

РЕГУЛИРУЕМЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА К-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2012 г. В. Ю. Быков, Г. Н. Ильин

*Институт прикладной астрономии РАН
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10*

Поступила в редакцию 09.12.2011 г.

После доработки 12.01.2012 г.

Представлены регулируемые генераторы шумового сигнала К-диапазона частот 18–37 ГГц на основе согласованных нагрузок, температура поглотителя которых поддерживается на заданном уровне с погрешностью не более ± 0.007 К цифровой многоканальной системой термостатирования. Устройства просты в изготовлении, надежны в эксплуатации и позволяют проводить калибровку шумовых параметров с.в.ч.-радиометров, а также исследовать их долговременную стабильность.

ВВЕДЕНИЕ

Для измерения и контроля шумовых параметров с.в.ч.-радиометров применяются генераторы шума (г.ш.) с известной спектральной плотностью мощности выходного сигнала, формирующие калибровочный сигнал, по которому определяют масштаб измеряемых сигналов. Г.ш. выполняются на основе полупроводниковых устройств или согласованных нагрузок с известной температурой поглотителя, которую можно варьировать в пределах от криогенных температур до сотен градусов и, следовательно, получать величину эффективной шумовой температуры калибровочного сигнала (“ступеньки”) в пределах от единиц до сотен градусов [1, 2].

С точки зрения долговременной стабильности выходного сигнала г.ш. на основе согласованных нагрузок являются более предпочтительными. Мощность выходного сигнала такого г.ш. в рассматриваемом диапазоне частот определяется физической температурой поглотителя согласованных нагрузок, сравнительно легко поддающейся измерению с помощью современных средств. Таким образом, контроль стабильности уровня сигнала г.ш. на длительных интервалах времени сводится к температурным измерениям. Полупроводниковые г.ш. требуют, помимо температурного контроля, стабилизации электрических параметров устройств – стабилизаторов тока г.ш., модуляторов и т.д. Обеспечение стабильной работы таких устройств на практике – достаточно сложная задача [1–3].

В данной работе представлен вариант конструкции генераторов шума на основе согласованных нагрузок, успешно используемых авторами для оценки параметров с.в.ч.-радиометров К- и К_а-диапазонов длин волн [4]. С помощью разработанных устройств можно проводить измерения, не требующие быстрой коммутации калибровоч-

ного сигнала (шумовых параметров радиометра в пределах от 50–100 К до 300 К), анализировать долговременную стабильность коэффициента передачи радиометра и его зависимость от температуры окружающей среды, оценить нелинейность характеристики квадратичного детектора и др.

КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА ШУМА

Генератор шума представляет собой стандартную волноводную согласованную нагрузку, поглотитель которой выполнен из ферроэпоксида. В описываемой конструкции г.ш. использованы нагрузки от ферритовых волноводных вентилях ФВВ1-38 и ФВВ1-35В соответственно К- и К_а-диапазона длин волн. Нагрузки отличаются хорошим согласованием и имеют в зависимости от образца (было использовано по 4 шт. каждого диапазона) к.с.в.н. = 1.1–1.12 в рабочем диапазоне длин волн волновода. Длина отрезка волновода нагрузки составляет 20 и 15 мм соответственно.

Основным требованием, предъявляемым к конструкции г.ш., является максимальное соответствие измеряемой датчиком температуры корпуса г.ш. ($T_{гш}$) температуре поглотителя согласованных нагрузок.

Выполнение указанного требования обеспечивается, в частности, формой и размерами поглотителя нагрузки. Поглотитель нагрузок выполнен в виде тонких (менее половины высоты волновода) экспоненциальных клиньев, частично заполняющих волновод, что облегчает его равномерный прогрев практически до температуры корпуса.

Кроме того, для обеспечения более равномерного прогрева поглотителя корпус нагрузки (отрезок волновода) помещен между двумя медными накладками, примыкающими к фланцу волновода, размером 29 × 29 × 7 мм. Схема г.ш. приведена

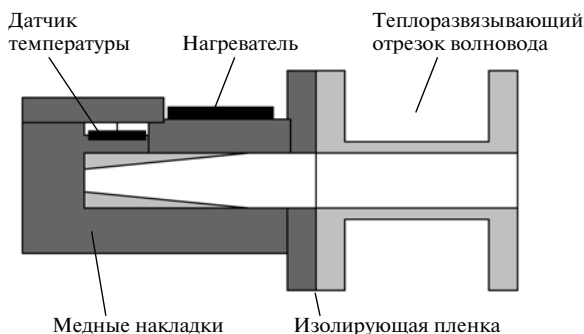


Рис. 1. Конструкция генератора шума.

