



Р. І. Майсаківський, М. В. Степаняк

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ АНТЕНИ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТІЛА В МІКРОХВИЛЬОВІЙ РАДІОТЕРМОМЕТРІЇ

Досліджено вплив конструкції антени на точність і глибину вимірювання внутрішньої температури тіла людини у системах мікрохвильової радіотермометрії. Проведено порівняльний аналіз основних типів антен, які застосовуються у медичних радіотермометрах, зокрема – щілинних, патч, хвилеводних та рупорних. Визначено ключові параметри, що впливають на якість вимірювань: робочий частотний діапазон, глибину проникнення сигналу, просторову роздільну здатність, рівень відбиття та втрат. Запропоновано математичну модель, яка враховує фізико-технічні характеристики антен і математично описує залежність інтенсивності прийнятого сигналу від глибини, температури та коефіцієнта поглинання біологічних тканин. Модель реалізовано мовою програмування Python, що дало змогу змоделювати процес виявлення локальних термічних аномалій у біологічних тканинах за допомогою різних типів антен та оцінити їх чутливість до змін температури на різних глибинах. Додатково проведено аналіз впливу частоти та геометрії антени на стабільність результатів вимірювання, що дало змогу визначити оптимальні діапазони параметрів для медичних застосувань і підвищити достовірність отриманих результатів. Результати моделювання показали, що частоти 0,3-1 ГГц забезпечують більшу глибину зондування, проте мають нижчу просторову роздільну здатність, тоді як антени з частотою 3-6 ГГц краще підходять для поверхневих вимірювань. Рупорні антени продемонстрували найвищу ефективність для глибинних зон (до 6-7 см), хвилеводні – для середніх глибин, а патч і щілинні антени – для поверхневих або портативних застосувань. Отримані результати мають важливе практичне значення для вдосконалення конструкцій медичних радіотермометрів, раціонального вибору антени під конкретне клінічне завдання та підвищення точності неінвазивної термодіагностики. Розроблену модель можна використати для калібрування пристроїв, тестування нових моделей, створення систем ранньої діагностики захворювань і подальшої автоматизації процесів аналізу температурних аномалій у медичних інформаційно-вимірювальних системах.

Ключові слова: термографія; термодіагностика; математичне моделювання; неінвазивний моніторинг; антенні системи.

Вступ / Introduction

Радіотермометрія (РТМ) – це метод дистанційного, неінвазивного вимірювання температури шляхом реєстрації власного електромагнітного випромінювання біологічних тканин, зазвичай у діапазоні надвисоких частот (НВЧ). Інтенсивність цього випромінювання пропорційна температурі об'єкта, що дає змогу проводити безконтактні вимірювання температури як на поверхні, так і на певній глибині у тканинах. Особливістю мікрохвильової радіотермометрії є її здатність проникати на глибину до кількох сантиметрів, що робить метод особливо перспективним для медичної термодіагностики [12, 13].

У медичній практиці радіотермометрія використовується для ранньої діагностики та моніторингу запальних процесів, пухлин, а також оцінювання ефективності хіміопроменевого лікування, зокрема – в онкології [2]. Метод дає змогу виявляти термічні аномалії до появи морфологічних змін, що значно розширює його діагностичні можливості порівняно з традиційними візуалізаційними методами (наприклад, ультразвукового дослідження чи комп'ютерної томографії).

Ключовим елементом будь-якого радіотермометричного пристрою є антена, яка приймає теплове випромінювання з певної ділянки тіла. Від її конструкції, розмірів, типу поляризації, матеріалу та частотного діапазону значною мірою залежать:

- глибина проникнення сигналу в тканини;
- чутливість та просторова роздільна здатність;
- стабільність калібрування;
- рівень відбиття та втрат сигналу.

Невдалий вибір антени та частоти може призвести до зниження точності вимірювань, спотворення температурного профілю або недостатньої глибини зондування. Актуальним залишається питання вибору оптимальної антени для неінвазивного вимірювання внутрішньої температури на глибинах 0,5-5 см у м'яких тканинах.

Отже, існує потреба у дослідженні впливу конструктивних і електричних параметрів антен на точність і глибину радіотермометричних вимірювань, а також у формуванні критеріїв їх оптимального вибору під конкретні медичні завдання [2, 12, 13].

Об'єкт дослідження – вимірювання внутрішньої

Інформація про авторів:

Майсаківський Роман Іванович, аспірант, кафедра комп'ютеризованих систем автоматики.

Email: maisakovsky@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-5816-0701>

Степаняк Михайло Васильович, канд. техн. наук, доцент, кафедра комп'ютеризованих систем автоматики.

Email: mystepanyak@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Майсаківський Р. І., Степаняк М. В. Вплив конструкції антени на точність вимірювання внутрішньої температури тіла в мікрохвильовій радіотермометрії. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 5. С. 121–129.

Citation APA: Maisakovskiy, R. I., & Stepanyak, M. V. (2025). Influence of antenna design on the accuracy and depth of internal body temperature measurement in microwave radiothermometry. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(5), 121–129. <https://doi.org/10.36930/40350514>

температурі тіла людини за допомогою антенних систем в мікрохвильовій радіотермометрії.

Предмет дослідження – конструктивні особливості та радіотехнічні характеристики антен, що впливають на точність і глибину вимірювання внутрішньої температури тіла у радіотермометрії.

