

И. Б. Власов, В. П. Михайлицкий,  
А. И. Гаврилов, В. С. Рыжов

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ АНТЕННЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

*Представлены результаты наблюдения сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС с помощью программно-аппаратного комплекса, созданного на базе радиотелескопа РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Описаны методики калибровки измерительной системы с использованием радиоизлучения Солнца.*

**E-mail:** vlasov@bmstu.ru

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, радиотелескоп РТ-7,5, контроль качества сигналов, измерение мощности навигационного сигнала.

Возросшее число областей применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), предъявляющих повышенные требования к точности и надежности навигационных определений, требует тщательного контроля структуры и характеристик сигналов, транслируемых навигационными космическими аппаратами (НКА).

В настоящее время в ряде стран мониторинг качества сигналов НКА проводится с использованием крупноапертурных зеркальных антенн [1—5]. Применение антенн с высоким коэффициентом усиления делает возможным регистрацию сигналов НКА с положительным отношением сигнал/шум на входе системы, в то время как в стандартной аппаратуре потребителя эти сигналы скрыты под собственными тепловыми шумами и для их восстановления применяется корреляционная обработка с использованием соответствующего псевдослучайного кода. Крупноапертурная антенна, помимо высокого коэффициента усиления, позволяет за счет узкого луча диаграммы направленности выполнять пространственную селекцию спутниковых сигналов, существенно ослабляя влияние сигналов других навигационных аппаратов. Технические характеристики зарубежных антенн, используемых в различных странах для мониторинга сигналов НКА, приведены ниже:

Антенна (страна)	Диаметр, м	$K_{ус\ id}$ , дБ	$K_{реал}$ , дБ	КИП
Green Bank (США)	110	65	—	—
Stanford (США)	45	57	52	0,32

Weilheim (Германия)	30	53,5	50,7	0,52
Chilbolton (Англия)	25	51,8	—	—
Redu (ESA) (Бельгия)	20	49,5	—	—
Alcatel (Италия)	5,1	38,6	35,9	0,54

### Описание комплекса, созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Комплекс построен на основе зеркальной антенны радиотелескопа РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, расположенного в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана. В состав радиотелескопа входят две зеркальные антенны диаметром 7,75 м с радиоинтерферометрической базой 250 м. В комплексе используется восточная антенна РТ-7,5 с точностью отражающей поверхности порядка 0,1 мм, позволяющей работать во всех диапазонах длин волн, превышающих 1 мм (рис. 1).

Антенна имеет азимутальную монтировку и оснащена синхронно-слеящими приводами с ошибками слежения порядка нескольких угловых секунд и диапазоном угловых скоростей вращения от 2°/с до 10°/с. Полная остаточная ошибка наведения в коротковолновой части миллиметрового диапазона составляет 10".

Для работы в  $L$ -диапазоне применяются специально разработанные облучатели (микрорешетчатые одно- и двухчастотные, спиральные широкополосные), обеспечивающие оптимальное облучение 120-градусного раскрыва зеркала из первичного фокуса.

Структурная схема комплекса представлена на рис. 2.

Коэффициент усиления антенны РТ-7,5 в диапазоне  $L1$  (1 600 МГц) составляет примерно 40 дБ при ширине луча около 2°. Коэффициент шума используемого малошумящего усилителя (МШУ) не более 1 дБ. Эти характеристики позволяют получить на входе регистрирующей аппаратуры отношение сигнал/шум порядка 20 дБ. Из первичного фокуса антенны сигнал передается по коаксиальному кабелю длиной 25 м в пилон антенны, где расположена регистрирующая аппаратура.

В качестве регистрирующей аппаратуры используется анализатор спектра для наблюдения спектров сигналов в реальном времени, радиометр для проведения калибровочных и юстировочных процедур, различные навигационные приемники для записи сигналов и их последующей обработки.



