

Применение РСДБ для определения положения источника излучения в околоземном пространстве

Н.А. Дугин, Д.А. Адамчик, М.Б.Нечаева

**ФГБНУ НИРФИ
ННГУ им.Н.И.Лобачевского
Нижний Новгород**

Отработка методик работы РСДБ по сигналам НКА ГЛОНАСС и GPS

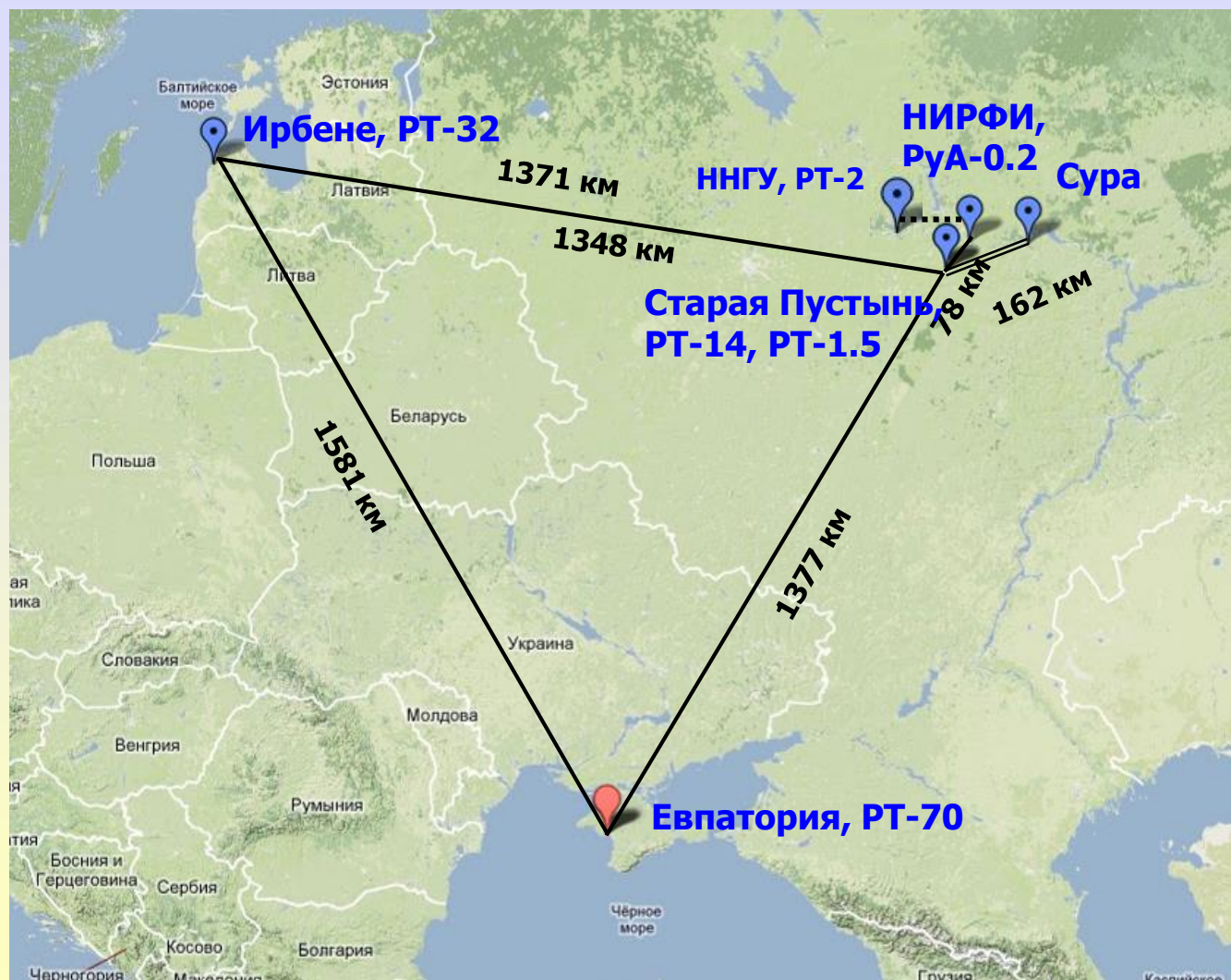
РСДБ-пункты:

НИРФИ:

- **РТ-14** Старая Пустынь,
- **РТ-1.5** Ст. Пустынь,
- **РТ-8** Васильсурск
- **РТ-2** ННГУ
- **РТ-15** Зименки

- **РТ-70** Евпатория,
- **РТ-32** Ирбене

$$\Delta\theta_{1.6\text{GHz}} = 0.02''$$



Диапазон: 1565 – 1685 МГц

Поставленные задачи:

1. Высокоточное определение координат КА в ближнем космосе.

2. Калибровка антенн и интерферометров по сигналам ИСЗ в ближнем космосе.

Разработка наземного комплекса РСДБ для измерения координат КА (в том числе Радиоастрон, планируемых лунных и марсианских КА)

3. Привязка земной и небесной систем координат.

4т. Отработка ПО коррелятора «НИРФИ-4».

5. Исследования ионосферы методом просвечивания сигналами КА и внеземных радиоисточников.

6. Исследования спорадического излучения Солнца.

