

УДК 621.396.9

## НОВЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОМЕТРОВ ПО МНОГОПРИЁМНИКОВОЙ СХЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА НУЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. В. Филатов\*

Томский госуниверситет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

В статье рассмотрен микроволновый многоприёмниковый радиометр, который основан на параллельно работающих приёмных каналах с использованием принципа нулевого баланса и измерения сигнала на антенне всеми приёмниками в одном спектральном диапазоне с временным разделением. Это позволяет получить большую флуктуационную чувствительность, чем в случае идеального компенсационного радиометра полной мощности, с одновременным достижением высокой стабильности измерений благодаря использованию модификации метода нулевых измерений.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из основных задач современной непилотируемой космонавтики являются дистанционные радиофизические исследования Земли и Мирового океана, проводимые с целью анализа динамики глобальной экологической ситуации, контроля параметров и безопасности природных и техногенных сред [1, 2]. В данных исследованиях важная роль отведена микроволновой радиометрии для динамического картирования изображений радиотепловых полей в различных спектральных диапазонах [3, 4]. Выполнение соответствующих измерений часто представляет собой трудную задачу. Их особенностью является необходимость фиксации малых изменений измеряемых величин в течение больших промежутков времени (так называемые режимные измерения). Поэтому для их выполнения требуется создание систем с высокой стабильностью характеристик как по времени (долговременная стабильность), так и при изменении условий рабочей среды, в первую очередь температуры. В исследованиях природных сред на очереди стоит изучение более тонких эффектов и сложных состояний, для чего требуется повышение чувствительности и надёжности радиометрической аппаратуры.

В устройствах микроволновой радиометрии, построенных по модуляционным схемам с использованием метода дифференциальных измерений, наклон (крутизна) передаточной характеристики сигнал на антенне—выходное напряжение зависит от коэффициента передачи измерительного тракта. Это же имеет место и для других типов радиометров (компенсационных, корреляционных, балансных), в которых полный коэффициент передачи измерительного тракта выполняет роль опорной величины. В этом случае дрейф и флуктуации коэффициента усиления влияют на точность измерений. Изменения коэффициента усиления являются одним из трудно контролируемых источников погрешности. Флуктуации коэффициента усиления наиболее сильно проявляют себя около нулевой частоты, и их спектральная плотность убывает с ростом частоты по закону, близкому к аналогичной зависимости для фликкер-шума [5]. Наиболее рациональный путь повышения точности измерений с помощью снижения влияния медленных флуктуаций коэффициента усиления состоит в увеличении времени накопления сигнала, что приводит к увеличению времени измерения. Иными словами, измерения радиометрами известных типов остаются зависимыми

\* filsash@mail.ru

от всё более медленных факторов. При достаточно больших временах измерения влияние медленных флуктуаций коэффициента усиления на интервале корреляции суммарного воздействия флуктуаций на различных частотах становится всё менее существенным. Поэтому в известных радиометрических схемах сокращение времени измерения неизбежно приводит к значительному ухудшению флуктуационной чувствительности радиометров.

Известные методы радиометрических измерений (компенсационный, модуляционный, корреляционный, балансный, нулевой), используемые в приёмных системах с одним или двумя приёмниками, не позволяют существенно увеличить чувствительность. Увеличение чувствительности радиометров на базе данных методов в настоящее время связано в основном с технологическими приёмами: улучшением параметров сверхвысокочастотных элементов (переключателей, направленных ответвителей, смесителей, гетеродинов и т. д.) и применением усилителей с низкой эффективной температурой шумов [6–8].

Одним из путей создания чувствительных микроволновых радиометрических систем является построение радиометров по многоприёмниковым схемам (3 и более приёмников) [9], когда измерение сигнала на антенне выполняется одинаковыми радиометрическими приёмниками в одном спектральном диапазоне. В радиометрах с несколькими приёмными каналами в основном применяется модуляционный метод дифференциальных измерений с использованием принципа временного разделения при подключении к антенне [10]. При этом, как известно, на работу модуляционного радиометра значительное влияние оказывают флуктуации и дрейф коэффициента усиления измерительного тракта, которые дополнительно модулируют амплитуду измеряемой разности антенного и опорного шумовых сигналов и в итоге понижают точность измерений. Из-за большого влияния дестабилизирующих факторов в модуляционной схеме многоприёмникового радиометра принципиально нельзя реализовать требуемое повышение чувствительности.

## 1. МНОГОПРИЁМНИКОВЫЙ НУЛЕВОЙ РАДИОМЕТР

В данной работе с целью достижения максимальной флуктуационной чувствительности радиометрических измерений в основу принципа создания многоприёмникового радиометра положена модификация метода нулевых измерений [11, 12] с применением двух видов синхронно выполняемых импульсных модуляций — амплитудной и широтной. При этом сигнал на антенне косвенным способом определяется через длительность широтно-импульсного сигнала опорного подшумливания (т. е. добавленного шумового сигнала) и на точность измерений не влияют основные дестабилизирующие факторы — изменения (частотные дрейф и флуктуации) собственных шумов и коэффициента усиления измерительного тракта. В результате при определённом числе приёмников в составе многоприёмникового радиометра (расчёт этого числа приведён ниже) достигнута большая чувствительность, чем в случае идеального компенсационного радиометра, в котором дрейф и флуктуации постоянной составляющей собственных шумов и коэффициента передачи измерительного тракта считаются равными нулю (среди известных схем компенсационный радиометр имеет самую высокую потенциальную чувствительность). При сохранении стабильности измерений удалось выполнить измерения на коротких интервалах с меньшим временем накопления сигнала при сохранении хорошей чувствительности. К одному из достоинств применения модификации нулевого метода можно отнести то, что опорные источники шумового сигнала, определяющие смещение и наклон передаточной характеристики, сосредоточены в локальном объёме входного узла, в котором осуществляется их импульсная модуляция совместно с сигналом антенны. При этом опорные источники имеют малые габариты и их проще термостабилизировать.

