

Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон

Литвинов Дмитрий Александрович

**защита диссертации
на соискание ученой степени к.ф.-м.н.**

специальности:

01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

01.04.03 – «Радиофизика»

научные руководители:

С.В. Пилипенко

В.Н. Руденко

Введение: эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ) и его экспериментальные проверки

1. Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью космических аппаратов (КА), оборудованных высокостабильными стандартами частоты и времени
2. Эффект движения фазового центра антенны в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за КА
3. Проверка ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон на основе данных однопутевых доплеровских измерений

Заключение

Эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ):

Слабый принцип эквивалентности

универсальность свободного падения

Локальная позиционная инвариантность

независимость результатов негравитационного эксперимента от места и времени

Локальная лоренц-инвариантность

независимость результатов негравитационного эксперимента от скорости и ориентации лаборатории

справедливость ЭПЭ → метрический характер гравитации

Мотивация проверок – единые теории поля:

петлевая квантовая гравитация, теория струн



нарушение ЭПЭ

Феноменологические модели нарушения:

c^2 -формализм, SME

Экспериментальные поиски нарушений:

СПЭ: крутильные весы, MICROSCOPE

ЛЛИ: дисперсия и анизотропия скорости света

ЛПИ: гравитационное красное смещение, дрейф
фундаментальных констант

Введение: ЭПЭ и его экспериментальные проверки

Нарушение ЛПИ:
$$\frac{\nu_a}{\nu_b} = 1 - \frac{1}{c^2} \left(U_b - U_a + \frac{v_b^2 - v_a^2}{2} + \varepsilon_b U_b - \varepsilon_a U_a \right)$$

■ «Нулевые» тесты:

одинаковый грав. потенциал

$$\text{сигнал} = \frac{1}{c^2} (\varepsilon_b - \varepsilon_a) U$$

Guen+ (2012), Peil+ (2013)

■ «Классические» тесты:

различный грав. потенциал

$$\text{сигнал} = \frac{1}{c^2} (1 + \varepsilon) (U_b - U_a)$$

(одинаковые часы)

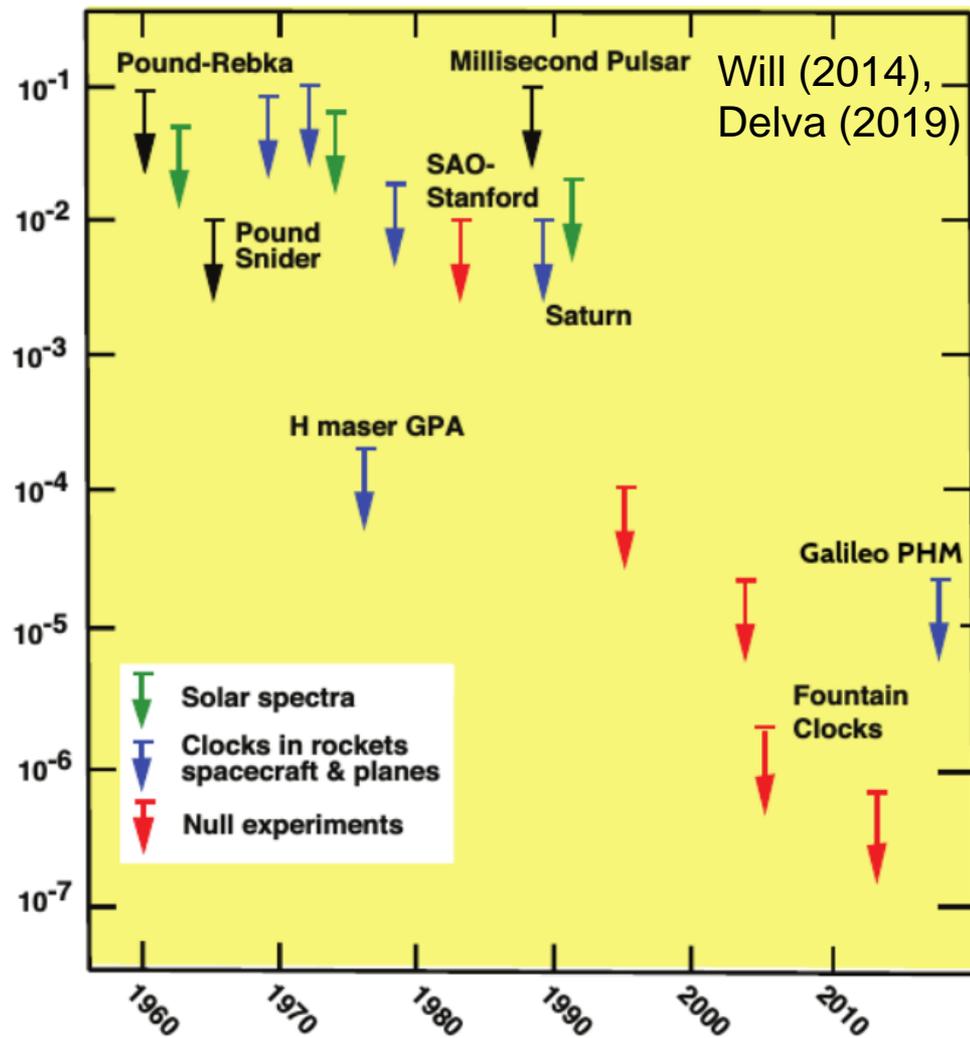
Gravity Probe A (1976),

Галилео (2018),

РадиоАстрон (планируем 2022),

ACES (2022+), STE-QUEST (>2025)

$\delta\varepsilon$



Введение: эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ) и его экспериментальные проверки

1. Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью космических аппаратов (КА), оборудованных высокостабильными стандартами частоты и времени
2. Эффект движения фазового центра антенны в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за КА
3. Проверка ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон на основе данных однопутевых доплеровских измерений

Заключение

Простейшая модель эффекта гравитационного красного смещения с нарушением ЭПЭ:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = (1 + \varepsilon) \frac{\Delta U}{c^2}$$

Полная модель:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{U_{\text{E}}^{(1)} - U_{\text{E}}^{(2)}}{c^2} + \frac{\varepsilon_{\text{E}}^{(1)} U_{\text{E}}^{(1)} - \varepsilon_{\text{E}}^{(2)} U_{\text{E}}^{(2)}}{c^2} + \frac{\varepsilon_{\text{S}}^{(1)} U_{\text{S}}^{(1)} - \varepsilon_{\text{S}}^{(2)} U_{\text{S}}^{(2)}}{c^2} + \frac{\varepsilon_{\text{M}}^{(1)} U_{\text{M}}^{(1)} - \varepsilon_{\text{M}}^{(2)} U_{\text{M}}^{(2)}}{c^2} + \dots$$

Рассмотренный нами случай: параметр нарушения ЭПЭ не зависит от типа часов и источника гравитационного поля

+ шум часов и расстройка частоты

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{U_{\text{E}}^{(1)} - U_{\text{E}}^{(2)}}{c^2} + \varepsilon \left(\frac{U_{\text{E}}^{(1)} - U_{\text{E}}^{(2)}}{c^2} + \frac{U_{\text{S}}^{(1)} - U_{\text{S}}^{(2)}}{c^2} + \frac{U_{\text{M}}^{(1)} - U_{\text{M}}^{(2)}}{c^2} + \dots \right) + \Delta f_0 + n(t)$$

Litvinov & Pilipenko, Clas. Quant. Grav., 2021

Спектральная плотность мощности (СПМ) шума сигнала часов

Часы	СПМ
VCH-1010	$1.5 \times 10^{-26} f^0 + 7.0 \times 10^{-31} f^{-1} + 3.5 \times 10^{-35} f^{-2}$
PHARAO	$5.0 \times 10^{-27} f^0 + 7.5 \times 10^{-33} f^{-1}$
JILA SrI	$2.0 \times 10^{-31} f^0 + 2.1 \times 10^{-36} f^{-1}$

Ковариационные матрицы шумов:

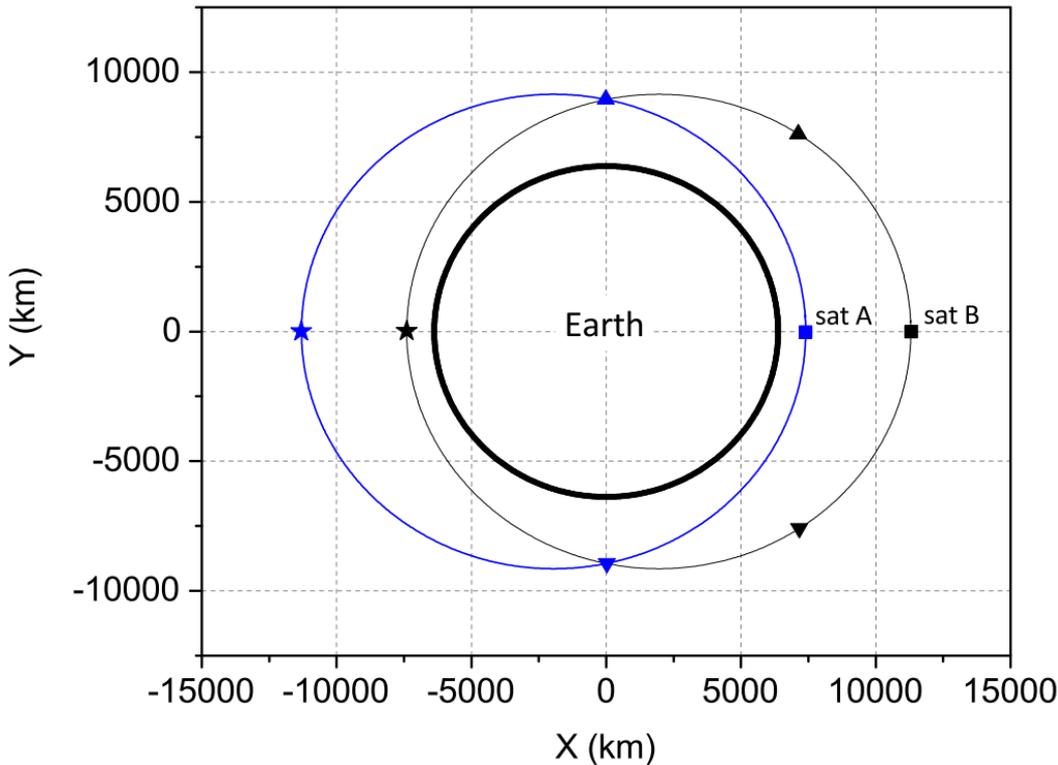
$$C_{ij}^0 = \Delta t^{-1} \delta_{ij},$$

$$C_{ij}^{-1} = 2\pi \sum_{m=1}^i \phi_m \phi_{i-j+m}, \quad \phi_m = \frac{\Gamma(m + 1/2)}{m! \Gamma(1/2)},$$

$$C_{ij}^{-2} = (2\pi)^2 \Delta t \min(i, j),$$

Точность оценки параметра ε – неравенство Крамера-Рао

Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью КА



Конфигурация эксперимента по проверке ЭПЭ с двумя КА на околоземной орбите. Параметры орбит согласно таблице, период 2,5 ч. Одинаковые символы отмечают одновременные положения двух КА.

Преимущества:
отсутствие атмосферы
непрерывное накопление

Период орбиты – параметр оптимизации (минимизируем ошибку оценки параметра ε)

Фиксированные параметры орбит КА

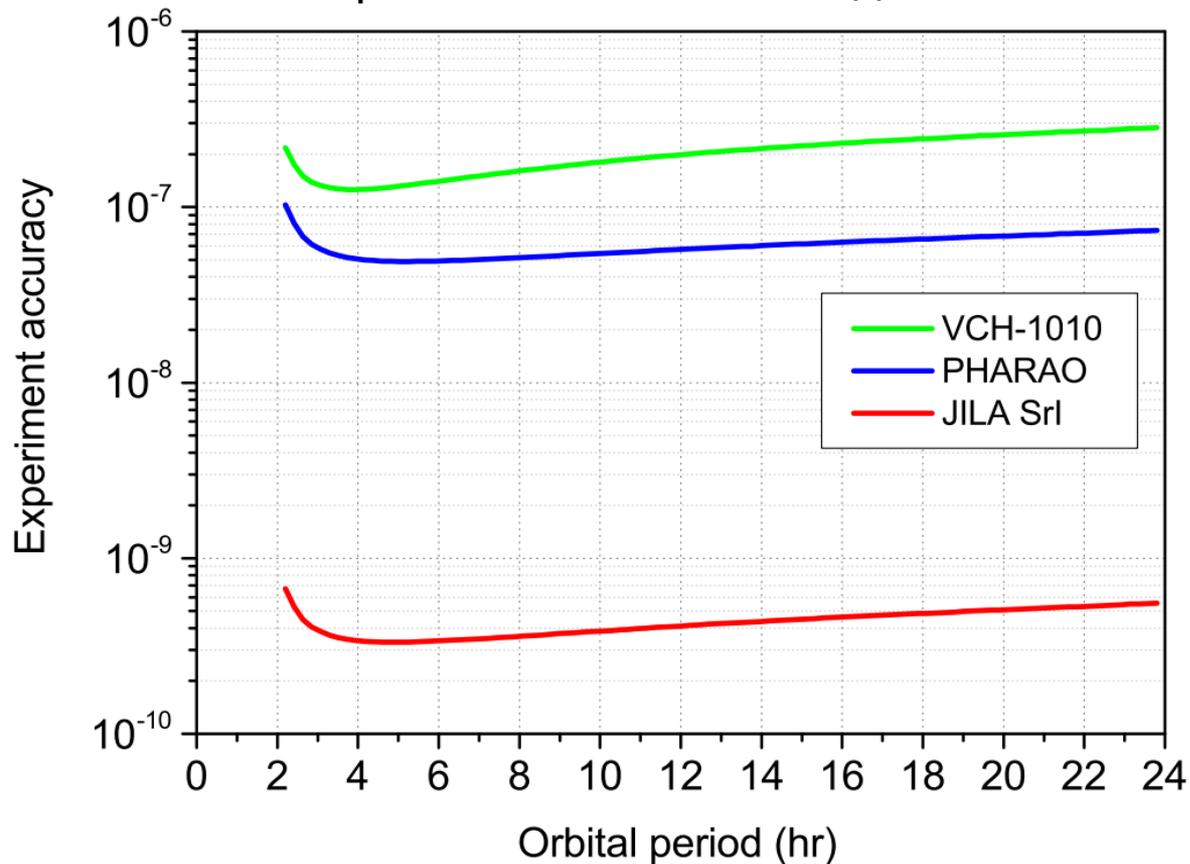
Параметр орбиты	Спутник 1	Спутник 2
Наклонение	0 град	0 град
Перигей	7,500 км	7,500 км
Долгота восходящего узла	0 град	0 град
Аргумент перигея	0 град	180 град
Средняя аномалия на эпоху	0 град	180 град

Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью КА

Точность эксперимента по проверке ЭПЭ с двумя спутниками на околоземной орбите в зависимости от периода орбит. Периоды спутников идентичны, остальные элементы орбит согласно таблице на слайде 11.

