

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2019

- Д. В. Чугунин** младший научный сотрудник;
Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва;
dimokch@iki.rssi.ru
- А. А. Чернышов** кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;
Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва;
achernyshov@iki.rssi.ru
- М. М. Могилевский** кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник;
Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва;
mogilevsky2012@gmail.com
- И. Л. Моисеенко** младший научный сотрудник;
Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва;
moiseenko.irine@gmail.com
- А. А. Петрукович** доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор;
Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва;
apetruko@iki.rssi.ru

Показана принципиальная возможность проводить измерения плотности плазмы и её флуктуаций в ионосфере на сверхмалых космических аппаратах с применением радиофизических методов, позволяющих по свойствам принимаемого излучения определять характеристики среды, через которую проходило излучение. Предполагается, что каждый космический аппарат будет иметь приёмник спутниковой навигации, а также устройство для излучения и детектирования сигнала на двух кратных частотах в радиодиапазоне. При таком подходе информация о плотности плазмы содержится в принимаемой разности фаз. Радиоприёмники и радиопередатчики на спутниках постоянно обмениваются радиосигналами, и затем по сдвигу фаз возможно определить электронную концентрацию и её флуктуации. В работе получены численные оценки получаемой разности фаз для различных частот от 10 МГц до 10 ГГц при характерных ионосферных параметрах в зависимости от дистанции между спутниками. Выполнены расчёты максимального расстояния между спутниками, при которых возможно принять сигнал при условии, что мощность передатчика будет составлять 2 Вт.

Малые космические аппараты; ионосфера; околоземная плазма; радиофизические методы.

Цитирование: Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Могилевский М.М., Моисеенко И.Л., Петрукович А.А. Использование сверхмалых космических аппаратов для изучения околоземной плазмы радиофизическими методами // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 154-162. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-154-162

Введение

Ионосфера – это ионизированная часть верхней атмосферы Земли, которая окружает нашу планету в виде оболочки, расположенной на высотах выше 60 км. Структура и свойства ионосферы сильно меняются с высотой. Процессы, протекающие в ионосфере, связаны с солнечной активностью, динамикой магнитосферы, с техногенными процессами, вариациями магнитного поля Земли, с движениями верхней атмосферы и так далее. Таким образом, ионосфера находится под постоянным воздействием природных и антропогенных факторов. Параметры ионосферной плазмы постоянно варьируются, а характерные времена динамических внешних и внутренних воздействий различной природы, а также длительность релаксации после них, могут составлять от нескольких минут до нескольких суток. Поэтому ионосфера крайне редко достигает ста-

ционарного состояния, а её пространственная структура характеризуется иерархией различных масштабов. Особенно заметно это проявляется в высокоширотной и экваториальной области [1]. Как правило, под вариациями ионосферы понимают их нерегулярную часть, связанную с нерегулярными эффектами солнечной и магнитосферной активности, а также с искусственной ионосферной турбулентностью.

Изучение неоднородной структуры ионосферы Земли необходимо как для понимания фундаментальной физики протекающих в ней процессов, так и для решения разнообразных прикладных задач, связанных в первую очередь с распространением радиоволн, с возможностью прогнозирования параметров радиосвязи, радионавигации, локации, спутниковых навигационных систем. Важность исследования ионосферы связана также с эффективностью функционирования спутниковых систем радиосвязи и координатно-временного обеспечения и с тенденцией разработки радаров с синтезированной апертурой [2]. Неоднородная и нестационарная структура ионосферы создаёт значительные трудности при её количественном описании и численном моделировании.

Радиофизические исследования верхней атмосферы Земли имеют давнюю историю и внесли большой вклад в решение проблем распространения радиоволн, в знания об ионосфере и верхней атмосфере. Развитие этого направления проводилось на стыке радиофизики и физики космической плазмы, что способствовало достижению значительных успехов в этой области. Л.И. Мендельштам и Н.Д. Папалекси впервые разработали радиофизические методы, позволяющие по свойствам принимаемого излучения определять характеристики среды, через которую проходило излучение [3]. Затем Я.Л. Альперт развил радиоинтерферометрический подход, где вместо двух приёмных антенн классического интерферометра используются две когерентные частоты излучения от одного задающего генератора [4]. В этом подходе информация о плотности плазмы содержится в разности фаз сигналов на разных частотах. Впервые этот метод был применён для обработки и интерпретации радиосигналов уже на первом искусственном спутнике Земли и активно используется до настоящего времени. Другими словами, при распространении в ионосфере наблюдаются различные эффекты взаимодействия радиоволн со средой, что позволяет установить связь между параметрами этой среды и характеристиками радиосигналов.

