

УДК 520.6.05

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА С НУЛЕВОЙ БАЗОЙ В ПРОЕКТЕ “РАДИОАСТРОН”

© 2015 г. А. В. Бирюков

*Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
biriukov@asc.rssi.ru*

Поступила в редакцию 18.11.2014 г.

В ходе подготовки к запуску космического радиотелескопа для проведения наземных подготовительных и тестовых испытаний наземно-космического комплекса научной аппаратуры проекта “РадиоАстрон” были разработаны программы и методики испытаний в режиме интерферометра с нулевой базой, позволяющие измерить параметры бортового плеча наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинными базами, определяющими его основной комплексный параметр – чувствительность.

DOI: 10.7868/S0023420615030036

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание комплекса научной аппаратуры (КНА) для наземно-космического радиоинтерферометра явилось принципиально новой технической задачей, как в области радиоастрономии, так и в области космического приборостроения. Выполнение стандартных требований к аппаратуре космического назначения сильно осложнялось наличием требований одновременного функционирования научных и служебных систем КА, таких как служебные бортовые радиопередатчики (БА КИС), передатчики высокоинформативного канала передачи научных данных (ВИРК) и бортовых высокочувствительных радиоастрономических приемников в диапазоне частот 300–26000 МГц. Испытания в рамках требований по этой проблеме осуществлялись частично в процессе радиоастрономических проверок (РАП) на специальном полигоне Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО), частично в рамках выполнения программы наземной экспериментальной отработки БКНА в АКЦ ФИАН в Москве и в заключение – при заводских испытаниях космического комплекса в НПО им. С.А. Лавочкина [1].

Для проведения московских испытаний было предложено провести испытания интерферометра с нулевой базой (ИНБ-0). Суть испытаний состояла в том, что радиоинтерферометр был составлен из двух плеч: бортового – аппаратура БКНА КРТ и наземного (НРТ) – укомплектованного аппаратурой с наземных радиотелескопов. Испытательный сигнал, подаваемый на входы плеч ИНБ-0, не имел естественной временной задержки, присущей сигналу от космических радиоисточников на

входах реального (с геометрически разнесенными плечами) интерферометра, что и определило название испытаний. При испытаниях ИНБ-0 вся система находится в статическом состоянии и наземных научных данных. В этих испытаниях также тестировалась работа коррелятора и регистратора научных данных, разрабатываемых в АКЦ для обработки бортовых и наземных научных экспериментальных данных. В ходе испытаний ИНБ-0 были получены важные результаты о работе отдельных систем, определивших технологию проведения испытаний ИНБ-0 и космического радиотелескопа в целом. Существенным недостатком проведенных ИНБ было отсутствие в составе аппаратуры (по понятным техническим ограничениям) антенного сегмента радиотелескопа, хотя это отсутствие несколько не умалило важности испытаний.

2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Схема проведения ИНБ-0 показана на рис. 1. Необходимо отметить, что на этой схеме отсутствует сегмент линии передачи научных данных с борта КА на наземную станцию слежения (НСС). Данный вопрос исследовался самостоятельно, в рамках достоверности передачи сигналов по радиолинии ВИРК, и анализ показал правомерность построения схемы испытаний, изображенной на рис. 1. На схеме указаны корреляционные параметры сигналов: автокорреляционные (АК), межканальные (МК) и кросскорреляционные (КК), используемые при проверке интерферометра в различных диапазонах длин волн. Испытания ИНБ-0, как наиболее простые в технологическом плане, начинались с диапазона 6 см.

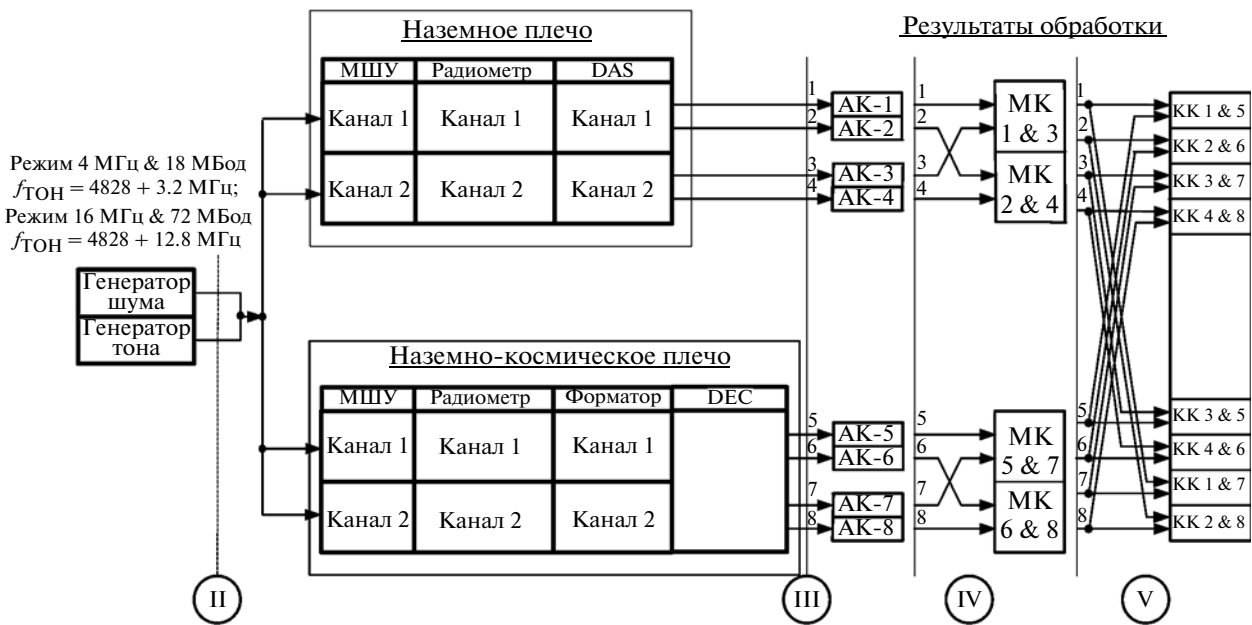


Рис. 1. Схема испытаний ИНБ-0.

В сечении II (рис. 1) присутствуют два сигнала, подаваемые в плечи ИНБ-0. Основной, шумоподобный сигнал от генератора шума (ГШ) с регулируемым выходным уровнем, а для контроля корректности сборки схемы испытаний подавался второй, тональный сигнал, $4828 + 3.2 \text{ МГц}$. При правильной сборке на корреляционных спектрах верхней боковой полосы должен присутствовать сигнал 3.2 МГц .

Сигналы на выходе плеч интерферометра должны быть совместимыми для осуществления их корреляционной обработки. Поэтому в наземном плече интерферометра использовался специально разработанный в *British Aerospace* прибор DAS, формирующий необходимый формат научных данных S2, которые фиксировались на цифровом регистраторе РДР. В наземно-космическом плече оконечная часть имеет сложный вид. Бортовые научные данные поступают на бортовой прибор “Форматор” в аналоговом виде, спектр сигналов ПЧ конвертируется в 4 видео полосы 16 или 4 МГц , оцифровывается и представляется как “параллельный” поток цифровых данных. Затем этот поток уплотняется в высокоскоростной “сериальный” поток цифровых данных и используется в качестве модулирующего сигнала несущей частоты 15 ГГц передатчика ВИРК, передающего научную информацию на землю. Модулированный сигнал, принятый на земле, соответственно обрабатывается в аппаратуре НСС и выдается на вход наземного прибора “Декодер”,

преобразующего бортовые сигналы из “сериального” в “параллельный” цифровой поток S2 (как и поток в наземном плече) и далее поступает на цифровой регистратор РДР. В схеме ИНБ-0, как уже говорилось, нет реально существующего в схеме бортового плеча интерферометра сегмента ВИРК (“модулятор–радиоизлучение–радиолиния–приемник–демодулятор”). Эта возможность, для упрощения технологии испытаний, была специально заложена в схему БКНА на начальной стадии проектирования миссии “РадиоАстрон”.

