

РСДБ КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

Г.А. Шануров (МИИГАиК)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в отделе инженерных изысканий в/ч 33859. С 1975 г. работает в МИИГАиК, в настоящее время — профессор кафедры высшей геодезии. Доктор технических наук. Член Международной ассоциации геодезии (IAG).

А.В. Щуров («РусМастерПроект»)

В 2010 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер астроном-геодезист». После окончания университета работал в Институте физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН. В настоящее время — инженер-геодезист ООО «РусМастерПроект».

Координацию действий по созданию и совершенствованию систем отсчета осуществляет Международная служба вращения Земли и систем отсчета или референчных систем (International Earth Rotation and Reference Systems Service — IERS). В соответствии с определением IERS в [1], Международная земная система отсчета (International Terrestrial Reference System — ITRS) содержит набор рекомендаций и соглашений совместно с моделями, необходимыми для того, чтобы задать начало, масштаб, ориентацию и изменение во времени условной земной системы отсчета (Conventional Terrestrial Reference System — CTRS). Как определено Резолюцией № 2 Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), принятой в Вене (Австрия) в 1991 г., ITRS представляет собой идеальную систему отсчета. Эту систему реализует Международная земная референчная опора или основа (International Terrestrial Reference Frame — ITRF), основывающаяся на оцененных значениях координат и скоростей набора станций, определенных

из результатов наблюдений методами радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), лазерной локации отражателей, установленных на поверхности Луны, лазерной локации ИСЗ и наблюдений спутников систем Navstar (GPS) и DORIS.

С использованием принятых IERS значений параметров ориентации Земли (Earth Orientation Parameters — EOP) ITRS может быть связана с Международной небесной системой отсчета (International Celestial Reference System — ICRS). В той же Резолюции № 2 МГГС записано, что ITRF представляет собой набор пунктов с их трехмерными декартовыми координатами, которые реализуют идеальную систему отсчета ITRS. Нами использован двойной перевод таких терминов, как «reference system» и «reference frame». Это связано с тем, что в русскоязычной геодезической литературе отсутствует единообразие применяемой в данной области терминологии [2]. Наиболее разумным, по крайней мере, в рамках данной статьи, представляется перевод, соответственно, «система отсчета» и «референчная опора».

Следуя тому, что изложено в работах [3] и [4], необходимо констатировать следующее. Система отсчета состоит из системы координат и системы времени. Референчная опора должна удовлетворять двум требованиям: реализуемости и доступности. Это означает, во-первых, что систему координат необходимо фиксировать физически существующими объектами. Во-вторых, что на этих объектах можно устанавливать геодезическую аппаратуру, либо эти объекты можно наблюдать с помощью геодезической аппаратуры. Сформулированным требованиям удовлетворяют центры пунктов геодезической сети и космические объекты, такие как искусственные спутники Земли и квазары. ITRF как глобальная геодезическая сеть включает около 800 станций. На большинстве станций ITRF установлены только приемники Navstar (GPS).

И лишь на 29 из этих станций одновременно со спутниковыми приемниками размещены лазерные спутниковые дальнометры и радиотелескопы, предназначенные для выполнения наблюдений методом РСДБ. Одна



Рис. 1

Радиотелескоп РТ-22 Симеизской астрономической обсерватории (www.astronomer.ru)

из станций расположена на территории Российской Федерации. Это Симеизская астрономическая обсерватория вблизи поселка Симеиз (Республика Крым). На рис. 1 показан радиотелескоп с диаметром антенны 22 м, установленный в 1960 г. на горе Кошка, на высоте 350 м над уровнем моря. Такой же радиотелескоп, принадлежащий ОКБ МЭИ, расположен в Крыму, в районе Алушты.

При расстояниях между радиотелескопами, составляющих тысячи километров, разности координат мест их установки определяют с погрешностями в несколько миллиметров. Авторы, опираясь на свой опыт, сочли возможным изложить теоретические основы применения метода РСДБ для решения задач в области геодезии, а также некоторые аспекты его практического использования.

Идея и теоретические основы метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой были предложены Н.С. Кардашевым, Л.И. Матвеевко и Г.Б. Шоломницким в 1965 г. [5]. Принцип метода РСДБ состоит в следующем. Несколько, по крайней мере два, радиотелескопа, работающих независимо друг от

друга, принимают и записывают радиоизлучение квазаров, координаты которых входят в заранее созданный каталог. Каждая пара радиотелескопов образует радиоастрономический инструмент — радиоинтерферометр. Вектор, соединяющий точки относимости антенн радиотелескопов, называют вектором базы радиоинтерферометра. Каждый квазар одновременно наблюдают все радиотелескопы, в поле зрения которых он находится. Измеряемой величиной является временная задержка τ прихода радиосигнала от квазара на один из радиотелескопов относительно другого. Это эквивалентно измерению разности расстояний от радиотелескопов до квазара. Поэтому в геометрическом смысле РСДБ — это разностный метод.

