

УДК 621.083.491

А.В. Убайчин, А.В. Щегляков, Т. Абдирасул уулу

Микроволновый радиометр с повышенным быстродействием на основе нулевого и дифференциального методов измерений

Приведена структурная схема нового микроволнового радиометра с повышенным быстродействием, реализованного на основе нулевого и дифференциального методов измерений. Показаны преимущества одновременного использования двух методов измерений: инвариантность к изменяющимся шумовой температуре и коэффициенту передачи приемника при измерении медленно меняющейся шумовой температуры антенны и повышенное быстродействие при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов. Проиллюстрировано сравнение работы предложенного микроволнового радиометра в нулевом и модуляционном режимах.

Ключевые слова: новые методы измерений, нулевой метод измерений, дифференциальный метод измерений, научное приборостроение, повышение быстродействия, дистанционное зондирование Земли, микроволновая радиометрия, микроволновый радиометр, СВЧ-радиометр.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-7-13

Современные средства пассивного дистанционного зондирования решают широкий спектр научно-прикладных задач [1–3]. Принято считать, что в области микроволновой радиометрии большинство исследуемых объектов являются стационарными и квазистационарными со сравнительно медленными изменениями шумовой температуры [4].

В большинстве исследований в некоторые моменты времени возникает быстрое изменение шумовой температуры объекта, например, в дистанционном зондировании подстилающей поверхности – наблюдение границ водная–земная поверхность, в солнечном мониторинге – вспыхивающая активность, в температурно-влажностном анализе – резкие изменения структуры объекта и т.д. [5]. Говоря о специализированных исследованиях быстропротекающих процессов, порождающих стремительное изменение радиотеплового излучения, следует отметить измерение параметров процессов горения, взрывов, динамики плазмы, пассивного радиовидения, поиска радиотепловых аномалий и т.д. [6–9]. Во всех описанных выше областях наибольший научный интерес представляют собой переходные состояния объекта.

Особенностью реализации повышенной абсолютной точности микроволновых радиометров как научных приборов, обеспечивающих измерение теплового электромагнитного излучения в СВЧ- и КВЧ-диапазонах, является необходимость стабилизации или учета дестабилизирующих факторов: дрейфа собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приемника [10]. Для повышения стабильности результатов радиометрических исследований используют метод нулевых измерений [11]. Недостатки аналоговых нулевых микроволновых радиометров [12] во многом учтены в модифицированных нулевых радиометрах, использующих широтно-импульсную модуляцию канала подшумливания: передаточная характеристика модифицированных нулевых радиометров обладает повышенной линейностью, результаты измерений по линейному закону связаны с длительностью сигнала широтно-импульсной модуляции, а конструкция входной СВЧ-части по

сложности сопоставима с модуляционными микроволновыми радиометрами [13].

Работа модифицированных нулевых радиометров основана на специальном следящем алгоритме последовательного приближения [14]. При выходе системы из состояния нулевого баланса следящий алгоритм обеспечивает последовательное изменение длительности сигнала широтно-импульсной модуляции на дискретную величину, эквивалентную флуктуационной чувствительности, за один период амплитудно-импульсной модуляции входного сигнала [15]. Недостатком следящего алгоритма является его сравнительно низкое быстродействие: если шумовая температура антенны скачкообразно изменилась на 1000 К, то при флуктуационной чувствительности 1 К и периоде амплитудно-импульсной модуляции 1 мс (соответствует типовой частоте модуляции 1 кГц) для установления нулевого баланса потребуется временной интервал порядка 1 с. В течение этого временного интервала результаты измерений будут обладать повышенной ошибкой измерений.

Очевидно, что обеспечиваемого уровня быстродействия недостаточно для решения задач исследования быстропротекающих радиотепловых процессов, характеризующихся временами, сопоставимыми с постоянными времени интеграторов, используемых в последетекторной части приемника модифицированных нулевых микроволновых радиометров.

В представленной статье предложен новый подход к технике измерения быстропротекающих радиотепловых процессов, позволяющий повысить быстродействие модифицированных нулевых микроволновых радиометров.

