

Ипатов Александр Васильевич

**Российские РСДБ-системы
для астрометрии и геодинамики**

Институт прикладной астрономии РАН

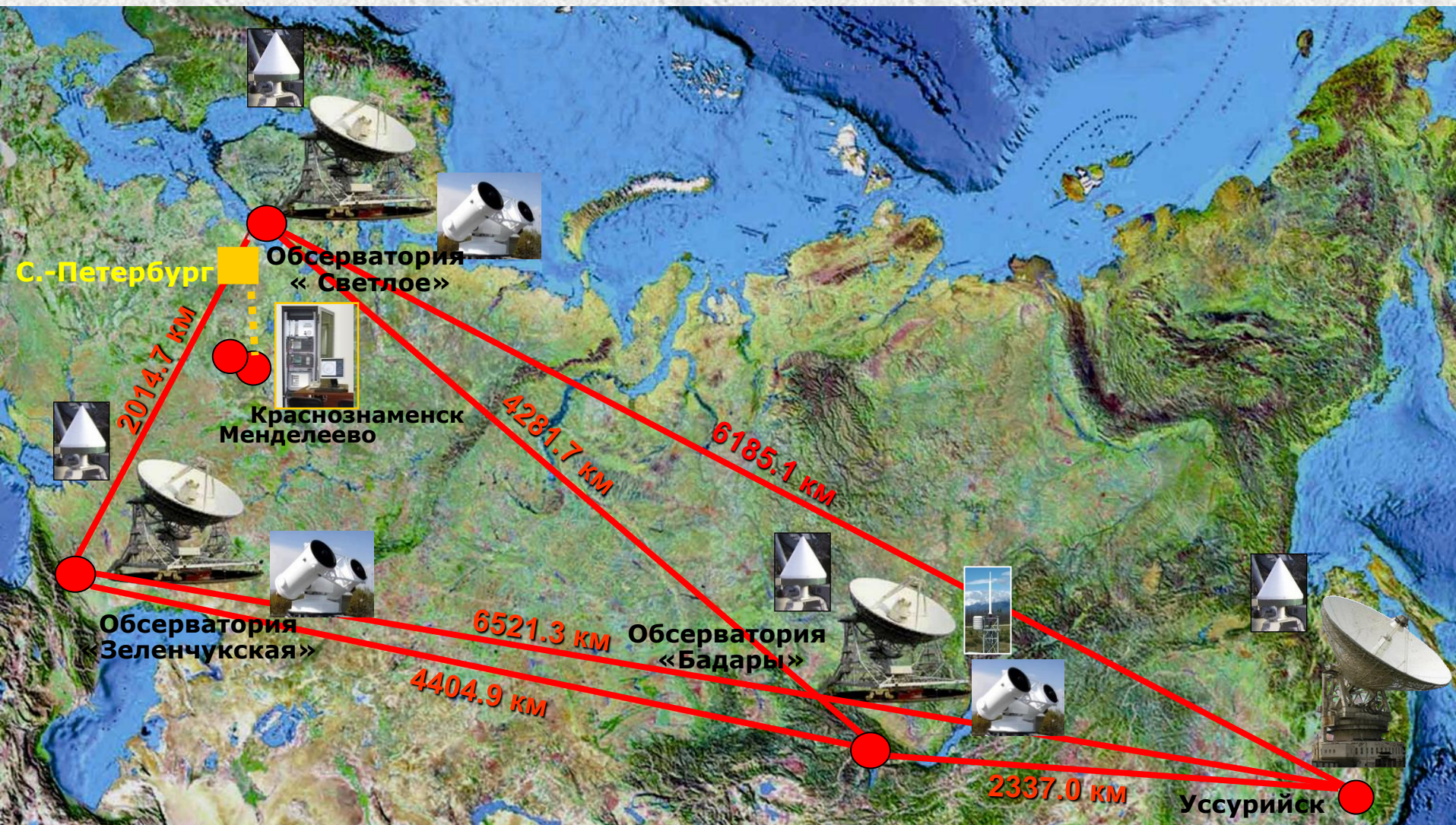
Всероссийская радиоастрономическая конференция

Пушино, 22-26 сентября 2014

Основные научные задачи фундаментального координатно-временного и навигационного обеспечения

- **Построение и поддержание небесной опорной системы координат в виде каталогов координат внегалактических радиоисточников;**
- **Построение и поддержание земной опорной системы координат в виде каталогов координат и скоростей опорных станций;**
- **Определение параметров взаимной ориентации земной и небесной опорных систем координат — параметров вращения Земли;**
- **Построение динамических систем координат в виде эфемерид тел Солнечной системы и космических аппаратов;**
- **Определение параметров гравитационного поля Земли;**
- **Построение национальной шкалы координированного времени UTC(SU) и поддержание ее в заданных пределах по отношению к шкале Всемирного координированного времени UTC;**
- **Построение моделей распространения сигнала в атмосфере.**

Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО»





Обсерватория «Светлое»



Обсерватория «Зеленчукская»



Обсерватория «Бадары»



