

Двухприемниковый микроволновый радиометр с высокой линейностью передаточной характеристики

А. В. ФИЛАТОВ, А. В. УБАЙЧИН, А. А. БОМБИЗОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия, e-mail: filsash@mail.ru

Описан микроволновый радиометр с двумя приемниками, в котором повышены чувствительность и стабильность преобразований благодаря использованию нулевого метода измерения. Принцип работы заключается в синхронном выполнении двух видов импульсной модуляции — амплитудной и широтной. Формирование сигналов, управляющих широтной модуляцией по специальному алгоритму для каждого приемника, улучшает линейность передаточной характеристики радиометра.

Ключевые слова: микроволновый радиометр, нулевой метод измерения.

The microwave radiometer with two receivers and increased sensitivity and stability of conversions due to the use of zero method of measurement is described. The operation principle consists in synchronous execution of two types of pulse modulation — amplitude and width. The formation for each of receivers signals controlling the width modulation by special algorithm improves the linearity of radiometer transmissions characteristics.

Key words: microwave radiometer, zero method of measurement.

В последнее десятилетие бурно развиваются исследования окружающей среды радиофизическими методами [1]. Высокая информативность микроволновых методов вызывает необходимость создания все более совершенной аппаратуры для проведения этих исследований. Как правило, радиометры функционируют в сложных климатических условиях, что определяет высокие требования к их надежности, стабильности характеристик в сочетании с высокой чувствительностью. В данной статье описан двухприемниковый радиометр с использованием комбинации двух видов импульсной модуляции — амплитудной и широтной, в котором выполняется авторегулирование нулевого равновесия.

На рис. 1 приведена структурная схема радиометра, содержащая антенну 1, входной блок 2, два приемника 9 и 13, цифровой блок управления 18. Во входном блоке радиометра выполняется импульсная модуляция сигналов. Выходной сигнал антенны с эффективной шумовой температурой T_a поступает в высокочастотный модулятор 7 через направленный ответвитель 3, в котором к сигналу антенны добавляется первый опорный сигнал с шумовой температурой T_d . Он вырабатывается в канале «подшумливания», образованном полупроводниковым генератором шума 6 на лавинно-пролетном диоде, аттенуатором 5, в котором сигнал ослабляется до необходимого уровня (настройка проводится при калибровке), и сверхвысокочастотным (СВЧ) ключом 4. В последнем происходит широтно-импульсная модуляция (ШИМ) сигнала генератора шума по управляющему сигналу $t_{\text{ШИМ}}$, который поступает на модулятор с блока управления 18. Второй опорный сигнал с

эффективной температурой $T_{\text{оп}}$ вырабатывается согласованной нагрузкой 8, находящейся при температуре входного узла радиометра.

Тракты согласованной нагрузки и антенны подсоединены ко входам высокочастотного модулятора 7, осуществля-

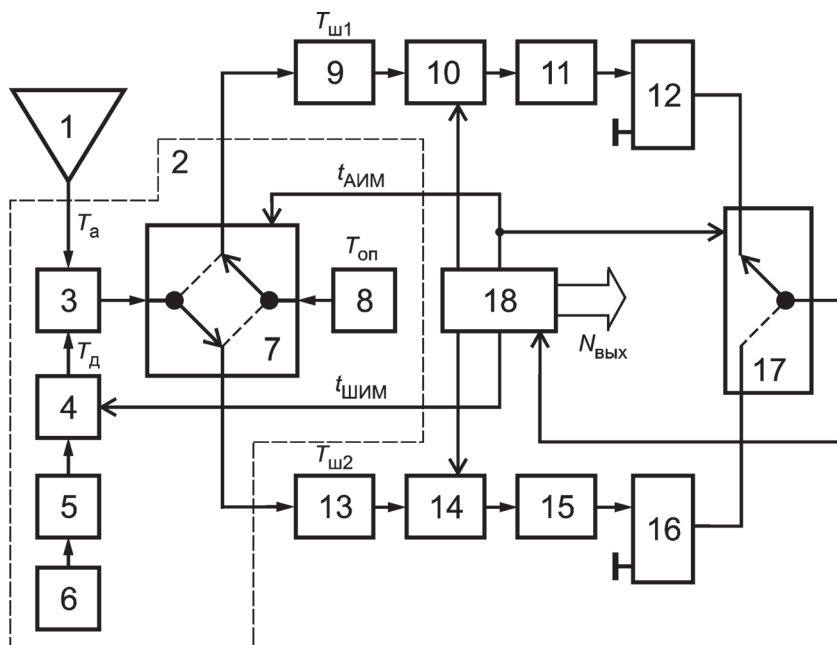


Рис. 1. Структурная схема двухприемникового радиометра с нулевым методом измерений:

