
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА БИОМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.317.07.089

МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИОМЕТРИЯ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ: СТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ, ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.

Яненко А.Ф., д.т.н., профессор

*Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина*

Введение

Развитие в последние 25-30 лет СВЧ-электроники и ее элементной базы стимулировало создание новых радиотехнических средств, в том числе и в области измерений слабых микроволновых сигналов с использованием радиометрических методов и структур. В свою очередь это способствовало более широкому использованию радиометрической аппаратуры в различных областях науки и техники – радиолокации и радионавигации, радиоастрономии и метеорологии, физике, биологии и медицине [1-4].

В последнее время получили также распространение новые технологии лечения с использованием низкоинтенсивных микроволновых сигналов: микроволновая резонансная терапия (МРТ), информационно-волновая терапия, миллиметровая терапия, объединенных общим названием “квантовая медицина” [5,6]. Термин “квантовая медицина” характеризует малую интенсивность применяемых сигналов (на уровне квантов энергии). В этих технологиях используются частоты мм-диапазона 37 – 78 ГГц и низкий уровень влияющих сигналов от 10^{-2} Вт/см² до 10^{-12} Вт/см². Такие малые уровни сигналов можно измерить с использованием специализированных высокочувствительных приемников, например, типа П15 либо с помощью нестандартной радиометрической аппаратуры, аттестованной установленным образом [6].

Перспективным представляется использование радиометрической аппаратуры для ранней диагностики заболеваний, связанных с наличием термонеоднородностей в организме человека, а также для исследования электромагнитных полей и излучений (ЭМИ) биообъектов и организма человека, характеризующих информационный обмен как внутри живого

Таким образом, развитие и углубление медико-биологических исследований и технологий требует создания высокочувствительной радиометрической аппаратуры с использованием новых достижений микроволновых технологий и элементной базы и изучения возможных направлений ее использования.

Основная часть.

Одной из задач решаемой радиометрической аппаратурой в технологиях квантовой медицины является метрологическое обеспечение.

В новых микроволновых технологиях используются сверхнизкие уровни излучения как монохроматических так и шумовых сигналов. Минимальные значения интегральной мощности монохроматических сигналов могут составлять 10^{-10} - 10^{-12} Вт (например, ARIA-SC, АМРТ-02), а спектральная плотность мощности шумовых сигналов 10^{-16} - 10^{-21} Вт/Гц (ПорогЗ, ПорогВТ, ПорогНТ Коверт-01). Для измерения таких уровней необходимо чтобы радиометрическая установка имела чувствительность как минимум на порядок выше, а точность измерения не хуже стандартной аппаратуры этого же диапазона на большие мощности, т.е. 10-15% . [6]

Проведение ранней диагностики и измерение термонеоднородностей внутри организма человека (на глубине 50-80 мм) возможно с помощью радиометра, работающего на низких частотах (0,9-1,5 ГГц), а чувствительность такой аппаратуры должна быть на уровне 10^{-15} - 10^{-16} Вт.

Исследование собственных электромагнитных полей и излучений и их взаимодействия с внешней средой также требует разработки радиометрической аппаратуры с чувствительностью порядка 10^{-14} - 10^{-16} Вт, в зависимости от диапазона рабочих частот.

С учетом вышеизложенного разработана классификация медико-биологических задач, решение которых возможно с применением микроволновой радиометрической аппаратуры (рис1).