В конечном счете, бортовые и наземные сигналы, записанные на регистраторы РДР, после воспроизведения и соответствующей обработки позволяют получать автокорреляционные и кросскорреляционные характеристики интерферометра. Эти характеристики достаточно полно отражают свойства радиоинтерферометра в целом и его плеч в частности.

На рис. 1 показаны условные сечения: III – можно получать автокорреляционные функции (АКФ) и автокорреляционные спектры (АКС) интерферометра; IV – можно получать так называемые межканальные корреляционные функции (МКФ) и межканальные корреляционные спектры (МКС) интерферометра; V – можно получать кросскорреляционные функции (ККФ) и кросскорреляционные спектры (ККС) интерферометра.

В дальнейшем анализ результатов испытаний ИНБ-0 за 2-х летний период показал стабиль-

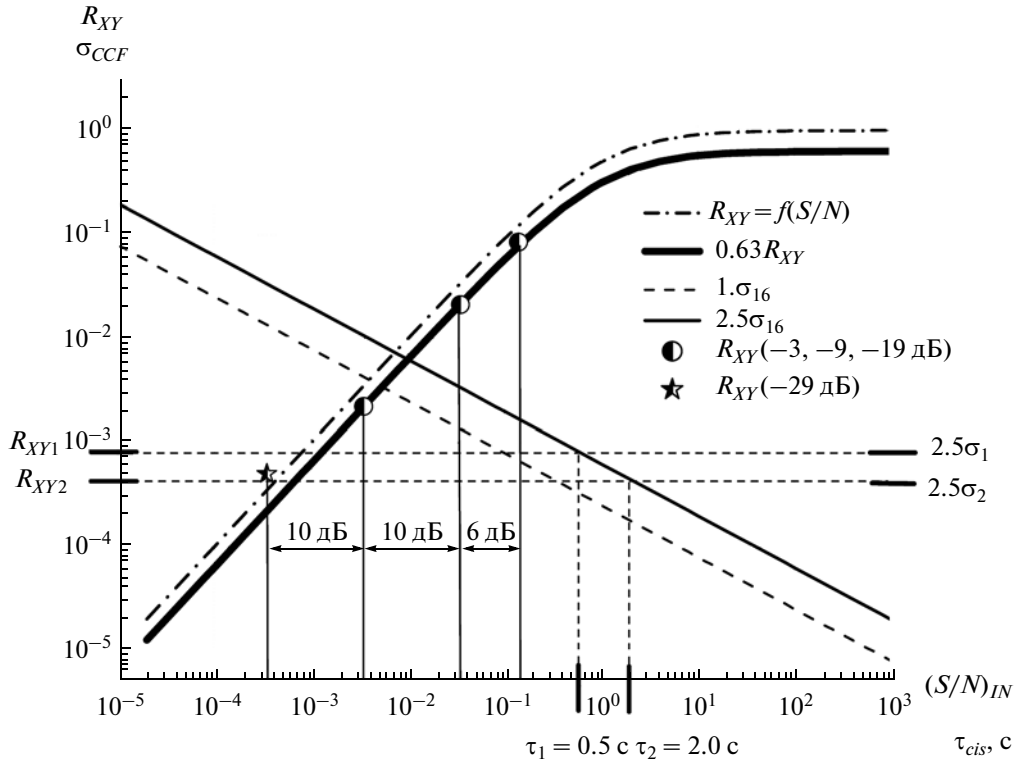


Рис. 2. Планшет для амплитудной калибровки интерферометра.

ность и повторяемость результатов АК, МК и КК. Поскольку в реальном эксперименте присутствуют различные наземные плечи, техническое руководство проекта сочло правильным упростить схему испытаний ИНБ-0 на заключительной стадии в НПОЛ, ограничившись использованием только МК параметров.

3. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ

А сначала, в круг экспериментальных проблем ИНБ-0 вошел вопрос определения чувствительности радиоинтерферометра, связанной с декорреляцией сигналов (ДКС) и максимально достижимым временем когерентного накопления (ВКН). Т.к. чувствительность интерферометра является величиной, зависящей от многих факторов, имеет смысл изобразить эти зависимости графически и отметить на графиках ограничения в виде численных значений. Таким образом, получился планшет, изображенный на рис. 2. Там, на одном графике с единой оцифровкой нанесены две зависимости:

1) значение ККФ (R_{XY}) в зависимости от радиотехнического соотношения сигнал/шум на входе интерферометра, где $S_{in} = S_{cog}$ — эквивалентная мощность шумоподобного сигнала от радиосточника на входах приемников, $N_{in} = S_{uncog}$ — эк-

вивалентная мощность шумов на входах плеч интерферометра:

$$S_{in} = \sqrt{S_{in1}^2 + S_{in2}^2}, N_{in} = \sqrt{N_{in1}^2 + N_{in2}^2},$$

$$R_{XY} = \frac{S_{in}}{S_{in} + N_{in}} = \frac{S_{cog}}{S_{cog} + N_{cog}}, \sigma_{ccf} = \sqrt{\frac{1}{\Delta F \cdot \tau_{cis}}}$$

Штрих-пунктиром на рис. 2 изображена скалькулированная зависимость $R_{XY} = f(S/N)$, а параллельная ей полужирная сплошная линия ниже — зависимость $R_{XY} = 0.63f(S/N)$, учитывающая однобитное квантование.

2) Ниспадающая слева направо пунктирная прямая линия показывает зависимость $\sigma_{ccf}(\tau_{cis})$ для видео полосы канала 16 МГц, а выше ее параллельная сплошная — $2.5\sigma_{ccf}(\tau_{cis})$. Превышение КФ значения $2.5\sigma_{ccf}$ (как “свертки” двухсторонних собственных шумов 5σ) указывает на присутствие когерентных сигналов в коррелируемых потоках.

Для примера, при заданных параметрах видеотрактов интерферометра и при $\tau_{cis} = 0.5$ с КФ (R_{XY1}) определяется с амплитудой выше $8 \cdot 10^{-4}$ (R_{XY2}) (верхняя горизонтальная пунктирная линия), а при $\tau_{cis} = 2.0$ с — выше $4 \cdot 10^{-4}$ (нижняя горизонтальная пунктирная линия).

