

# Корреляционная обработка данных в режиме замкнутой петли в проекте "Радиоастрон".

Литовченко И. Д., Андрианов А. С., Андрианов М. Н., Ляховец А. О.



## АКЦ ФИАН

В случае выхода из строя бортового водородного стандарта Радиоастрона, был предусмотрен режим замкнутой петли "Когерент", в котором часы спутника управлялись высокоточным сигналом с Земли.

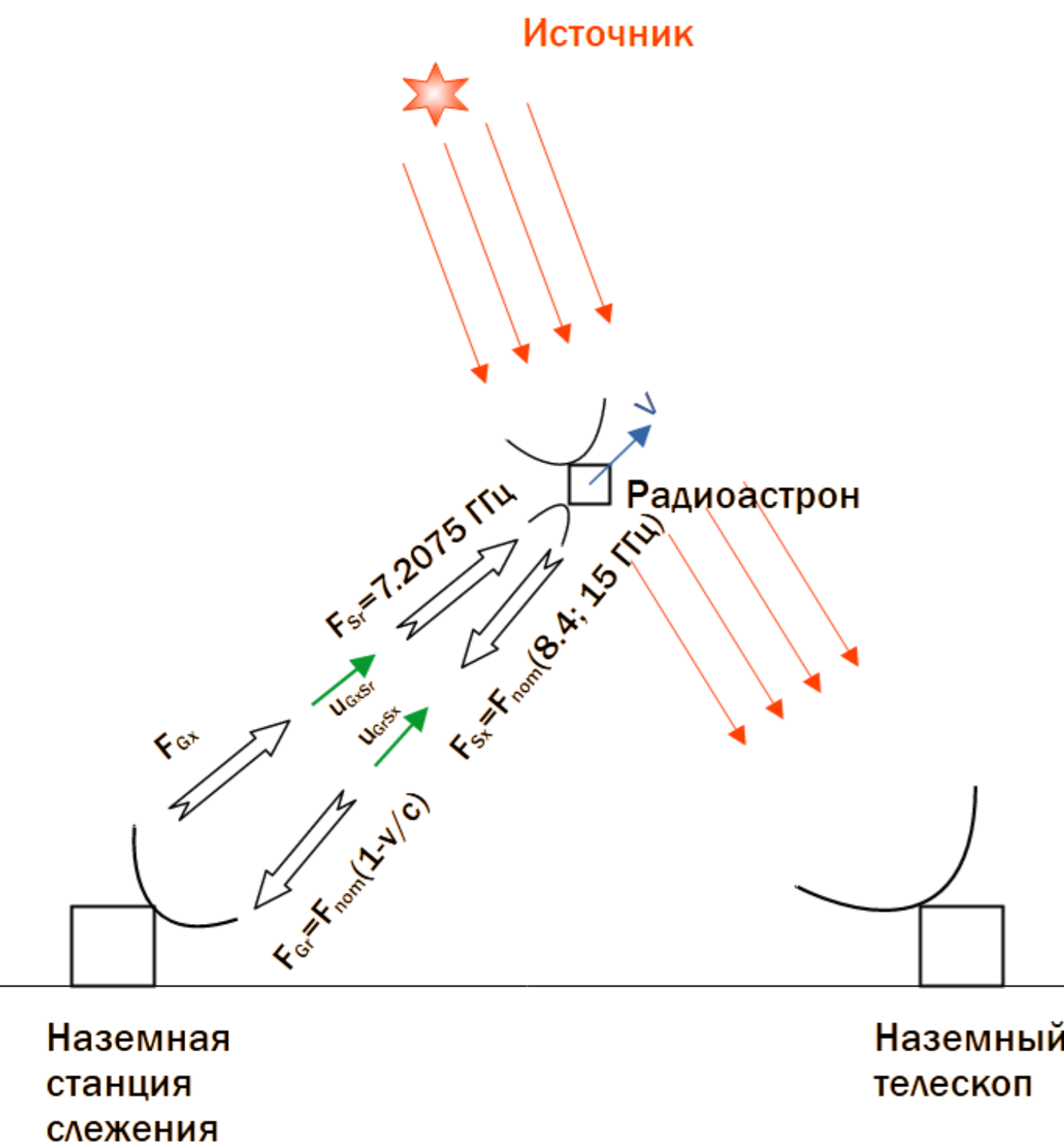


Схема передачи и контроля на борт Радиоастрона опорного сигнала режима «Когерент» с Наземной станции слежения (НСС).