Рис. 1. Восточная антенна РТ-7,5

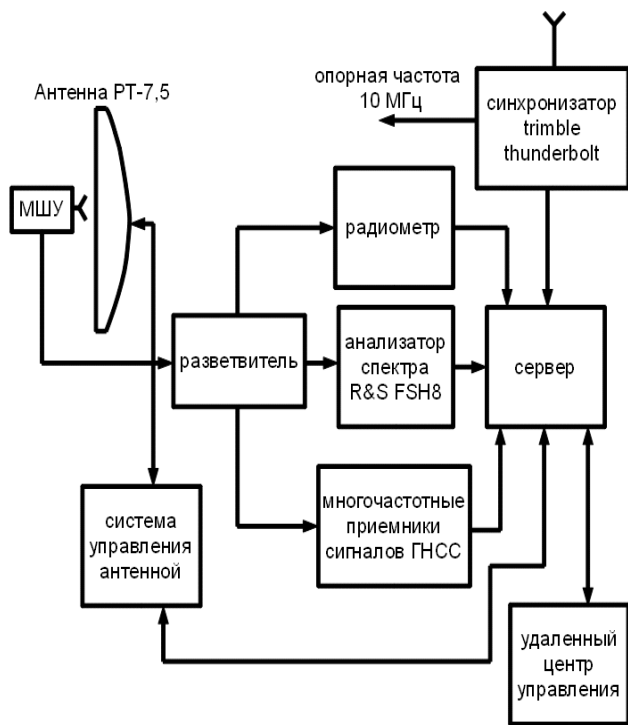


Рис. 2. Структурная схема комплекса

В состав комплекса также входит система управления антенной, включающая в себя сервер управления и сбора данных, к которому подключена регистрирующая аппаратура и контроллер управления приводом антенны.

**Калибровка измерительной системы.** Одной из задач, решаемых подобными комплексами мониторинга сигналов НКА, является определение абсолютных уровней мощности навигационных сигналов. Для решения этой задачи необходим постоянный контроль параметров системы, влияющих на общий коэффициент усиления измерительной системы.

Основными факторами, влияющими на точность определения абсолютной мощности сигналов, являются ошибки наведения антенны и определения коэффициента усиления антенны и приемника. Для измерения абсолютной величины мощности навигационного сигнала с погрешностью не более 1 дБ допустимые погрешности определения коэффициента усиления антенны и приемника должны составлять не более 0,6 дБ и 0,2 дБ соответственно. Погрешность, вызванная неточностью наведения антенны, не должна превышать 0,2 дБ, что соответствует максимальной ошибке наведения антенны не более 0,1 ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности.

Координаты НКА для наведения антенны рассчитываются на основе кеплеровских параметров орбиты с использованием свободно распространяемых файлов формата NASA Two Line Element format (TLE), представляющих собой текстовые двухстрочные файлы с кеплеровскими элементами для каждого КА.

Контроль коэффициента усиления антенны  $G$  и приемного тракта в подобных системах мониторинга обычно проводится отдельно [2]. Коэффициент усиления антенны определяется из шумовой добротности системы  $G/T$ , обычно измеренной по точечному космическому источнику с известной спектральной плотностью потока мощности на исследуемых частотах. В качестве такого источника, например, может выступать радиоисточник Кассиопея А.

После определения параметра шумовой добротности измеряется шумовая температура всей измерительной системы  $T$  с применением дополнительных эталонных источников шума. Затем рассчитывается искомый коэффициент усиления антенны  $G$ . Слежение за коэффициентом усиления приемника осуществляется в режиме реального времени и заключается в подмешивании на входе приемного тракта пилот-сигнала известной мощности с частотой, близкой к частотам исследуемых сигналов.

Для комплекса РТ-7,5 разработан и применяется более простой метод измерения абсолютных уровней мощности навигационных сигналов с использованием радиоизлучения Солнца. Метод основан на сравнении уровней принимаемых сигналов НКА и источника с известной спектральной плотностью потока мощности на исследуемых частотах и соизмеримой со спектральной плотностью потока мощности исследуемого навигационного сигнала (рис. 3).

