
РАЗВИТИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ И ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

УДК 528.851/.855
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-604-611

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ ИНВЕРСНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ

С. Е. АНДРЕЕВСКИЙ, В. М. СИНЕЛЬНИКОВ

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова
Российской академии наук, 108840, Московская область, Троицк, Россия
E-mail: andr@izmiran.ru*

В рамках программы Союзного государства „Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли“ („Мониторинг-СГ“) предложена инверсная схема радиотомографического спутникового зондирования ионосферы с использованием сигналов системы автономных наземных передатчиков (радиомаяков). В ИЗМИРАН разработан технический проект по переносу радиотомографических измерений на борт космического аппарата (КА) и изготовлены экспериментальные образцы бортовой и наземной аппаратуры*. Основными достоинствами инверсной радиотомографии ионосферы являются автономность и низкая стоимость развертывания системы, высокая технологичность обслуживания наземной сети радиомаяков, а также упрощение интеграции измерительного приемника в состав бортовой аппаратуры КА. Представлены основные технические параметры наземных и спутниковых модулей аппаратуры, рассмотрена организация работ при проведении экспериментов по схеме инверсной радиотомографии ионосферы.

Ключевые слова: *инверсная радиотомография, ионосфера, наземный передатчик, когерентные сигналы, бортовой приемник, GSM, интернет, GPS/ГЛОНАСС*

В 1947 г. английский физик венгерского происхождения Деннис Габор, адъюнкт-профессор по электронике в Имперском колледже Лондонского университета, разработал общую теорию голографии для устранения сферической аберрации линз в электронном микроскопе [1], а в 1948 г. предложил термин „голограмма“. Голография — принципиально новый метод получения объемных изображений предметов, основанный на использовании интерференции света. После изобретения лазера идеи голографии получили развитие, а в 1971 г. Габор стал лауреатом Нобелевской премии по физике „за изобретение и развитие голографического метода“ [2]. Использовать голографический метод восстановления волнового фронта радиоволн для изучения движений в ионосфере предложил Дж. Роджерс [3]. При регистрации голограмм подспутниковой неоднородной структуры ионосферы Г. Шмидт использовал две

* Разработка и создание экспериментального образца малогабаритной бортовой научной аппаратуры микроспутников для исследования верхней атмосферы Земли методами радиомаяковой томографии. Итоговый отчет. СЧ НИР „Мониторинг-СГ-2.3.5“. ИЗМИРАН. 2017. № гос. рег. У94063. 108 с.

когерентно связанные частоты бортового передатчика (150/400 МГц) космического аппарата (КА) низкоорбитальной радионавигационной системы NNSS (Navy Navigation Satellite System) [4, 5]. При этом вследствие нелинейной зависимости коэффициента преломления от частоты сигнал более высокой частоты в гораздо меньшей степени взаимодействовал с ионосферой, чем сигнал низкой частоты, который использовался в качестве „измерительной“ волны. Сигнал более высокой частоты, по аналогии с оптической голографией, можно считать „опорной“ волной. Метод обработки данных, использованный в [4, 5], основан на сильно упрощенной модели, в которой полностью исключен гладкий профиль электронной концентрации. В итоге, в схеме с одним приемным пунктом оказалось возможным неполное восстановление голограммы с потерей информации о распределении электронной концентрации в неоднородности. У. Стоун [6] описал эксперимент с 32 приемными антеннами, расположенными перпендикулярно траектории космического аппарата (КА), что обеспечивало трехмерное восстановление голограммы. Теория голографического эксперимента по локализации неоднородностей электронной концентрации в ионосфере с помощью искусственных спутников Земли была развита в работах [7, 8].

Восстановление параметров ионосферы и атмосферы по полученным линейным или плоскостным интегралам с использованием „линейки“ наземных приемников получило название радиотомографии (РТ). Первые в России спутниковые РТ-реконструкции структуры ионосферы были проведены в 1990 г. сотрудниками МГУ и ПГИ РАН [9]. Далее были выполнены РТ-исследования возмущений ионосферы, вызванных антропогенными факторами, в частности, стартами ракет, промышленными взрывами, мощным КВ-излучением [10]. В 1993 г. был проведен российско-американский томографический эксперимент (RATE'93) по сопоставлению результатов РТ-реконструкций с данными радара некогерентного рассеяния в Миллстоун Хилл (США). В 1998 г. сотрудники МГУ, ПГИ, ИЗМИРАН были отмечены Госпремией РФ в области науки и техники за разработку методов радиотомографии ионосферы.

