

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.8>

УДК: 621.376.53

БЫСТРОДЕЙСТВИЕ АЦП В СВЧ РАДИОМЕТРЕ

Д.П. Скулачев, А.С. Косов

Институт космических исследований Российской академии наук
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

Аннотация. Рассмотрена конфигурация аналого-цифрового модуляционного СВЧ радиометра. Проанализированы основания, которыми руководствуются разработчики при определении требований к быстродействию АЦП. Показано, что эти требования могут быть значительно снижены, если на входе АЦП установить дополнительный аналоговый интегратор. Проведено статистическое моделирование такой схемы, определены оптимальные параметры интегратора. Проведены расчеты и лабораторные испытания действующего образца радиометра. Показано, что введение простейшего RC-интегратора позволяет применять низкоскоростной АЦП и приводит к незначительному изменению чувствительности радиометра.

Ключевые слова: СВЧ, радиометр, АЦП, интегратор, чувствительность.

Финансирование: Госконтракт № 1921730301771217000241361/217/2258-3-2019.

Автор для переписки: Скулачев Дмитрий Петрович, dskulach@mx.iki.rssi.ru

Введение

В настоящее время СВЧ радиометры успешно используются для дистанционного определения температуры различных природных и технических объектов, а также в системах радиовидения, медицинской радиотермометрии [1, 2, 3]. Наибольшей стабильностью параметров обладают устройства модуляционного типа (радиометры Дике). Существуют многочисленные модификации модуляционных радиометров, но их всех объединяет наличие модулятора (переключателя) на входе или в дальнейшем тракте усиления. Для выделения информационного сигнала из шума в модуляционном радиометре применяется синхронизованный с модулятором перемножитель (синхронный детектор) и последующий интегратор. Прогресс в области цифровой техники позволяет выполнять отдельные узлы радиометра в цифровом виде. В некоторых случаях удастся сконструировать почти полностью цифровой радиометр. Мы далее будем рассматривать наиболее распространенный в настоящее время аналого-цифровой радиометр. В таком приборе аналоговые узлы выполняют модуляцию, усиление и квадратичное детектирование принимаемого СВЧ сигнала, а также усиление продетектированного напряжения низкой частоты (УНЧ). Далее аналоговое напряжение превращается в цифровой код с помощью АЦП. Синхронное детектирование и интегрирование сигнала затем производятся программным образом в цифровых блоках. Таким образом, АЦП является интерфейсом между аналоговой и цифровой частями радиометра, поэтому для достижения оптимальных параметров устройства необходимо правильно выбирать характеристики сигналов на входе АЦП и параметры самого АЦП.

Мы исследовали работу модифицированного радиометра с дополнительным аналоговым интегратором, установленным на входе АЦП. Показано, что в этом случае значительно снижаются требования к быстродействию АЦП и становится возможно применение дешевых и доступных низкоскоростных микросхем. Было проведено статистическое моделирование такого решения, изготовлен экспериментальный образец

модифицированного радиометра. Расчеты и лабораторные испытания подтвердили работоспособность прибора и показали, что предложенная модификация приводит к незначительному изменению чувствительности при неизменных прочих параметрах радиометра.

1. Структурная схема радиометра

Для простоты изложения мы будем рассматривать простейшую схему аналого-цифрового модуляционного радиометра приведенную на рис. 1.