Для контроля правильности частоты на Радиоастроне рассчитывается доплеровская невязка

$$F_{residual} = F_{Gr} - F_{nom} * (1 - v/c).$$

- орбита Радиоастрона на момент генерации  $F_{Gx}$  была известна неточно;
- в алгоритмах расчёта  $F_{Gx}$  и доплеровской невязки  $F_{residual}$  были неточности и ошибки.
- + переданная и принятая на НСС частоты ( $F_{Gx}$  и  $F_{Gr}$ ) сохранены и доступны;
- + к моменту корреляции доступна реконструированная орбита Радиоастрона с ошибкой скорости < 2 см/сек.

Исходя из сохранённых  $F_{Gx}$ ,  $F_{Gr}$  и реконструированной орбиты, мы достаточно точно восстановили принятую частоту на спутнике  $F_{Sr}$  и излученную спутником частоту  $F_{Sx}$ . Интегрируя  $(F_{Sx}/F_{nom} - 1)$  по времени, мы получаем дополнительный член модели задержки.

Для этого мы применили релятивистскую формулу Доплера и, пренебрегая всеми погрешностями, кроме ошибки в радиальной скорости спутника  $\Delta v$ , получили линейное уравнение на  $\Delta v$ :

$$F_{Gr} \approx F_{Gx} \times k \times \frac{1 - (p_{Sr} + \Delta v)/c}{1 - p_{Gx}/c} \times \frac{1 + p_{Gr}/c}{1 + (p_{Sx} + \Delta v)/c}$$

И вычислили частоту на спутнике, подставляя  $\Delta v$  в выражение для  $F_{Sx}$ :

$$F_{Sx} = F_{Gx} \times k \times \frac{1 - (p_{Sr} + \Delta v)/c}{1 - p_{Gx}/c} \times \frac{\sqrt{1 - (v_{Gx}/c)^2}}{\sqrt{1 - (v_{Sr}/c)^2}}$$

Где:

- $F_{Gx}$ ,  $F_{Gr}$ ,  $F_{Sr}$ ,  $F_{Sx}$  - частоты излучаемые и принимаемые НСС и Радиоастроном (РА);
- $v_{Gx}$ ,  $v_{Gr}$ ,  $v_{Sr}$ ,  $v_{Sx}$  - скорости НСС и РА в моменты излучения и приёма;
- $k$  - повышающий множитель на РА (1120/961 или 2000/961);  $F_{nom} = k \times 7.2075$  GHz;
- $p_{Gx} = v_{Gx} \cdot u_{GxSr}$  - проекция  $v_{Gx}$  от НСС до РА (в момент излучения с Земли);
- $p_{Sr} = v_{Sr} \cdot u_{GxSr}$  - такая же проекция  $v_{Sr}$
- $p_{Gr} = v_{Gr} \cdot u_{GrSx}$  - проекция  $v_{Gr}$  от НСС до РА (в момент приёма на Земле);
- $p_{Sx} = v_{Sx} \cdot u_{GrSx}$  - такая же проекция  $v_{Sx}$ .

В августе 2017 г. в результате выработки ресурса бортового водородного генератора (БВСЧ) было выполнено его штатное отключение из сети синхронизации. В результате последующие сеансы РСДБ с Радиоастроном проводились в режимах синхронизации от бортового рубидиевого стандарта частоты (на частотах ниже 5 ГГц) или в режиме «Когерент» с синхронизацией от водородных генераторов на одной из станций слежения в Пушино (ПРАО ФИАН) или Грин Бэнк (НРАО, США) на частоте 22 ГГц (К - диапазон).