Основные параметры, измеряемые в РСДБ

Задержка,

возникающая из-за разности трасс распространения сигнала от источника до двух антенн интерферометра:

$$\tau(t) = \frac{L(t)}{c}$$

$$\tau(t) = \frac{1}{c} [B_X \cos \delta \cos h(t) + B_Y \cos \delta \sin h(t) + B_Z \sin \delta]$$

Измеряется в максимуме корреляционной функции

Частота интерференции,

возникающая из-за скорости движения источника относительно антенн интерферометра:

$$F_u(t_0) = F_0 \left. \frac{\partial \tau}{\partial t} \right|_{t_0}$$

$$F_u(t) = \frac{1}{c} F_0 \Omega_3 \cos \delta [B_X \sin h(t) - B_Y \cos h(t)]$$

Измеряется в максимуме спектра

Выражения приведены для источника в дальней зоне интерферометра

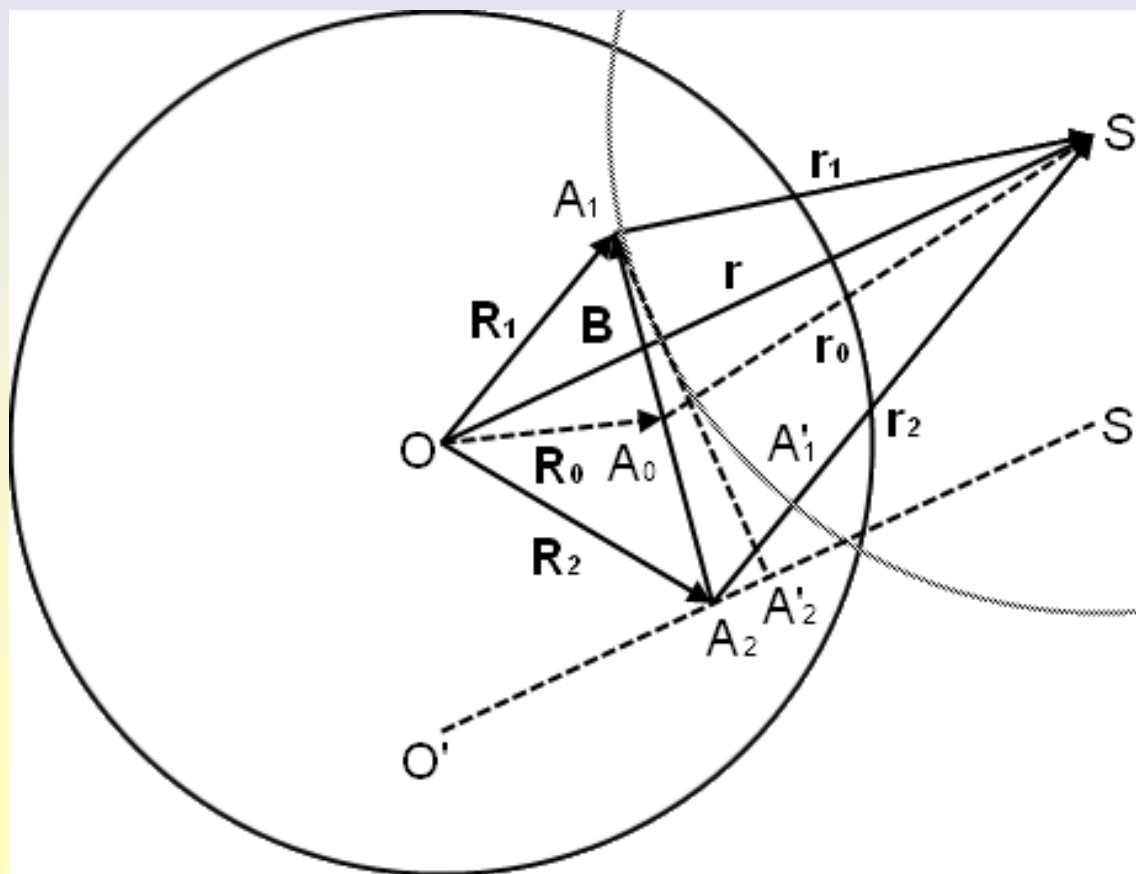
Соотношения для расчета задержки и частоты интерференции для источника в ближнем космосе

$$c\tau = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_1| - |\mathbf{r} - \mathbf{R}_2|$$

$$F_u(t_0) = F_0 \left. \frac{\partial \tau}{\partial t} \right|_{t_0}$$

База интерферометра: $\mathbf{B} = \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1$

Требуется разработка математического и программного обеспечения для измерения положения КА и отработка методик измерения и анализа данных



Выбор расчетных соотношений

$$\left(\frac{B}{2r_0}\right)^2 \ll 1$$

$$\frac{BR_0}{r} \ll c\delta_\tau$$

δ_τ - экспериментальная ошибка

1) Дальняя зона (выполняются оба условия)

$$c\tau = -(sB)$$

2) Промежуточная зона
(выполняется первое условие)

$$c\tau = -(s_0 B)$$

3) Ближняя зона

$$c\tau = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_1| - |\mathbf{r} - \mathbf{R}_2|$$

В приложении к прямой и обратной задачам радиоинтерферометрии точечных источников был применен метод Левенберга-Маркарда: решение задачи аппроксимации экспериментальных данных нелинейной функцией по методу наименьших квадратов

1. Задержка $c\tau = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_1| - |\mathbf{r} - \mathbf{R}_2| + cT$
 T – инструментальная задержка

2. Частота $c\beta = (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) \cdot \mathbf{v}$

