

# Метод РСДБ в приложении к задаче радиолокации объектов в околоземном космическом пространстве

М. Нечаева<sup>1,2</sup>, Н. Дугин<sup>2</sup>, И. Шмелд<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Вентспилсский международный радиоастрономический центр (Латвия),

<sup>2</sup> ФГБНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт» (Россия)

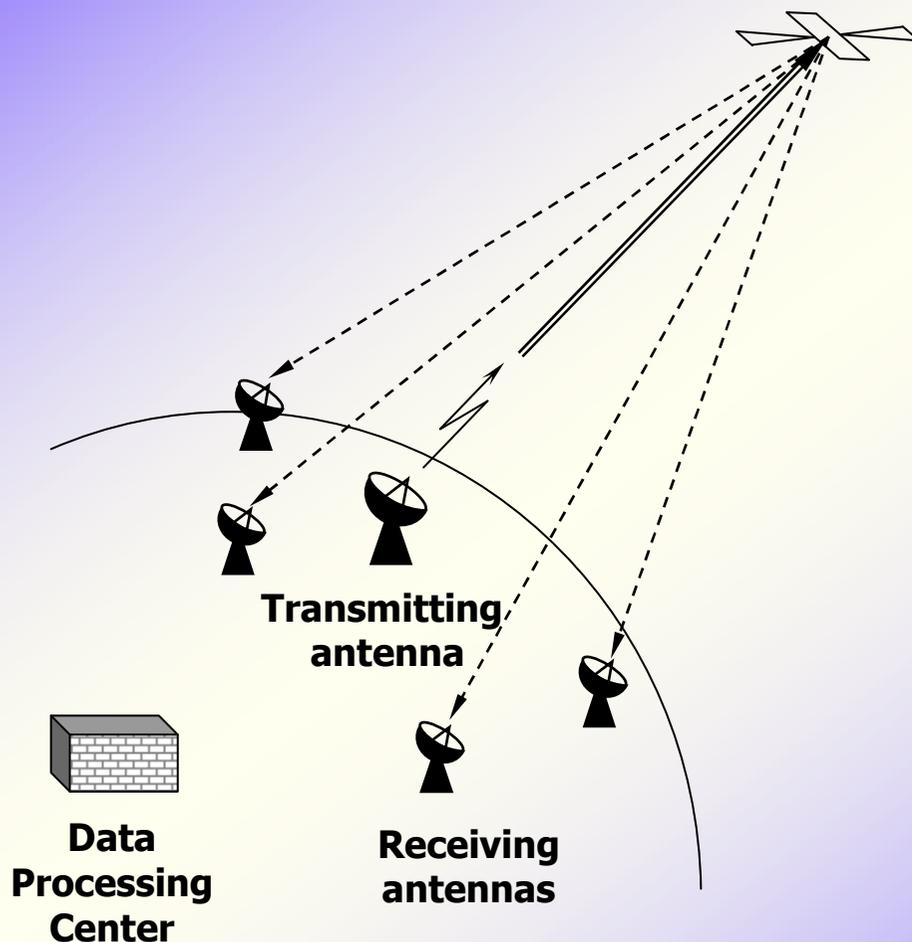


*Исследования поддержаны Европейским социальным фондом  
(проект №2009/0231/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/151) и  
Европейским фондом регионального развития  
(проект SATTEH №2010/0189/2DP/2.1.1.2.0/10/APIA/VIAA/019)*



**Метод РСДБ-локации (1998)** представляет собой объединение двух методов:

- метода **радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ)**, позволяющего выполнять измерения **угловых координат и угловых скоростей**,
- **дальномерно-доплеровского локационного метода** для измерения **дальности и радиальной скорости**.



**Основная задача экспериментов** – получение информации о положении космического объекта (КО) из измерений **разности времён прихода сигналов** в пункты интерферометра и **доплеровского сдвига частот сигналов**.



**Bear Lakes RT-64**



**Urumqi RT-25**



**Ventspils RT-32**



**Noto RT-32**

**Проект LFVN. Начало проекта: 1996**

**Организации участники:** АКЦ ФИАН, НИРФИ, ГАО РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, АКЦ ФИАН, НИРФИ, РНИИ КП, ОКБ МЭИ, НЦУИКС (Украина), РИНАНУ (Украина), КРАО (Украина), VIRAC (Латвия), ИРА ИНАФ (Италия); АОУ НАОК (Китай) и др.

**Эксперименты по РСДБ-локации осуществлялись на комплексе, включающем:**

- **планетный радиолокатор** в Евпатории (НЦУИКС, Украина), РТ-70, передатчик непрерывного излучения;  $F=5010$  МГц,  $P=20-60$  кВт);

- **приемные пункты РСДБ:** Медвежьи Озера (РТ-64, Россия), Калязин (РТ-64, Россия), Ното (РТ-32, Италия), Медичина (РТ-32, Италия), Вентспилс (РТ-32, Латвия), Урумчи (РТ-25, Китай), Симеиз (РТ-22, Украина) и др.;

- **центр обработки** – РСДБ-коррелятор НИРФИ



***TNA-2500 (PT-70),  
Евпатория, Украина  
планетный локатор (F=5 ГГц)***

В период с **2001 г. по 2010 г.** было проведено **13 экспериментов по РСДБ-локации планет земной группы, объектов космического мусора, астероидов.**

В результате обработки, выполняющейся в НИРФИ, получены ряды точных измерений **доплеровских сдвигов частоты** принятых отраженных сигналов относительно передаваемого зондирующего сигнала для нескольких **десятков объектов космического мусора, Венеры (2005), астероида 2004 XR14 (2006).**

