

Винахід належить до галузі вимірювання електромагнітного випромінювання біологічних об'єктів у діапазоні надзвичайно високих частот (НЗВЧ) і може бути використаний для реєстрації як власного випромінювання біологічних об'єктів, так і залежності інтенсивності власного випромінювання від внутрішніх та зовнішніх факторів, рівня зовнішнього опромінювання цих об'єктів шумовим сигналом НЗВЧ-діапазону, а також для оцінки поглинальної та відбивної здатності біологічних об'єктів залежно від інтенсивності зовнішнього опромінювання.

Медико-біологічні дослідження показали, що взаємодія нетеплового (низькоінтенсивного) випромінювання міліметрових хвиль з біологічними об'єктами має нелінійний характер (див. Петросян В.Н., Гуляев Ю.В., Житнева Э.А. и др. Взаимодействие физических и биологических объектов с электромагнитным излучением КВЧ-диапазона // Радиотехника и электроника. – 1995. - Т. 40. - Вып. 1). Эффект впливу на об'єкт має частотно-залежний характер, спостерігається порогове значення взаємодіючої потужності.

Радіотеплове випромінювання людини фіксують за допомогою НВЧ-радіометрів з флуктуаційною чутливістю $\sim 10^{-22}$ Вт/Гц·см² (див. Сітько С.П., Яненко О.П. Прямая реєстрація нерівноважного електромагнітного випромінювання людини в мм-діапазоні // Фізика живого. - 1997. - Т. 5. - № 2. - С. 60).

Відомий нульовий модуляційний радіометр (див. Есепкин Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. - М.: Наука, 1973. - С. 257-258, рис. 156а), виконаний за схемою одноканального комутаційного перетворення, який містить антену, еквівалент антени (генератор еквівалентного шуму антени), комутатор, приймач, що має у своєму складі НВЧ-підсилювач, НВЧ-змішувач, підсилювач проміжної частоти, квадратичний детектор, підсилювач низької частоти, синхронний детектор, генератор опорної частоти, вихід якого з'єднаний з керуючим входом синхронного детектора та комутатора, а другий вхід якого з'єднаний з генератором еталонного шуму.

Недоліком нульового модуляційного радіометра є низька точність вимірювання НВЧ-випромінювання через частотну залежність коефіцієнта пропускання елементів хвилевидного тракту, яке призводить до виникнення сигналу помилки на виході радіометра.

Відомий також нульовий модуляційний радіометр по а.с. СРСР № 1553924, кл. G01R 29/08, 1984 (Б.И. №12, 1990), який містить НВЧ-антену, послідовно з'єднані перший комутатор, НВЧ-підсилювач, НВЧ-змішувач, підсилювач проміжної частоти, амплітудний детектор, перший підсилювач низької частоти і перший синхронний детектор, перший генератор опорної частоти, вихід якого сполучено з керуючим входом першого комутатора і другим входом першого синхронного детектора, гетеродин, вихід якого приєднано до другого входу НВЧ-змішувача, послідовно з'єднані перший генератор шуму та перший електрично керований атенюатор, перший інтегратор, вихід якого сполучено з керуючим входом першого електрично керованого атенюатора, другі - комутатор, синхронний детектор та генератор опорної частоти, вихід якого з'єднаний з керуючим входом другого комутатора та другим входом другого синхронного детектора.

Окрім того, радіометр містить третій амплітудний детектор, другий вхід якого приєднаний до виходу другого генератора опорної частоти, вихід третього синхронного детектора через перший інтегратор сполучений з керуючим входом першого атенюатора, вихід першого генератора опорної частоти з'єднаний з керуючим входом гетеродина.

Позитивним у відомому радіометрі є незалежність вихідного сигналу третього синхронного детектора від частотної нерівномірності хвилевидного тракту.

Однак відомий нульовий модуляційний радіометр може тільки приймати власне випромінювання об'єктів та порівнювати його за інтенсивністю з шумовим сигналом вмонтованого генератора шуму. Це обумовлено тим, що генератор шуму за допомогою вхідного комутатора періодично приєднується до ЗВЧ-підсилювача приймального тракту та повністю роз'єднаний з ЗВЧ-антенною.