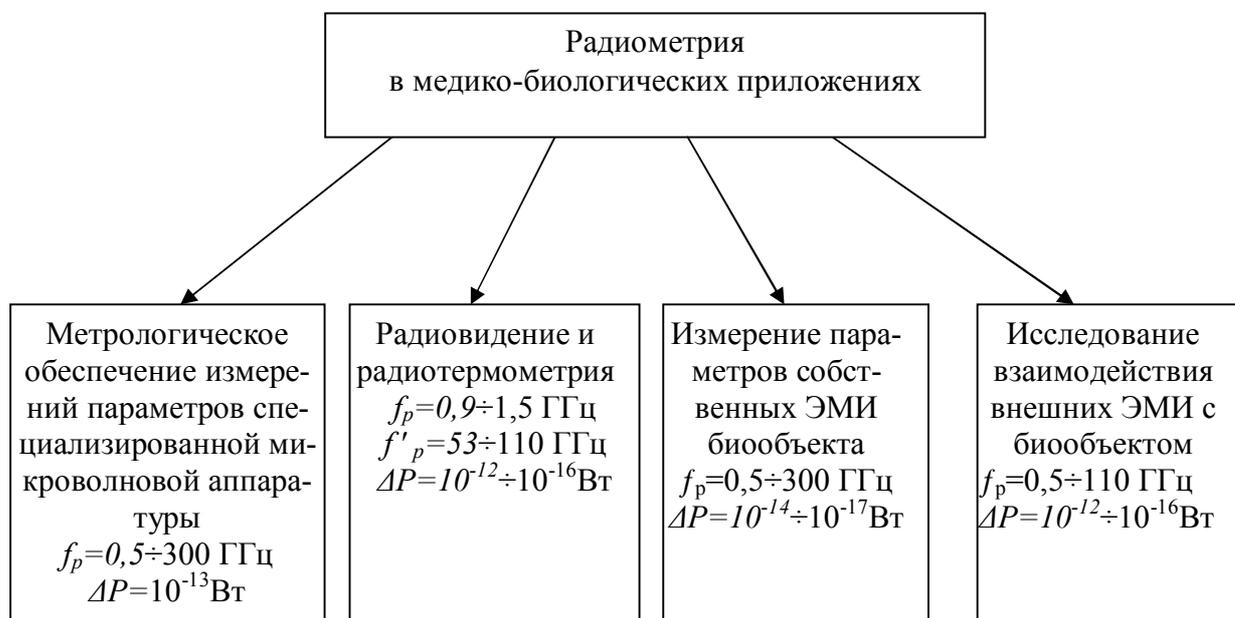


Рис.1 Классификация радиометрических задач в медико- биологических приложениях

Анализ данных рис 1 показывает, что в зависимости от решаемой задачи медико-биологических приложений диапазон рабочих частот радиометрической аппаратуры может составлять от единиц до сотен гигагерц, а

чувствительность от 10^{-13} до 10^{-17} Вт. Реализация структурных схем радиометрической аппаратуры такой чувствительности обычно осуществляется с использованием компенсационного, корреляционного или модуляционного метода преобразования входных сигналов.[7].

Из названных методов наиболее широко применяются модуляционные методы, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность и точность измерения, а также имеющие более простую и надежную схему реализации. В свою очередь структурная схема модуляционного радиометра может выполняться с прямым преобразованием входного сигнала, когда основное усиление производится на частоте входного сигнала и супергетеродинным преобразованием, в котором основное усиление достигается на промежуточной частоте.

На рис.2 представлена структурная схема радиометрической системы (РС) с гетеродинным преобразованием входной частоты.

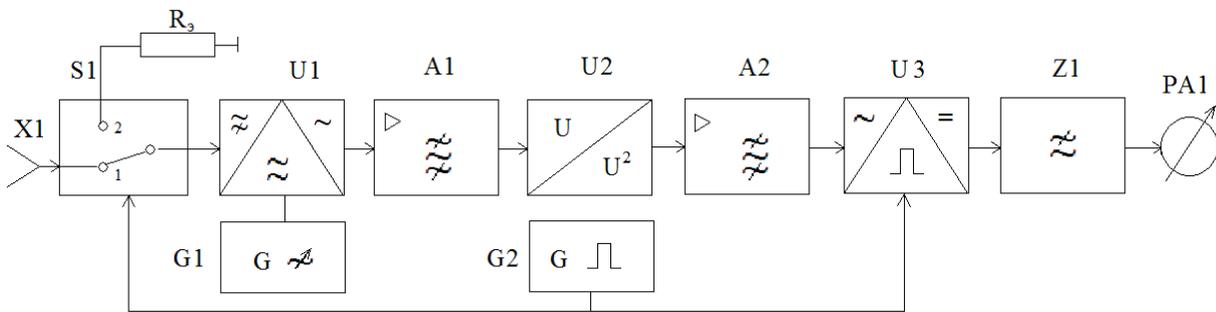


Рис.2 Структурная схема модуляционной РС .

