

## **Анализ стабильности выходных сигналов макета широкополосной приемной системы радиотелескопа**

© Ю. В. Векшин, А. А. Евстигнеев, А. П. Лавров

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены методика и результаты исследования амплитудной и фазовой стабильностей коэффициентов усиления макета широкополосной приемной системы (ШПС) с рабочим диапазоном частот 3–16 ГГц, разрабатываемой для радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН. С применением дисперсии Аллана определены источники флуктуаций и их типы, преобладающие на разных временных интервалах. Выделен вклад флуктуаций отдельных блоков в итоговую стабильность выходного сигнала ШПС. Исследовано влияние помех и интермодуляционных составляющих на стабильность выходного сигнала ШПС. Измерена чувствительность макета ШПС с двумя разными типами криогенных усилителей. Исследовано влияние параметров транзисторов на флуктуации коэффициента усиления маломощного усилителя.

**Ключевые слова:** широкополосный приемник, супергетеродинный приемник, дисперсия Аллана, стабильность коэффициента усиления, фазовая стабильность, флуктуации.

### **Введение**

Флуктуации выходного сигнала радиоастрономического приемника представляют собой шум с различной спектральной плотностью мощности (СПМ): белый шум, шумы вида  $1/f^\alpha$ , временные дрейфы. Анализ флуктуаций с применением дисперсии Аллана [1] позволяет выделить вклад различных составляющих шума на конкретных временных интервалах и определить интервал стабильности приемника — оптимальное время усреднения выходного сигнала, при котором достигается минимум дисперсии шума [2]. В радиоастрономическом приемнике с преобразованием частоты сигналов важной задачей является определение основных источников амплитудной и фазовой стабильностей и их вклада в итоговую стабильность выходного сигнала. В статье приведена методика исследования стабильности радиоастрономического приемника, позволяющая решить эту задачу, при этом приемник удобно рассматривать как каскадное соединение составляющих его блоков. Ам-

плитудная стабильность определяет реализуемую чувствительность приемников в радиометрии, фазовая стабильность важна при работе приемников в составе радиоинтерферометров.

### Методика исследования

Анализ флуктуаций производится с помощью дисперсии Аллана. Для шумов с СПМ вида  $S(f) = h_w/f^\alpha$  дисперсия Аллана  $\sigma_A^2(\tau) = C_a\tau^{\alpha-1}$ , где  $C_a$  — коэффициенты интенсивности шума [1]. Для линейного дрейфа с зависимостью от времени  $y = pt$ ,  $\sigma_A^2(\tau) = p^2\tau^2/2$ .

Одним из способов измерения амплитудной стабильности является регистрация выходной мощности приемника  $P$  при согласованной нагрузке на его входе. Исходя из соотношения  $P = k \cdot T_{\text{сист}} \cdot G \cdot \Delta f$ , относительную дисперсию флуктуаций мощности  $\Delta P$  на выходе приемника можно представить в виде

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 = \left(\frac{\Delta T}{T_{\text{сист}}}\right)^2 = \frac{1}{\Delta f \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  — флуктуационная чувствительность,  $T_{\text{сист}}$  — шумовая температура системы,  $\Delta f$  — полоса частот приемника,  $\tau$  — время накопления выходного сигнала,  $G$  — общий коэффициент усиления (КУ) приемника, равный произведению КУ его каскадов  $G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3$ ,  $\Delta G$  — флуктуации КУ. Относительные (нормированные на среднее значение) флуктуации амплитуды или флуктуации фазы общего КУ определяются суммой относительных флуктуаций амплитуды или флуктуаций фазы КУ отдельных каскадов:

$$\left(\frac{\Delta G}{G}\right) = \left(\frac{\Delta G_1}{G_1}\right) + \left(\frac{\Delta G_2}{G_2}\right) + \left(\frac{\Delta G_3}{G_3}\right), \quad (2)$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3. \quad (3)$$

Дисперсия флуктуаций общего КУ (относительной амплитуды или фазы) определяется суммой дисперсий флуктуаций каскадов и взаимных ковариаций  $K$  их флуктуаций:

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2K_{12} + 2K_{23} + 2K_{13}. \quad (4)$$

Исследования стабильности проведены для макета широкополосной приемной системы радиотелескопа (ШПС) [3], разрабатываемой для радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН. Макет ШПС работает в диапазоне частот 3–16 ГГц и имеет два канала для приема линейных ортогональных поляризаций. ШПС состоит из следующих основных блоков: широкополосного криогенного приемного фокального блока (ШКПФБ), содержащего охлаждаемые маломощные усилители и облучатель; блоков делителей (БД), осуществляющих дополнительное усиление и разделение сигнала на несколько идентичных каналов; широкополосных блоков преобразователей частот (ШБПЧ), которые преобразуют выбираемый участок спектра сигнала шириной 1 ГГц из входного диапа-

