

ИЗУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НАНОСПУТНИКАМИ СТАНДАРТА CUBESAT

А. А. ЧЕРНЫШОВ¹, Д. В. ЧУГУНИН¹, М. М. МОГИЛЕВСКИЙ¹, И. Л. МОИСЕЕНКО¹,
А. В. КОСТРОВ², М. Е. ГУЩИН², С. В. КОРОБКОВ², Д. В. ЯНИН²

¹Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Россия

E-mail: achernyshov@iki.rssi.ru

²Институт прикладной физики РАН, 603950, Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена возможность использования группировки наноспутников стандарта CubeSat. Такой подход обеспечивает получение одновременных измерений в разнесенных точках. Это позволит лучше понять сложные нелинейные процессы в ионосфере, что является важным аспектом для фундаментальных и практических задач. Предложено для описания состояния плазмы в авроральной области использовать методы нелинейной динамики (фрактальный подход, теория перколяции) с целью обработки спутниковых данных, полученных с помощью наноспутников CubeSat. Разработан датчик плотности плазмы, обеспечивающий измерение фонового значения концентрации плазмы и ее нестационарных флуктуаций.

Ключевые слова: наноспутники, высокоширотная ионосфера, методы нелинейной динамики, ионосферные неоднородности, резонансный зонд, датчик плотности плазмы, CubeSat

Изучение нестационарной и неоднородной структуры высокоширотной ионосферы является не только важной фундаментальной задачей физики космической плазмы, оно необходимо для корректного использования спутниковых навигационных систем, для обеспечения устойчивой связи и навигации в арктических областях. Как известно, основные ошибки определения местоположения и времени — так называемые ионосферные поправки — с помощью систем GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) связаны с прохождением сигналов через ионосферу. На средних широтах, где можно использовать достаточно надежные модели ионосферы, ионосферные поправки автоматически вносятся в обработку навигационных сигналов. В высокоширотной области ионосфера тесно взаимосвязана с магнитосферой посредством электрических полей и токов, а также потоков высокоэнергетических частиц из магнитосферы в ионосферу и восходящих потоков ионосферной плазмы. Такие особенности усложняют описание этой области ионосферы. Из-за того, что в высоких широтах плотность ионосферной плазмы относительно мала и значительно изменяется со временем, ее пространственное распределение сильно неоднородно, а количество станций наблюдений ограничено, в настоящее время не существует достаточно надежной эмпирической модели высокоширотной ионосферы. В результате возникает проблема автоматического внесения ионосферных поправок в обработку навигационных сигналов.

Практический интерес представляют активные эксперименты, в которых производится управляемое воздействие на ионосферу Земли. Наиболее эффективны для активного воздействия радиофизические средства: коротковолновые нагревные стенды и мощные наземные низкочастотные передатчики. Взаимодействие мощного искусственного КВ-излучения с ионосферной плазмой сопровождается возбуждением различного типа ионосферных неоднородностей в широком диапазоне временных и пространственных масштабов [1]. В результате воздействия излучения наземных низкочастотных передатчиков на околоземную плазму

радиосигнал претерпевает сильные спектральные и амплитудные изменения при распространении из одного полушария Земли в другое [2]. Такие эксперименты могут быть использованы для исследования ионосферных неоднородностей не только естественного происхождения, но и искусственной ионосферной турбулентности.

В последнее время широко используются сигналы навигационных систем ГЛОНАСС/GPS для определения характеристик ионосферы. Применение сигналов дает новые возможности в исследовании пространственно-временных характеристик ионосферы и изучении как глобальных, так и локальных явлений в ионосфере. С помощью систем ГЛОНАСС/GPS активно исследуется полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере Земли [3], которое является важным параметром не только для обеспечения радиосвязи, но и для решения фундаментальных задач физики ионосферы и ближнего космоса. Неоднородности различного масштаба в высокоширотной ионосфере обуславливают флуктуации амплитуды и фазы сигналов ГЛОНАСС/GPS, что приводит к снижению точности определения местоположения и времени. Ионосферные неоднородности являются трудно моделируемым объектом, и в большинстве современных эмпирических и теоретических моделей ионосферы заложено максимальное количество ошибок именно для высокоширотных областей, что влияет на точность позиционирования систем ГЛОНАСС/GPS [4].

