



УКРАЇНА

(19) UA (11) 34877 (13) U
(51) МПК (2006)
G01K 7/30МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) РАДІОТЕПЛОВИЙ ТЕРМОМЕТР

1

2

(21) u200803898

(22) 28.03.2008

(24) 26.08.2008

(46) 26.08.2008, Бюл. № 16, 2008 р.

(72) СКРИПНИК ЮРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ, UA, ВАГАНОВ ОЛЕКСІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ, UA

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ, UA

(57) Радіотепловий термометр, що містить антену, балансний змішувач, генератор низької частоти, послідовно з'єднані вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, керуючий вхід якого з'єднаний з виходом генератора низької частоти, інтегратор і цифровий вольтметр, який відрізняється тим, що в нього додатково введені НВЧ-трансформатор, коаксіальна лінія, НВЧ-перемикач, два широкосмужових НВЧ-підсилювачі і

фільтр нижніх частот, при цьому потенціальний вихід антени з'єднаний через коаксіальну лінію з одним кінцем первинної обмотки НВЧ-трансформатора, другий кінець якої заземлений, потенціальні кінці вторинної обмотки НВЧ-трансформатора, середня точка якої заземлена, з'єднані із входами НВЧ-перемикача, вихід якого через перший широкосмужовий НВЧ-підсилювач з'єднаний з одним входом балансного змішувача, інший вхід якого через другий широкосмужовий НВЧ-підсилювач з'єднаний безпосередньо з одним із потенціальних кінців вторинної обмотки НВЧ-трансформатора, вихід балансного змішувача через фільтр нижніх частот з'єднаний із входом вибіркового підсилювача низької частоти, а керуючий вхід НВЧ-перемикача підключений до виходу генератора низької частоти.

Корисна модель відноситься до термометрії і може бути використана для дистанційного вимірювання температури нагрітих тіл по радіотепловому випромінюванню в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) за допомогою високочутливих НВЧ-приймачів.

Радіотеплові термометри на відміну від оптичних пірометрів дозволяють дистанційно контролювати температуру нагрітих тіл через непрозорі середовища. Джерелом НВЧ-випромінювання є електричні шуми теплового характеру, які властиві будь-якому нагрітому тілу, що має активний опір або діелектричні втрати. При цьому інтенсивність радіотеплового випромінювання відповідно до закону Релея-Джинса прямо пропорційна термодинамічній температурі нагрітого тіла.

Відомий радіотепловий термометр [див. Саво-теев А.В. Шумовая термометрия. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинград отд., 1987, стр. 69-70], що містить хвильоводний графітовий датчик, з'єднаний із НВЧ-змішувачем через диск, що обертається, половина якого заповнена абсорбційним матеріалом, підсилювач проміжної частоти, детектор, підсилювач низької частоти, синхронний детектор, фільтр нижніх частот і вольтметр.

НВЧ-випромінювання графітового навантаження датчика і поглинаючого матеріалу диска по

черзі з частотою обертання диска перетворюються в один модульований сигнал проміжної частоти. Виділений детектором низькочастотний сигнал огинаючої підсилюється, випрямляється та вимірюється. Покази вольтметра пропорційні температурі нагріву хвильоводного датчика. Такий термометр має невисоку чутливість, яка обмежується шириною смуги частот (Δf) пропускання підсилювача проміжної частоти ($\Delta f=4\text{ МГц}$), до того ж виникає складність розміщення хвильоводного датчика на віддаленому об'єкті.

Відомий також радіотепловий термометр [див. Патент України №52659, МПК G01K7/30, 2003 р., Бюл. №1], що містить антену, балансний змішувач, генератор низької частоти, послідовно з'єднані вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, керуючий вхід якого з'єднаний з виходом генератора низької частоти, інтегратор і цифровий вольтметр. Крім того радіотепловий термометр містить загороджуючий фільтр, НВЧ-гетеродин, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, генератор проміжної частоти, керуємих аттенуатор, амплітудний модулятор, трьохходовий циркулятор, вентиля і надвисокочастотний переривач-відбивач.

Проте і цей радіотепловий термометр має обмежену чутливість і точність. Чутливість обмежена

(19) UA (11) 34877 (13) U

малою смугою пропускання трьоххвального циркулятора і підсилювача проміжної частоти. Похибка виникає через нестабільність частоти і потужності НВЧ-гетеродина. Підвищити чутливість за рахунок передвключених НВЧ-підсилювачів нецільно через їх власні шуми, які статистично невідрізняються від шумового випромінювання, що приймається від нагрітого тіла. Стабілізувати параметри НВЧ-гетеродина важко, якщо його частота переналагоджується.

