

О.П. Яненко

ПРИСТРОЇ ЗМІЩЕННЯ ЧАСТОТИ СИГНАЛІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ НВЧ-ДІАПАЗОНУ

Розглянуті принципи побудови пристроїв зміщення частоти (ПЗЧ) сигналів на основі подвійних T-подібних хвилеводних мостів і НВЧ-фазообертачів. Проаналізовані переваги та недоліки таких пристроїв. Розглянуті приклади практичної реалізації ПЗЧ при вимірюванні фазових співвідношень у радіометричній системі визначення резонансних частот біологічних об'єктів.

Зміщення частоти сигналів знаходить широке застосування в радіочастотному та оптичному діапазоні, в меншій мірі в НВЧ-діапазоні для підвищення точності, чутливості, покращення інших характеристик та розширення можливостей вимірювальних приладів і систем [1, 2, 3]. Так, в [6] описаний фазометр НВЧ-діапазону для вимірювання фазових співвідношень відбитих сигналів від біологічних та інших об'єктів. Класична схема із двох ідентичних каналів (вимірювального та опорного) доповнюється пристроєм зміщення частоти (ПЗЧ), який формує дві гетеродинні напруги:

$$U'_{пзч}(t) = U'_{пзч} \cos(\omega_r + \Omega)t, \quad (1)$$

$$U''_{пзч}(t) = U''_{пзч} \cos(\omega_r - \Omega)t, \quad (2)$$

де ω_r – частота НВЧ-генератора;

Ω – частота модулюючого генератора.

Напруги (1) і (2) по чергово (за період комутації) за допомогою комутатора під'єднують до змішувачів частоти опорного або вимірювального каналів, на другі входи яких подається в опорному каналі напруга НВЧ-генератора:

$$U_r(t) = U_r \cos(\omega_r t + \varphi_r),$$

а вимірювальному каналі відбитий від об'єкта сигнал

$$U_c(t) = U_c \cos(\omega_r t + \varphi_c),$$

де φ_c – фазовий зсув, який вноситься об'єктом.

В результаті послідовних перетворень на виході фазового детектора фазометра за півперіода комутації отримуємо:

$$U'_{фд} = S_{фд} (\arg U'_{опор} - \arg U'_{вим}) = S_з (\varphi_c + \varphi'_{зм} - \varphi''_{зм} - \varphi'_{пнч} - \varphi_r + \varphi''_{пнч}), \quad (3)$$

де $\varphi'_{зм}$, $\varphi''_{зм}$ – фазові зсуви, які вносяться змішувачем вимірювального та опорного каналів;

$\varphi'_{пнч}$, $\varphi''_{пнч}$ – фазові зсуви підсилювачів проміжної частоти каналів.

Переключення комутатора призводить до появи на виході ФД напруги:

$$U''_{фд} = S_{фд} (\arg U''_{опор} - \arg U''_{вим}) = S (\varphi'_{зм} - \varphi_c + \varphi''_{пнч} + \varphi_r - \varphi''_{зм} - \varphi'_{пнч}). \quad (4)$$

В процесі періодичної роботи комутатора на виході ФД отримуємо складову напруги, пропорційну вимірюваній різниці фаз:

$$U_{фд\lambda} = 0,5 (U'_{фд} - U''_{фд}) = S_{фд} (\varphi_c - \varphi_r). \quad (5)$$

Таким чином, із (5) видно, що результат комутаційного перетворення з використанням ПЗЧ не залежить від амплітудно-фазових спотворень у змішувачах частоти та частотно-фазових у підсилювачах проміжної частоти.

Інваріантність розглянутої схеми НВЧ-фазометра до фазових спотворень у перетворювальних каналах забезпечує підвищення точності вимірювання фазових зсувів.

Приклад використання ПЗЧ для підвищення точності вимірювання біологічно активних частот НВЧ-діапазону наведений в [7]. Основним вузлом вказаного пристрою є пристрій зміщення частоти. На виході ПЗЧ формуються дві напруги, аналогічні наведеним в (1) та (2).

