

Исследования характеристик приемных устройств на радиоинтерферометрическом стенде

© Ю. В. Векшин, В. О. Кең, В. К. Чернов, А. А. Евстигнеев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Для лабораторных исследований характеристик приемных систем радиотелескопа РТ-13 в ИПА РАН создан радиоинтерферометрический стенд. В состав стенда входят: управляемый генератор шума, широкополосная цифровая система преобразования сигналов с полосой регистрации 512 МГц, стандарт частоты, программный FX-коррелятор РАН, а также система буферизации и передачи данных.

В статье представлены описание стенда и результаты исследований двух трехдиапазонных приемных систем радиотелескопа (ПСП) и макета широкополосной ПСП РТ-13 в X-диапазоне. Определены следующие характеристики корреляционного отклика: отношение сигнал-шум, частота интерференции, стабильность задержки и фазы. Исследовано влияние погрешности установки частоты и фазовой нестабильности гетеродинов приемных устройств на характеристики корреляционного отклика радиоинтерферометра с нулевой базой.

Показано, что цифровая фильтрация спектра регистрируемого сигнала позволяет снизить среднеквадратическое отклонение (СКО) задержки. Методом математического моделирования определена амплитудно-частотная характеристика аналогового антиалиасингового фильтра, минимизирующего влияние фазовой нестабильности приемных систем на СКО задержки корреляционного отклика радиоинтерферометра с нулевой базой.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, РСДБ, трехдиапазонная приемная система, широкополосная приемная система, гетеродин, коррелятор, отношение сигнал-шум, задержка, фазовая стабильность, стабильность задержки.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.19-30>

Введение

Для фундаментального координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС (определения поправок Всемирного времени) в ИПА РАН в 2015 г. создан двухэлементный радиоинтерферометр со сверхдлинной базой, который состоит из радиотелескопов РТ-13 обсерваторий «Бадары» и «Зеленчукская», входящих в состав сети «Квazar-КВО» [1]. Для обработки результатов наблю-

дений используется программный FX-коррелятор РАН [2]. Радиотелескопы РТ-13 оснащены трехдиапазонной (2.2–2.6 ГГц, 7.0–9.5 ГГц, 28–34 ГГц) приемной системой [3] и широкополосной цифровой системой преобразования сигналов с полосой регистрации 512 МГц [4]. В настоящее время в ИПА РАН ведутся работы по созданию третьего радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое», который будет оснащен широкополосной приемной системой (3–16 ГГц) [5]. Трехэлементный радиоинтерферометр должен будет обеспечивать оперативное определение поправок Всемирного времени ежедневно 3–4 раза в сутки со среднеквадратической погрешностью не более 20 мкс. При работе радиотелескопов в обсерваториях в штатном режиме выявить погрешности, влияющие на точность определения поправок Всемирного времени, крайне сложно из-за множества влияющих факторов. Для определения инструментальных погрешностей приемной аппаратуры радиотелескопа РТ-13, влияющих на точностные характеристики радиоинтерферометра, был создан лабораторный радиоинтерферометрический стенд с целью исследования в радиоинтерферометрическом режиме как существующих трехдиапазонных приемных систем РТ-13, так и их совместной работы с макетом разрабатываемой широкополосной приемной системы радиотелескопа.

Структурная схема стенда и измеряемые характеристики

Структурная схема радиоинтерферометрического стенда приведена на рис. 1. Исследуются две трехдиапазонные приемные системы радиотелескопа (ПСП 1, ПСП 2) и макет широкополосной приемной системы (МШПС) радиотелескопа РТ-13 в X-диапазоне. Сигнал от генератора шума (ГШ), имитирующий сигнал космического радиоисточника, с помощью делителей подается на

