

Винахід відноситься до радіовимірювальної техніки надвисокочастотних частот (НВЧ) і може бути використаний для вимірювання зсуву фаз у відбитих НВЧ-коливаннях, для оцінки змін фази коливання від біологічно активних точок (БАТ) людини при опромінюванні їх електромагнітними коливаннями вкрай високих частот (ВВЧ)-30...300 ГГц.

Як показують деякі експерименти, є можливість діагностувати ряд захворювань за зміною фази відбитих коливань діапазону ВВЧ від БАТ шкіри людини (див., наприклад, Е.С.Чиграй, Ю.Г.Яременко. "Динамика коэффициента отражения мм-волн от кожи при КВЧ-воздействии". Сб.докл. 11 Рос. симпозиума "Миллиметровые волны в медицине и биологии". - М., ИРЭ РАН. 1997, с. 192-193). Зміни фази таких коливань незначні, не перевищують одиниці і навіть долі градуса, а їх вимірювання пов'язані із значними труднощами.

Відомий пристрій для вимірювання зсуву фаз у відбитих НВЧ-коливаннях (див. Черноушенко А.М., Майбородин АВ. "Измерение параметров электронных параметров дециметрового и сантиметрового диапазонов волн". Под ред. А.М.Черноушенко. - М.: Радио и связь. 1986, с. 159-161), який містить елементи розподілу падаючого та відбитого коливання, два змішувачі, загальний гетеродин, два підсилювачі проміжної частоти, фазовий детектор проміжної частоти та індикатор. На входах змішувача сигнали НВЧ-гетеродина мають однакові амплітуди та фази. Сигнали з різницевою (проміжною) частотою пропорційні різниці фаз вхідних НВЧ-сигналів, підсилюються вузькосмуговими підсилювачами проміжної частоти, а їх низькочастотна різниця фаз перетворюється фазовим детектором у пропорційну напругу, яка вимірюється вихідним індикатором.

Нестабільність вхідних НВЧ-коливань та коливань гетеродина спричиняє до значної відносної зміни проміжної частоти, у зв'язку з чим її необхідно вибирати достатньо високою (декілька десятків і навіть сотень мегагерц). Вимірювання зсуву фаз на таких частотах в умовах значних нестабільностей частот є не менш складним завданням ніж на НВЧ.

Для зменшення впливу нестабільностей використовують низькі (менше 100 кГц) проміжні частоти. При цьому використовується схема двоканального супергетеродинного приймача з автоматичною настройкою проміжної частоти на частоту опорного генератора (див. "Измерения в электронике" // Справочник/ В.А.Кузнецов, В.А.Долгов, В.М.Коневских и др./Под ред. В.А.Кузнецова - М.: Энергоатомиздат, 1987, с.328-330). У перетворювачі частоти використовуються стробоскопічні змішувачі та низькочастотний гетеродин, який перестроюється і сигнал якого подається на формувач-генератор стробуючих імпульсів. На виходах підсилювачів проміжної частоти, увімкнених після змішувачів, отримують сигнали, частота яких є різницею частот НВЧ-коливань та гармоніки частоти низькочастотного гетеродина, який перестроюється.

Згідно з вказаною схемою виконані НВЧ-фазометри ФК2-14 та ФК2-18 на частотний діапазон 100-12400 МГц. Однак реалізація такої схеми у ВВЧ-діапазоні пов'язана із значними технічними труднощами щодо забезпечення стабільності проміжної частоти для забезпечення високої точності вимірювання зсуву фази.

Відомий також пристрій для вимірювання зсуву фаз у відбитих ВВЧ-коливаннях (див. технічний опис вимірювача ослаблення та фазового зсуву ВВЧ-діапазону ДК1-14А, ДК1-15А, ГВ2.085.103 ТО, діапазон частот 37,5-53 ГГц та 53-78 ГГц, с. 18-26), який містить генератор гармонічних коливань ВВЧ-діапазону, послідовно увімкнені перший та другий подільники потужності; перший вихід другого подільника потужності з'єднаний із входом циркулятора, перший вихід якого з'єднаний із приймально-випромінювальною антеною, другий вихід - з послідовно увімкненими НВЧ-балансним змішувачем, підсилювачем проміжної частоти та формувачем коротких імпульсів; другий вихід подільника потужності через погоджувальний атенуатор з'єднаний з послідовно увімкненими другим НВЧ-балансним змішувачем, підсилювачем проміжної частоти та формувачем коротких імпульсів; пристрій обладнаний також низькочастотним гетеродином та індикатором. Окрім того, пристрій містить електродвигун, два НВЧ-кругові обертачі із рухомими роторами, буферні НВЧ-підсилювачі, причому НВЧ-кругові фазообертачі з'єднані послідовно та підключені до другого виходу першого подільника потужності, вихід другого фазообертача через буферні НВЧ-підсилювачі з'єднані із іншими входами НВЧ-балансних змішувачів, а електродвигун кінематично з'єднаний із рухомими роторами НВЧ-кругових фазообертачів.