Обозначения на рисунке: X1 –входная антенна, R_e -эквивалент антенны, S1-модулятор, U1- смеситель, G1- гетеродин, A1- усилитель промежуточной частоты, U2- квадратичный детектор, A2 – избирательный усилитель частоты коммутации, U3 –синхронный детектор, Z1 –фильтр нижних частот, PA1 – индикатор, G2 –генератор модулирующей частоты.

На выходе квадратичного детектора за период коммутации формируется сигнал[7]

$$U_k(t) = \alpha_k \frac{U_1 - U_2}{2} \text{sign} \sin \Omega t + 2U_w^2(t) \sum_{i=1}^n [[(\Omega \pm \Omega_i) t + \varphi_i]], \quad (1)$$

где α_k – коэффициент передачи канала РС до квадратичного детектора включительно, $U_1 - U_2 = \Delta U^2$ – разность напряжений за период коммутации, характеризующая мощность входного сигнала, $\text{sign} \sin \Omega t$ – коммутирующая функция, $2U_w^2(t) \sum_{i=1}^n [(\Omega \pm \Omega_i) t + \varphi_i]$ - суммарное напряжение составляющих термодинамического шума радиометрического канала (РК), от входной антенны до квадратичного детектора

Напряжение (1) через избирательный усилитель А2 поступает на синхронный детектор U3 и после соответствующего преобразования фильтром нижних частот Z1 выделяется выходное напряжение модуляционной РС

$$U_{pc} = \alpha_{pc} \frac{2}{\pi} \left[\frac{\Delta U^2}{\pi} + 2U_w^2(t) \sum_{i=1}^n [(\Omega - \Omega_i)t + \varphi_i] \right] \quad (2)$$

где - α_{pc} суммарной коэффициент преобразования канала РС.

Первое слагаемое уравнения (2) представляет собой постоянное напряжение, пропорциональное мощности входного измеряемого ла (ΔU^2), а второе – переменное напряжение шума, прошедшее через фильтрующие системы канала преобразования РС. Паразитные шумовые составляющие, присутствующие в уравнении (2) вызывают медленную флуктуацию указателя индикатора и ухудшают чувствительность РС.

Повышение чувствительности поэтому является актуальной задачей для РС медико-биологического применения и достигается несколькими путями.

Во-первых, уменьшение уровня термодинамических флуктуаций можно достичь за счет оптимальных конструкторских и технологических решений (экранирование, применение мал шумящих элементов и узлов и др.), а во-вторых за счет увеличения количества отсчетов и времени измерения, что естественно снижает быстродействие РС.

Уменьшение мощности термодинамических флуктуаций при этом можно рассчитать по формуле [8]

$$P_w = 4 k T \Delta f / n, \quad (3)$$

где n - количество отсчетов, k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ дж/К), T -температура окружающей среды, Δf - полоса пропускания канала РС до квадратичного детектора.

Количество отсчетов за время измерения t_0 можно записать как

$$n = t_0 / t_F, \quad (4)$$

где t_F - период выбранной частоты выходного шумового спектра.

С учетом (4) уравнение (3) принимает вид

$$P_w = 4 k T \Delta f t_F / t_0 \quad (5)$$

Используя уравнение (5) можно рассчитать мощность термодинамических флуктуаций для различных частот шумового спектра и таким образом определить возможности РС по чувствительности, быстродействию и применению ее для решения медико-биологических задач - метрологического обеспечения, термометрии, исследовательских целей.