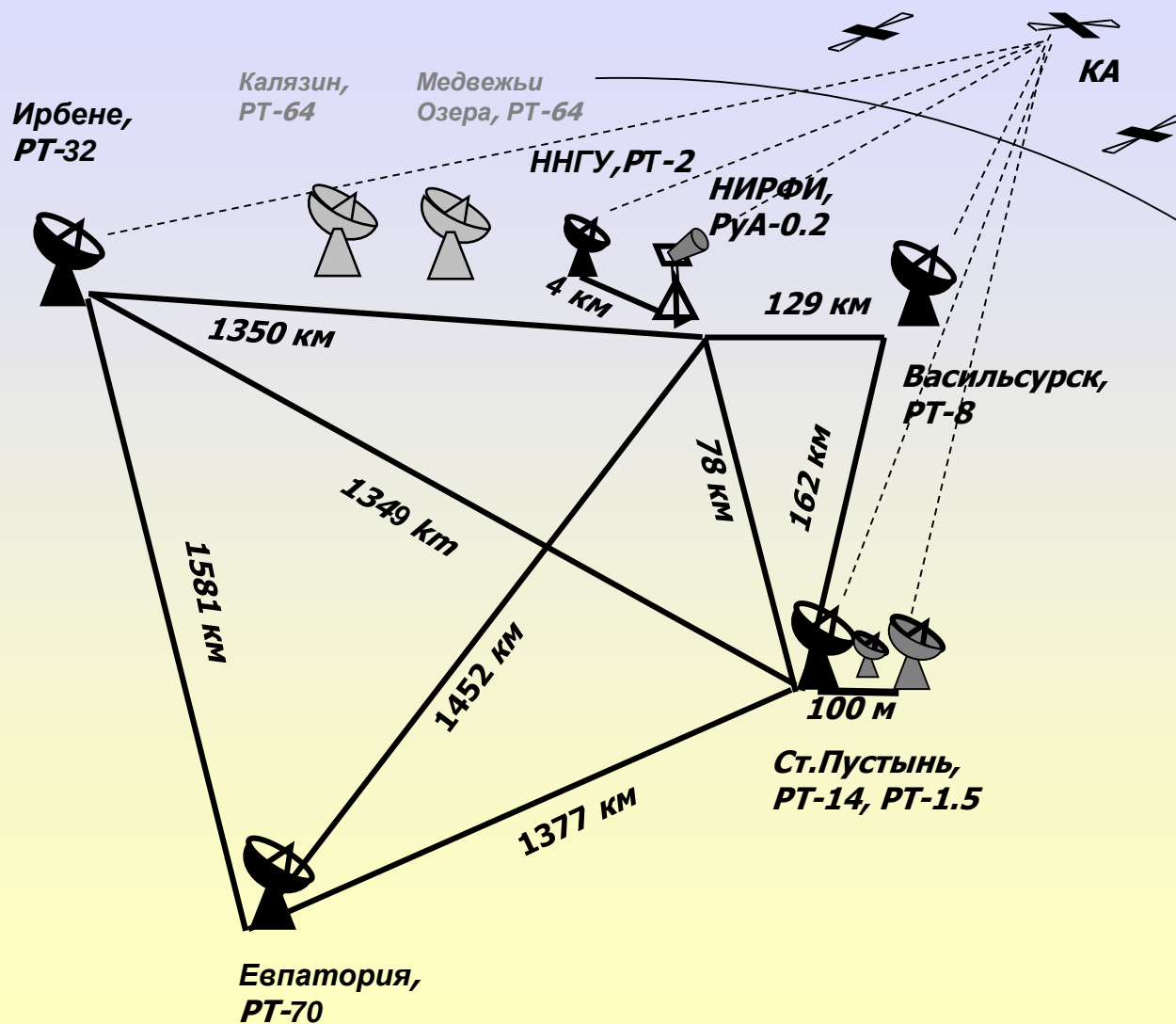
6 искоемых параметров, требуются
измерения на 7 базах (минимум 5 антенн)

$$\beta = \frac{d\tau}{dt} \quad \mathbf{v} \equiv \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

Измерения положения источника на трех базах

$$\begin{cases} \tau_{12} = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_1| - |\mathbf{r} - \mathbf{R}_2| + T_{12} \\ \tau_{13} = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_1| - |\mathbf{r} - \mathbf{R}_3| + T_{13} \\ \tau_{23} = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_2| - |\mathbf{r} - \mathbf{R}_3| + T_{23} \end{cases}$$

Состав измерительного комплекса



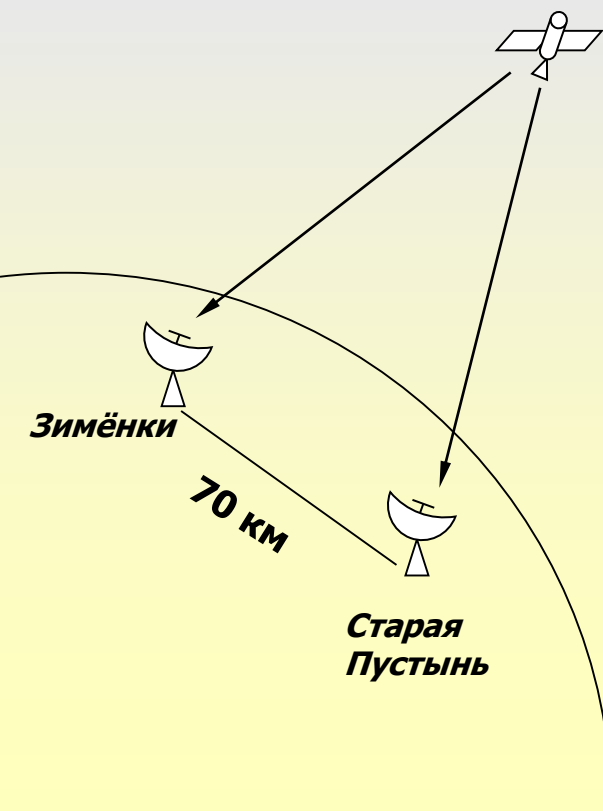
Работа по сигналам НКА ГЛОНАСС и GPS на интерферометре «Ст.Пустынь-Зимёнки» с базой 70 км

Цели: 1) отработка РСДБ-методик высокоточного определения координат НКА ГЛОНАСС.

