

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

А.В. Филатов, Д.А. Покаместов

**РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ И МНОГОКАНАЛЬНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ
РАДИОТЕРМОМЕТРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНОГО
ИЗОБРАЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ВНУТРИ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Учебное пособие для студентов технических направлений
подготовки и специальностей

Томск
2026

УДК 621.37.037
ББК 32.95
Ф51

Рецензент:

Рогожников Е.В., заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа,
кандидат технических наук

Ф 51 Радиоволновые методы и многоканальные микроволновые радиотермометры для дистанционного получения объемного изображения распределения тепловых полей внутри биологических объектов: Учебное пособие для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.В. Филатов, Д.А. Покаместов – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2026. – 46 с.

В учебном пособии изложены основные закономерности теплового микроволнового излучения биологических сред. Описаны факторы, влияющие на выбор аппликаторных антенн радиотермометров. Рассмотрены методы и схемы радиотермометров с компенсацией влияния коэффициента отражения в месте контакта антенны с биологической средой. Основное внимание уделено микроволновым радиотермометрам, использующим в основе функционирования перспективную модификацию нулевого метода измерений. Приводятся особенности построения и описаны принципы функционирования одно- и многоприемниковых радиотермометров. Уделено внимание оценке структуры биологической ткани по данным измерения модуля коэффициента отражения по мощности на границе биообъекта с антенной.

Учебное пособие для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Учебное пособие будет полезной научным работникам, аспирантам, магистрантам, а также преподавателям вузов, специализирующимся в создании микроволновых радиотермометров для исследования биологических сред.

Одобрено на заседании кафедры ТОР, протокол № 5 от 29 января 2026 г.

УДК 621.37.037
ББК 32.95

© Филатов А.В., Покаместов Д.А., 2026
© Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Диагностический метод микроволновой радиотермометрии.....	6
1.1 Основные положения	6
1.2 Особенности радиотеплового излучения биологических сред.....	6
1.3 Глубина зондирования. Выбор длины волны принимаемого излучения.....	7
1.4 Абсолютные и относительные радиометрические методы измерения глубинных температур	9
1.5 Вопросы для самопроверки	9
2 Методы и алгоритмы функционирования микроволновых радиотермометров для измерения глубинных температур биологических сред	11
2.1 Анализ функционирования радиотермометра с контактной антенной.....	11
2.2 Радиотермометр с исключением погрешности, вызванной рассогласованием антенны с биологическим объектом	14
2.3 Радиотермометр с автоматической регулировкой подшумливания биологической среды	15
2.4 Радиотермометр со скользящим подшумливанием объекта исследования.....	17
2.5 Быстродействующий радиотермометр с компенсацией влияния коэффициента отражения контакта антенны с биологической средой.....	18
2.6 Требования к аппликаторным антеннам радиотермометра	21
2.7 Вопросы для самопроверки	23
3 Микроволновые радиотермометры на основе метода комбинированной импульсной модуляции и авторегулирования нулевого баланса	25
3.1 Структура, математическая модель передаточной характеристики, принцип функционирования одноприемникового радиотермометра	25
3.1.1 Структура и состав.....	25
3.1.2 Принцип функционирования и передаточная характеристика.....	26
3.1.3 Калибровка.....	28
3.1.4 Алгоритм функционирования блока управления	28
3.1.5 Флуктуационная чувствительность	29
3.2 Многоприемниковый радиотермометр	30
3.2.1 Структура и состав.....	30
3.2.2 Принцип функционирования и передаточная характеристика.....	32
3.2.3 Калибровка.....	35
3.3 Вопросы для самопроверки	35
4 Оценка структуры биологической ткани по данным измерения модуля коэффициента отражения на границе биообъекта с антенной.....	37
4.1 Общие положения.....	37
4.2 Радиометрический измеритель модуля коэффициента отражения для определения структуры биологической ткани	39
4.2.1 Структура и состав.....	39
4.2.2 Принцип функционирования и передаточная характеристика.....	40
4.3 Вопросы для самопроверки	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	45

ВВЕДЕНИЕ

В наше время поведение сложной биологической системы можно прогнозировать на основе системного анализа, предусматривающего получение максимального объема информации, установления взаимосвязей явлений в функционировании системы, выявления отклонений параметров, характеризующих ее деятельность на основе сопоставления с модельными характеристиками. Такой подход требует нового уровня использования математических методов и компьютерных средств обработки физиологической и клинической информации. Прогнозирование возникновения, течения и исхода патологического процесса представляет собой одно из наиболее перспективных направлений современной медицинской науки, поскольку обеспечивает опережающее знание, позволяющее на основе предвидения наиболее вероятного развития событий предпринимать оптимальные управленческие решения по профилактике болезни, лечению и реабилитации больных.

Широкое применение радиоволнового электромагнитного излучения в медицине (онкологии, физиотерапии, урологии, гинекологии, неврологии и т.п.) ставит задачу разработки методик и средств экспериментального исследования распределения электромагнитного поля в ближней зоне в средах с высоким поглощением. Методы радиофизики, как научной методологии получения информации о дистантных объектах, в настоящее время широко привлекаются к исследованию организма человека. Они основаны на построении динамических распределений физических полей и излучений человека (динамическое радиотепловое картирование) – новое направление медицинской диагностики на основе неинвазивного функционального картирования биологического объекта.

В настоящее время большой интерес вызывает исследование возможностей восстановления глубинных распределений температуры в биологических средах, в частности в теле человека, по данным измерений теплового радиоизлучения этих сред. Ценность дистанционных, неинвазивных измерений определяется в первую очередь трудностями прямых измерений, связанных с введением датчика в тело человека. Важным достоинством радиометрических методов является возможность получения данных оперативно и непрерывно, в реальном масштабе времени.

Основная концепция метода микроволновой радиометрии в зондировании биологических сред была сформулирована в начале 80-х годов прошлого столетия академиками В.А. Котельниковым и В.С. Троицким. В результате были созданы методы радиометрического зондирования глубинного распределения абсолютной температуры биологических объектов, алгоритмы и методики решения задач зондирования сред с многослойной диэлектрической структурой и сильным поглощением.

Достоинство радиометрического метода измерения глубинных (висцеральных) температур включает 3 "бе(с)з": бескровность, безболезненность, безопасность для пациента. Достоинства метода радиометрии по сравнению с известными: неинвазивность (дистанционность), бескровность; раннее определение температурной аномалии (позволяет начать лечение воспалительного процесса или опухоли как можно раньше); контроль за ходом лечения (абсолютная безвредность, возможность проведения многократных исследований); портативность и невысокая стоимость (по сравнению с томографией, каждый врач может использовать радиотермометр в своей повседневной работе для обнаружения повышения температуры внутренних органов); всеобщая диспансеризация, как часть недорогого обследования, выявление болезни на ранней стадии; контроль за ходом лечения, а также за воздействием лекарственных средств и физиотерапевтических процедур; обнаружение патологического очага возможно на глубине 3-7 см. Важность знания внутренних температур биологического тела вызвана тем, что практически все болезненные процессы связаны с воспалением и с изменением температуры органа или участка тела.

В данном учебном пособии рассматриваются принципы построения радиотермометров, использующих в основе функционирования нулевой метод. Освещены вопросы создания высокоточных микроволновых радиотермометров с перспективной модификацией нулевого метода на базе комбинированной импульсной модуляции и авторегулировании нулевого баланса.

В третьей главе достаточно подробно рассматриваются микроволновые радиотермометры, использующие в основе функционирования модификацию нулевого метода измерений. Приведены структуры и состав одно- и многоприемниковых радиотермометров. Описаны принципы функционирования, получены математические модели передаточных характеристик. Приведены формулы для оценки флуктуационной чувствительности. Рассмотрен процесс калибровки по внешним эталонам.

В четвертой главе уделено внимание оценке структуры биологической ткани по данным измерения модуля коэффициента отражения по мощности на границе биообъекта с антенной. Приведен принцип функционирования радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения в широкой полосе частот с использованием сигналов шумового характера.

1 Диагностический метод микроволновой радиотермометрии

1.1 Основные положения

Микроволновая пассивная радиотермометрия относится к классу диагностических методов различных воспалительных и опухолевых процессов, заболеваний, приводящих к локальному повышению температуры в глубине тканей, и основана на измерении собственного излучения биологических тканей. Интенсивность этого излучения пропорциональна температуре тех областей тела, из которых оно выходит. Микроволновая радиометрия основана на законе излучения нагретых тел, законе Планка. Каждое нагретое тело излучает в широком диапазоне частот, и это излучение пропорционально абсолютной температуре тела.

Впервые радиометрия зондирования сред с многослойной диэлектрической структурой и сильным поглощением была применена Барретом для диагностики опухолей молочной железы. Вероятность определения опухоли оказалась равной 0,7, примерно такая же, как и при использовании инфракрасного тепловизора. Совместное использование инфракрасной и сверхвысокочастотной диагностики позволили увеличить вероятность распознавания опухоли до 0,91, то есть близко к методам рентгенографии. Дальнейшие исследования подтвердили возможность раннего обнаружения опухоли. Причем, преимущества использования СВЧ излучения тканей перед инфракрасным оказались тем больше, чем глубже находилась опухоль.

Основным параметром, определяющим перенос радиотеплового излучения биотканей, является их комплексная диэлектрическая проницаемость. Биологические ткани диамагнитны. Они прозрачны для магнитных полей, ультразвуковых излучений, микроволн дециметрового диапазона. Слой жира представляет собой среду с низким поглощением электромагнитных волн, поэтому более прозрачен. Под слоем жира возрастает точность восстановления температурного профиля более глубоких слоев ткани.

Толщина слоя, в котором формируется тепловое излучение, зависит от длины волны. Ниже приведена характеристика излучения организма человека в области инфракрасных и радиоволн.

Инфракрасное тепловое излучение тела человека с термодинамической температурой около 300 К имеет максимум на длине волны 8 – 14 мкм в диапазоне 3 – 20 мкм. Интенсивность этого излучения составляет 10^{-2} Вт/см² (интегральное значение излучения приблизительно составляет для средне статистического человека 100 Вт). В двух окнах прозрачности, 3 – 5 и 8 – 14 мкм, можно наблюдать человека за сотни метров. Характерная глубина, с которой выходит тепловое излучение, составляет ≈ 100 мкм. С использованием этого излучения можно оценить капиллярный кровоток в коже – основной механизм терморегуляции, где отражается активность практически всех регуляторных систем организма.

Интенсивность радиотеплового излучения намного более слабое, чем инфракрасное, составляет порядка 10^{-16} Вт/м²Гц^{1/2}рад². Это излучение выходит из глубины организма и несет информацию о кровотоке в мышцах, коре головного мозга, внутренних органах. Его длина волны соизмерима с глубиной, с которой оно выходит.

1.2 Особенности радиотеплового излучения биологических сред

В радиотермометрии прием теплового излучения глубинных тканей проводится с помощью антенн-аппликаторов, устанавливаемых на поверхность кожи в зоне проекции исследуемого органа или его части. Приемником измеряется интегральное значение температуры всего того объема биологического объекта, который сосредоточен под

прикладываемой антенной и ограничен с одной стороны ее размерами, с другой (по глубине зондирования) – чувствительностью и длиной принимаемых электромагнитных волн приемной системы, поглощающими свойствами объекта (диэлектрической проницаемостью среды).

Интенсивность излучения, приходящего от объема среды, непосредственно примыкающего к приемной антенне, удобно выражать через радиояркостную температуру $T_{я}$, определяемую выражением:

$$T_{я} = (1 - R) \int_0^{h_i} T(s) \gamma e^{-\gamma s} ds, \quad (1.1)$$

где T – интегральная, усредненная по объему глубинная температура исследуемой среды в градусах Кельвина;

$\gamma(\lambda, \epsilon)$ – коэффициент поглощения среды с размерностью [1/см], зависящий от длины волны λ принимаемого электромагнитного излучения и диэлектрической проницаемости ϵ среды;

h_i – глубина зондирования (характеризует нижний слой объема среды, с которого излучение еще принимается);

s – координата, составляющая нормаль с поверхностью среды;

R – коэффициент отражения по мощности на границе контакта антенны с исследуемой средой.

Если конструкция антенны представляет собой планарный излучатель на диэлектрической подложке в виде круга с малой теплоемкостью и низкими потерями, интегральное значение излучения принимается из объема среды, имеющего форму цилиндра (рисунок 1.1). Основание воображаемого цилиндра находится на поверхности исследуемой среды, площадь которого равна размеру (апертурному раскрытию) прикладываемой контактной (апликаторной) антенны, а образующая цилиндра (его высота) перпендикулярна поверхности среды и характеризует глубину среды зондирования.

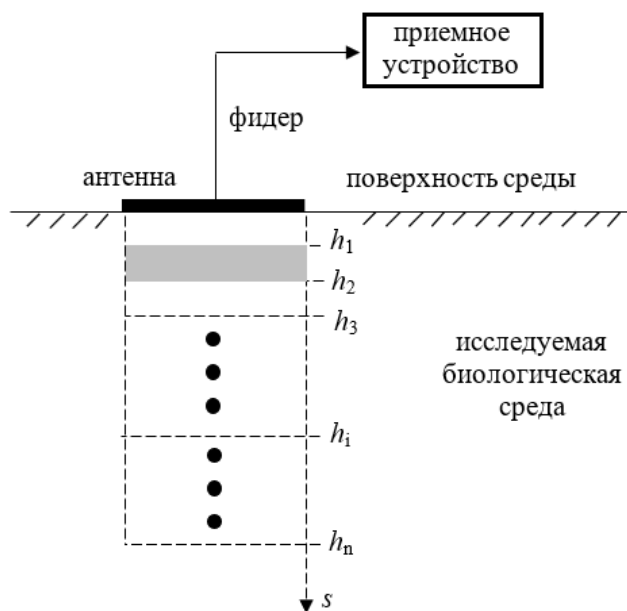


Рисунок 1.1 – Изображение излучающего объема биологической среды

1.3 Глубина зондирования. Выбор длины волны принимаемого излучения

Важной характеристикой микроволнового радиотермометрического метода является глубина зондирования H . Максимальная глубина $H_{\text{макс}}$ определения температурной аномалии

(приращения ΔT) в биологическом теле зависит от скин-слоя $H_{\text{ск}}$ (расстояние, на котором интенсивность излучения уменьшается в e^2 – раз) и флуктуационной чувствительности ΔT_A приемной системы:

$$H_{\text{макс}} = \frac{\lambda}{4\pi\alpha} \ln \frac{\Delta T}{\Delta T_A} = \frac{H_{\text{ск}}}{2} \ln \frac{\Delta T}{\Delta T_A}, \quad (1.2)$$

где α – показатель затухания радиоволн в биотканях;

λ – длина волны в вакууме.

В свою очередь толщина скин-слоя определяется из формулы:

$$H_{\text{ск}} = \frac{\lambda}{4\pi \operatorname{Im}\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1.3)$$

где $\operatorname{Im}\sqrt{\varepsilon}$ – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости. В биологических тканях толщина скин-слоя главным образом определяется содержанием воды.

При построении профиля глубинных температур биологической среды длины волн зондирования выбираются таким образом, чтобы толщина скин-слоя равномерно возрастала от миллиметров до максимальных значений. При заданной точности форма профиля температуры хорошо восстанавливается до глубины 4 см. При дальнейшем увеличении глубины точность восстановления резко падает, поскольку вклад глубоких слоев в радиоизлучение быстро уменьшается (среда с сильным поглощением).

Как следует из (1.3), глубина, с которой принимается излучение, непосредственно зависит от длины волны в среде. Чем больше длина волны, тем больше длина скин-слоя и с более глубоких слоев биологической среды принимается излучение. В свою очередь скин-слой определяется поглощающими характеристиками среды. Высоким поглощением характеризуется кожа, мышцы, внутренние органы, белое вещество мозга, кровь (частотная зависимость диэлектрической проницаемости тканей с высоким содержанием воды аналогична частотной зависимости собственно воды), низким – жир, кости. Для волн длиной 3 – 30 см, для жировой и костной ткани глубина зондирования составляет 3 – 17 см, для мышечной ткани – 0,3 – 3 см.

Еще одним параметром, от которого зависит глубина зондирования, является чувствительность приемного устройства (1.2). Чем чувствительность выше, тем с большего объема биологической среды принимается излучение.

Большая глубина зондирования для больших длин волн приводит к ухудшению пространственного разрешения, и радиотепловое излучение существенно "расплывчато". Большая длина волны не позволяет реализовать необходимое пространственное разрешение при измерениях из открытого пространства. При зондировании среды из свободного пространства предельное пространственное разрешение составляет половину длины волны в этом пространстве (рэлеевский порог разрешения). Улучшение пространственного разрешения связано с изменением диэлектрической проницаемости, и, следовательно, с уменьшением длины волны в том пространстве, из которого производится зондирование. Диэлектрическая проницаемость водосодержащих биологических тканей около 50 и соответственно длина волны в них в 7 раз меньше, чем в воздухе. Укорочение длины волны обратно пропорционально корню квадратному из диэлектрической проницаемости среды.