Так, например, в модуляционной РС при частоте коммутации 1 кГц за 1 сек усредняется 10^3 отсчетов. Полоса пропускания радиометрического канала обычно выбирается в пределах от 10^6 до 10^8 Гц, Мощность термоди-

намических флуктуаций при температуре окружающей среды $T = 293$ К составит $P_w = 1,6 (10^{-17} - 10^{-15})$ Вт, что достаточно для использования подобной РС в биологии и медицине.

Снижение мощности термодинамических флуктуаций можно достичь также уменьшением полосы пропускания избирательного фильтра частоты коммутации в усилителе А2, выбирая его в пределах 10-100Гц. В тоже время, как показали экспериментальные исследования [9], при узкой полосе ($\Delta F \leq 20$ Гц) большое влияние на чувствительность оказывает температура, под действием которой меняются параметры фильтра и частота генератора коммутации.

Перспективным представляется использование для повышения чувствительности модуляционного радиометра структурно-алгоритмического метода, разработанного авторами [10]. Отличительной особенностью схемы радиометра, реализующего этот метод, является введение отрицательной обратной связи по напряжению частот шумового спектра, что обеспечивает их дополнительное подавление. На рис.3 показана часть схемы, обеспечивающая выделение шумовых составляющих и реализующая метод их подавления. Схема подключается между выходом квадратичного детектора U2 и входом избирательного усилителя частоты коммутации А2 (рис.2).

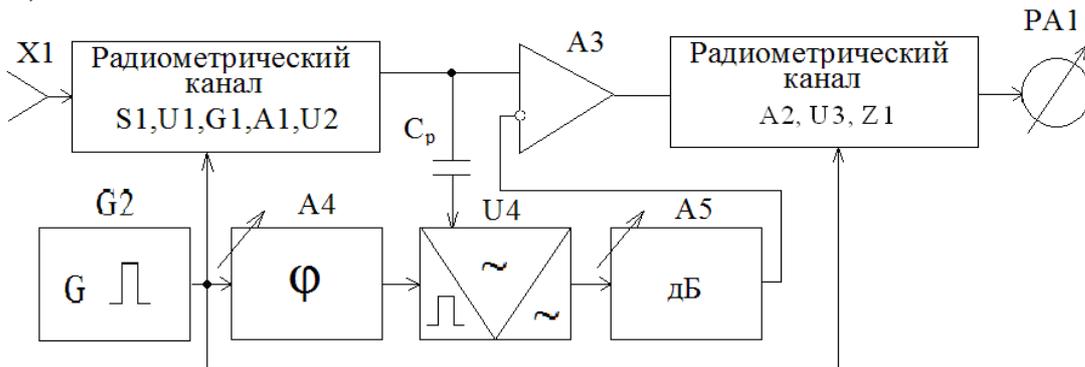


Рис.3 Схема снижения уровня шума модуляционного радиометра

Суть метода заключается в следующем. Напряжение (1) поступает на один из входов операционного усилителя А3. Переменная шумовая составляющая напряжения через конденсатор C_p подается также на один из входов перемножителя U4, на второй вход которого через фазовращатель А4 поступает напряжение от генератора коммутирующей частоты G2.

В результате перемножения на выходе U4 получаем напряжение удвоенной частоты коммутации, которая в дальнейшем задерживается избирательным фильтром, и напряжение шумовых составляющих

$$U_{pc}(t) = \alpha_{pc} \frac{\Delta U^2}{2} \text{sign} \sin 2\Omega t + 2U_w^2(t) \sum_{i=1}^n [[(\Omega \pm \Omega_i) t + \varphi_i]] \quad (6)$$

Напряжение (6) поступает на второй вход операционного усилителя А3, на выходе которого получаем разницу двух напряжений (1) и (6).

Соответствующим подбором фазовых соотношений фазовращателем А4 и амплитуды – аттенюатором А5 добиваются минимального показания индикатора при закрытой приемной антенне X1, что соответствует максимальному подавлению шумовых составляющих и соответственно повышению чувствительности РС. За данными источника [10] рассмотренная схема обеспечивает увеличение чувствительности до 10 раз.

