

ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ БІОМЕДИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 621.317

**МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ
НВЧ-РАДІОМЕТРІЇ В МЕДИЦИНІ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

¹⁾Скрипник Ю.О., ²⁾Яненко О.П., ³⁾Куценко В.П., ²⁾Іващенко В. О., ¹⁾Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна, тел.: (044) 291-21-30, ²⁾НДЦ квантової медицини “Відгук” МОЗ України, м. Київ, Україна, тел.: (044) 220-87-81, 220-72-88, ³⁾ЗАТ “Асоціація “Темп”, м. Донецьк, Україна

Розглянуті можливості та перспективи використання НВЧ-радіометрії для реєстрації і вимірювання електромагнітних полів і випромінювань біооб'єктів та людини. Проаналізовані основні принципи побудови радіометричних систем дециметрового діапазону, а також напрямки біомедичного використання НВЧ-радіометрів

Проблеми радіометричних вимірювань

Аналіз параметрів електромагнітного НВЧ-випромінювання від різноманітних об'єктів останнім часом набув дуже широкого застосування в різних галузях народного господарства. Найбільш вагома частка всього різноманіття приладів для реєстрації НВЧ-випромінювання припадає на технічні галузі (наука, промисловість, зв'язок). Дещо менша частка цієї апаратури використовується в медицині. Дослідження, проведені останнім часом доводять, що власне НВЧ випромінювання від різних об'єктів часто несе в собі важливу інформацію. Ці дані дозволяють визначити температуру, фізичні властивості, характер динаміки внутрішніх процесів в досліджуємому об'єкті. Для реєстрації надмалих рівнів НВЧ-випромінювань були розроблені спеціальні високочутливі радіометричні системи (РС). Чутливість їх досягає $10^{-13} \dots 10^{-16}$ Вт. Вимірювання надмалих рівнів НВЧ сигналів в медицині є особливо перспективними, оскільки дають можливість вимірювання інтенсивності випромінювань в локальних зонах і використання цих даних для діагностики. При порівнянні кількох результатів таких вимірювань можна, наприклад, отримувати інформацію про однорідність протікання процесів із поверхні, обмеженої цими зонами. З цього випливає, що основною проблемою є підвищення чутливості апаратури вимірювання, оскільки більш детальну інформацію можна отримувати із зон невеликого розміру, сигнали від яких мізерні.

Зазвичай процес вимірювання температурних аномалій біооб'єктів проводиться в контакт з джерелом випромінювання, а приймальні антени розміщуються безпосередньо на об'єкті дослідження і узгоджуються з його поверхнею.

Використання РС у контакт з об'єктом вимірювання дозволяє розглядати цей випадок, як широковідомий перехід електромагнітного поля із одного середовища в інше з різною або близькою діелектричною проникливістю, що потребує відповідного узгодження.

Аналіз результатів радіометричних досліджень НВЧ-діапазону

Перші спроби застосування в СРСР високочутливих радіохвильових радіометрів НВЧ-діапазону в медичних дослідженнях відносяться до випадків вимірювання температури внутрішніх органів людини за інтенсивністю електромагнітного випромінювання [1, 2, 3]. Подібні вимірювання абсолютної температури дозволяють виявляти та реєструвати температурні аномалії та неоднорідності, наприклад, в онкології (пухлини), ендокринології (щитовидна та підшлункова залози), ентології (шлунково-кишковий тракт), пульмонології (бронхо-легеневий тракт) [1, 2, 3, 4]. Можна також використовувати порівняльні вимірювання парних органів — нирок, грудей, легень, які передбачають наявність диференційних радіометрів з високою чутливістю для реєстрації різницевого відхилення температури, наприклад, радіометричними структурами, описаними в [6].

Радіометри аплікаційного типу отримали назву радіотермометрів. В той же час використання радіометричної апаратури для медичних вимірювань пов'язано з вирішенням ряду складних питань – забезпечення високої чутливості пристроїв, проведення узгодження вхідної антени, забезпечення необхідної глибини проникнення та роздільної здатності, забезпечення вимірювання абсолютних значень температури з похибкою не гірше $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Розглянемо апаратні можливості по реалізації задекларованих параметрів. Глибина сканування джерел температурних неоднорідностей визначається робочою частотою радіометра і для внутрішніх органів людини знаходиться в межах діапазону ультрависоких (0,3-3 ГГц) та надвисоких (3-30 ГГц) частот. Аналіз фізіологічного стану людини здійснюється в діапазоні надзвичайно високих частот (НЗВЧ).

