

# Регистрация выходных сигналов радиоастрономических приемников в модуляционном режиме с применением датчика мощности

А. Н. Камели

*Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*  
alinachupa@gmail.com

Ю. В. Векшин

*Институт прикладной астрономии РАН*  
yv.vekshin@iaaras.ru

**Аннотация.** В работе приведены результаты исследований чувствительности радиоастрономического приемника с помощью датчика мощности R&S NRP8SN. В среде LabView разработана программа, реализующая автоматизированное измерение мощности в режиме полной мощности и в модуляционном режиме на задаваемом интервале усреднения и запись результатов в файл. Приведены результаты расчёта дисперсии Аллана для определения типа шумового сигнала и оценки стабильности радиоастрономического приемника.

**Ключевые слова:** радиометр, радиоастрономический приемник, чувствительность, стабильность, дисперсия Аллана, синхронное детектирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для приема, измерения и регистрации мощности шумового радиоизлучения космических источников в радиоастрономии используются радиометры. В идеале приемная система должна обладать постоянными коэффициентами усиления и стабильной шумовой температурой, усилительные каналы должны иметь линейные характеристики в широком динамическом диапазоне. Изменение параметров приемной системы во времени, то есть нестабильность её характеристик, приводит к ухудшению реальной точности регистрации радиоастрономических сигналов [1].

Одной из самых простых схем является радиометр полной мощности (рис. 1). Он позволяет измерить суммарную мощность излучения и шума антенны с приемником. Данный тип радиометра имеет наилучшую потенциальную чувствительность, однако на практике её трудно реализовать из-за нестабильности коэффициентов усиления и дрейфа нуля усилителя постоянного тока. Для уменьшения нестабильностей аппаратуры используются модуляционные радиометры, в которых применяется непрерывное переключение входа приёмника с антенны на эталонный источник шумового сигнала. Однако это приводит к уменьшению времени измерения источника и ухудшению теоретической чувствительности.

Радиометр состоит из приёмника и системы регистрации. Для исследований стабильности приёмника без влияния системы регистрации необходимо проводить измерения независимым эталонным измерителем мощности. С этой целью в работе реализована

регистрация выходных сигналов радиоастрономических приёмников с помощью датчика мощности R&S NRP8SN, и проведено сравнение чувствительности радиометра в режимах полной мощности и модуляционном.

## II. ИССЛЕДУЕМЫЙ ПРИЕМНИК И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

В работе исследовался приемник X диапазона длин волн для радиотелескопа РТ-32 [2]. Приемник состоит из криогенного блока, содержащего охлаждаемые малошумящие усилители (МШУ), блока преобразования частот (БПЧ), блока генераторов шума (БГШ). Приемник позволяет работать как в режиме полной мощности, так и в модуляционном режиме с пилот-сигналом (рис. 2). Изменение режима работы приемника осуществляется в программе управления на компьютере.

МШУ необходим для усиления слабых СВЧ-сигналов при минимальном уровне собственных шумов. Охлаждение усилителей и элементов высокочастотного волноводного тракта производится в криостате. Сигналы на выходе МШУ усиливаются и фильтруются в БПЧ, а также преобразуются к промежуточной полосе частот, в которой работает система регистрации сигналов. БПЧ содержит также модулятор, осуществлявший изменение коэффициента усиления канала в модуляционном режиме с пилот-сигналом.

БГШ содержит полупроводниковые генераторы шума на лавинно-пролетных диодах и реализует формирование сравнительно слабого сигнала для амплитудной калибровки приемника и мощного сигнала для компенсации собственных шумов антенны и приемника. Для регулировки мощности ГШ компенсации и калибровки применены коаксиальные аттенуаторы на р-і-n диодах. Сигналы от БГШ вводятся в тракт приемника через направленный ответвитель в криоблоке. Программное управление позволяет подавать сигнал ГШ компенсации в противофазе с модулятором и ГШ калибровки в непрерывном режиме [3].

В качестве системы регистрации в данной работе применен датчик мощности R&S NRP8SN. В среде LabVIEW разработана программа, реализующая автоматизированное измерение мощности на задаваемом интервале усреднения  $\tau$  и запись результатов в файл. Реализовано синхронное детектирование

модулированного выходного сигнала радиометра и запись отсчетов в разные массивы в зависимости от уровня сигнала модуляции. Для модуляционного режима

использован режим «Trace time» и запуск по сигналу модуляции в виде TTL меандра и с частотой 1 кГц.