Радиотелескоп сети «Квазар-КВО» с диаметром главного зеркала 32 м

Диаграмма направленности антенны. Диапазон 6 см. Светлое

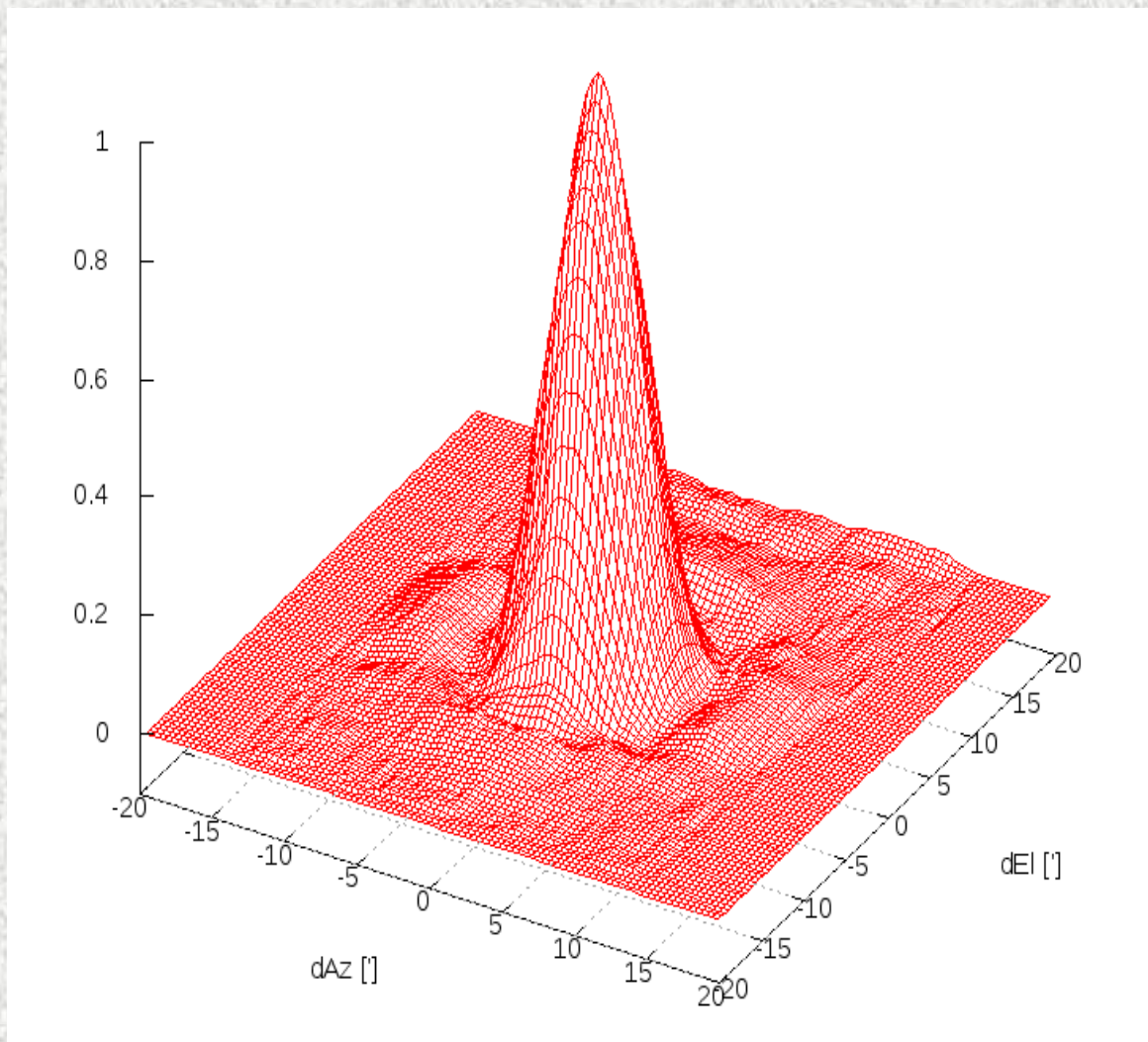
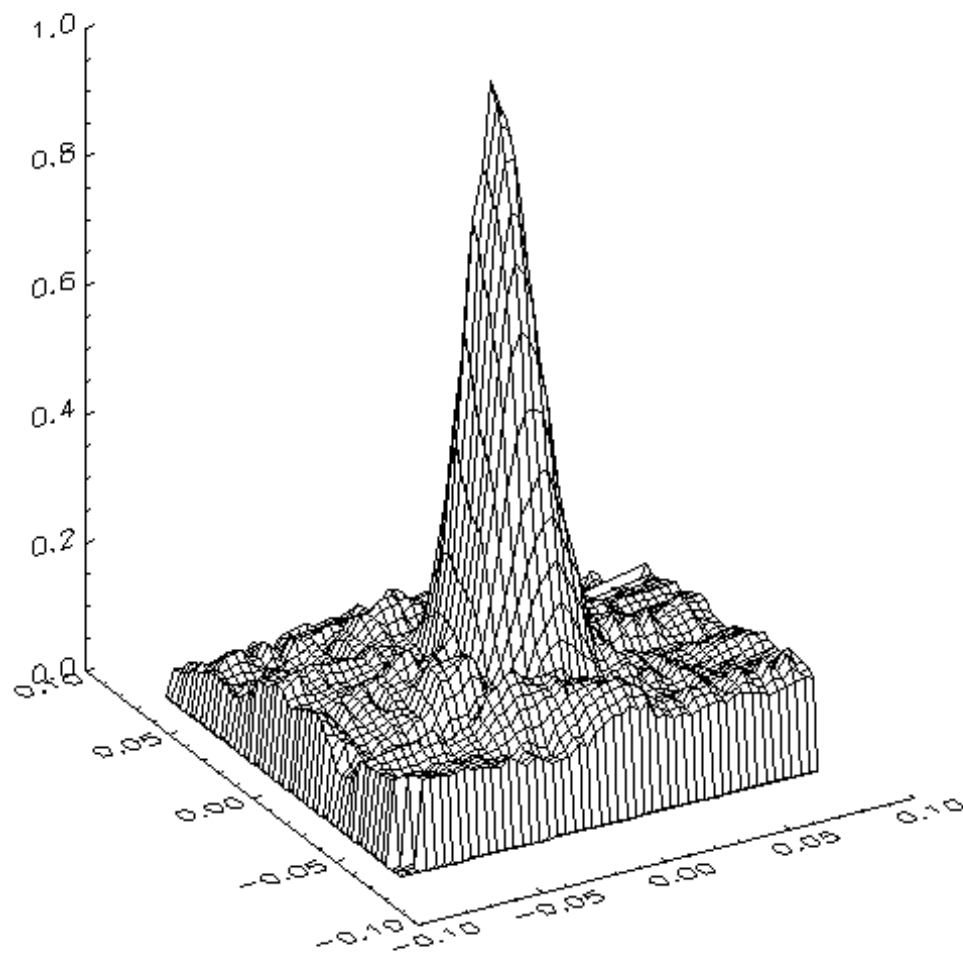
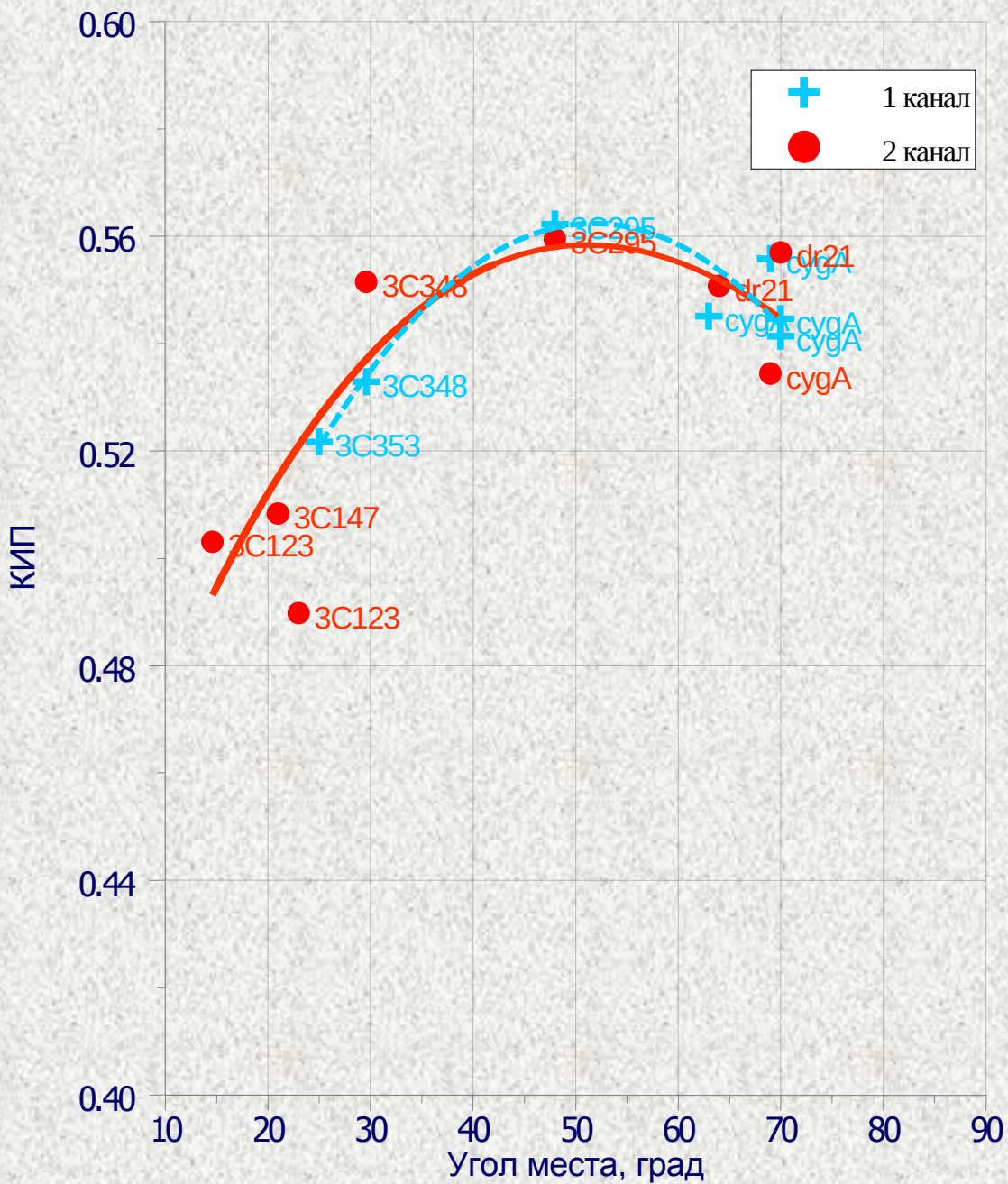
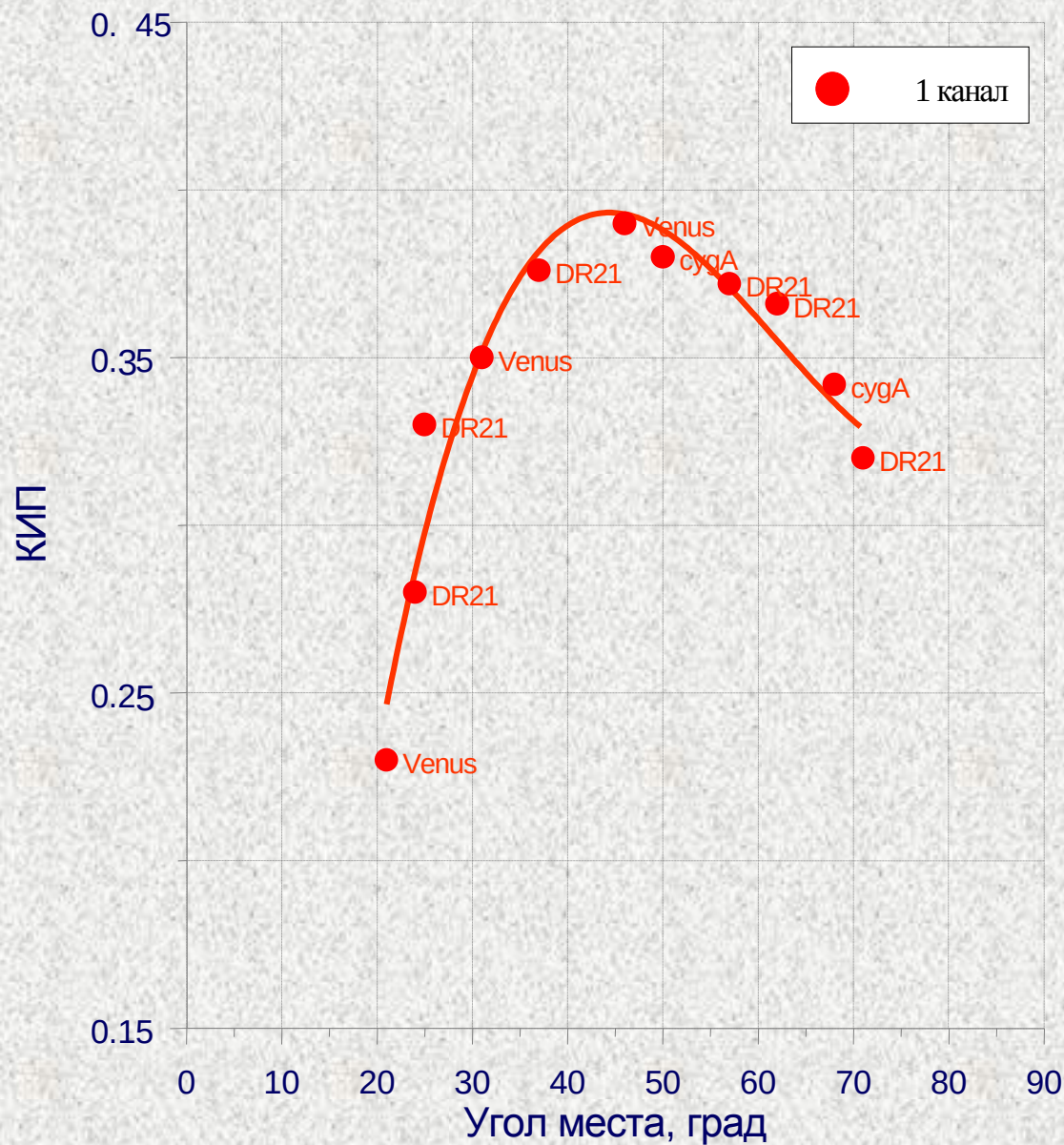


Диаграмма направленности антенны. Диапазон 1,35 см. Светлое





Контррефлектор
сфокусирован на
угле места 50°



Контррефлектор
сфокусирован на
угле места 45°

Расположение облучателей в надзеркальной кабине



Высокочувствительный приемный СВЧ комплекс



Приемники на волны 2.6 см, 6.2 см и 1.35 см



Приемники на волны 3.5 см и 13 см



Приемник на волны 18 - 21 см

Параметры приемной системы радиотелескопов комплекса КВАЗАР-КВО

диапазон	полоса частот, ГГц	$T_{\text{пр}}, \text{ K}$	$T_{\text{сис}}, \text{ K}$	SEFD, Ян	КИП
21/18 см	1,38-1,72	8	43	240	0,62
13 см	2,15-2,50	10	48	330	0,50
6 см	4,60-5,10	8	27	140	0,65
3,5 см	8,18-9,08	11	34	200	0,59
1,3 см	22,02-22,52	20	80	710	0,39

Аппаратура регистрации на радиотелескопах сети «Квазар-КВО»

- Система преобразования сигналов Р1002М
- Система записи на магнитных дисках Mark5B+
- Система радиометрической регистрации
- Спектрометр

Наблюдательные программы РСДБ комплекса «Квазар-КВО»

- Астрометрические РСДБ наблюдения
- РСДБ наблюдения по астрофизическим программам
- Наблюдения по астрофизическим программам в режиме одиночного телескопа

Наблюдения на сети “Квазар-КВО” по астрометрическим программам

Международные программы:

- | | |
|--------------|--------------------------------------|
| –IVS R1 & R4 | определение ПВЗ |
| –IVS Int | определение всемирного времени |
| –IVS T2 | уточнение земной системы координат |
| –IVS CRF | уточнение небесной системы координат |
| –VLBA | картографирование радиоисточников |
| –CONT | внутрисуточные вариации ПВЗ и др. |
| –APSG | азиатско-тихоокеанский регион |
| –EUROPE | европейский регион |