Завдяки безперервному обертанню роторів фазообертачів їх вихідні сигнали зміщуються на частоту обертання відносно вхідного НВЧ-сигналу. В результаті змішування НВЧ-сигналів у балансних змішувачах утворюються різницеві низькочастотні сигнали, які виділяються та підсилюються вибірково підсилювачами проміжної частоти. Фазовий зсув вимірюється між підсилюваними низькочастотними сигналами. Роль низькочастотного гетеродина виконує джерело змінного струму, який підключений до електродвигуна. Точність вимірювання фазових зсувів відомим пристроєм незначна через вплив таких факторів:

- неминучого розладнання вузькосмугових підсилювачів проміжної частоти із значною крутизною фазочастотних характеристик;
- амплітудно-фазових спотворень у НВЧ-змішувачах через нерівність потужностей, що падають та відбитих НВЧ-коливань;
- додаткових фазових зсувів сигналів, спричинюваних міжканальними зв'язками у ланцюгах загального гетеродина;
- низької частоти зміщення механічних фазообертачів, що не дозволяє використовувати високодобротні підсилювачі проміжної частоти.

У зв'язку з вищенаведеними причинами похибка вимірювання фазових зсувів ДК1-14А, ДК1-15А може становити $\Delta\varphi = \pm 6-10^\circ$, що недостатньо для точних вимірювань в області медицини, біології та техніки.

В основу винаходу покладена задача створення такого пристрою для вимірювання зсуву фаз у відбитих НВЧ-коливаннях, в якому введення нових елементів, що забезпечують по чергове змішування НВЧ-коливань з НВЧ-сигналами, зміщеними за частотою у протилежних напрямках, давало б можливість виклю-

чити частотно-фазові та амплітудно-фазові спотворення, а також послабити міжканальні паразитні зв'язки, що сприятиме значному підвищенню точності вимірювання фазових зсувів НВЧ-коливань.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що в пристрій для вимірювання зсуву фаз у відбитих НВЧ-коливаннях, який включає в себе генератор гармонічних коливань ВВЧ-діапазону, послідовно підключені до нього перший та другий подільники потужності, перший вихід другого подільника потужності з'єднаний із входом циркулятора, перший вихід якого з'єднаний з приймально-випромінювальною антеною, а другий вихід з'єднаний з послідовно включеними першими НВЧ-балансним змішувачем, підсилювачем проміжної частоти та формувачем коротких імпульсів; другий вихід другого подільника потужності через узгоджувачий атенуатор з'єднаний із послідовно увімкненими другими НВЧ-балансним змішувачем, підсилювачем проміжної частоти і формувачем коротких імпульсів; тригерний фазовий детектор входами з'єднаний із виходами формувачів коротких імпульсів; низькочастотний гетеродин та індикатор, введені нашим винаходом послідовно, з'єднані фільтр верхніх частот, підсилювач низької частоти та синхронний детектор, подвійний хвилевідний трійник, два НВЧ балансних модулятори, низькочастотний квадратурний фазорозщеплювач, двополюсний комутатор, подільник частоти та НВЧ-квадратурний фазорозщеплювач входом з'єднаний з іншим входом першого подільника потужності, входами з'єднаний з сигнальними входами НВЧ-балансних модуляторів, модулюючи входи яких через двополюсний комутатор з'єднані з виходами низькочастотного квадратурного фазорозщеплювача, вхід якого з'єднаний з виходом низькочастотного гетеродина; виходи балансних модуляторів з'єднані із входами подвійного хвилевідного трійника, виходи якого з'єднані з іншими входами НВЧ-балансних змішувачів; вихід тригерного фазового детектора з'єднаний із входом фільтра верхніх частот; вихід синхронного детектора з'єднаний з індикатором, а управляючий вхід детектора з'єднаний з управляючим входом двополюсного комутатора і через подільник частоти з'єднаний з виходом низькочастотного гетеродина.