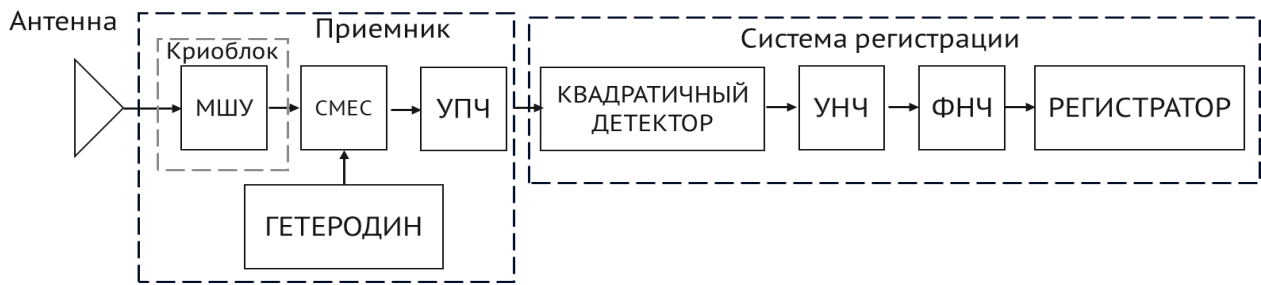


Рис. 1. Радиометр полной мощности

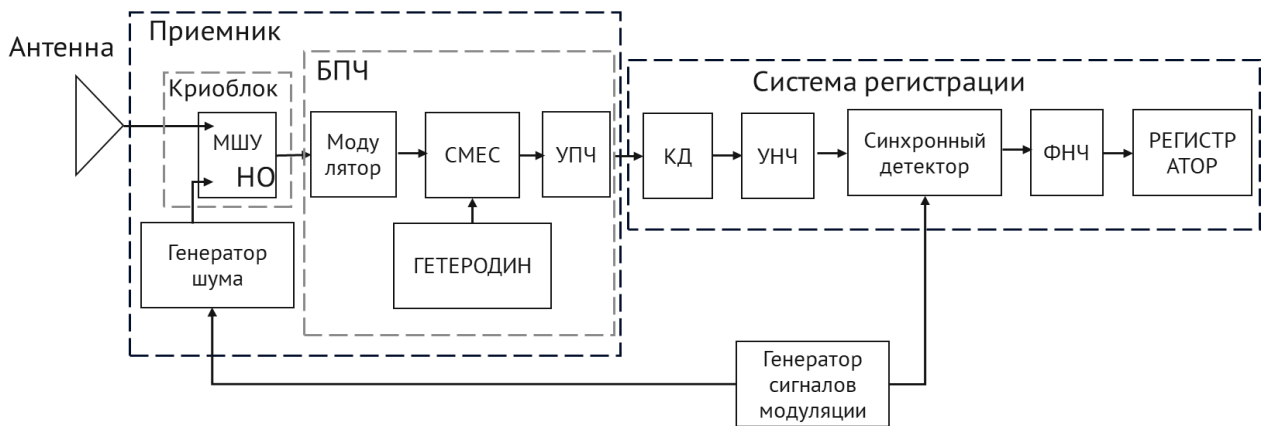


Рис. 2. Модуляционный радиометр с пилот-сигналом радиотелескопа РТ-32

Для сравнения двух типов радиометров проводились измерения чувствительности – минимально обнаруживаемого приращения антенной температуры, при котором среднее значения приращения выходного сигнала равно среднеквадратичному отклонению его флуктуаций. Чувствительность радиометра полной мощности в общем случае равна [4]:

$$\Delta T = (T_A + T_R) \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta F \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2},$$

где  $T_A$  – шумовая температура антенны (в лаборатории вместо антенны на вход подключалась согласованная нагрузка),  $T_R$  – шумовая температура приемника,  $\Delta F$  – полоса пропускания приемника (до детектора), а  $\Delta G/G$  – нестабильность коэффициента усиления (для идеального случая равна нулю).