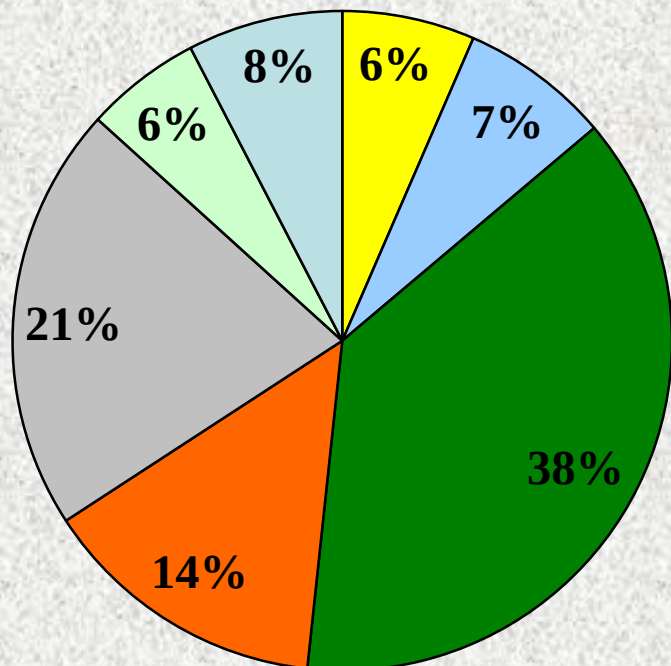
Отечественные программы:

- | | |
|-------------------|---|
| –Ru-E | определение ПВЗ |
| –Ru-U | ежедневное определение всемирного времени |
| –Ru-M, Ru-A, Ru-T | (тестовые сеансы) |

РСДБ наблюдения на комплексе «Квазар-КВО» по программам астрофизики

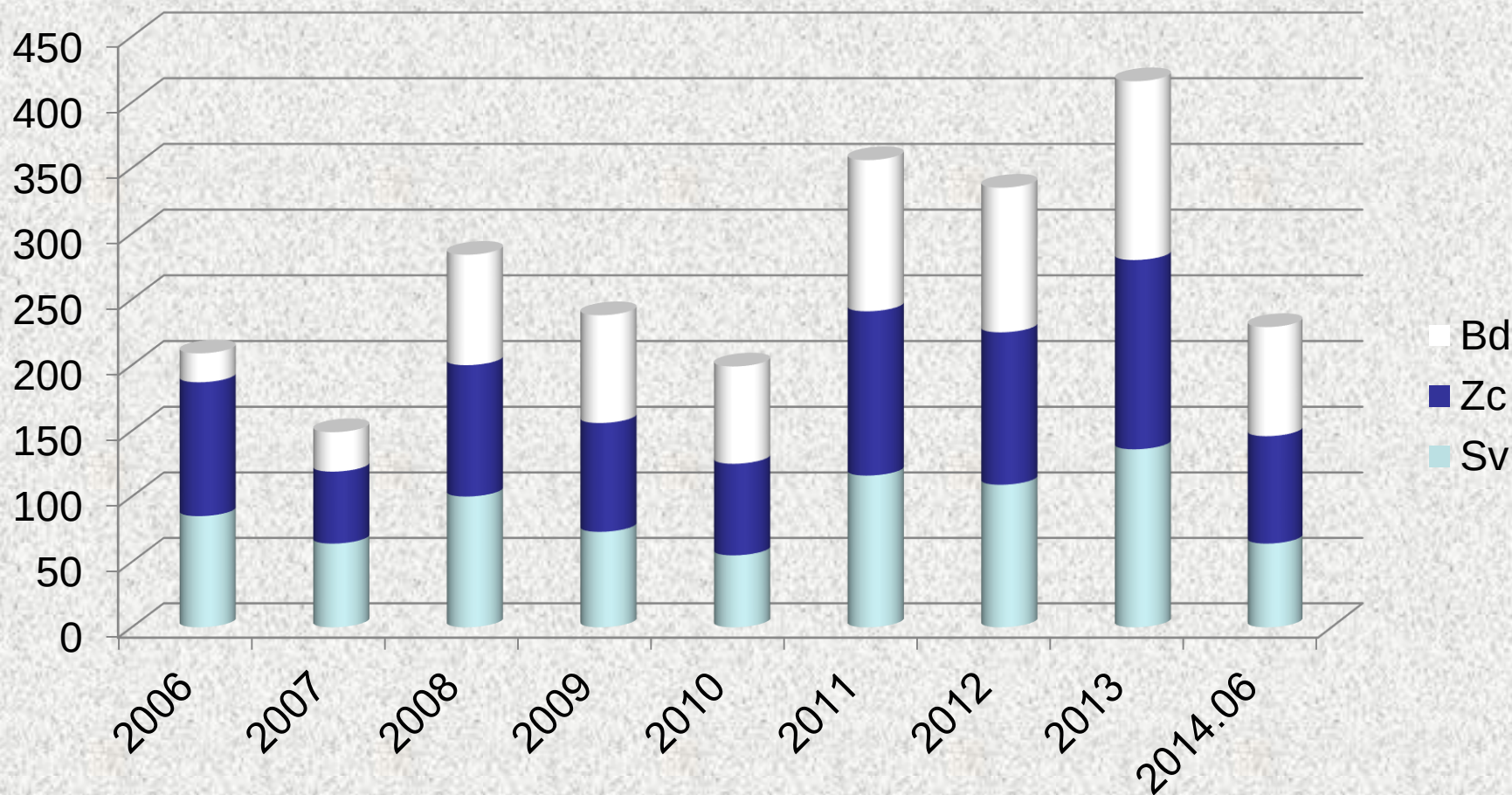
- В составе сети EVN
- По проекту Радиоастрон
- Собственные программы совместно с ИКИ РАН (Краб, мазеры ОН)

Статистика наблюдений на РСДБ комплексе «Квазар-КВО» за 2014 год

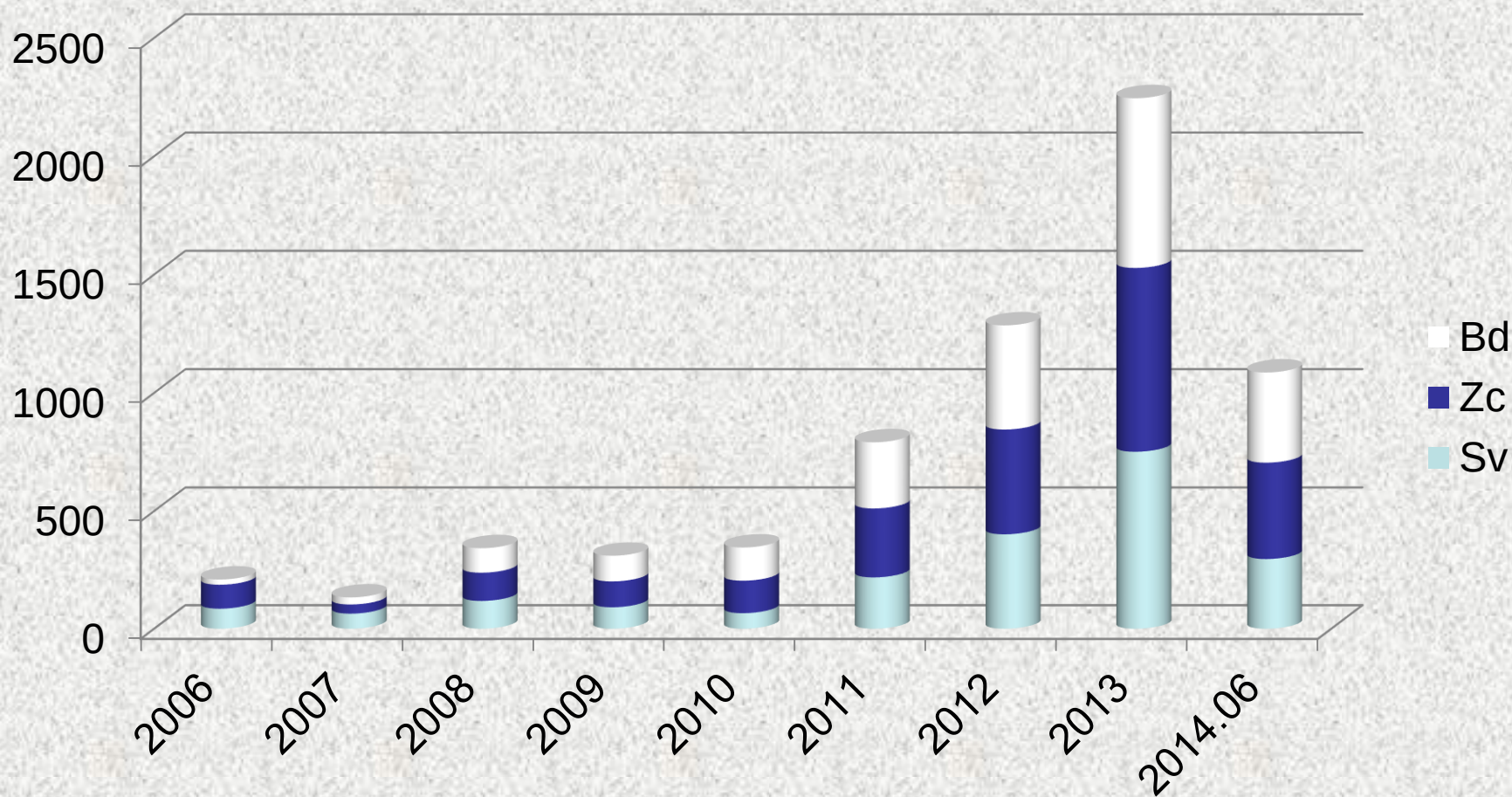


- РСДБ IVS
- РСДБ астрометрия ИПА Ru-E
- РСДБ астрометрия ИПА Ru-U
- РСДБ EVN
- РСДБ Радиоастрон
- РСДБ астрофизика ИПА
- Радиометрия астрофизика

РСДБ наблюдения на комплексе «Квазар-КВО» (сутки)



РСДБ наблюдения на комплексе «Квазар-КВО» (сеансов)



Станции глобальных и региональных сетей на обсерваториях «Квазар-КВО»

Техника	Станция сети	“Светлое”	“Зеленчукская”	“Бадары”
VLBI	IVS, EVN station (year)	Sv, 7380 (2003)	Zc, 7381 (2005)	Bd, 7382 (2006)
GNSS	IGS, EPN station (year)	SVTL (2004)	ZECK (1997)	BADG (2011)
SLR	ILRS station (year)	1888 (2012)	1889 (2012)	1890 (2012)
DORIS	IDS station (year)			BADB (1992)

Сеть опорных станций GGOS



Лазерные наблюдения спутников

Используются для определения ПВЗ, земной системы координат и решения задач геодинамики

КОС “Сажень-ТМ”

Высоты спутников:

дневное время

400-6000 км

ночное время

400-23000 км

Апертура оптической системы 25 см

Длина волны 532 нм

Частота импульсов 300 Гц

Длительность импульса 300 пс

Энергия импульса 2.5 мДж

Масса 170 кг

Точность нормальных точек 1 см

Точность угловых измерений 1-2"



ГЛОНАСС/GPS-наблюдения

SVTL



ZECK



BADG



TOPCON
NET-G3
(72 канала)

Javad
Delta-G3T

Javad
Delta-G3T

Javad
Delta-G3T

(216 каналов)

Суточные и часовые файлы в IGS и EPN

Другие средства измерений

Радиометр
водяного пара
(Светлое)



Антенна
системы
DORIS
(Бадары)



Метеостанции Vaisala WXT 510
(Светлое, Бадары, Зеленчукская)



Основные параметры комплекса «Квазар-КВО» (при работе в составе сети IVS)

- Небесная система координат – 100 мкс дуги для радиоисточников ICRF;
- Земная система координат – 5 мм для станций ITRF;
- Параметры вращения Земли:
 - 100 мкс дуги для координат полюса, углов нутации и прецессии;
 - 10 мкс для всемирного времени;
- Параметры тропосферы – 5 мм.