За даними [3] проникливість радіохвиль у м'які тканини біооб'єктів на частотах УВЧ та НВЧ діапазонів (0,3-3 ГГц) знаходиться у межах 38,9-16,1 мм.

Таким чином проникливість збільшується із зменшенням робочої частоти радіометра при одночасному збільшенні розмірів приймальної антени та зменшенні роздільної здатності вимірювачів.

Більшість радіометрів працюють в діапазоні 1-3 ГГц, де проникливість у м'які тканини обмежується глибиною 30-16 мм. Збільшення ж або зменшення частоти призводить до зменшення проникливості або роздільної здатності.

Забезпечення узгодження антени з біооб'єктом досягається за рахунок вибору конструкції та матеріалу антени. Антени смужкового типу з діелектричною проникливістю наближеною до діелектричної проникливості шкіри людини дозволяють виконувати контактні вимірювання температури з достатньо високою точністю та роздільною здатністю на частотах більше 400-500 МГц [4]. На частоті 1 ГГц [8] використовують антени (аплікатори) контактного типу — двопетльові та трипетльові на діелектричних підкладках із НВЧ-діелектриків (кераміки, синтетичних композитів, тефлону) по діелектричній проникливості наближених до проникливості тіла (шкіри) людини. В діапазоні НЗВЧ — антени рупорного типу та мікросмужкові.

Перспективним представляється використання на НВЧ-частотах діелектричної лінзової антени контактного типу, фокус якої відповідає досліджуваній ділянці в глибині тіла людини [5]. На частоті $f \approx 1,6$ ГГц ширина дифракційної плями складала $\Delta X \approx 14$ мм, а глибина проникливості 60 мм. Як діелектрик автори обирали воду, яка за діелектричною проникливістю близька до проникливості внутрішніх органів людини.

Важливою характеристикою радіометрів подібного типу є флуктуаційна чутливість до температури об'єкта або інтенсивності його випромінювання, оскільки за температури 37°C (310 К) навіть абсолютно чорне тіло формує слабкий сигнал, спектральна щільність якого складає тільки $1,07 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц·см². В той же час рівень випромінювання шкіри людини, враховуючи коефіцієнт сірості (коефіцієнт випромінювальної здатності), значно менший і знаходиться в межах $1 \cdot 10^{-21} \dots 1 \cdot 10^{-22}$ Вт/Гц·см² [6, 7].

Проведення вимірювання електромагнітних полів і випромінювань на ультрависоких та надвисоких частотах потребує створення ще більш чутливих пристроїв та систем, чутливість яких може сягати, наприклад, при виконанні НЗВЧ-НВЧ спектроскопії [8] на частоті 1 ГГц $P_{\min} = 1 \cdot 10^{-13} \dots 1 \cdot 10^{-16}$ Вт/см². Подібна чутливість дозволяє впевнено фіксувати електромагнітне випромінювання від біооб'єктів та створює можливість використовувати вимірювальну радіометричну апаратуру для діагностики стану досліджуваного біооб'єкта (людини).

Один із варіантів такого використання високочутливого НВЧ-радіометра, наведений в [8], базується на вимірюванні відгуку в дециметровому діапазоні відповідної зони (органу) людського тіла (наприклад, щитовидної залози) на опромінюючий сигнал мм-діапазону. Метод НЗВЧ-НВЧ спектроскопії дозволяє фіксувати відхилення спектральної характеристики досліджуваного органу і в процесі лікування контролювати відновлення функції органу за інтенсивністю та формою відгуку, що реєструється НВЧ-радіометром при опроміненні біооб'єкта низькоінтенсивним (< 10 мВт/см²) сигналом мм-діапазону на частотах 50-53 ГГц. За еталонну характеристику приймався резонансний відгук води.

Незважаючи на численні поточні публікації в області НВЧ-НЗВЧ-радіометрії структурна реалізація подібних пристроїв практично не приводиться за винятком [6, 7], де, в основному, розкриваються структурно — функціональні моделі радіометричної апаратури мм-діапазону з їх можливістю використання на ультрависоких та надвисоких частотах. В той же час виконання НВЧ-радіометрів на частотах 0,3-30 ГГц значно спрощується з погляду на широкий вибір елементної бази, наявності стандартних НВЧ вузлів, тощо. На наш погляд, є необхідним вдосконалення, підвищення чутливості та розробка нових перспективних модифікацій структурної побудови високочутливих радіометрів НВЧ-діапазону та проведення оцінки їх основних можливостей.