Мета роботи – визначити вплив конструкції антени на точність і глибину вимірювання внутрішньої температури тіла людини в мікрохвильовій радіотермометрії, що сприятиме підвищенню ефективності та достовірності результатів неінвазивної термодіагностики.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- провести аналіз наявних типів антен, що застосовуються в радіотермометрах для медичної діагностики, що дасть змогу узагальнити сучасні підходи до побудови антенних систем і визначити їх переваги та обмеження у контексті неінвазивних вимірювань;
- проаналізувати конструктивні та радіотехнічні параметри антен, визначити їх вплив на глибину проникнення та точність вимірювання температури за допомогою математичного моделювання, що дасть змогу кількісно оцінити ефективність різних типів антен і виявити залежності між частотою, глибиною та точністю вимірювань;
- визначити критерії вибору оптимального типу антени для забезпечення високої точності та надійності радіотермометричних вимірювань залежно від конкретного медичного застосування, що сприятиме підвищенню ефективності та достовірності результатів неінвазивної термодіагностики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз сучасних досліджень та наукових публікацій свідчить про актуальність розроблення та вдосконалення методів вимірювання внутрішньої температури тіла людини. Особливу увагу приділено дослідженню характеристик різних типів антен, що застосовуються в радіотермометрії як засіб неінвазивного дослідження внутрішніх тканин.

У роботі [25] досліджено сферу медичного застосування радіотермометрії, зосереджуючись як на клінічному використанні, так і на технічних розробках. Проаналізовано розробки мікрохвильових антен, які вимірюють внутрішню температуру тіла. Різні типи аплікаторів, такі як хвильоводні, смужкові, спіральні оптимізовані для глибини, точності та безпеки вимірювань. Для досягнення фокусування енергії на пухлинах використовуються масиви аплікаторів.

У дослідженні [23] подано результати проектування, моделювання, конструювання та експериментального випробування мікрокоаксіальної двощілинної антени, що працює на частоті 2,45 ГГц, для діагностики та лікування пухлин кісток. Як наслідок, запропонована антена є однією з небагатьох, спеціально розроблених для пухлин кісток, яка працює за відносно низької потужності 10 Вт.

У роботі [22] представлено мікрохвильовий радіометр Ку-діапазону (12-18 ГГц), призначений для точного, неінвазивного моніторингу температури тіла людини через одяг. Такий діапазон було обрано, оскільки мікрохвилі проникають крізь бавовняну тканину ефективніше. Радіотермометр реалізовано з допомогою рулонної антени з похибкою вимірювання температури приблизно $\pm 0,3$ °C.

Дослідження [4] представляє новий підхід до лікування раку молочної залози за допомогою мікрохвильової гіпертермії, що забезпечується щільною антеною з

патч-антеною, що працює на частоті 2,45 ГГц. Дослідження підтверджує можливість одночасного використання кількох антен для ефективного лікування кількох пухлин. Температури 43 °C, придатної для гіпертермічної терапії, було досягнуто впродовж 10 хв за допомогою кількох антен.

У дослідженні [3] моделюється коаксіальна щільна антена, яка використовується для діагностики і лікування пухлини печінки. Проведено аналіз розподілу температури та питомого коефіцієнта поглинання за різних потужностей мікрохвиль (5-25 Вт) та частот (0,7-5 ГГц). Результати показують, що вища вхідна потужність та частота підвищують температуру тканин та значення поглинання хвиль, покращуючи ефективність нагрівання пухлини, але ризикуючи пошкодженням навколишніх здорових тканин.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що попри значну кількість робіт з розроблення антен для медичних цілей, **питання кількісного порівняння типів антен у контексті точності та глибини вимірювання внутрішньої температури тіла людини залишалося недостатньо висвітленим.** Більшість досліджень зосереджені або на створенні окремих конструкцій, або на лікувальних застосуваннях (гіпертермія, абляція), тоді як **аналіз впливу конструкції антени на результати термодіагностики із застосуванням математичного моделювання практично не проводився.**

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Для досягнення поставленої мети, було проаналізовано наявні типи антен, які застосовують у пристроях мікрохвильової радіотермометрії. Аналіз літературних джерел показав, що вибір конструкції антени є критичним фактором, який безпосередньо впливає на точність та глибину вимірювання температури біологічних тканин. Залежно від медичного завдання, вимоги до антен можуть істотно відрізнятися, що зумовлює необхідність використання різних типів випромінювачів.

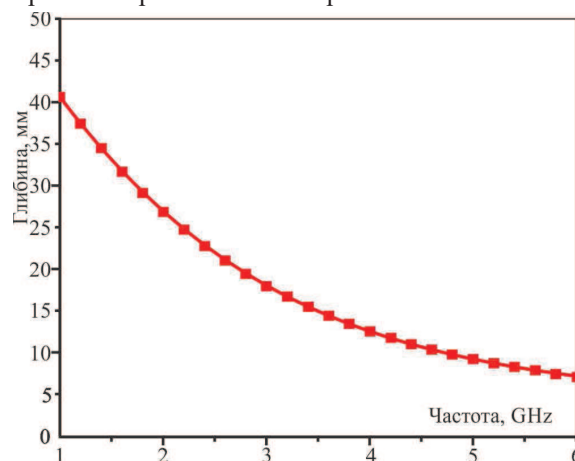


Рис. 1. Моделювання залежності глибини проникнення від частоти для м'язової тканини / Modeling the dependence of penetration depth on frequency for muscle tissue [5]

Вплив ключових параметрів антени на якість вимірювань є визначальним (рис. 1). Наприклад, робоча частота антени є компромісом між глибиною проникнення та просторовим розрізненням. Частоти в діапазоні 0,3-2 ГГц дають змогу проникати хвилі глибше у тканини, однак при цьому погіршується роздільна здатність вимірювання. Частоти 3-5 ГГц і вище забезпечують краще

просторове розрізнення, але сигнал згасає на меншій глибині, приклад моделювання залежності частоти і глибини наведено на рис. 1.

Розміри антени також відіграють важливу роль. З одного боку, антена повинна бути достатньо малою для комфортного розміщення на різних ділянках тіла. З іншого боку, її апертура повинна бути достатньо великою для ефективного приймання слабого теплового випромінювання [12, 14, 15], орієнтовані тенденції стосовно типових діапазонів частот, які застосовуються в радіотермометрії, і глибин вимірювань наведено в табл. 1 [10, 12, 13, 24].