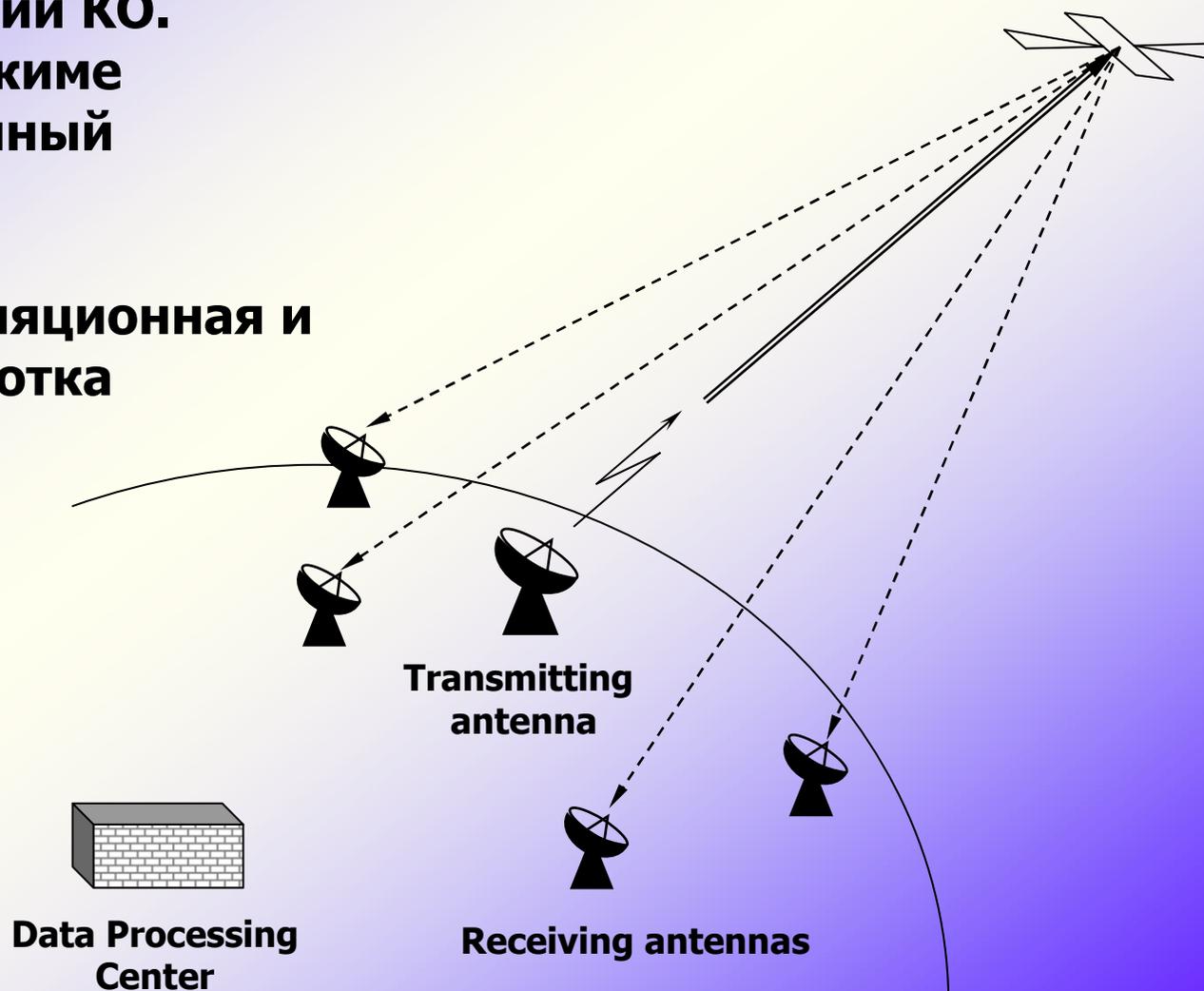
Сделаны оценки **периода вращения и размеров** объектов космического мусора, а также **направления оси вращения** **КО**.

## Схема эксперимента по РСДБ-локации:

**Передающая антенна** в непрерывном режиме излучает сигнал в направлении КО.

**Антенны** в РСДБ-режиме принимают отражённый сигнал.

**В центре обработки** выполняется корреляционная и спектральная обработка данных



# Выходной сигнал двухэлементного интерферометра

Корреляционная функция

$$V(\tau_0) \sim V_0 e^{j\omega_0 \left( \tau_H + \frac{\partial \tau}{\partial t} t \right)} \frac{\sin \left( \frac{\Delta \omega}{2} (\tau_H - \tau_0) \right)}{\frac{\Delta \omega}{2} (\tau_H - \tau_0)}$$

$$\Delta \tau_0 = \frac{2\pi}{\Delta \omega}$$

Спектр

$$Y(\Omega) \sim A(t_0)^2 V_0 e^{j\omega_0 \tau_H} R(\tau_H - \tau_0) \frac{\sin \left( \frac{T}{2} \left( \omega_0 \frac{\partial \tau}{\partial t} - \Omega \right) \right)}{\frac{T}{2} \left( \omega_0 \frac{\partial \tau}{\partial t} - \Omega \right)}$$

$$\Delta \Omega = \frac{2\pi}{T}$$

**Измеряемые параметры:** **задержка** - разность времён прихода сигнала; измеряется в максимуме корреляционной функции

**и частота интерференции** - относительный сдвиг частот между радиосигналами; измеряется в максимуме частотного спектра

$\omega_0$  – средняя частота полосы приёма,  
 $\Delta \omega$  – полоса приёма,  
 $T$  – время интегрирования,  
 $\tau(t)$  – время пространственной задержки между сигналами, приходящими на антенны:  
 $\tau = \tau_H + \beta t$   
 $\tau_H$  - задержка в момент  $t_0$ ,

$$\tau_0 = \frac{r_{t_0}}{c}; \quad \Omega_{\text{int}} = \frac{\omega_0}{c} \frac{\partial r(t)}{\partial t} \Big|_{t_0}$$

