Заметим, что вид фильтрующей функции (6) определяется значением параметра a — это „динамическое“ низкочастотное ядро.

Для задач 3D-реконструкции целесообразно использовать как минимум шесть МКА, плоскости орбит которых расположены, как представлено на рис. 1, *з*. В этом случае зона реконструкции представляет собой совокупность тороидальных поверхностей, заполненных шарами, в каждом из которых осуществляются процедуры восстановления функции $\alpha(v, r)$. Вычислительные процессы аналогичны рассмотренным выше, а восстановленные функциональные зависимости целесообразно представлять в виде стереоскопических проекционных изображений изопараметрических поверхностей.

Для исследования предложенных методов лидарно-томографического зондирования атмосферы (ионосферы) авторами разработан импульсный малогабаритный лидар для использования на наноспутниках 3D 7U CubeSat, схема которого представлена на рис. 2, *а*, где 1 — плита (основание), 2 — зубчатое колесо, 3 — шаговый двигатель (выбор зенитного угла), 4 — шестерня, 5 — корпус, 6 — подшипниковый узел механизма зенитной ориентации, 7 — фотоэлектронный умножитель, 8 — корпус-экран ФЭУ, 9, 13 — лидарные излучатели, 10, 11 — большое и малое зеркала лидара, 12 — коллиматор, 14 — платы управления лидарными излучателями, 15 — шаговый двигатель азимутальной ориентации, 16 — шестерня механизма привода по азимуту, 17 — подшипниковый узел привода по азимуту.

Конструкция данного устройства обеспечивает поворот излучателей и приемника рассеянного излучения по двум (трем) координатам (веерная и конусная геометрия зондирования). Механизмы поворота установлены на основании 1. Вращение в зенитном направлении обеспечивается малогабаритным шаговым двигателем 3 и редуктором 4, угол обзора равен $\Delta\theta \approx \pm 80^\circ$. Вращение по азимуту осуществляется с помощью зубчатого механизма 2, приводимого в движение шаговым двигателем 15, угол поворота составляет $\Delta\varphi \approx 340^\circ$. Лазерные

излучатели 9, 13 разработаны на основе малогабаритных импульсных лазеров ТЕСН-527, длина волны 527 нм, длительность импульса 50...100 нс, частота следования импульсов 1 кГц. Средняя энергия лазерного излучения в импульсе $250 \cdot 10^{-6}$ Дж. Приемная часть лидарного устройства содержит большое 10 и малое 11 зеркала, малогабаритный ФЭУ (ФЭУ-68), установленный в экране 8. Напряжение питания ФЭУ составляет 2000 В и формируется высокостабильным малогабаритным источником питания. Величина фронта генерируемого импульса ФЭУ порядка 1,5 нс. Для оцифровки сигналов ФЭУ используется 8-разрядный АЦП. Для уменьшения влияния фоновой засветки зеркала 10, 11 размещены в коллиматоре 12. Расчетная глубина зондирования Δr слоя ионосферы при высоте орбиты 400 км составляет 100 км, верхних слоев атмосферы — соответственно 30 км. Управление лидарным модулем осуществляется микроконтроллером, связанным с 8-процессорным блоком обработки данных.