Табл. 1. Глибина вимірювання відносно частотного діапазону / Measurement depth relative to frequency range

Частотний діапазон, ГГц	Глибина вимірювання, см	Особливості застосування
0,3...0,5	5...6	Застосовують з великими антенами. Висока глибина вимірювання.
0,5...1	3...5	Залежно від типу тканини – жир глибше, м'язи менше. Часто розглядають як компроміс між глибиною та розміром антени в медичних застосуваннях.
1...3	1...3	Глибина різко зменшується: у м'язових моделях ~1-2 см; все ще використовують для поверхнево-серединних ділянок і мультисистемних методів.
3...10	0,1...0,3	Поглинання хвилі відбувається переважно у поверхневих шарах шкіри, субміліметрові – міліметрові глибини; застосовують для поверхневого моніторингу.

Найпоширенішими в медичній радіотермометрії є контактні антени, які забезпечують безпосередній контакт з поверхнею тіла пацієнта. Такий підхід дає змогу мінімізувати відбиття сигналу на межі "антена-шкіра" та підвищити ефективність передачі електромагнітної енергії. Серед контактних антен можна виокремити кілька ключових типів:

- щілинні антени (англ. *slot antennas*);
- мікросмужкові (патч) антени (англ. *microstrip patch antennas*);
- хвильоводні антени (англ. *waveguide antennas*).

Серед безконтактних типів антен можна виокремити рупорні антени (англ. *horn antennas*).

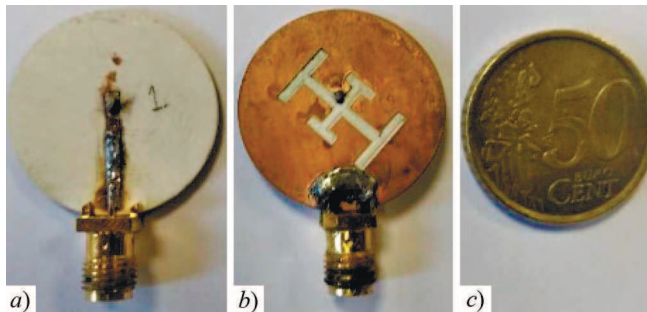


Рис. 2. Щілинна антена / Slot antenna [8]

Щілинні антени. Щілинні антени реалізуються як прорізи у металевих поверхнях, зазвичай інтегровані у друковану плату. Для них характерні низький профіль, порівняно широка смуга пропускання та можливість адаптації до локальних контурів тіла, як наведено на рис. 2. Перевагами такої реалізації є можливість точно-

го контролю геометрії щілини, що дає змогу адаптувати антену до потрібної робочої частоти та діагностичної глибини. Основними параметрами, що впливають на характеристики антени, є довжина та форма щілини, товщина підкладки та її діелектрична проникність.

Патч антени. Патч антени – це плоскі антени, які складаються з прямокутної або круглої металевої пластини, розміщеної над заземленою підкладкою, приклад якої показано на рис. 3. Їхні переваги: компактність, технологічна простота, можливість інтеграції у портативні пристрої. Такі антени працюють ефективно у діапазоні частот 1-4 ГГц, що забезпечує помірну глибину зондування. Недоліком є вузька смуга пропускання, хоча це частково компенсується спеціальними геометричними модифікаціями, такими як, наприклад, фрактальними або багатоплановими структурами [18, 20].

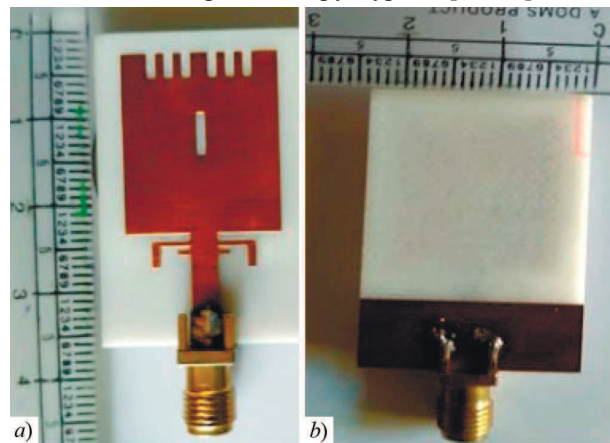


Рис. 3. Патч антена: вигляд спереду (a) і ззаду (b) / Patch antenna: front view (a) and rear view (b)

Хвильоводні антени. Зазвичай, це прямокутні або циліндричні хвильоводи, заповнені діелектриком з високою діелектричною проникністю, що дає змогу зменшити їхні апертурні розміри та покращити узгодження з біологічними тканинами. Наповненість антени діелектриком видно на рис. 4. Такі антени здатні забезпечити кращу спрямованість та менші втрати сигналу, що є перевагою під час вимірювання температури на більшій глибині, з робочою частотою в межах 1-5 ГГц. Зазвичай, хвильоводні антени є громіздкішими порівняно з друкованими. Їх часто використовують для високоточних лабораторних досліджень або в умовах, де контакт з тілом є утрудненим [6].

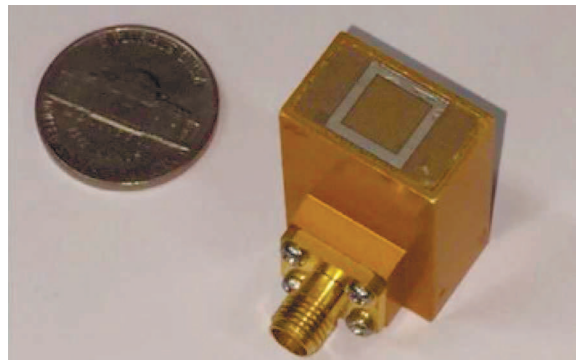


Рис. 4. Хвильоводна антена з апертурою, заповненою метаматеріалом / Waveguide antenna with an aperture filled with metamaterial [6]

Рупорні антени. Рупорна антена є класичним типом ширококутового випромінювача, що забезпечує високу ефективність приймання сигналу та стабільну діагра-

му спрямованості. Завдяки великій апертурі ця антена здатна приймати електромагнітне випромінювання із глибших шарів тканин, особливо в діапазоні частот 0,3-1,5 ГГц. Основний недолік – необхідність певної відстані між антеною та тілом пацієнта, що створює повітряний прошарок і збільшує втрати на відбиття. Для медичного застосування використовують модифіковані рупорні антени з діелектричними обтічниками або гелевими інтерфейсами для зниження відбиття. Такий тип антени найкраще підходить для вимірювання внутрішньої температури тіла там, де глибина вимірювання не дає змоги застосовувати інші типи антен, наприклад від 2 до 6 см, наприклад черевна порожнина. Проте, такий тип антен не доцільно використовувати, коли пристрій повинен бути портативний, адже відносно велика

апертура антени буде заважати, а також для поверхневих ділянок тіла до 2 см [1].

