

УДК 520

РОССИЙСКО-КУБИНСКАЯ СТАНЦИЯ КОЛОКАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОНИТОРИНГА ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2018 Д. В. Иванов¹, М.-Р. Урацука², А. В. Ипатов¹,
Д. А. Маршалов¹, Н. В. Шуйгина¹, М. В. Васильев¹, И. С. Гаязов¹,
Г. Н. Ильин¹, Ю. С. Бондаренко¹, А. Е. Мельников¹, В. В. Суворкин¹

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187, Россия

²Институт геофизики и астрономии Министерства науки, технологий и окружающей среды Республики Куба, Гавана, 11600 Республика Куба

Поступила в редакцию 8 декабря 2017 года; принята в печать 23 января 2018 года

В статье представлены основные направления использования проектируемой российско-кубинской геодинимической колоцированной станции на базе Института геофизики и астрономии Министерства науки, технологий и окружающей среды Республики Куба для проведения радиоастрономических наблюдений и мониторинга околоземного пространства. Рассмотрены потенциальные возможности станции для проведения различных наблюдательных программ: астрофизических наблюдений; наблюдений методами космической геодезии с использованием радионтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ), глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), лазерных дальномеров, различных доплеровских систем; а также мониторинга искусственных и естественных тел в околоземном пространстве и дальнем космосе, включая радиолокацию астероидов, сближающихся с Землей. Приведены результаты моделирования наблюдений на проектируемой станции в сравнении с результатами, получаемыми с использованием действующих геодинимических колоцированных станций. Приводится анализ эффективности проектируемой российско-кубинской станции для решения поставленных задач.

Ключевые слова: *телескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные методы изучения геометрических и динамических характеристик Земли основаны на использовании высокоточных средств координатно-временных измерений, таких как РСДБ, спутниковые лазерные дальнометры (СЛД), ГНСС, а также различные доплеровские системы. РСДБ-комплексы также активно используются для проведения астрофизических исследований и мониторинга околоземного пространства. Эффективность применения этих измерительных средств зависит от ряда факторов, основными из которых являются: точность и информативность измерений, режимы проведения измерений и географическое распределение инструментов. При достаточно близких параметрах точности указанных средств измерений их информативность и режимы работы значительно отличаются друг от друга. Именно по этой причине для получения наилучшего результата применяется принцип колокации — принцип совместного использования различных средств измерений на одном пункте.

Весьма важным фактором, влияющим на точность и достоверность получаемых результатов, является географическое распределение измерительных средств. Очевидно, что наилучшие результаты получаются при глобальном и по возможности равномерном распределении станций наблюдения. В настоящее время наибольшее число различных средств измерений размещено в таких регионах, как Европа и Северная Америка. С точки зрения более равномерного распределения станций колокации наиболее предпочтительными регионами для их глобального размещения являются Американский континент и страны Центральной Азии. Республика Куба является одной из стран, подходящей для создания на ее территории геодинимической колоцированной станции, которая могла бы использоваться в рамках научных проектов, выполняемых совместно российскими и кубинскими научными организациями. В качестве наиболее подходящей организации в Республике Куба для создания на ее базе станции колокации можно указать Институт геофизики и астрономии

Министерства науки, технологий и окружающей среды, который в течение длительного времени плодотворно сотрудничал с институтами Академии наук СССР. Размещение пункта колокации в данном регионе позволит заметно расширить круг задач, решаемых с помощью российского сегмента Глобальной геодезической наблюдательной системы (GGOS). Улучшение географического распределения станций колокации дает также дополнительные возможности для построения более подробных карт радиоисточников и для непрерывного мониторинга естественных и искусственных тел в околоземном пространстве.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Основной целью проекта создания российско-кубинской геодинимической колоцированной станции на базе Института геофизики и астрономии Министерства науки, технологий и окружающей среды Республики Куба является расширение возможностей российского сегмента GGOS за счет значительного улучшения географического распределения сети колоцированных станций, в которой основная роль принадлежит станциям колокации РСДБ-комплекса «Квazar-КВО». Для Республики Куба данный проект позволит вывести на новый уровень национальную систему координатно-временного обеспечения. Ожидается, что включение проектируемой станции в состав российского сегмента GGOS существенно повысит точность результатов, получаемых методами космической геодезии. Кроме решения своей основной задачи по определению параметров вращения Земли (ПВЗ) и уточнению фундаментальных систем координат российский сегмент GGOS активно проводит астрофизические наблюдения и участвует в программах мониторинга околоземного пространства. В рамках мониторинга проводятся наблюдения космических аппаратов (КА) в ближнем и дальнем космосе, а также радиолокационные наблюдения астероидов, сближающихся с Землей. Географическое положение Республики Куба дает возможность значительно увеличить зоны видимости КА и астероидов при РСДБ- и радиолокационных доплеровских наблюдениях. Результаты модельных расчетов показывают, что совместные российско-кубинские астрофизические РСДБ-наблюдения с целью построения карт радиоисточников заметно улучшают заполнение uv -плоскости и делают возможным более подробный анализ структуры наблюдаемых объектов. Еще одним направлением использования станции колокации на Кубе являются наблюдения пульсаров с целью изучения физических свойств этих объектов, а также построения пульсарной шкалы времени.

3. ПОСТРОЕНИЕ КАРТ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Задача построения изображений радиоисточников с высоким разрешением может быть решена только по РСДБ-наблюдениям на сети станций с межконтинентальными базами. В настоящее время российский сегмент GGOS представлен РСДБ-комплексом «Квazar-КВО», который включает в себя три радиоастрономические обсерватории, расположенные в Ленинградской области (обсерватория «Светлое»), Карачаево-Черкесской Республике («Зеленчукская») и Республике Бурятия («Бадары»). РСДБ-наблюдения комплекса «Квazar-КВО» проводятся на сети, состоящей из пяти радиотелескопов: трех радиотелескопов с диаметром антенны 32 м (РТ-32), установленных во всех обсерваториях, и двух радиотелескопов РТ-13 (диаметр антенны 13 м) в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская». Третий радиотелескоп РТ-13 строится в настоящее время в обсерватории «Светлое». Планируется создание четвертого радиотелескопа РТ-13 в Уссурийске. Для проведения РСДБ-наблюдений радиотелескопы РТ-32 оснащены высокочувствительными охлаждаемыми приемниками на длины волн 18–21, 13/3.5 (совмещенный), 6 и 1.35 см, а радиотелескопы РТ-13 — трехдиапазонными приемниками на длины волн 13, 3.5 и 1 см.

