

Многоприемниковый СВЧ-гиперспектрометр на основе метода нулевых измерений

А.В. Убайчин, Г.Г. Жук, Т. Абдирасул уулу, А. В. Щегляков, Д.С. Кречетов.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: anton.v.ubaychin@tusur.ru

Приведена разработанная структурная схема макета многоприемникового нулевого СВЧ-гиперспектрометра, позволяющего реализовать повышенное частотное разрешение при заданном уровне чувствительности и длительности одного измерения. Показаны подробные структурные схемы основных блоков, входящих в состав макета СВЧ-гиперспектрометра. Описаны непосредственные технические реализации входной радиочастотной части, блока селекции и переноса частоты и блока радиометрических приемников.

Ключевые слова: гиперспектрометр, метод нулевых измерений, пассивные дистанционные исследования

Multi-receiver microwave hyperspectrometer based on the zero-measurement method

A.V. Ubajchin, G.G. Zhuk, T. Abdirasul uulu, A.V.Chsheglyakov, D.S.Krechetov.

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

The developed block diagram of a multi-receiver zero microwave hyperspectrometer is presented, which makes it possible to realize an increased frequency resolution at a given level of sensitivity and duration of one measurement. Detailed block diagrams of the main blocks of the microwave hyperspectrometer are shown. Technical implementations of the front - end, the frequency selection and transfer unit and the radiometric receiver unit are described.

Keywords: hyperspectrometer, zero measurement method, passive remote sensing

Введение

Широкое распространение получили пассивные методы дистанционных исследований параметров атмосферы. Исследование интенсивности поглощения линий водяного пара позволяет решать широкий спектр научно-прикладных задач [1].

Неуклонная потребность в увеличении информативности результатов исследований привела к необходимости создания СВЧ-гиперспектрометров для захвата широких участков спектра радиоволн и получения достоверной информации о состоянии атмосферы [2,3]. Наряду с расширением спектра возникает другая задача – повышения числа спектральных линий в исследуемом диапазоне [4]. В этом направлении проведен ряд исследований [5,6], показавших возможность увеличения спектрального разрешения при сохранении заданной чувствительности и длительности измерений. Предложенный подход основан на использовании нулевого метода измерений и принципа многоприемниковости при реализации гиперспектрометров СВЧ- и КВЧ- диапазонов.

В представленной работе описывается способ реализации макета СВЧ-гиперспектрометра для исследования линии поглощения водяного пара вблизи частоты 22 ГГц.

Структурная схема СВЧ-гиперспектрометра

Как показано в [5], разрешающая способность по частоте в многоприемниковых нулевых СВЧ-гиперспектрометрах пропорциональна числу приемников, входящих в его состав. Число приемников задается при проектировании и зависит от требуемого частотного разрешения, длительности измерения и чувствительности. Однако, с технической точки зрения, число приемников ограничено вариантами конфигурации входного СВЧ-переключателя. В настоящее время промышленностью достаточно хорошо освоены СВЧ-переключатели на два и четыре направлений. Более сложные конфигурации твердотельных СВЧ-переключателей являются либо комбинацией менее сложных конфигураций, либо выполнены на основе заказных интегральных схем. С практической точки зрения реализация макета СВЧ-гиперспектрометра наиболее удобна в конфигурации с четырьмя приемниками.

На рис.1 представлена структурная схема макета СВЧ-гиперспектрометра, разработанная в соответствии со способом реализации, изложенном в [5].



Рис. 1 Структурная схема разработанного макета СВЧ-гиперспектрометра

Представленная на рис.1 структурная схема состоит из антенны А, входной высокочастотной части ВЧ, блока селекции и переноса частоты СПЧ, блока радиометрических приемников БРП и системы цифровой обработки сигналов ЦСП.

В качестве приемной антенны использована стандартная волноводная антенна РЕ9852-20 диапазона 18-26,5 ГГц с номинальным коэффициентом усиления 20 дБ.