на рис. 1. На поверхности медной накладки установлены транзистор нагревателя в корпусе ТО-220 и датчик температуры, представляющий собой микросхему измерителя температуры ADT7301 фирмы Analog Devices, установленную на поликорковую подложку размером $0.5 \times 6 \times 8$ мм. Микросхема размещена в корпусе SOT-23 размером $3 \times 3 \times 1.3$ м. Транзистор нагревателя установлен на слюдяную прокладку для обеспечения гальванической развязки силовой и измерительной частей терморегулятора.

Керамическая подложка датчика температуры запаивается на медное основание размером $0.5 \times 12 \times 12$ мм, имеющее крепежное отверстие для фиксации на медной накладке.

Датчик температуры закрыт сверху медной пластиной, изолирующей его от окружающей среды. На выходе волноводной нагрузки установлена теплоразвязывающая волноводная вставка, выполненная из нержавеющей стали и покрытая изнутри серебром. Волноводные вставки имеют низкие (≈ -0.05 дБ) потери сигнала. Между фланцами нагрузки и теплоразвязывающей вставки (фланцы

волноводные выполнены по ГОСТ 13337-89) закреплена тонкая ($\sim 5-10$ мкм) полимерная пленка, препятствующая конвективному охлаждению поглотителя согласованной нагрузки. Как показали измерения (использовались измерители к.с.в.н. и ослаблений P2-66 и P2-65), потерями сигнала в пленке можно пренебречь. Установка пленки на вход волноводной согласованной нагрузки приводит к незначительному увеличению к.с.в.н. нагрузки. В собранном виде к.с.в.н. генератора шума в зависимости от использованного образца согласованной нагрузки не выходил за пределы 1.15 в полосе частот волновода.

Внешняя теплоизоляция корпуса г.ш. выполнена из пенополистирола. Конструкции г.ш. К- и К_а-диапазонов однотипны и различаются только сечением волновода – соответственно 11×5.5 и 7.2×3.4 мм².

Терморегулятор

Устройство стабилизации заданной температуры корпуса г.ш. выполнено на микроконтроллере ATmega 8535, в программу которого заложен пропорционально-интегрирующий алгоритм регулирования температуры [5].

Электрическая схема одного канала (Ch1) измерительной и исполнительной части регулятора температуры приведена на рис. 2. Микросхема ADT7301 (M_2) обеспечивает измерение температуры в диапазоне от -40 до $+150^\circ\text{C}$ с разрешением 0.03°C (13 бит) и абсолютной погрешностью определения температуры $\pm 1^\circ\text{C}$. Питание микросхемы осуществляется от источника опорного напряжения M_1 .

Данные об измеренной датчиком температуре по последовательному интерфейсу SPI поступают в микроконтроллер. Плата терморегулятора свя-