Имеющаяся сеть радиотелескопов с базовыми линиями длиной 0.2, 2015, 4382 и 4405 км эквивалентна виртуальному телескопу с эффективным диаметром антенны, соответствующим максимальной длине базы. Синтезируемая диаграмма направленности виртуального радиотелескопа составляет от 9 мс дуги для диапазона длин волн 18–21 см до 0.6 мс дуги для длины волны 1.35 см. Четвертый радиотелескоп РТ-13 в Уссурийске добавит к РСДБ-сети базы длиной 2337, 6185 и 6521 км, а диаграмма направленности уменьшится до 6 и 0.4 мс дуги для диапазонов длин волн 18–21 и 1.35 см соответственно. Создание нового радиотелескопа на Кубе позволит увеличить максимальную длину базы до 10185 км; также добавятся базы длиной 8207, 9458, 10122 км. Диаграммы направленности изменятся до 4 и 0.3 мс дуги для диапазонов длин волн 18–21 и 1.35 см соответственно.

Для российско-кубинской сети, состоящей из радиотелескопов РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» и радиотелескопа на Кубе, было проведено моделирование взаимной видимости радиоисточников, заполнения uv -плоскости и синтезированной диаграммы направленности с использованием программы `sched`¹. Считалось, что радиотелескоп на Кубе размещен в г. Гавана в точке со

¹<http://www.aoc.nrao.edu/software/sched>

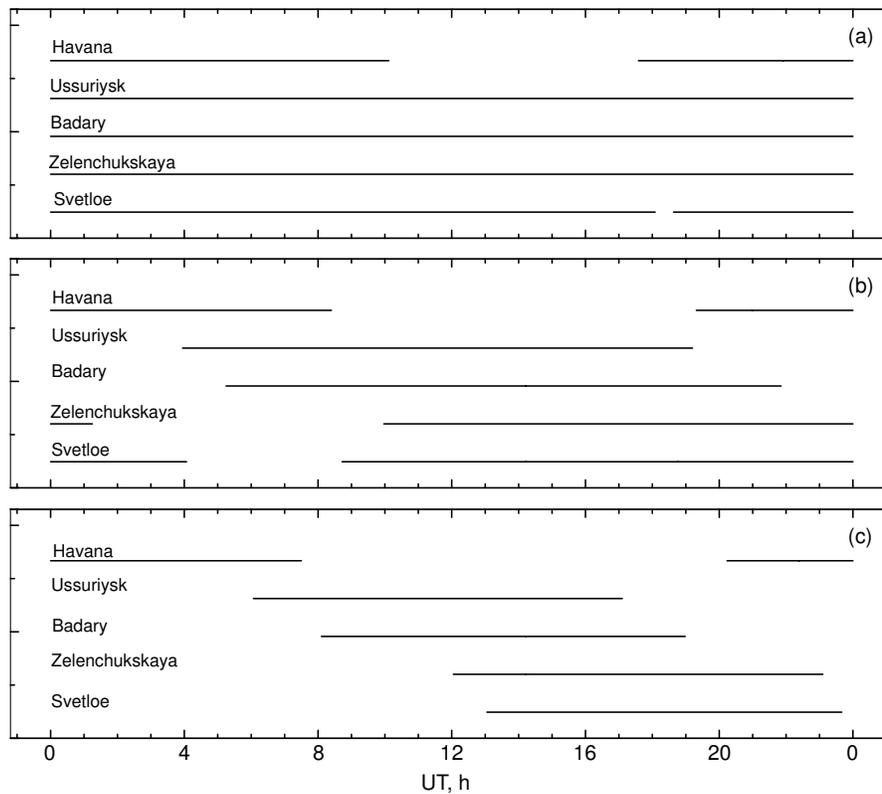


Рис. 1. Диаграмма видимости модельных радиосточников на различных радиотелескопах.

следующими геоцентрическими прямоугольными координатами: $x = 777771.822$, $y = -5813647.940$ и $z = 2505454.501$ м. Моделировались наблюдения гипотетических радиосточников со следующими склонениями: -45° , -30° , -15° , 0° , 15° , 30° , 45° , 60° и 90° градусов. Прямые восхождения модельных источников принимались равными 0.

Для расчета взаимной видимости источников на радиотелескопах российско-кубинской сети были созданы пробные расписания на 15 ноября 2017 г. со сканами длительностью 1 мин., повторяющимися в течение суток. На рис. 1 показаны расчетные интервалы видимости радиосточников со склонениями 60° (а), 30° (б), 0° (в) для различных радиотелескопов. Модельный источник со склонением -15° практически не имеет интервалов совместной видимости радиотелескопами РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и планируемым кубинским радиотелескопом. На рис. 2 приведены примеры заполнения uv -плоскости для различных модельных источников. Черточки на рисунке соответствуют сканам длительностью по 5 мин. Для источников со склонением -30° возможно наблюдение редких сканов РСДБ-комплексом «Квазар-КВО» (см. рис. 2 (h)), а совместных сканов с участием радиотелескопа на Кубе нет. Для источников со склонением -45° возможность совместных РСДБ-наблюдений отсутствует полностью (см. рис. 2 (i)).

Для источников со склонениями в интервале $-15^\circ \dots 90^\circ$, которые могут одновременно наблюдаться РСДБ-комплексом «Квазар-КВО» и планируемым кубинским радиотелескопом, заполнение uv -плоскости существенно улучшается.

На рис. 3 приведено изображение модельной синтезированной диаграммы направленности РСДБ-сети: «Куба», «Светлое», «Бадары», «Зеленчукская», «Уссурийск» для длины волны 3.5 см.

4. НАБЛЮДЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

Наблюдения пульсаров рассматриваются в настоящее время как один из методов формирования новой астрономической шкалы времени со стабильностью лучших атомных стандартов частоты, а также как возможную основу для навигации КА в Солнечной системе и за ее пределами [1]. Еще одним результатом программ регулярных наблюдений пульсаров может стать дальнейшее изучение физических свойств этих объектов. Технические характеристики разрабатываемого радиотелескопа для колоцированной станции были рассмотрены с точки зрения оценки его возможностей при наблюдениях пульсаров в радиодиапазоне. Пульсары наблюдаются во всем диапазоне электромагнитного излучения от радиочастот порядка 15 МГц. Распределение энергии в излучении пульсаров имеет

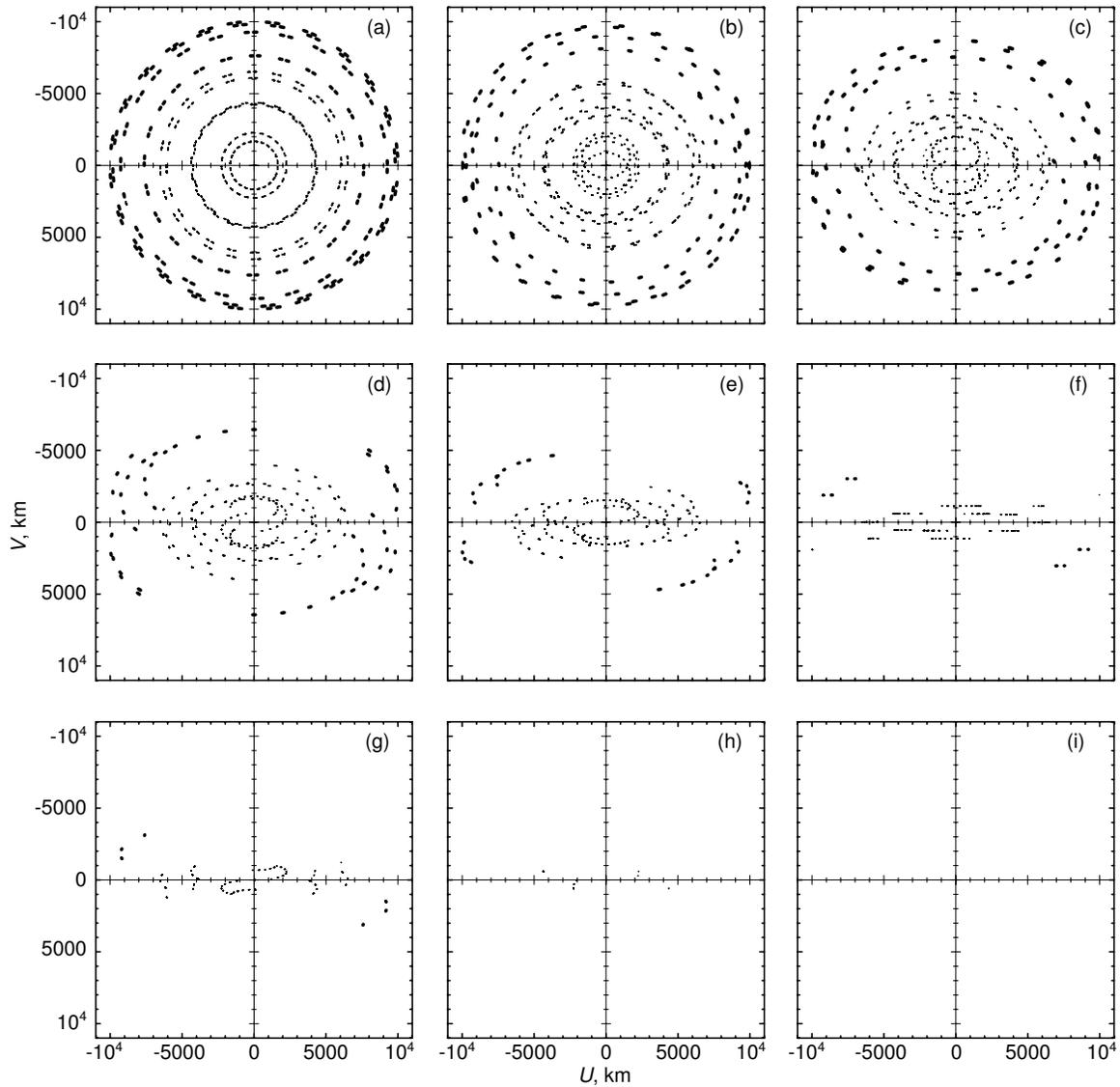


Рис. 2. Заполнение uv -плоскости для модельных источников со склонениями (a) 90° , (b) 60° , (c) 45° , (d) 30° , (e) 15° , (f) 0° , (g) -15° , (h) -30° , (i) -45° . Жирным шрифтом выделены наблюдения с радиотелескопом на Кубе.

нетепловой характер и зависит от типа пульсара. Среди пульсаров выделяют группы мощных секундных, миллисекундных и гигантских пульсаров. Число секундных пульсаров с высокой плотностью потока существенно превосходит число миллисекундных пульсаров, например, для частоты приема сигнала 1400 МГц (рис. 4). Плотности потока излучения варьируются от единиц мДж для микросекундных пульсаров до сотен Дж для гигантских пульсаров [2].

Отношение сигнал-шум (ОСШ) при регистрации сигналов пульсаров может быть представлено в виде:

$$S/N = \frac{SA_{\text{eff}} \sqrt{n_{\text{pol}} \tau \Delta f}}{2kT_{\text{sys}}} \sqrt{\frac{t_{\text{int}} P}{P W}}, \quad (1)$$

где S — плотность потока излучения пульсара (в континууме), n_{pol} — число поляризаций антенны, τ — постоянная времени приемника, k — постоянная Больцмана, T_{sys} — температура системы, A_{eff} — эффективная площадь антенны, t_{int} — время наблюдения, Δf — полоса регистрации, W — ширина импульса, P — период пульсара. Для минимизации ОСШ необходимо уменьшать шумовую температуру системы и увеличивать эффективную площадь антенны, полосу регистрации сигнала и время накопления сигнала. Регистрацию сигналов пульсаров целесообразно проводить в двух ортогональных поляризациях (линейных или круговых) с целью более точной компенсации частотного запаздывания сигнала, обусловленного дисперсией в межзвездной среде, и, тем самым, повышения