Несмотря на то что основные особенности и механизмы формирования стационарных крупномасштабных неоднородностей достаточно хорошо изучены, к настоящему моменту не существует детального описания вариаций пространственного распределения параметров плазмы в авроральной ионосфере. Даже общепринятая эмпирическая модель IRI (International Reference Ionosphere) [5], удовлетворительно воспроизводящая параметры среднеширотной ионосферы, не позволяет адекватно описать вариации полярной ионосферы. Это связано с ограниченной базой ионосферных данных в высоких широтах. Поскольку в этой области плазменная среда является нестационарной и неоднородной, необходимо иметь одновременные измерения на различных масштабах в высокоширотной ионосфере.

Таким образом, в рамках классических подходов для построения адекватной эмпирической модели ионосферы высокоширотной области необходим большой объем измерений на различных масштабах. Предлагается использовать нетрадиционный подход для описания состояния плазмы в авроральной области. Такой подход может быть реализован методами нелинейной динамики (фрактальный подход, теория перколяции), которые предполагается применить при обработке одновременных спутниковых данных, полученных при помощи небольших и относительно дешевых спутников стандарта CubeSat. Использование нескольких CubeSat дает возможность проводить одновременные измерения на различных масштабах авроральной области, что позволит лучше понять сложные процессы в ионосфере.

Основное преимущество фрактального метода — универсальность полученных результатов и независимость от природы возникновения фрактальных структур в рассматриваемой области [5]. В физических задачах оценки фрактальных характеристик реальных объектов понимаются как характеристики скейлинговых свойств этих объектов, справедливые на некотором диапазоне масштабов. В статьях [5—7] показана правомерность применения нелинейных методов для описания процессов в авроральной области ионосферы и аналитически получены топологические величины: фрактальные размерности и индексы связности, характеризующие структуру педерсеновской и холловской проводимостей в авроральной зоне. В этих работах ионосфера рассматривалась как „губчатая“ фрактальная среда, причем ее структура в отсутствие других источников ионизации задается распределением авроральных частиц. Поскольку масштабная инвариантность — это независимость основных характеристик процесса, явления, свойства от масштаба явления, чтобы получить скейлинг интересующей нас величины, необязательно иметь много точек, достаточно получить лишь несколько значений. В околоземной плазме изменения в наклоне спектра (изменения так назы-

ваемого индекса скейлинга), как правило, происходят около характерных плазменных величин (инерционная длина частицы, плазменная частота, радиус Дебая и т.д.). Следовательно, для изучения и более полного понимания процессов в ионосфере Земли необходимо получить ряд одновременных измерений на интервале характерных масштабов ионосферной плазмы. Благодаря самоподобию и фрактальным свойствам ионосферы достаточно иметь два-три измерения внутри одного характерного масштаба.

Для решения поставленных задач предлагается использовать несколько наноспутников CubeSat, которые позволят измерять электрическое поле (как постоянное, так и переменное), плотность плазмы, переменное магнитное поле одновременно в разных точках. Основным преимуществом наноспутников является скорость разработки и изготовления. Другим важным преимуществом таких спутников является их малая стоимость по сравнению с большими и сложными космическими аппаратами (КА). Использование нескольких CubeSat дает возможность проводить уникальные одновременные измерения в разных точках космического пространства и получать объемную картину протекающих процессов.

Архитектура бортовой аппаратуры. Для решения поставленных задач необходимо измерять параметры ионосферной плазмы с высоким временным разрешением: плотность плазмы, температура электронов и ионов, ионный состав, электрическое поле и др. Для упрощения и удешевления CubeSat желательно отказаться от поддержания определенной ориентации спутников в пространстве. Это приведет к отказу от измерений „векторных“ параметров в пользу „скалярных“, не зависящих от ориентации КА в пространстве.

