

Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО»

-фундаментальная базовая система
координатно-временного и
навигационного обеспечения

А. М. Финкельштейн, С.Г. Смоленцев

(Институт прикладной астрономии РАН)

«Радиоинтерферометрический комплекс КВАЗАР-КВО»



Центр корреляционной
обработки
комплекса «Квазар-КВО»



Обсерватория «Светлое»
(введена в эксплуатацию
в 1999 г.)



Обсерватория «Зеленчукская»
(введена в эксплуатацию в 2001 г.)



Обсерватория «Бадары»
(введена в эксплуатацию в 2005 г.)

Основные задачи астрометрии и космической геодезии

- 1. Установление небесной системы координат и реализация ее в виде каталога координат источников в разных диапазонах длин волн;**
- 2. Установление связи между различными небесными системами координат и, прежде всего, между радиоастрономической и оптической системами;**
- 3. Установление земной системы координат и реализация ее в виде каталога координат опорных станций;**
- 4. Определение глобальных и локальных трехмерных движений точек земной коры;**
- 5. Определение параметров взаимной ориентации небесной и земной систем координат – параметров вращения Земли;**
- 6. Установление динамической системы координат и ее реализация в виде теории движения тел Солнечной системы;**
- 7. Уточнение параметров Солнечной системы – фундаментальных астрономических постоянных;**
- 8. Установление динамической системы координат и ее реализация в виде теории движения искусственных спутников Земли и, прежде всего, навигационных спутников;**
- 9. Установление параметров гравитационного поля Земли и тел Солнечной системы;**
- 10. Установление параметров фигуры Земли и тел Солнечной системы;**
- 11. Создание и поддержание высокоточной глобальной шкалы атомного времени и эталонных частот.**

**Эти задачи охватывают следующие области фундаментальных наук:
астрометрия, геодинамика, эфемеридная и динамическая астрономия,
геофизика, геодезия, глобальная тектоника, метрология.**

Современные требования к точности решения задач астрометрии и космической геодезии:

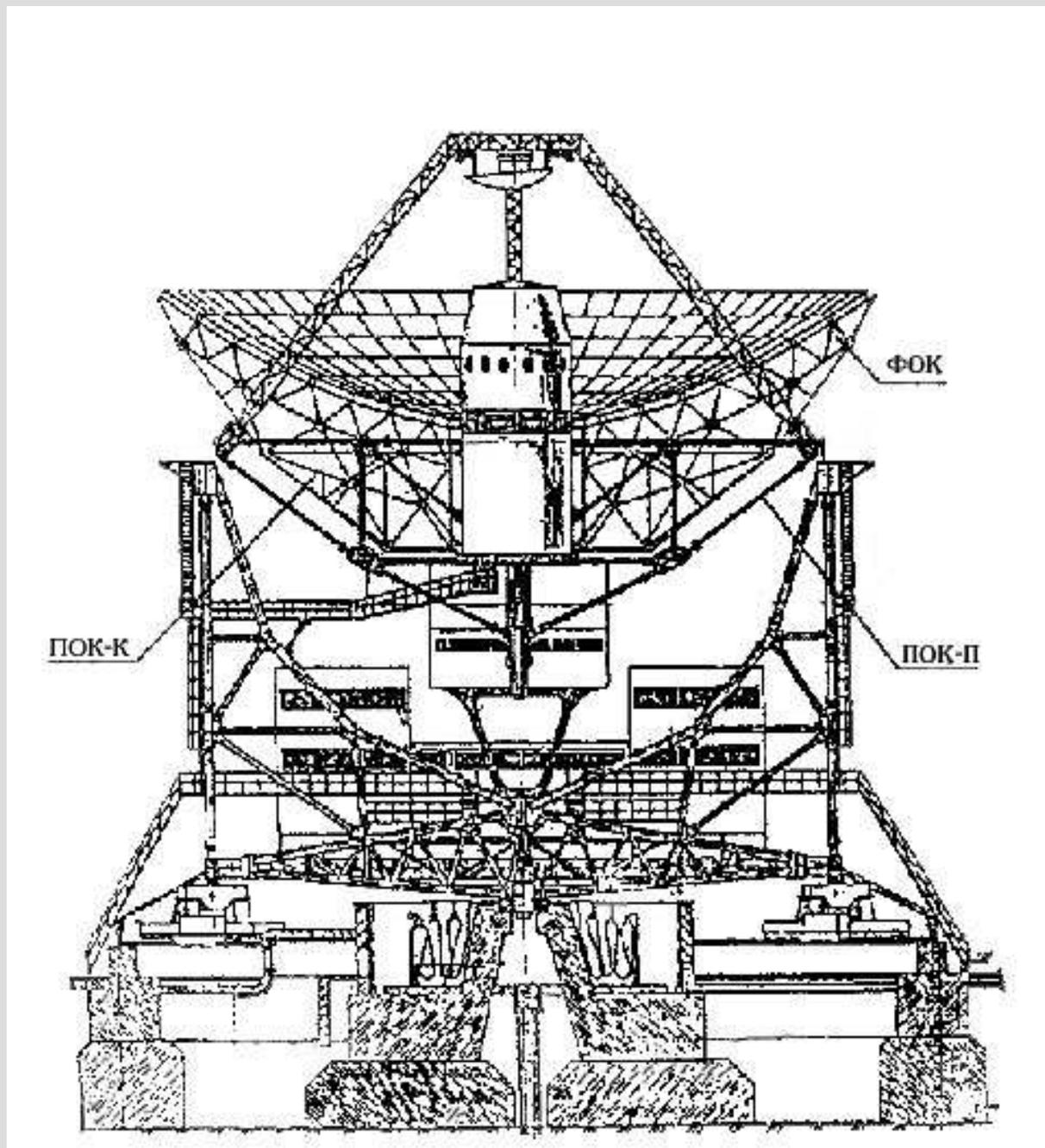
- ✓ лучше, чем $50 \text{ } \mu\text{arcs}$ — для координат астрономических объектов;
- ✓ лучше, чем 3 mm — для трехмерных земных координат;
- ✓ лучше, чем 3 mm — для координат полюса и $10 \text{ } \mu\text{s}$ для Всемирного времени;
- ✓ лучше, чем 3 mm/year — для тектонических движений точек земной коры;
- ✓ лучше, чем $0.5 \text{ } \mu\text{arcs}$ — для связи между радио- и оптической системами отсчета;
- ✓ лучше, чем $10 \text{ } \mu\text{arcs}$ — для определения параметров Солнечной системы — фундаментальных астрономических постоянных;
- ✓ лучше, чем 10 ps — для атомной шкалы времени.

**Точности ниже указанных
не представляют значительного
научного интереса**



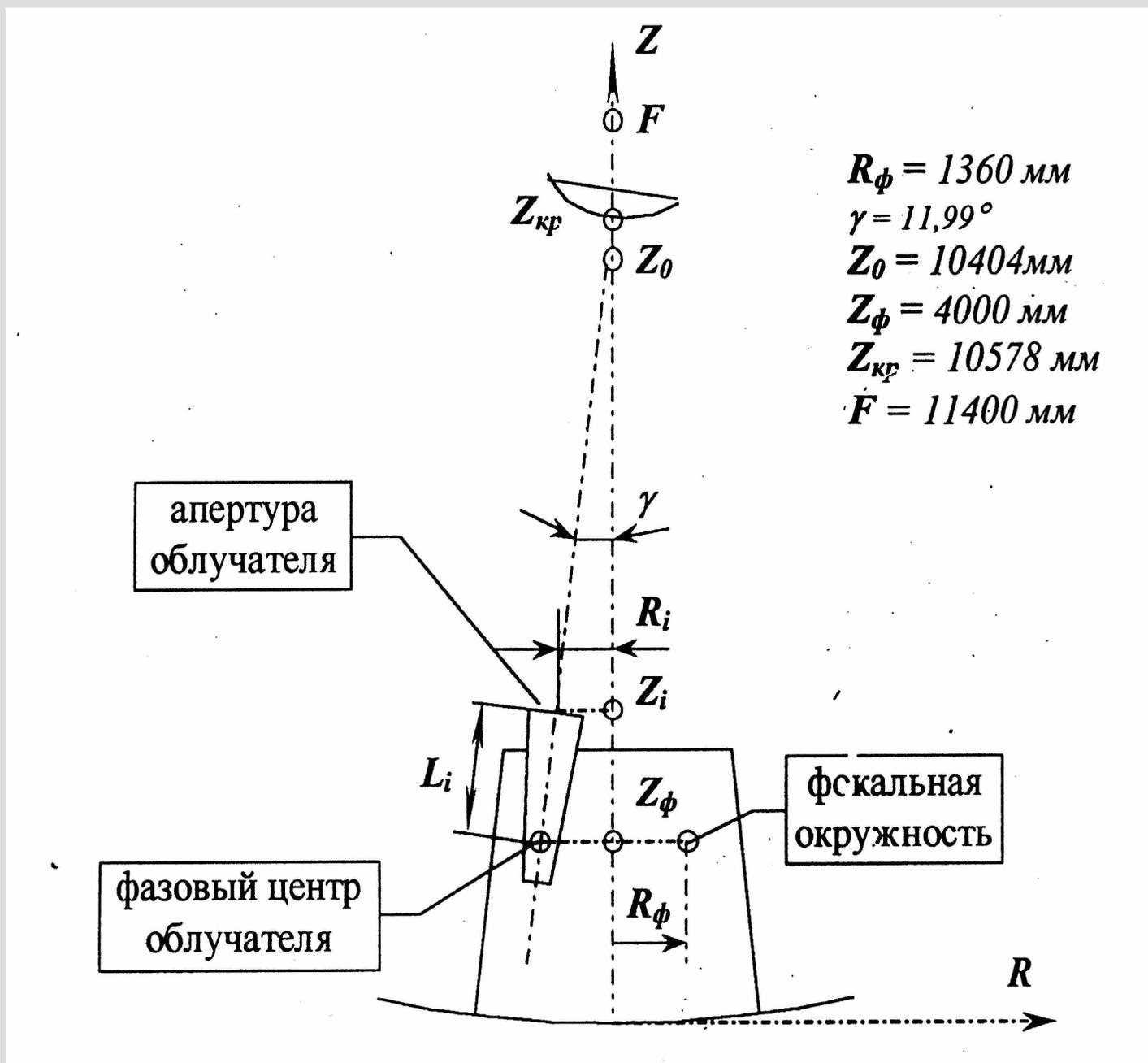
Обсерватория «Бадары»

