

Винахід відноситься до техніки вимірювань на надвисоких частотах (НВЧ) і може бути використаний для вимірювання власного електромагнітного випромінювання об'єктів різної фізичної природи в системах пасивної локації, дистанційного вимірювання температури, вимірювання властивостей матеріалів та характеристик атмосфери.

У відомому нульовому модуляційному радіометрі за перший такт комутації на вхід НВЧ-приймача надходить сигнал з виходу антени, за другий такт - сигнал з виходу еталонного генератора шуму (ГШ) [див. Патент №22888А (Україна), кл. Н04В1/10 /Макаренко О.С. Спосіб компенсації завад лінійного чотирьохполосника і пристрій для його здійснення. -Бюл. №3, 1998]. Регульованим (градуїваним) атенюатором встановлюють такий рівень шуму, при якому досягається нульове значення показника індикатора радіометра. У цьому випадку потужність НВЧ сигналу, що прийнятий антеною, дорівнює потужності еталонного ГШ на виході регульованого та градуїрованого атенюатора, а нестабільність параметрів НВЧ приймача не впливає на результат вимірювання. Але практично, через неідентичність і нестабільність параметрів ключ-модулятора та сторонньої небажаної модуляції шумів НВЧ приймача виникають похибки при вимірюванні потужності прийнятого випромінювання.

Відомий нульовий модуляційний радіометр [див. Патент №28122 (Україна), кл. G001R29/08 від 16.10.2000/ Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Нульовий модуляційний радіометр. -Бюл. №5, 2000], що містить послідовно з'єднані антену, ключ-модулятор, спрямований відгалужувач (НВ), НВЧ перемикач, НВЧ підсилювач, блок перетворення частоти з квадратичним детектором, підсилювач низької частоти (ПНЧ), синхронний детектор (СД), фільтр нижніх частот (ФНЧ) з індикатором, еталонний ГШ вихід якого через перший регульований (та градуїований) атенюатор з'єднаний із другим входом НВЧ перемикача, генератор низької частоти (ГНЧ), вихід якого з'єднаний з керуючими входами НВЧ перемикача і СД, другий ГШ, що з'єднаний через другий регульований (та градуїований) атенюатор із вторинним хвилеводом НВ та комп'ютерний блок керування.

Однак, недосконалість НВЧ перемикача, що зумовлена неідентичністю каналів передачі, електромагнітним зв'язком між каналами, несиметрією комутаційних розривів у модульованому сигналі і т.п., не дозволяє одержати високу точність вимірювання.

Найбільш близьким по суті технічного рішення є нульовий модуляційний радіометр, який взято за прототип, [див. Бережной В.А., Кужель В.И., Игнатенко В.С. и др. Высокочувствительный модуляционный радиометрический приемник диапазона частот 92...96ГГц //Технология и конструирование в электронной аппаратуре. -2003. -№3. -С.21-22], що містить антену, НВ, вхід основного хвилеводу якого з'єднаний з виходом антени, блок перетворення частоти зі змішувачем, перестроюваним по частоті гетеродином, підсилювачем проміжної частоти (ППЧ) і квадратичним детектором, які з'єднані послідовно, низькочастотний блок з ПНЧ, СД та ФНЧ, які з'єднані послідовно і індикатор, який підключений до виходу ФНЧ низькочастотного блоку, вхід якого з'єднаний з виходом квадратичного детектора блоку перетворення частоти, еталонний ГШ, регульований (та проградуїований) атенюатор, ключ-модулятор і генератор низької частоти (ГНЧ).

Крім усього, відомий пристрій містить малощумний підсилювач, НВЧ смуговий фільтр (СФ), регульовані р-і-п-атенюатори та комп'ютерний блок керування, регулюючи виходи якого з'єднані з керуючими входами р-і-п-атенюаторів.