Возможным вариантом повышения чувствительности модуляционной схемы РС может служить также метод автоматического углубления модуляции, за счет введения положительной обратной связи [11].

Достигается это дополнительным включением на входе стандартного радиометрического канала сумматора А1, генератора шума G1, аттенюатора А2 и цепи положительной обратной связи с делителем напряжения А3 (R1, R2) (рис. 4). На первый вход сумматора подключается приемная антенна X1, а на второй вход через аттенюатор А2 подсоединяется генератор шума. Выход РС через делитель напряжения А3 подключен к управляющему входу аттенюатора А2.

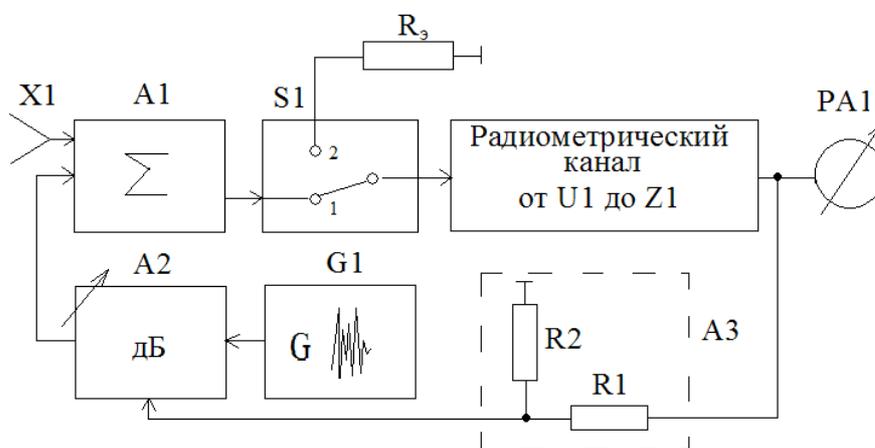


Рис.4 Схема увеличения чувствительности РС за счет введения ПОС

Постоянная составляющая выходного напряжения РС (1) поступает на аттенюатор А2, коэффициент передачи которого устанавливается пропорциональным величине этого напряжения

$$K_{A1} = U_{pc} \beta, \quad (7)$$

где β - коэффициент передачи делителя А3

С учетом изменений схемы постоянную составляющую напряжения (1) можно записать следующим образом

$$U_{pc} = \alpha_{pc} \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta U^2}{\pi} + K_{A1} U_{A1}^2 \right) \quad (8)$$

Подставляя значения (7) в уравнение (8) и проведя преобразования относительно выходного напряжения получим

$$U_{pc} = \frac{\alpha_{pc}}{1 - \alpha_{pc} \beta U_{A1}^2} \Delta U^2 \quad (9)$$

В случае отсутствия дополнительного сигнала от генератора G1 ($\beta = 0$) выходное напряжение РС имеет вид

$$U'_{pc} = \alpha_{pc} \Delta U^2$$

При поступлении входного сигнала ($\beta > 0$), открывается аттенюатор A2 и сигнал от шумового генератора G1 проходит на сумматор, что приводит к увеличению глубины модуляции (коммутатор S1 в положении 1), а это эквивалентно повышению чувствительности РС в число раз

$$\frac{U_{pc}}{U'_{pc}} = \frac{1}{1 - \alpha_{pc} \beta U_{A1}^2}, \quad (10)$$

где U_{A1}^2 - дисперсия шумового сигнала генератора G1

Практически повышение чувствительности такой схемы за данными источника [11] может составлять более 10 раз и ограничивается значениями при которых возникает возбуждение схемы.