Аналіз різних типів антен для мікрохвильової радіотермометрії показав значні відмінності у глибині вимірювання для різних типів антен, які узагальнено у табл. 2. Нагадаємо, мікрохвильова радіотермометрія – це медичний метод, який використовує вимірювання власного електромагнітного випромінювання внутрішніх тканин живого організму для виявлення теплових аномалій, наприклад, для раннього виявлення злоякісних пухлин. Він неінвазивно (без проникнення в тіло) дає змогу отримати інформацію про температуру всередині організму, наприклад людини, за допомогою мікрохвильових антен, які вимірюють радіотермічне випромінювання тканин.

Табл. 2. Порівняння типів антен для мікрохвильової радіотермометрії / Comparison of antenna types for microwave radiothermometry

Характеристика	Щілинна антена	Патч антена	Хвилеводна антена	Рупорна антена
Робочий діапазон частот, ГГц	1-6	1-6	1-5	0,3-8
Глибина проникнення, см	1-3	0,5-2	0,5-4	2-7
Габарити / компактність	Середні	Малі	Великі	Великі
Контакт із тілом	Так	Так	Так/Ні	Ні
Технологічна складність	Середня	Низька	Висока	Середня
Основні переваги	Гнучкість у формфакторі, інтеграція в корпус	Простота виготовлення, портативність	Чітка спрямованість, низькі втрати сигналу	Глибоке зондування, широка смуга частот
Основні недоліки	Вузька смуга частот	Мала глибина вимірювання, вузька смуга частот	Великі розміри, складність виготовлення	Необхідний зазор між шкірою і антеною

Моделювання процесу виявлення локальної термічної аномалії різними типами антен. Для кількісного порівняння ефективності антен у виявленні локальних термічних аномалій було розроблено математичну модель мовою програмування Python. Мета моделювання – оцінити, як різні типи антен, що застосовуються у мікрохвильовій радіотермометрії, реагують на однакову аномалію температури, розташовану на певній глибині [14, 15]. Код математичної моделі доступний за посиланням [11].

Математична модель базується на обчисленнях інтенсивності випромінювання, яке визначають за допомогою наближення Релея-Джинса до закону Планка [14]:

$$I(\lambda, T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}, \quad (1)$$

де: λ – довжина хвилі; T – температура; k_B – стала Больцмана; c – швидкість світла.

Також модель враховує згасання електромагнітних хвиль у тканинах, описане законом Бугера-Ламберта [14]:

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d}, \quad (2)$$

де: I_0 – інтенсивність випромінювання на поверхні тканини; μ – коефіцієнт поглинання; d – глибина.

У моделі враховано такі параметри для кожного типу антени:

- тканину моделювали як однорідне середовище з базовою температурою 36,5 °С, профіль температури зростає від поверхні до глибини 5 см, максимальна температура 37,1 °С;
- додано локальну підвищену температуру на глибині 2,25 см, з температурою 38,5 °С;
- для обчислення інтенсивності випромінювання застосовується наближення Релея-Джинса до закону Планка;
- експоненційний коефіцієнт згасання сигналу у біологічних тканинах, що залежить від глибини проникнення антени.

Побудовані графіки на рис. 5-8 демонструють розподіл інтенсивності сигналу від різних глибин, що дає змогу візуально оцінити чутливість кожного типу антени до термічних змін на заданій глибині залежно від частоти випромінювання, а також додано робочу глибину вимірювання, яку зазвичай використовують для конкретного типу антен.

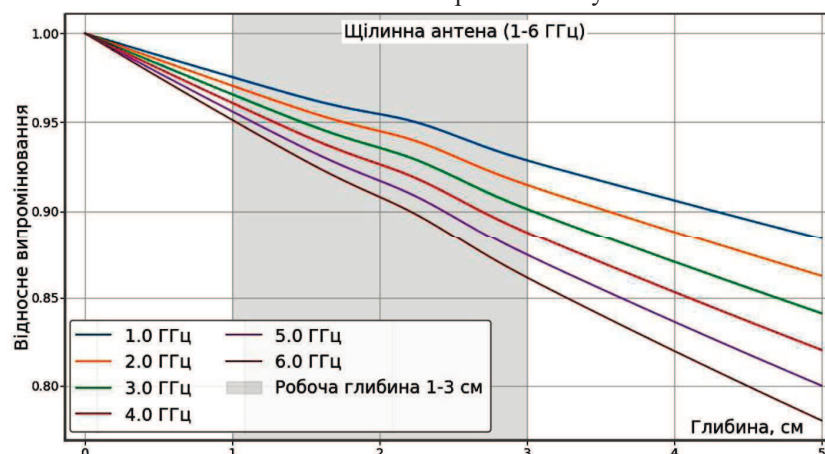


Рис. 5. Моделювання процесу виявлення локальної "гарячої" аномалії щілинною антеною / Simulation the process of local "hot spot" anomalies detection using a slot antenna

