

УДК 615.47:621.37/39

## ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КРАЙНЕ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ

Муравьев В.В.<sup>1</sup>, Тамело А.А.<sup>1</sup>, Путырский Ю.Л.<sup>2</sup>, Шаповал Е.В.<sup>2</sup>, Лецик А.А.<sup>2</sup>,  
Матвеев Д.И.<sup>1</sup>, Молодкин Д.Ф.<sup>1</sup>, Попов А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: [tamelo@bsuir.by](mailto:tamelo@bsuir.by)

*Разработана и исследована радиометрическая система диапазона крайне высоких частот для диагностики образцов тканей, пораженных карциномой. Ее возможности существенно превосходят возможности идентификации в диапазонах более низких частот, так как в диапазонах дециметровых волн и сверхвысоких частот разрешение 1–3 мм невозможно. Установлено, что пораженные карциномой образцы тканей имеют на 3 дБ меньший коэффициент прохождения по сравнению с непораженными тканями. Анализ приведенных зависимостей гармонических составляющих модуляционного сигнала, прошедшего через образцы исследуемых тканей, показывает резкое отличие поведения гармонических составляющих в частотной области. Данное явление наблюдается для измененной ткани – наличие резких спадов, что обусловлено взаимодействием электромагнитных колебаний с образцами тканей и может быть объяснено так называемым эффектом стохастического резонанса.*

**Ключевые слова:** радиометрическая система, радиотермометрия, крайне высокие частоты, карцинома.

### Введение

Залогом успешного лечения рака молочной железы является диагностика опухоли на так называемом «доклиническом» этапе, т.е. когда ее невозможно определить при пальпаторном исследовании. Основным скрининговым методом является маммография – рентгенологическое исследование молочных желез. Однако данная методика связана с лучевой нагрузкой и обладает низкой информативностью у женщин молодого возраста. В последние годы у женщин моложе 35 лет в качестве скринингового обследования используется ультразвуковое исследование молочных желез, обладающее высокой информативностью и точностью. Однако трактовка полученных результатов часто носит субъективный характер.

Одним из наиболее точных методов диагностики заболеваний молочных желез на сегодняшний день является МРТ – магнитно-резонансная томография, но сложность и высокая стоимость

исследования делают невозможным его частое использование с целью выявления новообразований.

С середины 1990-х годов стал использоваться метод радиотермометрии, основанный на измерении интенсивности электромагнитного излучения внутренних тканей. Исследования, направленные на определение эффективности радиотермометрии для выявления ранних заболеваний раком, проводились в диапазоне сантиметровых волн (СВЧ-диапазон). Применение же более коротковолновых электромагнитных волн миллиметрового диапазона (диапазон КВЧ – крайне высокие частоты, которые классифицируются с частоты выше 30 ГГц) позволяет получить высокое разрешение пораженных областей тканей (1–3 мм), что невозможно для СВЧ диагностики [1]. Данное обстоятельство послужило причиной для более подробного изучения возможностей радиотермометрии в скрининге непальпируемых новообразований молочных желез.

## Экспериментальные исследования в КВЧ диапазоне

Непосредственное использование КВЧ-излучения биообъектов в качестве диагностического средства оказалось весьма сложной для ее практической реализации.

Основная трудность связана с исключительно малой мощностью электромагнитных полей и сложностью эффективного их приема с помощью приемников излучения, традиционно используемых в радиофизике и технических приложениях [2]. Лишь применение новейших разработок в этой области, оригинальных аппаратно-программных и алгоритмических решений позволило принципиальным образом повысить уровень диагностических возможностей рассматриваемого подхода и создать комплекс для обнаружения злокачественных новообразований молочных желез. Микроволновая диагностика раковой опухоли молочной железы имеет потенциал к развитию согласно двум факторам: чувствительности и специфичности.

Преимуществом исследуемого метода диагностики является возможность обнаружения и идентификации маленьких опухолей (1–3 мм) за счет контрастности свойств, относительно небольшая стоимость (в отличие от маммографического и МРТ исследования), достаточно быстрые получение изображения и обработка результатов. Для реализации этих факторов необходимо использовать модуляционное приемное устройство миллиметрового диапазона, позволяющее обнаруживать сверхслабые электромагнитные поля биологических объектов [3].