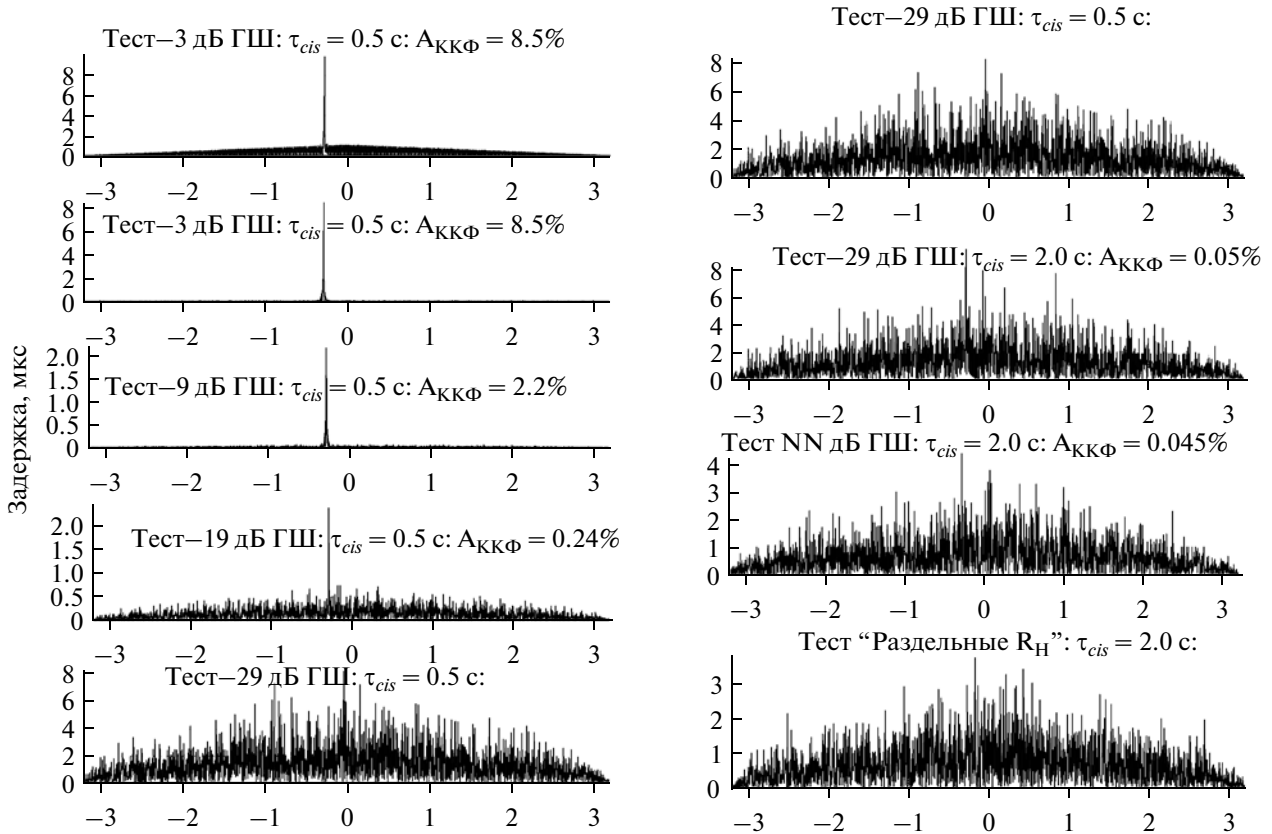


Рис. 3. Кросскорреляционные функции при амплитудной калибровке интерферометра.

С целью проведения амплитудной калибровки с использованием предложенного планшета был проведен следующий тест:

Для тестирования был выбран сигнал ГШ таким образом, чтобы значение КФ попало на конец линейного участка $R_{\text{ХУ}}$ (перед началом нелинейного участка справа, верхняя точка). При таком уровне тестового сигнала можно визуально определять соотношение сигнал/шум на экране анализатора спектра и тем самым гарантировать достоверные значения параметров.

Далее, в схему тестирования поочередно вводились калиброванные фиксированные аттенюаторы и на корреляторе ASL производилась обработка зафиксированных соотношений сигнал/шум для получения значений КФ. На рис. 2 эти значения обозначены полужакрашенными символами, а также указаны значения использованных аттенюаторов.

Эпюры последовательных шагов тестирования представлены на рис. 3 (левая колонка рисунка). На 2-х верхних эпюрах сигнал ГШ подан в оба плеча интерферометра, при котором $\text{КФ} \approx 0.08$. Сигнал сильный, корреляционные шумы в нижней боковой полосе (НБП) не видны, в верхней боковой полосе (ВБП) видна подставка от тонального

сигнала +3.2 МГц. На 3-ей сверху эпюре, после введения на входе аттенюатора 6 дБ, амплитуда КФ уменьшилась в 4 раза и составила ≈ 0.022 , у основания появились небольшие шумы КФ. На 4-ой эпюре после введения еще 10 дБ КФ стала ≈ 0.0024 (уменьшилась в 10 раз), и стали ощутимыми шумы КФ. На последней 5-ой эпюре, после введения в цепь подачи ГШ еще 10 дБ затухания, КФ не определяется, т.к. шумы КФ накрыли соответствующую точку $R_{\text{ХУ}}$.

Выше перечисленные эпюры получены при времени когерентного накопления $\tau_{\text{cis}} = 0.5$ с. Наличие сдвига максимума КФ на эпюрах объясняется различием инструментальных задержек в плечах интерферометра, составляет порядка 3 мкс и сохраняется во всех экспериментах с данным комплектом аппаратуры. Полученные результаты хорошо ложатся на поле планшета, последняя точка, при аттенюаторе 29 дБ, оказывается ниже уровня $2.5\sigma_{\text{ср}}(\tau_{\text{cis}} = 0.5$ с), что соответствует пропаданию КФ в шумах. Снижение уровня шумов к краям эпюр связано с типом коррелятора, здесь к краям установленного окна задержек уменьшается количество отсчетов, участвующих в процессе корреляции.

