

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ В РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

© 2013 г. А. В. Выгнов, Д. В. Иванов, А. С. Карпичев

*Институт прикладной астрономии РАН  
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10  
Поступила в редакцию 06.06.2012 г.*

Представлена система контроля фазовой стабильности радиоприемного тракта радиотелескопа, используемая при проведении радиоинтерферометрических наблюдений. Система содержит генератор импульсов пикосекундной длительности, фаза выходных импульсов которого привязана к фазе опорного сигнала. Импульсы генератора длительностью 40 пс подаются на вход приемного устройства и, пройдя тот же путь, что и принимаемый от небесных источников сигнал, позволяют скомпенсировать при корреляционной обработке изменение фазы сигнала, произошедшее в приемно-преобразующем тракте. Разработанная система обеспечивает контроль фазовой стабильности с точностью 10 пс.

DOI: 10.7868/S0032816213020249

### ВВЕДЕНИЕ

Точность геодезических и астрометрических наблюдений на радиоинтерферометре со сверхдлинными базами (РСДБ) определяется точностью измерения разности фаз или задержки сигналов, принятых от радиоисточника на различных радиотелескопах [1]. Поэтому требуется постоянный мониторинг фазовой стабильности приемной системы РСДБ-комплекса и групповой задержки принимаемого сигнала при прохождении через приемный усилительно-преобразующий тракт.

Изменение задержки и фазы сигнала в приемно-регистрающей системе радиотелескопа происходит в результате изменения температуры, атмосферного давления, а также кабельных рассогласований и механических воздействий на кабель при вращении радиотелескопа. Калибровка этих эффектов, учитывающая случайные воздействия на электрическую длину кабеля, осуществляется системой контроля фазовой стабильности.

### СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Контроль фазовых характеристик построен по принципу измерения задержки между опорным и калибровочным сигналами. Система контроля фазовой стабильности состоит из антенного и наземного модулей (см. рис. 1). На радиотелескопе в термостате установлены генератор импульсов пикосекундной длительности [2] и модулятор измерителя электрической длины кабеля. Наземная часть состоит из измерителя электрической длины кабеля и измерителя интервалов времени Agilent 53131A.

Генератор импульсов пикосекундной длительности формирует сигнал фазовой калибровки, представляющий собой сетку частот с шагом 1 МГц в широком диапазоне частот (до 25 ГГц). Измеритель электрической длины кабеля обеспечивает фазовую привязку сетки частот относительно фазы опорной частоты 5 МГц. Сигнал фазовой калибровки подается на вход приемного устройства через направленный ответвитель сразу после рупора антенны и проходит через весь приемно-преобразующий тракт. Фазовые сдвиги принимаемого полезного сигнала, прошедшего через приемно-преобразующий тракт, имеют такую же величину, что и калибровочного. Это позволяет скомпенсировать при корреляционной обработке изменение фазы сигнала, произошедшее в приемно-преобразующем тракте.

Для постоянного контроля задержки сигнала в приемной системе во время записи РСДБ-эксперимента сигнал фазовой калибровки можно подавать непрерывно, если установить достаточно низкий его уровень (несколько процентов от шумовой температуры приемной системы), обнаруживаемый только при очень узкой полосе фильтрации (~10 Гц).

#### *Генератор пикосекундных импульсов*

Генератор пикосекундных импульсов (г.п.и.) располагается в непосредственной близости от входа приемного устройства в надзеркальной кабине радиотелескопа, температура в которой может колебаться в пределах нескольких градусов. Это может привести к флуктуациям фазы импульса г.п.и., сравнимым с возникающими в ка-