Одна из самых актуальных задач создающейся в настоящее время системы мониторинга геофизической обстановки над территорией России — выявление неоднородных геофизических структур различного происхождения в верхней атмосфере и ионосфере. Многие природные и техногенные факторы проявляются в возмущениях регулярной структуры геофизических сред и, следовательно, могут быть обнаружены и идентифицированы в процессе их мониторинга. Особенный интерес представляет мониторинг неоднородной структуры ионосферы, поскольку оперативный учет ионосферных возмущений различного происхождения позволяет повысить эффективность решения таких задач, как обеспечение высокоточной спутниковой навигации с помощью одночастотной аппаратуры в стандартном и дифференциальном режиме, расчет трасс распространения сигналов при коротковолновой связи, контроль качества спутниковых радиоканалов связи, учет действия факторов космического пространства на КА и т.д. Одними из самых перспективных для достижения заданных целей являются методы низкоорбитальной радиотомографии (НОРТ) [11, 12]. По стандартной схеме РТ спутникового зондирования ионосферы одновременный прием когерентных сигналов от КА наземной сетью („линейкой“) приемных установок позволяет получать двумерные сечения, или „разрезы“, распределения электронной концентрации в ионосфере. Протяженность этих сечений составляет сотни и даже тысячи километров (зависит от длины „линейки“ приемников), а высота определяется высотой орбиты КА. Сеть приемных установок располагается вдоль направлений пролета спутника. Высокая скорость движения КА (~7,9 км/с) и соответственно быстрый (по сравнению с характерными масштабами временных изменений исследуемых ионосферных процессов) пролет КА над просвечиваемой областью ионосферы позволяет реконструировать сечения электронной концентрации в плоскости пролета спутника. Одновременный прием сигналов спутника на нескольких наземных пунктах, расположенных вблизи плоскости орбиты спутника, либо прием сигналов от нескольких спутников,

плоскости орбит которых близки, а наземный пункт находится вблизи плоскости орбит, позволяет получать двумерное сечение среды без привлечения каких-либо предположений о ее структуре. Такого рода измерения на сети наземных приемных пунктов на Камчатке позволяют в режиме мониторинга исследовать отклик ионосферы на процессы, связанные с подготовкой землетрясений и вулканической активностью. Томограммы ионосферы над Сахалином и Камчаткой доступны в сети Интернет [13, 14].

Суть предлагаемого ИЗМИРАН подхода состоит в том, чтобы инвертировать стандартную схему радиомаяковой томографии, а именно — одновременно регистрировать с помощью многоканального приемника на борту КА (в т.ч. микроспутника) когерентные радиосигналы, излучаемые портативными автономными наземными радиопередатчиками (радиобуями), размещаемыми в заданном полигоне по схеме, оптимальной для радиотомографической обработки данных. Разработка, предлагаемая ИЗМИРАН, является альтернативным вариантом стандартной низкоорбитальной РТ. Основными достоинствами инверсной схемы РТ можно признать полный контроль над работой системы (при самостоятельном разворачивании цепочек наземных передатчиков), упрощение интеграции приемника в состав микроспутника и более низкую стоимость развертывания и обслуживания наземной сети радиомаяков. К числу недостатков такой схемы можно отнести необходимость передачи результатов измерений с орбиты КА, более жесткие требования к характеристикам приемника, в том числе и требование многоканальности его схемы.

Для использования в составе инверсной схемы РТ-зондирования ионосферы в ИЗМИРАН разработан комплекс экспериментальных образцов наземного и бортового оборудования в следующем составе:

- наземный передатчик когерентных сигналов 150/400 МГц (ПКС 150/400);
- бортовой измерительный комплекс 150/400 МГц (БИК 150/400).

Представим основные технические характеристики разработанного оборудования.