Особенностью биологических тканей является их высокая диэлектрическая проницаемость – от 8 до 70; большая часть из них имеет большое влагонасыщение, что приводит к замедлению распространения электромагнитной волны в диэлектрике в 3–8 раз и наличию больших потерь. Большие потери в среде распространения существенно снижают глубину проникновения, однако в данном случае, как показывают исследования, качество контроля слабо зависит от эффективной площади рассеяния излучения, а укорочение длины волны по сравнению со свободным пространством позволяет обнаруживать неоднородности значительно меньших размеров, чем это имеет место, например, в воздухе [4].

В сравнении, например, с широкодоступным ультразвуковым исследованием, природа отражения электромагнитной и ультразвуковой волн различна. Ультразвуковая волна отражается от «скачка» плотностей ткани, электромагнитная – от «скачка» диэлектрической проницаемости. Так как диэлектрическая проницаемость сильно коррелирована с процентным содержанием воды, небольшое увеличение процентного содержания воды может увеличить проницаемость тканей без заметного увеличения плотности пораженной ткани (диэлектрическая проницаемость воды 81, а плотность воды 1). В соответствии с этим можно предположить, что градиент величины диэлектрической проницаемости у нормальной и пораженной тканей возрастает быстрее, чем величина градиентов их плотностей, что позволит провести диагностику тканей в КВЧ-диапазоне. Данное предположение требует экспериментальной проверки. Кроме того, существует возможность различения ткани с различной проводимостью. Такая возможность отсутствует в случае использования ультразвукового исследования [5].

## Реализация прибора для дистанционного обнаружения патологических образований в молочных железах

Нами изучены практические возможности создания прибора для дистанционного обнаружения патологических образований в молочных железах. При дистанционном зондировании в КВЧ-диапазоне предполагается извлечение информации об объекте, находящемся в непосредственной близости от измерительного устройства, но остающемся недоступным для визуальных или контактных методов контроля. К числу таких задач относятся бесконтактные измерения электромагнитного поля биологических объектов.

Схема установки для исследования приведена на рисунке 1. Радиометрическая система для обнаружения злокачественных новообразований состоит из генератора, приемного устройства, безэховой камеры, преобразователя кодов, контейнера для исследуемой ткани, персонального компьютера. Радиометрический прибор содержит: входной сверхмалозумящий каскад усиления, детекторный каскад на полевом транзисторе, широкополосный усилитель низкой частоты. Сверхмалозумящий приемный каскад

в диапазоне частот от 27 до 33 ГГц имеет шумовую температуру 190 К.

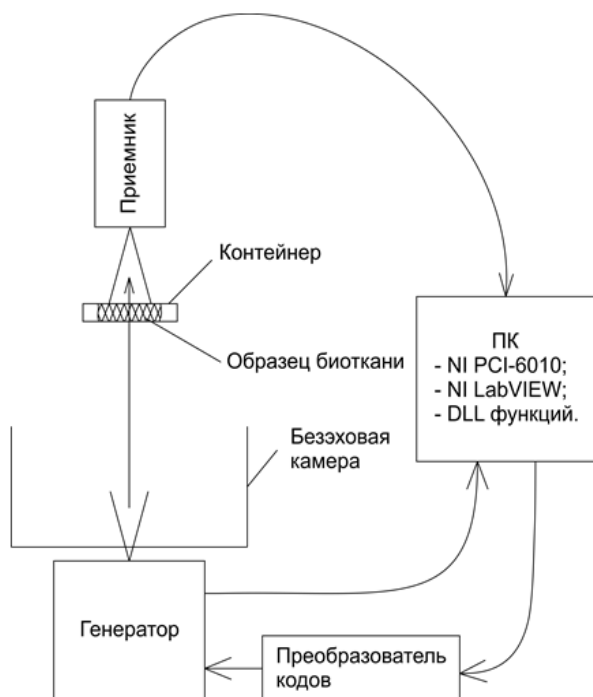


Рисунок 1 – Схема установки для дистанционного обнаружения патологических образований в молочных железах

Одним из основных требований к системам зондирования в этом случае является высокое пространственное разрешение, определяемое параметрами используемой антенны. Для достижения требуемого значения пространственного разрешения при зондировании целесообразно использовать миллиметровый диапазон длин волн и квазиоптические антенны, сфокусированные на исследуемую ткань.

### Результаты исследований злокачественных новообразований с помощью радиометрической системы КВЧ диапазона

Радиоизлучение исследуемой области с помощью приемного измерительного устройства модуляционного типа визуализировалось на мониторе компьютера для определения патологии образцов.