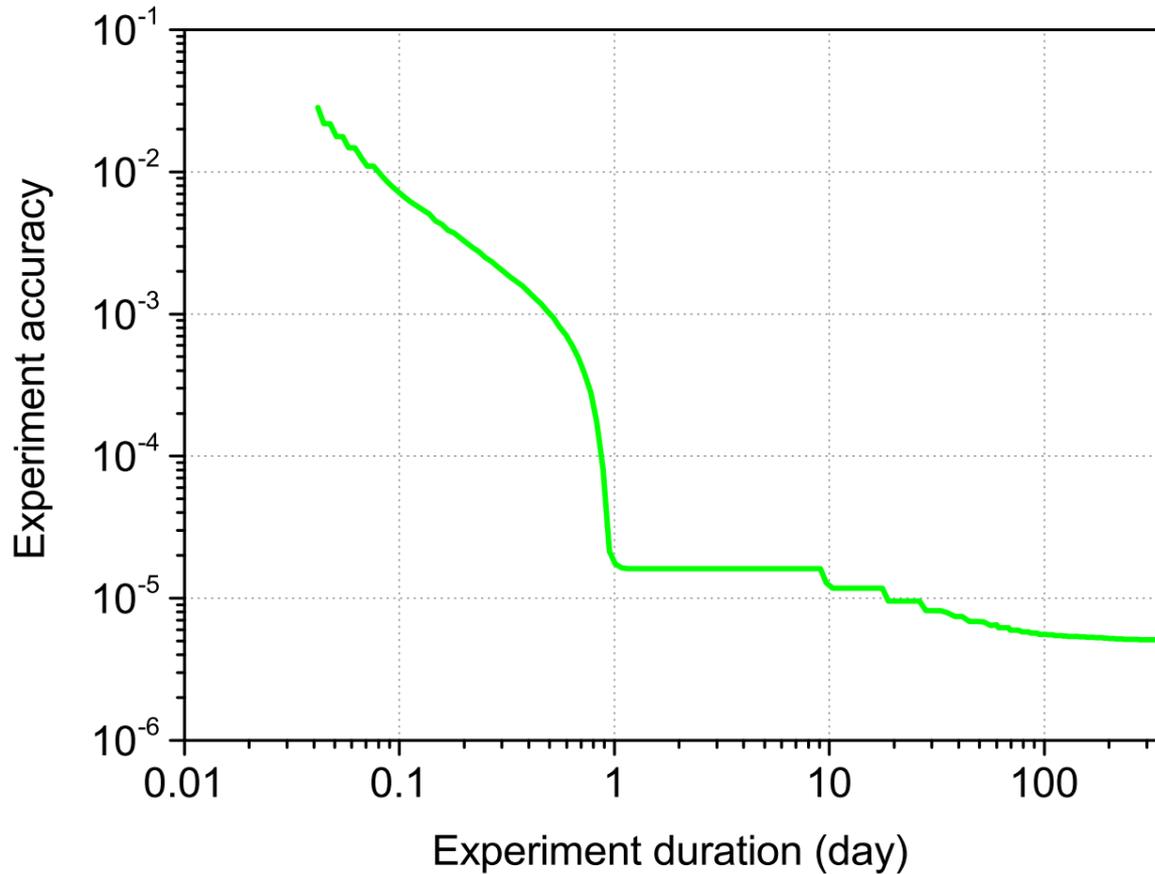
Часы: водородные VCH-1010, цезиевые PHARAO и стронциевые JILA Srl.

Время накопления: 3 года.



Минимумы:
VCH-1010 – 3.9 ч
PHARAO – 5.3 ч
JILA Srl – 4.8 ч

Litvinov & Pilipenko, Clas. Quant. Grav., 2021

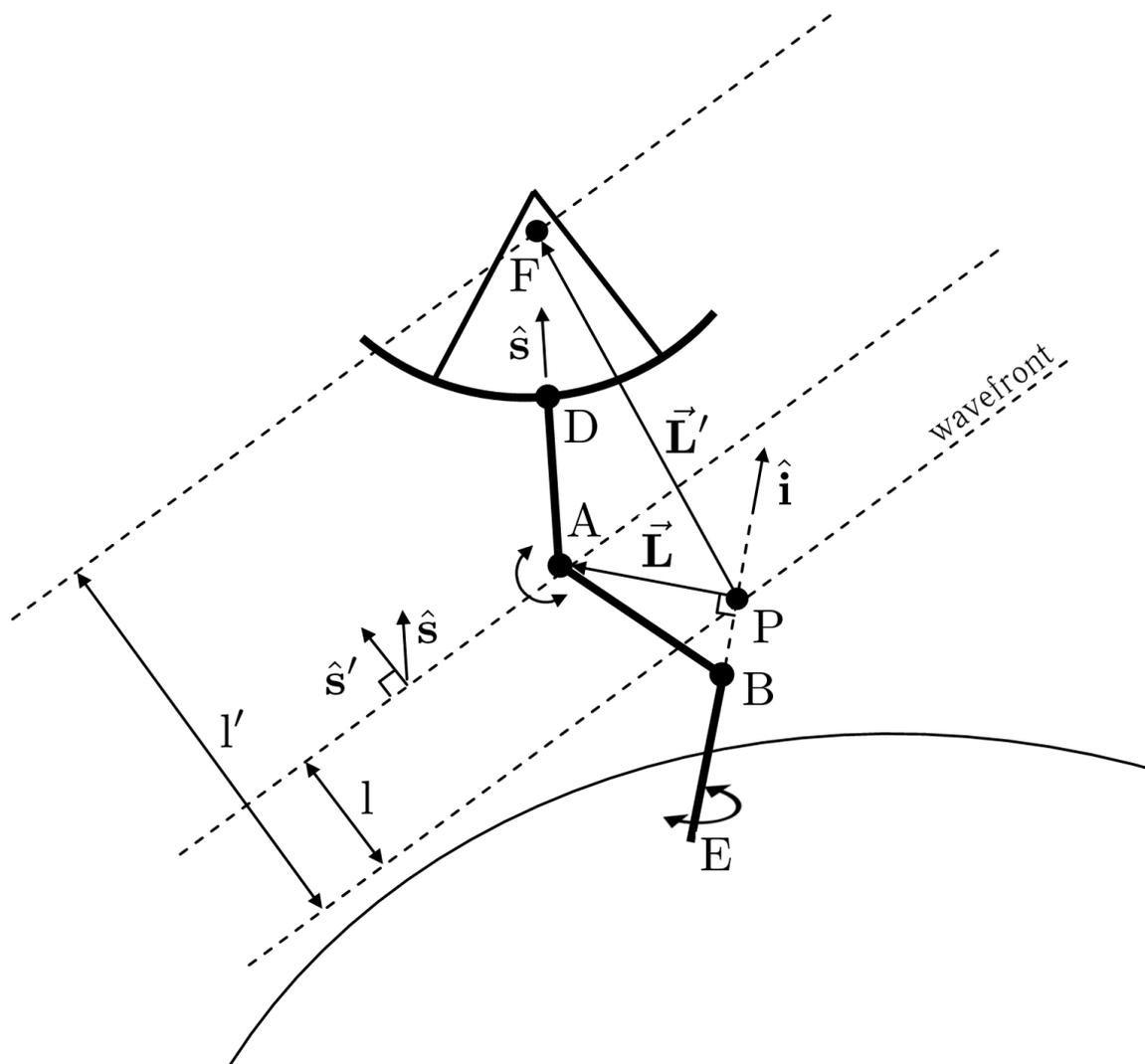


Точность эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью спутника РадиоАстрон.
Наземная станция слежения: Грин Бенк.
Интервал накопления: 01.01.2014 – 01.01.2015.

Введение: эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ) и его экспериментальные проверки

1. Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью космических аппаратов (КА), оборудованных высокостабильными стандартами частоты и времени
2. Эффект движения фазового центра антенн в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за КА
3. Проверка ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон на основе данных однопутевых доплеровских измерений

Заключение



Переменный набег фазы:

$$l' = \hat{s}' \cdot \mathbf{L}'$$

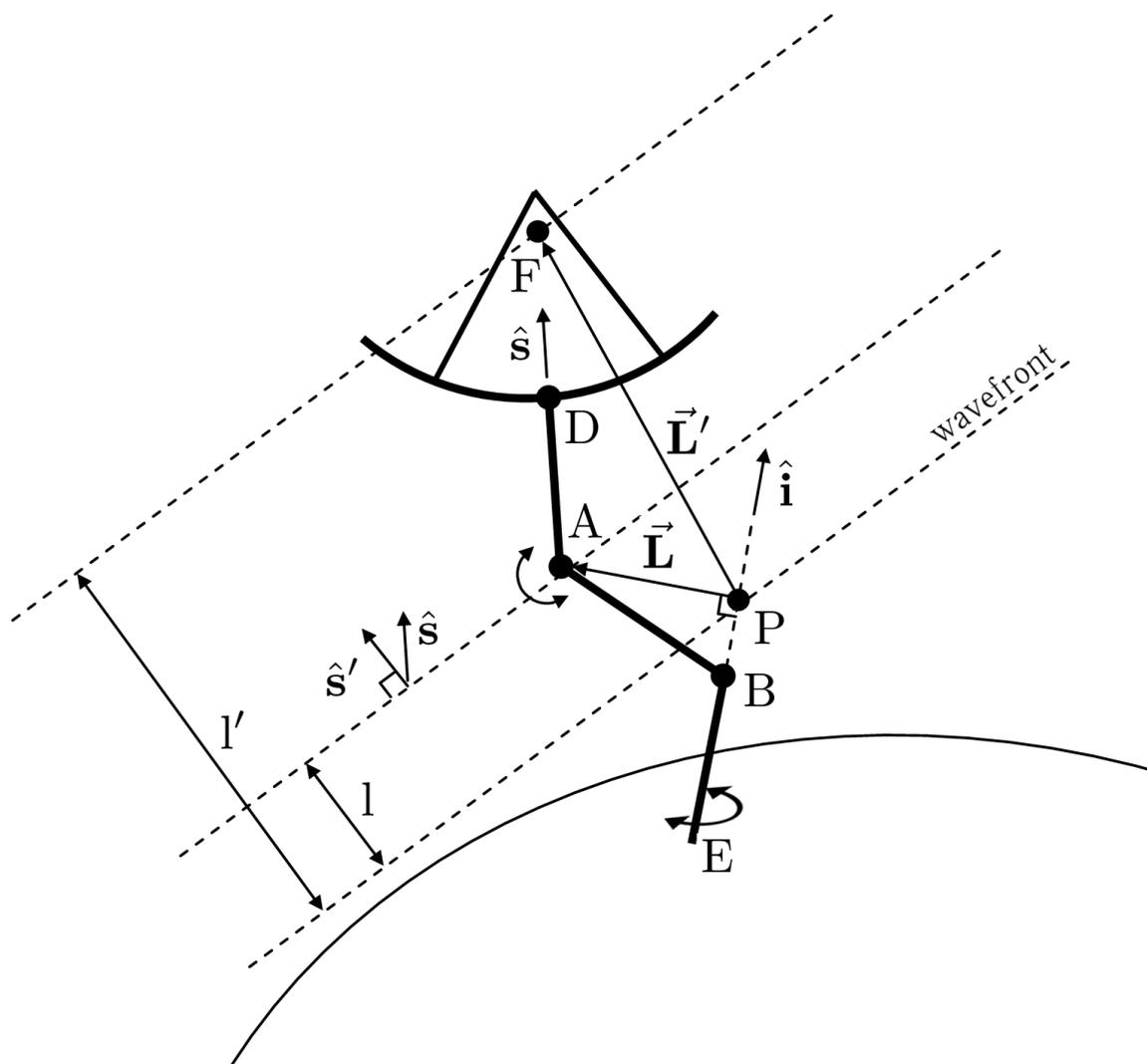
Зависит от:

- 1) направления распространения волнового фронта;
- 2) ориентации антенны

Новизна:

- 1) учет ошибок наведения
 $\hat{s} \neq \hat{s}'$
- 2) учет ошибок оценки эффекта

Litvinov et al., Adv. Space Res. 2021



Сдвиг частоты:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} (\hat{s}' \cdot \mathbf{L}')$$

Малые ошибки:

$$\frac{\Delta f}{f} = \mp \frac{L}{c} \dot{\theta}' \sin \theta' + O(\delta\theta^2)$$

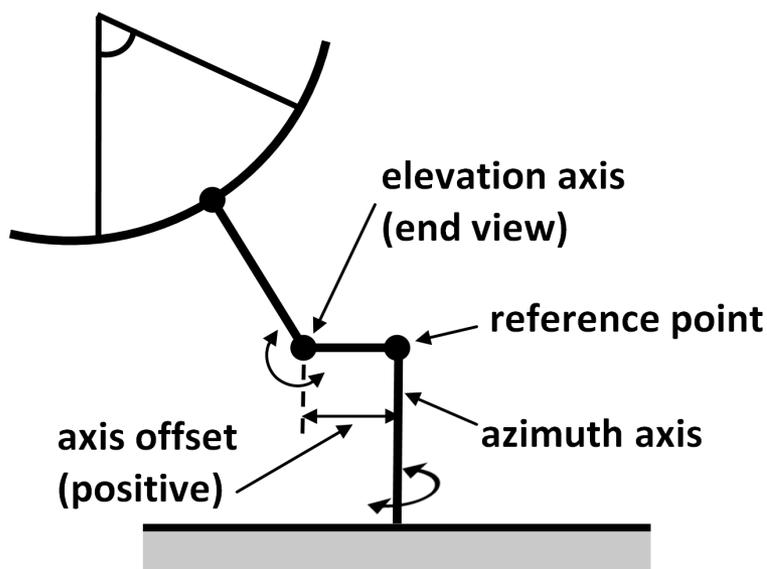
$$\delta \mathbf{s} = \hat{s}' - \hat{s}$$

$$|\delta \mathbf{s}| \ll 1$$

$$\theta' = \frac{\pi}{2} - \angle(\hat{s}', \hat{\mathbf{i}})$$

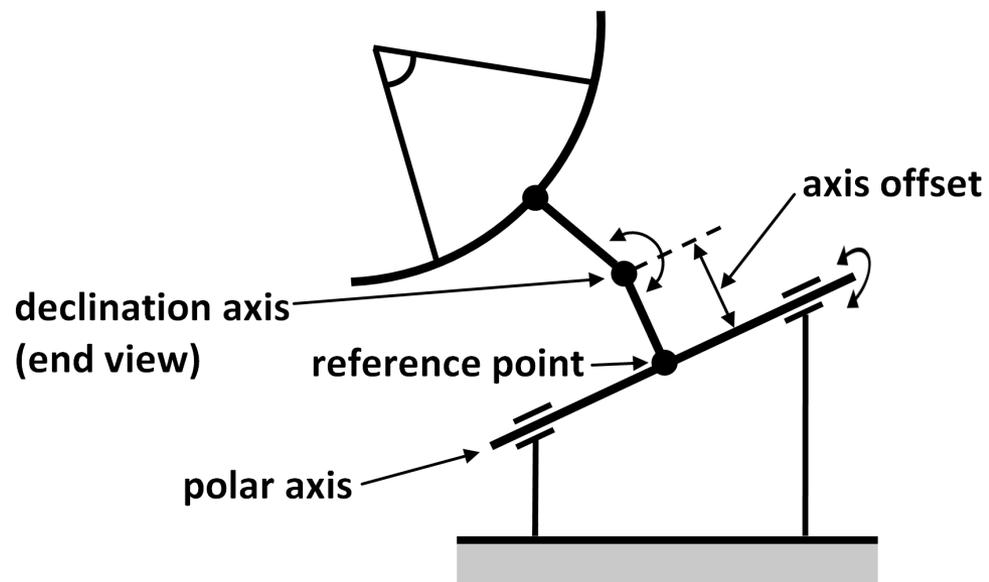
$$\delta \theta = \theta' - \theta$$

Альт-азимутальная монтировка
(пример: Пушино РТ-22)



