

ПРОЕКТ VLBI2010

Малкин З.М.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия

В результате анализа современных и перспективных требований к точности РСДБ-наблюдений Международная служба РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS) сформулировала требования к РСДБ-сети нового поколения VLBI2010. Для реализации проекта создан специальный комитет IVS VLBI2010, который координирует исследования и разработки, ведущиеся в разных странах, в том числе и в России. В статье рассматриваются основные результаты работы комитета IVS VLBI2010 и современное состояние проекта.

1. Введение

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является самым точным методом решения многих фундаментальных и прикладных научных задач в области астрометрии и смежных дисциплин. При этом такие задачи, как установление земной и небесной систем координат и определение параметров вращения Земли (ПВЗ), наиболее эффективно решаются на глобальных сетях станций в рамках международной кооперации. С 1999 г. эта работа координируется Международной службой РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS, Schlüter и Behrend 2007). В начале 2001 г. IVS основала рабочую группу IVS WG2 для анализа текущих и перспективных требований к результатам РСДБ-наблюдений с точки зрения потребностей фундаментальных и прикладных работ, использующих эти результаты. Выводы работы IVS WG2 опубликованы в (Schuh и др 2002). Вслед за этим была организована рабочая группа IVS WG3, которая рассмотрела направления развития технологии РСДБ, которые должны привести к удовлетворению требований, сформулированных в отчете WG2, и в 2005 г. в своем отчете сформулировала рекомендации по созданию РСДБ-системы нового поколения VLBI2010 (Niell и др. 2006). Для детальной проработки проекта был создан комитет IVS VLBI2010. Разработки ведутся в нескольких группах разных стран: Канаде, США, Японии, Австрии, России, Италии, Швеции и др. в таких направлениях, как развитие технических средств РСДБ, улучшение стратегии наблюдений и совершенствование методов и программного обеспечения для их обработки. С работой комитета VLBI2010 можно ознакомиться на сайте IVS <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/about/com/v2c/index.html>.

2. Основные требования к системе VLBI2010

В соответствии с рекомендациями IVS WG2 основными целевыми показателями точности результатов РСДБ-наблюдений, которые должна обеспечивать IVS, являются:

- точность ПВЗ: 25-50 мкс дуги для координат земного и небесного полюса и 2-3 мкс для всемирного времени за 24 часа наблюдений с задержкой не более 24 часов;
- точность координат станций: 2-5 мм за 24 часа; 1-2 мм за год;
- точность скоростей станций: 0.1-0.3 мм/год;
- точность длин баз: 1 мм за 24 часа;
- точность небесной системы координат: 0.25 мс дуги за год.

При этом выдвинута задача обеспечения непрерывных круглосуточных измерений. В среднем, целевые параметры системы VLBI2010 в 3-5 раз превышают значения, характерные для сегодняшних результатов IVS. В отчете WG2 были также рассмотрены требования к результатам определения тропосферных, ионосферных, геофизических, астрофизических и физических параметров.

Анализ этих требований рабочей группой IVS WG3 с точки зрения возможности их технической реализации показал, что существующие РСДБ-станции не могут обеспечить нужный результат по ряду причин:

- бóльшая часть РСДБ-станций построена в 1970-80 гг., у них накопился значительный моральный и физический износ, их эксплуатация очень дорога;
- антенны медленны и не могут обеспечить достаточной плотности наблюдений и хорошего покрытия неба для достаточно точного учета влияния атмосферы и картографирования радиоисточников;
- наблюдения в диапазонах S/X становятся все более проблематичными из-за увеличения числа мешающих источников излучения, особенно в S-диапазоне;
- размещение антенн не оптимально;
- время получения результата недопустимо велико.

В результате этого анализа WG3 выработала предложения по основным направлениям формирования РСДБ-системы нового поколения VLBI2010. Практическая реализация этих рекомендаций стала предметом деятельности комитета IVS VLBI2010, который координирует международную кооперацию по этому проекту. Ниже приводятся основные результаты, полученные к настоящему времени. Детали этой работы могут быть найдены в (Petrachenko и др. 2009), а также в серии меморандумов IVS, которые доступны по адресу <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/memos/index.html>. Там же могут быть найдены ссылки на первоисточники рассматриваемой в настоящей статье информации, которые здесь опущены из-за ограничения объема.

3. Основные компоненты системы VLBI2010

РСДБ-сеть состоит из одного или нескольких центров планирования и проведения операций, наблюдательных станций, одного или нескольких корреляторов, одного или нескольких центров обработки наблюдений и связывающих их линий передачи данных. Все эти компоненты требуют развития в сравнении с существующей сетью IVS.