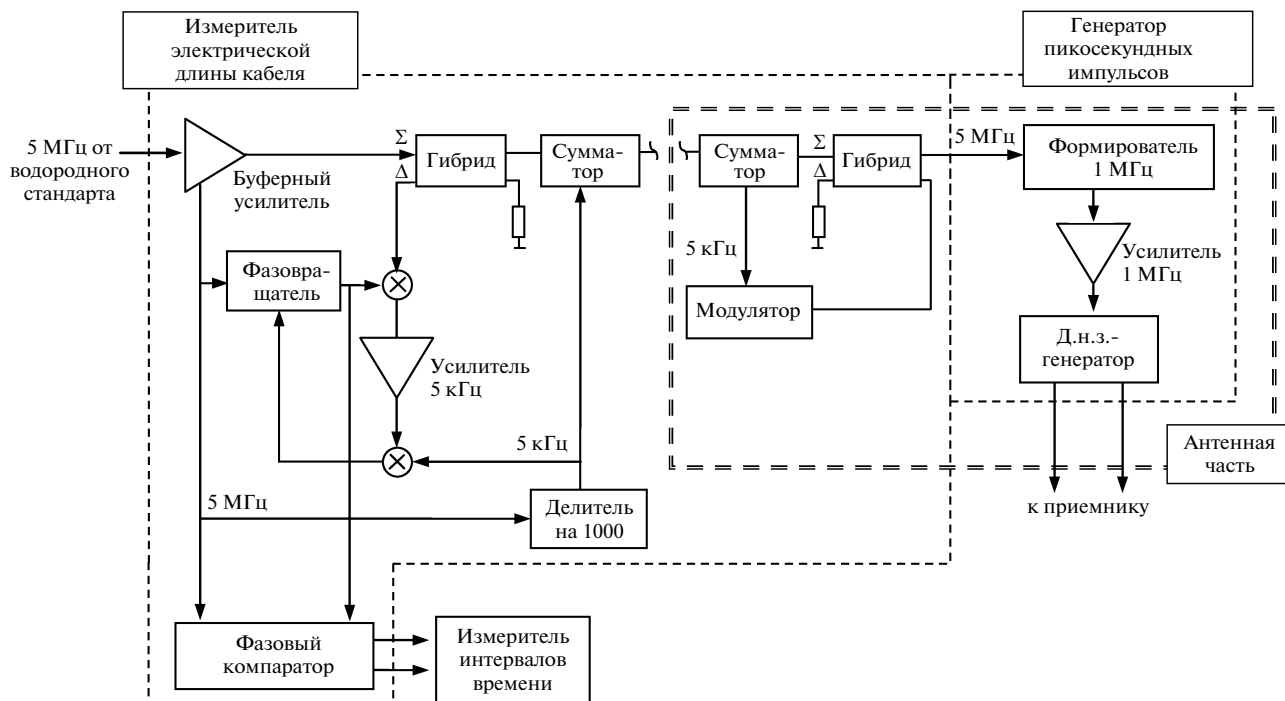


Рис. 1. Система контроля фазовой стабильности.

либруемом радиоприемном тракте. По этой причине генератор импульсов пикосекундной длительности помещен в термостат.

Устройство термостагирования построено по принципу балансного моста с двухуровневой системой регулирования температуры термостата. Точность поддержания температуры термостагирования  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  при изменении внешней температуры на  $10^\circ\text{C}$ , время выхода на рабочий режим не более 30 мин.

Структурная схема модуля г.п.и. на диоде с накоплением заряда (д.н.з.) представлена на рис. 2. Функционально модуль состоит из двух частей — схемы выделения опорного сигнала и формирователя импульса пикосекундной длительности. На вход модуля поступает смешанный сигнал, состоящий из опорного сигнала с частотой 5 МГц, сигнала управления и сигналов, используемых для контроля фазовой задержки в кабеле. С выхода схемы выделения опорного сигнала на усилитель-ограничитель поступает сигнал частотой 5 МГц. Усилитель-ограничитель преобразует этот сигнал в меандр с минимальными фазовыми потерями. Делитель частоты формирует временные ворота частотой 1 МГц. Синхронный коммутатор вырезает из меандра опорной частоты фронт полуволны с частотой 1 МГц.

Управляющий сигнал, выделенный фильтром сигнала управления, может закрыть ворота и прекратить генерацию импульса пикосекундной длительности без остановки делителя. Такая схема поз-

воляет внести минимальные задержки и устранить скачок фазы при выключении импульса г.п.и., а также минимизировать флуктуации фазы, вносимые в опорный сигнал.

Усилитель-формирователь увеличивает крутизну фронта и амплитуду сигнала. На д.н.з. поступает импульс длительностью около 2 нс. Длительность выходного импульса зависит от параметров диода и смещения постоянного напряжения, которое регулируется потенциометром.