Задачею винаходу є створення такого нульового модуляційного радіометра, в якому за рахунок введення в його структурну схему нових блоків і зв'язків можна було б роздільно вимірювати інтенсивність власного випромінювання біологічного об'єкта та відбитого випромінювання залежно від потужності зовнішнього електромагнітного сигналу або інших факторів.

Поставлена задача вирішується тим, що у нульовий модуляційний радіометр, який містить НВЧ-антену, послідовно з'єднані перший комутатор, НВЧ-підсилювач, НВЧ-змішувач, підсилювач проміжної частоти, амплітудний детектор, перший підсилювач низької частоти і перший синхронний детектор, перший генератор опорної частоти, вихід якого сполучено з керуючим входом першого комутатора і другим входом першого синхронного детектора, гетеродин, вихід якого приєднано до другого входу НВЧ-змішувача, послідовно з'єднані перший генератор шуму та перший електрично керований атенюатор, перший інтегратор, вихід якого сполучено з керуючим входом першого електрично керованого атенюатора, другі — комутатор, синхронний детектор та генератор опорної частоти, вихід якого з'єднаний з керуючим входом другого комутатора та другим входом другого синхронного детектора, згідно з винаходом, введені подільник потужності, перший та другий спрямовані відгалужувачі, другі - підсилювач низької частоти, інтегратор, електрично керований атенюатор і генератор шуму, третій електрично керований атенюатор, двоканальний аналого-цифровий перетворювач, мікроЕОМ з дисплеєм, цифро-аналоговий перетворювач та фільтр нижніх частот, вхід якого з'єднаний з виходом першого синхронного детектора, а вихід - з входом першого інтегратора і з входом другого підсилювача низької частоти, вихід якого з'єднаний з входом другого синхронного детектора, вихід якого через другий інтегратор сполучено з керуючим входом другого атенюатора, вхід якого з'єднаний з другим плечем подільника потужності, вхід якого через третій атенюатор з'єднаний з виходом другого комутатора, перший вхід якого сполучено з виходом другого генератора шуму, а другий вхід - з еквівалентним навантаженням, перше плече подільника потужності з'єднане з входом

першого спрямованого відгалужувача, увімкненого між виходом НВЧ-антени та першим входом першого комутатора, вихід другого атенюатора сполучено з входом другого спрямованого відгалужувача, який включено між виходом першого атенюатора та другим входом першого комутатора, входи двоканального аналого-цифрового перетворювача, підключені до виходів першого та другого інтеграторів, а виходи приєднані до мікроЕОМ, перший вихід якої через цифро-аналоговий перетворювач приєднаний до керуючого входу третього атенюатора, а другий - до входу дисплея.

Завдяки введенню в схему нульового модуляційного радіометра двох спрямованих відгалужувачів, подільника потужності, двох додаткових атенюаторів, другого генератора шуму і комутатора та інших елементів з'явилася можливість одночасно приймати сигнали, обумовлені власним електромагнітним випромінюванням біологічного об'єкта та властивістю об'єкта поглинати або відбивати зовнішнє опромінювання у НЗВЧ-діапазоні.

Розподіл постійної та змінної складової сигналу на виході першого синхронного детектора за допомогою першого інтегратора та другого підсилювача низької частоти, використання другого інтегратора для управління атенюатором у мережі другого спрямованого відгалужувача дало можливість за сигналом управління першого атенюатора визначати інтенсивність власного випромінювання об'єкта, а за сигналом управління другим атенюатором — інтенсивність зовнішнього відбитого або поглинутого випромінювання. Приєднання виходів інтеграторів через двоканальний аналого-циф-ровий перетворювач до мікроЕОМ, вихід якої через цифро-аналоговий перетворювач з'єднаний із керуючим входом третього атенюатора забезпечило синхронну зміну рівня опромінювання біологічного об'єкта з часом реєстрації двох керуючих сигналів, що дало змогу роздільно вимірювати і реєструвати інтенсивності власного випромінювання об'єкта та відбитого випромінювання залежно від потужності зовнішнього електромагнітного опромінювання.