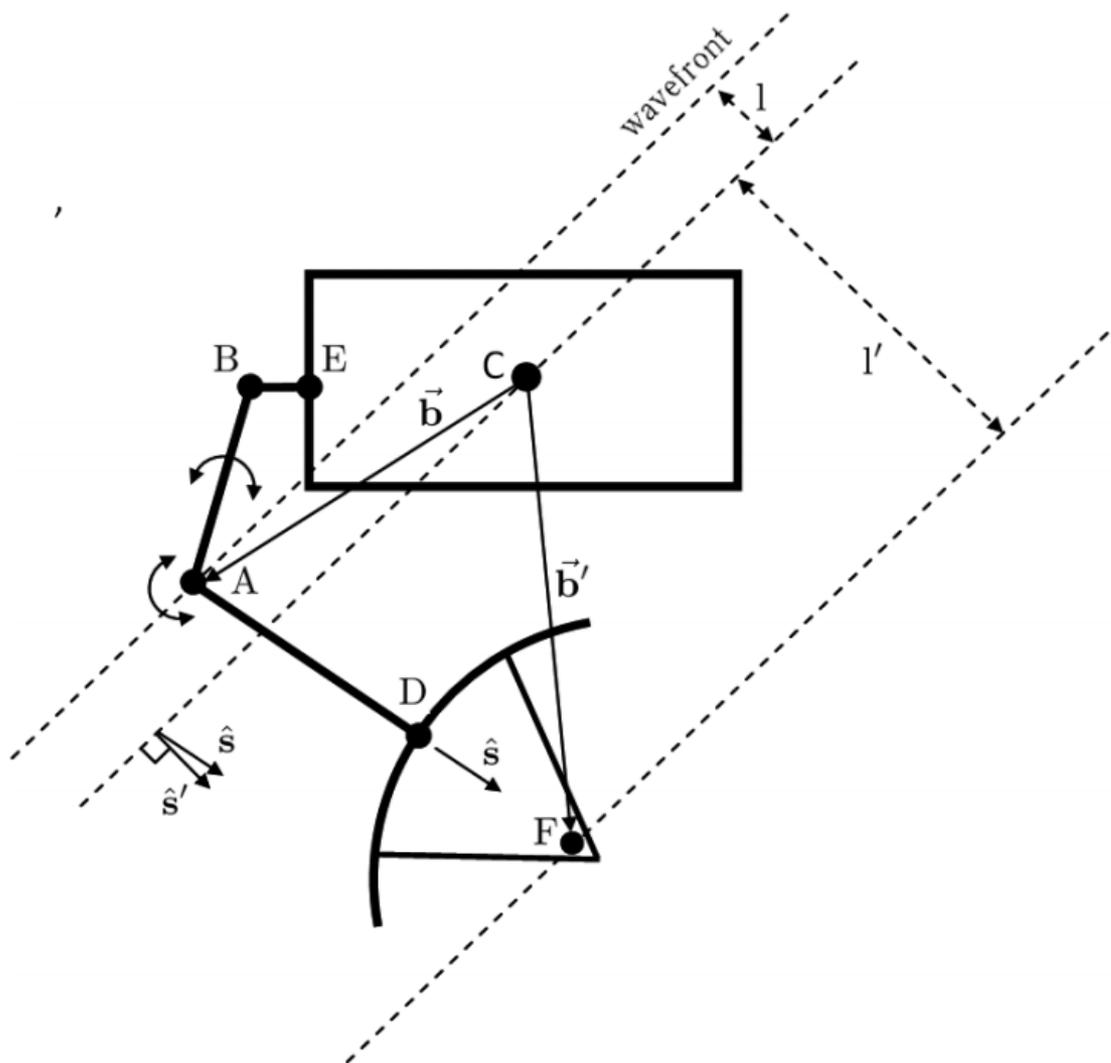
$$\frac{\Delta f}{f} = \mp (L/c) \dot{\gamma}' \sin \gamma'$$

Экваториальная монтировка
(пример: NRAO140)



$$\frac{\Delta f}{f} = \mp (L/c) \dot{\delta}' \sin \delta'$$

Случай бортовой антенны



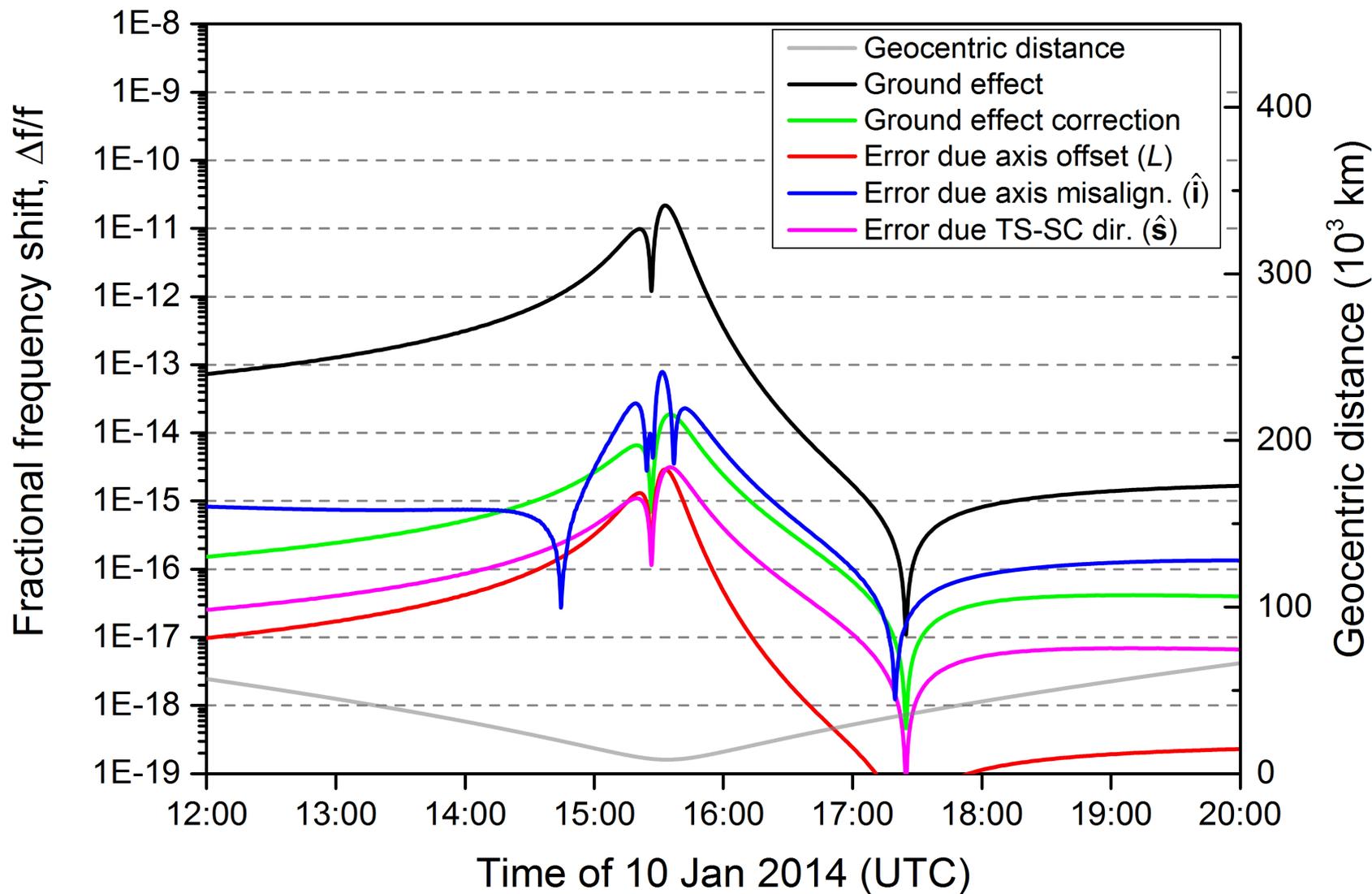
$$l' = (\mathbf{b}' \cdot \hat{\mathbf{s}}')$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} (\mathbf{b} \cdot \hat{\mathbf{s}}') + O(\delta \mathbf{s}^2)$$

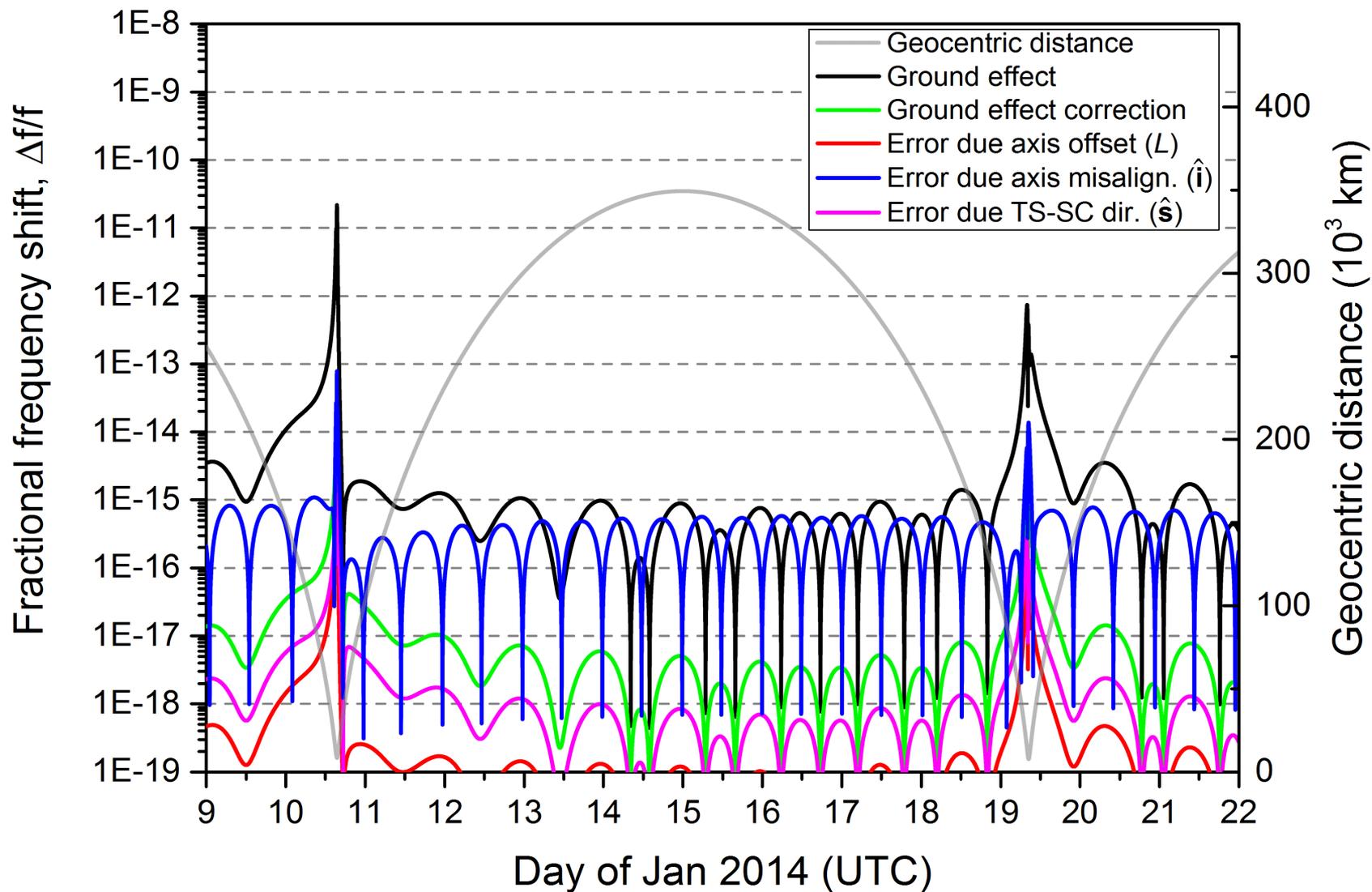
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{c} (\mathbf{b} \cdot \dot{\hat{\mathbf{s}}}') + O(\delta \mathbf{s}^2)$$

Неопределенности значений параметров, влияющих на расчетные значения эффекта движения фазового центра антенн для миссии РадиоАстрон и возможной будущей миссии космической РСДБ

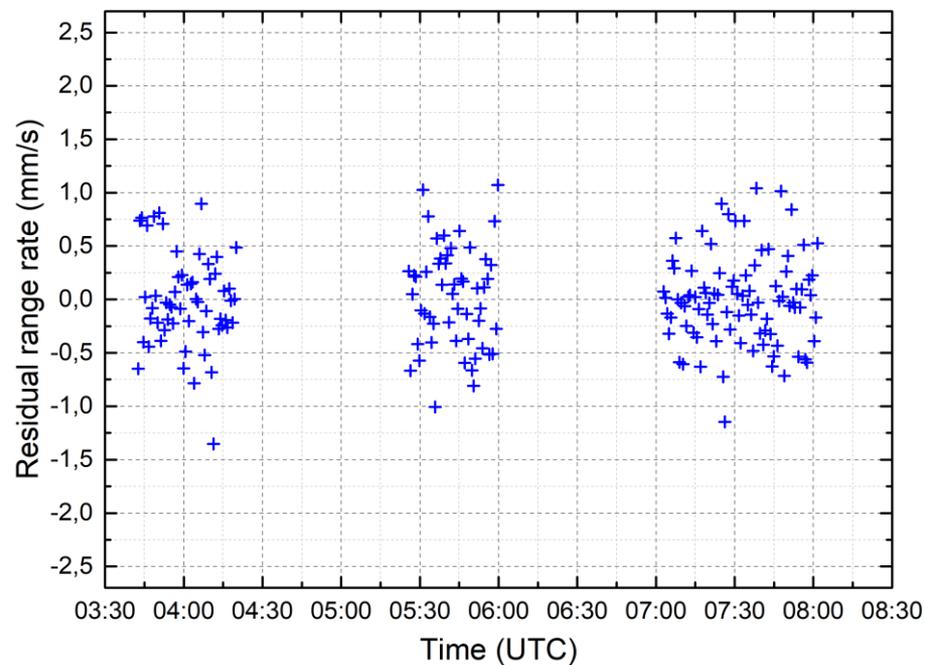
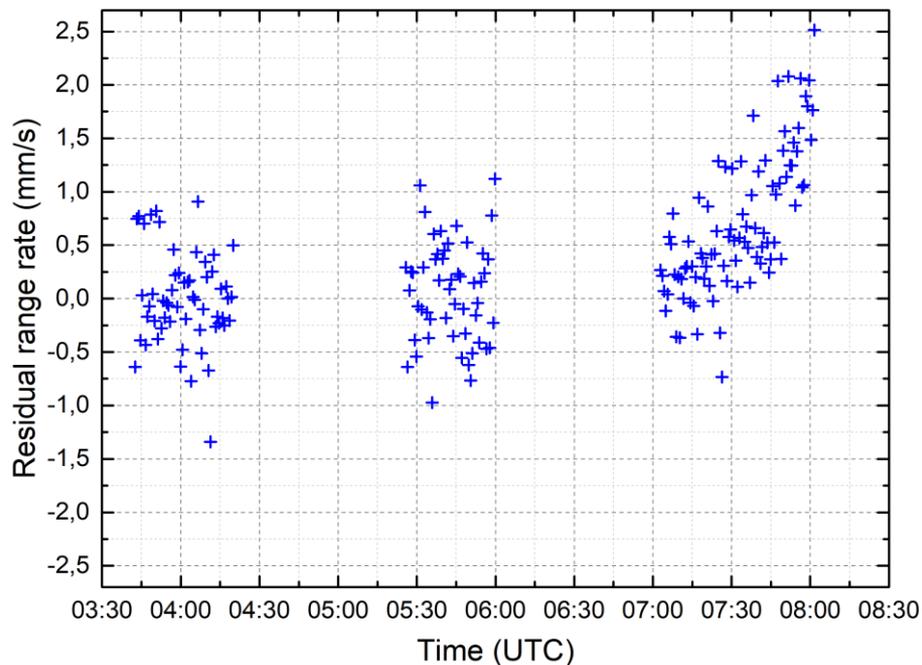
Источник ошибки	Параметр	РадиоАстрон	Будущая миссия КРСДБ
Неопределенность расстояния между осями наземной антенны	L	0.005 м	0.002 м
Отклонение оси наземной антенны от номинального	\hat{i}	5'	5'
Неточность положения фиксированной оси КА относительно его центра масс	\mathbf{b}	0.005 м	0.001 м
Неточность знания ориентации КА	\mathbf{b}	10''	1''
Неточность знания направления НСС-КА за счет неточности орбиты КА	\hat{s}	100м → 20''	10м → 2''