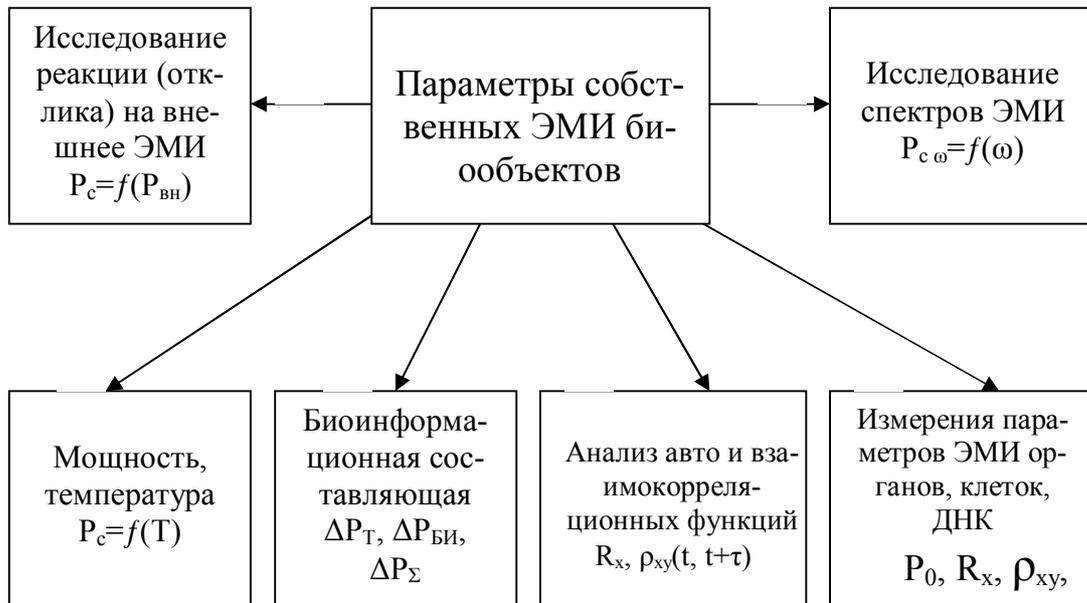


Рис.5 Классификация измерительных задач при исследовании собственного ЭМИ биообъекта.

Перспективным и многообещающим направлением использования радиометрической микроволновой аппаратуры является изучение параметров собственного электромагнитного излучения живых организмов.

На рис.5 приведена классификация возможных параметров собственного ЭМИ биообъекта, измерение которых можно проводить с применением радиометрической аппаратуры.

Рассмотренные выше варианты схем могут быть использованы для измерения мощности ЭМИ от целостного организма, определения темпера-

турних аномалій і їх местоположення. Для изучения структуры микроволнового ЭМИ, например, выделения биоинформационной составляющей можно воспользоваться схемами РС, приведенными в [12,13]. Отличительной особенностью автоматической РС [13], является использование дифференциального метода измерения в сочетании с применением двух антенн-сенсоров, обеспечивающих выделение биоинформационной компоненты.

Выходное напряжение биоинформационной компоненты в автоматической РС можно записать в виде

$$U_{pc} = \alpha_{pc} (I_1 - I_2) , \quad (11)$$

где I_1 - суммарная интенсивность ЭМИ, I_2 - интенсивность теплового излучения, α_{pc} - суммарный коэффициент преобразования измерительного канала РС.

Для уверенной регистрации сигналов чувствительность таких схем, работающих на разности сигналов, должна быть на уровне 10^{-15} - 10^{-16} Вт.

Другим направлением использования радиометрической аппаратуры при изучении параметров собственного ЭМИ биообъектов является измерение корреляционных характеристик излучения.