Радиофизические методы изучения ионосферы Земли возможны с помощью двух спутников – излучателя и приёмника сигналов, при движении которых лучевая линия радиоволн проходит через плазменную среду [5]. Проводились аналитические оценки влияния сред на радиоволны на трассах «спутник-спутник» для выяснения того, насколько радиоволны чувствительны к особенностям ионосферы и атмосферы. В работах (например, [6–9]) рассмотрена задача радиопросвечивания атмосферы и ионосферы Земли, выведены общие соотношения для изменения частоты, фазы, амплитуды, угла рефракции и поглощения радиоволн, а также даны оценки ожидаемых эффектов влияния ионосферы, когда волны распространяются по разным трассам «спутник-спутник».

В данной работе для радиозондирования ионосферы предлагается использовать одновременно несколько унифицированных космических аппаратов малой размерности (кубсаты формата 3U и выше), которые относительно просты в изготовлении, что позволяет быстро и относительно дешево изготовить необходимое их количество. Каждый космический аппарат (КА) будет иметь приёмник спутниковой навигации, а также устройство для излучения и детектирования частот в радиодиапазоне. При таком подходе информация о плотности плазмы содержится в разности (сдвиге, набеге) фаз. Радиоприёмники и радиопередатчики на сверхмалых космических аппаратах (СМКА) бу-

дуг постоянно обмениваться радиосигналами и затем по сдвигу фаз возможно определить электронную концентрацию и её флуктуации.

Принцип измерений

В основе действия прибора лежит зависимость набега фазы φ от частоты сигнала f , проходящего через область, заполненную плазмой. Набег фазы монохроматического сигнала в однородной плазме на частотах, намного превышающих циклотронную и плазменную частоты электронов, равен

$$\varphi = kr - \omega t = 2\pi \frac{f}{c} \left(\frac{1 - \frac{1}{2} f_{pe}^2}{f^2} \right) r,$$

где f_{pe} – плазменная частота; φ – набег фазы волны; k – волновой вектор; r – расстояние, которое прошла волна; ω – угловая частота волны; t – время; f – частота сигнала; c – скорость света.

При генерации опорного сигнала на борту принимающего спутника точность временной синхронизации между спутниками должна составлять малую долю периода зондирующего сигнала, что, например, для частоты 10 МГц должно составлять не больше 20 нс. Такой синхронизации на двух космических аппаратах добиться очень проблематично. Эту проблему можно решить, если передавать сигнал не на одной частоте, а на двух кратных частотах $f_2 = mf_1$, где f_1 и f_2 – частоты двух сигналов; m – коэффициент кратности, которые имеют одинаковую начальную фазу за счёт того, что сигналы формируются от одного генератора.

Тогда фазы сигналов, которые принимаются на другом спутнике, будут равны:

$$\varphi_1 = k_1 r - \omega_1 t; \quad \varphi_2 = k_2 r - \omega_2 t.$$

В принимающем устройстве сигналы приводятся к одной частоте. Для этого в приёмнике ставится умножитель или делитель частоты. В результате разность фаз сигналов, приведённых к одной частоте (к частоте f_1), не содержит времени. Если расстояние между источником сигналов и приёмником известно, то можно определить среднюю концентрацию плазмы вдоль луча распространения по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_2}{m} - \varphi_1 = \frac{\pi f_{pe}^2}{c f_1} \left(1 - 1/m^2 \right) r.$$

На рис. 1 приведены результаты расчётов разности фаз, которые должны быть зафиксированы КА в зависимости от расстояния между ними и от частоты f_1 . Кратность частоты принималась равной $m = 2$. Приведены результаты для двух уровней концентрации в ионосфере. На рис. 1, а средняя концентрация вдоль луча бралась 10^4 см^{-3} , на рис. 1, б – 10^5 см^{-3} . По оси абсцисс отложено расстояние между спутниками в метрах, по оси ординат – частота сигнала f_1 . Цветом и контурными линиями показана разница фаз в π между сигналом f_1 и $2f_1$.