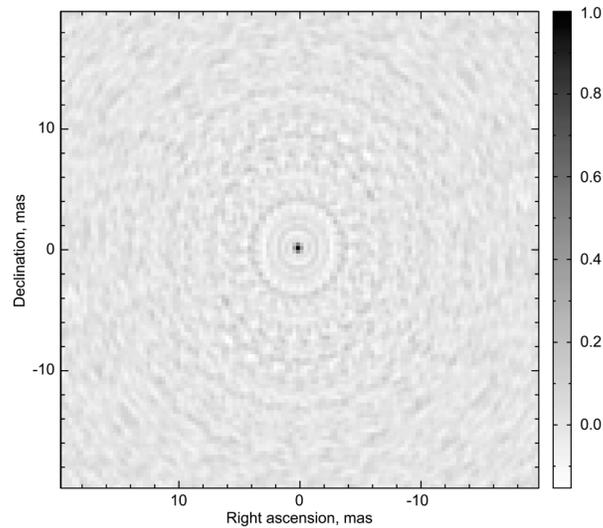


Рис. 3. Синтезированная диаграмма на длине волны 3.5 см для сети из 5 станций.

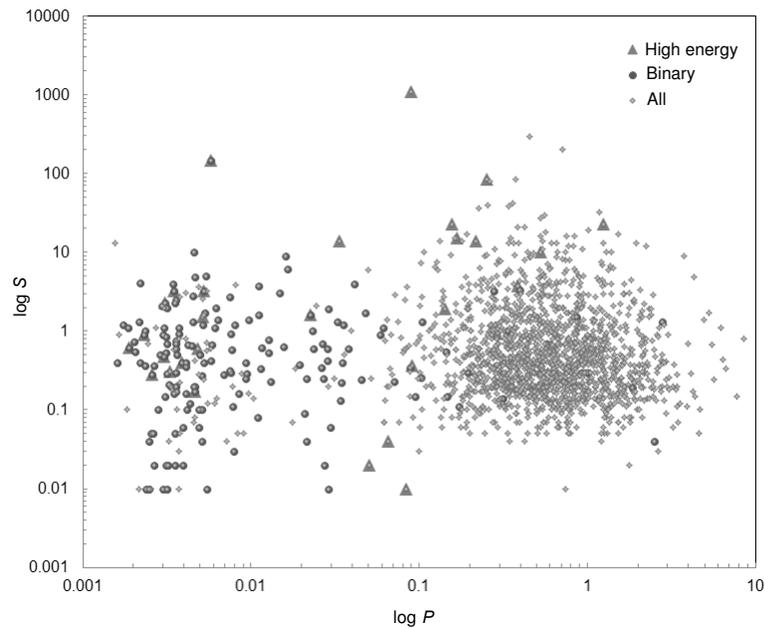


Рис. 4. Зависимость плотности потока радионизлучения пульсаров от их периода.

ОСШ. Выбор диапазона частот для наблюдений обусловлен несколькими факторами. С одной стороны, плотность потока мощности пульсаров в метровом диапазоне в несколько раз выше, чем в дециметровом, а спектральная плотность потока радионизлучения в среднем падает пропорционально квадрату частоты. С другой стороны, влияние неоднородностей межзвездной и межпланетной плазмы на распространение импульсов пульсара на доступных высоких частотах проявляется минимально. Следующим ограничением является техническая реализация широкой полосы регистрации (500–1000 МГц) в метровом диапазоне частот в

реальной помеховой обстановке. Компромиссом в этом случае может быть регистрация сигналов на частотах выше 1–2 ГГц и полосой 1–2 ГГц. Для этих частот температура собственных шумов приемного устройства и антенны может быть получена на уровне 20–30 К [3]. Расчеты с использованием (1) показали, что при использовании полосы регистрации около 1000 МГц и 100-секундных интервалов накопления количество наблюдаемых пульсаров будет зависеть, в первую очередь, от диаметра антенны радиотелескопа. Для антенны диаметром 13 м с эффективной площадью около 100 м² число пульсаров с достаточной плотностью

потока будет менее 50. При использовании антенны диаметром около 30 м с эффективной площадью порядка 400 м² число регистрируемых пульсаров с ОСШ > 10 окажется более 100. Таким образом, проектируемая российско-кубинская РСДБ-сеть может быть использована для наблюдений пульсаров с целью формирования пульсарной шкалы времени и изучения физических свойств наблюдаемых объектов. Основным преимуществом сети является географическое распределение измерительных средств, а основным недостатком — существенные ограничения на плотность потока излучения наблюдаемых пульсаров.

5. МОНИТОРИНГ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

На сегодняшний день радиолокация является одним из наиболее эффективных методов определения физических свойств объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ). Радиолокационные наблюдения позволяют определить размеры, форму, особенности вращения, исследовать свойства поверхности и уточнить элементы орбит этих объектов. Наличие передающей и приемной антенных систем является необходимым условием для проведения таких наблюдений. В настоящее время только антенны диаметром 70 м (DSS-14) и 34 м (DSS-13) Центра дальней космической связи «Голдстоун» (Калифорния, США), а также радиотелескоп диаметром 305 м обсерватории «Аресибо» (Пуэрто-Рико, США) имеют мощные радиопередатчики и регулярно проводят радиолокационные наблюдения ОСЗ [5]. Регистрация отраженных от ОСЗ сигналов возможна радиотелескопами с достаточной собирающей поверхностью, оснащенными высокочувствительными приемными системами. Этим требованиям удовлетворяют радиотелескопы РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары», входящие в состав Российской РСДБ-сети «Квазар-КВО» [6].

С 2015 года Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) совместно с центром дальней космической связи «Голдстоун» регулярно проводят межконтинентальные радиолокационные наблюдения ОСЗ с использованием DSS-14 в качестве передатчика и радиотелескопов РТ-32 в качестве приемников, реализуя «бистатический» режим наблюдений [7]. Совместная регистрация эхо-сигнала несколькими антеннами [8] позволяет определять направление и угловую скорость вращения ОСЗ и уточнять его координаты. Для проведения радиолокационных наблюдений ОСЗ на РСДБ-сети «Квазар-КВО» был адаптирован существующий комплекс средств приема, преобразования и регистрации сигналов радиотелескопов РТ-32, и создан пакет программ

для планирования наблюдений и обработки эхо-сигнала.

