

ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

**А.В. Убайчин, А.В. Филатов,
П.Е. Орлов**



**Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР)

А.В. Убайчин, А.В. Филатов, П.Е. Орлов

ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

Учебное пособие

Томск

2014

УДК 621.37

Рецензент:

Гошин Г.Г., д-р техн. наук, проф. каф. Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники

А.В. Убайчин

Основы микроволновой радиометрии. Учебное пособие / А.В. Убайчин А.В. Филатов, П.Е. Орлов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 85 с.

В учебном пособии приведены и систематизированы основные сведения, необходимые для введения в проблематику методик и техники приёма слабых стохастических электромагнитных сигналов тепловой природы. Приводится сравнительный анализ схемотехнических методов построения измерительной аппаратуры и оценка эффективности ее применения. Пособие включает в себя материалы по основам микроволновой радиометрии и антенным радиометрическим измерениям.

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по программе «Микроволновая техника и антенны» направления 11.04.01 «Радиотехника» по дисциплине «Измерение параметров и характеристик микроволновых устройств и антенн».

(с) Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники 2014

(с) А.В. Убайчин, А.В. Филатов, П.Е. Орлов 2014

Содержание

Содержание	4
1 Область знания	5
2 Что измеряют радиометры	7
2.1 Тепловое излучение материальных тел	7
2.2 Основные физические величины, лежащие в основе радиотеплолокации .	8
2.3 Закон Планка.....	10
2.4 Излучение реальных тел.....	11
2.5 Прием радиотеплового излучения.....	14
2.6 Численная оценка уровня сигнала радиометра.....	18
2.7 Области использования радиометрии.....	19
3 Радиометрические системы.....	22
3.1 Сложность приема радиотеплового излучения.....	22
3.2 Флуктуационная чувствительность радиометров.....	22
3.3 Структурные схемы радиометров	25
3.3.1 Компенсационный радиометр.....	25
3.3.2 Корреляционный радиометр	27
3.3.3 Модуляционный радиометр (одноканальный)	28
3.3.4 Двухприемниковый модуляционный радиометр (двухтактный).....	32
3.3.5 Балансный радиометр	33
3.3.6 Нулевые радиометры	36
4 Практические вопросы применения микроволновой радиометрии	46
4.1 Медицинское применение микроволновых радиометров	46
4.2 Применение радиометрии при исследовании источников естественного радиоизлучения	46
4.3 Поиск радиотепловых аномалий	49
4.4 Радиоспектроскопия	57
4.5 Навигация летательных аппаратов.....	59
Литература	63

Введение

Среди широкого класса прикладных радиоизмерительных задач, выполняемых при помощи техники микроволнового диапазона, особое место занимают измерения, связанные с оценкой параметров собственного электромагнитного излучения материальных сред и объектов.

Данные измерения позволяют решать специфические задачи, такие как, дистанционное измерение температуры, контроля окружающей среды, экологического мониторинга, неразрушающего контроля, ранней неинвазивной медицинской диагностики и некоторых специальных приложений. В каждом из данных приложений применяются специализированные приемники электромагнитного излучения – микроволновые радиометры.

Именно специфика принимаемых радиотепловых сигналов выделяет этот тип приемников в отдельный класс. Существует несколько характерных особенностей принимаемых сигналов радиометрами:

- принимаемое излучение носит шумовой характер (непрерывный спектр),
- мощность излучения сопоставима с мощностью шумов приемной аппаратуры,
- тип принимаемых сигналов имеет одинаковую природу с тепловыми шумами приемной аппаратуры.

Исходя из этих особенностей приемники обеспечивают:

- высокое усиление сигналов антенны,
- селекцию принимаемого сигнала и собственных шумов,
- оценку параметров случайных сигналов (измерение моментных функций первого и второго порядка).

В данном учебном пособии приведены и систематизированы основные сведения, необходимые для введения в проблематику методик и техники приема слабых стохастических электромагнитных сигналов тепловой

природы. Приводится сравнительный анализ схемотехнических методов построения измерительной аппаратуры и оценка эффективности ее применения.

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по программе «Микроволновая техника и антенны» направления 11.04.01 «Радиотехника» по дисциплине «Измерение параметров и характеристик микроволновых устройств и антенн».

1 Область знания

Область радиоэлектроники, занимающаяся приемом естественного электромагнитного излучения материальных объектов называется *радиотеплолокацией*.

Термин радиотеплолокация состоит из трех смысловых составляющих:

- радио – прием электромагнитных волн;
- тепло – причина возникновения электромагнитных волн;
- локация - обнаружение.

2 Общие сведения

2.1 Тепловое излучение материальных тел

Любое материальное тело, нагретое выше нуля термодинамической шкалы Кельвина, излучает очень слабые стохастические электромагнитные сигналы. Это собственное, естественное излучение тел связано со случайными микротоками, протекающими в физических телах, и случайными перемещениями в телах микрозарядов (по аналогии с броуновским движением). Следовательно, природа излучаемых материальными телами сигналов является случайной, случайные электромагнитные поля. Микротоки и перемещения микрозарядов имеют тепловое происхождение, и при температуре абсолютного нуля отсутствуют. Так как источником возникновения случайных электромагнитных полей является термодинамическая температура, поэтому сигналы имеют шумовой характер.

Случайные электромагнитные сигналы излучают все без исключения нагретые материальные объекты: почвы, растения, облака, водные поверхности, атмосфера, и даже льды.

Физическая сущность радиотеплового излучения заключается в преобразовании внутренней тепловой энергии тела в энергию электромагнитного поля, распространяющегося за пределы этого тела. Это

преобразование выполняется множеством элементарных осцилляторов (микроскопических частиц вещества), возбуждаемых тепловым движением. Такими осцилляторами являются электроны, атомы, ионы, молекулы, обладающие свойством электрической и магнитной полярности. Характеристики этого излучения (интенсивность, спектральный состав, степень поляризации) зависят от физических свойств излучающего тела. Спектр этих сигналов является сплошным во всем диапазоне частот.

Вывод: Тепловое излучение присуще всем телам, имеющим температуру выше абсолютного нуля. Все тела с температурами выше абсолютного нуля излучают энергию в виде электромагнитных волн.

2.2 Основные физические величины, лежащие в основе радиотеплолокации

1. P – полная мощность принимаемого сигнала во всей полосе частот приемника [Вт];

2. p (малое) – спектральная мощность (мощность, нормированная к единичной полосе принимаемого сигнала, 1 Гц). Спектральная мощность p [Вт/Гц], принимаемая элементом поверхности A в телесном угле Ω равна:

$$p = I \cos \theta \times \Omega \times A, \text{ где } I \text{ – интенсивность принимаемого излучения } \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ Гц Стерад}} \right]$$

], θ – угол между нормалью к поверхности и направлением на излучатель (Рисунок 1).

3. Интенсивность принимаемого излучения пропорциональна мощности, нормированной по частоте, телесному углу приема и элемента площади, если прием происходит в надир. Интенсивность численно равна мощности, если прием происходит в надир (угол $\theta=0$) на площади 1 м^2 , в телесном угле 1 стерадиан и полосе 1 Гц.

4. Плотность потока электромагнитной энергии $s = I \Omega$.

5. Связь телесного угла с размерами поверхности, принимающей электромагнитное излучение с длиной волны λ (проиллюстрировано на Рисунке 2), определяется следующим равенством: $\Omega = \frac{\lambda^2}{A}$.

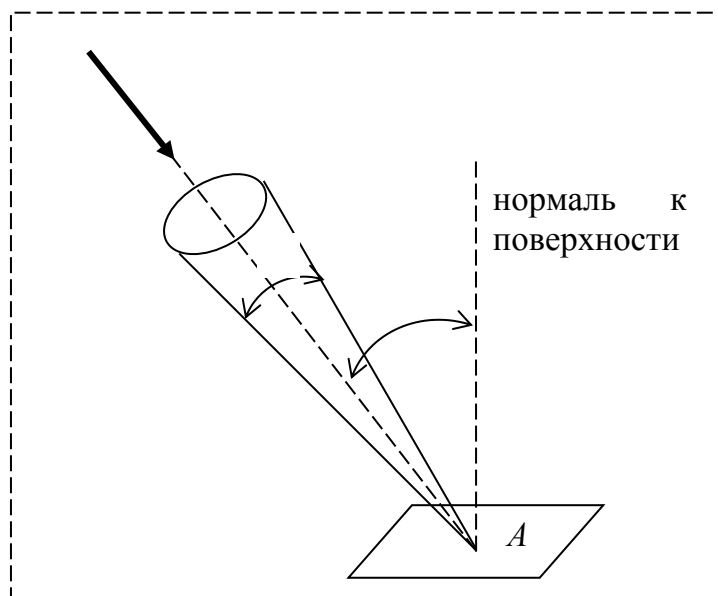


Рисунок 1 – Пояснения к приему собственного электромагнитного излучения (телесный угол, нормаль и элементарная площадка).

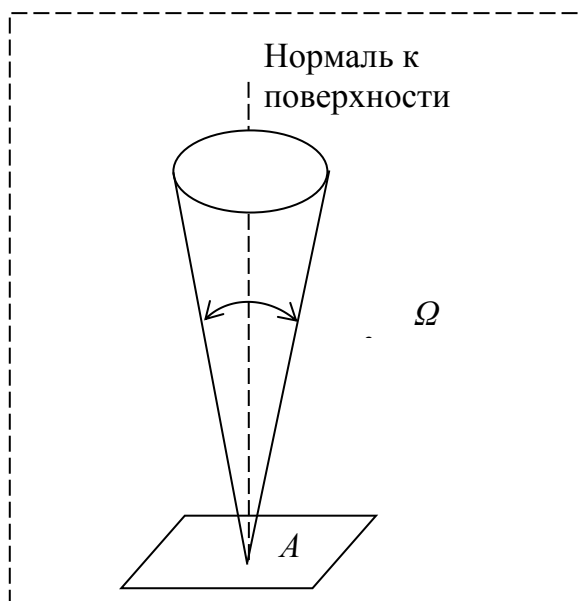


Рисунок 2 – Случай пропорциональности интенсивности и мощности .

2.3 Закон Планка

Кирхгоф (Kirchhoff G.R., 1859) показал, что хороший поглотитель является хорошим излучателем. Идеальным поглотителем является абсолютно черное тело (АЧТ). Он же является идеальным излучателем. Черное тело поглощает все излучение, падающее на него на всех длинах волн, а его собственное излучение является функцией *только* температуры и частоты. Интенсивность излучения черного тела определяется законом

излучения Планка:
$$I_{\text{АЧТ}} = \frac{2hf^3}{c^2} \times \frac{1}{\exp \frac{hf}{kT} - 1},$$
 где $h=6.63 \times 10^{-34}$ [Дж×Сек] –

постоянная Планка; $k=1.38 \times 10^{-23}$ [Дж/К] – постоянная Больцмана; $c=3 \times 10^8$ [м/Сек]– скорость света; T – абсолютная температура [К]; f – частота [Гц]. Особенностью кривых излучения Планка является смещение максимума интенсивности в сторону высоких частот с увеличением температуры.

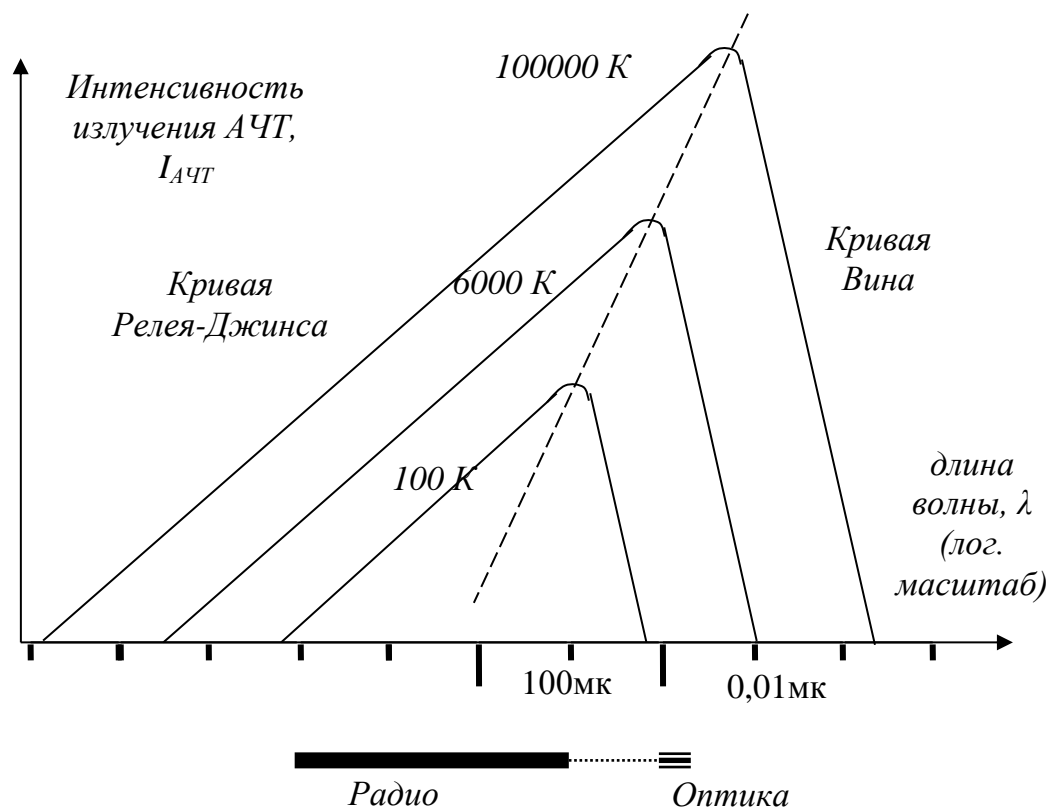


Рисунок 3 – Интенсивность излучения материальных тел .

Для радиодиапазона $hf \ll kT$ и $\exp \frac{hf}{kT} - 1 \cong \frac{hf}{kT}$. Тогда $I_{\text{АЧТ}} = \frac{2 f^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2}$ –

закон излучения Релея-Джинса (приближение для радиодиапазона), который предшествовал закону Планка. Невозможность объяснить с его помощью уменьшение интенсивности на коротких длинах волн послужило причиной Планку постулировать положение о том, что излучатель обладает дискретным набором уровней энергии (энергии с промежуточными значениями не существуют). Излучение или поглощение энергии происходит лишь дискретными количествами.

Аналогично закону Релея-Джинса существует приближение для коротких длин волн – приближение Вина.

Вывод. Собственное излучение абсолютно черного тела в радиодиапазоне подчиняется закону Релея-Джинса и зависит только от двух характеристик: физическая (собственная термодинамическая) температура тела и частота, на которой определяется его электромагнитное излучение. Однако в пределах полосы пропускания измерительного устройства интенсивность излучения можно считать практически постоянной. Поэтому интенсивность радиоизлучения характеризуется только температурой абсолютно черного тела (температура является характеристикой мощности).

2.4 Излучение реальных тел

Собственное излучение реальных тел отличается от чернотельного. Это учитывает коэффициент излучения (поглощения) тел α , который для АЧТ = 1, а для реальных тел меньше 1. То есть, реальное тело не является абсолютным излучателем и абсолютным приемником излучения. Излучение реального тела характеризуется радиояркостью температурой $T_{\text{я}} = \alpha T$ (закон излучения Кирхгофа – закон для реальных тел) Радиоярковая температура некоторого пространства является мерой интенсивности энергетического потока в заданном направлении (впервые данный термин был использован в радиоастрономии), и согласно закону излучения Кирхгофа пропорциональна

физической температуре объекта. Существует связь принимаемого излучения с физико-химическими особенностями объектов. В радиодиапазоне интенсивность излучения различных тел на каждой длине волны может быть представлена в виде "своей" эффективной температуры. Количественная оценка этой температуры в ряде случаев просто пропорциональна значениям физических величин. Это делает решение обратных задач (нахождение интересующих величин по данным дистанционного зондирования) в случае радиодиапазона очень простым (в отличие от оптического и ИК, где аналогичная операция является сложной и часто не однозначной).

Полное излучение реальных объектов определяется не только их собственным излучением, но и наличием "подсветки", которая создается одновременно действующими источниками естественного и искусственного происхождения. К естественным источникам относятся либо сплошная среда (атмосфера, космический фон), либо источники с малыми угловыми размерами, в первую очередь Солнце и Луна. Суммарная излучаемая телом энергия характеризуется "кажущейся" температурой, которая складывается из радиояркостной температуры тела и радиояркостной температуры подсвечивающего излучения. Таким образом, $T_k = T_j + \beta T_u = \alpha T + \beta T_\phi$, где α – коэффициент излучения (поглощения) тела, T – термодинамическая температура тела, β – коэффициент отражения тела, T_ϕ – радиояркостная температура подсвечивающего излучения (фона).

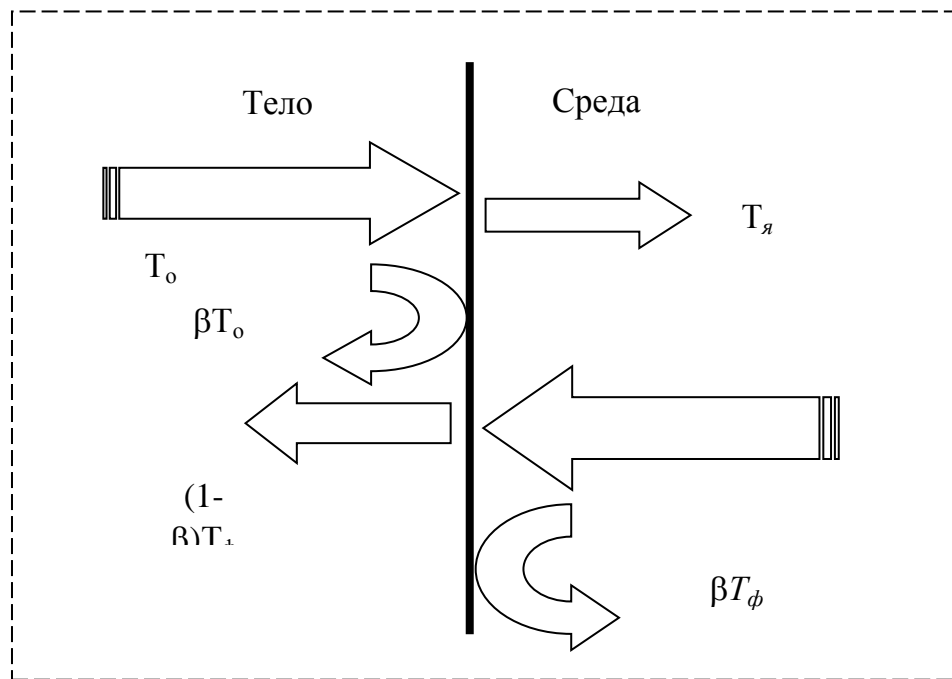


Рисунок 4 – Излучение реальных тел

Таким образом, полное излучение тела определяется собственным излучением, которое зависит как от коэффициента излучения α , так и физической температуры тела T , и отражением внешнего излучения от тела, которое определяется коэффициентом отражения β . Коэффициент излучения связан с физико-химическими свойствами тела, его строением и для разных частот различен. Коэффициент отражения β , также как и коэффициент α , зависит от целого ряда других факторов: характер поверхности тела, угол визирования, и т.п.

В качестве примера, приведем кажущиеся температуры некоторых наземных объектов на длине волны 8.6 мм: металлические конструкции – 50К (основной вклад - отражение, которое связано с яркостной температурой подсвечивающего фона); асфальт – 100-300К; реки, озера – 170-200К; здания – 230-250К; почвы и растительность – 260-275К; лесные массивы – 270-285К.