**Точность измерения задержки** определяется полосой регистрации:

$$\delta\tau = \frac{2\pi}{2\Delta\omega}$$

При полосе приёма 2 МГц  $\delta\tau = 250\text{нс}$

**Точность измерения частоты интерференции** определяется временем интегрирования при спектральном анализе:

$$d\Omega = \frac{2\pi}{2T}$$

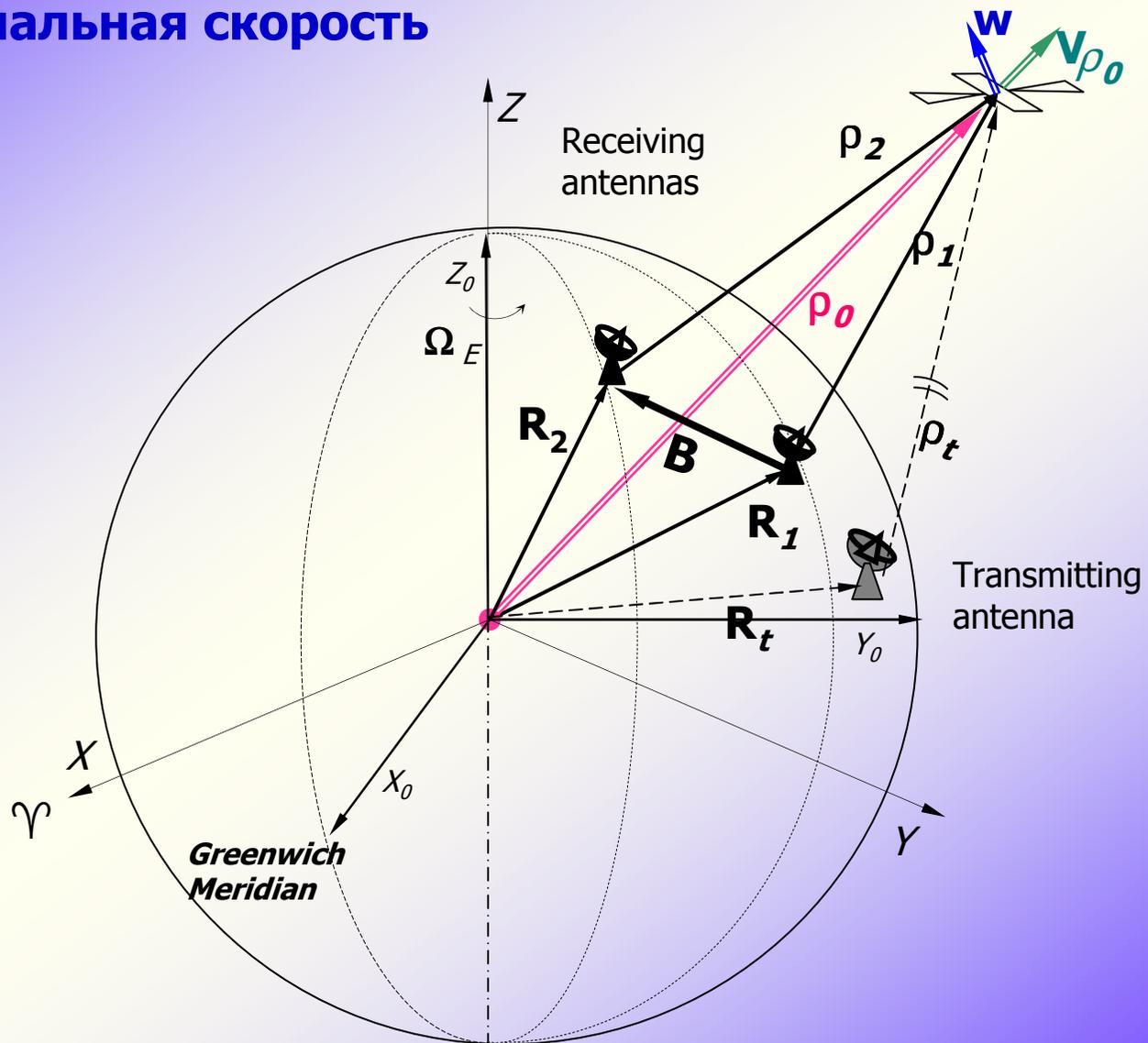
При времени накопления 10 с  $\frac{d\Omega}{2\pi} = 0.05 \text{ Гц}$

Навигационная задача состоит в нахождении **6 параметров** из **задержки и частоты интерференции**:

$\rho_0$  ( $\rho_x, \rho_y, \rho_z$ ) – геоцентрический вектор положения КО

$\mathbf{w}$  ( $w_\alpha, w_\delta$ ) - угловая скорость КО

$V_{\rho_0}$  - радиальная скорость



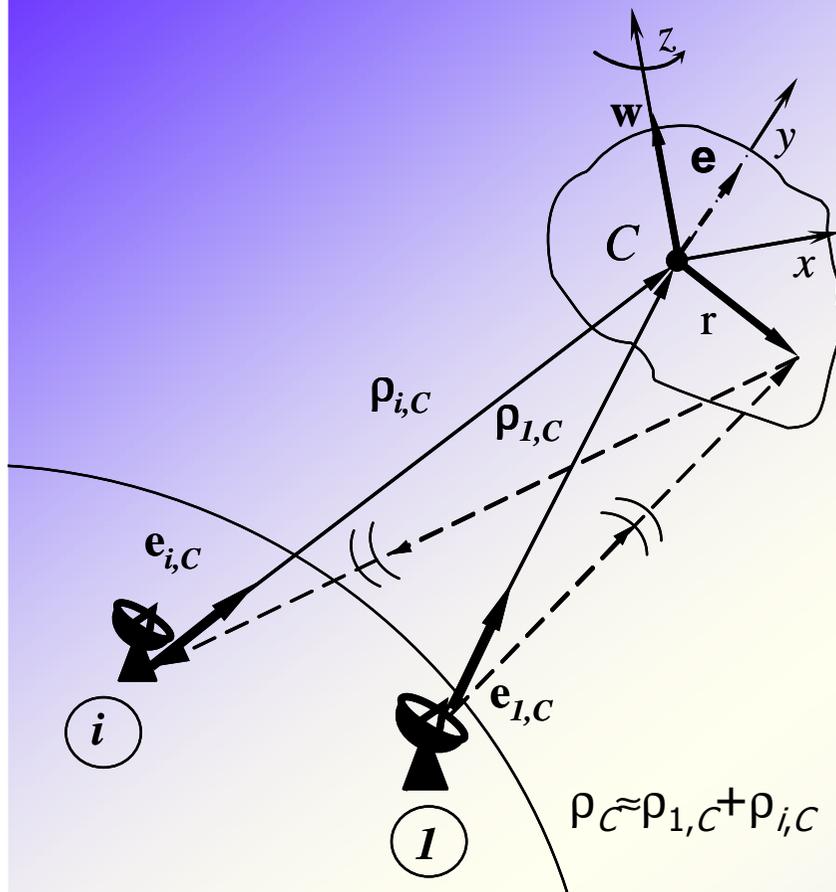
# 1. Взаимная корреляция излученного сигнала и эхо-сигнала, принятого в каждом приемном пункте (локация)

выполняется последовательно для каждой антенны.

Предположим, что **фазовый центр** отражённого от объекта сигнала находится в некоторой точке  $r$  на поверхности протяжённого КО. Объект вращается вокруг своей оси с некоторой **скоростью**  $w$ .

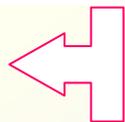
*1. положение и движение центра масс КО*

*2. положение и движение фазового центра отражённого сигнала*



**Длина трассы «передатчик - КО - приёмник»:**

$$\rho_C$$



$$V_C$$



$$\tau = \frac{1}{c} (\mathbf{e}_{1,C} (\rho_{1,C} + \mathbf{r})) + \frac{1}{c} (\mathbf{e}_{i,C} (\rho_{i,C} + \mathbf{r})) \approx \frac{1}{c} \rho_C + \frac{1}{c} (\mathbf{e}, \mathbf{r})$$

**Скорость изменения  $\rho_C$ :**

$$\Omega = \frac{\omega_0}{c} V_c + \frac{\omega_0}{c} (\mathbf{e}, [\mathbf{w}, \mathbf{r}])$$