Входная высокочастотная часть выполнена в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2.

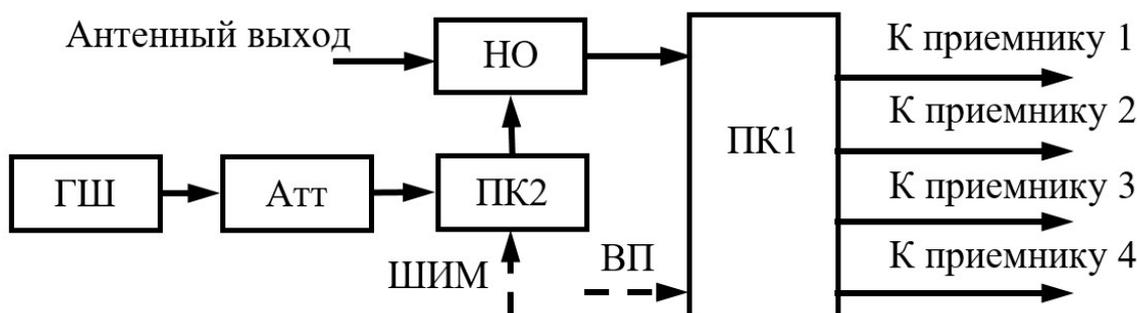


Рис. 2 Структурная схема входной высокочастотной части макета СВЧ-гиперспектрометра

Входная высокочастотная часть состоит из направленного ответвителя НО, первого высокочастотного переключателя поглощающего типа с конфигурацией один вход на четыре направления (SP4T) ПК1, второго высокочастотного переключателя, поглощающего с конфигурацией один вход одно направление (SPST) ПК2, аттенюатора Атт, генератора шума ГШ.

Назначение входной высокочастотной части заключается в поочередном переключении антенны на каждый приемник. Переключение осуществляется под управлением сигнала выбора приемника ВП. Через направленный ответвитель на вход первого высокочастотного переключателя поступает сигнал генератора шума. Мощность сигнала генератора шума регулируется аттенюатором. Длительность сигнала генератора шума регулируется вторым высокочастотным переключателем. Управление им осуществляется при помощи сигнала широтно-импульсной модуляции ШИМ.

Конфигурация второго высокочастотного переключателя позволяет переключать вход каждого из приемников либо на антенну, либо на внутреннюю согласованную нагрузку. Это позволяет реализовать модуляционный режим измерений и в соответствии с методом дифференциальных измерений устранить влияние медленно меняющейся шумовой температуры приемника на результаты измерений [6].

Как показано в [7], модуляционный метод и его технические реализации в задачах пассивных дистанционных исследований не позволяют устранить влияние изменений коэффициента передачи измерительного тракта. Для устранения этих эффектов используется частный случай метода дифференциальных измерений – нулевой метод. Использование нулевого метода измерений подразумевает построение передаточной характеристики по двум реперным точкам, задаваемым опорными генераторами шума. В представленной технической реализации роль первого пассивного генератора принимает согласованная нагрузка с шумовой температурой близкой к ее физической. Второй опорный генератор реализован на лавинном диоде. Уровень генерируемой им мощности определяет положение второй опорной точки передаточной характеристики и в представленном способе технической реализации величину динамического диапазона измеряемых шумовых температур антенны. Стабильность опорных генераторов шума определяет в основном погрешность измерений всей системы. Алгоритм работы входной высокочастотной части макета СВЧ-гиперспектрометра подробно описан в [5, 6].

Направленный ответвитель реализован на основе микрополосковых линий передачи с торцевой связью. Расчетный коэффициент передачи составляет минус 25 дБ при направленности 23 дБ. Первый высокочастотный переключатель реализован на микросхеме ADRF5045. Второй высокочастотный переключатель реализован на микросхеме HMC547. Для управления мощностью генератора шума, реализованного на лавинно-пролетном диоде NC403CH3, использован цифровой аттенуатор ADRF5730.