Материальные тела, как естественные источники радиотепловых излучений характеризуются не только энергетическими параметрами, но и диаграммами направленности. Для активной радиолокации (радиолокационного переизлучения) диаграмма направленности для

большинства объектов имеет изрезанную лепестковую структуру. В диаграммах радиотеплового излучения нет нулевых провалов и она более равномерная, так как излучение объекта складывается из независимых друг от друга отдельных участков тела. Поэтому, в первом приближении можно полагать, что интенсивность естественного излучения не связана с направлением.

2.5 Прием радиотеплового излучения

Радиоприемные устройства, предназначенные для измерения теплового радиоизлучения тел, называются *радиометрами* (микроволновыми радиометрами, СВЧ-радиометрами). Микроволновые радиометры измеряют слабые электромагнитные сигналы в области высоких частот, вызванные собственным излучением объектов, излучением, прошедшим через объект или отразившимся от него. Эти сигналы имеют тепловой случайный характер и их мощности измеряются величинами 10^{-21} Вт на 1 Гц полосы принимаемых частот. Для радиометров любое материальное тело является естественной радиостанцией.

С точки зрения математической статистики, радиометром измеряются шумовые электромагнитные сигналы, имеющие природу стационарных эргодических процессов с нормальным распределением. Собственно радиометр измеряет простейшую моментную функцию этих случайных процессов, а именно, моментную функцию первого порядка – среднее значение (постоянную составляющую шумов, математическое ожидание). С помощью других функций: центральной моментной функции второго порядка (дисперсии) и смешанной функции первого порядка (корреляции) определяется одна из основных характеристик радиометра, его чувствительность. Основным узлом радиометра является приемник – измеритель полной мощности, амплитудно-частотная характеристика которого имеет плоскую вершину в некоторой области частот df .

Радиометром измеряется шумовая (эффективная) температура "сопротивления" излучения антенны, и в данном случае проводится аналогия между шумящим сопротивлением *Найквиста* и сопротивлением излучения антенны.

Формула Найквиста – спектральная мощность шума p , выделяемая на зажимах активного сопротивления R , при температуре T равна: $p = kT$ (Рисунок 5а). На рис. приведена форма шумового напряжения, получаемого на выводах (полюсах) сопротивления, находящегося при термодинамической температуре T . Это напряжение имеет форму флуктуационного процесса с предельно малыми амплитудами. Среднее значение этого напряжения равно нулю. Но среднеквадратичное отличается от нуля и подчиняется закону излучения Планка:

$$\overline{v^2} = \sqrt{4kT\Delta fR}$$

Если $hf_0 \ll kT$, то выполняется приближение для экспоненциальной функции. Пример, для длины волны 1 мм (300 ГГц) и $T=150\text{K}$ произведение $hf_0=19.8 \times 10^{-23}$ [Дж]. С другой стороны произведение $kT=2.07 \times 10^{-21}$. Поэтому для миллиметровой длины волны можно считать, что сильное неравенство выполняется и экспоненту можно представить рядом из двух членов. Следовательно, любое сопротивление можно представить в виде эквивалентной схемы, содержащей два элемента: нешумовое сопротивление и последовательно включенный источник шумового напряжения с действующим напряжением $U_{ш}$. Для измерения генерируемой сопротивлением мощности шума, согласно критерия максимальной активной передаваемой мощности, к шумящему сопротивлению Найквиста необходимо подключить измерительное устройство с входным сопротивлением, номинал которого равен исследуемому сопротивлению. Мощность шумов определяется следующим образом:

$$P_{ш} = I_{ш}^2 \times R = \left(\frac{U_{ш}^2}{4R} \right) \cdot R = \left(\frac{4kT\Delta fR}{4R} \right) = kT\Delta f$$

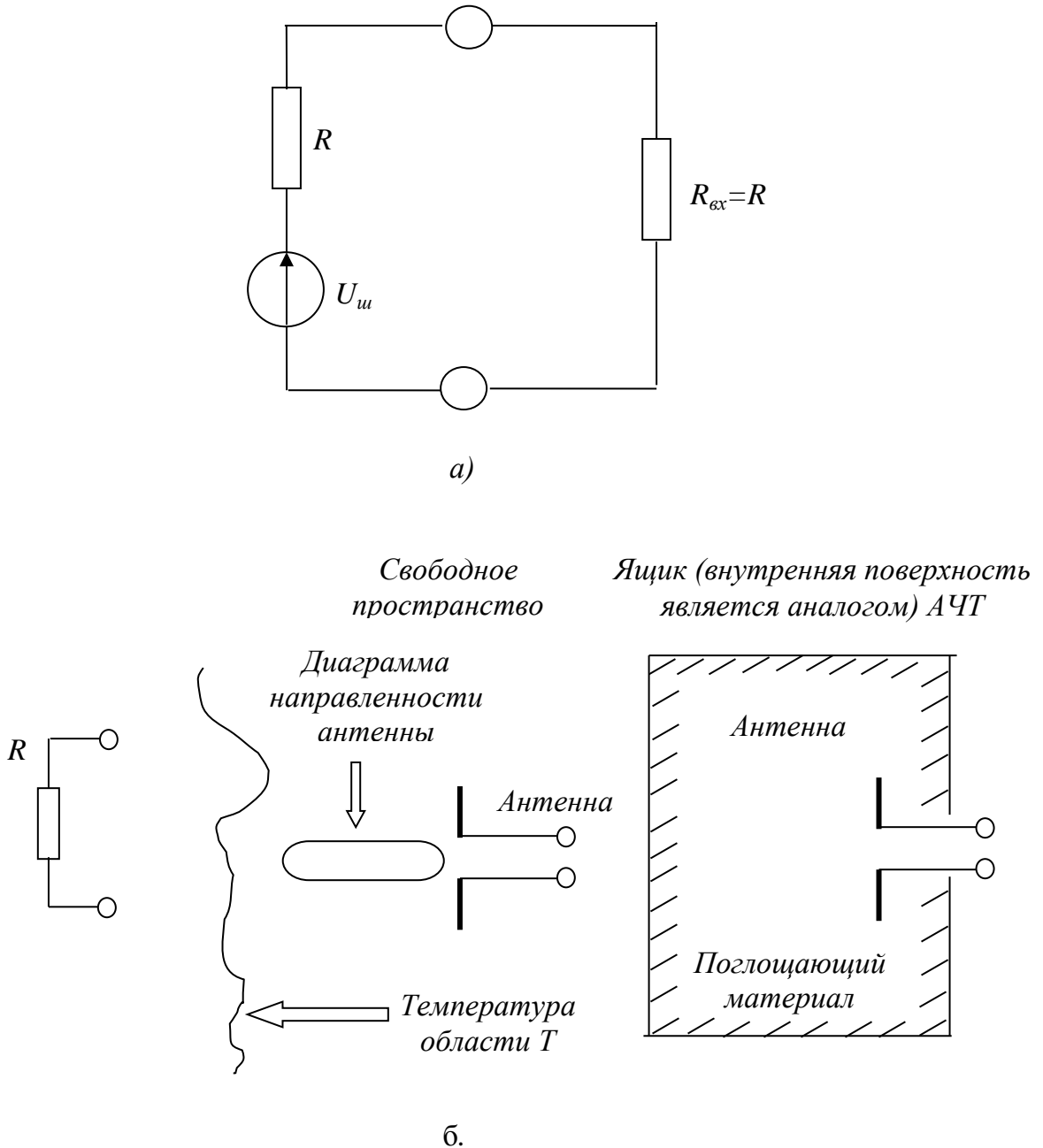


Рисунок 5 – Пояснения к формуле Найквиста и излучению сопротивления антенны

Если резистор заменить согласованной антенной без потерь с сопротивлением излучения R , то мощность шума останется неизменной в том случае, если антенна будет вести прием от области с температурой T (рисунке 5б). Докажем это утверждение.

Плотность потока электромагнитной энергии равна

$$S = I\Omega = \frac{2kT}{\lambda^2}\Omega = \frac{2kT}{\lambda^2} \times \frac{\lambda^2}{A_{эфф}} = \frac{2kT}{A_{эфф}} = 2 \frac{P}{A_{эфф}}, \text{ где } A_{эфф} - \text{ эффективная апертура}$$

антенны [м²], Ω – телесный угол [стерадиан=град²]. Откуда принимаемая антенной спектральная мощность выражается в виде

$$P = \frac{SA_{эфф}}{2} = \frac{1}{2} A_{эфф} \iint I(\theta, \varphi) D(\theta, \varphi) d\Omega, \theta - \text{ угол между зенитом и } d\Omega \text{ [рад], } \varphi - \text{ угол}$$

азимута [рад], D – нормированная диаграмма направленности антенны по мощности (безразмерная величина). Если антенна помещается внутрь абсолютно поглощающей полости с температурой T , то интенсивность принимаемого излучения постоянная во всех направлениях: $I=I_{const}$ и определяется согласно закона Релея-Джинса. Тогда

$$P = \frac{1}{2} A_{эфф} I_{const} \Omega_a = A_{эфф} \frac{kT}{\lambda^2} \Omega_a, \text{ где } \Omega_a - \text{ телесный угол диаграммы}$$

направленности антенны [стерад]. Однако $A_{эфф} \Omega_a = \lambda^2$. Следовательно, $P = kT$.

Таким образом, антенна в свободном пространстве имеет сопротивление излучения R , которое остается неизменным, если антенну поместить внутрь ящика, обладающего поглощающими свойствами (если бы в проводящем ящике отсутствовал поглощающий материал, то это была бы полость с малыми потерями, в которой сопротивление излучения антенны очень мало).

Отсюда следует следующая схема последовательности измерения сигнала: некоторое пространство – поток лучистой энергии – диаграмма направленности антенны (пространственный фильтр) – шумовая температура сопротивления излучения антенны T_a . Антенная система принимает и преобразует поток лучистой энергии в антенную температуру, которую измеряет радиометр.

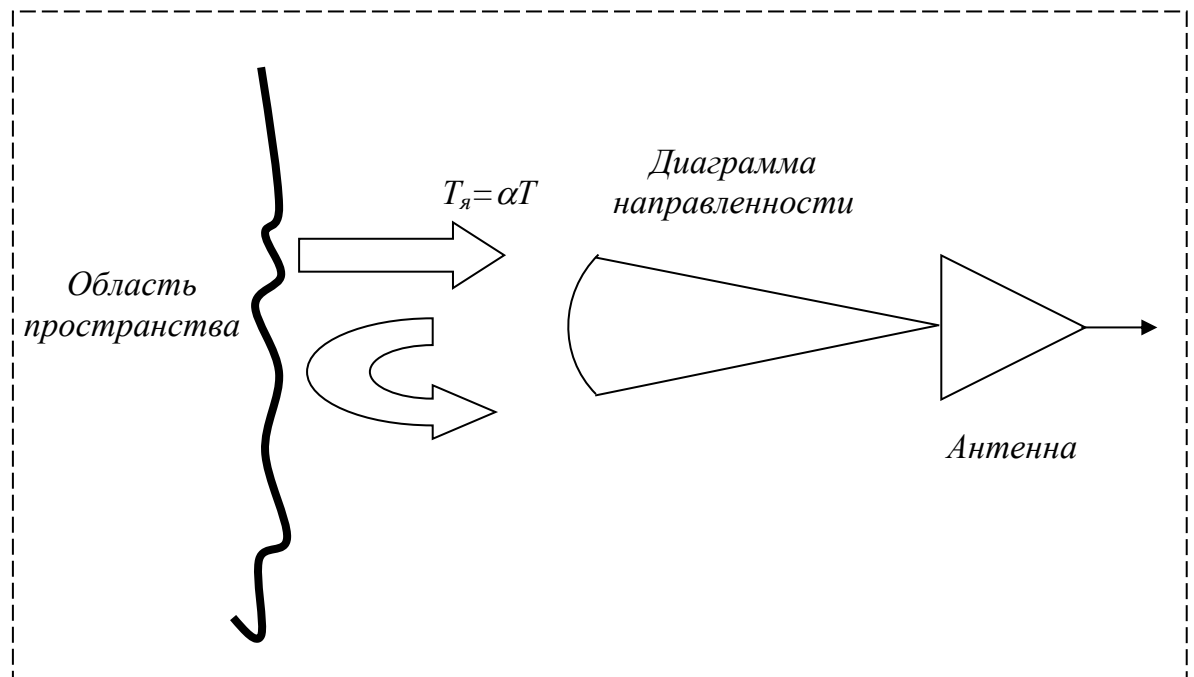


Рисунок 6 – Формирование антенной температуры

Вывод. Температура сопротивления излучения антенны определяется температурой области, которую антенна "видит" своей диаграммой направленности (в пределах луча антенны). Температура сопротивления излучения антенны называется антенной (эффективной, шумовой) температурой (если антенна не имеет потерь) T_a и данная температура является сигналом для радиометра, которую он измеряет.

Таким образом, радиометры относятся к пассивным средствам и позволяют регистрировать малые вариации интенсивности излучения, порождаемые изменениями температуры объектов (T) и температуры подсвечивающего фона (T_ϕ), а так же изменениями излучательной способности объектов (коэффициента α) и вариациями его отражательных свойств (коэффициента β).

2.6 Численная оценка уровня сигнала радиометра

Мощность на входе радиометра в случае идеальной антенны и идеального приемника для единичной эффективной температуры ($T=1\text{К}$) и

единичной полосы принимаемого сигнала ($\Delta f=1\text{Гц}$) равна нормирующему множителю, постоянной Больцмана $1,38\times 10^{-23}$ Вт.

Если $T=150\text{ К}$ и $\Delta f=100\text{ МГц}$, то полная мощность в данной полосе $p=2.07\times 10^{-16}$ Вт; Если $T=0.05\text{ К}$ и $\Delta f=100\text{ МГц}$, то $p=6.09\times 10^{-20}$ Вт (характеризует чувствительность радиометра).

2.7 Области использования радиометрии

Основным областями использования радиотеплолокации являются: радиоастрономия, пассивная радиолокация, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), медицинские приложения.

а) Радиоастрономия. Исторически первое применение радиометров произошло в данной области. Системы характеризуются большими массогабаритами (глубокое термостатирование усилительных устройств, применение хладагентов), стационарностью.

б) Параллельно с радиоастрономией развивалась пассивная радиолокация, где использовались свойства сильных радиоконтрастов различных сред. Эти особенности в основном использовались для построения систем специального назначения. Например, полет объекта вдоль границы "суша-вода", которая обладает перепадом радиоярких температур $\sim 150\text{ К}$ (вода – 150 К , суша – 300 К); определение цели на фоне неба. В последнем случае применяется антенна с игольчатой диаграммой направленности и измеряется радиоконтраст: небо – $\sim 0\text{ К}$, цель – $220\text{--}300\text{ К}$. Самолеты, невидимые активной локацией, для пассивной радиолокации являются, наоборот, отличными излучателями (аналогами АЧТ).

в) ДЗЗ. В настоящий момент дистанционное зондирование Земли является одним из основных направлений космических исследований. В последнее время этому направлению уделяется все более пристальное внимание.

Не секрет, что быстрое развитие цивилизации и недостаточно продуманное природопользование на протяжении предыдущего столетия

привело к ухудшению экологического состояния среды обитания на Земле (в настоящий момент проблема экологии сравнима с проблемой войны и мира) и подошло к катастрофическому уровню. На различных международных конгрессах, симпозиумах сравнивают угрозу антропогенно обусловленных изменений экологической обстановки с оружием массового уничтожения. Ключевым словом на всех встречах чаще всего звучит такое, как "неопределенность", т. е. нет глобальной системы наблюдения Земли. Однако, в настоящее время в научных кругах имеется достаточно четкое понимание этих проблем. Ведущими странами мира предпринимаются значительные усилия для организации контроля и улучшения экологического состояния. Так, на третьем Саммите, который прошел в 2005 году в Брюсселе, принят план реализации информационной Глобальной системы наблюдения Земли, работающей в реальном масштабе времени, для таких областей использования, как мониторинг чрезвычайных ситуаций природного и антропогенного происхождения, получение знаний о климате, мониторинг экосистем, устойчивое сельхозпроизводство, сохранение биоразнообразия и т.д. На этом же Саммите было решено Глобальную систему создавать на базе существующих и будущих, современных систем наблюдения, включая и радиометрические измерения в широком спектральном диапазоне, от волн ультрафиолетового диапазона до микроволн (длины волн от 0.2 мкм до 1 м).

Микроволновое зондирование – эффективный инструмент оперативного экологического и природоресурсного мониторинга, предназначенный для изучения внутренней структуры и оценки параметров состояния как природо-антропогенных объектов, скрытых толщей земного покрова или растительностью, так и самих сред. Это способ заглянуть внутрь исследуемого объекта и включающие его среды без разрушения их структуры. Установка на космические носители обеспечивает охват больших площадей, оценка удельных запасов биомассы лесных и экосистем.

г) Применение радиометрии в медицине для построения современных медицинских измерительных систем для диагностики заболеваний, в основном онкологического характера. Радиотермография применяется в ранней диагностике рака молочной железы, делаются попытки ее применения в гинекологии, урологии, неврологии.

Метод микроволновой радиотермометрии основан на измерении интенсивности собственного электромагнитного излучения внутренних тканей пациента в диапазоне сверхвысоких частот, которая пропорциональна температуре тканей.

Радиоволны обладают большой проникающей способностью и для волн дециметрового диапазона биологические ткани являются прозрачными. С помощью антенн-аппликаторов можно судить о температуре глубинных слоев (мощность излучения пропорциональна абсолютной температуре внутри объекта). Микроволновые методы позволяют проводить бесконтактную раннюю диагностику рака с абсолютной безвредностью, обнаружение быстрорастущих опухолей, непрерывный контроль за ходом лечения. Основная диагностическая особенность метода заключается в определении повышенной температуры внутри тканей в случае усиленного метаболизма клеток (при онкологическом заболевании). Согласно существующим представлениям, изменению температуры тканей обычно предшествуют структурные изменения, которые обнаруживаются. Удельное тепловыделение в опухоли прямо пропорционально скорости ее роста, т.е. быстро растущие опухоли более "горячие", и поэтому лучше видны на термограммах. В настоящее время, например, выявляемость рака молочной железы методом микроволновой радиотермометрии составляет 90%. Учитывается абсолютная безвредность метода и возможность проведения многократных исследований.

3 Радиометрические системы

3.1 Сложность приема радиотеплового излучения

Данное излучение по своей структуре и статистическим свойствам является шумовым и аналогично собственным шумам радиоприемной аппаратуры. В обычных радиоприемниках и активных радиолокационных станциях влияние собственных шумов уменьшают путем частотной селекции и временного стробирования. При приеме радиотепловых сигналов данные меры не применимы, так как сами сигналы имеют шумовой характер.

В статистической радиотехнике, в теории измерения шумового сигнала на фоне собственных шумов измерителя доказано, что для оптимального приема могут применяться два подхода:

1. прием с операцией квадратичного детектирования и интегрирования и последующей компенсацией постоянной составляющей собственных шумов.
2. корреляционный прием двумя независимыми приемниками с последующим интегрированием.

3.2 Флуктуационная чувствительность радиометров

Флуктуационная чувствительность является одной из важнейших характеристик радиометров.

Чувствительность радиометров численно равна эффективной температуре сигнала $dT_{мин}$, при подаче которого на вход радиометра отношение "сигнал/шум" на выходе равно 1.