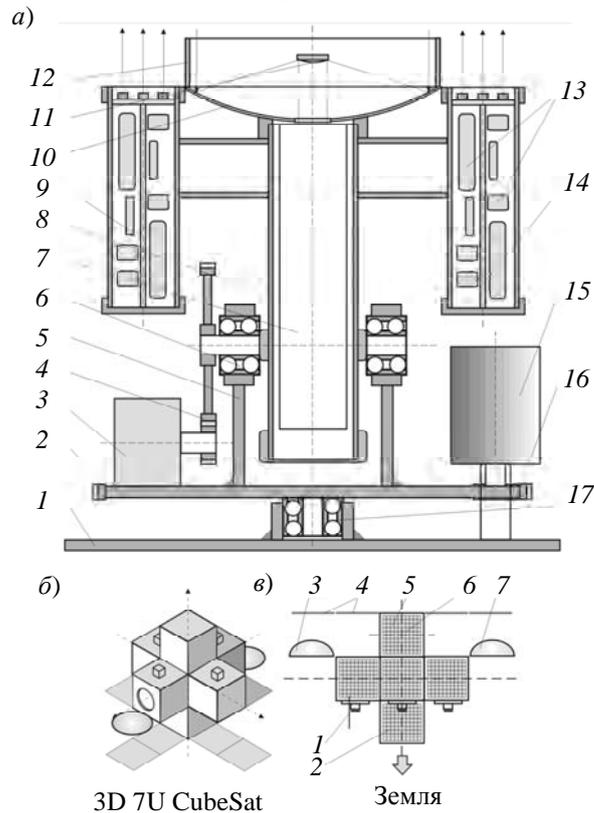


Рис. 2

Для размещения лидарно-томографической системы зондирования разработана конфигурация CubeSat, состоящая из семи модулей, скомпонованных в виде трехмерной крестообразной конструкции (см. рис. 2, б). В каждом взаимно-перпендикулярном направлении, таким образом, расположено по три модуля 1U CubeSat. В центральном модуле размещены трехосный гироскоп, датчики пространственной ориентации, микропроцессорная система контроля ориентации аппарата в пространстве. Для коррекции пространственного местоположения и ориентации НС применены малогабаритные ионные двигатели ориентации [8], способные перемещать аппарат в трех взаимно ортогональных направлениях. На рис. 2, в показаны основные элементы аппарата 3D 7U CubeSat, а именно: модули для микролидаров 1, 5; тяговые ионно-плазменные двигатели 2; миниатюрные параболические антенны 3, 7; солнечные панели 4, 6. В одном из модулей CubeSat размещены прецизионные блоки питания для ФЭУ-1, ФЭУ-2, содержащие малогабаритные аккумуляторы 12 В, солнечные панели, контроллер и приемопередатчик для связи с ЦУП. В другом модуле CubeSat расположена микропроцессорная система управления модулем лидара. Многопроцессорный модуль предварительной обработки данных находится в двух модулях CubeSat.

Структурная схема взаимосвязи основных модулей по обработке исходных данных и блоков питания и управления наноспутника 3D 7U CubeSat приведена на рис. 3, где приняты следующие обозначения: ИБП ЛД — импульсный блок питания лазерных диодов; ПП-1, ПП-2 — приемопередатчики; ШД-1, ШД-2 — шаговые двигатели, задающие режимы сканирования пространства; ИПД-1, ..., 4 — ионно-плазменные двигатели для коррекции орбиты НС. В качестве бортовых компьютеров в данной системе выбраны микрокомпьютеры типа Raspberry Pi 3 Model B. Это одноплатный микрокомпьютер, оснащенный 4-ядерным процессором ARM Cortex A53 1200 МГц (64 бит), 1 Гбайт ОЗУ, содержащий модуль Ethernet 10/100 Мбит/с, 4 порта USB 2.0, имеет слот для SSD, используется OS Linux. Один из этих компьютеров используется как бортовой, выполняющий функции управления, два других предназначены для предварительной обработки исходных данных лидарного зондирования верхнего слоя атмосферы и F-слоя ионосферы. Наличие двух приемопередатчиков объясняется тем, что один из них служит для управления НС по командам ЦУП, другой используется для передачи одномерных исходных массивов данных зондирования в ЦУП, где производится их окончательная обработка.