Поэтому для приема радиотеплового излучения используются контактные антенны-аппликаторы. Применение контактных антенн, непосредственно устанавливаемых на исследуемый участок биологической среды, позволяет значительно повысить пространственное разрешение. Но в случае прикладывания антенны к поверхности тела возникает необходимость согласования антенны с тканями по импедансам, чтобы уменьшить отражение радиотеплового излучения электромагнитных волн на границе с биологической средой в месте приложения антенны. Для этого изготавливаются специальные антенны-аппликаторы на подложках с высокой относительной диэлектрической проницаемостью в

микрорешетчатом исполнении, используются волноводы с диэлектрическим заполнением. Диэлектрическую проницаемость материала антенны выбирают так, чтобы она примерно соответствовала проницаемости среды зондирования.

1.4 Абсолютные и относительные радиометрические методы измерения глубинных температур

Существуют абсолютные и относительные радиометрические методы измерения глубинных температур биологических сред. При абсолютных измерениях калибровка осуществляется по внешним эталонам (фантомам), имитирующим исследуемую биологическую среду. В этом случае показания приборов зависят от многих факторов: идентичности коэффициентов отражения от эталонов и исследуемых участков тела, постоянства температуры материала антенны и т.д. Процедура измерения по абсолютному методу заключается в следующем. Если для эффективных температур эталонов T_1 и T_2 выходные напряжения прибора соответственно равны U_1 и U_2 , тогда для измеренного напряжения U температура исследуемой среды рассчитывается по формуле (принцип подобия треугольников):

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{U_2 - U_1} (U - U_1). \quad (1.4)$$

В качестве калибровочных эталонов, например, используется вода, находящаяся в двух термостатах, с растворенной солью ($NaCl$).

Для определения абсолютной температуры тела по глубине зондирования необходимо проводить измерения либо на нескольких длинах волн, либо на одной длине волны варьирова аперттуру антенны.

При относительных измерениях регистрируется величина, пропорциональная разности температур двух участков тела (радиоконтраст) или одного участка до и после какого-либо воздействия. В этом случае систематические ошибки исключаются. Для аппликаторных антенн при контакте антенны с телом каждый контакт дает свое значение коэффициента отражения (появление ложного сигнала). Возникает трудность проведения абсолютных измерений. Поэтому первые измерения с использованием радиотермометрического метода проводились на парных органах (например, молочная железа), где требуется относительная точность (радиоконтраст).

1.5 Вопросы для самопроверки

1. К каким медицинским методам относится микроволновая радиотермометрия и на чем она основана?
2. Какой основной параметр определяет перенос радиотеплового излучения в биотканях?
3. От чего зависит толщина слоя биологической ткани, в котором формируется тепловое излучение?
4. Охарактеризуйте инфракрасное и радиотепловое излучения тела человека.
5. Чем ограничен объем биообъекта, с которого принимается излучение антенной-аппликатором?
6. Как связана радиояркость температура принимаемого излучения биологической среды с интегральным значением глубинной температуры этого объекта?
7. С чем связана глубина зондирования биообъекта?
8. Сформулируйте понятие скин-слоя.
9. С чем связано пространственное разрешение измерений глубинных температур биологического объекта?

10. В чем заключаются абсолютные радиометрические методы измерения глубинных температур биологических сред?

11. В чем заключаются относительные радиометрические методы измерения глубинных температур биологических сред?

2 Методы и алгоритмы функционирования микроволновых радиотермометров для измерения глубинных температур биологических сред

2.1 Анализ функционирования радиотермометра с контактной антенной

В данном разделе рассмотрены вопросы абсолютных измерений внутренней температуры биологических сред по их собственному излучению, когда антенна приводится в контакт с телом. Для этого проводится анализ шумов на входе приемника, рассмотрено влияние коэффициента отражения на границе антенны с биологическим объектом как источника ошибок, введен принцип термодинамического равновесия входной системы радиотермометра и рассмотрены вопросы калибровки по двум внешним эталонам.

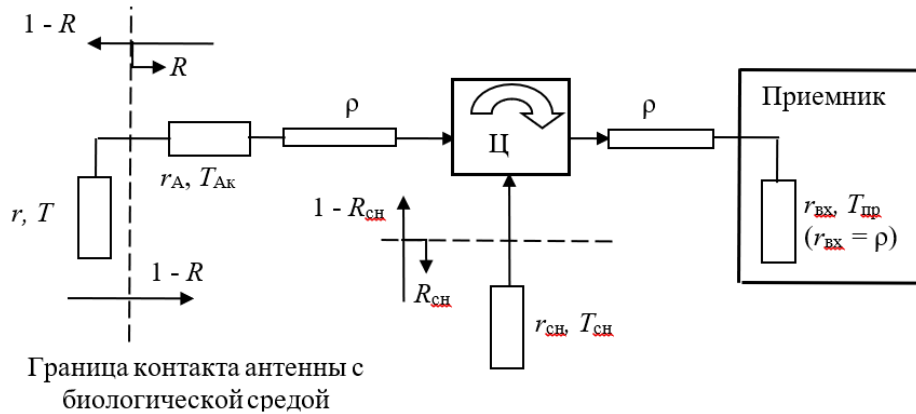


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема входа радиотермометра

На рисунке 2.1 приведена эквивалентная схема входного узла радиотермометра. На рисунке приведены следующие обозначения: r и T – сопротивление излучения антенны и эффективная температура шумов сопротивления; r_A и T_{Ak} – сопротивление потерь антенны и термодинамическая температура конструкции антенны; $r_{сш}$ и $T_{сш}$ – сопротивление и температура согласованной нагрузки циркулятора Ц; $r_{вх}$ и $T_{пр}$ – входное сопротивление приемника и эффективная температура его собственных шумов; ρ – волновое сопротивление фидера и линии передачи. Анализ проводится при условии согласования входа приемника с линией передачи, $r_{вх} = \rho$.

Сопротивление излучения антенны r вводится как эквивалентное сопротивление, на котором бы выделялась излучаемая антенной в пространство мощность. Так, если антенна без потерь запитывается синусоидальным током высоких частот с действующим значением I , то средняя по времени излучаемая антенной мощность равна $I^2 r / 2$, где деление на 2 учитывает то, что излучение происходит на одной из линейных поляризации. В случае приема электромагнитного излучения со сплошным спектром проводится аналогия между "шумящим" сопротивлением Найквиста и сопротивлением излучения антенны.

Согласно эквивалентной схеме, на входе приемника действуют три источника шумов, которыми являются собственно объект исследования, конструкция антенны, имеющая омические потери, и приемник. Мощности шумов этих источников соответственно равны:

$$W_{об} = k\Delta f T \eta (1 - R), \quad (2.1)$$

$$W_{Ак} = k\Delta f T_{Ак} (1 - \eta) (1 - R), \quad (2.2)$$

$$W_{пр} = k\Delta f T_{пр}, \quad (2.3)$$

где k – постоянная Больцмана;

Δf – полоса принимаемых радиотермометром частот;

η – коэффициент полезного действия антенны, равный $r / (r_A + r)$;

R – коэффициент отражения по мощности в месте приложения антенны к биологическому объекту, равный $(r - r_A - \rho)^2 / (r + r_A + \rho)^2$, то есть зависит от сопротивления излучения антенны;
 $(1-R)$ – излучательная способность антенны.

Как следует из (2.1), сигнал T (интегральная измеряемая температура объекта) передается на вход приемника измененный на неопределенную величину соответственно значениям R и η . Величина R (то же, что и r) сильно зависит от места приложения антенны к телу и плотности контакта.

К рассмотренным шумам на входе приемника, мощности которых определяются из выражений (2.1) – (2.3), добавляется шум, идущий к антенне от нагрузки циркулятора, который затем отражается от границы антенны с биологической средой и затем поступает на вход приемника. Мощность шума согласованной нагрузки циркулятора, идущая к антенне, составляет величину $k\Delta f T_{сн}(1 - R_{сн})$ где, $R_{сн}$ – коэффициент отражения по мощности излучения согласованной нагрузки в месте ее подключения к входу циркулятора. Эти шумы отражаются антенной и дают вклад в полную мощность шумов на входе приемника, равный:

$$W_{сн} = k\Delta f T_{сн} (1 - R_{сн}) R. \quad (2.4)$$

Собственные шумы приемника, мощность которых определяется из (2.3), отражаясь от нагрузки циркулятора и затем от антенны, снова попадают на вход приемника. Так как эти шумы являются когерентными с шумами приемника, то возникает их интерференция. В результате мощность собственных шумов приемника будет отличаться от (2.3) и составлять величину:

$$W_{пр} = k\Delta f \left[T_{пр} + T_{пр} R_{сн} R + 2T_{пр} \sqrt{R_{сн} R \cos(4\pi f_0 s \sqrt{\epsilon} / c)} \right], \quad (2.5)$$

где f_0 – центральная частота полосы принимаемых сигналов;

c – скорость света в вакууме;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

s – длина линии от входа приемника до антенны.

Полученное выражение содержит как переотраженный шум собственного шума приемника (второе слагаемое в квадратных скобках), так и интерференционную составляющую (последний член суммы в квадратных скобках).

Существует два способа подавления ложного интерференционного сигнала. Первый заключается в применении циркулятора с идеальными свойствами (идеально согласованная нагрузка циркулятора, идеальный вентиль), для которого $R_{сн} = 0$. Это можно достигнуть тщательным согласованием циркулятора и нагрузки или включением второго циркулятора последовательно с первым. Для второго способа подавления интерференционного сигнала длина линии s между приемником и антенной выбирается такой, чтобы время запаздывания интерферирующих сигналов (задержка во времени), равное $2s/v$, v – скорость распространения сигналов по линии, было больше времени когерентности (корреляции) шумов, равного $1/\Delta f$, где Δf – полоса частот приема электромагнитных колебаний. Если, например, микрополосковая линия передачи выполнена на подложке с диэлектрической проницаемостью ϵ , тогда скорость распространения сигналов в линии равна $v = c/\sqrt{\epsilon}$, где c – скорость света в вакууме. В соответствии с этим на длину линии накладываются ограничения $s > c/(2\Delta f\sqrt{\epsilon})$. Например, $\epsilon = 4$, $\Delta f = 100$ МГц, $c = 3 \times 10^8$ м/с, тогда $s > 0,73$ м. Если полоса частот радиотермометра имеет гауссову форму, то ослабление интерференции в e^{-4} раз достигается при $s = 2c/\pi\Delta f\sqrt{\epsilon} = 1,91 \times 10^8/\Delta f\sqrt{\epsilon}$.

Так как действующие на входе приемника шумы от различных источников по отношению друг к другу аддитивны и не связаны между собой (не коррелированы), их мощности складываются независимо. Полную мощность шума на входе приемника получим сложением мощностей, заданных формулами (2.1) – (2.5):

$$W = k\Delta f [T\eta(1-R) + T_{\text{Ак}}(1-\eta)(1-R) + T_{\text{сн}}(1-R_{\text{сн}})R + T_{\text{пр}} + T_{\text{пр}}R_{\text{сн}}R + 2T_{\text{пр}}\sqrt{R_{\text{сн}}R\cos(4\pi f_0 s\sqrt{\varepsilon}/c)}]. \quad (2.6)$$

Если подавлен интерференционный член до нужного уровня, мощность шумов на входе приемника будет равна:

$$W = k\Delta f [T_{\text{пр}} + T_{\text{Ак}} + (T - T_{\text{Ак}})\eta(1-R) + (T_{\text{сн}} - T_{\text{Ак}})R + (T_{\text{пр}} - T_{\text{сн}})R_{\text{сн}}R]. \quad (2.7)$$

Если выполнить переход от абсолютных температур к шкале Цельсия, полагая $T = T_0 + t$, $T_{\text{Ак}} = T_0 + t_{\text{Ак}}$, $T_{\text{сн}} = T_0 + t_{\text{сн}}$, где T_0 – термодинамическая температура, соответствующая нулю градусов Цельсия ($T_0 = 273,15$ К), t , $t_{\text{Ак}}$, $t_{\text{сн}}$ – температуры исследуемой среды, антенны, нагрузки циркулятора в градусах Цельсия, выражение (2.7) примет вид:

$$W = k\Delta f [T_{\text{пр}} + T_0 + t_{\text{Ак}} + (t - t_{\text{Ак}})\eta(1-R) + (t_{\text{сн}} - t_{\text{Ак}})R + (T_{\text{пр}} - T_0 - t_{\text{сн}})R_{\text{сн}}R]. \quad (2.8)$$

Предположим, что температуры исследуемой среды, антенны, согласованной нагрузки циркулятора и сопротивления входа приемника одинаковы (условие термодинамического равновесия). Тогда формула (2.8) преобразовывается к виду:

$$W = 2k\Delta f (T_0 + t) = 2k\Delta f T. \quad (2.9)$$

На выходе линейного приемника выходное напряжение будет равно:

$$U_{\text{вых}} = 2k\Delta f TG, \quad (2.10)$$

где G – коэффициент усиления приемника, включающий усиление по высокой и низкой частотам.

Таким образом, выходной сигнал зависит только от измеряемой абсолютной температуры среды. Однако, чтобы реализовать такой способ измерений, необходимо не только термостатировать антенну, циркулятор, но и регулировать собственные шумы приемника, что затруднительно. Поэтому рассмотрим случай, когда физические температуры антенны и согласованной нагрузки циркулятора равны температуре исследуемой среды $t_{\text{Ак}} = t_{\text{сн}} = t$. При выполнении этого равенства:

$$W = k\Delta f [T_{\text{пр}} + T_0 + t + (T_{\text{пр}} - T_0 - t)R_{\text{сн}}R]. \quad (2.11)$$

Если, например, $R_{\text{сн}} = 1/300$, $T_{\text{пр}} = 600$ К, $T_0 + t \approx 300$ К. Тогда $(T_{\text{пр}} - T_0 - t)R_{\text{сн}} \approx 1^{\circ}\text{С}$. Изменение R на 0,1 дает неопределенность $0,1^{\circ}\text{С}$.

В процессе калибровки и измерений используются три разных подключения антенны к телам (две точки калибровки и собственно измерение). Процедура калибровки и измерений заключается в следующем. В качестве исходных данных температуры антенны и циркулятора поддерживаются неизменными и точно известны температуры эталонов t_1 и t_2 . Термодинамическое равновесие осуществляется только при калибровке на первом эталоне, то есть $t_1 = t_{\text{Ак}} = t_{\text{сн}}$. Если шумовая температура приемника $T_{\text{пр}}$ не меняется от замера к замеру, тогда для всех трех замеров, температур эталонов t_1 , t_2 и температуры исследуемой среды t , можно записать:

$$U_{\text{вых1}} = Gk\Delta f [T_{\text{пр}} + T_0 + t_1 + (T_{\text{пр}} - T_0 - t_1)R_{\text{сн}}R_1]. \quad (2.12)$$

$$U_{\text{вых2}} = Gk\Delta f [(t_2 - t_1)\eta(1-R_2) + T_0 + t_1 + T_{\text{пр}} + (T_{\text{пр}} - T_0 - t_1)R_{\text{сн}}R_2]. \quad (2.13)$$

$$U_{\text{вых}} = Gk\Delta f [(t - t_1)\eta(1-R) + T_0 + t_1 + T_{\text{пр}} + (T_{\text{пр}} - T_0 - t_1)R_{\text{сн}}R]. \quad (2.14)$$

Используя прием подобия треугольников, получим:

$$t = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(U_{\text{вых}} - U_{\text{вых1}})}{U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}}. \quad (2.15)$$

Из полученных выражений (2.12) – (2.14) следует, что важно обеспечить равенство коэффициентов отражения R во всех трех замерах, $R_1 = R_2 = R$. Максимально точное соблюдение равенства возможно путем создания эталонных излучателей, близких по диэлектрическим свойствам к свойствам измеряемых тел. Разница коэффициентов отражения должна быть не хуже $0,3R$.

Также, для обеспечения точности измерений необходимо применять циркулятор с ослаблением не менее 25 дБ, а шумы входа не должны превышать 100 – 200 К для уменьшения влияния интерференционных ошибок. Если $R_{сн} = 0$, то выражения (2.12) – (2.14) преобразовываются к виду:

$$U_{\text{вых1}} = Gk\Delta f [T_{\text{пр}} + T_0 + t_1]. \quad (2.16)$$

$$U_{\text{вых2}} = Gk\Delta f [(t_2 - t_1)\eta(1 - R_2) + T_0 + t_1 + T_{\text{пр}}]. \quad (2.17)$$

$$U_{\text{вых}} = Gk\Delta f [(t - t_1)\eta(1 - R) + T_0 + t_1 + T_{\text{пр}}]. \quad (2.18)$$

Как было показано выше, полное исключение влияния отражений достигается установлением термодинамического равновесия. Устранение ошибки измерения из-за неполного согласования контакта антенны с телом биообъекта возможно методом подогрева антенны, фидера, входных элементов приемной системы до температуры $T_{\text{ср}}$, равной средней температуре исследуемого тела (приближенное термодинамическое равновесие). В этом случае ошибка равна:

$$\delta T = (T - T_{\text{ср}})R, \quad (2.19)$$

где T – измеряемая интегральная температура объекта;

R – коэффициент отражения по мощности на границе контактной антенны и поверхности объекта. Если обычные отклонения температуры тела человека $\pm 5^{\circ}\text{C}$, $R = 0,1$, тогда на краях имеет место ошибка $0,5^{\circ}\text{C}$.

