

### **Лабораторный макет СВЧ-гиперспектрометра на основе метода нулевых измерений и принципа многоприемниковости**

А.В. Убайчин, Г.Г. Жук, Т. Абдирасулулу, А. В. Щегляков, А. Н. Чубарова,  
Д.С. Кречетов.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».*  
E-mail: ubaychin@tpu.ru

*В представленной работе приведена структурная схема реализации лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра на основе метода нулевых измерений и принципа многоприемниковости. Показан способ синхронного аналогового изменения рабочей полосы частот радиометрических приемников, позволяющий получить эффект повышения спектрального разрешения при заданной чувствительности и длительности одного измерения. Предложены структурная схема радиометрического приемника с переносом частоты и конфигурация рабочих полос частот фильтров верхних и нижних частот в радиочастотной части и канале промежуточной частоты для управления рабочей полосой частот лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра.*

*The present paper describes a block diagram of the implementation of the laboratory model of the microwave hyperspectrometer based on the method of zero measurements and the concept of multi-receiver. The method for implementing synchronous analogue changes in the operating frequency band of radiometric receivers, which allows to obtain the effect of increasing the spectral resolution at a given sensitivity and duration of one measurement is shown. The block diagram of the radiometric receiver with frequency transfer and the configuration of the operating frequency bands of the high and low frequency filters in the channels of the radio frequency part and the intermediate frequency for controlling the operating frequency band of the laboratory model of the microwave hyperspectrometers are proposed.*

#### **Введение**

Задача реализации пассивных гиперспектральных исследований в СВЧ- и КВЧ-диапазонах подразумевает расширение спектрального состава результатов измерений и предельного повышения спектрального разрешения. Расширение спектрального состава решается путем увеличения числа приемных каналов, работающих в исследуемых участках спектра и достигается технологическим путем. Задача повышения спектрального разрешения в настоящее время ограничена уровнем собственных шумов приемника и длительностью одного измерения при заданной чувствительности [1].

В цикле работ [2-4] показан новый способ повышения чувствительности, реализованный на основе метода нулевых измерений и принципа многоприемниковости. Эффект увеличения чувствительности достигается за счет уменьшения флуктуаций опорного генератора шума при одновременном использовании двух и более приемников и непрерывного слежения за сигналом антенны. Реализацию потенциала по увеличению флуктуационной чувствительности удобно использовать для решения задачи повышения спектрального разрешения при сохранении чувствительности на уровне одного приемного канала [5,6].

Следует отметить, что задачи повышения разрешающей способности по частоте актуальны не только в научных областях микроволновой спектрометрии, но и в прикладных задачах повышения помехозащищенности радиометрических систем [7].

В [5] получен комплекс теоретических результатов по разработке принципов создания СВЧ-гиперспектрометров с повышенным частотным разрешением на основе метода нулевых измерений и принципа многоприемниковости.

Для практической реализации, полученной в [5] теоретической зависимости по увеличению спектрального разрешения, приведен вариант практической реализации лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра, основанного на принципе многоприемниковости, нулевого метода измерений и сравнительно простого способа синхронного изменения ширины рабочей полосы частот приемников гиперспектрометра.

### **Способы реализации**

Реализация задачи получения эффекта повышения спектрального разрешения при сохранении чувствительности на заданном уровне возможна несколькими путями. В работах [8,9] показан способ прямой оцифровки результатов измерений на промежуточной частоте приемника. Этот подход обладает удобством практической реализации и позволяет оперативно варьировать требуемые параметры приемника: время накопления сигнала, рабочую полосу частот, чувствительность и т.д. Такие системы достаточно хорошо масштабируются по числу используемых приемников и их использование удобно в условиях лабораторного эксперимента. Существенным недостатком прямой оцифровки является необходимость потоковой обработки сравнительно больших объемов данных. Этот факт обуславливает применение высокоскоростных систем перепрограммируемой цифровой логики, что усложняет разработку и повышает ее стоимость при реализации простых математических операций над результатами измерений.