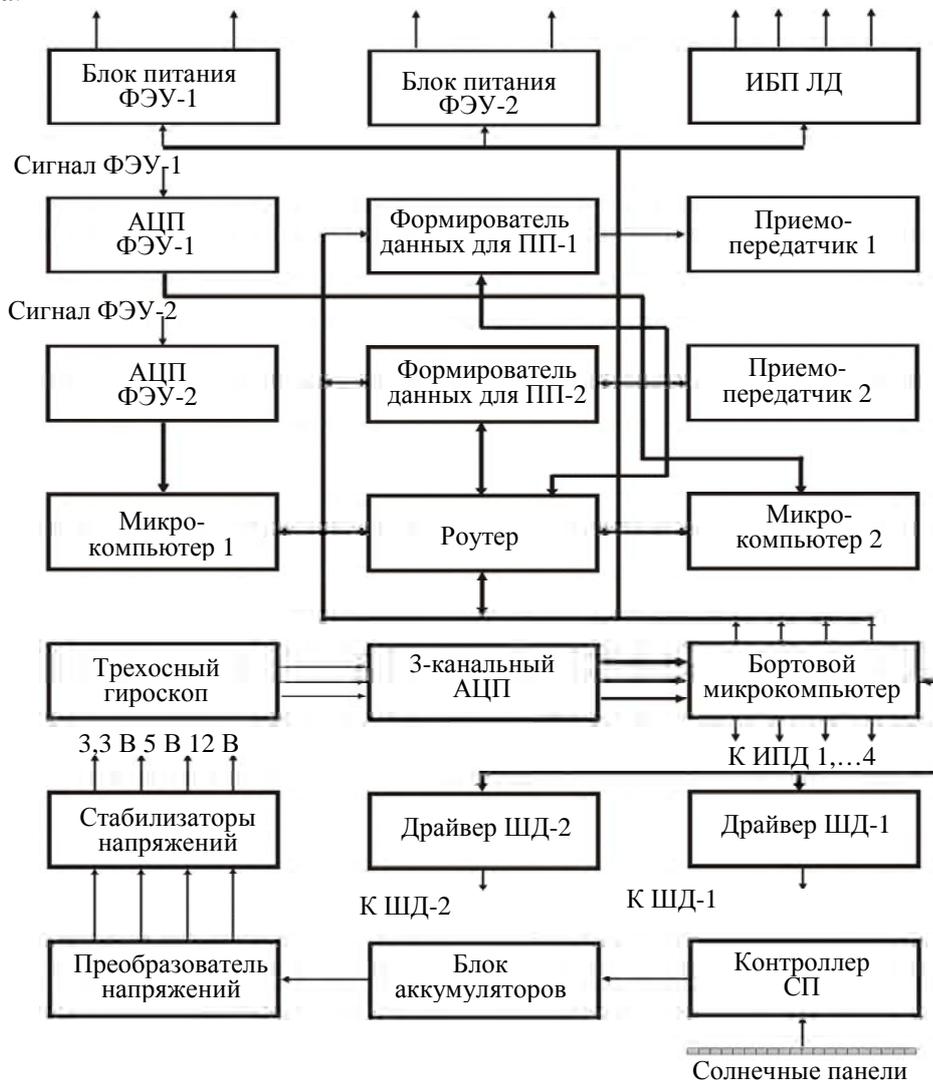


Рис. 3

На рис. 4 показана структурная схема пакетов программ для обработки получаемых данных. Бортовые микрокомпьютеры-1, -2 осуществляют предварительную обработку данных, а именно по параметрам сканирования — виду геометрии (веерная, конусная), числу зарегистрированных отраженных импульсов и пр. — формируют проекционные массивы, которые затем переводятся в массивы данных, соответствующие, например, ортогональной геометрии

проецирования. Затем осуществляется предварительная фильтрация проекционных данных, их прореживание и формирование массивов для передачи в ЦУП. Вычислительный комплекс ЦУП осуществляет восстановление исходных массивов до заданного числа отсчетов в каждой проекции, производит пересчет данных в полярную дискретную систему координат (СК). Далее происходит вычисление прямых одномерных преобразований Фурье („диаметры полярной СК“) и распределение полярных сечений в пространстве Фурье в соответствии с геометрией формирования исходных проекций. Затем осуществляется выборка, например, кольцевых гармоник для 2D-задач, вычисление спектров недостающих проекций, после чего производится расчет обратных одномерных преобразований Фурье — заполненной дискретной фурье-плоскости. Таким образом, в сигнальном пространстве формируется полный набор проекций в количестве $\approx 1,5n$ [7] для восстановления, например, 2D-массива форматом $n \times n$ элементов. Для того чтобы оптимально подобрать параметры динамического ядра, необходимо выбрать модельную функцию, аналогичную искомому функциональному распределению. Для этого производится „черновая“ реконструкция искомого распределения методом обратной проекции; она отличается от истинного распределения степенью расфокусировки, но в целом позволяет определить вид модельной функции, с помощью которой, проведя полный цикл моделирования, можно произвести оптимизацию ядра алгоритма свертки. Далее выполняются операции по представлению трехмерных данных в виде проекционных (стереоскопических) изображений, включающих в себя выделение изопараметрических кривых и их проекции.