Змішування вхідних НВЧ-коливань із НВЧ-гетеродинними коливаннями різних частот у вимірювальному та опорному каналах пристрою дає змогу здійснювати повну розв'язку каналів і тим самим вилучити паразитні міжканальні зв'язки. Почергове взаємне заміщення НВЧ-сигналів різних частот з низькою частотою комутації забезпечує формування на виході фазового детектора змінної складової напруги, амплітуда якої не залежить від розладнання підсилювачів проміжної частоти та нерівності потужностей вхідних НВЧ-коливань. Комутація низькочастотних модулюючих сигналів, зсунутих на дев'яносто градусів, забезпечує періодичну зміну частоти НВЧ-коливань у ланцюгах гетеродина без використання НВЧ-комутуючих пристроїв, які мають незначні розв'язувальні властивості.

Синхронне детектування змінної складової напруги, пропорційної зсуву фаз НВЧ-коливань, які зрівнюються, забезпечують інформацію про знак фазових присторів та усунення шумів і завад у вихідному інформативному сигналі. Означена відмінність значно знижує похибку вимірювання зсуву фаз у відбитих НВЧ-коливаннях та підвищує достовірність медично-біологічної інформації. На малюнку приведена структурна схема пристрою для вимірювання зсуву фаз у відбитих НВЧ-коливаннях.

Пристрій має у своєму складі генератор 1 гармонічних коливань ВВЧ-діапазону, подільники потужності 2 і 3, підключені до генератора, циркулятор 4, з яким з'єднана приймально-випромінювальна антена 5, спрямована на контрольований об'єкт 6, узгоджувач атенуатор 7, підключений до другого виходу подільника потужності 3, НВЧ-балансні змішувачі 8 та 9, до виходів яких підключені послідовно з'єднані підсилювачі проміжної частоти 10 та 11, формувачі коротких імпульсів 12 та 13 і тригерний фазовий детектор 14. До другого виходу першого подільника потужності підключений НВЧ-квадратурний фазорозщеплювач 15, до виходів якого через НВЧ-балансні модулятори 16 і 17 під'єднаний подвійний хвилевідний трійник 18, виходи якого з'єднані із другими входами НВЧ-балансних змішувачів, низькочастотний гетеродин 19, з'єднаний із низькочастотним квадратурним фазорозщеплювачем 20, виходи якого через двополюсний комутатор 21 з'єднані із модулюючими входами НВЧ-балансних модуляторів. Подільник частоти 22 з'єднує управляючий вхід двополюсного комутатора та вихід низькочастотного гетеродина. До виходу тригерного фазового детектора підключені послідовно з'єднані фільтр 23 верхніх частот, підсилювач 24 низької частоти, синхронним детектор 25 та індикатор 26. Вхід управління синхронного детектора з'єднаний з входом управління двополюсного комутатора.

Пристрій для вимірювання зсуву фаз у відбитих ЗВЧ-коливаннях працює за таким принципом.

Вихідні гармонічні коливання генератора 1 ВВЧ-діапазону частоти $U_1(t) = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$ розділяють з допомогою подільників потужності 2 і 3 на однакові частини. З подільника 3 частина потужності коливань через циркулятор 4 надходить до приймально-випромінювальної антени 5 і випромінюється у напрямку контрольованого об'єкта 6. Частина потужності із подільника 3 подається на узгоджувач атенуатор 7.

Відбиті від об'єкта коливання $U_2(t) = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$ приймаються антеною 5 і через вихід циркулятора 4 надходять на вхід НВЧ-балансного змішувача 8 вимірювального каналу. Ослаблені атенуатором 7 коливання $U_3(t) = U_{m3} \cos(\omega t + \varphi_1)$ надходять на вхід НВЧ-балансного змішувача 9 опорного каналу. Електрична довжина НВЧ-вимірювального та опорного каналів мають бути однакові.

Частина потужності коливань з подільника 2 надходить на НВЧ-фазорозщеплювач 15, наприклад гібридне з'єднання, де розділяється на два рівні квадратурні коливання $U_4(t) = U_{m4} \cos(\omega t + \varphi_1)$ і $U_5(t) = U_{m5} \sin(\omega t + \varphi_1)$, причому $U_{m4} = U_{m5}$.

