

М. В. КОЛИСНИЧЕНКО, В. П. КУЦЕНКО, д. т. н. Ю. А. СКРИПНИК,
д. т. н. А. Ф. ЯНЕНКО

Украина, г. Киев, ДП «Сонар», Нац. университет технологий и дизайна,
НИЦ квантовой медицины «Видгук»; г. Донецк, Ассоциация «ТЕМП»
E-mail: chmil@adamant.net

Дата поступления в редакцию
21.04 — 17.07 2003 г.

Оппонент к. т. н. В. А. БИДЕНКО
(НТУУ «КПИ», г. Киев)

РАДИОМЕТРИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА: МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Рассмотрены возможности использования СВЧ-радиометрии для регистрации и измерения электромагнитных полей и излучений биообъектов и человека.

Высококочувствительные радиометрические системы (РС) и радиометры радиоволнового диапазона нашли широкое использование в радиоастрономии, физике, метеорологии и других областях науки и техники для измерения слабых электромагнитных излучений, интенсивность которых может быть меньше или сопоставима с интенсивностью собственных шумов этих систем. В меньшей мере РС используются в биологических и медицинских целях — в связи со значительной сложностью и стоимостью таких устройств.

Первые попытки применения в СССР высококочувствительных радиоволновых радиометров СВЧ-диапазона в медицинских исследованиях относятся к случаям измерения температуры внутренних органов человека по интенсивности электромагнитного излучения [1, 2]. Подобные измерения абсолютной температуры позволяют определять и регистрировать температурные аномалии и неоднородности, например, в онкологии (опухоли), эндокринологии (щитовидная и поджелудочная железы), энтерологии (желудочно-кишечный тракт), пульмонологии (бронхо-легочный тракт) [1—3]. С помощью дифференциальных радиометров можно проводить сравнительные измерения температуры парных органов человека — почек, грудей, легких [4].

Еще один из вариантов использования высококочувствительного СВЧ-радиометра в медицине приведен в [5]. Он базируется на измерении отклика в дециметровом диапазоне соответствующей зоны (органа) человеческого тела (например, щитовидной железы) на облучающий сигнал мм-диапазона. (Метод КВЧ—СВЧ-спектроскопии позволяет фиксировать отклонение спектральной характеристики исследуемого органа и в процессе лечения контролировать обновление функции органа по интенсивности и форме отклика, что регистрируется СВЧ-радиометром при облучении биообъекта низкоинтенсивным ($<10 \text{ мкВт/см}^2$) сигналом мм-диапазона на частотах 50—53 ГГц.)

Разработка радиометрической аппаратуры для медицинских измерений связана с решением таких сложных вопросов как обеспечение высокой чув-

ствительности устройств, согласование входной антенны с биообъектом, обеспечение необходимой глубины проникновения и измерения абсолютных значений температур с погрешностью не хуже $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Обычно процесс измерения температурных аномалий биообъектов проводится в контакте с источником излучения, а приемные антенны размещаются непосредственно на объекте исследования и согласовываются с его поверхностью. Использование РС в контакте с объектом измерения позволяет рассматривать этот случай как широко известный переход электромагнитного поля из одной среды в другую с разной диэлектрической проницаемостью, которая требует соответственного согласования.

Обеспечение согласования антенны с биообъектом достигается за счет выбора соответствующей конструкции и материала антенны. Антенны полоскового типа с диэлектрической проницаемостью, близкой к диэлектрической проницаемости кожи человека, позволяют выполнять контактные измерения температуры с достаточно высокой точностью и разрешающей способностью на частотах более 400—500 МГц [6]. На частоте 1 ГГц [5] используют антенны (аппликаторы) контактного типа — двухпетельные и трехпетельные на подкладках из СВЧ-диэлектриков (керамики, синтетических композитов, тефлона), в диапазоне СВЧ — антенны рупорного типа и микрополосковые.