За допомогою комутатора, по чергово, опромінювання біологічного об'єкта проводиться спочатку сумарним НВЧ-сигналом (1), відбитий від об'єкта сигнал при цьому змішують з різницею сигналом ПЗЧ (2), виділяючи напругу проміжної частоти, а потім опромінюють різницевою частотою (2), змішуючи відбитий сигнал із сумарним (1). В результаті проведених процедур на виході балансного змішувача утворюються пакети низькочастотних коливань з подвоєною частотою модуляції, амплітуди яких пропорційні добутку коефіцієнтів відбиття об'єкта на симетричних бокових частотах:

$$U'_{зм} = \rho_1 S_{зм} U_c U_r m \cos(2\Omega t + \varphi_1),$$

$$U''_{зм} = \rho_2 S_{зм} U_c U_r m \cos(2\Omega t + \varphi_1),$$

де ρ_1 – модуль коефіцієнта відбиття об'єкта на частоті $\omega_1 = \omega_r - \Omega$, а ρ_2 – на частоті $\omega_2 = \omega_r + \Omega$;

$S_{зм}$ – крутизна перетворювання змішувача;

m – коефіцієнт модуляції;

U_c, U_r – напруги сигналів на вході змішувача.

На виході амплітудного детектора з крутизною перетворювання $S_{ад}$ отримуємо при опромінюванні об'єкта частотою ω_1 напругу:

$$U'_{ад} = \rho_1 S_{зм} S_{ад} m U_c U_r / 4,$$

а при зміні черговості опромінювання ω_2

$$U''_{ад} = \rho_2 S_{зм} S_{ад} m U_c U_r / 4.$$

Змінна напруга, що утворюється при цьому з частотою комутації, підсилюється та випрямляється фазочутливим випрямлячем (ФВ). Різницевий сигнал на виході фазочутливого випрямляча має вигляд:

$$U_{фчв} = U'_{ад} - U''_{ад} = S_{зм} S_{ад} m U_c U_r (\rho_1 - \rho_2) / 4.$$

Залежно від знаку розладу сигналу відносно резонансної частоти об'єкта змінюється фаза обгинаючої модульованого сигналу, знак напруги на виході ФВ, яка підстроює тим самим частоту ω_r НВЧ-генератора до значення резонансної частоти об'єкта ω_c .

Розроблений прилад з використанням ПЗЧ дає змогу автоматично здійснювати пошук резонансних частот біологічних об'єктів з високою точністю. Це пояснюється тим, що непостійність абсолютних значень коефіцієнтів відбиття об'єкта в області резонансу ρ_1 та ρ_2 , а також нерівність сигналів U_c та U_r на вході змішувача, нестабільність коефіцієнтів змішування $S_{зм}$ та детектування $S_{ад}$ не впливають на точність суміщення частоти опромінювання з резонансною частотою об'єкта, яка вимірюється НВЧ-частотоміром.

Принцип дії ПЗЧ, які використовуються у вимірювальних приладах НВЧ-діапазону, ґрунтується на алгебраїчному складанні або відніманні високої частоти (несучої) з низькою частотою (модулюючої) та послідовним формуванням одночастотного сигналу.

Так, наприклад, при наявності двох сигналів виду

$$U_1(t) = U_1 \cos \omega t \text{ та } U_2(t) = U_2 \cos \Omega t$$

вихідна напруга ПЗЧ, який забезпечує зміщення в бік збільшення частоти, можна записати

$$U_{пзч}(t) = 0,5 U_1 U_2 \cos(\omega + \Omega)t. \quad (6)$$

Подібними перетворювачами можуть слугувати класичні схеми односмугових модуляторів, але більш перспективними для вимірювальної техніки є ПЗЧ на основі аналогових або дискретних фазообертачів в режимі безперервної зміни фази високочастотного коливання, так звані високочастотні перетворювачі [4].

Безперервна зміна фази коливання на виході аналогового фазообертача або стрибкоподібна на виході дискретного фазообертача приводить до переміщення потоку енергії несучого коливання та явища зміщення частоти і проявлення ефекту Доплера. У загальному вигляді зміну вихідної фази фазообертача можна записати

$$\varphi_{фo}(t) = f(\alpha),$$

де α – кут повороту динамічної частини фазообертача; $f(\alpha)$ – управляюча функція;

а вихідну напругу фазообертача

$$U_1(t) = U_1 \cos[\omega t + \varphi_{фo}(t)]. \quad (7)$$

Для ПЗЧ на основі аналогового фазообертача вихідна напруга описується виразом (6) та (7), а на дискретному – виразом (7) та (8).

$$U_{пзч}(t) = U_{пзч}(\omega + \Omega/n)t, \quad (8)$$

де n – число фазових дискретів.

