Координатно-навигационные измерения

УДК 621.3.088

# МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ГНСС «ГЛОНАСС»

**А.С. Завгородний, В.Л. Воронов, И.В. Рябов**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево. Московская обл.,*
*e-mail:zavgor@vniiftri.ru*

*В статье проведён краткий сравнительный анализ измерительных систем, предназначенных для измерений радиотехнических характеристик спутников сигналов. Приведено описание метрологического комплекса оценки энергетических характеристик сигналов ГНСС «ГЛОНАСС».*

*The article gives a brief comparative analysis of measurement systems for the satellite signals characteristics evaluation. Description of the metrological GNSS «GLONASS» signals power measuring system is proposed.*

*Ключевые слова: спутниковые сигналы, радиотехнические характеристики, метрологический комплекс*

## Введение

Жизнь современного общества неразрывно связана с разработкой и применением новейших технологий. Например, в настоящее время без применения сложной вычислительной техники невозможно представить такие сферы общественной жизни как наука, производство, медицина, транспорт, связь и т.д. Ярким примером проникновения современных технологий во многие сферы общественной жизни стало повсеместное использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

ГНСС успешно решают задачи, далеко выходящие за привычные рамки задач навигации, геодезии и картографии, а также определения места положения пользователя. Конечно, традиционная аппаратура потребителя, предназначенная для решения навигационной задачи, непрерывно совершенствуется, и для рядового пользователя давно уже доступны решения, позволяющие достичь погрешностей определения координат не более единиц метров [1]. За последнее десятилетие номенклатура типов аппаратуры потребителя сигналов ГНСС (НАП) сильно разрослась, любое транспортное средство, начиная от велосипеда и заканчивая космическим

кораблём, может (а порой и обязано) быть оснащено подходящей по характеристикам НАП. Кроме того, решение обратной задачи по принимаемым на поверхности Земли сигналам позволило получить дополнительный инструмент для анализа верхних, ионизированных слоев атмосферы [2]. Благодаря повсеместной доступности радионавигационного сигнала и стабильности бортовых передатчиков навигационных космических аппаратов (НКА) по сигналам ГНСС оказалось очень удобным синхронизировать различные комплексы и системы, расположенные даже в разных полушариях планеты [3]. Непрерывность радионавигационного сигнала во времени и хорошая предсказуемость его радиотехнических характеристик сделали возможным решение задач пассивной радиолокации и анализа подстилающей поверхности [4, 5, 6].

Комплексирование НАП и хорошо разработанных геодезических, связных методов и устройств позволило успешно использовать достижения радионавигации в сельском хозяйстве при разметке территорий и для координации работ сельскохозяйственной техники [6]. Вопросы обеспечения безопасности и учета трафика автотранспорта также решаются на основе совместного использования НАП и современных технологий радиосвязи.

Область применения технологий ГНСС непрерывно растет. Вместе с этим ростом и всё более глубоким внедрением ГНСС в жизнь современного общества растут и усложняются требования к точности и надежности получаемой от них информации, а значит, и к их метрологическому обеспечению.

На качество работы устройств, являющихся потребителями сигналов ГНСС, влияет множество параметров. Это и состояние самой НАП и расположения созвездия навигационных космических аппаратов (НКА) относительно пользователя, и помеховая обстановка в месте приема и т.д. Однако одним из важнейших среди них являются радиотехнические характеристики принимаемого сигнала, и, прежде всего, его энергетические характеристики. В одном из разделов интерфейсного контрольного документа ГНСС «ГЛОНАСС» эти характеристики определяются следующим образом: «Мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НКА «ГЛОНАСС», на выходе приемной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления 3 дБ и при угле места НКА более 5° составляет не менее минус 161 дБВт для частот поддиапазона

L1». Для НКА серии «ГЛОНАСС-М» нормируется также уровень мощности сигнала в поддиапазоне частот L2 – также не менее минус 161 дБВт [1].

Статья посвящена анализу систем, предназначенных для оценки радиотехнических параметров спутниковых сигналов, а также специализированному комплексу, созданному во ФГУП «ВНИИФТРИ» для измерений характеристик сигналов ГНСС.

