

## Антенная система прототипа мобильного РСДБ-радиотелескопа

© В. Ю. Быков, В. Г. Стэмповский, А. М. Шишкин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Эксперимент по созданию перемещаемого РСДБ-радиотелескопа прошел этап разработки и испытания прототипа на базе механической части наземной спутниковой станции связи. В работе представлены основные решения по трансформации антенной системы станции спутниковой связи в антенную систему РСДБ-радиотелескопа. Приведены экспериментальные оценки точности наведения антенной системы на наблюдаемый радиоисточник.

**Ключевые слова:** станция спутниковой связи, радиотелескоп, антенная система, электропривод, управление электроприводом, ПИ-алгоритм, программное обеспечение, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.10-18>

### Введение

Концепция мобильного РСДБ-радиотелескопа с диаметром главного зеркала 1.5–2.0 м предложена в [1]. Промежуточным решением может быть мобильный РСДБ-радиотелескоп с диаметром главного зеркала 3.0–5.0 м. Для проверки реализуемости концепции было использовано натурное моделирование передвижного РСДБ-радиотелескопа в составе радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» [2, 3].

Натурное моделирование не требует создания полноценного устройства, и тем не менее позволяет проверить концепцию с учетом всех факторов, которые влияют на все элементы радиотелескопа в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Адаптация подходящего прототипа для натурного моделирования позволяет снизить затраты на проведение исследований. В качестве такого прототипа послужила выведенная из эксплуатации наземная спутниковая станция (НСС) TESLA S11 DD 424 [4]. На рис. 1 представлен внешний вид НСС.

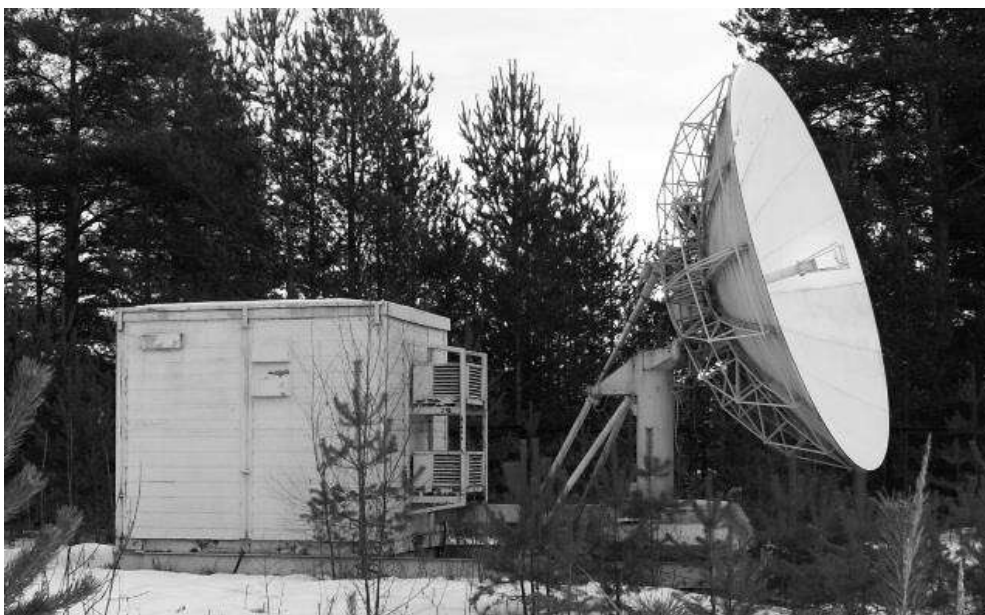


Рис. 1. Наземная спутниковая станция TESLA S11 DD 424

### **НСС в качестве прототипа антенной системы мобильного РСДБ-радиотелескопа**

Технические характеристики антенной системы (АС) НСС приведены в табл. 1. Скорость движения по азимуту и углу места гарантированно обеспечивает сопровождение любых источников радиосигнала, используемых в РСДБ-наблюдениях. Качество зеркальной системы обеспечивает работу в частотном диапазоне 8.0–12.0 ГГц (X-диапазон частот).