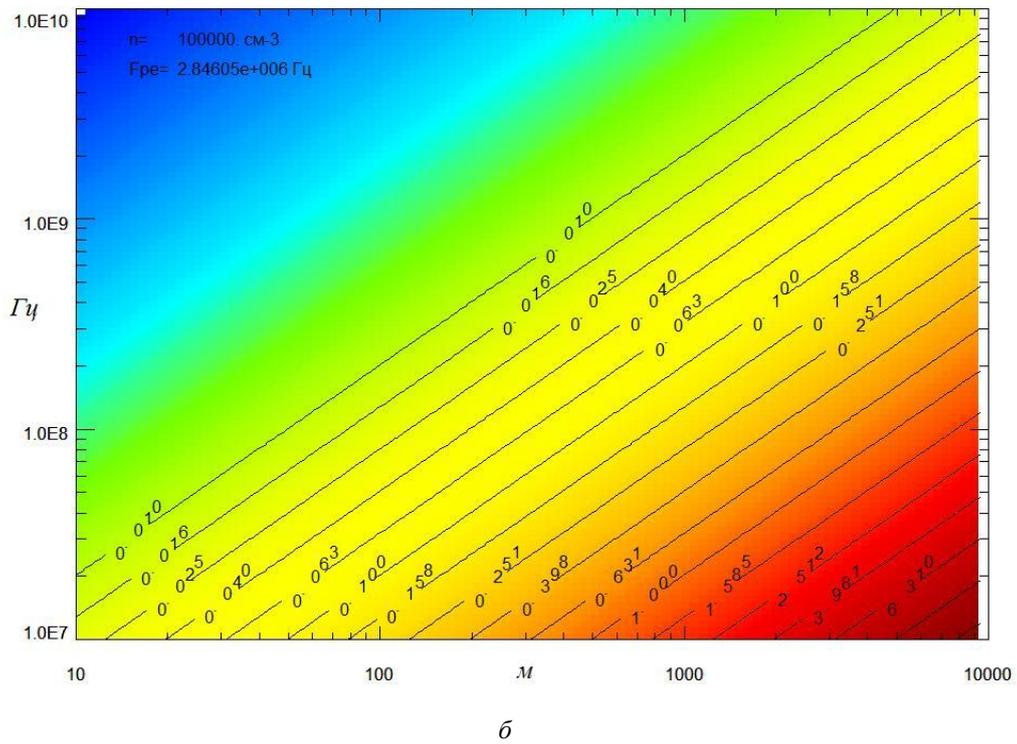
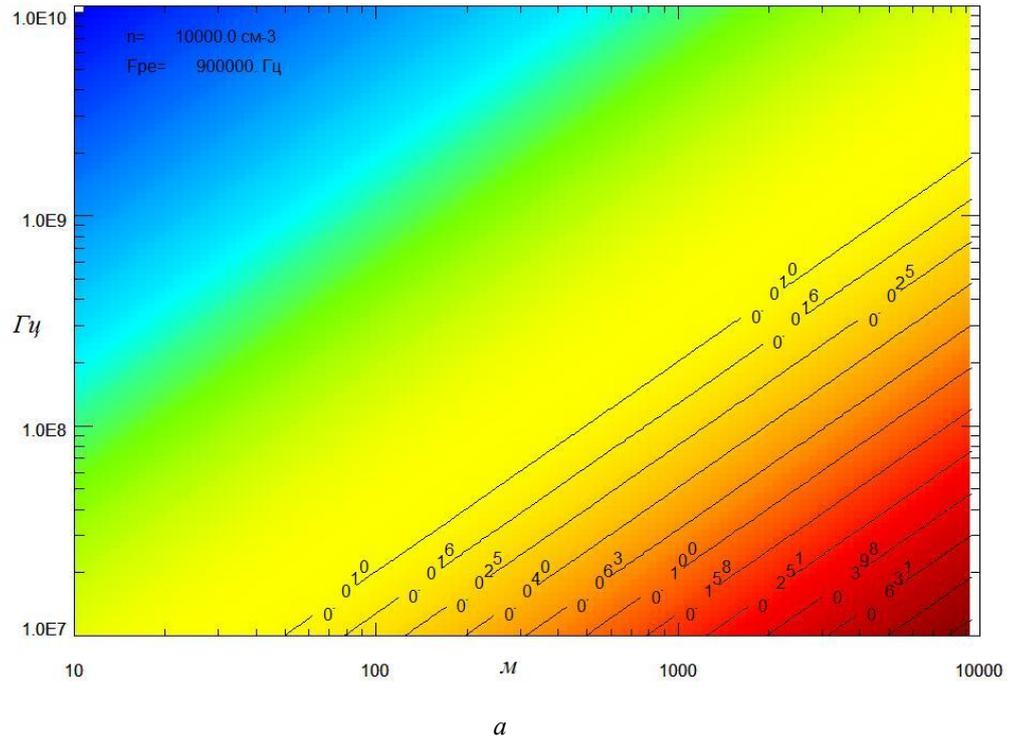