На рис. 1 приведена структурная схема многоприёмникового нулевого радиометра, а на рис. 2 —

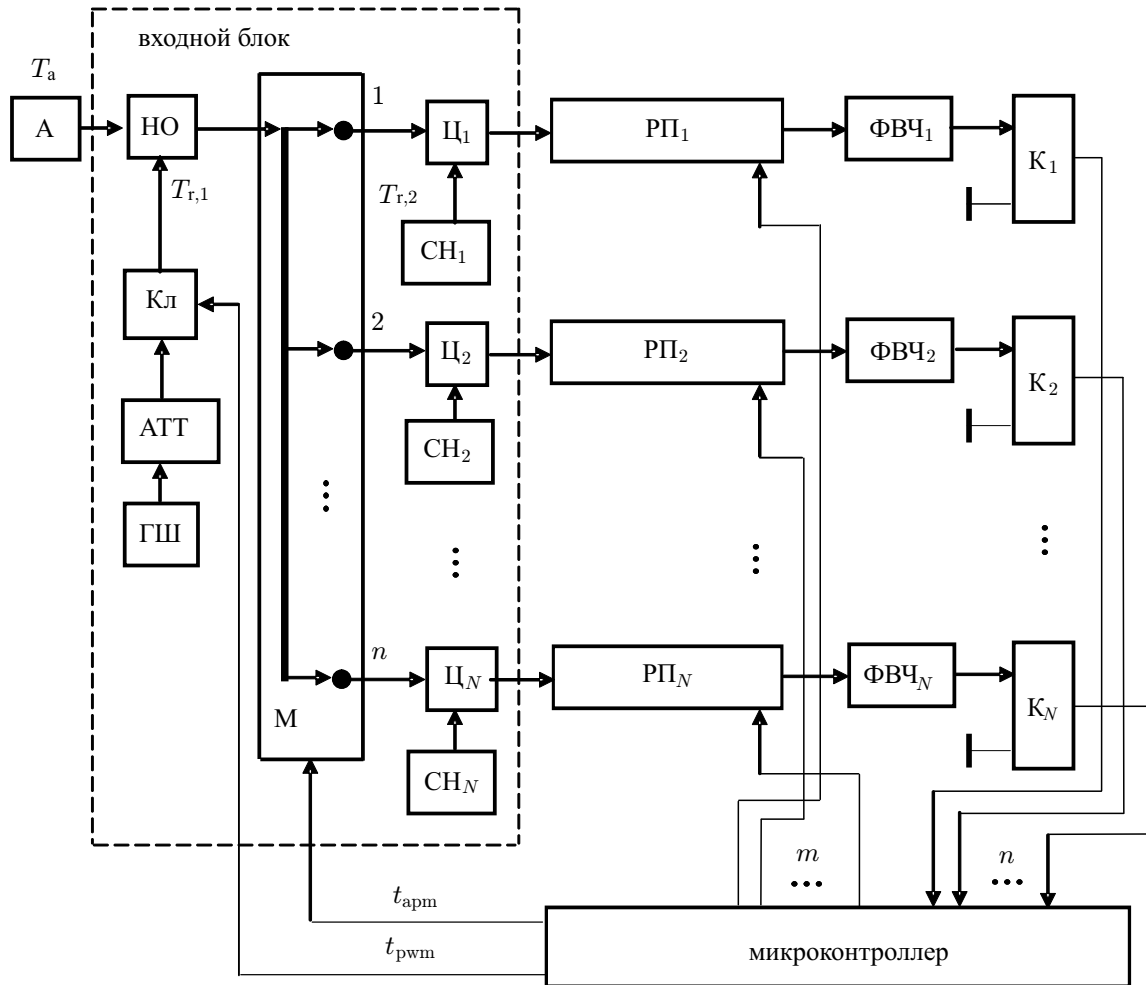


Рис. 1. Структурная схема микроволнового многоприёмникового радиометра, основанного на модифицированном нулевом методе: А — антенна, НО — направленный ответвитель, Кл — высокочастотный ключ, АТТ — аттенюатор, ГШ — генератор шума, М — высокочастотный мультиплексор,  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$  — циркуляторы, работающие в режиме вентиля,  $СН_1, СН_2, \dots, СН_N$  — согласованные нагрузки,  $РП_1, РП_2, \dots, РП_N$  — радиометрические приёмники,  $\PhiВЧ_1, \PhiВЧ_2, \dots, \PhiВЧ_N$  — фильтры высоких частот,  $К_1, К_2, \dots, К_N$  — компараторы,  $m$  и  $n$  — число выходов и входов микроконтроллера соответственно

временные диаграммы, иллюстрирующие принцип его работы (диаграммы соответствуют установленному нулевому балансу). Во входном блоке, термостатированном при термодинамической температуре  $T_0$ , через направленный ответвитель к сигналу на антенне  $T_a$  добавляется первый опорный сигнал, формируемый в канале стабильного подшумливания,

$$T_{r,1} = [T_{ng}\alpha + T_0(1 - \alpha)]l + T_0(1 - l) - T_0, \quad (1)$$

где  $T_{ng}$  — выходной сигнал генератора шума на лавинно-пролётном диоде,  $l$  — коэффициент связи линий в направленном ответвителе,  $\alpha$  — коэффициент передачи аттенюатора, изменяющийся в пределах от 0 (полное подавление сигнала) до 1 (полное пропускание). В процессе калибровки грубая регулировка опорного сигнала осуществляется изменением тока, протекающего через активную зону лавинно-пролётного диода, точная — изменением поглощения сигнала в аттенюаторе.

Второй опорный шумовой сигнал  $T_{r,2}$  вырабатывается согласованными нагрузками циркуляторов, выполняющих функцию шумовых генераторов. Величина сигнала равна термодинамической температуре нагрузок. Регулировка опорного сигнала в процессе калибровки радиометра осуществляется изменением температуры локальных термостатов, в которых находятся согласованные нагрузки.