Для реализации переноса частоты вниз использован блок селекции и преобразования частоты. Блок обеспечивает последовательные операции усиления, выделения рабочей полосы частот, преобразования частоты вниз и фазового подавления зеркального канала. Такая реализация необходима для увеличения частотной избирательности и возможности сравнительно простой перестройки частоты. Структурная схема блока селекции и преобразования частоты представлена на рис. 3

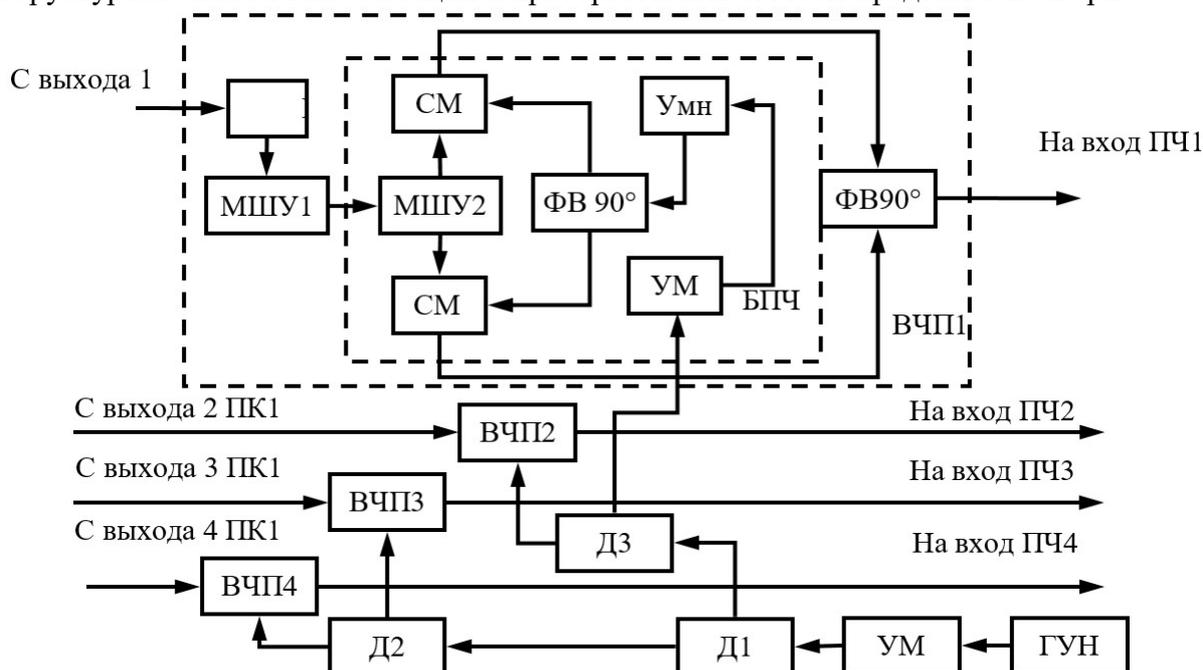


Рис. 3 – Структурная схема блока селекции и переноса частоты

Блок селекции и переноса частоты состоит из четырех идентичных по структуре высокочастотных частей приемника ВЧП1, ... ВЧП4, трех высокочастотных делителей Д1, Д2, Д3, усилителя мощности УМ и генератора, управляемого напряжением ГУН. Каждый высокочастотный приемник состоит из вентиля В, первого малошумящего усилителя МШУ1, блока переноса частоты БПЧ и направленного моста ФВ90°. Блок переноса частоты состоит из второго малошумящего усилителя МШУ2, двух балансных смесителей СМ, направленного моста, умножителя Умн и усилителя мощности сигнала гетеродина.