На кресленні наведена структурна схема нульового модуляційного радіометра.

Нульовий модуляційний радіометр містить надвисокочастотну антену 1, перший спрямований відгалужувач 2, перший комутатор 3, НВЧ-підсилювач 4, НВЧ-змішувач 5, гетеродин 6, перший генератор 7 опорної частоти, підсилювач проміжної частоти (ППЧ) 8, амплітудний детектор (АД) 9, перший підсилювач низької частоти (ПНЧ) 10, перший синхронний детектор 11, фільтр низьких частот (ФНЧ) 12, перший інтегратор 13, другий спрямований відгалужувач 14, перший електрично керований атенюатор 15, перший генератор шуму 16, другий ПНЧ 17, другий СД 18, другий інтегратор 19, другий електрично керований атенюатор 20, подільник потужності 21, третій електрично керований атенюатор 22, аналого-цифровий перетворювач 23, другий генератор 24 опорної частоти, другий комутатор 25, еквівалентне навантаження 26, другий генератор шуму 27, мікроЕОМ 28, цифро-аналоговий перетворювач 29 та дисплей 30.

НВЧ-антена 1 через спрямований відгалужувач 2 з'єднана з першим входом комутатора 3, до виходу якого приєднані послідовно сполучені НВЧ-підсилювач 4, НВЧ-змішувач 5 з гетеродином 6, ППЧ 8, АД 9, ПНЧ 11 і ФНЧ 12. До виходу ФНЧ 12 приєднано інтегратор 13, виходом сполучений з керуючим входом 15 першого електрично керованого атенюатора, який включено між спрямованим відгалужувачем 14 та генератором шуму 16. До виходу ФНЧ 12 увімкнені також послідовно з'єднані ПНЧ 17, СД 18 та інтегратор 19.

Вихід інтегратора 19 з'єднаний з керуючим входом атенюатора 20, до другого входу якого приєднані послідовно сполучені подільник потужності 21, атенюатор 22 та комутатор 25, один вхід якого підключено до еквівалентного навантаження 26, а другий вхід - до генератора шуму 27.

Керуючий вхід комутатора 3 та другий вхід СД 11 приєднані до виходу генератора 7 першої опорної частоти, а керуючий вхід комутатора 25 та другий вхід СД 18 — до виходу генератора 24 другої опорної частоти. Вхід спрямованого відгалужувача 2 приєднано до плеча подільника потужності 21, а вхід спрямованого відгалужувача 14 - до виходу атенюатора 20.

Вихід спрямованого відгалужувача 14 з'єднано з другим входом комутатора 3. Виходи інтеграторів 13 та 19 через двоканальний аналого-циф-ровий перетворювач 23 сполучені з мікроЕОМ 28, перший вихід якої через цифро-аналоговий перетворювач підключено до керуючого входу атенюатора 22, а другий - до дисплея 30.

Нульовий модуляційний радіометр працює так.

Генератор 7 першої опорної частоти формує низькочастотний сигнал прямокутної форми частотою F_1 , який керує першим комутатором 3 та першим синхронним детектором 11. При перемиканні комутатора вхід НВЧ-підсилювача 4 періодично приєднується до виходу антени 1 через спрямований відгалужувач 2 або до виходу першого шумового генератора 16 через спрямований відгалужувач 14 та перший атенюатор 15. Генератор 24 другої опорної частоти F_2 також формує сигнал низької частоти прямокутної форми, причому $F_2 < F_1$, який керує другим комутатором 25 та другим синхронним детектором 18. Тривалість інтервалу, протягом якого другий генератор шуму 27 приєднано до спрямованого відгалужувача 2 та 14 через атенюатори 20 і 22 у декілька разів перевищує інтервал часу приєднання першого генератора шуму 15 до НВЧ підсилювача 4.