1 — антенна; 2 — входной блок; 3 — ответвитель; 4 — ключ; 5 — аттенуатор; 6 — генератор шума; 7, 17 — высоко- и низкочастотные модуляторы; 8 — согласованная нагрузка; 9, 13 — приемники; 10, 14 — фильтры низких частот; 11, 15 — фильтры высоких частот; 12, 16 — компараторы; 18 — цифровой блок управления; $T_{\text{ш1}}$, $T_{\text{ш2}}$ — приведенные ко входу собственные шумовые температуры приемников

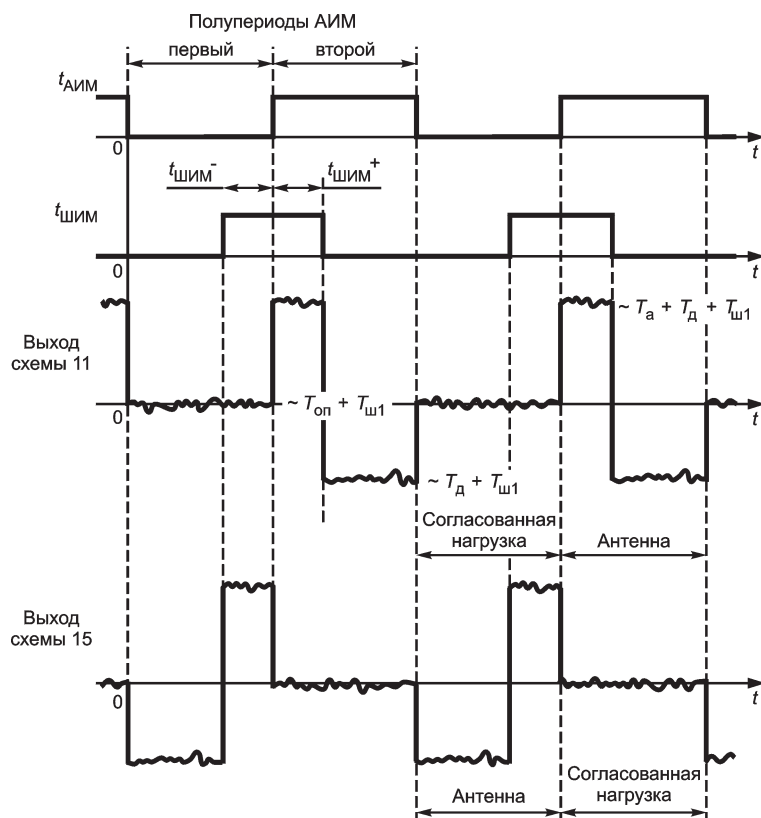


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы двухприемникового нулевого радиометра

ющего их подключение к двум радиометрическим приемникам 9 и 13 с одинаковыми диапазонами частот принимаемых сигналов. Синхронным переключением ключей высокочастотного 7 и низкочастотного 17 модуляторов по импульсному сигналу t_{AIM} , следующему со скважностью два, в радиометре осуществляется импульсная амплитудная модуляция (АИМ). Модулятор 7 имеет конфигурацию «два входа — два выхода». В зависимости от управляющего сигнала t_{AIM} антенный или опорный тракты поочередно коммутируются на входы радиометрических приемников (каналы работают параллельно). С выхода приемников модулированная последовательность сигналов поступает на синхронные фильтры низких частот (ФНЧ) 10 и 14, фильтры высоких частот (ФВЧ) 11 и 15, компараторы 12 и 16, определяющие полярность. Блок управления 18 поддерживает оба измерительных тракта в режиме нулевого равновесия и анализирует выходные сигналы компараторов. На его выходе вырабатывается цифровой код $N_{вых}$ измеряемого сигнала антенны, который поступает на динамический интегратор для накопления и усреднения.

Сигналы блока управления также служат для работы низкочастотных синхронных фильтров 10, 14, которые состоят из трех однозвенных интегрирующих RC-цепей и имеют общий резистор. Постоянные составляющие трех модулируемых входных сигналов (антенны, опорного генератора шума, согласованной нагрузки) накапливаются на трех

конденсаторах синхронным подключением к общей точке схемы через управляемый электронный ключ.