От работы центра планирования и проведения операций (операционного центра) в решающей степени зависит эффективность работы РСДБ-сети. В частности, для сети VLBI2010 ведется разработка новых принципов планирования наблюдательных программ. При этом будет обеспечено более полное использование антенного времени и сокращение интервала полного покрытия небесной сферы, что необходимо для надежного определения быстро меняющихся тропосферных параметров и их разделения с основными определяемыми параметрами, такими как ПВЗ и координаты станций и источников. Кроме того, достигаемое при этом увеличение числа наблюдений напрямую способствует уменьшению ошибок определяемых параметров и повышению качества картографирования радиоисточников. Существующая практика работы IVS и моделирование, проведенное в рамках работы комитета VLBI2010, показали, что только за счет оптимизации расписания наблюдений можно добиться улучшения точности результатов в полтора-два раза. Задача эффективного планирования наблюдений тесно связана с необходимостью минимизации времени одного наблюдения радиоисточника, необходимого для достижения заданного отношения сигнал/шум. Для этого, в свою очередь, необходимо расширять частотную полосу наблюдений и увеличивать скорость регистрации. Также необходимо увеличивать скорость вращения антенн.

Другой важной функцией операционного центра является удаленное автоматизированное управление работой станций, которое, в частности, предусматривает:

- передачу на станцию расписания наблюдений, как правило, один раз в сутки;
- прием со станции результатов наблюдений в непрерывном режиме (по сканам) и их передачу на коррелятор (альтернативно рассматривается передача данных непосредственно со станций на коррелятор);

- управление станцией и контроль ее работы, включая выработку управляющих решений при возникновении нештатных ситуаций.

Основные требования к наблюдательной станции VLBI2010 включают в себя:

- тщательный выбор места расположения с точки зрения геологической стабильности, радиопомех, транспортной доступности, др., а также с учетом существующих и планируемых мест расположения других наблюдательных станций космической геодезии;
- минимальный набор оборудования, включающий РСДБ-антенну стандарта VLBI2010 (с перспективой установки второй антенны), ГНСС-приемник, включенный в сеть IGS (Международная служба ГНСС), метеостанцию, систему резервного питания, локальную геодезическую сеть;
- линию передачи данных между станцией и операционным центром (коррелятором) со скоростью не менее 8 Гб/с.

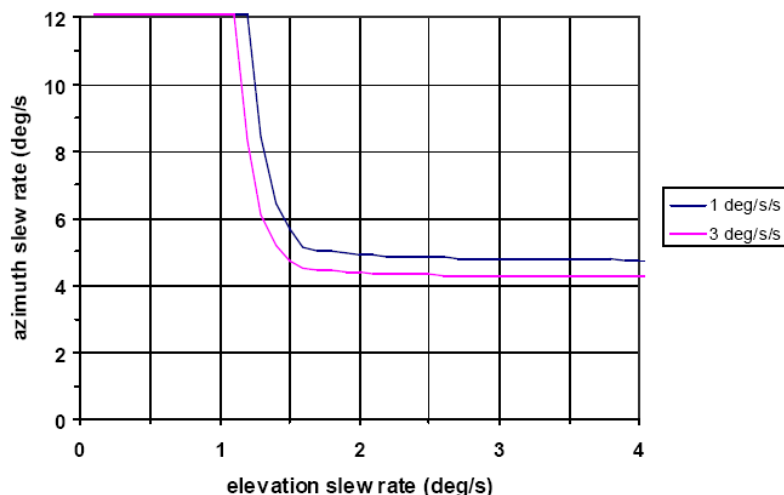
Локальная геодезическая сеть должна состоять из сети станции и районной сети. Первая должна включать в себя не менее трех геодезических марок на расстоянии 30-100 м от антенны, в зависимости от ее диаметра, на разных азимутах. При этом должна быть обеспечена прямая взаимная видимость между опорными точками антенн РСДБ и ГНСС и марок геодезической сети. Региональная сеть должна состоять как минимум из трех марок, расположенных в разных азимутах на расстоянии 10-20 км от станции в зависимости от местной геологической ситуации. Регулярные измерения на локальной геодезической сети должны обеспечить точность взаимного положения антенн и марок сети станции не хуже одного мм. В эти измерения также включается определение смещения оси РСДБ-антенны. Измерения на локальной сети должны проводиться достаточно регулярно для отслеживания местных деформаций земной коры.