Квазары — это внегалактические объекты, воспринимаемые земным наблюдателем как точечные. Они излучают шумовые электромагнитные сигналы в столь широком диапазоне, что заполняют полосу частот приема и записи любого радиометра — приемно-регистрирующей части радиотелескопа. Это означает, что излучение квазаров

обладает малой степенью временной когерентности [6]. Таким образом, результаты измерений временной задержки, выраженной в линейной мере, могут быть получены с погрешностями в несколько миллиметров.

Обнаружены десятки тысяч квазаров. Квазары удалены на расстояния в миллиарды световых лет. Например, самый близкий к Земле квазар ЗС 273 расположен в созвездии Девы и находится на удалении в 2,5–3 миллиарда световых лет (рис. 2). Этот квазар видим в световом диапазоне. Именно вследствие столь значительного удаления от Земли квазары воспринимаются как точечные — их угловые размеры не превышают тысячной доли угловой секунды — миллисекунды. Из-за таких малых угловых размеров излучение квазаров при малой длине временной когерентности обладает большой пространственной когерентностью [6]. Принимая сигналы квазаров в двух, сколь угодно удаленных друг от друга точках на поверхности Земли, можно получить когерентные, т. е. «похожие друг на друга» сигналы. Кроме того, и это принципиально важно, квазары, из-за их значительного удаления от Земли,

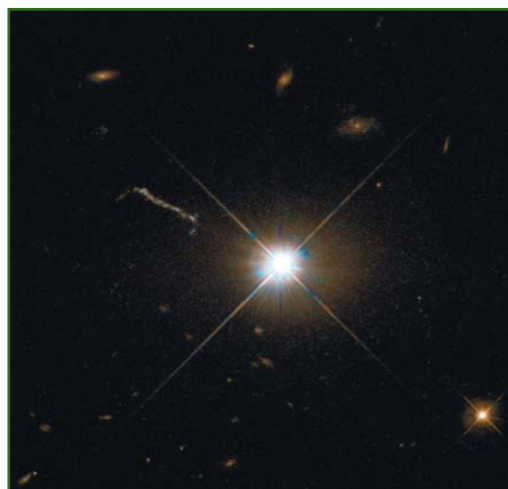


Рис. 2

Изображение квазара ЗС 273, полученное орбитальным телескопом «Хаббл» (www.lenta.ru)

не имеют заметных собственных движений. Поэтому направления на квазары и позволяют практически реализовать инерциальную систему отсчета на уровне миллисекунды.

Инерциальной системой отсчета является ICRS. Практической реализацией ICRS служит фиксированная направлениями на квазары Международная небесная референциальная опора (International Celestial Reference Frame — ICRF). Начало ICRF совмещено с барицентром, т. е. с центром масс Солнечной системы. Основой ICRF является каталог координат 212 квазаров, причем эти координаты определены с погрешностью в одну миллисекунду [3]. Каталог включает также координаты 118 218 звезд, определенные за 37 месяцев телескопом для астрометрических измерений, установленным на космическом аппарате HIPPARCOS. Космический аппарат был запущен в 1989 г. Европейским космическим агентством. HIPPARCOS — акроним от High Precision Parallax Collecting Satellite — спутник для сбора высокоточных параллаксов. Его название созвучно имени древнегреческого астронома Гиппарха, составителя первого в Европе звездного каталога, открывшего явление прецессии оси вращения Земли [7]. Объединение каталога квазаров и каталога видимых звезд выполнено на основе одновременных наблюдений квазара 3C 273 в радиочастотном и оптическом диапазонах [4].

Метод РСДБ позволяет геометрически связать земную систему отсчета с инерциальной системой на уровне, соответствующем точности задания инерциальной системы отсчета. Никакие иные космические и наземные методы такой возможности не дают. По этой причине, несмотря на большие экономические затраты, метод РСДБ в сочетании с лазерной

локацией искусственных спутников Земли используют для создания и поддержания глобальной геодезической сети.

Практическая реализация РСДБ стала возможной после того, как разработали радиометры, способные регистрировать сигналы квазаров в широкой полосе частот, составляющей сотни мегагерц, а также высокоточные стандарты частоты и времени, работающие на основе водородных мазеров.