Блок переноса частоты осуществляет фазовое подавление зеркального канала за счет использования направленных мостов, обеспечивающих суммарный фазовый сдвиг 180° для компонент верхней и нижней промежуточной полосы. Это обуславливает дополнительную возможность сканирования по частоте для измерения интенсивности поглощения в более широком спектре частот. Использование умножителя позволяет снизить требования к диапазону частот генератора, управляемого напряжением (гетеродина).

В качестве вентиля использован ферритовый прибор на краевой волне FPN2-302, первый малошумящий усилитель реализован на микросхеме НМС751, смеситель с фазовым подавлением выполнен на микросхеме НМС977, направленный мост выполнен на основе ЛТСС трансформатора. Гетеродин реализован на микросхеме НМС6380, усилитель сигнала гетеродина реализован с применением микросхемы НМС451, делители выполнены на ЕР2К.

Представленная конфигурация технической реализации блока селекции и переноса частоты обеспечивает рабочую полосу частот от 20 ГГц до 28 ГГц. Диапазон промежуточной частоты составляет 0...3,5 ГГц. Усиление в рабочем диапазоне частот составляет не менее 34 дБ. Использование генератора, управляемого напряжением, позволяет осуществлять перестройку рабочего диапазона частот. Исходя из технического описания смесителя выбрана конфигурация с нижней настройкой гетеродина.

Как показано выше, усиления блока переноса частоты недостаточно для формирования требуемого уровня сигнала на входе АЦЦ. Также необходима повышенная избирательность в рабочем диапазоне частот, в связи с чем требуется применение дополнительных усилителей в канале промежуточной частоты. Канал промежуточной частоты представлен блоком радиометрических приемников. На рис. 4 представлена структурная схема блока радиометрических приемников.

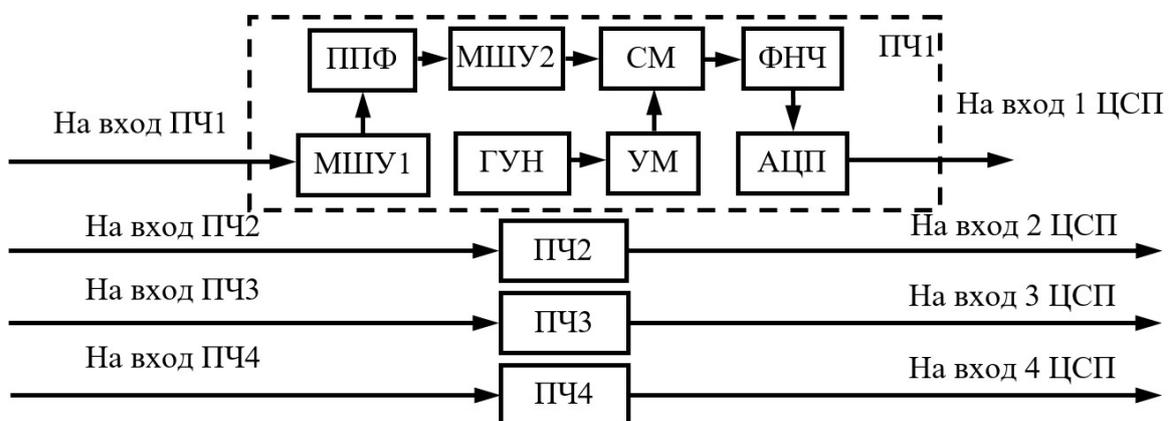


Рис. 4 Структурная схема реализации блока радиометрических приемников

Блок радиометрических приемников состоит из четырех идентичных по структуре каналов промежуточной частоты ПЧ1, ..., ПЧ4. Каждый канал состоит из последовательно соединенных первого малошумящего усилителя МШУ1, полосового фильтра ППФ, второго малошумящего усилителя МШУ2, балансного смесителя СМ, фильтра нижних частот ФВЧ и аналого-цифрового преобразователя АЦП. К гетеродинному входу смесителя через усилитель мощности подключен генератор, управляемый напряжением.