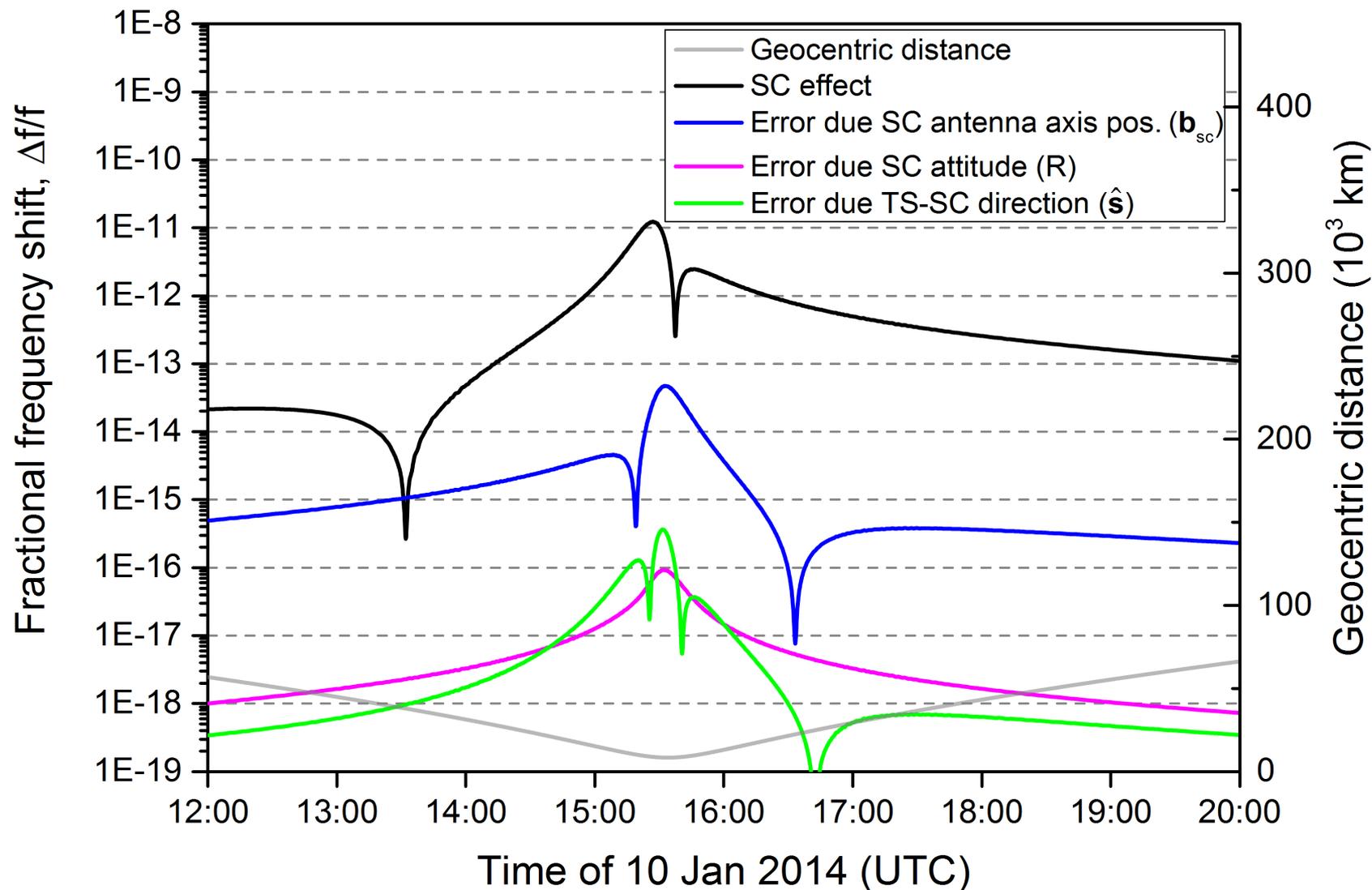
Эффект движения фазового центра для наземной антенны NRAO140 обсерватории Грин Бенк при слежении за КА РадиоАстрон



Эффект движения фазового центра для наземной антенны NRAO140 обсерватории Грин Бенк при слежении за КА РадиоАстрон



Частотные невязки для однопутевого сигнала 8.4 ГГц, посланного КА РадиоАстрон и принятого НСС Грин Бенк 19 января 2014. Слева эффект движения фазового центра обеих антенн (бортовой и наземной) не учтен, справа – учтен.

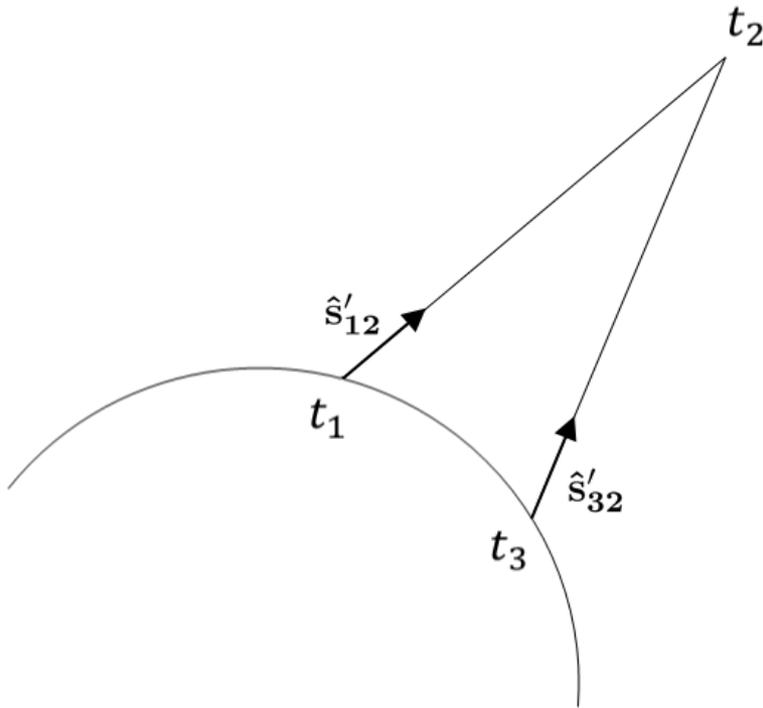


Эффект движения фазового центра для бортовой антенны КА РадиоАстрон при слежении за наземной антенной NRAO140 обсерватории Грин Бенк

Компенсация эффекта движения фазового центра антенн

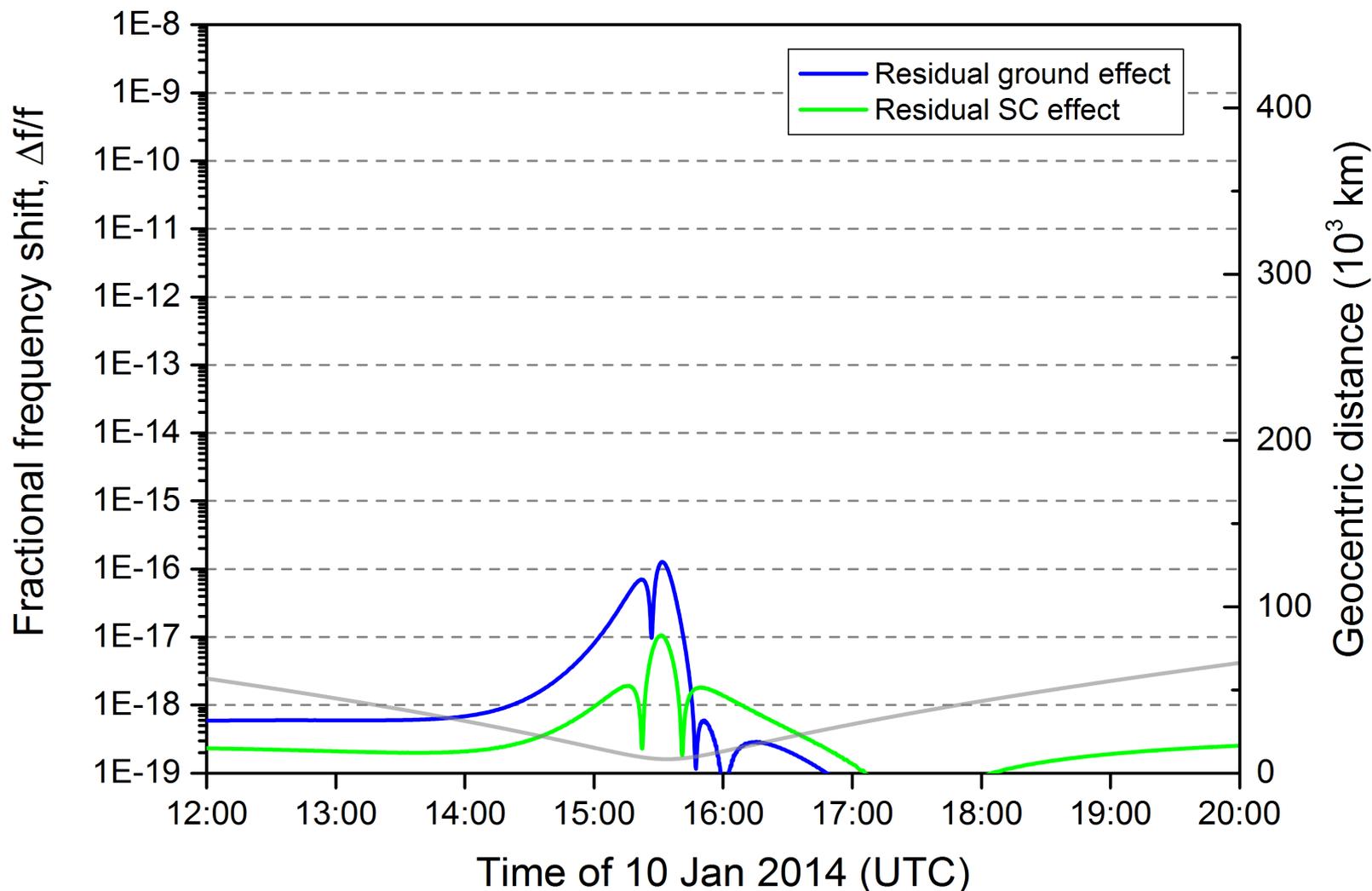
$$\Delta f_{1w} - \frac{\Delta f_{2w}}{2} = \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{kin}}^{(\text{res})} + \Delta f_{\text{media}}^{(\text{res})} + \Delta f_{\text{pcm}}^{(\text{res})} + \Delta f_{\text{other}}^{(\text{res})}$$

$$\Delta f_{\text{pcm}}^{(\text{res})} = \Delta f_{1w}^{(\text{pcm})} - \frac{\Delta f_{2w}^{(\text{pcm})}}{2}$$



Остаточный эффект – 2-го порядка по v/c :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f_{\text{pcm}}^{(\text{res})}}{f} = & \mp \frac{L}{c^2} \left\{ \frac{\dot{\theta}'}{\cos^2 \theta'} \left((\mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{s}}') \hat{\mathbf{s}}') \cdot \hat{\mathbf{i}} \right) \right. \\ & + \tan \theta' \left[\left((\mathbf{a} - (\mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{s}}') \hat{\mathbf{s}}' - (\mathbf{v} \cdot \dot{\hat{\mathbf{s}}}') \hat{\mathbf{s}}' - (\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{s}}') \dot{\hat{\mathbf{s}}}') \cdot \hat{\mathbf{i}} \right) \right] \left. \right\} \\ & - \frac{1}{c^2} \left(\mathbf{b}' \cdot \left(\mathbf{a} - (\mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{s}}') \hat{\mathbf{s}}' - (\mathbf{v} \cdot \dot{\hat{\mathbf{s}}}') \hat{\mathbf{s}}' - (\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{s}}') \dot{\hat{\mathbf{s}}}' \right) \right) \\ & + O(\delta\theta^2) + O(\delta\mathbf{s}^2) + O(v/c)^3, \end{aligned}$$

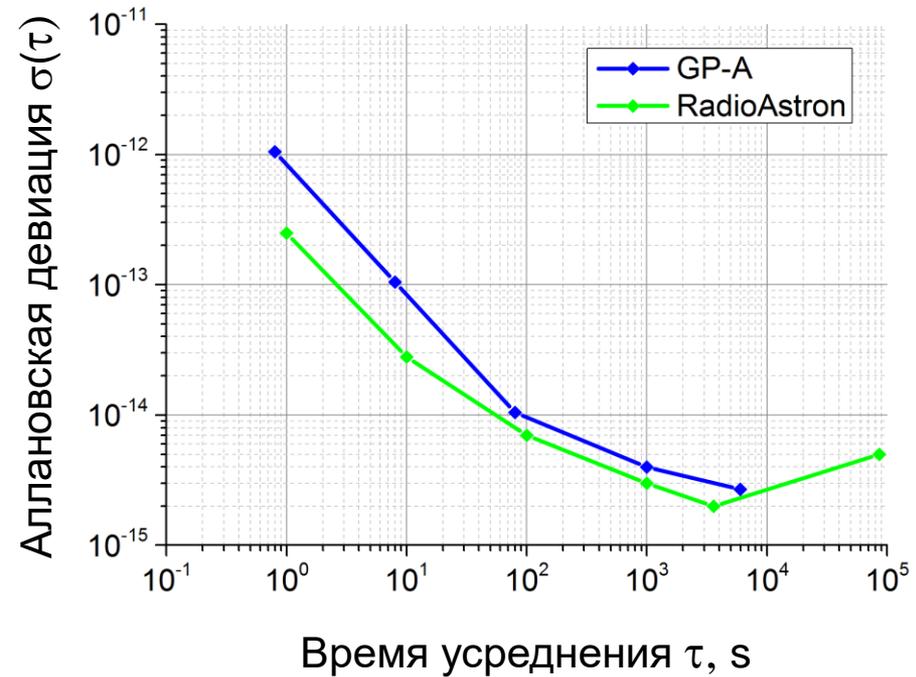
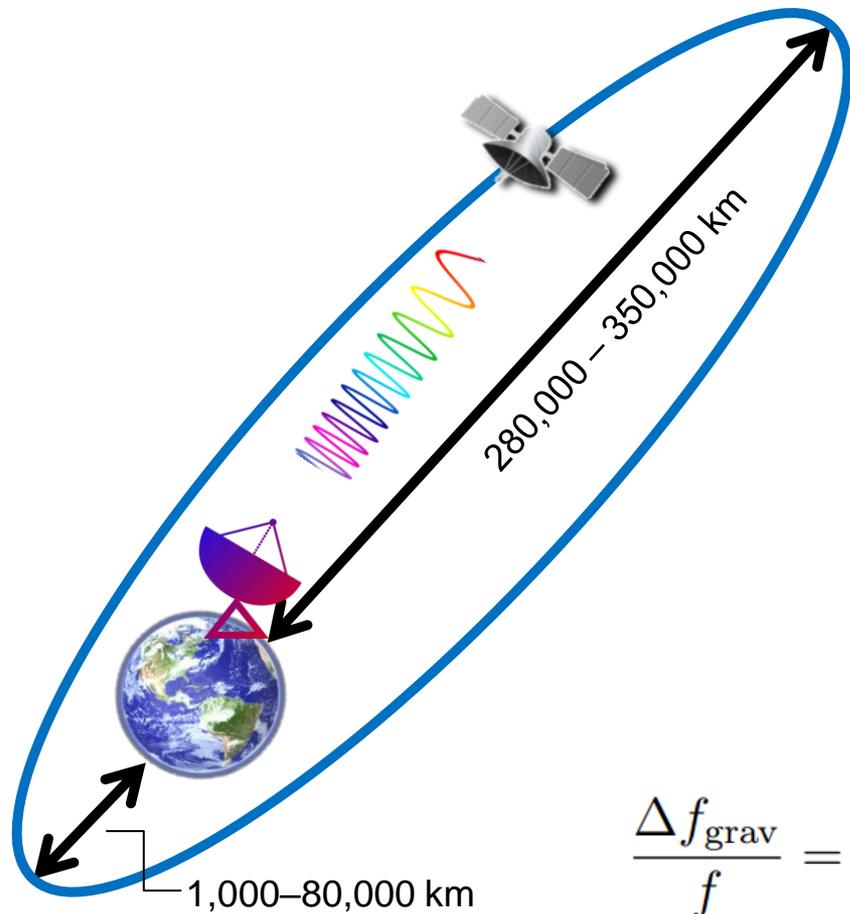


Остаточный эффект движения фазового центра для бортовой антенны КА РадиоАстрон и наземной антенны NRAO140

Введение: эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ) и его экспериментальные проверки

1. Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью космических аппаратов, оборудованных высокостабильными стандартами частоты и времени
2. Эффект движения фазового центра антенн в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами (КА)
3. Проверка ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон на основе данных однопутевых доплеровских измерений

Заключение



$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = (1 + \varepsilon) \frac{\Delta U}{c^2}$$