Принцип работы радиометра поясняют временные диаграммы, приведенные на рис. 2 для случая нулевого равновесия. В радиометре реализована модификация метода нулевых измерений [2], согласно которой нулевое равновесие двух измерительных трактов радиометра достигается изменением длительности сигнала t_{SHIM} . Так как в схеме радиометра перед компараторами постоянная составляющая исключается в ФВЧ, изменение длительности t_{SHIM} приводит к сдвигу вверх или вниз периодической модулированной последовательности сигналов относительно нулевой оси времени. Индикатором нулевого равновесия для данной модификации метода служит отсутствие напряжения на входе компараторов в полупериод АИМ при подключении согласованной нагрузки 8 к приемникам 9, 13. Это состояние фиксируют компараторы, работающие в режиме нуля-органа, на один вход которых поступают сигналы с исключенной в них постоянной составляющей, а другой вход соединен с общей точкой схемы. Изменением длительности ШИМ-сигналов происходит выравнивание на входе компараторов вольтсекундных площадей положительных и отрицательных импульсов. В этом случае передаточная характеристика радиометра имеет вид [3]:

$$t_{SHIM} = t_{AIM} (T_{оп} - T_a) / T_d \quad (1)$$

Как следует из (1), сигнал антенны с шумовой температурой T_a определяется через длительность сигнала t_{SHIM} , и на измерения не влияют изменения коэффициентов передачи приемников и их собственные шумы.

Так как выходным сигналом блока управления является цифровой код длительности ШИМ-сигнала, в (1) выполнен переход от длительностей к их цифровым эквивалентам:

$$N_{вых} = (N_{max} + 1) (T_{оп} - T_a) / T_d \quad (2)$$

где N_{max} — цифровой код с единицами во всех разрядах.

На запаздывание в контуре регулирования длительности сигнала t_{SHIM} оказывает влияние постоянная времени $\tau_{ФВЧ}$ ФВЧ 11, 15 (см. рис. 1). Для нее данная схема является интегрирующим звеном, и поэтому накопление происходит с некоторой инерционностью. Улучшение динамических свойств радиометра, увеличение его быстродействия связаны со скоростью отработки изменений сигнала антенны контуром автоматического регулирования нулевого равновесия. Для этого постоянную времени ФВЧ необходимо уменьшать. В радиометре с одним приемником это приведет к повышению погрешности нелинейности характеристики преобразования [3], а если длительность $\tau_{ФВЧ}$ сравнима с полупериодом амплитудной модуляции t_{AIM} , то длительность t_{SHIM} определяется следующим соотношением [4]:

$$t_{SHIM} = \tau_{ФВЧ} \ln \{ [T_d + T_a - T_{оп} + (T_{оп} - T_a) \exp(h)] / T_d \} \quad (3)$$

где $h = t_{AIM} / \tau_{ФВЧ}$.

Отклонение характеристик от прямой линии тем больше, чем меньше постоянная времени $\tau_{ФВЧ}$. Если эту постоянную времени выбрать много больше длительности полупериода АИМ, то получим (1).

Для двухприемниковой схемы в случае одновременной обработки сигналов обоих приемников возможно значительное уменьшение погрешности нелинейности при сохранении высоких динамических характеристик радиометра. Для этого изменяется вид модулирующей функции по управлению временем появления ШИМ-сигнала. Для первого приемника сигналы $t_{ШИМ}$ следуют в начале второго полупериода амплитудной модуляции, для второго — в конце первого полупериода (на рис. 2 обозначены как $t_{ШИМ}^+$ и $t_{ШИМ}^-$ соответственно). В этом случае погрешности нелинейности передаточных характеристик приемников имеют разные знаки, но близкие по модулю значения. Вычисление среднего позволяет повысить линейность характеристики преобразования радиометра при больших погрешностях нелинейности отдельных приемников

$$t_{ШИМ} = \frac{t_{ШИМ}^+ + t_{ШИМ}^-}{2} = \frac{\tau_{ФВЧ}}{2} \ln \left(\frac{(T_d + T_a - T_{оп}) \exp(h) + (T_{оп} - T_a) \exp(2h)}{(T_d + T_a - T_{оп}) \exp(h) + T_{оп} - T_a} \right). \quad (4)$$

На рис. 3, а приведена графическая иллюстрация рассчитанных по (4) передаточных характеристик двухприемникового радиометра (кривые 1 — 5) для различных $\tau_{ФВЧ}$, построенных для диапазона измерения 50 — 350 К и длительности полупериода ШИМ 500 мкс. Из графиков следует, что характеристики близки к линейным и слабо зависят от постоянной времени фильтров. На этом же рисунке пунктиром показана построенная с использованием (3) передаточная характеристика одного приемника радиометра при $\tau_{ФВЧ} = 0,25$ мс. Погрешность нелинейности преобразования значительно снижается (кривая 6), если с данной постоянной времени происходит одновременная работа двух приемников и совместная обработка выходных сигналов по описанному выше алгоритму.