В основу корисної моделі покладена задача створити такий радіотепловий термометр, в якому шляхом введення нових елементів і зв'язків була б істотно розширена смуга шумового НВЧ-випромінювання, що приймається, і виключено вплив власних апаратних корельованих і некорельованих шумів, що забезпечить підвищення чутливості і точності радіотеплового термометра.

Поставлена задача досягається тим, що в радіотепловий термометр, що містить антену, балансний змішувач, генератор низької частоти, послідовно з'єднані вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, керуючий вхід якого з'єднаний з виходом генератора низької частоти, інтегратор і цифровий вольтметр, згідно з корисною моделлю, у нього додатково введені НВЧ-трансформатор, коаксіальна лінія, НВЧ-перемикач, два широкосмугових НВЧ-підсилювача і фільтр нижніх частот, при цьому потенціальний вихід антени з'єднаний через коаксіальну лінію з одним кінцем первинної обмотки НВЧ-трансформатора, другий кінець якої заземлений, потенціальні кінці вторинної обмотки НВЧ-трансформатора, середня точка якої заземлена, з'єднані із входами НВЧ-перемикача, вихід якого через перший широкосмуговий НВЧ-підсилювач з'єднаний з одним входом балансного змішувача, інший вхід якого через другий широкосмуговий НВЧ-підсилювач з'єднаний безпосередньо з одним із потенціальних кінців вторинної обмотки НВЧ-трансформатора, вихід балансного змішувача через фільтр нижніх частот з'єднаний із входом вибіркового підсилювача низької частоти, а керуючий вхід НВЧ-перемикача підключений до виходу генератора низької частоти.

Саме введення в схему радіотеплового термометра НВЧ-трансформатора, коаксіальної лінії, НВЧ-перемикача, двох широкосмугових НВЧ-підсилювачів, фільтру нижніх частот, з'єднаних зазначеним чином, забезпечує розщеплення шумового НВЧ-сигналу антени на дві різнополярні складові відносно заземленої середньої точки вторинної обмотки НВЧ-трансформатора, які по черзі з низькою частотою роботи НВЧ-перемикача потрапляють на вхід першого широкосмугового НВЧ-підсилювача. На вхід другого широкосмугового НВЧ-підсилювача потрапляє некомутований шумовий НВЧ-сигнал тільки з однієї половини вторинної обмотки НВЧ-трансформатора, а підсилені в широкій смузі частот шумові НВЧ-сигнали разом з власними шумами широкосмугових НВЧ-підсилювачів перемножуються в балансному змішувачі. Оскільки полярність одного з перемножуваних НВЧ-сигналів періодично змінюється, то у вихідній напрузі балансного змішувача, яка усере-

днюється фільтром нижніх частот, присутня змінна напруга низької частоти перемикачання полярності, амплітуда якої пропорційна потужності шумового НВЧ-сигналу, що приймається антенною, і не залежить від потужності власних шумів широкосмугових НВЧ-підсилювачів. Виділена вибіркового підсилювачем низькочастотною напруга синхронно детектується і усереднюється інтегратором. Постійна напруга, накопичена інтегратором, вимірюється цифровим вольтметром, покази якого пропорційні потужності НВЧ-сигналу, що приймається антенною, а, отже, і температурі нагрітого тіла. Завдяки широкій смузі частот перемножуваних НВЧ-сигналів і виключенню впливу власних шумів НВЧ-підсилювачів підвищена чутливість і точність радіотеплового термометра.

На кресленні представлена електрична функціональна схема радіотеплового термометра.

На схемі позицією 1 позначена антена, з'єднана коаксіальною лінією 2 з одним кінцем первинної обмотки 3 НВЧ-трансформатора, другий кінець якої заземлений. Потенціальні кінці вторинної обмотки 4 НВЧ-трансформатора, середня точка якої заземлена, з'єднані із входами НВЧ-перемикача 5, до виходу якого підключений входом перший широкосмуговий НВЧ-підсилювач 6. Вхід другого широкосмугового НВЧ-підсилювача 7 з'єднаний безпосередньо з одним із потенціальних кінців вторинної обмотки 4 НВЧ-трансформатора. Виходи широкосмугових НВЧ-підсилювачів 6 та 7 з'єднані із входами балансного змішувача 8, до виходу якого підключені послідовно з'єднані фільтр 9 нижніх частот, вибіркового підсилювач 10 низької частоти, синхронний детектор 11, інтегратор 13 та цифровий вольтметр 14. Керуючі входи НВЧ-перемикача 5 та синхронного детектора 11 підключені до виходу генератора 12 низької частоти.