Розглянемо роботу нульового модуляційного радіометра, насамперед, з підключенням генератора шуму 27 та періодичною роботою першого комутатора. У напівперіод комутації $\Delta t_1 = 1/2 F_1$, коли увімкнена антена 1, досліджуваний об'єкт опромінюється сигналом генератора шуму 27, який підводиться до антени через спрямований відгалужувач 2. На вхід НВЧ-підсилювача 4 надходить шумовий сигнал власного опромінювання біологічного об'єкта та шумовий сигнал генератора 27, відбитий від цього об'єкта. З урахуванням власних шумів радіометра, зведених до входу НВЧ-підсилювача 4, дисперсія підсиленого сигналу

$$\bar{U}_{41}^2 = K_1(\bar{U}_1^2 + K_2 K_3 R \bar{U}_2^2 + \bar{U}_3^2), \quad (1)$$

де K_1 , - коефіцієнт підсилення НВЧ-підсилювача 4 за потужністю;

$K_2 K_3$ - коефіцієнти передачі атенюатора 22 та спрямованого відгалужувача 2 за потужністю;

\bar{U}_1^2 - дисперсія сигналу власного випромінювання об'єкта;

\bar{U}_2^2 - дисперсія сигналу генератора шуму 27;

\bar{U}_3^2 - дисперсія власних шумів радіометра, зведених до його входу;

R - коефіцієнт відбиття об'єкта.

У наступний напівперіод комутації $\Delta t_2 = \Delta t_1 = 1/2 F_1$ на вхід НВЧ-підсилювача 4 надходить сигнал від генератора шуму 16 через атенюатор 15 та сигнал генератора шуму 27 через спрямований відгалужувач 14. Дисперсія сигналу на виході підсилювача 4

$$\bar{U}_{42}^2 = K_1(K_2 K_4 K_5 \bar{U}_2^2 + K_6 \bar{U}_5^2 + \bar{U}_3^2), \quad (2)$$

де K_4, K_5, K_6 - коефіцієнти передачі атенюатора 20 та 15 і спрямованого відгалужувача 14 за потужністю;

\bar{U}_5^2 - дисперсія сигналу генератора шуму 16.

Сигнали з дисперсіями (1) та (2) по чергово надходять на НВЧ-змішувач 5, на другий вхід якого подається сигнал гетеродина 6. Підсилювачем проміжної частоти 8 із вихідного спектра змішувача 5 подається сигнал у смузі частот Δf_2 . На виході амплітудного детектора 9 за декілька періодів комутації формується сигнал, постійна складова якого пропорційна сумарній потужності (1) та (2). Змінна складова сигналу є періодичною функцією з частотою F_1 , амплітуда якої визначається різницею потужностей (1) та (2). Цей сигнал підсилюється в ПНЧ 10 та подається на вхід першого синхронного детектора 11, на другий вхід якого надходить опорний сигнал з виходу генератора 7. В результаті, на виході синхронного детектора 11 формується сигнал

$$\bar{U}_6 = \frac{K_o}{2} (\bar{U}_1^2 + K_2 K_3 R \bar{U}_2^2 - K_2 K_3 R \bar{U}_2^2 - K_6 \bar{U}_5^2), \quad (3)$$

де K_o - результуючий коефіцієнт перетворення модуляційного радіометра.

Після декількох періодів комутації F_1 відбувається перемикання комутатора 25. У цьому випадку другий генератор шуму 27 вимикається, а вхід атенюатора 22 під'єднується на навантаження 26, яке еквівалентне вихідному опорі генератора 27.

У процесі періодичної роботи першого комутатора 3 з частотою F_1 за перший напівперіод комутації на виході НВЧ-підсилювача 4 формується сигнал, дисперсія якого має вигляд

$$\bar{U}_{71}^2 = K_1(\bar{U}_1^2 + \bar{U}_3^2), \quad (4)$$

а за другий напівперіод комутації - сигнал з дисперсією

$$\bar{U}_{72}^2 = K_1(K_6 \bar{U}_5^2 + \bar{U}_3^2), \quad (5)$$

За декілька напівперіодів комутації на виході першого синхронного детектора 11 формується сигнал

$$\bar{U}_8 = \frac{K_o}{2} (\bar{U}_1^2 - K_6 \bar{U}_5^2), \quad (6)$$

В результаті періодичної комутації генератора 27 з частотою $F_2 < F_1$ сигнал (3) заміщується сигналом (6). На виході фільтра 12 нижніх частот формується постійна складова напруги, пропорційна сумі сигналів (6) та (3), а саме

$$\bar{U}_9 = \frac{K_o K_7}{4} [2\bar{U}_1^2 + K_2(K_3 R - K_4 K_5)\bar{U}_2^2 - 2K_6 \bar{U}_5^2], \quad (7)$$