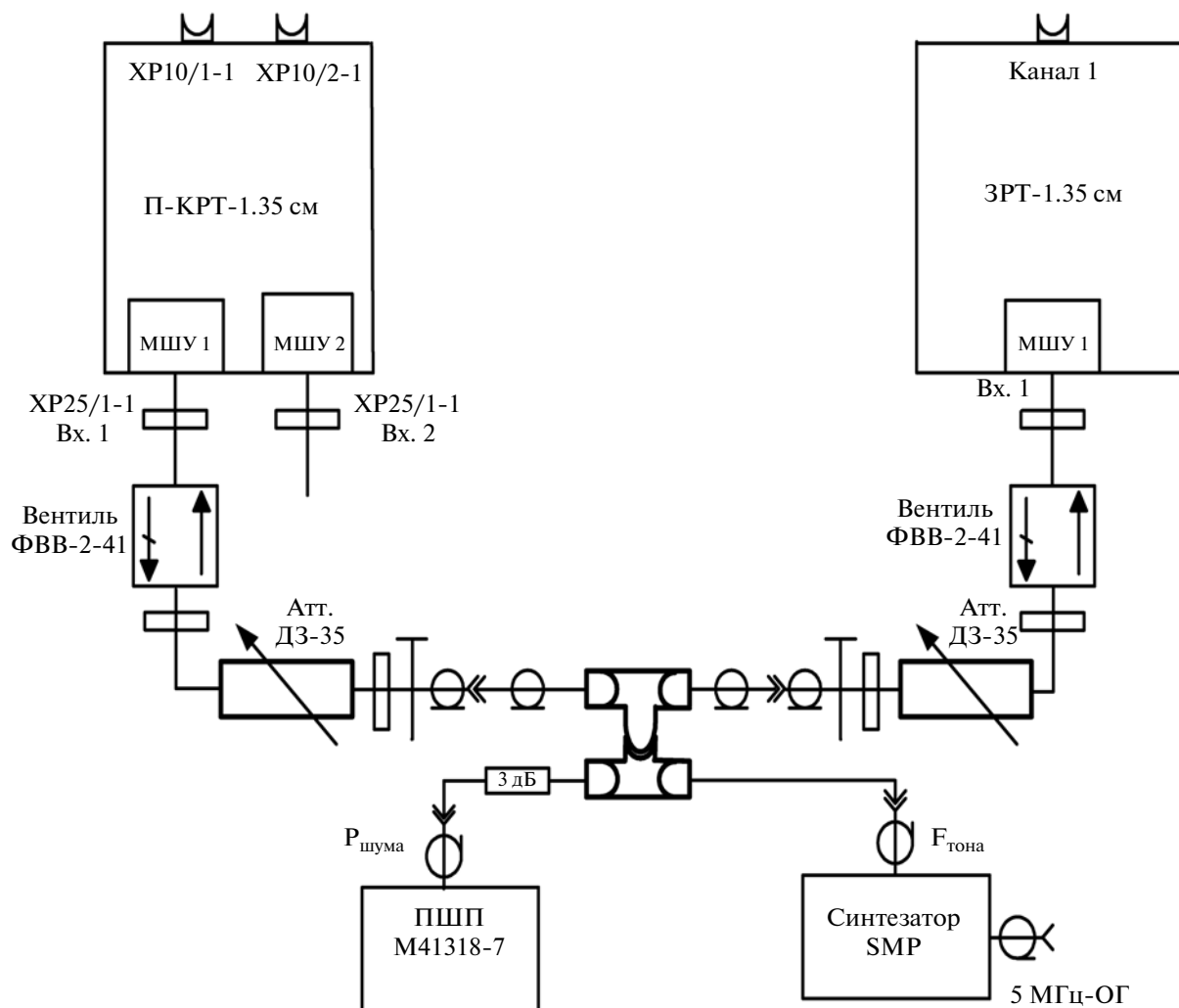


Рис. 4. Схема подачи сигналов в тесте ИНБ-0 для диапазона 1.35 см.

Эти же данные были обработаны для времени когерентного накопления $\tau_{cis} = 2.0$ с (см. эпюры в правой колонке рис. 3). Для сравнения, верхняя эпюра в этой колонке повторяет эпюру 5 в левой колонке ($\tau_{cis} = 0.5$ с). На 2-ой правой эпюре при $\tau_{cis} = 2.0$ с появилась КФ с амплитудой 0.0005. По сравнению с планшетными данными это значение несколько завышено. При отключении мощности ГШ (эпюра 3 в правой колонке) амплитуда КФ составляет 0.00045. Но это не субъективное определение значения $\sin X/X$ амплитуды КФ, а, как и все предыдущие, получены цифровым аппаратным способом и зафиксированы в заголовках эпюр (к сожалению, на эпюрах в тексте они не читаемы). Расположение точек и уровней шумов на планшете показывают, что при существующем значении R_{xy} и принятом $\tau_{cis} = 2.0$ с КФ на эпюре должна определяться, что и есть на самом деле (значок выше уровня $2.5\sigma_{cef}(\tau_{cis} = 2.0$ с).

Как выяснилось позже, завышение измеренных значений при малых уровнях входных сигналов является следствием недостаточной развязки при тестировании между входами плеч интерферометра, находящееся на уровне $1/0.00045 = 2222$ (это более 30 дБ). Увеличение развязки между входами связано с техническими трудностями при работе со слабыми сигналами и необходимостью увеличения мощности тестового генератора. Наличие недостаточной развязки подтверждается эпюрой 4 правой колонки. В этом тесте входное устройство подачи сигналов было отключено и на входах остались только независимые согласованные нагрузки по 50 Ом. Сигнал КФ отсутствует.

Схема подачи тестирующих сигналов при калибровке интерферометра показана на рис. 4. Важным усовершенствованием, правда, уже после описанных тестов, явилось введение в схему вентиля с обратным затуханием 40 дБ.

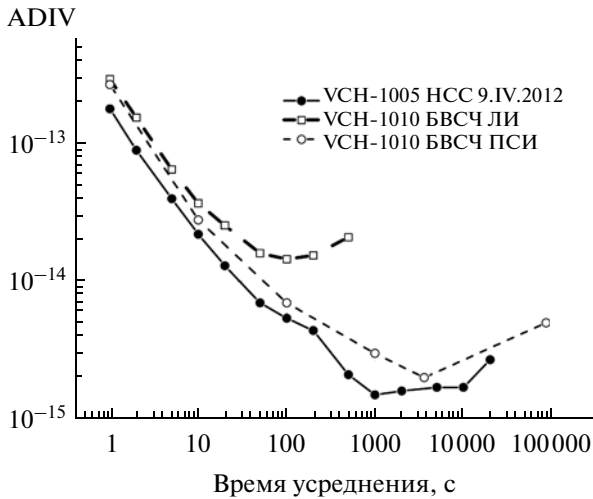


Рис. 5. Вариация Аллена для БВСЧ и НСВЧ.

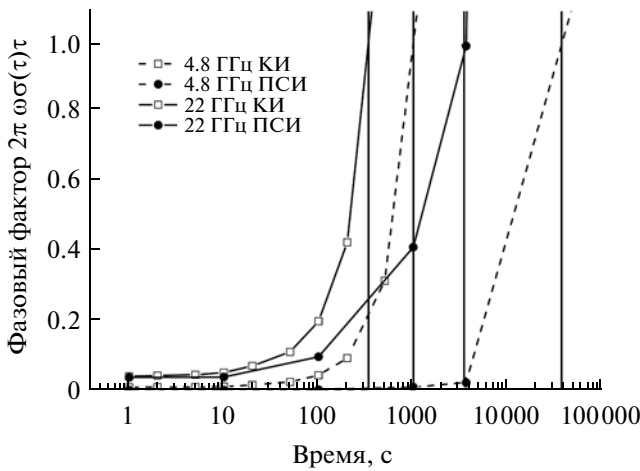


Рис. 6. Время декорреляции сигналов в диапазонах 6 и 1.35 см.

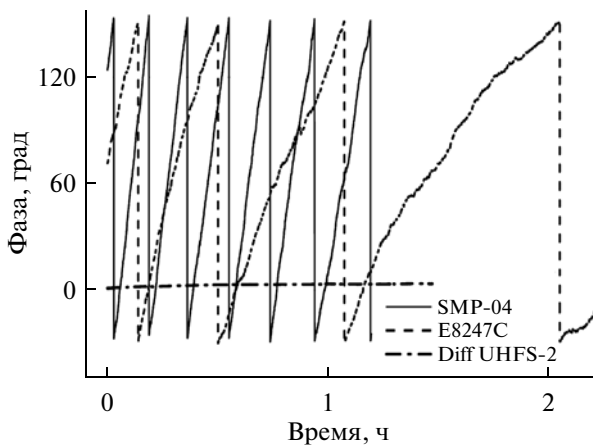


Рис. 7. Смещения частоты и дрейф фазы гетеродинных сигналов 4320 МГц.

В планшете на рис. 2 предполагалось, что R_{XY} константа во времени. Но на самом деле это не так. Во-первых, существует время когерентности сигнала генератора, связанное с собственными фазовыми шумами устройства. Это время уменьшается по мере возрастания номинала частоты устройства, т.к. абсолютная флуктуация фазы увеличивается при неизменной относительной стабильности частоты. Существует грубая оценка времени когерентности

$$2\pi f_0 t_c \sigma_y(\tau_c) \cong 1.$$

Время когерентности условно равно времени t_c , за которое среднеквадратичная ошибка фазы при соответствующем $\sigma_y(\tau_c)$ достигает значения 1 радиан. По имеющимся в распоряжении данным вариации Аллена (рис. 5) построены графики декорреляции сигналов, представленные на рис. 6.