Схема антенной системы

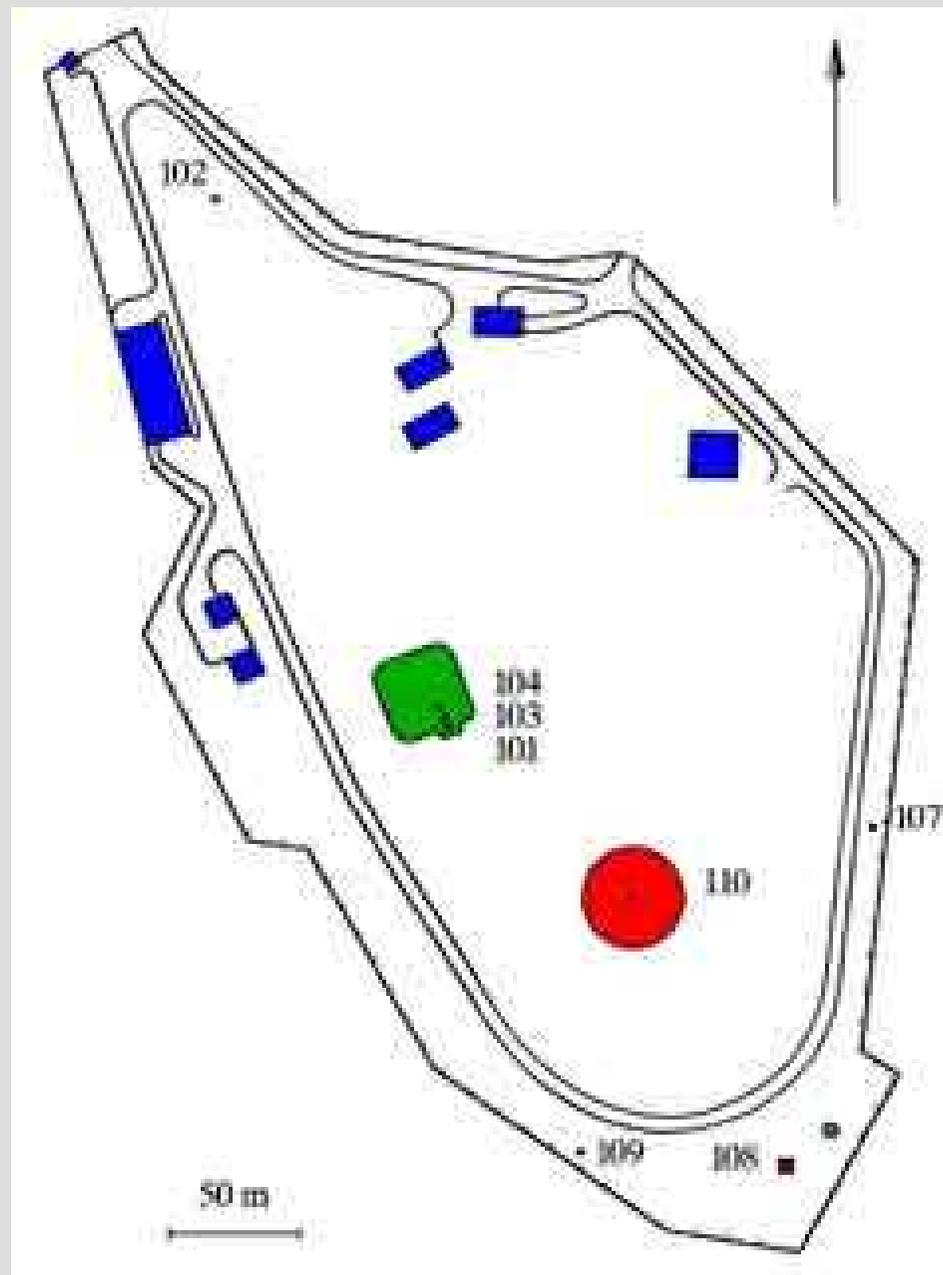


Теоретический чертеж зеркальной и облучающей системы радиотелескопа.

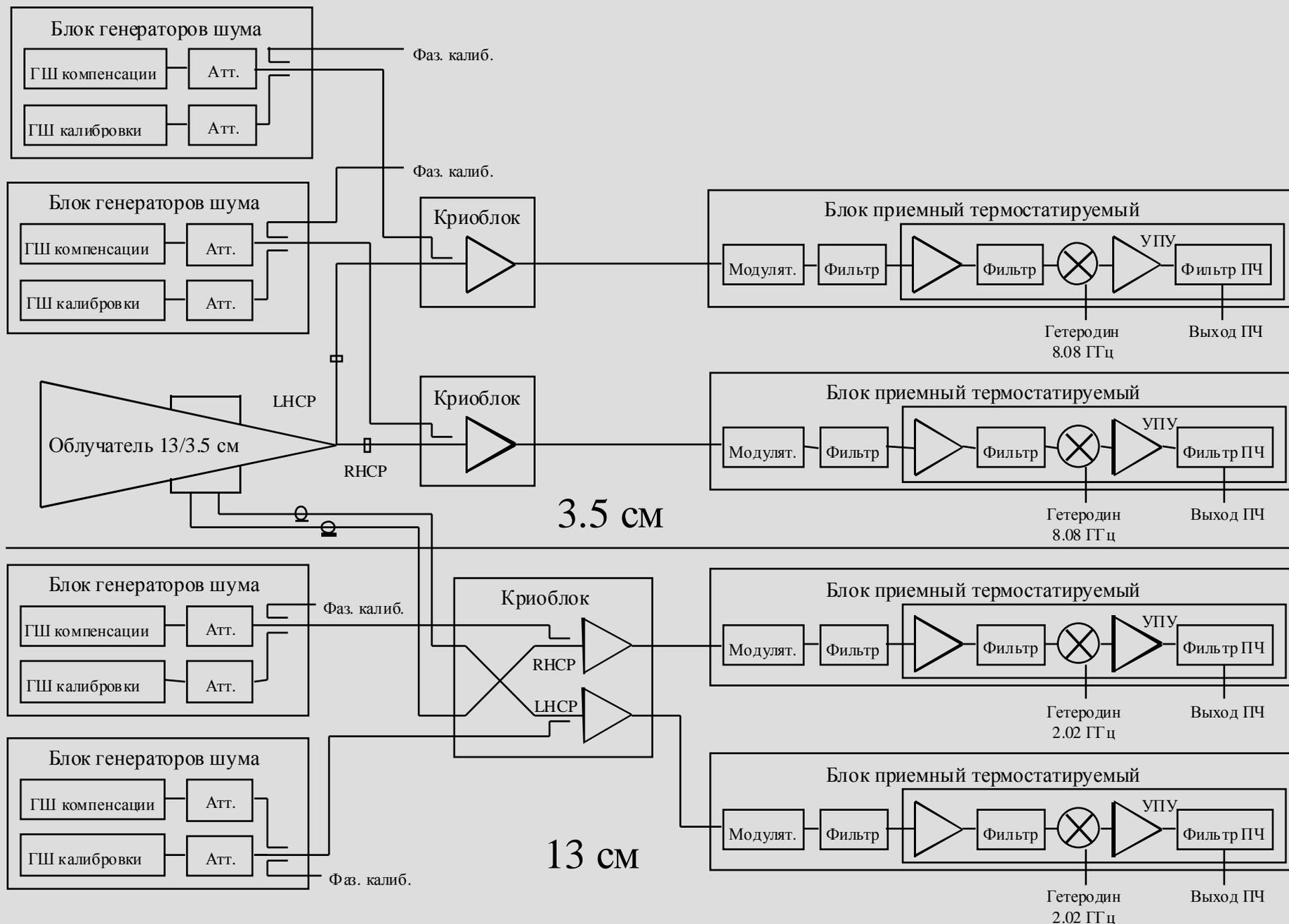
F — фокусное расстояние параболического рефлектора,
 Z_0 — точка пересечения осей рупоров и зеркальной системы



Локальная геодезическая сеть «Светлое»



Функциональная схема СВЧ-трактов приемников диапазонов 13 и 3,5 см для сети КВАЗАР.