Цепи д.н.з. смонтированы на плосковых линиях. На выходе д.н.з. в полосковой линии, нагруженной на делитель мощности, возбуждается импульс амплитудой около 10 В. Далее от симметричного полоскового аттенуатора-разветвителя импульс поступает на два симметричных выхода. Длительность выходного импульса д.н.з. составляет около 40–45 пс. Амплитуда импульса на выходе модуля составляет 1 В, флуктуация фронта выходного импульса не более 2 пс, фазовый дрейф не более  $5 \text{ пс}/^\circ\text{C}$ .

#### Аппаратура контроля электрической длины кабеля

Аппаратура контроля электрической длины кабеля состоит из измерителя электрической длины кабеля и измерителя интервалов времени (счетчик-частотомер).

На вход измерения электрической длины кабеля поступает сигнал опорной частоты 5 МГц от водородного стандарта. Выход подключен к кабе-

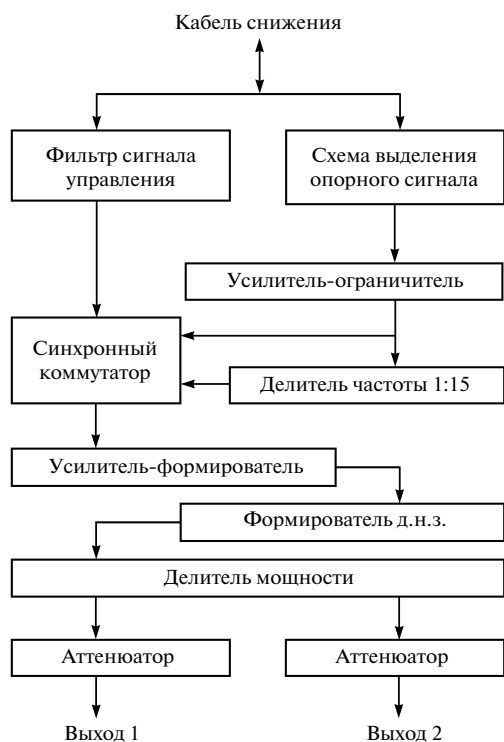


Рис. 2. Структурная схема модуля генератора пикосекундных импульсов.

лю снижения, соединяющему генератор импульсов пикосекундной длительности, расположенный в надзеркальной кабине антенны, и наземную часть измерителя. Часть сигнала опорной частоты через ответвитель поступает на кабель снижения. Другая часть мощности сигнала используется в измерительной схеме.

Сигнал, возвращенный по кабелю снижения, сдвинут по фазе на двойную величину приращения задержки в кабеле плюс начальный сдвиг фаз. Устройство преобразования переносит фазовый сдвиг на опорную частоту для формирования опорного канала и дальнейшего измерения. Измерение разности фаз выполняется при помощи фазового компаратора с коэффициентом умножения 100 и измерителя интервалов времени Agilent 53131A. Результат измерений передается по интерфейсу GPIB в компьютер управления. Структурная схема наземной части измерителя представлена на рис. 3.

Усилитель 5 МГц построен по трансформаторно-транзисторной схеме. Такой выбор схемы связан с тем, что источник опорной частоты расположен в непосредственной близости от узла. На выходе усилителя установлен разветвитель сигнала.

Монтаж гибридного трансформатора на отдельной плате позволил устранить наводки на усилитель. Гибрид предназначен для согласования узлов и разделения сигналов. На вход гибрида



Рис. 3. Структурная схема наземной части измерителя электрической длины кабеля.

поступают сигнал опорной частоты и смесь сигналов, возвращенная с кабеля снижения. На выходе выделяется промодулированный сигнал частоты 5 МГц, возвращенный от антенного блока. Сумматор предназначен для объединения сигналов 5 МГц, 5 кГц, отключения импульса г.п.и. и передачи на кабель снижения. Сумматор построен на пассивных элементах.

Делитель 1:1000 предназначен для формирования фазостабильного сигнала частотой 5 кГц из сигнала опорной частоты 5 МГц. Сигнал опорной частоты поступает от усилителя 5 МГц на вход приемника с линии, совмещенного с триггером Шмитта. Делитель построен на шести двоично-десятичных счетчиках. Делитель 1:200000 предназначен для формирования из сигнала опорной частоты 5 МГц двух сигналов частотой 25 Гц, сдвинутых по фазе на  $45^\circ$ . Делитель вынесен на отдельную плату для уменьшения сетевых наводок 50 и 25 Гц на частоту модуляции 5 кГц. Делитель построен на двоично-десятичном счетчике и двух JK-триггерах.