Построенные кривые показывают, что при использовании в качестве опорного генератора бортового плеча водородного стандарта частоты БВСЧ–КРТ в диапазоне 6 см с декорреляцией сигнала нет проблем. Эта величина более 10000 с, которая на практике в радиоинтерферометрии не используется. В диапазоне 1.35 см ситуация более напряженная, т.к. при рассмотрении работы бортового водородного стандарта возможны 2 версии вариации Аллена, которые изображены на рис. 6:

кривая, полученная на прямо-сдаточных испытаниях (ПСИ) на предприятии изготовителя (обозначена “контурными квадратами”);

кривая, полученная при комплексных испытаниях (КИ) в НПОЛ (обозначена “темными кружками”). Частотные сдвиги и дрейфы влияют на минимум характеристик ADIV и их крутизну правее этого минимума. Доподлинно известно, что при КИ не был обеспечен требуемый прогрев БВСЧ в силу технологических причин, но эти результаты ADIV КИ были опубликованы и поэтому результат требует пояснения. По данным ПСИ время декорреляции составляет ~4000 с, по данным КИ ~400 с. Как видно из графиков ADIV долгосрочный прогрев БВСЧ значительно увеличивает время декорреляции опорного сигнала. По результатам летных испытаний (ЛИ), после 2-х летней непрерывной работы, вид ADIV БВСЧ повторяет ADIV НСВЧ на станции слежения.

Как показали многочисленные испытания, дрейфы частоты мало прогретых устройств во всем комплексе радиоинтерферометра приводят к результату, аналогичному с результатами КИ. Одним из источников подобных дрейфов являются синтезаторы частот, широко используемые в плечах интерферометра. На рис. 7 представлен относительный ход частот гетеродинных сигналов 4320 МГц, сформированных на основе единой

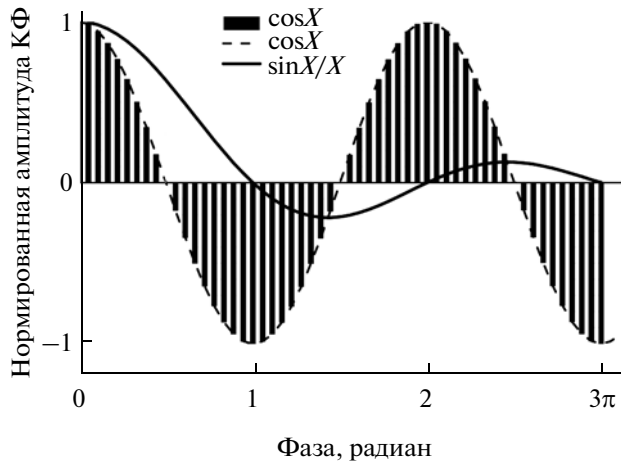


Рис. 8. Соотношения мгновенных и усредненных значений КФ.

опорной частоты в синтезаторе частоты БФГТЧ–КРТ и в 2-х промышленных синтезаторах. Каждый период пилообразного сигнала на графике рис. 7 соответствует изменению фазы измеряемых сигналов на π (180°). Если сигнал синтезатора Agilent E8247E (пунктирная линия) имеет смещение $\Delta f/f_0 = 3.2 \cdot 10^{-14}$ и эта величина уменьшается с прогревом, то сигнал синтезатора SMP Rode & Schwarz (сплошная линия) смещен приблизительно на $\Delta f/f_0 = 1.8 \cdot 10^{-13}$ и меняется слабо, т.е. здесь присутствует постоянный сдвиг частоты. Сравнение сигналов БФГТЧ–КРТ показывает незначительное смещение частоты на уровне менее $\Delta f/f_0 = 1.0 \cdot 10^{-15}$. Ниже, при рассмотрении вопроса смещения видео полос, будет дана оценка таких смещений.

Влияние сдвигов по частоте исследуемых спектров при ИНБ подтверждается измерениями в ИНБ-0. Как известно, если оба плеча засинхронизировать одним и тем же опорным сигналом, то время когерентного накопления сигнала (τ_{cis}) практически не ограничено. При использовании отдельных опорных сигналов в плечах интерферометра возникает сдвиг опорных частот, как следствие этого сдвиги исследуемых видео спектров, и появляется проблема дефицита τ_{cis} , вызванного ограничением времени накопления среднего, подчиняющегося закону $\sin X/X$ (рис. 8). Из графика видно, что значение среднего $\sin X/X$ – функция только относительной фазы коррелируемых сигналов.

На рис. 9 графически показана взаимосвязь времени τ_{cis} с частотой исследуемого диапазона и с относительной величиной сдвигов видео полос по частоте. На этом рисунке в логарифмическом масштабе изображена функция $\sin X/X$, скалькированная и пронормированная по максимуму КФ для частотных диапазонов 6 и 1.35 см и при

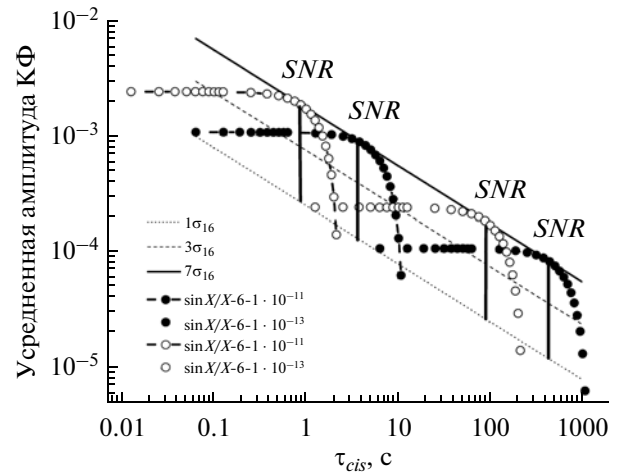


Рис. 9. Усредненное значение КФ в диапазонах 6 и 1.35 см при сдвиге ОЧ $1 \cdot 10^{-11}$ и $1 \cdot 10^{-13}$.

относительных сдвигах опорных частот $1 \cdot 10^{-11}$ и $1 \cdot 10^{-13}$. Видно, что за счет уменьшения частотных сдвигов, появляется потенциальная возможность увеличения чувствительности интерферометра за счет увеличения времени когерентного накопления.

Соотношение сигнал/шум на выходе коррелятора желательно иметь, $SNR = R_{XY}/\sigma_{ccf} = 3-7$, где $\sigma_{ccf} = 1/\sqrt{\Delta F \cdot \tau_{cis}}$, ΔF – полоса видео канала, Гц; τ_{cis} – время накопления, с; SNR – превышение значения R_{XY} над шумами коррелятора. Обычно значение SNR представляется в разгах или децибеллах. Необходимо отметить, что чувствительность часто однозначно связывают с значением SNR и используют его в качестве меры чувствительности интерферометра: $SNR = R_{XY}/\sigma_{ccf}$.

На планшете (рис. 9) не трудно найти множество одинаковых значений SNR , соответствующих разным значениям S/N_{in} и τ_{cis} . Реально, чувствительность интерферометра растет за счет увеличения R_{XY} и это техническая характеристика приемного тракта, а уменьшение $\sigma_{ccf}(t)$ – это функция времени, позволяющая увидеть КФ на фоне ее собственных шумов (если удовлетворяются требования к сигналам, о которых говорилось выше). Это означает, что параметр SNR нельзя использовать в качестве меры чувствительности интерферометра.