Рис. 1. Разница набега фаз между сигналами с частотой f и частотой $2f$.
 По горизонтали отложено расстояние между передающим и принимающим сигналами спутников.
 По вертикали отложена частота f . Изолиниями и цветом показана разность фаз между
 сигналами в долях от π : а – для концентрации плазмы для 10^4 см^{-3} ;
 б – для 10^5 см^{-3} ; n – концентрация плазмы; $f_{pe}(F_{pe})$ – плазменная частота

Из рис. 1 видно, что при точности определения разности фаз $0,025\pi$ можно определить концентрацию плазмы 10^4 см^{-3} на частоте 10^7 Гц при расстоянии между спутниками ~ 100 м и более, а на частоте 10^8 Гц – при расстоянии 1 км и более. При плотности плазмы 10^5 см^{-3} концентрацию на этих частотах можно будет определять на расстоянии 100 м и более для 100 МГц. На частоте 10 МГц расчёты не вполне корректны, поскольку использовалось приближение, что частота намного больше циклотронной и плазменной частоты. При концентрации 10^5 см^{-3} плазменная частота будет составлять 2,8 МГц.

Результаты расчётов показывают, что возможно подобрать частоту f_1 так, что при небольших расстояниях между спутниками можно определить среднюю концентрацию плазмы в ионосфере.

Используя этот же принцип, можно оценить чувствительность метода на изменения средней вдоль луча плотности плазмы. Были проведены расчёты, насколько изменится разность фаз между сигналами с частотами, отличающимися в два раза, при незначительном изменении плотности. На рис. 2 приведены результаты расчётов разницы фаз в зависимости от расстояния (ось X) и относительного изменения плотности $\Delta n/n$. На рис. 2 показаны расчёты для плотности плазмы 10^5 см^{-3} и основной частоты сигнала 100 МГц. Из рис. 2 видно, что если принимать чувствительность приёмника по фазе около $0,025\pi$, то относительное изменение средней плотности плазмы вдоль луча распространения 10% можно будет зафиксировать на расстоянии ~ 1 км и более. Это говорит о том, что вышеописанным методом на КА, разнесённых друг относительно друга на расстояние от сотен метров до нескольких километров, можно не только определять среднюю плотность плазмы на линии «спутник-спутник», но и быстрые её изменения с точностью $\Delta n/n$ в 10% и выше.