2.2 Радиотермометр с исключением погрешности, вызванной рассогласованием антенны с биологическим объектом

Устранение ошибок измерения возможно за счет ввода дополнительного шумового сигнала от специального генератора через направленный ответвитель или циркулятор.

На рисунке 2.2 приведена структурная схема радиотермометра, в которой предложена система квазитермодинамического равновесия, не требующая подогрева и термостатирования входной приемной части радиотермометра. Для этого используется генератор шума ГШ, имеющий регулировку интенсивности, работающий в сторону антенны А, и тем самым создающий тепловое (шумовое) равновесие. Это позволяет получить точность, близкую точности измерений при выполнении термодинамического равновесия входной части радиотермометра.

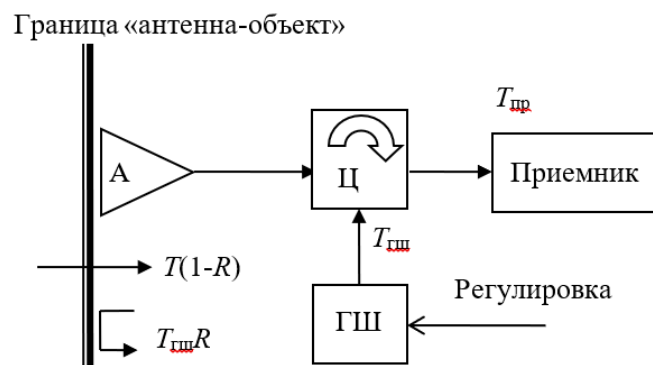


Рисунок 2.2. – Структурная схема приемной части радиотермометра

В идеале, когда потери антенны A , циркулятора Ц , соединений равны нулю и элементы входного тракта идеально согласованы, на выходе приемника напряжение равно:

$$U_{\text{вых}} = Gk\Delta f [T(1-R) + T_{\text{ш}}R + T_{\text{пр}}] = Gk\Delta f [T + R(T_{\text{ш}} - T) + T_{\text{пр}}], \quad (2.20)$$

где G – коэффициент усиления тракта приемника;

k – постоянная Больцмана;

Δf – полоса принимаемых радиотермометром частот;

T – интегральная эффективная температура биологического объекта;

R – коэффициент отражения на границе антенны с исследуемым объектом;

$T_{\text{ш}}$ – эффективная температура шумового генератора;

$T_{\text{пр}}$ – эффективная температура собственных шумов приемника.

Если в (2.20) разность $T_{\text{ш}} - T$ равна нулю, то коэффициент отражения R не влияет на точность измерений.

2.3 Радиотермометр с автоматической регулировкой подшумливания биологической среды

На рисунке 2.3 приведена схема радиотермометра с автоматическим подшумливанием антенны с целью исключения влияния на измерения коэффициента отражения в месте приложения антенны к объекту. В радиотермометре реализован нулевой метод измерений. В состав радиотермометра входит ключевой модулятор M , работающий по принципу отражения, широкополосный генератор шума ГШ , циркулятор Ц , радиометрический приемник и контактная антенна A . По управляющему воздействию на генератор регулируется мощность шумового сигнала, и по этому воздействию определяется глубинная температура исследуемого объекта.

На рисунке 2.3 показана структурная схема радиотермометра, в котором исключается ошибка из-за неполного согласования контакта антенны с биообъектом.

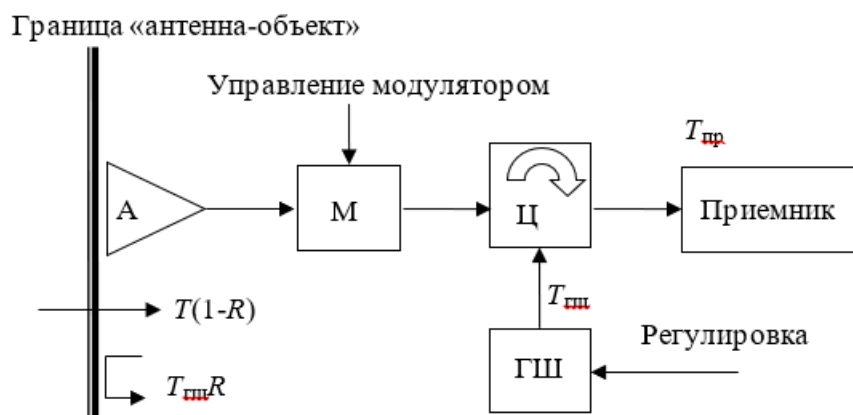


Рисунок 2.3 – Структурная схема радиотермометра с модулятором на входе

Принцип работы радиотермометра заключается в следующем. Если ключ модулятор замкнут, на входе приемника мощность шумов равна:

$$W_1 = k\Delta f [T(1-R) + T_{гш}R + T_{пр}], \quad (2.21)$$

где k – постоянная Больцмана;

Δf – полоса принимаемых радиотермометром частот;

T , $T_{гш}$, $T_{пр}$ – эффективные температуры шумов соответственно биологического объекта, генератора, приемника;

R – коэффициент отражения на границе антенны с исследуемым объектом.

При выключенном ключе модулятора мощность шума на входе приемника равна:

$$W_0 = k\Delta f (T_{гш} + T_{пр}). \quad (2.22)$$

Сигнал генератора шума, отражаясь о разомкнутого ключа, через циркулятор поступает на вход приемника.

В радиотермометре регулировкой сигнала генератора шума $T_{гш}$ устанавливается нулевой баланс (равенство мощностей шумовых сигналов на входе приемника при включенном и выключенном ключе модулятора):

$$W_1 = W_0. \quad (2.23)$$

Или, после подстановки в (2.23) равенств (2.21) и (2.22), получим:

$$k\Delta f [T(1-R) + T_{гш}R + T_{пр}] = k\Delta f (T_{гш} + T_{пр}). \quad (2.24)$$

Откуда, после преобразований следует:

$$T = T_{гш}. \quad (2.25)$$

При установленном нулевом балансе (2.24) на точность измерений не влияет коэффициент усиления приемника, его дрейф и флуктуации, спектр которых ниже частоты модуляции в радиотермометре, и коэффициент отражения в месте приложения антенны к биологической среде.

Формула (2.25) получена для идеального случая отсутствия потерь в модуляторе, циркуляторе, антенне и их соединениях и для коэффициента отражения модулятора в закрытом состоянии равном единице.

2.4 Радиотермометр со скользящим подшумливанием объекта исследования

В данном разделе рассмотрен модуляционный радиотермометр со скользящей схемой компенсации отражений между объектом и антенной, использующий в основе работы принцип установки нулевого баланса.

На рисунке 2.4 приведена схема радиотермометра со следующими обозначениями: ДТ₁ и ДТ₂ – два датчика температуры; ПТН – преобразователь "температура-напряжение"; П – переключатель; А – антенна-аппликатор; М – ключевой модулятор, работающий на отражение; Ц – циркулятор; В – вентиль; РП – радиометрический приемник с усилением по высокой частоте, в котором демодуляция выполняется квадратичным детектором; БУ – блок управления; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, СН – согласованная нагрузка, в качестве которой используется нагреваемый элемент Пельтье резистор с сопротивлением 50 Ом (миниатюрный пленочный элемент, размещаемый на тонкой керамической пластине малой площади).

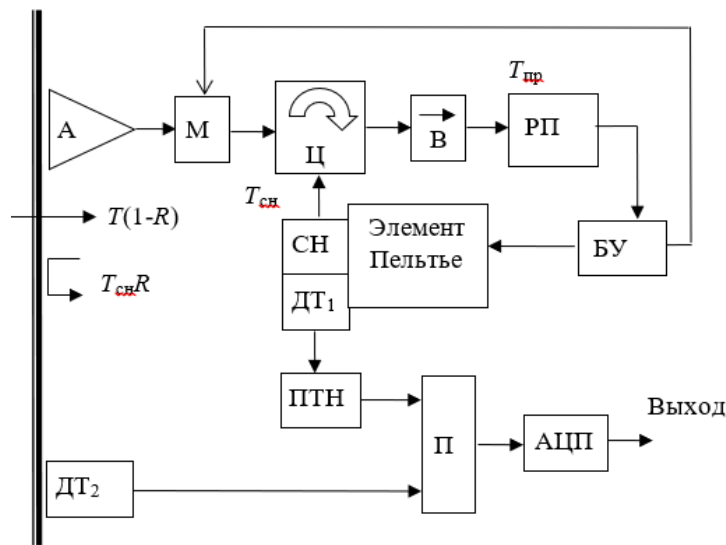


Рисунок 2.4 – Радиотермометр со скользящей схемой компенсации отражений между объектом и антенной

Принцип работы радиометра заключается в следующем. Весь процесс измерений делится на две фазы. Рассмотрим сигнал на входе радиометрического приемника. Для замкнутого состояния ключа модулятора мощность шумового сигнала на входе радиометрического приемника равна:

$$W_{\text{вкл}} = k\Delta f [T(1-R) + T_{\text{сн}}R + T_{\text{пр}}], \quad (2.26)$$

где k – постоянная Больцмана;

Δf – полоса принимаемых радиотермометром частот;

T – интегральная по глубине температура объекта;

R – коэффициент отражения по мощности на границе антенны с исследуемым объектом;

$T_{\text{сн}}$ – термодинамическая температура согласованной нагрузки;

$T_{\text{ш}}$ – температура собственных шумов приемника.

Так как модулятор работает на отражение, для разомкнутого ключа модулятора сигнал на входе приемника равен:

$$W_{\text{выкл}} = k\Delta f (T_{\text{сн}} + T_{\text{пр}}). \quad (2.27)$$

С помощью подогрева – охлаждения термоэлемента Пельтье в радиотермометре поддерживается нулевой баланс:

$$W_{\text{вкл}} = W_{\text{выкл}} \cdot \quad (2.28)$$

Подстановкой в (2.28) выражений (2.26) и (2.27) получим:

$$k\Delta f [T(1-R) + T_{\text{сн}}R + T_{\text{пр}}] = k\Delta f (T_{\text{сн}} + T_{\text{пр}}). \quad (2.29)$$

Откуда:

$$T = T_{\text{сн}}. \quad (2.30)$$

Таким образом, измерение внутренней (усредненной и глубинной) температуры биологического тела заменяется измерением температуры нагреваемого резистора датчиком температуры ДТ₁.

В этом же радиометре для измерения температуры кожи применен бесконтактный метод. Плотность излучения с поверхности определяется законом Стефана-Больцмана. Датчик температуры ДТ₂ состоит из оптической системы, формирующей поле обзора, механического прерывателя потока лучей, тела сравнения, нагретого до опорной температуры, и усилительной части.

Вывод равенства (2.30) получен для идеального случая, когда антенна не имеет потерь, потери модулятора и циркулятора также равны нулю, коэффициент отражения модулятора в закрытом состоянии равен единице. К недостатку работы рассмотренного радиотермометра можно отнести его инерционность (установление и поддержание нулевого баланса связано со скоростью нагревания – охлаждения согласованной нагрузки). Так как разница температур между измеряемыми точками глубинной температуры биологического тела незначительная, для сокращения времени измерений в радиотермометр введена схема выборки – хранения и кнопка. В процессе перемещения антенны-аппликатора с одного участка тела на другой кнопка разомкнута, и элемент Пельтье сохраняет температуру прежней точки.

2.5 Быстродействующий радиотермометр с компенсацией влияния коэффициента отражения контакта антенны с биологической средой

На рисунке 2.5 приведена схема радиотермометра, в котором исключены ошибки измерения из-за неполного согласования аппликаторной антенны с биообъектом. Выходной сигнал пропорционален эффективной температуре объекта и не зависит от коэффициента передачи измерительного тракта и коэффициента отражения на границе "антенна – объект".

Динамические характеристики радиотермометра значительно повышены по сравнению с предыдущей схемой, рассмотренной в разделе 2.4. Это связано с тем, что прием мощности теплового излучения исследуемого объекта производится при двух различных уровнях шумового сигнала, вырабатываемых опорным генератором, время установления которых пренебрежимо мало.

Согласно структурной схеме радиотермометр содержит антенну А, модулятор М, работающий по принципу отражения сигнала, направленный ответвитель НО, опорный генератор шума ГШ, радиометрический приемник РП, коммутатор К с конфигурацией 1×2, синхронные детекторы СД₁, СД₂, СД₃, фильтры нижних частот ФНЧ₁, ФНЧ₂, ФНЧ₃, сумматор СМ, вычитающее устройство ВУ, делители аналоговых сигналов Д₁, Д₂ и задающие генераторы ЗГ₁, ЗГ₂. Задающий генератор ЗГ₁ вырабатывает импульсы, следующие с частотой f_1 и скважностью 2. Работа задающего генератора ЗГ₂ синхронизирована импульсами генератора ЗГ₁, и на выходе генератора ЗГ₂ вырабатывается прямоугольная импульсная последовательность, имеющая также скважность равную двум, но следующая с частотой в два раза меньшей, $f_2 = f_1/2$. Генератор шума ГШ вырабатывает два различных опорных сигнала $T_{гш1}$ и $T_{гш2}$, причем $T_{гш2} > T_{гш1}$. Модуляция генератора шума выполняется импульсами задающего генератора ЗГ₁. Направленный ответвитель включен в измерительный тракт так, что сигнал генератора шума направлен в сторону выхода модулятора. Для всего диапазона измеряемого сигнала объекта T справедливо неравенство $T < T_{гш1} < T_{гш2}$.

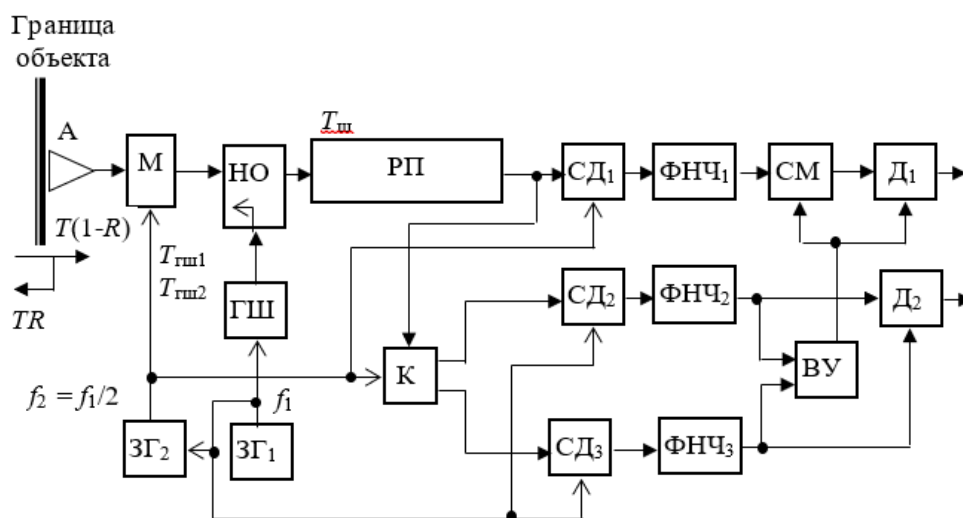


Рисунок 2.5 – Структурная схема радиотермометра с компенсацией влияния коэффициента отражения

Задающие генераторы управляют модуляцией сигналов в приемном тракте. Поскольку фазы колебаний генераторов строго синхронизированы, то имеют место четыре повторяющихся интервала времени, обусловленные различными состояниями модулятора М и генератора шума ГШ. Полный период модуляции состоит из четырех временных интервалов равной длительности. В ходе первого интервала модулятор М выключен. Сигнал генератора шума, равный на этом такте $T_{гш1}$, полностью отражаясь от выхода разомкнутого модулятора поступает на вход приемника, и мощность сигнала на его входе равна:

$$W_1 = k\Delta f (T_{гш1} + T_{ш}), \quad (2.31)$$

где k – постоянная Больцмана;

Δf – полоса усиливаемых частот;

$T_{ш}$ – эффективная температура собственных шумов приемника, приведенная к его входу.