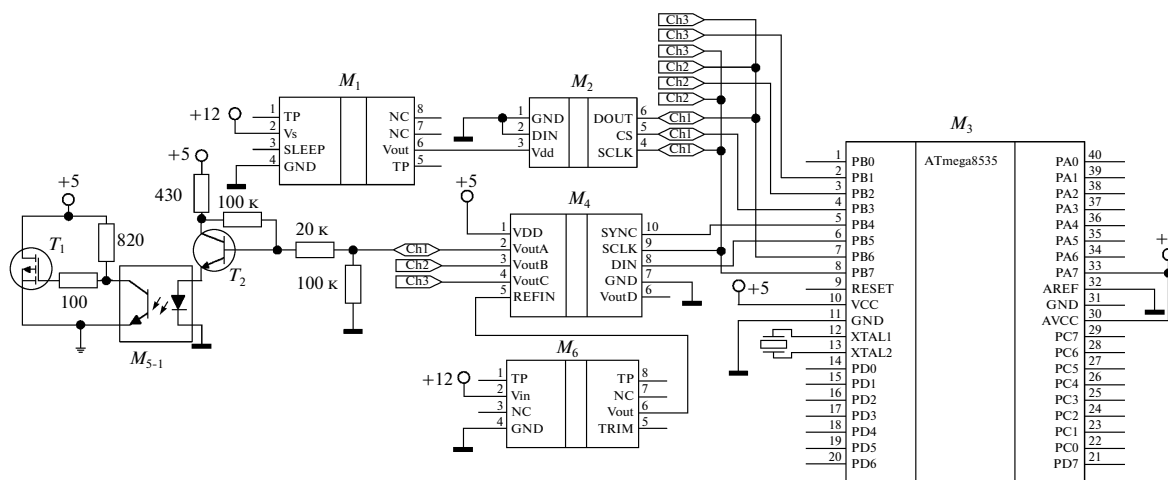


Рис. 2. Схема терморегулятора. M_1 – REF195, M_2 – ADT7301, M_3 – ATmega 8535, M_4 – AD5324, M_5 – PS2501-4, M_6 – ADR431; T_1 – IRF9Z34N, T_2 – KT3153A9.

зана по RS-485 с компьютером, с помощью которого отображаются данные о температуре нагрузки, а также проводится оперативная настройка алгоритма регулирования температуры г.ш. Контроллер терморегулятора обслуживает до трех (Ch1—Ch3) независимых каналов измерения и регулирования температуры.

В системе терморегулирования г.ш. в качестве нагревателя используется p -канальный MOSFET-транзистор IRF9Z34N фирмы International Rectifier (T_1), у которого напряжение “исток—сток” составляет -5 В, а изменение напряжения “затвор—исток” позволяет регулировать ток стока и соответственно мощность, рассеиваемую транзистором. Управляющее напряжение формируется 12-разрядным цифроаналоговым преобразователем (ц.а.п.) — микросхемой AD5324 фирмы Analog Devices (M_4).

Источником опорного напряжения $+2.5$ В для ц.а.п. служит микросхема ADR431 (M_6). Передача управляющего напряжения от ц.а.п. к нагревателю и гальваническая развязка измерительной и силовой частей схемы осуществляются с помощью транзистора T_2 и оптопары “светодиод—фототранзистор” (микросхема PS2501-4 фирмы NEC (M_5)).

Диапазон управляющего напряжения, формируемого микросхемой ц.а.п., лежит в пределах 1750 – 2250 мВ, что полностью отвечает требованиям к дискретности регулировочной характеристики и позволяет плавно регулировать ток через транзистор T_1 в пределах от 0 до 1.2 А.

Выделяемая нагревателем мощность (≈ 6 Вт) обеспечивает скорость разогрева корпуса г.ш. $\approx 0.1^\circ\text{C}/\text{с}$ и нагрев его корпуса до 100°C .

Коэффициенты пропорционально-интегрального алгоритма управления системой терморегулирования изменяются с помощью разработанного программного обеспечения, и их числовые величины определяются в процессе настройки алгоритма исходя из заданных требований к погрешности регулирования температуры г.ш.

Выходной сигнал генератора шума

Эквивалентная шумовая температура выходного сигнала г.ш. ($T_{\text{вых гш}}$) зависит от модуля коэффициента отражения согласованной нагрузки (для выбранных нагрузок $\Gamma \approx 0.05$) и коэффициента передачи ($\varepsilon \approx 0.98$) волновода тепловой развязки и может быть оценена следующим образом:

$$T_{\text{вых гш}} = T_{\text{гш}}(1 - \Gamma^2)\varepsilon + T_{\text{в}}(1 + \varepsilon), \quad (1)$$

где $T_{\text{гш}}$ — физическая температура поглотителя согласованной нагрузки г.ш., измеряемая датчиком температуры; $T_{\text{в}}$ — средняя температура отрезка волновода тепловой развязки:

$$T_{\text{в}} \approx 0.6(T_{\text{гш}} + T_0), \quad (2)$$

где T_0 — температура окружающей среды.

Для более точного (по сравнению с данными производителя) определения текущего значения $T_{\text{вых гш}}$ датчики температуры целесообразно откалибровать, например, в региональном центре Росстандарта.

Стабильность выходного сигнала г.ш. была проверена на многосуточном интервале времени. Измерения проводились путем регистрации показаний температурного датчика системы терморегулирования. Регистрация отсчетов значений температуры проводилась с интервалом 5 с. Результаты испытания системы термостатирования показали, что среднеквадратическая погрешность поддержания температуры корпуса г.ш. относительно заданной точки составляет $\sigma_T \approx 0.007^\circ\text{C}$ при изменении наружной температуры в пределах 3 – 5°C на интервале суток и более.