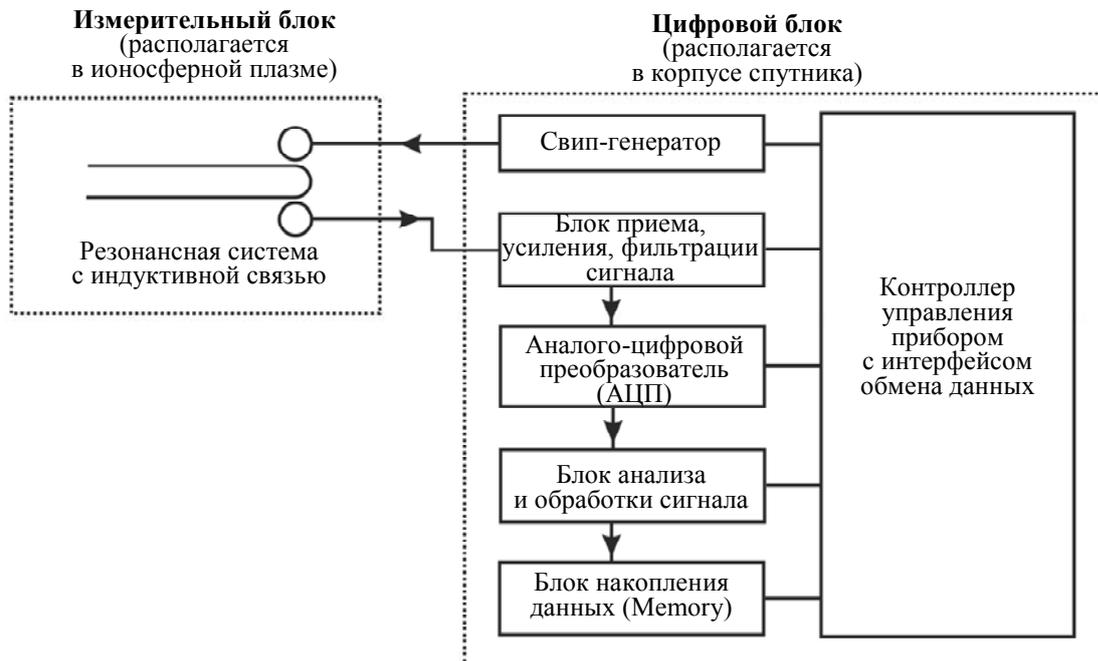
Для измерения фонового значения концентрации плазмы и ее нестационарных флуктуаций может быть использован датчик плотности плазмы (ДПП) — резонансный зонд на основе отрезка двухпроводной линии, позволяющий измерять диэлектрическую проницаемость плазмы, величина которой определяется электронной плотностью. Измерительная часть ДПП, окруженная плазмой, представляет собой распределенную резонансную систему в виде четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, закороченного на одном конце и разомкнутого на другом. Расстояние между проводами 3—10 см, диаметр проводов 1—3 мм, длина зонда в развернутом виде не превышает 100 см. Собственная резонансная частота зонда порядка 100 МГц, добротность резонанса $Q_0 \sim 100$. Возбуждение резонансной системы и прием ее отклика осуществляются с помощью петель индуктивной связи, размещенных вблизи закороченного конца. В предлагаемой схеме измерений зонд используется в условиях, когда собственная частота резонатора зонда ω с плазмой значительно превышает плазменную частоту ω_{pe} . В этом случае моды плазменных колебаний, которые могут возбуждаться в теплой плазме, подавляются затуханием Ландау и поэтому не влияют на результаты измерений.