*Системы, предназначенные для измерений радиотехнических характеристик спутниковых сигналов*

Измерение радиотехнических характеристик сигналов космических аппаратов регулярно проводится различными методами со времен первых запусков. Исторически сформировавшийся подход к решению этой задачи предполагает использование направленной антенной системы, предназначенной для усиления сигнала и пространственной селекции аппарата, и подключаемых к ее тракту измерительных устройств, оценивающих энергетические, спектральные и (или) временные характеристики принимаемого сигнала. Существует достаточно много измерительных систем, предназначенных для измерений характеристик сигналов космических аппаратов. Ниже приведено описание некоторых из них.

1. Контрольно-измерительный комплекс «Ямал».

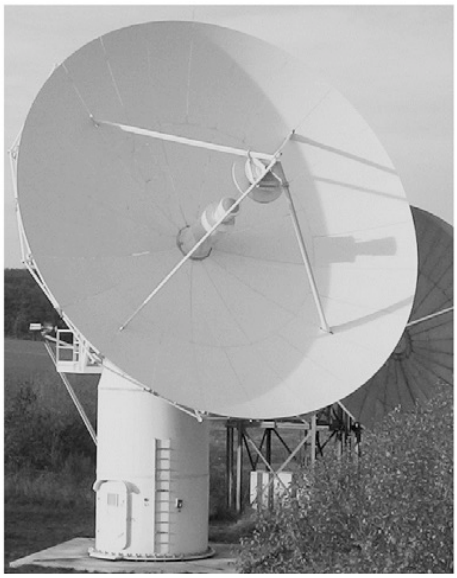


Рис. 1. Антенная система комплекса «Ямал» с диаметром рефлектора 11 м

Комплекс аппаратуры «Ямал» предназначен для измерения амплитудных и спектральных характеристик сигналов спутников систем связи, расположенных на геостационарной орбите. Частоты принимаемых сигналов располагаются в диапазоне от 3 до 7 ГГц. Измерительные системы комплекса строятся по двум схемам: измерительная схема, требующая калибровки кабеля снижения, в составе антенна – малошумящий усилитель (МШУ) - анализатор спектра или измерительный приемник, и схема, не требующая калибровки кабеля, для которой необходимо введения в тракт калибровочного сигнала. Для построения антенной системы выбрана схема Кассегрена, позволяющая существенно упростить доступ к облучателю и узлам ВЧ тракта, организовать термостабилизацию МШУ, уменьшить длину шлангов и кабелей. Недостаток этой схемы в увеличении области затенения из-за использования крупного вторичного облучателя. Также антенная система включает в себя систему антиобледенения и удаления влаги. В силу малой подвижности на небосводе спутников, находящихся на геостационарной орбите, поворотное устройство антенны разработано для надежной фиксации антенны на определенном, выбранном для измерений направлении.

2. Стационарная станция радиоконтроля спутниковых служб связи РАД СпРМ [7].

Комплекс аппаратуры, предназначенный для радиоконтроля спутниковых сигналов, включает в себя измерительную антенну, конвертеры на требуемый диапазон частот, МШУ и анализатор спектра. Диапазоны рабочих частот – от 3,4 до 4,2 ГГц и от 10,5 до 12,75 ГГц. Антенная система построена по классической схеме зеркальных антенн. Диаметр зеркала – 3,5 м, приемное устройство - анализатор спектра.

3. Аппаратура комплекса радиотелескопа Green Bank (США) [8, 9].

Комплекс аппаратуры телескопа Green Bank использовался в экспериментальной работе по исследованию структуры излучаемых псевдослучайных последовательностей (ПСП) НКА ГНСС GPS, а также таких характеристик ПСП, как джиттер и качество фронтов импульсов. Диаметр рефлектора радиотелескопа – 110 м, усиление антенной системы на навигационных частотах настолько велико (порядка 70 дБ), что анализатор спектра способен осуществлять демодуляцию принимаемого сигнала и выделение из него ПСП без дополнительного усиления. Антенна радиотелескопа выполнена по офсетной схеме построения, что полностью

исключает эффект затенения. Недостатком такой схемы является необходимость формировать сложное распределение амплитуд поля по раскрыву апертуры зеркала, что приводит к усложнению облучателя. Размеры камеры облучателя таковы, что анализатор спектра был размещен в непосредственной близости от фланца МШУ, что практически полностью исключает потери сигнала и необходимость калибровки тракта. Внешний вид антенной системы представлен на рис. 2.

