

Высокочувствительный компенсационный радиометр для радиотелескопа РТ-70

И. С. Фалькович, М. А. Сидорчук, А. А. Гридин

Радиоастрономический институт НАН Украины
61002, Харьков, Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 29 апреля 1999 г.

Рассматривается вариант построения радиометра компенсационного типа. Вместо применяемой компенсации уровня фона постоянным напряжением используется преобразование "напряжение-частота" в управляемом кварцевом генераторе. Радиометрический выигрыш в предлагаемом радиометре близок к теоретическому пределу.

Розглядається варіант створення радіометра компенсаційного типу. Замість компенсації рівня фону постійною напругою, що застосовується звичайно, пропонується використання перетворення "напруга-частота" у керованому кварцевому генераторі. Радіометричний виграш радіометра, що пропонується, близький до теоретичної межі.

Для проведения радиоастрономических исследований на радиотелескопе РТ-70 (г. Евпатория), включающих, в частности, определение плотности потоков дискретных источников и картографирование протяженных объектов, необходимо оснащение антенны РТ-70 радиометром, измеряющим мощность принимаемого полезного сигнала. Имеющаяся в составе РТ-70 штатная аппаратура содержит (помимо собственно антенной системы) мал шумящие усилители (МШУ) с шумовой температурой ~50 К на частоты 5.8 ГГц и 927 МГц, а также приемники на эти же частоты. Промежуточная частота на выходе приемной системы $f_{ПЧ} = 48$ МГц, полоса пропускания Δf – не менее 5 МГц, определяет максимально достижимый радиометрический выигрыш пропорциональный $\sqrt{\Delta f}$.

Наибольшее распространение в радиоастрономической практике получил модуляционный радиометр Дикке [1], на входе которого установлен модулятор, периодически переключающий сигнал с выхода антенны на эталонный источник шумового сигнала. После детектирования амплитудно-модулированного колебания используется синхронное детектирование с частотой переключения. Выходное напряжение синхронного детектора пропорционально шумовой температуре полезного сигнала и равно нулю при его отсутствии. Приемник Дикке имеет чувствительность ΔT_M вдвое ниже максимально возможной ΔT_K :

$$\Delta T_M = 2\Delta T_K, \quad \Delta T_K = \frac{T_{\text{сист}}}{\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (1)$$

($T_{\text{сист}}$ – шумовая температура системы, τ – постоянная времени интегрирования), однако обладает существенным достоинством: в результате модуляции практически полностью исключаются флуктуации коэффициента усиления приемной системы.

Для использования модуляционного радиометра необходимо установить СВЧ-модулятор на выходе облучателя (или на выходе волноводного тракта) антенны РТ-70, что, во-первых, сопряжено с известными практическими трудностями, а во-вторых, требует изменения структурной схемы и режимов работы имеющейся штатной аппаратуры. В связи с этим на данном этапе исследований оказалось целесообразным разработать компенсационный радиометр, который может быть включен на выходе усилителя промежуточной частоты радиоприемного устройства.

Компенсационный радиометр измеряет суммарную мощность шумового сигнала, поступающего от антенны и от приемника. Шумовая температура приемной системы $T_{\text{сист}}$ (состоящая из шумов приемника и космических шумов) в сантиметровом диапазоне определяется, в основном, собственными шумами волноводного тракта и МШУ, имеющими величину ~50 К. Шумовая температура $\Delta T_{\text{и}}$ подавляющего большинства космических источников радиоизлучения много меньше указанной величины, поэтому необходимо выделить на выходе радиометра слабое приращение $\Delta T_{\text{и}}$ на фоне преобладающего значения $T_{\text{сист}}$. В радиометре рассматриваемого типа это осуществляется компенсацией напряжения, соответствующего величине $T_{\text{сист}}$ после квадратичного

детектирования, при отсутствии сигнала с последующим усилением на постоянном токе.