Для реализации лабораторного макета использован аналоговый способ изменения ширины рабочей полосы частот, основанный на приемнике с переносом частоты и управляемом гетеродине.

### **Структурная схема макета СВЧ-гиперспектрометра**

Структурная схема разработанного лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра, реализованного на основе метода нулевых измерений, принципа многоприемниковости и реализующего аналоговое управление шириной рабочей полосы частот приведена на рис. 1.

Разработанный лабораторный макет состоит из имитатора антенны ИА, направленного ответвителя НО, первого и второго высокочастотных переключателей ПК1 и ПК2, опорной согласованной нагрузки СН, аттенюатора Атт, генератора шума ГШ, управляющего микроконтроллера МК, шести идентичных радиометрических приемников РП1, ... РП6, генератора управляемого напряжением ГУН используемого в качестве гетеродина. Разработанный лабораторный макет СВЧ-гиперспектрометра функционирует на основе предложенного авторами способа реализации метода нулевых измерений, описанного в [5].

Поставленная во введении задача решается путем специальной реализации радиометрических приемников с переносом частоты. Первый и последующие радиометрические приемники (см. рис.1) выполнены в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2.

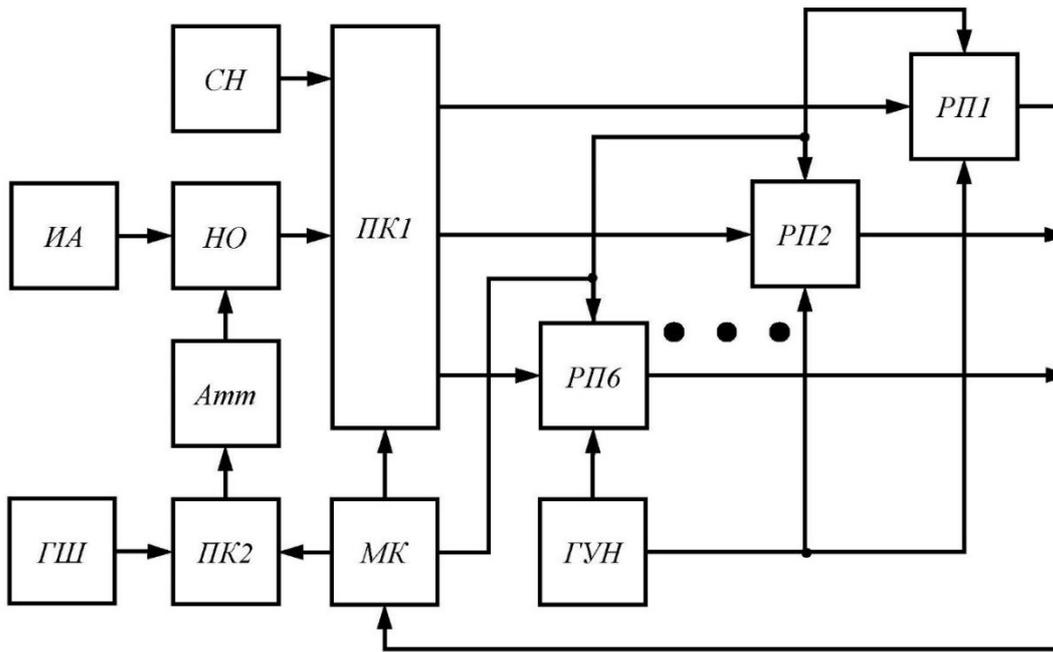


Рис. 1 – Структурная схема разработанного лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра

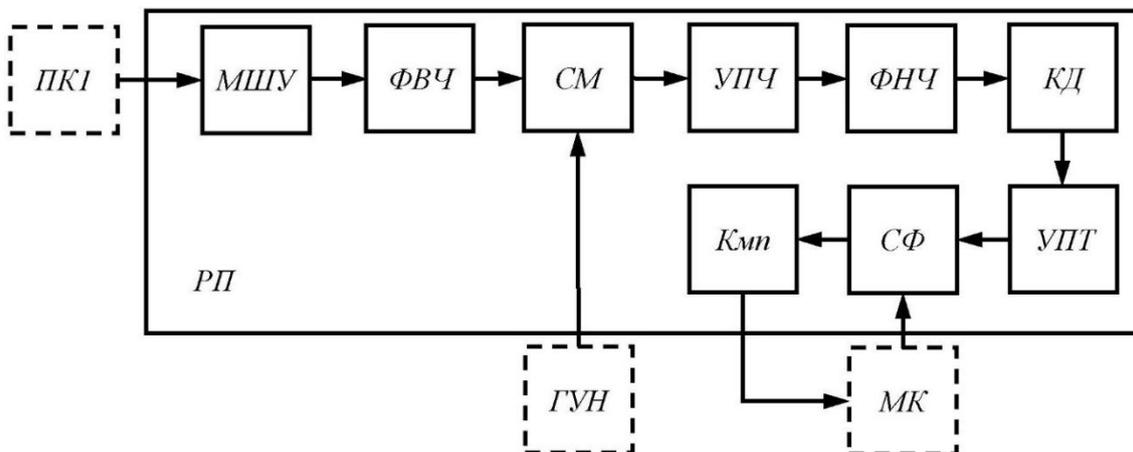
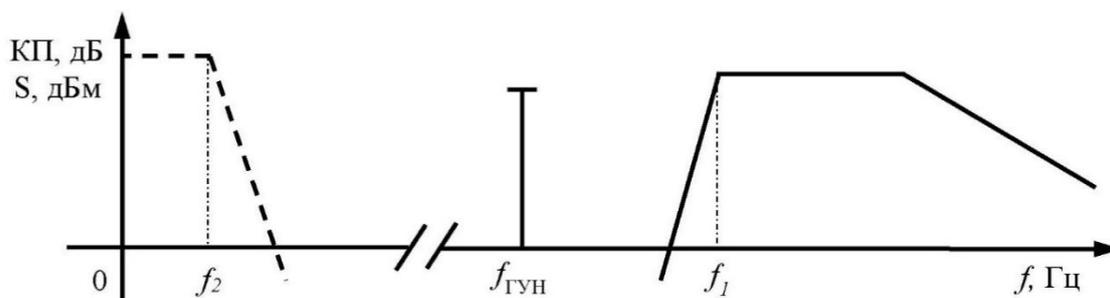


Рис. 2 – Структурная схема радиометрического приемника

Структурная схема первого радиометрического приемника, показанная на рис. 2, состоит из малошумящего усилителя МШУ, фильтра верхних частот ФВЧ, смесителя СМ, усилителя промежуточной частоты УПЧ, фильтра нижних частот ФНЧ, квадратичного детектора, усилителя постоянного тока УПТ, синхронного фильтра СФ и компаратора Кмп.

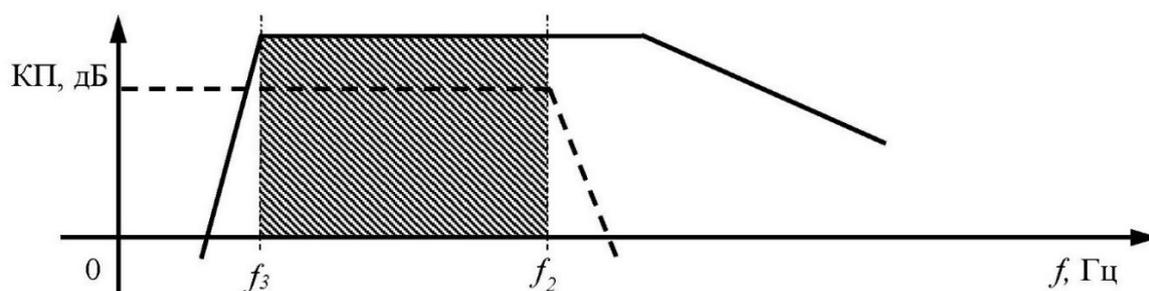
Отличительной особенностью представленного радиометрического приемника является реализация управления рабочей полосой частот. Управление рабочей полосой частот осуществляется следующим образом. На рис. 3 представлены графики коэффициентов передачи радиочастотной части приемника и канала промежуточной частоты.