Чувствительность ограничивается уровнем мощности собственных шумов радиометра, приведенным к входу (потенциальная чувствительность). В реальных радиометрических системах дополнительное существенное влияние оказывают:

- медленные и быстрые флуктуации уровня собственных шумов радиометра;
- флуктуации коэффициента усиления каскадов.

Полное влияние всех снижающих чувствительность факторов учитывает техническая чувствительность, или просто чувствительность.

Увеличение чувствительности возможно в случаях:

1. Расширение полосы частот приемной части до детектора. С одной стороны, расширение вызывает уменьшение помехоустойчивости, что связано с вопросами электромагнитной совместимости. С другой стороны расширение полосы частот накладывает ограничения на спектральные измерения.

2. Сужение полосы после детектора. Данный прием ухудшает динамические характеристики системы, возникают ошибки при анализе быстропротекающих процессов, при сканировании сред с движущегося носителя.

Согласно оптимальной концепции приема слабых сигналов случайного характера, радиометр в простейшие реализации должен содержать последовательно соединенные: усилитель высокой частоты (УВЧ) – квадратичный детектор – фильтр низкой частоты (ФНЧ). На рисунке df – полоса частот принимаемого сигнала до детектора, dF – полоса частот фильтра нижних частот (после детектора).

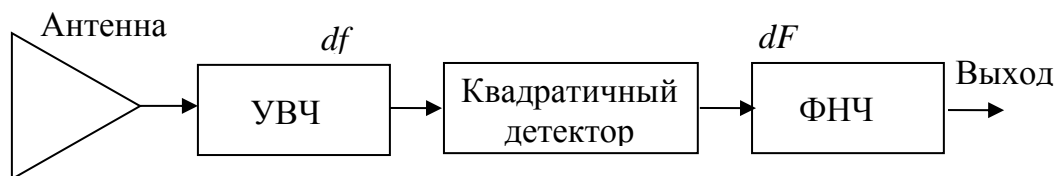


Рисунок 7 – Структурная схема компенсационного радиометра

Отношение "сигнал/шум" на входе радиометра равно: T_c/T_u , где эффективная температура собственных шумов T_u пересчитана на вход радиометра, T_c – шумовая температура сигнала. Отношение не изменится после усиления по высокой частоте. На выходе детектора, после операции квадратичного детектирования шум сохраняет широкополосный характер, но его спектр переносится в область низких частот. Отношение "сигнал/шум" на выходе детектора равно $(T_c/T_u)^2$. На выходе ФНЧ, имеющего

эквивалентную полосу пропускания dF , мощность шума меньше в df/dF – раз. Следовательно, выходное отношение "сигнал/шум" равно

$$\left(\frac{T_c}{T_u} \right)^2 = \frac{df}{dF}.$$

Согласно определению чувствительности, последнее соотношение приравниваем единице. Откуда, минимально обнаружимый сигнал равен:

$$T_{c,\min} = T_u \times \sqrt{\frac{dF}{df}}$$

Таким образом, радиометры от других приемных устройств отличает широкая полоса частот принимаемых сигналов и большое время измерения, т.е. один результат измерения получается за большой интервал времени. Данная формула определяет потенциальную чувствительность (максимально возможную) и не учитывает дрейфа и флуктуаций собственных шумов и коэффициента передачи измерительного тракта. Поэтому имеет место для идеального радиометра.

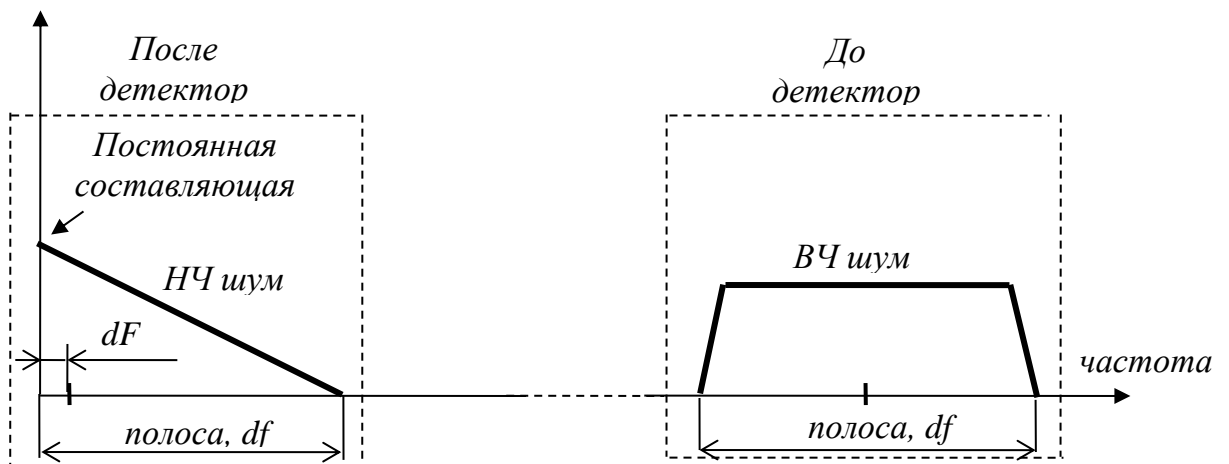


Рисунок 8 – Соотношение полос пропускания фильтров приемника.

3.3 Структурные схемы радиометров

Из всего разнообразия существующих схем основными являются компенсационные, модуляционные, корреляционные схемы.

3.3.1 Компенсационный радиометр

Компенсационный радиометр почти полностью повторяет схему оптимального радиометра. Классическая схема компенсационного радиометра (см. рисунок 9) (радиометра полной мощности) содержит радиометрический приемник РП, на вход которого подключается антенна А, а выход соединяется с квадратичным детектором КД. Так как радиометр измеряет очень слабые сигналы, следовательно, для правильной их интерпретации приемник радиометра обладает очень высоким коэффициентом усиления. Постоянная составляющая сигнала с выхода квадратичного детектора усиливается в низкочастотном усилителе УНЧ, интегрируется для увеличения радиометрического выигрыша фильтром низких частот ФНЧ (повышается отношение сигнал – шум) и поступает на один вход регистратора, на другой вход которого подается сигнал с компенсатора – регулируемого резистивного делителя напряжения опорного источника. С помощью управляемого делителя напряжения показания регистратора устанавливаются на ноль при отсутствии сигнала. Тем самым компенсируется напряжение, вызванное собственными шумами радиометрического приемника, имеющими одинаковую природу, что и сигнал антенны. При появлении сигнала схема разбалансируется и показания регистратора отображают по шкале эффективную температуру антенны.

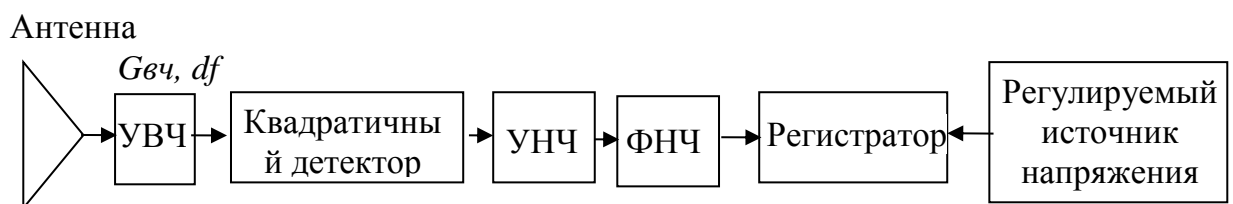


Рисунок 9 – Структурная схема компенсационного радиометра.

Так как сигнал антенны измеряется непрерывно, компенсационные радиометры с одной стороны обладают максимально возможной чувствительностью, но с другой стороны характеризуются сильной зависимостью показаний от изменений коэффициента усиления радиометрического приемника и его собственных шумов. Флуктуации выходного сигнала, возникающие вследствие случайных изменений коэффициента усиления и флуктуации, вызванные шумом в системе, не позволяют достигнуть теоретической чувствительности. Изменения коэффициента усиления приемника складываются из флуктуаций усиления отдельных каскадов, которые определяются нестабильностью напряжений источников питания, изменением температуры усилительных элементов при больших температурных перепадах рабочей среды (основные факторы, вызывающие вариации коэффициента усиления приемного тракта). Нестабильность коэффициента усиления вызывает паразитный сигнал, маскирующий полезный сигнал. Так, приемник, обеспечивающий разброс коэффициента усиления 0,1 дБ при усилении 100 дБ и шумовой температуре несколько сот градусов, имеет выходные флуктуации несколько градусов, превышая на порядок потенциальную чувствительность.

Интенсивность флуктуаций коэффициента усиления радиометрического приемника изменяется с изменением частоты по закону, близкому к закону фликкер-шума. Энергетический спектр этих флуктуаций имеет вид $1/f^\alpha$, где $\alpha = 1.7 \div 2.5$. Флуктуации наиболее сильны около нулевой частоты (аномальные флуктуации) и значительно уменьшаются с увеличением частоты. Это осложняет применение высокочувствительной схемы компенсационного радиометра, измеряющей сигнал антенны вблизи нулевой частоты, на практике ввиду ее малой стабильности.

Изменение коэффициента усиления радиометра является первым фактором, снижающим точность работы прибора. Вторым дестабилизирующим фактором является изменение собственных шумов приемника. Так как они имеют ту же природу, что и измеряемые шумы

антенны, поэтому они ничем не отличаются от измеряемого сигнала. Следовательно, изменение собственной шумовой температуры приемника адекватно появлению сигнала на входе.

Таким образом, главные дестабилизирующие факторы в работе микроволновых радиометров вызваны изменениями коэффициента усиления радиометрического приемника и его шумовой температурой (изменение коэффициента шума). Конечно проблему стабилизации коэффициента усиления можно решить термостатированием усилителей и всего измерительного тракта, что приводит к созданию громоздких стационарных систем со значительными энергетическими затратами. К другому пути решения этой проблемы относится создание новых методов и принципов работы радиометров, в результате применения которых данные приемные системы становятся менее чувствительными к изменениям выше описанных параметров аппаратуры.

Вывод. Преимущества описанной схемы заключаются в простоте исполнения и высокой потенциальной чувствительности, которая на практике никогда не реализуется. К ее недостатку относится существенное влияние дрейфа коэффициента усиления и собственных шумов. При изменении коэффициента усиления измерительного тракта ($G_{вч}$ и K_u) и собственных шумов ($T_{ш}$) компенсация нарушается. Это вызывает паразитный сигнал на выходе радиометра, регистрируемый индикатором так же, как и полезный сигнал. Чтобы это явление исключить, требуется чрезвычайно высокая стабильность коэффициента усиления и полных собственных шумов. Для этого требуется тщательная термостабилизация всего устройства, что практически трудно реализовать, особенно в портативных, переносных системах.

3.3.2 Корреляционный радиометр

Двухприемниковый радиометр. Проведение следующей операции:

$$\int (u_c + u_{ш1}) \cdot (u_c + u_{ш2}) dt$$

где u_c – напряжение сигнала на выходе идентичных приемников; $u_{ш1}$ и $u_{ш2}$ – напряжения собственных шумов первого и второго приемников соответственно. Схема умножения и фильтр образуют коррелятор. На выходе умножающего устройства:

$$u = K [u_{2c} + u_c (u_{ш1} + u_{ш2}) + u_{ш1} u_{ш2}]$$

где K – коэффициент пропорциональности.

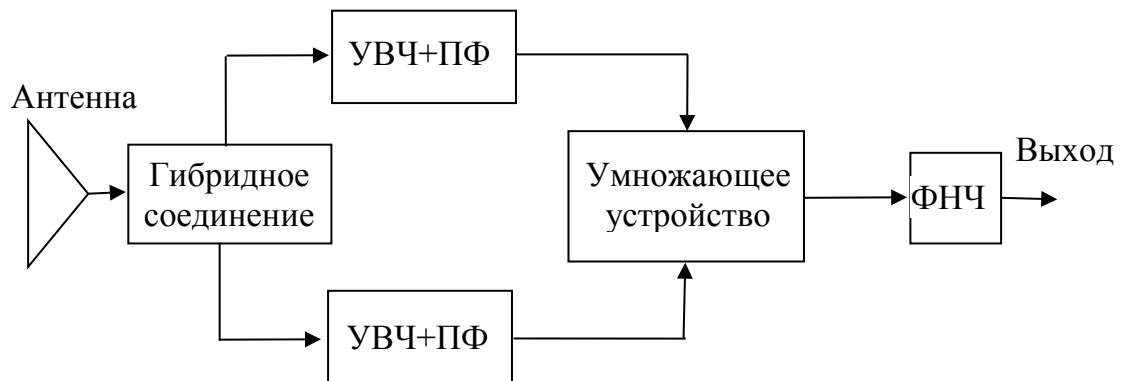


Рисунок 10 – Устройство корреляционного радиометра

Напряжение сигнала в каналах сильно коррелировано, собственные шумы каналов не коррелированы.

Недостатки: жесткие требования к идентичности каналов АЧЧ и ФЧХ приемных каналов.

Достоинства: отсутствие квадратичного детектора, отсутствие влияния собственных шумов, влияние неидентичности фазочастотных характеристик каналов. Флуктуации этих характеристик приводят к возникновению дополнительных флуктуаций, аналогичных флуктуациям, вызываемых нестабильностью коэффициента усиления.

3.3.3 Модуляционный радиометр (одноканальный)

При рассмотрении компенсационного радиометра были названы два основных дестабилизирующих фактора, снижающих точность измерений. Данные факторы можно значительно уменьшить, если в схеме радиометра применить модуляционный принцип дифференциальных измерений. На

входе радиометра устанавливают модулятор М и опорный источник шума – генератор шума ГШ, играющий роль имитатора антенны. В современных радиометрах в качестве такого источника, как правило, применяют либо согласованную нагрузку, либо полупроводниковый генератор на лавинно-пролетных диодах. Поскольку изменения выходного сигнала радиометра, обусловленные собственными шумами и флуктуациями нестабильности усиления, статистически независимы, рассмотрим их влияние на выходной сигнал модуляционного радиометра отдельно.

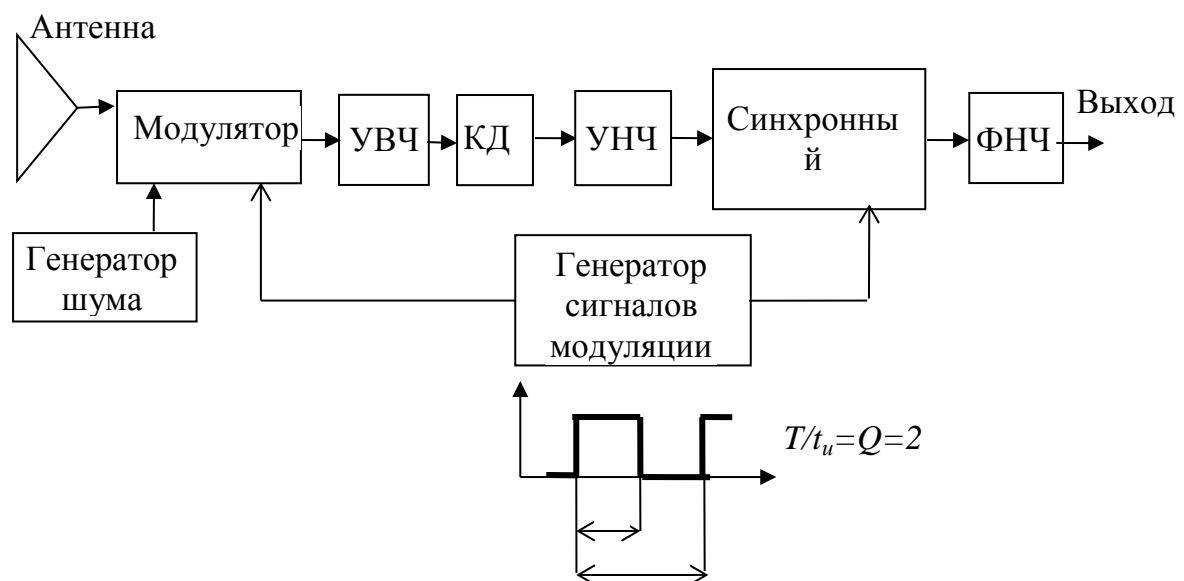


Рисунок 11 – Устройство модуляционного радиометра

В модуляционном радиометре вход радиометрического приемника попеременно подключается либо к антенне, либо к опорному генератору, вырабатывающему шумовой сигнал неизменной мощности. Используется принцип периодического сравнения мощности антенного сигнала с мощностью сигнала антенного эквивалента – генератора шума со стабильной шумовой температурой. В подавляющем большинстве в таком типе радиометров применяется амплитудная импульсная модуляция симметричным сигналом меандра.

Таким образом, за счет модуляции сигнала антенны и опорного сигнала, измерения переносятся на более высокие частоты, где флуктуации коэффициента усиления приемника слабы. Демодуляция в двухтактном

синхронном детекторе На выходе синхронного детектора СД усиливается постоянная составляющая сигнала и на выходе измеряется напряжение, равное:

$$U_{\text{вых}} = G \beta K [(T_a + T_{ш}) - (T_{он} + T_{ш})] = G \beta K (T_a - T_{он}),$$

где $G\beta K$ - произведение трех коэффициентов, соответственно определяющих усиление сигналов по мощности в приемнике, передачу квадратичного детектора, усиление сигналов по напряжению в низкочастотной части радиометра, и также учитывающих ослабление сигналов в модуляторе, соединителях и соединениях; T_a и $T_{он}$ - эффективные температуры антенны и опорного генератора, соответственно, $T_{ш}$ - приведенная к входу приемника собственная шумовая температура радиометра.

В результате:

а). собственные шумы не подвергаются модуляции и после операции вычитания постоянная составляющая собственных шумов радиометра $T_{ш}$ исключаются на выходе радиометра;

б). период модуляции выбирается существенно меньше времени корреляции аномальных флуктуаций коэффициента усиления (вблизи нулевой частоты), и тем самым происходит ослабление их влияния на измерения.

Применяя модуляцию, можно заметно уменьшить влияние вариаций коэффициента усиления на точность измерений. Действительно, в этом случае, при достаточно высокой частоте модуляции, сигнал на выходе квадратичного детектора лежит не на нулевой частоте, а на частоте модуляции, и, следовательно, дисперсия коэффициента усиления определяется интегрированием спектральной плотности флуктуаций усиления вблизи частоты модуляции. На выходе синхронного детектора выделяется постоянная составляющая, спектр шумов смещается к нулевой частоте.