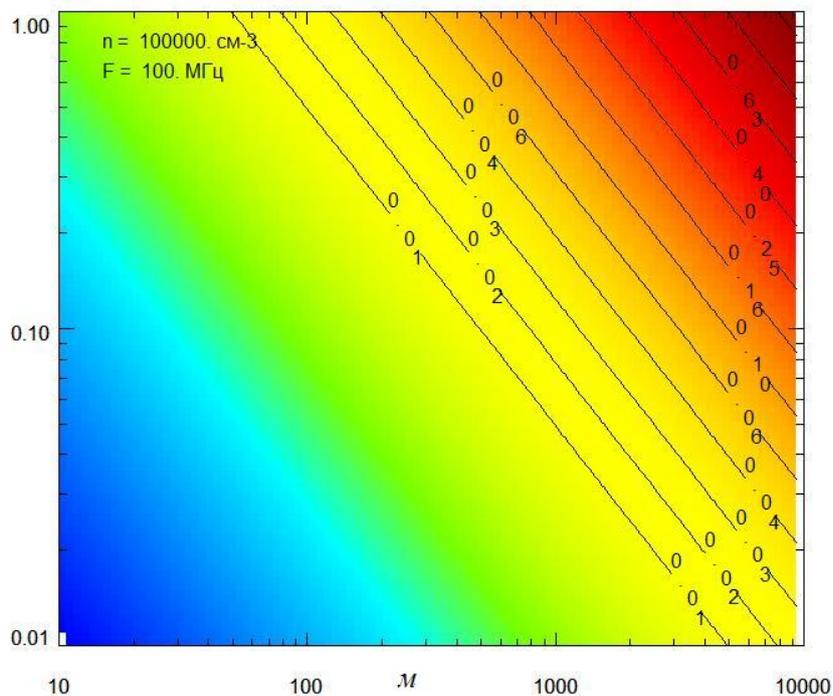


Рис. 2. Зависимость разницы набега фаз между сигналами с частотой f и частотой $2f$ в зависимости от относительного изменения плотности плазмы и расстояния между спутниками при плотности плазмы 10^5 см^{-3} и частоте основного сигнала $f_1(F) = 100$ МГц.

Изолиниями и цветом показана разность фаз в π

Антенна

На КА предпочтительнее выбрать небольшие антенны. Для наилучшей передачи сигнала предпочтительней иметь антенну длиной $\lambda/2$. Для излучения с частотой 10^8 Гц это составляет 1,5 м. Размер антенны накладывает определённые ограничения на размер КА. Такую антенну проблематично установить на кубсат формата 1U, поэтому предлагается использовать КА малой размерности формата 3U или более. Для излучения на удвоенной частоте эта антенна не подойдёт, т. к. её длина будет равняться длине волны и излучение будет неэффективным. Для удвоенной частоты необходимо иметь вторую антенну вдвое меньшей длины. Однако в таком случае необходимо учитывать взаимное влияние антенн, что требует дальнейшей проработки.

Рассмотрим вопрос чувствительности приёмной антенны: на каком расстоянии между приёмником и передатчиком напряжённости поля волны будет достаточно для извлечения сигнала из приёмной антенны [10]? Для диполя в виде уголкового антенны Пистолькорса действующая высота полуволнового диполя будет равна $h_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{\pi}$ [1].

Минимальная напряжённость электрического поля для уверенного приёма определяются формулой $E_{\min} = \frac{2G}{h_d} \sqrt{\Delta f}$, где Δf при добротности $Q=100$ для частоты $f_1 = 100$ МГц будет равняться 1 МГц, чувствительность приёмника G примем равной $10^{-7} \text{ В/Гц}^{1/2}$. Тогда минимальная напряжённость электрического поля E_{\min} на антенне должна быть ~ 40 мкВ/м.

Для симметричного диполя:

$$E \left(\frac{\text{мкВ}}{\text{м}} \right) = \frac{6700 \sqrt{P_u (\text{Вт})}}{r (\text{км})}.$$

На рис. 3 приведены результаты расчётов максимального расстояния уверенного приёма сигнала для мощности излучателя $P_u = 2$ Вт. Такую мощность передатчика можно обеспечить на аппаратах класса кубсат формата от 3U и выше. По горизонтальной оси расположена частота, по вертикальной – максимальное расстояние приёма. Область уверенного приёма сигнала для частоты 100 МГц находится на расстояниях меньше 20 км. Это расстояние достаточно для задач по измерению малых неоднородностей в ионосфере и для мониторинга плотности плазмы на околоземных высотах на близколетящих спутниках. С увеличением частоты максимальное расстояние уменьшается, и если использовать частоту, например 10 ГГц, то необходимо увеличивать мощность передатчика.

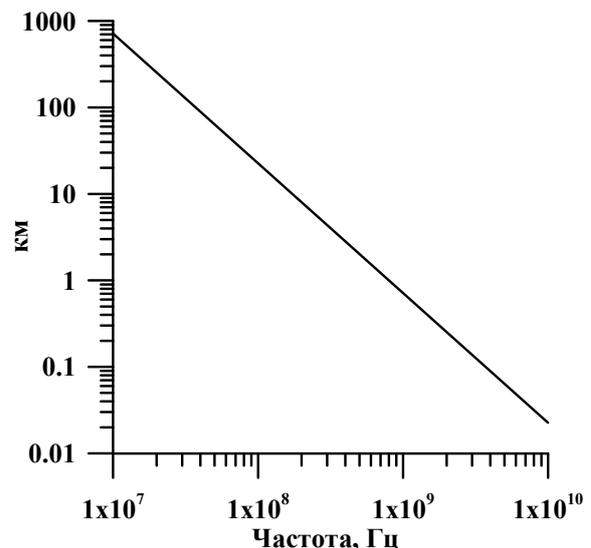


Рис. 3. Максимальное расстояние, на котором принимающий спутник сможет зафиксировать сигнал от передающего спутника в зависимости от частоты сигнала f_1