Радиотепловое излучение, которое формируется равновесными процессами имеет шумовой характер, а его интенсивность пропорциональна температуре объекта T . Биоинформационное (нетепловое) излучение на клеточном уровне, которое определяется неравновесными процессами и обеспечивает синхронизацию в организме является детерминированным. Из-за малых размеров клеток плотность энергии ЭМИ уже на малом расстоянии от биообъекта снижается во много раз, к тому же это снижение сопровождается стохастизацией излучения. Суммарное излучение живого организма можно представить в виде суперпозиции детерминированного и шумового сигнала

$$U_{\Sigma}(t) = U_{\omega}(t) + U_T(t) \quad (12)$$

Регистрация слабого детерминированного сигнала $U_{\omega}(t)$ на фоне сильного шумового сигнала $U_T(t)$ является трудной технической задачей, решение которой возможно только с использованием специализированной высокочувствительной РС, измеряющую автокорреляционную функцию.

Радиометрическая система [14], наряду с измерением плотности мощности ЭМИ биообъекта позволяет регистрировать автокорреляционную функцию сигнала. Выходное напряжение РС, в этом случае имеет вид

$$U_{pc} = \frac{\alpha_{pc} [1 - R_x(\tau)]}{R_x(\tau = 0)} \Delta U^2 , \quad (13)$$

где $R_x(\tau)$ - нормированная функция корреляции сигнала антенны при раз-

ных значениях задержки τ .

Регистрация автокорреляционной функции открывает возможность выявления детерминированных процессов, которые могут маскироваться шумом и тем самым идентифицировать источник биоинформационного излучения живого организма.

Важным параметром может быть взаимокорреляционная характеристика двух сигналов, обеспечивающая регистрацию распространения (нахождения) детерминированного сигнала на тех или иных участках биообъекта.

Двухвходовая одноканальная дифференциально-корреляционная РС приведенная в [15], позволяет проводить такие измерения. Выходное напряжения этой РС содержит информацию о коэффициенте корреляции

$$U_{PC} = \alpha_{PC} \rho \bar{U}_1^2 \bar{U}_2^2, \quad (14)$$

где ρ - коэффициент взаимной корреляции биоинформационных сигналов,

\bar{U}_1^2, \bar{U}_2^2 - дисперсии некоррелированных радиотепловых сигналов входных антенн РС. Измерение взаимокорреляционной функции позволяет исследовать градиенты температурных полей при наличии выделенных источников в организме биообъекта (локальных термонеоднородностей). Чувствительность подобных РС должна быть на уровне $10^{-16} - 10^{-17}$ Вт.

На характер частотных зависимостей ЭМИ большое влияние оказывают температурные аномалии в живом организме, возникающие вследствие опухолей, травм, воспалений и др. Размещение источников термонеоднородностей при этом может быть на разной глубине тела. Длина волны излучения изменяется в зависимости от глубины его возникновения. Поэтому регистрация частотных зависимостей интенсивности ЭМИ позволяет выявлять и локализовать источники термонеоднородностей в теле человека.

Структурная схема такого спектроанализатора приведенная в [16] позволяет проводить подобные измерения. На выходе РС при автоматической перестройке частоты гетеродина регистрируется постоянное напряжение следующего вида

$$U_{PC} = \alpha_{PC} \frac{\Delta \bar{U}_i^2(\omega_i)}{\bar{U}_0^2(\omega_0)} U_0, \quad (15)$$

где $\Delta \bar{U}_i^2(\omega_i)$ - изменение дисперсии сигнала на частотах анализа по отношению к начальной частоте, $\bar{U}_0^2(\omega_0)$ - дисперсия сигнала на начальной частоте, U_0 - постоянное напряжение эталонного источника.

Форма кривой в координатах частота-напряжение $U = f(\omega)$ обеспечивает информацию о характере термонеоднородности и градиенте температур внутри объекта. Интенсивность на частотной координате позволяет определить глубину источника радиотеплового излучения.

Выводы.

1 Живые организмы характеризуются большим набором параметров собственного микроволнового ЭМИ, измерение и изучение которых способствует не только углублению знаний о живых объектах, а и разработке новых методов диагностики и лечения.

2 Радиометрические методы и средства имеют большие потенциальные возможности для решения прикладных и исследовательских задач в биологии и медицине - метрологическое обеспечение специализированной аппаратуры, проведение диагностики состояния живого организма, исследование параметров собственных микроволновых ЭМИ и их взаимосвязи с окружающей средой.