Высокочувствительный приемный СВЧ комплекс



Приемники на волны 2.6 см, 6.2 см и 1.35 см

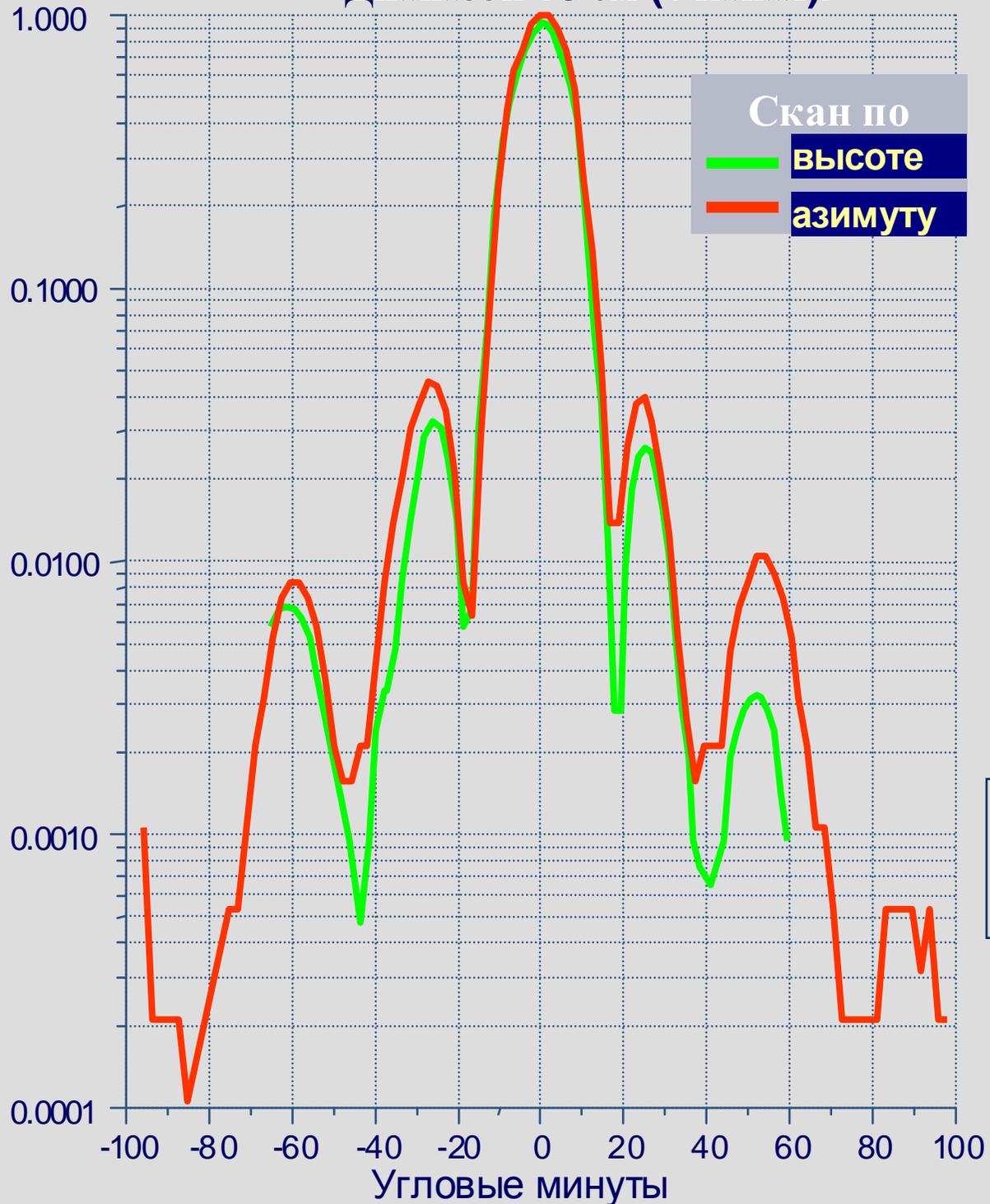


Приемники на волны 3.5 см и 13 см

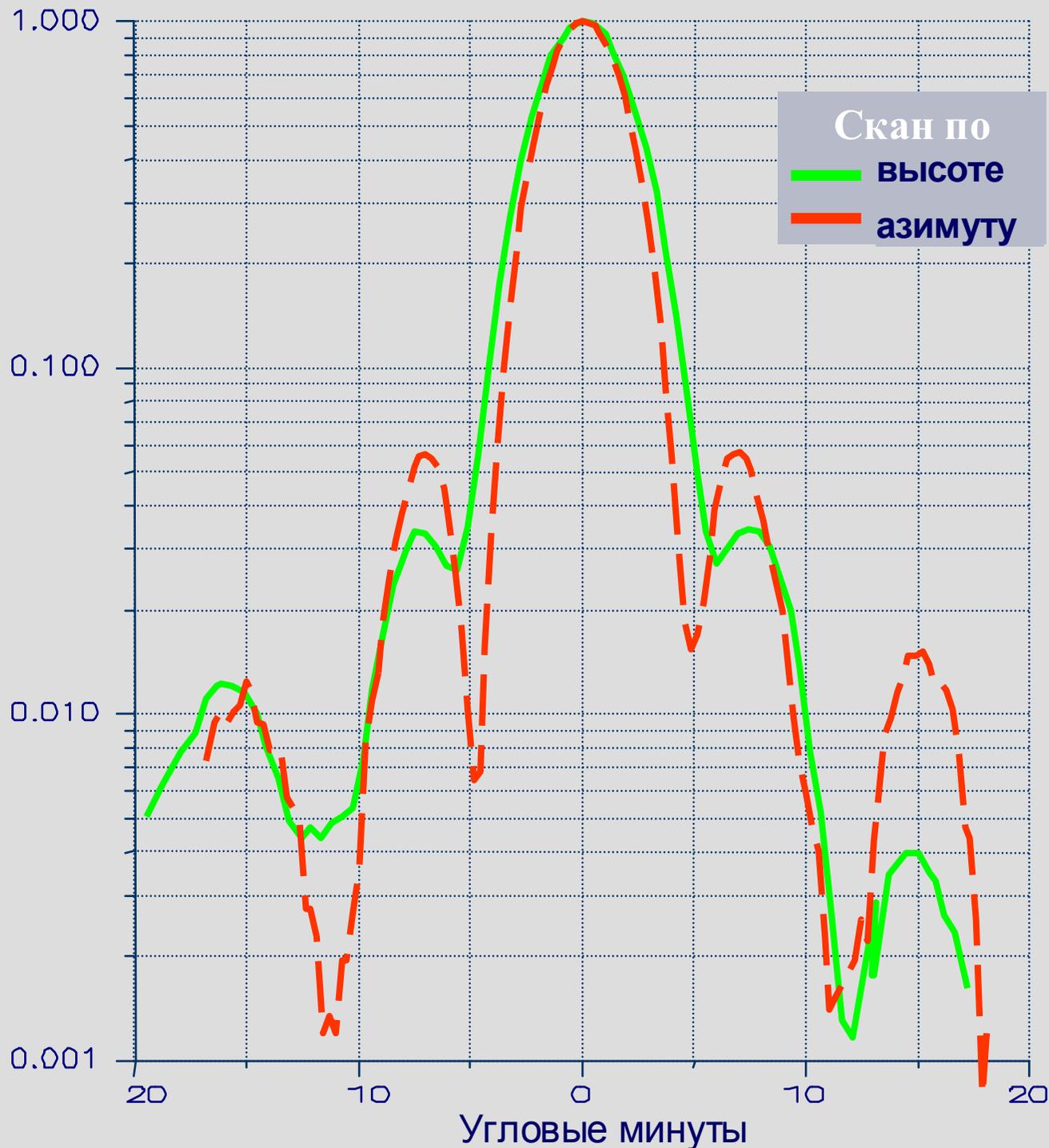


Приемник на волны 18 - 21 см

Сканирование радиисточника Cygnus A ($h=50^\circ$) диаграммой направленности антенны.
Диапазон 13 см (1 канал).