Поэтому при обсуждении проблем чувствительности интерферометра в первую очередь надо принимать во внимание собственные шумы радиометров, тогда при максимально доступном времени когерентного накопления или времени декорреляции (в зависимости от того, что раньше наступит) определять максимальную чувствительность. Планшет на рис. 10 наиболее полно отображает ситуацию с несколькими переменны-

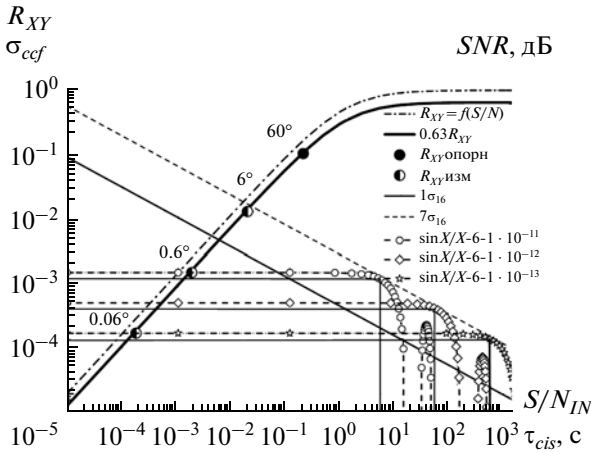


Рис. 10. ИНБ-0. Планшет для определения ВКН в диапазоне 6 см.

ми параметрами интерферометра и направлениями их вариации для получения максимального значения КФ для конкретного интерферометра.

4. МОДИФИКАЦИЯ ТЕСТОВ

Качественное развитие парка измерительной аппаратуры позволило сократить объем аппаратуры, участвующей в испытаниях, не ухудшая качество измерений. В практике испытаний КРТ была опробована подмена второго плеча интерферометра за счет разнесения сеанса тестирования во времени. Получается некоторый виртуальный интерферометр с параметрами, присущими одному из плеч интерферометра, в нашем случае плечу БКНА–КРТ. Эта операция была корректна при тестировании с использованием генераторов гармонических входных сигналов (такие сигналы квазикогерентны во времени). Появление аппаратуры с формированием когерентной псевдошумовой последовательности (КПШП) упростило схему испытаний ИНБ-0, позволив отказаться от схемы подачи тестовых сигналов в два плеча интерферометра, что особенно привлекательно при тестировании в диапазоне 1.35 см, требующим использования волноводной техники. Такое упрощение оказалось и стратегически верным, т.к. в предыдущих испытаниях участвовало второе плечо со своими персональными параметрами, оказывающими соответствующее влияние на конечный результат. И что еще важно, что в реальной ситуации работы по проекту “Радио-Астрон” присутствует множество вторых (наземных) плеч, протестировать которые в режиме ИНБ-0 практически невозможно. В то же время протестировать наземные телескопы в режиме ИНБ-Т вполне реально (для отождествления режима тестирования плеча сигналами КПШП с

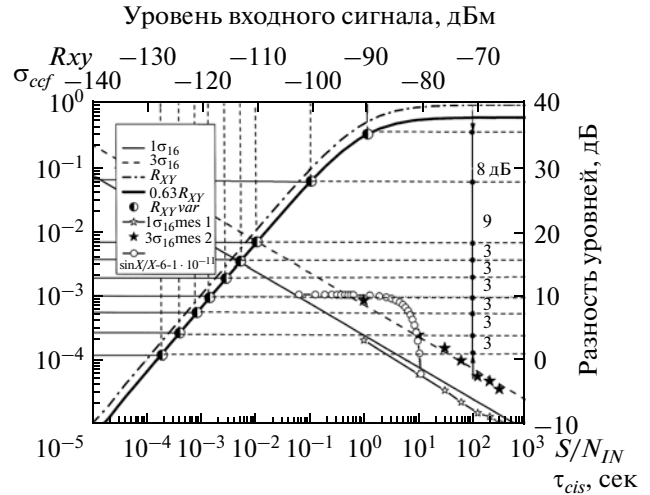


Рис. 11. ИНБ-Т. Калибровка наземного приемника диапазона 6 см когерентным сигналом ПШП.

разнесением во времени введена индексация ИНБ-Т – “Time”). При такой ситуации сравнение характеристик радиотелескопов становится более объективным.

Результаты калибровки интерферометра в диапазоне 6 см с использованием ИНБ-Т представлены на рис. 11. Первое, что необходимо отметить, калибровка получается более точная (по сравнению с калибровкой рис. 2) и в большем динамическом диапазоне. Второе – нет паразитных пролезаний сигналов, нарушающих линейность функции R_{XY} в этой же области. Выбор времен когерентного накопления полностью соответствует планшетным данным. $\sigma_{csf}(t)$ измерена по двум методикам, но результаты близки к расчетным и не вызывают сомнения.

Дальнейшее развитие измерений ИНБ-Т позволило показать на планшете влияние смещения частот опорных генераторов. Для этого были произведены две записи ПШП сигналов: одна запись с использованием опорного сигнала от БВСЧ, а другая – с использованием опорного сигнала от БРСЧ. Интервал между измерениями как бы имитировал уход частоты за этот интервал. Предварительно, из условия минимизации времени обработки, было определено относительное смещение частот ОГ, которое составило $3.1 \cdot 10^{-10}$. На графике рис. 12 кривая с сплошными значками показывает измеренное значение величин, кривые с контурными значками – скалькулированные значения. Качественно эффект подтверждается полностью, количественно полностью подтвердить не удалось из-за дефицита времени. Для увеличения точности необходимо подбирать параметры обработки и, как минимум, увеличить количество экспериментальных точек хотя бы на порядок.

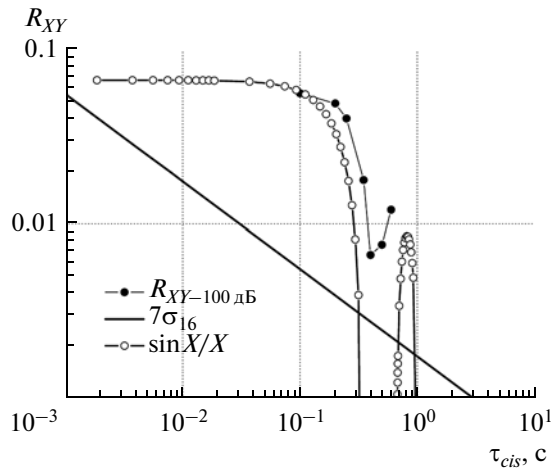


Рис. 12. ИНБ-Т. ВКН в диапазоне 6 см при сдвиге ОЧ $3.1 \cdot 10^{-10}$.

Все выше представленное в виде иллюстраций, в основном, было основано на тестированиях в диапазоне 6 см, как наиболее технологичном и достаточно высокочастотном. В миссии “Радио-Астрон” диапазон 1.35 см уже значительно сложнее, поскольку разбит на 8 полос с шагом 960 МГц и занимает общую полосу от 18 до 26 ГГц. Для тестирования такое устройство равносильно 8 от-

дельным приемникам. Главное внимание в этих испытаниях было сосредоточено на стабильности параметров фазовых характеристик трактов и стабильности коэффициентов передачи трактов на краткосрочных интервалах времени порядка нескольких минут, но прослеживаемых на протяжении 2–3 лет. Центр тяжести в тестировании приемника лег на диапазон 1.35 см – F0 (центральная частота 22232 МГц).