Принцип измерений плотности фоновой плазмы и ее возмущений с помощью ДПП изложен в работах [8, 9]. Постоянная распространения k в передающей линии из двух параллельных проводов, помещенных в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ , определяется выражением $k = \omega \epsilon^{1/2} / c$. В результате четвертьволновый отрезок такой линии длиной l ($kl = \pi/2$), закороченный на одном конце и открытый на противоположном, обладает свойствами резонатора с собственной частотой $\omega_{res} = (\pi/2l)c/\epsilon^{1/2}$. Если такой резонатор помещен в изотропную либо в слабозамагниченную плазму (при условии $\omega \gg \omega_{pe} \gg \omega_{ce}$, где ω_{ce} — электронная циклотронная частота), для которой $\epsilon \approx 1 - \omega_{pe}^2/\omega^2$, то выражение для резонансной частоты относительно вакуумного значения ω_0 имеет вид $\omega^2 = \omega_0^2 + \omega_{pe}^2$. Таким образом, определив собственную частоту резонатора без плазмы и в плазме, легко определить плазменную частоту ω_{pe} , а следовательно и концентрацию плазмы $n_e = m\omega_{pe}^2/(4\pi e^2)$, где m и e — масса и заряд электрона соответственно. По оценкам, диапазон измеряемых таким зондом концентраций фоновой плазмы для ионосферных высот порядка 400 км составляет $n_e \sim 10^4 - 10^7 \text{ см}^{-3}$.

Наряду с определением фонового значения концентрации эта резонансная система позволяет измерять малые нестационарные возмущения плотности плазмы δn_e . В условиях,

близких к резонансу, наличие возмущений плотности приводит к амплитудной модуляции детектированного сигнала на выходе резонансной системы, причем при фиксированной частоте сигнала, выбранной на „склоне“ резонансной кривой, глубина модуляции огибающей δU пропорциональна δn_e . По оценкам, чувствительность предложенной методики по возмущениям плотности плазмы составляет $\delta n_e/n_e \sim 10^{-2}$.

В состав ДПП входит электронный блок, осуществляющий возбуждение резонатора, прием и обработку выходного сигнала (см. рисунок). Электронный блок включает в себя: цифровой свип-генератор (СГ), являющийся источником высокочастотного сигнала для измерительной системы с диапазоном качания частоты 90—110 МГц и шагом по частоте 1—100 кГц; блок приема, усиления и фильтрации (БПУ) сигнала с измерительной системы; скоростной аналого-цифровой преобразователь (АЦП), обеспечивающий оцифровку сигналов, поступающих с выхода БПУ; блок анализа и обработки сигнала; быстродействующую память; контроллер прибора, оснащенный шиной обмена данными с бортом спутника.



Такой способ не исключает возможности дополнительно измерения плотности плазмы с помощью зонда Ленгмюра [10]. Также возможно проводить измерения электрического поля методом двойного зонда [11] без учета ориентации КА. Планируется проведение измерений разности потенциалов между двумя проводящими сферами, которые электрически изолированы от КА. Кроме этого, будут измерены три компонента квазипостоянного магнитного поля для определения продольных токов, которые характеризуют магнитную активность. Для определения положения спутников и привязки результатов измерений ко времени будет использоваться приемник GPS/ГЛОНАСС на борту. Данные приемника могут быть использованы, в том числе, для определения ПЭС вдоль луча распространения сигнала от GPS/ГЛОНАСС спутников до CubeSat.

Исходя из характеристик плазмы в ионосфере на высотах 400—800 км и с учетом скорости движения спутников временное разрешение должно быть не хуже 30—60 мкс. По возможности измерения будут проводиться в двух режимах: а) быстрый, высокоинформативный — для подробных измерений на отобранных интервалах, б) дежурный, малоинформативный, предназначенный для мониторинга окружающей среды на длительных интервалах. Быстрый режим используется на наиболее важных участках пролета: над работающими нагревными стендами и в авроральной области. Группировка CubeSat будет располагаться таким образом, чтобы обеспечить одновременные измерения на разных масштабах: часть

спутников должны находиться внутри инерционной длины электронов, другая часть — внутри инерционной длины ионов, а один или несколько должны отстоять на расстояниях, превышающих эти величины.