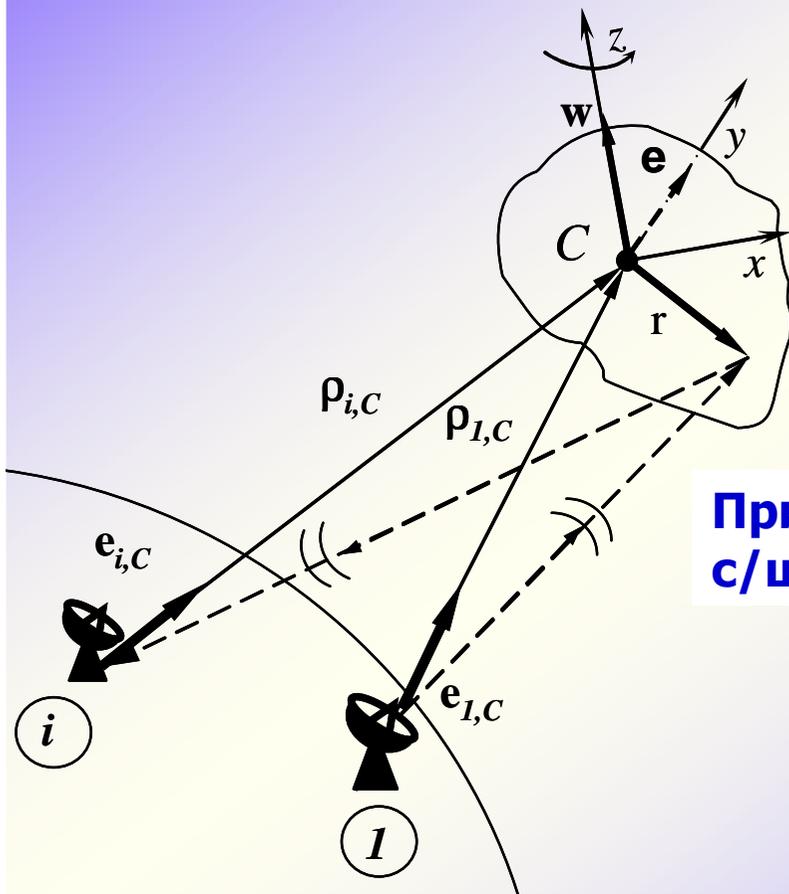
Анализ по переменным  $\tau_0$  и  $\Omega$  в выходном сигнале производится отдельно по двум ортогональным осям этой системы координат  $x, y$ .

$$\tau = \frac{1}{c} (\rho_c + r_y) \quad \Omega = \frac{\omega_0}{c} (V_c + w r_x)$$

**Разрешающая способность** (элементы отражающей поверхности объекта различимы), если находятся на линейном расстоянии не менее:

$$\delta r_y = \frac{2\pi c}{\Delta\omega}$$

$$\delta r_x = \frac{2\pi c}{T w \omega_0}$$



При полосе 2 МГц и  $c/\text{ш}=8$

$$\delta r_y = 19 \text{ м}$$

При частоте 5 ГГц,  $T=10$  с,  $w=10$  угл.с/с,  $c/\text{ш}=8$

$$\delta r_x = 3 \text{ м}$$

файл:  
12\_31\_21.1

источник  
95017

частота  
5010 мГц

наблюдение  
15/09/05

Пункты:  
BRLAKES  
EYPTRYA

Скан:  
12:31:0-12:35:37

Начало участка:  
0:0:0.00

длина 1.27 сек.

разрешение  
0.23437 гц

ENTER - для  
продолжения

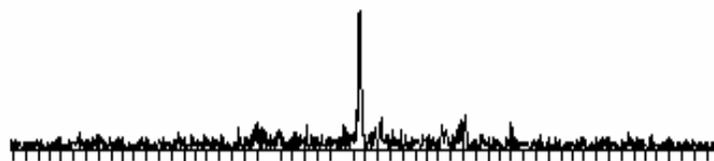
## Спектрограммы участков записи



0:0:12-0:0:17

max F=-3.74999

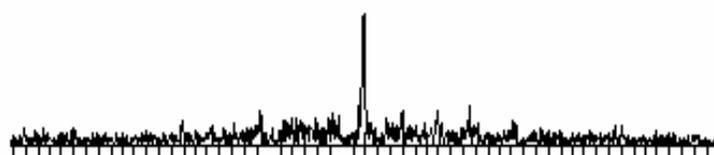
R(%)=0.43342



0:0:8-0:0:12

max F=-1.87499

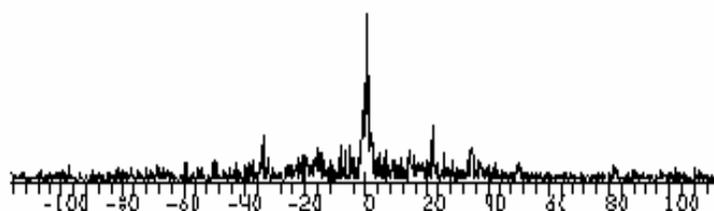
R(%)=0.88122



0:0:4-0:0:8

max F=-0.70312

R(%)=0.84153



0:0:0-0:0:4

max F=0.23437

R(%)=1.08412

Объект 95017

**15 сентября  
2005;**

12:30-12:35 UT;

База:

Медвежьи

Озера -

Евпатория

Частота

Доплера

17845 Гц.

Спектры мощности результата кросс-корреляции сигнала передатчика и сигнала, отражённого от объекта «35303», принятого РТ-32 в Вентспилсе.