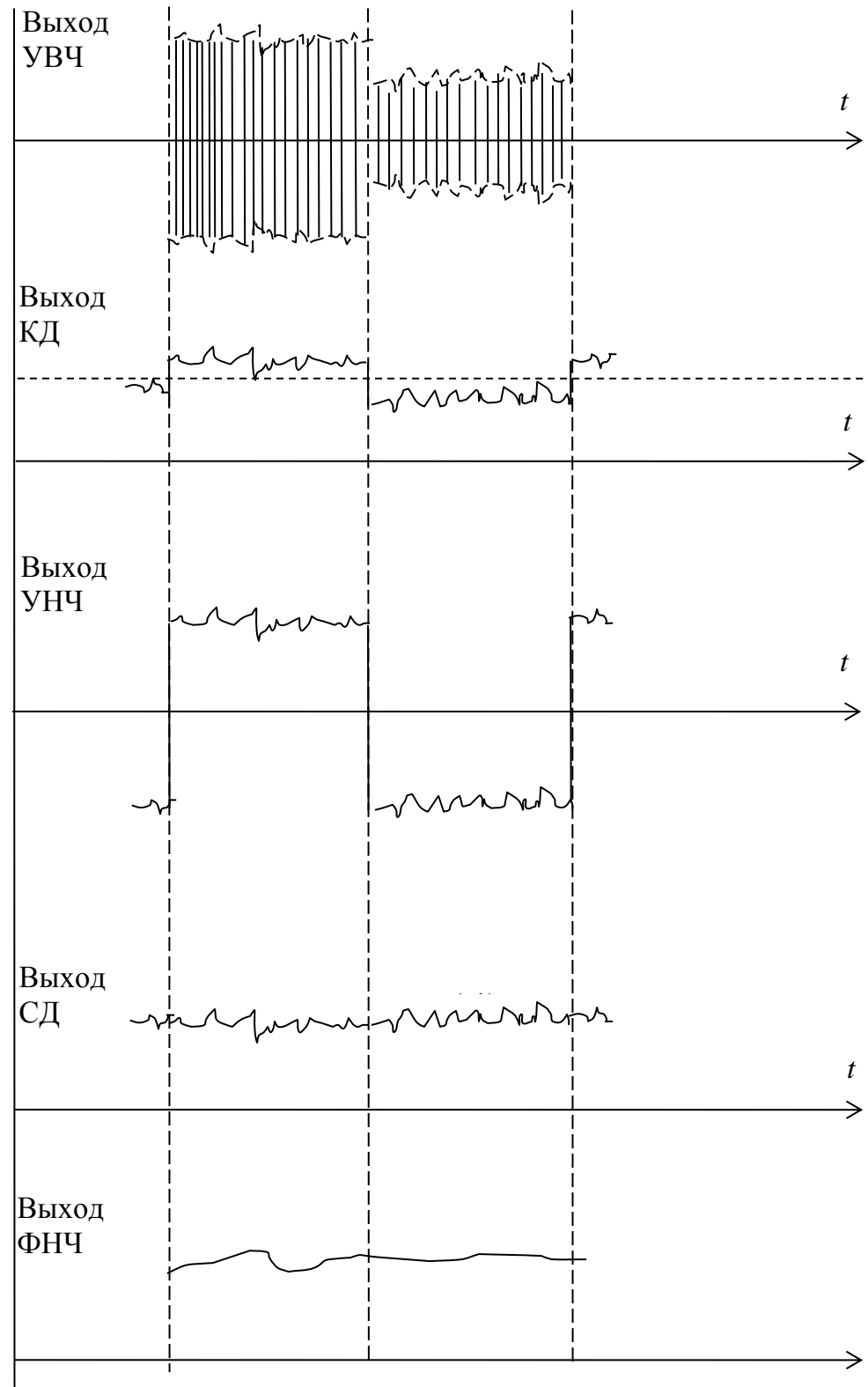


Рисунок 12 – Сигналы в модуляционном радиометре

Достоинства: устранение влияния дрейфа собственных шумов и ослабление влияния изменений и дрейфа коэффициента усиления.

Недостатки: Потери в модуляторе, влияние на результаты измерений дрейфа коэффициента усиления приемника.

3.3.4 Двухприемниковый модуляционный радиометр (двухтактный)

Необходимость применения радиометров с несколькими приемниками заключается в том, что флуктуационная чувствительность таких радиометров растет пропорционально \sqrt{N} , где N – число одинаковых приемников, работающих на общую антенну в одной области частот.

На рисунке 13 приведена структурная схема модуляционного радиометра с двумя приемниками, построенная по схеме Грахама, которая включает в себя антенну A , опорный генератор шума $ОГШ$, переключатель-модулятор $ПК$ конфигурации 2×2 , два идентичных радиометрических приемника $РП_1$ и $РП_2$ и устройство управления $УУ$. Каждый приемник аналогичен приемному каналу обычного модуляционного радиометра и состоит из усилителя высоких частот $УВЧ$, квадратичного детектора $КД$, усилителя низких частот $УНЧ$, синхронного детектора $СД$ и интегратора $И$. Для раздельной работы каналов по времени, на входе установлен $ПК$. По поступающему на переключатель управляющему сигналу с устройства управления антенна и генератор шума поочередно, на равные промежутки времени подключаются к входам радиометрических приемников. Таким образом, в этой схеме наблюдение сигнала антенны происходит непрерывно.

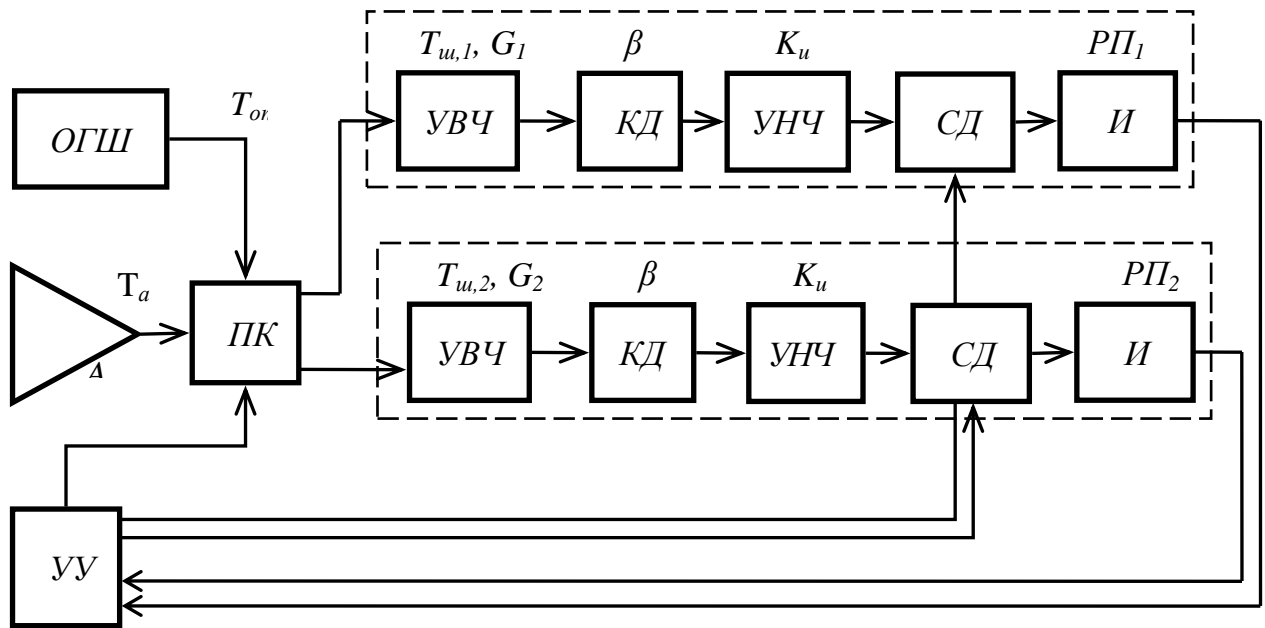


Рисунок 13 – Структурная схема двухприемникового модуляционного радиометра

Флуктуационная чувствительность радиометра Грахама определяется выражением [59]

$$\Delta T = \sqrt{\frac{(T_{u1} + T_a)^2}{\Delta f \tau} + \frac{(T_{u2} + T_{on})^2}{\Delta f \tau} + \frac{(T_a - T_{on})^2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\Delta G_1 + \Delta G_2}{2G} \right)^2},$$

где $\Delta G_{1,2}$ – флуктуации коэффициента передачи первого и второго приемников.

В формуле учтено возросшее в два раза время накопления сигналов антенны и опорного источника шума, а также уменьшение флуктуаций коэффициента усиления, пропорциональное $\sqrt{2}$.

Кроме увеличения чувствительности, к другому достоинству данной схемы относится повышение надежности измерений. При отказе одного из приемных каналов работоспособность радиометра сохраняется с той лишь разницей, что чувствительность уменьшается и становится равной чувствительности обычного модуляционного радиометра.

3.3.5 Балансный радиометр

В работе балансного радиометра используются свойства квадратурного ответвителя. Структурная схема балансного радиометра представлена на рисунке 14. В состав радиометра входят: антенна A , опорный генератор шума $ОГШ$, два одинаковых СВЧ-квадратурных моста M_1 и M_2 , два усилителя высоких частот $УВЧ_1$ и $УВЧ_2$ одного типа, устройство вычитания сигналов $УВ$, регистратор P и одинаковые низкочастотные тракты $НЧ_1$ и $НЧ_2$, содержащие квадратичный детектор $КД$, усилитель постоянного тока $УПТ$, интегратор $И$.

Радиометр функционирует следующим образом. Шумовая температура на входе 1 M_1 равна шумовой температуре антенны T_a , на входе 2 – шумовой температуре опорного генератора шума T_{on} . Учитывая фазовую характеристику СВЧ-моста M_1 шумовая температура на выходе 3 будет равна

$$T_1 = \frac{T_a + T_{on}^{90^0}}{2},$$

на выходе 4

$$T_2 = \frac{T_a^{90^0} + T_{on}}{2}$$

Сигнал на входе 1 второго моста M_2 будет равен

$$T_3 = \left(\frac{T_a + T_{on}^{90^0}}{2} + T_{u1} \right) G_1,$$

где T_{u1} – шумовая температура $УВЧ_1$.

Сигнал на втором входе M_2 будет равен

$$T_4 = \left(\frac{T_a^{90^0} + T_{on}}{2} + T_{u2} \right) G_2,$$

где T_{u2} – шумовая температура $УВЧ_2$.

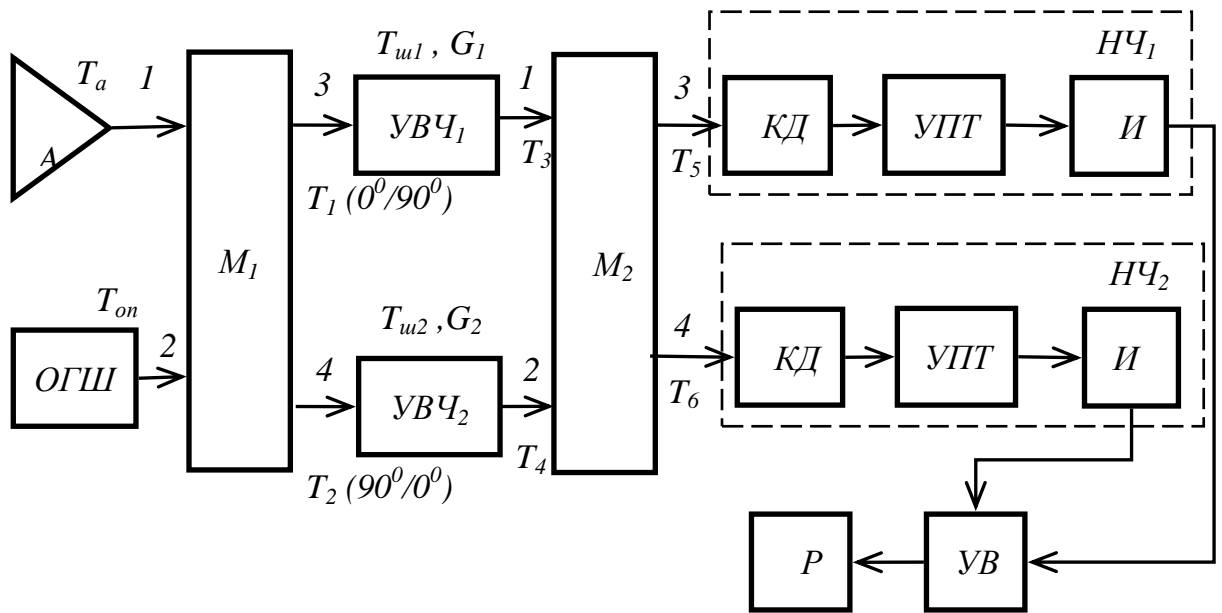


Рисунок 14 – Структурная схема балансного радиометра

Поскольку собственные шумы $УВЧ_1$ и $УВЧ_2$ не коррелированы между собой и с измеряемым шумовым сигналом антенны, то они независимо делятся пополам в M_2 , создавая на выходах 3 и 4 следующие сигналы

$$T_5 = \frac{\left(T_a + T_{on}^{90^\circ}\right)G_1}{4} + \frac{T_{u1}G_1}{2} + \frac{\left(T_a^{180^\circ} + T_{on}^{90^\circ}\right)G_2}{4} + \frac{T_{u2}^{90^\circ}G_2}{2},$$

$$T_6 = \frac{\left(T_a^{90^\circ} + T_{on}^{180^\circ}\right)G_1}{4} + \frac{T_{u1}^{90^\circ}G_1}{2} + \frac{\left(T_a^{90^\circ} + T_{on}\right)G_2}{4} + \frac{T_{u2}G_2}{2}.$$

Учитывая описанные выше формулы при условии одинаковых коэффициентов усиления $УВЧ_1$ и $УВЧ_2$, $G_1=G_2=G$, на входе квадратичных детекторов получим

$$T_5 = G \left\{ \frac{T_{on}^{90^\circ}}{2} + \frac{T_{u1}}{2} + \frac{T_{u2}^{90^\circ}}{2} \right\},$$

$$T_6 = G \left\{ \frac{T_a^{90^\circ}}{2} + \frac{T_{u1}^{90^\circ}}{2} + \frac{T_{u2}}{2} \right\}.$$

После усиления огибающих сигналов в $УПТ$ и интегрирования в $И$, на выходе вычитающего устройства из получим напряжение, пропорциональное разности

$$u \approx T_5 - T_6 \approx T_{on} - T_a$$

в которое не входят собственные шумы усилителей.

Как и для корреляционной схемы, в балансном радиометре возникают сложности при калибровке прибора на выбранный диапазон измерений и требуется высокая идентичность *УВЧ*.

3.3.6 Нулевые радиометры

Устранить недостатки модуляционных радиометров позволяет применение в них нулевого метода измерений, когда регулировкой опорного источника шума обеспечивается выполнение условия $T_{on} - T_a = 0$. Нулевые радиометры являются частным случаем модуляционных радиометров. В них также выполняется амплитудно-импульсная симметричная модуляция. Отличие заключается в том, что различными способами (синхронным изменением усиления по высокой и низкой частотам, регулировкой опорного источника и т.д.) на выходе радиометра выравниваются сигналы в различные, равные по длительности полупериоды амплитудно-импульсной модуляции. Индикатором нулевого баланса является нулевое напряжение на выходе радиометра в обои полупериоды модуляции. И в этом случае на точность измерений не влияют изменения коэффициента передачи всего измерительного тракта $G\beta K_u$, его дрейф и флуктуации, частоты которых меньше частоты амплитудно-импульсной модуляции в радиометре. Таким образом, измерение шумовой температуры антенны в нулевом радиометре не зависит от температуры собственных шумов и изменений коэффициента передачи приемника. Влияние двух основных дестабилизирующих факторов сведено к нулю. Точность измерений определяется лишь чувствительностью компаратора радиометра, сравнивающего уровни сигналов в различные полупериоды амплитудной модуляции, и стабильностью опорных источников шумовой температуры.

Флуктуации усиления, спектр которых выше частоты модуляции в радиометре (то есть, изменения коэффициента усиления на периоде модуляции) влияют как на точность измерений, так и на чувствительность. Но, как следует из работы, спектральная плотность этих флуктуаций уменьшается пропорционально $1/f^{2.5}$ и на частотах амплитудно-импульсной модуляции (1...2 кГц) не велика. Следовательно, флуктуации усиления тракта наиболее сильны вблизи нулевой частоты и в нулевом радиометре их влияние подавляется. Все это определяет нарастающий интерес к схемам нулевых радиометров. Из известных схем наиболее популярными являются три реализации: с аналоговой регулировкой опорного сигнала с делением сигналов и с регулировкой длительности ввода опорного неизменного сигнала в измерительный тракт.

Нулевой радиометр по схеме на рисунке 15 содержит в измерительном тракте все элементы модуляционного радиометра, и дополнен регулируемым генератором шума *РГШ* с блоком управления выходной мощностью генератора *УУГШ*. Выходной сигнал радиометра является управляющим для блока управления генератором шума. По этому сигналу регулируется выходная мощность *РГШ* до выполнения равенства $T_a = T_{on}$. Передаточная характеристика радиометра полностью определяется регулировочной характеристикой выходного сигнала генератора шума (смещение и наклон). В известных радиометрах регулируют шум опорного источника либо изменением тока через активную зону полупроводникового элемента, лавинно-пролетного или диода Ганна, транзистора, либо последовательно с генератором шума, вырабатывающим неизменный выходной сигнал, устанавливают пассивное устройство -регулируемый аттенюатор. С регулировкой шумового сигнала связаны основные трудности реализации радиометра. Достаточно сложно создать источник шума с изменением выходной мощности в широком динамическом диапазоне и с характеристикой высокой линейности. Полупроводниковые генераторы шума имеют существенную нелинейность зависимости выходной мощности

от питающего его тока. Если для регулировки использовать аттенюатор, выходная мощность будет зависеть не только от коэффициента ослабления аттенюатора, но и от его физической температуры. Возникают трудности при калибровке прибора, настройки на выбранный диапазон измерений.

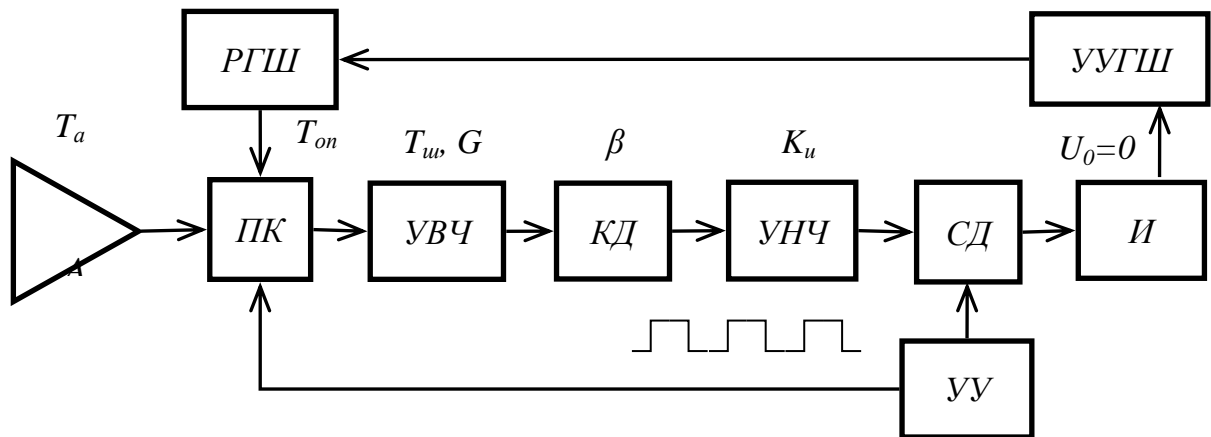


Рисунок 15 – Структурная схема нулевого радиометра с аналоговым регулированием опорного сигнала

Поэтому чаще всего аналоговые нулевые радиометры используют в квазиуловом режиме работы. Для этого, в начале измерений, настройкой генератора шума устанавливают равенство $T_a = T_{оп}$. В дальнейшем радиометр работает по принципу дифференциальных измерений (как обычный модуляционный радиометр). Так как измерения происходят при небольшой разнице $T_{оп} - T_a$, поэтому влияние ΔG на точность измерений снижено. Калибровка радиометра также упрощается. Регулировкой генератора шума по первому эталону настраивают смещение передаточной характеристики радиометра, изменением коэффициента усиления измерительного тракта, по второму эталону регулируют наклон характеристики.