В області НВЧ та НЗВЧ використовуються в основному ПЗЧ на аналогових поляризаційних фазообертачах, наприклад, на базі модулятора Фокса [3].

Такий ПЗЧ має у своєму складі коловий аналоговий поляризаційний фазообертач із двох нерухомих колохвильоводних секцій, між якими з частотою Ω обертається третя колохвильоводна секція. Всередині секцій розміщені діелектричні пластини, які забезпечують диференціальний фазовий зсув на 90° в нерухомих секціях і на 180° в рухомій секції, а загальний зсув поляризаційної хвилі на виході фазообертача дорівнює 2π .

Таким чином, регульований диференціальний фазовий зсув фазообертача, а відповідно і частота зміщення на виході пристрою визначається кутом повороту діелектричної пластини третьої секції та частотою обертання.

Позитивною якістю фазочастотних перетворювачів на основі модулятора Фокса є їх широкосмуговість, до недоліків слід віднести наявність механічного приводу, мале значення частотного зміщення несучого коливання (десятки – сотні герц) і недостатнє подавлення

“паразитних” частотних складових (20 – 25 дБ) та складність забезпечення стабільності частоти зміщення на рівні електронних схем, але ці недоліки не заважають конструювати точні вимірювальні прилади.

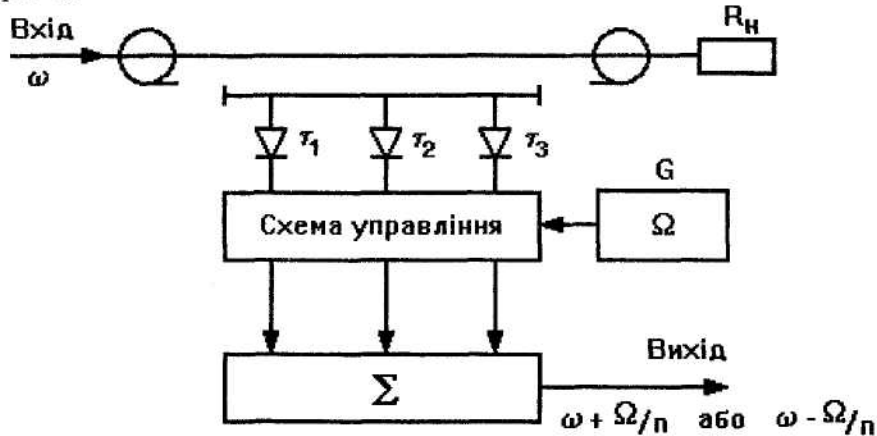


Рис. 1. Схема ПЗЧ на лінії затримки

Так, наприклад, високочастотні вимірювачі ослаблення та фазового зсуву ДК1-14А і ДК1-15 на діапазон частот 37,5 – 78,3 ГГц мають в своєму складі ПЗЧ з частотою зміщення 175 Гц.

Аналогові фазообертачі створюються також на основі лінії затримок, час затримки якої комутується за допомогою реактивності діодів, включених в лінію проходження сигналу. Схема реалізації подібного ПЗЧ представлена на рис. 1.

Такі фазообертачі можна використовувати для схем фазової модуляції, схем корекції фазочастотних характеристик НВЧ-трактів та інше. До недоліків слід віднести складність їх використання як фазочастотних перетворювачів.