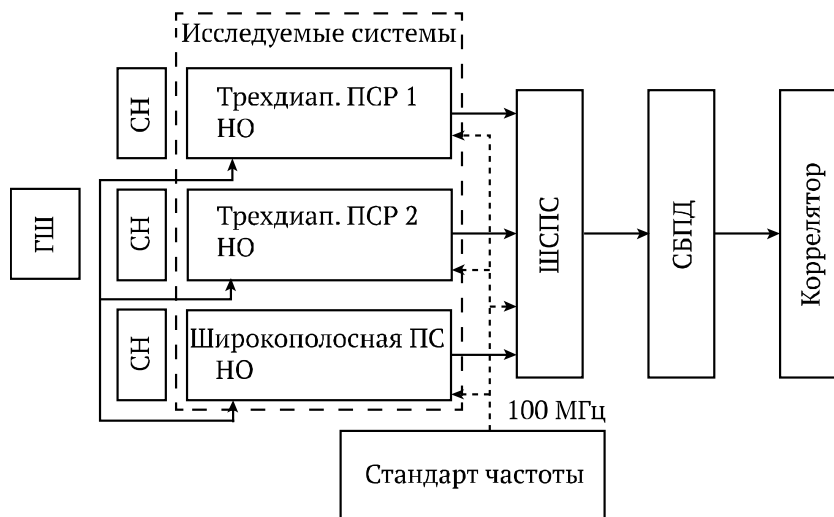


Рис. 1. Структурная схема радиоинтерферометрического стенда

входы приемников через направленные ответвители входных криогенных приемных фокальных блоков. На входы облучателей криогенных приемных фокальных блоков устанавливаются широкоапертурные согласованные нагрузки (СН). Уровень сигнала ГШ, задающий отношение сигнал-шум, подбирается с помощью управляемого аттенюатора. Мощность выходных сигналов приемных систем устанавливается одинаковой (примерно на уровне – 9 дБм) с помощью управляемых аттенюаторов. Выходные сигналы приемных систем поступают на входы широкополосной системы преобразования сигналов (ШСПС) с полосой регистрации 512 МГц, преобразующей их в 2-битовые потоки данных, которые передаются с помощью системы буферизации и передачи данных (СБПД) [6] на коррелятор. Синхронизация приемных систем МШПС, ПСР 1, ПСР 2 и широкополосной системы преобразования сигналов осуществляется сигналами частоты 100 МГц от пассивного стандарта частоты Ч1-1007.

В программном FX-корреляторе вычисляется кросскорреляционный спектр каналов радиоинтерферометра. При постпроцессорной обработке рассчитывается двумерная кросскорреляционная функция в координатах задержки τ и частоты интерференции f_i на заданном временном интервале. По отношению максимума функции к СКО шума определяется отношение сигнал-шум.

Согласно [7] отношение сигнал-шум SNR (Signal-to-noise ratio) может быть рассчитано по формуле:

$$SNR = 0.88 \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{сиг1}}}{T_{\text{сист1}}} \cdot \frac{T_{\text{сиг2}}}{T_{\text{сист2}}}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta f \cdot t_n}, \quad (1)$$

где $T_{\text{сиг } i}$ – шумовая температура полезного сигнала, $T_{\text{сист } i}$ – шумовая температура системы «приемник+нагрузка», Δf – полоса частот, t_n – время накопления.

СКО определения задержки корреляционного отклика σ_τ рассчитывается согласно [7] по формуле:

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{12}}{2\pi \cdot \Delta f \cdot SNR}. \quad (2)$$

Для определения поправок Всемирного времени со среднеквадратической погрешностью не более 20 мкс для базы обсерваторий «Бадары» – «Зеленчукская» СКО определения задержки корреляционного отклика должно быть не более 20 пс.

Результаты исследований радиоинтерферометрического стенда

Исследования проводились путем записи интерферометрических сеансов и определением на корреляторе фактических значений SNR, частоты интерференции, задержки и фазы корреляционного отклика. Записывались сеансы

двух типов: 1) непрерывные 15-минутные для определения характера изменения во времени характеристик корреляционного отклика с временем накопления $t_n = 1$ с; 2) часовые, имитирующие реальные, наблюдения: 120 записей с временем накопления $t_n = 10$ с и паузами между записями по 20 с.

Для определения погрешности измерений самого радиоинтерферометрического стенда проведены эксперименты по записи сеансов без приемных систем в полосе промежуточных частот (ПЧ) 1024–1536 МГц — диапазоне работы широкополосной системы преобразования сигналов. Необходимый уровень мощности сигнала обеспечивался усилителями ПЧ. На вход подавался сигнал от ГШ, уровень сигнала ГШ подбирался аттенюатором для задания выходного SNR, близкого к реальным для РСДБ-наблюдений значениям (100–300). Для этого измерялось отношение шумовой температуры ГШ к шумовой температуре усилителей по входу, и выходное значение SNR рассчитывалось по формуле (1). Результаты сравнивались с фактически полученными значениями SNR. Расчетное значение СКО задержки рассчитывалось по формуле (2) при подстановке фактически измеренного значения SNR.