3.Использование радиометрии в медико-биологических приложениях связано с необходимостью обеспечения флуктуационной чувствительности на уровне 10^{-15} - 10^{-17} Вт, что является сложной технической задачей, требующей для своего решения создания новых вариантов высокочувствительной радиометрической аппаратуры.

4. Предложенные технические решения, наряду с обеспечением требуемой чувствительности расширяют функциональные возможности радиометрической аппаратуры, применительно к объектам живой природы и организму человека.

Литература

- 1.Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.В. Радиотелескопы и радиометры-М.: Изд. Наука-1972-416 с.
- 2.Николаев А.Г., Перцов Б.М. Радиотеплокация-М.:Изд.Сов.радио-1964-335 с.
- 3.Башаринов А.Е., Тучков Л.Г., Поляков В.М., Ананов Н.И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений – М. : Изд.Сов.радио-1968-390 с.
- 4.Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф. и др. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов – Житомир. : Изд.Вольный-2003-406с.
- 5.СитькоС.П., Мкртчян Л.Н. Введение в квантовую медицину- К. : Паттерн -1994-146 с.
- 6.Скрипник Ю.А., Манойлов В.Ф., Яненко А.Ф. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ діапазону –Навчальний посібник –ЖІТІ. : 2001-373 с.
- 8.Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств-Л-д. : Энергия -1968-248 с.
9. Яненко А.Ф., Красюк А.Д., Колисниченко М.В. и др.Особенности выделения частоты коммутации в измерительном канале модуляционного радиометра // Материалы 19-ой Междун. н/т конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” Севастополь. : Том 2 - 2009-с.773-774.
- 10.Пат. №57820, Україна Модуляційний радіометр/ Скрипник Ю.О.,Яненко О.П., Колисниченко М.В.- Бюл.№7-2003.

11. Пат.№27625, Україна. Модуляційний радіометр / Скрипник Ю.О., Яненко О.П., Перегудов С.М.-Бюл.№4 – 2000.

12. Пат. №56208, Україна. Спосіб вимірювання біоінформаційної складової ЕМВ та пристрій для його знаходження / Сітько С.П., Скрипник Ю.О., Яненко О.П.– Бюл.№5-2003

13. Патент №73326, Україна Пристрій для вимірювання нерівноважної складової електромагнітного випромінювання живих організмів / Сітько С.П., Скрипник Ю.О., Яненко О.П., Мацibuра А.П. Бюл.№7-2005

14. Пат. №27641, Україна. Одноканальний радіометр / Скрипник Ю.О., Яненко О.П. – Бюл. №4- 2000.

15. Пат. №51722, Україна. Спосіб визначення енергетичних меридіанів в біологічних об'єктах / Скрипник Ю.О., Яненко О.П. –Бюл.№12 – 2002.

16. Пат. №47460, Україна. Пристрій для реєстрації спектра ЕМВ біологічних об'єктів / Головка Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П., Маковська В.Ю.-Бюл.№7-2002

Яненко О.П. Мікрохвильова радіометрія в біології та медицині: структурні рішення, можливості та перспективи використання. Розглянуті оригінальні технічні рішення радіометричної апаратури, з можливістю їх , а також можливі конкретні варіанти їх використання.

Ключові слова: мікрохвильова радіометрія, біомедичні застосування

Яненко А.Ф. Микроволновая радиометрия в биологии и медицине: структурные решения, возможности и перспективы использования. Рассмотрены оригинальные технические решения радиометрической аппаратуры применительно к биомедицинским приложениям, а также возможные варианты ее использования.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, биомедицинские применения

Yanenko A.F. Microwave radiometry in biology and medicine: the structural solutions opportunities and prospects. Consider the original technical solutions radiometric instrumentation for biomedical applications, as well as options for its use.

Keywords: microwave radiometry in biology, biomedical applications