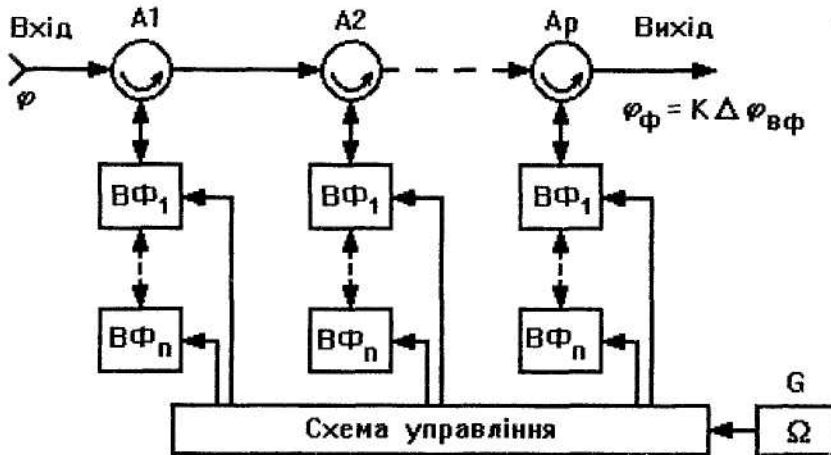


Рис. 2. Схема дискретного фазообертача НВЧ-діапазону

Більш перспективними, з точки зору фізичної реалізації та створення ПЗЧ, є дискретні фазообертачі, які мають у своєму складі послідовно з'єднані *p*-прохідні фазообертачі (ПФ), кожний із яких містить, наприклад, феритовий циркулятор та *n*-каскадні відбиваючі фазообертачі (ВФ) (рис. 2.). Вихідний фазовий зсув такого фазообертача визначається сумою зсувів окремих його ланцюгів [5].

Фазовий зсув на виході першого циркулятора визначається:

$$\Delta\varphi_1 = 4 \pi \tau_1 / \lambda,$$

де τ_1 – часова затримка сигналу в ВФ першого циркулятора;

λ – довжина хвилі сигналу на вході фазообертача.

Сумарний фазовий зсув на виході НВЧ-фазообертача має вигляд:

$$\varphi_\Phi = 4 \pi (\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_p) / \lambda, \tag{9}$$

або

$$\varphi_{\text{ф}} = 4 \pi \tau / \lambda = 2 \pi$$

у випадку колового фазообертача.

У випадку рівності дискретних фазових зсувів, які формуються окремими ланцюгами фазообертача, якщо $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_p$, формула (9) приймає вигляд:

$$\varphi_{\text{ф}} = 4 \pi p \tau_p / \lambda = 2 \pi,$$

а фазовий зсув, який перемикається,

$$\Delta\varphi = \tau_p = \lambda / 2 p.$$

Таким чином, дискретні фазообертачі забезпечують формування колового фазового НВЧ-поля, необхідного для побудови ПЗЧ.

Використання ВФ в ПЗЧ встановлює певні вимоги до точності формування фазового зсуву, яка бажана в межах одиниць градусів.

Значно більша неточність установки фазового дискрета при динамічному управлінні фазовими етапами (дискретами) призводить до появи амплітудної та фазової модуляції, що, в свою чергу, розширює вихідний спектр сигналу та збільшує рівень "дзеркальної" складової зміщеної частоти, що обмежує можливості використання фазочастотного перетворювача у вимірювальних приладах НВЧ-діапазону.

Слід відмітити перспективу використання для зміщення частоти в області НВЧ-діапазону на прикладі [7] подвійних Т-подібних хвилеводних мостів, включених відповідним чином і реалізуючих "класичний" метод формування односмугового сигналу з урахуванням конструктивних особливостей НВЧ-діапазону.

Крім того, подвійний хвилеводний трійник може виконувати буферну (розв'язуючу) роль, як, наприклад, в схемі [6] НВЧ-фазометра, що дуже складно забезпечити на високих частотах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Зимин Н.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Метод электронного смещения частоты // Электросвязь, 1976. – № 10.
2. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. и др. Развитие и перспективы двухчастотной фазовой светодальнометрии // Тез. докл. н/т конференции "Контроль, измерение, диагностика, ремонт и техобслуживание РЭС". – М., 1991. – С. 133–135.
3. Виницкий А.С. Очерк основ радиолокации при непрерывном излучении радиоволн. – М.: Сов. радио, 1961. – 365 с.
4. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. и др. Автоматизация фазоизмерительных устройств и систем. – К УМКМВО. – 192–204 с.
5. Царенко В.Т., Имшенецкий В.В., Борисов М.М. Автоматические устройства СВЧ. – К.: Техника. – 152 с.
6. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Оценки фазовых соотношений сверхвысокочастотных сигналов, отраженных от биологических или других объектов // Труды I международной конференции "СТРЭС-97". – К.: – Партенид, 1997. – С. 29–32.
7. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Определение резонансных частот объектов СВЧ-диапазона // Праці II міжнародної н/т конференції "Метрологія в електроніці": Том 1. – Харків, 1997. – С. 223–225.
8. Милашкеевская А.В. Автоматические измерители в диапазоне СВЧ. – М.: Связь, 1972. – 80 с.

ЯНЕНКО Олексій Пилипович – кандидат технічних наук, завідувач лабораторії Київського центру "Квантова медицина".

Наукові інтереси:

– метрологія та стандартизація.