Метою пропонованої статті є розгляд можливих варіантів побудови високочутливої радіометричної апаратури НВЧ-діапазону, яку можна використовувати у фізиці, біології та медицині для дослідження фізичних тіл та біологічних об'єктів.

Методи та схеми створення НВЧ радіометрів

Враховуючи вищенаведене, НВЧ радіометри (модуляційного типу), можна виконувати, в основному за двома функціональними схемами — схемою прямого підсилення та схемою з перетворенням частоти НВЧ-сигналу (рис. 1 та рис. 2).

На рис.1 наведено схему радіометра прямого підсилення з комутаційно-модуляційним перетворювачем S1.

Схема забезпечує високу чутливість за рахунок використання на вході малошумлячого НВЧ-підсилювача A1, коефіцієнт шуму якого на частотах 0,3-3 ГГц може бути забезпечений $K_{ш} \ll 1$ дБ. Широка смуга підсилювача A1 до квадратичного детектора U1 та великий коефіцієнт підсилення на частоті модуляції (підсилювач A2) сприяє зниженню флуктуаційного порогу. Синхронне детектування за допомогою U2 і усереднення фільтром нижніх частот Z1 також сприяє зниженню флуктуаційного порогу та підвищенню роздільної здатності.

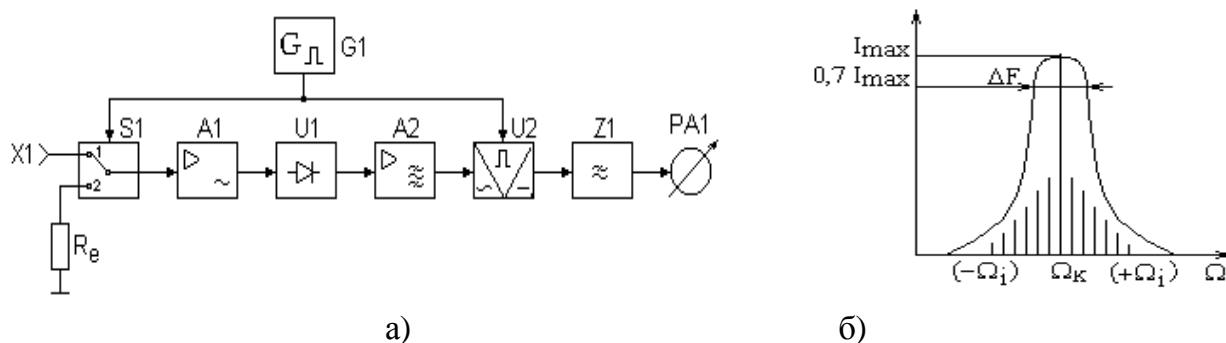


Рисунок 1- Структурна схема НВЧ-радіометра прямого підсилення (а) та спектр частотних складових на виході підсилювача A2 (б)

В наслідок перемноження сигналу на опорну напругу генератора G1 на виході синхронного детектора формується напруга [6]:

$$\begin{aligned}
 u_{U2}(t) &= u_{A2}(t)u_2(t) = a \left[\frac{U_o^2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} + \Delta u_w^2(t) \right] \frac{4U_2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} = \\
 &= \frac{2aKU_2U_o^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} - \frac{2aKU_2U^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)2\Omega t}{2n-1} + \frac{4U_2}{\pi} Ka\Delta u_w^2(t) \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

Фільтром нижніх частот Z1 виділяється постійна складова сигналу (1) і повільно флуктуючі напруги низькочастотних шумів, які наближені до частоти комутації та проходять через смуговий фільтр підсилювача A2 (рис. 1, б), що обмежує чутливість радіометричного пристрою

$$u_{Z1} = \frac{2aKU_2U_o^2}{\pi^2} + 2Ka \frac{U_2}{\pi} \Delta U_w^2(f) \sum_1^i (\Omega - \Omega_i). \quad (2)$$

Як видно з (1) в наслідок проходження через смуговий фільтр підсилювача А2 шумів, наближених до частоти комутації (рис. 1, б) на виході синхронного детектора формується напруга як низькочастотних (перший член рівняння), так і високочастотних (другий і третій члени рівняння) складових. Високочастотні складові рівняння (1) зазвичай затримуються вихідним фільтром вимірювача. Напруги першої складової (2), особливо від частот, наближених до нульової вільно проходять на індикатор, спричиняючи повільну флуктуацію показника індикатора, що є одним з основних недоліків модуляційних радіометричних приймачів як прямого підсилення, так і з перетворенням вхідної частоти.