Проблема, с которой сталкиваются разработчики компенсационных радиометров, заключается в физической природе шумов в усилителях квазипостоянного тока и источниках компенсирующего напряжения. В усилителях переменного тока на частотах свыше нескольких десятков герц основным источником шумов является белый шум, имеющий не зависящую от частоты спектральную плотность мощности. Величина радиометрического выигрыша, пропорциональная $\sqrt{\tau}$, определена применительно к белому шуму. В случае очень низких частот (менее 1 Гц) и, соответственно, больших интервалов наблюдения доминирует фликкер-шум, спектральная плотность мощности которого изменяется с частотой как $f^{-\alpha}$, где $\alpha \geq 1$. Дисперсия усилителя постоянного тока с учетом шумов источника компенсирующего напряжения теоретически равна бесконечности. Практически, однако, дисперсия ограничена, так как усилитель работает конечное время и его полоса пропускания начинается не с нуля, а с некоторой начальной частоты. Поскольку $\Delta T_{\text{и}} \ll T_{\text{сист}}$, то после компенсации требуется достаточно большое усиление по постоянному току. Это приводит к сильному возрастанию дисперсии сигнала на выходе радиометра и, соответственно, к резкому ухудшению его чувствительности по сравнению с теоретическим пределом (1), когда $\Delta T_{\text{к}} \cong 8 \times 10^{-3}$ К при $T_{\text{сист}} \cong 50$ К, $\Delta f = 5$ МГц и $\tau = 8$ с. Забегая вперед, укажем, что вариант с компенсацией постоянным током был реализован для измерения шумовой температуры ряда мощных радиоисточников с $\Delta T_{\text{и}} \geq 5$ К, когда $\Delta T_{\text{и}} / T_{\text{сист}} \geq 10^{-1}$.

Заметное уменьшение собственных шумов радиометра компенсационного типа может быть достигнуто при преобразовании напряжения сигнала в частоту с использованием высокой частотной стабильности кварцевых генераторов и особенностей их собственных шумов. Влияние различных шумовых механизмов прецизионного кварцевого генератора может быть сведено к достаточно реалистичной модели, которая описывается представлением спектральной плотности мощности $S_y(f)$ относительного мгновенного отклонения $y(t)$ частоты от номинальной [2]:

$$y(t) = \frac{d\Phi/dt}{2\pi f_0}, \quad S_y(f) = af^{-2} + bf^{-1} + cf^0, \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ – флуктуации фазы кварцевого генератора. Третий член в разложении $S_y(f)$ с показателем степени $\alpha=0$ описывает флуктуации частоты, связанные с белым шумом, второй ($\alpha=-1$) – мерцание частоты, первый ($\alpha=-2$) – случайные блуждания частоты. Дисперсия $\sigma_y^2(\tau)$ флуктуаций частоты для каждого члена $S_y(f)$ в (2) пропорциональна $\tau^{-(\alpha+1)}$ [2].

Чаще всего имеет место несколько различных создающих шум процессов. Если эти процессы не коррелированы, то суммарная спектральная плотность и соответствующая дисперсия могут быть получены простым добавлением членов, как в (2).

На рис. 1 приведены данные по стабильности высококачественных кварцевых генераторов [2,3]. Как видно из рисунка, при значениях $\tau < 1$ с преобладает белый шум, для которого $\sigma_y^2(\tau) \propto \tau^{-1}$. В наиболее интересном для проведения радиоастрономических наблюдений диапазоне $\tau = 1 + 10^3$ с величина σ_y^2 от τ не зависит и имеет минимальное значение, определяющееся процессом мерцания частоты, то есть членом bf^{-1} в выражении (2). В то же время относительные флуктуации фазы $\Phi(t)$ кварцевого генератора описываются процессом близким к фликкер-шуму (пунктирная линия на рис. 1), что подтверждает целесообразность управления именно частотой, а не фазой генератора.