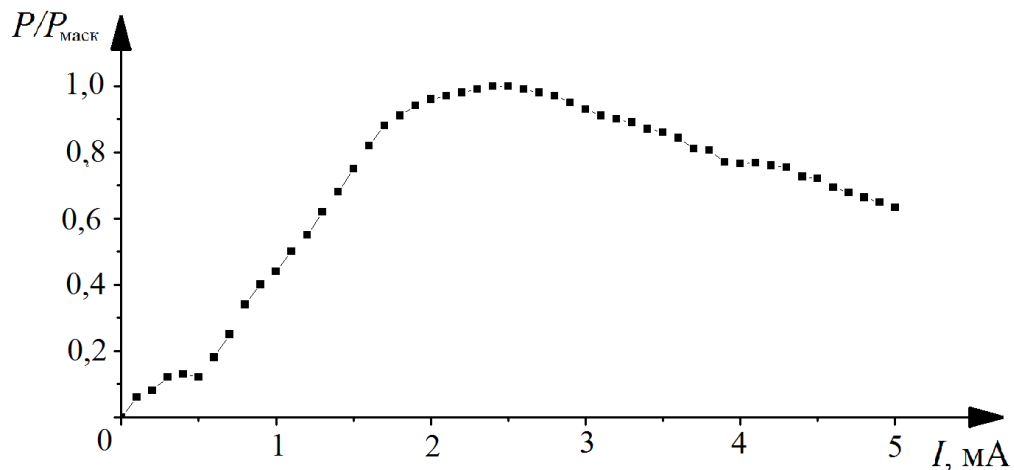


Рисунок 16 – Нормированная характеристика выходной мощности полупроводникового генератора шума *NoiseCom NC501* от питающего тока (коротковолновая часть дециметрового диапазона длин волн)

Флуктуационная чувствительность аналогового нулевого радиометра выше, чем у модуляционного, так как влияние изменений коэффициента усиления ΔG в большей степени устранено

$$\Delta T = 2(T_{ш} + T_{on}) \sqrt{\frac{1}{\Delta f \tau}}$$

На рисунке 17 представлена схема нулевого радиометра с делением сигналов, в которую введены два опорных генератора шума $ОГШ_1$ и $ОГШ_2$, определяющие положение (смещение и наклон) передаточной характеристики радиометра. Ввод сигнала $T_{on,2}$ в тракт прохождения сигнала T_a антенны A происходит через направленный ответвитель $НО$. Сигнал $T_{on,1}$ с выхода $ОГШ_1$ поступает на вход приемника через модулятор-переключатель $ПК$. Включением $ОГШ_2$ управляет цифровое устройство управления и обработки сигналов $УУ$. Также данное устройство вырабатывает импульсные сигналы типа "меандр" для управления модулятором-переключателем и синхронным фильтром $СФ$. В измерительном тракте радиометра установлены: усилитель высоких частот $УВЧ$, квадратичный детектор $КД$, усилитель постоянного тока $УПТ$, аналого-цифровой преобразователь $АЦП$. Синхронный фильтр построен по схеме коммутируемых конденсаторов и представляет собой однозвенный RC

фильтр низких частот. УУ формирует на входе УВЧ три повторяющихся уровня шумовых сигналов: T_a , $T_a + T_{on,2}$, $T_{on,1}$. Данные уровни сигналов действуют на входе УВЧ в течение одинаковых интервалов времени. На выходе СФ радиометра, согласно выполняемой на входе модуляции, измеряются и преобразуются АЦП в код следующие напряжения

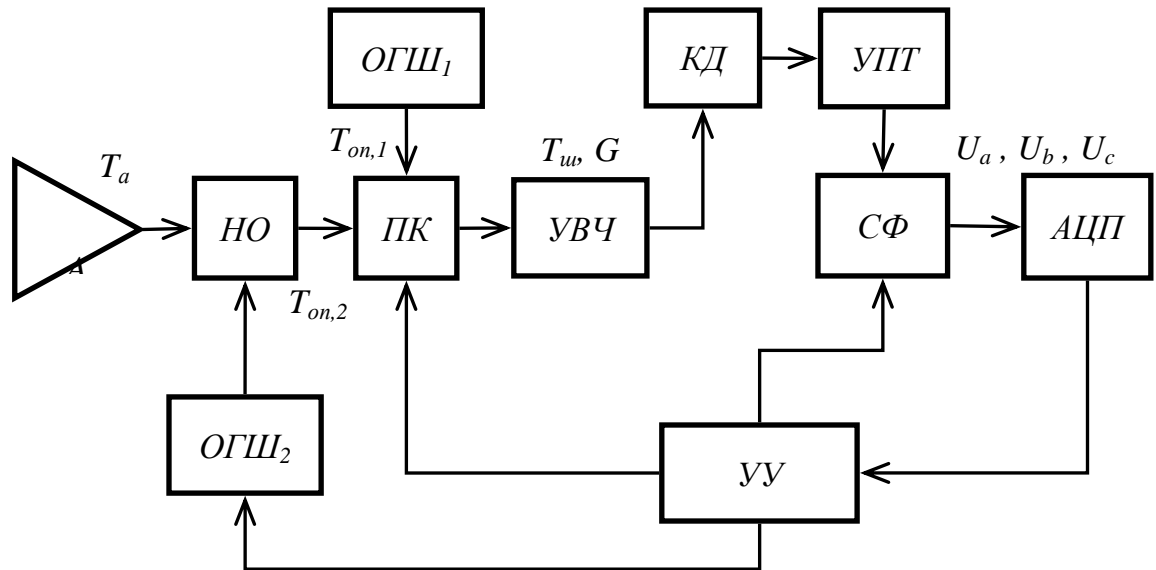


Рисунок 17 – Структурная схема нулевого радиометра с делением сигналов

$$U_a = G \beta K_u k \Delta f (T_a + T_{uв})$$

$$U_b = G \beta K_u k \Delta f (T_a + T_{on,2} + T_{uв})$$

$$U_c = G \beta K_u k \Delta f (T_{on,1} + T_{uв}),$$

где K_u – коэффициент усиления УПТ, $T_{uв}$ – шумы УВЧ.

В ходе дальнейшей обработки цифровых сигналов и вычислений находится коэффициент

$$M = \frac{U_c - U_a}{U_b - U_a} = \frac{T_{on,1} - T_a}{T_{on,2}},$$

куда не входит коэффициент передачи всего измерительного тракта и собственные шумы.

Следующей операцией рассчитывается сигнал антенны по формуле

$$T_a = T_{on,1} - M \times T_{on,2}.$$

Флуктуационная чувствительность описанного радиометра определяется выражением [94]

$$\Delta T = \sqrt{\frac{3}{\Delta f \tau}} \left\langle (T_{on,1} + T_u)^2 + (T_a + T_u)^2 \left[1 - \frac{T_{on,1} - T_a}{T_{on,2}} \right]^2 + (T_a + T_{on,2} + T_u)^2 \left(\frac{T_{on,1} - T_a}{T_{on,2}} \right)^2 \right\rangle^{\frac{1}{2}}$$

Для осуществления заданного алгоритма работы в радиометре установлен УПТ, который в большей степени подвержен дрейфу выходного напряжения. Также требуются дополнительные вычислительные операции над преобразованными в цифровой код сигналами. Это, в конечном итоге приводит к искажению передаточной характеристики радиометра и понижает точность измерения сигналов. В радиометре реализуется квазиреальный масштаб времени представления результатов измерений. Дополнительные сложности возникают при проведении калибровки устройства.

На рисунке 18 представлена структурная схема нулевого радиометра, в которой ввод второго опорного сигнала $T_{on,2}$ в тракт антенны регулируется по длительности его поступления. В радиометре реализована модификация метода нулевых измерений с применением комбинированной модуляции, которая заключается в синхронном выполнении двух видов импульсных модуляций – амплитудной и широтной. Для этого устройство управления УУ радиометра вырабатывает два сигнала: t_{aum} – импульсный сигнал со скважностью следования 2 и t_{uum} – изменяемый по длительности широтный импульсный сигнал. Для осуществления модификации метода нулевого приема на выходе измерительного тракта устанавливается фильтр высоких частот ФВЧ и компаратор К, работающий в режиме нуль-органа.

Модифицированный метод относится к косвенным измерениям. Определение сигнала антенны T_a происходит прямыми измерениями длительности сигнала $t_{шим}$, управляющего широтно-импульсной модуляцией в радиометре, связанной с T_a функциональной зависимостью (передаточная характеристика радиометра)

$$T_a = T_{on,1} - T_{on,2} \frac{t_{шим}}{t_{aим}}$$

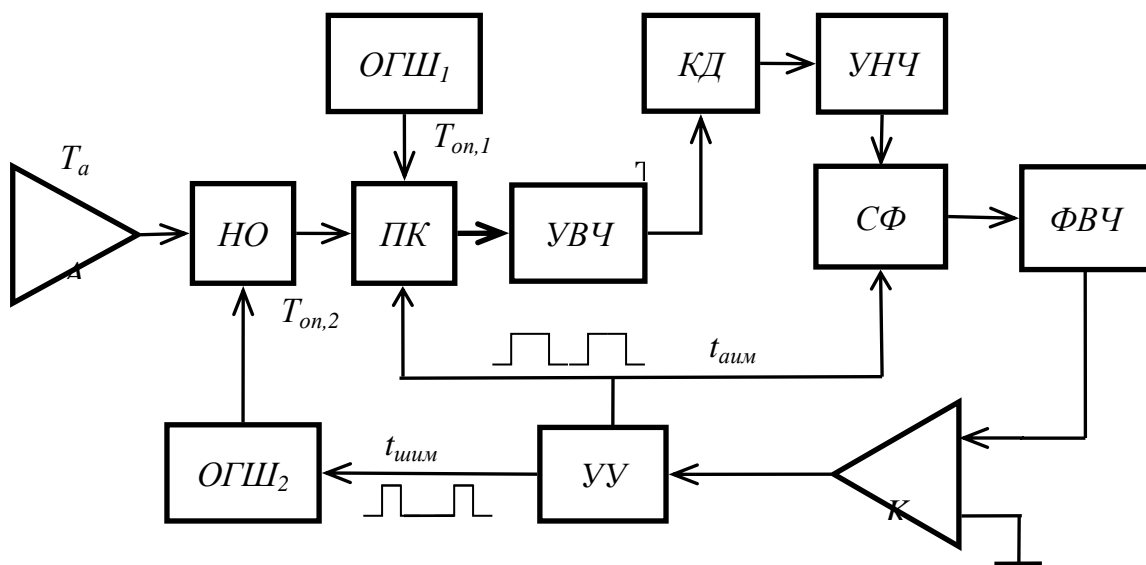


Рисунок 18 – Структурная схема нулевого радиометра с изменением длительности опорного сигнала

Принцип работы радиометра поясняется временными диаграммами на рисунке 19 и заключается в следующем. Переключатель под управлением импульсного сигнала $t_{aим}$ выполняет поочередную коммутацию на вход приемника сигналов антенны и первого опорного генератора шума $ОГШ_1$. В те полупериоды времени $t_{aим}$, когда на вход приемника подключена антенна, под действием широтно-модулированного сигнала $t_{шим}$ происходит включение $ОГШ_2$ и сигнал генератора через направленный ответвитель $НО$ поступает в тракт антенны. Происходит добавление мощности генератора шума к

сигналу антенны и на входе приемника имеет место сумма сигналов $T_a + T_{on2}$. Изменением длительности $t_{шум}$ добиваются такой формы сигнала в последетекторной части радиометра (низкочастотном блоке), при которой после исключенной в ней постоянной составляющей фильтром высоких частот $\Phi ВЧ$ среднее значение на периоде модуляции равно нулю. Нулевому среднему значению сигнала на периоде амплитудной модуляции соответствует равенство вольт-секундных площадей импульсов отрицательной и положительной полярности (рисунок 19 в, нулевой баланс установлен)

$$(U_s - U_c)t_{шум} = (U_c - U_a)(t_{ам} - t_{шум}).$$

Следовательно, индикатором нулевого баланса является нулевое напряжение во второй полупериод модуляции, при подключении к входу приемника первого опорного генератора шума. Компаратор K определяет полярность этого напряжения. Формула, описанная выше показывает линейную связь шумовой температуры антенны T_a с сигналом широтной модуляции $t_{шум}$, независимость результатов измерений от флуктуаций коэффициента передачи радиометрического приемника и дрейфа шумовой температуры приемной системы.

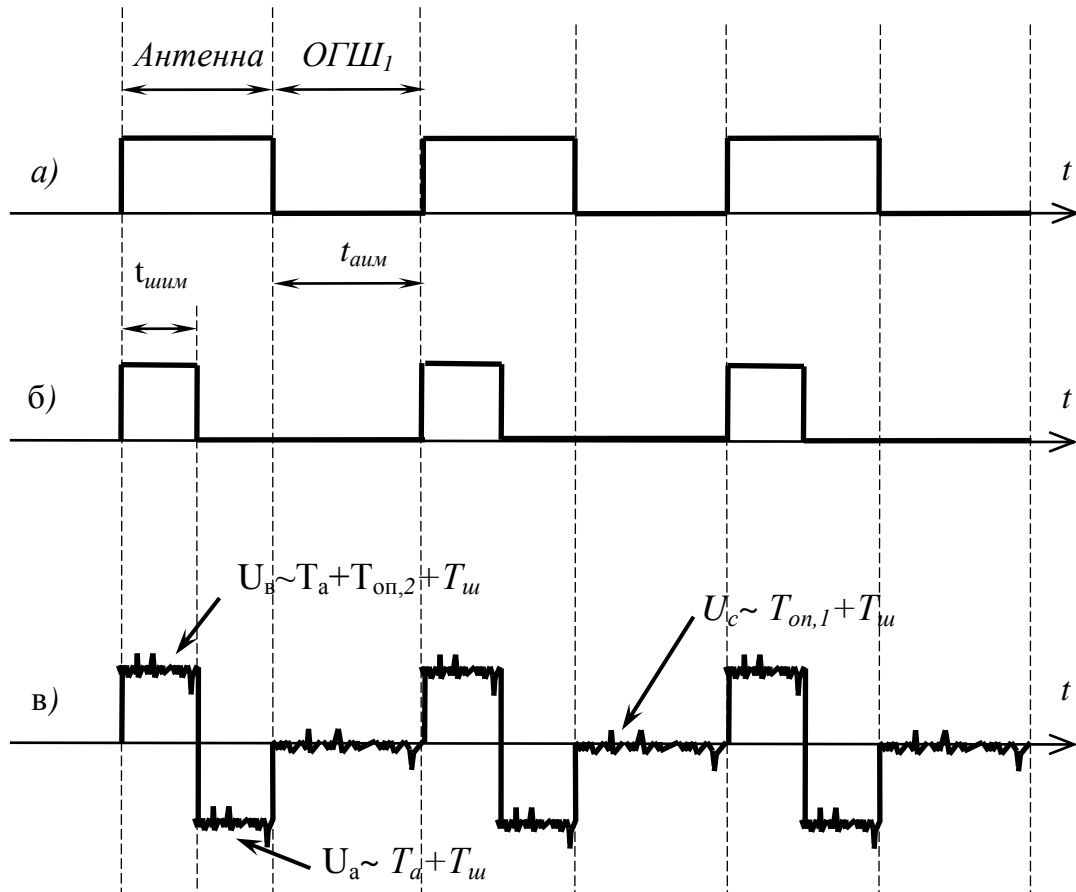


Рисунок 19 – Временные диаграммы, поясняющие принцип работы нулевого радиометра с изменением длительности опорного сигнала, а – сигнал управления амплитудно-импульсной модуляцией; б – сигнал управления широтно-импульсной модуляцией; в – сигнал на входе компаратора.

Алгоритм авторегулирования нулевого баланса следующий. При изменении сигнала антенны во втором полупериоде модуляции появится напряжение (произойдет разбалансировка). В зависимости от его полярности действия по увеличению или уменьшению длительности принимаются по логическому сигналу компаратора. УУ направленно регулирует длительность $t_{шум}$ до появления нулевого напряжения во второй полупериод модуляции. При достижении этого условия система снова войдет в состояние нулевого баланса, когда длительность $t_{шум}$ определяет сигнал антенны согласно соотношения.

В радиометре опорные источники определяют положение передаточной характеристики. Калибровка выполняется по двухточечной схеме с подключением на вход эталонов, определяющих верхнюю и нижнюю границы диапазона измерения. В ходе настройки на минимальную границу шкалы $t_{\text{шум}}$ устанавливается равным $t_{\text{аим}}$ и регулируется $T_{\text{он},1}$ (смещение характеристики). При настройке шкалы радиометра на максимальную границу измерений $t_{\text{шум}} = 0$ и регулируется $T_{\text{он},2}$. Регулировка выполняется по сигналам компаратора, как и в рабочем режиме функционирования радиометра. Таким образом, максимальная и минимальная границы диапазона измерения, как следует из, будут равны: $T_{a, \text{макс}} = T_{\text{он},1} (t_{\text{шум}} = 0)$, $T_{a, \text{мин}} = T_{\text{он},1} - T_{\text{он},2} (t_{\text{шум}} = t_{\text{аим}})$.

Флуктуационная чувствительность радиометра зависит от сигнала антенны T_a и оценивается по следующему выражению

$$\Delta T = \frac{\sqrt{T_{\text{он},1} (T_{\text{он},1} + T_{\text{он},2} + 4T_u) + 2T_u^2 - T_a (T_a + T_{\text{он},2} - 2T_{\text{он},1})}}{\sqrt{2 \Delta f \tau R}},$$

где τ – постоянная времени синхронного фильтра, R – количество усредненных цифровых кодов длительности $t_{\text{шум}}$ в цифровом устройстве управления радиометром на интервале одного измерения.

Локальный максимум, соответствующий минимальной чувствительности достигается в середине диапазона измерения при значении сигнала антенны равном

$$T_a = T_{\text{он},1} - \frac{T_{\text{он},2}}{2}.$$

Тогда, после подстановки получим

$$\Delta T_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{2(T_{\text{он},1} + T_u)^2 + \frac{T_{\text{он},2}^2}{4}}}{\sqrt{2 \Delta f \tau R}},$$

Данный радиометр обеспечивает высокую линейность характеристики преобразования сигнала антенны в длительность широтно-импульсного

сигнала при условиях квадратичности характеристики детекторной секции и работы усилителей в линейном режиме.

4 Практические вопросы применения микроволновой радиометрии

4.1 Медицинское применение микроволновых радиометров

Основными сферами практического применения СВЧ-радиометрии в настоящее время представляются диагностика злокачественных опухолей различных органов: молочной железы, мозга, легких, метастазов, а также функционального состояния коры головного мозга. При этом используют так называемые функциональные пробы: воздействия, вызывающие известный отклик организма. В этом качестве применяется, например, глюкозная проба - пациент принимает несколько граммов раствора глюкозы, после чего начинают измерения внутренней температуры антеннами, установленными в нескольких точках на поверхности тела около исследуемого органа. Если есть злокачественные опухоли или метастазы, то после глюкозной пробы видно увеличение глубинной температуры тела в этих областях.

4.2 Применение радиометрии при исследовании источников естественного радиоизлучения

Радиометрические исследования являются одним из важнейших способов получения информации о состоянии окружающей среды из космоса. Неуклонный рост потребности к повышению качества данных, полученных радиометрическими методами, обуславливает все большие требования к техническим свойствам радиометров, таким как чувствительность, динамика измерений, абсолютная точность, надежность и массогабаритные параметры. Улучшение перечисленных характеристик свойственно процессу совершенствования широкого класса радиоизмерительной аппаратуры, однако в радиометрах, в силу специфики

исследуемых радиотепловых сигналов и схемотехнического исполнения, повышение качества аппаратуры достигается лишь при совместном улучшении группы параметров.