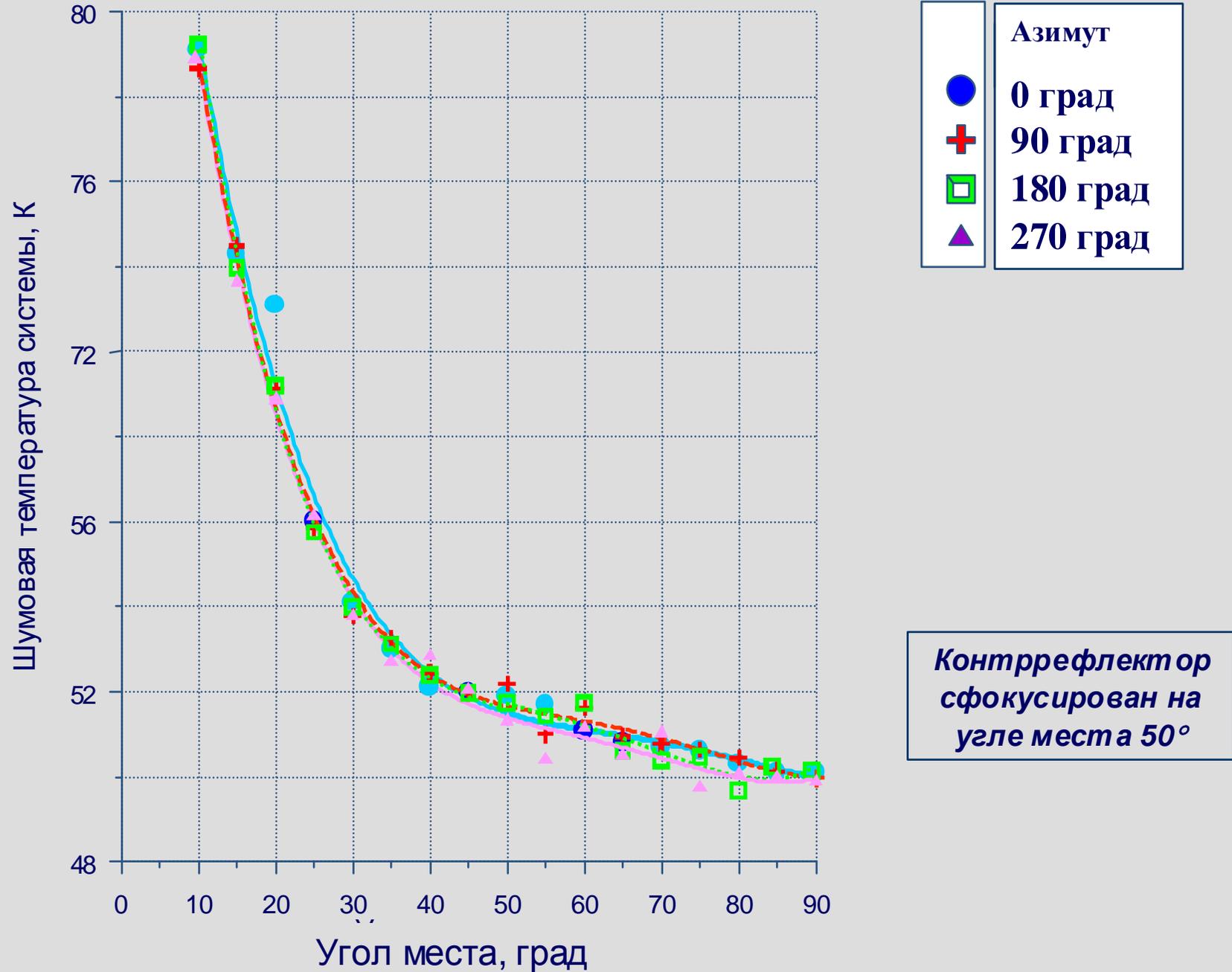


**Сканирование радиисточника Cygnus A ($h=70^\circ$) диаграммой направленности антенны.
Диапазон 3.5 см (1 канал).**

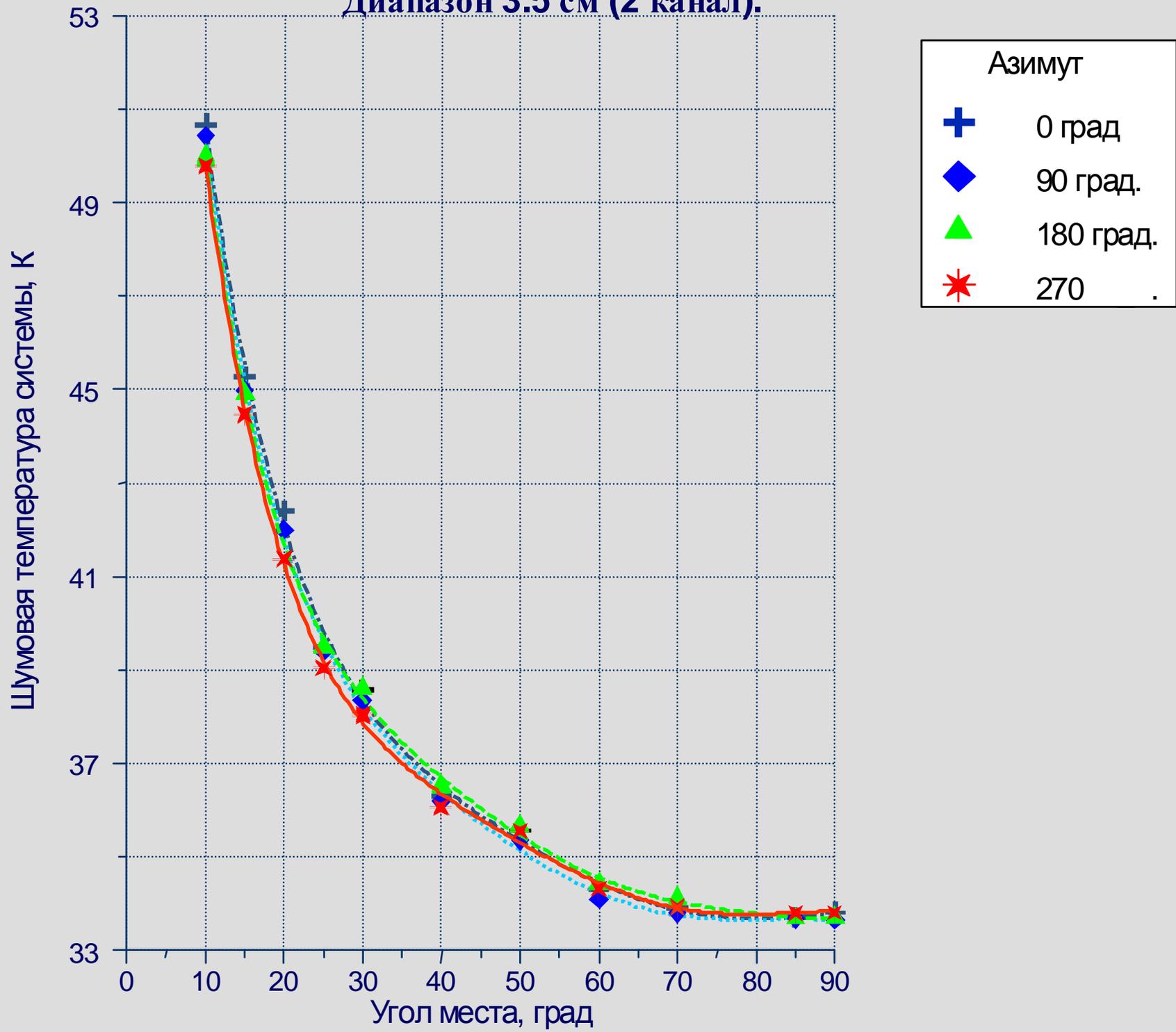


*Контррефлектор
сфокусирован на
угле места 70°*

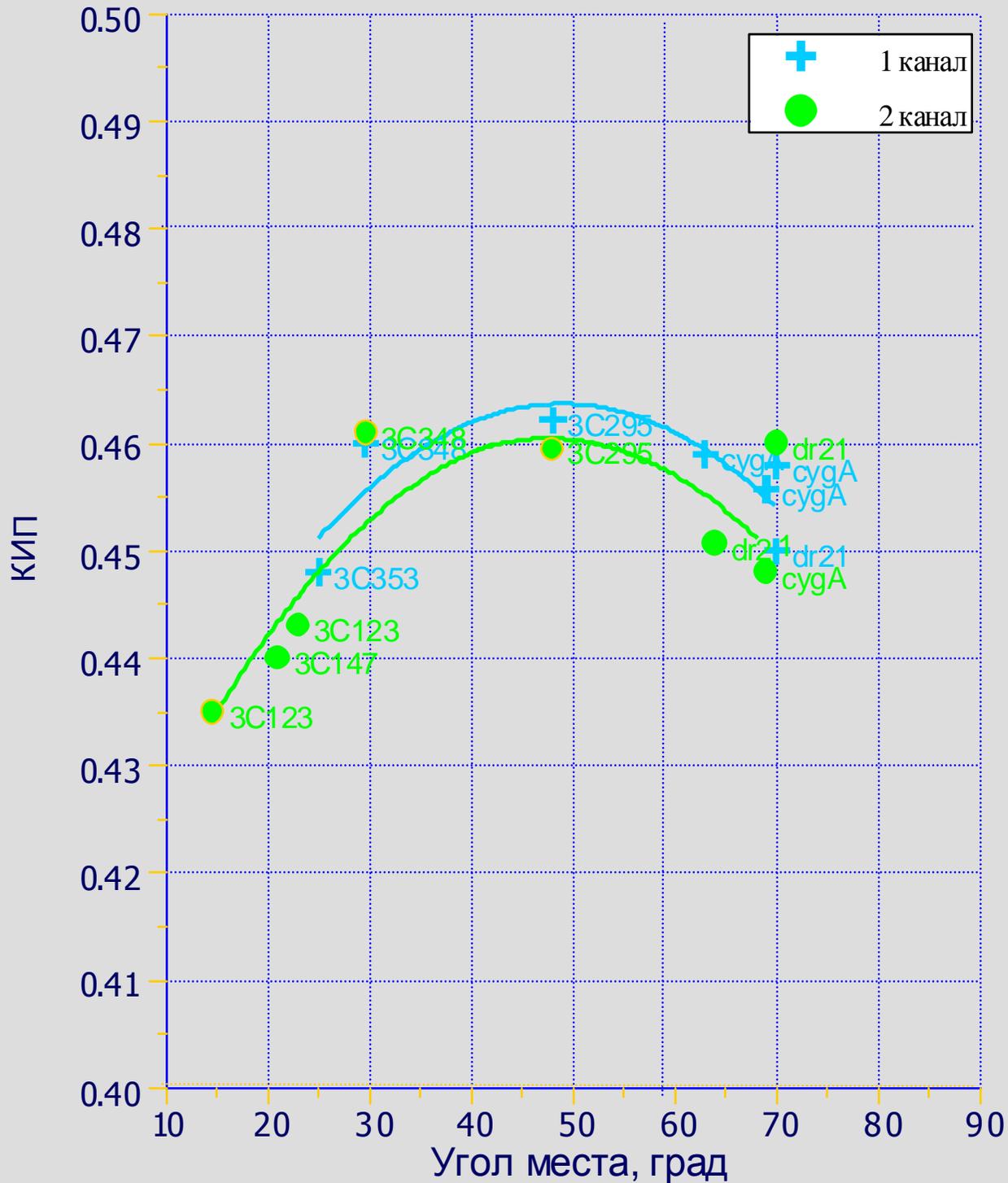
Зависимость шумовой температуры системы от угла места радиотелескопа. Диапазон 13 см (1 канал).



Зависимость шумовой температуры системы от угла места радиотелескопа. Диапазон 3.5 см (2 канал).



Зависимость КИП от угла места. Диапазон 13 см

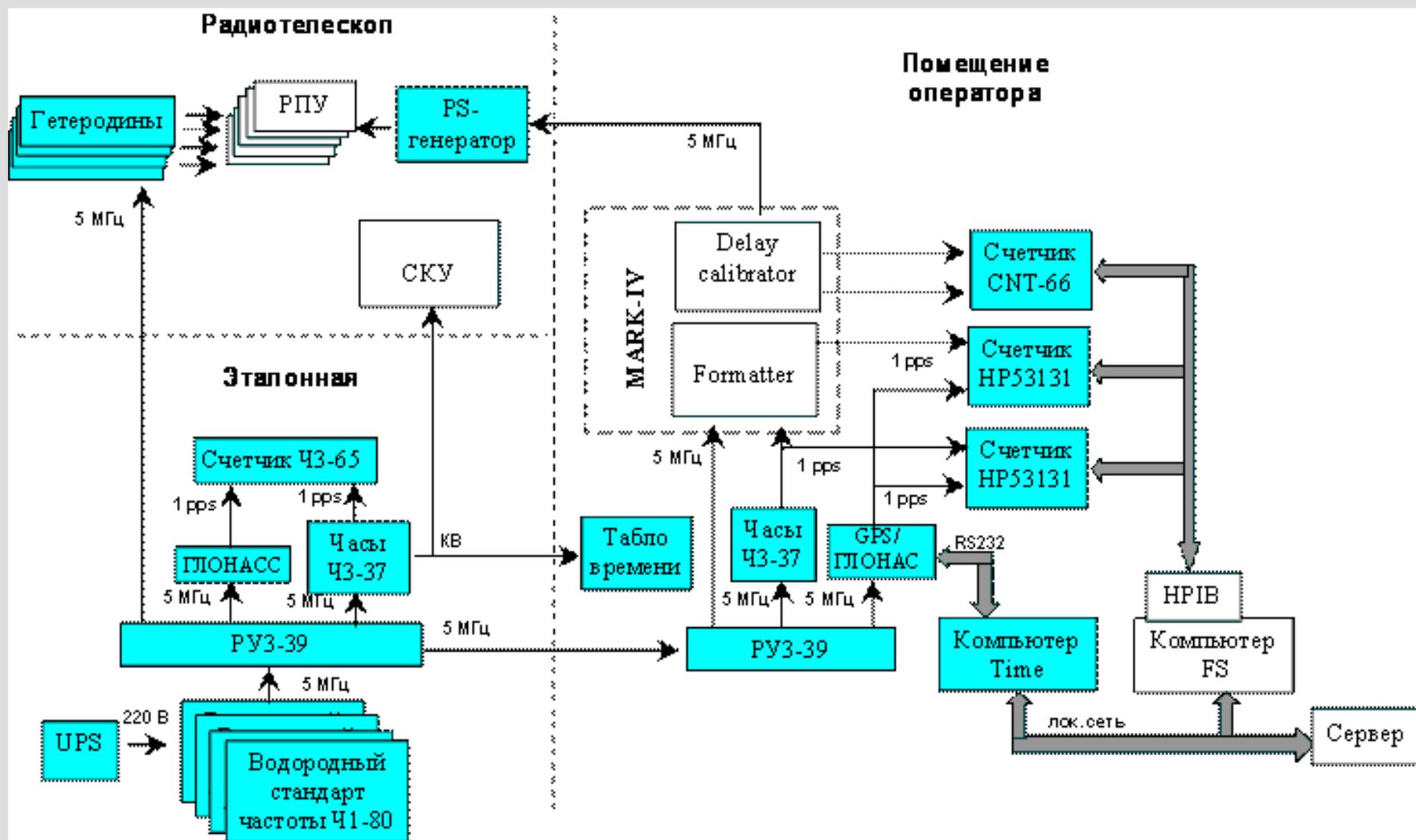


*Контррефлектор
сфокусирован на
угле места 50°*

**Параметры приемной системы радиотелескопов
комплекса КВАЗАР
данные на сентябрь 2005 г.**

диапазон	полоса частот, ГГц	$T_{пр}$, К	$T_{сис}$, К	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