Коливання $U_4(t)$ та $U_5(t)$ надходять на сигнальні входи НВЧ-балансних модуляторів 16 і 17, на гетеродинні входи яких подані низькочастотні квадратурні сигнали $U_6(t) = U_{m6} \cos(\Omega t + \varphi_3)$ і $U_7(t) = U_{m7} \sin(\Omega t + \varphi_3)$ з однаковими амплітудами $U_{m6} = U_{m7}$.

Джерелом низькочастотних сигналів є гетеродин 19 звукової частоти із початковою фазою φ_3 та низькочастотний квадратурний фазорозщеплювач 20, вихідні сигнали якого $U_6(t)$ і $U_7(t)$ надходять на модулюючі входи НВЧ-балансних модуляторів через автоматичний комутатор 21.

В результаті перетворення на виходах НВЧ-модуляторів 16 та 17 формуються двочастотні НВЧ-сигнали сумарної та різницевої частоти:

$$U_8(t) = 0,5S_1U_{m4}U_{m6}\{\cos[(\omega - \Omega)t + \varphi_1 - \varphi_3] + \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_3]\},$$

$$U_9(t) = 0,5S_1U_{m5}U_{m7}\{\cos[(\omega - \Omega)t + \varphi_1 - \varphi_3] - \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_3]\},$$

де S_1 - крутизна балансних модуляторів.

У зв'язку з тим, що $U_{m4}U_{m6} = U_{m5}U_{m7}$, двочастотні сигнали $U_8(t)$ і $U_9(t)$ мають однакові амплітуди, а складові зміщених частот мають протилежні знаки.

Двочастотні сигнали надходять на входи подвійного хвилевідного трійника 18, де вони в плечах трійника складаються та віднімаються. В результаті складання на одному виході трійника 18 утворюється коливання різницевої частоти:

$$U'_{10}(t) = S_1K_1U_{m4}U_{m6}\cos[(\omega - \Omega)t + \varphi_1 - \varphi_3],$$

а в результаті віднімання на другому виході трійника - коливання сумарної частоти:

$$U'_{11}(t) = S_1K_1U_{m4}U_{m6}\cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_3],$$

де K_1 - коефіцієнт передачі трійника.

Колівання різницевої частоти надходять на другий вхід балансного змішувача 8, а коливання сумарної частоти — на другий вхід балансного змішувача 9.

В результаті балансного змішування НВЧ-коливань різницевої частоти $U'_{10}(t)$ із НВЧ-коливаннями $U_2(t)$ вимірювального каналу утворюються різницеві коливання низької частоти:

$$U'_{12}(t) = K_1S_1S_2U_{m2}U_{m4}U_{m6}\cos(\Omega t + \varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4),$$

де S_2 - крутизна балансного змішувача;

φ_4 - фазовий зсув, який вносить змішувач 8.

Балансне змішування НВЧ-коливань сумарної частоти $U'_{11}(t)$ з НВЧ-коливаннями $U_3(t)$ опорного каналу також створює різницеве коливання низької частоти:

$$U'_{13}(t) = K_1S_1S_2U_{m3}U_{m4}U_{m6}\cos(\Omega t + \varphi_3 + \varphi_5),$$

де φ_5 - фазовий зсув, який спричиняє змішувач 9.

У зв'язку з тим, що амплітуди потужностей коливань U_{m2} та U_{m3} в загальному випадку неоднакові через несталість коефіцієнта відбиття від контрольованого об'єкта, $\varphi_4 \neq \varphi_5$.

Сигнали низької частоти $U'_{12}(t)$ та $U'_{13}(t)$ виділяються і підсилюються вузькосмуговими підсилювачами 10 та 11, які настроєні на частоту низькочастотного гетеродина 19. В той же час через неминуче розладнання вибіркового підсилювачів у процесі роботи пристроїв вихідні підсилені сигнали зсуваються на різні кути:

$$U'_{14}(t) = K_1K_2S_1S_2U_{m2}U_{m4}U_{m6}\cos(\Omega t + \varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_6),$$

$$U'_{15}(t) = K_1K_2S_1S_2U_{m3}U_{m4}U_{m6}\cos(\Omega t + \varphi_3 + \varphi_5 + \varphi_7),$$

де φ_6 і φ_7 - фазові зсуви, спричинені підсилювачами 10 і 11 відповідно ($\varphi_6 \neq \varphi_7$).

