

Винахід відноситься до пасивної радіолокації, а саме до техніки виміру потужності слабких шумових сигналів у діапазоні надвисоких частот (НВЧ), і може бути використаний в радіоастрономії, радіометеорології, радіогеодезії і медицині.

Відомі радіометри модуляційного типу (див. Есепкіна Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М: Наука, 1979, С. 258) які містять, як правило, два вхідних канали - канал антени і канал опорного сигналу, які через два НВЧ - ключі, що працюють у протифазі, підключені до одного приймача.

У приймачі радіометру сигнал антени і сигнал опорного каналу по черзі підсилюються одним НВЧ підсилювачем з великим коефіцієнтом підсилення, щоб забезпечити квадратичне детектування модульованого сигналу. Однак у діапазоні край високих частот (30-300 ГГц) важко виконати приймач прямого підсилення з великим коефіцієнтом підсилення, особливо на транзисторах. Тому використовують приймачі радіометрів з гетеродинним перетворенням частоти, у яких по чергово посилення сигналів здійснюється на відносно низькій проміжній частоті (див. Скрипник Ю.О., Манойлов В.П., Яненко О.П., Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ - діапазону - Житомир: ЖІТІ, 2001, С.173).

Для виключення впливу власних шумів вхідної антени в опорному каналі використовують еталонне навантаження, шумова характеристика якого еквівалентна аналогічній характеристиці антени. У цьому випадку сигнал від антени на виході квадратичного детектора приймача віднімається із сигналу від еталонного навантаження і підсилювач частоти модуляції підсилює тільки прийнятий антеною зовнішній шумовий сигнал. Однак на частотах понад 50-60 ГГц через вплив розподілених ємностей і індуктивностей важко виконати еталонне резистивне навантаження, еквівалентне антені. Крім того, через неідентичність коефіцієнтів передачі і відбиття двох НВЧ - ключів і паразитного зв'язку між каналами виникає велика похибка виміру потужності прийнятого сигналу.

Відомий модуляційний гетеродинний радіометр (див. Авт. свид. СРСР №1553924, МПК G01R29/08, 1984, бюл. №12, 1990), що містить з'єднані послідовно антену, комутатор, змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, підсилювач низької частоти, синхронний детектор і інтегратор, при цьому до другого входу комутатора підключений генератор шуму через атенуатор, керуючий вхід якого з'єднаний з виходом інтегратора, і гетеродин, вихід якого підключений до другого входу змішувача, а генератор низької частоти з'єднаний з керуючими входами комутатора і синхронного детектора.

Роль еталонного навантаження виконує атенуатор, що живиться генератором шуму, рівень якого встановлюють відповідно рівню шумів приймальної антени. Однак необхідність у комутаторі, що складається з двох НВЧ - ключів, не дозволяє виключити похибку від паразитного міжканального зв'язку і неідентичності параметрів двох ключів.

Відомий також модуляційний гетеродинний радіометр (див. Патент України №26122, МПК G01R29/08, 1998, Бюл. №5, 2000), що містить НВЧ - антену, НВЧ - ключ, підключений до виходу антени, послідовно з'єднані НВЧ - змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, перший фільтр нижніх частот, вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, другий фільтр нижніх частот і реєстратор, генератор низької частоти, з'єднаний виходом з керуючими входами НВЧ - ключа і синхронного детектора, НВЧ - гетеродин, дільник НВЧ - потужності, спрямований відгалужувач і атенуатор.

Крім того, він містить другі комутатор, синхронний детектор, підсилювач низької частоти, два інтегратори, два генератори НВЧ - шуму, електричне керовані атенуатори, двоканальний аналого-цифровий перетворювач, мікро-ЕОМ із дисплеєм і цифро-аналоговий перетворювач. При цьому входи двоканального аналого-цифрового перетворювача підключені до виходів першого і другого інтеграторів, а виходи підключені до входу мікро-ЕОМ, перший вихід якої через цифро-аналоговий перетворювач з'єднаний з керуючим входом атенуатора, другий підключений до дисплея.