Одинаковые радиометрические приёмники выполнены по схемам прямого усиления и включают в себя высокочастотные и низкочастотные усилители, секции квадратичного детектирования и синхронные низкочастотные фильтры. Использование приёмников прямого усиления обусловлено прогрессом в создании компонентной электронной базы, простотой схемной реализации и стабильностью характеристик. Приёмники на базе малощумящих усилителей работают вплоть до частот 50 ГГц. Прямое преобразование сигнала позволяет заметно снизить уровень собственного шума. Выходные сигналы приёмников поступают на фильтры высоких частот и компараторы. Данные узлы необходимы для реализации в радиометре модификации нулевого метода измерений.

Микроконтроллер управляет работой радиометра и выполняет первичную обработку сигналов, динамическое интегрирование, накопление и т. д. Выходы микроконтроллера позволяют управлять в приёмниках синхронными низкочастотными фильтрами первого порядка, состоящими из общего резистора и трёх переключаемых конденсаторов [13]. На входы микроконтроллера поступают логические сигналы с выходов компараторов, определяющих полярность входного сигнала (один из их входов соединён с общей шиной радиометра). Импульсными сигналами микроконтроллера с длительностью  $t_{apm}$  происходит управление находящимся во входном блоке мультиплексором, через который к входу одного из выбранных приёмников подключается антенна. Таким образом выполняется амплитудно-импульсная модуляция сигнала на антенне и опорных сигналов согласованных нагрузок циркуляторов (см. рис. 2). Широтно-импульсная модуляция выполняется сигналами с длительностью  $t_{pwm}$ , которые управляют замыканием сверхвысокочастотного ключа в канале стабильного подшумливания. При приходе этого сигнала выходной сигнал генератора шума поступает через направленный ответвитель в тракт антенны. Данной модуляцией устанавливается нулевой баланс в приёмных каналах радиометра.

Установка и авторегулирование нулевого баланса в каждом приёмном канале многоприёмникового радиометра реализовано с помощью метода слежения, алгоритм которого состоит в следующем. Полный период амплитудно-импульсной модуляции делится по числу приёмников на  $N$  временных интервалов с длительностью  $t_{apm}$ . Когда приёмник не подключён к антенне, опорный сигнал с шумовой температурой  $T_{r,2}$  согласованной нагрузки циркулятора, отражаясь от закрытого входа мультиплексора, поступает на вход приёмника. Таким образом, время накопления сигнала от согласованной нагрузки для каждого приёмника увеличивается и становится равным  $(N - 1)t_{apm}$ . На этом же интервале времени компаратором осуществляется анализ полярности сигнала. Если полярность отрицательная, то длительность широтно-импульсного сигнала увеличивается на 1 дискретную единицу, если положительная — уменьшается. Откорректированная длительность используется в формировании управляющего широтно-импульсной модуляцией сигнала для следующего периода амплитудно-импульсной модуляции, а цифровой код длительности в микроконтроллере передаётся на устройство накопления двоичных кодов. Изменение этого кода на 1 младший разряд соответствует изменению длительности широтно-импульсного сигнала на 1 дискретную единицу. В конце временного интервала одного измерения в микроконтроллере накапливается  $R$  цифровых кодов длительности  $t_{pwm}$ , после суммирования которых и определения арифметического среднего получается один результат измерения для одного приёмного канала. Количество  $R$  накопленных кодов длительности широтно-импульсного сигнала в приёмниках связано с временем измерения  $t_{calc}$  и периодом амплитудно-импульсной модуляции