Фазовый детектор предназначен для сравнения фазы сигнала частоты 5 кГц, сформированного из опорного сигнала, с фазой сигнала, возвращенного от кабеля снижения, и формирования напряжения рассогласования для управления фазовращателем. На вход фазового детектора поступают сигналы опорной частоты 5 кГц, 5 МГц от фазовращателя и выделенный гибридом из смеси частот сигнал 5 МГц, возвращенный по кабелю снижения. Сигналы частотой 5 МГц поступают на перемножитель, где выделяется сигнал частоты модуляции. На выходе перемножителя установ-

лены транзисторный усилитель и два прецизионных операционных усилителя с коэффициентом усиления  $K = 100$  каждый. Фазовый детектор выполнен на квадратурном перемножителе фирмы Motorola, который обеспечивает достаточно высокую линейность и температурную стабильность на рабочей частоте. На выходе установлен интегратор на операционном усилителе.

Синтезатор формирует сигнал частоты 4999975 Гц из сигналов частот 5 МГц и 25 Гц. Для подавления зеркального канала применена микросхема смесителя с одной боковой полосой. Усилитель-ограничитель предназначен для уменьшения влияния неравномерности коэффициента передачи фазовращателя. Усилитель собран на двухканальном быстродействующем операционном усилителе с коэффициентом усиления  $K = 200$ .

Фазовый компаратор построен по принципу симметричного преобразования опорного и измеряемого каналов. На два смесителя с подавлением одной боковой полосы поступают сигналы опорной частоты 4999975 Гц, два сигнала частоты 5 МГц на опорный и измеряемый каналы соответственно. На выходе установлены активный фильтр верхних частот, выполненный на операционном усилителе, и буферный усилитель.

Разработанное устройство обеспечивает контроль электрической длины кабеля с точностью 10 пс.

Результаты измерения электрической длины кабеля в обсерватории “Бадары” представлены на рис. 4, где показаны изменение кабельной задержки в течение РСДБ-сеанса, результаты калибровки до и после сеанса и изменение наружной температуры. Видно, что изменение кабельной задержки в основном определяется наружной температурой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше аппаратные средства контроля фазовых характеристик радиоприемно-

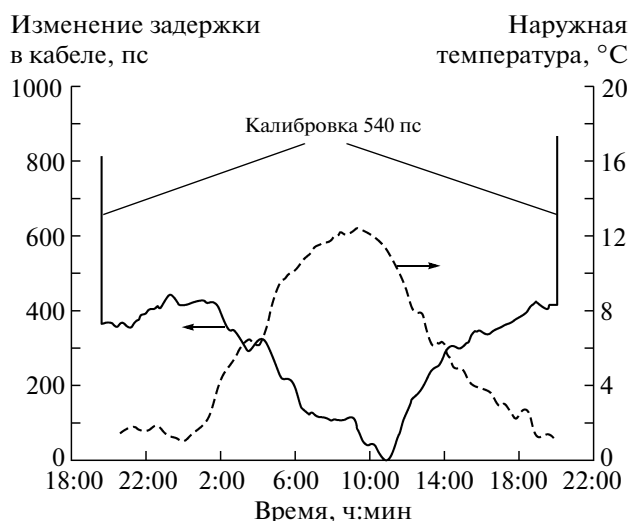


Рис. 4. Результаты измерения кабельной задержки на сеансе RUE-069 в обсерватории “Бадары”.

го тракта введены в эксплуатацию в обсерваториях “Светлое”, “Зеленчукская” и “Бадары” РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” [3, 4] и используются при проведении радиоинтерферометрических наблюдений.

Авторы благодарят А.В. Ипатову за внимание к разработке и постоянное содействие в ее выполнении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии М.: Физматлит, 2003.
2. Вытнов А.В., Иванов Д.В., Милев А.П. // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 15. С. 130.
3. Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н. и др. // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104.
4. Гаязов И.С., Финкельштейн А.М., Ипатов А.В. и др. // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 20. С. 157.