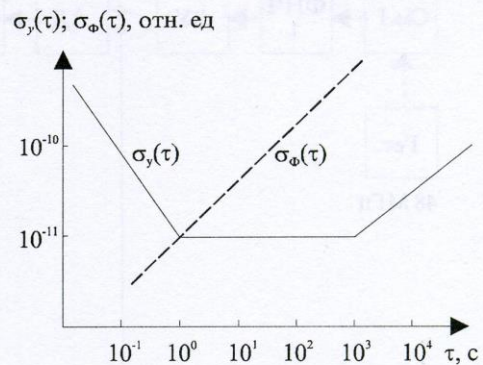


Рис. 1. Зависимость от времени нестабильности частоты $\sigma_y(\tau)$ и среднеквадратичных флуктуаций фазы $\sigma_\Phi(\tau)$ кварцевого генератора

В разработанном радиометре в качестве преобразователя “напряжение-частота” использован термостатированный управляемый кварцевый генератор. Шумовой сигнал детек-

тируется линейным амплитудным детектором с малой постоянной времени, равной 0.1 с. Продетектированное напряжение U подается на варикап, управляющий частотой $f_0 + F$ генератора по закону $F = \gamma U$, то есть осуществляется линейное преобразование "напряжение-частота". Описываемый вариант радиометра предназначен для использования в случае слабых сигналов $\Delta T_{\text{и}} / T_{\text{сист}} \ll 1$, когда приращение выходного напряжения ΔU амплитудного детектора пропорционально мощности ΔP полезного сигнала или его шумовой температуре ΔT :

$$\Delta U \propto \frac{\Delta P}{2\sqrt{P_{\text{сист}}}} \propto \Delta T.$$

Следовательно, изменения частоты F кварцевого генератора пропорциональны шумовой температуре исследуемого космического радиисточника. Используя далее частотный детектор, имеем $\Delta U_{\text{чд}} \propto F \propto \Delta T_{\text{и}}$, т. е. его выходное напряжение можно проградуировать в

единицах шумовой температуры (К) или спектральной плотности потока (Ян).

Полная функциональная схема разработанного компенсационного радиометра приведена на рис. 2. Сигнал с выхода штатного радиоприемника РТ-70 дополнительно фильтруется в полосовом фильтре (Ф) и преобразуется к нулевой промежуточной частоте, что позволяет использовать шумовую мощность "зеркального" канала. Входной преобразователь частоты состоит из высоколинейного двойного кольцевого смесителя (См.1) и перестраиваемого LC-гетеродина. Преобразованный сигнал проходит фильтр нижних частот (ФНЧ-1) с переключаемой полосой пропускания 100 кГц или 2.5 МГц. Более узкая полоса предусмотрена для повышения помехозащищенности измерений с возможностью перестройки радиометра в пределах общей полосы пропускания 5 МГц. Далее шумовой сигнал поступает на широкополосный термокомпенсированный видеосузитель (ВУ) с коэффициентом передачи 72 дБ. Для режима измерения мощных радиисточников ($\Delta T_{\text{и}} \geq 5$ К), как уже отмечалось, реализован обычный компенсационный радиометр,