Заключение

Ионосферная плазма, являясь неоднородной, диспергирующей и нелинейной средой, оказывает существенное влияние на свойства радиоволн в широком диапазоне частот. Изучение вопросов распространения радиоволн в таких сложных средах составляет одну из важнейших проблем радиофизики. С другой стороны, при распространении в ионосфере наблюдаются различные эффекты взаимодействия радиоволн со средой, что позволяет установить связь между параметрами этой среды и характеристиками радиосигналов.

В данной работе предлагается исследовать концентрацию плазмы и её неоднородности в ионосфере несколькими сверхмалыми КА с помощью радиофизических подходов. На каждый аппарат необходимо установить излучатель на двух кратных частотах, например 100 и 200 МГц, и приёмник этого излучения от другого аппарата с умножителем или делителем частоты. Показано, что по разности фаз этих двух сигналов возможно определить среднюю концентрацию плазмы вдоль линии «спутник-спутник» и относительную вариацию концентрации с точностью в несколько процентов. Численные расчёты показали, что на расстояниях между КА, начиная от сотен метров, можно определить сдвиг фаз и, следовательно, плотность плазмы. Оценено максимальное расстояние между спутниками при мощности передатчика 2 Вт и показано, что возможно проводить измерения на расстояниях до 100 км.

Предлагаемые в представленной работе подходы могут быть использованы для исследования ионосферных неоднородностей не только естественного происхождения, но и искусственной ионосферной турбулентности [11; 12].

Библиографический список

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
2. Смирнов В.М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Москва, 2007. 38 с.
3. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности. М.-Л.: Гостехиздат, 1945. 296 с.
4. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
5. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Либроком, 2010. 208 с.
6. Ungar S.G., Lusignan B.B. A two-satellite microwave occultation system for determining pressure altitude references // *Journal of Applied Meteorology*. 1973. V. 12, Iss. 2. P. 396-403. DOI: 10.1175/1520-0450(1973)012<0396:atmosf>2.0.co;2
7. Яковлев О.И., Гришмановский В.А., Елисеев С.Д., Кучерявенков А.И., Матюгов С.С. Радиопросвечивание атмосферы Земли с помощью двух спутников // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 315, № 1. С. 101-103.
8. Rangaswamy S. Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS-F radio occultation data // *Geophysical Research Letters*. 1976. V. 3, Iss. 8. P. 483-486. DOI: 10.1029/GL003i008p00483
9. Вилков И.А., Матюгов С.С., Яковлев О.И. Флуктуации амплитуды при радиопросвечивании атмосферы Земли на трассе спутник-спутник // *Радиотехника и электроника*. 1993. Т. 38, № 5. С. 795-803.
10. Мареев Е.А., Чугунов Ю.В. Антенны в плазме. Нижний Новгород: ИПФ АН СССР, 1991. 231 с.

11. Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Моисеенко И.Л., Ильясов А.А., Вовченко В.В., Пулинец С.А., Клименко М.В., Захаренкова И.Е., Костров А.В., Гушин М.Е., Коробков С.В. Подходы к исследованию мультимасштабной структуры ионосферы с использованием наноспутников // Геомагнетизм и Аэрономия. 2016. Т. 56, № 1. С. 77-85. DOI: 10.7868/S0016794016010041

12. Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Моисеенко И.Л., Костров А.В., Гушин М.Е., Коробков С.В., Янин Д.В. Изучение неоднородной структуры ионосферы при помощи одновременных измерений наноспутниками стандарта CubeSat // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 443-449. DOI 10.17586/0021-3454-2016-59-6-443-449

USE OF ULTRA-SMALL SPACE VEHICLES FOR STUDYING NEAR-EARTH PLASMA BY RADIOPHYSICAL METHODS

© 2019

D. V. Chuginin Junior Researcher;
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Moscow;
Russian Federation;
dimokch@iki.rssi.ru

A. A. Chernyshov Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher;
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation;
achernyshov@iki.rssi.ru

M. M. Mogilevsky Candidate of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher;
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation;
mogilevsky2012@gmail.com