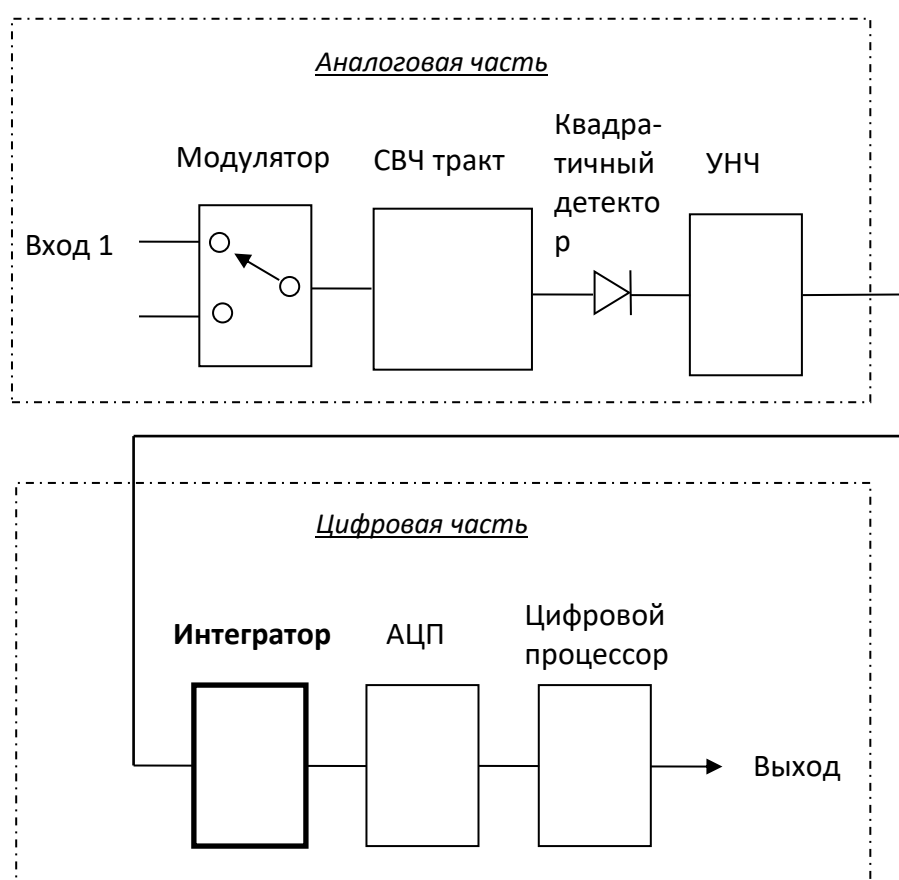


Рис. 1. Структурная схема радиометра

В традиционных схемах интегратор, выделенный на рис. 1 утолщенными линиями, не используется.

2. Напряжение на выходе квадратичного детектора

По принципу действия модуляционный радиометр измеряет разность мощностей сигналов, поступающих на входы устройства. На выходе квадратичного детектора такого радиометра вырабатывается переменное напряжение сигнала прямоугольной формы, изменяющееся с частотой переключения модулятора, к которому добавлена случайное напряжения шумов устройства. Информация о разности мощностей входных сигналов содержится в размахе напряжения сигнала. Эта величина может быть определена не чаще, чем один раз за период модуляции.

3. Традиционный выбор скорости опроса АЦП

Для примера рассмотрим радиометр по рис. 1 (обычная схема, без интегратора). Пусть модулятор имеет частоту переключения 1 кГц, а полоса пропускания последетекторного тракта 30 кГц. Сигнал на выходе УНЧ в этом случае представляет собой импульсное напряжение скважностью два (меандр), частотой 1 кГц и длительностью фронтов примерно 5 мкс. К сигналу будет добавлен шум со временем автокорреляции около 10 мкс и величиной, определяемой шумовыми свойствами устройства.

Для того, чтобы без потерь произвести преобразование такого сигнала в цифровую форму, необходимо использование АЦП с частотой опроса не менее 300 кГц (не менее трех отсчетов за время автокорреляции шума).

4. Работа цифровой части радиометра

Чисто цифровая часть радиометра (после АЦП) выполняет следующие действия:

- накапливает результаты АЦП в течение первого полупериода;
- накапливает результаты АЦП в течение второго полупериода;
- вычитает накопленные результаты для двух полупериодов (цифровой эквивалент размаха напряжения сигнала);

- накапливает результаты вычитания в течение заданного времени интегрирования и выдает данные на выход устройства.

Таким образом цифровая часть радиометра интегрирует сигналы от двух текущих полупериодов, вычитает эти интегралы друг из друга (т. е. выполняет функцию синхронного детектора), а затем интегрирует получающуюся разность в течение заданного времени.

5. Интегратор перед АЦП

В аналоговых радиометрах для накопления данных в течение смежных полупериодов часто применяли так называемый синхронный фильтр, представляющий собой два интегратора, переключаемых с частотой модуляции. Сигналы переключения синхронного фильтра неизбежно проникали в усилительный тракт и могли приводить к его перегрузке. В современных цифровых радиометрах операцию накопления выполняют программным образом в цифровой части прибора. При этом АЦП приходится преобразовывать широкополосный импульсный сигнал с короткими фронтами, что требует достаточного быстродействия устройства.