Передатчик ПКС 150/400

Выходная мощность передатчика, Вт, не менее	1
Частотный диапазон сигналов VHF, МГц	149,07—150,93
Частотный диапазон сигналов UHF, МГц	397,52—402,48
Шаг перестройки по частоте в диапазоне VHF, кГц, не более	30
Погрешность установки частоты сигнала, не более	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$

Приемник БИК 150/400

Частотный диапазон сигналов VHF, МГц	149,07 — 150,93
Частотный диапазон сигналов UHF, МГц	397,52 — 402,48
Пороговая чувствительность в диапазоне VHF, дБм, не менее	-129
Пороговая чувствительность в диапазоне UHF, дБм, не менее	-138
Шаг перестройки по частоте в диапазоне VHF, кГц, не более	30
Общее число каналов приема, не менее	12
Число частотных каналов приема, не менее	4
Число доплеровских каналов приема, не менее	12

Структурная схема спутниковой системы инверсной радиотомографии ионосферы приведена на рисунке: БИК 150/400 — бортовой измерительный комплекс 150/400 МГц; ПО МСД — программное обеспечение модуля сбора данных; ЦПС — цифровой процессор сигналов; РПМ VHF — модуль приемника VHF (150 МГц); РПМ UHF — модуль приемника UHF (400 МГц); ПКС 150/400 — передатчик когерентных сигналов 150/400 МГц; РПД VHF — передатчик VHF (150 МГц); РПД UHF — передатчик UHF (400 МГц); РПМ GPS — приемник GPS/ГЛОНАСС; МДМ GSM — модем сотовой связи сети GSM; ССД КА — система сбора данных КА; ЦУ КА — центр управления КА. Ниже даны пояснения к структурной схеме и кратко представлена организация работ при проведении измерений.

БИК 150/400 содержит два антенно-фидерных устройства, два модуля приемника, работающих в частотных диапазонах VHF и UHF, два модуля цифровых процессоров сигналов (ЦПС) и модуль сбора данных (МСД).

Модуль ЦПС предназначен для:

- установки режимов работы частотных каналов приемников (рабочая частота и коэффициент усиления);
- включения и выключения режима измерений;
- приема результатов измерений;
- поиска, захвата и слежения за частотой доплеровских каналов приема;
- детектирования результатов измерений доплеровских каналов приема;
- буферного хранения результатов измерений и передачи в модуль сбора данных.



Использование двух модулей ЦПС, работающих параллельно, позволяет резервировать модули ЦПС (работает один из модулей ЦПС); дублировать модули ЦПС (для увеличения вычислительной мощности ЦПС, при необходимости).

МСД предназначен для решения следующих задач:

- прием команд управления, меток времени, параметров режима работы и орбитальных параметров движения КА от его служебной системы;
- передача результатов измерений и параметров телеметрии в служебную систему КА;
- включение и выключение режима измерений;
- управление ЦПС в соответствии с программой измерений;
- установка режима работы модулей приемников и модулей ЦПС, контроль их состояния;
- расчет ожидаемого доплеровского смещения частоты сигналов, излучаемых наземными передатчиками, и передача результатов расчета в модули ЦПС;
- прием результатов измерений от ЦПС и их буферное хранение.

Передатчик ПКС 150/400 содержит два антенно-фидерных устройства, два модуля передатчика, работающих в частотных диапазонах VHF и UHF, и модуль управления.

Модуль управления предназначен для:

- установки рабочей частоты каналов передатчиков;
- включения и выключения усилителей мощности по программе измерений или по команде дистанционного управления;
- контроля состояния каналов передатчиков;

- генерации сигнала опорной частоты;
- управления модемом сотовой связи для организации дистанционного управления передатчиком ПКС 150/400 и передачи данных о его состоянии;
- управления навигационным приемником с целью приема текущих координат ПКС 150/400 и секундной шкалы времени (PPS);
- сравнения смещения шкалы времени навигационного приемника и шкалы времени опорного генератора для измерения и минимизации относительной погрешности его частоты;
- приема команд управления и программы измерений по каналу сотовой связи или локальной линии связи на основе интерфейса RS-485;
- передачи данных состояния ПКС 150/400 по каналу сотовой связи или локальной линии связи на основе интерфейса RS-485.