Управляющая программа, разработанная в среде *NI LabVIEW* с использованием *DLL* функций, выдает управляющий сигнал ВЧ генератора [6]. Управляющее слово несет информацию о частоте, мощности и режиме модуляции. Управ-

ляющая программа ожидает окончания перестройки генератора на заданную частоту и, при помощи платы сбора данных, производится выборка массива значений измеренного приемником сигнала. Цикл измерения повторяется с заданным шагом частоты до момента достижения границы частотного диапазона.

Результатом работы управляющей программы является массив данных, характеризующих уровни спектральных составляющих модуляционных сигналов, прошедших через образцы тканей в частотной области, полученных с использованием преобразования Фурье [7]. Частотная зависимость поведения соответствующих зависимостей имеет общую тенденцию спада с повышением частоты, что обусловлено ростом коэффициента затухания электромагнитных волн.

На рисунке 2 приведена типичная зависимость для первой гармоники модуляционного сигнала. Наибольшая чувствительность выявлена в диапазоне 28–29 ГГц (частота отложена на нижней оси графиков). В процессе измерений уровни принимаемого сигнала были в интервале 100–200 мВ (значения отложены на верхней оси), что позволило провести компьютерную обработку. При этом установлено, что ткани с карциномой имеют в среднем на 3 дБ меньший коэффициент прохождения по сравнению с непораженными тканями. Кривая 1 соответствует непораженной карциномой ткани, 2 – пораженной карциномой. Частотная зависимость поведения соответствующих зависимостей имеет общую тенденцию спада с повышением частоты, что обусловлено ростом коэффициента затухания электромагнитных волн.

Проведенные измерения позволили сделать заключение, что у пораженных карциномой тканей изменяются электрические параметры, в частности диэлектрическая проницаемость. В силу вышесказанного предложенный метод позволяет проводить скрининг молочной железы при весьма малых уровнях сигнала внешнего генератора (менее 1 мВт).

Нами проведены исследования здоровых тканей, а также тканей со злокачественными и доброкачественными заболеваниями молочных желез в диапазоне 27–33 ГГц. Выявлено существенное отличие поведения частотных характеристик и уровней коэффициента прохождения КВЧ-волн в тканях с карциномой и без нее. Проведено согласование волновых сопротивлений антенны и тканей биологического объекта.

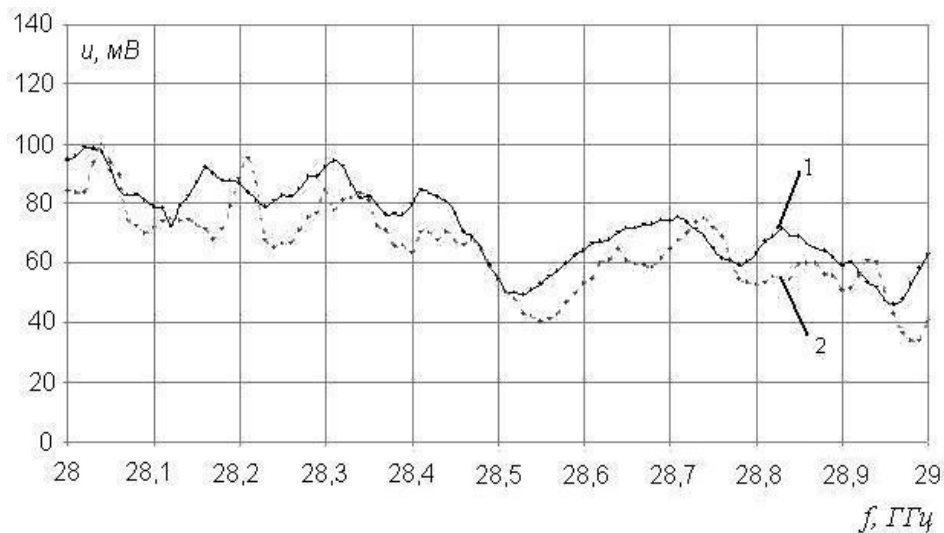


Рисунок 2 – Уровень сигнала, прошедшего через образец ткани: 1 – непораженной карциномой; 2 – пораженной карциномой; при различных значениях коэффициента прохождения

**Обработка результатов исследований образцов тканей пациентов с помощью радиометрической системы КВЧ диапазона в трехмерном виде**

Как было указано выше, результатом работы управляющей программы является массив данных в частотной области с использованием преобразования Фурье. Было выделено 10 гармоник модулирующего сигнала для каждой КВЧ-частоты.