У відомому пристрої нульовий метод вимірювання реалізується за допомогою твердотілого еталонного ГШ і керованого р-і-п-атенюатора, який включений між виходом еталонного ГШ і входом основного хвилеводу НВ.

Прийнятий антеною НВЧ сигнал через основний хвилевід НВ, ключ-модулятор надходить на гетеродинний блок перетворення частоти, де відбувається зниження частоти сигналу до рівня проміжної частоти. Через вторинний хвилевід НВ введено зашумлений сигнал, який використовується як компенсуючий для нульового режиму роботи радіометра.

У результаті періодичного вмикання ключ-модулятора сигналу, в приймальному каналі відбувається періодичне відключення входу гетеродинного блоку перетворення частоти від низькоомного виходу антени, що призводить до виникнення небажаної сторонньої модуляції шумів змішувача та гетеродина і викликає на виході радіометра появу хибного сигналу, який зміщує його нульовий показник. Для подавлення сторонньої модуляції ключ-модулятор з боку його входу і виходу розв'язують двома феритовими вентилями, що призводить до додаткових втрат вимірюваного сигналу і зниженню чутливості радіометра. Крім того, періодичні розриви вимірюваного сигналу та їх часова несиметрія викликають появу комутаційних завад, які усунути важко, і разом із залишковою сторонньою модуляцією зміщують «нуль» радіометра, що знижує точність та чутливість вимірювання слабких сигналів.

В основу винаходу поставлено задачу удосконалити нульовий модуляційний радіометр шляхом виключення періодичних розривів вимірюваного слабкого сигналу перемикачем, а також за рахунок введення нових елементів і зв'язків забезпечити нульовий режим вимірювання слабких сигналів, що дозволить підвищити точність та чутливість вимірювання параметрів слабких сигналів.

Поставлена задача досягається тим, що в нульовому модуляційному радіометрі, що містить антену, спрямований відгалужувач (НВ), вхід основного хвилеводу якого з'єднаний з виходом антени, послідовно з'єднані блок перетворення частоти, що включає послідовно з'єднані змішувач, вхід якого є входом блоку перетворення частоти, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, вихід якого є виходом блоку перетворення частоти і гетеродин, підключений до другого входу змішувача, блок низької частоти, що включає послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, синхронний детектор (СД), фільтр низької частоти, вихід якого є виходом блоку низької частоти і підключено, до входу індикатора, еталонний генератор шуму (ГШ), регульований атенюатор, перший ключ-модулятор і генератор низької частоти (ГНЧ), новим є те, що в нього введені другий ключ-модулятор, послідовно з'єднані перший та другий постійні атенюатори і третій постійний атенюатор, вихід якого підключений до входу вторинного хвилеводу НВ, вихід другого постійного атенюатора підключено до входу змішувача та через перший ключ-модулятор з'єднано зі входом другого постійного атенюатора, другий ключ-модулятор підключено між виходом еталонного ГШ і входом регульованого атенюатора, вихід якого підключено до входу третього постійного атенюатора, а прямий та інверсний виходи ГНЧ з'єднані з керуючими входами

першого та другого ключ-модуляторів і керуючими входами СД.

Введення в схему радіометра з одним ключем-модулятором нових елементів - другого ключа-модулятора і трьох постійних атенюаторів, включених зазначеним шляхом, забезпечує почергове формування двох шумових сигналів, з яких один безпосередньо вимірюється, а другий - складається з шумом від еталонного ГШ, але його ослаблено в задане число разів. З отриманого складеного сигналу після зниження його до проміжної частоти, квадратичним детектором виділяють низькочастотну напругу обвідної цього сигналу. Нульовий режим роботи радіометра при зникненні обвідної забезпечується регулюванням рівня еталонного шуму від ГШ, який є сумарний з вимірюваним шумом, рівень якого задається регульованим та проградуйованим атенюатором, вхід якого періодично вимикається другим ключ-модулятором. При цьому весь вимірюваний шум у прийомному каналі радіометра не вимикається, а тільки дещо послабляється введеними постійними атенюаторами. В результаті усунення небажаної сторонньої модуляції власних шумів радіометра і відсутності комутаційних завад, нової організації вимірювального процесу в його приймальному каналі підвищується точність і чутливість вимірювання параметрів слабких сигналів.