Рис. 2. Радиотелескоп Green Bank

4. Радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана [10].

Комплекс аппаратуры радиотелескопа РТ-7,5 предназначен для проведения измерений в миллиметровом диапазоне длин волн, а также исследований естественных излучений (небесных тел, атмосферы и проч.). Внешний вид антенны радиотелескопа представлен на рис. 3. РТ-7,5 использовался в экспериментальной работе, аналогичной работам на Green Bank.

Рис. 3. Радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана

Для демодуляции сигнала было разработано специальное устройство, осуществляющее перенос частоты, усиление сигнала с выхода МШУ и его дискретизацию. ПЭВМ, подключаемая к демодулятору, позволяла исследовать тонкую структуру сигналов.

Обобщенная информация по антенным устройствам, используемым для контроля сигналов спутниковых систем, приведена в таблице 1.

Основные характеристики измерительных комплексов ГГц диапазона частот Таблица 1

| Наименование измерительного комплекса | Диаметр антенны, м | Диапазон рабочих частот, ГГц | Тип антенны | Тип МШУ | Метод измерений |
|---|---|---|---|---|---|
| Стационарная станция радиоконтроля спутниковых служб связи РАД СпРМ | 3,5 | 3,4 - 4,2<br>10,5 - 12,75 | Классическая зеркальная схема построения | Твердотельный, неохлаждаемый с преобразованием частоты | Прямые измерения с учетом калибровочного коэффициента (антенна+МШУ+кабель снижения) |
| Радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана | 7,75 | Многодиапазон-ный | Классическая зеркальная схема построения | Твердотельный, неохлаждаемый | Прямые измерения с учетом калибровочного коэффициента (антенна+МШУ+кабель снижения) |
| Robert C. Byrd radio telescope, Green Bank, West Virginia USA | 110 | многодиапазон-ный | Офсетная схема построения | Твердотельный, неохлаждаемый | Прямые измерения на выходе облучателя антенной системы |
| КИК «Ямал» | 9 | 3 - 7 | Двухзеркальная по схеме Кассегрена | Твердотельный, неохлаждаемый | Метод замещения сигналом опорного генератора немодулированного сигнала в термостатированом контейнере |

В качестве антенн измерительных комплексов часто используются зеркальные антенные системы радиотелескопов. Параметры таких антенн для λ=0,2 м приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Страна | Диаметр/м/ | $К_{ус\ ид.}$ /дБ/ | $К_{реал}$ /дБ/ | КИП, ή |
|---|---|---|---|---|
| США, Green Bank | 110 | 65 | – | – |
| США, Stanford | 45 | 57 | 52 | 0,32 |
| Германия,Weilheim | 30 | 53,5 | 50,7 | 0,52 |
| Англия, Chilbolton | 25 | 52 | – | – |
| Бельгия, Redu (ESA) | 20 | 49,5 | – | – |
| Италия, Alcatel | 5,1 | 38,6 | 35,9 | 0,54 |

Все эти системы объединяют характеристики антенных систем, служащих основой измерительным комплексам. Для всех комплексов выбрана зеркальная схема построения антенн, как довольно простая и надежная по сравнению с другими типичными схемами антенных систем ГГц диапазона. Диаметр рефлекторов составляет единицы, реже десятки метров, обычно применяется неохлаждаемый МШУ (исходя из экономической и эксплуатационной целесообразности). Также следует отметить, что, несмотря на большое количество экспериментальных работ по измерениям характеристик радионавигационных сигналов, а также на непрерывный контроль и сопровождение различными службами космических аппаратов, регулярные измерения характеристик радионавигационных сигналов ведутся на довольно небольшом количестве объектов. Это объясняется сложностями работы с навигационными сигналами из-за их широкой полосы, а также их малой мощности по сравнению, например, с сигналами линий связи.