Международный проект «РСДБ-2010»: основные продукты

Продукт	Параметр	Цель
Координаты полюса (x_p , y_p)	точность скорость получения временное разрешение частота наблюдений	25 мкс дуги 1 сутки 10 мин –1 час ежедневно, круглосуточно
Всемирное время (UT1-UTC)	точность скорость получения временное разрешение частота наблюдений	2 мкс 1 сутки 10 минут ежедневно, круглосуточно
Углы нутации	точность скорость получения временное разрешение частота наблюдений	25 мкс дуги 1 сутки 1 сутки 1 раз в неделю
Небесная система координат	точность частота наблюдений	0.15 мс дуги 1 месяц
Земная система координат	точность	2 мм

Международный проект «РСДБ-2010»: системные характеристики

Параметр	Текущее состояние	РСДБ-2010
Время работы	24 часа, раз в неделю	Круглосуточно
Время восстановления	До нескольких месяцев	< 24 часов
Диаметр антенны	5–100 м	~ 10–12 м
Скорость движения	~ 20–200 град/мин	≥ 360 град/мин
Частоты приема	S/X	~ 2–15(18) ГГц
Скорость записи	128; 256 Мбит/с	8–16 Гбит/с
Передача данных	Транспортировка дисков, в отдельных случаях e- РСДБ	e-РСДБ, в отдельных случаях транспортировка дисков
Число станций	40, распределенных случайным образом	40, распределенных оптимальным образом
Число станций, оснащенных не менее, чем 3/4 средствами измерений	16/5	40/20

Принципы построения радиоинтерферометра нового поколения

- Радиотелескопы нового радиоинтерферометра должны быть полностью совместимы с радиотелескопами сети «Квазар-KBO»;
- Проект должен быть основан на результатах рабочей группы «VLBI-2010»;
- Должны учитываться условия радиоклимата в местах расположения радиотелескопов;
- Радиотелескопы должны работать 24 часа в сутки 7 дней в неделю;
- Радиотелескопы должны быть расположены на максимально возможном расстоянии по долготе.

Диапазоны частот интерферометра нового поколения

- 8 полос по 512 МГц или 4 полосы по 1024 МГц
- Двухбитовое квантование
- Суммарный поток данных 16 Gbps



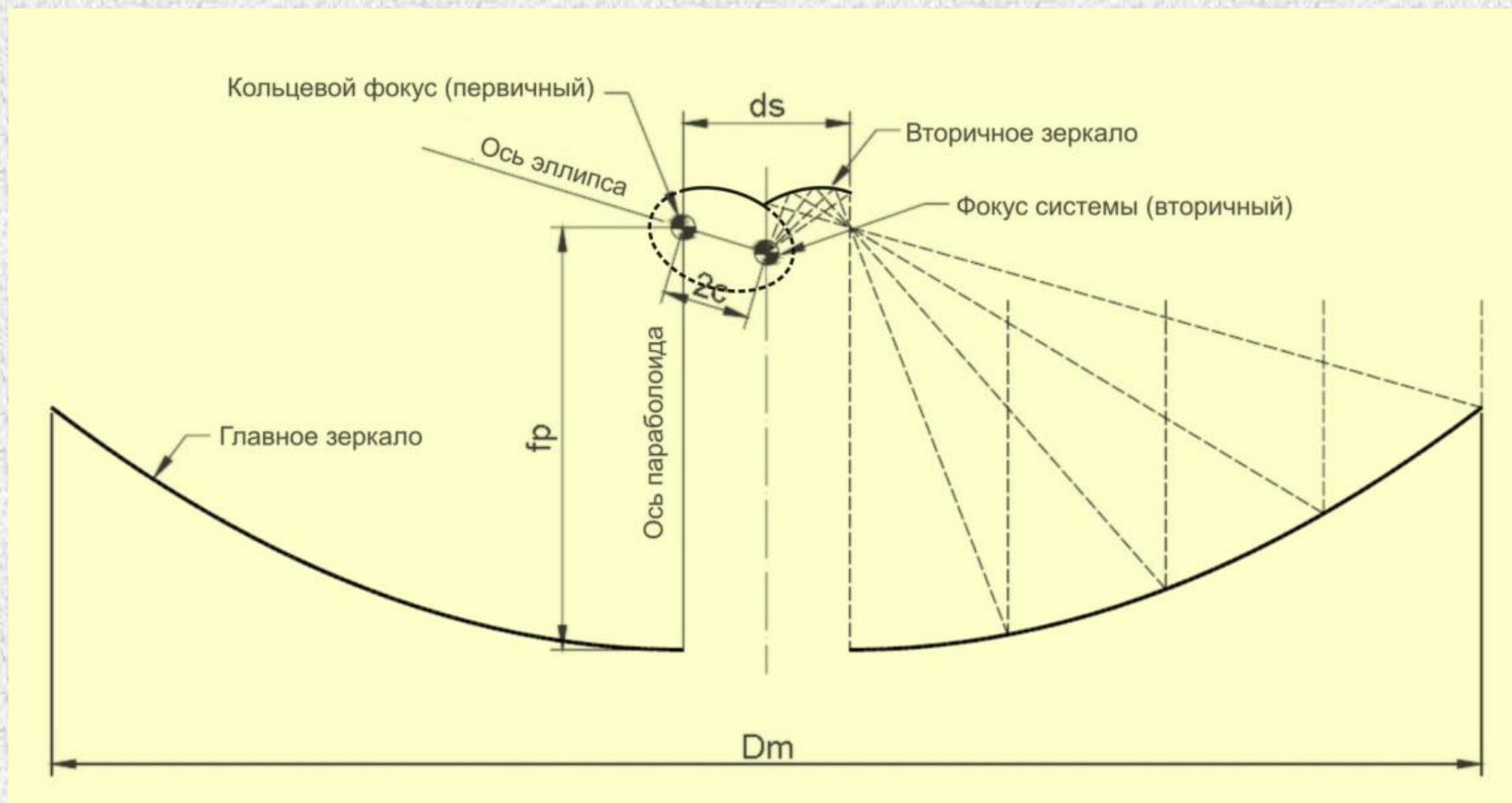
	Полосы частот	Точность определения групповой задержки
Первый этап проекта	3 x 512 МГц в X-band для определения групповой задержки 1 полоса ~300 МГц в S-band для определения ионосферной задержки	до 4 пс
Второй этап проекта	1 x 1024 МГц в X-band и 3 x 1024 МГц в Ka-band Синтезированная полоса частот 8.5-34 ГГц	< 1 пс (теоретически)

Антенная система радиотелескопа РТ-13



- Диапазон принимаемых частот: 2 – 40 ГГц
- Диаметр главного зеркала: 13.2 м
- Точность поверхности: 0.2 мм
- Монтровка: альт-азимутальная
- Кольцевое облучение
- Подвеска контррефлектора: гексопод
- КИП = 0.8
- Скорость по азимуту: 12 град/с
- Скорость по углу места: 6 град/с
- Точность сопровождения: 16 угл. с

Схема облучения антенны



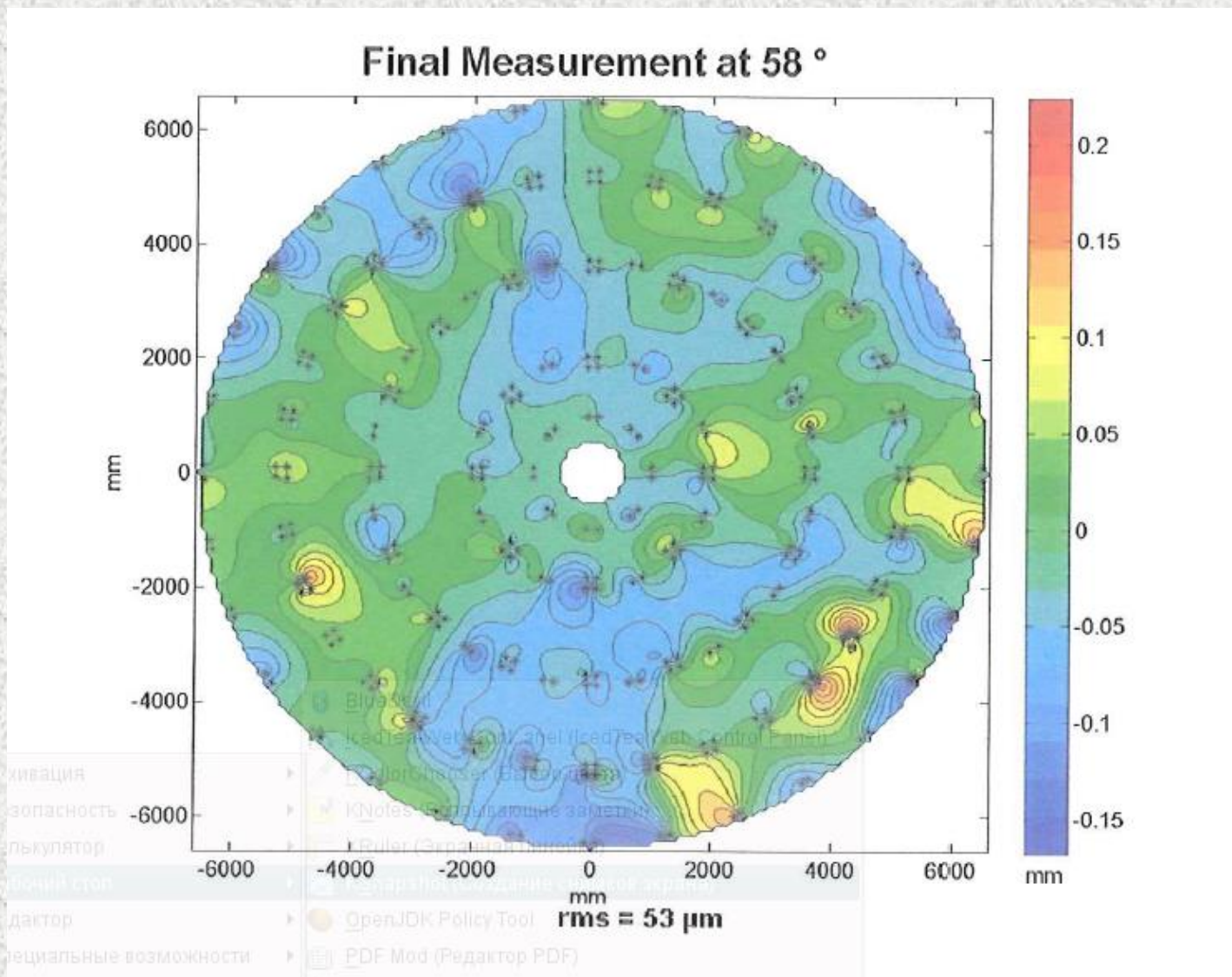
Радиотелескоп РТ-13 в обсерватории Бадары