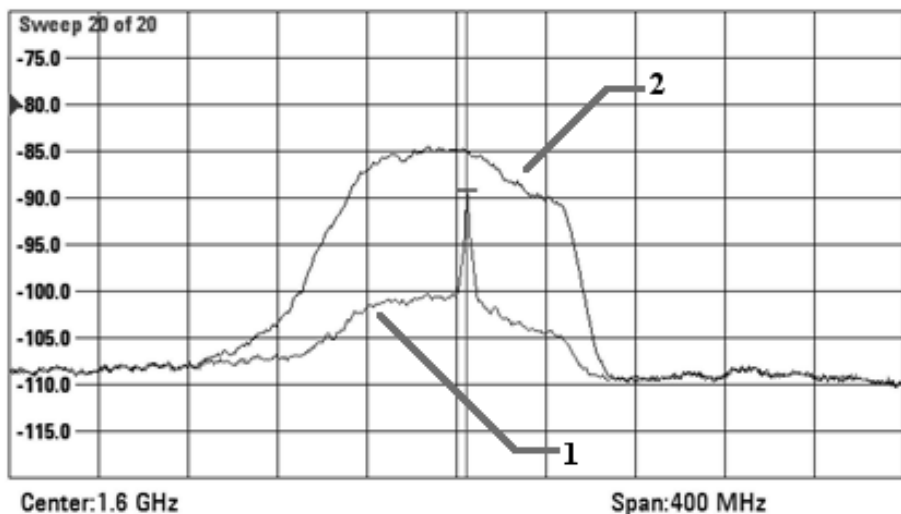


Рис. 3. Сравнение спектров сигнала L1 НКА ГЛОНАСС (1) и сигнала от Солнца (2) на фоне собственных шумов системы

В данном случае таким мощным опорным источником является Солнце, угловой размер которого ( $0,5^\circ$ ) позволяет считать его точечным источником для антенны РТ-7,5 в  $L$ -диапазоне в отличие от других комплексов мониторинга, использующих антенны большего диаметра.

В исследуемом диапазоне частот полный солнечный поток существенным образом зависит от текущего уровня активности Солнца. Для контроля спектральной плотности потока мощности Солнца используются данные Центра прогнозов космической погоды (SWPC) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) министерства торговли США, получаемые несколько раз в день для разных частот, в том числе и для  $L$ -диапазона.

Эффективность системы измерения в комплексе РТ-7,5 оценивается с помощью двух параметров: коэффициента усиления антенны  $G$  и шумовой добротности  $G/T$  с использованием радиоизлучения Солнца. Контроль этих параметров необходим для настройки системы с целью получения наибольшего отношения сигнал/шум, что актуально для сравнительно небольших антенн, таких как РТ-7,5.

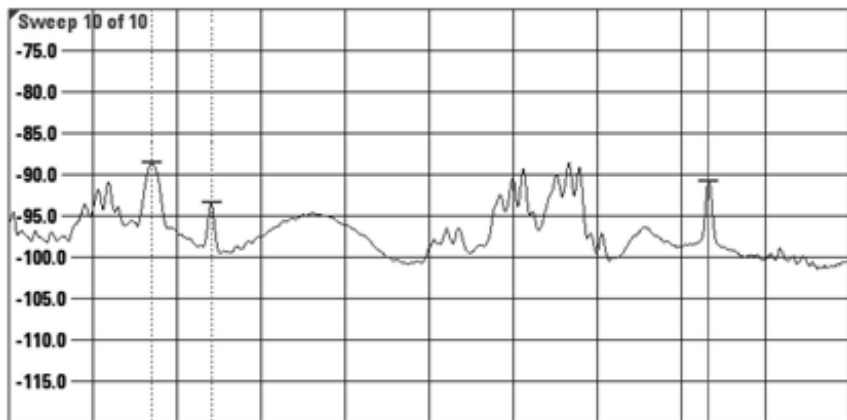
Коэффициент усиления антенны  $G$  можно определить из измеренной диаграммы направленности в двух ортогональных плоскостях. Измерение диаграммы направленности в  $L$ -диапазоне производится по сигналам НКА с помощью штатного навигационного приемника и радиометра, а также по радиоизлучению Солнца с использованием радиометра. Близкие значения полученных коэффициентов усиления в трех случаях привели к заключению, что Солнце может рассматриваться в качестве точечного калибровочного источника для антенны РТ-7,5 в  $L$ -диапазоне.

Шумовая добротность системы  $G/T$  также определяется по радиоизлучению Солнца с использованием информации о его текущей плотности потока.

Таким образом, измерение абсолютных значений мощности сигналов и контроль параметров измерительной системы РТ-7,5 может проводиться с использованием солнечного радиоизлучения без усложнения комплекса и без дополнительных методик калибровки.