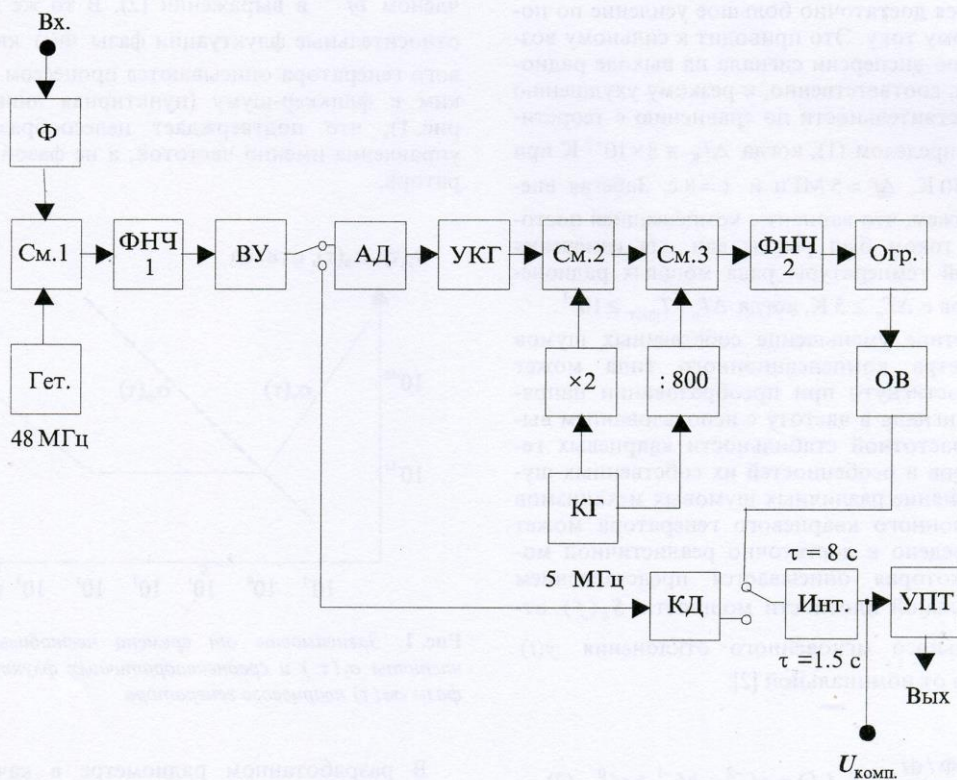


Рис. 2. Функциональная схема радиометра

в котором усиленный видеосигнал квадратично детектируется (КД), интегрируется (Инт.) с постоянными времени 1.5 или 8 с. Последняя величина согласована со временем прохождения точечного источника через диаграмму направленности антенны РТ-70. Усилитель постоянного тока (УПТ) усиливает продетектированный сигнал до необходимой для регистрации величины ~ 5 В. На его вход подается постоянное напряжение, компенсирующее отклик радиометра на шумовую температуру системы $T_{\text{сист}}$ в отсутствие полезного сигнала. Выходные данные регистрируются с помощью АЦП в персональном компьютере с одновременной записью на самописец.

При измерении шумовой температуры слабых радиоисточников ($\Delta T_{\text{и}} < 5$ К) сигнал с выхода видеоусилителя поступает на линейный амплитудный детектор (АД), который для исключения влияния температуры на его коэффициент передачи помещен в термостат. В этом же термостате находится и управляемый кварцевый генератор (УКГ), имеющий частоту 10.00627 МГц при входном сигнале, равном $T_{\text{сист}}$. При наблюдении радиоисточника с температурой $\Delta T_{\text{и}}$ указанная частота возрастает на величину F . Крутизна перестройки кварцевого генератора $\gamma = F/U = 0.74$ Гц/мВ, что в пересчете на шумовую температуру соответствует 4×10^{-2} К/Гц. Учитывая, что относительная нестабильность частоты генератора с кварцем не хуже 10^{-9} (среднеквадратичные флуктуации частоты менее 0.1 Гц при $f_0 \approx 10$ МГц), оценим собственные шумы разработанного радиометра: $\Delta T \leq 4 \times 10^{-2}$ К/Гц $\times 0.1$ Гц = 4×10^{-3} К. Указанная выше максимальная чувствительность составляет 8 мК при $\Delta f = 5$ МГц и $\tau = 8$ с, следовательно, преобразование "напряжение-частота" практически не влияет на чувствительность радиометра.