Чувствительность модуляционного радиометра с пилот-сигналом рассчитывается по формуле [5]:

$$\Delta T = 2 \cdot \frac{M}{M-1} \cdot \frac{(T_A + T_R)}{\sqrt{\Delta F \cdot \tau}}$$

где  $M$  – коэффициент ослабления модулятора.

В лабораторных экспериментах на вход приемника устанавливалась согласованная нагрузка с температурой  $T_n$ . Принимая  $T_{сум} = (T_A + T_R)$ , расчетное значение  $(\Delta T / T_{сум}) = 1,05 \cdot 10^{-4}$  для полосы  $\Delta F = 900$  МГц и

интервале усреднения  $\tau = 0,1$  с. Измеренное значение  $(\Delta T / T_{сум})$  определялось как отношение СКО флуктуаций к среднему значению мощности выходного сигнала. При времени измерения 60 с, число отсчетов 600, для радиометра полной мощности измеренное значение  $(\Delta T / T_{сум}) = 1,17 \cdot 10^{-4}$ , при времени измерения 60 мин, число отсчетов 36000,  $(\Delta T / T_{сум}) = 1,96 \cdot 10^{-4}$ .

В модуляционном режиме 2% времени исключалось за счет переходных процессов. В модуляционном режиме расчетное значение  $(\Delta T / T_{сум}) = 2,4 \cdot 10^{-4}$ , в 2.2 раза больше, чем у полной мощности. При времени измерения 60 с для модуляционного радиометра измеренное значение  $(\Delta T / T_{сум}) = 2,7 \cdot 10^{-4}$ , при времени измерения 60 мин  $(\Delta T / T_{сум}) = 2,8 \cdot 10^{-4}$ . Чувствительность радиометра в модуляционном режиме на коротких интервалах времени получилась в 2.3 раза больше, чем радиометра полной мощности в соответствии с теорией.

### III. АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ СИГНАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСПЕРСИИ АЛЛАНА

Среднеквадратичное отклонение временного ряда отсчетов выходного сигнала радиометра не позволяет различить тип шума или дрейфа. Шумовые сигналы на выходе могут иметь различную спектральную плотность мощности. Белый шум имеет равномерную

спектральную плотность мощности. Фликкер-шум вида  $1/f$  – электронный шум, наблюдаемый практически в любых аналоговых электронных устройствах. Но могут присутствовать также флуктуации вида  $1/f^\alpha$ , при

которых шум не стационарен. Для таких случаев может потребоваться временной или частотный анализ шумов и дрейфов.