**Первые наблюдения.** В ноябре 2011 г. с помощью комплекса была проведена серия экспериментов по определению текущего состояния сигналов группировки НКА ГЛОНАСС. Регистрировались спектры сигналов в диапазонах  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  (рис. 4), а также записывались временные реализации принятых сигналов. Также были проведены необходимые юстировочные и калибровочные процедуры.

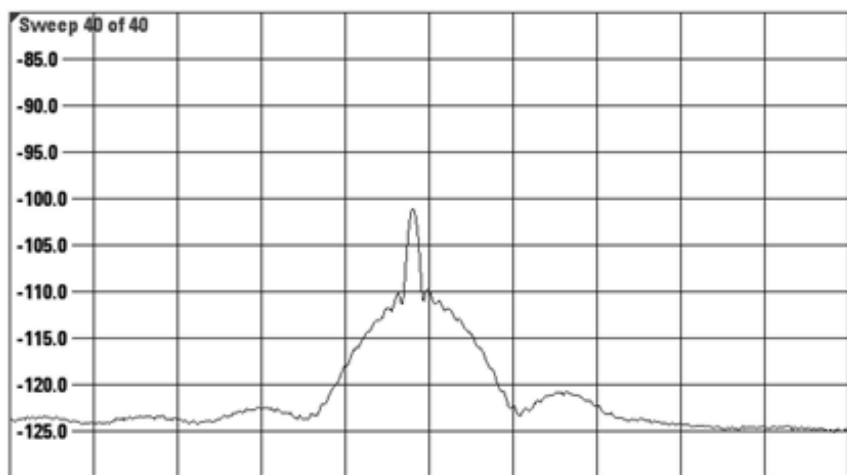
По записанным спектрограммам методом компарирования с использованием радиоизлучения Солнца были определены эффективные изотропно-излучаемые мощности сигналов, а также формы их спектров.



Start: 1.1 GHz

Stop: 1.7 GHz

*a*



Center: 1.6 GHz

Span: 40 MHz

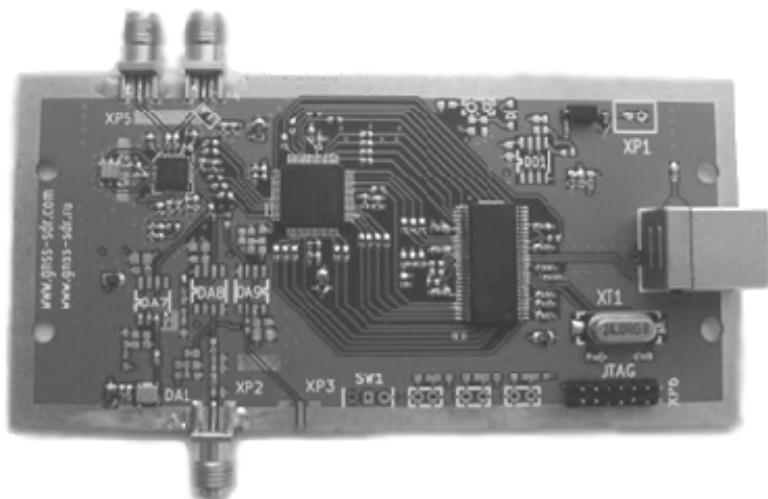
*б*

**Рис. 4. Спектрограмма сигналов КА ГЛОНАСС № 701к:**

*a* —  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  в широкой полосе частот на фоне помех; *б* —  $L_1$  в узкой полосе частот