Позицією 15 позначена оптично непрозора стінка, наприклад, з цеглини, за якою розміщено нагріте тіло 16, наприклад, пальник.

Радіотепловий термометр працює наступним чином.

Антенною 1 з симетричним вібратором приймається широкосмугове радіотеплове НВЧ-випромінювання, інтенсивність якого пропорційна термодинамічній температурі нагрітого тіла 16. Оптично непрозора стінка 15 з діелектричного матеріалу (цегла) радіопрозора в сантиметровому діапазоні НВЧ і пропускає шумове радіотеплове випромінювання нагрітого тіла. Вихідний широкосмуговий сигнал антени 1 з симетричним вібратором можна представити у вигляді комплексної ам-

плітуди \dot{E}_1 хвилі, що збуджується в антені 1 з симетричним вібратором, яка пропорційна напруженості електромагнітного поля в місці прийому.

Сигнал \dot{E}_1 потрапляє по коаксіальній лінії 2 в первинну обмотку 3 НВЧ-трансформатора, де розщеплюється у вторинній обмотці 4 НВЧ-трансформатора на два різнополярні сигнали відносно заземленої середньої точки:

$$\dot{E}_2 = K_1 \dot{E}_1, \quad (1)$$

$$\dot{E}_3 = -K_1 \dot{E}_1, \quad (2)$$

де K_1 - коефіцієнт трансформації НВЧ-трансформатора.

Розщеплені сигнали \dot{E}_2 і \dot{E}_3 потрапляють на входи НВЧ-перемикача 5, який керується напругою генератора 12 низької частоти. При безперервній роботі НВЧ-перемикача 5 на його вихід по черзі проходять пакети НВЧ-коливань з комплексними

амплітудами \dot{E}_2 і \dot{E}_3 , що мають протилежні полярності. Пакети НВЧ-коливань підсилюються першим широкодіапазонним НВЧ-підсилювачем 6 і впливають по черзі на один вхід балансного змішувача 8, на інший вхід якого впливають безперервні НВЧ-коливання з однієї частини вторинної обмотки 4 НВЧ-трансформатора відносно заземленої середньої точки. Некомутовані НВЧ-коливання

$$\dot{E}_4 = \dot{E}_2 = K_1 \dot{E}_1, \quad (3)$$

підсилюються другим широкодіапазонним НВЧ-підсилювачем 7.

Оскільки рівень радіотеплового випромінювання вельми малий (10^{-19} - 10^{-20} Вт/см·Гц), то підсилювані сигнали (1), (2) і (3) одного порядку з власними шумами широкодіапазонних НВЧ-підсилювачів 6 і 7. При низьких температурах нагрітого тіла 16 інформаційні шумові сигнали, що приймаються, виявляються навіть менше власних шумів широкодіапазонних НВЧ-підсилювачів 6 і 7. Тому підсилені шумові сигнали є аддитивною сумішшю корисного інформаційного шуму і паразитного власного шуму. Тоді з урахуванням власних шумів широкодіапазонних НВЧ-підсилювачів 6 і 7 підсилені сигнали (1), (2) і (3) представимо у вигляді суми комплексних амплітуд.

Так, при одному положенні НВЧ-перемикача 5 комплексна амплітуда результуючого сигналу на виході першого широкодіапазонного НВЧ-підсилювача 6

$$\dot{E}_5 = K_2 \cdot \left(K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п1}} \right), \quad (4)$$

де K_2 і $\dot{E}_{\text{п1}}$ - коефіцієнт підсилення і комплексна амплітуда власних шумів першого широкодіапазонного НВЧ-підсилювача 6. При другому положенні НВЧ-перемикача 5 із врахуванням (2) маємо

$$\dot{E}_6 = K_2 \cdot \left(-K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п1}} \right). \quad (5)$$

Комплексна амплітуда підсиленого сигналу (3)

$$\dot{E}_7 = K_3 \cdot \left(K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п2}} \right), \quad (6)$$

де K_3 і $\dot{E}_{\text{п2}}$ - коефіцієнт підсилення і комплексна амплітуда власних шумів другого широкодіапазонного НВЧ-підсилювача 7.