**Метрологический комплекс оценки энергетических характеристик**

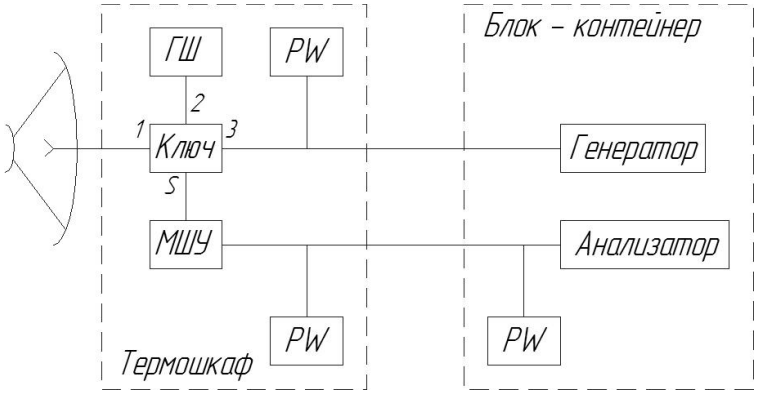
Для измерений радиотехнических характеристик радионавигационных сигналов ГНСС «ГЛОНАСС» во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан метрологический комплекс оценки энергетических характеристик (МК ОЭХ, см. рис. 4). На основании анализа мирового опыта построения измерительных комплексов ГГц диапазона в конструкции комплекса были учтены сильные и слабые стороны различных технических решений.

Рис. 4. Метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов

МК ОЭХ представляет собой аппаратно-программный комплекс на базе двухзеркальной антенной системы (построенной по схеме Кассегрена) с диаметром рефлектора 12 м. Диаметр зеркала выбран в результате компромисса между требованиями необходимого усиления и пространственной селекции, с одной стороны, и экономической целесообразности, с другой. Антенная система позволяет осуществлять прием сигналов в трех поддиапазонах частот: L1, L2 - L3 и Ku. Привод и система наведения рассчитаны на сопровождение НКА, а точности наведения позволяют наблюдать источники сигналов Ku диапазона (ширина диаграммы направленности антенны в этом диапазоне ≈ 6′). Двухзеркальная схема построения предполагает размещение облучателя на колонне, устанавливаемой на первичное зеркало (рефлектор). При этом объем колонны может использоваться для размещения узлов ВЧ тракта, подключаемых непосредственно к облучателю, не увеличивая области затенения. Рефлектор оснащен автоматической системой антиобледенения, учитывающей температуру воздуха и осадки.

Системы, не использующие оперативную калибровку тракта, а лишь периодически выполняющие калибровку кабеля снижения, сильно проигрывают по метрологическим характеристикам. Их основная

уязвимость – это нестабильность характеристик ВЧ тракта в различных условиях, причем важен не только температурный режим, значение имеет даже разница положений кабеля при его калибровке и при работе в составе комплекса. По этой причине при проектировании МК ОЭХ было принято решение предусмотреть оперативную калибровку ВЧ тракта. Весь высокочастотный тракт МК ОЭХ разделен на две части, соединенные кабелями снижения и калибровочными кабелями (см. рис. 5). Первая часть размещена в термостатированном шкафу в непосредственной близи от облучателя, вторая – в служебном помещении блока-контейнера у основания опоры антенной системы.




PW – ваттметр
ГШ – генератор шума
Ключ – СВЧ переключатель

Рис. 5. Упрощенная схема пути калибровочного сигнала в ВЧ тракте МК ОЭХ

Оперативная калибровка тракта проводится сигналами опорного генератора, установленного в служебном помещении, или сигналами генератора шума, установленного в термостатированном шкафу. Для контроля мощности калибровочных сигналов в составе тракта предусмотрены ваттметры, масса-габаритные характеристики которых позволили также разместить их вблизи облучателя. Благодаря большому числу измерений мощности калибровочного сигнала на разных участках тракта, а также многоэтапной калибровке по сигналам нескольких источников возможно не только измерить ослабления в кабелях снижения, но и рассчитать ослабления участков, соединяющих элементы тракта, а также измерить коэффициенты усиления активных элементов, входящих в

состав тракта. Также тракт предусматривает проведение калибровки методом прямых измерений коэффициента ослабления с использованием векторного анализатора цепей. Такие измерения неоперативны, однако более точны (пределы погрешности измерений модуля коэффициента передачи S21 ± 0,05 дБ). При помощи векторного анализатора цепей проводится измерение полос пропускания фильтров, установленных в тракте перед МШУ, что было бы довольно трудоемко.