Проведены два 15-минутных сеанса и часовой сеанс при разных значениях SNR, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений характеристик корреляционного отклика радиоинтерферометрическим стендом

Сеанс	SNR		СКО(τ), пс	
	расчетное значение	измеренное значение	расчетное значение	измеренное значение
ПЧ, 15 мин, $t_n = 1$ с	122	128	8.4	9.5
ПЧ, 15 мин, $t_n = 1$ с	191	189	5.7	6.3
ПЧ, часовой, $t_n = 10$ с	303	303	3.5	4.5

Фактически измеренное значение SNR с точностью до 5 % совпадает с расчетным значением. Коррелятор работал в режиме, обеспечивающем определение задержки корреляционного отклика с дискретом 1 пс. Результаты экспериментов, представленные в табл. 1, показали, что отличие измеренного стендом значения СКО задержки от расчетного значения составляет порядка 1 пс. Это свидетельствует о том, что стенд вносит незначительную погрешность в измерение задержки сигнала и пригоден для исследования стабильности приемных систем.

Результаты исследований характеристик приемных устройств

Результаты исследований трехдиапазонных приемных систем

Проведены измерения SNR и задержки корреляционных откликов двух трехдиапазонных приемных систем в X-диапазоне (8591.6–9103.6 МГц) на двух 15-минутных сеансах с временем накопления $\tau = 1$ с и трехчасовых сеансах (120 записей с временем накопления $\tau = 10$ с и паузами между записями по 20 с) при различных значениях SNR. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений характеристик корреляционного отклика трехдиапазонных приемных систем

Сеанс	SNR		СКО(τ), пс	
	расчетное значение	измеренное значение	расчетное значение	измеренное значение
ПСП 1–ПСП 2, 15 мин, $t_n = 1$ с	87	85	12.7	15.3
ПСП 1–ПСП 2, 15 мин, $t_n = 1$ с	81	73	14.7	16.5
ПСП 1–ПСП 2, часовой, $t_n = 10$ с	142	129	8.4	9.6
ПСП 1–ПСП 2, часовой, $t_n = 10$ с	219	175	6.2	6.9
ПСП 1–ПСП 2, часовой, $t_n = 10$ с	285	257	4.2	4.4

Отличие расчетных значений выходного SNR, определяемых по измерениям шумовой температуры ГШ относительно шумовой температуры системы и формуле (1), от измеренных составляет не более 20 %. Расчетные значения СКО задержки, определяемые по формуле (2), близки к измеренным значениям: различие составляет не более 2.5 пс. При среднем для РСДБ-наблюдений значении SNR = 200 СКО задержки составило 6.9 пс.

Результаты исследований макета широкополосной приемной системы в паре с трехдиапазонной приемной системой

При исследованиях макета МШПС в паре с трехдиапазонными приемными системами в X-диапазоне (8591.6–9103.6 МГц) обнаружено периодическое изменение задержки корреляционного отклика, см. рис. 2, а. СКО задержки в паре МШПС и ПСП 1 составило 71.5 пс при расчетном значении 10.8 пс (для фактического SNR = 100).

С помощью коррелятора определена частота интерференции $F_i = 9$ мГц и линейный тренд фазы корреляционного отклика со скоростью 3.2 °/с, что свидетельствует о наличии ошибки установки частоты гетеродинов приемных систем. Поскольку в экспериментах между двумя ПСП была нулевая частота интерференции, было установлено, что, вероятно, гетеродин МШПС имеет ошибку установки частоты 9 мГц.