Заключение. Целесообразно использовать одновременно несколько унифицированных наноспутников CubeSat, которые просты в изготовлении, что позволяет изготовить необходимое их количество для исследования сложной мультимасштабной структуры ионосферы. Предполагается, что такие спутники, способные обеспечить получение уникальных одновременных измерений в разнесенных точках околоземного пространства, не будут долго находиться на орбите, следовательно, отпадает необходимость в дополнительных затратах на радиационную защиту спутника и можно использовать более дешевые комплектующие при их производстве. Унификация спутников позволяет не только удешевить и ускорить их проектирование и изготовление, но и при необходимости произвести запуск дополнительных аналогичных спутников для получения вспомогательной информации на других масштабах или для уточнения уже имеющихся данных.

Работа поддержана грантами РФФИ (15-35-20364) и РНФ (14-12-00556).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145—1177.
2. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985. 224 с.
3. Марчук В. Н., Смирнов В. М. Определение электронного содержания ионосферы Земли по данным дальномерных и фазовых измерений // Электронный журнал “Исследовано в России”. 2001. № 127. С. 1465—1475.
4. Cherniak I., Krankowski A., Zakharenkova I. Observation of the ionospheric irregularities over the Northern Hemisphere: Methodology and service // Radio Sci. 2014. Vol. 49, N 8. P. 653—662.
5. Chernyshov A. A., Mogilevsky M. M., Kozelov B. V. Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in the auroral zone // J. Geophys. Res. (Space Phys.). 2013. Vol. 118, N 7. P. 4108—4118.
6. Chernyshov A. A., Mogilevsky M. M., Kozelov B. V. Application of nonlinear methods to the study of ionospheric plasma // J. Physics: Conf. Ser. 2015. Vol. 574. P. 012128. DOI:10.1088/1742-6596/574/1/012128.
7. Чернышов А. А., Могилевский М. М., Козелов Б. В. Фрактальный подход к описанию авроральной области // Физика плазмы. 2013. Т. 39, № 7. С. 636—646.
8. Stenzel R. L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasma // Rev. Sci. Instrum. 1976. Vol. 47, N 5. P. 603—607.
9. Янин Д. В., Костров А. В., Смирнов А. И. и др. Диагностика параметров плазмы атмосферного давления методом ближнепольного СВЧ-зондирования // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 4. С. 42—51.
10. Barjatya A., Swenson C. M., Thompson D. C., Wright K. H. Data analysis of the floating potential measurement unit aboard the international space station // Rev. Sci. Instrum. 2009. Vol. 80, N 4. P. 041301.
11. Fahleson U. Theory of electric field measurements conducted in the magnetosphere with electric probes // Space Sci. Rev. 1967. Vol. 7, N 2—3. P. 238—262.

Сведения об авторах

- Александр Александрович Чернышов** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований РАН, отдел физики космической плазмы; старший научный сотрудник; E-mail: achernyshov@iki.rssi.ru
- Дмитрий Владимирович Чугунин** — Институт космических исследований РАН, отдел физики космической плазмы; младший научный сотрудник; E-mail: dimokch@iki.rssi.ru
- Михаил Менделевич Могилевский** — канд. физ.-мат. наук; Институт космических исследований РАН, отдел физики космической плазмы; заведующий лабораторией; E-mail: mogilevsky2012@gmail.com

