

---

---

## ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА РАДІОВИМІРЮВАНЬ

УДК 621.317.07.089

### ВУЗЬКОСМУГОВИЙ МОДУЛЯЦІЙНИЙ РАДІОМЕТР- СПЕКТРОАНАЛІЗАТОР

*Яненко О.П.<sup>1</sup>, д.т.н., професор, Скрипник Ю.А.<sup>2</sup>, д.т.н., професор,  
Куценко В.П.<sup>1</sup>, к.т.н., докторант*

*<sup>1</sup>Національний технічний університет України*

*Київський політехнічний інститут, м. Київ, Україна*

*<sup>2</sup>Київський національний університет технологій і дизайну, м. Київ, Україна*

#### **Вступ. Постановка задачі**

Шумові радіотеплові випромінювання живих організмів та фізичних тіл за температури навколишнього середовища 300-310 К характеризуються широким спектром та надзвичайно малою інтенсивністю випромінювання, спектральна щільність якого може складати  $10^{-21} - 10^{-22}$  Вт/(Гц·см<sup>2</sup>) [1]. Вимірювання спектральних складових такої малої потужності можливе із застосуванням вузькосмугової радіометричної апаратури, яка переналагоджується за частотою, для чого використовується гетеродинне перетворення вхідних сигналів, здатне забезпечити більшу чутливість.

Відомі схеми вузькосмугових модуляційних радіометрів для вимірювання слабких сигналів, достатньо повно розглянуті в [1,2]. В той же час, використання наведених технічних рішень не завжди можливе, оскільки при аналізі електромагнітного випромінювання із суцільним спектром в смугу пропускання модуляційних радіометрів потрапляють як власні шуми приймального тракту, так і компоненти частотного перетворення, які поступають по прямому і дзеркальному каналам, що спотворює результати вимірювання.

В [3] приведений вузько смуговий модуляційний гетеродинний радіометр, що окрім радіометричного каналу додатково містить механічно переналагоджуваний смуговий фільтр, реєструючий вольтметр та стрічкопротяжний механізм, який кінематично зв'язаний з налагоджуваним фільтром та гетеродином.

Розглянута схема забезпечує придушення сигналів по дзеркальному каналу, але використання механічного інерційного стрічкопротяжного механізму і механічно переналагоджуваного смугового фільтра та гетеродина не забезпечує достатньої швидкості і точності налаштування та придушення неробочих бокових частот, що знижує точність аналізу особливо динамічних широкосмугових процесів.

Задачею даного дослідження є створення вузькосмугового модуляцій-

ного радіометра, в якому усувалися б вказані недоліки та забезпечувалося б збільшення швидкодії і придушення частот дзеркального каналу, а також підвищення точності аналізу швидкоплинних електромагнітних сигналів в об'єктах дослідження, з одночасною повною автоматизацією процесів вимірювання.

### Основна частина

Авторами розроблена структурна схема вузькосмугового модуляційного радіометра–спектроаналізатора вільного від вказаних недоліків.

Окрім основного каналу перетворення вхідного сигналу схема включає в себе мікроконтролер з додатковими елементами управління та електрично керовані смуговий фільтр і гетеродин. В якості елементів переналагоджування використовуються феритові сфери із залізоітрієвого граната (ЗІГ). На рис.1 представлена функціональна схема радіометра- спектроаналізатора, яка включає в себе широкосмугову антену 1, хвилевідний діодний ключ 2 та хвилевідний трійник 3 з поглинальним навантаженням 4.