Структурная схема и принцип работы предложенного микроволнового радиометра

Структурная схема предложенного микроволнового радиометра с повышенным быстродействием показана на рис. 1.

Структурная схема предложенного микроволнового радиометра с повышенным быстродействием (см. рис. 1) содержит: источник тока ИТ, генератор шума ГШ, переключатель ПК, направленный ответ-

витель НО, первый аттенюатор АТТ1, второй аттенюатор АТТ2, модулятор М, антенну А, приемник П, импульсный усилитель ИУ, фильтр высоких частот ФВЧ, аналоговый мультиплексор АМ, интеграторы

И1, И2 и И3, дифференциальный усилитель ДУ, аналого-цифровой преобразователь АЦП, компаратор К, блок управления БУ и выходную шину данных ВШ.

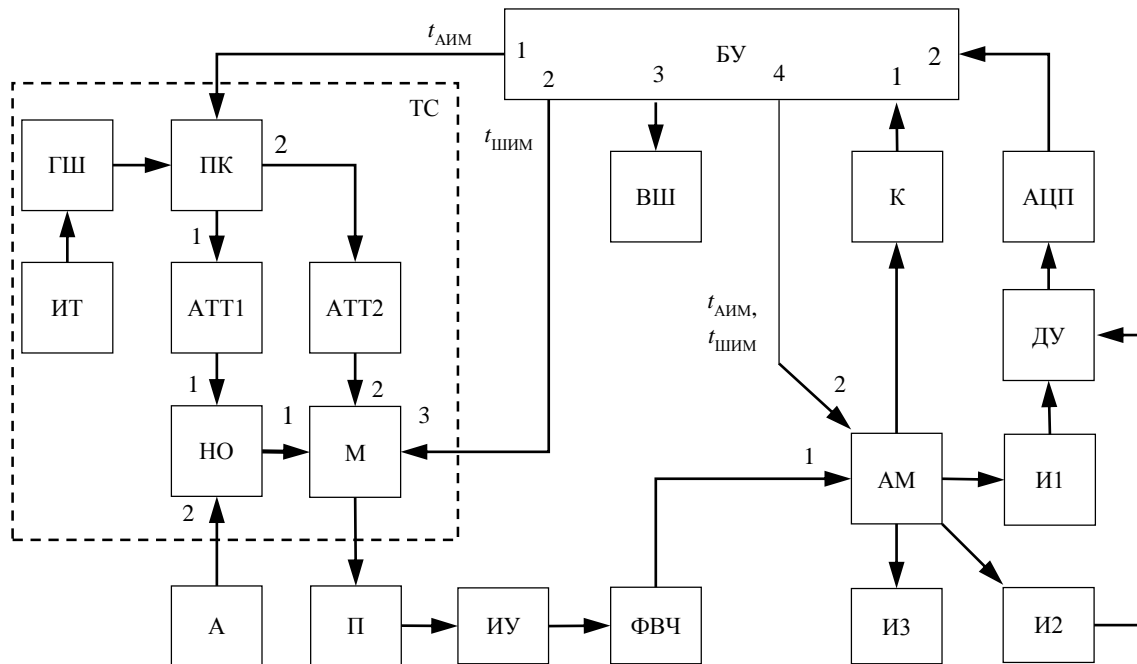


Рис. 1. Структурная схема предложенного микроволнового радиометра с повышенным быстродействием

Принцип работы предложенного микроволнового радиометра поясняется временными диаграммами, показанными на рис. 2 и заключається в следующем.

Блок управления формирует сигналы широтно-импульсной и амплитудно-импульсной модуляции (см. рис. 2, а и б). На первом выходе блока управления формируется сигнал амплитудно-импульсной модуляции для управления переключателем. На втором выходе блока управления формируется сигнал широтно-импульсной модуляции для управления модулятором. На четвертом выходе формируются

сигналы широтно-импульсной и амплитудно-импульсной модуляции для управления аналоговым мультиплексором.

Сигнал амплитудно-импульсной модуляции $t_{АИМ}$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов со скважностью следования, равной двум. Один период амплитудно-импульсной модуляции состоит из двух полупериодов с равными длительностями (см. рис. 2, а).

