

Модель оценки погрешности радиометрических измерений в СВЧ-гиперспектральном режиме

А.В. Убайчин

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, пр-т Ленина 30, E-mail: ubaychin@tpu.ru*

В работе приводится математическая модель, позволяющая на этапе проектирования осуществить оценку погрешности приемного канала СВЧ-гиперспектрометра, выполненного на основе нулевого СВЧ-радиометра. Показан вклад потерь во входных пассивных СВЧ-узлах на результирующую погрешность измерений. Рассмотрено изменение величины погрешности измерений при изменении шумовой температуры антенны. Описан эффект термодинамического равновесия согласованной нагрузки с ее фидером при равной физической температуре. Проведен анализ влияния потерь в антенном фидере на результаты измерений. Приведены практические рекомендации по уменьшению погрешности измерений приемного канала СВЧ-гиперспектрометра.

The paper presents a mathematical model that allows to carry out an estimate of the error of the receiving channel of the microwave hyperspectrometer, based on a zero-type microwave radiometer during designing process. The contribution of losses in the input passive microwave modules to the resulting measurement error is shown. The change in the measurement error when changing the noise antenna noise temperature measurement is considered. The effect of thermodynamic equilibrium of a matched load with own feeder at an equal physical temperature is described. The analysis of the effect of losses in the antenna feeder on the measurement results. Practical recommendations for reducing the measurement errors of the receiving channel of the microwave hyperspectrometer are given.

Одним из последних трендов развития средств дистанционного зондирования природных сред в СВЧ и КВЧ диапазонах является использование гиперспектральных методов исследований. Использование гиперспектральных методов позволяет повысить информативность зондирования и решать новые исследовательские задачи. В СВЧ диапазоне гиперспектральные исследования осуществляются при помощи нескольких СВЧ-радиометров. СВЧ-радиометры объединены в приемные каналы. Рабочие частоты приемных каналов разнесены по интересующим участкам спектра. Такой подход использования принципа частотного мультиплексирования позволяет перекрыть диапазоны длин волн от дециметров до миллиметров и выше.

Погрешность СВЧ-гиперспектрометра определяет уровень достоверности проводимых исследований и зависит от погрешности измерений примененных СВЧ-радиометров. В работе [1] показана сравнительная погрешность СВЧ-радиометров различных типов при одинаковых параметрах приемника. В работах [2,3] показано, что применение СВЧ-радиометров на основе метода нулевых измерений позволяет понизить погрешность измерений по сравнению с классическим СВЧ-радиометрами.

Ключевым преимуществом использования нулевых СВЧ-радиометров является повышение устойчивости результатов измерений к изменяющимся факторам внешней среды без термостатирования всего радиометрического приемника. Теоретически, нулевой метод позволяет полностью устранить влияние изменяющегося коэффициента усиления и дрейфа собственных шумов радиометрического приемника. На практике [4], использование модификации нулевого метода позволяет минимизировать влияние изменений коэффициента передачи радиометрического приемника до величин, составляющих сотни и тысячи миллионных долей флуктуационной чувствительности. Очевидно, что такой уровень минимизации влияния является достаточным и избыточным. Особенностью проведения измерений в случае использования нулевых

СВЧ-радиометров, является то, что результаты измерений зависят от стабильности опорных генераторов шума и изменяющихся шумов, обусловленных потерями в пассивных узлах входной высокочастотной части. Часть последней группы факторов, ухудшающих погрешность измерений является условно контролируемой (шумы, обусловленные потерями узлов, находящихся внутри прибора) вторая часть является не контролируемой и обусловлена шумами пассивных устройств, находящихся вне гиперспектрометра. Для полного понимания величины неопределенности измерений, крайне важно на этапе проектирования СВЧ-гиперспектрометра обладать инструментом, позволяющим оценить неопределенность и провести анализ путей ее уменьшения в случае превышения заданного уровня.

В представленной работе показана математическая модель, позволяющая на этапе проектирования оценить погрешность радиометрических измерений в СВЧ-гиперспектральном режиме при использовании в качестве приемных каналов СВЧ-радиометров на основе нулевого метода измерений.

На практике, изменения внешних условий эксплуатации, в первую очередь температуры, приводит к появлению погрешности измерений, обусловленной не идеальностью узлов входных высокочастотных элементов. На рис.1 показана структурная схема входной СВЧ-части приемного канала СВЧ-гиперспектрометра, выполненного на основе нулевого СВЧ-радиометра с учетом не идеальностей узлов.