2) Исследования влияния ионосферы на характеристики сигналов НКА.

начало экспериментов – октябрь 2010 года

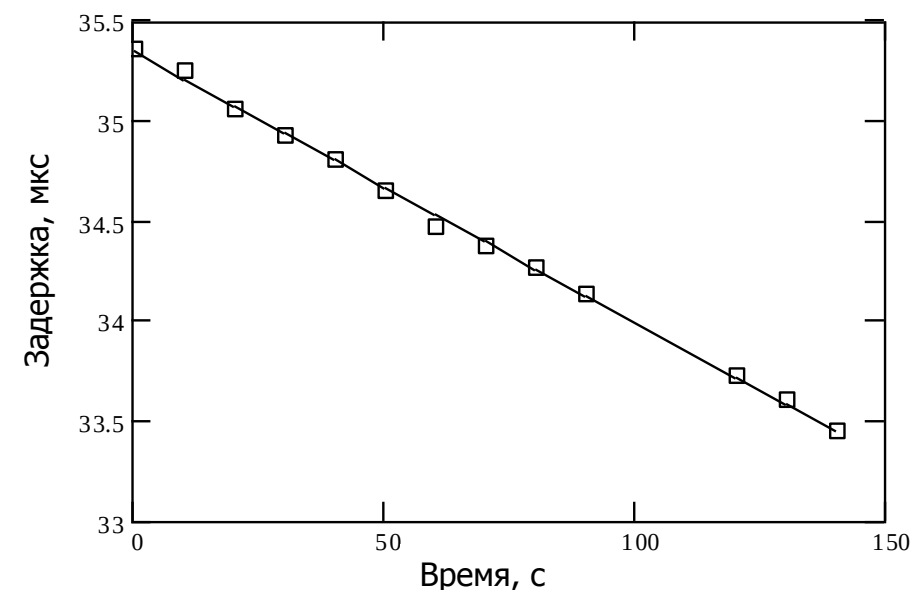
НКА СРНС



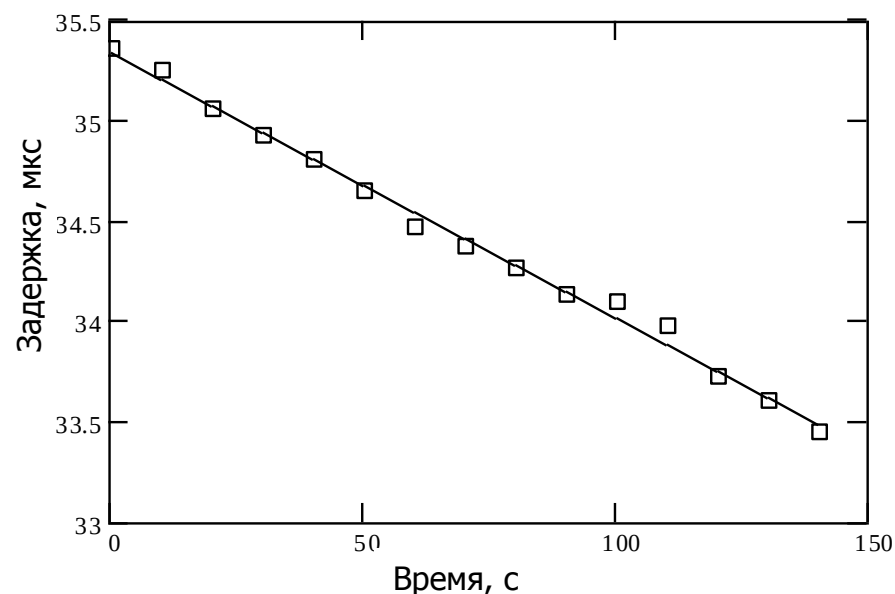
Преимущества тестового эксперимента:

- мощность прямого сигнала на входе приёмной системы $\sim 10^{-11}$ Вт;
- известные координаты и характер движения КА;
- небольшая угловая скорость движения;
- равномерное распределение КА в видимом полупространстве.