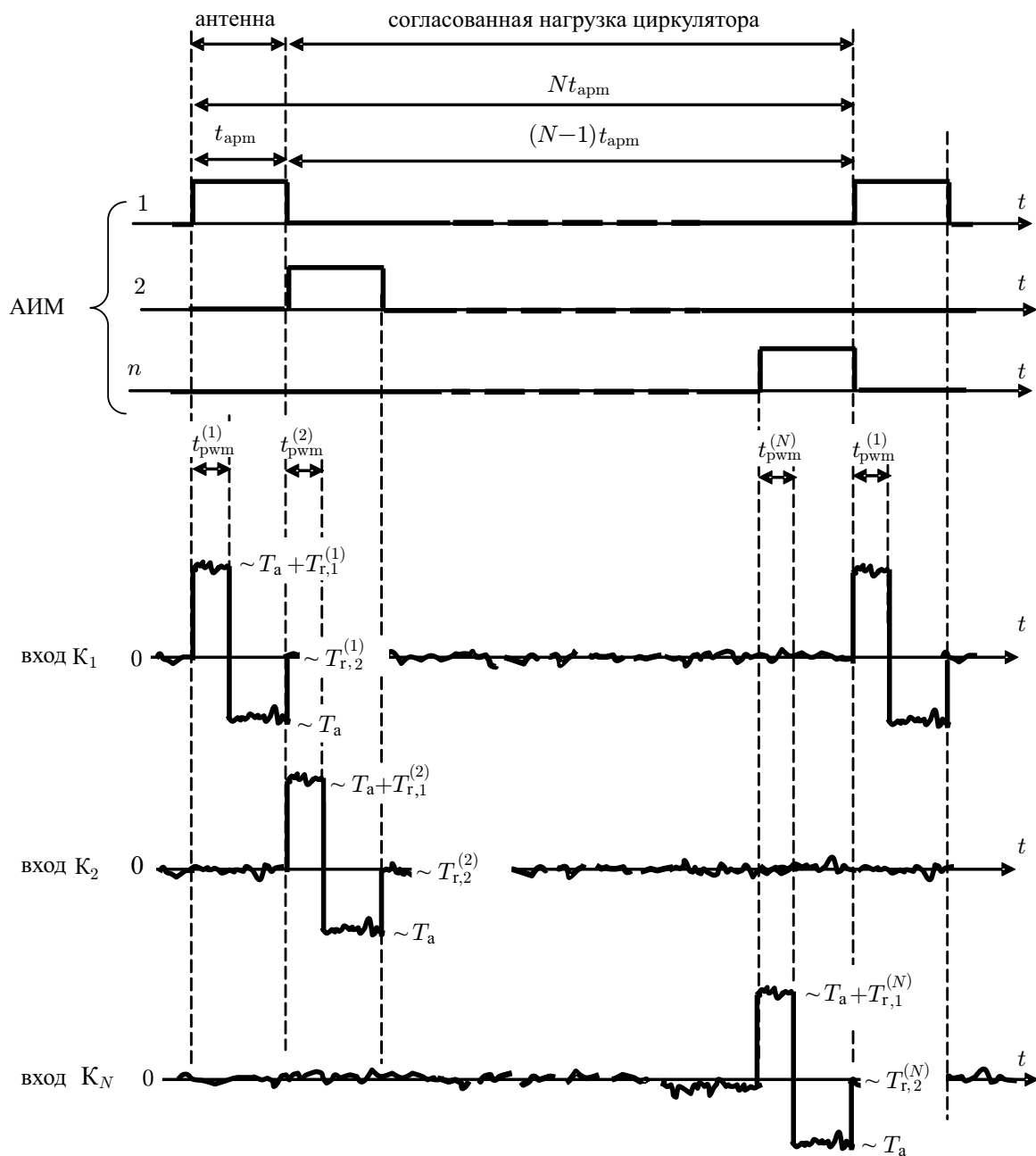


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие принцип функционирования многоприёмникового радиометра с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) сигнала

следующим равенством:  $R = t_{calc} / (Nt_{apm})$ .

В результате простого алгоритма авторегулирования приёмник поддерживается в состоянии нулевого баланса, когда выполняется следующее равенство [14]:

$$t_{pwm} = \frac{T_{r,2} - T_a}{T_{r,1}} t_{apm}. \tag{2}$$

Отсюда следует, что длительность широтно-импульсного сигнала  $t_{pwm}$  связана с сигналом на антенне  $T_a$  линейным законом и что на эту связь не влияют изменения коэффициента переда-

чи измерительных приёмников и их собственные шумы (как для нулевых радиометров). Через длительность широтного сигнала косвенным образом определяется сигнал на антенне:

$$T_a = T_{r,2} - T_{r,1} t_{\text{pwm}}/t_{\text{apm}}. \quad (3)$$

Согласно равенству (3) минимальная и максимальная границы шкалы измерений имеют место для  $t_{\text{pwm}} = t_{\text{apm}}$  и  $t_{\text{pwm}} = 0$  и соответственно равны  $T_{a,\text{min}} = T_{r,2} - T_{r,1}$  и  $T_{a,\text{max}} = T_{r,2}$ . Следовательно, размах диапазона измерений определяется опорным сигналом канала подшумливания:

$$dT_a = T_{a,\text{max}} - T_{a,\text{min}} = T_{r,1}. \quad (4)$$

## 2. ФЛУКТУАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МНОГОПРИЁМНИКОВОГО РАДИОМЕТРА

В работе [15] получена формула для расчёта флуктуационной чувствительности одного радиометрического канала с несимметричной амплитудно-импульсной модуляцией, в котором используется приём по модифицированному нулевому методу:

$$\Delta T^{(1)} = \frac{\sqrt{T_{r,2} (2T_a + T_{r,1} + T_{r,2} + 4T_n) + 2T_n^2 - T_a (T_a + T_{r,1})}}{\sqrt{\Delta f \tau RN}}, \quad (5)$$

где  $T_n$  — эффективная температура собственных шумов приёмника,  $\Delta f$  — полоса принимаемых радиометром частот,  $\tau$  — постоянная времени синхронного низкочастотного фильтра. Из равенства (5) следует, что увеличение числа приёмников  $N$  приводит к росту чувствительности приёмного канала радиометра. Однако это не так. С увеличением периода амплитудно-импульсной модуляции, равного  $Nt_{\text{apm}}$ , происходит уменьшение числа  $R$  накапливаемых в микроконтроллере цифровых кодов длительности  $t_{\text{pwm}}$ . Например, в двухприёмниковой схеме на четырёх периодах амплитудно-импульсной модуляции  $R = 4$ , а в восьмиприёмниковой схеме на этом же интервале измерений  $R = 1$ . Произведение  $NR$  как для двухприёмниковой, так и для восьмиприёмниковой схем одинаково и равно 8. Поскольку произведение  $NR$  находится в подкоренном выражении формулы (5), чувствительность не изменяется. Поэтому такой простой приём, как увеличение времени наблюдения опорного сигнала согласованной нагрузки, не приводит к увеличению флуктуационной чувствительности. Она остаётся на том же уровне, как если бы амплитудно-импульсная модуляция выполнялась по симметричному закону сигналом типа меандр.

Из равенства (5) следует, что чувствительность не является постоянной величиной и зависит от сигнала на антенне. Поэтому естественным является вопрос, при каком сигнале на антенне чувствительность минимальная, т. е. величина  $T^{(1)}$  принимает максимальное значение. Продифференцируем (5) по  $T_a$  и приравняем производную к нулю:  $T_a = T_{r,2} - T_{r,1}/2$ . Следовательно, чувствительность минимальна в середине диапазона измерения. Подставляя полученное значение сигнала антенны в формулу (5), найдём выражение, из которого можно оценить минимальную флуктуационную чувствительность одного приёмного канала радиометра:

$$\Delta T_{\text{max}}^{(1)} = \sqrt{\frac{(2T_{r,2} + T_n)^2 + T_{r,1}^2/4}{\Delta f \tau RN}}. \quad (6)$$

По принципу функционирования работа многоприёмникового радиометра схожа с работой одноканального радиометра при многократном сканировании объекта исследования. После сканирования одного и того же участка в ходе дальнейшей обработки происходит синхронное поточечное суммирование сканов (т. е. цифровых кодов длительностей широтно-импульсного сигнала)

с определением среднего значения. Результирующая шумовая дорожка имеет меньший разброс. Снижение дисперсии пропорционально квадратному корню из числа сканов [16].