Сигнал широтно-импульсной модуляции $t_{ШИМ}$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов с переменной длительностью (см. рис. 2, б).

Под действием сигналов $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ происходит управление модулятором, переключателем и аналоговым мультиплексором. В соответствии с временными диаграммами, представленными на рис. 2, блок управления формирует четыре комбинации сигналов $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$.

Если блок управления формирует управляющие сигналы $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ низкого уровня, то вход приемника связан с антенной через первый вход модулятора и направленный ответвитель, а выход генератора шума с первым входом направленного ответвителя – через первый аттенюатор посредством переключателя. Выход фильтра высоких частот посредством аналогового мультиплексора подключен на вход первого интегратора. Следовательно, сигнал антенны T_A поступает на второй вход направленного ответвителя. С выхода направленного ответвителя сигнал антенны поступает на первый вход модулятора.

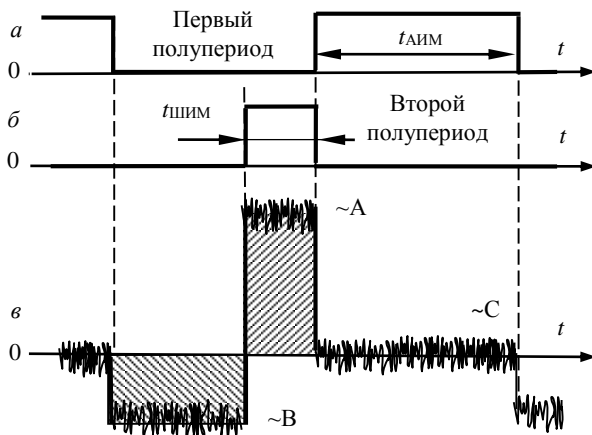


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы предложенного микроволнового радиометра: а – управляющий сигнал амплитудно-импульсной модуляции; б – управляющий сигнал широтно-импульсной модуляции; в – вход компаратора

Источник тока осуществляет непрерывное электропитание генератора шума. Сигнал генератора шума $T_{ГШ}$ поступает на первый вход направленного ответвителя через переключатель и первый аттенюатор. Далее с выхода направленного ответвителя через модулятор $T_{ГШ}$ поступает на вход приемника.

Таким образом, на вход приемника поступает сумма сигналов T_A и $T_{ГШ}$. С выхода приемника сигналы T_A и $T_{ГШ}$ поступают на вход компаратора через импульсный усилитель, аналоговый мультиплексор, первый интегратор и фильтр высоких частот, где последовательно выполняются операции усиления, полосовой фильтрации, детектирования, сглаживания и исключения постоянной составляющей. При этом на входе компаратора образуется сигнал (см. рис. 2, в)

$$A = (T_{ГШ} + T_A + \alpha_1 \cdot T_{ГШ}) \cdot dfGk, \quad (1)$$

где T_A – шумовая температура антенны, df – рабочая полоса частот приемника, $T_{ГШ}$ – уровень собственных шумов приемника, G – коэффициент передачи приемника, k – постоянная Больцмана, α_1 – коэффициент передачи первого аттенюатора.

Посредством аналогового мультиплексора сигнал T_A сглаживается и накапливается в первом интеграторе.

Далее в соответствии с временными диаграммами, изображенными на рис. 2, блок управления формирует комбинацию управляющих сигналов высокого уровня $t_{ШИМ}$ и низкого $t_{АИМ}$. Переключатель переходит в закрытое состояние, и сигнал $T_{ГШ}$ поглощается на его входе.

Выход импульсного усилителя через первый вход аналогового мультиплексора связан с входом второго интегратора. При этом аналогично (1) на входе компаратора формируется сигнал

$$B = (T_{ГШ} + T_A) \cdot dfGk. \quad (2)$$

Посредством аналогового мультиплексора сигнал B сглаживается и накапливается во втором интеграторе.

Далее в соответствии с временными диаграммами, изображенными на рис. 2, блок управления формирует сигналы $t_{АИМ}$ высокого уровня и $t_{ШИМ}$ низкого уровня.