зона частот к промежуточным частотам (1–2 ГГц). Измерения проведены на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Поскольку входом ШКПФБ является облучатель, он закрывался специальной широкоапертурной согласованной нагрузкой (СН), а входной гармонический сигнал на приемник подавался от генератора Agilent 8257D через направленный ответвитель (НО) ШКПФБ, используемый для подачи сигнала калибровки в штатном режиме работы ШПС. На выходе каждого блока мощность гармонического сигнала измерялась с помощью внешних НО и датчиков мощности (ДМ) Agilent 8487D измерителя мощности Agilent N1914A. КУ каскадов  $G_i$  вычислялись как отношение мощностей на их выходах и входах. Таким образом, данная схема позволяет измерять флуктуации КУ всех блоков одновременно, что дает возможность исследовать и корреляционные связи между блоками.

Фазовая стабильность исследовалась с помощью векторного анализатора цепей R&S ZVA на выбираемой фиксированной частоте по непрерывному измерению параметра  $S_{21}$  в течение заданного интервала времени (режим «Time mode» анализатора). Для измерения фазовой стабильности блока с преобразованием частоты использовались три порта анализатора: порт 1 генерировал входной сигнал высокой частоты, по порту 2 измерялся выходной сигнал на промежуточной частоте  $f_{пч}$ , порт 3 использовался в качестве «эталонного» генератора с частотой  $f_{пч}$ . Измерялась разность фаз между портами 2 и 3. ШБПЧ и векторный анализатор были синхронизированы сигналами 100 МГц и 10 МГц от пассивного водородного стандарта частоты. Поскольку частоты сигналов перестраиваемых гетеродинов макета ШПС устанавливаются не точно (имеются сдвиги в десятки-сотни миллигерц для разных частот гетеродинов), при измерении на промежуточной частоте имеется линейное изменение разности фаз во времени, которое учитывалось (вычиталось) при обработке.

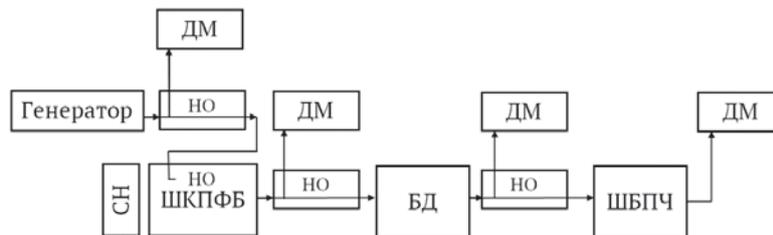


Рис. 1. Схема установки для измерений нестабильностей КУ блоков

## Результаты исследований

На рис. 2 представлены результаты исследования амплитудных  $\Delta G/G$  флуктуаций КУ макета ШПС в виде графиков  $\sigma_A(\tau)$  — зависимости среднеквадратичного отклонения (СКО) Аллана от времени усреднения  $\tau$ .

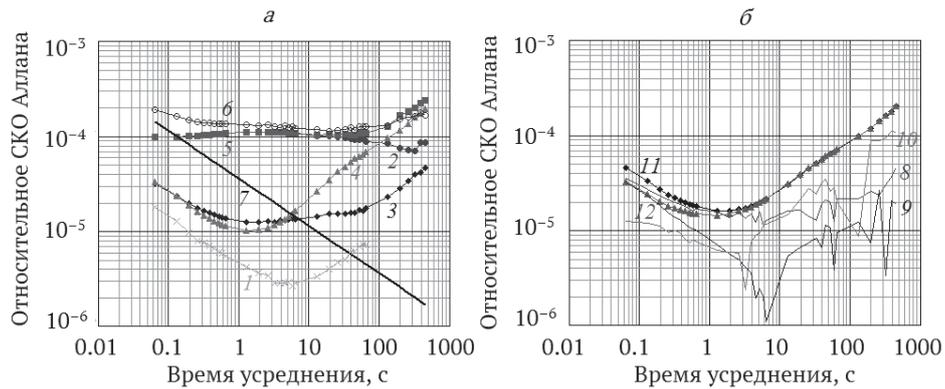


Рис. 2. Амплитудные флуктуации КУ макета ШПС: 1 — измеритель мощности, 2 — ШКПФБ, 3 — БД, 4 — ШБПЧ, 5 — общий КУ, 6 — флуктуации полной выходной мощности, 7 — теоретический случай белого шума для полосы 1 ГГц, 8 — ковариация  $K_{23}$ , 9 — ковариация  $K_{34}$ , 10 — ковариация  $K_{24}$ , 11 — суммарный КУ БД и ШБПЧ, 12 — суммарный КУ БД и ШБПЧ с учетом ковариации