Радиотелескоп состоит из антенны и радиометра, т. е. приемно-регистрирующей части (рис. 3). В радиотелескопах используют зеркальные параболические полноповоротные антенны. Антенны, предназначенные специально для РСДБ, имеют диаметр от 20 до 30 м, хотя используются антенны диаметром 64 м и более. Например, антенны радиотелескопов ТНА-1500, расположенных в ЦКС ОКБ МЭИ «Медвежьи озера» (Московская обл.) и в филиале ОКБ МЭИ «Калязин» (Тверская обл.) имеют диаметр 64 м. Приемно-регистрирующая часть радиотелескопа содержит малошумящие усилители, охлаждаемые жидким гелием. Сигнал квазара регистрируют на видеоманитофон с синтезированной полосой записи шириной в несколько сотен мегагерц. Одновременно с записью сигнала квазара, принятого радиотелескопом, записывают метки времени от стационарного стандарта частоты и времени, расположенного в месте установки радиотелескопа. Стандарты частоты и времени каждого радиотелескопа не связаны между собой и работают автономно. Несмотря на это, они обеспечивают синхронизацию записи сигналов, принимаемых радиотелескопами, находящимися друг от друга на расстоянии в тысячи километров. Это достигается, благодаря тому, что работой стационарного

стандарта частоты и времени управляет водородный мазер — наиболее точный из современных опорных генераторов, имеющий относительную нестабильность 10^{-14} . Водородный мазер задает также ритм работы радиотелескопа в целом.

Совместной обработке, а именно, корреляционной обработке [8], подвергают не принятые сигналы, а их записи, привязанные ко времени. Такой подход к обработке в свое время стал революционным. Именно в этом состояла принципиальная новизна предложения, изложенного в работе [5]. В процессе обработки, помимо геодезических и астрометрических параметров, с погрешностью в доли наносекунды определяют относительную поправку показаний водородных стационарных стандартов частоты и времени. РСДБ — это самый точный метод синхронизации стандартов частоты и времени.

Технологию РСДБ начали разрабатывать до того, как приступили к созданию существующих в настоящее время спутниковых систем глобального позиционирования, в которых использованы некоторые технические решения, примененные в методе РСДБ. К ним относится совместная обработка не самих сигналов, а записей этих сигналов, а также корреляционная обработка шумовых сигналов с целью измерения времени задержки τ прихода сигнала на антенну спутникового приемника.

Радиотелескоп с антенной, диаметром 32 м, расположенный в радиоастрономической обсерватории «Светлое» (Ленинградская обл., рис. 3), и еще два аналогичных радиотелескопа в радиоастрономических обсерваториях «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесская Республика) и «Бадары» (Республика Бурятия) специально предназначены для



Рис. 3
Радиотелескоп радиоастрономической обсерватории «Светлое» [10]

наблюдений квазаров в режиме РСДБ и образуют сеть «Квазар-КВО». Аббревиатура КВО означает «координатно-временное обеспечение». Любопытно отметить, что термин «координатно-временное обеспечение» по смыслу совпадает с термином «техническая реализация системы отчета». Расположение станций сети «Квазар-КВО» иллюстрирует рис. 4.

Измеряемая величина временной задержки τ связана с вектором базы \bar{D} и с единичным вектором \bar{S} направления на квазар уравнением [8]:

$$\tau = (1/V) \cdot \bar{D} \cdot \bar{S}. \quad (1)$$

В этой формуле V — рабочая скорость распространения радиоволны. Вектор базы выражается в земной системе координат X, Y, Z , фиксированной на исходную фундаментальную эпоху. Вектор направления на квазар выражается в экваториальной (инерциальной) системе координат α, δ . В координатной форме векторы имеют вид:

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{S} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (3)$$

Чтобы подставить выражения (2) и (3) в формулу (1), необходимо представить вектор базы \bar{D} в экваториальной систе-

ме координат. Для этого следует умножить этот вектор на матрицу вращения R [9]. В результате получим:

$$\tau = (1/V) \cdot (\bar{R} \bar{D}) \cdot \bar{S}. \quad (4)$$

Элементы матрицы R являются функциями параметров прецессии, параметров нутации, координат полюса и поправки в мгновенное звездное гринвичское время. Все эти параметры объединяются упомянутым в начале статьи понятием «параметры ориентации Земли», которое ранее называли «параметры вращения Земли». Формула (4) — это уравнение, связывающее измеряемую величину временной задержки τ с оп-

ределяемыми параметрами, которыми являются три координаты вектора базы радиоинтерферометра, две координаты квазара и параметры вращения Земли. К этому перечню необходимо добавить относительную поправку часов (стандартов частоты и времени) радиотелескопов. Уравнение (4) нелинейно относительно определяемых параметров. Чтобы использовать способ наименьших квадратов, его линеаризуют, получают систему параметрических уравнений, переходят к системе нормальных уравнений и решают эту систему многогрупповым способом. Неизвестные разделяют на группы по нескольким признакам: геодезические и астрономические (астрометрические) параметры, медленно меняющиеся со временем и меняющиеся быстро параметры и др.