При этом выход генератора шума подключен через переключатель, второй аттенюатор и модулятор на вход приемника. Выход импульсного усилителя через первый вход аналогового мультиплексора связан с входом третьего интегратора.

Аналогично выражению (1) на первом входе компаратора формируется сигнал

$$C = (T_{ГШ} + T_{АТТ2} + \alpha_2 \cdot T_{ГШ}) \cdot dfGk, \quad (3)$$

где $T_{АТТ2}$ – шумовая температура второго аттенюатора, α_2 – коэффициент передачи второго аттенюатора. Посредством аналогового мультиплексора сигнал C сглаживается и накапливается в третьем интеграторе.

В зависимости от состояния сигнала на первом выходе компаратора в блоке управления, при низком уровне $t_{АИМ}$, происходит регулирование длительно-

сти сигнала широтно-импульсной модуляции $t_{ШИМ}$. Если на первом выходе компаратора сформирован сигнал высокого уровня, то длительность сигнала широтно-импульсной модуляции $t_{ШИМ}$ уменьшается. Если на первом выходе компаратора сформирован сигнал низкого уровня, то длительность сигнала широтно-импульсной модуляции $t_{ШИМ}$ увеличивается. Регулирование осуществляется до тех пор, пока не выполнится равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов на первом входе компаратора (заштрихованные области на рис. 2, в). Среднее значение сигнала во втором полу-периоде модуляции равно нулю, что фиксируется компаратором в последующем полупериоде модуляции при его сравнении с потенциалом общей шины микроволнового радиометра. В этом случае выполняется равенство

$$(A - C) \cdot t_{ШИМ} = (C - B) \cdot (t_{АИМ} - t_{ШИМ}). \quad (4)$$

Подставляя (1), (2) и (3) в (4), получим

$$\begin{aligned} & \left(T_{ГШ} + T_A + \alpha_2 T_{ГШ} + T_{АТТ2} - \right. \\ & \left. - T_{ГШ} + T_A + \alpha_1 T_{ГШ} \right) \cdot dfGk \cdot t_{ШИМ} = \\ & = \left(T_{ГШ} + T_A - T_{ГШ} + T_A + \right. \\ & \left. + \alpha_2 T_{ГШ} + T_{АТТ2} \right) \cdot dfGk \cdot (t_{АИМ} - t_{ШИМ}). \quad (5) \end{aligned}$$

Решая (5) относительно $t_{ШИМ}$, получим

$$t_{ШИМ} = \frac{T_A - (\alpha_2 T_{ГШ} + T_{АТТ2})}{\alpha_1 T_{ГШ}} \cdot t_{АИМ}. \quad (6)$$

Из последней формулы (6) следует линейная зависимость сигнала $t_{ШИМ}$ от входного сигнала антенны. Через длительность сигнала $t_{ШИМ}$ определяется шумовая температура объекта. Также, из формулы (6) следует, что на длительность широтно-импульсного сигнала не влияют изменения уровня собственных шумов $T_{ГШ}$ и коэффициента передачи G приемника. Устранение влияния этих дестабилизирующих факторов указывает на то, что предложенный микроволновый радиометр работает по методу нулевых измерений.

После накопления требуемого количества значений сигнала широтно-импульсной модуляции блок управления формирует на выходной шине цифровой код, соответствующий шумовой температуре исследуемого объекта.

В процессе измерений на выходе дифференциального усилителя формируется сигнал, пропорциональный разнице значений, накопленных на первом и втором интеграторах:

$$dU = B - C = [T_A - (T_{АТТ2} + \alpha_2 \cdot T_{ГШ})] \cdot dfGk. \quad (7)$$

Таким образом, на вход аналого-цифрового преобразователя поступает сигнал, пропорциональный полному коэффициенту передачи и разнице сигналов генератора шума (с учетом ослабления во втором аттенюаторе) и антенны. В этом случае результаты измерений не зависят от изменений $T_{ГШ}$, а предложенный микроволновый радиометр работает в модуляционном режиме (дифференциальный метод измерений).