Наявність у схемі модуляційного радіометру генератора НВЧ - шуму, сигнал від якого періодично надходить на вхід приймача, дозволяє компенсувати власні шуми НВЧ - антени і вхідного хвилеводу, однак немінуча нерівномірність спектральної потужності шумового сигналу генератора НВЧ - шуму викликає похибку виміру потужності прийнятого НВЧ - сигналу при перебудові частоти НВЧ - гетеродина. Це зв'язано з тим, що в смугу пропущення підсилювача проміжної частоти при зміні частоти НВЧ - гетеродина попадає вже інший компенсуючий сигнал від сусідньої ділянки спектральної характеристики генератора НВЧ - шуму, не еквівалентний потужності власного шуму антени. Крім того, у відомому радіометрі використаний комутатор із двох НВЧ - ключів, що викликає немінучі похибки від неідентичності параметрів ключів і паразитних зв'язків між ними.

В основу винаходу покладена задача створення такого модуляційного гетеродинного радіометру, в якому введенням нових елементів і зв'язків забезпечувалось би підвищення точності і чутливості вимірів слабких шумових сигналів у широкому діапазоні частот.

Поставлена задача вирішується тим, що в модуляційний гетеродинний радіометр, що містить НВЧ - антену, НВЧ - ключ, підключений до виходу антени, послідовно з'єднані НВЧ - змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, перший фільтр нижніх частот, вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, другий фільтр нижніх частот і реєстратор, генератор низької частоти, з'єднаний виходом з керуючими входами НВЧ - ключа і синхронного детектора, НВЧ - гетеродин, дільник НВЧ - потужності, спрямований відгалужувач і атенуатор, згідно з винаходом, в нього введені керований підсилювач проміжної частоти, диференціальний підсилювач, джерело стабілізованої постійної напруги, НВЧ - балансовий модулятор і вентиль, який виходом підключений до входу НВЧ - змішувача, другий вхід якого підключений до виходу НВЧ - гетеродина через одне плече дільника НВЧ - потужності, друге плече якого з'єднано із сигнальним входом НВЧ - балансового модулятора, модулюючий вхід якого підключений до виходу підсилювача проміжної частоти через атенуатор і керований підсилювач проміжної частоти, керуючий вхід якого з'єднаний з виходом диференціального підсилювача, один вхід якого з'єднаний з виходом джерела стабілізованої постійної напруги, другий вхід підключений до виходу першого фільтра нижніх частот, а вихід НВЧ - балансового модулятора з'єднаний із відгалужуючим плечем спрямованого відгалужувача, включеного між НВЧ - ключем і входом вентиля.

Введення в схему модуляційного гетеродинного радіометру керованого підсилювача проміжної частоти,

диференціального підсилювача, джерела стабілізованої постійної напруги, НВЧ - балансового модулятора і вентиля, включених зазначеним образом, забезпечує формування компенсуючого шумового сигналу безпосередньо з НВЧ - сигналу і гетеродина, що перебуває по частоті, шляхом балансової модуляції його шумовим сигналом проміжної частоти і подачі модульованого сигналу на вихід НВЧ - ключа антени через спрямований відгалужувач. Введений у приймач додатковий модульований сигнал змішується з НВЧ - сигналом гетеродина й в результаті утворюється компенсуючий сигнал проміжної частоти, діючий у моменти відключення антени від входу приймача. У результаті вплив власних шумів антени на приймач врівноважується дією додаткового модульованого сигналу, який формується на виході НВЧ - балансового модулятора і вводиться в тракт приймача спрямованим відгалужувачем коли НВЧ - ключ закритий. Це забезпечує підвищення точності і чутливості вимірів вхідних сигналів за рахунок виключення впливу власних шумів антени і вхідних елементів прийомного тракту на значення прийнятого сигналу незалежно від частоти гетеродина.