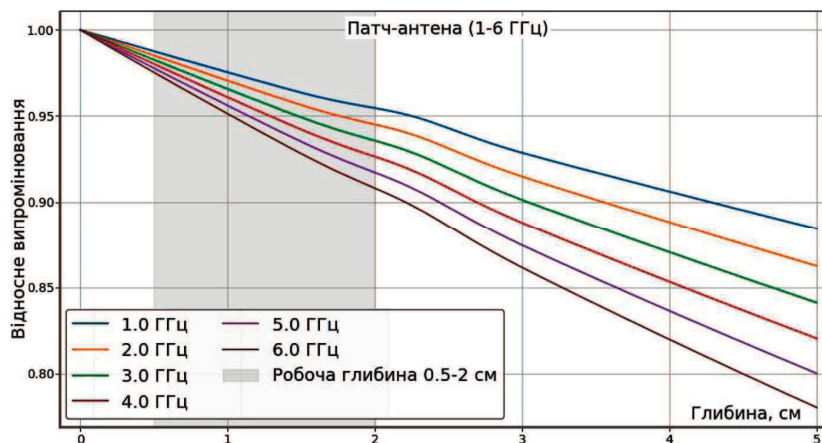


Рис. 6. Моделювання процесу виявлення локально "гарячої" аномалії патч антеною / Simulation the process of local "hot spot" anomalies detection using a patch antenna

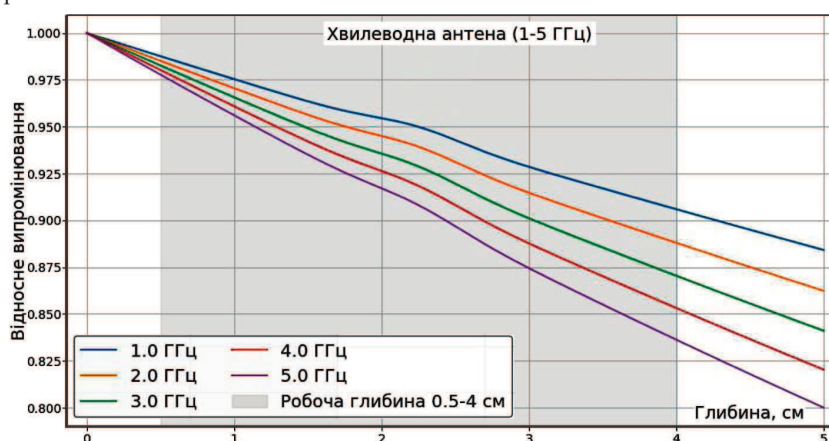


Рис. 7. Моделювання процесу виявлення локально "гарячої" аномалії хвильоводною антеною / Simulation the process of local "hot spot" anomalies detection using a waveguide antenna

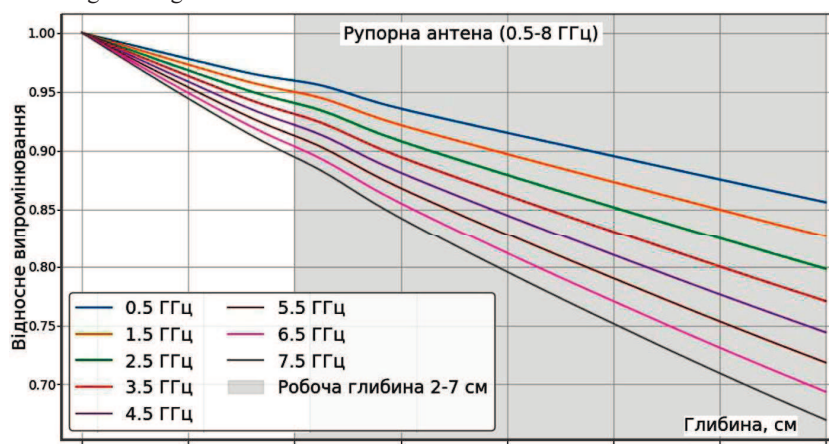


Рис. 8. Моделювання процесу виявлення локально "гарячої" аномалії рупорною антеною / Simulation the process of local "hot spot" anomalies detection using a horn antenna

Отримані результати моделювання узгоджуються з фізичними принципами та законами, які описують властивості хвиль та температури [7, 14, 15]. Усі типи антен достатньо точно можуть визначити локально аномалію на глибині 2,25 см.

Для валідації математичної моделі проведено порівняльний аналіз отриманих результатів із експериментальними даними, наведеними у сучасних дослідженнях. Зокрема, отримані температурні профілі та залежність інтенсивності сигналу від глибини добре узгоджуються з результатами, описаними в роботах. Отримані в цій роботі залежності відтворюють основні експериментально підтверджені тенденції: низькі частоти (0,3-1,0 ГГц) забезпечують глибше проникнення до 5-6 см, а високі (3-6 ГГц) – більшу просторову

роздільну здатність, але меншу глибину. Отже, модель адекватно описує фізичні закономірності процесу і її можна використати для прогнозування ефективності антен різного типу у медичній радіотермометрії [7, 16, 21, 22].

Щілинна антена має помірну чутливість до глибинних ділянок, починаючи від 3 см, але значну частину сигналу формують поверхневі шари завглибшки до 3 см. Завдяки можливості роботи на високих частотах, дає високу роздільну здатність на вимірюванні внутрішньої температури тіла на глибині менше за 3 см. Зважаючи на частоту діапазону, глибину і точність вимірювання, вона може мати такі медичні застосування: дослідження шкіри та підшкірної клітковини, виявлен-

ня поверхневих пухлин, дослідження молочних залоз та інші локальні дослідження.

Патч антена через меншу робочу глибину проникнення найслабше "бачить" температурну аномалію, проте показує все ж таки достатню точність, потрібну для вимірювання внутрішньої температури до 2,25 см. На глибині 2 см і більше краще застосовувати інші типи антен. Завдяки можливості роботи на високих частотах, дає високу роздільну здатність на вимірюванні внутрішньої температури тіла на глибині менше 2 см. Медичні застосування: контактний моніторинг температури шкіри, наприклад, у разі опіків або інших уражень, використання у переносних діагностичних пристроях, дослідження молочних залоз та інші локальні вимірювання.