Зависимость изменения задержки от времени при наблюдении НКА «НАВСТАР 27663» (квадратами показаны значения задержки, уточненные аппроксимацией)



Время: 11:30:00, СКО 6.17 нс



Время: 11:30:00, СКО 10.98 нс

Достигнута точность определения задержки — основного параметра для расчётов проекций базы, а в дальнейшем координат КА — **4...7 нс (1...2 м в линейном масштабе).**

**Результаты измерений проекции базы
интерферометра «Зимёнки – Старая Пустынь»
Ближняя зона.**

Переменные	Истинные координаты	Задача с 7 неизвестными	Задача с 4 неизвестными
$R_{1x'}$ км	2610,583	$2620,151 \pm 11,953$	2610,583
$R_{1y'}$ км	2488,632	$2646,631 \pm 51,056$	2488,632
$R_{1z'}$ км	5243,019	$5315,115 \pm 14,777$	5243,019
$R_{2x'}$ км	2549,035	$2558,929 \pm 12,033$	$2549,033 \pm 0,009$
$R_{2y'}$ км	2486,162	$2644,144 \pm 51,058$	$2486,160 \pm 0,011$
$R_{2z'}$ км	5274,220	$5346,112 \pm 14,754$	$5274,196 \pm 0,018$
T , мкс		$17,163 \pm 0,098$	$16,894 \pm 0,046$
χ^2		9,015 (1,1%)	71,932 (0,0%)

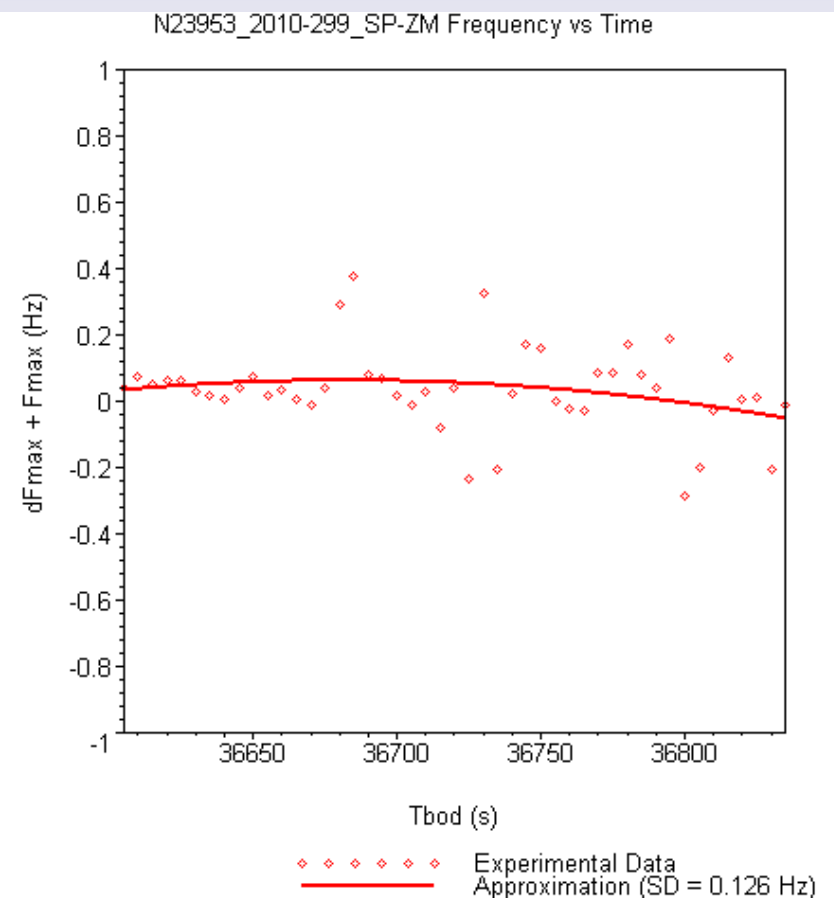
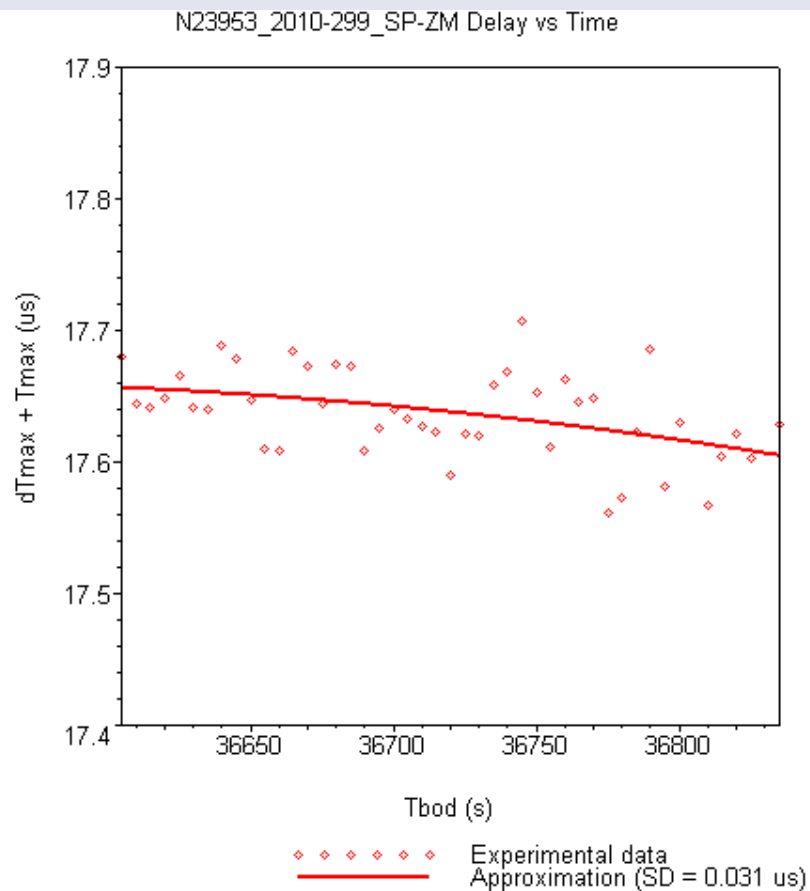
Расчет параметров базы. Промежуточная зона.