РСДБ позволяет определять разности координат пунктов геодезической сети, но сами координаты пунктов этим методом получить невозможно. Для привязки к центру масс Земли, т. е. для определения именно координат пунктов геодезической сети в земной системе координат, РСДБ сочетают с лазерной

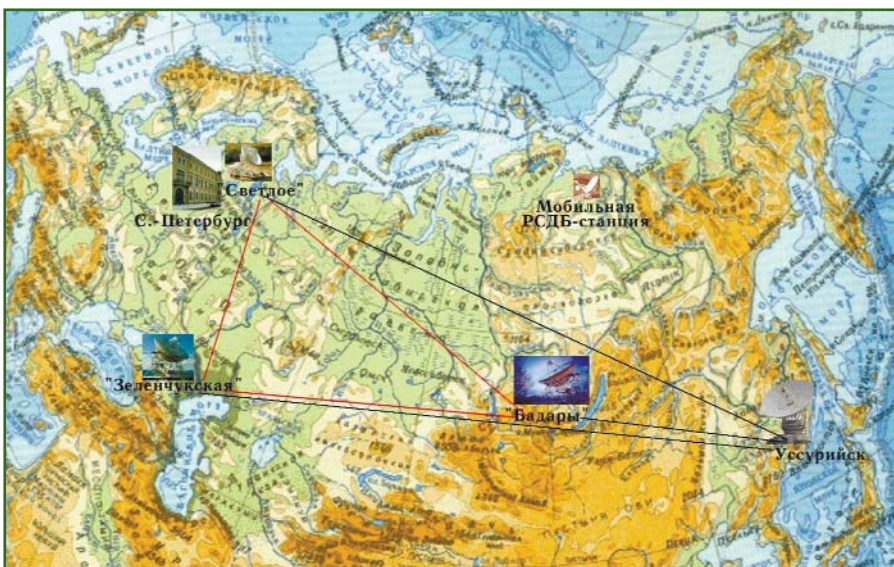


Рис. 4
Пункты сети «Квазар-КВО» [10]

локацией искусственных спутников Земли. Такое сочетание двух независимых в физическом смысле методов позволяет осуществлять взаимный контроль полученных результатов.

В заключение отметим, что в рассматриваемой области геодезии существуют по крайней мере две неопределенности. Отмеченное автором работы [2] отсутствие единообразия применяемой терминологии объясняется не только затруднениями в переводе на русский язык англоязычных формулировок. Существуют исходные несогласования понятий, сформулированных в англоязычных источниках информации. Как отмечалось в начале статьи, в работе [3] указано, что система отсчета включает в себя систему координат и систему времени. В состав общеземной системы координат — прямоугольной или эллипсоидальной — входит геоцентрическое координированное вре-

мя (TCG). Данное же в начале статьи официальное определение ITRS не содержит утверждения о том, что в состав этой системы отсчета входит какая-либо система времени. Вторая неопределенность касается программы и сети «Квазар-КВО». Имеются публикации о том, что эта сеть функционирует [10]. Однако отсутствуют сообщения о том, что радиотелескопы сети «Квазар-КВО» включились в регулярные наблюдения в рамках проекта ITRF. Надеемся, что в ближайшее время такие сообщения появятся.

▼ **Список литературы**

1. IERS Technical Note № 21 (IERS Conventions 1996). — www.iers.org.
2. Серапинас Б.Б. Земная система отсчета и ее составные части // Геопрофи. — 2009. — № 1. — С. 49–53.
3. Christopher Jekeli. Geometric Reference Systems in Geodesy. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Sciences.

Ohio State University. July 2006, p. 202.

4. Крылов В.И. Координатно-временные преобразования в геодезии. — М.: МИИГАиК, 2014. — 90 с.

5. Кардашев А.С., Матвеев Л.И., Шоломницкий Г.Б. О радиointерферометре с большой базой // Известия вузов. Радиофизика. — 1965. — Т. 8. — № 4. — С. 651–654.

6. Brown R.H., Twiss A.B. The Intensity Interferometer, its Application to Astronomy. — London: Taylor & Francis, 1974. — 383 p.

7. Википедия. — <https://ru.wikipedia.org>.

8. Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ. — М.: МИИГАиК, 2001. — 136 с.

9. Mueller I.I. Spherical and Practical Astronomy as applied to Geodesy. — New York: F. Ungar Pub, 1969.

10. Институт прикладной астрономии РАН. — www.ipa.nw.ru

КБ Панорама
Геоинформационные технологии

тел.: (495) 739-0245
факс: (495) 739-0244
panorama@gisinfo.ru
www.gisinfo.ru

**Профессиональная
ГИС Карта 2011**

Основа для построения информационных систем различного назначения

ЗАО КБ "Панорама" Россия, 119017,
г. Москва, Пыжевский пер., д. 5, стр. 3