Хвильовода антена показує схожі результати вимірювання, як і щілинна, так і патч, проте завдяки кращій спрямованості антени показує кращу чутливість і глибину вимірювання. Медичне застосування: вимірювання температури у м'язовій тканині, застосування у системах гіпертермії для лікування пухлин та інші вимірювання на середніх глибинах.

Рупорна антена найкраще підходить для глибинних вимірювань, адже має найкращу чутливість до сигналу на глибинах, які інші типи антени не здатні зареєструвати, або будуть слабо реєструвати. Проте, за рахунок використання частоти хвилі в діапазоні 0,3-1 ГГц, яка дає змогу реєструвати глибинні сигнали, роздільна здатність вимірювання буде нижчою, ніж в інших антен. Медичне застосування: дослідження органів черевної порожнини та інші запальні процеси у внутрішніх органах, де інші антени через глибину не можуть використовуватись для вимірювання температури, а також де портативність пристрою не є критичною.

Антени на частотах 0,5-1,9 ГГц проходять глибше, сигнал містить інформацію з великих глибин, але з меншою просторовою роздільною здатністю. Частоти у діапазоні 5-8 ГГц проникають тільки неглибоко і "бачать" поверхневі шари, проте з кращою роздільною здатністю зображення.

Отже, проведене моделювання підтвердило ефективність застосованого підходу, що базується на математичному описі процесу приймання теплового випромінювання антенами різних типів. Використання розробленої моделі дало змогу кількісно оцінити чутливість антен до локальних термічних аномалій та визначити оптимальні діапазони частот для різних глибин зондування. Такий підхід забезпечує можливість прогнозування результатів вимірювань без проведення тривалих експериментів і може бути використаний для оптимізації конструкцій антенних систем та підвищення точності мікрохвильової радіотермометрії.

Обговорення результатів дослідження. Дослідження [19] описує проєктування, створення та оцінювання роботи медичного мікрохвильового радіометра Діке для неінвазивного вимірювання градієнта температури біологічних тканин людини. Він працює на частоті 1,3 ГГц. Цей діапазон вибрано як компроміс між глибиною проникнення та просторовою роздільною здатністю. Оцінка системи проводилася на рідкому тканинному фантомі, що імітує людське тіло, у якому була гаряча точка діаметром 10 мм на різній глибині, імітуючи пухлину. У роботі порівнюються два типи антен: хвиль-

оводну та щілинну. Було встановлено, що щілинна антена забезпечує кращу видимість гарячої точки на глибині порівняно з хвильоводною антеною, оскільки має більший об'єм зондування.

У роботі [21] представлено багатодіапазонний мікрохвильовий радіотермометр, який пасивно приймає теплове мікрохвильове випромінювання від тіла через одяг і тканини. Основним нововведенням є конструкція антени, яка використовує набір невеликих, високоспрямованих пірамідальних рупорних антен, оптимізованих для кожного частотного діапазону. Система працює в чотирьох частотних діапазонах – 4-6 ГГц, 8-12 ГГц, 12-16 ГГц та 14-18 ГГц – кожен з яких вибрано на підставі співвідношення між глибиною проникнення мікрохвиль (глибиною шкіри) та товщиною шару тканини. Нижчі частоти зондують глибші шари, тоді як вищі частоти зосереджені на поверхневих тканинах.

У дослідженні [17] розглянуто питання взаємодії лазерного випромінювання з біологічними тканинами та його вплив на теплові процеси всередині організму. Автори аналізують основні методи моделювання тепломаєобміну – моделі Пеннеса, Каттанео-Вернота, Монте-Карло, інтеграла Арреніуса та двофазного запізнення. На підставі останньої було створено вдосконалену модель двофазного запізнення, яка додатково враховує коефіцієнт поглинання біологічного середовища. Це дає змогу точніше описати динаміку розподілу температури у тканинах. Моделювання проводилося в середовищі MATLAB із використанням лазера з довжиною хвилі 1064 нм і потужністю 12 Вт.

Автори у роботі [9] розробили аплікатор, який складається із 36 мініатюрних мікросмужкових антен, які працюють на частотах 0,915 і 2,45 ГГц. Цей дводіапазонний режим роботи дає змогу точно нагрівати пухлини різних розмірів: 0,915 ГГц для глибших і більших ($\approx 2 \text{ см}^3$) пухлин і 2,45 ГГц для менших ($\approx 1 \text{ см}^3$) поверхневих пухлин, зберігаючи при цьому навколишні здорові тканини, використовуючи сфокусовану мікрохвильову енергію. Структуру антени було оптимізовано за допомогою моделювання у Ansys Electronics 2019, щоб максимізувати точність фокусування.

У роботі [16] автори розробили та дослідили три типи щілинних антен: однощілинна антена, двощілинна антена, двощілинна антена для вимірювань температури у неглибоких шарах тіла до ~ 4 мм. Усі антени працювали на частоті 2,45 ГГц, мали довжину 11 см. Для моделювання поширення електромагнітних хвиль та теплопередачі всередині фантомів було використано метод скінченних елементів на підставі біотеплового рівняння Пеннеса. Зроблено висновки, що геометрія антени істотно впливає на схеми нагрівання та ефективність реєстрації мікрохвильового випромінювання. Подвійна щілинна антена короткої дії продемонструвала найкраще узгодження та найрівномірніший розподіл тепла, мінімізуючи втрати енергії.

Аналіз наявних наукових джерел підтвердив актуальність нашого дослідження щодо використання радіотермометричних антен для вимірювання внутрішньої температури тіла людини, а також застосування математичних моделей для оцінювання впливу довжини хвилі, частоти сигналу та глибини вимірювання на похибку визначення температури за відносно невисокої обчислювальної складності. Це створює основу для калібрування параметрів роботи антени радіотермометра

та їх подальшого вдосконалення відповідно до специфічних умов застосування.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено математичну модель процесу вимірювання внутрішньої температури тіла людини у мікрохвильовій радіотермометрії, яка враховує конструктивні та фізико-технічні параметри антен і дає змогу кількісно оцінювати їх вплив на точність і глибину вимірювань.