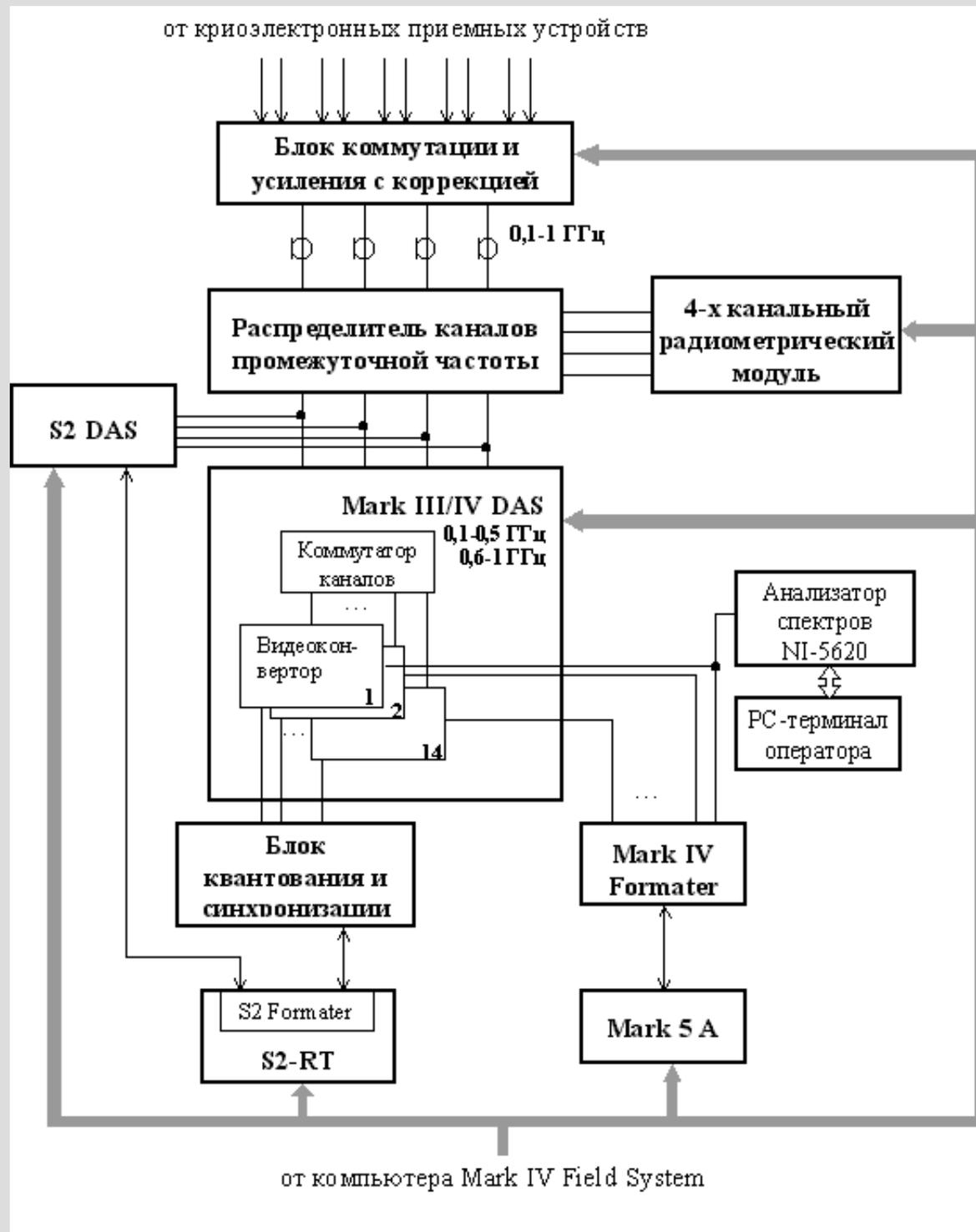
Система частотно-временной синхронизации



Система атомного времени радиоинтерферометрической системы Квазар-КВО



1 — 4 водородных стандарта: нестабильность — $\sigma_{1c} = 1 \times 10^{-13}$ и $\sigma_{1000c} = 3 \times 10^{-15}$, точность — 1 сек. за 10 миллионов лет;
2 — стойка формирования временной шкалы;
3 — аппаратура обработки сигналов эталона времени и частоты.



Система регистрации интерферометрической информации

Общий вид стоек с аппаратурой преобразования и регистрации сигналов в обсерватории «Светлое»:

- 1 – записывающая аппаратура MarkVA,
- 2 – записывающая аппаратура MarkIII,
- 3 – стойка DAS Mark IV,
- 4 – стойка S2 (S2-RT и S2 DAS),
- 5 – четырехканальный модуль ПРМ-2.



Пультовая обсерватории «Светлое»



Система сбора метеоданных

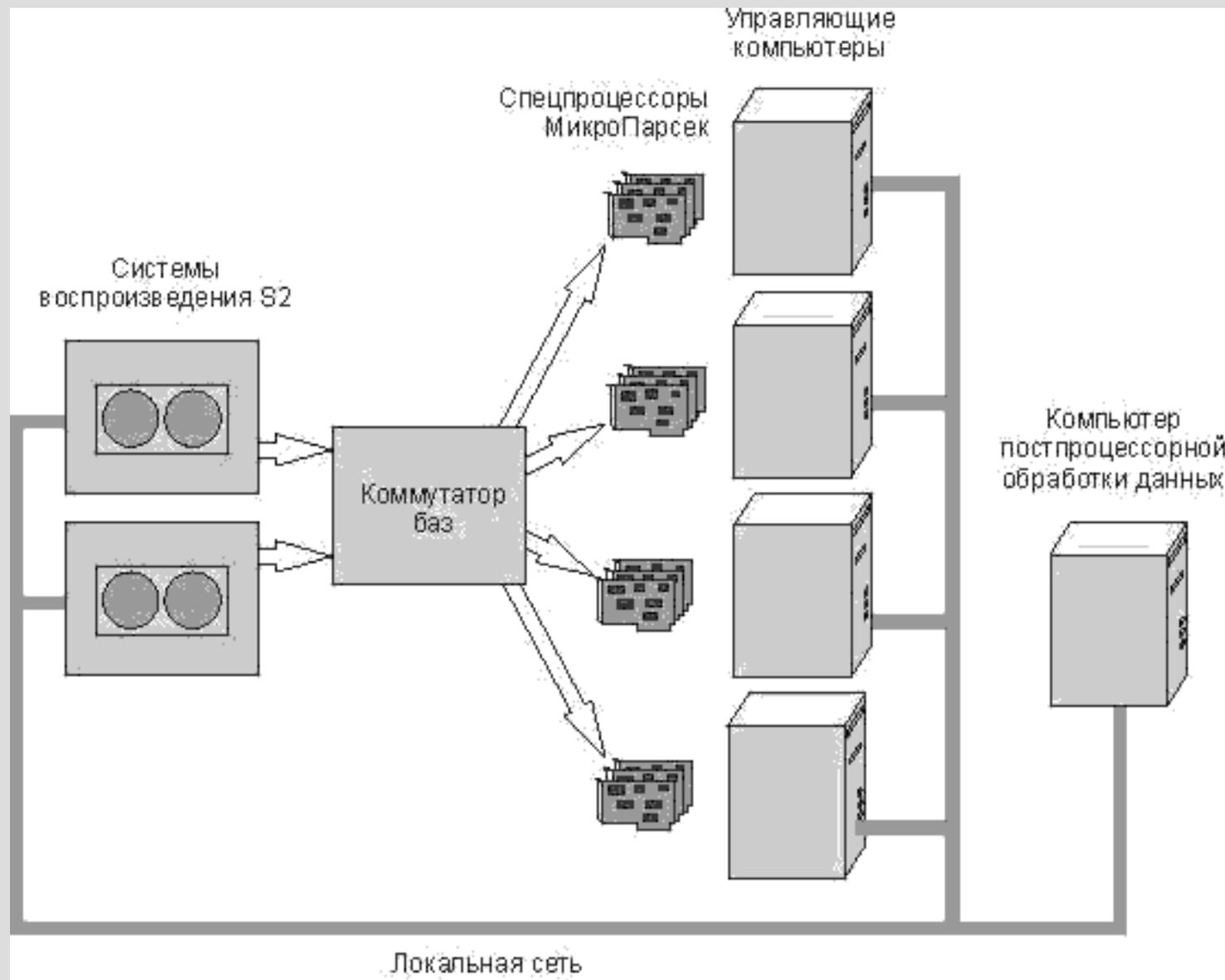


Коррелятор Mark-III с модулями S2 радиоинтерферометрической сети «Квазар-КВО»