Все радиолокационные наблюдения проводятся в автоматическом режиме, используя эфемеридные данные разработанной в ИПА РАН программы планирования. Основной задачей на этапе планирования наблюдений является определение совместных наблюдательных окон и оценка ОСШ для заданной конфигурации передающей и приемной антенных систем и исследуемого объекта, сближающегося с Землей (астероида, кометы или искусственного спутника Земли). Географическое расположение радиотелескопов РТ-32 сильно ограничивает размер совместных с обсерваториями «Голдстоун» и «Аресибо» наблюдательных окон, особенно для объектов, проходящих на малых расстояниях от Земли. Так, например, 12 октября 2017 г. в связи с отсутствием окна совместной видимости не удалось провести наблюдения астероида 2012 TC₄, который пролетел около Земли на расстоянии порядка 50 тысяч км. Одним из решений этой проблемы может стать создание российско-кубинской геодинамической колоцированной станции, которая позволит значительно расширить совместные зоны видимости ОСЗ.

Увеличение отношения сигнал шум (ОСШ) регистрируемого эхо-сигнала достигается за счет применения многоканальных систем преобразования сигналов (СПС), путем сложения сигналов с выходов разных каналов в соответствующих поляризациях. С 2015 г. удалось зарегистрировать эхо-сигналы от астероидов 2011 UW158, 2003 TL₄, 2003 YT₁, 2003 BD44, 2014 JO25 и 3122 Florence. Параметры этих астероидов на момент максимального сближения с Землей представлены в таблице 1. Для каждого ОСЗ получены расстояние до объекта R , ширина спектра эхо-сигнала B , время распространения сигнала до объекта и обратно Δt , а также априорная оценка ОСШ на интервале Δt .

На рис. 5 черными точками показаны астероиды, зарегистрированные на РТ-32. Пунктирной линией изображена модельная кривая распределения размеров обнаруживаемых ОСЗ в зависимости от расстояния, для среднего периода вращения $P = 11$ часов, радиолокационного альбедо $\hat{\sigma} = 0.1$, угла наклона оси объекта $\delta = 0^\circ$ и ОСШ, равного 3. Эта кривая демонстрирует нижнюю границу чувствительности радиотелескопов РТ-32 и используется при планировании радиолокационных наблюдений.

Обработка и анализ радиолокационных наблюдений проводится с использованием комплекса программ, разработанного в ИПА РАН. В результате обработки наблюдений получены спектры мощности эхо-сигналов этих астероидов. В качестве примера на рис. 6 приведен спектр эхо-сигнала астероида 3122 Florence, полученный по

Таблица 1. Параметры ОСЗ, зарегистрированных на РТ-32, на момент сближения с Землей.

ОСЗ	Эпоха	D, м	P, ч	R, а.е.	B, Гц	$\Delta\tau$, с	ОСШ/ $\Delta\tau$
2011 UW158	19 июля 2015	320	0.61	0.016	52.3	16	6
2003 TL4	27 октября 2016	380	27.2	0.026	1.4	28	9
2003 YT1	31 октября 2016	1100	2.34	0.035	46.9	35	6
2003 BD44	18 апреля 2017	1400	29.7	0.056	4.7	56	6
2014 JO25	19 апреля 2017	650	4.5	0.012	14.4	15	70
3122 Florence	1 сентября 2017	4500	2.4	0.047	187.1	47	19

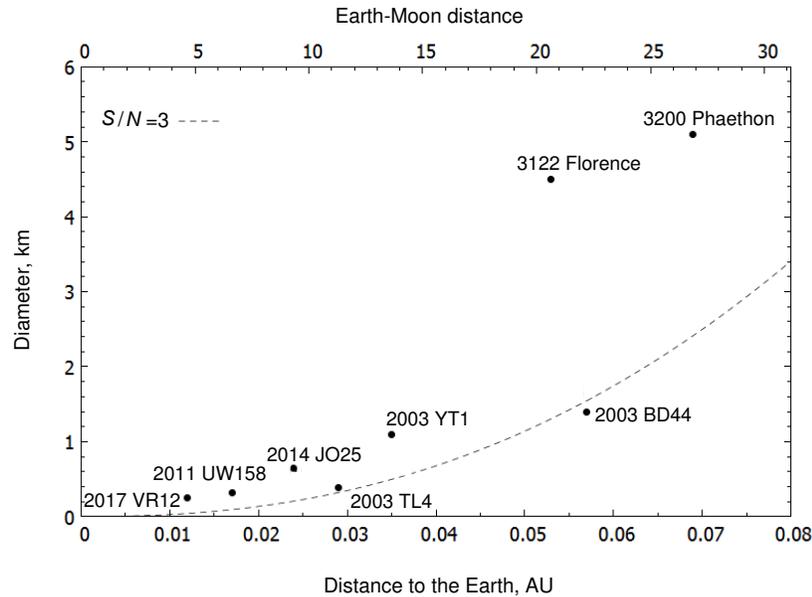


Рис. 5. Распределение размеров ОСЗ, зарегистрированных на РТ-32, в зависимости от расстояния. Пунктиром показано расстояние до Земли и диаметр ОСЗ для $S/N = 3$, периода вращения $P = 9$ часов и мощностью передатчика $P_{tx} = 400$ кВт.

наблюдениям обсерватории «Бадары» 4 сентября 2017 г. По оси ординат отложена мощность эхо-сигнала, выраженная в единицах стандартного отклонения шума, а по оси абсцисс — частота в Гц. Сплошными и пунктирными линиями изображены спектры зеркальной и диффузной компонент эхо-сигнала. Эхо-сигнал обычно регистрируется в обеих круговых поляризациях. Зеркальной компонентой эхо-сигнала (ОС) принято называть сигнал с поляризацией, ортогональной поляризации излученного сигнала, а диффузной компонентой (СС) — с совпадающей поляризацией. Для относительно гладких поверхностей ОСЗ большую часть эхо-сигнала составляет зеркальная компонента. Диффузная компонента возникает вследствие многократных отражений от неровностей на поверхности объекта. Отношение поляризационных компонентов эхо-сигнала SC/OC называется

коэффициентом круговой поляризации и характеризует неровности на поверхности ОСЗ.