Перспективным представляется использование в СВЧ-диапазоне диэлектрической линзовой антенны контактного типа, фокус которой соответствует исследуемому участку (или органу) в глубине тела человека [3]. На частоте $f \approx 1,6 \text{ ГГц}$ ширина дифракционной точки составляла примерно 14 мм, а глубина проницаемости — 60 мм. В качестве диэлектрика авторами выбиралась вода, которая по диэлектрической проницаемости близка к проницаемости внутренних органов человека.

Глубина сканирования источников температурных неоднородностей определяется рабочей частотой радиометра и для внутренних органов человека находится в пределах диапазона ультравысоких (0,3—3 ГГц) и крайневых (3—30 ГГц) частот. Анализ физиологического состояния человека определяется в диапазоне сверхвысоких частот. По данным [2], проницаемость радиоволн в мягкие ткани биообъектов на частотах УВЧ- и СВЧ-диапазонов находится в пределах 38,9—16,1 мм. Большинство радиометров работа-

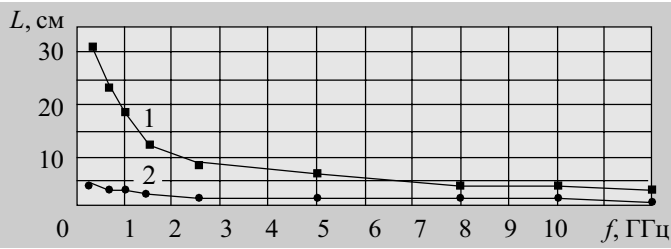


Рис. 1. График распределения глубины проникновения СВЧ-сигнала:

1 — ткани с низким содержанием воды; 2 — с высоким содержанием воды

ют в диапазоне 1—3 ГГц, где проникаемость в мягкие ткани ограничивается глубиной 30—16 мм (рис. 1).

Важной характеристикой радиометров подобного типа является флуктуационная чувствительность к температуре объекта или к интенсивности его излучения, поскольку при температуре 27°C (300 К) даже абсолютно черное тело формирует слабый сигнал, спектральная плотность которого составляет только $1,07 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц·см². В то же время уровень излучения кожи человека, учитывая коэффициент серости (коэффициент излучательной способности), значительно меньший — $\sim 1 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц·см² [4, 7].

Проведение измерений электромагнитных полей и излучений на ультравысоких и сверхвысоких частотах требует создания устройств и систем, чувствительность которых должна достигать, например, при выполнении КВЧ—СВЧ-спектроскопии [5] на частоте 1 ГГц $P_{\min} = 1 \cdot 10^{-13} \dots 1 \cdot 10^{-16}$ Вт/см². Подобная чувствительность позволяет уверенно фиксировать электромагнитное излучение от биообъектов и создает возможность использовать измерительную радиометрическую аппаратуру для диагностики состояния исследуемого биообъекта (организма человека).

Известно, что радиометры выполняются по схеме прямого усиления и по схеме с преобразованием частоты СВЧ-сигнала (супергетеродинный приемник). По способу действия радиометры делятся на корреляционные, компенсационные и модуляционные.

Простейшими и наиболее распространенными являются компенсационные радиометры, которые содержат типовый тракт: усилитель — квадратичный детектор — фильтр — развязывающее устройство. Причем в последнем проводят компенсационное вычитание постоянной составляющей, обусловленной внутренними шумами. В то же время реально наиболее чувствительными являются модуляционные радиометры, которые позволяют реализовать высокую точность и разрешающую способность и возможность наблюдения слабого радиотеплового излучения объектов.

Нами была реализована схема модуляционного радиометра с преобразованием входного СВЧ-сигнала.

Электромагнитные излучения биообъектов принимаются антенной и подаются на модулятор входных сигналов. Схема радиометра обеспечивает высокую чувствительность за счет использования на входе маломощного СВЧ-усилителя, коэффициент шума которого на частотах 0,3—3,0 ГГц составляет приблизительно 0,5 дБ (≤ 40 К). Выходной сигнал усилителя подается на балансный смеситель, после чего усиливается усилителем промежуточной частоты и поступает на квадратичный детектор.