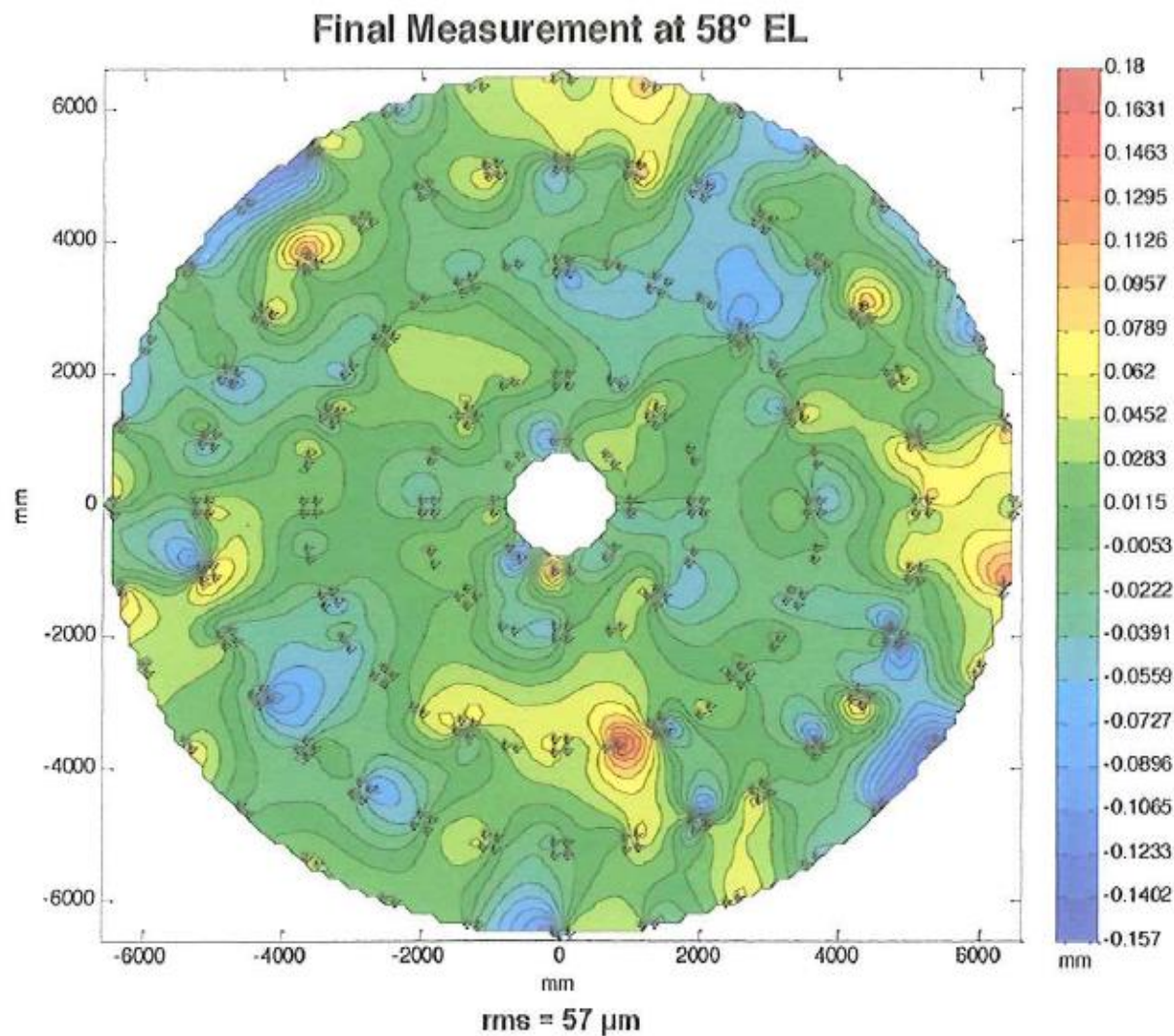
Радиотелескоп РТ-13 в обсерватории Зеленчукская



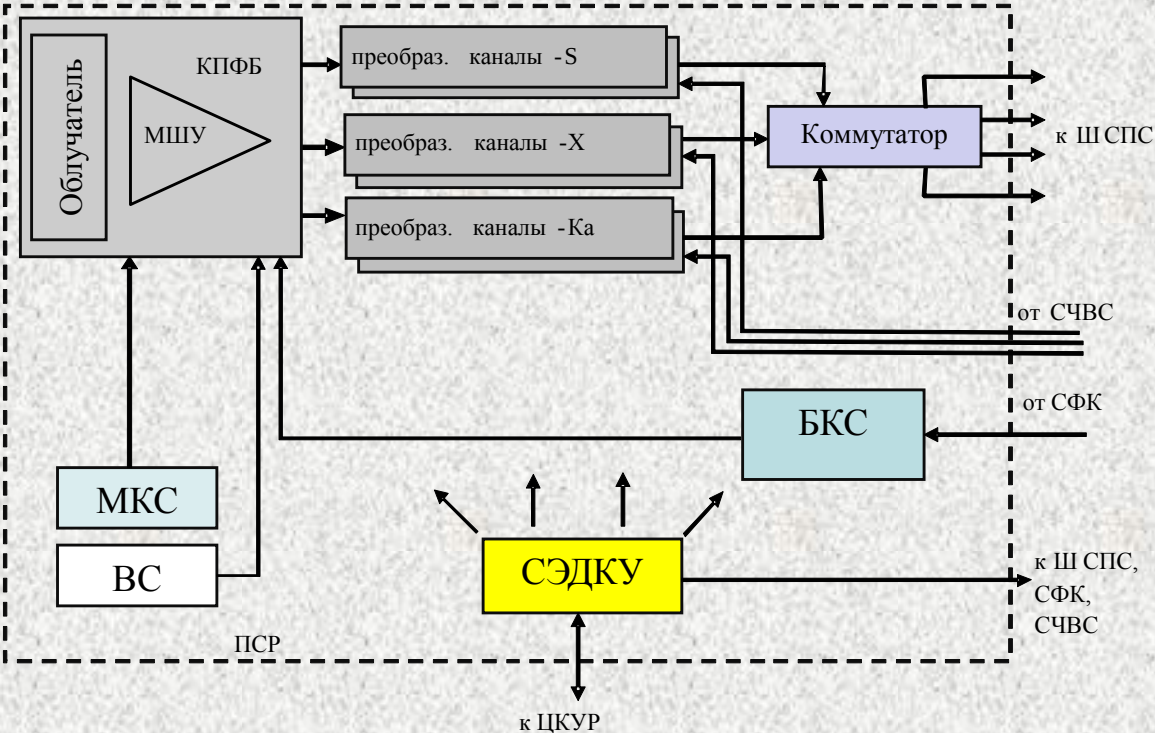
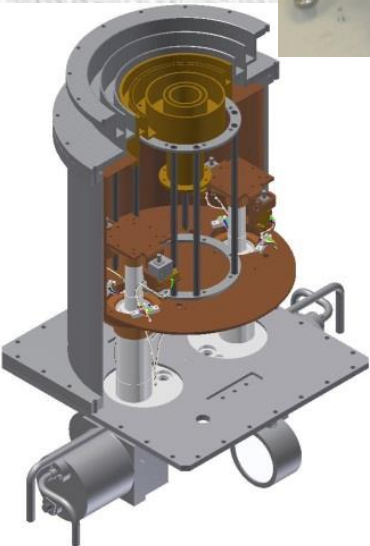
Измерения качества поверхности антенны РТ-13 в обсерватории Зеленчукская



Измерения качества поверхности антенны РТ-13 в обсерватории Бадары

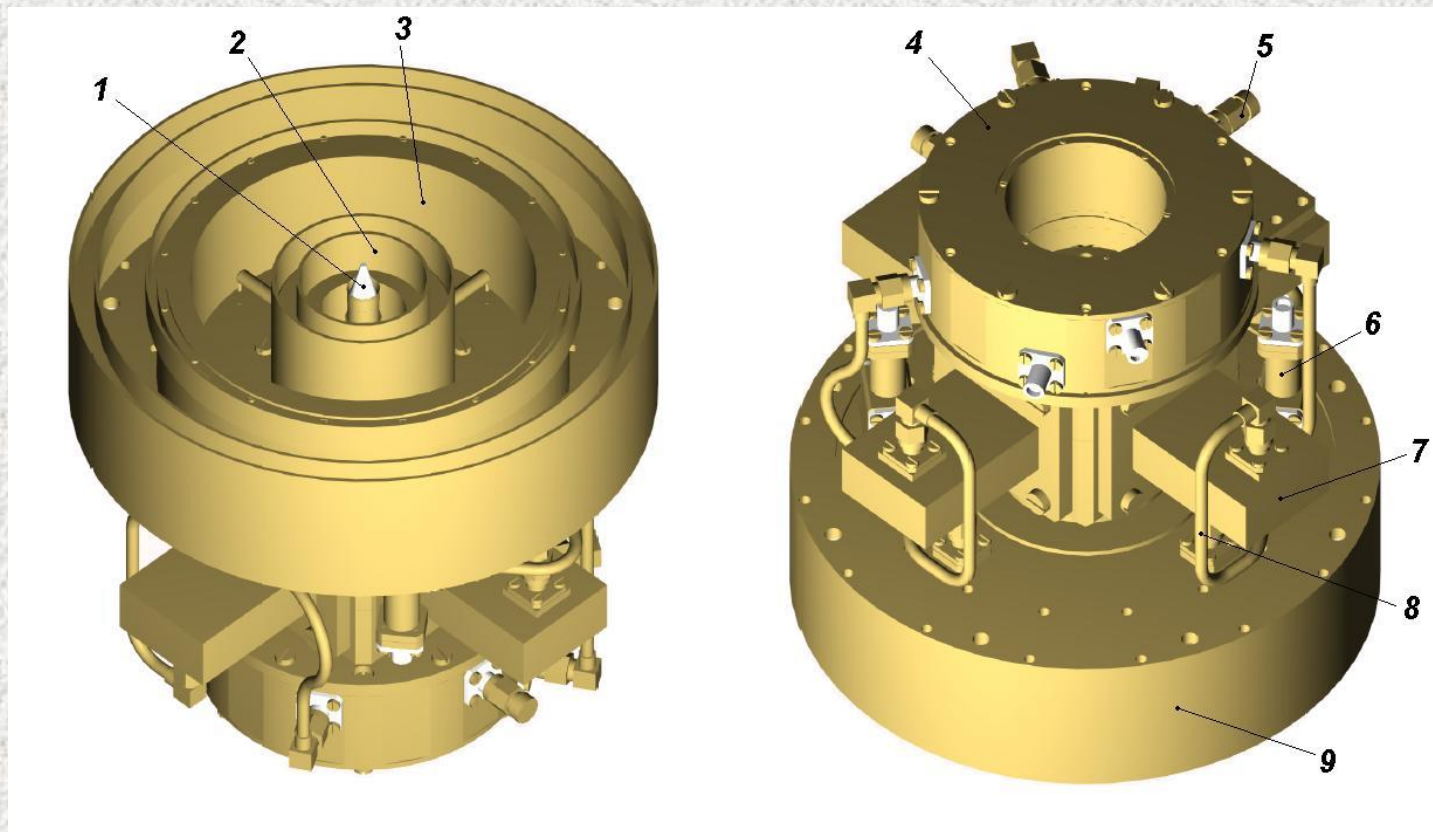


Приемная система радиотелескопа РТ-13



Диапазон	Рабочий диапазон частот, ГГц	Поляризация	Оценка ЭШТВ, К	Ширина диаграммы направленности облучателя (-16 дБ)	Кол-во субканалов ПЧ	Режимы работы
S	2.2 – 2.6	Левая и правая круговые	23.2	130	2	1S + 3X
X	7.0 – 9.5		29.7		6	
Ka	28 – 34		44.5		6	1X + 3Ka