Активно разрабатываются и применяются новые системные решения в создании перспективных средств радиометрической аппаратуры, позволяющие вывести основные технические характеристики радиометров на новый уровень. Не смотря на множество схемотехнических исполнений различных типов радиометров, дифференциальный метод измерений (частный случай – нулевой метод) обуславливает наличие отдельных функциональных блоков, ограничивающих предельные технические характеристики радиометров. Примером функционального блока, ухудшающего потенциальные технические характеристики, является СВЧ-переключатель, устанавливаемый на входе приемника. Ослабление сигнала на входе радиометра приводит к увеличению шумовой температуры приемника, что сказывается на ухудшении флуктуационной чувствительности. Последние модели выпускаемых промышленностью СВЧ-переключателей для S –диапазона обладают уровнем собственных потерь 1...2,5 дБ. Реализация широкополосных СВЧ- переключателей более высоких частотах (30...300 ГГц) с приемлемым уровнем ослабления затруднительна.

При создании радиометров бортового базирования на основе классическим схемотехнических исполнений разработчикам приходится решать многокритериальную противоречивую задачу создания прибора, обладающего приемлемой долговременной стабильностью или высокой чувствительностью, динамикой, надежностью, низкими массогабаритными параметрами.

Например, в составе спутника Метеор-3 использован компенсационный радиометр с долговременной стабильностью 25 с. Реализованная в данном техническом решении долговременная стабильность не позволяет проводить непрерывные измерения с длительностью более 25 с, что сказывается на

эффективности использования спутниковой аппаратуры. Процесс калибровки обуславливает наличие дополнительных технических средств в модуле полезной нагрузки спутника, что негативно влияет на массогабаритные параметры и надежность.

По сравнению с классическими схемами, эффективным решением данной проблемы является применение радиометра, описанного в . Данный тип радиометров уступают компенсационному радиометру со сложности исполнения входной СВЧ- части – измерение шумовой температуры антенны модифицированными нулевыми радиометрами, реализуется при помощи СВЧ- переключателей, направленных ответвителей, генераторов СВЧ- шума. Усложнение входной части компенсируется значительным улучшением чувствительности.

При реализации модифицированного метода приема, использование СВЧ- переключателя можно избежать в случае применения пространственно разнесенных опорных источников шумового сигнала. Для реализации этого подхода требуется изменение пространственной ориентации диаграммы направленности антенны, что осуществляется, например, её механической перестройкой, как это показано на рисунке 20.

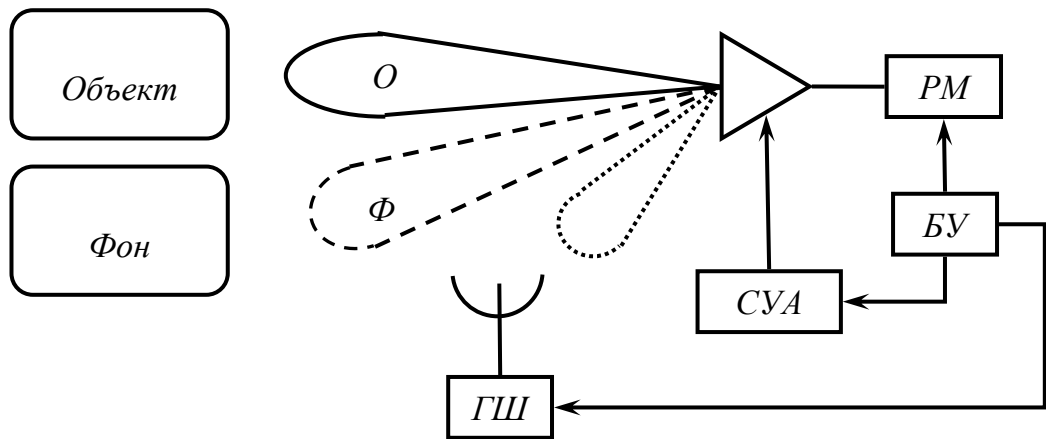


Рисунок 20– Изменение пространственной ориентации приемной антенны

На рисунке антенна (А) с изменяемой диаграммой направленности (главный лепесток имеет положения "О" и "Ф", боковой лепесток с

пространственным положением "Г"), радиометр на основе модификации нулевого метода измерений (РМ), блок управления (БУ), система управления антенной (СУА), генератор шума (ГШ).

Эффективность использования данного способа реализации модификации нулевого метода измерений иллюстрируется на примере расчета понижения шумовой температуры приемника в отсутствие СВЧ-переключателя.

4.3 Поиск радиотепловых аномалий

Непрерывное развитие научно-технического потенциала способствует применению новых технологий в вооружении и появлению новых видов боевой техники. Одним из новых видов боевой техники, который уже эффективно применяется в военных конфликтах, являются беспилотные летательные аппараты.

Беспилотные летательные аппараты решают широкий круг боевых задач, в том числе разведка, селекция целей, целеуказание и т.д. и являются одним из перспективных направлений развития вооружений. Проектирование беспилотных летательных аппаратов проводится с учетом существующих средств противодействия воздушным угрозам. В связи с этим применение последних не эффективно в достаточной степени.

Развитие высокотехнологичных, наукоемких видов вооружения, в том числе на новых физических принципах, формирует актуальную научную проблему и диктует необходимость создания новых, эффективных методов и средств противодействия, с применением превосходящих наукоемких знаний.

Широко известны общепринятые методы активной и пассивной радиолокации применяемые в настоящее время. Совершенствование основных тактико-технических характеристик (дальность и достоверности обнаружения цели, разрешающая способность, помехоустойчивость и т.д.)

радиолокационных станций, на основе этих методов, в большинстве случаев направлено на технологическое усовершенствование характеристик отдельных блоков, входящих в их состав. За последнее время не происходит внедрения новых, прорывных решений в данных областях, применение которых способствовало бы качественному переходу на новый уровень основных тактико-технических характеристик современных радиолокационных станций. Методы и техника активной радиолокации, в настоящее время, развиты в достаточной степени и приближаются к своему фундаментальному пределу.

Применению активных радиолокаторов сопутствуют следующие фундаментальные проблемы:

1. Активная локация подразумевает применение зондирующего излучения, являющегося демаскирующим признаком. Затруднительно обеспечить скрытную работу такой радиолокационной станции с позиции радиомаскировки.

2. Цели с низкой эффективной поверхностью рассеяния малозаметны для систем активной локации, что не позволяет обеспечивать требуемой дальности обнаружения.

Системы пассивной радиолокации, использующие в своей основе прием излучаемых объектом детерминированных радиосигналов, развиты достаточно широко. Однако, их применение ограничено для поиска и сопровождения целей не излучающих детерминированные радиосигналы (сигналы радиосвязи), что характерно для современных беспилотных летательных аппаратов, имеющих возможность работать полностью автономно.

Решение задачи эффективного поиска и сопровождения малоразмерных (с низкой эффективной поверхностью рассеяния) целей позволит повысить обороноспособность страны, конкурентные преимущества высокотехнологичной продукции отечественного военно-

промышленного комплекса, эффективность применения комплексов противовоздушной обороны.

Ввиду не высокой эффективности применения существующих радиолокационных систем в описанных выше аспектах, актуальна задача создания радиолокационных систем, основанных на иных физических принципах. По нашему мнению, в задаче поиска беспилотных летательных аппаратов преимуществом перед системами активной и классической пассивной радиолокации обладают радиотеплолокационные системы.

В задаче поиска беспилотных летательных аппаратов, выполненных с применением стелс-технологий, с использованием радиопоглощающих материалов, метод радиотеплолокации обладает преимуществом ввиду того, что его обнаружительная способность основана на радиотепловом контрасте. Хорошо поглощающие электромагнитную энергию цели являются хорошими излучателями (закон Планка для излучения абсолютно черных тел). На фоне "холодного" неба с шумовой температурой около 10 Кельвин в микроволновом диапазоне любое радиопоглощающее тело с комнатной температуре будет обладать радиотепловым контрастом по сравнению с фоновым излучением в 300К, что составляет порядка 15дБ (эквивалент соотношения сигнал/шум). Уровень чувствительности современных приемников составляет порядка 0,05К, что меньше радиотеплового контраста на 40дБ.

Среди систем пассивной локации, измеряющих параметры собственного электромагнитного излучения широко известны системы инфракрасного диапазона (ИК-тепловизоры). Несмотря на сравнительную простоту и высокую разрешающую способность инфракрасные радиометры не эффективны при использовании в плохих метеоусловиях – волны инфракрасного диапазона значительно подвержены влиянию атмосферных явлений в виде тумана, дождя и т.д.

Применение радиотеплолокации (микроволновой радиометрии) является эффективным средством обнаружения малозаметных целей по

сравнению с тепловизорами инфракрасного диапазона. Прием собственного электромагнитного излучение в микроволновом диапазоне длин волн обеспечивает минимальное влияние атмосферных явлений (осадков), ввиду малого затухания, достаточную разрешающую способность, высокую чувствительность.

Основные научные задачи в данной области состоят в разработке теоретической и экспериментальной базы для создания радиотеплолокационной системы микроволнового диапазона предназначенной для поиска и сопровождения беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающей более высокие тактико-технические характеристики по сравнению с существующими радиолокационными станциями.

В рамках этой задачи подразумеваются проработка вопросов:

- математического и структурного моделирования работы радиотеплолокационной системы,
- создания математического аппарата для оценки требуемых технических характеристик радиотеплолокационной системы,
- разработки модели (математической и структурной) радиометрической системы нового типа, обладающей повышенными характеристиками (чувствительность, динамика и стабильность работы),
- разработки алгоритмов совместной работы радиометрической и антенной системы, обеспечивающей электронное управление диаграммой направленности,
- разработки алгоритмов цифровой обработки сигналов с реализацией сверхразрешения и помехоподавления,
- разработки и создания радиометрической и антенной системы,
- проведения экспериментальных исследований по оценке основных характеристик разработанного макета радиотеплолокационной системы.

С начала применения первых компенсационных радиометрических систем происходит процесс непрерывного совершенствования радиометрических систем.

Интересные схемные и технические решения применены в работах отечественных ученых. Особый вклад в развитие микроволновой радиометрии внесли работы Гуляева Ю.В., Троицкого В.С., Аблязова В.С., Башаринова А.Е., Бородзич Э.В., Вайсблата А.В., Волохова С.А., Есепкиной Н.А., Ипатова А.В., Карлова Н.В., Кислякова А.Г., Королькова Д.В., Кубланова В.С., Маречка С.В., Носова В.И., Парийского Ю.Н., Полякова В.М., Рахлина В.Л., Соломонова С.В., Сороченко Р.Л., Струкова И.А., Ворсина Н.И., Милицкого Ю.А., Шаинского В.М., Эткина В.С., Брагиных, Калининых, Г.Г. Щукина и др.

Каждая радиометрическая система создается для решения отдельных задач народного хозяйства и имеет характерные схмотехнические решения, применение которых обуславливается спецификой области эксплуатации. Тем не менее, из всего многообразия схмотехнических решений, выделяют несколько подходов в части совершенствования основных технических характеристик (чувствительности и стабильности).

В части построения радиотепловых изображений основные тенденции в мировой науке сводятся к применению эффективных алгоритмов по обработке результатов измерений радиометрических систем, в чем достигнут определенный прогресс. Математическая обработка сигналов, решение задач сверхразрешения для пассивных радиотепловых систем развиты в работах исследователей: Ю. А. Пирогова, В. В. Гладуна, Р. А. Павлова, Dunn D., Lettington A.H., Alexander N.E., Wabby A., Lyons B.N., Doyle R., Walshe J., Attia M., Blankson I. и др.

За рубежом различные коллективы занимаются разработкой и созданием как радиометрической аппаратуры, так и эффективных алгоритмов решения обратных задач интерпретации, сверхразрешения в радиометрических измерениях. В мировой практике существуют тенденции

прикладных работ в радиометрии - все больше разработок направленно на решение медицинских задач и совершенствование специальной техники для обеспечения безопасности.

Наиболее интересные технические решения по созданию радиометрических систем различного назначения принадлежат коллективам:

- Московского государственного университета им. Ломоносова,

1. Математическое моделирование в задачах обработки данных в системах радиовидения/ Пирогов Ю.А., Боголюбов А.Н., Гладун В.В., Гушин Р.А., Могилевский И.Е., Шапкина Н.Е.// Журнал радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 1.

2. Система ближнего пассивного радиовидения 3-мм диапазона /В. В. Гладун, А. В. Котов, В. И. Криворучко, Р. А. Павлов, Ю. А. Пирогов, Д. А. Тищенко // “Журнал радиоэлектроники” N 7, 2010.

3. Сверхразрешение в системах радиовидения миллиметрового диапазона / Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тищенко Д.А., Тимановский А.Л., Шлемин И.В., Джен С.Ф.// Журнал радиоэлектроники. 2004. № 3. С. 2.)

- Институту космических исследований РАН,

(1. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии/ Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.// Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29.

2. Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения / Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 1. С. 238-243.

3. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии /Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков

Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.// Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29.)

- Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова,

(Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы / Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М.// Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1 (9). С. 28-31.)

- Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,

Радиометрический метод обнаружения людей в зоне техногенных катастроф /Михайлов В.Ф., Брагин И.В./ Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 9. С. 108-111.

- Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,.

Модуляционный радиометр двухканальной радиометрической системы с программно-аппаратным модулем патент на полезную модель № 122185
Дата регистрации: 06.08.2012

2. Оценка возможности компенсации помеховых компонент сигнала адаптивной РМС / Федосеева Е.В., Шашкова Е.А., Ермаков Р.Л., Росточкин И.Н. // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2001. № 1. С. 9-11.

3. Особенности реализации алгоритма выделения информационной составляющей входного сигнала в двухканальной радиотеплолокационной системе с внешним пилот-сигналом /Федосеева Е.В. // Радиотехника. 2006. № 11. С. 101-104.

4. Радиометрическая система с дополнительным каналом формирования сигнала компенсации/ Федосеева Е.В., Росточкин И.Н./ Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2010. № 562. С. 243.

5. Результаты зондирования облачной атмосферы вблизи радиогоризонта двухканальной свч радиотеплолокационной системой /Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А./ Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 3 (11). С. 4-10.)

За рубежом активно ведутся работы по данному направлению. Анализ публикационной активности показал, что наиболее перспективные работы принадлежат коллективам из:

- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, USA,

- Wireless Communications and e-Applications Research Group Technological Educational Institution of Athens Athens, Greece

(Design and Development of 60 GHz Millimeter-wave passive Components using Substrate Integrated Waveguide Technology// N. Athanasopoulos, D. Makris, K. Voudouris)

- Department of Electronic and Information Engineering, Beihang University, China

(A passive millimeter-wave imager used for concealed weapon detection Cheng Zheng, Xianxun Yao, Anyong Hu, and Jungang Miao// Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 46, 2013)

- Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology Cambridge,

(Gasiewski A.J., J.W. Barrett, P.G. Bonanni and D.H. Staelin. Aircraft-based Radiometric Imaging of Tropospheric Temperature and Precipitation Using the 118.75-GHz Oxygen Resonance.// .Journal of Applied Meteorology 29 - 1990)

- Department of Physics, Wright State University, Dayton, OH, USA

(Active and passive millimeter and sub-millimeter-wave imaging Douglas T. Petkie*a, Frank C. De Luciab // Proc. of SPIE Vol. 5989)

- Army Research Laboratory, Adelphi, USA

- European Space research and technology center, и др.

4.4 Радиоспектроскопия

В последнее десятилетие происходит бурное развитие исследований окружающей среды радиофизическими методами. К приоритетной задаче дистанционного зондирования относится развитие новых технологий, включая модернизацию существующих и разработку новых измерительных систем, комплексирование измерительной аппаратуры различных типов, работающей в различных спектральных диапазонах. Высокая информативность микроволновых методов вызывает необходимость создания все более совершенной аппаратуры. Как правило, радиометры должны работать в сложных климатических условиях, что определяет высокие требования к их надежности, стабильности характеристик в сочетании с высокой флуктуационной чувствительностью.

Для исследования газовых составляющих атмосферы используют различную измерительную технику, в частности, лазерные локаторы оптического диапазона длин волн. Применение измерителей радиодиапазона (СВЧ- радиометров) для аналогичных целей связано с трудностью создания переносных, стабильных систем. Однако, использование микроволновых методов обеспечивает принципиально иную информативность, чем при использовании только оптического и инфракрасного диапазонов. Достоинства микроволновой диагностики - это возможность получения информации в любое время суток, в различных погодных условиях, в условиях плохой видимости, независимость от солнечного освещения, практически неограниченная дальность (возможна установка системы на малые спутники). Атмосферные "окна" прозрачности в микроволновом диапазоне принимаемых частот радиометрическим приемником позволяют определять отдельные спектральные линии поглощения тестируемой газовой компоненты среды.

Активными способами не может быть получено никакой информации о состоянии газов в атмосфере, так как рассеяние электромагнитных волн на

молекулах газа крайне не значительно. Напротив, пассивная локация, прием теплового излучения обеспечивает поразительные по информативности данные о состоянии газовых сред в атмосфере. На фоновом тепловом спектре выделяются полосы, соответствующие полосам поглощения парниковых газов, легких газовых составляющих атмосферы.

Эти обстоятельства делают актуальными работы по созданию радиометрических пассивных систем, которые совместно с действующими известными комплексами, в совокупности обеспечат высокую достоверность определения составляющих атмосферы (использование дополнительной информации, заключенной в пространственной структуре электромагнитного поля).

Исследование выбранной компоненты атмосферы и получения достоверной информации возможно только в случае применения многоканальных систем, как минимум двух спектральных каналов. Возникает необходимость в реперной (опорной) точки отсчета, на которую настраивается один из каналов, и как правило, фиксирует фоновое излучение. Тогда второй канал настраивается на частоту поглощения спектральной линии исследуемого газа. Таким образом, в основе измерений лежит метод определения радиоконтраста. Так как фоновое излучение не постоянная величина в спектральном рассмотрении, поэтому получение информации требуется в близких спектральных диапазонах.

Для определения процессов, слабо контрастных в радиолокационном отношении, требуется измерение очень слабых электромагнитных сигналов с флуктуационной чувствительностью системы 0.02-0.1К. Это накладывает определенные требования на стабильность характеристик приемной аппаратуры. Особенно остро этот вопрос стоит для радиометров, используемых в передвижных комплексах, при работе в реальных полевых условиях.

Ситуация усугубляется, если измерения происходят не в режиме стационарного использования, а с установкой измерительной системы на

борту летательных аппаратов, или в случае наблюдения за динамикой изменения газового состояния атмосферы.

4.5 Навигация летательных аппаратов

Одной из основных задач авиастроения является обеспечение безопасности летательных аппаратов при выполнении полетов. В настоящее время летательные аппараты оборудуются комплексом различных радиоэлектронных систем обеспечения безопасности перелетов. Однако, при полетах на малых высотах с высокой скоростью в сложных метеоусловиях, для контроля опасности столкновения требуется оперативная информация о препятствиях на пути летательного аппарата. В подобных случаях особенно осложнены полеты в горной местности.

Далее рассматривается возможность применения микроволновых радиометров для решения задач обеспечения контроля столкновения с препятствиями на пути летательного аппарата.

Применение радиотеплолокации и радиометров, как приборов, относящихся к пассивной радиолокации, измеряющих слабые электромагнитные сигналы, вызванные собственным излучением тел в микроволновом диапазоне, для задач обеспечения безопасности полетов на малых высотах, измерения путевой скорости и посадки в сложных метеоусловиях хорошо описано ранее в литературе.