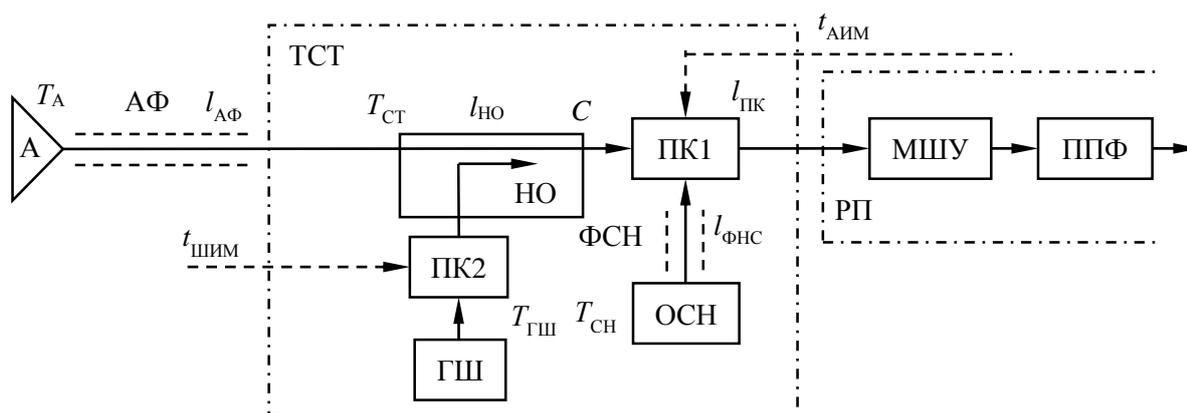


Рис. 1 – Структурная схема входной СВЧ-части приемного канала СВЧ-гиперспектрометра с учетом потерь

Структурная схема входной СВЧ-части состоит из антенны А, с шумовой температурой T_A , антенного фидера АФ с потерями $l_{АФ}$, направленного ответвителя НО с потерями $l_{НО}$ и коэффициентом связи C , первого высокочастотного переключателя ПК1 с потерями $l_{ПК}$, опорной согласованной нагрузки ОСН с шумовой температурой $T_{СН}$, фидера согласованной нагрузки ФСН с потерями $l_{ФСН}$, второго высокочастотного переключателя ПК2, активного генератора шума ГШ с шумовой температурой $T_{ГШ}$, термостата ТСТ с температурой $T_{СТ}$, фрагмента радиометрического приемника РП, состоящего из малошумящего усилителя МШУ, полосового фильтра ППФ, широкополосного усилителя ШПУ.

На рис. 1 не изображены параметры радиометрического приемника (коэффициент усиления, собственные шумы и т.д.), так как влияние их изменений устраняется за счет применения метода нулевых измерений. Для контроля влияния вклада потерь входной части все пассивные элементы размещены в термостате, поддерживающем постоянную физическую температуру с заданной погрешностью. Влияние вклада потерь в антенном

фидере не учтено при рассмотрении, так как не поддается контролю при помощи гиперспектрометра.

Для оценки погрешности измерений приемного канала СВЧ-гиперспектрометра, выполненного на основе нулевого СВЧ-радиометра, разработана математическая модель, учитывающая изменения основных параметров входной высокочастотной части. Математическая модель, описывающая погрешность СВЧ-гиперспектрометра, выполненного на основе нулевого СВЧ-радиометра представлена выражением:

$$dT_A = dT_{CH} - \left\langle \frac{C \cdot dT_{ГШ} \cdot t_{ШИМ}}{t_{АИМ} \cdot (1 - l_{НО})} \right\rangle, \quad (1)$$

где dT_{CH} – погрешность поддержания температуры пассивного опорного генератора шума (согласованной нагрузки), $t_{ШИМ}/t_{АИМ}$ – отношение управляющих сигналов широтной и амплитудных модуляций, $l_{НО}$ – величина потерь в направленном ответвителе, $dT_{ГШ}$ – погрешность поддержания шумовой температуры активного генератора шума.

Согласно реализации модификации метода нулевых измерений, шумовая температура антенны линейно связана с длительностью сигнала широтно-импульсной модуляции [3]. Следовательно, величина dT_A в (1) является функцией, в том числе, измеряемой шумовой температуры антенны, которая задает отношение $t_{ШИМ}/t_{АИМ}$:

$$\frac{t_{ШИМ}}{t_{АИМ}} = \frac{T_{CH} - T_A}{T_{ГШ}}, \quad (2)$$

где T_A – шумовая температура антенны, T_{CH} – шумовая температура согласованной нагрузки, $T_{ГШ}$ – шумовая температура генератора шума. Выражение (2) позволяет рассчитать значение отношения $t_{ШИМ}/t_{АИМ}$ при заданной шумовой температуре антенны.

В выражение (1) не входят шумы, обусловленные вносимым ослаблением в фидере опорной согласованной нагрузки. Этот факт обусловлен термодинамическим равновесием шумов потерь фидера и опорной согласованной нагрузки, реализующимся при их одинаковой физической температуре.

Шумы, обусловленные потерями в высокочастотном переключателе, так же не входят в выражение (1). Этот эффект обусловлен реализацией дифференциального метода измерений [1] и условием равенства потерь между обоими направлениями высокочастотного переключателя. Если последнее условие не выполняется, то необходим учет вносимых шумов потерями в высокочастотном переключателе.