В следующем временном промежутке модулятор также закрыт, но генератор шума ГШ вырабатывает сигнал величиной $T_{гш2} > T_{гш1}$. Поэтому мощность сигнала на входе приемника возрастает и становится равной:

$$W_2 = k\Delta f (T_{гш2} + T_{ш}). \quad (2.32)$$

В два следующих интервала времени модулятор открыт. Мощность теплового излучения объекта поступает на границу раздела "антенна – объект". Часть мощности, пропорциональная TR , где R – коэффициент отражения по мощности на границе антенны с объектом измерения, отражается от границы раздела и затухает в среде объекта. Оставшаяся часть мощности, пропорциональная $T(1-R)$, принимается антенной и через открытый модулятор поступает на вход приемника. Сигнал генератора шума, равный в этот момент $T_{гш1}$, проходит через открытый модулятор, частично отражается от границы раздела "антенна – объект" с коэффициентом отражения R и также поступает на вход приемника. Таким образом, полная мощность сигнала на входе приемника становится равной (считается, что антенна имеет высокий коэффициент полезного действия и ее собственные шумы пренебрежимо малы):

$$W_3 = k\Delta f [T(1-R) + T_{гш1}R + T_{ш}]. \quad (2.33)$$

Аналогично, для четвертого, последнего интервала времени мощность на входе приемника равна:

$$W_4 = k\Delta f [T(1-R) + T_{гш2}R + T_{ш}]. \quad (2.34)$$

Выход радиометрического приемника представляет собой повторяющуюся последовательность напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 , пропорциональных мощностям входных сигналов W_1, W_2, W_3, W_4 с коэффициентом пропорциональности G . После синхронного детектирования в детекторе СД₁, на выходе фильтра ФНЧ₁, постоянная времени которого значительно больше периода модуляции, формируется напряжение, равное:

$$U_{\phi1} = U_3 + U_4 - U_1 - U_2 = Gk\Delta f [2T(1-R) - (T_{гш1} + T_{гш2})(1-R)]. \quad (2.35)$$

Выходные напряжения фильтров ФНЧ₂ и ФНЧ₃ после синхронного детектирования будут, соответственно, равны:

$$\begin{aligned} U_{\phi2} &= U_4 - U_3 = Gk\Delta f (T_{гш2} - T_{гш1})R, \\ U_{\phi3} &= U_2 - U_1 = Gk\Delta f (T_{гш2} - T_{гш1}). \end{aligned} \quad (2.36)$$

Напряжения $U_{\phi2}$ и $U_{\phi3}$ подаются в блок вычитания, на выходе которого формируется напряжение $U_{\text{вы}}$, равное:

$$U_{\text{вы}} = U_{\phi3} - U_{\phi2} = Gk\Delta f (T_{гш2} - T_{гш1})(1-R). \quad (2.37)$$

Напряжение $U_{\text{вы}}$ поступает на сумматор СМ для компенсации постоянной составляющей напряжения $U_{\phi1}$, обусловленной наличием в формуле (2.35) для $U_{\phi1}$ члена $Gk\Delta f (T_{гш1} + T_{гш2})(1-R)$. Для этого коэффициенты передачи входов сумматора a и b выбираются так, чтобы выполнилось равенство:

$$aGk\Delta f (T_{гш1} + T_{гш2})(1-R) = bGk\Delta f (T_{гш2} - T_{гш1})(1-R). \quad (2.38)$$

Коэффициенты a и b определяются в ходе калибровки прибора. С выхода сумматора напряжение $U_{\text{см}}$, равное $2aGk\Delta f T(1-R)$, в качестве делимого поступает на делитель Д₁. На другой вход делителя поступает напряжение с вычитающего устройства. После проведения операции деления в Д₁ на его выходе появляется напряжение, равное:

$$U_{\text{вых1}} = \frac{U_{\text{см}}}{U_{\text{вы}}} = \frac{2aGk\Delta f T(1-R)}{Gk\Delta f (T_{гш2} - T_{гш1})(1-R)} = \frac{2aT}{T_{гш2} - T_{гш1}}. \quad (2.39)$$

Это напряжение пропорционально интегральной температуре объекта T , не зависит от коэффициента передачи измерительного тракта радиометра и от коэффициента отражения по мощности сигнала на границе раздела "антенна – объект".

Для того, чтобы исследовать структуру объекта, а так же для контроля и калибровки, радиотермометром также измеряется коэффициент отражения на границе "антенна – объект". Для этого в радиотермометре используется вторая схема деления D_2 , на которую в качестве делимого поступает сигнал с фильтра ФНЧ₂, а делителем является выходное напряжение фильтра ФНЧ₃. Таким образом, напряжение на выходе второго делителя равно:

$$U_{\text{вых2}} = \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 3}} = \frac{Gk\Delta f (T_{\text{гш2}} - T_{\text{гш1}})R}{Gk\Delta f (T_{\text{гш2}} - T_{\text{гш1}})} = R. \quad (2.40)$$

Это напряжение пропорционально коэффициенту отражения на границе раздела "антенна – объект", не зависит от коэффициента передачи радиотермометра и точности поддержания разности температур генератора шума.

2.6 Требования к аппликаторным антеннам радиотермометра

Для измерения глубинных температур биологических сред радиоволновыми методами применяют контактные (аппликаторные) антенны, прикадываемые непосредственно к телу исследуемой среды.

На практике используются такие типы антенн-аппликаторов, как волноводы, заполненные диэлектриком, щелевые и линзовые антенны, адаптивные вибраторные антенны, полосковые антенны с частичным использованием адаптивности. К достоинствам аппликационных антенн можно отнести возможность их полоскового выполнения, хорошее согласование с объектом, малые размеры (высокая диэлектрическая проницаемость керамики) и соответственно хорошая разрешающая способность по пространственной координате, низкая теплоемкость (слабо влияют на объект измерения), низкая реакция на внешние поля. Применение высококачественной керамики приводит к низким потерям, можно добиться постоянных характеристик за счет подогрева от термостата радиотермометра. Сканирование объекта с применением аппликаторных антенн осуществляется либо способом переключения антенн (антенной решетки, наложенной на объект исследования), либо их движением относительно исследуемого объекта.

При проектировании аппликаторных антенн необходим анализ системы "антенна – излучающая среда" на базе эквивалентных схем. На рисунке 2.6 приведена эквивалентная схема аппликационной антенны, принимающей излучение не только из дальней зоны (Фраунгоферовой), но и из ближней (зоны Френеля). Тепловое излучение пространства среды, расположенного перед рабочей поверхностью антенны, представлено шумовыми генераторами $E_{бз}$ (ближняя зона) и $E_{дз}$ (дальняя зона) с внутренними сопротивлениями $Z_{бз}$ и $Z_{дз}$, нагретых до термодинамических температур ближней и дальней зон. Тепловые шумы в элементах конструкции антенны представлены в виде шумового генератора E_A с внутренним сопротивлением Z_A , нагретого до температуры конструкции антенны. В эквивалентной схеме сигналы генераторов шума не коррелированы, поэтому в сопротивлении нагрузки Z_H мощности будут складываться независимо.

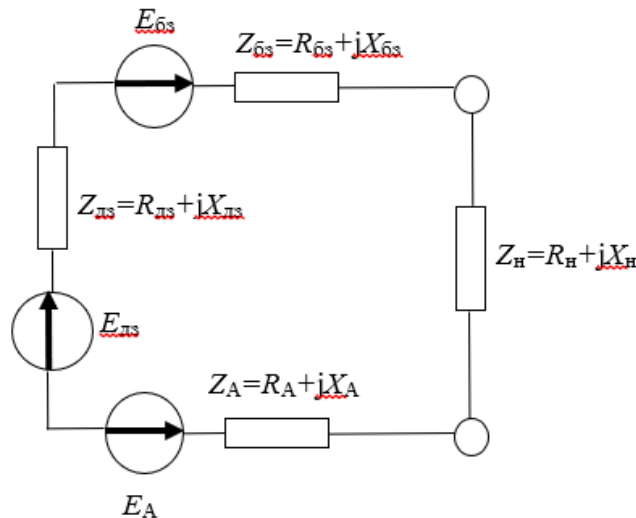


Рисунок 2.6. – Эквивалентная схема системы "антенна – излучающая среда".

Анализ эквивалентной схемы на рисунке 2.6 указывает на следующие основные черты антенной системы:

- при проектировании антенны важную роль играют не только активные, но и реактивные составляющие цепи;

- для получения максимальной активной мощности на входе радиометра необходимо, чтобы антенная система осуществляла трансформацию сопротивлений: полное выходное сопротивление антенны должно быть комплексно-сопряжено с входным сопротивлением радиотермометра;

- изменение структуры измеряемой среды изменяет значения активных и реактивных составляющих комплексных сопротивлений эквивалентной схемы. В результате изменяются все параметры антенной системы, и она может оказаться не пригодной даже для проведения грубых измерений. Следовательно, необходимо изменять параметры антенны в зависимости от структуры среды. Для этого применять адаптивные антенны или сменные;

- для увеличения глубины зондирования следует использовать антенны с малым значением коэффициента реактивности, то есть широкополосные с минимальной концентрацией энергий электрического и магнитного полей в апертуре антенны.

Из анализа эквивалентной схемы следует важность учета влияния измеряемой структуры биологической среды (толщины слоев кожи, жира, относительной диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности слоев) на результаты измерений. Оптимизация заключается в следующем:

- получение предварительных данных о структуре измеряемого объекта (оценка структуры может быть произведена путем измерения коэффициента отражения на разных частотах или на одной частоте, но различными антеннами);

- создание на этой базе эталона для калибровки;

- выбор оптимальной антенны из набора (антенны с различными волновыми сопротивлениями по-разному реагируют на структуру). Необходимо применять антенны с низким волновым сопротивлением, около 50 Ом, что близко к волновому сопротивлению кожного покрова. При использовании набора антенн появляется возможность оценить структуру биообъекта, измеряя коэффициент отражения на границе антенны и исследуемой среды и используя для этого антенны с различными волновыми сопротивлениями.

При применении аппликаторных антенн возникает сложность полного согласования в антенной системе и объекте, которое меняется при переходе от одной точки исследования к другой. Меры по уменьшению рассогласования:

– локальное термодинамическое равновесие (обеспечение близости температуры антенны с ожидаемой глубинной температурой объекта);

– измерение коэффициента отражения.

Существует необходимость выполнения сменной антенны. Это позволяет:

– провести измерения коэффициента отражения при разных антеннах и оценить структуру объекта;

– провести измерения объекта разными антеннами с разными глубинными характеристиками и подобрать оптимальную антенну для данного объекта;

– оценить температуру профиля объекта на одной частоте, используя антенны с разными глубинными характеристиками.

В случае заполнения аппликационной антенны условным диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ можно получить разрешающую способность по поверхности, приблизительно равную $c/2f\sqrt{\epsilon}$, где c – скорость света в вакууме, f – частота, на которой происходит измерение электромагнитного излучения объекта.

На рисунке 2.7 приведен стенд для измерения глубинных характеристик антенн-аппликаторов, в котором применен водный раствор на основе глицерина (хорошо моделирует кожно-мышечную ткань). Антенна располагается на радиопрозрачном дне водонепроницаемого тубуса. Перемещение тубуса происходит перпендикулярно радиопрозрачной мембране. При перемещении тубуса измеряется сигнал на выходе антенны и оценивается вклад слоев в общую мощность. Для этого вводятся весовые коэффициенты $a(s)$, где s характеризует расстояние от антенны до радиопрозрачной перегородки. Эта функция определяет предельную возможность антенны обнаружить "ступенчатую" температурную неоднородность на глубине. Таким образом, появляется возможность создать на одной частоте несколько антенн с разными глубинными свойствами и использовать их для определения глубинного профиля температуры, как это делается при использовании разных частот.

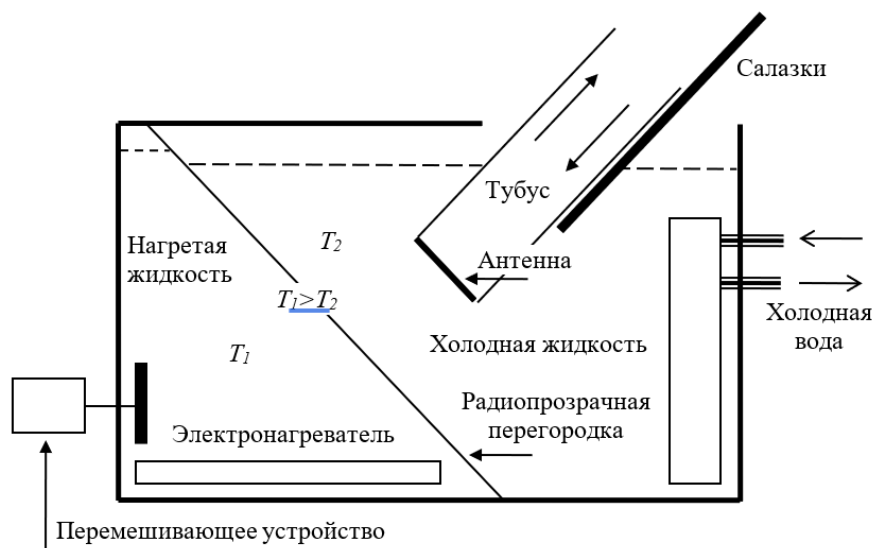


Рисунок 2.7 – Стенд для измерения глубинных характеристик антенн-аппликаторов

2.7 Вопросы для самопроверки

1. Укажите особенности измерения внутренней температуры биологических сред по их собственному излучению, когда антенна приводится в контакт с телом.

2. Как влияет коэффициент отражения на границе антенны с биологическим объектом?
3. Что понимают под сопротивлением излучения антенны?
4. Перечислите источники шума, действующие на входе приемника, если антенна приложена к биообъекту.
5. С чем связана интерференция собственных шумов приемника и какие существуют методы снижения ее влияния на точность измерений?
6. В чем заключается принцип термодинамического равновесия входной системы радиотермометра?
7. Опишите последовательность калибровки радиотермометра по двум внешним эталонам.
8. Каким образом можно устранить ошибки, возникающие от неполного согласования антенны с биологической средой?
9. Приведите структурную схему радиотермометра, в которой исключается влияние на измерения не полного согласования антенны в месте приложения ее к биообъекту.
10. Какой метод функционирования используется в радиотермометре с модулятором на входе?
11. Поясните понятие нулевого баланса в радиотермометре.
12. Приведите структурную схему радиотермометра со скользящим подшумливанием биологического объекта.
13. Поясните основной недостаток радиотермометра со скользящим подшумливанием.
14. За счет чего повышены динамические характеристики быстродействующего радиотермометра?
15. Какова функциональная схема быстродействующего радиотермометра?
16. В чем заключается принцип функционирования быстродействующего радиотермометра?
17. Типы антенн-аппликаторов, используемых на практике для определения глубинных температур биообъектов.
18. Эквивалентная схема системы "антенна – излучающая среда".
19. Основные особенности, которыми должна обладать антенна для контактных измерений глубинных температур биообъекта.
20. Как влияет структура биологической среды на процесс выбора аппликаторной антенны?
21. Опишите меры по уменьшению рассогласования антенны с биологической средой.
22. Как можно повысить разрешающую способность по поверхности в аппликаторной антенне?
23. Из каких элементов состоит стенд для измерения глубинных характеристик антенн-аппликаторов (один из вариантов исполнения)?

3 Микроволновые радиотермометры на основе метода комбинированной импульсной модуляции и авторегулирования нулевого баланса

3.1 Структура, математическая модель передаточной характеристики, принцип функционирования одноприемникового радиотермометра

3.1.1 Структура и состав

На рисунке 3.1 приведена структурная схема радиотермометра, принцип работы которого основан на модифицированном методе нулевых измерений. Согласно приведенной схеме радиотермометр состоит из антенны А аппликаторного типа, работающего на отражение модулятора-ключа М, направленного ответвителя НО сонаправленного типа, циркулятора Ц, работающего в режиме вентиля (его второй вход соединен с согласованной нагрузкой $СН_{II}$), переключателя П, на входы которого подключены генератор шума ГШ с питающим его источником тока ИТ и согласованные нагрузки $СН_1$ и $СН_2$. Модулятор, направленный ответвитель, циркулятор, три согласованных нагрузки, переключатель, генератор шума и источник тока образуют входной узел радиотермометра. В измерительный канал радиотермометра входит радиометрический приемник РП, синхронный фильтр нижних частот СФ, фильтр верхних частот ФВЧ, компаратор К, определяющий на входе полярность напряжения. Для этого его другой вход соединен с общей точкой схемы. Все управляющие сигналы в радиотермометре вырабатывает цифровой блок управления БУ. На его выходную цифровую шину, организованную по интерфейсу *SPI*, поступает сигнал о глубинной температуре биообъекта.