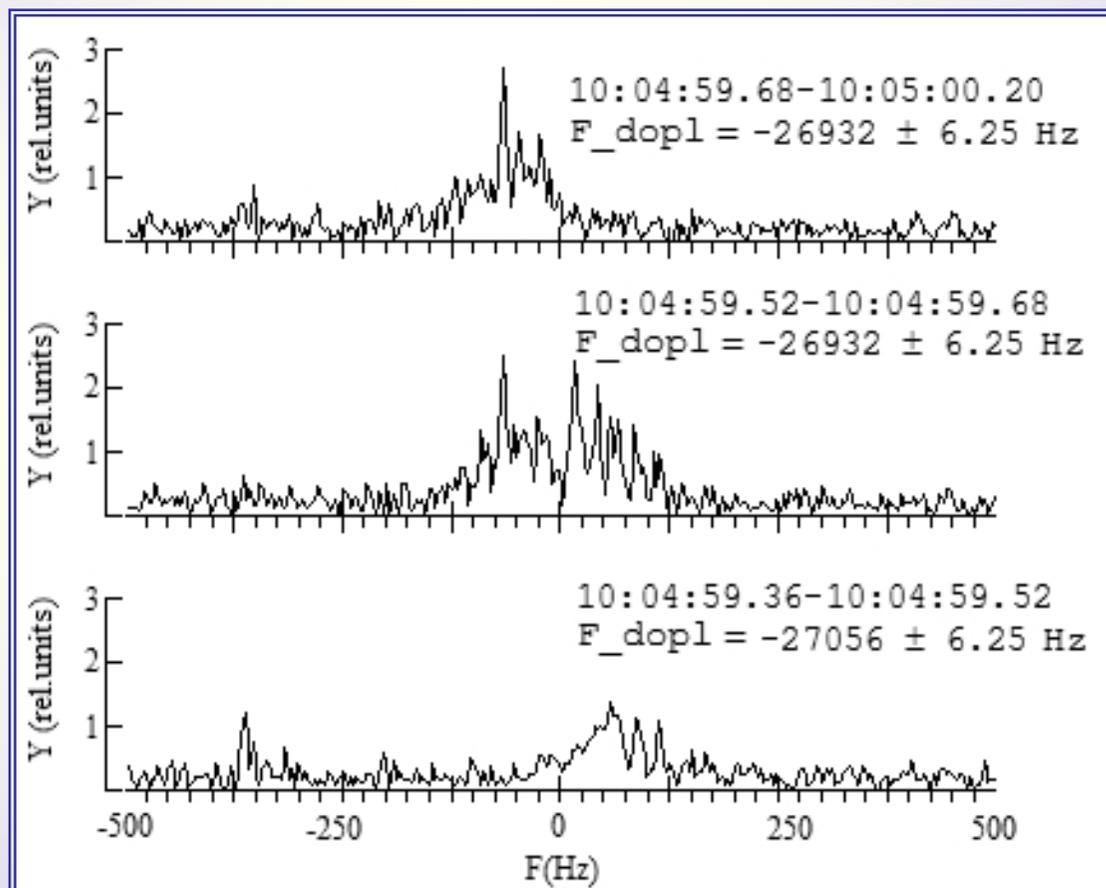
На рисунке приведены частоты Допплера, рассчитанные для трёх последовательных участков записи (снизу вверх)

**30 июня 2010 г.**

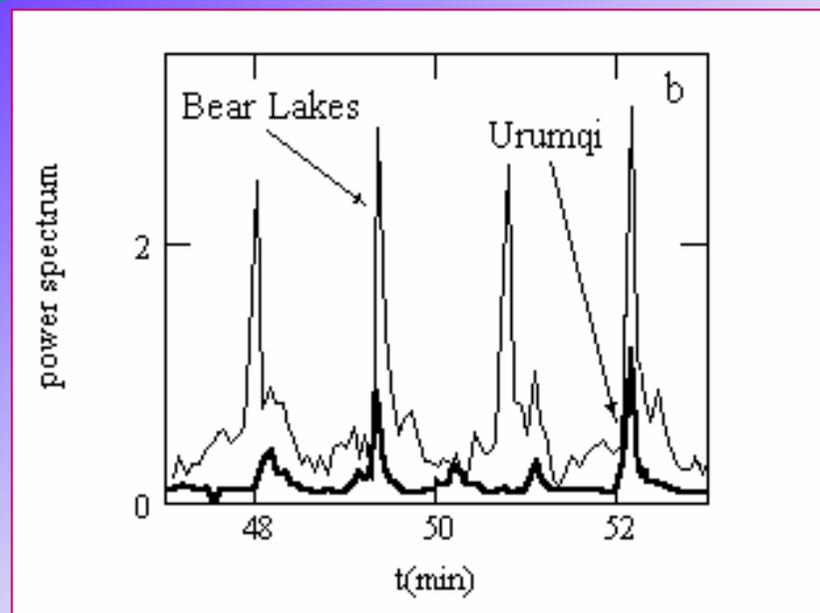
**Объект 35303  
(Iridium 33 1997-  
051PT)**

**База:**

**Вентспилс -  
Евпатория**



## Зависимость спектрального максимума от времени



Объект **12618** ("Радуга-9");  
28 июля 2003, 19:52

Зависимость максимума спектра от времени, полученная в результате корреляционной обработки сигналов пунктов **Урумчи-Евпатория** и **Медвежьи Озера-Евпатория**,

временное разрешение  $dt=4.26$  с,  
реальный период вращения 165 с.

# Зависимость спектрального максимума от времени

Объект 95069

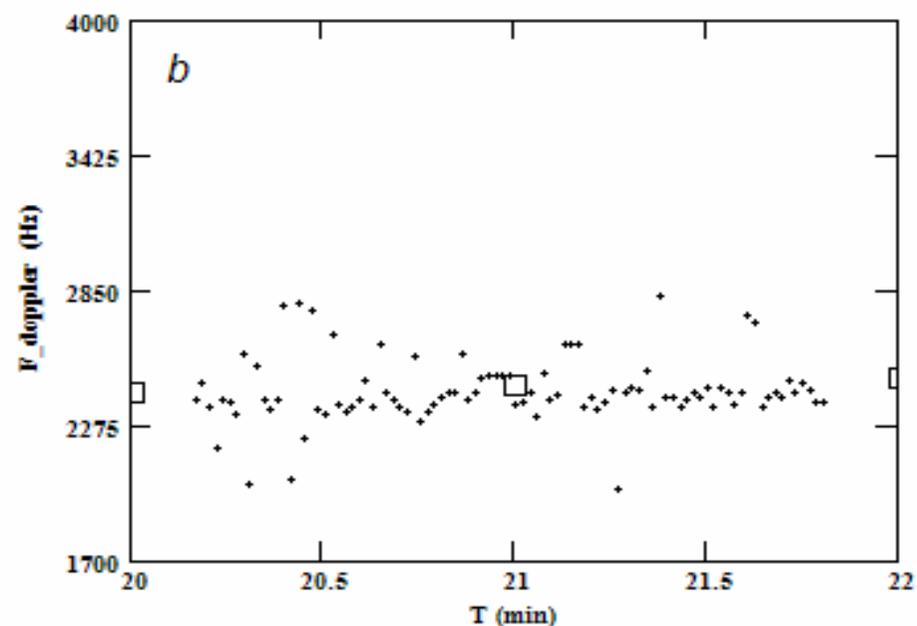
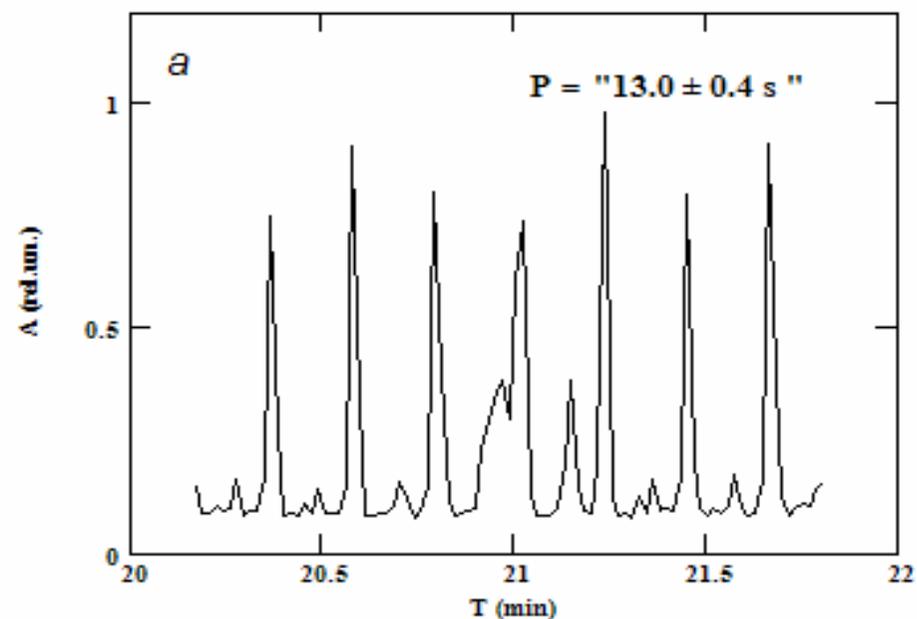
**12 сентября 2008 г.**