На рисунке 3 приведено типичное трехмерное представление гармоник для КВЧ ча-

стот тканей одной из пациенток: рисунок 3а – для неизменной ткани, рисунок 3б – для измененной, при различных значениях коэффициента прохождения. Всего было исследовано 30 пациенток. Анализ приведенных зависимостей показывает резкое отличие поведения гармонических составляющих в частотной области. Характерное явление проявляется для измененной ткани – наличие резких спадов, что может быть обусловлено взаимодействием электромагнитных колебаний с образцами тканей и объяснено так называемым эффектом стохастического резонанса [7].

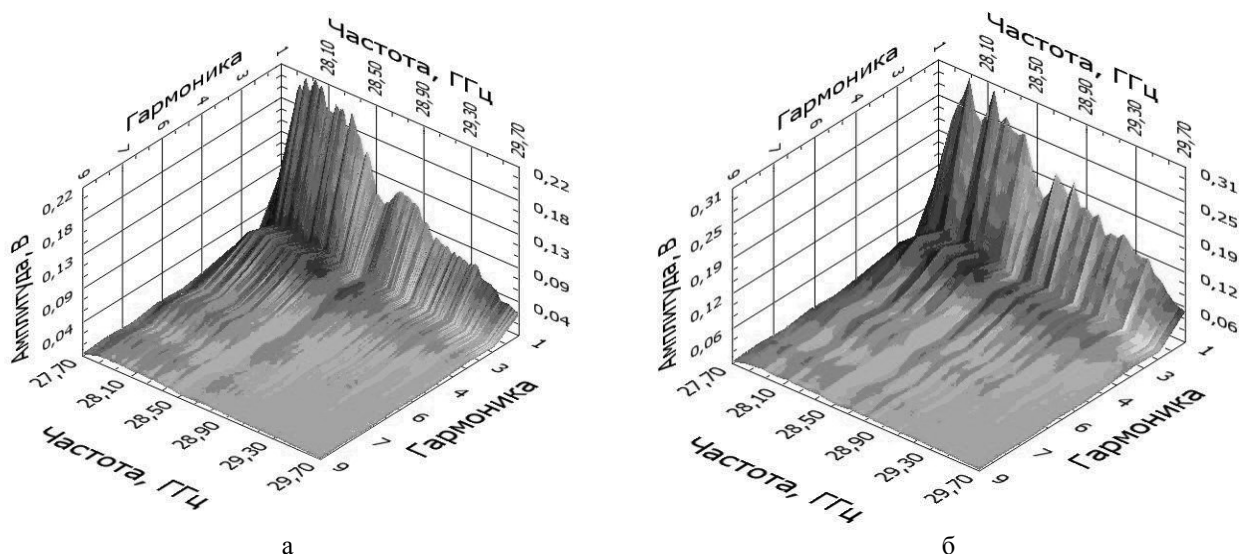


Рисунок 3 – Трехмерное представление гармоник для КВЧ-частот тканей пациентки: а – для неизменной ткани; б – для измененной, при различных значениях коэффициента прохождения

### Заключение

Разработана и исследована радиометрическая система КВЧ-диапазона для диагностики образцов тканей, пораженных карциномой. Решена практическая задача по созданию прибора для дистанционного обнаружения патологических образований в молочных железах. Возможности КВЧ-системы существенно превосходят возможности идентификации в диапазонах более низких частот, так как в диапазонах ДЦВ и СВЧ разрешения 1–3 мм невозможны.

Наибольшая чувствительность при исследовании образцов тканей пациентов выявлена в диапазоне 27,7–29,7 ГГц. В процессе измерений уровни принимаемого сигнала были в интервале 100–200 мВ.

Установлено, что пораженные карциномой образцы тканей имеют в среднем на 3 дБ меньший коэффициент прохождения по сравнению с непораженными тканями.