де K_7 - коефіцієнт передачі фільтра 12.

Змінна складова напруги частоти F_2 , пропорційна різниці сигналів (6) та (3), має вигляд

$$\bar{U}_{10} = \frac{K_6 K_7}{4} K_2 (K_3 R - K_4 K_5) \bar{U}^2, \quad (8)$$

Змінна напруга частоти F_2 з амплітудою (8) підсилюється другим підсилювачем 17 низької частоти та випрямляється другим синхронним детектором 18, на другий вхід якого надходить опорний сигнал з виходу генератора 24. Випрямлена напруга заряджає другий інтегратор 19, вихідна напруга якого керує роботою другого атенюатора 20. Регулювання коефіцієнта передачі атенюатора 20 здійснюється до тих пір, поки потужність відбитого від об'єкта сигналу на одному вході комутатора 3 не стане однакою з компенсуючою потужністю на другому вході комутатора 3. Якщо спрямовані відгалужувачі 2 та 14 ідентичні, то їх коефіцієнти передачі $K_3=K_4$, а у випадку однакових потужностей, які порівнюються, матимемо

$$K_5=R. \quad (9)$$

Таким чином, за значенням коефіцієнта передачі K_5 атенюатора 20 можна визначити коефіцієнт відбиття досліджуваного об'єкта незалежно від значення випромінюваної потужності.

Постійна напруга U_9 , згідно з виразом (7), заряджає перший інтегратор 13, вихідна напруга яко-го керує роботою першого атенюатора 18. Процес регулювання триває до тих пір, поки постійна складова напруги на виході синхронного детектора 11 не стане рівною нулю ($U_9=0$). З урахуванням рівняння (9) отримаємо

$$\bar{U}_1^2 = K_6 \bar{U}_5^2, \quad (10)$$

У зв'язку з тим, що потужність генератора шуму 16 постійна ($\bar{U}_5^2 = \text{const}$), коефіцієнт передачі першого атенюатора 15 стає пропорційний потужності власного випромінювання досліджуваного об'єкта.

$$K_6 = \frac{U_1^2}{U_5^2} = \frac{U_1^2}{P_{01}} \quad (11)$$

де $P_{01} = \bar{U}_5^2$ - потужність генератора шуму 16.

Для реєстрації коефіцієнта відбиття R та власного випромінювання біологічних об'єктів використовують двоканальний аналого-цифровий перетворювач 23 та мікроЕОМ 28. При цьому паралельно з реєстрацією параметрів на виході мікроЕОМ формується цифровий код, який подається на цифро-аналоговий перетворювач 29. Вихідна напруга ЦАП збільшує коефіцієнт передачі атенюатора та пропорційно збільшує рівень випромінюваної потужності антени 1. У процесі підвищення потужності, яка опромінює об'єкт через антену, нелінійно змінюється коефіцієнт відбиття R досліджуваного об'єкта та сумарний сигнал, який приймається антеною. Рівень власного випромінювання об'єкта \bar{U}_1^2 визначається внутрішньою його температурою

$$\bar{U}_1^2 = ST = ST, \quad (12)$$

де S - чутливість антени;

T - температура об'єкта.

Електричні сигнали, які змінюють коефіцієнти передачі атенюаторів 15 та 20, реєструються мікроЕОМ як коефіцієнт відбиття об'єкта R та рівня власного випромінювання \bar{U}_1^2 залежно від інтенсивності зовнішнього опромінювання об'єкта. При цьому на результат вимірювання не впливають непостійність потужності опромінювання (\bar{U}_2^2), нестабільність власного випромінювання (\bar{U}_1^2), непостійність рівня власних шумів радіометра (\bar{U}_3^2), а також нестабільність результуючого коефіцієнта перетворення радіометра (K_6) та нестабільність параметрів додаткових елементів і блоків (K_3, K_4, K_7) радіометра.