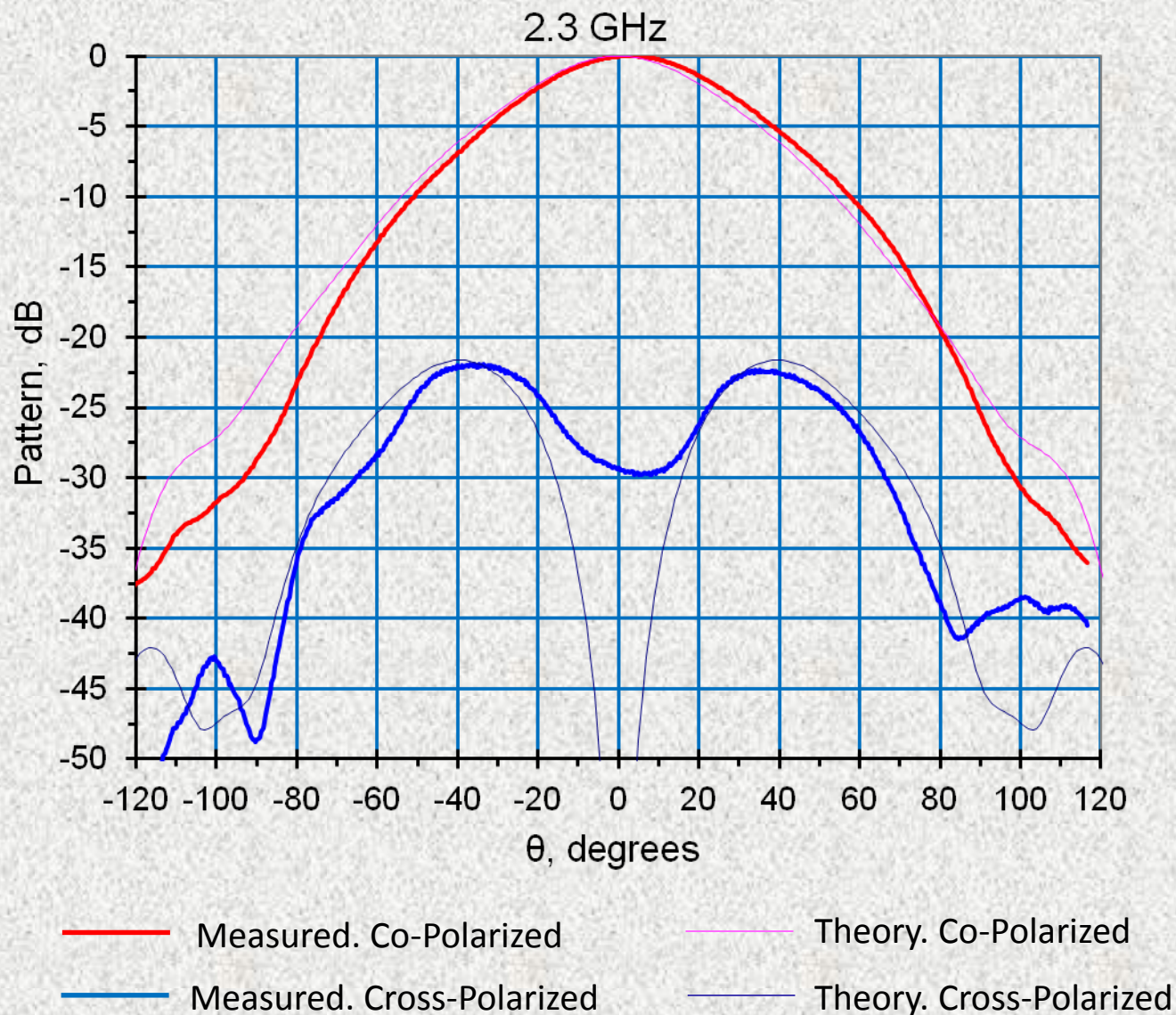
Общий вид трехдиапазонного облучателя



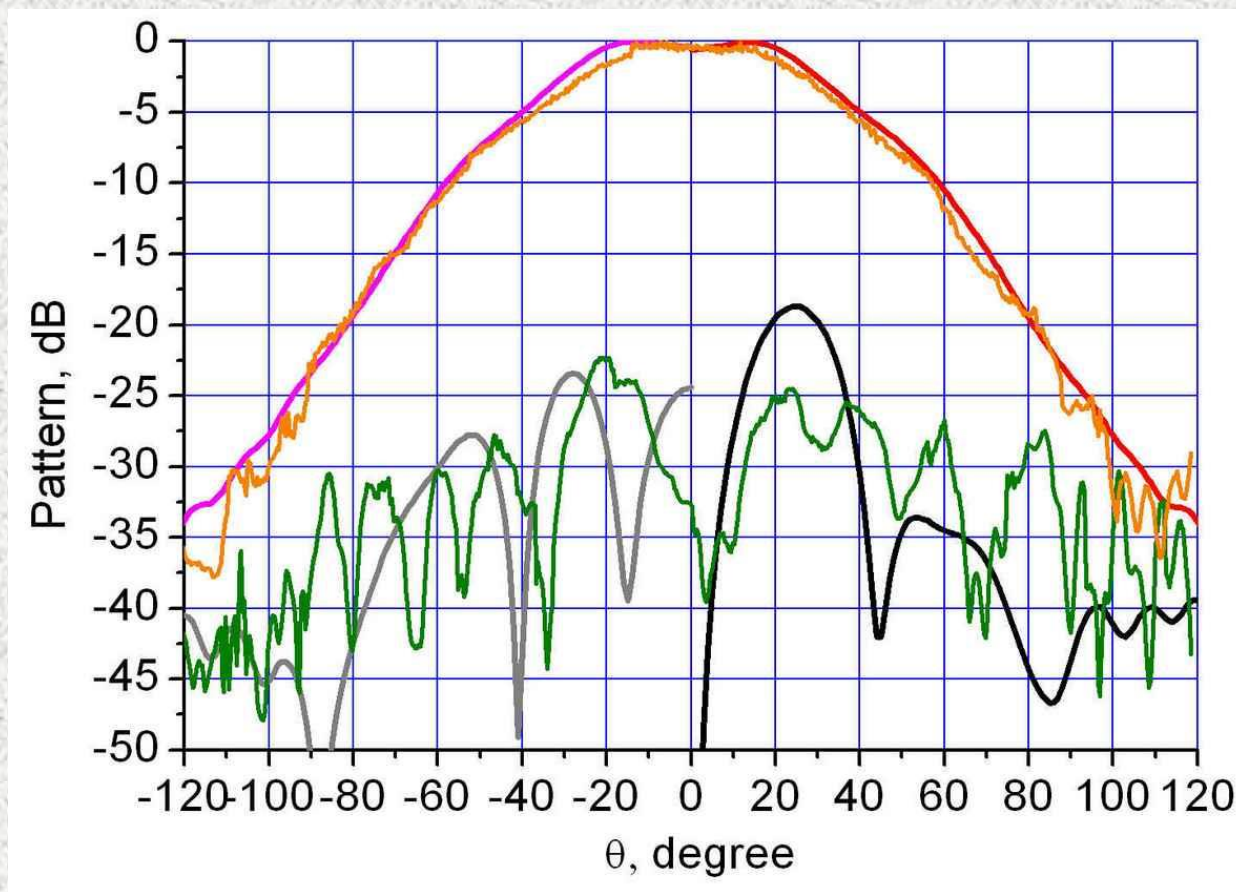
1 – излучатель Ka-диапазона;
 2 – излучатель X-диапазона;
 3 – излучатель S-диапазона;
 4 – сдвоенный кольцевой мост
 S-диапазона;
 5 – согласованная нагрузка;

6 – синфазный делитель X-диапазона;
 7 – синфазный коаксиально-волноводный
 переход X-диапазона;
 8 – полужесткий коаксиальный кабель;
 9 – несущий корпус облучателя.