Зменшення впливу шумів, частота яких наближена до частоти комутації, можна за рахунок вводу від'ємних зворотних зв'язків відповідного протифазного підсумовування складових до процедури синхронного детектування, запропонованих наприклад в [6].

В той же час недоліком структурної схеми радіометра прямого підсилення є неможливість аналізу спектральних характеристик досліджуваних об'єктів в НВЧ-діапазоні, незважаючи на те, що вибіркові властивості радіометра частково реалізуються за рахунок резонансних властивостей вхідної антени (аплікатора).

Структурна схема (рис. 2) цього недоліку позбавлена за рахунок використання додаткового перетворення частоти вхідного сигналу за допомогою змішувача U1 та гетеродина G2 і використання вузькосмугового підсилювача проміжної частоти А2. Основне підсилення радіометричного каналу забезпечується на проміжній частоті. Окрім того, схема з перетворенням вхідної частоти має більшу стійкість, оскільки підсилення в радіометричному каналі виконується на трьох рознесених частотах — вхідній (підсилювачем А1), проміжній (підсилювачем А2) та на частоті комутації (підсилювачем А3).

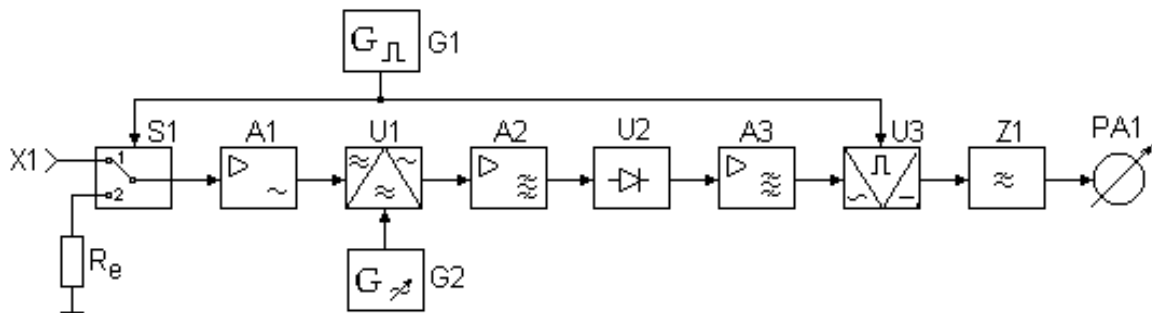


Рисунок 2 - Структурна схема НВЧ-радіометра з перетворенням вхідної частоти

Використання додатного зворотного зв'язку, розглянутим в [9], в поєднанні з методами зниження флуктуаційного порогу дозволяє в 10-50 разів підвищити чутливість розглянутих вище схем радіометрів.

Висновки

Незважаючи на відмічені недоліки модуляційних радіометричних приймачів вони забезпечують можливість вимірювання сигналів, інтенсивність яких співставлена або менша за інтенсивність власних шумів вимірювальної апаратури.

Практично досягнута чутливість НВЧ- радіометрів 10^{-14} ... 10^{-15} Вт достатня для вимірювання і реєстрації електромагнітних полів і випромінювань біологічних об'єктів і людини, що відкриває можливість широкого їх використання в біології і медицині.

Якщо резюмувати можливості і перспективи використання НВЧ-радіометрії в медицині і наукових дослідженнях, то необхідно відмітити, що радіометрична апаратура НВЧ і НЗВЧ діапазонів дозволяє:

- виявляти джерела термонеоднорідностей в організмі біооб'єкту;
- проводити реєстрацію значення цієї температури, вимірюючи як інтегральну так і спектральну характеристику випромінювання;
- проводити реєстрацію впливу фізичних та хімічних факторів на температурні поля внутрішніх органів біооб'єкту;
- реєструвати просторово-частотні характеристики електромагнітних сигналів біооб'єктів та встановлювати зв'язок між параметрами цих характеристик і фізіологічними параметрами біооб'єкту.
- коректувати процес лікування фізичними та хімічними методами за зміною параметрів електромагнітного поля біооб'єкту.