Измерение быстропротекающих радиотепловых процессов и аналитическое моделирование работы предложенного микроволнового радиометра

Измерение быстрого (больше величины флуктуационной чувствительности за один период модуляции) изменения шумовой температуры антенны предложенным микроволновым радиометром в нулевом режиме приводит к повышенным ошибкам измерений. Эти ошибки возникают, когда алгоритм последовательного приближения в цепи обратной связи уравнивания энергий сигналов антенны и генератора шума не успевает изменить величину сигнала широко-импульсной модуляции на соответствующие значения [16].

В модуляционном режиме величина ошибки при регистрации быстропротекающих радиотепловых

процессов меньше ввиду того, что время изменения сигнала на выходе микроволнового радиометра определяется постоянными времени τ соответствующих интеграторов (И1 и И2) и составляет порядка 3τ .

На рис. 3 показан пример моделирования работы предложенного микроволнового радиометра при измерении скачкообразного изменения шумовой температуры.

Для проведения моделирования приняты следующие параметры: длительность переходного процесса изменения шумовой температуры антенны порядка 5 мкс, длительность полупериода амплитудно-импульсной модуляции $t_{\text{АИМ}} = 500$ мкс, величина изменения шумовой температуры антенны порядка 7 К, флуктуационная чувствительность $dT_A = 1$ К, постоянная времени первого и второго интеграторов 120 мкс.

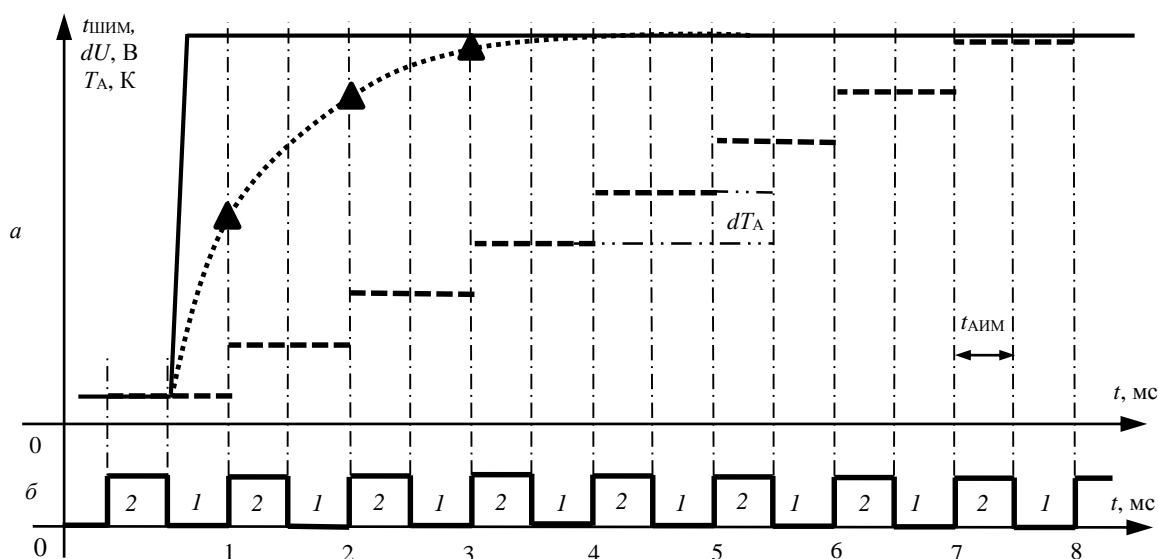


Рис. 3. Моделирование работы предложенного микроволнового радиометра при измерении быстропротекающего радиотеплового процесса – *a*. Полуциклы модуляции и их количество – *б*:

▲ – результаты измерений в модуляционном режиме, – огибающая результатов измерений в модуляционном режиме, ——— – шумовая температура антенны, - - - - - – результаты измерений в нулевом режиме

На рассмотренном примере моделирования при работе предложенного микроволнового радиометра в нулевом режиме по алгоритму последовательного приближения для установления нулевого баланса потребуется порядка 8 периодов модуляции, что соответствует длительности 8 мс при частоте модуляции 1 кГц. При использовании модуляционного режима результаты измерений будут обладать минимальной ошибкой через 3–4 периода модуляции, что соответствует длительности 3–4 мс.