Подобную аналогию можно провести и для многоприёмникового радиометра. Поскольку приёмные каналы работают раздельно на одну антенну, то каждый приёмник по сути накапливает свой скан сигнала на антенне и в результате обработки разброс полученных значений  $t_{\text{pwm}}$  (дисперсия длительности) снижается пропорционально квадратному корню из числа приёмных каналов. Для полученных массивов сканов первого приёмника  $t_{\text{pwm},1}^{(1)}, t_{\text{pwm},2}^{(1)}, \dots, t_{\text{pwm},R}^{(1)}$ , второго приёмника  $t_{\text{pwm},1}^{(2)}, t_{\text{pwm},2}^{(2)}, \dots, t_{\text{pwm},R}^{(2)}$  и ...  $N$ -го приёмника  $t_{\text{pwm},1}^{(N)}, t_{\text{pwm},2}^{(N)}, \dots, t_{\text{pwm},R}^{(N)}$  после истечения времени одного измерения рассчитываются средние значения по приёмникам:

$$t_{\text{pwm}}^{(1)} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R t_{\text{pwm},i}^{(1)}, \quad t_{\text{pwm}}^{(2)} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R t_{\text{pwm},i}^{(2)}, \quad \dots, \quad t_{\text{pwm}}^{(N)} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R t_{\text{pwm},i}^{(N)}.$$

Затем вычислением суммы находится результат:

$$t_{\text{pwm}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{pwm}}^{(i)}.$$

В ходе такой обработки флуктуационная чувствительность всего многоприёмникового радиометра возрастает пропорционально квадратному корню из числа приёмников и равна

$$\Delta T = \Delta T^{(1)} / \sqrt{N}, \quad (7)$$

где величина  $\Delta T^{(1)}$  определяется соотношением (5). Тогда, с учётом равенства (5), окончательно получаем формулу для расчёта флуктуационной чувствительности многоприёмникового радиометра:

$$\Delta T^{(1)} = \frac{\sqrt{T_{r,2}(2T_a + T_{r,1} + T_{r,2} + T_n) + 2T_n^2 - T_a(T_a + T_{r,1})}}{N \sqrt{\Delta f \tau R}}. \quad (8)$$

Выражение (8) для минимальной чувствительности радиометра с учётом  $N$  приёмных каналов принимает следующий вид:

$$\Delta T_{\text{max}} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{(2T_{r,2} + T_n)^2 + T_{r,1}^2/4}{\Delta f \tau R}}. \quad (9)$$

На рис. 3 приведены временные диаграммы работы двух-, четырёх- и восьмиприёмниковых радиометрических схем нулевого радиометра. Для примера рассмотрен временной интервал одного измерения, состоящий из четырёх периодов амплитудно-импульсной модуляции (8 одинаковых временных отрезков с длиной  $t_{\text{apm}}$ ). В процессе работы каждого приёмного канала после широтно-импульсной модуляции на вход радиометрического приёмника подаётся опорный сигнал с согласованной нагрузкой циркулятора и происходит коррекция цифрового кода длительности  $t_{\text{pwm}}$  на один младший разряд ( $\pm 1$ ) для данного приёмника. Формирование следующего периода широтно-импульсной модуляции в приёмном канале происходит с новым кодом длительности широтно-импульсного сигнала.