Процес змішування НВЧ-коливань в балансовому змішувачі 8 математично є результатом перемноження відповідних сигналів. Отриманий добуток шумових сигналів усереднюється фільтром 9 нижніх частот. Тому результуючу напругу на

виході фільтру 9 нижніх частот можна представити як усереднений в часі добуток комплексних амплітуд сигналів. Відповідно до цього, при одному положенні НВЧ-перемикача 5 на виході фільтру 9 нижніх частот має місце напруга

$$U_8 = K_4 S \dot{E}_5 \dot{E}_7, \quad (7)$$

де K_4 - коефіцієнт передачі фільтру 9 нижніх частот;

S - крутизна балансного змішування.

«--» - усереднювання в часі.

У іншому положенні НВЧ-перемикача 5 вихідна напруга фільтру 9 нижніх частот визначається виразом

$$U_9 = K_4 S \dot{E}_6 \dot{E}_7. \quad (8)$$

Підставивши у вирази (7) і (8) вказані співвідношення, отримаємо:

$$U_8 = SK_2 K_3 K_4 \cdot \left(K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п1}} \right) \cdot \left(K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п2}} \right), \quad (9)$$

$$U_9 = SK_2 K_3 K_4 \cdot \left(-K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п1}} \right) \cdot \left(K_1 \dot{E}_1 + \dot{E}_{\text{п2}} \right). \quad (10)$$

При перемноженні комплексних амплітуд слід врахувати характер власних шумів широкодіапазонних НВЧ-підсилювачів 6 і 7. Велика частина цих шумів між собою не корельована, оскільки процеси в двох широкодіапазонних НВЧ-підсилювачах 6 і 7 є статистично незалежними. Проте, через паразитні електричні зв'язки деяка частина шумів широкодіапазонних НВЧ-підсилювачів 6 і 7 є корельованою. Якщо усереднений добуток двох некорельованих шумів рівний нулю

$$\dot{E}_{\text{п1}} \cdot \dot{E}_{\text{п2}} = 0, \quad (11)$$

то корельовані шуми при перемноженні і усередненні дають постійну складову напруги.

Теплові шуми, що приймаються антеною 1 з симетричним вібратором, не корельовані з власними шумами широкодіапазонних НВЧ-підсилювачів 6 і 7, тому

$$K_1 \dot{E}_1 \cdot \dot{E}_{\text{п2}} = 0, \quad (12)$$

$$K_1 \dot{E}_1 \cdot \dot{E}_{\text{п1}} = 0. \quad (13)$$

В той же час розщеплені НВЧ-трансформатором шумові сигнали (1), (2) і (3) є корельованими, оскільки мають одне загальне джерело - антену 1 з симетричним вібратором. Тому постійні складові напруги від корельованих шумів, що виділяються фільтром 9 нижніх частот, представимо з урахуванням полярностей перемножуваних шумових сигналів так:

$$U_{10} = SK_2 K_3 K_4 \cdot \left(K_1^2 \dot{E}_1^2 + \dot{E}_{\text{п1}}' \cdot \dot{E}_{\text{п2}}' \right) + U_c, \quad (14)$$

$$U_{11} = SK_2K_3K_4 \cdot \left(-K_1^2 \overline{E_1^2} + \overline{E_{п1}' \cdot E_{п2}'} \right) + U_C, \quad (15)$$

де $\overline{E_{п1}'}$ і $\overline{E_{п2}'}$ - комплексні амплітуди корельованих складових власних шумів широкосмугових НВЧ-підсилювачів 6 і 7;

U_C - напруга зсуву нуля балансного змішувача 8.

Перший член у виразах (14) і (15) є величиною, пропорційною потужності прийнятого радіовипромінювання. Другий член - постійна складова напруги від взаємодії корельованих шумів широкосмугових НВЧ-підсилювачів 6 і 7, яка збільшує або зменшує напругу зсуву нуля балансного змішувача 8. Крім того на виході фільтру 9 нижніх частот присутні низькочастотні шуми, рівень яких порівняний з корисним сигналом, пропорційним потужності сигналу, що приймається.

