

УДК 520.8:520.27

НЕПРЕРЫВНАЯ КАЛИБРОВКА
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИИ

В. Р. Амирханян*, А. А. Капусткин*

Предлагаемый метод калибровки позволяет непрерывно контролировать коэффициент усиления приемного тракта без потери чувствительности радиометра.

The suggested calibration method allows monitoring the gain of the microwave receiver without decreasing the radiometer sensitivity.

Традиционный способ калибровки радиоастрономических наблюдений с помощью "ступеньки" оказался крайне неудобным при массовых измерениях, когда неизбежна полная формализация процесса обработки. "Ступенька" – это неоднородность в наблюдениях, которую надо найти, определить ее параметры, а затем убрать из наблюдательного материала, чтобы не терять наблюдательное время. Эти многочисленные процедуры отягощают и без того сложные программы обработки и заметно увеличивают время счета. Кроме того, "ступенька" не позволяет непрерывно контролировать коэффициент усиления приемника.

Ситуация значительно упрощается, если постоянный калибровочный сигнал, пройдя весь приемный тракт, на выходе отфильтровывается от исследуемого сигнала. Таким образом организуется канал калибровочного сигнала. Тогда, при хорошей развязке между каналами, калибровочный сигнал не влияет на работу основного канала и позволяет непрерывно контролировать приемную систему, причем без снижения чувствительности системы.

Рассмотрим реализацию непрерывной калибровки в наиболее популярных модуляционных радиоастрономических приемниках. Сигнал, проходящий через такой приемник, модулируется, как правило, меандром и на выходе выделяется ключевым синхронным детектором (СД1). Синхронный детектор – это фильтр, имеющий гребенчатую частотную характеристику, пропускающий нечетные гармоники опорной частоты f_1 и максимально подавляющий ее четные гармоники. Используем этот естественный фильтр радиометра для разделения основного и калибровочного каналов. Для этого модулируем сигнал калибровочного генератора четной гармоникой f_2 опорной частоты, подадим его на вход приемника, а на выходе отфильтруем от основного сигнала вторым синхронным детектором (СД2), настроенным на эту же гармонику. Тем самым мы решим задачу разделения основного и калибровочного каналов: на выходе СД1 получаем исследуемый сигнал, а на выходе СД2 – калибровочный.

Дальнейшие вычисления идут по стандартной схеме:

* Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга.

$$S_1 = \frac{U_1}{U_2} S_2, \quad (1)$$

U_1 – напряжение на выходе СД1, отсчитанное от уровня аппаратного нуля;

U_2 – напряжение на выходе СД2, отсчитанное от уровня аппаратного нуля;

S_1 – исследуемый сигнал в Ян или в К;

S_2 – амплитуда U в Ян или в К.

Учитывая, что при равенстве постоянных времени СД1 и СД2 дисперсии процессов U_1 и U_2 равны, и используя формулу переноса ошибок (Худсон, 1970), получим выражение для среднеквадратичного стандарта процесса S_1 :

$$\sigma = \sigma_1 \frac{S_2}{U_2} \sqrt{1 + \frac{\tau_1 U_1^2}{\tau_2 U_2^2}}, \quad (2)$$

σ_1 – среднеквадратичный стандарт процесса на выходе СД1, τ_1 – постоянная времени СД1, τ_2 – постоянная времени СД2. Как видно из этого выражения, для того, чтобы уменьшить вклад шумов калибровки, необходимо выполнить условие $\tau_2 \gg \tau_1$.

Реализовать аппаратно большую постоянную времени (десятки и сотни секунд) затруднительно. Гораздо проще сделать это программным способом в ЭВМ, управляющей процессом наблюдений: либо с помощью рекурсивного RC-фильтра, либо простым усреднением выходного напряжения СД2 на заданном отрезке времени. Также в режиме on-line можно непрерывно вычислять S_1 , устраняя тем самым дрейф коэффициента усиления приемного тракта. Конечно, сформированная постоянная времени не должна превышать характерное время неустойчивости приемника. Это время зависит от конструкции и условий работы приемника и может колебаться от единиц до десятков минут.

Принципиальная реализуемость предложенной схемы сомнений не вызвала. Практическое же применение определялось уровнем технических решений, заложенных в схему, дабы обеспечить достаточный уровень развязок между каналами. Мы перечислим их без комментариев, так как они достаточно очевидны.