На кресленні представлена функціональна схема модуляційного гетеродинного радіометру.

Радіометр містить НВЧ - антену 1 до якої підключені послідовно з'єднані НВЧ - ключ 2, спрямований відгалужувач 3, вентиль 4, НВЧ змішувач 5, підсилювач 6 проміжної частоти, квадратичний детектор 7, перший фільтр 8 нижніх частот, вибіркового підсилювач 9 низької частоти, синхронний детектор 10, другий фільтр 11 нижніх частот і реєстратор 12. Генератор 13 низької частоти з'єднаний з керуючими входами НВЧ - ключа 2 і синхронного детектору 10, НВЧ - гетеродин 14 через дільник НВЧ - потужності 15 з'єднаний із другим входом НВЧ - змішувача 5 і сигнальним входом НВЧ - балансового модулятора 16, модулюючий вхід якого через атенуатор 17 і регульований підсилювач 18 проміжної частоти з'єднаний з виходом підсилювача 6 проміжної частоти. До керуючого входу регульованого підсилювача 18 проміжної частоти підключений вихід диференціального підсилювача 19, один вхід якого з'єднаний з виходом джерела 20 стабілізованої постійної напруги, а інший вхід з'єднаний з виходом першого фільтра 8 нижніх частот.

Модуляційний гетеродинний радіометр працює таким чином.

Шумовий сигнал, прийнятий НВЧ - антеною 1, через відкритий НВЧ - ключ 2, спрямований відгалужувач 3 і вентиль 4 надходить на НВЧ - змішувач 5, на другий вхід якого безупинно надходить монохроматичний (гармонійний) сигнал гетеродина 14 через дільник потужності 15. У результаті змішування гармонійного сигналу частоти ω_{Γ} і шумового сигналу із суцільним спектром ω_i утворюються сигнали різницевої (проміжної) частоти $\omega_{\Gamma} - \omega_i$. У смузі пропускання $\Delta\omega_p$ підсилювача 6 проміжної (різницевої) частоти попадають перетворені по частоті складові прийнятого шумового сигналу, що зміщені щодо частоти гетеродина ω_{Γ} на значення проміжної частоти ω_p нагору і вниз по осі частот;

$$\begin{aligned}\Delta\omega_i' &= \omega_{\Gamma} + \omega_p \pm \Delta\omega_p, \\ \Delta\omega_i'' &= \omega_{\Gamma} - \omega_p \pm \Delta\omega_p.\end{aligned}\quad (1)$$

У результаті змішування складових спектра (1) із сигналом гетеродина утворюються низькочастотні сигнали різницевої частоти, що підсилювачем 6 проміжної частоти виділяються у вигляді вузькосмугового шумового сигналу. Дисперсія шумового сигналу буде визначатись подвоєнням значенням квадратів складових спектра смуг $\Delta\omega_i'$ і $\Delta\omega_i''$:

$$\overline{U}_i^2 = 2K_1 S_1 \int_0^{\Delta\omega_p} U_x^2(\omega_i) U_{\Gamma}^2 d\omega \quad (2)$$

де K_1 - коефіцієнт підсилення підсилювача проміжної частоти по потужності;

S_1 - крутість перетворення НВЧ - змішувача;

U_x^2 - потужність спектральних складових прийнятого антеною сигналу;

U_{Γ}^2 - потужність сигналу гетеродина.