Основной элемент РСДБ-станции – антенна. На станциях сети VLBI2010 должны использоваться антенны, удовлетворяющие следующим требованиям:

- диаметр: ≥ 12 м ;
- качество поверхности (ср.кв.): ≤ 0.2 мм;
- азимут и угол места: $\pm 270^\circ$, $5...88^\circ$;
- КИП: ≥ 0.5 на 18 ГГц;
- диапазон частот: 2-32 ГГц для конструкции антенны,
2-14 ГГц для облучателя (желательно 2-18 ГГц);
- температура системы (без атмосферы): ≤ 40 К
- SEFD: < 2000 Ян;
- точность автоматического позиционирования: < 0.1 НРВW на 32 ГГц (соответствует 20 с дуги для 12-м антенны);
- стабильность опорной точки антенны: не хуже 1 мм;
- скорость и ускорение: см. ниже;
- надежность должна обеспечивать время эксплуатации 20 лет при нагрузке 2500 сканов в сутки и среднем времени наработки на отказ для приводов не менее двух лет.

Более подробные спецификации антенны приведены в (Petrachenko и др. 2009). Особое место занимают требования к скорости и ускорению антенны. Они выработаны на основе численного моделирования с тем расчетом, чтобы обеспечить проведение достаточного числа наблюдений в сутки для достижения заданной точности определения координат станций и длин баз 1 мм. Поскольку эти требования могут быть обеспечены при различном сочетании величин скорости и ускорения антенны по двум осям, они не приводятся явно, а задаются в виде диаграммы, приведенной на рис. 1.

Рис. 1. Диаграмма для определения минимально необходимой скорости вращения антенны по азимуту и углу места для двух значений ускорения 1 и 3 град/с². Для удовлетворения требований VLBI2010 необходимо, чтобы точка, соответствующая скоростям вращения антенны по двум осям лежала выше соответствующей кривой.



Сравнение с существующими антеннами показывает, что основными проблемами при построении антенны VLBI2010 являются обеспечение высоких скоростей движения и заданного диапазона длин волн. Последнее, в частности, предусматривает разработку специальных широкополосных облучателей и приемников.

Из остальных систем РСДБ-станции особые требования выдвигаются к системе преобразования и регистрации – ключевой для успеха проекта VLBI2010. Для достижения требуемой точности наблюдений, в том числе относительно слабых источников, в системе VLBI2010 предусматриваются наблюдения в широкой полосе частот с высокой скоростью регистрации данных. Для этого нужна цифровая система, способная обрабатывать радиосигнал как минимум в четырех полосах частот в общем диапазоне, указанном выше. Суммарная скорость обработки данных составляет до 32 Гб/с при средней скорости регистрации (с буферизацией) порядка 8 Гб/с. Система преобразования должна быть легко перестраиваемой в отношении числа, расположения и ширины полос, параметров квантования, выделения боковых полос и т.д.

Использование при наблюдениях нескольких широко разнесенных частотных полос, которые при дальнейшей корреляционной обработке должны образовать конечную фазовую задержку, представляет собой новую концепцию, названную авторами "broadband delay", широкополосная задержка. При этом возникает ряд новых сложных проблем, связанных, в первую очередь, с фазовой связностью сигнала в нескольких далеко разнесенных частотных полосах. Кроме чисто технических вопросов, большой сложностью является учет переменности фазы сигнала с длиной волны и временем, вызываемой сложной структурой источников и влиянием атмосферы.

Коррелятор VLBI2010 должен обеспечить корреляцию сигналов с описанными выше параметрами от сети объемом до 40 станций со скоростью более высокой, чем скорость поступления данных с наблюдательных станций. Рассматриваются несколько вариантов построения такого коррелятора: аппаратный, программный, гибридный, распределенный.

Алгоритмы и программы для обработки данных должны обеспечить высокую скорость обработки при высоком уровне автоматизации, включая устойчивость к проблемным данным. Автоматическая система вычисления, в первую очередь, ПВЗ должна быть частью общего цикла автоматической работы сети VLBI2010.

4. Реализация проекта VLBI2010

Работы по реализации проекта VLBI2010 ведутся во многих странах: США, Канада, Германия, Австралия, Новая Зеландия, Япония, Швеция, Россия, Китай, Корея, и др. Работы находятся на разных стадиях. В Германии, Австралии и Новой Зеландии новые станции уже строятся и будут введены в эксплуатацию в 2010-2011 гг.

Основным и наиболее дорогим элементом РСДБ-системы является антенна. На трех строящихся станциях в Австралии и одной в Новой Зеландии устанавливаются сравнительно дешевые антенны Patriot (рис. 1 слева). Эти антенны диаметром 12 м и скоростью вращения 5 град/с по азимуту и 1.5 град/с по углу места, что несколько уступает требованиям VLBI2010, но существенно превышает типичные показатели антенн IVS сегодня. На станции Ветцель, Германия строится наиболее совершенная на сегодня РСДБ-система. Основу новой станции составляют две 13-м антенны Vertex (рис. 2 справа), рассчитанные на работу в диапазоне до 40 ГГц и имеющие скорость вращения 12 град/с по азимуту и 6 град/с по углу места. Стоимость двух антенн составляет 7 млн. евро, что в 15-20 раз больше стоимости одной антенны Patriot.