Из рис. 6 видно, что ширина полученных спектров соответствует априорной оценке ширины спектра эхо-сигнала B , представленной в таблице 1. Коэффициент круговой поляризации, в нашем случае, достигает значения порядка 0.3, что согласуется с радарными наблюдениями обсерватории «Голдстоун»². Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность проведения бистатических радиолокационных наблюдений на базе радиотелескопов РСДБ-сети «Квazar-КВО» в качестве приемных антенн, и дают возможность развивать данное направление исследований с применением метода радиоинтерферометрии, в том числе с применением проектируемой российско-кубинской станции колокации.

²<https://echo.jpl.nasa.gov>

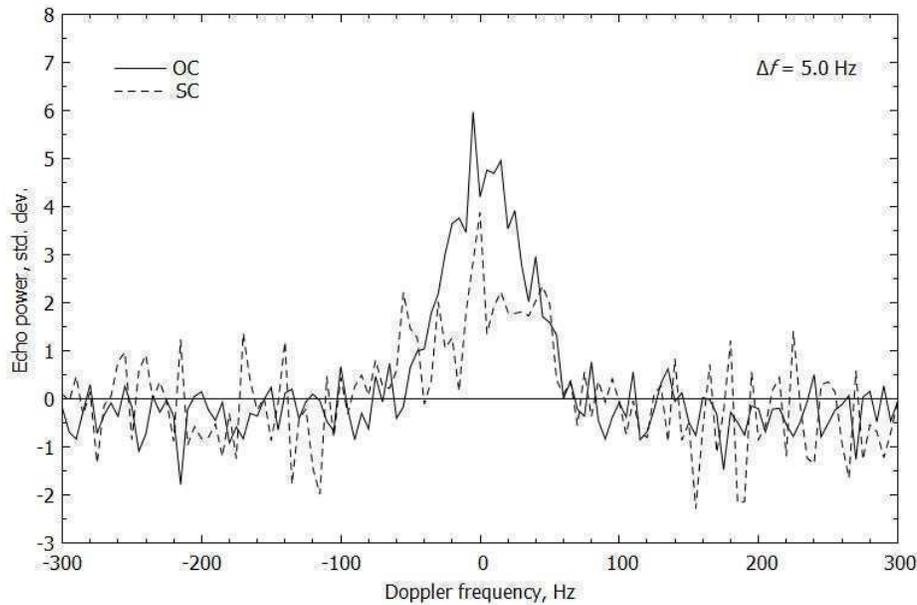


Рис. 6. Спектры мощности зеркальной (сплошная линия) и диффузной (пунктир) компонент эхо-сигнала астероида 3122 Florence, полученные по наблюдениям обсерватории «Бадары» 4 сентября 2017 г.

Еще одним направлением совместного использования проектируемой российско-кубинской колоцированной станции и РСДБ-сети «Квазар-КВО» являются наблюдения КА в ближнем и дальнем космосе. Перспективность этого направления обусловлена следующими факторами: возможностью принимать, регистрировать и обрабатывать практически любые сигналы КА в диапазонах L, S, C, X и Ka; наличием гибкой системы обработки, основанной на аппаратных и программных корреляторах; высокой, вплоть до миллиметровой, точностью радиотехнических измерений; использованием возможностей колоцированной станции для компенсации тропосферных и иных погрешностей измерений; географией расположения радиотелескопов РСДБ-сети «Квазар-КВО» и российско-кубинской колоцированной станции. Возможности комплекса «Квазар-КВО» для радиотехнических наблюдений КА были продемонстрированы [4] на примере доплеровских и фазовых измерений КА миссии РадиоАстрон и навигационных спутников системы ГЛОНАСС, РСДБ-измерений КА Марс Экспресс, КА серии КОСМОС, китайского лунного посадочного аппарата и спутников системы Beidou.

6. КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Потенциальные возможности российско-кубинской станции колокации для проведения измерений методами космической геодезии, такими как ГНСС и РСДБ, оценивались с помощью моделирования наблюдений, а также с использованием реальных

данных, полученных действующими станциями GGOS. Эффективность ГНСС-методов анализировалась на примере определения параметров тропосферной задержки сигнала и параметров орбит навигационных спутников ГЛОНАСС.

При установке ГНСС-антенны рядом с радиотелескопом появляется возможность комбинирования результатов, полученных по РСДБ- и ГНСС-наблюдениям, с учётом данных локальной привязки, выполненной методами классической геодезии. Кроме того, появляется возможность использования при анализе РСДБ-наблюдений параметров, определённых из обработки ГНСС-измерений, как для повышения устойчивости решения, так и по причине более высокой частоты определения этих параметров.

К таким параметрам относятся поправки часов станции (при подключении ГНСС-приёмника и радиотелескопа к одному водородному стандарту) и параметры атмосферы (тропосферная задержка радиосигнала с учетом горизонтальных градиентов).

Наиболее точные оценки тропосферной задержки получаются из обработки РСДБ-данных по программам CONT, в рамках которых проводится непрерывный двухнедельный сеанс наблюдений глобально распределённой сетью антенн.

При сравнении с данными международной ГНСС-службы (IGS) среднеквадратические значения разностей, полученных по сессиям CONT оценок влажной компоненты тропосферы для разных станций, составляют от 7 до 24 мм, при

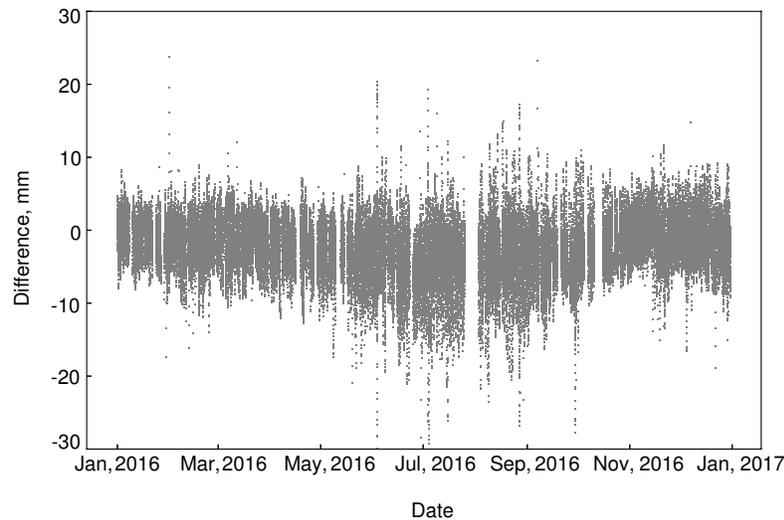


Рис. 7. Разности ZPD_w между ГНСС–решением ИПА РАН и решением IGS для станции «Светлое», мм