Таблица 1

Технические характеристики НСС TESLA S11 DD 424

Характеристика	Значение
Принимаемая частота, МГц	11525
Передаваемая частота, МГц	14325
Диаметр основного зеркала, м	4.23
Фокусное расстояние, мм	1185.5
Перемещение по азимуту, град.	$\pm 40$
Перемещение по углу места, град.	0–80
Погрешность наведения антенны, мин.	< 3
Масса зеркала, кг	340
Масса фидера, кг	18
Масса опорно-поворотного устройства, кг	830
Масса транспортного состояния, кг	1250

Оценка текущего состояния НСС дала основания для использования механической части — зеркальная система, опорно-поворотное устройство с электродвигателями привода — в качестве АС прототипа РСДБ-радиотелескопа. Инкрементные датчики положения и управление электроприводом не подходят для радиотелескопа в силу различий в алгоритме наведения и сопровождения источника радиосигнала. Для НСС характерно отсутствие движения АС после настройки на связной спутник, в то время как АС РСДБ-радиотелескопа постоянно меняет ориентацию в пространстве в соответствии с принципами РСДБ-наблюдений.

Существенным ограничением для использования НСС является малая скорость перемещения от одного источника к другому, а также ограниченный диапазон перемещения по азимуту. Тем не менее для создания прототипа данные ограничения допустимы при соответствующем планировании РСДБ-наблюдений [5].

### **Модернизация АС НСС**

В процессе модернизации выполнено оснащение опорно-поворотного устройства АС датчиками положения на основе вращающегося трансформатора 5БВТ. Датчики положения с устройствами передачи угла поворота обеспечивают систему наведения абсолютными координатами азимута и угла места. Преобразование выходного напряжения 5БВТ в 16-разрядный код производит модернизированное устройство преобразования координат (УПК) [6].

Для двигателей привода АС применено частотное управление с использованием преобразователей частоты, обеспечивающих изменение управляющей частоты в диапазоне 0–400 Гц с дополнительным указанием направления вращения двигателя. Предварительные испытания системы управления электроприводом (СУ ЭП) показали, что для собственных двигателей НСС управляющая частота должна быть ограничена значениями 0–200 Гц для азимутального привода и 0–150 Гц — для угломестного. Кроме возможности управления по скорости, применение частотных преобразователей позволило увеличить скорость перемещения антенны до 3'/с.

### **Система управления электроприводом АС прототипа РСДБ-радиотелескопа**

Аппаратная часть СУ ЭП включает управляющий компьютер (УК), датчики положения с устройством преобразования координат и преобразователи частоты для управления электродвигателями.

Наведение на источник радиосигнала и дальнейшее его сопровождение осуществляется по командам центрального компьютера управления радиотелескопом [7]. Компьютер, управляющий электроприводом, обеспечивает максимально быстрое перемещение к источнику и выполнение алгоритма слежения за расчетной траекторией источника радиосигнала. Эти задачи решает программное обеспечение (ПО) УК.

В значительной степени ПО УК унаследовано от системы управления радиотелескопом РТ-32 [8, 9]. Существенные изменения обусловлены отсутствием управляемого вторичного зеркала, разрешением датчиков положения и шириной диаграммы направленности антенны для предусмотренного диапазона частот принимаемого радиоизлучения.

В реализованном прототипе осуществляется прием радиосигналов в  $X$ -диапазоне. Для приемной антенны с диаметром зеркала 4.23 м ширина диаграммы направленности на уровне сигнала половинной мощности составит  $\sim 34'$ . Точность сопровождения в пределах  $3'$ , заявленная для НСС, достаточна для проведения РСДБ-наблюдений.