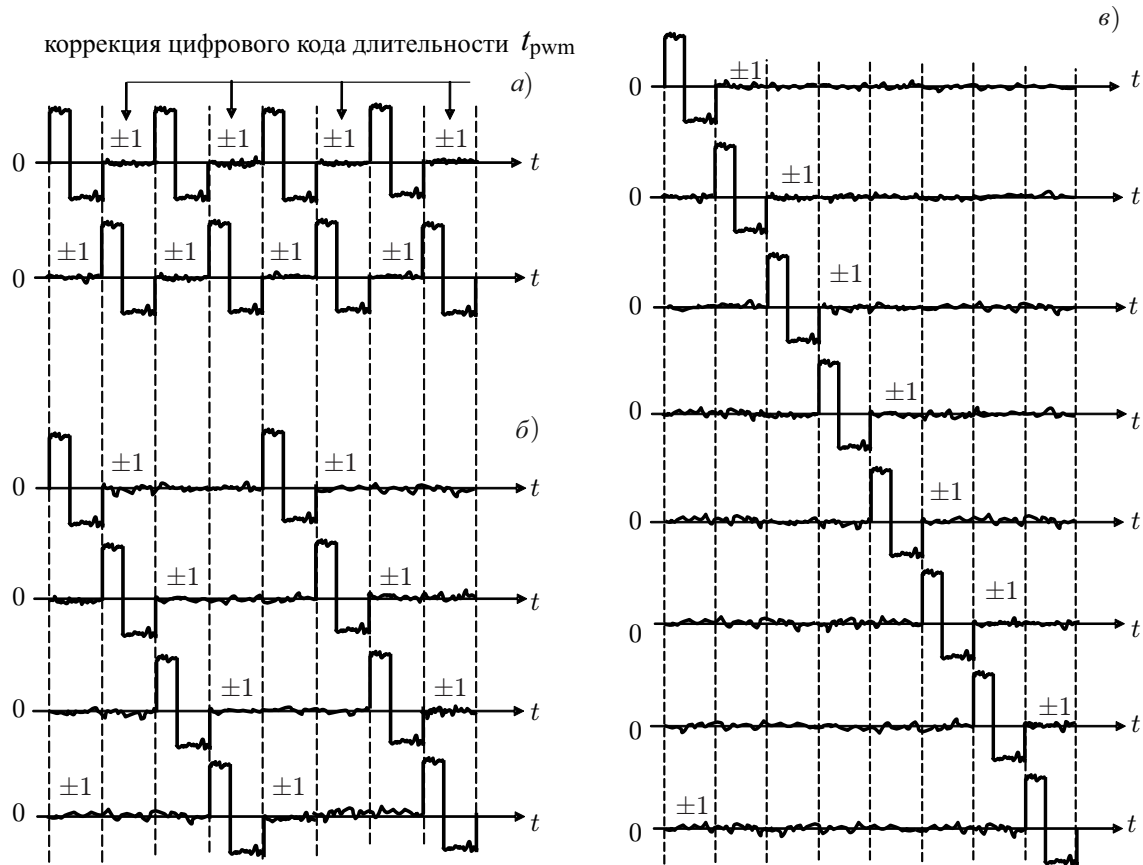


Рис. 3. Временные диаграммы функционирования двухприёмников ( $N = 2, R = 4$ , панель *a*), четырёхприёмников ( $N = 4, R = 2$ , *б*) и восьмиприёмников ( $N = 8, R = 1$ , *в*) нулевых радиометров, рассмотренные на четырёх периодах амплитудно-импульсной модуляции;  $R$  — число накопленных кодов длительности широтно-импульсного сигнала

### 3. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЕНСАЦИОННОГО И МНОГОПРИЁМНИКОВОГО РАДИОМЕТРА

В ходе дальнейшего анализа проведём сравнение по чувствительности рассмотренного многоприёмникового радиометра с идеальным одноканальным компенсационным радиометром как эталоном наилучшей чувствительности среди известных радиометрических устройств. Для этого рассмотрим, при каком числе радиометрических приёмников в составе многоприёмникового нулевого радиометра его флуктуационная чувствительность равна чувствительности идеального компенсационного радиометра. Для этого воспользуемся формулой для определения флуктуационной чувствительности идеального компенсационного радиометра [17, 18]

$$\Delta T_c = \sqrt{2} \frac{T_{n,c} + T_a}{\sqrt{\Delta f_c \tau_c R_c}}, \tag{10}$$

где  $T_{n,c}$  — собственная шумовая температура компенсационного радиометра,  $T_a$  — действующий на входе шумовой сигнал антенны,  $\Delta f_c$  — полоса принимаемых радиометром частот,  $\tau_c$  — постоянная времени последетекторного аналогового фильтра низких частот,  $R_c$  — число накопленных и усреднённых цифровых кодов выходного напряжения радиометра, полученных при аналого-цифровом преобразовании. Накопление цифровых кодов аналого-цифрового преобразователя и



их усреднение (динамическое интегрирование) эквивалентно увеличению постоянной времени аналогового низкочастотного фильтра в  $R_c$  раз.

Сравнение компенсационного и нулевого многоприёмникового радиометров проведём при следующих условиях: полосы принимаемых радиометрами частот сигнала на антенне совпадают ( $\Delta f = \Delta f_c$ ), шумовые температуры приёмников равны ( $T_{n,c} = T_n$ ), одинаковое накопление кодов (характеризующее общее время интегрирования входных сигналов) обоими радиометрами за одно измерение обеспечено выполнением условия  $\tau_c R_c = \tau R$  (т. е. отношения ширин полос на входном и выходном каналах компенсационного радиометра и одного канала многоприёмникового радиометра совпадают). Тогда, приравнявая соотношения (9) и (10) и выражая из полученного равенства число приёмников  $N$ , получим

$$N = \frac{\sqrt{4(T_{r,2} + T_n)^2 + T_{r,1}^2}/2}{T_n + T_a}. \quad (11)$$

Для компенсационной схемы существует зависимость флуктуационной чувствительности от  $T_a$ . Как следует из равенства (10), чувствительность принимает наилучшее (минимальное) значение при сигнале на антенне, равном нижней границе диапазона измерений. Учитывая, что эта граница, согласно (3), равна  $T_{a,\min} = T_{r,2} - T_{r,1}$ , формула (11) для расчёта числа приёмников в многоприёмниковом радиометре преобразовывается к виду

$$N = \frac{\sqrt{4(T_{r,2} + T_n)^2 + T_{r,1}^2}/2}{T_n + T_{r,2} - T_{r,1}}. \quad (12)$$

В зависимости от соотношения диапазона измерений эффективных температур шумового сигнала на антенне и собственных шумов приёмной системы имеют место три основных случая:  $T_n \gg \{T_{r,1}, T_{r,2}\}$ , величина  $T_n$  соизмерима с  $T_{r,1}$  и  $T_{r,2}$  и  $T_n \ll \{T_{r,1}, T_{r,2}\}$ .

Первый и третий случаи в меньшей степени используются в практике дистанционных исследований. Если  $T_n \gg \{T_{r,1}, T_{r,2}\}$ , то, согласно равенству (12),  $N = 2$ . В современных радиометрах применяются сверхвысокочастотные узлы и элементы нового поколения, которые постоянно модернизируются, что в разы уменьшает собственные шумы приёмной системы. Другой случай получения очень низких собственных шумов ( $T_n \ll \{T_{r,1}, T_{r,2}\}$ ) требует, как правило, криогенного охлаждения входных узлов и первых усилителей приёмного устройства радиометра, что возможно для стационарных систем, например используемых в радиоастрономии.

Для создания систем дистанционного зондирования Земли на базе многоприёмниковых радиометров наиболее приемлемым для применения на практике является второй случай, когда собственная шумовая температура радиометра примерно равна эффективным температурам опорных источников шума. На рис. 4 приведены графики, по которым можно определить число приёмников в многоприёмниковой схеме радиометра для достижения одинаковой чувствительности с идеальным компенсационным радиометром.