Практична значущість результатів дослідження – розроблену математичну модель можна використовувати як інструмент вибору типу антени і її характеристик для конкретного медичного застосування.

Висновки / Conclusions

Визначено вплив конструкції антени на точність і глибину вимірювання внутрішньої температури тіла людини у мікрохвильовій радіотермометрії, що дало змогу обґрунтувати вибір оптимальних типів антен для конкретних медичних застосувань і підвищити достовірність результатів неінвазивної термодіагностики. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано літературні джерела щодо наявних типів антен. Цей напрям досі розвивається, тому існує потреба в аналізі їх застосування і математичному моделюванні.
2. Проведено аналіз конструктивних і фізико-технічних параметрів основних типів антен, що застосовуються в мікрохвильовій радіотермометрії, а саме щільних, патч, хвильоводних та рупорних.
3. Розроблено математичну модель процесу приймання теплового випромінювання різними типами антен, яка враховує поглинання сигналу у біологічних тканинах та дає змогу кількісно оцінити чутливість антен до локальних термічних аномалій на різних глибинах.
4. З'ясовано, що частота випромінювання антени є ключовим параметром, який визначає компроміс між глибиною проникнення сигналу та просторовою роздільною здатністю. Частоти в діапазоні 0,3-1 ГГц забезпечують вимірювання на великих глибинах, а вищі частоти – покращують точність вимірювання для поверхневих шарів тканин або з кращою роздільною здатністю.
5. Встановлено, що вибір антени визначає глибину зондування, точність вимірювань та придатність пристрою для певних медичних застосувань.
6. Отримані результати можна використати для вдосконалення конструкцій радіотермометрів, оптимізації вибору антени під конкретне медичне завдання, а також для калібрування й розроблення програмного забезпечення моделювання процесів термодіагностики.

Запропонована в цьому дослідженні математична модель є спрощеною, тобто базується на припущенні однорідності тканин та лінійної залежності коефіцієнта поглинання від глибини. У подальших дослідженнях можливе розроблення детальнішої фізико-математичної моделі, яка може базуватися на рівнянні біоотеплопереносу Пеннеса, методі Монте-Карло чи їх комбінації для точнішого опису поширення електромагнітного випромінювання та теплових процесів у біотканинах.

References

1. Abdel-Haleem, M. R., Abouelnaga, T., Abo-Zahhad, M., & Ahmed, S. M. (2021). Enhancing microwave breast cancer hyperthermia therapy efficiency utilizing fat grafting with horn antenna. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(6), article ID e22651. <https://doi.org/10.1002/mmce.22651>
2. Bazyka, D. A., & Vorobyov, M. O. (2022). Radiothermometry as a dynamic method of examination of the chemoradiotherapy efficiency in patients with malignant neoplasm of the oral cavity, oral and laryngeal parts of the pharynx. *Ukrainian Medical Journal*, 6(152), 1–7. <https://doi.org/10.32471/umj.1680-3051.152.235151>
3. Biswas, C., Nasrin, R., & Ahmad, M. S. (2022). Numerical analogy of bioheat transfer and microwave cancer therapy for liver tissue. *Heat Transfer*, 1–28. <https://doi.org/10.1002/htj.22597>
4. Elsaadi, M., & Hamad, R. (2023). Breast cancer hyperthermia treatment based on slotted patch antenna at 2.45 GHz. *Circuits and Systems*, 14(5), 10–18. <https://doi.org/10.4236/cs.2023.145002>
5. Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" (IFAC) – Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). (2021). Calculation of the dielectric properties of body tissues. Retrieved October 28, 2022. URL: <https://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>
6. Kim, I., Lee, D.-M., Shin, J.-W., Lee, G.-J., Kim, E.-S., & Kim, N.-Y. (2024). Radio frequency hyperthermia system for skin tightening effect by filled waveguide aperture antenna with compact metamaterials. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 12, article ID 1378084. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1378084>
7. Klemetsen, Ø. (2012). Design and evaluation of a medical microwave radiometer for observing temperature gradients subcutaneously in the human body. University of Tromsø, Tromsø, Norway. URL: https://www.researchgate.net/publication/277232511_Design_and_Evaluation_of_a_Medical_Microwave_Radiometer_for_Observing_Temperature_Gradients_Subcutaneously_in_the_Human_Body
8. León, G., Herrán, L. F., Mateos, I., Villa, E., & Ruiz-Alzola, J. B. (2020). Wideband Epidermal Antenna for Medical Radiometry. *Sensors*, 20(7), article ID 1987. <https://doi.org/10.3390/s20071987>
9. Lyu, C., Li, W., Li, S., Mao, Y., & Yang, B. (2023). Design of ultra-wideband phased array applicator for breast cancer hyperthermia therapy. *Sensors*, 23(3), article ID 1051. <https://doi.org/10.3390/s23031051>
10. Ma, M.-L., Zhao, D., Hu, Z.-J., Wang, Y., Liang, F., & Wang, B.-Z. (2024). Increasing Microwave Penetration Depth in the Human Body by a Complex Impedance Match of Skin Interface with a Two-Layered Medium. *Electronics*, 13(19), article ID 3915. <https://doi.org/10.3390/electronics13193915>
11. Maisakovskiy, R. I. (2025). *Radiotermometer antena.py* [Computer software]. GitHub. URL: <https://github.com/qroma/radiotermometer/blob/main/radiotermometer%20antena.py>
12. Maisakovskiy, R. I., & Stepanyak, M. V. (2024). Analysis of non-invasive methods for measurement of internal human body temperature. *Scientific bulletin of UNFU*, 34(5), 100–118. <https://doi.org/10.36930/40340515>
13. Maisakovskiy, R. I., & Stepanyak, M. V. (2024). Methods of non-invasive measurement of internal body temperature. Information-Measuring Technologies IVT-2024: Abstracts of the 2nd International Scientific and Practical Conference, November 13–14, 2024, Lviv (pp. 180–181). [In Ukrainian]. URL: <https://eu-conf.com/en/events/the-most-difficult-problems-of-youth-and-ways-to-solve-them>
14. Maisakovskiy, R. I., & Stepanyak, M. V. (2025). Mathematical modeling of the process of measuring human internal body temperature using a radiothermometer. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(2), 140–145. <https://doi.org/10.36930/40350216>
15. Maisakovskiy, R. I., & Stepanyak, M. V. (2025). Mathematical modeling of core body temperature measurement. Abstracts of III International Scientific and Practical Conference. Krakow, Poland, 254–258. URL: <https://eu-conf.com/en/events/the-most-difficult-problems-of-youth-and-ways-to-solve-them>