Накопление данных в течение соседних полупериодов можно сделать аналоговым асинхронным интегратором, не используя синхронный фильтр. Интегратор устанавливается на входе АЦП (на рис. 1 выделен утолщенными линиями). Темп опроса АЦП при этом составляет два раза за период модуляции. В нашем примере радиометра – это 2 кГц (вместо 300 кГц в традиционной схеме).

В случае использования дополнительного интегратора напряжение сигнала на входе АЦП будет треугольной формы. При этом АЦП должен выполнять выборки в вершинах треугольников, то есть в моменты времени, совпадающие с моментами переключения модулятора.

6. Выбор параметров дополнительного интегратора

Дополнительный интегратор не обязательно должен быть отдельным узлом. Возможно использование имеющегося УНЧ после переделки его в интегрирующий усилитель. При этом интегрирующие конденсаторы следует выбирать с минимальной зависимостью емкости от температуры и приложенного напряжения. Усиление УНЧ должно быть достаточным, чтобы уровень шума радиометра на входе АЦП (после интегратора) был минимум втрое больше собственных шумов АЦП.

Время выборки АЦП должно быть достаточно малым, чтобы треугольной формы сигнал на его входе за это время не успевал значительно измениться.

7. Область применения дополнительного интегратора

Область основного применения дополнительного интегратора – это простые, малогабаритные и дешевые устройства. Другая область применения – радиометры СВЧ, измеряющие быстропеременный сигнал.

В компактных простых радиометрах обычно наблюдается высокий уровень помех внутри корпуса устройства. Интегратор является фильтром нижних частот, активно подавляющим импульсные помехи. В этом случае определенные преимущества имеет отдельный RC-интегратор, размещенный непосредственно на входе АЦП.

8. Экспериментальная и расчетная проверка эффективности использования интегратора

Замена идеального интегратора простой RC-цепочкой приводит к тому, что форма сигнала на входе АЦП немного отличается от треугольной и отношение сигнал/шум несколько ухудшается [4].

Для определения оптимальных параметров RC-интегратора были проведены расчеты методом статистического моделирования [5]. При моделировании постоянная времени интегрирования радиометра принималась

равной 1 с. Число реализаций при моделировании было выбрано равным 1000, что эквивалентно реальному времени измерений 1000 с.

Расчеты показали, что оптимальная постоянная времени RC-интегратора составляет 40 % от длительности периода модуляции. Размах пилообразного напряжения на выходе интегратора при этом составляет 55 % от размаха входного напряжения прямоугольной формы. Потери чувствительности радиометра в этом случае не превышают 10 %.

Экспериментальная проверка данного решения была выполнена с помощью образца модуляционного радиометра прямого усиления трехсантиметрового диапазона длин волн. Частота модуляции составляла 1 кГц, частота опроса АЦП в традиционной схеме – 100 кГц, с дополнительным RC-интегратором – 2 кГц. Исходная чувствительность радиометра 0.15 К при времени интегрирования 1 с. Ухудшение чувствительности после установки интегратора и изменения частоты опроса составило не более 15 %. Установка в радиометр интегрирующего усилителя и изменение частоты опроса привело к ухудшению чувствительности не более, чем на 10 % по сравнению с традиционной схемой. Погрешность измерения чувствительности во всех случаях составляла около 5 %.

Заключение

Установка дополнительного интегратора на входе АЦП в тракте модуляционного радиометра позволяет резко снизить требования к быстродействию АЦП. При этом введение интегратора незначительно влияет на чувствительность радиометра. Метод может быть полезен при создании быстродействующих радиометров, а также дешевых изделий из доступных электронных компонентов.

Финансирование: Госконтракт № 1921730301771217000241361/217/2258-3-2019.

Литература

1. Есепкина Е.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. *Радиотелескопы и радиометры*. Москва, Наука. 1973. 416 с.
2. Шарков Е.А. *Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы*. Москва, ИКИ РАН. 2014. 544 с.
3. Троицкий В.С., Густов А.В., Белов И.Ф., Плечков В.М. и др. О возможности использования собственного теплового СВЧ радиоизлучения тела человека для измерения температуры его внутренних органов. *Успехи физических наук*. 1981. Т.134. №5. С.155-158.
4. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп.* Москва, Высшая школа. 2000. 462 с.
5. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр.* Москва, Физматлит. 2001. 320 с.

Для цитирования:

Скулачев Д.П., Косов А.С. Быстродействие АЦП в СВЧ радиометре. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.8>