На рис. 13 отображены результаты кросскорреляционной обработки на корреляторе АКЦ нового поколения 2-х минутного тестового сеанса от 9.И.2007 09.38.50–09.40.50. Тест проводился по методике ИНБ-0 и для общего опорного генератора (ООГ). Показаны 5 стандартных (для АКЦ) параметров, по которым оценивается качество работы устройства в сеансе:

1. график амплитуды ККФ (Ampl) для верхней (ВБП) и нижней (НБП) боковых полос, сдвиг между кривыми оценивает фазовую и, отчасти, амплитудную не идентичность каналов, изменение параметра по величине – стабильность канала за сеанс;

2. график действительной части ККФ (Re.part) позволяет определить в сопоставлении с амплитудой ККФ амплитудные это или фазовые проблемы, возникающие в тракте;

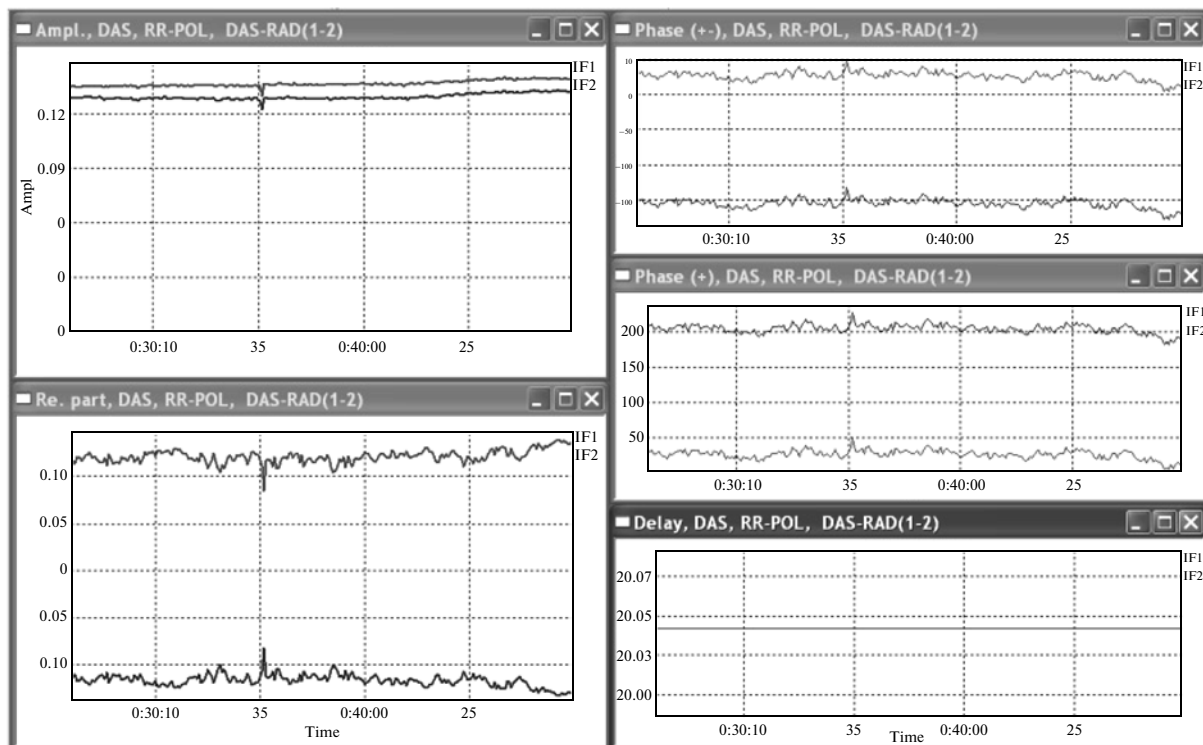


Рис. 13. Основные характеристики интерферометра, полученные при корреляционной обработке.

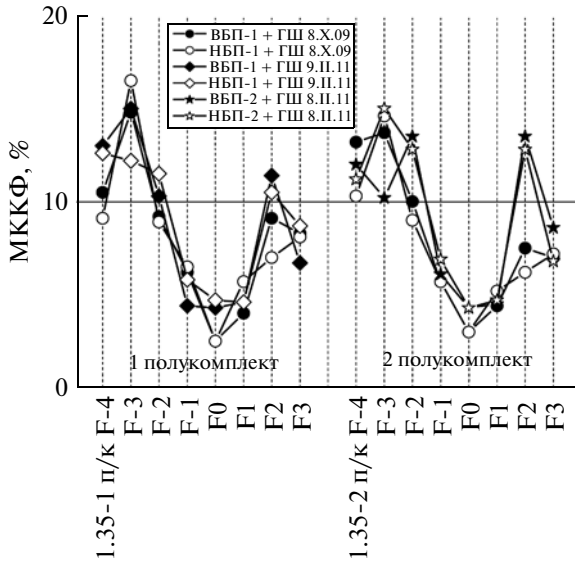


Рис. 14. МККФ диапазона 1.35 см при испытаниях БКНА (с подачей ГШ).

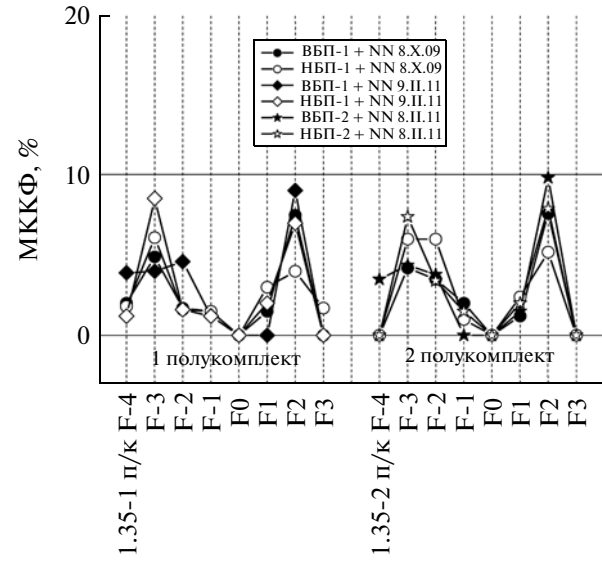


Рис. 15. МККФ диапазона 1.35 см при испытаниях БКНА (без подачи ГШ).

3–4. два индикатора фазы, с интервалом перекрытия $-\pi \dots +\pi$ (Phase $+$ $-$) и $0-2\pi$ (Phase $+$) позволяют исключить из рассмотрения области перехода фазы $N \cdot 2\pi$ и $N \pm \pi$ (просто для удобства), а по наклону и флуктуациям кривой определять сдвиги спектров по частоте и частотную стабильность. Так для данного теста имеем:

собственный сдвиг частот в каналах $\delta f = 25^\circ/2/22232000000/360/120 = 1.3 \cdot 10^{-14}$;

стабильность $\sigma_f = 25^\circ/22232000000/360 = 3.12 \times 10^{-12}$ для $\tau_{cis} = 1$ с;

предельное время когерентного накопления τ_{cis} , ограничиваемое бортовой радиотехнической системой, составляет порядка 4000 с, возможное ухудшение этого параметра зависит уже от параметров и взаимных настроек наземного плеча интерферометра;

наличие фазового сдвига “ π ” между каналами ВБП и НБП обусловлено схмотехническими проблемами при реализации бортового *SSB* формирователя боковых полос, как и симметричное, относительно 0, значение *Re.part*;

5. график текущей задержки сигналов в тракте (*Delay*), как уже упоминалось выше, порядка 3 мкс для данного комплекта аппаратуры ИНБ-0 и находится в стабильном состоянии.

Это хорошие характеристики для диапазона 1.35 см-F0. Аналогичные характеристики наблюдаются и для других диапазонов F-4–F3.

Стабильность параметров интерферометра в диапазоне 1.35 см на больших интервалах времени. Измерение параметров приемников осуществлялись периодически на протяжении нескольких лет, в заключение чего стал возможным некоторый

объединенный график. На этом графике размещены только результаты измерений в АКЦ, перед сдачей комплекса в НПОЛ (октябрь 2009 г.), и в НПОЛ, перед сдачей комплекса на заключительную сборку (февраль 2011 г.). Специально не показан осредненный график, т.к. он только бы замазал картину. В результате анализа тотальных измерений АК, МК и КК на начальном этапе ИНБ-0, как упоминалось выше, было принято решение о возможности завершения испытаний с измерением только МК, которые к тому же проводились в рамках ИНБ-Т.