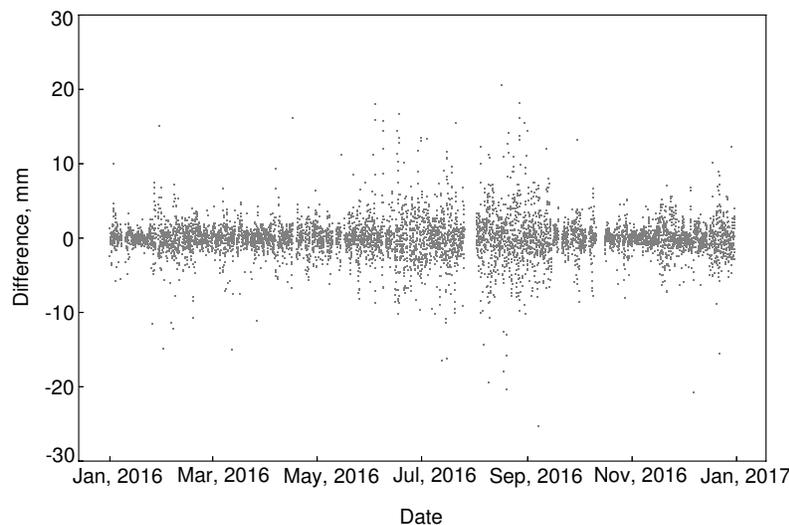


Рис. 8. Разности ZPD_w между ГНСС–решением ИПА РАН и данными РВП для станции «Светлое», мм

сравнении с данными радиометра водяного пара (РВП) — от 6 до 1.5 мм [?]. При этом точность оценок тропосферных параметров IGS находится на уровне 4 мм³. В ИПА РАН в рамках службы ПВЗ в результате обработки ГНСС-измерений формируется ряд тропосферных задержек ZPD_w для станций глобальной сети на ежедневной основе. Например, для станции «Светлое», на которой также установлен РВП [10], по данным за 2016 г. среднеквадратическая разность с данными IGS составляет менее 4 мм (рис. 7), а в сравнении с данными РВП — менее 3 мм (рис. 8).

Поскольку точность определения параметров тропосферы по РСДБ-наблюдениям в других ре-

жимах, особенно на коротких сериях, существенно ниже по сравнению с режимом программы CONT, то использование ГНСС-данных должно существенно улучшить качество результатов, получаемых по наблюдениям радиотелескопа, колоцированного с ГНСС-приёмником.

При обработке данных глобальной сети ГНСС-станций с уточнением полного набора параметров (ПВЗ, орбиты спутников и т.д.) большое значение имеет общая геометрия сети. О качестве получаемых решений можно судить по точности вычисляемых орбит, например, по сравнению с апостериорными орбитами IGS. В ИПА РАН в рамках службы ПВЗ проводится ежедневная обработка наблюдений глобальной сети ГНСС-станций, и точность получаемых орбит по сравнению с IGS

³<http://www.igs.org/products>

Таблица 2. Значения среднеквадратической ошибки определения орбит (σ_R) при различных конфигурациях сети в 2017 году для 330 (I), 331 (II) и 332 (III) дней, соответственно.

Количество станций	σ_R , см		
	I	II	III
14	57	48	45
15	54	47	35
16	26	22	20

Таблица 3. Средние значения моделируемых параметров на часовых сеансах наблюдений для определения всемирного времени.

РСДБ-сеть	$\sigma_{UT1-UTC}$, мкс	Obs	Src
BvZv	8.320	124	52
BvZvSv	5.952	343	54
BvCv	3.189	88	30

— не хуже 5 см. Такая точность достигается при обработке только GPS-измерений сети, включающей не менее 70 станций, а в режиме совместной обработки измерений GPS+ГЛОНАСС используется около 150 станций. Сокращение количества обрабатываемых станций приводит к ухудшению решения, при этом существенное значение имеет то, как распределены станции геометрически.

Для иллюстрации важности геометрии сети был выбран набор из 15 станций, расположенных на территории России и ряда сопредельных государств. Такая конфигурация сети близка к той, что использовалась для поддержки эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС. В таблице 2 представлены результаты обработки наблюдений в виде среднеквадратических разностей положений спутников при сравнении с данными IGS для трех конфигураций сети: 1) 15 станций, 2) 14 станций (исключалась одна станция на территории России) и 3) 16 станций. В качестве 16-й станции была включена действующая на Кубе ГНСС-станция Центра исследования Земли (Германия). Использовались суточные файлы измерений с шагом 30 с для 330, 331 и 332го дней 2017 г. в стандартном режиме обработки (определение ПВЗ, начальных орбит и параметров светового давления для спутников, тропосферных параметров с градиентами, поправок часов станций и спутников, фазовых неоднозначностей).

Из таблицы 2 видно, что добавление всего одной станции, расположенной в другом полушарии,

заметно улучшает качество вычисляемых орбит. Наличие такого пункта очень важно при обработке ограниченного набора станций, например, только станций, расположенных на территории России.

Кроме того, было выполнено моделирование РСДБ-наблюдений двух-, трех- и четырех-станционных радиоинтерферометров на основе российско-кубинской РСДБ-сети для определения ПВЗ. Предполагалось, что рассматриваемая РСДБ-сеть состоит из радиотелескопов диаметром 13 м.