База:

**Вентспилс-Евпатория**

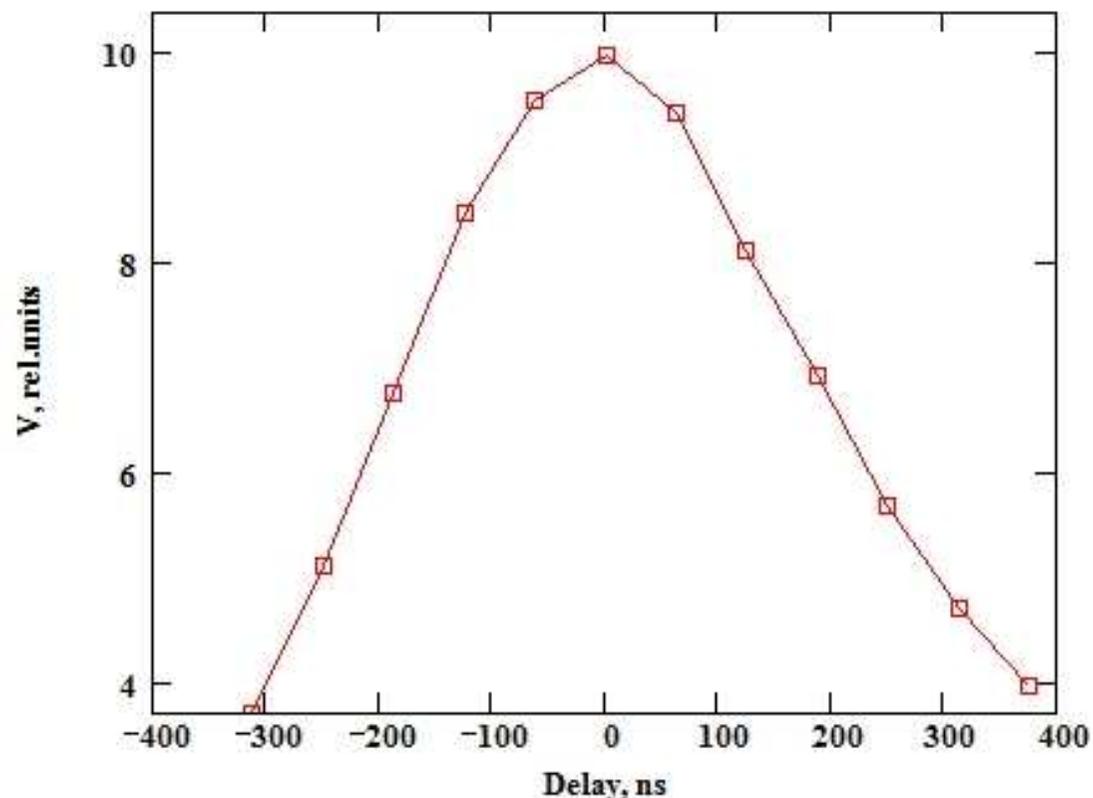
**График временной зависимости максимума спектра мощности, измеренной для объекта 95069**

**График временной зависимости частоты сдвига Доплера, измеренной для объекта 95069**



## 2. Взаимная корреляция эхо-сигналов, принятых в РСДБ-пунктах (РСДБ)

Пример  
корреляционной  
функции при  
приёме  
широкополосного  
сигнала от КО



26 октября 2010 г.  $F=1.6$  ГГц

Аппарат Космос 36400. База Зимёнки - Старая Пустынь

Полоса регистрации 8 МГц, полоса излучённого сигнала 10 МГц,

Разрешение по задержке  $d\tau=62$  нс

## 2.1. Локация широкополосным сигналом объекта, находящегося в дальней зоне:

### А) угловые координаты фазового центра излучения источника:

– из измерений временной задержки:

$$\tau_{H_i} = \frac{1}{c} \left[ B_{X_i} \cos \delta \cos h + B_{Y_i} \cos \delta \sin h + B_{Z_i} \sin \delta \right] + \Delta \tau_{сф}$$

$$\Rightarrow \alpha, \delta$$

Точность определения угловых координат КА:

$$\varepsilon_{\alpha, \delta} = \frac{2\pi}{2\Delta\omega(c/w)} \frac{c}{B} \approx 2'' \Rightarrow \text{при } B = 1000 \text{ км, } \rho = 10 \text{ млн. км}$$

$$\varepsilon_L \approx 90 \text{ км}$$

### В) угловые скорости движения источника :

– из измерений частоты максимума спектра мощности:

$$\Omega_i = \delta\omega + \frac{\omega_0}{c} \left\{ \left( -\sin \delta_H \cosh h_H \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} - \sin h_H \cos \delta_H \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \right) B_{X_i} + \left( -\sin \delta_H \sin h_H \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} + \cosh h_H \cos \delta_H \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \right) B_{Y_i} + \cos \delta_H \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} \cdot B_{Z_i} \right\},$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \frac{\partial \delta}{\partial t}$$