Диаграмма направленности облучателя - S-band



7.5 GHz



— Measured. Co-Polarized

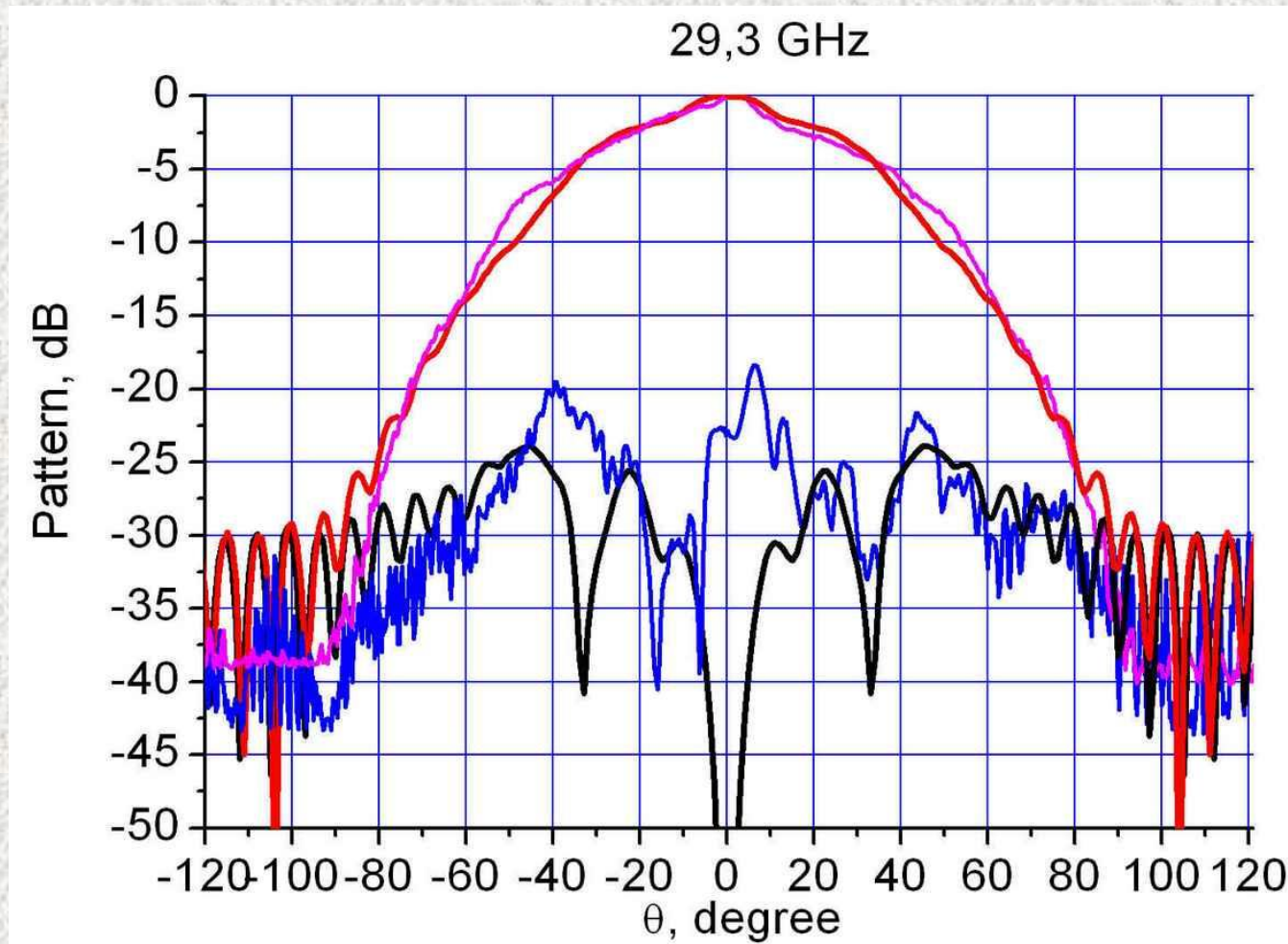
— Theory. Co-Polarized

— Theory. Co-Polarized
(with differential phase
section)

— Measured. Cross-Polarized

— Theory. Cross-Polarized

— Theory. Cross-Polarized
(with differential phase section)



— Measured. Co-Polarized

— Theory. Co-Polarized

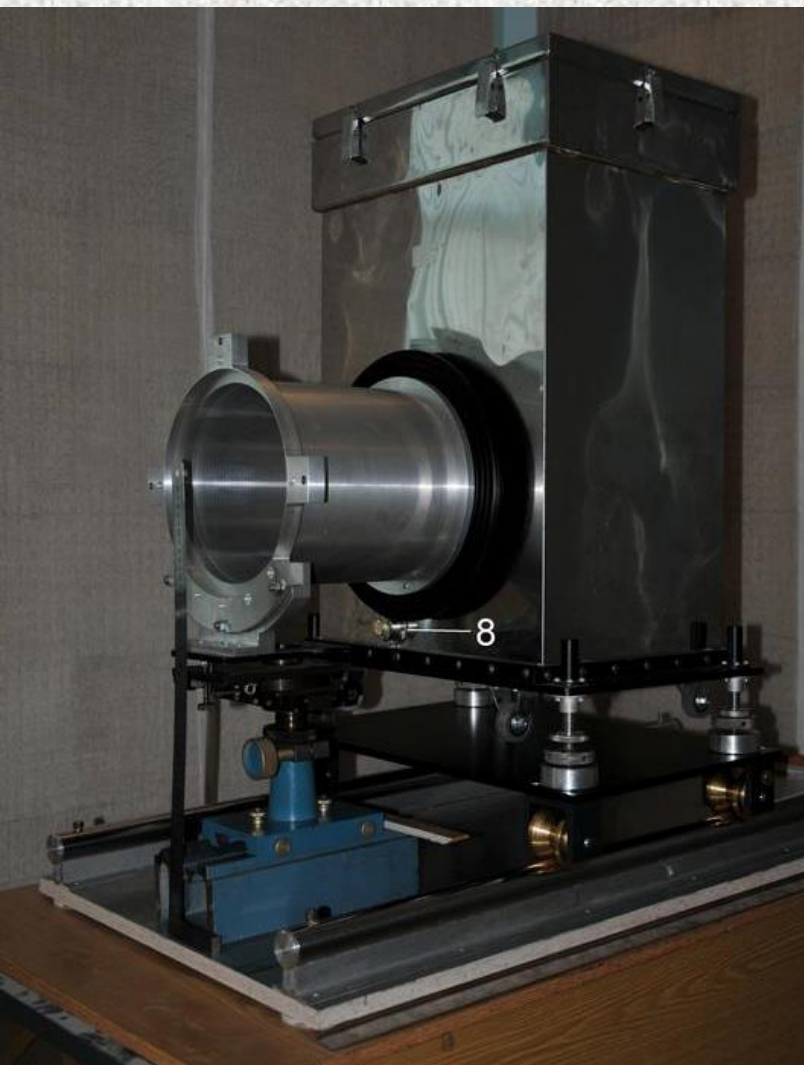
— Measured. Cross-Polarized

— Theory. Cross-Polarized



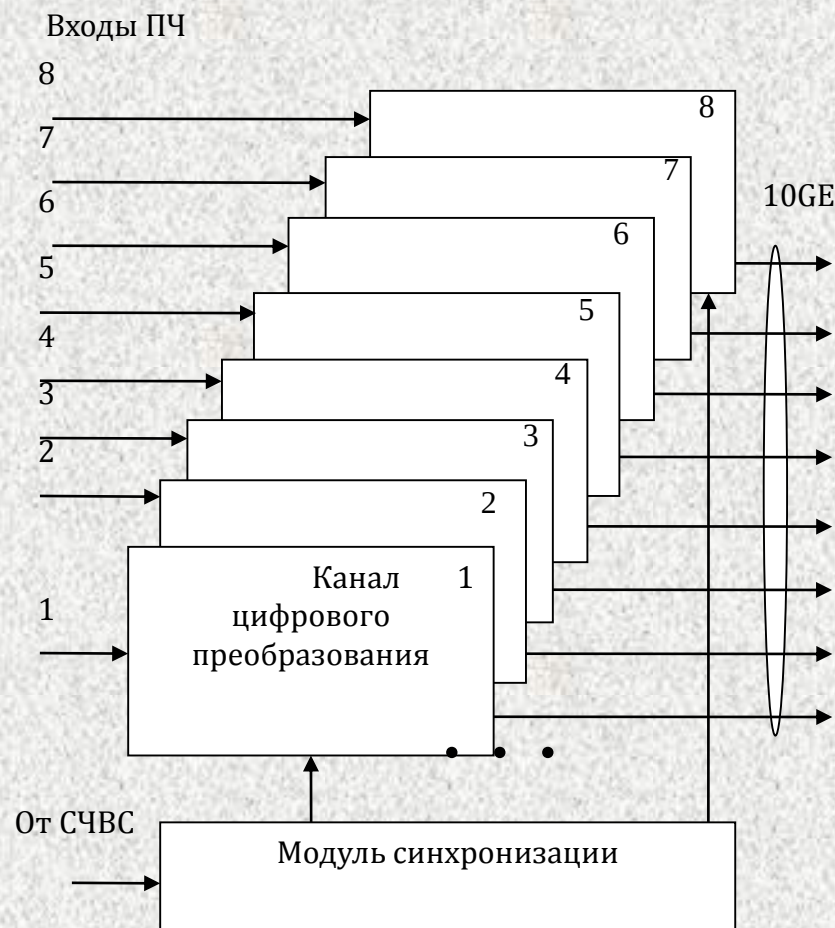
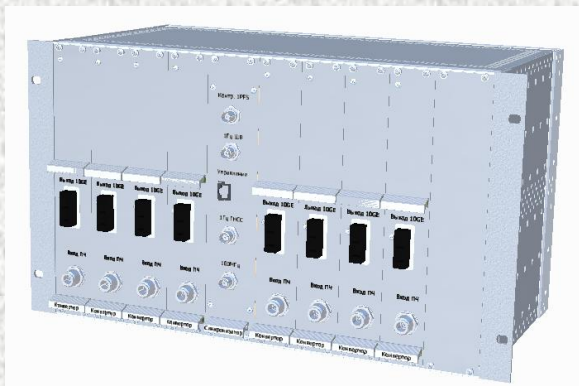
Сборка фокального блока в НПО «Сатурн»

Холодная нагрузка для измерения шумовой температуры



Широкополосная цифровая система преобразования сигналов

- Аналого-цифровое преобразование 8 параллельных сигналов с полосой 512 МГц.
- Измерение мощности в каждом канале.
- 2-битное цифровое квантование.
- Суммарная скорость информационного потока 16 Гбит/с.
- Формирование информационных потоков VDIF.
- Передача информационных потоков через интерфейс 10G Ethernet.