Было сделано предположение о причине периодического изменения задержки корреляционного отклика. Аналого-цифровой преобразователь ШСПС работает с частотой дискретизации 1024 МГц и оцифровывает сигнал в третьей зоне Найквиста в диапазоне 1024–1536 МГц [4]. При недостаточной крутизне скатов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) антиалиасинговых фильтров происходит наложение спектров соседних зон Найквиста. Неточность установки частоты гетеродина приводит к появлению линейного тренда во времени разности фаз выходных сигналов приемных систем. При наложении спектров фазы соседних зон Найквиста складываются с противоположным знаком, что при их линейном изменении и приводит к синусоидальному изменению отношения сигнал-шум и задержки корреляционного отклика радиointерферометра с нулевой базой. Амплитуда этого периодического изменения задержки будет определяться уровнем наложения спектров, а частота — ошибкой установки частоты гетеродинов приемных систем.

При корреляционной обработке происходит перемножение комплексного и комплексно-сопряженного спектров сигналов коррелируемых каналов, поэтому эффект наложения спектров в значительной мере определяется произведением АЧХ приемных систем и антиалиасинговых фильтров ШСПС. Для измерения АЧХ каналов интерферометра на входы приемных систем подавался гармонический сигнал заданной частоты от генератора СВЧ-сигналов и при помощи ШСПС измерялась мощность оцифровываемого сигнала. На рис. 3 представлено измеренное произведение АЧХ каналов радиointерферометра, включающего МШПС и ПСР 1. Пунктирной линией выделен диапазон работы ШСПС 1024–1536 МГц, вне этого диапазона — соседние зоны Найквиста.

Для устранения эффекта периодического изменения задержки, затрудняющего измерения характеристик приемной аппаратуры, авторами предложена цифровая фильтрация взаимного корреляционного спектра. С целью определения оптимальной полосы фильтрации отрезались участки спектра с каждого края шириной от 8 МГц до 160 МГц и рассчитывалось СКО задержки. Минимальное СКО задержки было достигнуто при полосе пропускания 256 МГц (диапазон 1152–1408 МГц указан на рис. 3 сплошной линией). В этой полосе в дальнейшем и производилась цифровая фильтрация. Результаты после фильтрации представлены на рис. 2, б. Как видно из рис. 2, цифровая фильтрация позволила исключить синусоидальный характер изменения задержки. Численные значения полученных SNR и СКО задержки во всей полосе 512 МГц и с цифровой фильтрацией с полосой пропускания 256 МГц представлены в табл. 3. Уменьшение полосы в 2 раза ожидаемо привело к снижению SNR в $\sqrt{2}$ раз и расчетного значения задержки в $2\sqrt{2}$ раз в соответствии с формулами (1) и (2). Для пары МШПС и ПСР 1 после фильтрации СКО задержки снизилось с 71.5 до 28.6 пс и приблизилось к расчетному значению 27.7 пс для полосы 256 МГц. Полученные результаты свидетельствуют

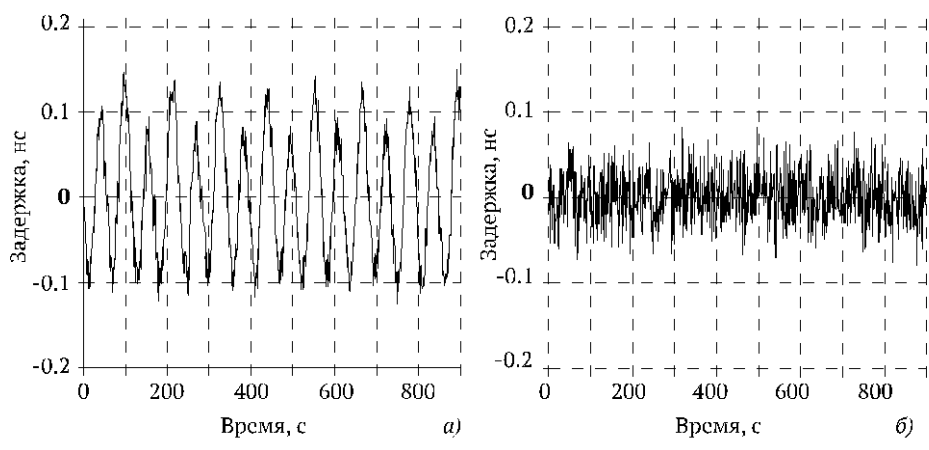


Рис. 2. Результаты измерений задержки корреляционного отклика МШПС и ПСР 1 по 15-минутному сеансу с временем накопления 1 с: *а* – во всей полосе 512 МГц, *б* – при цифровой фильтрации с полосой пропускания 256 МГц