Для тестирования режима «Когерент» было проведено несколько сеансов в которых синхронизация переключалась с БВСЧ на наземный стандарт («Когерент»). На рисунках ниже показаны результаты корреляции одного из таких экспериментов RAKS18AH (21.07.2017, С - диапазон). Видно, что результаты корреляции в случае режима «Когерент» (COHERENT MODE) не хуже, чем при работе от БВСЧ (H-MASER MODE).

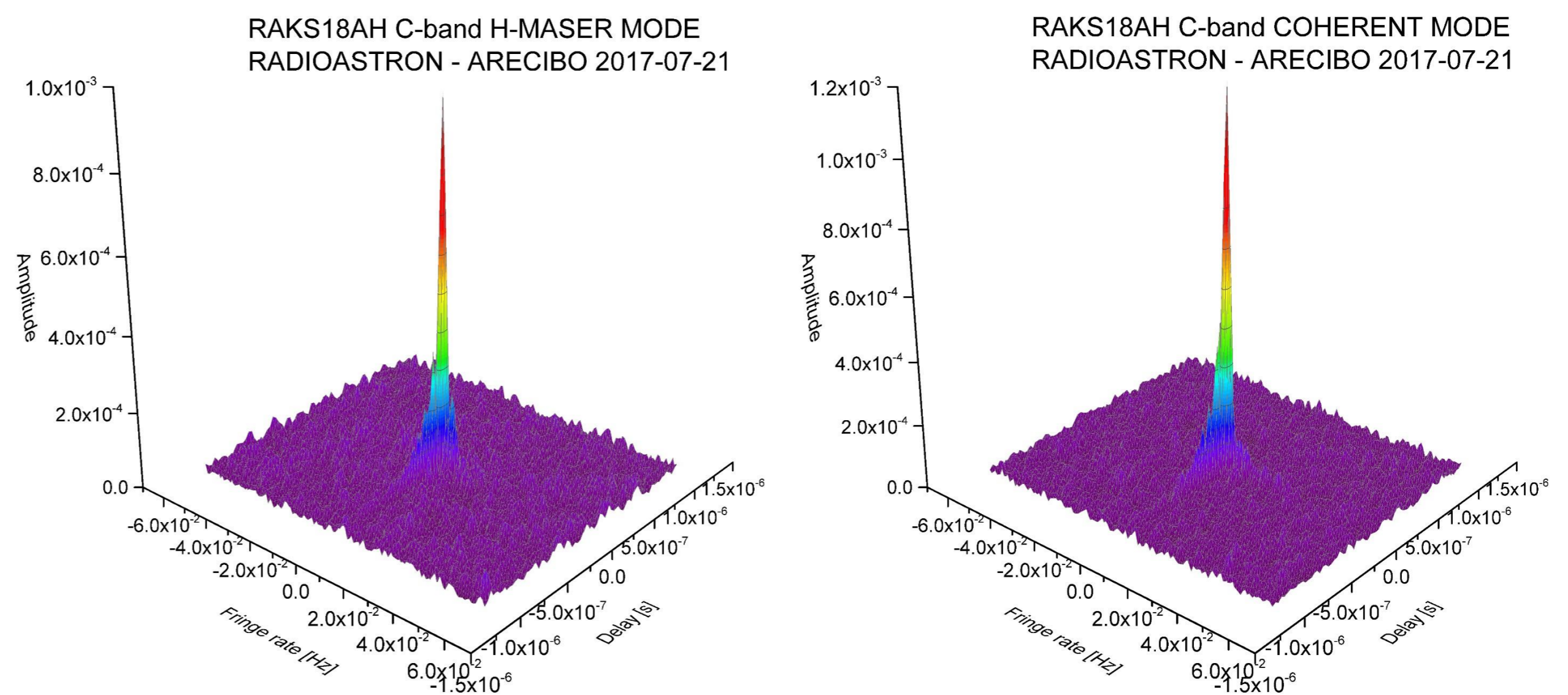
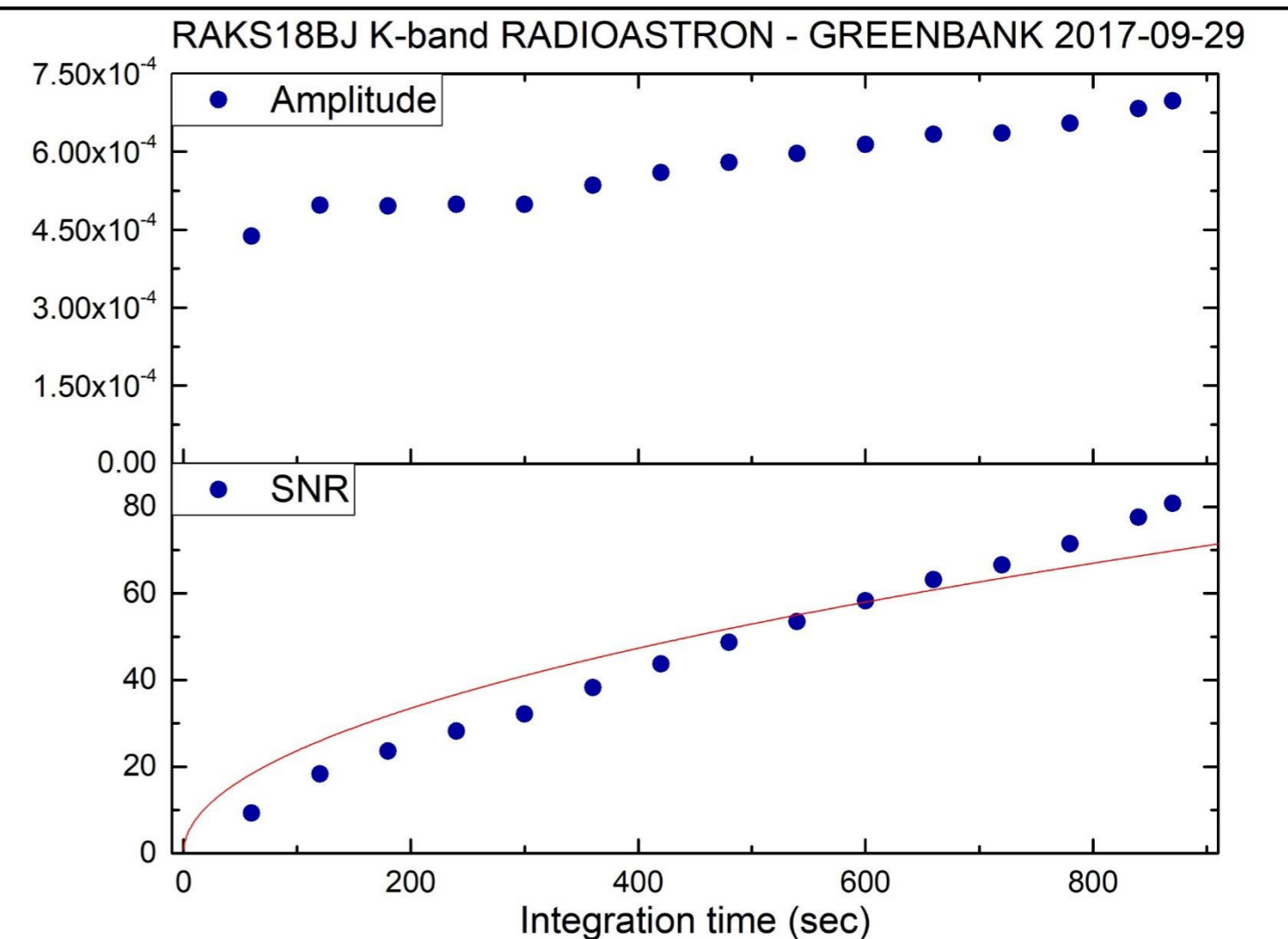
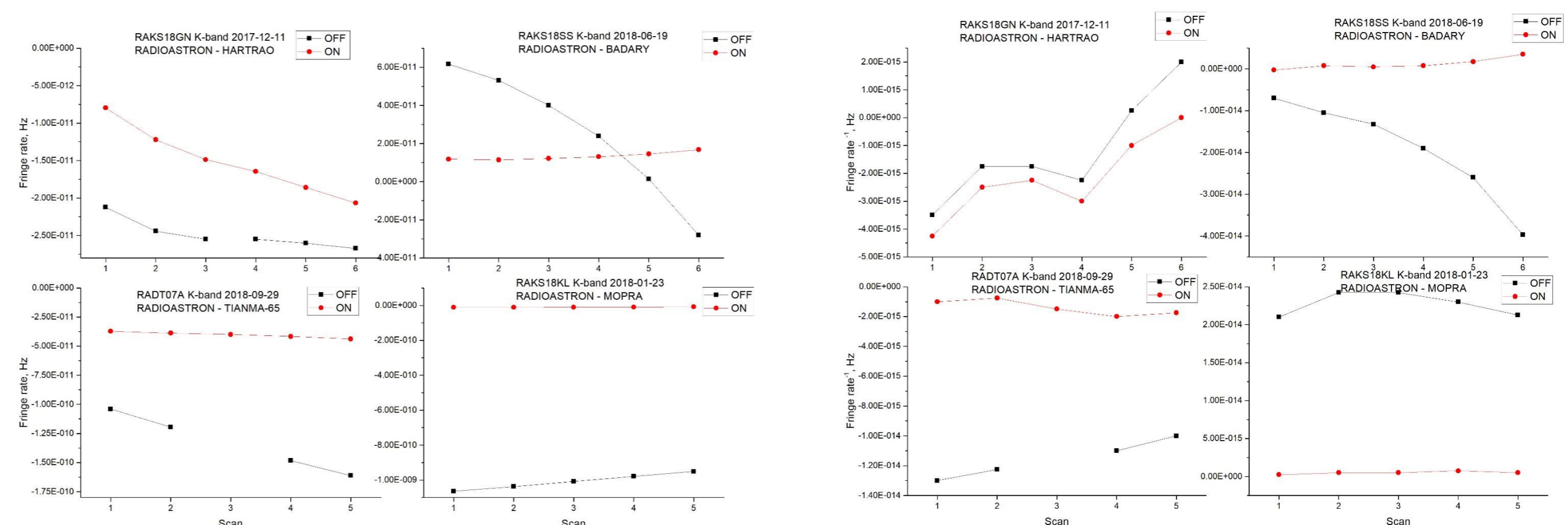