Существуют задачи построения динамических карт рельефа местности при помощи систем пассивной навигации, то есть без использования средств и методов активной локации. В случае, если условия применения аппаратов не позволяют использовать сигналы глобальных навигационных систем, летательный аппарат должен обладать комплексом оборудования для динамического построения рельефа местности.

Для решения подобных задач применяются системы оптического и инфракрасного диапазона длин волн. В темное время суток эффективное применение оптического диапазона затруднительно. Приборы

инфракрасного диапазона длин волн, так же как и оптического, подвержены влиянию атмосферных явлений (туман, дождь), что ограничивает применение подобной аппаратуры. Иное дело обстоит с микроволновым диапазоном, для которого атмосферные явления не оказывают значительного влияния из-за высокой проникающей способности.

При радиотеплолокационном методе построения рельефа используется собственное электромагнитное излучение объектов – перепад яркостных температур (радиотеплоконтраст) поверхности Земли (около 300 К) и неба (около 10 К). Построение динамических радиотепловых карт рельефа поверхности и предупреждение о возникновении препятствия на пути летательного аппарата осуществляется при помощи радиометрической системы, размещенной на борту летательного аппарата. Для построения радиояркостного профиля производится сканирование антенной с узкой диаграммой направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рисунок 21).



Рисунок 21 – Обнаружение препятствий радиометрическим методом.

Современные технические средства микроволновой радиометрии не находят широкого применения из-за сложности создания высокостабильных радиометров с малыми габаритами, низким энергопотреблением и высокой чувствительностью и динамикой на классических методах .

На рисунке 22 представлена функциональная схема радиометрической системы обеспечения безопасности полетов. Функционирование системы осуществляется следующим образом.

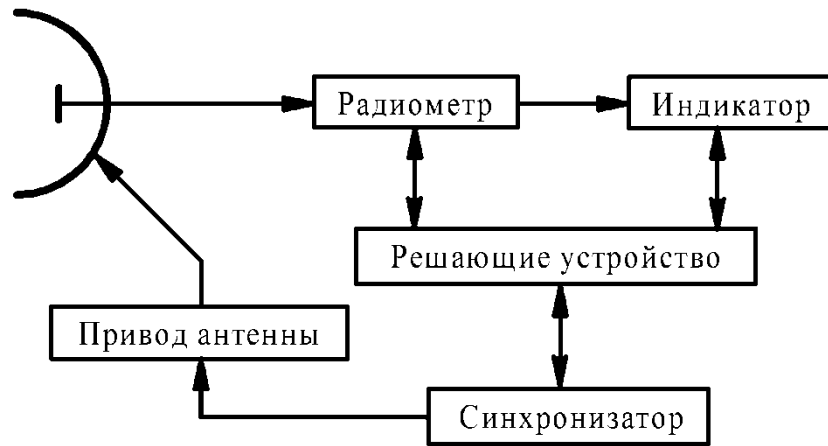


Рисунок 22 – Структурная схема радиометрической системы

Управляемая антенна производит сканирование пространства, как показано на рисунке 21. Сигнал антенны поступает на вход радиометра, измеренные значения шумовой температуры антенны отображаются на устройстве индикации, обменивающегося данными с решающим устройством. Функции решающего устройства заключаются в выработке сигнала опасности столкновения с препятствием. Синхронизатор управляет приводом антенны и передает информацию об ее пространственном расположении.

Заключение

Данная книга является первым, вводным пособием в технику микроволновых радиометров. Комплексное понимание представленных основ принципов приема электромагнитного излучения позволяет понять ширину технических задач, возникающих при создании микроволновых радиометров. Полагаем, что ни одна из приведенных в книге схем реализации радиометров не работоспособна в натуральных условиях в представленном виде.

В процессе проектирования каждый радиометр модифицируется в зависимости от многих факторов, обуславливающих условия эксплуатации, что порождает еще большее число возможных вариантов практических реализаций. Несмотря на это, сведения приведенные в книге достаточны для начала создания простейших радиометрических систем, способных использоваться в образовательных целях.

Дальнейшее развитие направления планируется посвятить вопросам применения радиометров, создания новых схем и технических реализаций в зависимости от требуемого рабочего диапазона частот.

Литература

1. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Методы обработки данных радиофизического исследования окружающей среды. – М.: Наука. – 1987.
2. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Портрет Земли из космоса. Глобальное радиотепловое поле // Природа. – 2006. – №9. – С.20–35.
3. Сытник О.В. Методы идентификации природных сред и объектов по данным радиофизического эксперимента // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 1. – С. 30–56.
4. Быстров В.П., Краснянский А.Д., Новиков С.С., Потапов А.А., Соколов А.В. Пассивные радиолокационные системы скрытного обнаружения наземных объектов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1996. – Т. 1, № 1. – С. 64–71.
5. Арманд Н.А., Воронков В.Н., Никитский В.П., Панченко В.А. и др. Перспективы исследований в области дистанционного зондирования Земли и экологического мониторинга // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, №9. – С. 1061–1069.
6. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). – М.: Советское радио, 1964. – 326 с.
7. Кравцов Ю.А. Наблюдения океана из космоса при помощи микроволновых радиометров // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 7. – С. 103–107.
8. Швецов А.А., Караштин Д.А., Федосеев Л.И. и др. Наземное зондирование термической структуры средней атмосферы в диапазоне частот 50 – 60 ГГц // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54, № 8–9. – С. 631–639.

9. Федосеев Л.И., Кузнецов И.В., Куликов Ю.Ю. и др. Радиотепловые контрасты объектов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн // Радиотехника. – 2011 – № 11. – С. 80–89.

10. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Радиометрия температурной пленки морской поверхности // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 11. – С. 39–55.

11. Михайлов Н.Ф., Щукин Г.Г. Зарубежные исследования в области СВЧ– радиометрического зондирования атмосферы. Обзор // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 4. – С. 49–58.

12. Ellowitz Howard I. An introduction for microwave remote sensing // Microwave J. – 1992. – V. 35, N9. – P. 69–70

13. Финкель М.И., Масленников С.Н., Гольцман Г.Н. Концепция приемного комплекса космического радиотелескопа "Миллиметр" // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 10–11. – С. 924–932.

14. Руденко В.М. Особенности приема низкоэнергетических источников радиоэлектронных излучений в СВЧ диапазоне частот // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 12. – С. 18–31.

15. Шульгина Е.Н. Радиотепловое зондирование земных покровов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 4. – С. 59–68.

16. Vaks V.L., Kislyakov A.G., Pripolzin S.I., Savel'ev D.V., Shevelev E.I. Laboratory spectroscope based on a multichannel radiometer // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1998. – V.41, № 7/ – P. 610–615.

17. Башаринов А.Е., Шутко А.М. Определение влажности земных покровов методами СВЧ– радиометрии (обзор) // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, №9. – С. 1778–1791.

18. Шутко А.М. СВЧ– радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М.: Наука, 1986.

19. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Radiometer systems. In Microwave Remote Sensing (Active and Passive), 2nd ed. – Addison–Wesley: Reading, MA, USA. – 1981. – Vol. 1. – P. 344–431.

20. Краус Д.Д. Радиоастрономия. – М.: Сов радио, 1973. – 456с.
21. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1973. – 415 с.
22. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. – М.: Советское радио, 1976.
23. Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Кохалев А.В. Радиометрическая система радиотелескопа РФ-32 // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 4. – С. 66–75.
24. Федотов Л.Б., Кольцов Н.Е., Носов Е.В., Гренков С.А. Цифровая система преобразования сигналов для астрономических радиоинтерферометров с небольшими антеннами // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 6. – С. 21–26.
25. Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., Мардышкин В.В., Федотов Л.Б. Блоки усиления и преобразования частот сигналов для радиоастрономических приемников // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 6. – С. 41–50.
26. Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Федотов Л.Б. Радиоинтерферометрический терминал обсерватории "Бадары" // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 1. – С. 52–57.
27. Розанов С.Б., Завгородний А.С., Логвиненко С.В. и др. Малошумящий приемник для микроволновой озонметрии // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54, № 8–9. – С. 708–718.
28. Швецов А.А., Федосеев Л.И., Большаков О.С., Караштин Д.А. Микроволновый спектрометрический комплекс для наземного температурного зондирования стратосферы // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 134–135.

29. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г. и др. Новый малогабаритный микроволновый спектрометрический прибор – озонметр // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 127–133.

30. Lemaître F., Poussière J.-C., Kerr Y.H. Design and Test of the Ground-Based L-Band Radiometer for Estimating Water in Soils (LEWIS) // IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing. – 2004. – V. 42, № 8. – P. 1666–1676

31. Шило С.А., Комяк В.А. Перспективы создания многолучевых сканирующих СВЧ-радиометрических систем на основе антенн с открытыми электродинамическими структурами // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, № 2–3. – С. 101–110.

32. Выставкин А.Н., Шитов С.В., Банков С.Е. и др. Высококонтрастный матричный радиометр диапазона частот 0,13 – 0,38 ТГц на сверхпроводниковых болометрах для телескопа БТА // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 10–11. – С. 941 – 947.

33. Соломонов С.В., Игнатьев А.Н., Кропоткина Е.П. и др. Спектральная аппаратура для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №2. – С. 138–144.

34. Кубланов В.С., Потапова О.В., Седельников Ю.Е., Сысков А.М. Совершенствование характеристик свч-радиотермографов в медицинских задачах // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 4. – С. 1–27.

35. Кубланов В.С., Седельников Ю.Е., Азин А.Л., Сысков А.М. Природа флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2010. – № 9. – С. 45–54.

36. Акиншин Р.И., Быстров Р.П., Кузнецов Е.Б. и др. Развитие радиоэлектронной техники радиолокационных систем // Успехи современной

радиоэлектроники. – 2005.

– №10. – С. 24–58.

37. Быстров Р.П., Кузнецов Е.Б., Соколов А.В., Чесноков Ю.С. Методы современной радиолокации и системы обработки сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 9. – С. 11–28.

38. Соколов А.В., Чеканов Р.Н., Быстров Р.П., Садыков Р.Р., Федорова Л.В. Элементы и устройства радиоэлектронных систем // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 1. – С. 58–69.

39. Sato M., Hirose T., Ohki T., Sato H. et al. 94–GHz Band High–Gain and Low–Noise Amplifier using InP–HEMTs for Passive MillimeterWave Imager // IEEE MTT–S International Microwave Symposium Digest. – 3–8 June 2007. – Honolulu, USA. – P. 1775–1778.

40. Пирумян Г.А. Совмещенная система активно–пассивной локации // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16, № 7. – С. 52–58.

41. Черный И.В., Чернявский Г.М., Успенский А.Б., Пегасов В.М. СВЧ–радиометр МТВЗА спутника "Метеор – 3М" № 1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 6. – С. 35–48.

42. Алексеев П.В., Викторов А.С., Волков А.М. и др. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 5. – С. 68–76.

43. Федосеев Л.И., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В. Шкаев А.П. Радиометр 3– миллиметрового диапазона длин волн с модулятором–калибратором // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, N 10–11. – С. 948 – 953.

44. Bocquet B.J., Velde C., Mamouni A., Leroy Y. Microwave radiometric imaging at 3 GHz for the exploration of breast tumors // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1990. – Vol. 38, № 6. – P. 791–793.

45. Маречек С.В. Интерференционный радиометр– поляриметр // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 4. – С. 64–70.

46. Аракелян А.К., Акопян И.К., Аракелян А.А. и др. Короткоимпульсный, поляризационный, совмещенный скаттерометр–радиометр на 20 ГГц // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 9. – С. 56–63.

47. Аракелян А.К., Гамбарян А.К., Смолин А.И. и др. Короткоимпульсный, поляризационный, совмещенный скаттерометр–радиометр диапазона Ка // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 7. – С. 73–77.

48. Аракелян А.К., Акопян И.К., Аракелян А.А. и др. Поляризационный, короткоимпульсный, совмещенный скаттерометр–радиометр диапазона S с возможностью действия на близких расстояниях // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 52–60.

49. Аракелян А.К., Акопян И.К., Аракелян А.А. и др. Двухканальный, поляриметрический, совмещенный скаттерометр–радиометр на 5,6 ГГц // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12, № 11. – С. 41 – 47.

50. Патент РФ 2060507, МПК⁷ G01R 29/08. Радиоспектрометр с частотной модуляцией / А.Г. Кисляков, Е.И. Шкелев (РФ). – 5002395/09; заявл. 01.07.91; опубл. 20.05.96. – Бюл. №14. – С.196.

51. Jansky K.G. Directional studies of atmospherics at High Frequencies // Proc. IRE. – 1932. – vol. 20. – P. 1920–1932.

52. Reber G. Cosmic Static // Astrophys. J. – 1940. – vol. 91, June. – P. 621–624.

53. Tiuri M.E. Radiometer astronomy receivers // IEEE Transactions Antennas Propagations. – 1964. – № 12. – P. 930–938.

54. Hersman M.S., Poe G.A. Sensitivity of the total power radiometer with periodic absolute calibration // IEEE Transactions Microwave Theory. – 1981. – № 29. – P. 32–40.

55. Brown S., Desai S., Lu W. and Tanner A. On the Long–Term Stability of Microwave Radiometers Using Noise Diodes for Calibration // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2007. – V. 45, № 7. – P. 1908–1920.

56. Dicke R.H. The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies // Rev. Sci. Instr. – 1946. – vol. 17, July. – P. 268–275.

57. Thomsen F. On the resolution of Dicke type radiometers // IEEE Transactions Microwave Theory. – 1984. – № 32. – P. 145–150.

58. Skou N. Sensitivity and accuracy of different radiometer types. In Microwave Radiometer Systems. Design and Analysis, 2nd ed. – Artech House: Norwood, MA, USA. – 1989. – P. 57–78.

59. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. – М.: Наука, 1974. – 188 с.

60. Грачев А.М. Модуляционные радиометры (обзор) // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. – 1991. – № 3. – С. 29–38.

61. Ryle M. Vonberg D.D. An investigation of radio–frequency radiation from the sun // Proceeding of the Royal Society. – 1948. – Vol. 193, № 1032. – P. 98–119.

62. Троицкий В.С. Нулевой метод измерения слабых электрических флюктуаций // Журнал технической физики. – 1955. – Т.25, №3. –С. 478–496.

63. Fusomoto K. On the Correlation Radiometer Technique // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1964.– vol. MTT–12. – P. 203.

64. Панаджян В.Г. Балансный радиометр // Известия вузов. Радиофизика. – 1990. – Т. 33, № 7. – С. 887–888.

65. Aitken G. J. M. A new correlation radiometer // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1968. – Vol. 16, N 2. – P. 511–523
66. Гвоздев В.И., Криворучко В.И., Кузаев Г.А., Турыгин С.Ю. Микроволновый радиовизор // Измерительная техника. – 2000. – №3. – С. 52–57.
67. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. – М.: Луч, 1997. – 440 с.
68. Graham M.H. Radiometer circuit // Proc. IRE. – 1958. – vol.46. – P. 1966
69. Дулевич Б.Е. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио. – 1964. – 710 с.
70. Ван дер Зил А. Флуктуации в радиотехнике и физике. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 234 с.
71. Адерихин В.И., Буренков Ю.А., Саргсян М.В., Уздин Р.И. Усовершенствование государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения // Измерительная техника. – 2012. – № 12. – С. 3 – 8.
72. Поляков В.М. Измерения абсолютных термодинамических температур биологических объектов радиофизическим методом // Радиотехника. – 1998. – №8. – С. 88–94.
73. Башаринов А.Е., Тучков Л.Т., Поляков В.М., Ананов Н.И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ– диапазоне. – М.: Сов. радио, 1968. – 390 с.
74. Harris A.I. Spectroscopy with Multichannel Correlation Radiometers // Review of Scientific Instruments. – 2005. – 76, 054503. – P. 1–6.
75. А.с. №1166017 СССР. МКИ G01 R 29/08. Многоканальный радиометр / А.С. Султанов, В.А. Кулаков, В.Н. Быков, Ю.В. Овсянников. – Оpubл. в Бюл. №25, 1985.

76. А. с. №1528156 СССР, МКИ⁵ G01R 29/08. Многоканальный модуляционный радиометр / В.С.Аблязов. – 4326858/24–09; заявл. 11.11.87.

77. А. с. №1574037 СССР, МКИ⁵ G01R 29/08. Многоканальный модуляционный радиометрический приемник / В.С.Аблязов. – 4323335/24–09; заявл. 30.10.87.

78. А. с. №1605784 СССР, МКИ⁵ G01R 29/08. Многоканальный модуляционный радиометр / В.С.Аблязов. – 4419546/24–09; заявл. 03.05.88.

79. Мухиев Г., Рахимов И.А., Рыжков Н.Ф., Ханбердиев А.Х. Методика спектральных измерений с шумовым пилот– сигналом в широкополосном канале и с синтезированным каналом сравнения в анализаторе спектра с цифровыми спектральными каналами // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции "Радиоастрономическая аппаратура". – 10–12 окт. 1985 г. – Ереван: Изд–во Акад. наук Арм. ССР, 1985. – С. 95.

80. Абанеев С.И., Гудзь Ю.Д., Ловкова И.М., Спангенберг Е.Е. Радиометр РАТАН–600 на волну 31см по схеме с пилот– сигналом // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции "Радиоастрономическая аппаратура". – 10–12 окт. 1985 г. – Ереван: Изд–во Акад. наук Арм. ССР, 1985. – С. 190.

81. Alimenti F., Bonafoni S., Leone L., Tasselli G, Basili P., Roselli L. A Low–Cost Microwave Radiometer for the Detection of Fire in Forest Environments // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2008. – vol. 46, №. 9. – 2632–2643

82. А.С. №1451627 СССР, МКИ G01W 1/100. Сканирующий радиометр / Н.Н. Будолович, В.В. Некрасов, Л.А. Пенязь, А.Ю. Прозоровский. – 4170442/24–10.

– Оpubл. В бюл. №2 15.01.89

83. А.С. №1370640 СССР, МКИ G 01 s 13/95, G01 R 29/08. Компенсационный радиометр / С.А. Волохов и А.А. Кочетков. – 4127834/24–09. – Оpubл. В бюл. № 4 30.01.88

84. Бутакова С.В. Апертурные шумовые излучатели в микроволновой радиометрии // Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 4. – С. 3–26.

85. Вайсблат А.В. Методы калибровки и поверки медицинских радиотермометров // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. – № 1. – С. 49–54.

86. Розанов С.Б., Платонов Ю.М., Лукин А.Н., Соломонов С.В. Охлаждаемые квазиоптические поглощающие нагрузки для радиометров коротковолновой части миллиметрового диапазона волн // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 3. – С. 359–365.

87. Тетерич Н.М. Генераторы шума и измерение шумовой характеристики. – М.: Энергия, 1968. – 214 с.

88. Наливайко Б.А., Берлин А.С., Божков В.Г., Вейц В.В., и др. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник. – Томск: МГП "РАСКО", 1992. – 223 с.

89. Frater R.H., Williams D.R. An active "cold" noise source // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. – 1981. – MTT-29, № 4. – P. 344–347.

90. Бережной В.А. Низкотемпературный генератор шума // Электронная техника. Серия: Электроника СВЧ. – 1989. – №10. – С. 46–47.

91. Немлихер Ю.А., Рукавицын А.Ф., Струков И.А. Транзистор – источник низкотемпературного СВЧ–шума // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 5. – С. 603–608.

92. Топольницкий В.Н. Генерация "холодного" шума сверхвысокочастотным транзистором // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47, № 12. – С. 1513–1516.