Погрешность нелинейности передаточной характеристики двухприемникового радиометра определяется выражением

$$\delta t_{ШИМ} = \frac{\tau_{ФВЧ}}{2} \ln \left(\frac{(T_d + T_a - T_{оп}) \exp(h) + (T_{оп} - T_a) \exp(2h)}{(T_d + T_a - T_{оп}) \exp(h) + T_{оп} - T_a} \right) - \frac{T_{оп} - T_a}{T_d} t_{АИМ}. \quad (5)$$

На рис. 3, б приведены кривые, характеризующие данную погрешность измерений для различных постоянных времени ФВЧ. Из построенных графиков следует, что погрешность нелинейности результирующей передаточной характеристики радиометра с двумя приемниками имеет два экстремальных значения — положительное и отрицательное — и равна нулю в середине шкалы преобразования.

Данная погрешность принимает максимальные значения при сигналах антенны, определяемых дифференциро-

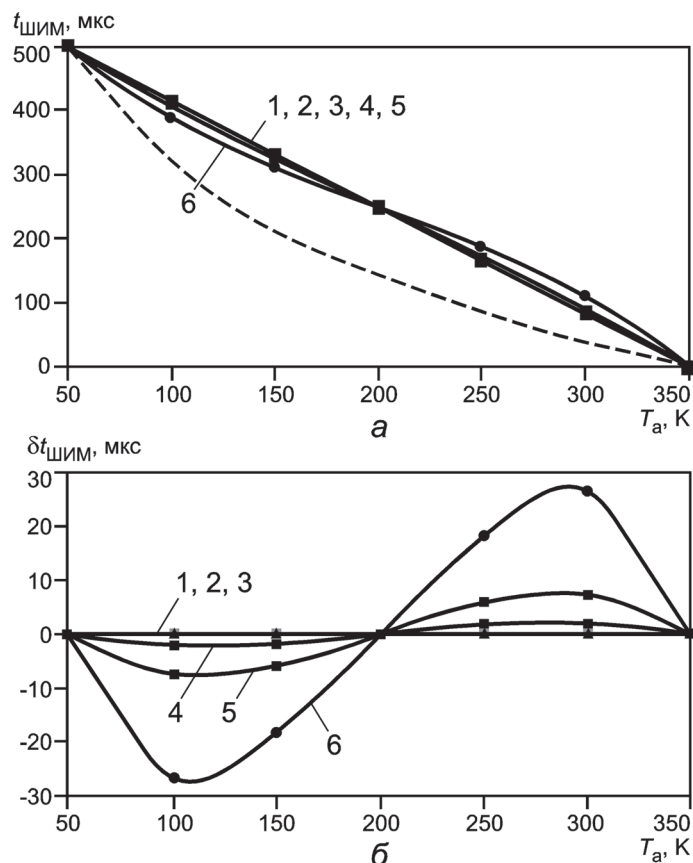


Рис. 3. Передаточные характеристики (а) и их погрешности нелинейности (б) двухприемникового радиометра при постоянных времени фильтров высоких частот $\tau_{ФВЧ} = 10; 5; 2,5; 1; 0,5; 0,25$ мс — соответственно кривые 1 — 6

ванием выражения (5) по T_a и приравнованием производной к нулю:

$$\begin{aligned} T_{a1} &= T_{оп} + T_d (A - 1) / 2; \\ T_{a2} &= T_{оп} + T_d (A + 1) / 2, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } A = \frac{\exp(h) + 1}{\exp(h) - 1} \sqrt{1 - \frac{2\tau_{ФВЧ} [\exp(h) - 1]}{t_{АИМ} [\exp(h) + 1]}}.$$

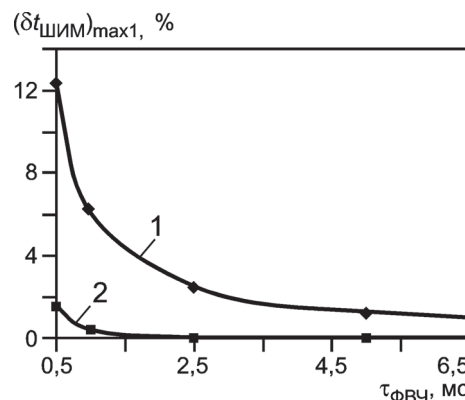


Рис. 4. Зависимости максимального значения погрешности нелинейности одного приемника радиометра (1) и всего радиометра в целом (2) от постоянной времени фильтра высоких частот $\tau_{ФВЧ}$