Измерения флуктуаций амплитуды КУ проведены с помощью системы генератор+измеритель мощности, поскольку амплитудные флуктуации этой системы (1 на рис. 2, а) оказались меньше, чем у векторного анализатора. На рис. 2, а также приведены  $\sigma_A(\tau)$  флуктуаций амплитуды КУ: 2 — для ШКПФБ, 3 — для БД, 4 — для ШБПЧ, 5 —  $\sigma_A(\tau)$  для общего КУ, 6 — для флуктуаций полной выходной мощности  $\Delta P/P$ , 7 — для теоретического случая белого шума (при отсутствии флуктуаций КУ) в полосе 1 ГГц. Преобладающим источником амплитудных флуктуаций являются флуктуации типа фликкер-шума ШКПФБ (2 на рис. 2, а), СКО Аллана — константа. На интервалах более 100 с наблюдается подъем СКО Аллана, вызванный шумом вида  $1/f^2$  ШБПЧ (4 на рис. 2, а). Детали анализа стабильности с применением СКО Аллана можно найти в [4]. Измеренные флуктуации общего КУ (5 на рис. 2, а) совпадают с суммой флуктуаций относительных КУ каскадов 2, 3, 4 и их ковариаций (формула (4)). Относительные флуктуации полной мощности 6 определяются суммой относительных флуктуаций общего КУ 5 и теоретического случая белого шума 7 (первое слагаемое в формуле (1)). Взаимные ковариации флуктуаций блоков  $K_{23}$ ,  $K_{34}$ ,  $K_{24}$  представлены на графиках 8, 9, 10 на рис. 2, б, их влияние на флуктуации общего КУ незначительно. На рис. 2, б для примера приведено  $\sigma_A(\tau)$  для суммарного коэффициента усиления БД и ШБПЧ без учета 11 и с учетом ковариаций 12, графики совпадают за исключением начального участка, где небольшая отрицательная корреляция приводит к уменьшению  $\sigma_A(\tau)$  суммарного КУ.

На рис. 3 приведены результаты исследования  $\sigma_A(\tau)$  фазовых флуктуаций: 1 — для векторного анализатора, 2 — для ШКПФБ, 3 — для БД, 4 — для ШБПЧ, 5 — для общего КУ. Видно, что фазовые флуктуации типа шума  $1/f^2$  ШБПЧ 4

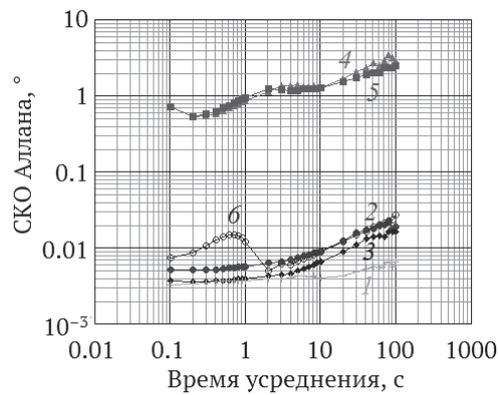


Рис. 3. Фазовые флуктуации КУ макета ШПС: 1 — векторного анализатора, 2 — ШКПФБ, 3 — БД, 4 — ШБПЧ, 5 — общего КУ, 6 — разности фаз двух каналов ШБПЧ

совпадают с флуктуациями общего КУ 5. Поскольку два канала ШБПЧ имеют общие гетеродины, их нестабильность может быть исключена путем измерения стабильности разности фаз двух каналов. СКО Аллана такой записи фазовых флуктуаций каналов без учета гетеродинов представлено на графике 6 рис. 3, и оно существенно меньше, чем  $\sigma_A(\tau)$  для ШБПЧ 4. Это говорит о том, что основным источником фазовой нестабильности являются гетеродины. На графике 6 имеется локальный максимум на интервале усреднения 0.8 с, соответствующий присутствию гармонической компоненты [2] неизвестного происхождения с частотой 0.6 Гц. Фазовые флуктуации ШКПФБ 2 и БД 3 малы и близки к фазовому шуму векторного анализатора 1, но на интервалах более 10 с наблюдается подъем СКО Аллана. Среднеквадратичное отклонение фазы макета ШПС не превышает  $6^\circ$  на получасовом интервале, что при использовании двух таких приемников приведет к ухудшению отношения сигнал-шум радиоинтерферометра на 1 % [5].