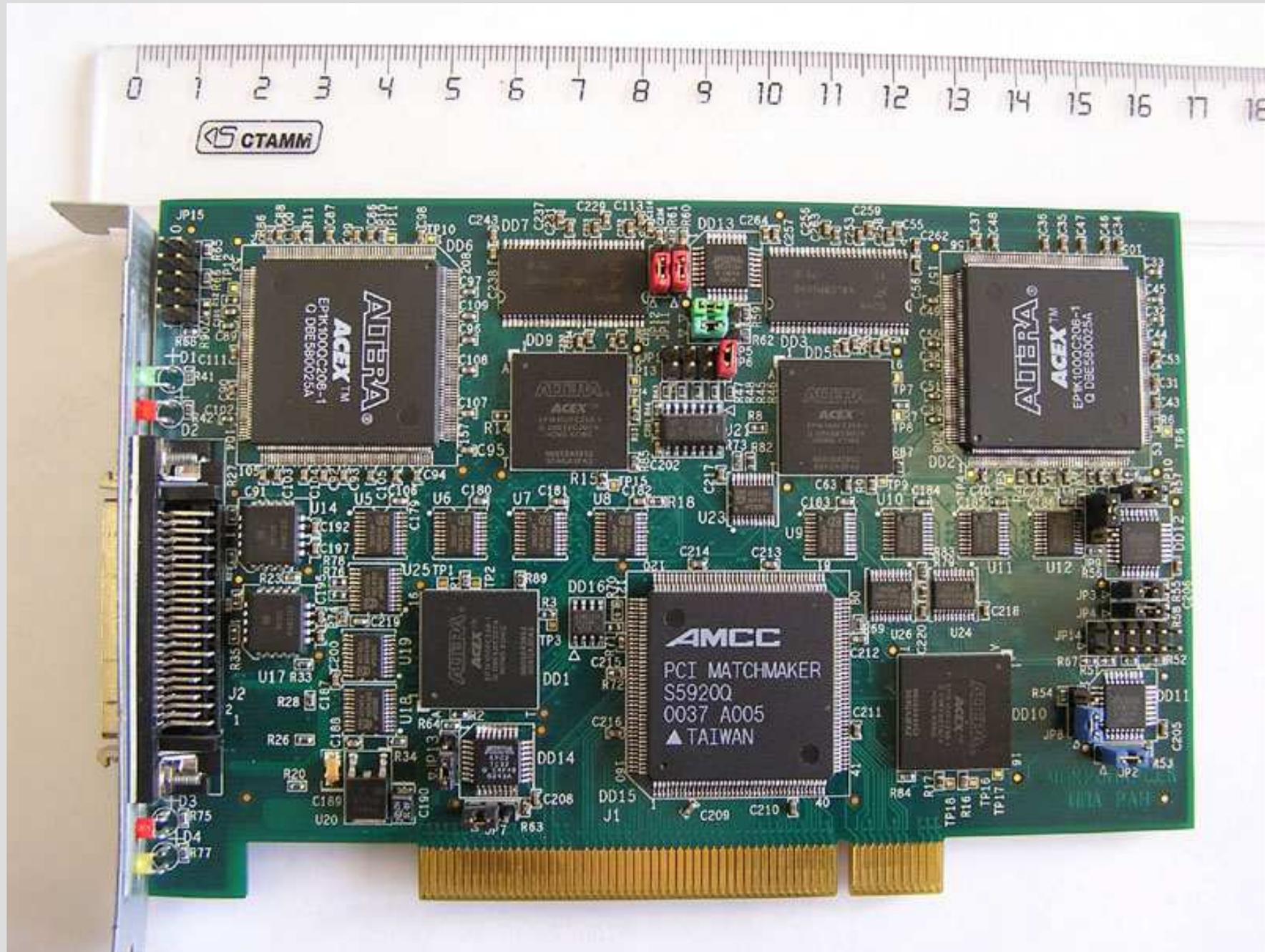


112 Мбит/сек для каждой базы

МикроПарсек



МикроПарсек



Международные и национальные наблюдательные программы

Глобальные программы

IVS-R1, IVS-R4	Определение всех ПВЗ с задержкой 10-15 дней, продолжение NEOS и CORE (с 1993 г.)
IVS-INT1, IVS-INT-2	Определение всемирного времени с задержкой 5-7 дней (с 1984 г.)
IVS-E3	Определение ПВЗ с регистрацией на S2 (с 2002 г.)
IVS-T2	Земная система координат, геодинамика (с 2002 г.)
VLBA	Картографирование радиоисточников совместно с VLBA (с 2006 г.)

Региональные геодинимические программы

APSG	Азиатско-тихоокеанский регион (с 1997 г.)
EUROPE	Европейский регион (с 1990 г.)

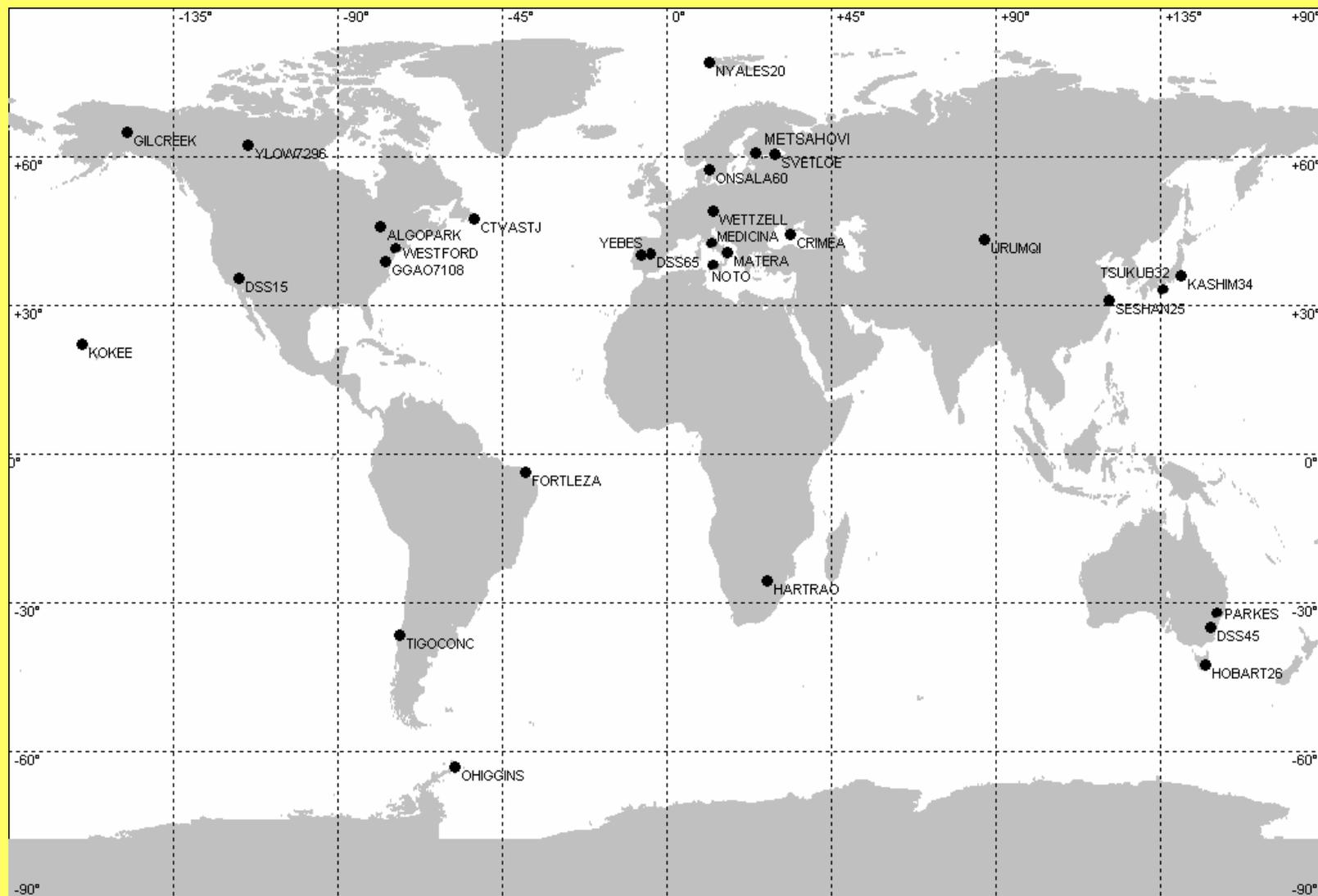
Специальные программы

IVS-CRF	Небесная система координат (с 1995 г.)
RDV	IVS+VLBA, земная система координат, координаты и структура источников (с 1994 г.)
IVS-R&D	Отработка технологии планирования и проведения наблюдений (с 1988 г.)
CONT	Короткопериодические вариации ПВЗ, длин баз, тропосферы и др. (с 1989 г.)

Национальные программы

RU-EOP	Определение параметров вращения Земли на базах «Светлое»- «Зеленчукская»- «Бадары» (с 2006 г.)
RU-UT1	Определение всемирного времени на базе «Бадары» -«Зеленчукская» (с 2006 г.)
RU-TS	Исследование параметров расхождений шкал времени водородных стандартов (с 2005 г.)

Станции глобальной РСДБ-сети, работающие по международным научным программам с обсерваторией «Светлое»



Определение координат станций и длин баз из РСДБ-наблюдений

Координаты обсерватории «Светлое»
определены из наблюдений по программам IVS за 2003-2004 гг.
(60 сессий, 100 тыс. наблюдений)

с точностью 1 мм.

Скорость обсерватории определена с точностью 1.6 мм/год
(за полтора года).

Геоцентрические координаты и скорость обсерватории «Светлое»
в системе ITRF2000, определенные из наблюдений
по программам IVS за 2003-2004 гг.

Координаты на эпоху 2004.115, м			Скорость, мм/год		
X	Y	Z	Vx	Vy	Vz
2730173.838	1562442.679	5529969.074	-13.9	+16.9	+12.4
±1	±1	±1	±1.4	±1.0	±2.4

Длины баз между РСДБ-станцией «Светлое» и другими станциями глобальной РСДБ-сети и скорости их изменения

Станция	N_{sess}	Длина базы, м (эпоха 2004.0)	Скорость изменения, м/год
ALGOPARK	42	6255567.6500 ± 0.0011	0.0257 ± 0.0020
CRIMEA	3	1810877.6164 ± 0.0027	
CTVASTJ	5	5061441.0554 ± 0.0051	
DSS15	1	8232230.1024 ± 0.0007	
DSS45	1	11734020.5441 ± 0.0020	
DSS65	5	3192391.5774 ± 0.0020	
FORTLEZA	42	8428008.6909 ± 0.0024	0.0389 ± 0.0048
GGAO7108	5	6767247.4382 ± 0.0264	
GILCREEK	33	5853689.1447 ± 0.0015	0.0221 ± 0.0030
HARTRAO	2	8697010.3291 ± 0.0020	
HOBART26	1	11933358.5200 ± 0.0017	
KASHIM34	3	7173755.4721 ± 0.0066	
KOKEE	36	9561115.3870 ± 0.0026	-0.0273 ± 0.0042
MATERA	12	2373640.0996 ± 0.0055	0.0019 ± 0.0090
MEDICINA	9	2139526.9581 ± 0.0013	
NOTO	5	2808545.4659 ± 0.0007	
NYALES20	35	2133122.9975 ± 0.0010	0.0016 ± 0.0018
ONSALA60	15	1079812.9405 ± 0.0005	0.0006 ± 0.0010
PARKES	1	11633925.3134 ± 0.0043	
SESHAN25	2	6760938.2696 ± 0.0038	
TIGOCONC	9	11412934.1021 ± 0.0099	
TSUKUB32	3	7140832.1550 ± 0.0025	
URUMQI	7	4127151.1158 ± 0.0046	
WESTFORD	4	6269171.1024 ± 0.0008	
WETTZELL	45	1654774.8539 ± 0.0005	-0.0005 ± 0.0011
YEBES	2	3129769.6007 ± 0.0007	
YLOW7296	8	5807450.7627 ± 0.0005	

Программное обеспечение ИПА РАН для решения задач КВО

Пакет	Методы обработки	Типы данных	Определяемые параметры
ERA	МНК, ФК	РСДБ, SLR, DORIS, РЛ и др.	ЗСК, НСК, ПВЗ, ДСК и др.
GRAPE	МНК, СКИФ	GPS, SLR	ПВЗ, ДСК, ШВ
GROSS	МНК	SLR	ЗСК, ПВЗ
OCCAM-R	ФК, СКК	РСДБ	ЗСК, НСК, ПВЗ и др.
QUASAR	МНК, СКК, ФК	РСДБ	ЗСК, НСК, ПВЗ и др.