Обсуждение результатов

Реализация нулевого режима обеспечивает повышенные метрологические характеристики при исследовании объектов, находящихся в стационарном состоянии, за счет снижения влияния на результаты измерений изменений собственных шумов и коэффициента передачи приемника микроволнового радиометра и следящей обратной связи.

Использование модуляционного режима (реализованного за счет аналогового мультиплексора, первого, второго и третьего интеграторов, дифференциального усилителя и аналого-цифрового преобразователя) позволяет осуществить измерения быстропротекающих радиотепловых процессов с повышенным быстродействием (уменьшенной ошибкой).

Активация режимов работы происходит в блоке управления путем сравнения результатов измерений с модуляционного и нулевого каналов. Если величина разности измерений превышает заданный порог, определяемый типом исследуемого радиотеплового процесса, то на выходную шину микроволнового радиометра поступают результаты измерений с модуляционного канала. Если величина разности измерений не превышает заданного порога, то на выходную шину поступают результаты измерений с нулевого канала. Таким образом, в предложенном мик-

роволновом радиометре реализован адаптивный режим работы.

Установление нулевого баланса в предложенном микроволновом радиометре, по сравнению с нулевыми микроволновыми радиометрами, использующими регулирующую длительность работы канала подшумливания [12], составляет порядка 3–5 периодов модуляции при измерении быстропротекающих радиотепловых процессов со скачкообразным изменением шумовой температуры. Установление нулевого баланса не зависит от величины изменения шумовой температуры в связи с работой модуляционного канала во время переходного процесса. Погрешность результатов измерений быстропротекающих радиотепловых процессов определяется, в основном, величиной постоянной времени интеграторов без влияния инертности цепи обратной связи.

Однако выигрыш при использовании предложенного микроволнового радиометра, по сравнению с нулевыми радиометрами, использующими регулирующую длительность работы канала подшумливания, прямо пропорционален величине изменения шумовой температуры антенны. Зависимость выигрыша от величины изменения шумовой температуры обусловлена линейным изменением длительности работы канала подшумливания в нулевых микроволновых радиометрах, не использующих АЦП в своем составе [12].

Следовательно, по сравнению с существующими решениями, в предложенном микроволновом радиометре повышена точность измерений быстропротекающих радиотепловых процессов. Это достигнуто за счет снижения систематической погрешности, обусловленной сравнительно медленной работой последовательного алгоритма в цепи обратной связи уравнивания энергии сигнала антенны.

Чувствительность предложенного микроволнового радиометра при измерениях медленно изменяющихся радиотепловых процессов не ухудшается за счет сохранения постоянных времени интеграторов и работы в нулевом режиме.

Заключение

Разработана структурная схема микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений. Выполнено моделирование работы предложенного микроволнового радиометра. Адаптивный режим работы предложенной схемы позволяет использовать преимущества нулевого метода измерений, заключающиеся в его инвариантности к изменяющимся шумовой температуре и коэффициенту передачи радиометрического приемника, и дифференциального метода измерений, позволяющего увеличить быстродействие микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов.

Наибольшее преимущество предложенного микроволнового радиометра проявляется при его использовании для измерения квазистационарных объектов, изменение шумовой температуры которых, в основном, проходит медленно и лишь в некоторые мо-

менты времени меняется сравнительно быстро, например, при исследовании солнечной активности.

Микроволновый радиометр, реализованный по предложенной структурной схеме, внедрен в комплекс исследовательских приборов Крымской астрофизической обсерватории для решения задач анализа солнечной активности с повышенным быстродействием.

В дальнейших исследованиях будет представлена модель описания оценки погрешности результатов измерений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00168, <https://rscf.ru/project/21-79-00168>.