- Ирина Леонидовна Моисеенко** — Институт космических исследований РАН, отдел физики космической плазмы; младший научный сотрудник;
E-mail: moiseenko.i@mail.ru
- Александр Владимирович Костров** — д-р физ.-мат. наук; Институт прикладной физики РАН, лаборатория моделирования космической плазмы; заведующий лабораторией; E-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru
- Михаил Евгеньевич Гуцин** — канд. физ.-мат. наук; Институт прикладной физики РАН, лаборатория моделирования космической плазмы; старший научный сотрудник; E-mail: mguschin@appl.sci-nnov.ru
- Сергей Владимирович Коробков** — Институт прикладной физики РАН, лаборатория моделирования космической плазмы; младший научный сотрудник;
E-mail: korobkovs@gmail.com
- Дмитрий Валентинович Янин** — канд. физ.-мат. наук; Институт прикладной физики РАН, лаборатория моделирования космической плазмы; младший научный сотрудник; E-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru

Рекомендована межвузовской
кафедрой космических исследований

Поступила в редакцию
14.11.2015 г.

Ссылка для цитирования: Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Моисеенко И. Л., Костров А. В., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Янин Д. В. Изучение неоднородной структуры ионосферы при помощи одновременных измерений наноспутниками стандарта CubeSat // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 443—449.

STUDY OF INHOMOGENEOUS STRUCTURE OF THE IONOSPHERE USING SIMULTANEOUS MEASUREMENTS BY NANOSATELLITES OF CUBESAT STANDARD

A. A. Chernyshov¹, D. V. Chugunin¹, M. M. Mogilevsky¹, I. L. Moiseenko¹, A. V. Kostrov²,
M. E. Gushchin², S. V. Korobkov², D. V. Yanin²

¹Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 117342, Moscow, Russia
E-mail: achernyshov@iki.rssi.ru

²Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 603950, Nizhny Novgorod, Russia

The possibility of using groups of nanosatellites of CubeSat standard is considered. This approach provides obtaining simultaneous measurements at a number of spaced points and therefore allows a better understanding of complex non-linear processes in the ionosphere is important for fundamental and practical problems. The use of nonlinear dynamics methods (the fractal approach, the percolation theory) is proposed to describe the state of plasma in the auroral region when applied to processing of the data obtained from CubeSat nanosatellites. A plasma density sensor is developed to provide a measurement of the background values of the plasma density and its non-stationary fluctuations.

Keywords: nanosatellites, high-latitude ionosphere, nonlinear dynamics methods, ionospheric inhomogeneities, resonant probe, plasma density sensor, CubeSat

Data on authors

- Alexander A. Chernyshov** — PhD; Space Research Institute of the RAS, Department of Space Plasma Physics; Senior Scientist; E-mail: achernyshov@iki.rssi.ru
- Dmitriy V. Chugunin** — Space Research Institute of the RAS, Department of Space Plasma Physics; Junior Scientist; E-mail: dimokch@iki.rssi.ru
- Mikhail M. Mogilevsky** — PhD; Space Research Institute of the RAS, Department of Space Plasma Physics; Head of Laboratory;
E-mail: mogilevsky2012@gmail.com
- Irina L. Moiseenko** — Space Research Institute of the RAS, Department of Space Plasma Physics; Junior Scientist; E-mail: moiseenko.i@mail.ru
- Alexander V. Kostrov** — Dr. Sci.; Institute of Applied Physics of the RAS, Laboratory of Space Plasma Modeling; Head of the Laboratory;
E-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru
- Mikhail E. Gushchin** — PhD; Institute of Applied Physics of the RAS, Laboratory of Space Plasma Modeling; Senior Scientist;
E-mail: mguschin@appl.sci-nnov.ru

Sergey V. Korobkov — Institute of Applied Physics of the RAS, Laboratory of Space Plasma Modeling; Junior Scientist; E-mail: korobkovs@gmail.com

Dmitriy V. Yanin — PhD; Institute of Applied Physics of the RAS, Laboratory of Space Plasma Modeling; Junior Scientist; E-mail: dyanin@appl.sci-nnov.ru

For citation: Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Mogilevsky M. M., Moiseenko I. L., Kostrov A. V., Gushchin M. E., Korobkov S. V., Yanin D. V. Study of inhomogeneous structure of the ionosphere using simultaneous measurements by nanosatellites of CubeSat standard // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 6. P. 443—449 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-443-449