График зависимости амплитуды корреляции (верхний график) и соотношения сигнал-шум в режиме «Когерент» (нижний график) от времени накопления для эксперимента RAKS18BJ (29.09.2017, К - диапазон). В результате мы видим, что время когерентного накопления сигнала в режиме «Когерент» превышает 800 секунд в К-диапазоне, что соответствует значениям для бортового водородного генератора.



Сложными для корреляции являются эксперименты, проводившиеся в перигее орбиты Радиоастрона. В перигее возрастают все ошибки, связанные с точностью восстановления орбиты. Для дальнейшей обработки таких экспериментов крайне важно, чтобы остаточные частоты интерференции и ее первая производная были как можно меньше.



На графиках представлены остаточные частоты интерференции и их первые производные для 4 экспериментов (К - диапазон) в перигее. Черный цвет (OFF) - корреляция с моделью задержки без учета режима «Когерент», красный цвет (ON) - с учетом режима «Когерент».

## Выводы

- режим «Когерент» работал успешно;
- итоговая стабильность (время когерентности) сигнала с БВСЧ и наземного стандарта сопоставима;
- качество модели задержки даже в сложных случаях дает хороший результат (остаточная частота интерференции мала);
- опыт Радиоастрона показал, что данный режим может использоваться в качестве как резервного, так и основного способа синхронизации времени в будущих космических миссиях.