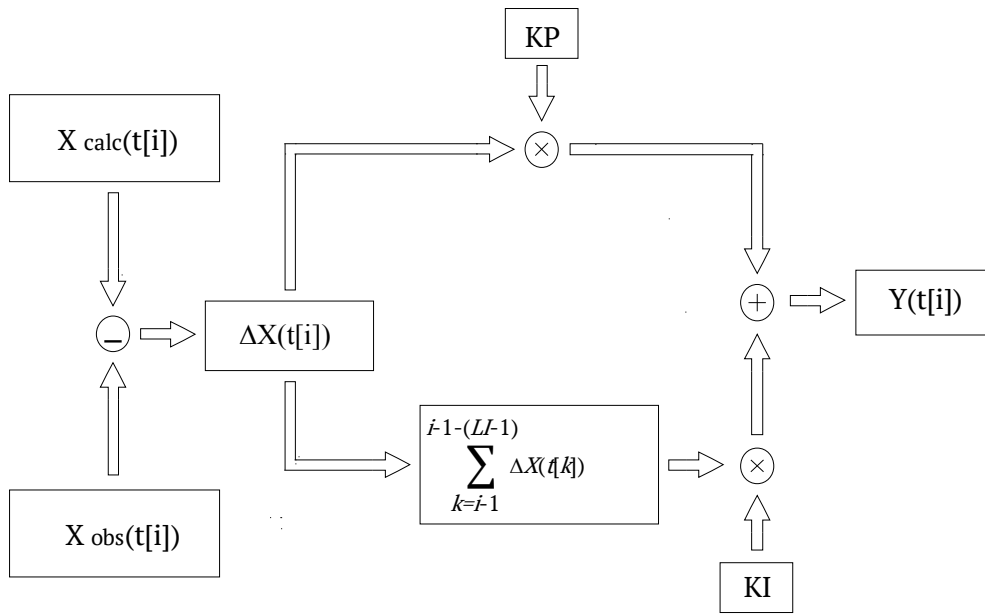
УПК формирует 16-разрядное представление данных датчиков положения, т. е. обеспечивается угловое разрешение в  $20''$ , время формирования и передачи цифрового кода не превышает 50 мс. УПК взаимодействует с управляющим компьютером по последовательному интерфейсу и формирует значение по запросу. С учетом быстродействия УПК частота посылки запросов определена как 20 запросов в сек.

Допустимая частота управляющего воздействия определяется чувствительностью датчиков положения, как при переходе от одного источника радиосигнала к другому, так и при сопровождении.

Для достижения наилучшей точности алгоритм сопровождения был доработан настройкой коэффициентов. Настройка производилась в два этапа. На первом этапе разрабатывалась имитационная математическая модель привода АС, на которой отрабатывались все режимы работы привода: переброс, сопровождение, поиск поправок и сканирование источника. На втором этапе проводился перенос параметров модели в алгоритм управления реальным объектом. Математическая модель предусматривала, в том числе зашумленность сигналов обратной связи, приближая поведение модели к поведению моделируемого объекта [10].

В результате моделирования получен ПИ-алгоритм (пропорционально-интегральный алгоритм) сопровождения источника радиосигнала, представленный на рис. 2. По входным данным о требуемом  $X_{\text{calc}}(t[i])$  и фактическом  $X_{\text{obs}}(t[i])$  положении объекта управления вычисляется управляющее воздействие  $Y(t[i])$  для момента времени  $t[i]$ . Время изменяется с шагом  $0.001 \times FD$ . Параметры алгоритма сопровождения представлены в табл. 2.

Перенос результатов имитационного моделирования на действующую АС показал, что точность сопровождения в пределах одной угловой минуты достигнута с сохранением хороших динамических показателей, таких как время выхода на сопровождение после переброса, возвращение на заданную траекторию при поиске поправок (рис. 3–4) и следование траектории сканирования в окрестности источника радиосигнала (рис. 5–6). Все графики на рис. 3–6 получены из моментальных снимков экрана управляющей рабочей станции и представляют собой 25-секундную историю поведения



$$t[i]=t[i-1]+0.001 \times FD$$

Рис. 2. Пропорционально-интегральный алгоритм сопровождения

Таблица 2

Параметры алгоритма сопровождения

Параметр алгоритма	Элемент привода АС	
	Азимут	Угол места
KP	20	20
KI	15	15
LI	10	10
FD	200	