Литература

1. All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding / W.J. Blackwell, V.R. Leslie, M.L. Pieper, J.E. Samra // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2010. – Vol. 18. – P. 28–46.
2. Караваев Д.М. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков методом микроволновой радиометрии / Д.М. Караваев, Г.Г. Щукин // *Оптика атмосферы и океана*. – 2019. – Т. 32, № 11 (370). – С. 930–935.
3. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from space borne L-band radiometers to ancillary sea surface temperature / T. Meissner, F. Wentz, J. Scot, J. Vazquez-Cuervo // *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 54. – P. 7105–7111.
4. Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes / V.M. Bel'skii, A.L. Mikhailov, A.V. Rodionov, A.A. Sedov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2011. – Vol. 47, No. 6. – P. 639–650.
5. Karvonen J. Baltic Sea Ice Concentration Estimation Using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 Microwave Radiometer Data // *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 99. – P. 1–3.
6. Measurement of kinematic and thermal characteristics of high-speed gas-dynamic processes by means of microwave sounding / E.V. Botov, V.N. Ikonnikov, V.A. Kanakov, N.S. Kornev, K.V. Mineev, A.V. Nazarov, A.A. Sedov, A.A. Shalygin, E.S. Mitin // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2018. – Vol. 54, No. 5. – P. 614–617.
7. Ikonnikov V. N. A method for retrieving the two-dimensional temperature field of the fast-process front by approximating the measurement results of a multichannel radiometer / V.N. Ikonnikov, V.A. Kanakov, V.V. Parkhachev // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 62, No. 1. – P. 77–84.
8. Application of low-loss transmission lines with an EHF radiometer in gas-dynamic experiments / E.Y. Gainulina, N.S. Kornev, K.V. Mineev, A.V. Nazarov, Y.I. Orekhov // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2021. – Vol. 64. – P. 157–160.
9. Пат. № 2698523 РФ, МПК G01K 11/00. Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте / Н. Иконников (РФ), В.А. Канаков (РФ), Н.С. Корнев (РФ) [и др.] (РФ). № 2018144404; заявл. 14.12.2018; опубл. 28.08.2019, Бюл. № 25.
10. On the long-term stability of microwave radiometers using noise diodes for calibration / T. Shannon, D. Shailen, W. Lu, A. Tanner // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 45, Iss.7. – P. 1908–1920.
11. Ubaychin A.V. Microwave radiometer for sensor systems with self-contained power supplies / A.V. Ubaychin, T. Abdirasul, G. Zhuk // *Sensor review*. – 2020. – Vol. 40, No. 3. – P. 329–334.

12. Filatov A. V. The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin // *Measurement Techniques*. – 2012. – Vol. 54, No. 10. – P. 1160–1165.

13. Camps A. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times / A. Camps, J. M. Tarongi // *Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 2. – P. 1826–1843.

14. Пат. № 2745796 РФ, МПК G01R 29/08. Быстродействующий нулевой радиометр / А.В. Филатов (РФ), К.А. Сердюков (РФ), А.А. Новикова (РФ). № 2020113936; заявл. 03.04.2020; опубл. 01.04.2021, Бюл. № 10.

15. Kaisti M. Radiometric Resolution Analysis and a Simulation Model / M. Kaisti, M. Altti, T. Poutanen // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, No. 85. – P. 1–9.

16. Ubaichin A. Dynamics of internal thermal processes in dielectric materials and the method of its measurement in microwave hyper spectral mode / A. Ubaichin, A. Surzhikov // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 942. – P.151–161.

Убайчин Антон Викторович

Канд. техн. наук, доцент, с.н.с. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0001-6284-4645

Тел.: +7-952-883-67-67

Эл. почта: anton.v.ubaichin@tusur.ru

Щегляков Артём Владимирович

Аспирант каф. радиотехники и систем связи (РСС) ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0001-6018-6810

Тел.: +7-996-938-62-90

Эл. почта: artyom_9709@mail.ru

Абдирасул уулу Тилекбек

Аспирант каф. РСС ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0002-0377-754X

Тел.: +7-952-175-00-12

Эл. почта: abdirasul.u.t@mail.ru

Ubaichin A.V., Schegliakov A.V., Abdirasul uulu T.

Microwave radiometer based on zero and differential measurement methods with high measurement rate

A block diagram of a new high-speed microwave radiometer implemented on the zero and differential measurement methods are presented. The advantages of the simultaneous use of two measurement methods are shown: invariance to changing noise temperature and gain of the receiver when measuring slowly varying antenna noise temperature, and increased speed when measuring fast radio-thermal processes. A comparison of the operation of the proposed microwave radiometer in zero and modulation modes is illustrated.