Подстановкой в (5) найденных сигналов (6) антенны определяем два максимальных значения погрешности нелинейности характеристики преобразования:

$$(\delta t_{\text{ШИМ}})_{\text{max } 1} = \frac{\tau_{\text{ФВЧ}}}{2} \ln \left(\frac{(A+1)\exp(h) - (A-1)\exp(2h)}{(A+1)\exp(h) - (A-1)} \right) + \frac{t_{\text{АИМ}}}{2} (A-1); \quad (7)$$

$$(\delta t_{\text{ШИМ}})_{\text{max } 2} = \frac{\tau_{\text{ФВЧ}}}{2} \ln \left(\frac{(A+1)\exp(2h) - (A-1)\exp(h)}{(A+1) - (A-1)\exp(h)} \right) - \frac{t_{\text{АИМ}}}{2} (A+1). \quad (8)$$

Максимальные погрешности, рассчитанные по (7), (8), имеют равные значения, но разные знаки и не зависят от сигналов опорных источников шума. На рис. 4 приведена графическая иллюстрация вычисленной по (7) зависимости $(\delta t_{\text{ШИМ}})_{\text{max } 1} = f(\tau_{\text{ФВЧ}})$, представленная в процентном отношении к максимальной длительности $t_{\text{ШИМ}} = 500$ мкс (кривая 2). На этом же графике по приведенной ниже формуле построена зависимость максимальных значений погрешности нелинейности одного приемника (кривая 1) [4]:

$$(\delta t_{\text{ШИМ}})_{\text{max}} = \tau_{\text{ФВЧ}} \ln \left(\frac{\tau_{\text{ФВЧ}} [\exp(h) - 1]}{t_{\text{АИМ}}} \right) + \frac{t_{\text{АИМ}}}{\exp(h) - 1} - \tau_{\text{ФВЧ}}.$$

Использование двух приемников позволяет повысить чувствительность измерений. Выражение для определения чувствительности ΔT_a одного приемника радиометра получено в [5] и имеет вид

$$\Delta T_a = \sqrt{T_{\text{оп}}(T_{\text{оп}} + T_d + 4T_{\text{ш}}) + 2T_{\text{ш}}^2 - T_a(T_a + T_d - 2T_{\text{оп}})} / \sqrt{2df\tau R}, \quad (9)$$

где $T_{\text{ш}}$ — шумовая температура приемника; df — полоса частот сигналов, принимаемых приемником; τ — постоянная времени синхронного ФНЧ; R — число накопленных цифровых кодов длительности $t_{\text{ШИМ}}$ для последующего усреднения на временном интервале одного измерения.

Как следует из (9), в случае двухприемниковой схемы количество накопленных цифровых кодов с последующим

усреднением на одинаковом временном интервале возрастает в два раза. Таким образом, минимально обнаружимый порог сигнала в радиометре с двумя приемниками уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Так как накопление цифровых кодов происходит в два раза быстрее, динамические характеристики двухприемникового радиометра возрастут в такое же количество раз.

Кроме того, применение двухприемниковой схемы повышает надежность работы радиометрических систем. В случае отказа одного приемника система остается работоспособной, с той лишь разницей, что в $\sqrt{2}$ раз ухудшается чувствительность.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-08-99106).

Л и т е р а т у р а

1. **Sharkov E. A.** Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003.
2. **Филатов А. В.** Способы реализации модификации метода нулевого приема в сверхвысокочастотных радиометрах // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. Вып. 7. С. 888—894.
3. **Филатов А. В., Каратаева Н. А., Дмитриев В. Д.** Микроволновый нулевой радиометр с комбинированной импульсной модуляцией // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 65—69; **Filatov A. V., Karataeva N. A., Dmitriev V. D.** A microwave zero radiometer with combined pulse modulation // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 3. P. 337—343.
4. **Филатов А. В.** Микроволновые радиометрические системы нулевого метода измерений: монография. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007.
5. **Филатов А. В., Каратаева Н. А., Ложилов А. Г.** Флуктуационная чувствительность микроволновых нулевых радиометров на основе комбинированной импульсной модуляции // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). 2006. № 10. С. 3—18.

Дата принятия 04.05.2012 г.