Блок передатчика ПКС 150/400 выполнен в виде моноблока, совмещенного с передающей антенной.

Организация работ с применением ПКС 150/400. Число передатчиков, входящих в состав одного кластера (географического региона), может колебаться от трех до двенадцати. Передатчики, расположенные вдоль проекции орбиты КА, должны работать на одном частотном канале. Передатчики, расположенные поперек проекции орбиты КА, должны работать на разных частотных каналах.

Основные параметры режима работы ПКС 150/400, получаемые от сервера управления:

- номер частотного канала n , где n принимает целые значения от -31 до 31 ;
- программа включения и выключения усилителя мощности;
- состояние потенциометра опорного генератора, соответствующее наилучшему приближению к номиналу рабочей частоты.

Первые два параметра посылаются сервером управления и записываются в энергонезависимую память модуля управления. Второй параметр также записан в энергонезависимой памяти, но согласно дополнительным параметрам режима работы может изменяться источник администрирования этого параметра — сервер управления или модуль управления ПКС 150/400. Если источником администрирования этого параметра является сервер управления, то на основании данных об отклонении частоты опорного генератора от номинала на сервере управления вычисляется величина управляющего параметра, уменьшающего отклонение частоты, и передается в ПКС 150/400. Если источником администрирования этого параметра является модуль управления ПКС 150/400, то на основании данных об отклонении частоты опорного генератора от номинала модуль управления автономно вычисляет величину управляющего параметра, уменьшающего отклонение частоты, и записывает его в память ПКС 150/400. Программа включения и выключения усилителя мощности рассчитывается на неделю автономной работы ПКС 150/400.

Основные параметры режима работы ПКС 150/400, передаваемые серверу управления:

- номер частотного канала n , где n принимает целые значения от -31 до 31 ;
- состояние включения или выключения усилителя мощности;
- уровень выходной мощности в частотных диапазонах UHF и VHF;
- текущий ток потребления ПКС 150/400;
- величина входного напряжения питания;
- параметры состояния вторичных источников питания;
- результаты измерения отклонения частоты опорного генератора от номинала;
- текущее значение параметра управления частотой опорного генератора.

Организация работ с применением БИК 150/400. Программа работы БИК 150/400 зависит от общего числа передатчиков, входящих в состав одного кластера, от числа рабочих частотных каналов и числа передатчиков, работающих в каждом частотном канале. Кластер описывается числом частотных каналов приема, числом доплеровских каналов приема и координатами передатчиков в кластере.

Основные параметры режима работы БИК 150/400, получаемые от сервера управления:

- число частотных каналов приема и их номера n , где n принимает целые значения от -31 до 31 ;
- число доплеровских каналов приема m , где m принимает целые значения от 1 до 12 , при условии, что $m \cdot n \leq 12$;
- географические координаты всех передатчиков;
- параметры орбиты КА.

В результате реализации программы измерений, определяющей моменты времени, когда КА оказывается на минимально требуемом расстоянии от передатчиков, обеспечивающем возможность обнаружения сигналов передатчиков, подстройку и захват их частоты, выполняются измерение квадратурных компонентов сигналов и их доплеровское смещение по частоте. Результаты измерений записываются в буферную память служебной системы КА и передаются на Землю. Кроме результатов измерений на Землю передаются параметры режима работы БИК 150/400. Основные параметры режима работы БИК 150/400, передаваемые серверу управления, следующие:

- результаты проведения сеансов обнаружения и захвата сигналов передатчиков рабочего кластера;
- длительность сеансов измерений;
- объем данных сеансов измерений;
- текущая программа измерений (на интервале недели);
- рабочий ток потребления БИК 150/400;
- величина входного напряжения питания;
- параметры состояния вторичных источников питания;
- результаты измерения отклонения частоты опорного генератора от номинала.

Заключение. В ИЗМИРАН в рамках программы Союзного государства „Мониторинг-СТ“ разработана конструкторская документация и изготовлены экспериментальные образцы бортовой и наземной аппаратуры инверсной радиотомографии, обоснована концепция разработанных аппаратных и программных средств для реализации предложенного метода исследования структуры ионосферы.