Рис. 2. Варианты антенн VLBI2010: *слева* антенна Patriot, *справа* антенна Vertex.

Другим ключевым компонентом станции VLBI2010 является система преобразования и регистрации сигнала. Разработка и тестирование прототипа такой системы ведется на базе обсерватория Хайстек – Годдардская геофизическая и астрономическая обсерватория, США. Построен опытный образец широкополосной системы, проведены наблюдения с регистрацией в четырех полосах и получены корреляционные отклики. В этих экспериментах используется система преобразования и регистратор Mark 5C, разработанные в обсерватории Хайстек. Другая далеко продвинутая разработка системы преобразования ведется в Институте радиоастрономии, Италия.

Имеются в разработке и опытных образцах прототипы широкополосных облучателей и приемников, подходящих для антенн VLBI2010. Такие работы ведутся упомянутой группой Хайстек-Годдард, а также в рамках проектов SKA, ATA и др.

В мире также существуют несколько работающих и разрабатываемых корреляторов, способных обеспечить работу сети VLBI2010. В частности, такие работы ведутся в рамках проектов SKA, ALMA, EVLA и др. Имеются сторонники как аппаратных, так и программных решений. Предлагаются и гибридные конструкции. В последнее время

большую популярность приобрел программный коррелятор DiFX, изначально построенный в Австралии и в настоящее время активно развиваемый также в Бонне (MPIfR), Хайстеке, NRAO.

В России с начала работы комитета VLBI2010 (автор является членом комитета) исследования ведутся в таких направлениях как общая конфигурация системы, оптимальное планирование работы сети, требования к наблюдательным станциям, анализ наблюдений. В 2008 г. Главный метрологический центр Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ), ВНИИФТРИ инициировал работу по модернизации системы определения параметров вращения Земли ГСВЧ на основе специализированной РСДБ-сети станций стандарта VLBI2010, решающей задачи как национальной службы ПВЗ, так и международной кооперации. В настоящее время ведется работа над техническими предложениями. В работе над этим проектом участвует несколько астрономических (ГАИШ МГУ, АКЦ ФИАН, ГАО РАН) и научно-технических (ОКБ МЭИ, НИИ Радио) институтов и организаций. Первые результаты работы по этому проекту приведены в (Красовский и др. 2009).

Литература

- Красовский П.А., Жаров В.Е., Костромин В.П., Пальчиков В.Г., Пасынок С.Л., Черепашук А.М., Шеффер Е.К., Сажин М.В., Белинский А.А., Илясов Ю.П., Лихачев С.Ф., Малкин З.М., Чеботарев А.С., Грачев В.Г., Харламов Г.Ю.* Модернизация комплекса средств определения ПВЗ ГСВЧ на основе создания Российской РСДБ сети малых высокоскоростных антенн. Тр. ВНИИФТРИ, 2009, вып. 54 (146).
- Niell A., Whitney A., Petrachenko B., Schlüter W., Vandenberg N., Hase H., Koyama Y., Ma C., Schuh H., Tuccary G.* VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. In: D. Behrend, K. D. Baver (Eds.), IVS 2005 Annual Report, NASA/TP-2006-214136, 2006, 13-40.
- Petrachenko B., A. Niell, D. Behrend, B. Corey, J. Boehm, P. Charlot, A. Collioud, J. Gipson, R. Haas, T. Hobiger, Y. Koyama, D. MacMillan, Z. Malkin, T. Nilsson, A. Pany, G. Tuccari, A. Whitney, J. Wresnik.* Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee, June 2009. NASA/TM-2009-214180, 2009, 62 pp.; <ftp://ivsec.gsfc.nasa.gov/pub/misc/V2C/TM-2009-214180.pdf>.
- Schlüter W., Behrend D.* The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): current capabilities and future prospects. *J. of Geodesy*, 2007, V. 81, 379-387.
- Schuh H., Charlot P., Hase H., Himwich E., Kingham K., Klatt C., Ma C., Malkin Z., Niell A., Nothnagel A., Schlüter W., Takashima K., Vandenberg N.* IVS Working Group 2 for Product Specification and Observing Programs, Final Report (13th of February 2002). In: N. R. Vandenberg, K. D. Baver (Eds.), IVS 2001 Annual Report, NASA/TP-2002-210001, 2002, 13-45.

VLBI2010 PROJECT

Malkin Z.M.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

Basing on the analysis of the modern and expected requirements to the accuracy of the VLBI observations, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry developed requirements to the new-generation VLBI network VLBI2010. For realization of this project, the special IVS Committee VLBI2010 was established, which coordinates R&D works performing in several countries including Russia.. In this paper, the main results obtained by the VLBI2010 Committee and the current status of the VLBI2010 project are discussed.