I. L. Moiseenko Junior Researcher;
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation;
moiseenko.irine@gmail.com

A. A. Petrukovich Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director;
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation;
apetruko@iki.rssi.ru

The paper shows the possibility to measure plasma density and its fluctuations in the ionosphere on ultra-small space spacecraft using radiophysical methods that allow determining the characteristics of the medium through which radiation is transmitted. It is assumed that each spacecraft will have a navigational satellite receiver, as well as a device for emitting and detecting a signal at two multiple frequencies in the radio band. With this approach, information on plasma density is contained in the received phase difference. Radio receivers and radio transmitters on satellites constantly exchange radio signals and then it is possible to determine the electron concentration and its fluctuations from the phase shift. The authors obtained numerical estimates of the resulting phase difference for different frequencies from 10 MHz to 10 GHz with typical ionospheric parameters depending on the distance between the satellites. Calculations were also made to determine the maximum distance between satellites at which it is possible to receive a signal, provided that the transmitter power is 2 watts.

Small satellites; ionosphere; near-Earth plasma; radiophysical methods.

Citation: Chuginin D.V., Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Moiseenko I.L., Petrukovich A.A. Use of ultra-small space vehicles for studying near-Earth plasma by radiophysical methods. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 154-162. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-154-162

References

1. Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 528 p.
2. Smirnov V.M. *Metod monitoringa ionosfery Zemli na osnove ispol'zovaniya navigatsionnykh sputnikovykh system. Avtoreferat dis. ... doktora fiziko-matematicheskikh nauk* [Method of monitoring the Earth's ionosphere based on the use of navigational satellite systems. Extended abstract of Doctoral Dissertation (Physics and Mathematics)]. Moscow, 2007. 38 p.
3. Mandel'shtam L.I., Papaleksi N.D. *Noveyshie issledovaniya rasprostraneniya radiovoln vdol' zemnoy poverkhnosti* [Recent studies of the propagation of radio waves along the Earth's surface]. M.-L.: Gostekhizdat Publ., 1945. 296 p.
4. Al'pert Ya.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln i ionosfera* [Propagation of electromagnetic waves and ionosphere]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 564 p.
5. Yakovlev O.I., Pavel'ev A.G., Matyugov S.S. *Sputnikovyy monitoring Zemli: radioozatmennyy monitoring atmosfery i ionosfery* [Satellite monitoring of the Earth: radio occultation monitoring of the atmosphere and ionosphere]. Moscow: Librocom Publ., 2010. 208 p.
6. Ungar S.G., Lusignan B.B. A two-satellite microwave occultation system for determining pressure altitude references. *Journal of Applied Meteorology*. 1973. V. 12, Iss. 2. P. 396-403. DOI: 10.1175/1520-0450(1973)012<0396:atmosf>2.0.co;2
7. Yakovlev O.I., Grishmanovskiy B.A., Eliseyev S.D., Kucheryavenkov A.I., Matyugov S.S. Radio sounding of the Earth's atmosphere using two satellites. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1990. V. 315, Iss. 1. P. 101-103. (In Russ.)
8. Rangaswamy S. Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS-F radio occultation data. *Geophysical Research Letters*. 1976. V. 3, Iss. 8. P. 483-486. DOI: 10.1029/GL003i008p00483
9. Vilkov I.A., Matyugov S.S., Yakovlev O.I. Amplitude fluctuation in radio inspection of the Earth atmosphere from the satellite-satellite route. *Radiotekhnika i Elektronika*. 1993. V. 38, no. 5. P. 795-803. (In Russ.)
10. Mareyev E.A., Chugunov Yu.V. *Antenny v plazme* [Plasma antennas]. Nizhny Novgorod: IPF AN SSSR Publ., 1991. 231p.
11. Chernyshov A.A., Chuginin D.V., Mogilevsky M.M., Moiseenko I.L., Ilyasov A.A., Vovchenko V.V., Pulinets S.A., Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Kostrov A.V., Gushchin M.E., Korobkov S.V. Approaches to studying the multiscale ionospheric structure using nanosatellites. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. V. 56, Iss. 1. P. 72-79. DOI: 10.1134/S0016793216010047
12. Chernyshov A.A., Chuginin 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. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2016. V. 59, Iss. 6. P. 443-449. DOI 10.17586/0021-3454-2016-59-6-443-449. (In Russ.)