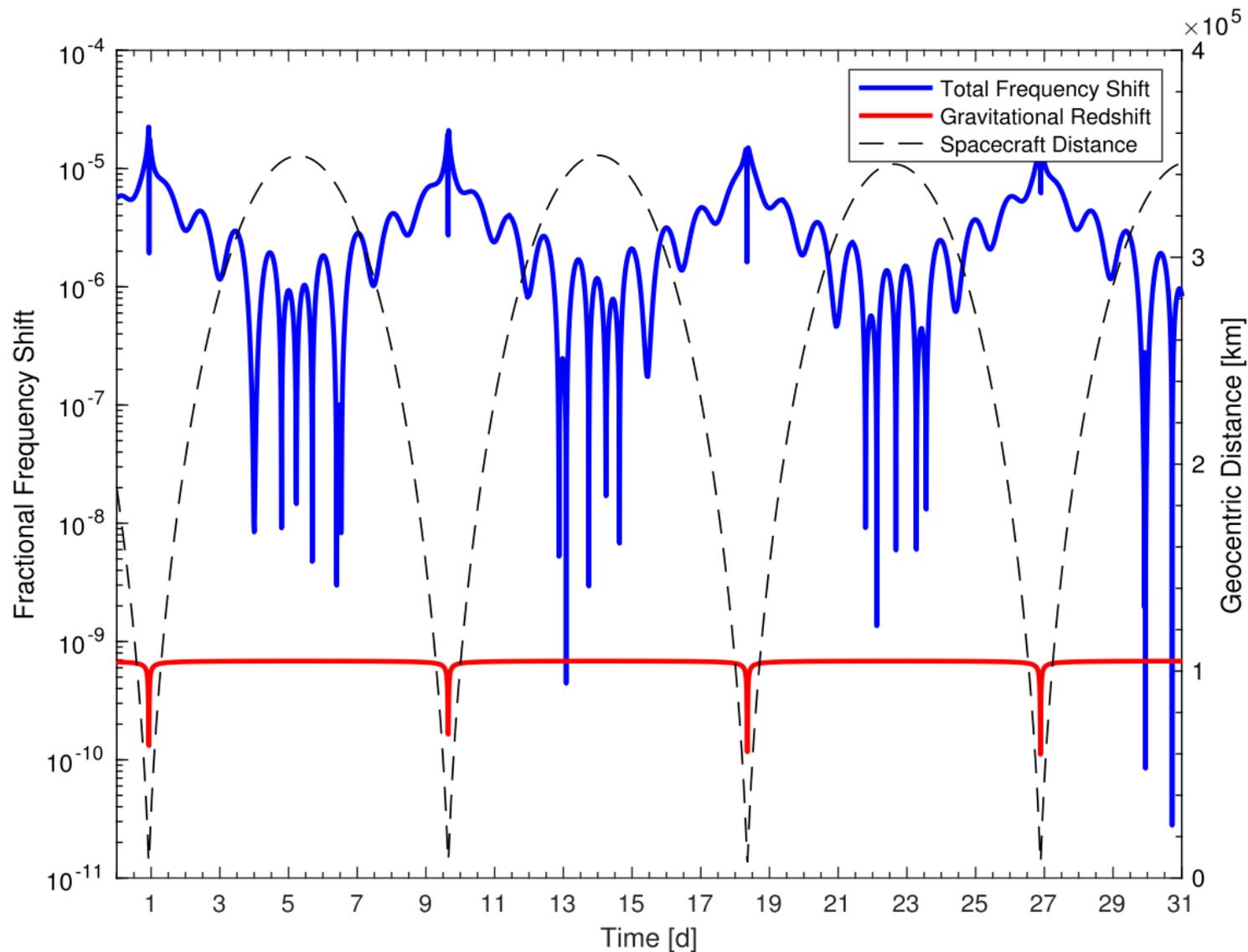
Модуляция эффекта:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = 0.4 \cdot 10^{-10} \div 5.8 \cdot 10^{-10}$$

По результатам обработки всех собранных данных ожидаем: $\delta\varepsilon < 10^{-4}$

Проблема: выделение гравитационного сигнала из измерений частоты принятого сигнала. Для однопутевого сигнала КА – наземная станция:

$$\Delta f_{1w} = f \left(-\frac{\dot{D}}{c} - \frac{v_s^2 - v_e^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})}{c^2} \right) + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{ion}} + \Delta f_{\text{trop}} + \Delta f_{\text{fine}} + \Delta f_0 + O\left(\frac{v}{c}\right)^3$$



Суммарный и гравитационный сдвиг частоты принятого на станции слежения Грин Бенк однопутевого сигнала с КА РадиоАстрон (январь 2014)

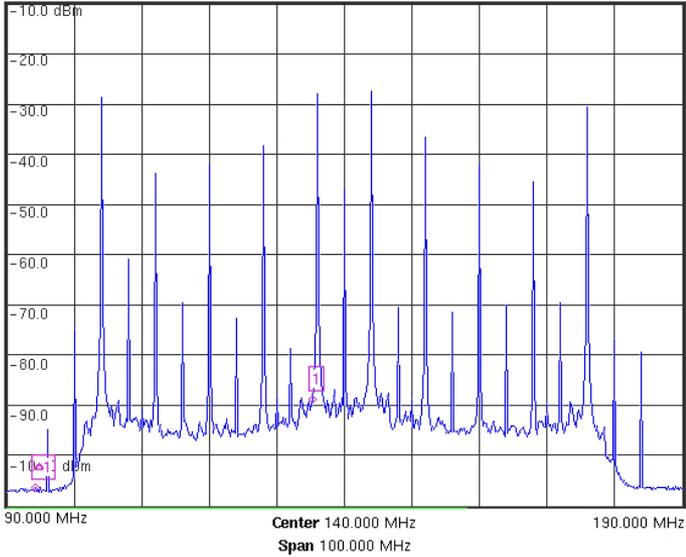
$$\Delta f_{1w} = f \left(-\frac{\dot{D}}{c} - \frac{v_s^2 - v_e^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})}{c^2} \right) + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{ion}} + \Delta f_{\text{trop}} + \Delta f_{\text{fine}} + \Delta f_0 + O\left(\frac{v}{c}\right)^3$$

Способы решения проблемы нерелятивистского эффекта Доплера:

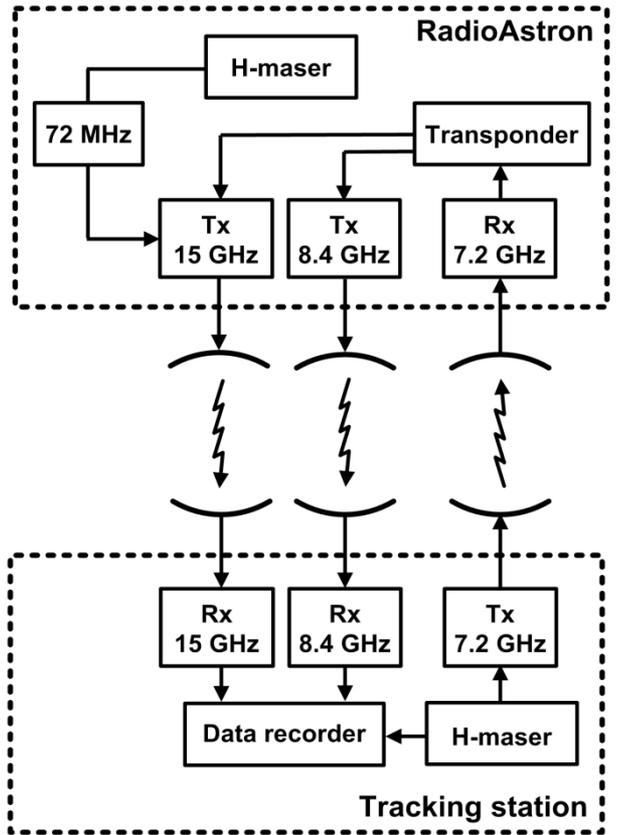
1. Расчет с помощью орбиты.
2. Компенсация: модифицированная схема Gravity Probe A – смешанный режим синхронизации радиолинии (Бирюков, Литвинов и др., АЖ 2014).
3. Компенсация: модифицированная схема Gravity Probe A – чередование режимов синхронизации радиолинии (Litvinov et al., Phys. Lett. A, 2018).

Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера с помощью смешанного режима синхронизации «Частичный когерент»:

$$\begin{aligned} & \left\{ [(Rf_e^\uparrow + \nu_s)^\downarrow - (Rf_e^\uparrow)^\downarrow] - \nu_e \right\} - \frac{1}{2} \frac{\nu_0}{Rf_0} [(Rf_e^\uparrow)^\downarrow - Rf_e] = \\ & = \nu_e \left[\frac{\Delta f_{\text{grav23}}}{f} - \frac{|\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_e|^2}{2c^2} + \frac{\mathbf{a}_{e3} \cdot \mathbf{n}_{32} \Delta t}{c} + \frac{1}{2} (T_{23} - T_{12}) \right] - \\ & \quad - \frac{3}{2} \frac{I_{23}}{Rf_0} \frac{\nu_0}{Rf_0} - \frac{1}{2} \frac{I_{12}}{f_0} \frac{\nu}{f_0} + \Delta \nu_0 + o(v/c)^2 + o(\Delta t), \end{aligned}$$



режим «Тест-2»



режим «Частичный когерент»

Бирюков, Литвинов и др., АЖ 2014

Собранные экспериментальные данные:

- 1. Однопутевые частотные измерения (8.4 и 15 ГГц, Пушино и Грин Бенк штатные измерители) – радиоастрономические сеансы.**
2. Частотные измерения в смешанном режиме синхронизации «Частичный когерент» (15 ГГц, Пушино, Ef, VLBA, РСДБ-рекордер).
3. Частотные измерения по схеме с переключение одно- и двухпутевого режимов (8.4 и 15 ГГц, Пушино и Грин Бенк, штатные измерители + РСДБ-рекордер в Пушино и наземных радиотелескопов Bd, Ef, Gb, Hh, On, Sv, VLBA, Wn, Wz, Yg, Ys, Zc).

Однопутевые частотные измерения – обработка на основе формулы:

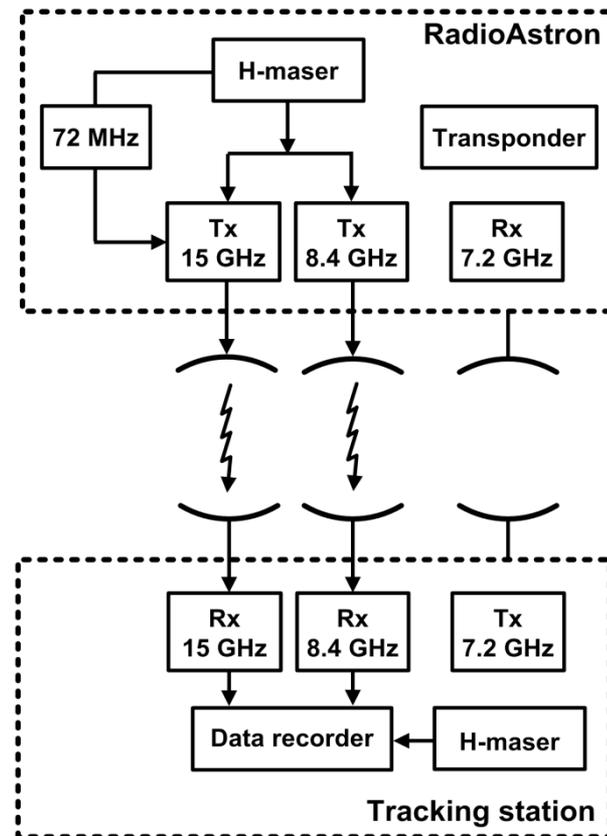
$$\Delta f_{1w} = f \left(-\frac{\dot{D}}{c} - \frac{v_s^2 - v_e^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})}{c^2} \right) + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{ion}} + \Delta f_{\text{trop}} + \Delta f_{\text{fine}} + \Delta f_0 + O\left(\frac{v}{c}\right)^3$$