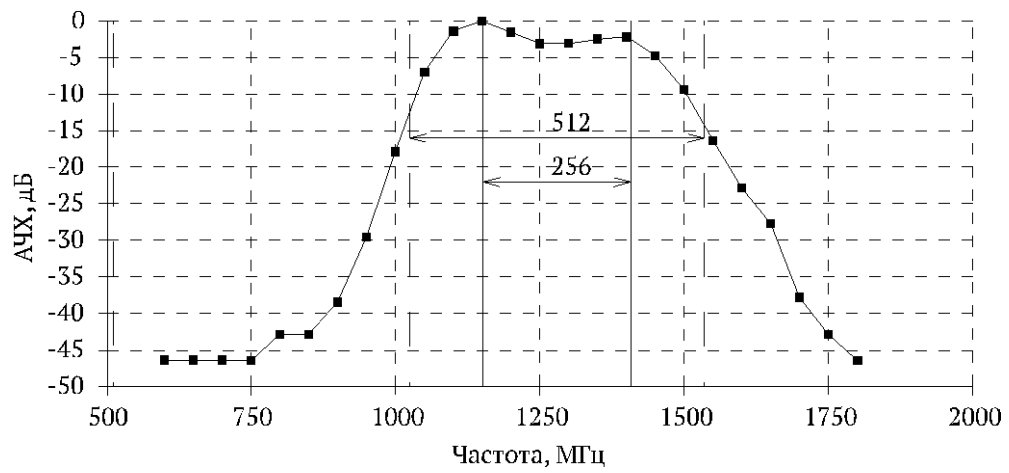


Рис. 3. Произведение АЧХ каналов радиоинтерферометра (МШПС и ПСР 1)

о справедливости сделанных предположений о причине периодического изменения задержки.

Гетеродин МШПС был заменен на новый с точной установкой частоты, что подтвердилось нулевой частотой интерференции корреляционного отклика. Результаты исследований МШПС с новым гетеродином представлены в нижней строке табл. 3 и рис. 4.

Периодическое изменение задержки корреляционного отклика исчезло (рис. 4, *а*), СКО задержки составило 14.2 пс. Отличие СКО задержки от расчетного значения 5.4 пс обусловлено влиянием фазовой нестабильности гетеродина и наложением спектров соседних зон Найквиста, о чем свидетельствует