З допомогою формул 12 та 13 із низькочастотних сигналів $U'_{14}(t)$ та $U'_{15}(t)$ формуються короткі імпульси в момент переходу через нуль напруги сигналу, які надходять на лінійний фазовий детектор 14, виконаний, наприклад за двополярною тригерною схемою.

Вихідна напруга фазового детектора пропорційна різниці фаз вхідних сигналів:

$$U'_{16} = S_3(\arg U'_{14} - \arg U'_{15}) = S_3(\varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_4 + \varphi_6 - \varphi_5 - \varphi_7),$$

де S_3 - чутливість фазового детектора.

Управління двополюсного комутатора 21 здійснюється через прямокутну напругу подільника частоти 22, на який подається низькочастотна напруга гетеродина 19.

Управління комутатора 21 (зміна положень контактів) здійснюється через часові інтервали $2\pi n/\Omega$, де n -коефіцієнт ділення подільника частоти 22. При цьому відбувається взаємне заміщення низькочастотних модулюючих сигналів, зсунутих на 90° . В результаті здійснюється взаємне заміщення сумарних та різницевих коливань НВЧ-діапазону на виходах подвійного хвилевідного трійника 18:

$$U''_{10}(t) = S_1K_1U_{m4}U_{m6}\cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_3],$$

$$U''_{11}(t) = S_1 K_1 U_{m4} U_{m6} \cos[(\omega - \Omega)t + \varphi_1 - \varphi_3],$$

Потім НВЧ-коливання $U_2(t)$ вимірювального каналу змішуються з НВЧ-коливаннями сумарної частоти $U''_{10}(t)$, в результаті чого виникає різницеве коливання низької частоти:

$$U''_{12}(t) = K_1 S_1 S_2 U_{m2} U_{m4} U_{m6} \cos(\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4),$$

Аналогічно перетворюються НВЧ-коливання $U_3(t)$ опорного каналу та різницевої частоти $U''_{11}(t)$:

$$U''_{13}(t) = K_1 S_1 S_2 U_{m3} U_{m4} U_{m6} \cos(\Omega t + \varphi_3 + \varphi_5),$$

У зв'язку з тим, що вибірккові підсилювачі вносять ті ж самі фазові зсуви у підсилені напруги:

$$U''_{14}(t) = K_1 K_2 S_1 S_2 U_{m2} U_{m4} U_{m6} \cos(\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_6),$$

$$U''_{15}(t) = K_1 K_2 S_1 S_2 U_{m3} U_{m4} U_{m6} \cos(\Omega t + \varphi_3 + \varphi_5 + \varphi_7).$$

Вихідні напруги фазового детектора, з урахуванням змінених значень аргументів напруг, які зрівнюються, набувають виду:

$$U''_{16} = S_3 (\arg U''_{14} - \arg U''_{15}) = S_3 (\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_4 + \varphi_6 - \varphi_5 - \varphi_7),$$

Порівнюючи напруги U'_{16} та U''_{16} бачимо, що при зміні положення комутатора 21 змінюється знак вимірювальної різниці фаз ($\varphi_2 - \varphi_1$ на $\varphi_1 - \varphi_2$), останні фазові складові залишаються без змін. Тому в процесі періодичної роботи комутатора 21 у вихідній напрузі фазового детектора 14 виникає змінна складова напруги, пропорційна тільки вимірюваній різниці фаз.