Радіометр дає можливість реєструвати зміну власного випромінювання під дією зовнішніх факторів, а також зміну коефіцієнта відбиття та поглинання залежно від рівня зовнішнього опромінювання.

Експериментальні дослідження власного випромінювання людини показали, що за нормальної температури ($T=293\text{ K}$) у діапазоні НЗВЧ (53-78 ГГц) потужності шуму випромінювання становить $P_{\text{л}} \sim 1 \cdot 10^{-21} \dots 1 \cdot 10^{-22}$ Вт/Гц·см². Опромінювання людини шумовим сигналом означеного діапазону частот потужністю близько $P_{\text{л}}$ на певних частотах спричиняє інтенсивне його поглинання ($R \approx 0$) і за його подальшого збільшення (\sim в 10 разів) значення коефіцієнта поглинання зберігається постійним. Значне збільшення потужності опромінюючого сигналу (>10 разів) призводить до різкого підвищення коефіцієнта відбиття R , що свідчить про нелінійні властивості поглинальної здатності шкіри людини.

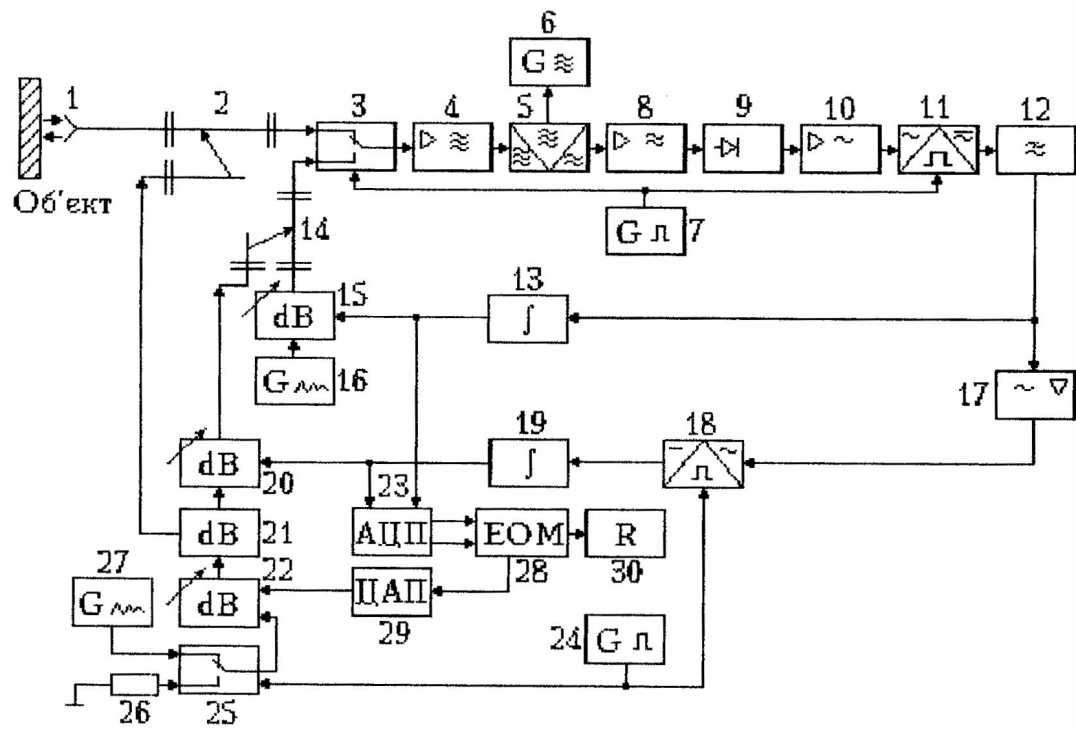


Fig. 1