Калибровка полного коэффициента передачи системы складывается из двух составляющих: коэффициента передачи ВЧ тракта и коэффициента усиления антенны. Если первая составляющая может быть довольно просто измерена с малой погрешностью, то калибровка второй – отдельная техническая задача. Для калибровки коэффициента усиления направленных антенных систем используются методы ближней и дальней зоны, использование первых для стационарно установленной антенной системы затруднительно, а для применения вторых необходим источник опорного излучения в дальней зоне антенны. Граница дальней зоны антенной системы МК ОЭХ расположена на удалении ≈ 1,4 км в диапазоне частот L и ≈ 14,4 км в диапазоне Ku от фазового центра антенны. Более того, из-за искажений формы рефлектора под действием его собственного веса необходимо проводить калибровку при наведении антенной системы на разные углы места. Установить перебазируемый стационарный источник опорного сигнала на указанных удалениях и различных углах места – технически нереализуемая задача. В результате поиска подвижных источников опорного сигнала в дальней зоне антенной системы было принято решение использовать для калибровки коэффициента усиления антенной системы Солнце. Выбор был сделан по нескольким причинам:

1. Солнце довольно мощный источник излучения в радиодиапазоне. Прием такого сигнала аппаратурой МК ОЭХ гарантирует существенное превышение его мощности над шумами аппаратуры и тракта, что снижает случайную составляющую погрешности калибровки.

2. Скорость перемещения Солнца по небосводу невелика (по сравнению, например, с НКА), что означает минимальную нагрузку на привод антенной системы при его сопровождении и экономию ресурса двигателей;

3. Находящиеся в свободном доступе эфемериды центра солнечного диска приводятся в различных источниках с более высокой точностью, чем эфемериды космических аппаратов.

4. Мощность солнечного излучения в радиодиапазоне (а также в оптическом, в рентгеновском и других) систематически измеряется многими лабораториями. Результаты этих измерений метрологически обеспечены и находятся в открытом доступе.

5. Процедура калибровки коэффициента усиления антенной системы по радиоизлучению Солнца неоднократно и успешно опробована на базе других радиотелескопов [10].

Процедура калибровки подробно рассмотрена в [11]. Полученные результаты калибровки полного коэффициента усиления системы в диапазоне частот L показывают небольшую зависимость от погодных условий. Это объясняется главным образом поглощением радиоизлучения в кислороде и водяном паре нижних слоев атмосферы. Например, при равномерной, пусть даже плотной облачности это не приводит к росту погрешности калибровки полного коэффициента усиления системы и, следовательно, измерений мощности НКА, так как излучение Солнца и сигнал НКА в этом случае ослабляются одинаково. Однако в случаях, когда калибровка комплекса и измерения мощности НКА производятся в изменяющихся погодных условиях, из-за разности ослаблений на трассе распространения появляется дополнительная составляющая погрешности, которая может достигать 0,3 - 0,5 дБ. Впрочем, используя справочные данные о поглощении атмосферы при различных погодных условиях, эту составляющую можно скомпенсировать [12]. Наиболее неудачны с этой точки зрения дни с переменной облачностью. На рис. 6 приведены результаты калибровки полного коэффициента передачи комплекса в различных погодных условиях. Диапазон частот L3 выбран для демонстрации с точки зрения помеховой обстановки в месте расположения антенной системы. Особенность калибровки в том, что уменьшение уровня мощности принимаемого излучения Солнца приводит к росту калибровочного коэффициента, при измерении мощности НКА эта величина вычитается из результатов измерений, следовательно, противоречия нет.

На рисунке видна сильная изменчивость результатов измерений в условиях переменной облачности (до ≈ ± 0,2 дБ) и сравнительно небольшой разброс результатов (до ≈ ± 0,07 дБ для ясного неба и до ≈ ± 0,12 дБ для облачного) в случаях «спокойного» неба. Такое поведение результатов калибровки учитывается при штатной работе комплекса в процессе измерений энергетических характеристик НКА - для получения точечных

оценок используется среднее значение коэффициента передачи комплекса, однако разброс результатов калибровки является показателем качества этих оценок.