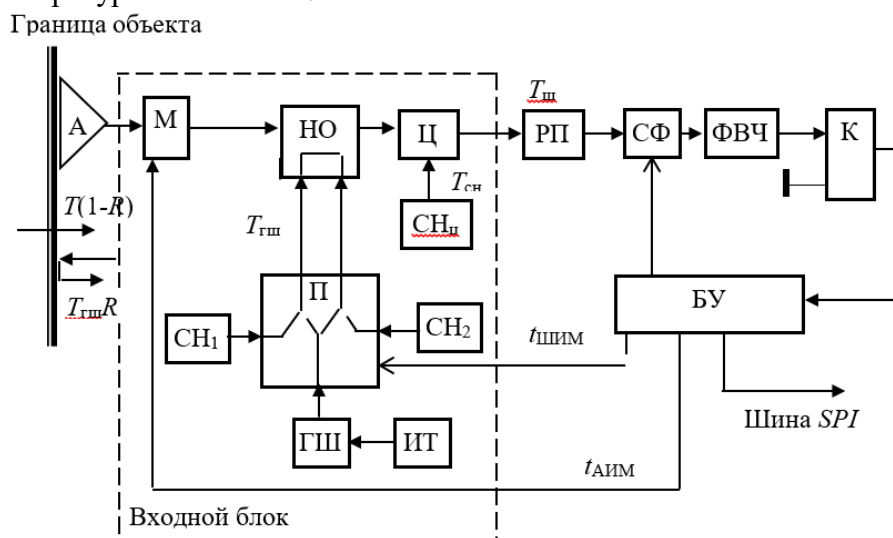


Рисунок 3.1 – Структурная схема радиотермометра на основе метода комбинированной импульсной модуляции и авторегулирования нулевого баланса

В радиотермометре выполняются два вида импульсной модуляции. Амплитудная модуляция сигнала антенны происходит в результате замыкания - размыкания ключа в модуляторе по импульсам длительностью t_{AIM} , следующим со скважностью 2. Широтной модуляции подвергается сигнал генератора шума. Данная модуляция происходит в переключателе по поступающему на его управляющий вход импульсному сигналу длительностью $t_{ШИМ}$ с блока управления. Переключатель работает следующим образом. При поступлении сигнала $t_{ШИМ}$ генератор шума ГШ и согласованная нагрузка $СН_2$ подключаются к основному каналу направленного ответвителя так, что сигнал генератора через циркулятор поступает на вход радиометрического приемника (согласованная нагрузка $СН_1$ для

рассматриваемого случая отключена). При отсутствии импульса $t_{\text{ШИМ}}$ к основному каналу направленного ответвителя подключаются генератор шума и согласованная нагрузка $СН_1$ и в этом случае шумовой сигнал генератора передается в обратном направлении, в сторону антенны (согласованная нагрузка $СН_2$ в этот момент времени отключена). Циркулятор работает в режиме вентиля. Поэтому собственные шумы радиометрического приемника $T_{\text{ш}}$ поглощаются согласованной нагрузкой $СН_1$. В свою очередь, ее шумовая температура $T_{\text{сн}}$ излучается в антенный тракт и после отражения на границе "объект – антенна" при замкнутом ключе модулятора, или от модулятора при разомкнутом ключе, через прямое плечо циркулятора поступает на вход приемника.

Измерительная часть радиотермометра представляет собой радиометрический приемник с линейной передаточной характеристикой и полосой принимаемых частот Δf . Синхронный фильтр нижних частот СФ производит предварительную фильтрацию сигналов, уменьшает флуктуационную компоненту в протектированных сигналах. Фильтр верхних частот ФВЧ собран по схеме однозвенного фильтра первого порядка (представляет собой разделительную CR -цепь) с частотой среза, много меньшей частоты модуляции в радиотермометре ($f_{\text{ср}} \ll 1/2t_{\text{АИМ}}$), и предназначен для устранения в сигналах постоянной составляющей. В результате на выходе фильтра выделяется переменная составляющая сигнала с минимальными искажениями формы импульсов.

3.1.2 Принцип функционирования и передаточная характеристика

Принцип работы радиотермометра поясняется временными диаграммами на рисунке 3.2 и заключается в следующем. Во входном узле, в зависимости от состояния модулятора M и переключателя P , которые управляются импульсами с длительностями $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$, на вход приемника поступают следующие три уровня шумовых сигналов.

При отсутствии обоих импульсов $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ ключ модулятора разомкнут, и поскольку он отражательного типа, сигналы генератора и согласованной нагрузки циркулятора, отражаясь от модулятора, далее поступают на вход приемника. В этом случае на входе приемника имеет место сумма сигналов $T_{\text{гш}}$ и $T_{\text{сн}}$, к которым добавляются собственные шумы приемника, характеризуемые эффективной температурой $T_{\text{ш}}$. То есть, первый уровень сигналов равен $T_{\text{гш}} + T_{\text{сн}} + T_{\text{ш}}$. Так как эти сигналы от разных источников шума, следовательно, они не коррелированы, и на входе приемника мощности этих сигналов, пропорциональные шумовым температурам, складываются.

При действии импульса $t_{\text{АИМ}}$ ключ модулятора замыкается и при отсутствии импульса $t_{\text{ШИМ}}$ на входе приемника присутствует сумма сигналов $T(1-R) + T_{\text{гш}}R + T_{\text{сн}}R + T_{\text{ш}}$ (второй уровень сигналов на входе приемника). Первым сигналом этой суммы является интегральная (глубинная) шумовая температура T объекта. Одна часть этого сигнала поступает в антенну, другая отражается обратно в объект с коэффициентом отражения по мощности R . Вторым и третьим являются сигналы генератора шума $T_{\text{гш}}$ и согласованной нагрузки циркулятора $T_{\text{сн}}$, отраженные от границы контакта антенны с объектом исследования. Четвертым сигналом является собственная шумовая температура $T_{\text{ш}}$ приемника.

При появлении импульса $t_{\text{ШИМ}}$ в направленном ответвителе меняется направление распространения сигнала генератора шума, и тогда на входе приемника радиотермометра присутствует сумма сигналов $T(1-R) + T_{\text{гш}} + T_{\text{сн}}R + T_{\text{ш}}$ (третий уровень).

На рисунке 3.2 приведены три временные диаграммы: (а) диаграмма импульсного сигнала управления модулятором длительностью $t_{\text{АИМ}}$; (б) диаграмма импульсного сигнала управления переключателем длительностью $t_{\text{ШИМ}}$; (в) диаграмма сигнала на выходе высокочастотного фильтра для случая установленного нулевого баланса в радиотермометре. Индикатором нулевого баланса в приемном тракте служит устанавливаемое следящей системой блока управления радиотермометра нулевое напряжение на входе компаратора,

когда по измерительному тракту проходит сигнал $T_{гш}$ генератора шума, отраженный от закрытого выхода модулятора (второй полупериод амплитудно-импульсной модуляции). Нулевой баланс при включении питания радиотермометра устанавливается и затем, при изменении сигнала антенны автоматически поддерживается соответствующей регулировкой длительности широтно-импульсного сигнала $t_{ШИМ}$. Так как постоянная составляющая в сигналах на входе компаратора исключена фильтром верхних частот, изменение длительности широтного сигнала приводит к сдвигу всей периодической последовательности промодулированных сигналов относительно нулевой оси времени вверх или вниз (в зависимости от уменьшения или увеличения длительности $t_{ШИМ}$). В этом заключается особенность регулировки нулевого баланса в радиотермометре.

При установленном нулевом балансе выполняется равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов в первом полупериоде амплитудно-импульсной модуляции:

$$U_+ t_{ШИМ} = U_- (t_{АИМ} - t_{ШИМ}) \quad (3.1)$$

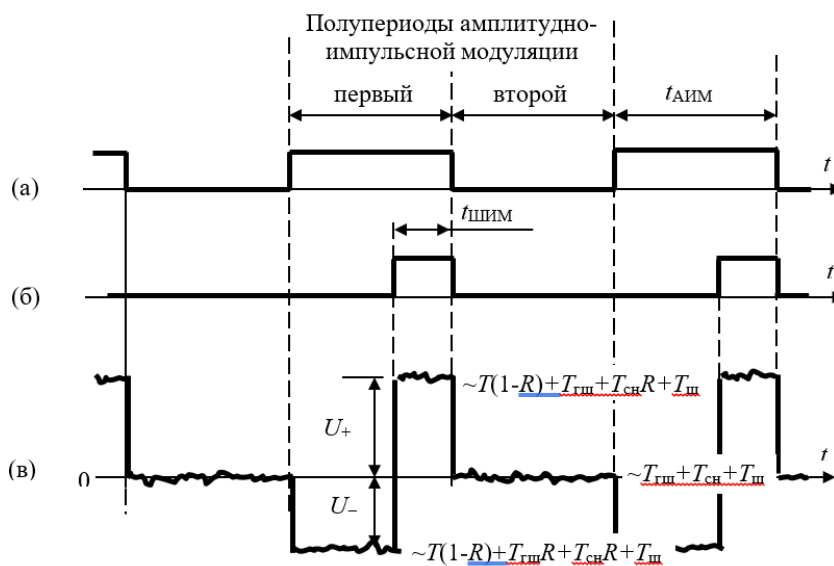


Рисунок 3.2 – Схема измерения динамической зависимости выходного спектра при одночастотном сигнале

На рисунке 3.2 U_+ и U_- - амплитуды положительного и отрицательного импульсов, равные:

$$U_+ = Gk\Delta f [T(1-R) + T_{гш} + T_{сн} R + T_{ш} - T_{гш} - T_{сн} - T_{ш}] = Gk\Delta f (T - T_{сн})(1-R), \quad (3.2)$$

$$U_- = Gk\Delta f (T_{гш} + T_{сн} + T_{ш} - T(1-R) - T_{гш} R - T_{сн} R - T_{ш}) = Gk\Delta f (T_{гш} + T_{сн} - T)(1-R), \quad (3.3)$$

где G - коэффициент передачи измерительного тракта, равный произведению коэффициентов усиления по высокой и низкой частотам, передачи квадратичного детектора;

k - постоянная Больцмана;

Δf - полоса частот приемника.

Подставляя (3.2) и (3.3) в (3.1), и решая относительно глубинной температуры биообъекта получим математическую модель передаточной характеристики радиотермометра:

$$T = T_{гш} + T_{сн} - T_{гш} \frac{t_{ШИМ}}{t_{АИМ}} \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) следует линейная зависимость сигнала T от длительности $t_{\text{ШИМ}}$. Следовательно, через эту длительность можно косвенным способом определить интегральную глубинную температуру объекта. Из (3.4) также следует, что на измерения не влияют изменения собственных шумов $T_{\text{ш}}$ радиотермометра, коэффициента передачи измерительного тракта G и коэффициента отражения сигнала по мощности R на границе антенны и объекта.

Значения минимальной $T_{\text{мин}}$ и максимальной $T_{\text{макс}}$ интегральных температур объекта определяются из (3.4) подстановкой крайних значений длительности $t_{\text{ШИМ}}$: при $t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}$ $T_{\text{мин}} = T_{\text{сн}}$, при $t_{\text{ШИМ}} = 0$, $T_{\text{макс}} = T_{\text{сн}} + T_{\text{гш}}$.

Следовательно, диапазон измерений сигналов начинается от термодинамической температуры согласованной нагрузки циркулятора $\text{СН}_{\text{ц}}$ и имеет размах, равный сигналу генератора шума.

3.1.3 Калибровка

Настройка диапазона измерений выполняется в ходе внешней калибровки, когда эталонные сигналы образцовых источников шума, поступающие на антенну от образцовых излучателей, переносятся на внутренние опорные источники, расположенные во входном тракте радиотермометра, и запоминаются. Внутренними опорными источниками шума в радиотермометре являются согласованная нагрузка циркулятора (шумовой, вырабатываемый нагрузкой сигнал равен физической температуре нагрузки, для волноведущих структур согласованная нагрузка является аналогом абсолютно черного тела) и генератор шума.

Калибровка осуществляется в два этапа и начинается с подключения эталона, определяющего нижнюю границу диапазона измерения. На этом этапе сигнал подшумливания $T_{\text{гш}}$ генератора шума на протяжении всего первого полупериода амплитудно-импульсной модуляции передается в сторону приемника, что производится соответствующей установкой длительности $t_{\text{ШИМ}}$, равной $t_{\text{АИМ}}$. Регулировка шумовой (эффективной) температуры согласованной нагрузки циркулятора осуществляется изменением температуры локального термостата, в котором данная нагрузка установлена. Регулировка температуры термостата и, соответственно, находящейся с ней в тепловом контакте согласованной нагрузки осуществляется до момента исчезновения сигналов с частотой модуляции на входе компаратора (выходе фильтра верхних частот). На выходе компаратора будут возникать случайно повторяющиеся переходы между уровнями логического нуля и логической единицы.

После того как произведена регулировка нижней границы диапазона измерений, на антенну направляется излучение эталона, определяющего верхнюю границу диапазона. Сигнал $t_{\text{ШИМ}}$ устанавливается равным нулю. То есть на протяжении этого этапа калибровки сигнал генератора шума направлен в сторону антенны. Осуществляется регулировка во входном блоке радиометра выходной мощности генератора шума изменением величины питающего его источника тока. Аналогично первому этапу калибровки, настройка на верхнюю границу диапазона производится до исчезновения модулированных сигналов на входе компаратора измерительного тракта.

3.1.4 Алгоритм функционирования блока управления

В радиотермометре цифровой блок управления вырабатывает все необходимые сигналы для функционирования. В реальном масштабе времени осуществляет следящий режим работы и автоматическое поддержание нулевого баланса. Как следует из выше приведенного описания принципа работы радиотермометра, необходимым условием нулевого приема является поддержание на входе компаратора нулевого напряжения в фазу

прохождения по измерительному тракту сигналов генератора шума $T_{гш}$ и согласованной нагрузки циркулятора $T_{сн}$ во второй полупериод амплитудно-импульсной модуляции. После анализа выходного сигнала компаратора в этом полупериоде блок управления корректирует цифровой код длительности широтно-импульсного сигнала $t_{шим}$. Корректировка кода осуществляется по следующему алгоритму. Если на входе компаратора напряжение во втором полупериоде амплитудно-импульсной модуляции положительное, код длительности в блоке управления увеличивается на 1 младший разряд. Если напряжение отрицательное – код уменьшается на 1 младший разряд. Это приводит к изменению длительности широтно-импульсного сигнала на 1 младший дискрет в следующем периоде амплитудно-импульсной модуляции. Число дискретов длительности широтно-импульсного сигнала определяет разрешающую способность измерений и находится из отношения $t_{АИМ}/2^n$, где n – число разрядов цифрового кода длительности $t_{чис}$.

Цифровой код длительности широтно-импульсного сигнала является цифровым эквивалентом измеряемого сигнала антенны и поступает на выходную шину SPI блока управления.

3.1.5 Флуктуационная чувствительность

Расчет чувствительности радиотермометра производится по формуле:

$$\Delta T_A = \frac{\sqrt{(T_{гш} + T_{сн})[4T_{ш} + T_{сн}(1 + 2R - R^2)] + 2T_{гш}T_{сн} + 2T_{ш}^2} + \sqrt{2\Delta f\tau K}}{\times \frac{T(1-R)^2(T_{гш} + 2T_{сн} - T)}{(1-R)}} \quad (3.5)$$

где τ – постоянная времени синхронного фильтра;

K – число накопленных кодов длительности широтно-импульсного сигнала за время одного измерения, равного:

$$t_{изм} = 2t_{АИМ}K. \quad (3.6)$$

Из (3.5) следует, что чувствительность имеет переменный характер, зависит от сигнала объекта T , и локальный максимум для ΔT_A (минимальная чувствительность) достигается при значении сигнала:

$$T = T_{сн} + \frac{T_{гш}}{2}. \quad (3.7)$$

то есть в середине диапазона измеряемых температур.

Тогда формула для определения минимального значения чувствительности получается подстановкой (3.7) в (3.5):

$$\Delta T_{\max} = \frac{\sqrt{(T_{гш} + T_{сн})[4T_{ш} + T_{сн}(1 + 2R - R^2)] + 2T_{гш}T_{сн} + 2T_{ш}^2} + \sqrt{2\Delta f\tau K}}{\times \frac{(\frac{T_{гш}}{2} + T_{сн})^2(1-R)^2}{(1-R)}} \quad (3.8)$$

Если при проектировании радиотермометра чувствительность задана, для нахождения времени одного измерения (характеризует динамику работы радиотермометра) сначала определяют произведение параметров τK по формуле, полученной из (3.8):

$$\tau K = \frac{(T_{гш} + T_{сн})[4T_{ш} + T_{сн}(1 + 2R - R^2)] + 2T_{гш}T_{сн} + 2T_{ш}^2 + (\frac{T_{гш}}{2} + T_{сн})^2(1-R)^2}{2\Delta f\Delta T_{\max}^2(1-R)^2}. \quad (3.9)$$

Затем время измерения находится из (3.6).

3.2 Многоприемниковый радиотермометр

3.2.1 Структура и состав

В данном разделе рассмотрен радиотермометр, схема которого построена по многоприемниковому принципу. В результате радиотермометр имеет более высокую флуктуационную чувствительность и, соответственно, может измерять слабо выраженные температурные аномалии на большей, чем для одноприемниковых схем, глубине биологических сред. Каждый приемный канал радиотермометра работает в режиме нулевых измерений, что повышает стабильность его функционирования. Одновременно возрастает надежность измерений: отказ одного из приемников не приводит к нарушению работоспособности всей системы, а лишь незначительно снижается чувствительность.

Увеличение чувствительности в радиотермометре можно достигнуть соответствующим увеличением времени измерения и накоплением сигнала. Но в этом случае снижаются динамические характеристики радиотермометра, и увеличивается время измерения, что для контактных определений глубинных температур биообъектов аппликационной антенной приводит к большим ошибкам вследствие нагрева антенны объектом исследования. Есть второй способ увеличения чувствительности без увеличения времени измерения. Это использование многоприемникового принципа построения радиотермометра, когда все приемники работают в одном спектральном диапазоне частот на общую антенну.