Для упрощения расчетов и в виду отсутствия возможности контроля в выражение (1) не входят шумы, обусловленные потерями в антенном фидере. Практический анализ показывает, что физическая температура антенного фидера в процессе эксплуатации СВЧ-гиперспектрометра в жестких климатических условиях изменяется на десятки и сотни градусов. При таких изменениях температур минимальные потери в антенном фидере приводят к изменениям измеряемой шумовой температуры антенны. Нестабильность измерений, обусловленная потерями в антенном фидере, в разы превышает величину погрешности, обусловленной нестабильностью сигнала генератора шума и погрешности поддержания температуры термостата.

Для оценки величины погрешности измерений проведено моделирование работы СВЧ-гиперспектрометра. Результаты моделирования получены при заданных типовых параметрах входной высокочастотной части СВЧ-гиперспектрометра: погрешность поддержания температуры термостата ± 1 К, величина динамического диапазона

измеряемых шумовых температур антенны 0...300 К, величина собственных потерь в направленном ответвителе 0,01...0,2, величина погрешности поддержания шумовой температуры активного генератора шума $\pm 1,5$ К. Результаты моделирования ошибки измерений приемного канала СВЧ-гиперспектрометра с учетом различных параметров представлены на рис.2.

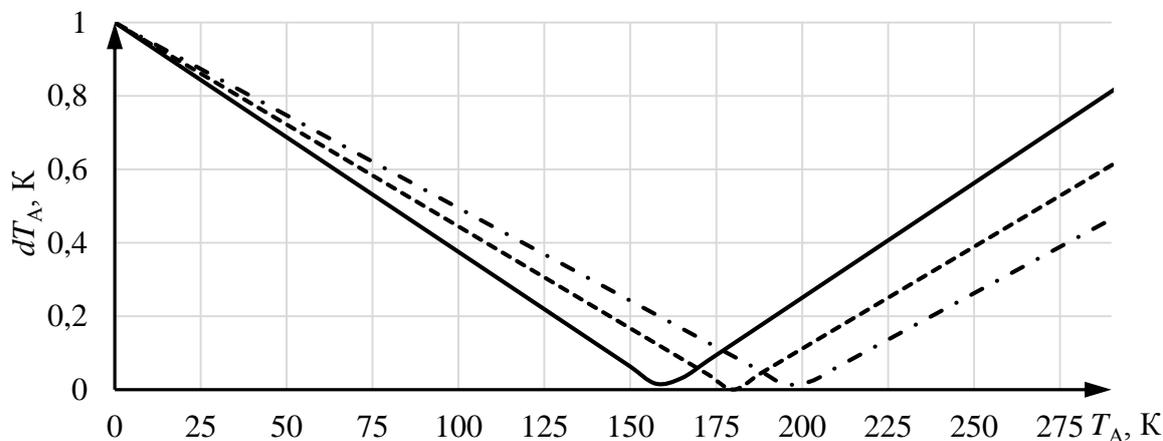


Рис. 2 – Модуль погрешности приемного канала СВЧ-гиперспектрометра

На рис. 2 сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют величинам собственных потерь аттенуатора, равным 0,01, 0,1 и 0,2 соответственно. Анализ результатов моделирования, показанных на рис. 2 позволяет сделать вывод о следующем. У нижней границы динамического диапазона величина погрешности измерений определяется стабильностью поддержания температуры пассивного генератора шума и равна стабильности поддержания температуры термостата. У верхней границы динамического диапазона величина погрешности измерений соответствует разнице модулей величин погрешностей пассивного и активного генераторов шума.

Значения величин погрешностей пассивного и активного генераторов шума определяют величину шумовой температуры антенны, при которой результаты измерений обладают минимальной ошибкой. Изменение величины потерь в направленном ответвителе не значительно влияет на результирующую погрешность измерений. Наибольшим вкладом в результирующую погрешность измерений обладает погрешность поддержания температуры пассивного генератора шума. Наиболее приемлемым вариантом ее устранения (снижения влияния) является применение активных полупроводниковых низкотемпературных генераторов шума.

В части снижения влияния вклада потерь в антенном фидере, наиболее приемлемым является их учет в измерениях путем контроля температуры антенного фидера при известной величине его ослабления. Этот подход усложняет гиперспектральную систему и не учитывает изменение величины потерь в антенном фидере с течением времени.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о актуальности вопроса разработки нового способа реализации учета влияния потерь в антенном фидере на результаты измерений и применения активных низкотемпературных генераторов шума в качестве реперов передаточной характеристики СВЧ-гиперспектрометра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00045).

Литература

1. Убайчин А.В., Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модификации метода нулевых измерений. Томск: Изд. ТУСУР, 2014. 154 с.
2. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация // . – М.: Сов. радио, 1964. – 326 с.
3. Убайчин А.В. Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9-3. С. 130-133.
4. Camps A., Tarongi J.M. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times // Remote Sensing. 2010. Vol. 2. pp. 1826–1843.