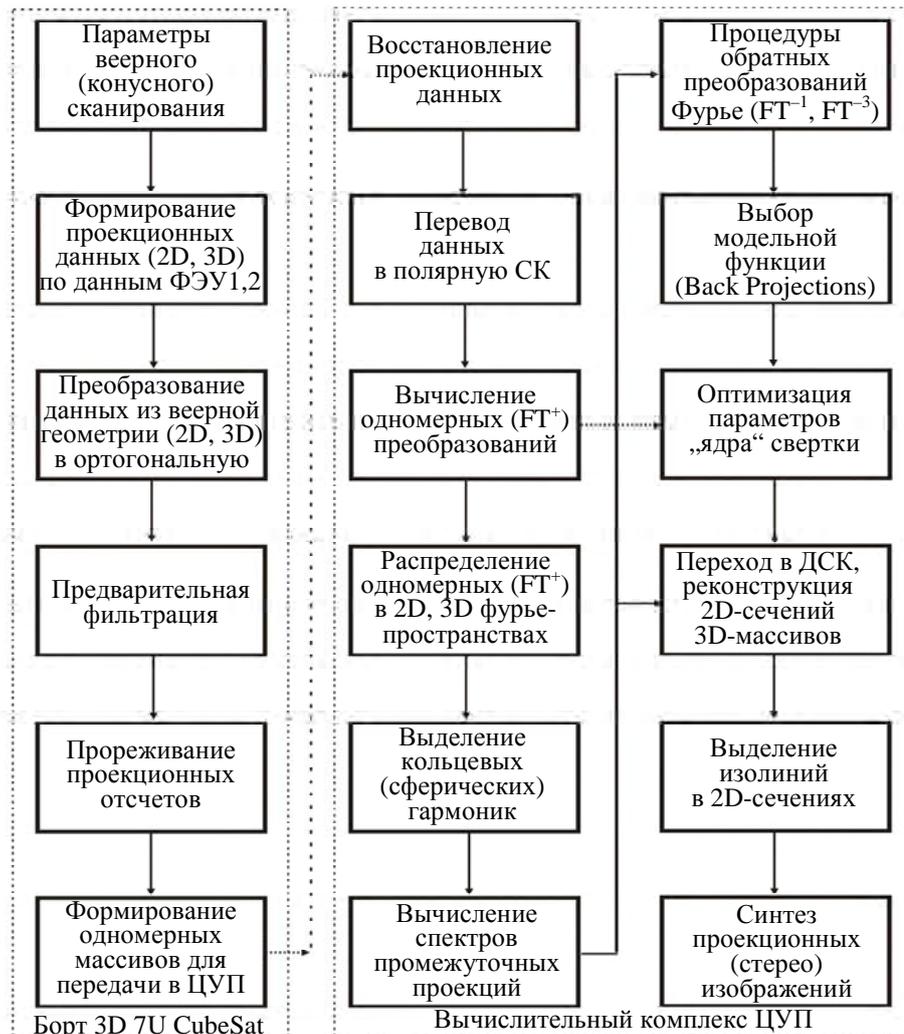


Рис. 4

На рис. 5 приведены результаты математического моделирования описанных методов и алгоритмов реконструкции атмосферных и ионосферных неоднородностей по данным лидарного зондирования. Рис. 5, а иллюстрирует процедуры доопределения недостающих проекционных данных в 3D-фурье-пространстве. На рис. 5, б показана функция проекции модельной функции, на рис. 5, в изображено ядро типа (6), а рис. 5, г иллюстрирует процедуру свертки функции проекции с функцией ядра. Рис. 5, д—ж последовательно отображают вид двумерной модельной функции, процедуру реконструкции и результат восстановления по полному набору проекционных данных. На рис. 5, з показан вид ионосферного возмущения, обусловленного воздействием системы HAARP, а рис. 5, и последовательно иллюстрирует выбор модели, результат восстановления модельной функции с использованием только процедуры обратного проецирования, реконструкцию методом свертки с разными параметрами фильтрующей функции (6).