Многоприемниковый принцип отличается от принципа многоканальных измерений. Под последним понимают мультиспектральные измерения, когда каналы принимают сигналы антенны в различных спектральных диапазонах.

На рисунке 3.3 приведена схема многоприемникового радиотермометра высокой чувствительности. Согласно структурной схеме в состав радиотермометра входит антенна аппликаторного типа А, работающий в ключевом режиме селектор СК отражающего типа с одним входом и n выходами, где n – количество приемников в радиотермометре, n направленных ответвителей HO_1, HO_2, \dots, HO_n , циркуляторы $Ц_1, Ц_2, \dots, Ц_n$ с согласованными нагрузками $CH_{ц1}, CH_{ц2}, \dots, CH_{цn}$, переключатели $П_1, П_2, \dots, П_n$, на входы которых подключены генераторы шума $ГШ_1, ГШ_2, \dots, ГШ_n$ с питающими источниками тока $ИТ_1, ИТ_2, \dots, ИТ_n$ и пары согласованных нагрузок $CH_{1,2}, CH_{3,4}, CH_{5,6}, CH_{7,8}, \dots, CH_{(n-1),n}$. Приемные измерительные каналы состоят из радиометрических приемников $РП_1, РП_2, \dots, РП_n$, синхронных фильтров нижних частот $СФ_1, СФ_2, \dots, СФ_n$, фильтров верхних частот $ФВЧ_1, ФВЧ_2, \dots, ФВЧ_n$, компараторов K_1, K_2, \dots, K_n , определяющих полярность напряжения, так как вторые входы компараторов подключены к общей точке многоприемниковой схемы. Все управляющие сигналы в радиотермометре вырабатывает микроконтроллер МК. Сигнал длительностью t_{AIM} микроконтроллера поступает на управляющий вход селектора для подключения одного из приемных каналов к антенне. Сигналы на шине k микроконтроллера длительностью $t_{ШИМ}$ управляют переключателями $П_1 - П_n$ и изменяют направление распространения сигнала генератора шума в антенном тракте. С шины m микроконтроллера происходит управление синхронными фильтрами нижних частот. На шину l поступают выходные сигналы компараторов приемников. Измеряемый сигнал объекта формируется на выходной шине интерфейса *SPI* микроконтроллера.

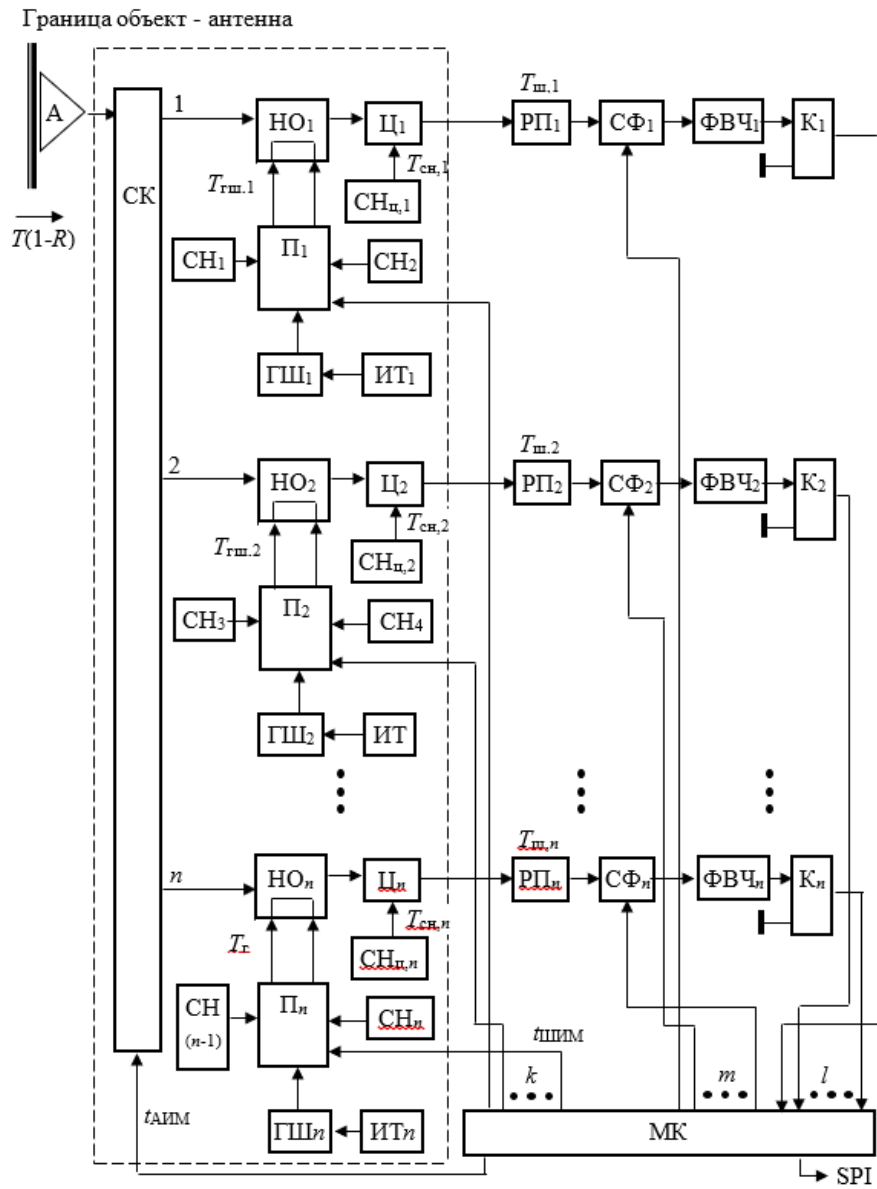


Рисунок 3.3 – Структурная схема многоприемникового радиотермометра

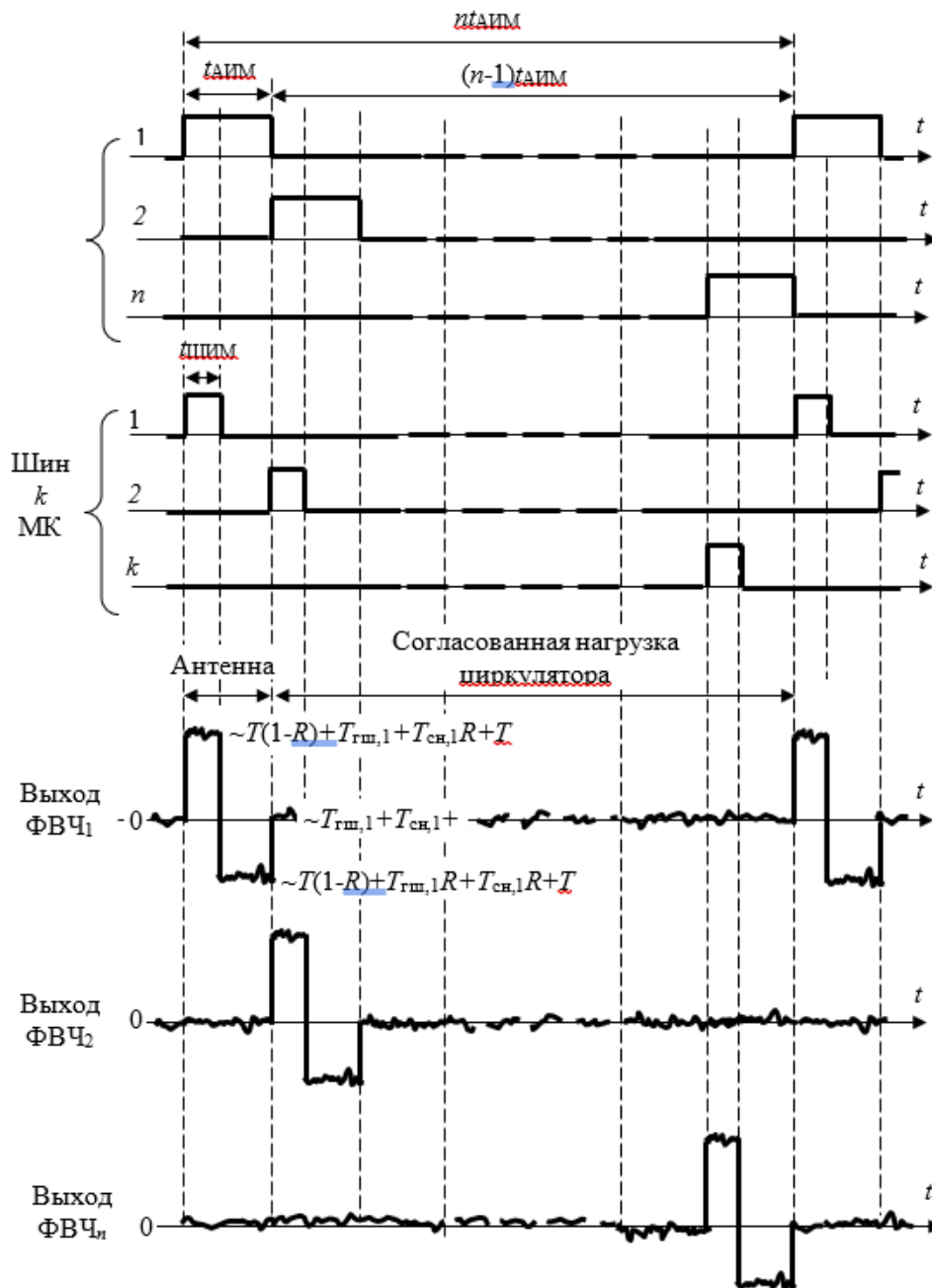


Рисунок 3.4 – Временные диаграммы, поясняющие принцип работы многоприемникового радиотермометра

3.2.2 Принцип функционирования и передаточная характеристика

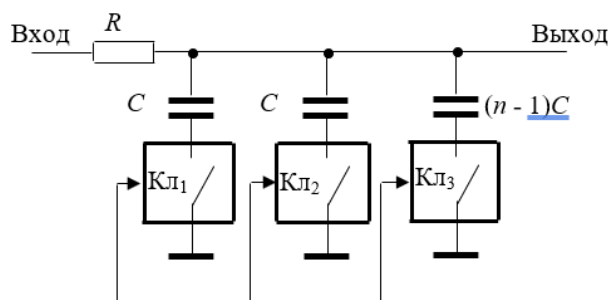
Принцип работы радиотермометра иллюстрируется временными диаграммами на рисунке 3.4 и заключается в следующем. Подключение к антенне каждого из приемных каналов выполняется согласно принципа временного разделения. Вход первого приемника на время $t_{\text{АИМ}}$ подключается к антенне, и в этом промежутке времени выполняется широтно-импульсная модуляция выбранного приемного тракта. Изменением длительности $t_{\text{ШИМ}}$ широтно-импульсного сигнала устанавливается нулевой баланс в приемнике по алгоритму, рассмотренному в разделе 3.1.4, как для одноприемниковой схемы радиотермометра. В остальное время на вход приемника поступает сигнал согласованной нагрузки циркулятора и генератора шума. По истечении времени $t_{\text{АИМ}}$ селектором к антенне подключается второй

приемник и описанные выше операции повторяются.

Таким образом, в селекторе тракт антенны последовательно подключается на входы приемников, начиная с первого, на одинаковое время $t_{\text{АИМ}}$ (в любой момент времени подключенным оказывается только один приемник). Следовательно, период повторения сигнала управления амплитудно-импульсной модуляцией для одного приемника составляет $nt_{\text{АИМ}}$, где n – количество приемных каналов в радиотермометре. В остальное время, когда приемник не подключен к антенне, сигналы $T_{\text{сн}}$ и $T_{\text{гш}}$ согласованной нагрузки циркулятора Ц_1 ($\text{Ц}_2, \dots, \text{Ц}_n$) и генератора шума ГШ_1 ($\text{ГШ}_2, \dots, \text{ГШ}_n$), отражаясь от закрытого ключа селектора, поступают на вход радиометрического приемника РП_1 ($\text{РП}_2, \dots, \text{РП}_n$). Таким образом, время накопления сигналов согласованной нагрузки циркулятора и генератора шума для каждого канала возрастает в $(n-1)$ -раз до значения $(n-1)t_{\text{АИМ}}$.

Это приводит к значительному сглаживанию флуктуирующей компоненты шумового сигнала. Согласно закону больших чисел теории вероятности, при увеличении времени наблюдения шумового сигнала уменьшается разброс в его независимых выборках, то есть его постоянная составляющая становится более сглаженной. В этом случае возникает аналогия с работой компенсационного радиометра – радиометра полной мощности, обладающего самой высокой потенциальной чувствительностью среди различных схем, но не достижимой на практике вследствие сильного влияния дестабилизирующих факторов – дрейфа и флуктуаций коэффициента усиления приемника и собственных шумов. В компенсационном радиометре сравнение входного сигнала происходит с не шумящим источником – источником образцового напряжения.

В приемниках радиотермометра накопление сигналов в аналоговой форме происходит в синхронных низкочастотных фильтрах. В основе построения фильтра используется интегрирующая RC -цепь первого порядка. Отличие заключается в том, что данный фильтр является трехзвенным и накапливает три уровня промодулированных на входе радиотермометра сигналов (рисунок 3.5). Каждый уровень накапливается на своем конденсаторе C подключением его к общей точке схемы через управляемый ключ Кл_{1-3} . Резистор R для трех звеньев фильтра является общим.



Управление ключами синхронного фильтра

Рисунок 3.5 – Схема синхронного фильтра, устанавливаемого в приемных каналах многоприемникового радиотермометра, в котором увеличена емкость конденсатора, накапливающего опорный сигнал согласованной нагрузки циркулятора и генератора шума в $n - 1$ – раз

Так как время накопления сигналов согласованных нагрузок циркуляторов и генераторов шума возрастает и становится равным $t_{\text{АИМ}}(n-1)$, постоянную времени цепи синхронного фильтра для накопления этих сигналов необходимо увеличивать в $n-1$ - раз соответствующим увеличением емкости конденсатора. Тогда флуктуационная чувствительность всего многоприемникового радиометра возрастает в количество раз, равное корню квадратному из числа приемных каналов:

$$\Delta T_{\text{АМП}} = \frac{\Delta T_{\text{А}}}{\sqrt{n}}, \quad (3.10)$$

где ΔT определяется соотношением (3.5).

Таким образом, чувствительность многоприемникового радиотермометра возрастает с увеличением количества приемных каналов. Для четырехприемникового радиотермометра чувствительность возрастает в два раза, для девятиприемникового – в три раза и т.д.

На практике сложно обеспечить создание приемников с одинаковыми шумовыми свойствами, с одинаковой шумовой температурой $T_{\text{ш}}$. Разброс $T_{\text{ш}}$ от приемника к приемнику учитывается следующей формулой:

$$T_{\text{ш}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{ш}}^i. \quad (3.11)$$

Количество K накопленных кодов длительности широтно-импульсного сигнала в микроконтроллере по каждому приемнику зависит от времени измерения $t_{\text{изм}}$ и периода амплитудно-импульсной модуляции. Формула для расчета числа накоплений имеет вид:

$$K = \frac{t_{\text{изм}}}{nt_{\text{АИМ}}}. \quad (3.12)$$

Если время измерения составляет 0,5 с, длительность управляющего импульса амплитудно-импульсной модуляцией равна 0,5 мс, тогда для четырехприемниковой схемы число накопленных кодов по каждому приемнику будет равно $K = 250$.

По принципу функционирования работа многоприемникового радиотермометра схожа с работой одного приемного канала при многократном сканировании объекта исследования. Например, в радиоастрономии при сканировании радиотелескопом одного и того же участка неба в ходе дальнейшей обработки происходит синхронное поточечное суммирование сканов с определением среднего. Результирующая шумовая дорожка имеет меньший разброс и позволяет выявить небольшие отклонения радиояркостной температуры. Снижение дисперсии результирующей шумовой дорожки пропорционально корню квадратному из числа сканов.

Подобную аналогию можно провести и для многоприемникового радиотермометра. Так как приемные каналы работают раздельно на одну антенну, то каждый приемник по сути накапливает свой "скан" сигнала антенны, и в результате обработки полученных значений длительности широтно-импульсного сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ всех приемников разброс значений длительности (ее дисперсия) снижается пропорционально корню квадратному из числа приемных каналов.