электропривода — горизонтальная ось на графиках. В верхней части каждого рисунка представлены графики ошибок сопровождения  $X_{calc}(t[i]) - X_{obs}(t[i])$ , в нижней части — графики управляющего воздействия  $Y(t[i])$ . Ошибки и управляющее воздействие приведены отдельно для азимутального (АЗ) и угломестного (УМ) приводов. Поскольку реакция привода АС НСС на управляющее воздействие различаются для разных значений азимута, угла места и направления движения, на рис. 3–4 отдельно в левой и правой частях рисунка рассмотрено выполнение «отвода» (введение поправки) в противоположных направлениях для подтверждения работоспособности реализации алгоритма и настройки его параметров. На рис. 5–6 в таком же формате пред-

ставлена работа алгоритма сопровождения в наименее удобном для СУ ЭП режиме сканирования области нахождения источника радиосигнала. В целом рис. 3–6 демонстрируют достигнутую точность сопровождения в пределах 1'.

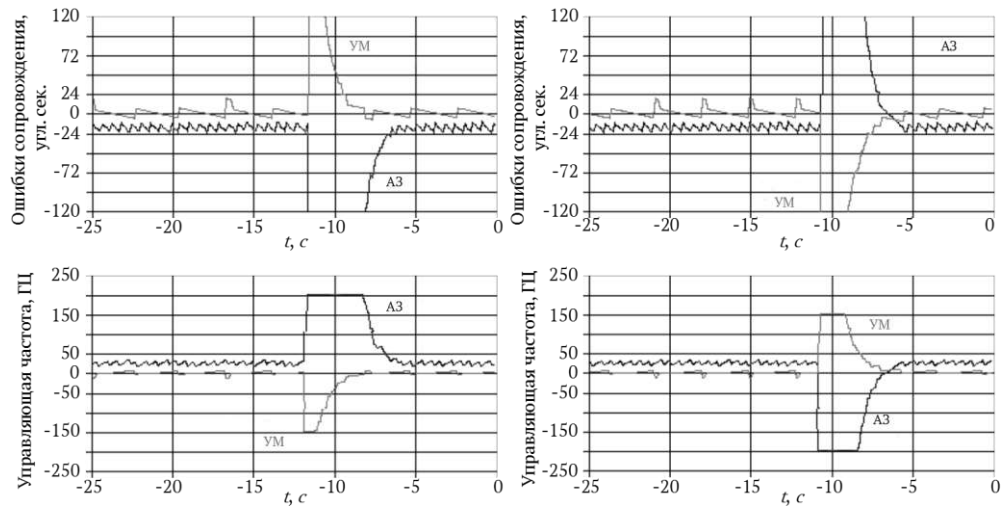


Рис. 3. Выход на источник и его сопровождение при поиске поправок с использованием математической модели антенной системы

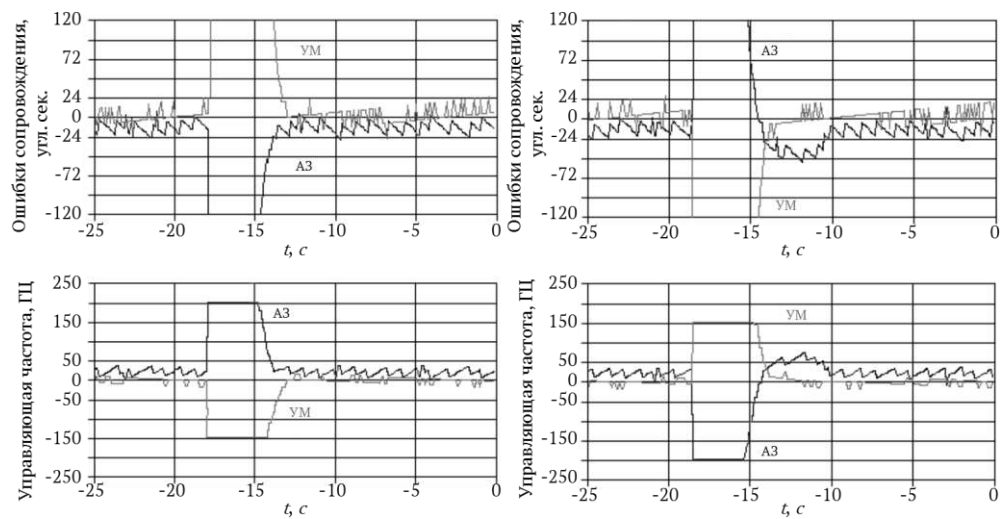


Рис. 4. Выход на источник и его сопровождение при поиске поправок на прототипе РСДБ-радиотелескопа