Компенсация шумовой температуры системы осуществляется в процессе двойного преобразования частоты в смесителях (См. 2 и См. 3). Гетеродинные напряжения формируются из выходного сигнала частоты 5 МГц прецизионного термостатированного опорного генератора "Гиацинт" (КГ) с помощью умножения и деления. Опорный генератор по сравнению с управляемым имеет на порядок меньшую нестабильность частоты и не ухудшает шумовые характеристики радиометра. После второго преобразования и низкочастотной фильтрации с полосой 200 Гц (ФНЧ-2) частота сигнала равна 20 Гц $+ F$, 20 Гц соответствует $T_{\text{сист}}$, а величина F пропорциональна $\Delta T_{\text{и}}$. Начальное смещение частоты необходимо для устойчи-

вой работы частотного детектора, состоящего из усилителя-ограничителя (Огр.), одновибратора (ОВ) и интегратора (Инт.). Принцип частотного детектирования заключается в формировании одновибратором импульсов постоянной длительности, интегрирование которых дает постоянное напряжение, пропорциональное частоте F .

Проведенные суточные испытания в лабораторных условиях подтвердили ожидаемые характеристики радиометра, ко входу которого подключался генератор белого шума, имитирующий $T_{\text{сист}} \approx 50$ К. Приращения выходного сигнала генератора на $2 \times 10^{-3} T_{\text{сист}} \approx 100$ мК воспроизводили полезный сигнал. На полученных записях (рис. 3) отношение "ступеньки" за счет сигнала к среднеквадратичному значению флуктуаций не менее 10:1, что соответствует реальной чувствительности радиометра – не больше 10 мК – при рассчитанной теоретической чувствительности 8 мК. Среднее значение долговременного дрейфа выходного сигнала – не более 5 мК/ч при изменении температуры окружающей среды в пределах 20 ± 2 °С и изменении напряжения сети 220 ± 10 В.

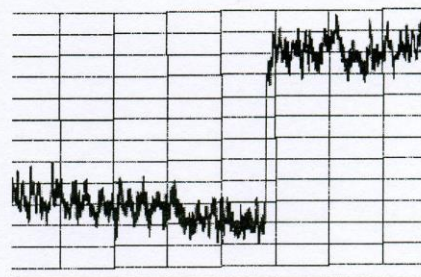


Рис. 3. Запись изменения сигнала, соответствующего $2 \times 10^{-3} T_{\text{сист}}$ на выходе радиометра

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов INTAS 94 - 4010 и INTAS 96 - 0183.

Литература

1. Дж. Д. Краус. Радиоастрономия. Москва, Сов. Радио, 1973, 456 с.
2. П. К. Карташов, Дж. А. Барнс. Высокоточное воспроизведение единиц времени и частоты, В сб. Время и частота. Москва, Мир, 1973, с. 29-39.
3. В. К. Клемперер. Применение независимых стандартов частоты в радиоинтерферометрах с большими базами. В сб. Время и частота. Москва, Мир, 1973, с. 173-183.

High-Sensible Compensating Radiometer for RT-70 Radiotelescope

I. S. Falkovich, M. A. Sidorchuk, A. A. Gridin

The version of the compensation-type radiometer construction has been considered. Instead of usable compensation of the background level by a constant voltage, the transformation "voltage-frequency" in a controlled quartz generator has been employed. The radiometric gain in the suggested radiometer approaches the theoretic limit.



Fig. 1. Signal waveform on the compensating radiometer.

Данный рисунок показывает сигнал на радиометре с компенсацией. Видно изменение амплитуды сигнала в процессе измерения.

1. Д. Д. Кравец, Радиотехника, Москва, 1971, стр. 187-188.
2. Д. К. Карачинский, Д. А. Казанский, Радиотехника, Москва, 1973, стр. 24-25.
3. В. К. Карачинский, Радиотехника, Москва, 1973, стр. 24-25.
4. В. К. Карачинский, Радиотехника, Москва, 1973, стр. 173-174.