Канал промежуточной частоты обеспечивает усиление сигнала промежуточной частоты соответствующего блока высокочастотного приемника, частотную селекцию, преобразование частоты, частотное сканирование и оцифровку результатов измерений.

Для формирования рабочей полосы частот (подавления зеркального канала) использован полосно-пропускающий фильтр. По сравнению с типовыми решениями, использующими фазовый метод, полосно-пропускающий фильтр обеспечивает повышенное на 10...30 дБ подавление зеркального канала. Использование фильтра низких частот необходимо для подавления сигнала гетеродина. При этом для подавления сигнала гетеродина используется фильтр нижних частот с частотой среза, превосходящей рабочую полосу на 3...7 октав. В рабочей полосе этого фильтра происходит дополнительная фильтрация вторым фильтром нижних частот, полоса которого соответствует требуемой рабочей полосе.

Для оптимизации электромагнитной совместимости представленная на рис. 4 структурная схема может быть модифицирована путем ввода дополнительного полосно-пропускающего фильтра перед смесителем. В блоке радиометрических приемников первый и второй малошумящий усилитель, и усилитель мощности выполнены на основе микросхемы GVA-63. Смеситель реализован на микросхеме НМС219, фильтр нижних частот выполнен на технологии LTCC и представлен LFCN-225, аналого-цифровой преобразователь реализован на микросхеме LTC2252. Полосовой фильтр выполнен на основе связанных микрополосковых резонаторов U – образной формы с емкостным уширением резонаторов на краях [9].

На вход ЦСП приходят сигналы с выходов блока радиометрического приемника с результатами измерений. После обработки результатов измерений уровней шумов опорных генераторов шума в соответствии с алгоритмом, описанным в [5-8], происходит формирование сигнала ШИМ с заданной длительностью для каждого приемника.

Заключение

Разработана структурная схема макета многоприемникового нулевого СВЧ-гиперспектрометра, позволяющего реализовать повышенное частотное разрешение при заданном уровне чувствительности и длительности одного измерения. Представлены подробные структурные схемы основных блоков, входящих в состав макета СВЧ-гиперспектрометра. Приведены непосредственные технические реализации входного радиочастотного блока, блока радиометрических приемников и блока селекции и переноса частоты. Представленные результаты будут использованы для проведения лабораторных испытаний в части определения чувствительности и разрешающей способности по частоте в режиме использования одного и нескольких приемников.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2020-0041 Минобрнауки России.

Литература

1. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков методом микроволновой радиометрии // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32. – № 11 (370). – С. 930-935.
2. Федосеева Е.В., Шукин Г.Г., Кольцов И.А. Влияние направленных свойств антенны СВЧ радиометрической системы на точность калибровки по излучению атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2019. – № 3 (35). – С. 65-71.
3. Ростокин И.Н., Федосеева Е. В. Вопросы построения многочастотной СВЧ-радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – №1. – С. 5-11.
4. Blackwell W.J., Leslie V.R., Pieper M.L., Samra J.E. All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding // Lincoln laboratory Journal. – 2010. Vol. – 18. – P.P 28-46.
5. Ubaichin A., Surzhikov A. Dynamics of internal thermal processes in dielectric materials and the method of its measurement in microwave hyperspectral mode // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 942. – P.P. 151-161.
6. Убайчин А.В. Способ повышения частотного разрешения сверхвысокочастотных гиперспектрометров// Измерительная техника. – 2019. – № 6. – С. 54-58.
7. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). Москва: Советское радио, 1964. 326 с.
8. Убайчин А.В., Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд. ТУСУР, 2014. 154 с.
9. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Leksikov A.A., Balva Y.F., Leksikov A.A. Novel High-Quality Compact Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter // IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters. – 2015. – Vol. 25. – P.P. 579-581.