Крім корисного сигналу (2) на виході підсилювача 6 проміжної частоти буде присутній вузькосмуговий шум, як результат частотного перетворення власного НВЧ - шуму змішувача із сигналом гетеродина плюс власні шуми підсилювача. Буде також присутній паразитний сигнал від шумів антени і вхідних елементів прийомного тракту. Додатково на вхід прийомного тракту надходить модульований НВЧ - сигнал через спрямований відгалужувач 3. Останній формується з гармонійного сигналу гетеродина 14, що через дільник НВЧ - потужності 15 надходить на

НВЧ - балансовий модулятор 16, де модулюється вузькосмуговим шумовим сигналом проміжної частоти ω_p зі смугою $\Delta\omega_p$. Для цього використовується шумовий сигнал підсилювача 6 проміжної частоти, стабілізований регульованим підсилювачем 16 проміжної частоти й ослаблений до необхідного рівня атенуатором 17. У результаті балансової модуляції утвориться двосмуговий НВЧ - сигнал з частотним спектром, аналогічним (1). Однак при зазначеній спрямованості відгалужувача 3 і відкритому НВЧ - ключі 2 додатковий сигнал у радіометр не попадає, а надходить в антену і розсіюється в навколишньому просторі. Тому в радіометр надходить корисний прийнятий сигнал, шумовий сигнал антени і сигнал, обумовлений власними шумами приймача радіометра. Зазначені складові результуючого шумового сигналу між собою не корельовані, тому його дисперсія буде дорівнювати сумі дисперсій зазначених складових.

З урахуванням цих складових вузькосмуговий шумовий сигнал, що надходить на вхід квадратичного детектора 7, буде мати вид:

$$\bar{U}_2^2 = 2K_1 S_1 S_2 \int_0^{\Delta\omega_p} [U_x^2(\omega_i) + U_p^2(\omega_i) + U_a^2(\omega_i)] U_F^2 d\omega \quad (3)$$

де S_2 - чутливість квадратичного детектора;

$U_p^2(\omega_i)$ - потужність спектральних складових власних шумів радіометра;

$U_a^2(\omega_i)$ - потужність спектральних складових шумів антени і вхідних елементів НВЧ - тракту.

У результаті квадратичного детектування на виході фільтра 8 нижніх частот формується відеоімпульс з амплітудою

$$U_3 = 2K_1 K_2 S_1 S_2 (\bar{U}_x^2 + \bar{U}_p^2 + \bar{U}_a^2) U_F^2 \quad (4)$$

де K_2 - коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот 8;

\bar{U}_x^2 , \bar{U}_p^2 , \bar{U}_a^2 - потужності корисного сигналу, шумів радіометра і шумів антени в смузі прийому гетеродинного радіометра.

У модуляційному радіометрі НВЧ - ключ 2 керується напругою генератора 13 низької частоти, що обумовлює періодичне відкривання і закривання ключа. У напівперіод комутації ключа, коли ключ 3 закритий, сигнал антени 1 відбивається від закритого ключа і на приймач радіометра не надходить. У той же час модульований сигнал, що вводиться в прийомний тракт спрямованим відгалужувачем 3, відбивається від закритого ключа і надходить на НВЧ - змішувач 5. Після гетеродинного перетворення підсилювачем 6 проміжної частоти виділяється додатковий вузькосмуговий шумовий сигнал, аналогічний (2). На вхід квадратичного детектора 7 тепер буде впливати сигнал із сумарною дисперсією;

$$\bar{U}_4^2 = 2K_1 S_1 S_2 \int_0^{\Delta\omega_p^2} [U_p^2(\omega_i) + \alpha U_\delta^2(\omega_i)] U_F^2 d\omega \quad (5)$$

де α - ослаблення, внесені атенюатором 17 по потужності;

$U_\delta^2(\omega_i)$ - потужність спектральних складових додаткового сигналу, що попадає в приймач радіометра.

Відповідно до цього напівперіоду комутації амплітуда відеоімпульсу на виході фільтра 8 нижніх частот

$$U_5 = 2K_1 S_1 S_2 (U_p^2 + \alpha \bar{U}_\delta^2) U_F^2 \quad (6)$$

При періодичній роботі НВЧ - ключа 2 вибірково підсилювачем 9 низької частоти буде виділятися і підсилюватися напруга огинаючої відеоімпульсів (4) і (6). Якщо низька частота переключень НВЧ - ключа Ω , то низькочастотну напругу, посилену вибірково підсилювачем 9, можна представити як

$$U_6 = K_3 \frac{U_3 - U_5}{2} \cos(\Omega t + \Phi) + \Delta U(t) \quad (7)$$

де K_3 - коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача;

Φ - фаза огинаючої відеоімпульсів;

$\Delta U(t)$ - напруга низькочастотних шумів, що попадають у смугу пропускання вибіркового підсилювача.