Сутність запропонованого винаходу пояснює графічний матеріал, на якому зображено функціональну схему нульового модуляційного радіометра.

Нульовий модуляційний радіометр містить антену 1, до виходу якої підключені послідовно з'єднані через основний хвилевід НВ 2, перший 3 та другий 4 постійні атенюатори, причому паралельно атенюатору 4 включений перший ключ-модулятор 5, блок 6 перетворення частоти, який містить з'єднані послідовно змішувач 7 з перестроюваним за частотою гетеродином 8, ППЧ 9 і квадратичний детектор 10, до виходу якого підключений блок низької частоти 11, що містить послідовно з'єднані ПНЧ 12, СД 13 і ФНЧ 14. До виходу блоку 11 підключений індикатор 15, а входом блоку 11 є ПНЧ 12. Прямий та інверсний виходи ГНЧ 16 з'єднані з керуючими входами СД 13, еталонний ГШ 17 через другий ключ-модулятор 18 з'єднаний із входом регульованого атенюатора 19, до виходу якого підключений входом третій постійний атенюатор 20, вихід якого з'єднаний із вторинним хвилеводом НВ 2, а керуючі входи ключ-модуляторів 5 і 18 з'єднані з протифазними виходами генератора 16.

Нульовий модуляційний радіометр працює таким чином.

Вимірюваний НВЧ шумовий сигнал, який прийнятий антеною 1 від досліджуваного об'єкта, через основний хвилевід НВ 2, постійні атенюатори 3 і 4 надходить на блок 6 перетворення частоти. У результаті змішування шумового сигналу в змішувачі 7 з гармонійним сигналом гетеродина 8 утворюється сигнал проміжної частоти, який виділяється і підсилюється ППЧ 9 в смузі його пропускання. Підсилений сигнал детектується квадратичним детектором 10 і усереднюється. В результаті вихідна напруга квадратичного детектора виявляється пропорційною потужності P_X прийнятого антеною 1 сигналу. Якщо всі елементи приймального тракту радіометра узгоджені між собою, то вихідна напруга U_1 квадратичного детектора 10 зв'язана з потужністю P_X лінійною залежністю

$$U_1 = S_1^2 S_2^2 K^2 P_X, \quad (1)$$

де S_1 і S_2 - коефіцієнти передач постійних атенюаторів 3 і 4;

K - загальний коефіцієнт перетворення блоку 6 перетворення частоти.

Одночасно з корисним шумовим сигналом антени 1 перетворюються і підсилюються власні шуми змішувача 7 і гетеродина 8 блоку 6 перетворення частоти, що викликає зсув перетворювальної характеристики (1) відносно нуля. Неминуча змінюваність коефіцієнта підсилення і смуги пропускання обумовлюють появу мультиплікативної похибки, яка впливає на нахил кута перетворювальної характеристики. З урахуванням похибок перетворення, залежність (1) має вигляд

$$U_2 = S_1^2 S_2^2 K_1^2 [(1 + \gamma) P_X + \Delta P], \quad (2)$$

де γ - відносна мультиплікативна похибка каналу;

ΔP - абсолютна адитивна похибка, яка приведена до входу приймального каналу.

Схема радіометра - вимірювальний цикл - працює за двома комутаційними тактами. У першому такті перший ключ-модулятор 5 замкнений, а другий ключ-модулятор 18 розімкнений. У результаті цього другий постійний атенюатор 4 закорочений, еталонний ГШ 17 відключений. Тоді напруга на виході квадратичного детектора дорівнює

$$U_3 = S_1^2 K_1^2 [(1 + \gamma_1) P_X + \Delta P_1]. \quad (3)$$

Похибка від власних шумів ΔP_1 визначається вихідним опором першого постійного атенюатора 3, а мультиплікативна γ_1 - неузгодженістю змішувача 7 з першим постійним атенюатором 3. При цьому коефіцієнт передачі другого постійного атенюатора 4 дорівнює одиниці ($S_2=1$).