Опытный образец ШСПС



Модуль КЦП

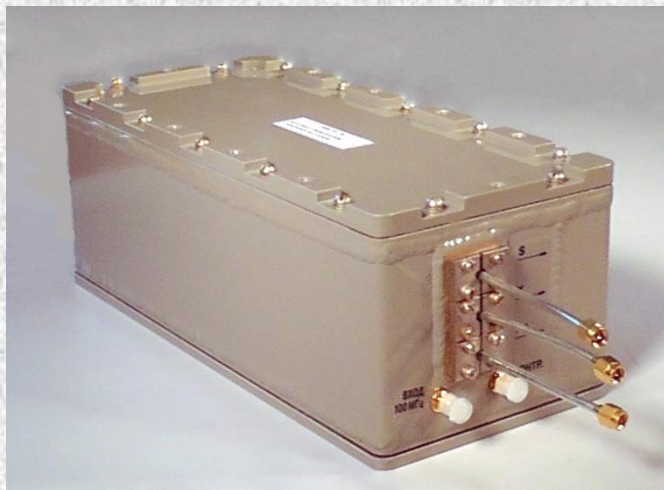


Модуль синхронизации

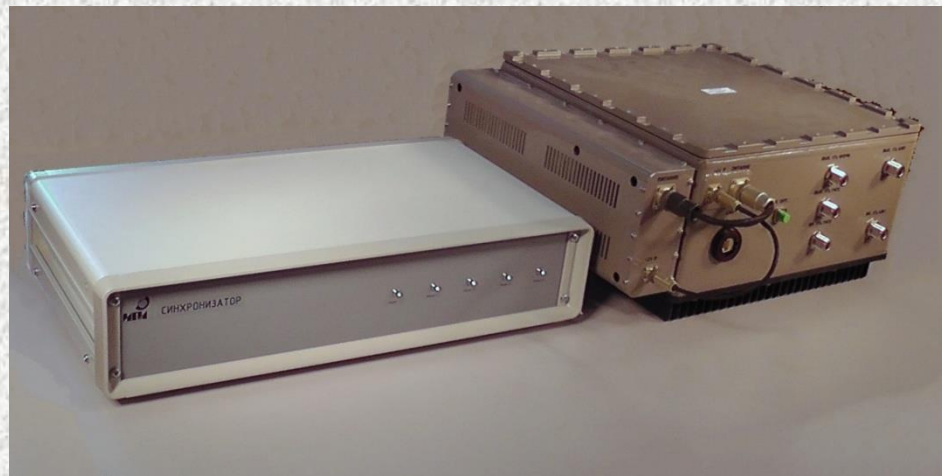
Изготовленные компоненты СЧВС



**Блок формирования
опорных частот**

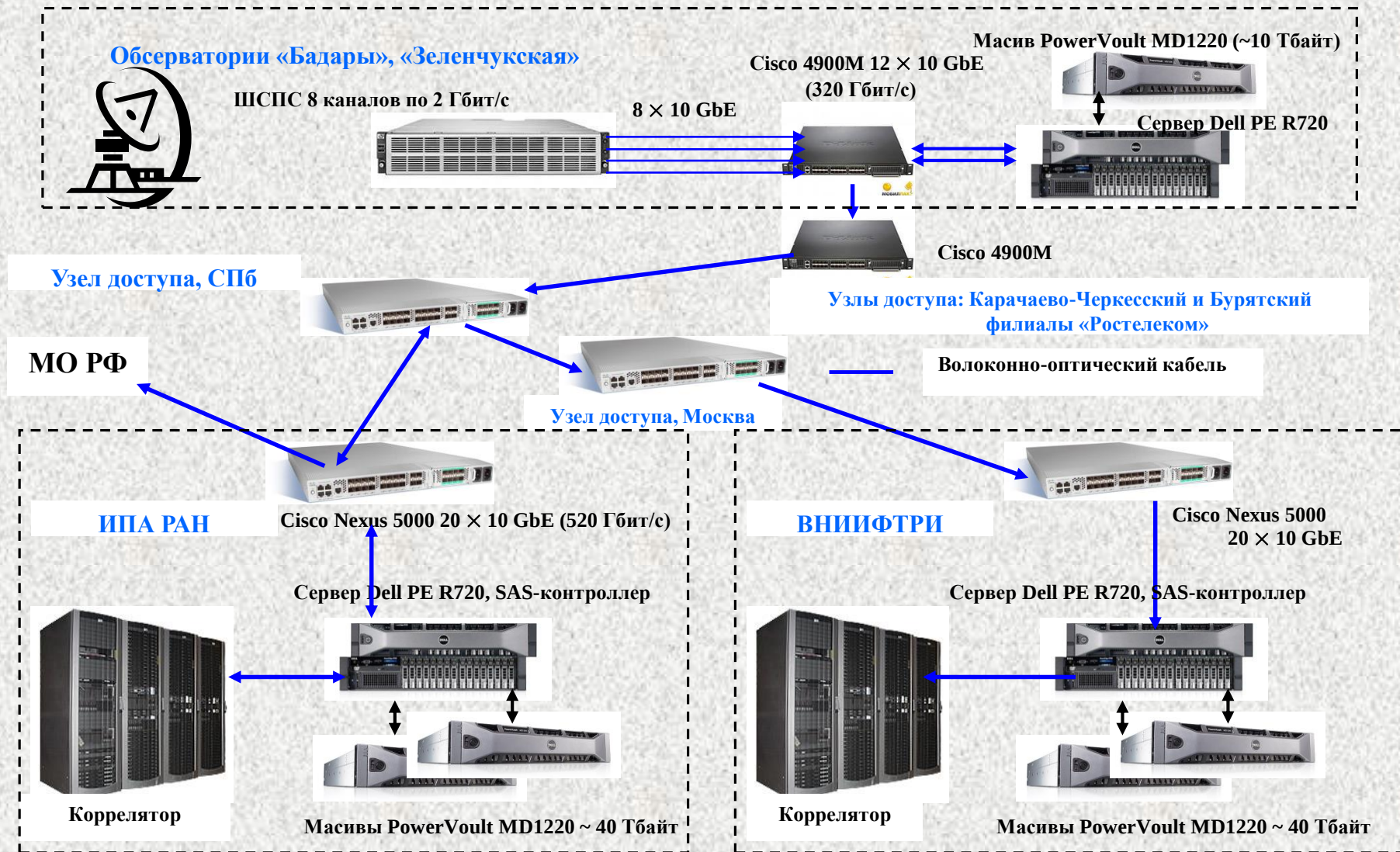


Блок ГПИ



Блок синхронизатора

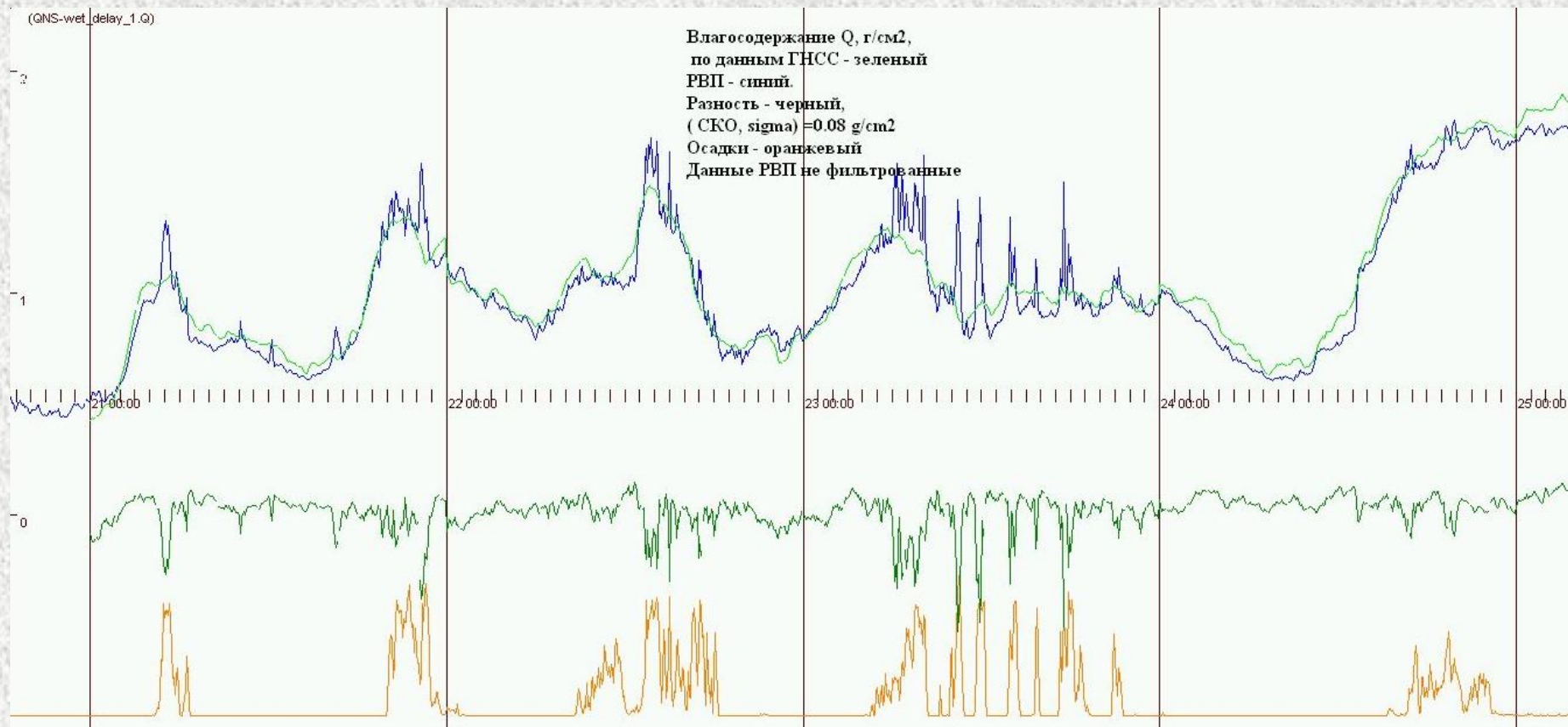
Структурная схема системы буферизации и передачи данных



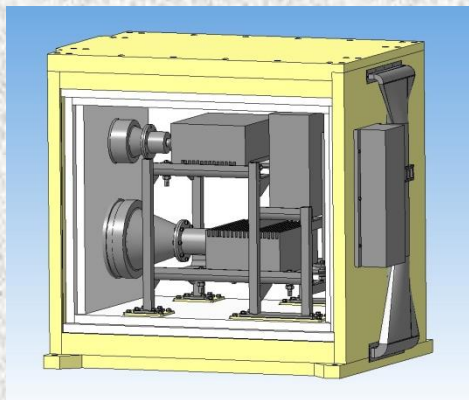
Сервер буферизации данных



Радиометр водяного пара – средство оперативного определения интегрального содержания водяного пара (Q , г/см²) в атмосфере.



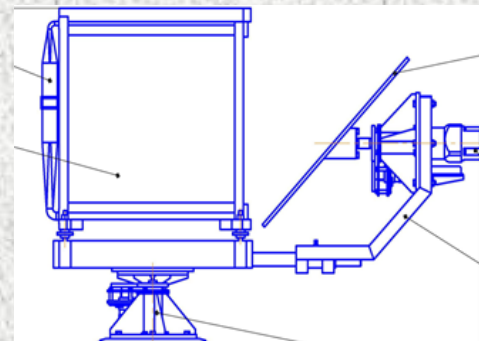
Аппаратный комплекс РВП



Компоновка РВП



Опорно-поворотное устройство



Программный РСДБ-коррелятор на гибридном процессорном кластере

- Входной поток данных 16 Гбит/с от каждой станции:
 - 2-битовое квантование
 - Основные режимы регистрации сигналов:
 - 4 частотных диапазона, 1 поляризация, ширина полосы пропускания 1024 МГц, поток данных 4 Гбит/с
 - 4 частотных диапазона, 2 поляризации, ширина полосы пропускания 512 МГц, поток данных $4=2 \times 2$ Гбит/с
 - 8 частотных диапазонов, ширина полосы пропускания 512 МГц, поток данных 2 Гбит/с
- Одновременно обрабатываемых сигналов станций – до 6
- Вычисление точек кросс-спектров – до 4096
- Выделение тонов ГПИ в каждом частотном канале – до 16
- Точность вычисления групповых задержек – не хуже 10 пс.

Вычислительный комплекс коррелятора



- Количество ЦПУ Intel E5-2670, 8-core, 2.6 GHz – 80
- Количество ГПУ Nvidia Tesla K20 – 80
- Суммарная пиковая производительность кластера – 85,5 Tflops

Спасибо за внимание!



Обсерватория «Бадары»