16. Ortega-Palacios, R., Trujillo-Romero, C. J., Cepeda-Rubio, M. F. J., Leija, L., & Vera Hernández, A. (2020). Heat transfer study in breast tumor phantom during microwave ablation: Modeling and experimental results for three different antennas. *Electronics*, 9(3), article ID 535. <https://doi.org/10.3390/electronics9030535>
17. Pashchenko, H. A., & Tereshchenko, M. F. (2024). Modeling the impact of laser irradiation on temperature changes in biological tissues. *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, 67(1), 96–102. [https://doi.org/10.20535/1970.67\(1\).2024.306876](https://doi.org/10.20535/1970.67(1).2024.306876)
18. Rajput, J. L., Nandgaonkar, A. B., Nalbalwar, S. L., Wagh, A. E., Munde, M. M., & Huilgol, N. G. (2021). Teeth shaped microstrip antenna for breast hyperthermia. 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 1–6. <https://doi.org/10.1109/GU-CON50781.2021.9573629>
19. Ravi, V. M., Akki, R. S., Sugumar, S., Venkata, K. C., & Arunachalam, K. (2019, March 9–15). Design and evaluation of medical microwave radiometer for measuring tissue temperature. In *Proceedings of the URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)* (pp. 1–3). IEEE. <https://doi.org/10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738630>
20. Saravanan, S., Haimavathi, K. U., & Aafizaa, K. (2025). Biomedical Antenna Design: Micro strip Patch Antennas for Wearable and Implantable Healthcare Applications-A Review. *Biomedical Materials & Devices*. <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00299-0>
21. Sun, G., Liu, J., Ma, J., Zhang, K., Sun, Z., Wu, Q., Wang, H., & Liu, Y. (2021). Design and implementation of multiband noncontact temperature-measuring microwave radiometer. *Micromachines*, 12(10), article ID 1202. <https://doi.org/10.3390/mi12101202>
22. Tian, H., ZhuGe, X., Hu, A., Dou, Q., & Miao, J. (2023). A novel noncontact Ku-band microwave radiometer for human body temperature measurements. *Progress in Electromagnetics Research*, 178, 13–36. <https://doi.org/10.2528/PIER23042501>
23. Trujillo-Romero, C. J., Leija-Salas, L., Vera-Hernández, A., Rico-Martínez, G., & Gutiérrez-Martínez, J. (2021). Double slot antenna for microwave thermal ablation to treat bone tumors: Modeling and experimental evaluation. *Electronics*, 10(7), article ID 761. <https://doi.org/10.3390/electronics10070761>
24. Villa, E., Aja, B., de la Fuente, L., Artal, E., Arteaga-Marrero, N., Ramos, G., & Ruiz-Alzola, J. (2023). Multifrequency Microwave Radiometry for Characterizing the Internal Temperature of Biological Tissues. *Biosensors*, 13(1), article ID 25. <https://doi.org/10.3390/bios13010025>
25. Vorlíček, J., Vrbová, B., & Vrba, J. (2011). Prospective applications of microwaves in medicine. In H. Gali-Muhtasib (Ed.), *Advances in cancer therapy* (pp. 507–532). InTech. <https://doi.org/10.5772/22939>

R. I. Maisakovskiy, M. V. Stepanyak

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

INFLUENCE OF ANTENNA DESIGN ON THE ACCURACY AND DEPTH OF INTERNAL BODY TEMPERATURE MEASUREMENT IN MICROWAVE RADIOTHERMOMETRY

The paper investigates the influence of antenna design on the accuracy and depth of internal body temperature measurement in microwave radiothermometry systems. A comparative analysis of the main antenna types used in medical radiothermometers – slot, patch, waveguide, and horn antennas – has been carried out. The key parameters affecting measurement quality are identified, including operating frequency range, signal penetration depth, spatial resolution, reflection coefficient, and signal losses. A mathematical model has been developed that considers the physical and technical characteristics of antennas and describes the dependence of received signal intensity on tissue depth, temperature, and absorption coefficient. The model, implemented in Python, allows simulating the detection of local thermal anomalies by different antenna types and evaluating their sensitivity to temperature variations at various depths. Additionally, the influence of antenna geometry and frequency on the stability of temperature measurements has been analyzed, which made it possible to determine optimal parameter ranges for medical applications and increase the reliability of diagnostic data. Simulation results demonstrated that frequencies between 0.3 and 1 GHz provide a greater penetration depth but lower spatial resolution, while higher frequencies between 3 and 6 GHz are more suitable for surface temperature monitoring. Horn antennas demonstrated the highest efficiency for deep-layer sensing (up to 6–7 cm), while waveguide antennas were effective for medium depths. Patch or slot antennas proved optimal for surface or portable systems. The obtained results are of practical importance for improving the design of medical radiothermometers, optimizing antenna selection for specific clinical applications, and enhancing the accuracy of non-invasive thermodiagnoses. The developed model can be used for device calibration, testing new antenna structures, developing early disease detection systems, and automating the analysis of thermal anomalies in medical diagnostic applications.

Keywords: thermography; thermal diagnostics; mathematical modeling; non-invasive monitoring; antenna systems.