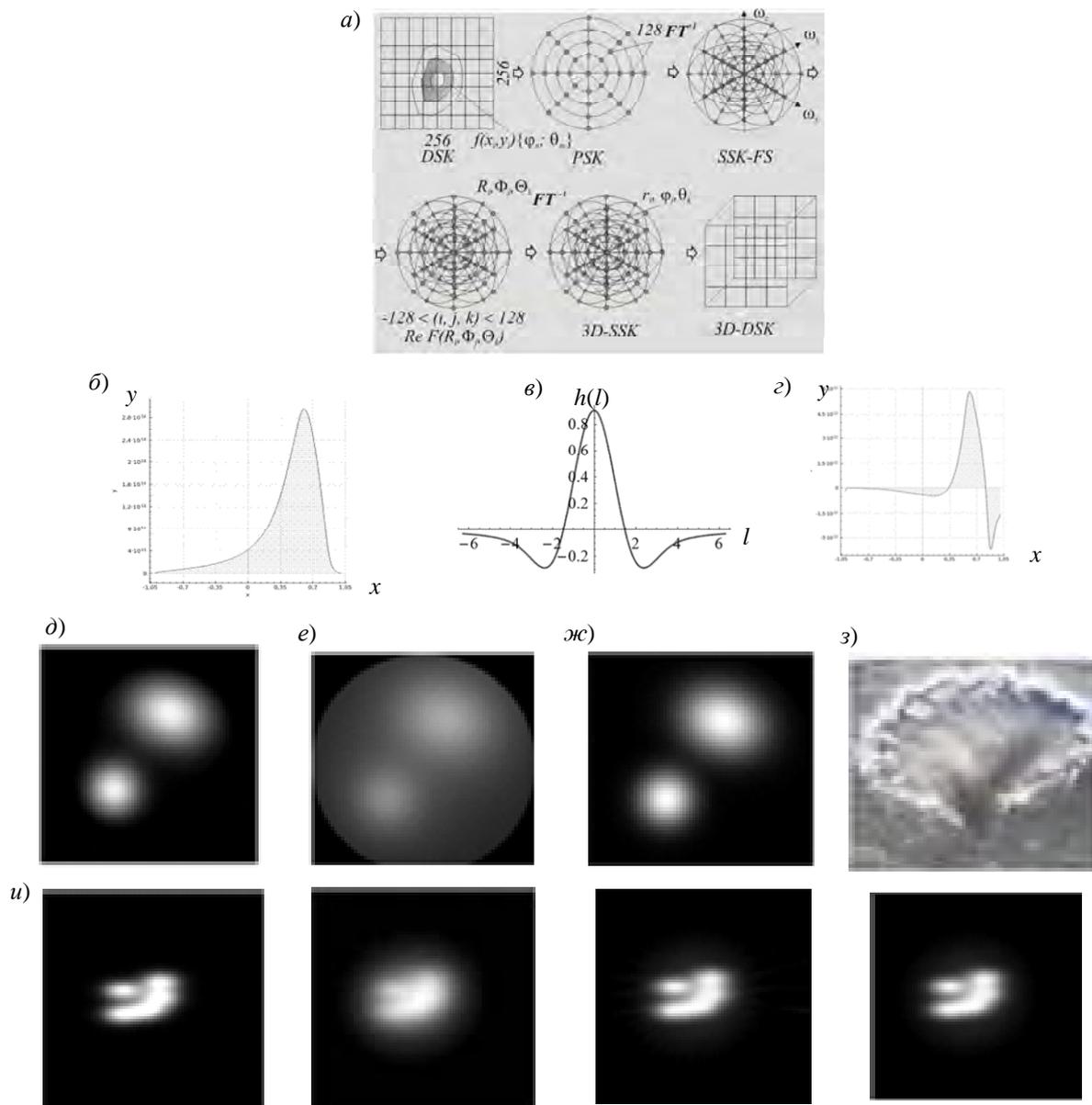


Рис. 5

Предложенные авторами способы отображения для искомым 2D-, 3D- функциональных распределений, соответствующих неоднородностям в атмосфере и ионосфере, представлены на рис. 6.

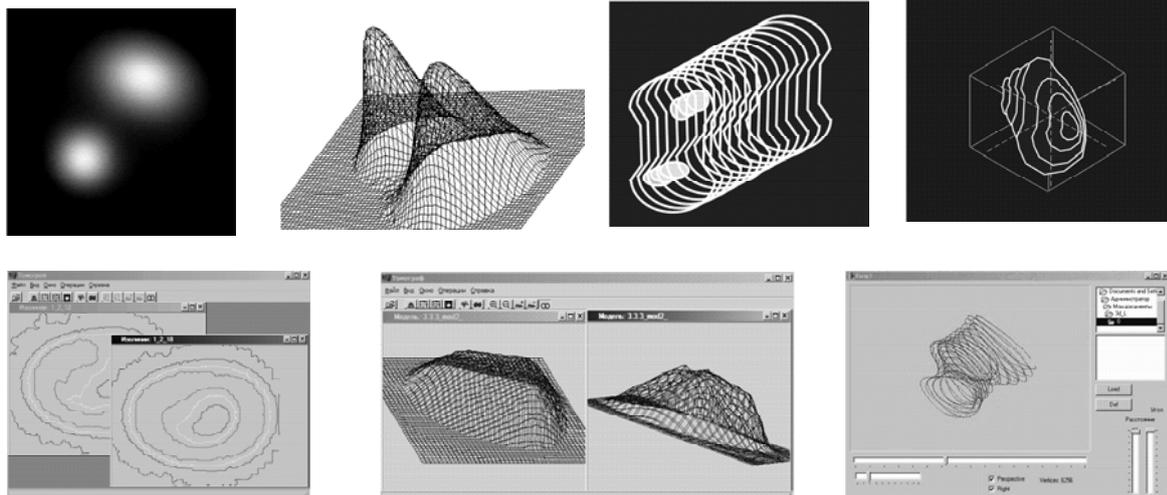


Рис. 6

Нельзя не отметить, что обобщенное интегральное уравнение (1) в какой-то мере является идеализированным. В действительности существуют реальные трудности, обусловленные следующими обстоятельствами: неопределенностью лидарного уравнения, обращение которого лежит в основе интерпретации результатов (оно содержит более чем одну величину, неизвестную во многих точках пространства: коэффициент ослабления и коэффициент обратного рассеяния [9]), и некорректностью обратной задачи, определяемой неполными наборами данных, конечностью числа носителей, дискретностью преобразований.