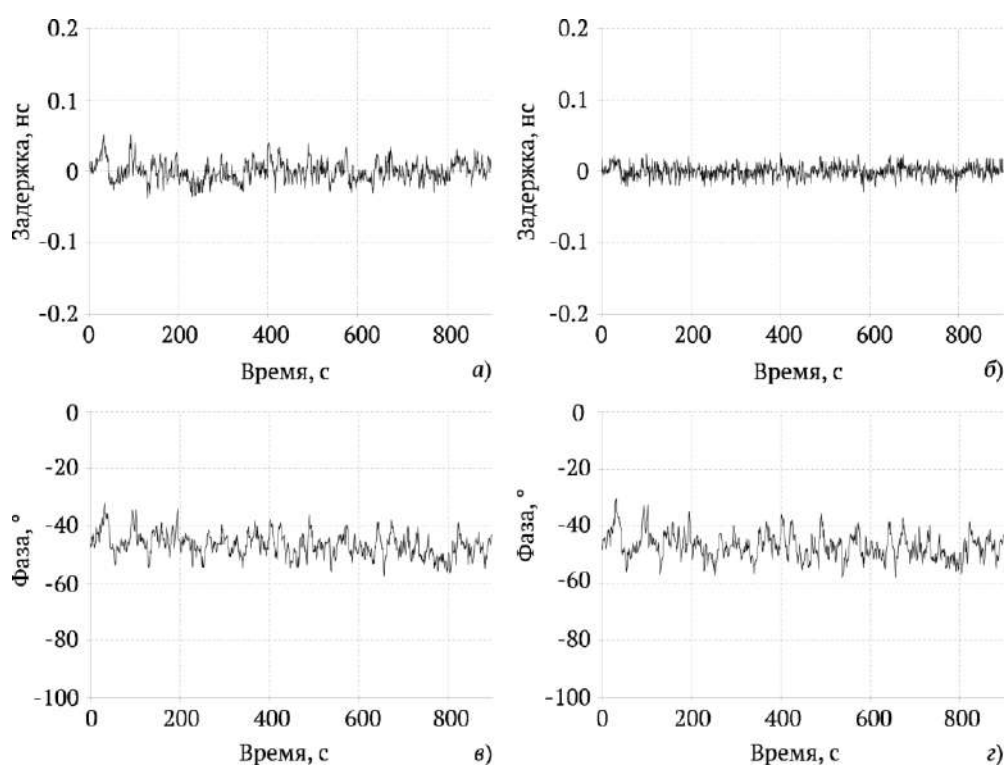


Рис. 4. Результаты измерений характеристик корреляционного отклика МШПС с новым гетеродином и ПСР 1 по 15-минутному сеансу с временем накопления 1 с: а — задержка во всей полосе 512 МГц, б — задержка при цифровой фильтрации с полосой пропускания 384 МГц, в — фаза во всей полосе 512 МГц, г — фаза при цифровой фильтрации с полосой пропускания 384 МГц

Таблица 3

Результаты измерений характеристик корреляционного отклика МШПС и ПСР на 15-минутном сеансе с временем накопления 1 с

Сеанс	Без фильтрации				С фильтрацией			
	SNR		СКО(τ)		SNR		СКО(τ)	
	расч.	изм.	расч.	изм.	расч.	изм.	расч.	изм.
	Полоса 512 МГц				Полоса 256 МГц			
МШПС–ПСР 1	101	100	10.7	71.5	72	78	27.6	28.6
МШПС–ПСР 2	118	118	9.1	35.4	83	96	22.4	22.8
	Полоса 512 МГц				Полоса 384 МГц			
МШПС с новым гетеродином ПСР 1	198	198	5.4	14.2	172	187	7.7	9.2

сильная корреляция флуктуаций (рис. 4 а, в) задержки и фазы корреляционного отклика (связанной с фазой гетеродина). Коэффициент корреляции составил $K_{кор} = 0.75$, коэффициент влияния, определяемый по формуле $K_{вл} = K_{кор} \cdot СКО(\tau) / СКО(\varphi)$, равен $2.8 \text{ пс}/^\circ$ при $СКО(\varphi) = 3.9^\circ$. Была проведена цифровая фильтрация кросс-корреляционного спектра с различной шириной полосы пропускания.

Минимум СКО задержки 9.2 пс был достигнут при полосе 384 МГц (табл. 3). После фильтрации СКО задержки приблизилось к расчетному значению. Корреляция фазы и задержки корреляционного отклика уменьшилась (рис. 4, б, г): $K_{кор} = 0.48$, $K_{вл} = 1 \text{ пс}/^\circ$.

Оптимизация аналоговых антиалиасинговых фильтров радиointерферометрического стенда

Как показали проведенные исследования, при измерениях на радиointерферометре с нулевой базой при наложении спектров соседних зон Найквиста может происходить ухудшение СКО задержки вследствие неточности установки частоты гетеродинов, а также из-за случайных флуктуаций фазы гетеродинов. Цифровая фильтрация позволяет снизить влияние указанных факторов на СКО задержки до значений, соответствующих полосе частот цифрового фильтра. Применение на стенде аналогового антиалиасингового фильтра с большим коэффициентом прямоугольности позволит снизить СКО задержки за счет устранения краевых эффектов, при этом незначительно уменьшая полосу частот и SNR.

Для определения характеристики оптимизированного фильтра проведено математическое моделирование корреляционного отклика двухэлементного радиointерферометра. Задавались два случайных ряда чисел, имитирующие выходной сигнал приемников, к ним добавлялся третий сигнал, имитирующий сигнал космического радиосточника. Вычислялись спектры итоговых сигналов в полосе 2048 МГц и умножались на заданную АЧХ фильтра. При идентичных антиалиасинговых фильтрах в каналах радиointерферометра их фазочастотные характеристики можно не учитывать. Далее в один из спектров вводилась регулируемое смещение по фазе, имитирующее изменение фазы гетеродина одного из приемников. После перехода во временную область осуществлялось прореживание массивов для имитации дискретизации сигнала с частотой 1024 МГц. Вычислялась задержка корреляционного отклика двух сигналов в зависимости от смещения фазы гетеродина в пределах от 0 до 360° , и рассчитывалось СКО полученного ряда значений задержки.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для существующих в настоящее время антиалиасинговых фильтров, а также результаты моделирования задержки корреляционного отклика для оптимизированных фильтров представлены на рис. 5.