кинематические эффекты – орбита

тропосфера – метео измерения

ионосфера – ионосферные карты

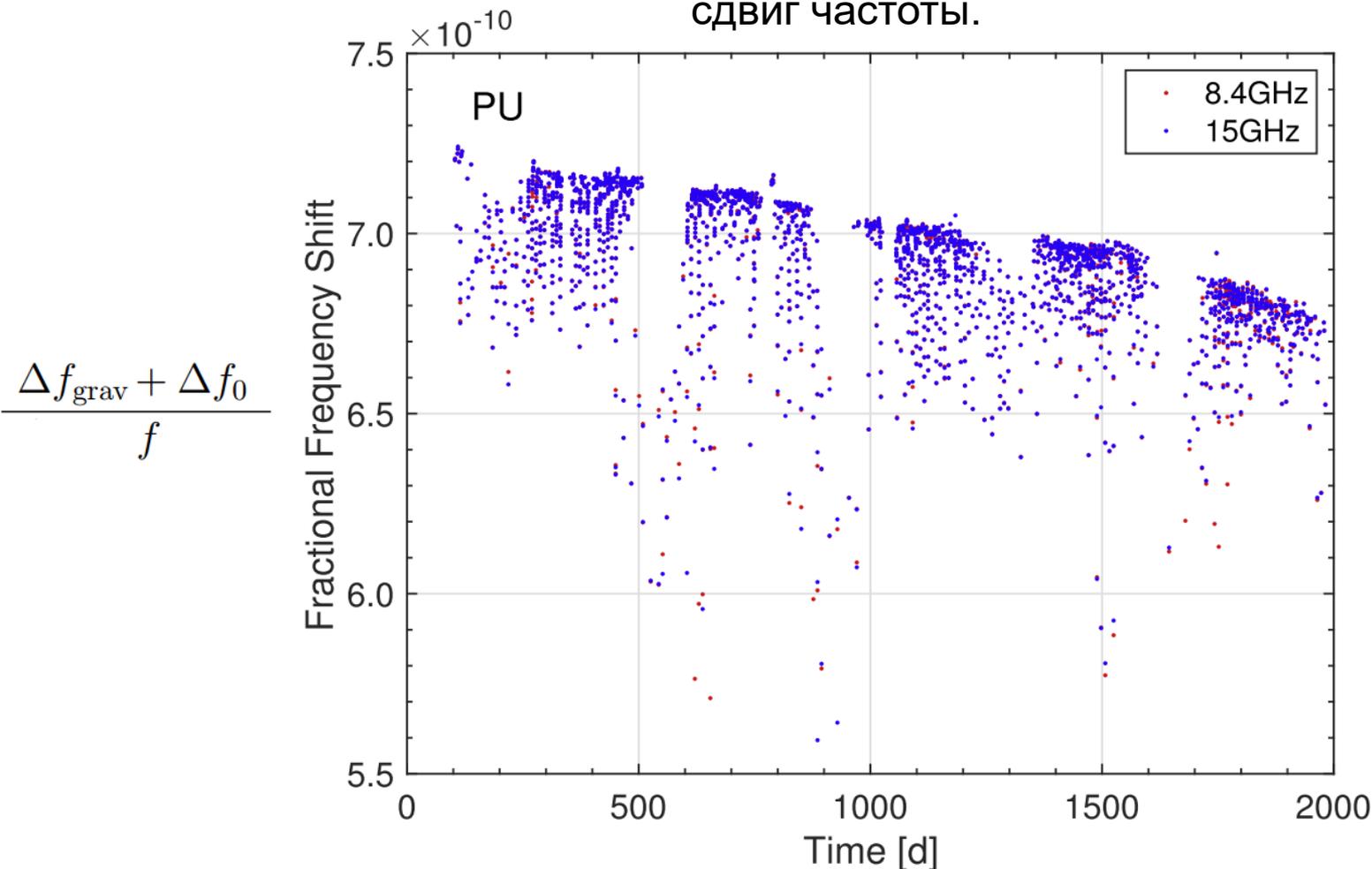
дрейф частоты – не учитывался



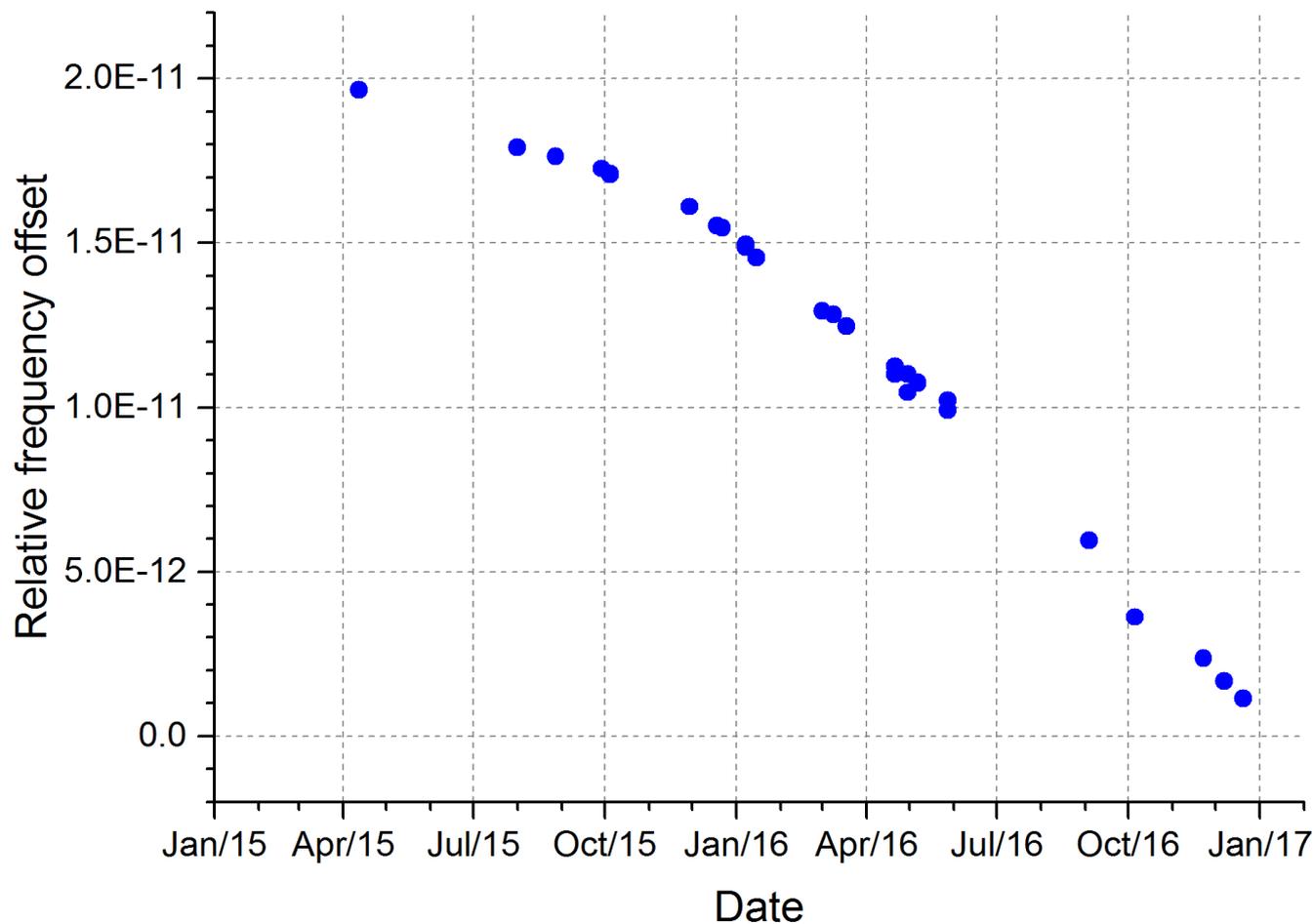
режим «H-мазер»

Nunes, Litvinov et al., Adv. Space Research, 2020

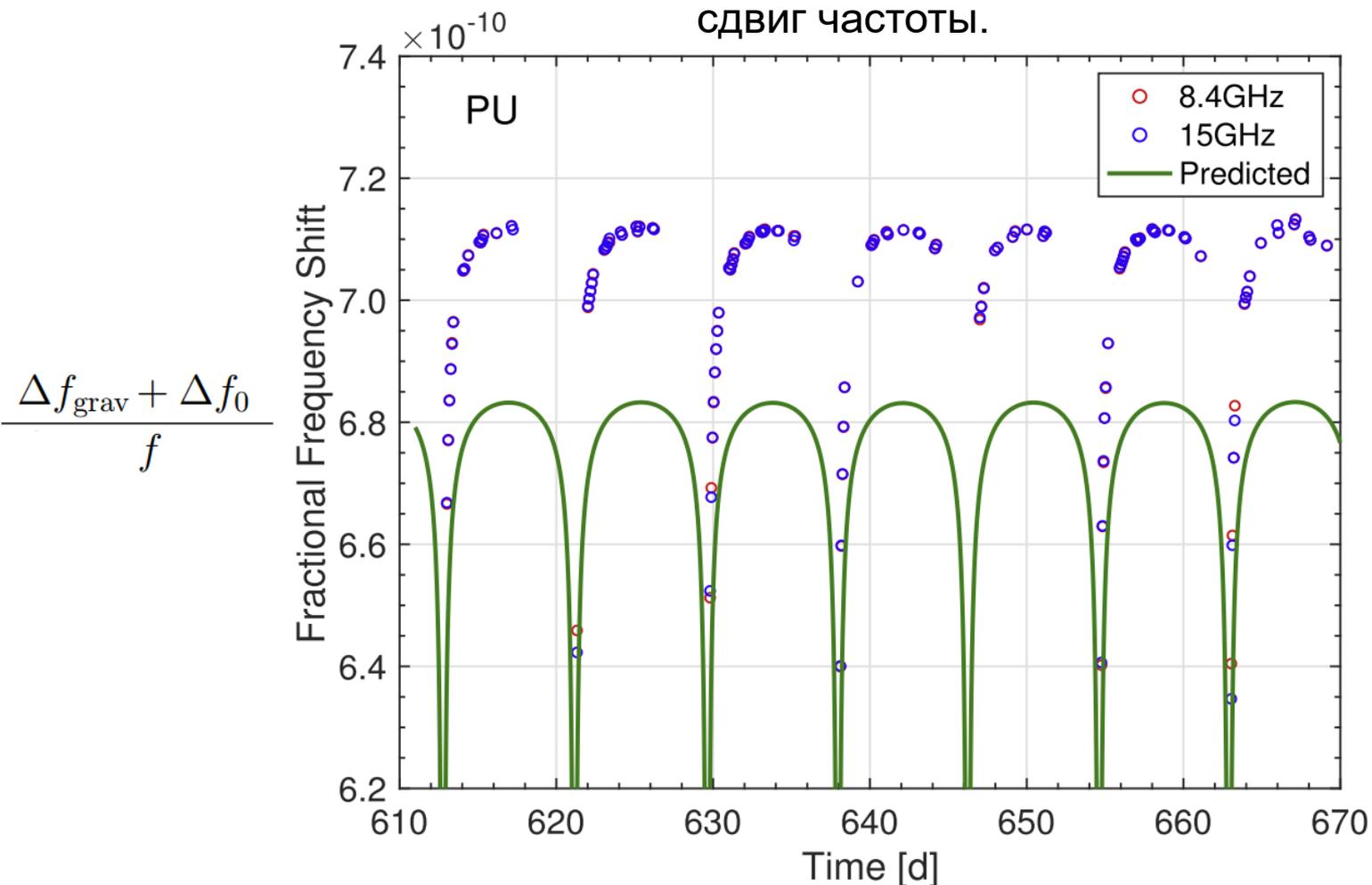
Остаточная частота после вычитания кинематического, тропосферного и ионосферного вкладов в сдвиг частоты. Станция Пушино. Каждая точка – сеанс радиоастрономических наблюдений в однопутевом режиме, всего ~2700 сеансов. По горизонтальной оси – дни от 1 января 2012, по вертикальной – относительный сдвиг частоты.



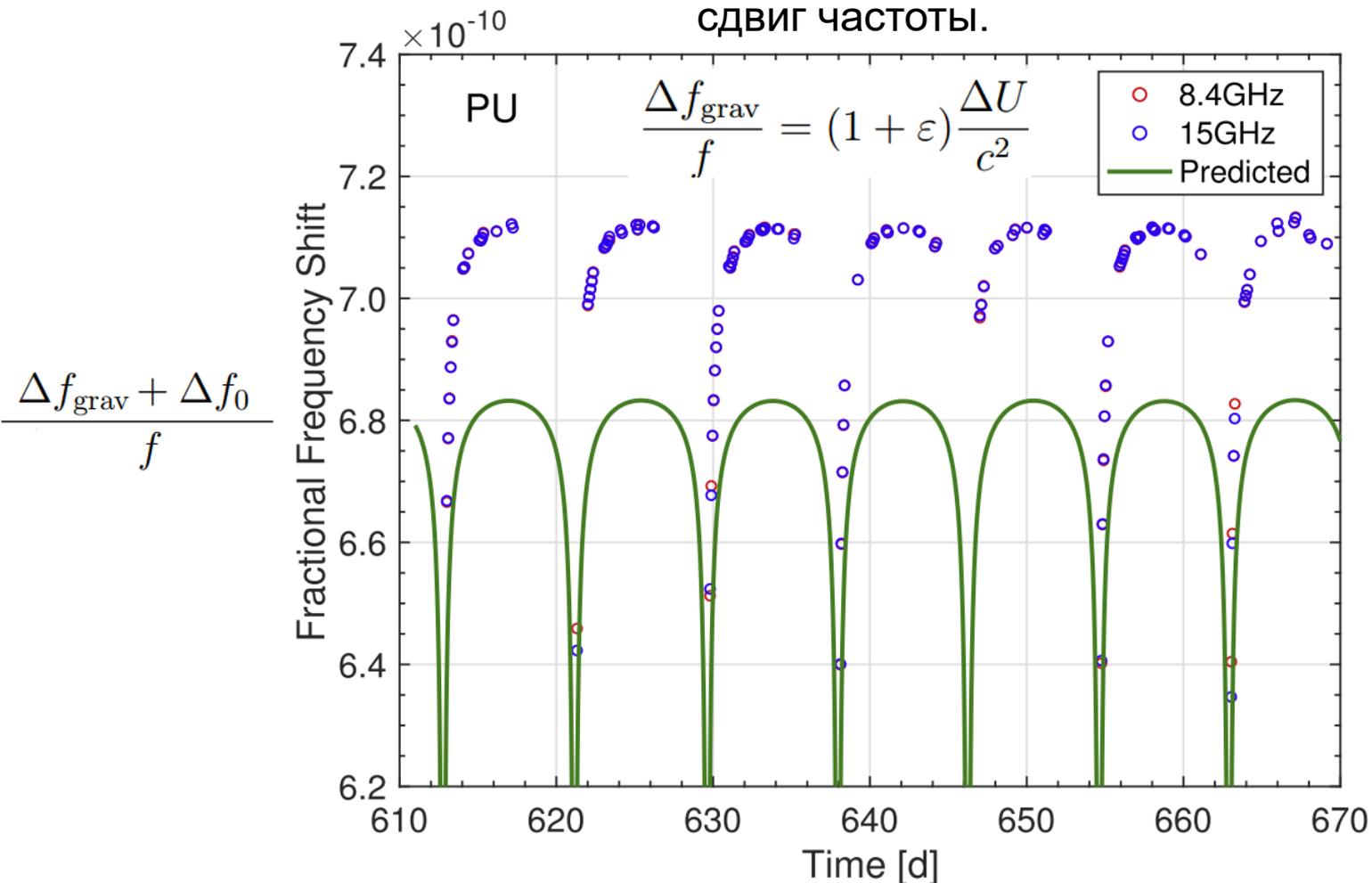
Эволюция отстройки частоты бортового водородного стандарта КА Спектр-Р от водородного стандарта станции слежения Грин Бенк (Litvinov et al., Phys. Lett. A, 2018)



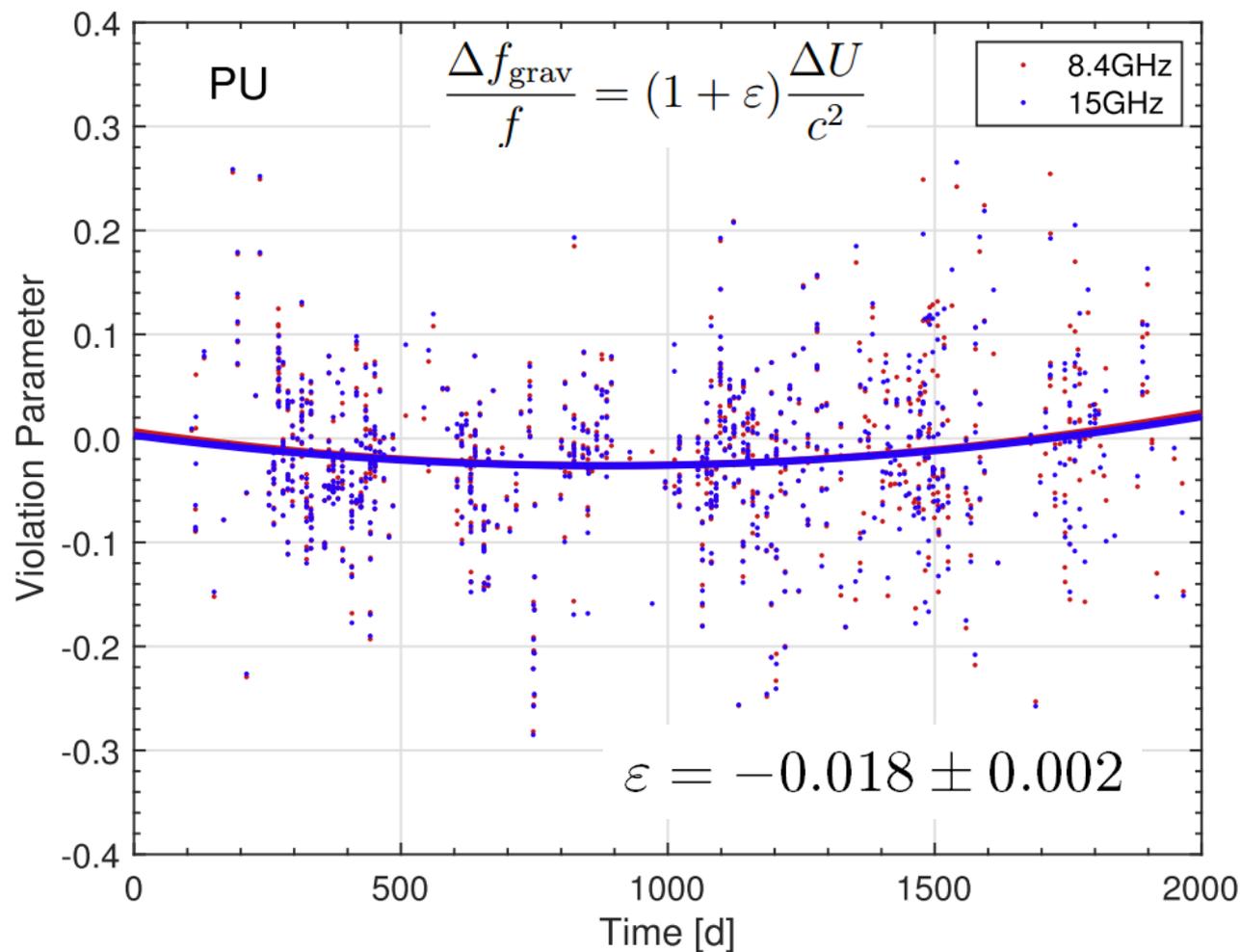
Остаточная частота после вычитания кинематического, тропосферного и ионосферного вкладов в сдвиг частоты. Станция Пушино. Каждая точка – сеанс радиоастрономических наблюдений в однопутевом режиме, всего ~2700 сеансов. По горизонтальной оси – дни от 1 января 2012, по вертикальной – относительный сдвиг частоты.