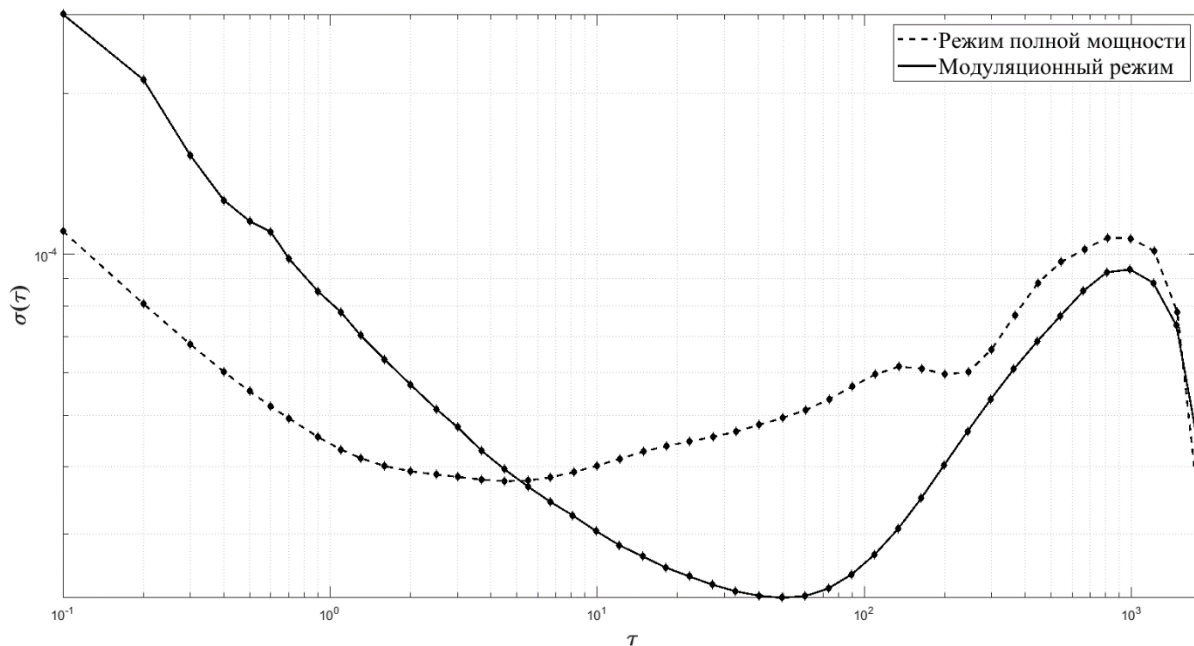


Рис. 3. Зависимость отклонения Аллана от интервала усреднения для приемника X-диапазона РТ-32 в режимах полной мощности и модуляционном

Для рассматриваемого приемника произведен анализ с применением дисперсии Аллана [6], который позволяет определить оптимальное время накопления его выходного сигнала, при котором достигается минимальный уровень дисперсии шума [7]. Также с помощью такого анализа можно исследовать флуктуации вида  $1/f^\alpha$ .

Расчет отклонения Аллана в зависимости от времени усреднения для приемника X-диапазона приведен на рис. 3. При малых значениях интервала усреднения  $\tau$  преобладает белый шум (отклонение Аллана уменьшается для обоих режимов приемника). Модуляционный режим имеет в 2 раза большее значение отклонения Аллана, что соответствует теории. Минимальный уровень шума для режима полной мощности достигается времени усреднения  $\tau=2$  с, это время является оптимальным временем для режима полной мощности. На интервалах до 10 с преобладает фликкер-шум (отклонение Аллана – константа). На более длительных интервалах преобладает временной дрейф сигнала (отклонение Аллана растет). В модуляционном режиме нестабильность частично компенсируется, белый шум проявляется на более длительных интервалах накопления  $\tau=30$  с, что является оптимальным временем для модуляционного режима. На интервалах накопления более 5 с чувствительность в модуляционном режиме выше, чем в режиме полной мощности за счет устранения нестабильности коэффициента усиления приемника.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система регистрации выходных сигналов радиоастрономических приемников с применением

датчика мощности R&S NRP8SN. Реализовано синхронное детектирование сигналов в модуляционном режиме. Исследована стабильность приемника X-диапазона в режимах полной мощности и в модуляционном. Чувствительности радиометра на коротких интервалах времени близки к теоретическим значениям. Чувствительность радиометра полной мощности на интервалах времени усреднения до 5 с выше, чем модуляционного, на более длительных интервалах чувствительность модуляционного радиометра выше за счет устранения нестабильности коэффициента усиления приемника.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.
- [2] Астронет: Ю. Н. Гнедин, "Физика Космоса", 1986 Поляризация излучения (космических источников).
- [3] Иванов Д.В., Ипатов А.В., Ипатова И.А., Мардышкин В.В., Михайлов А.Г. Приемники радиоинтерферометрической сети КВАЗАР // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С.247–248.
- [4] Кольцов Н.Е., Мардышкин В.В., Маршалов Д.А., Евстигнеев А.А. Результаты модернизации приемных каналов S/X диапазонов длин волн на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2012. Вып.23. С. 224–229.
- [5] Camps A., Tarongi J. M. Microwave Radiometer Resolution Optimization Using Variable Observation Times // Remote Sensing. 2010. V. 2. P. 1826–1843.
- [6] Ипатов А.В., Кольцов Н.Е. Радиометры: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2007, 92 с.
- [7] Riley W.J. Handbook of Frequency Stability Analysis // NIST Special Publication 1065. 2008. 136 p.
- [8] Векшин Ю.В., Лавров А.П., Хвостов Е.Ю. Методика и результаты исследований амплитудной и фазовой стабильности супергетеродинного радиоастрономического приемника // Радиотехника. 2018. №1. С. 24–30.