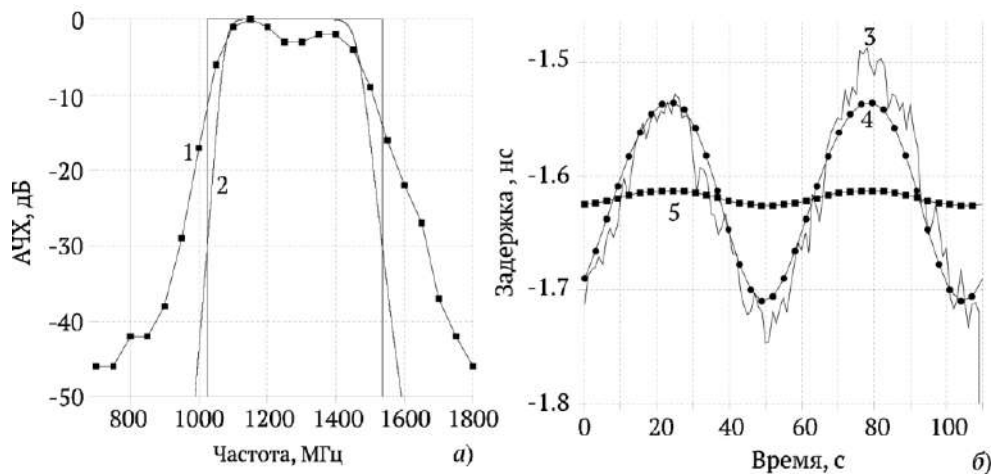


Рис. 5. Результаты математического моделирования влияния АЧХ антиалиасиновых фильтров на задержку корреляционного отклика и экспериментальные данные: 1 — произведение АЧХ каналов с существующими фильтрами, 2 — произведение АЧХ оптимизированных фильтров, 3 — изменение задержки МШПС и ПСР 1 во времени с существующими фильтрами (эксперимент), 4 — рассчитанное в модели изменение задержки МШПС и ПСР 1 с существующими фильтрами, 5 — рассчитанное в модели изменение задержки с оптимизированными фильтрами

Для произведения АЧХ каналов существующих фильтров (график 1) экспериментальное изменение задержки корреляционного отклика МШПС и ПСР 1 (график 3, СКО = 72 пс) хорошо совпадает с рассчитанным в модели изменением задержки (график 4, СКО = 73 пс). Для снижения СКО задержки при измерении характеристик приемных устройств на радиоинтерферометрическом стенде предлагается использовать полосовой фильтр Баттерворта седьмого порядка с крутизной скатов 20 дБ/100 МГц. Произведение АЧХ двух таких фильтров представлено на графике 2. Вычисленное в модели СКО задержки для таких фильтров составляет 5 пс (график 5). В качестве предлагаемого фильтра можно использовать фильтр WBLB-T-BP-1300-400-11С производства компании А-INFO, имеющий еще больший коэффициент прямоугольности.

Таким образом, применение такого фильтра позволит исключить влияние фазовой нестабильности гетеродинов приемных систем на СКО задержки радиоинтерферометра с нулевой базой. При этом остается возможность определения погрешности установки частоты и фазовой нестабильности гетеродинов по характеру и величине изменения фазы корреляционного отклика.

Заключение

Созданный радиоинтерферометрический стенд позволяет проводить интерферометрические исследования радиоастрономической приемной аппаратуры в лабораторных условиях, а также эксперименты, проведение которых в обсерваториях затруднительно. С помощью стенда возможно проводить диагностику приемных устройств по наличию отклонения от расчетных значений характеристик корреляционного отклика: отношения сигнал-шум, частоты интерференции, СКО задержки и фазы. Представленный стенд обладает достаточно высокой точностью измерений. Испытания показали, что вносимые стендом отклонения СКО задержки составляют порядка 1 пс.