Полученные массивы чисел ("сканы") первого приемника $t_{\text{ШИМ},1}^1, t_{\text{ШИМ},2}^1, \dots, t_{\text{ШИМ},K}^1$, где K – число накопленных цифровых кодов длительности за одно измерение, второго приемника $t_{\text{ШИМ},1}^2, t_{\text{ШИМ},2}^2, \dots, t_{\text{ШИМ},K}^2, \dots, n$ -го приемника $t_{\text{ШИМ},1}^n, t_{\text{ШИМ},2}^n, \dots, t_{\text{ШИМ},K}^n$ можно обработать двумя способами. По первому способу после каждого периода амплитудно-импульсной модуляции находится среднее арифметическое значение (одна точка) по всем n приемникам:

$$t_{\text{ШИМ},1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{ШИМ},1}^i, \quad t_{\text{ШИМ},2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{ШИМ},2}^i, \dots, t_{\text{ШИМ},K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{ШИМ},K}^i.$$

Затем после получения всех точек на одном цикле измерения в конце рассчитывается результат:

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_{\text{ШИМ},i}. \quad (3.13)$$

По второму способу после истечения времени одного измерения рассчитываются средние значения по приемникам:

$$t_{\text{ШИМ}}^1 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_{\text{ШИМ},i}^1, \quad t_{\text{ШИМ}}^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_{\text{ШИМ},i}^2, \quad \dots, \quad t_{\text{ШИМ}}^n = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_{\text{ШИМ},i}^n.$$

Результирующая длительность широтно-импульсного сигнала вычисляется операцией нахождения среднего арифметического длительностей широтно-импульсных сигналов каждого приемного канала.

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_{\text{ШИМ},i}. \quad (3.14)$$

Далее интегральная глубинная температура объекта определяется из выражения (3.4).

3.2.3 Калибровка

Калибровка многоприемникового радиотермометра выполняется в два этапа. Начинается с подключения на вход радиотермометра вместо антенны эталона, определяющего нижнюю границу диапазона измерения, $T_{\text{ЭТ,МИН}} = T_{\text{МИН}}$. На этом этапе калибровки $t_{\text{ШИМ}}$ устанавливается равным $t_{\text{АИМ}}$. Регулировка сигнала $T_{\text{СН}}$ производится одновременно по всем приемным каналам изменением температуры согласованных нагрузок циркуляторов (изменение температуры локальных нагревателей). Для каждого приемника регулировка температуры согласованной нагрузки осуществляется до момента исчезновения сигналов с частотой амплитудно-импульсной модуляции на входе компаратора. При этом на выходе компаратора будут происходить случайно повторяющиеся переходы между уровнями логического нуля и единицы.

После того, как все приемные каналы отрегулированы на нижнюю границу диапазона измерений, на вход радиометра подключается эталон, определяющий верхнюю границу диапазона, $T_{\text{ЭТ,МАКС}} = T_{\text{МАКС}}$. Сигнал $t_{\text{ШИМ}}$ устанавливается равным нулю. Регулировка осуществляется во входном блоке сигналов генераторов шума $T_{\text{ГШ}}$ по всем приемникам изменением величины тока от источников и проводится до исчезновения частоты модуляции на входе соответствующих компараторов (аналогично первому этапу калибровки).

Если в радиотермометре использовать цифроаналоговые преобразователи, калибровку можно проводить в полуавтоматическом режиме с использованием микроконтроллера.

3.3 Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается метод комбинированной импульсной модуляции в радиотермометре?
2. Выполнением каких операций устанавливается нулевой баланс в радиотермометре, работающем на модифицированном методе нулевых измерений?
3. Поясните принцип регулирования нулевого баланса в радиотермометре.
4. Приведите структурную схему радиотермометра на одном приемнике.
5. Запишите математическую модель передаточной характеристики радиотермометра на одном приемнике.
6. От чего зависят границы диапазона измерения радиотермометра?
7. От чего зависит чувствительность радиотермометра, и как она связана с измеряемым сигналом?
8. Приведите алгоритм калибровки радиотермометра на одном приемнике.
9. В каких случаях используется схема многоприемникового радиотермометра?
10. Чем отличается принцип многоканальности от многоприемниковости?
11. Поясните особенность функционирования многоприемникового радиотермометра.
12. Как определяется чувствительность многоприемникового радиотермометра. Во сколько раз она выше одноприемниковой схемы, и при каких условиях она выполняется?

13. От чего зависит время измерения в многоприемниковой схеме радиотермометра.
14. Опишите процесс обработки сигналов в многоприемниковом радиотермометре.

4 Оценка структуры биологической ткани по данным измерения модуля коэффициента отражения на границе биообъекта с антенной

4.1 Общие положения

Биоткань характеризуется чередованием слоев с различными диэлектрическими характеристиками. Возникают отражения радиоволн на границах слоев. Изменение толщины слоев приводит к вариациям результирующего коэффициента отражения и, следовательно, коэффициента излучения. Например, при излучении в свободное пространство излучательная способность меняется более чем на 50 % при изменении толщины слоев кожи и жира.

При неинвазивном восстановлении профильной температуры биологических тел решаются обратные задачи, для решения которых важно знать параметры биологической среды. В этом случае, для решения обратной задачи необходимо осуществить регуляризацию, используя априорные данные об исследуемом профиле (детерминистская и статистическая регуляризация, построение профиля по точкам (поточечное восстановление кривых)). Во всех случаях надо знать структуру исследуемой ткани.

Оценить параметры трехкомпонентной среды "кожа – жир – мышцы" биологической ткани и динамику этих характеристик во времени можно по измерениям модуля коэффициента отражения по мощности либо на нескольких частотах, либо на одной частоте при использовании разных антенн (с разным импедансом). Предварительные результаты моделирования показали, что использование модуля коэффициента отражения по мощности позволяет оценить размер слоев с точностью лучше 0,1 мм на частотах в единицы ГГц.

На рисунке 4.1 приведена плоская трехслойная модель биологической среды "кожа – жир – мышцы". Мышечный слой обладает сильным поглощением волн, поэтому рассматривается как бесконечное полупространство. Плоская электромагнитная волна распространяется из вакуума в направлении движения, перпендикулярном плоскостям всех слоев ($\theta = 0$). По измерениям отраженной волны рассчитывается модуль коэффициента отражения по мощности на различных частотах, и из анализа частотной зависимости коэффициента отражения делается вывод о толщине первого (кожи) и второго (жира) слоев. Для оценки толщин слоев кожи и жира наиболее оптимальными являются две частоты со значениями 0,8 и 1,5 ГГц.

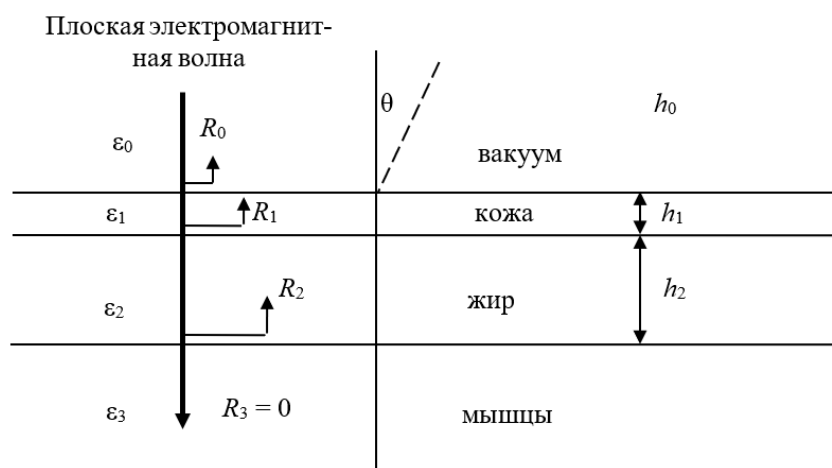


Рисунок 4.1 – Модель плоской трехслойной среды "кожа – жир – мышцы"

Для анализа структуры исследуемой биоткани через измерения коэффициента отражения метод решения заключается в следующем. Аппроксимация степенными функциями частотных характеристик комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев биологических тканей имеет вид:

- кожа, мышечная ткань – $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = (100f^{-0,1} + 2000f^{-1,3}) + j(18000\sigma/f)$, где σ – погонная проводимость слоя [см/м], равная $4,5 \times 10^{-8}f^2 + 9,48 \times 10^{-2}f^{0,39} + 0,3$; f – частота [МГц];

- жир – $\varepsilon_2 = (5,3f^{-0,008} + 500f^{-1,1} + 6 \times 10^{-5}f) + j(18000\sigma/f)$, где σ равна $1,3 \times 10^{-9}f^2 + 5,9 \times 10^{-3}f^{0,43}$.

Комплексные коэффициенты отражения по полю определяются следующими соотношениями:

$$\overline{R_0}^{1/2} = \frac{\gamma_0 + \overline{R_1}^{1/2} \exp(-2k_1 h_1)}{1 + \gamma_0 \overline{R_1}^{1/2} \exp(-2k_1 h_1)}, \quad (4.1)$$

$$\overline{R_1}^{1/2} = \frac{\gamma_1 + \overline{R_2}^{1/2} \exp(-2k_2 h_2)}{1 + \gamma_1 \overline{R_2}^{1/2} \exp(-2k_2 h_2)}, \quad (4.2)$$

$$\overline{R_2}^{1/2} = \gamma_2, \quad (4.3)$$

где $k_{0,1,2,3}$ – волновые числа соответствующих слоев, равные $[2\pi f(\varepsilon_0 - \varepsilon_{0,1,2,3})^{1/2}]/c$;

c – скорость света в вакууме и выполняется условие $Im(k) < 0$;

$\gamma_{0,1,2}$ – коэффициент отражения на границе между полупространствами, равный $(\gamma_{0,1,2+1} - \gamma_{0,1,2})/(\gamma_{0,1,2+1} + \gamma_{0,1,2})$;

$\gamma_{0,1,2,3} = k_{0,1,2,3}/j2\pi f \varepsilon \varepsilon_{0,1,2,3}$;

ε – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Приведенные формулы учитывают как амплитуду, так и фазу коэффициента отражения. Измерением определяется модуль коэффициента отражения по мощности, то есть $|\overline{R_0}| = R_0$. В ходе моделирования рассчитываются по формулам (4.1) – (4.3) и анализируются характеристики $R_0(f, h_1, h_2)$. Для этого толщина кожи изменяется в пределах 1 – 8 мм, жира – 1- 20 мм. Информативные зависимости модуля коэффициента отражения по мощности строятся на диаграммах для двух частот – f_1 и f_2 .

При проведении измерения модуля коэффициента отражения на конкретных биологических средах диаграммами пользуются для определения толщины слоев кожи и жира по полученным значениям коэффициента отражения.

Фазовые измерения усложняют аппаратуру. Тем не менее, если такие измерения возможны, тогда оценивают толщину слоев кожи и жира по измерениям комплексного коэффициента отражения на одной частоте высокочастотного диапазона длин волн согласно следующей методики.

Расчет комплексного коэффициента отражения для плоских волн можно провести через комплексные входные волновые сопротивления трехслойной структуры, моделирующей кожу, жир и мышцы.

Выражение для расчета комплексного входного сопротивления i - того слоя на частоте f через волновое сопротивление этого слоя $Z_{0,i}$ и входное сопротивление последующего слоя $Z_{вх,i+1}$ имеет вид (рисунок 4.2):

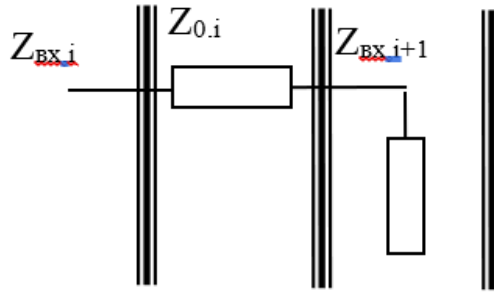


Рисунок 4.2. – Фрагмент модели плоскостойкой структуры, выраженной через комплексные входные и волновые сопротивления

$$Z_{\text{BX},i} = Z_{0,i} \frac{Z_{\text{BX},i+1} + Z_{0,i} \text{th}(k_i h_i)}{Z_{0,i} + Z_{\text{BX},i+1} \text{th}(k_i h_i)}, \quad (4.4)$$

где h_i – толщина i -того слоя ($i = 1$ соответствует входному сопротивлению всех слоев, $i = 3$ соответствует входному сопротивлению последнего, третьего слоя, который является полупространством);

k_i – волновые числа соответствующих слоев, равные $[2\pi f(\varepsilon - \varepsilon_i)^{1/2}]/c$;

c – скорость света в вакууме;

ε – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε_i – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость i -того слоя;

th – гиперболический тангенс;

$Z_{0,i}$ – волновое сопротивление i -того слоя, равное $k_i/j2\pi f\varepsilon\varepsilon_i$.

Комплексный коэффициент отражения на частоте f от системы трех слоев равен:

$$R(f) = \frac{Z_{\text{BX},i} - Z_0}{Z_{\text{BX},i} + Z_0}, \quad (4.5)$$

где Z_0 – волновое сопротивление свободного полупространства, из которого распространяется волна. В случае применения аппликационной антенны свободное полупространство заменяется средой с высокой диэлектрической проницаемостью (проницаемость подложки антенны).

4.2 Радиометрический измеритель модуля коэффициента отражения для определения структуры биологической ткани

4.2.1 Структура и состав

На рисунке 4.3 приведена структурная схема измерителя интегрального значения модуля коэффициента отражения различных биологических тел в широком диапазоне частот. В основе работы измерителя применен метод микроволновой радиометрии, то есть для определения отражательной способности тел используют электромагнитные сигналы шумового характера.

В состав радиометрического измерителя коэффициента отражения входит антенна А, два направленных ответвителя НО₁ и НО₂, переключатель П, генератор шума ГШ, источник тока ИТ. Измерительный канал состоит из радиометрического приемника РП, синхронного фильтра нижних частот СФ, фильтра верхних частот ФВЧ, компаратора К, блока управления БУ. Передача выходного сигнала о коэффициенте отражения осуществляется в цифровой форме с выхода БУ по интерфейсу связи SPI.

Опорный сигнал вырабатывается полупроводниковым генератором шума с применением лавинно-пролетного диода, через активную зону которого протекает ток стабильного источника тока. Переключатель состоит из трех высокочастотных ключей и работает в режиме селектора. На вход переключателя поступает сигнал генератора шума. В зависимости от управляющих сигналов во включенное состояние переходит только один ключ переключателя, и тем самым сигнал генератора шума поступает только на один из его выходов. Подключение генератора шума происходит либо к основным каналам идентичных направленных ответвителей HO_1 и HO_2 , либо к согласованной нагрузке СН. Включение в схему направленных ответвителей выполнено так, что для первого ответвителя HO_1 сигнал генератора шума, поступая в антенный тракт, далее распространяется в сторону антенны для второго HO_2 – на вход радиометрического приемника.

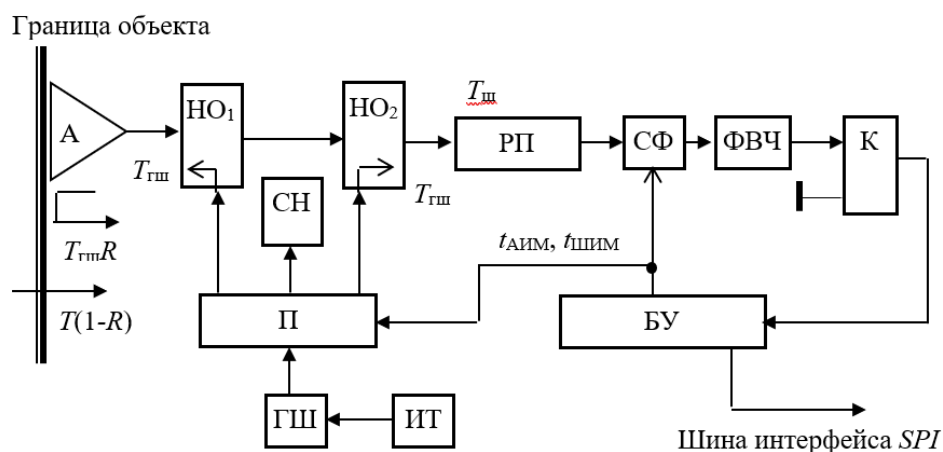


Рисунок 4.3 – Структурная схема радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения

Измерительный канал представляет собой радиометрический приемник с линейной передаточной характеристикой и полосой принимаемых частот Δf . Приемник включает высокочастотные усилители, полосовой фильтр, квадратичный детектор, выделяющий огибающую сигналов модуляции, пропорциональную мощности входных сигналов, линейные импульсные усилители низких частот.

4.2.2 Принцип функционирования и передаточная характеристика

Принцип работы радиометрического измерителя коэффициента отражения поясняется временными диаграммами на рисунке 4.4 и заключается в следующем. В измерителе синхронно выполняются два вида импульсной модуляции: амплитудная и широтная. Для этого в цифровом блоке управления формируются два управляющих логических сигнала с длительностями t_{AIM} и $t_{ШИМ}$. Импульсы длительностью t_{AIM} следуют со скважностью 2 и имеют форму типа "меандр". Импульсы длительностью $t_{ШИМ}$ изменяются от нуля до длительности t_{AIM} по алгоритму, описанному ниже. Данные сигналы по двухпроводной шине поступают на управляющие входы переключателя.

Если на входе переключателя действует только импульс t_{AIM} , выход генератора шума подключен к согласованной нагрузке, и в измерительный тракт сигнал генератора не поступает (подшумливание отсутствует). В этом случае на входе приемника действует сигнал антенны и собственные шумы приемника $T(1-R) + T_{ш}$, где T – термодинамическая температура объекта, R – коэффициент отражения по мощности на границе "антенна - объект", $T_{ш}$ – шумы приемника, приведенные к его входу.