При исследованиях стабильности широкополосного приемника важно не допускать возможность возникновения интермодуляционных компонент. Так, в лаборатории сильная внеполосная помеха на частоте 2.65 ГГц (мобильная связь 4G LTE) вызывает интермодуляционные искажения на кратных частотах (на рис. 4, а приведен спектр на выходе ШКПФБ), которые при двойном преобразовании частоты вызывают другие гармоники и ухудшают чувствительность. Поэтому для измерения стабильности в лаборатории была изготовлена специальная портативная безэховая камера, устанавливаемая на входе ШПС. На рис. 4, б приведены записи выходного сигнала ШПС в полосе 1 ГГц при перестройке частоты гетеродина и подаче сигналов калибровки с открытым входом и с камерой на входе. Уровни помехи 2.65 ГГц в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» минимум на 20 дБ меньше, и эта проблема отсутствует.

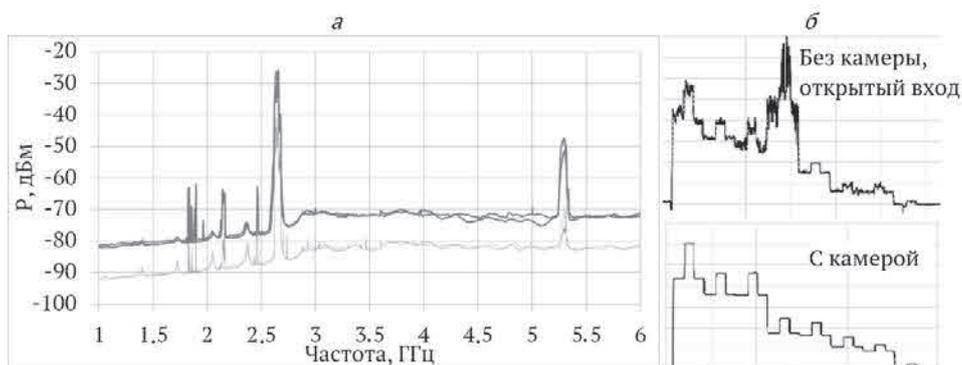


Рис. 4. Влияние помех и интермодуляционных компонент в лаборатории: *a* — спектр выходного сигнала ШКПФБ, *б* — запись выходного сигнала ШПС при пере-стройке гетеродина и подаче сигналов калибровки

Поскольку преобладающим источником амплитудных флуктуаций является ШКПФБ, то было проведено сравнение чувствительности ШПС при ее реализации с использованием двух разных типов криогенных усилителей. Результаты измерения СКО Аллана в градусах К приведены на рис. 5 для двух усилителей производства компании Low Noise Factory (LNF) — 1 и двух усилителей производства АО «ИПА» — 2. Данные по измерению стабильности на рис. 2 приведены для макета ШПС с усилителем LNF. Чувствительность макета ШПС с усилителями LNF лучше, составляет около 4 мК, и она не уменьшается при усреднении выходного сигнала (см. рис. 5).

Исследовано влияние параметров транзисторов усилителя LNF на стабильность его КУ. Устройство питания усилителей LNF позволяет регулировать постоянные значения напряжения на стоке  $U_c$  и тока стока  $I_c$  полевых

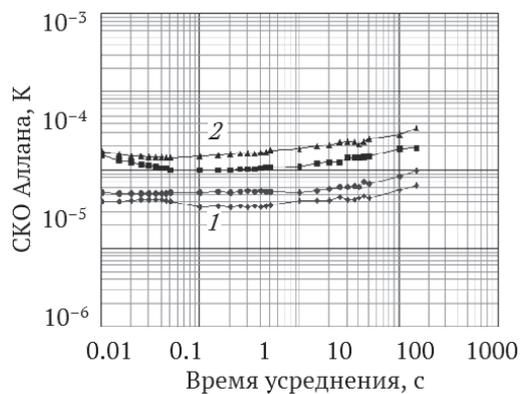


Рис. 5. Чувствительность ШПС с разными криогенными усилителями: 1 — усилители производства LNF (2 канала), 2 — усилители производства АО «ИПА» (2 канала)