В таблице 3 приведены результаты моделирования наблюдений с целью определения всемирного времени для существующего радиоинтерферометра «Бадары»–«Зеленчукская» (BvZv), для создаваемого трехстанционного радиоинтерферометра «Бадары»–«Зеленчукская»–«Светлое» (BvZvSv) и для двухстанционного интерферометра «Бадары»–«Куба» (BvCv). Формальные ошибки определения всемирного времени ($\sigma_{UT1-UTC}$), количество наблюдений (Obs) и наблюдаемых источников (Src) усреднены по всем часовым сеансам моделированных наблюдений на 15ое число каждого месяца 2016 г. На каждые сутки рассчитывалось 24 сеанса с параметрами наблюдений, взятыми из реальных наблюдательных расписаний для стандартных геодезических сессий: диапазоны S/X, наблюдения длительностью 10 с, определяются всемирное время, поправка к «сухой» компоненте тропосферной задержки, смещение и ход часов. Для опорной станции часы фиксируются и не определяются. Целевое значение отношения сигнал–шум в диапазонах X и S принято равным 15. В моделировании наблюдательных сессий с радиотелескопом «Куба» пришлось увеличить максимальное допустимое время наблюдения до 60 с, так как количество ярких источников в каталоге недостаточно для наблюдений сканами по 10 с на базе 10122 км.

В таблице 4 приведены результаты моделирования суточных РСДБ-наблюдений с целью определения ПВЗ на радиоинтерферометрах «Бадары»–«Зеленчукская»–«Светлое» (BvZvSv) и «Бадары»–«Зеленчукская»–«Светлое»–«Куба» (BvZvSvCv). Длительность наблюдений в диапазоне S/X составляет 10 с, определяются все параметры вращения Земли, «сухая» тропосферная задержка, смещение и ход часов. Остальные параметры совпадают с теми, которые были использованы в моделировании часовых сеансов наблюдений. Формальные ошибки определения всемирного времени ($\sigma_{UT1-UTC}$), координаты X земного полюса (σ_{X_t}), координаты Y земного полюса (σ_{Y_t}), координаты X небесного полюса (σ_{X_c}), координаты Y небесного полюса (σ_{Y_c}), количество наблюдений (Obs) и наблюдаемых

Таблица 4. Средние значения моделируемых параметров на суточных сеансах наблюдений для определения ПВЗ.

РСДБ-сеть	$\sigma_{UT1-UTC}$, мкс	σ_{X_t} , мм	σ_{Y_t} , мм	σ_{X_c} , мм	σ_{Y_c} , мм	Obs	Src
BvZvSv	3.096	2.74	4.15	0.47	1.19	7612	119
BvZvSvCv	0.712	0.92	0.73	0.18	0.45	10292	110

источников (Src) усреднены по всем суточным сеансам моделированных наблюдений на 15ое число каждого месяца 2016 г. Результаты моделирования РСДБ-наблюдений российского сегмента GGOS с участием российско-кубинской станции колокации продемонстрировали, что точность определения всемирного времени может возрасти более чем в 2 раза, остальных параметров вращения Земли — в 3 раза.

7. ВЫВОДЫ

Реализация проекта российско-кубинской геодинимической колоцированной станции на базе Института геофизики и астрономии Министерства науки, технологий и окружающей среды Республики Куба позволит решить следующие задачи:

1. повысить качество изображений радиоисточников за счет более равномерного заполнения uv -плоскости средствами российско-кубинского сегмента GGOS;
2. организовать интенсивные программы наблюдений пульсаров для изучения их физических свойств и построения пульсарной шкалы времени.
3. провести мониторинг тел искусственного и естественного происхождения в околоземном пространстве и дальнем космосе;
4. повысить точность определения всемирного времени более чем в 2 раза, остальных параметров вращения Земли — в 3 раза;
5. выполнить оперативное определение параметров атмосферы и шкал времени станций российско-кубинского сегмента GGOS.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61317X0075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Rodin, in *Proceedings of the Journees-2010*, Ed. by N. Capitaine (Paris, 2010), p. 243
2. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh and M. Hobbs, *AJ*, **129**, 1993 (2005)
3. Yu. Vekshin, V. Chernov, D. Ivanov, et al., *Transactions IAA RAS*, **41**, 135 (2017)
4. M. Vasilyev, V. Zimovsky, G. Ilyin, et al., *Transactions IAA RAS*, **41**, 131 (2017)
5. S. J. Ostro, *Rev. Mod. Phys.* **65**, No. 4, 1235 (1993).
6. A. Ipatov, I. Gayazov, S. Smolentsev, et al., in *IVS 2014 General Meeting Proc.*, Ed. by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong (Beijing, China, 2014), p. 173
7. A. Ipatov, Yu. Bondarenko, Yu. Medvedev, et al., *Astronomy Letters* **42**, 12, 850 (2016)
8. M. W. Busch, S. R. Kulkarni, W. Briskin, et al., *Icarus* **209**, 535 (2010)
9. B. Soja, T. Nilsson, M. Karbon, et al., *Earth, Planets and Space*, **67**, 144 (2015)
10. G. Ilyin, V. Bykov, V. Stempkovskiy, et al., *Transactions IAA RAS*, **33**, 52 (2015)

Russian-Cuban Co-Location Station for Radio Astronomical Observations and Monitoring Circumterrestrial Space

D. V. Ivanov, M.-R. Uratsuka, A. V. Ipatov, D. A. Marshalov, N. V. Shuygina, M. V. Vasiliev, I. S. Gayazov, G. N. Ilyin, Yu. S. Bondarenko, A. E. Melnikov and V. V. Suvorkin

The article presents the main ways to use the future Russian-Cuban geodynamic co-location station on the basis of the Institute of Geophysics and Astronomy of the Ministry of Science, Technology and Environment of the Republic of Cuba for radio astronomical observations and monitoring circumterrestrial space. We consider various potential capabilities of the station to provide the following observational programs: astrophysical observations; observations by means of space geodesy using very long baseline radio interferometry (VLBI), global navigation satellite systems (GNSS), satellite laser ranging (SLR) and various Doppler systems; monitoring artificial and natural bodies in the near-Earth and deep space (including ranging observations of near-Earth asteroids). We present results obtained both ways: by processing simulated observations from the Cuba's future station, and the actual data from the co-location geodynamic stations which are in operation currently. The analysis of the future Cuba station's effectiveness for solving the tasks mentioned is given.

Keywords: telescopes, instrumentation: interferometers, techniques: radar astronomy, techniques: interferometric, pulsars: general, atmospheric effects