1. Выбор высокого четного номера гармоники для опорной частоты калибровочного канала. Естественно, что верхняя граница полосы усиления НЧ-тракта радиометра ограничивает номер гармоники.

2. Когерентность опорных частот сигнального и калибровочного каналов.

3. Сквозность 2 как для f_1 , так и для f_2 с точностью $0.1/f_2$. Такого же порядка должна быть и длительность фронтов меандра. Если низкое быстродействие СВЧ-переключателя не позволяет выполнить последнее условие, то необходимо блокировать работу калибровочного генератора и СД2 до завершения переходного процесса.

4. В каждый полупериод модуляции сигнала желательно "уложить" целое число периодов модуляции калибровочного генератора.

Решающее слово было за экспериментом. Проверка этого метода калибровки была проведена в 1985 – 1986 гг. на 2-см приемнике автоматизированного радиоастрономического комплекса ГАИШ (Амирханян и др., 1980). Схема радиометра приведена на рис. 1. Шумовой калибровочный генератор и СД2 управляются восьмой гармоникой опорной частоты.

Для того, чтобы обе частоты были когерентны и для получения симметричного меандра, восьмая гармоника и опорная частота получены делением на два и шестнадцать, соответственно, частоты задающего генератора (8 кГц). То есть опорная частота $f_1=500$ Гц, а ее восьмая гармоника $f_2 = 4$ кГц. Почему восьмая?

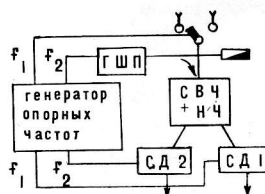


Рис.1. Блок-схема радиометра с непрерывной калибровкой.

Во-первых, это достаточно высокий номер гармоники, которая удачно попадает в полосу НЧ-тракта и согласуется с быстродействием входного СВЧ-переключателя. А во-вторых – простая реализация генератора опорных частот на одном четырехразрядном счетчике (например, 155ИЕ5). С выходов СД1 и СД2 сигнал поступает на 11-разрядные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), которые вычислительная машина Э-60 опрашивает через 0.32 с. Постоянная времени СД1 $\tau_1 = 0.16$ с, постоянная времени СД2 $\tau_2 = 1.0$ с. Для увеличения постоянной времени калибровочного канала ЭВМ усредняет U_2 в течение 163.2 с (510 отсчетов – длина одной порции наблюдений, регистрируемой на магнитной ленте).

Несколько слов об "аппаратном нуле". Обычно он определяется как выходное напряжение синхронного детектора при выключенных СВЧ-усилителях радиометра. Его значение необходимо знать как в сигнальном, так и калибровочном канале. И это основной недостаток предлагаемой схемы: "плавание" нуля может полностью исказить результаты наблюдений. Некоторое усложнение схемы позволяет осуществить контроль нулевого уровня. Но мы выбрали простой путь. Стабильность нуля определяется в основном температурной стабильностью выходных операционных усилителей и в нашем случае не выходит за уровень двух младших разрядов АЦП. Регулировкой нуля на выходе операционного усилителя "аппаратный нуль" подгонялся к нулевому напряжению с точностью до младшего разряда АЦП, т.е. до 2 мВ. Если учесть, что рабочее значение $\sigma_1 = 20-40$ мВ и $U_2 = 500$ мВ, то можно быть уверенным в достаточной стабильности аппаратного нуля.

Результаты испытаний оказались очень обнадеживающими: мы не заметили взаимного влияния основного и калибровочного каналов на уровне младшего разряда АЦП. Даже быстрые изменения в канале, например, включение и выключение калибровочного генератора, не сказываются на работе другого канала. При этом не замечено ухудшение чувствительности в основном канале.

После проверки радиометр длительное время работал в режиме обзора и продемонстрировал, что предлагаемый метод калибровки можно использовать в эксперименте. Естественно, этот способ можно использовать для разделения как частотных, так и поляризационных каналов радиометров.

ЛИТЕРАТУРА

- Амирханян В. Р., Конникова В.К., Лазуткин А.Н.: 1980, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 12, С. 151-155.
Худсон Д.: 1970, Статистика для физиков, М.: Мир., 296 с.

Поступила в редакцию
5 мая 1989 г.