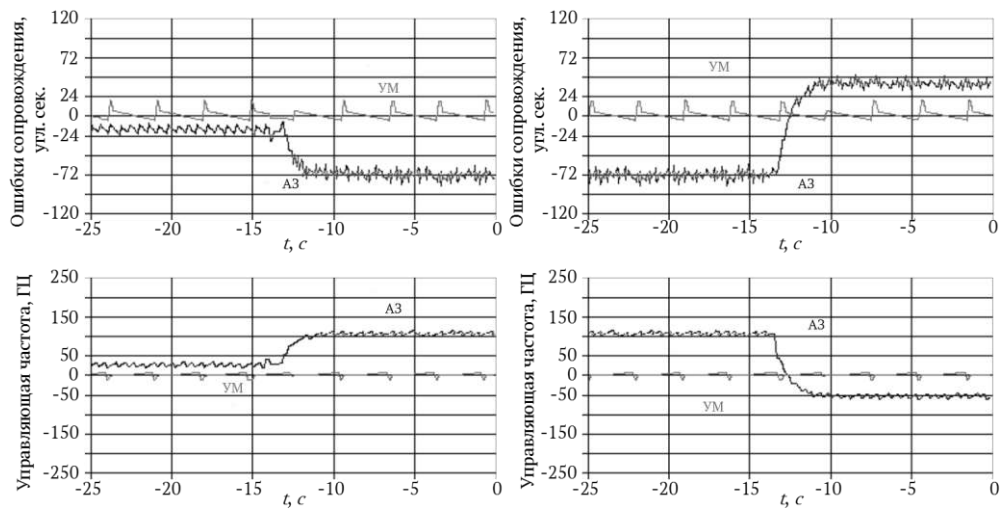


Рис. 5. Сканирование области в окрестности радиосточника с использованием математической модели антенной системы

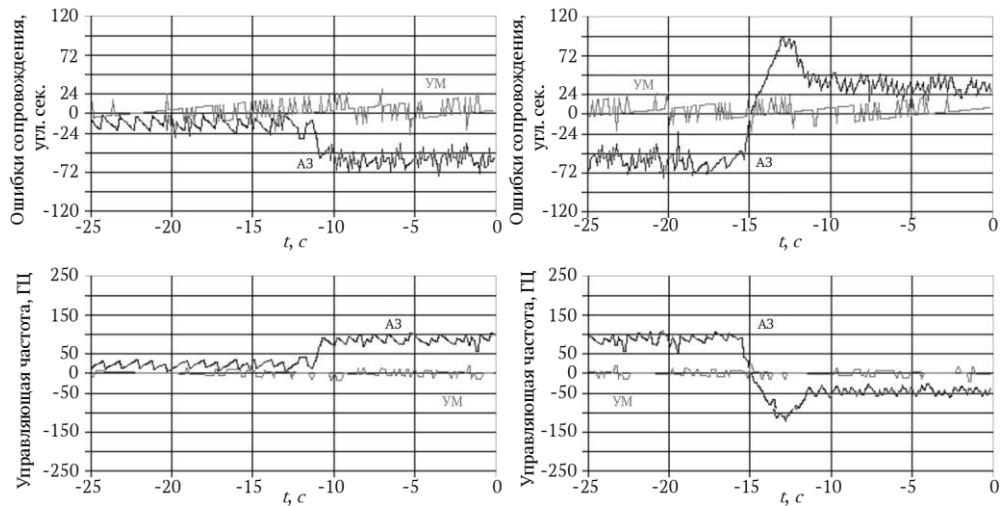


Рис. 6. Сканирование области в окрестности радиосточника на прототипе РСДБ-радиотелескопа

Испытанию системы управления электроприводом АС НСС предшествовала отработка алгоритмов управления на имитационной модели электропривода, затем испытания проводились в лабораторных условиях на аппаратном стенде, воспроизводящем электропривод АС. На аппаратном стенде были отработаны алгоритмы реального времени с учетом фактических задержек срабатывания преобразователей частоты и электродвигателей привода. Данная последовательность действий позволила избежать возможных ошибок и нестандартных ситуаций при испытаниях СУ на реальной АС НСС.