$$U_{17} = 0,5 (U'_{16} - U''_{16}) = S_3 (\varphi_2 - \varphi_1).$$

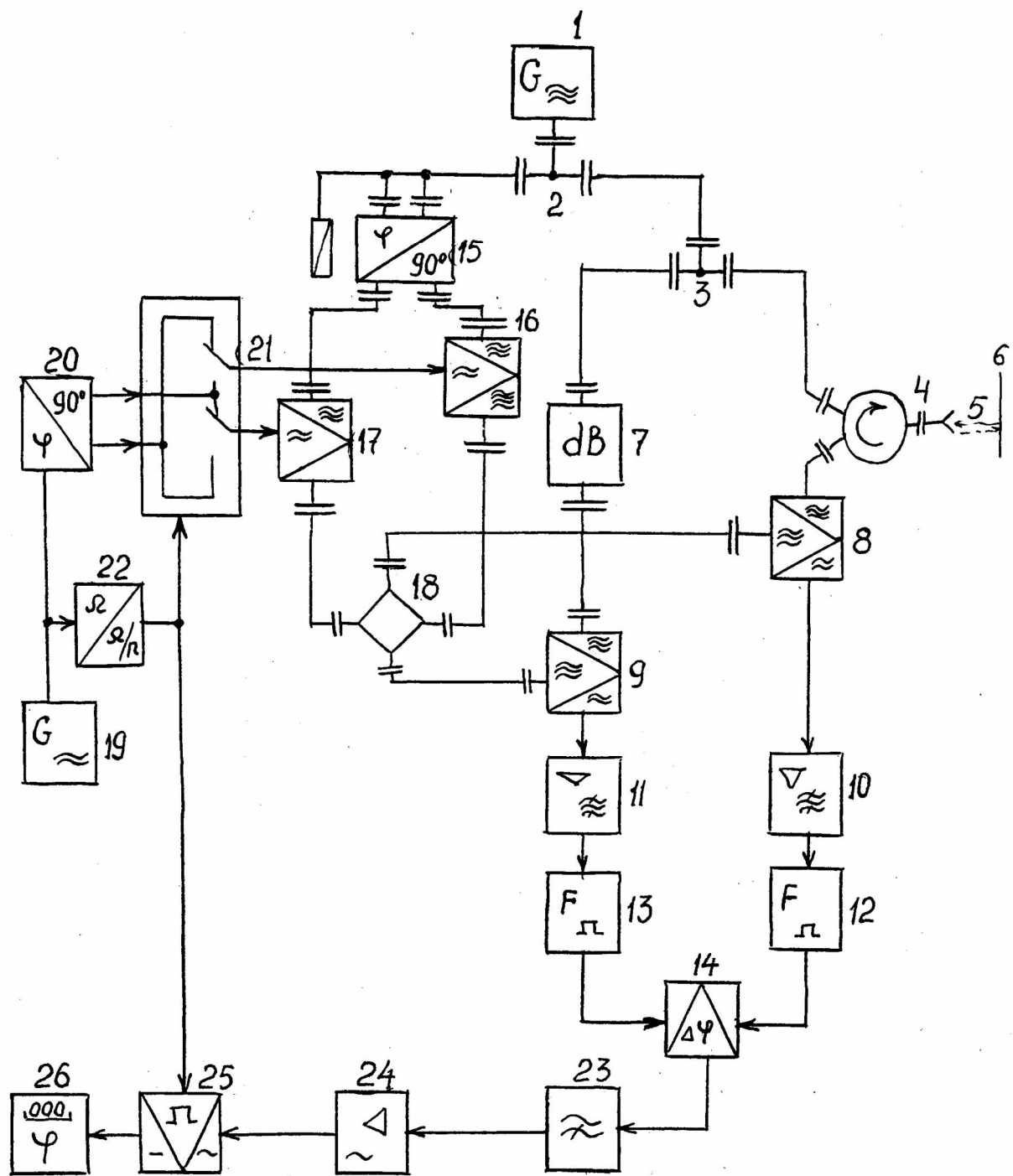
Змінна складова напруги U_{17} виділяється фільтром 23 верхніх частот, підсилюється підсилювачем 24 частоти комутації та випрямляється синхронним детектором 25. Випрямлена напруга $U_{18} = S_0 (\varphi_2 - \varphi_1)$, де S_0 - результуюча чутливість перетворення різниці фаз у постійну напругу), вимірюється індикатором 26.

Із отриманого виразу видно, що результат комутаційного перетворення не залежить від амплітудно-фазових спотворень у змішувачах частоти (φ_4 та φ_5) і частотно-фазових — у вибірккових підсилювачах (φ_6 та φ_7).

Розв'язка гетеродинних входів НВЧ-змішувачів за допомогою подвійного хвилевідного трійника практично виключає фазові спотворення під впливом паразитних міжканальних зв'язків.

Таким чином, розглянутий комутаційний перетворювач зсуву фаз відбитих НВЧ-коливань інваріантний до фазових спотворень у перетворювальних каналах, що забезпечує підвищення точності вимірювання.

Експериментальні дослідження макетного зразка пристрою у 5-мм діапазоні ВВЧ (53-63 ГГц) підтвердили можливість вимірювання малих змін фази відбитого сигналу в межах $5-15^\circ$ з похибкою не більше $\pm 0,1^\circ$ при частоті зміщення 10 кГц та коефіцієнті відбиття $\rho = 0,7 \dots 0,3$.



Тираж 50 екз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»
Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101
(03122) 3 – 72 – 89 (03122) 2 – 57 – 03