Исследовано влияние неточности установки частоты и фазовой нестабильности гетеродинов приемных устройств на характеристики корреляционного отклика радиоинтерферометра с нулевой базой. Показано, что неточность установки частоты гетеродинов приводит к периодическому изменению задержки при наложении спектров соседних зон Найквиста. Фазовая нестабильность гетеродинов в сочетании с недостаточным коэффициентом прямоугольности антиалиасингового фильтра также приводит к увеличению СКО задержки корреляционного отклика радиоинтерферометра с нулевой базой. Показано, что цифровая фильтрация спектра регистрируемого сигнала в этих случаях позволяет снизить СКО определения задержки.

Методом математического моделирования определена АЧХ антиалиасингового аналогового фильтра, минимизирующего влияние фазовой нестабильности приемных систем на СКО задержки корреляционного отклика радиоинтерферометра с нулевой базой.

Проанализировано СКО задержки различных пар приемных систем: двух трехдиапазонных и макета широкополосной. При среднем для РСДБ-наблюдений SNR около 200 СКО задержки корреляционного отклика для пары трехдиапазонных приемных систем составило 7 пс, для пары МШПС и ПСР 1 после цифровой фильтрации — 9 пс.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

Авторы выражают благодарность Мардышкину В. В. за поддержку идеи создания стенда радиоинтерферометра, Хвостову Е. Ю. и Зотову М. Б. — за обеспечение работоспособности трехдиапазонных приемных систем, Носову Е. В. и Маршалову Д. А. — за обсуждение результатов исследований, Суркису И. Ф. и Шантырь В. А. — за модернизацию программы постпроцессорной корреляционной обработки, Безрукову И. А. — за организацию передачи и записи данных, сотрудникам лаборатории времени и частоты — за предоставление стандарта частоты.

Литература

1. *Ипатов А. В.* Радиointерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. — М.: Наука, 2013. — Т. 183, № 7. — С. 769–777.
2. *Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О., Курдубова Я. Л., Мишин В. Ю., Мишина Н. А., Шантырь В. А.* Программный коррелятор для обработки наблюдений РСДБ-сети малых антенн. Результаты первых испытаний // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 36. — С. 83–89.
3. *Chernov V., Evstigneev A., Evstigneeva O., Ivanov D., Ipatov A., Ipatova I., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshkin V., Pozdnyakov I., Vekshin Y., Zotov M.* The S/X/Ka Receiving System for Radio Telescope RT-13 of the “Quasar” VLBI Network // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 41. — С. 79–84.
4. *Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В.* Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономических радиointерферометров // Известия вузов России. Радиоэлектроника. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — № 1. — С. 34–39.
5. *Evstigneev A., Evstigneeva O., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshkin V., Pozdnyakov I.* The Ultra-Wideband Receiver System for RT-13 Radio Telescope IAA RAS “Quasar” Network // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 41. — С. 49–51.
6. *Безруков И. А., Сальников А. И., Яковлев В. А., Вылегжанин А. В.* Система буферизации и передачи данных нового поколения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 32. — С. 3–9.
7. *Томпсон А. Р., Моран Дж. М., Свенсон Дж. У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Физматлит, 2003. — 624 с.

Receiver Characteristics Analysed on a Radio Interferometric Test Bench

Y. V. Vekshin, V. O. Ken, V. K. Chernov, A. A. Evstigneev

A prototype of a zero-baseline VLBI test bench has been designed in the IAA RAS to analyse characteristics of radio astronomical receivers. It includes a tunable noise generator, a 512 MHz bandwidth broadband data acquisition system, a frequency standard, a data transmission system, and the RASFX correlator. This paper presents the VLBI test bench and the results of using it in X-band with two tri-band receivers and one wideband receiver prototype. The following correlation response characteristics have been obtained: signal-to-noise ratio, delay rate, and phase and delay stability. We have analysed the influence of inaccuracies in the frequency setup and phase instabilities of heterodynes in the receivers on the response characteristics of the zero-baseline radio interferometer. It is shown that the digital filtering of signal spectra reduces the RMSD (root-mean-square deviation) of the measured delays. The anti-aliasing filter characteristics of the zero-baseline radio interferometer which can minimise the influence of the receiver phase instability on the RMSD of the measured delays, are proposed using mathematical simulation.

Keywords: radio interferometer, VLBI, tri-band receiver, wideband receiver, local oscillator, correlator, signal-to-noise ratio, delay, phase stability, delay stability.