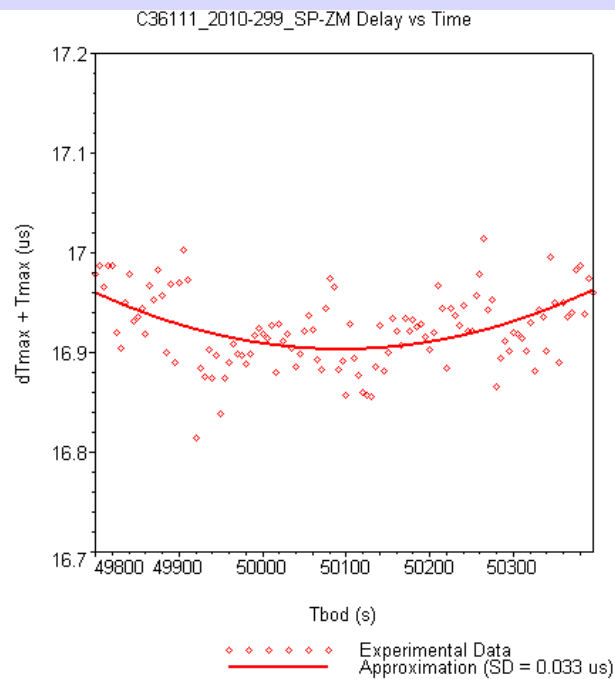
Число условных уравнений - 9

Переменные	Истинные координаты	Задача с 7 неизвестными	Задача с 4 неизвестными
R_{0x} , км	2579,809	$2589,533 \pm 11,993$	2579,809
R_{0y} , км	2487,397	$2645,385 \pm 51,057$	2487,397
R_{0z} , км	5258,620	$5330,590 \pm 14,766$	5258,620
B_x , км	61,547	$61,222 \pm 0,089$	$61,550 \pm 0,009$
B_y , км	2,469	$2,487 \pm 0,012$	$2,472 \pm 0,011$
B_z , км	-31,202	$-30,998 \pm 0,038$	$-31,177 \pm 0,018$
T , мкс		$17,163 \pm 0,098$	$16,894 \pm 0,046$
χ^2		9,014 (1,1%)	71,910 (0,0%)

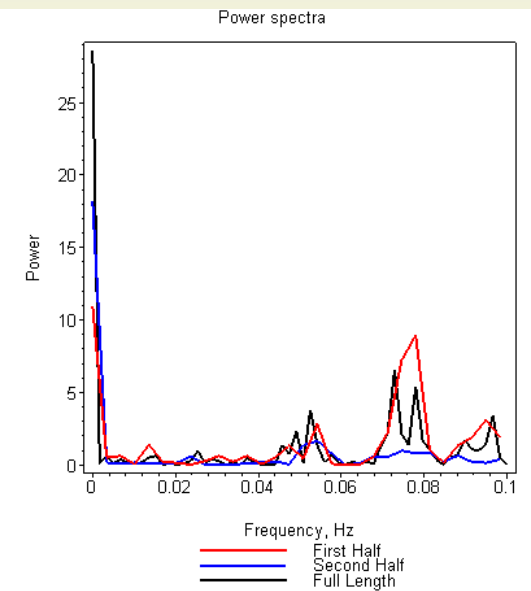
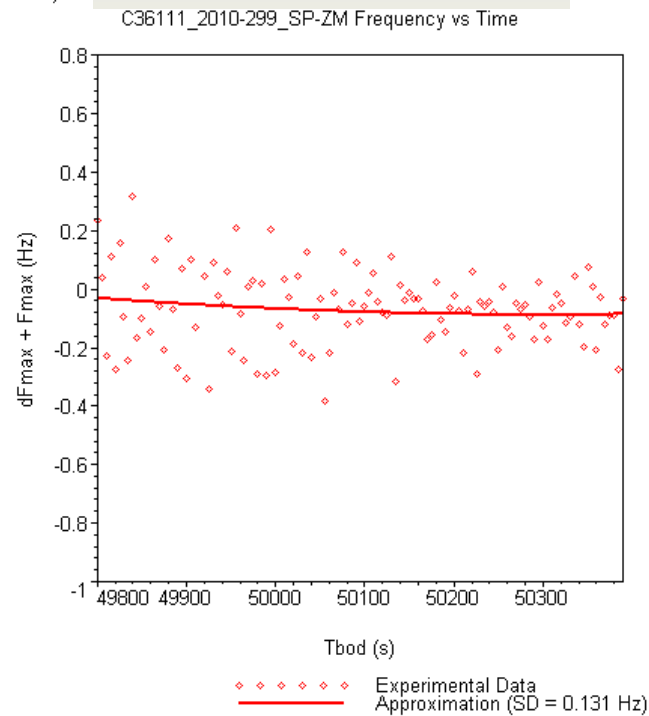
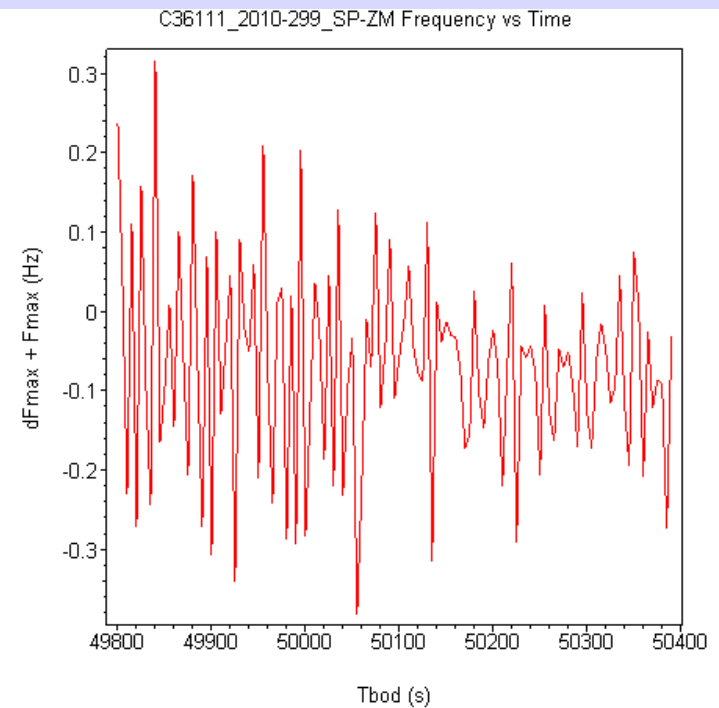
Источники ошибок определения задержки и частоты интерференции