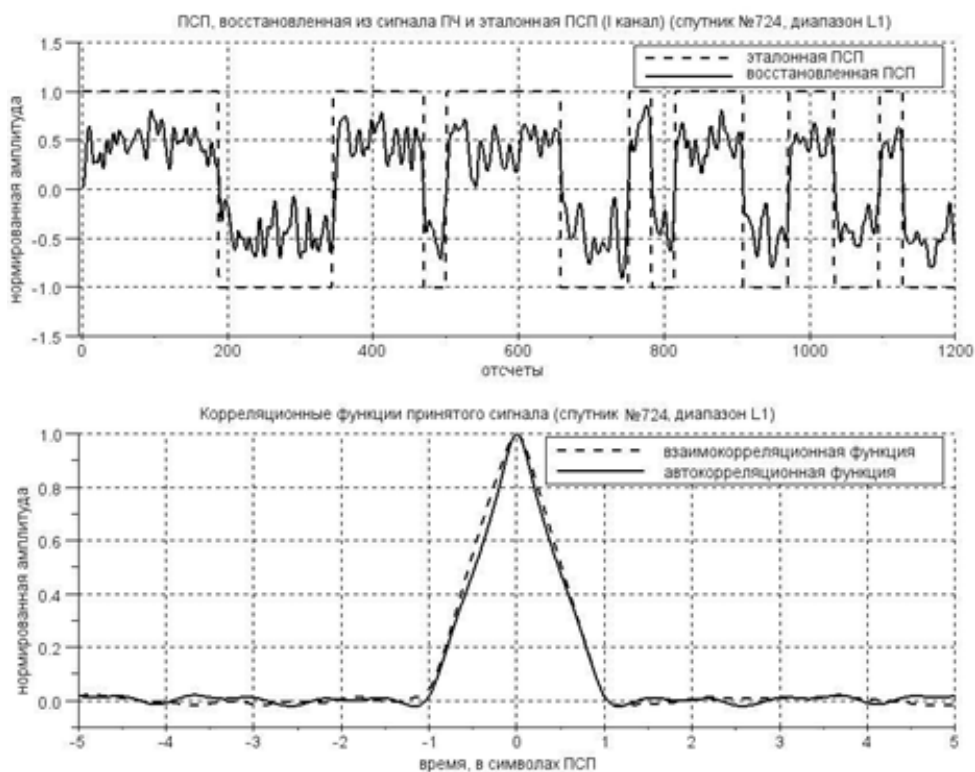
Временные реализации сигналов записывались и обрабатывались с использованием разработанного в НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана программного приемника ГЛОНАСС.

Аппаратная часть приемника (рис. 5) реализует усиление, преобразование частоты, фильтрацию и аналого-цифровое преобразование частоты принятых сигналов отдельно для синфазного ( $I$ ) и квадратурного сигналов ( $Q$ ) с частотой дискретизации 16 МГц и разрядностью 2 бит. Цифровые сигналы затем передаются по интерфейсу USB 2,0 на персональный компьютер для последующей обработки в программной части приемника.



**Рис. 5. Аппаратная часть программного приемника ГЛОНАСС**

Одной из задач наблюдений являлось восстановление псевдослучайной последовательности (ПСП) принятого сигнала и сравнение ее с эталонной ПСП (рис. 6).



**Рис. 6. Восстановленная ПСП и корреляционные функции сигнала L1 КА ГЛОНАСС № 724**

Проводились также наблюдения сигналов НКА ГЛОНАСС-К в Ки-диапазоне [6] (рис. 7), а также сигналов бортового ретранслятора системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) ГЛОНАСС, установленного на НКА «Луч-5А» (рис. 8).