Итак, разработан метод лидарно-томографического исследования верхней зоны атмосферы и F -слоя ионосферы с помощью малых космических аппаратов. Созданы математические методы реконструкции искомым функциональных распределений на основе быстродействующих алгоритмов свертки. Проведенные с помощью математического моделирования исследования показали работоспособность предложенных методов и алгоритмов. Разработана конструкция малогабаритного лидара для использования его на нано- и микроспутниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Титов А. А., Соломенцев Д. В., Хаттатов В. У.* Мониторинг состояния ионосферы в реальном времени с помощью трехмерной ассимиляционной модели // Сб. материалов и науч. трудов II Всерос. науч.-техн. конф. „Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды“. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2012. Т. 1.
2. *Solomentsev D., Jacobsen K., Khattatov B., Khattatov V., Cherniak Y., Titov A.* Ionosphere data assimilation capabilities for representing the high-latitude geomagnetic storm event in September 2011 // *J. of Geophysical Research: Space Physics*. 2014. Vol. 119. DOI: / 2014JA.
3. *Васильев Б. И., Маннун У. М.* ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // *Квантовая электроника*. 2006. Т. 36, № 9. С. 801—820.
4. Пат. 2018104 РФ. Способ определения профиля коэффициента ослабления на заданном участке атмосферы / *А. Д. Егоров, И. А. Егорова* // Б. И. 1994. № 15.
5. *Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б.* Обращение лидарных сигналов малой мощности // *Оптич. журн.* 2007. Т. 74, № 10.
6. *Филонин О. В.* Малоракурсная томография. Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2006. 256 с.
7. *Филонин О. В.* Общий курс компьютерной томографии. Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2012. 407 с.
8. *Phylonin O., Belokonov I.* The small-size ionic-plasma engine for nanosatellites // *Procedia Engineering*. 2017. N 185. P. 373—379.

9. Yegorov A. D., Yegorova I. A. Comparative analysis of multipositional remote sensing techniques // Image Processing, and Synthetic Aperture Radar for Remote Sensing: Proc. of SPIE. 1997. Vol. 3217.

Сведения об авторах

- Олег Васильевич Филонин** — д-р техн. наук, профессор; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований, E-mail: phylonin@gmail.com
- Игорь Витальевич Белоконов** — д-р техн. наук, профессор; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований, E-mail: ibelokonov@mail.ru
- Петр Николаевич Николаев** — аспирант; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований; E-mail: pnikolayev@gmail.com
- Константин Сергеевич Насонов** — студент; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований; E-mail: kon4797@ya.ru

Поступила в редакцию
14.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Филонин О. В., Белоконов И. В., Николаев П. Н., Насонов К. С. Лидарное зондирование верхних слоев атмосферы и F-слоя ионосферы с помощью группировок наноспутников // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 387—397.

**LIDAR SOUNDING OF THE UPPER LAYERS OF THE ATMOSPHERE
AND THE F-LAYER OF THE IONOSPHERE WITH THE USE OF NANOSATELLITES GROUPS**

O. V. Philonin, I. V. Belokonov, P. N. Nikolaev, K. S. Nasonov

Samara National Research University, 443086, Samara, Russia

E-mail: phylonin@gmail.com

Possibilities of lidar sensing of the upper atmosphere and the F-layer of the ionosphere using compact optical-range lidar able to be mounted on nanosatellites, are studied. Methods of mathematical modeling of processes of attenuation (absorption) of pulsed lidar radiation are applied. It is shown that the problem of reconstruction of the spatial distribution of the coefficient of light absorption by atmospheric inhomogeneities may be reduced to Radon-type inverse problem, and that fast reconstruction algorithms of convolutional type may be applied to solve the problem.

Keywords: ionosphere F-layer, atmosphere, nanosatellites, small-sized lidar, coefficient lidar pulse absorption, inverse problem, reconstruction algorithms, convolution method, projection mapping

Data on authors

- Oleg V. Philonin** — Dr. Sci., Professor; Samara University; Interuniversity Department of Space Research, E-mail: phylonin@gmail.com
- Igor V. Belokonov** — Dr. Sci., Professor; Samara University; Interuniversity Department of Space Research, E-mail: ibelokonov@mail.ru
- Peter N. Nikolaev** — Post-Graduate Student; Samara University; Interuniversity Department of Space Research; E-mail: pnikolayev@gmail.com
- Konstantin S. Nasonov** — Student; Samara University; Interuniversity Department of Space Research; E-mail: kon4797@ya.ru

For citation: Philonin O. V., Belokonov I. V., Nikolaev P. N., Nasonov K. S. Lidar sounding of the upper layers of the atmosphere and the F-layer of the ionosphere with the use of nanosatellites groups. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 5. P. 387—397 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-387-397