Пробные РСДБ-наблюдения осуществлялись с участием радиотелескопа-прототипа в радиоастрономической обсерватории «Светлое», радиотелескопов РТ-13 в радиоастрономических обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская». В результате корреляционной обработки наблюдений корреляционный отклик получен для всех трех баз: «Светлое» — «Бадары», «Светлое» — «Зеленчукская» и «Бадары» — «Зеленчукская».

### Заключение

Проведенные эксперименты подтвердили возможность работы прототипа РСДБ-радиотелескопа в составе радиоинтерферометрического комплекса «Квазар КВО» с возможностью наведения АС на источники в ограниченных пределах: в секторе полусферы с азимутом  $214 \pm 35^\circ$  и углом места  $40 \pm 35^\circ$ .

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

### Литература

1. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Гаязов И. С., Зотов М. Б., Мельников А. Е., Стэмповский В. Г., Суркис И. Ф., Чернов В. К. Оценка возможности использования малогабаритных РСДБ систем для решения задач КВНО // Тезисы докладов Седьмой Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017)», СПб., 17–21 апреля 2017 г. — С. 131–132.
2. Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Кайдановский М. Н., Кольцов Н. Е., Коркин Э. И., Малкин З. М., Рахимов И. А., Сальников А. И., Смоленцев С. Г. Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО» — базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2005. — Вып. 13. — С. 104–138.
3. Ипатов А. В., Гаязов И. С., Смоленцев С. Г., Варганов М. Е., Иванов Д. В., Шахнабиев И. В., Мардышкин В. В., Федотов Л. В., Кайдановский М. Н., Вытнов А. В., Сальников А. И., Михайлов А. Г. РСДБ-система нового поколения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 216–222.
4. Наземная спутниковая станция типа ТЕСЛА S11 DP 425 и ТЕСЛА S11 DD 424. Инструкция по обслуживанию и уходу.
5. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ипатова И. А., Мардышкин В. В., Михайлов А. Г., Харин М. А. Программный пакет подготовки, проведения и обработки радиометрических наблюдений на радиотелескопах сети КВАЗАР // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2005. — Вып. 12. — С. 93–112.
6. Быков В. Ю., Ильин Г. Н. Устройство съема угловых координат радиотелескопа РТ-32 // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2010. — Вып. 21. — С. 294–303.
7. Михайлов А. Г. Программное обеспечение центрального управляющего компьютера наблюдательного пункта РСДБ-сети Квазар // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2004. — Вып. 12. — С. 68–92.
8. Кайдановский М. Н., Белоусов Н. Ю., Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Рубин И. Г., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М. Система наведения радиотелескопа РТ-32 // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2012. — № 3. — С. 63–74.
9. Белоусов Н. Ю., Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М. Система контроля и управления антенной радиотелескопа



РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2012. — Вып. 25. — С. 16–58.

10. *Стэмповский В. Г.* Математическая модель антенной системы // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2012. — Вып. 24. — С. 87–91.

## **An Antenna System for a Prototype of a Mobile VLBI Radio Telescope**

**V. Yu. Bikov, V. G. Stempkovsky, A. M. Shishikin**

Our experiment to create a mobile VLBI radio telescope has reached a stage to develop and test its prototype which is based on the mechanical part of a ground-based satellite communication station. This paper presents our main solutions to transform the antenna system of the satellite communication station into the antenna system of the VLBI radio telescope. We give our experimental accuracy estimation of the antenna system pointed to an observable radio source.

**Keywords:** satellite communication station, radio telescope, antenna system, electric drive, electric drive control, PI algorithm (Proportional-Integral algorithm), software, very long baseline radio interferometry.