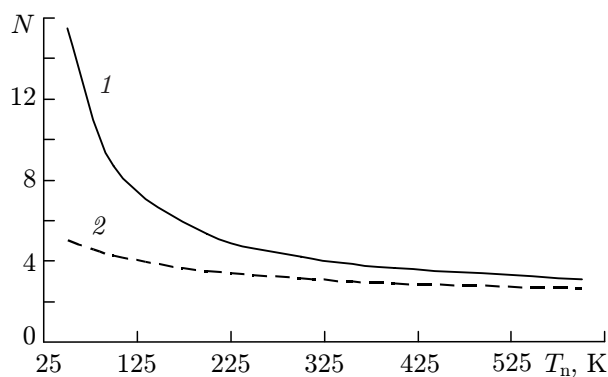


Рис. 4. Зависимости числа приёмников  $N$  в многоприёмниковой схеме от эффективной температуры  $T_n$  собственных шумов приёмников для случая одинаковой флуктуационной чувствительности многоприёмниковой схемы со схемой одноприёмникового компенсационного идеального радиометра, построенные для диапазонов измерений  $0 \div 320$  К (кривая 1) и  $100 \div 320$  К (кривая 2)

На рис. 4 приведены графики, по которым можно определить число приёмников в многоприёмниковой схеме радиометра для достижения одинаковой чувствительности с идеальным компенсационным радиометром.

На графике кривые построены для двух диапазонов измерения:  $0 \div 320$  К ( $T_{r,1} = T_{r,2} = 320$  К) и  $100 \div 320$  К ( $T_{r,1} = 220$  К,  $T_{r,2} = 320$  К), наиболее часто используемых в дистанционном зондировании различных природных сред. Поскольку дробное число приёмников не имеет смысла, при использовании графиков для определения числа приёмников в многоприёмниковом радиометре необходимо округлять результат до натурального числа в сторону увеличения. Из графиков следует, что, например, при шумовой температуре приёмников 200 К применение шести параллельно работающих приёмников позволит достичь чувствительности идеального варианта компенсационной радиометрической схемы для диапазона измерения шумовой температуры антенны  $0 \div 320$  К, а при диапазоне измерений  $100 \div 320$  К для это достаточно четырёх приёмников. Понятно, что применение в составе многоприёмникового радиометра большего числа приёмников позволит превзойти флуктуационную чувствительность компенсационного идеального радиометра полной мощности.

Отсюда следует одно из достоинств радиометрической схемы, созданной по принципу многоприёмниковости. С одной стороны, можно создать радиометрическую систему с одним приёмным каналом с высокой чувствительностью, применив дорогостоящие, с малыми потерями и хорошими свойствами, пассивные сверхвысокочастотные узлы, усилители и смесители с низкой температурой шумов и тщательно изготовив входной тракт. С другой стороны, можно построить радиометр с несколькими приёмниками с применением дешёвых интегральных микроволновых усилителей со средними шумовыми свойствами, изготовить сверхвысокочастотный узел на единой подложке и в едином технологическом цикле, что неизбежно приведёт к увеличению потерь и росту собственных шумов, но в конечном итоге получить ту же чувствительность, что и в одноприёмниковой схеме, более дорогой и тщательно выполненной.

#### 4. КАЛИБРОВКА МНОГОПРИЁМНИКОВОГО РАДИОМЕТРА

Другим достоинством многоприёмникового радиометра является значительное упрощение процесса калибровки для настройки требуемой передаточной характеристики, что в общем случае свойственно всем радиометрам, в основе работы которых лежит модифицированный метод нулевого приёма. Суть калибровки заключается в переносе эталонных сигналов, подаваемых на вход радиометра, на внутренние опорные источники шума, где они накапливаются и в дальнейшем, при работе радиометра, используются как эталонные, определяющие установленную передаточную характеристику. Первый из шумовых эталонов, подключаемый на вход радиометра вместо антенны, определяет смещение характеристики преобразования, второй — её наклон (двухточечный метод). Алгоритм калибровки многоприёмникового радиометра заключается в следующем. Согласно равенству (3) верхняя граница диапазона измерений  $T_{a,max} = T_{r,2}$  и достигается при  $t_{pwm} = 0$ . Нижняя граница диапазона измерений  $T_{a,min}$  определяется разностью  $T_{r,2} - T_{r,1}$  при  $t_{pwm} = t_{apm}$ .

В данном радиометре калибровка проходит в полуавтоматическом режиме под управлением микроконтроллера с применением цифро-аналоговых преобразователей и выполняется в два этапа. Она начинается с подключения на вход радиометра вместо антенны эталона с шумовой температурой, определяющей верхнюю границу диапазона измерения:  $T_{s,max} = T_{s,max}$ . На этом этапе калибровки канал подшумливания выключен, что выполняется установкой длительности  $t_{pwm} = 0$ . Регулировка сигнала  $T_{r,2}$  проводится одновременно по всем приёмным каналам изменением температуры согласованной нагрузки каждого приёмника (изменение температуры локального нагревателя). Для каждого приёмника регулировка температуры согласованной нагрузки осуществляется до исчезновения модуляции на входе компаратора. При этом на выходе компаратора имеются случайно повторяющиеся переходы между уровнями логических нуля и единицы.

После того как все приёмные каналы отрегулированы на верхнюю границу диапазона измерений, на вход радиометра подключается эталон с шумовой температурой, определяющей нижнюю границу диапазона:  $T_{s,\min} = T_{a,\min}$ . Время  $t_{\text{pwm}}$  устанавливается равным  $t_{\text{арм}}$ , т. е. на протяжении этого этапа калибровки канал подшумливания постоянно включён. Регулировка осуществляется во входном блоке сигнала подшумливания  $T_{r,1}$ . Поскольку в радиометре канал подшумливания один на все приёмники, регулировка  $T_{r,1}$  проводится по всем каналам последовательно. Настройка каждого приёмника на нижнюю границу диапазона проводится до исчезновения модуляции на входе соответствующего компаратора (аналогично первому этапу калибровки). Для каждого приёмного канала в микроконтроллере формируются свои коды для управляемого аттенуатора, которые в процессе работы поступают в канал подшумливания.