В другому такті перший ключ-модулятор 5 розімкнений, другий ключ-модулятор 18 замкнений. У цьому такті шумовий сигнал від еталонного ГШ 17 починає надходити в приймальний канал радіометра через атенюатори 19, 20 і вторинний канал НВ 2. Оскільки прийнятий слабкий сигнал та шумовий сигнал еталонного генератора 17 між собою не корельовані, то на виході основного каналу НВ 2 потужності двох шумових сигналів будуть сумарними. Напруга на виході квадратичного детектора 10 набуває вигляду

$$U_4 = S_1^2 S_2^2 K_1^2 [(1 + \gamma_2)(P_X + S_3^2 S_4^2 S_5^2 P_E) + \Delta P_2], \quad (4)$$

де S_3 - коефіцієнт передачі НВ 3;

S_4 - коефіцієнт передачі третього постійного атенюатора 20;

S_5 - коефіцієнт передачі регульованого атенюатора 19;

P_E - потужність еталонного ГШ;

ΔP_2 - рівень власних шумів, обумовлений вихідним опором другого постійного атенюатора 4;

γ_2 - похибка неузгодженості змішувача 7 з другим постійним атенюатором 4.

Періодичне відмикання та замикання ключ-модуляторів 5 і 18, які керуються протифазними напругами ГНЧ 16, на виході квадратичного детектора 10 формує напругу низькочастотної обвідної

$$U_3 = \frac{U_2 - U_4}{2} \text{signsin} 2\pi Ft, \quad (5)$$

де F - частота переключення модуляторів 5 та 18;

$\text{signsin} 2\pi Ft$ - напруга обвідної відеоімпульсів (3) і (4) прямокутної форми.

Далі напруга обвідної (5) підсилюється ПНЧ 12, настроєним на частоту F , випрямляється СД 13, згладжується ФНЧ 14 та фіксується індикатором 15.

Якщо постійні атенюатори 3 і 4 вибрані однаковими ($S_1=S_2=S$), то вони мають однакові вихідні опори. Тому рівень власних шумів, коли замкнений або розімкнутий перший ключ-модулятор 5, не буде змінюватися, а отже, буде відсутня небажана стороння модуляція шуму ($\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P$). Аналогічно не змінюється і ступінь неузгодженості входу блоку перетворення частоти 6 з постійними атенюаторами 3 і 4 ($\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$).

Постійна напруга, яку фіксує індикатор 15, з урахуванням рівності адитивної та мультиплікативної складових похибок у виразах (3) та (4), набуває вигляду

$$U_6 = K_2 \frac{U_3 - U_4}{2} = 0,5 K_1^2 K_2 (1 + \gamma) \left[S_1^2 P_X - S_1^4 (P_X + S_3^2 S_4^2 S_5^2 P_E) \right] \quad (6)$$

де K_2 - коефіцієнт перетворення низькочастотної частини схеми.

Зміною ослаблення, внесеного регульованим (та проградуйованим) атенюатором 19, домагаються нульового показника індикатора 15. Прирівнявши вираз (6) нулю, одержимо

$$P_X = S_1^4 (P_X + S_3^2 S_4^2 S_5^2 P_E) \quad (7)$$

звідки потужність прийнятого сигналу дорівнює

$$P_X = \frac{S_3^2 S_4^2}{1 - S_1^2} S_5^2 P_E. \quad (8)$$

Коефіцієнти передачі постійних атенюаторів 3, 4 і 20 вибираємо такими, щоб задовольнити умові

$$\frac{S_3^2 S_4^2}{1 - S_1^2} = 1. \quad (9)$$

Тоді, з урахуванням (9), остаточно одержимо

$$P_X = S_5^2 P_E, \quad (10)$$

де S_5^2 - коефіцієнт передачі регульованого атенюатора 19 за потужністю.