Планы по синхронизации шкал времени

- Калибровки и исследования инструментальных задержек радиотелескопов
- Сравнение полученных результатов с технологией на базе GPS/ГЛОНАСС и возимых часов
- Исследование возможностей калибровки разности аппаратурных задержек станций методом нулевой базы

Модернизация комплекса «Квазар-КВО»

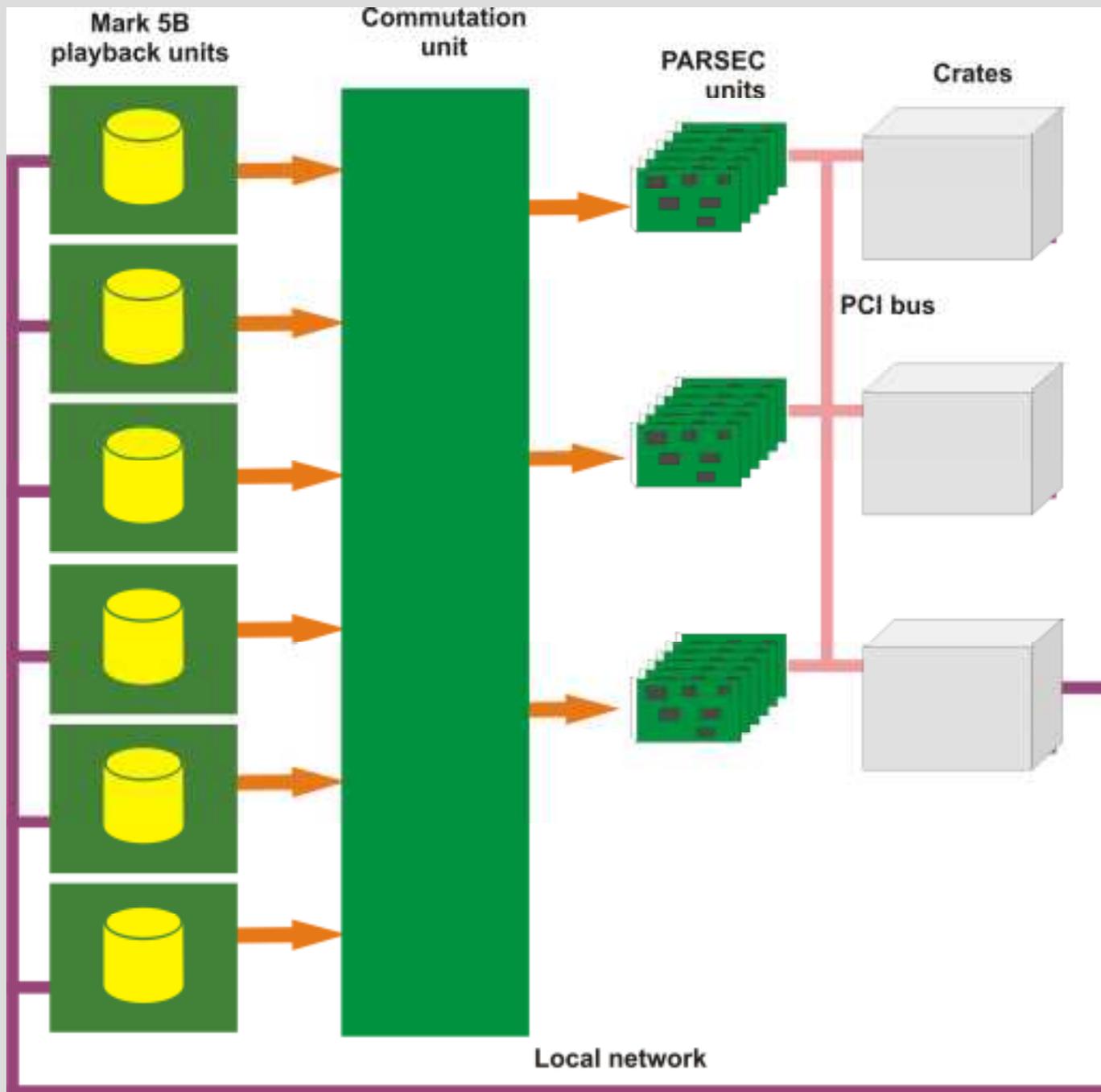
2007-2011 г.г.

- **Переход на волны 3,5/1,35 см**
- **Замена стандартов частоты**
- **Коррелятор на 6 станций «Парсек»**
- **Оснащение E-VLBI**
- **Повышение надежности телескопов**

Схема подключения обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» к глобальной телекоммуникационной среде



Блок-схема коррелятора Парсек

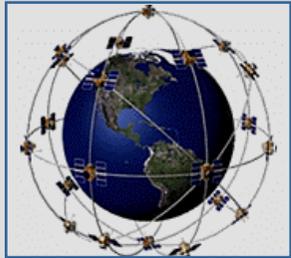


Перспективная РСДБ-сеть в 2011 году



Фундаментальный сегмент Единой системы КВиНО

Фундаментальный сегмент представляет собой совокупность действующих и создаваемых средств:



- постоянно-действующая радиоинтерферометрическая сеть;
- средства космической геодезии – космические аппараты, сеть опорных станций ГЛОНАСС/GPS, станции лазерной локации и радиотехнических наблюдений геодезических ИСЗ, станции DORIS;
- эталонные средства единой системы времени;
- геодезические сети – ФАГС, ВГС, СГС;
- средства мониторинга параметров атмосферы и ионосферы;
- средства, используемые или создаваемые в рамках международной кооперации – средства лазерной локации Луны, радиолокации планет, радарных и доплеровских наблюдений космических аппаратов, космической астрометрии;
- центры сбора и обработки данных;
- базы данных и физические модели,

предназначены для решения с наивысшей точностью следующих задач:



- установления, поддержания и расширения небесной опорной системы координат;
- установления, поддержания и расширения земной опорной системы координат;
- определения и мониторинга параметров вращения Земли;
- развития и поддержания эталонных средств единой системы времени и средств ее синхронизации;
- установления и поддержания динамических систем координат искусственных и естественных космических объектов;
- определения параметров гравитационного поля Земли и тел Солнечной системы;
- определения параметров земной атмосферы и ионосферы;
- поддержания баз координатно-временных, навигационных и геоинформационных данных;
- развития физических теорий, математических методов и программных продуктов для анализа координатно-временных и навигационных данных.

ТЕХНИКА ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

РСДБ — технология за 30 лет улучшала точность измерений на 2 порядка каждые 15 лет, что было связано с расширением полосы регистрации от Mark I (1968) до Mark V (2003) с одной стороны и увеличение числа радиотелескопов с другой.

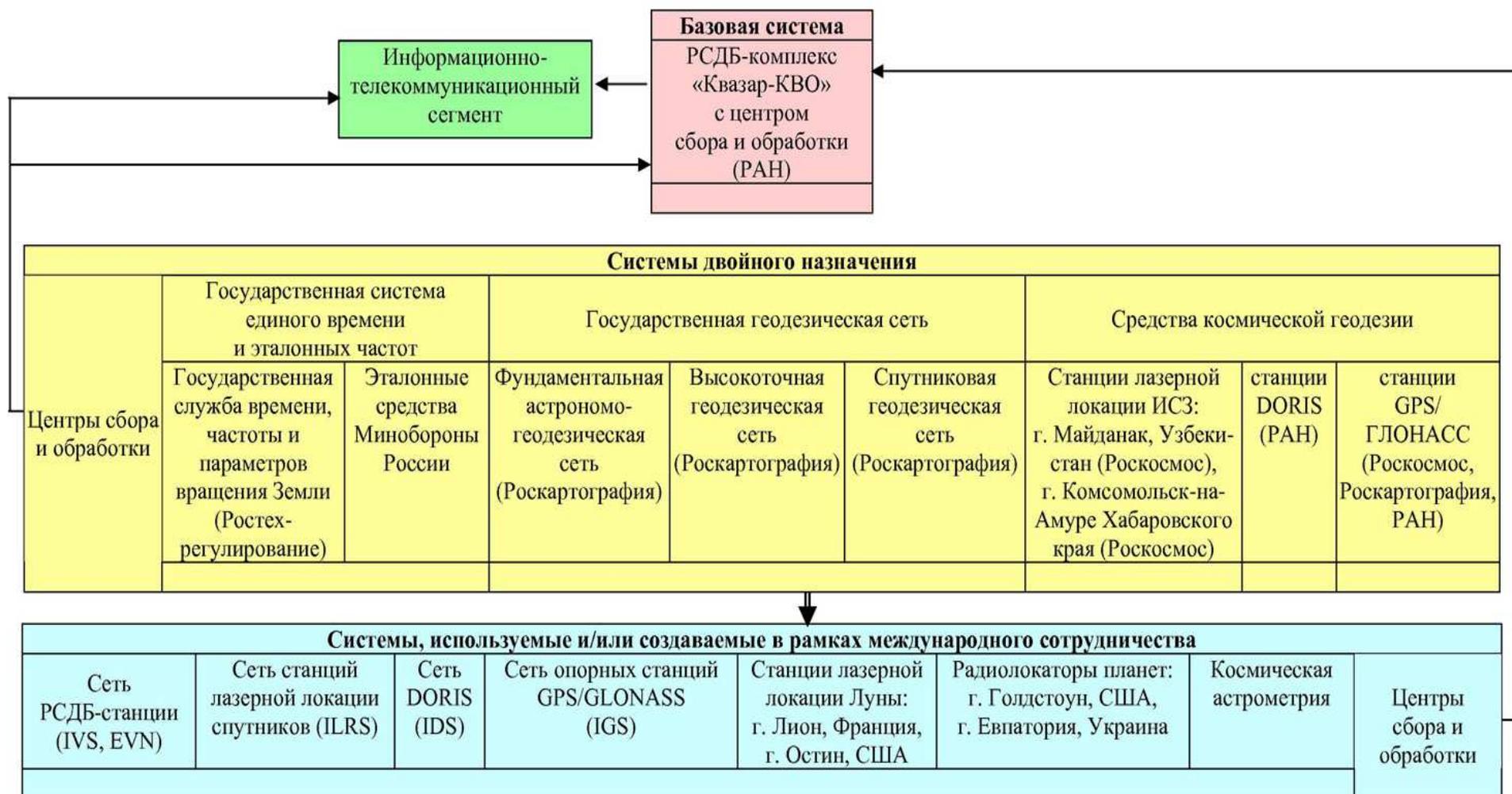
GPS — технология за счет создания многочастотных приемников нового поколения и организацией сотен GPS-пунктов, расположенных на всех континентах земного шара.

SLR — технология, начиная с конца 80-х годов, не улучшает точность определения параметров вращения Земли и глобальных баз и удерживается на уровне (0,7-1,0) мсек. дуги и (0,5-1.0) см.