Напряжение на выходе квадратичного детектора содержит составляющую, которая изменяется с частотой модуляции, и шумовую компоненту. Периодическая составляющая отфильтровывается и усиливается узкополосным усилителем, настроенным на частоту модуляции. С помощью синхронного детектора (СД) проводится демодуляция. К основным преимуществам СД относятся малые нелинейные искажения сигнала и отсутствие угнетения слабого сигнала сильной помехой благодаря работе детектора при достаточно большом напряжении опорного гетеродина частоты коммутации.

Опорное напряжение генератора частоты коммутации, которое подается на СД, соответствует выделенной частоте сигнала. Максимум полезного сигнала на выходе СД будет при $\Omega_c = \Omega_r$ и совпадении фазовых соотношений. Поэтому в схему радиометра включен фазовращатель. Синхронное детектирование с помощью СД и усреднение фильтром нижних частот снижает флуктуационный порог и повышает разрешающую способность.

В результате перемножения сигнала на опорное напряжение генератора на выходе синхронного детектора формируется напряжение [4, с. 172]

$$\begin{aligned}
 u_{U2}(t) &= u_{A2}(t)u_2(t) = \\
 &= a \left[\frac{U_0^2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} + \Delta u_w^2(t) \right] \frac{4U_2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} = \\
 &= \frac{2aKU_2U_0^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} - \frac{2aKU_2U^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)2\Omega t}{2n-1} + \\
 &+ \frac{4U_2}{\pi} Ka\Delta u_w^2(t) \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Фильтром нижних частот выделяется постоянная составляющая сигнала (1) и медленно флуктуирующие напряжения низкочастотных шумов, которые приближены к частоте коммутации и проходят через полосовой фильтр усилителя, что ограничивает чувствительность радиометрического устройства.

$$u_{z1} = \frac{2aKU_2U_0^2}{\pi^2} + 2Ka \frac{U_2}{\pi} \Delta U_w^2(f) \sum_1^i (\Omega - \Omega_i). \quad (2)$$

Как видно из (1), в результате прохождения через полосовой фильтр усилителя шумов, приближенных к частоте коммутации, на выходе синхронного детектора формируется напряжение как низкочастотных (первый член уравнения), так и высокочастотных (второй и третий члены уравнения) составляющих. Высокочастотные составляющие уравнения (1) обычно задерживаются выходным фильтром измерителя. Напряжения первой составляющей (2), особенно от частот, приближенных к нулевой, свободно проходят на индикатор, создавая медленную флуктуацию показателя индикатора, что является одним из основных недостатков модуляционных радиометрических приемников как прямого усиления, так и с преобразованием входной частоты.

Уменьшить воздействие шумов, частота которых приближена к частоте модуляции, можно за счет вве-

дения отрицательных обратных связей (например, рассмотренным в [8] образом), соответствующим противофазным суммированием составляющих до процедуры синхронного детектирования, предложенным в [4, 9], а также сужением полосы пропускания фильтра коммутации. Использование положительной обратной связи в сочетании с методами снижения флуктуационного порога позволяет в 10—50 раз повысить чувствительность схем радиометров.

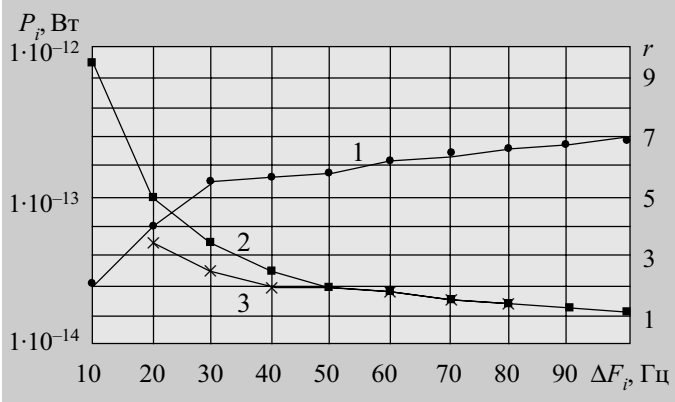


Рис. 2. Распределение интенсивности термодинамических флуктуаций в некоторых точках радиометрического канала:

зависимость интенсивности тепловых шумов $P_f(I)$ и флуктуационного выигрыша r от полосы фильтра частоты коммутации ΔF_f (2 — расчетный, 3 — экспериментальный)

На рис. 2 приведена зависимость распределения интенсивности тепловых шумов (I) при различной полосе пропускания фильтра частоты коммутации, а также флуктуационный выигрыш (2 — расчетный, 3 — экспериментальный), который реально может составлять 4—5 раз.

Широкий выбор элементной базы, наличие стандартных СВЧ-узлов позволяют создать высокочувствительные портативные малогабаритные радиометры, пригодные для использования в медицине. Несмотря на отмеченные недостатки модуляционных радиометрических приемников, они обеспечивают возможность измерения сигналов, интенсивность которых сопоставима или меньше интенсивности собственных шумов измерительной аппаратуры. Практически достигнутая чувствительность СВЧ-радиометров 10^{-14} — 10^{-15} Вт достаточна для измерения и регистрации электромагнитных полей и излучений биологических объектов и человека, что открывает возможность широкого их использования в биологии и медицине.

Резюмируя возможности и перспективы использования СВЧ-радиометрии в медицине и научных исследованиях, необходимо отметить, что радиометрическая аппаратура СВЧ- и КВЧ-диапазонов позволяет:

- определять источники термонеоднородностей в организме биообъекта;
- проводить регистрацию значения этой температуры, измеряя как интегральную, так и спектральную характеристику излучения;
- проводить регистрацию воздействия физических и химических факторов на температурные поля внутренних органов биообъекта;
- регистрировать пространственно-частотные характеристики электромагнитных сигналов биообъектов и устанавливать связь между параметрами этих характеристик и физиологическими параметрами биообъекта;
- корректировать процесс лечения по изменению параметров электромагнитного поля биообъекта.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Троицкий В. С., Густов А. В., Белов И. Ф. и др. О возможности использования собственного теплового СВЧ радиоизлучения для измерения температуры его внутренних органов: результаты и перспективы // УФН.— 1981.— Т. 134, вып. 1.— С. 155—158.
2. Штейншлейгер В. Б., Мисежников Г. С., Сельский А. Г. Об одном радиофизическом методе обнаружения температурных аномалий внутренних органов человека // УФН.— 1981.— Т. 134, вып. 1.— С. 163 — 164.
3. Хитров Ю. А., Шестиперов В. А. СВЧ в медицине // Обзор по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.— 1983.— С. 40—43.
4. Скрипник Ю. О., Манойлов В. П., Яненко О. П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону.— Житомир: ЖІТІ, 2001.
5. Петросян В. Н., Синицин Н. И., Елкин В. А. и др. Роль резонансных молекулярно-волновых процессов в природе и их использование для контроля и коррекции состояния экологических систем // Биомедицинская радиоэлектроника.— 2001.— № 5—6.— С. 62—129.
6. Березовский В. А., Колотилов Н. Н. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник.— К.: Наукова думка, 1990.
7. Ситько С. П., Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины.— К.: ФАДА, ЛТД, 1999.
8. Пат. 57820 Украины, G01R 29/26. Модуляційний радіометр / Ю. О. Скрипник, М. В. Колісниченко, О. П. Яненко.— Оpubл. в Бюл.— 2003, № 7.
9. Пат. 27625 Украины, G01R 29/26. Модуляційний радіометр / Ю. О. Скрипник., О. П. Яненко, С. М. Перегудов.— Оpubл. в Бюл.— 2000, № 4.