Если на управляющих входах переключателя действуют оба импульса $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$, сигнал генератора шума поступает на второй направленный ответвитель НО₂ и излучается в сторону приемника. Таким образом, на входе приемника сигнал антенны суммируется с сигналом генератора шума: $T(1-R) + T_{\text{гш}} + T_{\text{ш}}$.

При отсутствии обоих импульсов управления сигнал генератора шума поступает в первый направленный ответвитель НО₁ и излучается в сторону антенны. Таким образом, на входе приемника будет присутствовать сумма сигналов $T(1-R) + T_{\text{гш}}R + T_{\text{ш}}$. Второй из этих сигналов является сигналом генератора шума, отраженный от границы "антенна- объект" с коэффициентом R .

Последовательность управляющих сигналов повторяется с периодом, равным $2t_{\text{АИМ}}$, и соответственно на входе радиометрического приемника действуют три описанных выше периодически повторяющихся шумовых сигнала.

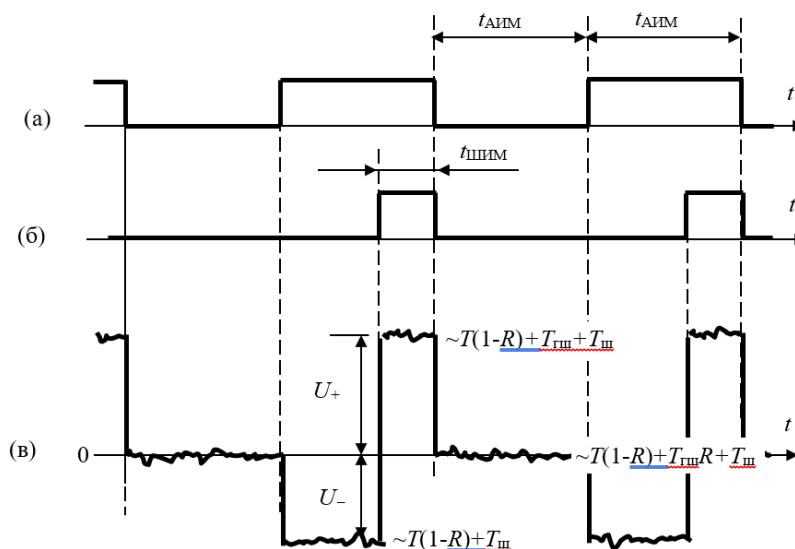


Рисунок 4.4 – Временные диаграммы функционирования радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения

На временной диаграмме (рисунок 4.4) приведен сигнал на входе компаратора для случая установленного нулевого баланса. Для данной структурной схемы и алгоритма функционирования нулевой баланс имеет место в том случае, если в полупериод амплитудно-импульсной модуляции, когда на вход приемника поступают сигнал антенны и отраженный от объекта сигнал генератора шума ($t_{\text{АИМ}} = 0$ и $t_{\text{ШИМ}} = 0$), выходное напряжение измерительного тракта равно нулю, и это равенство фиксирует компаратор. При включении питания нулевой баланс автоматически устанавливается и затем при изменении сигнала антенны регулируется соответствующим изменением длительности широтно-импульсного сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ в блоке управления. Так как сигнал на входе компаратора имеет периодический характер, и в этих сигналах исключена постоянная составляющая фильтром верхних частот, тогда для одного периода выполняется равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов на входе компаратора. Так как в один полупериод амплитудно-импульсной модуляции напряжение на входе компаратора равно нулю, поэтому равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов выполняется в другой полупериод модуляции:

$$U_+ t_{\text{ШИМ}} = U_- (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}), \quad (4.6)$$

где U_+ и U_- – амплитуды положительного и отрицательного импульсов, равные:

$$\begin{aligned}
U_+ &= Gk\Delta f [T(1-R) + T_{гш} + T_{ш} - T(1-R) - T_{гш}R - T_{ш}] = Gk\Delta f T_{гш}(1-R), \\
U_- &= Gk\Delta f [T(1-R) + T_{гш}R + T_{ш} - T(1-R) - T_{ш}] = Gk\Delta f T_{гш}R,
\end{aligned}
\tag{4.7}$$

где G – коэффициент передачи измерительного тракта, равный произведению коэффициентов усиления сигналов по высокой и низкой частотам и коэффициента передачи квадратичного детектора;

k – постоянная Больцмана;

Δf – полоса частот приемника.

Подставляя выражения (4.7) для амплитуд импульсов в (4.6), получим:

$$Gk\Delta f T_{гш}(1-R)t_{ШИМ} = Gk\Delta f T_{гш}R(t_{АИМ} - t_{ШИМ}),$$

$$R = \frac{t_{ШИМ}}{t_{АИМ}}. \tag{4.8}$$

Из формулы (4.8) следует, что коэффициент отражения можно определить косвенно через длительность широтно-импульсного сигнала, между которыми имеет место линейная зависимость. Также из данной формулы следует, что на измерения не влияют изменения коэффициента передачи G измерительного тракта, дрейф и флуктуации собственных шумов $T_{ш}$ и сигнала генератора шума $T_{гш}$.

Согласно (4.8), при полном отражении $t_{ШИМ} = t_{АИМ}$ и $R = 1$. Если исследуемый объект является абсолютно черным телом $t_{ШИМ} = 0$ и соответственно получаем $R = 0$.

В приемном тракте измерителя синхронный фильтр нижних частот производит предварительную фильтрацию сигнала, уменьшает флуктуационную компоненту в протектированных сигналах и тем самым исключает перегрузку компаратора. Фильтр состоит из трех однозвенных интегрирующих RC -цепей, в которых резистор является общим для всех цепей, а постоянные составляющие трех уровней модулируемых входных сигналов накапливаются на трех конденсаторах синхронным их подключением к общей шине радиометра через управляемые электронные ключи. Ключи имеют входы управления, на которые поступают сигналы с блока управления по трехпроводной шине. Фильтр верхних частот собран по схеме однозвенного фильтра первого порядка (представляет собой разделительную CR -цепь) с частотой среза много меньшей частоты амплитудно-импульсной модуляции в радиотермометре ($f_{ср} \ll 1/2t_{АИМ}$) и предназначен для устранения в сигналах постоянной составляющей. В результате на выходе фильтра выделяется переменная составляющая сигнала с минимальными искажениями формы импульсов.

Блок управления вырабатывает все необходимые сигналы для функционирования устройства. С помощью цифровых сигналов $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ управляет амплитудно-импульсной и широтно-импульсной модуляциями во входном блоке радиометра. Эти же сигналы поступают на синхронный фильтр низких частот. Блок управления производит съём сигнала с выхода компаратора и изменяет длительность широтно-импульсного сигнала по следующему алгоритму. Если напряжение на входе компаратора при отсутствии импульса амплитудно-импульсной модуляции имеет положительную полярность, длительность широтно-импульсного сигнала блоком управления увеличивается, что приводит к сдвигу промодулированных сигналов на входе компаратора вниз относительно нулевой оси времени. В случае отрицательной полярности напряжения блок управления уменьшает длительность широтно-импульсного сигнала, и вся последовательность промодулированных сигналов сдвигается вверх. На этом основан следящий принцип поддержания нулевого баланса в радиотермометре, индикатором которого служит отсутствие напряжения на входе компаратора в тот полупериод амплитудно-импульсной модуляции, когда $t_{АИМ} = 0$.

Полученный сигнал антенны в цифровом виде передается на внешние устройства по интерфейсу *SPI*.

4.3 Вопросы для самопроверки

1. Какие параметры биологической ткани можно определить измерением коэффициента отражения в месте контакта антенны с биологической средой?
2. Какова модель среды "кожа – жир – мышцы"?
3. Какими основными параметрами характеризуются слои "кожа – жир – мышцы" биологической ткани?
4. Можно ли определить толщину кожи и жира через коэффициент отражения на одной частоте зондирующего сигнала?
5. Опишите модель плоскостройной структуры биологической ткани, выраженной через комплексные входные и волновые сопротивления.
6. Из каких основных элементов состоит радиометрический измеритель модуля коэффициента отражения?
7. Какой тип сигналов и метод функционирования используется в радиометрическом измерителе модуля коэффициента отражения?
8. Опишите на примере временных диаграмм принцип функционирования радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения.
9. Приведите математическую модель передаточной характеристики измерителя и поясните, через какой параметр определяется модуль коэффициента отражения.
10. Перечислите достоинства радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения.
11. В чем суть алгоритма функционирования измерителя модуля коэффициента отражения по поддержанию нулевого баланса в измерительном тракте?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современной медицинской практике начинают широко использоваться новые физические принципы построения биомедицинской аппаратуры, связанные с изучением физических полей и излучений человека. Академиком Ю.В. Гуляевым и профессором Э.Э. Годиком сформулирована гипотеза о параметрической модуляции собственных физических полей человека биохимическими и биофизическими процессами организма. Учеными предложен новый радиофизический подход к изучению функционирования организма человека, основанный на комплексном измерении физических полей и излучений человека в процессе его жизнедеятельности, развиты радиоэлектронные методы неинвазивной ранней медицинской диагностики (медицины будущего).

Микроволновая радиометрия, основанная на измерении собственного излучения биологических тканей, как средство диагностики различных воспалительных и опухолевых процессов, заболеваний, приводящих к локальному повышению температуры в глубине тканей, стала применяться сравнительно недавно. Достоинства метода радиометрии по сравнению с известными: неинвазивность (дистанционность), бескровность; раннее определение температурной аномалии (позволяет начать лечение воспалительного процесса или опухоли как можно раньше); контроль за ходом лечения (абсолютная безвредность, возможность проведения многократных измерений); диспансеризация, как часть недорого обследования; контроль за воздействием лекарственных средств и физиотерапевтических процедур; уникальная способность обнаруживать быстрорастущие опухоли (известно, что удельное тепловыделение в опухоли прямо пропорционально скорости ее роста).

На сегодняшний момент к решению актуальных вопросов микроволновой радиометрии относится построение динамических распределений и получение объемного изображения тепловых полей внутри биологических объектов и на их поверхности, обнаружение слабых температурных аномалий с высоким пространственным разрешением по глубине биологического объекта. Это в первую очередь связано с повышением флуктуационной чувствительности приемных систем без существенного увеличения времени измерения.

В учебном пособии в лаконичной форме приведены основы теории и принципы работы приемных радиометрических систем одно- и многоприемникового типа (измерение одинаковыми приемниками сигнала в одной спектральной полосе, что приводит к росту чувствительности всей совокупной системы). Каждый приемный канал функционирует по модифицированному методу нулевого баланса, что повышает динамические характеристики радиоволновой системы при сохранении высокой стабильности измерений. Регистрация и анализ собственного теплового электромагнитного излучения позволяет получить информацию о глубинной температуре биологических сред и это облегчает раннюю диагностику при различных патологиях.

Для неинвазивного определения профиля температуры биологического объекта и обнаружения слабых температурных аномалий с высоким линейным пространственным разрешением по глубине биологического объекта в пособии описан запатентованный способ параметрического изменения флуктуационной чувствительности многоприемниковой радиометрической системы.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годик Э.Э., Гуляев Ю.В. Человек "глазами радиофизики" // Радиотехника. – 1991. - №8. – С. 51-62.
2. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Известия вузов. Радиофизика. – 1981. – Т.14, №9. – С. 1054-1061.
3. Рахлин В.Л. Метод регулируемого подшумливания для исключения ошибок радиотермометра, вызванных рассогласованием антенны с телом // Известия вузов. Радиофизика. – 1984. – Т.27, №9. – С. 1204-1206.
4. Троицкий В.С., Рахлин В.Л. Нулевой медицинский радиотермометр на волну 30 сантиметров (радиометр с автоматическим регулируемым подшумливанием антенны) // Известия вузов. Радиофизика. – 1987. – Т.30, №11. – С. 1397-1399.
5. Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2001. - №8. – С. 3-9.
6. Вайсблат А.В. Методы калибровки и поверки медицинских радиотермометров // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. - №1. – С. 49-54.
7. Поляков В.М., Шмаленюк А.С. СВЧ-термография и перспективы ее развития. Применение в медицине и народном хозяйстве // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1991. - вып. 8(1640).
8. Поляков В.М. Измерения абсолютных термодинамических температур биологических объектов радиофизическими методами // Радиотехника. – 1998. - №8. – С. 88-94.
9. Поляков В.М. Применение СВЧ-радиометрии в медицине и животноводстве // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1999. - №2. – С. 39-48.
10. Маречек С.В., Поляков В.М. Влияние структуры биоткани на результаты СВЧ-термометрических измерений // Успехи современной радиоэлектроники. – 2001. - №11. – С. 21-30.
11. Маречек С.В., Поляков В.М., Тищенко Ю.Г. Радиометрические методы исследования температурного режима приповерхностного слоя биоткани // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2003. - №8. – С. 57-64.
12. Маречек С.В., Поляков В.М. Возможности оценки приповерхностной структуры биологической ткани по измерению коэффициента отражения на отдельных частотах СВЧ-диапазона // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005. - №11-12. – С. 4-11.
13. Маречек С.В., Поляков В.М., Тищенко Ю.Г. Оценка толщины приповерхностных слоев биологической ткани по измерению комплексного коэффициента отражения на одной частоте СВЧ-диапазона // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. - №1. – С. 16-19.
14. Гайкович К.П., Сумин М.И., Троицкий Р.В. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотермографии в медицинских приложениях // Известия вузов. Радиофизика. – 1988. – т. 31, №9. – С. 1104-1112.
15. Веснин С.Г., Седакин М.К. Сравнение микроволновых антенн-аппликаторов медицинского назначения // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2012. –№10. – С. 63–74.
16. Патент № 2485462 РФ, МПК G01K 13/00, G01R 29/08. Радиометр для измерения глубинных температур объекта (радиотермометр) / Филатов А.В., Лощилов А.Г.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (RU). — № 2011132840/28; заявл. 04.08.2011; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
18. Asimakis N. P., Karanasiou I. S., Uzunoglu N. K. Non-invasive microwave radio7metric system for intracranial applications: a study using the conformal l-notch microstrip patch antenna. // Progress In Electromagnetic Research. – 2011. – Vol. 117. – P. 83–101.

18. O'Halloran M., Glavin M., Jones E. Rotating antenna microwave imaging system for breast cancer detection // *Progress In Electromagnetic Research*. –2010. – Vol.1– P. 203–217.
19. Патент №2439595 РФ, МПК G01R 29/08. Радиометрический измеритель коэффициента отражения / Филатов А.В.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (RU). — №2010132764/28; заявл. 04.08.2010; опубл. 06.09.2012, Бюл №1.
20. Филатов А.В. Микроволновые радиометрические системы нулевого метода измерений. - Томск: Томский гос. у-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. - 273 с.
21. Филатов А.В. Нулевой метод в радиометрических измерениях. - Томск: Томский гос. у-т систем упр. и радиоэлектроники, 2010. - 206 с.
22. Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. - Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 154 с.
23. Филатов А.В. Модель входного устройства радиометрического приемника для измерения профиля глубинных температур биологических сред методом неинвазивной радиотермометрии // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 21-27.
24. Филатов А.В., Белов Н.О., Тарасов С.Е., Филатов Н.А., Лощилов А.Г. Две модели измерителя модуля коэффициента отражения в широкой полосе частот методами микроволновой радиометрии // *Доклады ТУСУР*. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 50-54.
25. Пат. 2675670 РФ, МПК G01R 29/08. Радиометрический измеритель коэффициента отражения в широкой полосе частот / Филатов А.В., Филатов Н.А., Тарасов С.Е.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (RU). — № 2017140736; заявл. 22.11.2017; опубл. 21.12.2018, Бюл. № 36.
26. Filatov A.V., Utkin B.V., Tarasov S.E, Gazitov S.R., Anishin M.N. A Microwave Radiometer for Deep Noninvasive Diagnostics of Thermal Fields Inside a Biological Object // *Instruments and Experimental Techniques*, 2017. - Vol. 60, No. 3. - pp. 367–371.
27. Filatov A. V., Anishin M. N., Gazitov S. R., Tarasov S. E., Utkin B. V., Shibel'gut A. A. Upgraded Microwave Radio Thermometer Input Unit for Remote Temperature Measurement of a Biological Object // *Measurement Techniques*. - 2017. - Vol. 60, № 3. - PP. 283–290.
28. Filatov A.V. A New Principle for Construction of Microwave Multireceiver Radiometers Using a Modified Method of Zero Measurement // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 59, Issue 5. - pp 382–392.
29. Филатов А.В. Радиометрический измеритель модуля коэффициента отражения // *Приборы и техника эксперимента*.- 2016. - №1. - С. 97-101.
30. Дубров А.П., Кравченко Ю.П., Савельев А.В. Метод и аппаратура измерения и оценки электромагнитного поля биообъектов и их применение в медицинской технике // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2017. - №2. – С. 9-19.
31. Гуляев Ю.В. Приборы диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии // *Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век*. - 2017. – Т. 9, №2. – С. 27-45.
32. Под ред. Гудкова А.Г. Радиотермометрия. - 2020. - 320 с.