Keywords: new measurement methods, zero measurement method, differential measurement method, scientific instrumentation, high measurement rate, Earth remote sensing, microwave radiometry, microwave radiometer.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-7-13

References

1. Blackwell W.J., Leslie V.R., Pieper M.L., Samra J.E. All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding. *Lincoln Laboratory Journal*, 2010, vol. 18, pp. 28–46.

2. Karavaev D.M., Schukin G.G. Investigation of variations in the moisture content of the atmosphere and the water content of clouds by microwave radiometry. *Atmospheric and Ocean Optics*, 2019, vol. 32, no. 11 (370), pp. 930–935.

3. Meissner T., Wentz F., Scot J., Vazquez-Cuervo J. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from spaceborne L-band radiometers to ancillary sea surface temperature. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, vol. 54, pp. 7105–7111.

4. Bel'skii V.M., Mikhailov A.L., Rodionov A.V., Sedov A.A. Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 639–650.

5. Karvonen J. Baltic Sea Ice Concentration Estimation Using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 Microwave Radiometer Data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 99, pp. 1–3.

6. Botov E.V., Ikonnikov V.N., Kanakov V.A., Kornev N.S., Mineev K.V., Nazarov A.V., Sedov A.A., Shalygin A.A., Mitin E.S. Measurement of kinematic and thermal characteristics of high-speed gas-dynamic processes by means of microwave sounding. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 614–617.

7. Ikonnikov V.N., Kanakov V.A., Parkhachev V.V. A method for retrieving the two-dimensional temperature field of the fast-process front by approximating the measurement results of a multichannel radiometer. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 77–84.

8. Gainulina E.Y., Kornev N.S., Mineev K.V., Nazarov A.V., Orekhov Y.I. Application of low-loss transmission lines with an EHF radiometer in gas-dynamic experiments. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, vol. 64, pp. 157–160.

9. Ikonnikov N., Kanakov V.A., Kornev N.S. *Sposob dstantsionnogo opredeleniya termodinamicheskoy temperatury bystroprotekeyushchego protsesssa, razvivayushchegosya v radioprozrachnom ob'yekte* [A method for remotely determining the thermodynamic temperature of a fast process developing in a radio-transparent object] Patent RF no. 2698523, 2019.

10. Shannon T., Shailen D., Lu W., Tanner A. On the long-term stability of microwave radiometers using noise diodes for calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, is.7, pp. 1908–1920.

11. Ubaichin A.V., Abdirasul T., Zhuk G. Microwave radiometer for sensor systems with self-contained power supplies *Sensor Review*, 2020, vol. 40, no. 3, pp. 329–334.

12. Filatov A.V., Ubaichin A.V. The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency. *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 10, pp. 1160–1165.

13. Camps A., Tarongi J. M. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times. *Remote Sensing*, 2010, vol. 2, pp. 1826–1843.

14. Filatov A.V., Serdukov K.A., Novikova A.A. *Bystrodeystvuyushchiy nulevoy radiometr* [Fast response zero radiometer] Patent RF No 2745796, 2021.

15. Kaisti M., Altti M., Poutanen T. Radiometric Resolution Analysis and a Simulation Model. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no. 85, pp. 1–9.

16. Ubaichin A., Surzhikov A. Dynamics of internal thermal processes in dielectric materials and the method of its measurement in microwave hyper-spectral mode. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 942, pp. 151–161.

Anton V. Ubaychin

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor,
Department of Radio Engineering Systems (RES),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-6284-4645
Phone: +7-952-883-67-67
Email: anton.v.ubaychin@tusur.ru

Artem V. Scheglyakov

Postgraduate student, Department of RES, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-6018-6810
Phone: +7-996-938-62-90
Email: artyom_9709@mail.ru

Tilekbek Abdirasul uulu

Postgraduate student, Department of RES, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0377-754X
Phone: +7-952-175-00-12
Email: abdirasul.u.t@mail.ru