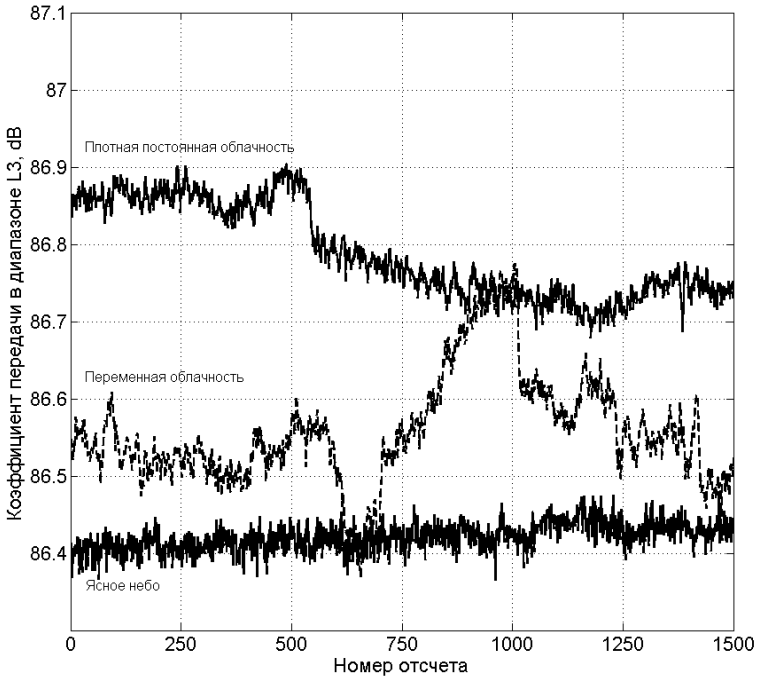



Рис. 6. Результаты измерений коэффициента передачи МК ОЭХ в диапазоне L3 при различных погодных условиях (4.04.16 – ясно, 5.05.16 – облачность, 6.05.16 – переменная облачность)

В настоящее время при помощи МК ОЭХ измеряются энергетические характеристики сигналов НКА ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo и Beidou. Успешно решена задача демодуляции навигационного сигнала и оценки мощностей навигационных сигналов различной точности. Этим и другим вопросам будут посвящены следующие работы авторов.

## Литература

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). http://www.aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf.
2. Куницын В.Е., Васильев А.Е., Падохин А.М. Возможности исследования

естественных и искусственных ионосферных неоднородностей с помощью одиночных ГНСС-приемников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013, т.10, № 1, с. 123-133.

3. Филимонов С. Н. О некоторых проблемах синхронизации точного времени сигналами ГЛОНАСС// T-Comm// Телекоммуникации и Транспорт, 2013, № 7.
4. Саккулин Е.А. Использование навигационного поля системы ГЛОНАСС и ее функциональных дополнений для привязки позиций многопозиционных радиолокационных систем/ Материалы XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 25 - 26 марта 2015 г., С–Пб, 2015.
5. Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Леконцев Д.А. Применение перспективных сигналов системы ГЛОНАСС с кодовым разделением для получения радиолокационных изображений/ Материалы XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 25 - 26 марта 2015 г., С–Пб, 2015.
6. Бышов Н.В., Бышов Д.Н., Бачурин А.Н., Олейник Д.О., Якунин Ю.В. Геоинформационные системы в сельском хозяйстве. Учебное пособие – Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2013, 169 с.
7. Государственный реестр СИ. Описание типа № 46780-11.
8. Balser D., Braatz J., David F., Frank G., Kepley A., Kobelski A., O'Neil K., Langston G., Lynch R., Maddalena R., Mason D., Minter T., Perera D., Prestage R., Ransom S. Observing With The Green Bank Telescope. GBT Scientic Staf, November 3, Version 3.3, 2015. https://science.nrao.edu/facilities/gbt/observing/GBTog.pdf
9. Pini M., M.Akos D. Analysis GNSS signals using the Robert C. Byrd Green Bank Telescope–Satellite Communications and Navigation Systems.- Springer Science & Business Media, 2007, 768 с.
10. Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Рыжов В.С. Калибровка радиотракта радиотелескопа РТ-7,5 при мониторинге сигналов навигационных космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. “Приборостроение”, 2014, № 6.
11. Завгородний А.С. О калибровке полного коэффициента передачи метрологического комплекса оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов/ Тез. докл. научно-

практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XX веке», 2 марта 2016 г., Менделеево.- Менделеево.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016, с. 152-158.

12. Бартенев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др. Спутниковая связь и вещание. Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Л.Я. Кантора.- М.: Радио и связь, 1997, 528 с.