93. Адерихин В.И., Дорофеев А.А., Топольницкий В.Н., Уздин Р.И. Расчет шумовой температуры транзисторных низкотемпературных генераторов шума СВЧ // Измерительная техника. – 2002. – № 2. – С. 59–64.

94. Camps A., Tarongi J.M. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times // Remote Sensing. – 2010. – № 2. – P. 1826–1843/

95. Q. Klemetsen, Y. Birkelund, S. K. Jacobsen, P. F. Maccarini and P. R. Stauffer. Design of medical radiometer front-end for improved performance. // Progress In Electromagnetics Research –2011. – № B27: – P.289–306.

96. United states patent US2013/0079629 Int.Cl. A61 B 6/00. Passive non invasive tomography / James U. Lemke. – App. № 13/242 186, Pub. date 28.03.2013.

97. Авторское свидетельство СССР № 1168876 МКИ 4G01R29/08. Модуляционный радиометр / В.С. Аблязов. – 3530983/24–09, опубл. 23.07.82 в Бюл. № 27 стр. 8–15.

98. Goggins W.B. A microwave feedback radiometer // IEEE Transactions Aerospace Electronics Systems. – 1967. – № 3. – P. 83–90.

99. Геворкян В.Г., Кисляков А.Г., Мирзабекян Э.Г. Автоматический нулевой радиометр диапазона длин волн 3–4 мм // Известия вузов. Радиофизика. – 1979. – Т. 22, № 2. – С. 240–242.

100. Чеевко А.Г. Метод противопоставления в шумовой термометрии как развитие идей П.Г. Стрелкова // Измерительная техника. – 2011. – № 10. – С. 28–33.

101. Карапетян В.Р., Нагдалян Э.А. Квазиулевой модуляционный радиометр // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции "Радиоастрономическая аппаратура". – 10–12 окт. 1985 г. – Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1985. – С. 255–256.

102. Агаджанян А.С., Долганов С.А., Тохмахян М.Г. Цифровое управление подшумливанием для квазиулевого радиометра //

Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции "Радиоастрономическая аппаратура". – 10–12 окт. 1985 г. – Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1985. – С. 5–6.

103. Nach J.P. A very sensitive airborne microwave radiometer using two reference temperatures // IEEE Transactions Microwave Theory. – 1968. – № 16. – P. 629–636.

104. Ворсин Н.Н., Милицкий Ю.А., Шаинский В.М., Эткин В.С. Измерительные СВЧ-радиометры с цифровым выходом // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 103.

105. Wilson W.J., Tanner A., Pellerano F. Development of a high stability L-band radiometer for ocean salinity measurements // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA, July 2003. – Vol. 2. – P. 1238 – 1240. (две опоры, время наблюдения на три части, компьютерные расчеты, формула для чувствительности).

106. Фрейтер. Синхронный интегратор и демодулятор // Приборы для научных исследований. – 1965. – Т. 36, № 5. – С. 53–57.

107. Ипатов А.В., Берлин А.Б. Низкочастотное выходное устройство радиоастрономического приемника с синхронным интегратором // Известия вузов. Радиофизика. – 1973. – Т. 16, № 5. – С. 712–715.

108. Hardy W.N., Gray K.W., Love A.W. An S-band Radiometer Design with High Absolute Precision // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1974. – MTT-22, № 4. – P. 382–391.

109. Носов В.И., Забытов Ю.М., Лебский О.В., Штанюк А.М. Нулевой двухканальный автоматический радиометр 3-миллиметрового диапазона волн // Изв. вузов. Радиофизика. – 1988. – Т. 31, № 7. – С. 785–790.

110. А.с. №1171731 СССР, МКИ³ G01R 29/08. Модуляционный радиометр / В.С. Аблязов. – Оpubл. в Б.И. № 29, 1985. – С. 154.

111. Land D.V., Levick A.P. and Hand J.W. The use of the allan deviation for the measurement of the noise and drift performance of microwave radiometers // *Measurement Science Technology*. – 2007. – Vol. 18, № 7. – P. 1917–1928.

112. Филатов А.В. Способы реализации модификации метода нулевого приема в сверхвысокочастотных радиометра // *Радиотехника и электроника*. – 2003. – Т.48, № 7. – С. 888–894.

113. Филатов А.В. Микроволновые радиометрические системы нулевого метода измерений. Изд–во: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 273 с.

114. Филатов А.В. Нулевой метод в радиометрических измерениях. Изд–во: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. – 206 с.

115. Филатов А.В., Убайчин А.В. Параев Д.Е. Применение концепции нулевого метода измерений в микроволновых радиометрах // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2011. – № 4. – С. 41–55

116. Филатов А. В., Убайчин А.В. Метод авторегулирования нулевого баланса в радиометрических системах // *Нелинейный мир*. – 2010. – Т.8. № 4, – С. 220–233.

117. United States Patent ICC G01S 3/02 20060101 G01S003/02/. Multi-channel radiometer imaging system / Ammar, Danny F. – pub. March 9, 2006

118. А.с. №1538150 СССР. МКИ G01R29/08. Компенсационный радиометр / В.С. Аблязов. – Оpubл. в Бюл. № 3, 1990.

119. А.с. №1144060 СССР. МКИ G01 R 29/08. Радиометр / А.С. Султанов, В.А. Кулаков, Ю.В. Овсянников В.Н. Бондарчук. – Оpubл. в Бюл. № 9, 1985.

120. А.с. №1168876 СССР. МКИ G01 R 29/08. Модуляционный радиометр / В.С. Аблязов. – Оpubл. в Бюл. № 27, 1985.

121. А.с. №1423967 СССР. МКИ G01 R 29/08. Радиометр / А.Ю. Прозоровский, В.П. Яковлев, К.Ю. Ходареев. – Оpubл. в Бюл. № 34, 1988.

122. А.с. №1493962 СССР. МКИ G01 R 29/08. Модуляционный радиометр / В.С. Аблязов. – Оpubл. в Бюл. № 26, 1989.

123. А. с. №1574038 СССР, МКИ⁵ G01R 29/08. Многоканальный балансный радиометр / В.С.Аблязов. – 4419538/24–09; заявл. 03.05.88.

124. Патент США №7603088 В2. Многоканальная радиометрическая система с применением СВЧ ГИС / Danny F. Ammar, F.L Wndermere (US). – приоритет от 13 декабря 2005.

125. Филатов А.В., Убайчин А.В., Параев Д.Е. Микроволновый четырехканальный нулевой радиометр L–диапазона // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 1. – С. 67–75.

126. Филатов А.В., Убайчин А.В., Жуков Н.О. Двухканальный радиометр повышенной точности // Радиотехника. – 2011. – № 1. – С. 47–53.

127. Филатов А.В., Убайчин А.В., Бомбизов А.А. Двухприемниковый микроволновый радиометр с высокой линейностью передаточной характеристики // Измерительная техника. – 2012. – № 1. – С. 37–41.

128. Патент №2439594 РФ, МПК G01R 29/08. Нулевой радиометр / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Н.О. Жуков. – Приоритет от 01.06.2010. – заявка № 2010122360/28. – Оpubл. в Бюл. № 1, 2012. – С. 133.

129. Патент №2460081 РФ. МПК G01R 29/08. Многоканальный нулевой радиометр / А.В. Филатов, А.В. Убайчин. – Приоритет от 23.11.2010.

– заявка № 2010147776/28. – Оpubл. в Бюл. № 24, 2012. – С. 253.

130. Патент №2393502 РФ, МПК G01R 29/26, G01S 13/95. Двухканальный нулевой радиометр / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, О.А. Сербинов. – Приоритет от 08.12.2008. – заявка № 2008148402/09. – Оpubл. в Бюл. № 18, 2010. – С. 125.

131. Убайчин А.В., Сербинов О.А., Жуков Н.О. Двухканальный микроволновый радиометр повышенной точности // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2009". – 4–8 мая 2009. – Томск. – Из-во: В-Спектр, 2009. – Ч. 5. – С. 312–315.

132. Филатов А.В., Убайчин А.В., Жуков Н.О., Чудинов А.О. Новый подход к построению многоканальных радиометрических систем для дистанционного определения легких газовых составляющих атмосферы // IV Всероссийская конференция молодых ученых "Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии". – 19–21 окт. 2009. – Томск. – Изд-во: ИОА СО РАН, 2009. – С. 372–376.

133. Филатов А.В., Убайчин А.В., Параев Д.Е. Многоканальные радиометрические системы нулевого метода измерений // Конференция молодых специалистов "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева" "Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем", посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина. – 2–4 марта 2011. – Железногорск. – Изд-во: ОАО "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева", 2011. – С. 53–55.

134. Убайчин А.В. Двухканальный радиометр с произвольным диапазоном измерения // Конференция молодых специалистов "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева" "Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем", посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина. – 2–4 марта 2011. – Железногорск. – Изд-во: ОАО "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева", 2011. – С. 51–53.

135. Филатов А.В., Убайчин А.В., Параев Д.Е. Многоканальные радиометрические системы для экологических исследований // 66-я Научная сессия, посвященная Дню радио. Российское научно-техническое общество

радиотехники электроники и связи (РНТОРЭС). – 11–12 мая 2011. – Москва. – Изд-во: РНТОРЭС, 2011. – С. 100–102.

136. Убайчин А.В., Мисюнас А.О., Филатов А.В. Цифровой блок управления для микроволнового радиометра РМ–1420 // Всероссийская научно–техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР–2008". – 4–8 мая 2008. – Томск. – Изд-во: В–Спектр, 2008. – Ч. 1. – С. 111–115.

137. Убайчин А.В. Инвариантность нулевых радиометров с цифровым управлением подшумливанием к нелинейности уравнивающего генератора шума на лавинно–пролетном диоде // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), часть 1. – С.87–91.

138. Филатов, А.В. Модифицированный метод нулевого приема в сверхвысокочастотном радиометре / Филатов А.В. // Приборы и техника эксперимента. – 1996. – № 3. – С. 87–92.

139. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 383с.

140. Грачев В.Г., Рыжков Н.Ф. Чувствительность радиометра и метод импульсной компенсации // Астрофизические исследования (Изв. САО). – 1980. – № 19. – С. 68–76.

141. Галустов Г.Г., Бровченко С.П., Клименко В.В. Связь шумовых параметров многоканального приемного СВЧ– устройства с его чувствительностью // Радиотехника. – 2008. – № 11. – С. 102–105.

142. Лебедев И.В. Новый подход к расчетам тепловых шумов // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 12. – С. 1516–1520.

143. Ворсин Н.Н., Милицкий Ю.А., Шаинский В.М., Эткин В.С. Реализация предельной чувствительности модуляционных СВЧ– радиометров // Известия вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30, № 8. – С. 931–938.

144. Филатов А.В., Каратаева Н.А., Лоцилов А.Г. Флуктуационная чувствительность микроволновых нулевых радиометров на основе комбинированной импульсной модуляции // Успехи современной радиоэлектроники.– № 10.– 2006.– С. 3–18.

145. Филатов А.В., Убайчин А.В. К вопросу о повышении чувствительности нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии". – 10–14 сентября 2012, Севастополь, Крым, Украина. – Изд–во: Вебер, –2012. – Т.2. – С. 1094–1098.

146. Убайчин А.В. Оценка возможности определения тепловых аномалий по собственному электромагнитному излучению в непроводящих средах. // Доклады ТУСУР.– 2011. – № 2 (24), часть 1. – С.122–127.

147. А.с. №1124232 СССР МКИ G 01 S 13/00/ Радиометр /Б.П. Рябов, В.А. Шевченко. – приоритет от 31.12.86. Заявка 360114/18–09. – опубл. в бюл. № 42 15.11.84.

148. Федосеева Е.В. Анализ факторов, ограничивающих пространственную разрешающую способность радиометрических систем СВЧ // Радиотехника. – 2009. – № 11. – С. 130 – 133.

149. Филатов А. В., Убайчин А.В. Динамические свойства цифровой радиометрической системы и эффективность ее работы // Измерительная техника. – 2011. – № 10. – С. 39–42.

150. Убайчин А.В., Жуков Н.О., Филатов А.В. Способы повышения динамических характеристик микроволновых радиометрических систем // Международная научно–практическая конференция "Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития". – 31 октября – 3 ноября 2007. – Томск. – Изд–во: В–Спектр, –2007. – С. 39–42.

151. Филатов А.В., Шестернев Д.М. Микроволновые нулевые радиометры для исследования экосистем. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2003. – 152 с.

152. Филатов А.В., Винокуров В.М., Мисюнас А.О. Двухканальный радиометр с нулевым методом измерений // Приборы и техника эксперимента.– 2009. – №1. – С. 90–95.

153. Убайчин А.В. Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т.55, № 9/3. – С. 130–134.

154. Филатов А.В., Убайчин А.В., Жуков Н.О., Чудинов А.О. Двухканальный микроволновый радиометр с улучшенными динамическими характеристиками // Шестая Всероссийская научно-техническая конференция с участием стран СНГ "Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем". – 22–23 сентября 2009. – Ульяновск. – Изд-во: Ульяновский ГТУ, 2009. С. 279–300.

155. Филатов А.В., Убайчин А.В. Повышение динамических характеристик двухканального микроволнового радиометра // Конференция молодых специалистов "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева" "Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем", посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина. – 2–4 марта 2011. – Железногорск. – Изд-во: ОАО "Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева", 2011. – С. 56–57.

156. А.с. №1582833 СССР МКИ G 01 R 29/08, G 1 S 13/95. Калибратор сверхвысокочастотного радиометра / В.С. Кубланов, Ю.П. Гаврилов. – приоритет от 28.04.1988 заявка № 4453587/24–09. Обул. в бюл. № 15 02.05. 1989.

157. А.с. №1239641 СССР. G01R 29/08. Калибратор СВЧ– радиометра / А.Г. Горелик, С.А. Кочеров, Ю.А. Фролов. – Опубл. в Б.И. №23, 1986. – С. 174

158. Юрчук Э.Ф., Арсаев И.Е. Обеспечение единства измерений в микроволновой радиометрии // Измерительная техника. – 2009. – № 1. – С. 51–56.

159. Han Y., Westwater E.R. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers // IEEE International Geoscience and Remote Sensing. – 2000. – N 38. – P. 1260–1277.

160. Арсаев И.Е., Юрчук Э.Ф. Методы и аппаратура для прецизионных измерений коэффициента поглощения микроволновых широкоапертурных излучателей в свободном пространстве // Измерительная техника. – 2011. – № 3. – С. 62–66.

161. Убайчин А.В., Жуков Н.О., Филатов А.В. Микроволновый радиометр для измерения сигналов с низкой эффективной температурой // Международная научно–практическая конференция "Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития". – 31 октября – 3 ноября 2007. – Томск. – Изд–во: В–Спектр, 2007. – С. 34–39.

162. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / Клаассен, К.Б. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

163. Ефимов И.Е., Шермина Г.А. Волноводные линии передачи. – М.: Связь, 1979. – 232с.

164. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. и др.. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.

165. Мэклин Э.Д. Терморезисторы. Пер. с англ. под общей редакцией К.И. Мартюшова. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.

166. Радиотехника: Энциклопедия / Под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды. – М.: Додэка–21, 2002. – 944с.
167. А.с. №1575715 СССР. Радиометрический приемник / В.Н. Самарин, В.Ф. Ключев. – приоритет от 29.02.1988.
168. Костров В.В., Линников О.Н., Смирнов М.С., Трусов В.Н. Сравнительный анализ приемников сверхширокополосных сигналов // Радиотехника. – 2009 – № 11. – С. 134 – 136.
169. Алмазов–Долженко К.И., Пантыкин С.В. Шумовые параметры шестиполосников // Радиотехника. – 2009 – № 6. – С. 32–34.
170. А.с. №1633984 СССР, МПК⁵ G01R 29/26. Способ определения эквивалентной шумовой температуры входа усилителя / И.И.Очковский, В.А.Петровский. – 4720862/21; заявл. 14.07.89.
171. Крохалев А.В. Блок магистральных усилителей–корректоров для радиотелескопов комплекса "Квазар" // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 2. – С. 175–176.
172. Belyaev V.A., Tyurnev V.V., Nikitina M.I., Nozhenkova L.F. Intelligent system for the designing of microband filters // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2000. – Т. 39, № 2. – С. 255–261.
173. Беляев Б.А., Титов М.М., Тюрнев В.В. Коэффициент связи нерегулярных микрополосковых резонаторов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2000. – Т. 43, № 8. – С. 722–727.
174. Belyaev V.A., Serzhantov A.M. The behavior of coupling coefficients of coupled microwave quarter–wave resonators // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2004. – Т. 49, № 3. – С. 275–281.
175. Alaydrus M. Designing Microstrip Bandpass Filter at 3.2 GHz // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. – 2010.– Volume 2, № 2. – P.71–83.
176. Плотников Д.Е. Операционные усилители: Принципы построения, теория, схемотехника. – М.: Энергоиздат, 1983. – 216 с.

177. Ильин В.А. Технология изготовления печатных плат. – Л.: Машиностроение, 1984. – 75 с.
178. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 302 с.
179. Kalimulin I.F., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Impedance of low-frequency passive components of spaceborne equipment at frequencies ranging to 20 GHz // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2012. – Т. 55. № 2. – С. 231–237.
180. Убайчин А.В., Жуков Н.О. Устройство отладки радиометров с цифровым управлением подшумливанием // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР–2010". – 4–8 мая 2010. – Томск. – Изд-во: В-Спектр, 2010. – Ч.5. – С. 269–271.
181. Бережной В.А., Полищук В.И. Установка для прецизионного измерения малых ослаблений СВЧ– мощности методом замещения на низкой частоте // *Электронная техника. Серия: Электроника СВЧ*. – 1989. – № 9. – С. 60–61.
182. Xu Wen Tian, Yand Chuan Tao. Microwave radiometer calibration and its error analysis // *Digest Conference on precision electromagnetic measurements. CPREM'88*. – 1988. – Tsukuba. – S. 1. – P. 390–391.
183. Carver K.R. Microwave remote sensor calibration // *New Mexico State University Engineering Research center*. – 12–16 sept. 1983. – С. 589–599.
184. Hardy W.N. Precision temperature reference for microwave radiometer // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. – 1973. – МТТ–21. – № 3. – P. 149–150.
185. Патент №2439595 РФ. G01R 29/08. Радиометрический измеритель коэффициента отражения / А.В. Филатов, А.В. Убайчин. – Приоритет от 04.08.2010. – № 2010132764/28, опублик. в Бюл. № 1, 2012. – С. 157.
186. Патент №2431856 РФ. G01R 29/08. Радиометр для исследования объектов, непосредственно прилегающих к антенне / А.В. Филатов,

А.В. Убайчин. – Приоритет от 01.06.2010. – № 2010122330/28; опубл. в Бюл. № 29, 2011. – С. 240.

187. Комяк В.А., Шило С.А., Левада А.С., Яцевич С.Е. Особенности наземной калибровки бортовых радиометрических систем с антеннами больших размеров // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – № 12. – С. 10–15.

188. Шевцов Б.Н., Алмазов–Долженко К.И., Паляев В.С., Пантыкин С.В. Автоматизация измерения флуктуационной чувствительности радиометров с оценкой достоверности результатов // Электронная техника. Серия: Электроника СВЧ. – 1990. – № 2. – С. 33–36.

Учебное издание

**Убайчин Антон Викторович ,
Филатов Александр Владимирович,
Орлов Павел Евгеньевич**

ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

Учебное пособие

Корректор

Компьютерная верстка

Подписано в печать " ____ " _____ 2014г.

Усл. печ. л. _____. Тираж _____ экз. Заказ _____.

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.