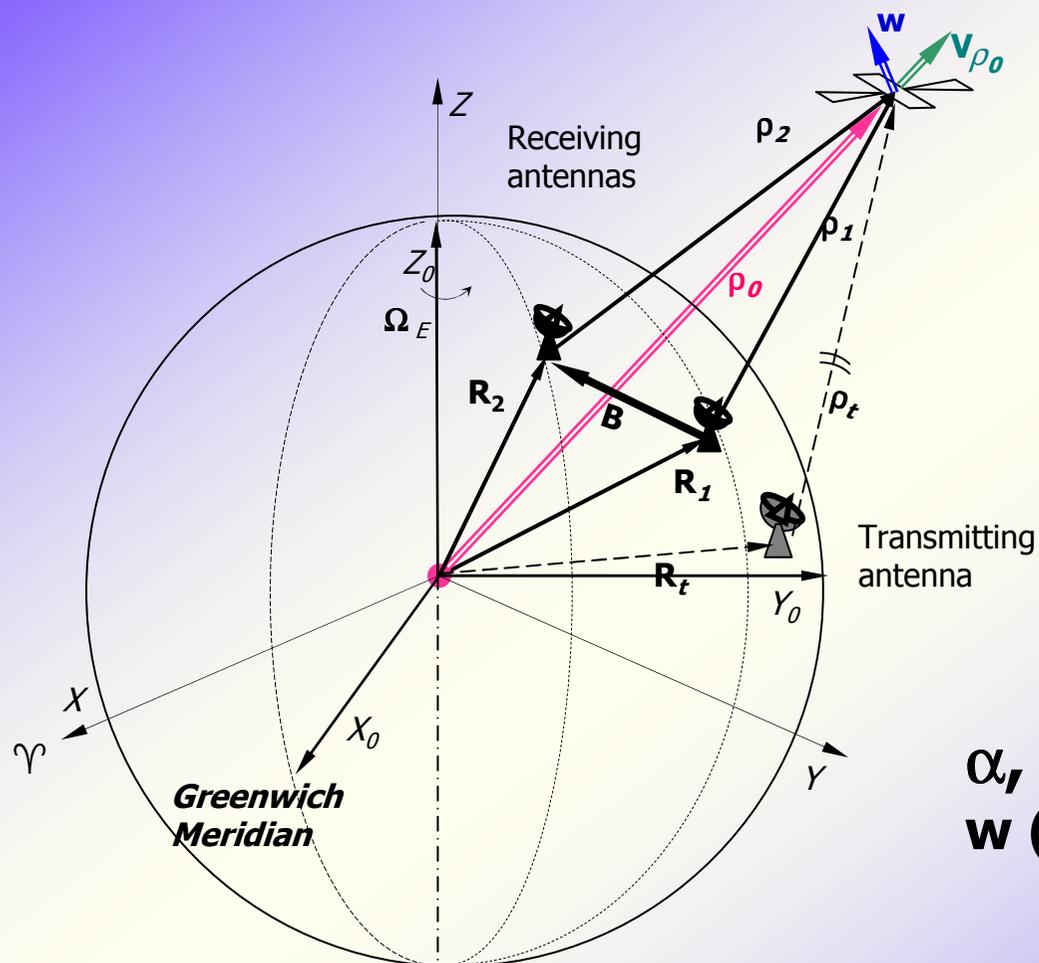
Точность определения угловых скоростей КА:

$$\varepsilon_{W_{\alpha, \delta}} = \frac{c}{B\omega_0} \frac{1}{T(c/w)} \approx 10^{-3} \text{ угл.с / с} \Rightarrow \text{при } \omega_0 = 5 \text{ ГГц, } T = 10 \text{ с:}$$

$$\varepsilon_{W_L} = 60 \text{ м / с}$$

## Частота интерференции при локации объекта в ближней зоне монохроматическим сигналом:

$$\omega_{\text{int}} = \frac{\omega_0}{c} \left[ V_{\rho_0} \mathbf{e}_{\rho_0} (\mathbf{e}_{\rho_{i1}} - \mathbf{e}_{\rho_{i2}}) + \left( \frac{1}{\rho_{i2}} - \frac{1}{\rho_{i1}} \right) \rho_0 [\mathbf{R}_1, (\mathbf{w} - \boldsymbol{\Omega}_E)] + \frac{\rho_0}{\rho_{i2}} [\mathbf{B}, (\mathbf{w} - \boldsymbol{\Omega}_E)] \right] + \delta\omega$$



где  $\mathbf{B}$  – вектор базы интерферометра,  $\rho_{i1}$  и  $\rho_{i2}$  – векторы от приёмного пункта до КО,  $\mathbf{e}_{\rho_0}$ ,  $\mathbf{e}_{\rho_{i1}}$  и  $\mathbf{e}_{\rho_{i2}}$  – единичные векторы в направлении векторов  $\rho_0$ ,  $\rho_{i1}$  и  $\rho_{i2}$ ;  $\rho_{i1}$ ,  $\rho_{i2}$  – длины соответствующих векторов;  $V_{\rho_0}$  – радиальная составляющая скорости КО относительно центра масс Земли,  $\boldsymbol{\Omega}_E$  – вектор угловой скорости вращения Земли.

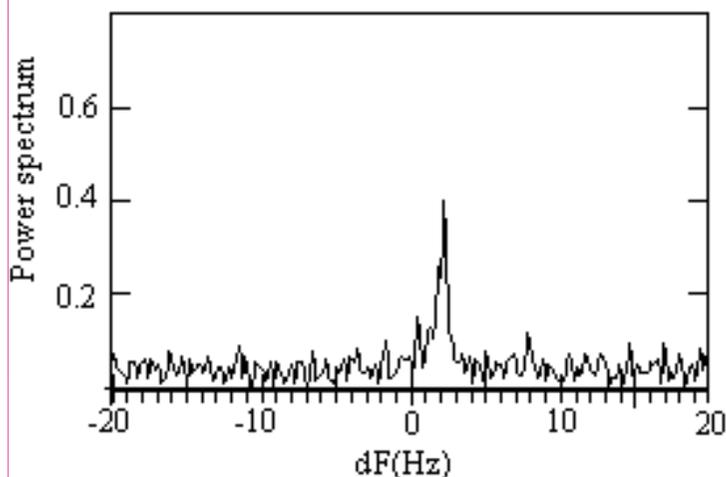
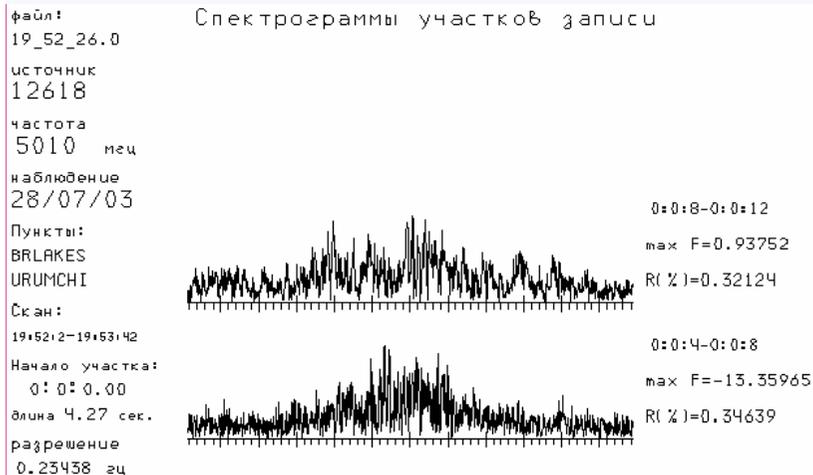
### Искомые параметры:

$\alpha, \delta$  – **угловые координаты**  
 $\mathbf{w} (w_\alpha, w_\delta)$  – **угловая скорость**

$\rho_0 (\rho_x, \rho_y, \rho_z)$  и  $V_{\rho_0}$  известны из локационных измерений

# Пример спектров мощности при приёме монохроматического сигнала

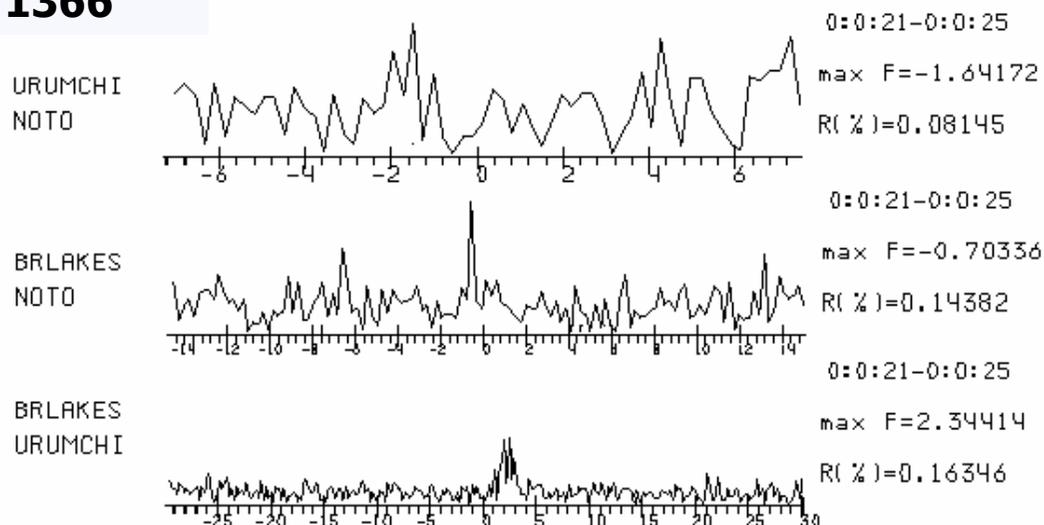
**"Raduga-9"; Urumqi-Bear Lakes;  
28 July 2003, 19:52; df=0.2 Hz**



**"Cosmos-1366", Urumqi-Bear Lakes;  
25 July 2003, 22:22; df=0.2 Hz**

## Кросскорреляционные спектры для ЭХО-сигналов от спутников на комплексе Медвежьи Озера - Ното - Урумчи:

**Cosmos-1366** 25/07/03 22:22:21



При использовании планетного локатора с узкой ДН метод РСДБ-локации эффективен для уточнения параметров орбит.

Точность может быть повышена за счёт применения **многоэлементных РСДБ с большими базами**, увеличения полосы шумового сигнала, **частоты** несущей излучённого сигнала, **времени накопления** при обработке.

**Точность измерения задержки:**

$$\delta\tau = \frac{2\pi}{2\Delta\omega}$$

При  $\Delta\omega = 2\text{МГц}$   $\delta\tau = 250\text{нс}$

**Точность измерения частоты интерференции:**

$$d\Omega = \frac{2\pi}{2T}$$

При  $T = 10\text{ с}$   $\frac{d\Omega}{2\pi} = 0.05\text{ Гц}$

В настоящее время параллельно в НИРФИ и в ВМРЦ ведётся создание новых **корреляторов**.

В ВМРЦ создаётся **программное обеспечение** для получения параметров орбит объектов из частот Допплера, полученных в предыдущих экспериментах по РСДБ-локации КО.

Исходя из полученных результатов предполагается **планирование новых РСДБ-сеансов** по мере готовности к работе планетного локатора РТ-70 в Евпатории и приёмных пунктов РСДБ-сети, включающих, в частности, радиотелескопы РТ-32 в **Вентспилсе и Мединине**.

## Список литературы:

Алексеев В.А., Алтунин В.И., Антипенко А.А., Горшенков Ю.Н., Дементьев А.Ф., Князев Н.А., Липатов Б.Н. и др. **Длиннобазовая узкополосная радиоинтерферометрия для космической навигации. II. Орбитальные аппараты: измерения координат ИСЗ «Астрон».** //Космические исследования. 1989. Т. 27, № 5. С. 765 – 771.

В.А. Алексеев, Б.Н. Липатов, В.Э. Резникова. **Радиолокационная длиннобазовая интерферометрия: анализ возможностей применения для определения характеристик вращения планет.** //Изв. ВУЗов Радиофизика. 2000. Т. 43, №8. С. 675-681.

М.Б. Нечаева, А.А. Антипенко, А.Ф. Дементьев, Н.А. Дугин, С.Д. Снегирев, Ю.В. Тихомиров. **РСДБ-исследования в Научно-исследовательском радиофизическом институте.** //Изв.ВУЗов Радиофизика, 2007. Т.50, №7. С. 577-592.

Молотов И.Е., Нечаева М.Б., Коноваленко А.А., Туккари Дж., Лю Ш., Дементьев А.Ф., Антипенко А.А., Дугин Н.А., Пушкарев А.Б., Агапов В.М., Титенко В.В., Шишов В.А., Степаньянц В.А., Фалькович И.С., Вольвач А.Е., Горшенков Ю.Н., Харламов Г.Ю., Орешко В.В., Языков В.П. **Развитие метода РСДБ-локации в проекте LFVN.** //Изв. ГАО. 218. 2006. С. 402-414.

I. Molotov, M. Nechaeva, I. Falkovich, A. Konovalenko, V. Agapov, G. Tuccari, G. Pupillo, S. Montebugnoli, G. Kharlamov, L. Benner, V. Fateev, Y. Burtsev, A. Volvach, X. Liu, V. Oreshko, I. Shmelds, P. Bolli, A. Dementiev, A. Antipenko, N. Dugin, V. Jazykov, D. Bezrukov. **Astrometry of the Solar System Bodies with VLBI Radar.** // «Measuring the Future», Proceedings of the Fifth IVS General Meeting, A. Finkelstein, D. Behrend (Eds.). StPb: Nauka, 2008. PP. 30-36.

**Исследования поддержаны Европейским социальным фондом  
(проект №2009/0231/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/151) и  
Европейским фондом регионального развития  
(проект SATTEH №2010/0189/2DP/2.1.1.2.0/10/APIA/VIAA/019)**