Як видно з виразів (14) і (15), полярність напруги першого члена періодично змінюється в такт роботи НВЧ-перемикача 5, тобто змінюється з частотою генератора 12 низької частоти. Завдяки цьому з послідовності пакетів напруг U_{10} і U_{11} за допомогою вибіркового підсилювача 10 низької частоти, налагодженого на частоту генератора 12 низької частоти, виділяють і підсилюють змінну складову напруги частоти перемикача

$$U_{12} = SK_1^2K_2K_3K_4K_5 \cdot \overline{E_1^2} \sin \Omega t, \quad (16)$$

де K_5 - коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 10 низької частоти;

Q - кругова частота перемикача полярності НВЧ-сигналів.

Змінна складова напруги (16) випрямляється синхронним детектором 11, який керується безпосередньо генератором 12 низької частоти. З урахуванням частини низькочастотних шумів, що потрапляють в смугу пропускання вибіркового підсилювача 10 низької частоти, вихідну напругу синхронного детектора 11 можна представити як суму

$$U_{13} = SK_1^2K_2K_3K_4K_5K_6 \cdot \overline{E_1^2 + U_{п3}(\Delta\Omega)}, \quad (17)$$

де $\overline{U_{п3}(\Delta\Omega)}$ - середньоквадратичне значення низькочастотного шуму в смузі частот $\Delta\Omega$ вибіркового підсилювача 10 низької частоти.

За допомогою інтегратора 13 відбувається виділення постійної складової напруги з низькочастотних шумів. Тому вихідна напруга інтегратора 13

$$U_{14} = SK_1^2K_2K_3K_4K_5K_6K_7P_a, \quad (18)$$

де K_7 - коефіцієнт передачі інтегратора 13, що визначається його постійною часу;

$P_a = \overline{E_1^2}$ - потужність радіотеплового випромінювання, що приймається антеною 1 з симетричним вібратором в смузі пропускання широкосмугових НВЧ-підсилювачів 6 і 7.

Постійна напруга (18) вимірюється цифровим вольтметром 14. Результуючий коефіцієнт перетворення $K_0 = SK_1^2K_2K_3K_4K_5K_6K_7$ визначається в процесі калібрування радіотеплового термометра по відомій температурі нагрітого тіла 16. Для цього використовується високотемпературна платина -платинородієва термopapa, що знаходиться у контакті з нагрітим тілом 16. Термодинамічну температуру T_X нагрітого тіла 16 в процесі дистанційних вимірювань оцінюють за розрахунковою формулою

$$T_X = \frac{U_{14}}{K_0K_T}, \quad (19)$$

де U_{14} - напруга, що вимірюється цифровим вольтметром 14;

K_0 - результуючий коефіцієнт перетворення потужності радіотеплового випромінювання в постійну напругу;

K_T - коефіцієнт, що зв'язує потужність радіотеплового випромінювання нагрітого тіла 16 з його термодинамічною температурою. Коефіцієнт K_T розраховується відповідно до закону Релея-Джинса для діапазону НВЧ:

$$B = \frac{2\beta f^2 k T_X}{c^2}, \quad (20)$$

де B - випромінювальна здатність нагрітого тіла 16;

β - коефіцієнт випромінювання (сірості);

f - частота випромінювання, що приймається;

k - постійна Больцмана;

c - швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у вакуумі.

Потужність широкосмугового радіотеплового випромінювання, що приймається, пропорційна випромінювальній здатності B нагрітого тіла 16 на середній частоті f спектру і при ширині смуги пропускання частот Δf НВЧ-підсилювачів приймального пристрою. Відсутність гетеродина і вузькосмугового підсилювача проміжної частоти, а також періодичне перемикання полярності НВЧ-сигнала дозволяє істотно (не менше в 3-5 разів) підвищити чутливість і точність радіотеплового термометра.

Використання запропонованого радіотеплового термометра в контрольно-вимірювальній техніці дозволяє:

- дистанційно вимірювати температуру нагрітих тіл, розташованих за оптично непрозорими елементами конструкцій термічних пристроїв (печей, реакторів, теплообмінників і т.п.);

- підвищувати роздільну здатність температурних вимірювань за рахунок розширення смуги частот радіотеплового випромінювання, що приймається;

- знижувати похибки дистанційного вимірювання температури шляхом придушення впливу власних шумів апаратури як в діапазоні високих, так і низьких частот.

- визначати градієнт температур в біологічних об'єктах за рахунок внутрішніх джерел тепла, наприклад, запальних процесів.