Підсилена напруга (7) випрямляється синхронним детектором 10, що керується безпосередньо напругою генератора 13 низької частоти, і згладжується фільтром 11 нижніх частот. При досить великій постійній частоті фільтра нижніх частот шуми $\Delta U(t)$ шляхом усереднення придушуються, а постійна напруга що реєструється з урахуванням виразів (4) і (6)

$$U_7 = 2K_1 K_2 K_3 K_4 S_1 S_2 (\bar{U}_x^2 + \bar{U}_p^2 + \alpha \bar{U}_\delta^2) U_F^2 \quad (8)$$

де K_4 - коефіцієнт передачі фільтра 11 нижніх частот.

Для повного виключення впливу шумів антени і фону радіовипромінювання на покази радіометру проводять операцію калібрування. НВЧ антenu 1 направляють не на досліджуваний об'єкт, а на нейтральне фон, на якому можна вважати, що корисний сигнал відсутній ($U_x = 0$), тоді зміною послаблення α атенюатора 17 домагаються нульового показання реєстратора 12. Дорівнюючи вираз (8) нулю, одержуємо умову компенсації

$$\alpha = \frac{\bar{U}_a^2}{\bar{U}_\delta^2} \quad (9)$$

При перебудові частоти гетеродина 14 умова (9) не порушується, тому що компенсуючий сигнал U_δ , формується безпосередньо із сигналу того ж гетеродина і шумів проміжної частоти ($\omega_p = \text{const}$). Для стабілізації

рівня шумів у смузі $\Delta\omega_p$ напруга з виходу підсилювача 6 проміжної частоти стабілізуються підсилювачем 18 з автоматичним регулюванням підсилення. Для цього постійна складова напруги з виходу фільтра 8 нижніх частот порівнюється з опорною стабілізованою постійною напругою джерела 20. Різницева напруга, формована диференціальним підсилювачем 19, змінює коефіцієнт підсилення додаткового підсилювача 18 проміжної частоти. У результаті автоматичного регулювання коефіцієнта підсилення сигнал проміжної частоти на вході атенюатора 17 залишається практично постійним при змінах рівня потужності вихідного сигналу основного підсилювача 6 проміжної частоти.

Після проведення калібрування радіометра антenu 1 направляють на досліджуваний об'єкт і реєструють прийняте випромінювання незалежно від рівня власних шумів антени і самого радіометру. У результаті цього підвищується точність і чутливість вимірів слабких шумових сигналів у широкому частотному діапазоні,

Приклад.

Підсилювач проміжної частоти виконаний на частоту 200МГц зі смугою пропускання 50МГц і коефіцієнтом підсилення ~80дБ. Квадратичний детектор зроблений на тунельному діоді типу ГИ401А з використанням зворотної ділянки вольтамперної характеристики і має чутливість по входу 5-10мкВт. У якості НВЧ-ключа використаний стандартний хвилеводний модулятор типу Н347, виконаний на варакторних діодах (p-i-n - діодах).

Завдяки компенсації впливу власних шумів антени і відних хвиеводних елементів сигналом НВЧ - гетеродина, промодульованим шумовою напругою проміжної частоти, зареєстровано власне електромагнітне випромінювання людини. Інтенсивність електромагнітного випромінювання в діапазоні міліметрових хвиль з біологічно активних зон (БАЗ) виявилася в межах 10^{-20} - 10^{-21} Вт/(Гц*см²), а її конкретні значення використовувалися для діагностики стану здоров'я.