Разработанный комплекс оборудования с соответствующим программным обеспечением имеет, на наш взгляд, следующие достоинства:

- простота создания локальных измерительных полигонов с точки зрения согласования используемых радиочастот и развертывания системы наземных передатчиков;
- интеграция измерительного приемника на борт микроспутников с различными комплектами полезных нагрузок, с точки зрения электромагнитной совместимости;
- перспектива разработки аппаратуры для инверсного томографического зондирования с использованием микро- и даже наноспутников, за счет снижения потребления энергии и массогабаритных характеристик приемника (при увеличении степени интеграции компонентов) и минимизации массогабаритных характеристик антенно-фидерных устройств приемника, при переходе на когерентные рабочие частоты в верхней части УВЧ-диапазона [15].

Области применения:

- фундаментальные исследования с целью получения новых данных о физических параметрах околоземной плазмы с высоким временным и пространственным разрешением;
- прикладные исследования экологических последствий природных и техногенных катастроф, вызывающих модификацию ионосферной плазмы;
- региональный мониторинг модификации структуры ионосферы над очагом подготовки землетрясения, с целью получения дополнительной информации для прогнозирования места и времени катастрофических сейсмических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gabor D.* A new microscope principle // *Nature*. 1948. Vol. 161. P. 777—778.
2. *Gabor D.* Holography // *Nobel Lecture*. December 13, 1971. Preprint: *Les Pris Nobel en 1971*, Stockholm, 1972.
3. *Rogers G. L.* A new method of analyzing of ionospheric movement records // *Nature*. 1956. Vol. 177. P. 613—614.
4. *Schmidt G.* Determination of the height of ionospheric irregularities with the holographic method // *Zeitschrift fur Geophysic*. 1972. Vol. 38. P. 891—913.
5. *Schmidt G., Tauriainen A.* The localization of ionospheric irregularities by the holographic method // *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 4313—4323.
6. *Stone W. R.* A holographic radio camera technique for the three-dimensional reconstruction of ionospheric irregularities // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1976. Vol. 38. P. 583—592.
7. *Дубовой А. П., Синельников В. М.* Теория квазиголографического эксперимента по локализации неоднородностей электронной концентрации в ионосфере с помощью ИСЗ // XII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Томск, 1978. Т. 1. С. 51—53.
8. *Терещенко Е. Д.* Радиоголографический метод исследования ионосферных неоднородностей. Кольский филиал АН СССР, 1987. 100 с.
9. *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.* и др. Радиотомография глобальных ионосферных структур // Препринт Полярного геофизич. ин-та. Апатиты. 1990. № 90-10-78. С. 1—30.
10. *Andreeva E. S., Frolov V. L., Kunitsyn V. E., Kryukovskii A. S., Lukin D. S., Nazarenko M. O., Padokhin A. M.* Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the Sura heating facility // *Radio Sci.* 2016. Vol. 51, N 6. P. 638—644.
11. *Kunitsyn V., Tereshchenko E.* *Ionospheric Tomography*. Springer-Verlag, 2003. 272 p.
12. *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
13. *Романов А. А., Трусов С. В., Романов А. А., Крючков В. Г.* Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 2. С. 14—20.
14. *Романов А. А., Трусов С. В., Новиков А. В., Аджалова А. В., Романов А. А., Селин В. А.* Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения // *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*. 2009. Т. 111. С. 32—37.
15. *Андреевский С. Е., Кузнецов В. Д., Синельников В. М., Ружин Ю. Я.* Радиотомография ионосферы с помощью системы микро/нано спутников // *Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках: Тр. Научной сессии секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН*. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 9—15.

Сведения об авторах

- Станислав Евгеньевич Андреевский** — ИЗМИРАН; ведущий инженер; E-mail: andr@izmiran.ru
Вячеслав Михайлович Синельников — д-р физ.-мат. наук; ИЗМИРАН; ведущий научный сотрудник;
 E-mail: sinel371@mail.ru

Поступила в редакцию
26.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Андреевский С. Е., Синельников В. М. Предложения по созданию системы спутниковой инверсной радиотомографии // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 7. С. 604—611.