транзисторов и контролировать напряжение на их управляющем электроде — затворе  $U_3$ . Измерены зависимости  $G(U_c)$  и  $U_3(U_c)$ ,  $G(I_c)$  и  $U_3(I_c)$ , по которым построены две зависимости  $G1(U_3)$  и  $G2(U_3)$  соответственно. Пересечение зависимостей  $G1(U_3)$  и  $G2(U_3)$  соответствует рабочей (паспортной) точке транзисторов. Для рабочей точки можно рассчитать связь изменений  $G$  и напряжения  $U_3$ . При измерениях зависимостей  $G(U_c)$  и  $G(I_c)$  найдены их экстремумы, и соответствующие значения  $U_{cm}$  и  $I_{cm}$  выбраны в качестве новой рабочей точки (оптимальной) транзисторов. Для оптимальной рабочей точки также рассчитывается связь изменений  $G$  и напряжения  $U_3$ . Измерены флуктуации относительного КУ усилителя (1, рис. 6) и напряжения на затворе (2, рис. 6) при паспортной рабочей точке и при найденной оптимальной рабочей точке (1' и 2', рис. 6), для которой влияние нестабильности  $U_3$  на  $G$  меньше. Видно, что характер зависимости СКО Аллана от времени усреднения для флуктуаций КУ  $G$  и напряжений  $U_3$  попарно одинаков. При найденной оптимальной рабочей точке флуктуации КУ на интервалах времени более 10 с до 2 раз меньше, чем при штатной рабочей точке, при этом шумовая температура ШКПФБ практически не изменяется.

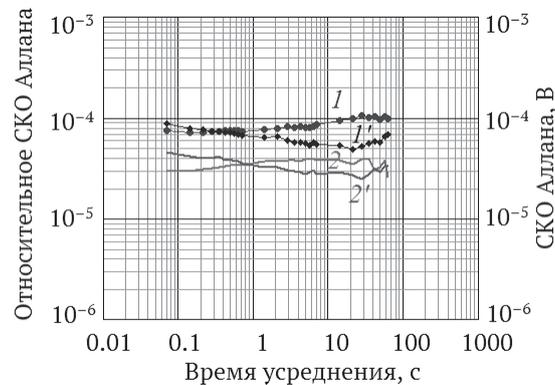


Рис. 6. Флуктуации КУ усилителя  $G$  ШКПФБ и напряжений на затворе  $U_3$ :  
 1 —  $G$ , 2 —  $U_3$  ( $U_c=1$  В,  $I_c=13$  мА,  $U_3=0,17$  В — паспортная рабочая точка),  
 1' —  $G$ , 2' —  $U_3$  ( $U_c=1,31$  В,  $I_c=18$  мА,  $U_3=-0,1$  В — оптимальная рабочая точка)

## Заключение

Разработана и реализована методика исследования амплитудной и фазовой стабильностей многокаскадного супергетеродинного приемника. Относительное СКО Аллана удобно применять для характеристики и сравнения флуктуаций КУ отдельных каскадов приемника. Измерена стабильность выходного сигнала макета ШПС и КУ отдельных блоков. Основным источником амплитудной нестабильности макета ШПС являются входные малошумящие усилители ШКПФБ, а фазовой нестабильности — гетеродины ШБПЧ. Выявлено влияние напряжений транзисторов на флуктуации КУ малошумящего усилителя, что требует дальнейших исследований.

## Литература

1. Schieder R, Rau G, Vohwinkel B. Characterization and Measurement of System Stability // Proc. of a SPIE conference on «Instrumentation for Submillimeter Spectroscopy», 1985 — Vol. 598. — P. 189–192.
2. Векшин Ю. В., Лавров А. П. Исследование стабильности трехдиапазонного криогенного приемного фокального блока с применением дисперсии Аллана // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 33. — С. 3–21.
3. Евстигнеев А. А., Евстигнеева О. Г., Лавров А. С., Мардышкин В. В., Поздняков И. А., Хвостов Е. Ю. Результаты разработки сверхширокополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 // Труды ИПА РАН. - СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 35. — С. 98–103.
4. Vekshin Yu. V., Lavrov A. P. The Allan variance usage for stability characterization of weak signal receivers // Lecture Notes in Computer Science, 2016. — Vol. 9870 LNCS. — P. 648–657.
5. Томпсон А.Р., Моран Дж.М., Свенсон Дж.У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Физматлит, 2003. — 624 с.

## An Output Signal Stability Analysis of the Radio Telescope Wideband Receiving System Prototype

Yu. V. Vekshin, A. A. Evstigneev, A. P. Lavrov

The measurement technique and results of the gain amplitude and phase stability measurements of the wideband receiving system prototype for the RT-13 radio telescope are presented in this paper. The main sources of fluctuations and their types are identified on different time scales using the Allan Variance. The fluctuation impact on the overall receiver stability is determined at some stages. Gain fluctuations of cryogenic amplifiers and the influence of transistor parameters on its fluctuations are investigated.

**Keywords:** wideband receiver, superheterodyne receiver, Allan Variance, gain stability, phase stability, fluctuation.