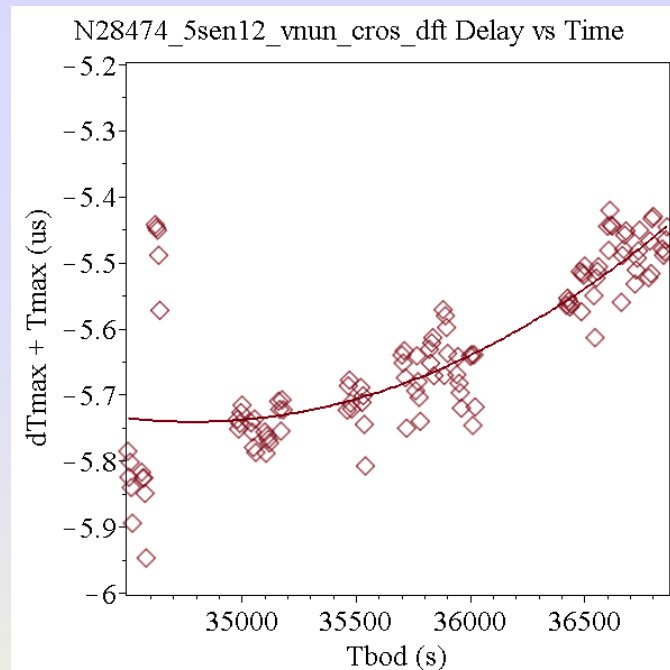
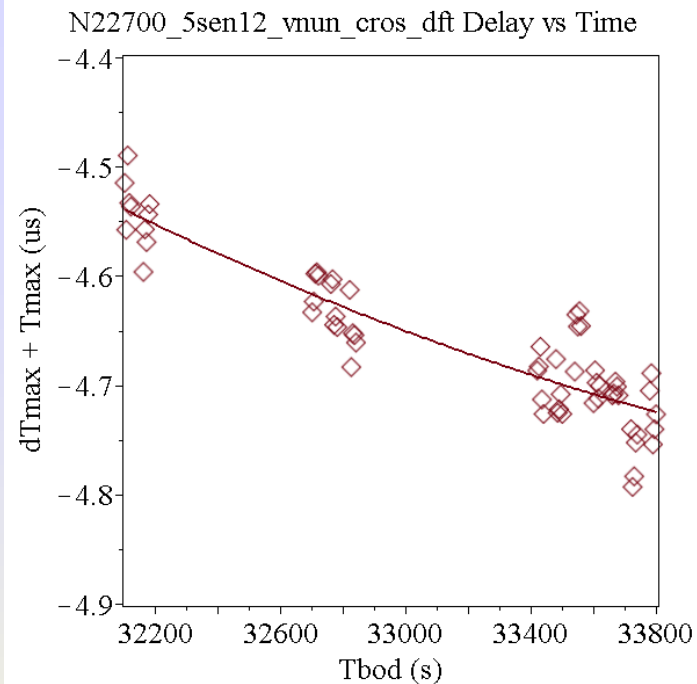
Аппаратурные и методические факторы. Экспериментальные погрешности.