По результатам измерений (рис. 14, 15) появилось еще одно важное заключение о том, что волноводный разделитель поляризаций на входе МШУ-1.35 см узкополосный. Изначально настроенный для работы в диапазоне 1.35 см-F0 (МК стремится к 0), по мере ухода от этой частоты значения МК начинают расти, что, по-видимому, связано с уменьшением межканального затухания для поляризационных каналов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате испытаний в режимах ИНБ-0 и ИНБ-Т был получен ряд характеристик и параметров комплекса аппаратуры наземно-космического радиоинтерферометра. В основном, определения касались бортового плеча, как нового явления в интерферометрии на сверхбольших базах, хотя многие положения могут быть общими для любых интерферометров.

Общеизвестно, что в радиоинтерферометрии требования к характеристикам и параметрам возрастают по мере увеличения частоты исследуе-

мых сигналов. Поэтому при тестировании аппаратуры миссии “РадиоАстрон” предпочтение было отдано диапазонам 6 и 1.35 см, а диапазоны 92 и 18 см считались в норме (для интерферометрии), если не возникло каких либо недоразумений на верхних диапазонах.

Для исследований применялись два метода тестирования:

классический ИНБ-0, когда испытываются одновременно два плеча интерферометра и на входы подается один и тот же тестовый сигнал, а результат оценивается по вычисленной КФ;

модернизированный ИНБ-Т, испытывается только одно плечо интерферометра, а тестовый сигнал подается дважды, с сдвигом по времени и результат оценивается по вычисленной МКФ.

Калибровка радиоинтерферометров заключается в сопоставлении расчетных и экспериментально полученных данных значений КФ. Были проведены калибровки в диапазоне 6 см по методике ИНБ-0 и в диапазоне 1.35 см по методике ИНБ-Т. Результаты одинаковые по точности и составляют ~10–15%. Динамический диапазон тестирующих сигналов в режиме ИНБ-Т шире, что объясняется отсутствием в данном методе недостаточных межканальных развязок.

Время когерентности сигналов является одним из важных факторов, ограничивающих потенциальную чувствительность интерферометра. По данным вариации Аллена для опорного сигнала, являющегося основой для формирования сигналов, участвующих в частотных преобразованиях в плечах интерферометра, когерентность сигналов должна сохраняться в течении 4000 с для диапазона 1.35 см и более 10000 с для остальных диапазонов.

Вторым фактором, ограничивающим чувствительность интерферометра, является частотный сдвиг преобразованных спектров, возникающий из-за неточности выставления номиналов опорных сигналов в плечах интерферометра и за счет движения КА относительно НСС (неопределенность знания орбиты, возникновение релятивистских поправок, а также ионосферные и тропосферные сдвиги). В зависимости от величины частотного сдвига ОГ и используемого диапазона рабочих частот интерферометра происходит падение среднего значения накопленного сигнала и наступает момент, когда он становится сравнимым с собственными шумами в корреляторе. Этот интервал времени и будет определять время когерентного накопления (ВКН).

Конкретно оценивать создающуюся ситуацию предлагается с использованием планшета, на котором имеются параметрические графики $\sigma_{сф}$ как функции времени, полосы анализируемого сигнала, выбранной кратности σ и ход функции корреляции в зависимости от относительного сдвига

частот видео спектров. При наличии этих данных можно определять предполагаемое значение R_{xy} и необходимое для этого ВКН или наоборот.

Зафиксировано влияние частотных дрейфов опорных сигналов на ход кривой вариации Аллена. В частности, для диапазона 1.35 см при выходе в рабочий режим при плохо прогревом бортовом стандарте частоты время когерентности сигнала снижается до ~400 с против ~4000 с после длительного (несколько суток) прогрева. Аналогично, дрейфы частоты в аппаратуре приводят к уменьшению времени когерентности.

В ходе ИНБ были подтверждены долгосрочные стабильности параметров МКФ, измерение которых осуществлялось в течение нескольких лет. Приведены показатели МКФ для завершения испытаний в АКЦ в 2009 г. и для завершения испытаний в НПОЛ в 2011 г. Специально показаны не усредненные характеристики. Налицо хорошая повторяемость результатов на уровне $\sim\pm 15\%$, что свидетельствует о стабильности приемных трактов интерферометра.

На этих же графиках наблюдается подъем значений МКФ при переходе к краям общего диапазона 1.35 см. По видимому, это связано с узкополосностью волноводного селектора поляризацій и то, что он изначально проектировался и оптимально настраивался на частоту 22232 МГц.

И еще один довод в пользу мнения об узкополосности селектора поляризацій в том, что без подачи тестового сигнала значение МКФ близко к 0 на частоте F_0 и увеличивается на соседних частотах. Можно предположить, что подобная картина зависит от настройки БАО-1.35 см, а именно, связано с ухудшением переходного затухания на соседних с F_0 частотных каналах и взаимопроникновением тестового сигнала в поляризационные каналы приемников, увеличивающего значения КФ.

Первые полученные корреляционные функции сигналов в режиме ИНБ-0 можно датировать началом 2000 года. Процесс корреляции оказался громоздким и плохо управляемым. И с этого же времени в АКЦ начались поиски оптимизации и минимизации процесса получения корреляционных характеристик. В результате чего была разработана регистрация научных данных на жестких дисках, пересмотрен алгоритм создания уплотненного потока данных на борту, перепроектирован наземный декодер научных данных и некоторые другие нововведения. Вместе с этим в методику испытаний ИНБ-0 вводились новые элементы передовой измерительной техники с когерентными псевдошумовыми выходными сигналами, что позволило отойти от “классического” тестирования ИНБ-0 в пользу “временного” ИНБ-Т. Такой подход по началу тормозил проведение испытаний, но в конечном счете позволил сделать большой рывок

на заключительном этапе испытаний и скомпенсировать образовавшийся дефицит времени.

Все вышеизложенные тезисы были проверены в ходе испытаний и полученные экспериментальные данные подтвердили правильное, с точки зрения радиотехники функционирование радиоэлектронного комплекса интерферометра. Полученные характеристики однозначно истолкованы и готовы к применению для расчетов в астрономической области знаний.

В итоге на ИНБ ушло более 10 лет подготовительных работ и тестов, перепроектирования и изготовления значительного количества новой аппаратуры, осмысления полученных результатов, повторных тестов для технологических и летных образцов бортовых приборов и наземного оборудования. Благодаря огромной работе проведенной сотрудниками АКЦ, ИКИ, изготовителей-смежников отдельных приборов, огромного коллектива НПОЛ на предпусковых и летных испытаниях программа ИНБ была успешно завершена. Отдельные элементы тестирования были

заимствованы в программу испытаний ЭМС для всего комплекса АКА. Сегодня, когда спутник функционирует на орбите уже более 3-х лет, можно утверждать, что испытания были проведены еще и качественно. Также необходимо отметить, что предполагаемые на ранней стадии существования проекта рекордные характеристики наземно-космического радиоинтерферометра, на сегодняшний день, реализованы практически и во многом благодаря оригинальным техническим решениям при разработке и проведении испытаний интерферометрического комплекса, а так же благодаря самоотверженному труду коллектива ученых, инженеров и рабочих, участвовавших в реализации миссии “РадиоАстрон”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кардашев Н.С.* Радиоастрон (проект “Спектр-Р”) – радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2011. № 3. С. 11.