На рис. 5 приведён график зависимости флуктуационной чувствительности от числа приёмников многоприёмникового модифицированного нулевого радиометра  $L$ -диапазона на длину волны 18 см с полосой принимаемых электромагнитных сигналов 100 МГц. На вход подавался шумовой сигнал от калибровочного узла, величина которого соответствовала середине диапазона измерений 0÷300 К. Приведённая на графике чувствительность для одного приёмника рассчитывалась усреднением чувствительностей шести приёмников. Для построения пунктирной кривой использовалась формула (9). Время измерения составляло 1 с. Таким образом, экспериментальные данные по чувствительности многоприёмникового радиометра удовлетворительно согласуются с результатами теоретических исследований, согласно которым чувствительность растёт пропорционально квадратному корню из числа приёмных каналов. Максимальное отклонение полученной кривой от зависимости (9) не превысило 8 %.

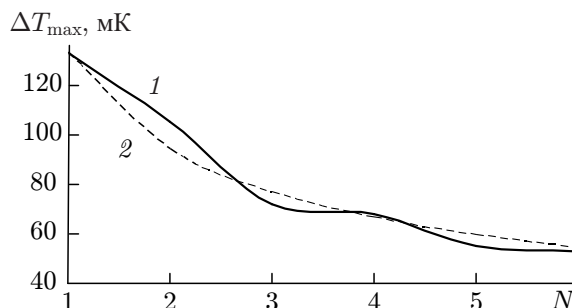


Рис. 5. Зависимость флуктуационной чувствительности многоприёмникового радиометра от числа приёмников. Кривая 1 соответствует экспериментальным данным, 2 — теоретическим расчётам по формуле (9)

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание радиометров по многоприёмниковым схемам приводит к увеличению габаритов, массы изделий и потребляемой ими мощности. При повышении чувствительности объём радиометра увеличивается квадратичным образом. Например, для увеличения чувствительности в 2 раза его объём возрастает в 4 раза. Но, с одной стороны, развитие нанотехнологий, гибридных интегральных схем, создание радиометрических каналов на подложке позволило разработать в рассматриваемом микроволновом диапазоне многоприёмниковый радиометр без значительного увеличения габаритов, массы и потребляемой мощности. С другой стороны, многоприёмниковый радиометр характеризуется повышенной работоспособностью и надёжностью, что является особенно важным при автономном базировании, когда нет возможности оперативного ремонта (например, в высокоприоритетных, требующих безотказной работы системах космического базирования, специального назначения). Отказ одного из приёмников незначительно снижает флуктуационную чувствительность многоприёмникового радиометра при сохранении его полной работоспособности.

Применение многоприёмниковой схемы позволило уменьшить влияние ослабления сигнала при его прохождении через узлы входного блока радиометра на точность измерений. Тем самым, было оправдано использование модуляции для реализации нулевого метода, которая принципи-

ально ухудшает чувствительность, но является необходимой для стабильности функционирования радиометра.

Таким образом, использование в основе построения микроволнового радиометра принципа многоприёмниковости и нулевого метода позволило улучшить три следующих характеристики радиометра: чувствительность (одна из важнейших характеристик любой приёмной системы), стабильность параметров во времени и при изменении условий окружающей среды (достигнутую применением модифицированного нулевого метода) и надёжность работы. Повышение флуктуационной чувствительности многоприёмниковой системы обусловлено увеличением суммарного времени накопления сигнала всеми приёмниками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-07-98009 p\_сибирь\_a и 15-07-04971\_a).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Н. А., Воронков В. Н., Никитский В. П., Панченко В. А. и др. // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43, № 9. С. 1061.
2. Смирнов М. Т., Халдин А. А. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 12. С. 160.
3. Смирнов М. Т., Ермаков Д. М. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 2. С. 92.
4. Астафьева Н. М., Раев М. Д., Шарков Е. А. // Природа. 2006. № 9. С. 17.
5. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 415 с.
6. Розанов С. Б., Завгородний А. С., Логвиненко С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 708.
7. Финкель М. И., Масленников С. Н., Гольцман Г. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 924.
8. Черный И. В., Чернявский Г. М., Успенский А. Б., Пегасов В. М. // Исследование Земли из космоса. 2003, № 6. С. 35.
9. Односецев В. А. // Межвуз. сб. «Радиоизмерительная аппаратура для решения задач ЭМС РЭС». Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, 1993. С. 32.
10. Ворсин Н. Н., Милицкий Ю. А., Шаинский В. М., Эткин В. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 8. С. 931.
11. Бордонский Г. С., Филатов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35, № 8. С. 652.
12. Филатов А. В. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 7. С. 888.
13. Ипатов А. В., Берлин А. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 5. С. 712.
14. Филатов А. В., Винокуров В. М., Мисюнас А. О. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 1. С. 90.
15. Филатов А. В. Нулевой метод в радиометрических измерениях. Томск: ТУСУР, 2010. 206 с.
16. Краус Д. Д. Радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1973. 456 с.
17. Hersman M. S., Poe G. A. // IEEE Trans. 1981. V. MTT-29, No. 1. P. 32.
18. Brown S. T., Desai S., Lu W., Tanner A. B. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2007. V. 45, No. 7. P. 1908.

Поступила в редакцию 21 апреля 2015 г.; принята в печать 27 августа 2015 г.

**A NEW PRINCIPLE FOR CONSTRUCTION OF MICROWAVE MULTIRECEIVER  
RADIOMETERS USING A MODIFIED METHOD OF ZERO MEASUREMENT***A. V. Filatov*

We consider a microwave multireceiver radiometer based on in-parallel operated receiving channels using the principle of zero balance and measuring the antenna signal by all receivers in the same spectral range with time division. This yields a higher fluctuation sensitivity than in the case of an ideal full-power compensatory radiometer while achieving a high stability of measurements by a modified method of zero measurement.