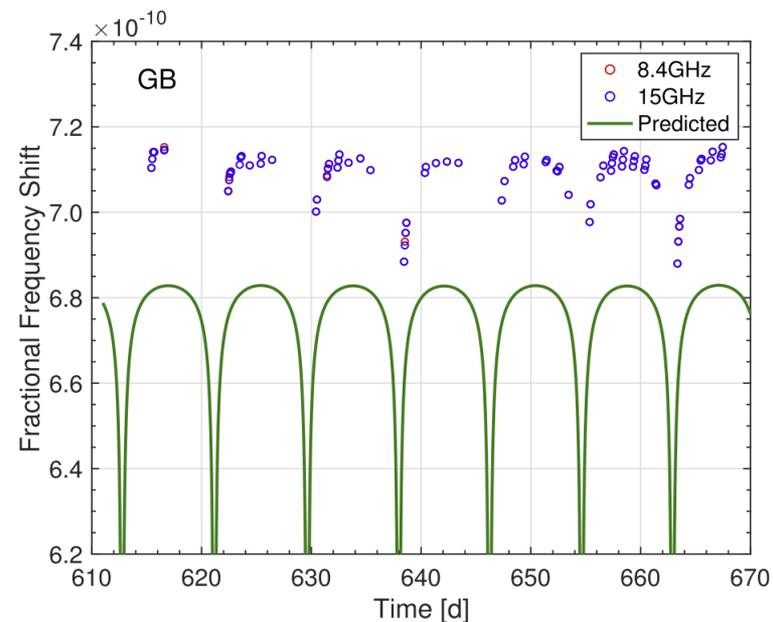
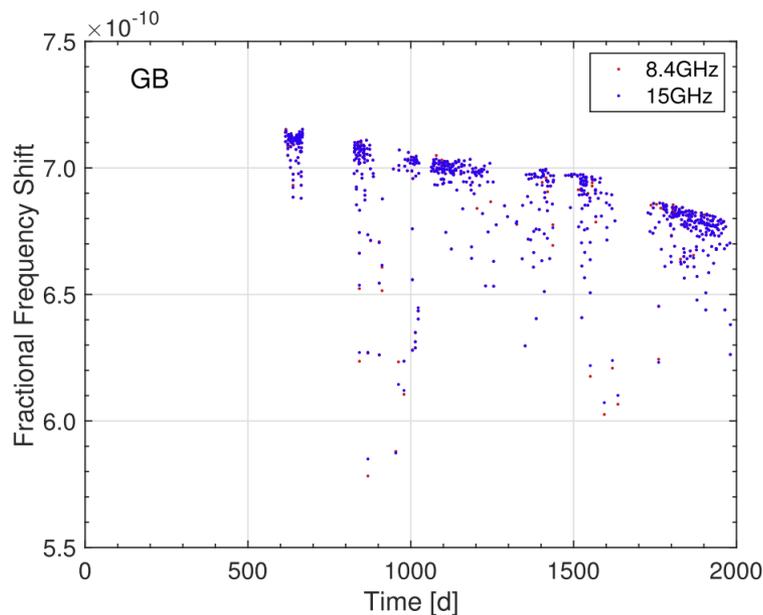


Остаточная частота после вычитания кинематического, тропосферного и ионосферного вкладов в сдвиг частоты. Станция Пушино. Каждая точка – сеанс радиоастрономических наблюдений в однопутевом режиме, всего ~2700 сеансов. По горизонтальной оси – дни от 1 января 2012, по вертикальной – относительный сдвиг частоты.

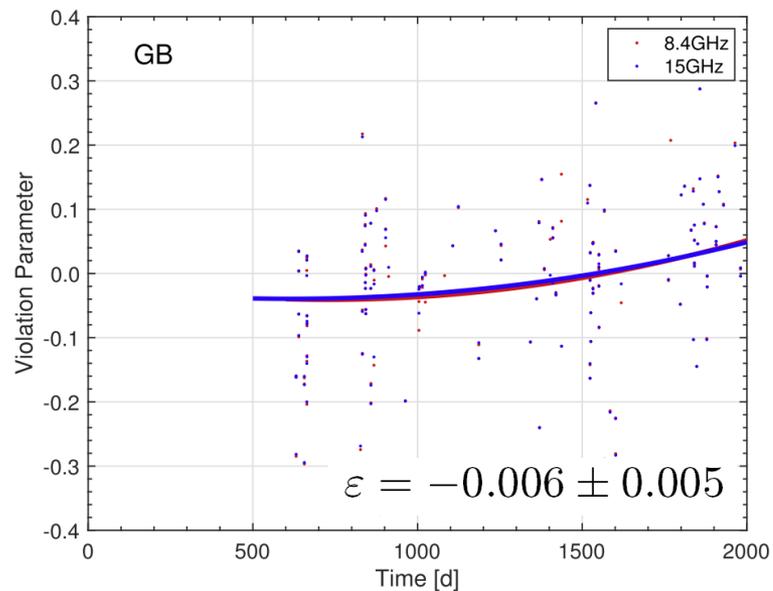


Оценка параметра нарушения ЭПЭ ε по результатам обработки однопутевых измерений частоты. Станция Пушино. Каждая точка соответствует паре сеансов. По горизонтальной оси – дни от 1 января 2012.





станция
слежения
Грин Бенк,
~1200 сеансов



Итоговая оценка параметра нарушения ЭПЭ по результатам обработки однопутевых частотных измерений:

$$\varepsilon = -0.016 \pm 0.003_{\text{stat}} \pm 0.030_{\text{sys}}$$

↑
орбита

Nunes, Litvinov et al., Adv. Space Res. (2020)

Введение: эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ) и его экспериментальные проверки

1. Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью космических аппаратов (КА), оборудованных высокостабильными стандартами частоты и времени
2. Эффект движения фазового центра антенн в прецизионных экспериментах по доплеровскому слежению за КА
3. Проверка ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон на основе данных однопутевых доплеровских измерений

Заключение

Результаты, выносимые на защиту

1. Разработана математическая модель космических экспериментов по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов. Модель учитывает гравитационное воздействие тел Солнечной системы, окрашенный характер шума часов и возможную зависимость нарушающего принцип эквивалентности вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля. С помощью данной модели произведена оценка предельной точности эксперимента по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон, которая составила 5×10^{-6} при накоплении данных в течение 1 года.
2. Разработана концепция эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени и проверки эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью двух околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами. Определена оптимальная конфигурация орбит спутников и показано, что точность эксперимента может достичь 3×10^{-10} с использованием существующих атомных часов при накоплении данных в течение 3 лет. Это на 5 порядков лучше достигнутого на настоящий момент результата.
3. Разработана математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения. Показано, что в гравитационном эксперименте с РадиоАстроном эти ошибки могут на порядок превышать допустимые. Разработана схема компенсации данного эффекта, которая позволяет на 4-5 порядков уменьшить его вклад в сдвиг частоты сигналов.
4. Разработана схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы в экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами, основанная на смешанном режиме синхронизации радиолинии космический аппарат – наземная станция (несущий сигнал – от наземного стандарта частоты, модулирующий – от бортового). Схема реализована на практике в гравитационных сеансах по доплеровскому слежению за космическим аппаратом РадиоАстрон.
5. Осуществлена проверка эйнштейновского принципа эквивалентности путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата РадиоАстрон с точностью 3×10^{-2} . Данная точность впервые достигнута на расстояниях, охватывающих диапазон от 10 до 350 тыс. км от центра Земли.

Статьи с результатами, выносимыми на защиту

1. A. V. Biriukov, V. L. Kauts, V. V. Kulagin, **D. A. Litvinov**, and V. N. Rudenko. Gravitational redshift test with the space radio telescope “RadioAstron”. *Astronomy Reports*, 58(11):783–795, 2014.
2. **D. A. Litvinov**, V. N. Rudenko, A. V. Alakoz, U. Bach, N. Bartel, A. V. Belonenko, K. G. Belousov, M. Bietenholz, A. V. Biriukov, R. Carman, G. Cimo, C. Courde, D. Dirkx, D. A. Duev, A. I. Filetkin, G. Granato, L. I. Gurvits, A. V. Gusev, R. Haas, G. Herold, A. Kahlon, B. Z. Kanevsky, V. L. Kauts, G. D. Kopelyansky, A. V. Kovalenko, G. Kronschnabl, V. V. Kulagin, A. M. Kutkin, M. Lindqvist, J. E. J. Lovell, H. Mariey, J. McCallum, G. Molera Calvés, C. Moore, K. Moore, A. Neidhardt, C. Plotz, S. V. Pogrebenko, A. Pollard, N. K. Porayko, J. Quick, A. I. Smirnov, K. V. Sokolovsky, V. A. Stepanyants, J. M. Torre, P. de Vicente, J. Yang, and M. V. Zakhvatkin. Probing the gravitational redshift with an Earth-orbiting satellite. *Physics Letters A*, 382(33):2192–2198, 2018.
3. N. V. Nunes, N. Bartel, M. F. Bietenholz, M. V. Zakhvatkin, **D. A. Litvinov**, V. N. Rudenko, L. I. Gurvits, G. Granato, and D. Dirkx. The gravitational redshift monitored with RadioAstron from near Earth up to 350,000 km. *Advances in Space Research*, 65(2):790–797, 2020.
4. **D. Litvinov** and S. Pilipenko. Testing the Einstein Equivalence Principle with two Earth-orbiting clocks. *Classical and Quantum Gravity*, 38(13):135010, 2021.
5. **D. A. Litvinov**, N. V. Nunes, A. I. Filetkin, N. Bartel, L. I. Gurvits, G. Molera Calves, V. N. Rudenko, and M. V. Zakhvatkin. The antenna phase center motion effect in high-accuracy spacecraft tracking experiments. *Advances in Space Research*, 68(10):4274–4291, 2021.

Конференции, на которых были доложены результаты, выносимые на защиту

1. 40-я Научная ассамблея КОСПАР (40th COSPAR Scientific Assembly), г. Москва, Россия, 2014.
2. Конференция «Рассекая Вселенную» (Dissecting Universe), Бонн, Германия, 2015.
3. 13-й Симпозиум европейской РСДБ сети (13th European VLBI Network Symposium), г. Санкт-Петербург, Россия, 2016.
4. 14-я Конференция «Встречи им. Марселя Гроссмманна» (The 14th Marcel Grossmann Meeting), г. Рим, Италия, 2016.
5. Всероссийская астрономическая конференция «ВАК-2017», г. Ялта, Россия, 2017.
6. Конференция «6-й Международный коллоквиум по научным и фундаментальным аспектам ГНСС/Галилео» (6th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS/Galileo), г. Валенсия, Испания, 2017.
7. 14-й Симпозиум европейской РСДБ сети (14th European VLBI Network Symposium), г. Гранада, Испания, 2018.
8. 42-я Научная ассамблея КОСПАР (42nd COSPAR Scientific Assembly), г. Пасадина, США, 2018.
9. 15-я Конференция «Встречи им. Марселя Гроссмманна» (The 15th Marcel Grossmann Meeting), г. Рим, Италия, 2018.
10. 54-я конференция «Rencontres de Moriond», г. Ля Тюиль, Италия, 2019.
11. 43-я Научная ассамблея КОСПАР (43rd COSPAR Scientific Assembly), г. Сидней, Австралия, 2021.

A large satellite antenna dish is shown in a cleanroom environment. The dish is covered in yellow protective material and is suspended by multiple yellow lifting straps. The dish is connected to a central structure that includes a cylindrical component and a metal frame. The cleanroom has white walls and a high ceiling with various equipment and scaffolding visible.

Спасибо за внимание!

- 1. При рассмотрении теоретических схем спутниковых экспериментов для проверки ПЭ, нет ссылки и обсуждения высокоточного эксперимента “STEP” по спутниковой проверке ПЭ, предложенной в США [Advances in Space Research, 39, 254 (2007); Adv. Space Res. 43, 1532 (2009); Class. Quantum Grav. 29 184012 (2012)]**

В разделе 1.1.6 «Типы экспериментов по проверке ЭПЭ» я рассматриваю лишь реализованные на настоящий момент эксперименты. Тем не менее, я согласен, что столь важный эксперимент, как STEP, -- упрощенный вариант которого, в частности, реализован в недавно завершившемся эксперименте MICROSCOPE, -- следовало упомянуть.

- 2. В третьей главе даны результаты обработки измерений одно-путевых данных, с использованием схемы компенсации. Автор подробно излагает схему компенсации проекта Gravity Probe A, а также разработанную автором методику компенсации «Частичный когерент», которая на практике не была реализована. Эту методику было бы более уместно поместить в предыдущую теоретическую главу.**

Не вполне согласен. Радиотехнические схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера (Gravity Probe A и наши оригинальные разработки) относятся к области практической реализации гравитационного эксперимента с КА РадиоАстрон. Поэтому, на мой взгляд, их было уместно изложить именно в Главе 3, посвященной особенностям эксперимента с РадиоАстроном.

- 3. Непонятно, почему автор не приводит никаких (даже предварительных) результатов совместной обработки одно и двух путевых данных, что должно существенно улучшить оценку параметра соответствия измерений формулам ОТО.**

Эти результаты еще не опубликованы, поэтому я не стал их приводить. Сейчас мы готовим публикацию по результатам обработки данных со штатных измерителей частоты станций слежения Пушино и Грин Бенк. Полученная с их помощью точность оценки параметра нарушения ЭПЭ составляет 3×10^{-4} . Это также еще не финальный результат. Далее будет статья по основному набору данных, полученных с помощью РСДБ системы регистрации на станции Пушино.

- 1. В диссертации хотелось бы видеть более подробное изложение проблем, относящихся к точности определения величины гравитационного потенциала предлагаемого в работе автора.**

В разделе 3.5 мною рассмотрен вопрос о точности восстановления орбиты КА, необходимой для расчета гравитационного потенциала в эксперименте с РадиоАстроном. Однако, я согласен, что данный вопрос следовало изложить более подробно. В частности, следовало указать точность орбиты, необходимую для расчета грав. потенциала на дальностях до КА меньше 40 тыс. км (указано, что она обеспечивалась с помощью спутниковой лазерной дальнометрии), а приведенные значения следовало обосновать.

- 2. При изложении материала работы следовало бы выделить геофизические факторы, влияющие на измерения, например, ионосферные возмущения, турбулентность и т.п.**

Эти вопросы также рассматриваются в разделе 3.5. В частности, я кратко рассматриваю два использованных нами метода расчета ионосферного сдвига частоты (с помощью двухчастотных измерений и карт ионосферной плотности), а также учет влияния земных приливов. Однако, снова согласен, что эти вопросы требуют более подробного изложения. Это и предыдущее замечания мы обязательно учтем в наших следующих статьях.

- 3. В разделе 1.4.2 при оценке достижимой точности эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с РадиоАстроном и наземной станцией Грин Бенк автор исходит из нереалистического предположения о непрерывном приеме сигнала со спутника. Не представляло бы существенных трудностей учесть условия видимости спутника со станции и получить более реалистическую оценку точности эксперимента.**

Согласен, это не представляет затруднений. Мы включим результат такого расчета в статью по результатам обработки данных с РадиоАстроном.

4. При оценке точности возможного будущего эксперимента с двумя спутниками рассмотрен довольно узкий класс орбит с фиксированной высотой перигея порядка 1000 км. Следовало бы рассмотреть более широкий класс орбит, в т.ч. менее вытянутых. Это позволило бы оценить возможность совместного проведения подобных экспериментов с другими космическими проектами, в первую очередь, космической РСДБ.

Согласен. Мы планируем это сделать в ближайшее время и представить результаты в виде отдельной публикации.

5. Вывод некоторых соотношений в главе 2 представлен недостаточно подробно (например, (2.17)). Также схематично изложен раздел 2.2.2. «Бортовые антенны».

Некоторые соотношения главы 2, действительно, получаются в результате довольно длинных выкладок, связанных с разложениями по малым параметрам ошибок углов наведения антенн. Я решил не включать их в диссертацию. Возможно, следовало оформить их в виде приложений. Раздел о бортовых антеннах во многом повторяет предыдущий раздел о наземных антеннах, поэтому я посчитал, что этот вопрос стоит изложить более кратко.

6. Формула (2.42) получена в предположении неподвижности вектора \mathbf{i} в системе координат, жестко связанной с Землей. Ясно, что итоговый вывод о компенсации эффекта движения фазового центра от этого не изменится, но следовало бы более четко отметить, для каких случаев применима эта формула.

Согласен, это замечание следовало бы сделать.

- 7. При оценке параметра нарушения ЭПЭ не учтены чувствительность бортового стандарта к вариациям температуры и магнитного поля. По моим оценкам эти эффекты должны быть малы по сравнению с ошибкой расчета нерелятивистского эффекта Доплера, но, тем не менее, это следовало бы оговорить.**

Данные эффекты мною упомянуты в разделе 3.5. Однако, в той обработке данных, результаты которой представлены в работе, эти эффекты не учитываются. Согласен, что возможность пренебрежения ими следовало обосновать.

- 8. Приведенные под формулой (3.21) на с. 101 утверждения о пренебрежимой малости ионосферного сдвига частоты, приливных эффектов и т.п. имело бы смысл проиллюстрировать графиками.**

Согласен.