**Рис. 3 – Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи радиочастотной части и канала промежуточной частоты приемника**

На рис. 3 сплошной линией обозначен график коэффициента передачи (рабочая полоса) радиочастотной части приемника, частота  $f_1$  соответствует частоте среза ФВЧ, частота  $f_{\text{ГУН}}$  соответствует частоте генерируемого в ГУН гармонического СВЧ-сигнала, штриховой линией обозначена амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи канала промежуточной частоты приемника, частота  $f_2$  соответствует частоте среза ФНЧ.

В результате работы смесителя происходит перенос рабочей полосы частот приемника в область промежуточных частот. Результирующая амплитудно-частотная характеристика в канале промежуточной частоты показана на рис. 4



**Рис. 4 – Результирующая амплитудно-частотная характеристика радиометрического приемника**

На рис. 4 частота  $f_3$  соответствует разнице между частотой среза ФВЧ ( $f_1$ ) и частотой ГУН ( $f_{\text{ГУН}}$ ). Таким образом, ширина рабочей полосы частот приемника равна разнице между частотами  $f_3$  и  $f_4$  (см. заштрихованную область на рис.4). В результате переноса частоты рабочая полоса частот приемника определяется по формуле

$$\Delta f = f_2 - f_3 = f_2 - (f_1 - f_{\text{ГУН}}). \quad (1)$$

Выражение (1) связывает частоту ГУН с шириной рабочей полосы частот. Управление шириной рабочей полосы частот радиометрического приемника осуществляется путем изменения частоты ГУН. Синхронное изменение частоты ГУН на всех приемниках обеспечивает управление шириной рабочей полосы частот лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра.

### **Заключение**

Предложен вариант практической реализации лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра на основе метода нулевых измерений и принципа многоприемниковости. Показан аналоговый способ реализации управления рабочей полосой частот приемников. Предложенный способ основан на переносе рабочей

полосы в область промежуточных частот. Изменение рабочей полосы достигается путем перестройки частоты ГУН. Ширина рабочей полосы частот ограничена полосами среза ФНЧ и ФВЧ в канале промежуточных частот и высокочастотной части соответственно. Использование предложенной схемы позволяет синхронно изменять рабочую полосу частот на всех приемниках, входящих в состав лабораторного макета СВЧ-гиперспектрометра.

### **Благодарности**

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

### **Литература**

1. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). Москва: Советское радио, 1964. 326 с.
2. Filatov A.V., Ubaichin A.V., Paraev D.E. A microwave four-channel null L-band radiometer / *Instruments and Experimental Techniques*. / – 2012. – Vol. 55. – No 1. – P.P. 59-64.
3. Филатов А.В., Убайчин А.В., Жуков Н.О. Двухканальный радиометр повышенной точности // *Радиотехника*. – 2011. – №1. – С.47-53.
4. Filatov A.V., Ubaichin A.V., Bombizov A.A. A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity // *Measurement Techniques*. – 2013. – Vol. 55. – No.11. – P.P. 1281-1286.
5. Убайчин А.В. Способ повышения частотного разрешения сверхвысокочастотных гиперспектрометров // *Измерительная техника*. – 2019. – № 6. – С. 54-58.
6. 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.
7. 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.
8. Убайчин А.В., Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд. ТУСУР, 2014. 154 с.
9. Fischman M.A., England A.W. Sensitivity of a 1.4 GHz direct-sampling digital radiometer // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 37. – No. 5. – P.P. 2172-2180.