Полученный результат позволяет в ряде случаев использовать г.ш. в виде внутренней эталонной нагрузки радиометра и корректировать по ней вариации коэффициента усиления радиометра, если величина σ_T близка к величине теоретической чувствительности конкретного радиометра, как, например, в [1].

Величина калибровочной ступеньки г.ш. рассчитывалась согласно (1) и (2). Основная погрешность определения величины калибровочной ступеньки складывается из ошибок измерения температуры в начальной и конечной точках разогрева г.ш. Поскольку датчики температуры производителем не калибруются, а указывается лишь максимальный разброс показаний температуры в диапазоне от -40 до $+150^\circ\text{C}$, была выполнена проверка температурных датчиков. Проверка была выполнена компанией “Тест-Петербург” по четырем отсчетам: 20 , 40 , 60 и 80°C . По результатам измерений построена калибровочная кривая датчиков температуры, привязанная к показаниям эталонного термометра с погрешностью не более 0.01°C .

Оценка температуры поглотителя проводилась косвенным способом — измерением температуры в разных точках корпуса г.ш. При этом использовались два поверенных датчика, один из которых включался в систему регулирования температуры на заданном уровне, а второй использовался для измерения температуры верхней или нижней грани медных накладок корпуса. Измерения проводились при поддержании температуры корпуса г.ш. на уровне 40 и 65°C . Измерения показали, что температура нижней грани корпуса отличалась в меньшую сторону от температуры нагревателя (верхней грани) на -0.2 и -0.5°C соответственно. Допуская линейное распределение температуры между гранями, можно предположить, что отклонение температуры поглотителя согласованной нагрузки будет отличаться вдвое от приведенных значений. С учетом сказанного рассчитывались эффективная температура выходного сигнала г.ш.

и соответственно величина калибровочной ступеньки, используемой для оценки параметров радиометра.

Оценка качества разработанных г.ш. проводилась сравнением результатов измерений шумовой температуры радиометров К- и К_а-диапазонов частот с помощью разработанных г.ш. и криогенных волноводных нагрузок “азотного уровня”, входивших в комплект измерителей коэффициента шума с.в.ч.-устройств типа Х5. Центральная частота радиометров составляла 20.75 и 31.05 ГГц, шумовая температура – 113 и 208 К соответственно. Полоса частот радиометров 500 МГц. Для определения шумовой температуры радиометра корпус г.ш. последовательно нагревался до заданных значений температуры: 30, 40, 65 и 80°С. Далее формировался ряд калибровочных ступенек различной величины и вычислялись масштабные коэффициенты. По полученным данным оценивалась шумовая температура, а также линейность амплитудной характеристики радиометра, от которой, как известно, существенно зависит диапазон температур, измеряемых данным методом.

С помощью “азотной” нагрузки аналогично определялись масштабный коэффициент и значение шумовой температуры радиометра. При расчете величины калибровочной ступеньки учитывались параметры нагрузки в соответствии с (1), (2). Различия полученных в результате измерений шумовых параметров радиометров не превосходило 1–2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простота конструкции г.ш. в сочетании с недорогой эффективной системой регулирования и мониторинга температуры существенно упростила и расширила возможности контроля параметров радиометрических устройств, позволив обходиться без использования дорогих и громоздких измерительных приборов, предназначенных для исследования шумовых характеристик с.в.ч.-устройств.

Разработанные г.ш. с успехом применяются авторами в лабораторных и полевых условиях для исследования характеристик и проведения калибровок радиометров К- и К_а-диапазонов длин волн, когда использование серийных приборов или криогенных устройств затруднено или практически невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Ипатова И.А. и др.* // Труды ИПА РАН. СПб, 1997. Вып. 2. С. 232.
2. *Nach J.P.* // IEEE Trans. Microwave Theory. 1968. V. 16. P. 629.
3. *Ипатов А.В., Иванов Д.В., Мардышкин В.В.* // Труды ИПА РАН. СПб, 2005. Вып. 12. С. 113.
4. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Кайдановский М.Н.* // Труды ИПА РАН. СПб, 2010. Вып. 21. С. 255.
5. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н.* // Труды ИПА РАН. СПб, 2010. Вып. 21. С. 288.