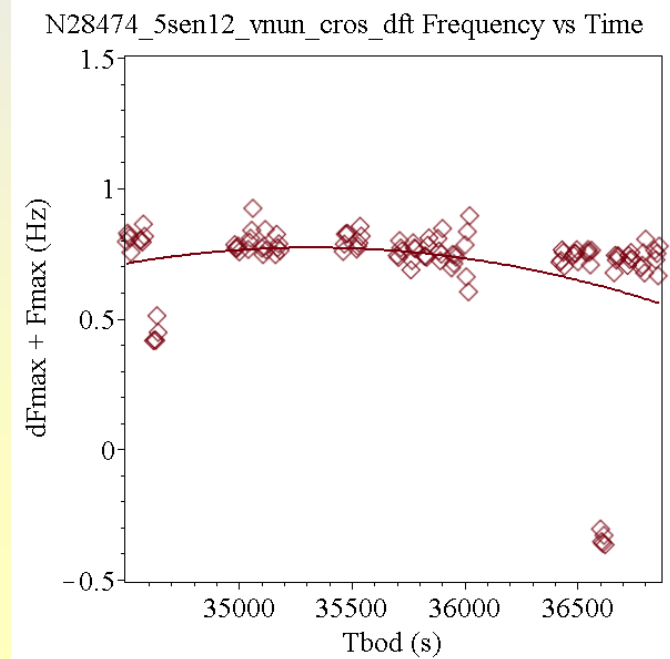
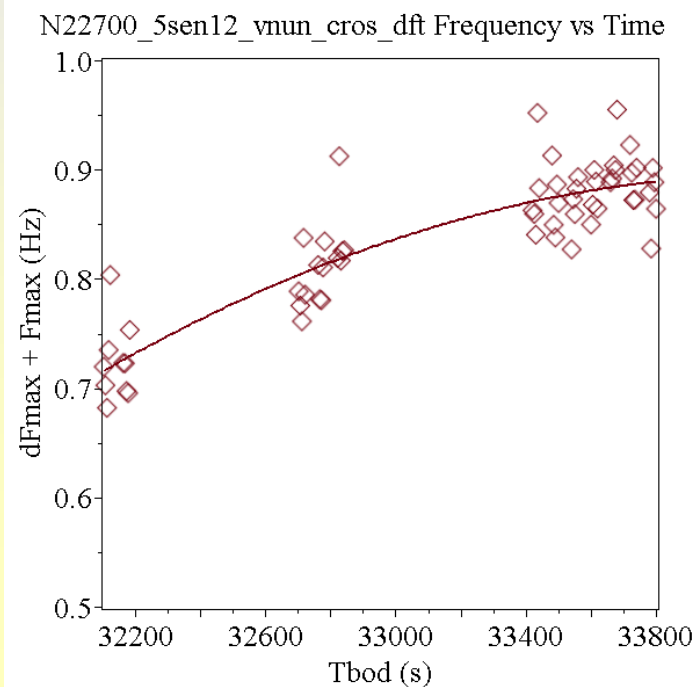


База
69 км





База
1400 км



Выводы

- Рассмотрены алгоритмы решения прямой и обратной задач астрометрии методом РСДБ при произвольном расположении источника излучения.
- **Анализируются варианты приемного РСДБ комплекса для измерения положения объектов в околоземном космическом пространстве.**
- Определены направления теоретических и экспериментальных исследований для совершенствования разработанных методик и алгоритмов решения поставленной задачи.

Общее заключение.

- **Радиоинтерферометры с независимым приемом могут эффективно использоваться для определения положения КА в ближнем космосе, излучающих квазишумовые сигналы.**
- **Сигналы НКА СРНС можно использовать для точного и оперативного определения ряда параметров приемной РСДБ аппаратуры и калибровки инструмента в целом.**
- **Полученные результаты при дальнейшей работе могут служить основой для разработки наземных РСДБ комплексов для контроля положения КА в ближнем космосе.**

Дугин Н.А., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В. Особенности работы радиоинтерферометра с независимым приемом по сигналам навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и НАВСТАР.// Сборник докладов конференции «RLNC 2010». XVII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация навигация связь». Электронная версия. 12-14 апреля 2011г. г. Воронеж. Издатель: НПФ «САКВОЕЕ» ООО. 2011. Т. 3. С. 1858-1869.

Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Тихомиров Ю.В. Измерение параметров антенн по сигналам космических аппаратов систем ГЛОНАСС и NAVSTAR. Изв.ВУЗов. Радиофизика, 2011. Т. 54, № 3, с. 177-184.

М.Б. Нечаева, Н.А. Дугин, И.К. Шмелд. Метод РСДБ в приложении к задаче радиолокации объектов в околоземном космическом пространстве. //Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. Выпуск 6 (39), 2011. С. 196-200.

Дугин Н.А., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В. О возможности калибровки РСДБ по сигналам навигационных космических аппаратов // Труды ИПА РАН. - СПб: Наука, 2012. - Вып. 23. - С. 202-206.

Дугин Н.А., Гавриленко В.Г., Нечаева М.Б., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Тихомиров Ю.В., Чагунин А.К. РСДБ-эксперименты по приему сигналов навигационных космических аппаратов. //Труды XVI научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.Н. Бархатова (Нижний Новгород, 11-18 мая 2012 г.) /Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Нижний Новгород: ННГУ, 2012. С. 66-67.

Н.А. Дугин. О влиянии помех на точность позиционирования наземных транспортных средств – потребителей сигналов системы ГЛОНАСС. //Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2012». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 2. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012.– с.241-244.

N. Dugin, A. Antipenko, Vl. Bezrukovs, V. Gavrilenko, A. Dementjev, A. Lesins, M. Nechaeva, I. Shmeld, S. Snegirev, Yu. Tikhomirov, J. Trokss. Radio interferometric research of ionosphere by signals of space satellites. //Baltic Astronomy, 2013. V. 22, N. 1, P.25-33

Дугин Н.А., Гавриленко В.Г. , Антипенко А.А. , Дементьев А.Ф. , Нечаева М.Б. , Тихомиров Ю.В. , Калинин А.В. , Чагунин А.К. Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ – НИРФИ – Иrbене. Первые результаты. //Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (раздел "Радиофизика"). 2013. №1 (1). С. 79-85.

S.D. Snegirev, N.V. Bakhmetieva, N.A. Dugin, A.N. Karashtin, V.P. Uryadov. Radio astronomical and Radiophysical Studies in the near-Earth space in the Radiophysical Research Institute. //Baltic Astronomy, 2013. V. 22, N. 1, P.43-51

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-02-00586 и 13-02-97080-р-поволжье-а.