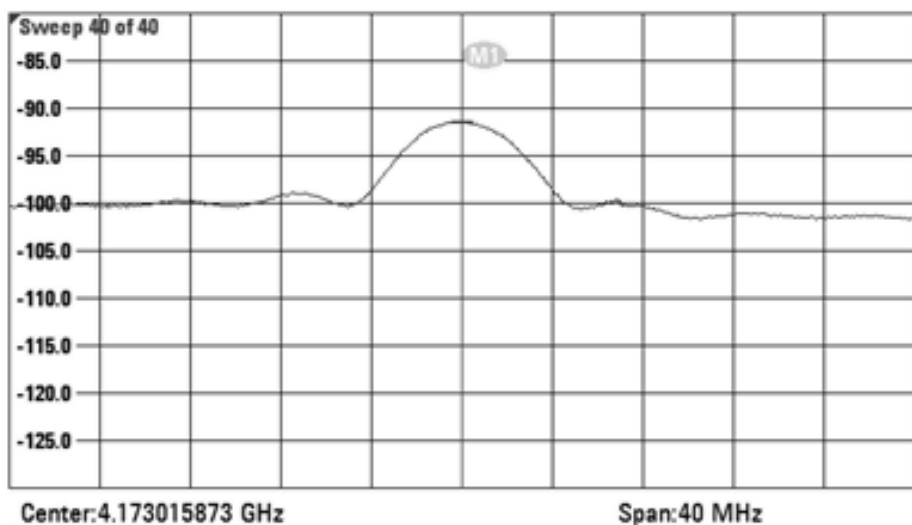


Рис. 7. Спектр сигнала НКА ГЛОНАСС-К (701-к) в Ки-диапазоне

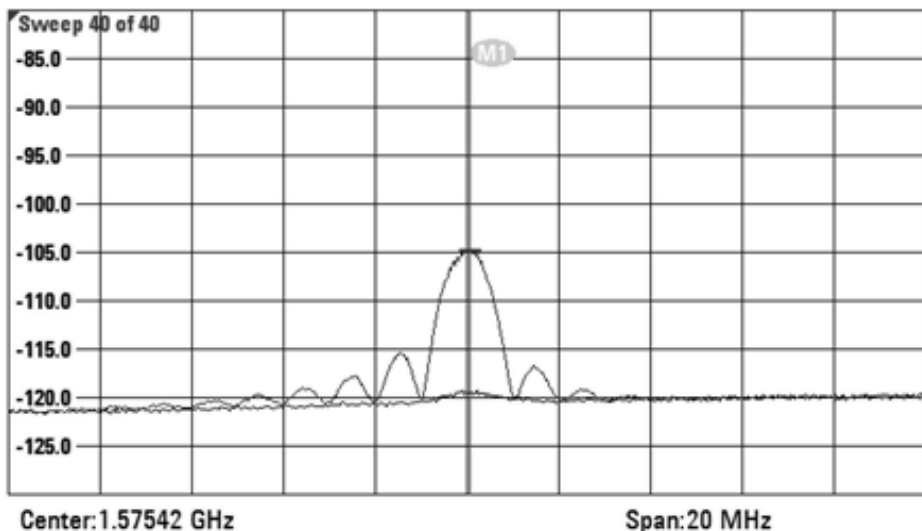


Рис. 8. Спектр сигнала бортового ретранслятора СДКМ на КА «Луч-5А»

Представленный комплекс мониторинга может регистрировать формы спектров сигналов ГНСС ГЛОНАСС, и других ГНСС (GPS, Galileo). Разработанные методики юстировки и калибровки измерительной системы позволяют проводить абсолютные измерения мощности принимаемых сигналов с точностью не хуже 0,6 дБ.



Сравнительно небольшая апертура антенны допускает применение в качестве калибровочного эталонного источника радиоизлучения Солнца, использование более высоких темпов обзора исследуемых источников, а также оперативное изменение конфигурации системы.

Применение в комплексе антенной системы, системы управления, методик, алгоритмов и программ, разработанных и применяющихся на протяжении долгого времени для миллиметрового диапазона длин волн, сделало возможным оперативный ввод в строй и дальнейшую модернизацию комплекса для исследований сигналов ГНСС в  $L$ -диапазоне.

Первые полученные данные и отсутствие других подобных комплексов мониторинга сигналов ГНСС в России позволяют рассчитывать, на то, что созданный комплекс на базе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана позволит получать актуальную научно-техническую информацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pini M., Akos D. M. Analysis of GNSS Signals using the Robert C. Byrd Green Bank Telescope // *Satellite Communications and Navigation Systems*; edited by Enrico Del Re, Marina Ruggieri. – Springer, 2008. – 766 p.
2. Tholert S., Erker S., Furthner J., Meurer M. Determination and Analysis of Interference Affecting Signal in Space Measurement // *ION-GNSS 2009*. – P. 2890–2898.
3. Wong G., Phelts R. E., Walter T., Enge P. Characterization of Signal Deformations for GPS and WAAS Satellites // *ION-GNSS 2010*. – P. 3143–3151.
4. GIOVE-A initial signal analysis / O. Montenbruck, C. Gunther, S. Graf et al. // *GPS Solutions*. – 2006. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 146–153.
5. Giove on the Line / E. Rooney, M. Unwin, G. Gatti et al. // *InsideGNSS*. January/February 2008.
6. Некоторые результаты испытаний и перспективы развития угломерного радиоканала ГНСС «ГЛОНАСС-К» / Б.В. Шебшаевич, А.Е. Тюляков, В.Е. Дружин и др. // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (МКИНС2012) (28–30 мая 2012 г., Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 07.09.2012