Слід відзначити, що можливості застосування радіометрів НВЧ діапазону в медико-біологічних напрямках ще вивчаються. Результати досліджень, проведених в НДЦ КМ "Відгук" доводять, що інтенсивність випромінювання від різноманітних частин тіла людини знаходиться в складній залежності від стану здоров'я, емоційного стану, тощо. Це відкриває широкі перспективи застосування НВЧ радіометрів для вимірювання температури внутрішніх органів людини на різній глибині та ранньої діагностики різних захворювань в ендокринології, ентерології, онкології та інших галузях практичної медицини. Незважаючи на те, що дослідження в даному напрямку започатковані ще в 80-х роках, подальші розвідки в цій маловивченій області за теперішнього часу є надзвичайно актуальними.

Література:

1. Троицкий В.С., Густов А.В., Белов И.Ф. и др. О возможности использования собственного теплого СВЧ радиоизлучения для измерения температуры его внутренних органов: результаты и перспективы // УФН. -Т. 134. -Вып. 1. -1981. –С. 155-158.
2. А.С. № 799726. СССР. Устройство для обнаружения аномалий внутри тела человека / Мисежников Г.С., Мухина М.М. и др. Опубл. 18.08.78.
3. Штейншлейгер В.Б., Мисежников Г.С., Сельский А.Г. Об одном радиофизическом методе обнаружения температурных аномалий внутренних органов человека //УФН. -Т.134. -Вып. 1. – 1981. – С. 163-164.
4. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека. – Справочник: – К.: Наукова думка. – 1990. – 223 с.
5. Хитров Ю.А., Шестиперов В.А. СВЧ в медицине // Обзор по электронной технике, Серия1: Электроника СВЧ.– 1983. – С.163-164.

6. Скрипник Ю.О., Манойлов В.П., Яненко О.П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: Навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ. – 2001. – 374 с.
7. Ситько С.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины. – К.: ФАДА, ЛТД. – 1999. – 199с.
8. 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. № 5-6, М.: 2001. – С. 62-129.
9. Пат. 27625 Україна, G01R 29/26. Модуляційний радіометр /Ю.О. Скрипник., О.П. Яненко, С.М. Перегудов (Україна). – № 97073269; Заявл. 08.07.1997; Опубл. 15.09.2000; Бюл. № 4, - 2000. – 2 с.

<p>Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Куценко В.П., Иващенко В.А. Возможности и перспективы использования СВЧ-радиометрии в медицине и научных исследованиях</p> <p>Рассмотрены возможности и перспективы использования СВЧ-радиометрии для регистрации и измерения электромагнитных полей и излучений биообъектов и человека. Проанализированы основные принципы построения радиометрических систем дециметрового диапазона, а также направления биомедицинского использования СВЧ-радиометров.</p>	<p>Skrynyuk Yu. A., Yanenko O. P., Kucenko V. P., Ivaschenko V. O. Possibilities and perspectives of EHF-radiometry application in medicine and scientific studies</p> <p>The possibilities and perspectives were discussed of using EHF-radiometry for registration and measurement of electromagnetic fields as well as bioobject's and human radiation. The basic principles of construction of dm-range radiometric system were analyzed as well as the trends of biomedical utilization of EHF-radiometers.</p>
--	---

Надійшла до редакції
25 листопада 2002 року

УДК 621.3:504.064

МЕДИКО-БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТЕОРІЇ ТОНТОР

Скицюк В.І., Ключко Т.Р. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

В роботі йдеться про застосування засад теорії взаємодії польових структур об'єктів біологічного та технічного походження для аналізу стану біоорганізмів, що надасть можливість підвищення якості моніторингу плинних біологічних процесів.

Вступ

Бурхливий розвиток науки та техніки, проблеми взаємодії технічних та біологічних об'єктів за останні часи призвів до підвищення вимог до якості роботи приладів та обладнання. Ця проблема також актуальна при створенні медичних приладів, зокрема фізіотерапевтичних, лазерних, магнітних тощо. У виробництві механічних деталей це вимагає не тільки використання матеріалів високої якості, але і високих показників точності. У науці та техніці на цей час все це