**Научные исследования
в области фундаментального координатно-временного обеспечения
многообразны и чрезвычайно сложны,
а измерительные системы весьма эффективны,
так как базируются на современных технологиях.**

**Освоение и развитие этой области знаний требует больших усилий и средств,
но без этого невозможно представить будущее отечественной и мировой науки.**

Структура фундаментального сегмента

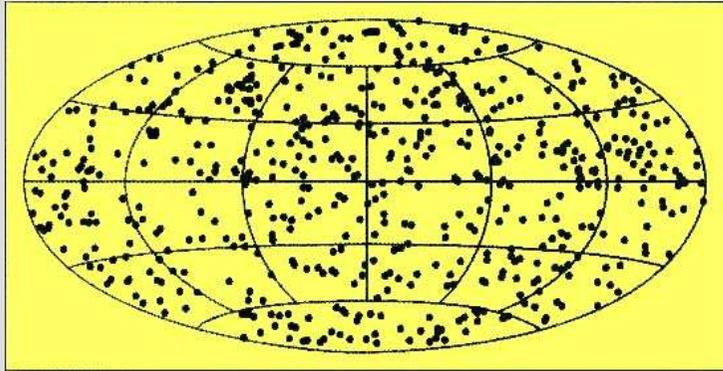


Задачи фундаментального КВиНО, решаемые различными средствами

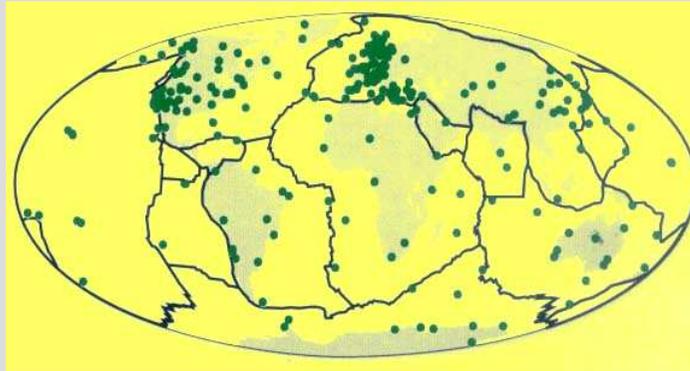
Задачи	РСДБ	GPS	SLR/ LLR	DORIS	Radar/ Doppler
Земная система координат					
глобальная опорная система координат:	•	•	•	•	•
центр	•	•	•	•	•
масштаб	•	(•)	•	•	•
региональные системы координат	•	•	•	•	•
установление опорных станций	•	•	•	•	•
распространение системы координат	(•)	•	(•)	•	•
Небесная система координат					
в радиодиапазонах S/X	•	•	•	•	•
в других радиодиапазонах	•	•	•	•	•
Параметры вращения Земли					
Xp, Yp	•	•	•	•	•
UT1	•	•	•	•	•
Xc, Yc	•	(•)	•	•	•
Динамическая система координат					
ближний космос	(•)	•	•	•	•
система Земля–Луна	(•)	•	•	•	•
Солнечная система	•	•	•	•	•
Геопотенциал					
высшие гармоники	•	•	•	•	•
полная модель	•	•	•	•	•
Распространение шкалы времени	(•)	•	(•)	•	•
Стандартная атмосфера	•	•	•	•	•
Навигация/определение орбит					
наземная/морская/воздушная	•	•	•	•	•
ближний космос	(•)	•	•	•	•
дальний космос	(•)	•	•	•	•

- — не применяется
- — применяется в мире, но у нас нет опыта
- — есть некоторый наш опыт, но нужна работа для достижения реального результата
- — реально используется или есть готовность к быстрому реальному использованию
- () — ограниченное или экспериментальное использование

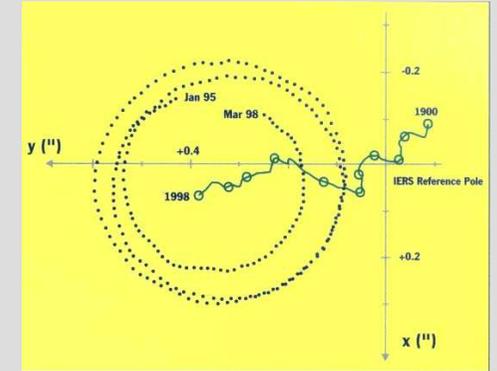
Микросекундная астрометрия, эфемеридная астрономия и геодинамика



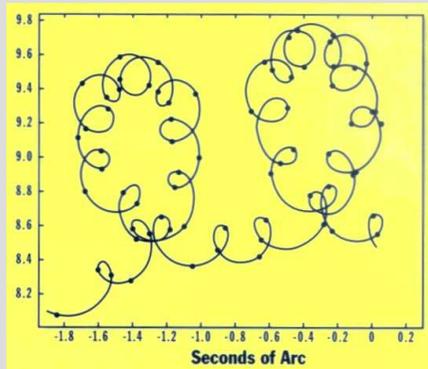
ICRF



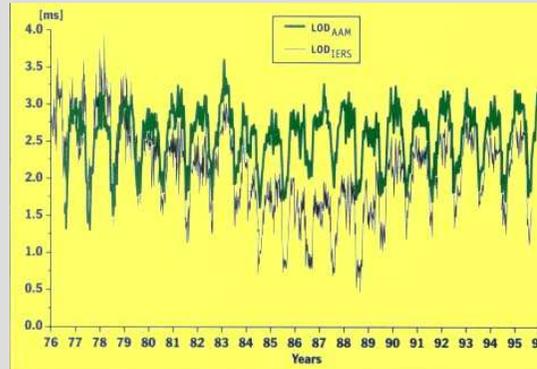
ITRF



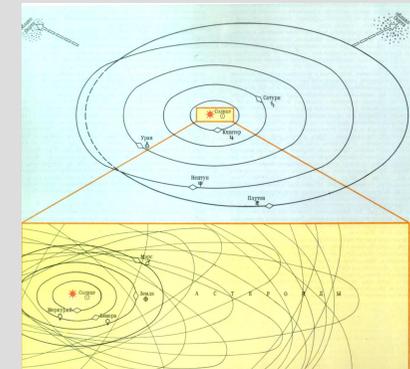
Движение полюса



Прецессия и нутация



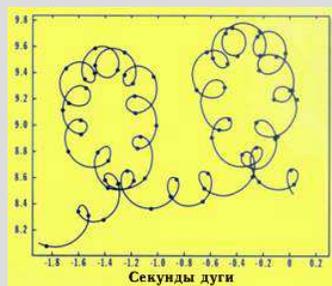
Всемирное время



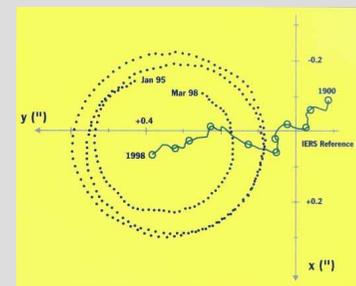
Солнечная система

Параметры ориентации Земли

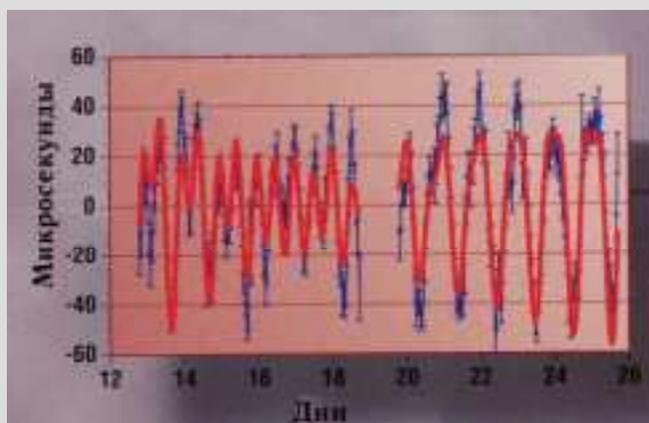
Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами — единственный метод высокоточного определения всех параметров ориентации Земли: прецессии и нутации, координат полюса, всемирного времени и длительности суток.



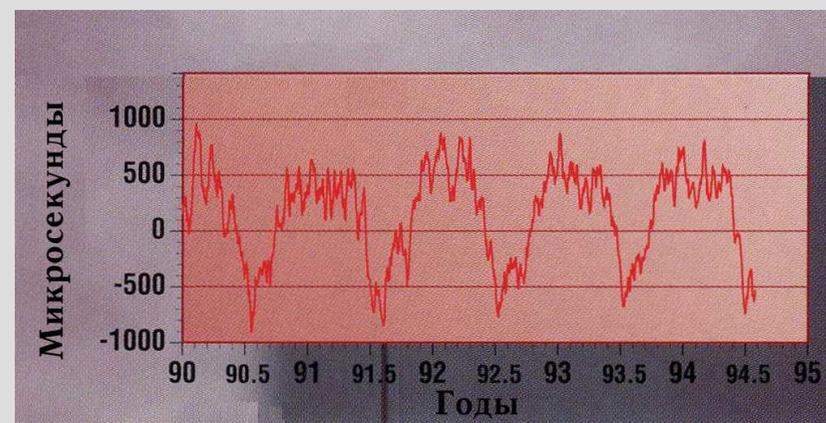
Прецессия и нутация



Движение полюса



Всемирное время



Длительность суток

Summary of Current VLBI Main Products

Products	Specification	Status 2002	Status 2006	Goals (2010-2012)
Polar Motion (x_p, y_p)	accuracy product delivery resolution frequency of solution	$x_p \sim 100, y_p \sim 200 \mu\text{as}$ 1 – 4 weeks – 4 months 1 day 3 days/week	$x_p, y_p: 50 - 80 \mu\text{as}$ 8 – 12 days 1 day	25 μas 1 day 10 min – 1 h 7 days/week
UT1-UTC (DUT1)	accuracy product delivery resolution	5 – 20 μs 1 week 1 day	3 μs 3 – 4 days 1 day	2 μs 1 day 10 min
Celestial Pole ($d\varepsilon; d\psi$)	accuracy product delivery resolution frequency of solution	100 – 400 μas 1 – 4 weeks – 4 months 1 day ~ 3 days/week	50 μas 3 – 4 days 1 day	25 μas 1 day 7 days/week
TRF (x, y, z)	accuracy	5 – 20 mm	5 mm	2 mm
CRF ($\alpha; \delta$)	accuracy frequency of solution product delivery	0.25 – 3 mas 1 year 3 – 6 months	0.25mas (improv. distribution) 1 year 3 months	0.25 mas improve. for more freq. Bands 1 month

Спасибо за внимание