1. Стоило бы, опираясь на полученные результаты, привести оценки ограничений на сдвиги частот вызванные негравитационными эффектами, например, на сдвиги из-за возможной пространственной вариации постоянной тонкой структуры.

Согласен. Это очень интересное замечание и одно из возможных направлений наших дальнейших исследований.

2. В диссертации стоило бы обсудить возможность получить ограничения на величину других эффектов ОТО, например, на величину эффекта увлечения инерциальных систем отсчета и значения постньютоновских поправок к гравитационному потенциалу.

А) Возможность измерения гравитомагнитных эффектов, -- в частности, эффекта увлечения Лензе-Тирринга – нами рассматривалась на стадии разработки концепции гравитационного эксперимента с РадиоАстроном. К сожалению, эти эффекты требуют на 2-3 порядка более высокой чувствительности эксперимента.

Б) Для определения постньютоновских параметров необходимо повышение чувствительности эксперимента на 3-4 порядка, т.к. при измерении эффекта гравитационного замедления времени они появляются только во 2-м порядке разложения по слабому гравитационному полю Земли.

3. В диссертации стоило бы обсудить, почему в формуле (1.18) отсутствуют слагаемые

$(U_S^{(1)} - U_S^{(2)})/c^2$ и $(U_M^{(1)} - U_M^{(2)})/c^2$. Также в формуле (1.18) пропущены приливные члены.

А) В формуле (1.18) ошибок нет. Слагаемые с потенциалами Солнца и Луны, не нарушающие ЭПЭ, действительно, не дают вклада в (1.18). Это связано с т.н. эффектом отсутствия «noon-midnight redshift»: наблюдатели на противоположных относительно Солнца сторонах Земли не ощущают (с точностью до приливных слагаемых) эффекта гравитационного замедления времени за счет поля Солнца (и аналогично для Луны). Это – прямое следствие принципа эквивалентности. К сожалению, в диссертации, действительно, не упомянута причина отсутствия этих слагаемых, хотя в статье мы это обсуждаем.

Б) Приливные члены, действительно, не приведены. Это было сделано потому, что они не содержат параметров ε . Эти члены надо учитывать при обработке экспериментальных данных: их величина существенна уже в эксперименте с РадиоАстроном (достигает 10^{-13} для $\Delta f/f$). Согласен, что следовало упомянуть об этом в тексте.

4. В диссертации стоило бы более подробно обсудить вклад поправок, связанных с гравитационным полем Солнца и Луны, в частности привести оценки сдвига частоты из-за вносимых ими искажений в орбиту КА.

Согласен. При обработке данных с РадиоАстроном эти вклады учитываются. При расчете орбиты КА их влияние также учитывалось баллистическим центром ИПМ им. Келдыша.

5. Стоило бы обсудить, могут ли быть связаны упомянутые на с. 100 выбросы с пролетами комков темной материи.

Согласен. Это интересное замечание. В работе мы не исследовали транзиентные эффекты, но такую возможность стоило обсудить в тексте.

6. Стоило бы привести значения периода T , которые соответствуют минимумам кривых на рисунке 1.3.

Согласен. Значения периодов, соответствующих минимумам кривых на рис. 1.3, составляют: ВЧ-1010 – 3.9 ч; PHARAO – 5.3 ч; JILA – 4.8 ч.

Дополнительные слайды

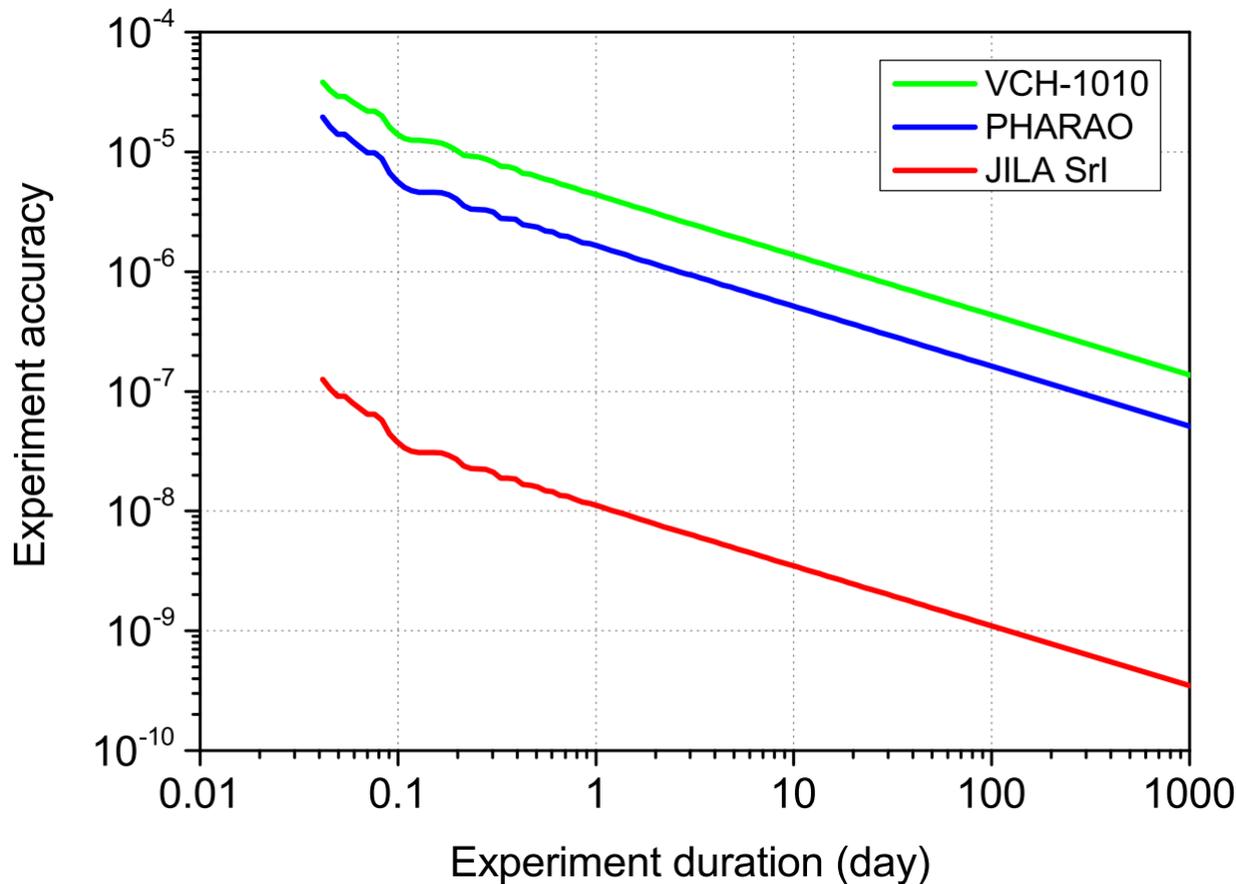
Три подпринципа ЭПЭ (скорее всего) не независимы

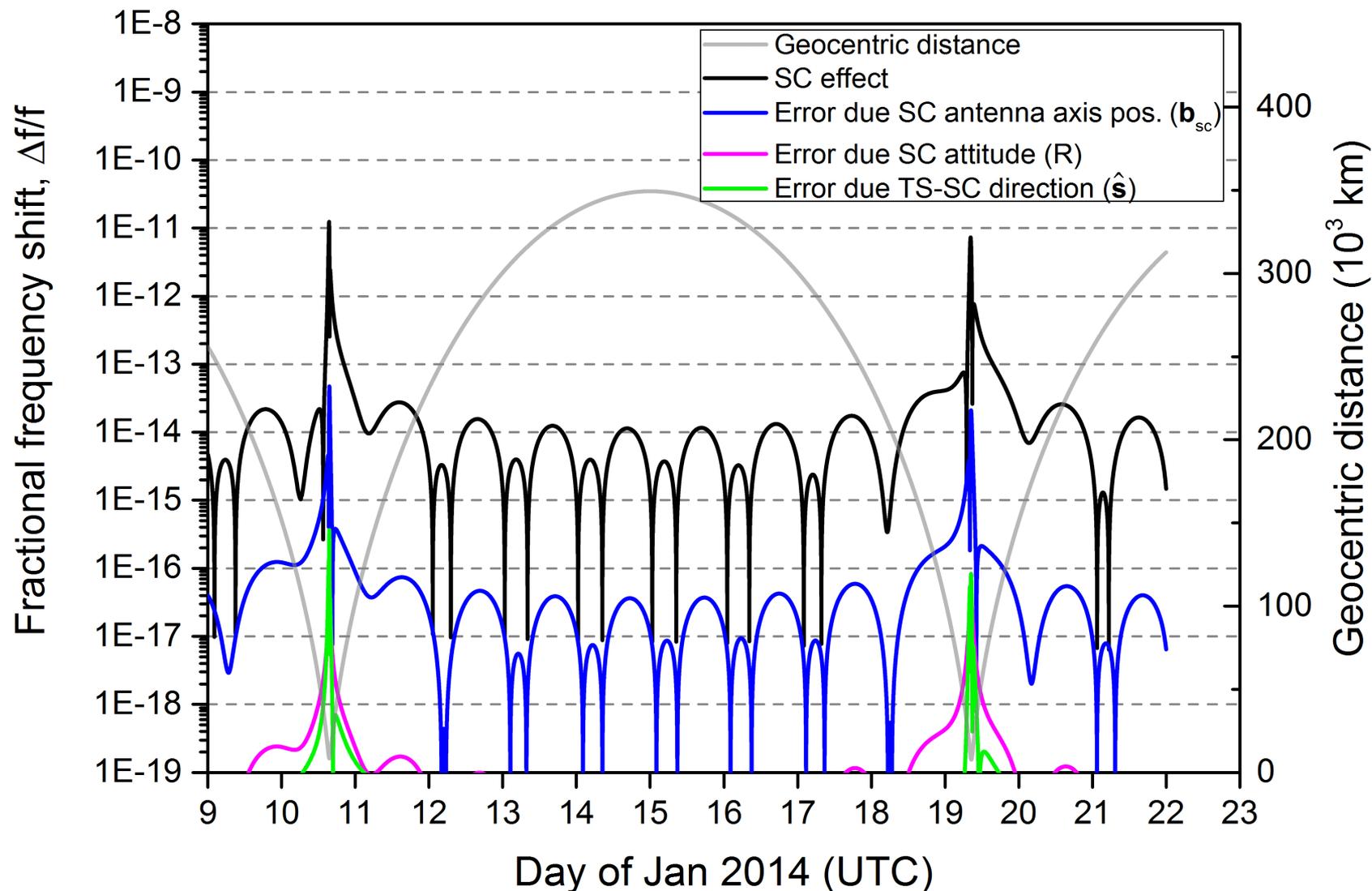
Гипотеза Шиффа:

Любая самосогласованная теория гравитации, удовлетворяющая слабому ПЭ и закону сохранения энергии, должна удовлетворять и ЭПЭ (может быть доказано для ряда моделей)

Оценка точности экспериментов по проверке ЭПЭ с помощью КА

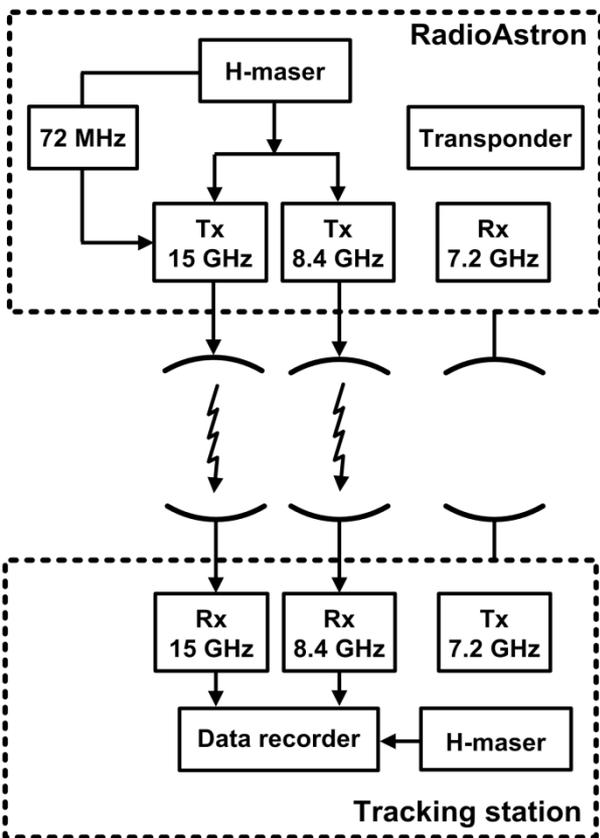
Точность эксперимента по проверке ЭПЭ с двумя спутниками на околоземной орбите в зависимости от времени накопления данных. Периоды орбит спутников составляют 5 часов, остальные элементы орбит фиксированы в соответствии с таблицей на слайде 11.



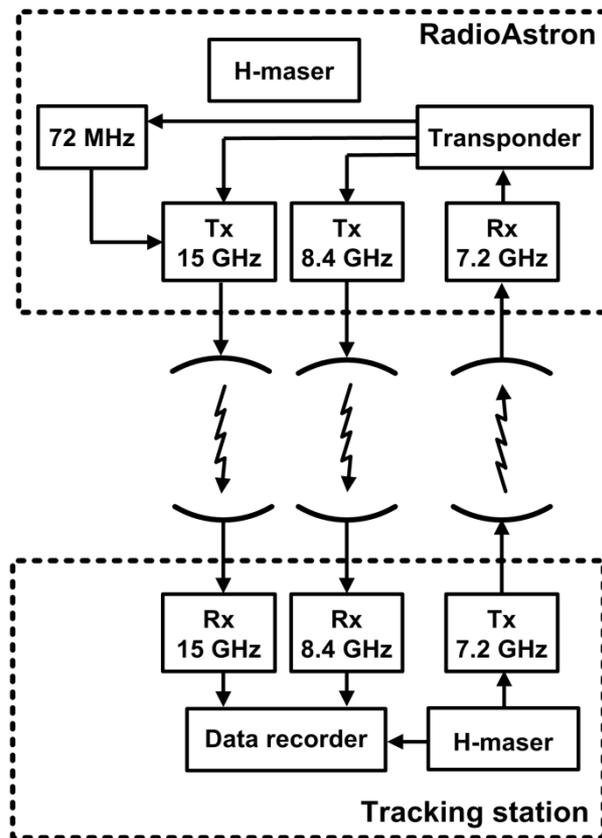


Эффект движения фазового центра для бортовой антенны КА РадиоАстрон при слежении за наземной антенной NRAO140 обсерватории Грин Бенк

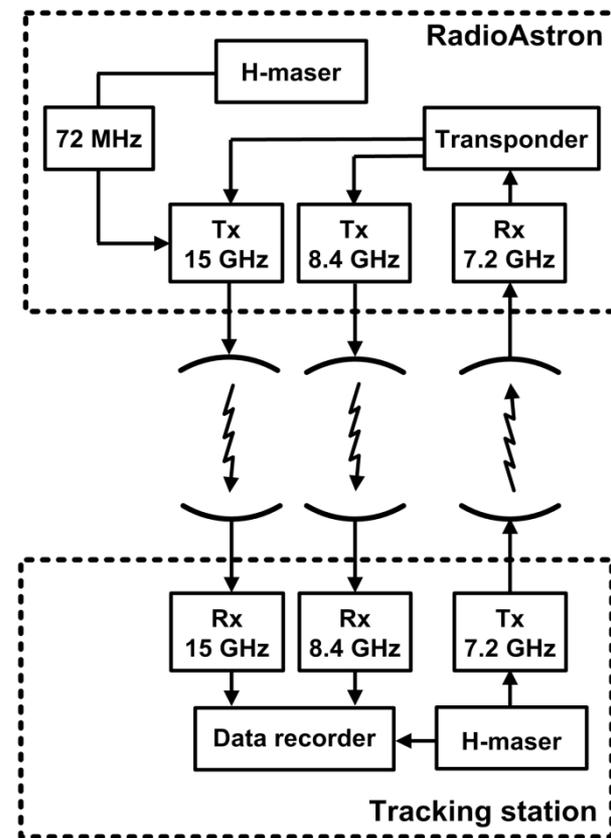
Режимы синхронизации частот радиолиний КА РадиоАстрон



Однопутевой
«Н-мазер»



Двухпутевой
«Когерент»



Смешанный
«Частичный когерент»