PROPOSALS FOR CREATION OF SATELLITE INVERSE RADIO TOMOGRAPHY SYSTEM

S. E. Andreevsky, V. M. Sinelnikov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS,
142190, Moscow Region, Troitsk, Russia
E-mail: andr@izmiran.ru*

The inverse geometry of radio tomographic satellite sounding of the ionosphere with the use of ground-based transmitters system signals is considered. The main advantages of the inverse scheme

of ionosphere radio tomography are complete control over work of ground transmitters, simplification of receiver integration into the a small spacecraft structure, and also a low cost of expansion and service of ground radio beacons network. Technical characteristics of the proposed ground and satellite modules for ionosphere radio tomography equipment are presented.

Keywords: radio tomography, ionosphere, ground based transmitter, coherent signals, spaceborne receiver, GSM, Internet, GPS/GLONASS

REFERENCES

1. Gabor D. *Nature*, 1948, no. 161, pp. 777–778.
2. Gabor D. *Holography*, Nobel Lecture. December 13, 1971, Preprint, Les Pris Nobel en 1971, Stockholm, 1972.
3. Rogers G.L. *Nature*, 1956, no. 177, pp. 613–614.
4. Schmidt G. *Zeitschrift fur Geophysic*, 1972, no. 38, pp. 891–913.
5. Schmidt G., Tauriainen A. *J. Geophys. Res.* 1975, no. 80, pp. 4313–4323.
6. Stone W.R. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, no. 38, pp. 583–592.
7. Dubovoy A.P., Sinel'nikov V.M. *XII Vsesoyuznaya konferentsiya po rasprostraneniyu radiovoln* (XII All-Union Conference on Distribution of Radio Waves), Tomsk, 1978, no. 1, pp. 51–53. (in Russ.)
8. Tereshchenko E.D. *Radiolograficheskiy metod issledovaniya ionosfernykh neodnorodnostey* (Radioholographic Method for the Study of Ionospheric Inhomogeneities), Kola branch of the USSR Academy of Sciences, 1987, 100 p. (in Russ.)
9. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreyeva E.S. et al. *Radiotomografiya global'nykh ionosfernykh struktur* (Radiotomography of Global Ionospheric Structures), Pre-print of Polar geophysical Institute, Apatity, 1990, no. 90-10-78, pp. 1–30. (in Russ.)
10. Andreeva E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., Kryukovskii A.S., Lukin D.S., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. *Radio Sci.*, 2016, no. 6(51), pp. 638–644.
11. Kunitsyn V., Tereshchenko E. *Ionospheric Tomography*, Springer-Verlag, 2003, 272 p.
12. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreyeva E.S. *Radiotomografiya ionosfery* (Radiotomography of the Ionosphere), Moscow, 2007, 336 p. (in Russ.)
13. Romanov A.A., Trusov S.V., Romanov A.A., Kryuchkov V.G. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008, no. 2, pp. 14–20. (in Russ.)
14. Romanov A.A., Trusov S.V., Novikov A.V., Adzhalova A.V., Romanov A.A., Selin V.A. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIIEM* (Electromechanics Questions. Works of NPP VNIIEM), Moscow, 2009, no. 111, pp. 32–37. (in Russ.)
15. Andreyevskiy S.E., Kuznetsov V.D., Sinel'nikov V.M., Ruzhin Yu.Ya. *Issledovaniya solnechno-zemnykh svyazey na mikro-, nano- i pikosputnikakh. Trudy Nauchnoy sessii sektsii solnechno-zemnykh svyazey Soveta po kosmosu RAN* (Research of Solar-Terrestrial Communications on Micro-, Nano- and Picosatellites. Proceedings of the Scientific Session of the Solar-Terrestrial Relations Section of the Space Council RAS), Moscow, 2015, pp. 9–15. (in Russ.)

Data on authors

- Stanislav E. Andreevsky** — Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS; Leading Engineer;
E-mail: andr@izmiran.ru
- Vyacheslav M. Sinelnikov** — Dr. Sci.; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS; Leading Scientist;
E-mail: sinel371@mail.ru

For citation: Andreevsky S. E., Sinelnikov V. M. Proposals for creation of satellite inverse radio tomography system. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 604–611 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-604-611