### Список использованных источников

1. Мустафин, Ч.К. Физические основы радиотермометрических исследований молочных желез // Медицинская визуализация. – 2006, № 3. – С. 32–38.
2. Девятков, Н.Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бецкий. – М. : Радио и связь, 1991. – 170 с.
3. Зилов, В.Г. Элементы информационной биологии и медицины / В.Г. Зилов, К.В. Судаков, О.И. Эпштейн. – М. : МГУЛ, 2000. – 248 с.
4. Илларионов, В.Е. Основы информационной медицины : учеб. пособие / В.Е. Илларионов. – М. : МИМСР, 2004. – 96 с.
5. Tamelo, A.A. Research of possibility radiometric systems millimeter wave for detection malignant new growths of mammary glands / A.A. Tamelo // Conference proceedings ISEMA. – 2013. – P. 366–369.
6. Путырский, Л.А. Возможности применения радиометрической системы КВЧ для обнаружения злокачественных новообразований молочных желез / Л.А. Путырский, Ю.Л. Путырский, А.А. Тамело // Репродуктивное здоровье в Беларуси. – 2011. – № 5 (17). – С. 50–59.
7. Путырский, Л.А. Возможности применения радиометрических систем СВЧ, КВЧ для обнаружения злокачественных новообразований молочных желез / Л.А. Путырский [и др.] // Онкологический журнал. – 2011. – № 3 (19). – Т. 5. – С. 70–71.
1. Мустафин, Ч.К. Физические основы радиотермометрических исследований молочных желез // Медицинская визуализация. – 2006, № 3. – С. 32–38.

---

## APPLICATION OF MILLIMETER WAVE'S RADIOMETRIC SYSTEM FOR DETECTION OF MALIGNANT NEW GROWTHS OF MAMMARY GLANDS

Murav'iov V.V.<sup>1</sup>, Tamelo A.A.<sup>1</sup>, Puturskiy Y.L.<sup>2</sup>, Shapoval E.V.<sup>2</sup>, Leshik A.A.<sup>2</sup>, Matveev D.I.<sup>1</sup>, Molodkin D.F.<sup>1</sup>, Popov A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>N.N. Alexandrov National Cancer Centre

e-mail: tamelo@bsuir.by

**Abstract.** Developed and investigated radiometric system EHF (extremely high frequency) range for the diagnosis of tissue samples affected by carcinoma. EHF system are significantly higher than in the possibility of identifying a lower frequency range, as in UHF band (UHF band) and UHF (ultra high frequency) resolution of 1-3 mm are impossible. It was established that the affected carcinoma tissue samples are 3 dB lower transmittance compared to unaffected tissues. Analysis of the dependency of the harmonic components of the modulation signal passing through the examined tissue samples shows dramatic difference in the behavior of the harmonic components of the frequency domain. This phenomenon appears to altered tissue - the presence of slumps that due to the interaction of electromagnetic waves with the tissue samples may be explained by the so-called stochastic resonance effect.

**Keywords:** radiometric system, radiometry, extremely high frequencies, carcinoma.

References

1. Mustaphin C.K. [Physical basis of radiometry studies of the breast]. *Meditinskaya vizualizatsiya*. 2006, № 3, pp. 32–38 (in Russian).
2. Devyatkov N.G., Golant M.B., Betskiy O.V. *Millimetrovye volny i ikh rol' v protsessakh zhiznedeyatel'nosti*. [Millimeter waves and their role in the life]. Moscow, Radio and svyaz Publ., 1991. 170 p. (in Russian)
3. Zilov V.G., Sudakov K.V. *Yelementy informatsionnoy biologii i meditsiny* [Elements of information in biology and medicine]. Moscow, 2000. 248 p. (in Russian)
4. Ilarionov V.E. *Osnovy informatsionnoy mediciny* [Fundamentals of Information Medicine]. Moscow, 2004. 96 p. (in Russian)
5. Tamelo A.A. Research of possibility radiometric systems millimeter wave for detection malignant new growths of mammary glands. *Conference proceedings ISEMA*. 2013, pp. 366–369.
6. Puturskiy L.A., Puturskiy Y.L., Tamelo A.A. [The possibility of using radiometric system for detection of EHF breast cancers]. *Reproduktivnoye zdorov'ye v Belarusi*, 2011, № 5 (17), pp. 50–59 (in Russian).
7. Puturskiy L.A., Puturskiy Y.L., Tamelo A.A. [The possibility of using microwave radiometric systems, UHF detection of malignant tumors of the mammary glands]. *Onkologicheskiy Zhurnal*, 2011, № 3 (19), pp. 70–71 (in Russian).

*Поступила в редакцию 20.01.2014.*