З отриманого виразу (10) випливає, що вимірювана потужність P_X визначається тільки рівнем потужності еталонного ГШ 17 на виході регульованого атенюатора 19. При цьому вимірювана потужність P_X у приймальному каналі радіометра періодично не вимикається. Якщо коефіцієнти передачі однакових постійних атенюаторів 3 і 4 вибрати близькими до одиниці, то втрати корисного сигналу будуть мінімальними, на відмінність від прямих значних втрат на феритових вентилях, які застосовані в прототипі. Періодичне шунтування другого постійного атенюатора 4 першим ключ-модулятором 5 не змінює вхідного опору блоку 6 перетворення частоти, що виключає модуляцію вхідних шумів змішувача 7 і гетеродина 8, як це має місце у прототипі, де застосовані феритові вентиля.

Періодичне переривання шумового сигналу здійснюється тільки другим ключ-модулятором 18 на вході регульованого атенюатора 19, бо рівень шуму на виході еталонного ГШ 17 є набагато більшим рівня прийнятого слабого шумового сигналу ($P_E \gg P_X$), а це означає, що рівень комутаційних завад на виході НВ 2 буде вкрай малим.

Таким чином, хоча на виході антени 1 здійснюється сумарне складання двох незалежних шумових сигналів, але завдяки зазначеній послідовності роботи ключ-модуляторів 5 і 18 відбувається, відповідно до виразу (10), їх вирівнювання. За звичай, ця задача розв'язується шляхом порівняння (віднімання), що неможливо для некорельованих шумових сигналів, або заміщенням при їх переключенні. У запропонованому пристрої ця задача вирішена операцією сумування двох шумових сигналів з наступним їх ослабленням в задане число разів.

Таким чином у запропонованому пристрої вирішена задача підвищення точності вимірювання слабких шумових сигналів нульовим модуляційним методом на 25%.

Приклад

Вимірюється прийнятий антеною НВЧ сигнал з потужністю $P_X = 10^{-14}$ Вт, коли потужність еталонного ГШ складає 1 мкВт (10^{-6} Вт).

Вибираємо з урахуванням мінімального ослаблення корисного сигналу коефіцієнт передачі атенюаторів $S_1=S_2=0,95$. Тоді для задоволення умови (9) варто вибрати результуючий коефіцієнт передачі атенюатора 20 з НВ 2 через вторинний хвилевід із співвідношення

$$S_3 S_4 = \sqrt{1 - S_1^2} = 0,48.$$

Якщо вибрати НВ 2 з коефіцієнтом передачі $S_3=0,5$, то третій постійний атенюатор 20 повинен мати коефіцієнт передачі $S_4 \approx 0,95$.

У такий спосіб усі три постійні атенюатори (3, 4 і 20) мають мале послаблення (коефіцієнт передачі близький до одиниці) і виконують роль елементів, що узгоджують тракт-антена-суматор (атенюатори 3 та 4)-блок

перетворення частоти та тракт-еталонний ГШ-регульований атенюатор-суматор (атенюатори 3 та 4)-блок перетворення частоти. За ключ-модулятори доцільно використовувати р-і-п-атенюатори, що працюють у ключовому режимі, а інші елементи - від радіометрів, що випускаються серійно.

Тобто сукупність та послідовність вимірювальних операцій та введення додаткових елементів та нових зв'язків у запропонованому нульовому модуляційному радіометрі забезпечує досягнення можливості вимірювання слабких сигналів на рівні 10^{-14} Вт з підвищеною на 30% чутливістю та підвищеною на 25% точністю, ніж це має прототип.