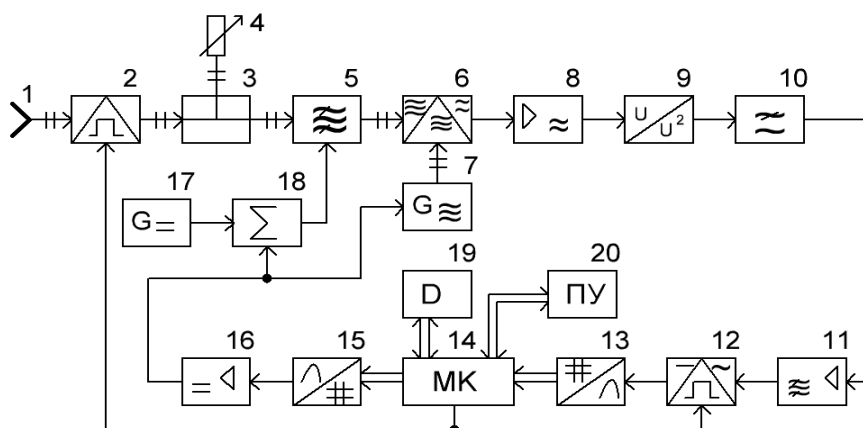


Рис.1

Вихід хвилевідного трійника 3 через електрично керований смуговий фільтр 5 підключено до сигнального входу балансного змішувача 6, вихід якого через послідовно з'єднані вибіркового підсилювач 8 проміжної частоти, квадратичний детектор 9, фільтр нижніх частот 10, вибіркового підсилювач частоти комутації 11, синхронний детектор 12 та інтегруючий аналого-цифровий перетворювач 13 підключено до входу мікроконтролера 14. Перший вихід мікроконтролера 14 підключений до керуючого входу діодного ключа 2 і синхронного детектора 12, другий вихід – через цифро-аналоговий перетворювач 15 та підсилювач струму 16 підключено до керуючого входу електрично керованого гетеродина 7 та першого входу суматора струму 18, до другого входу якого підключено вихід джерела постійного струму 17. Вихід суматора струму 18 з'єднано з керуючим входом електрично керованого смугового фільтра 5. Третій вихід мікроконтролера 14 з'єднано з дисплеєм 19, а четвертий – з пультом керування 20.

На рис.2 приведені епюри сигналів в каналі вузькосмугового модуля-

ційного радіометра-спектроаналізатора.

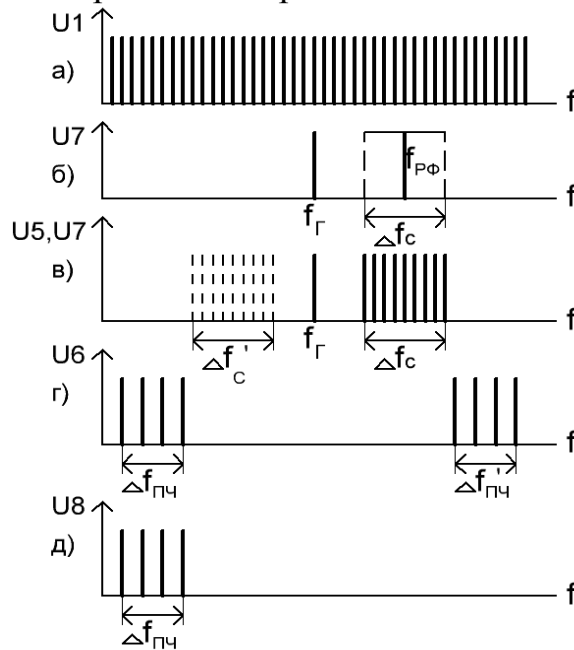


Рис.2

Розроблений пристрій працює наступним чином.

Широкосмуговий сигнал (рис.2, а), спектральну щільність якого необхідно виміряти, через приймальну широкосмугову антену 1 поступає на хвилевідний діодний ключ 2, що періодично перемикається прямокутними імпульсами низької частоти, які генерує мікроконтролер 14. У відкритому стані хвилевідного діодного ключа 2 спектральні компоненти вхідного сигналу та шуми приймальної широкосмугової антени 1 через хвилевідний трійник 3 та електрично керований смуговий фільтр 5 потрапляють на сигнальний вхід балансного змішувача 6. При цьому поглинальне навантаження 4 з високим опором шунтується низьким опором приймальної широкосмугової антени 1 і шуми поглинального навантаження 4 з високим опором не поступають на балансний змішувач 6. В закритому стані хвилевідного діодного ключа 2 на вхід балансного змішувача 6 поступають тільки шуми поглинального навантаження 4.

Електрично керований смуговий фільтр 5 із суцільного спектра вхідного сигналу (рис.2, а) виділяє вузькі ділянки частотного спектра (рис.2, б). Резонансна частота  $f_{рФ}$  електрично керованого смугового фільтра 5 встановлюється за допомогою вихідного струму суматора струму 18 за наступної процедури.

На пульті керування 20 встановлюється необхідне значення смуги вхідного сигналу  $\Delta f_c$  (рис.2, б), яке повинен пропустити електрично керований смуговий фільтр 5. Мікроконтролер 14 програмно формує цифрові сигнали, які перетворюються цифро-аналоговим перетворювачем 15 в пропорційний струм  $J_1$ . Після підсилення струму на виході підсилювача

струму 16 отримуємо

$$J_2 = K_1 J_1, \quad (1)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт перетворення підсилювача струму 16.

Струм  $J_2$  поступає на елементи управління електрично керованого гетеродина 7 та встановлює на його виході частоту  $f_\Gamma$  (рис.2 б, в). Окрім того, струм  $J_2$  подається на перший вхід суматора струму 18, на другий вхід якого подається опорний струм  $J_0$  від джерела постійного струму 17. В результаті на виході суматора струму 18 формується струм

$$J_3 = K_1 J_1 + J_0. \quad (2)$$

Співвідношення струмів обирається таким, щоб задовольняти умовам  $J_3 > J_2$ , а збільшення струму на постійне значення  $J_0$  призводить до збільшення резонансної частоти електрично керованого смугового фільтра 5 на задане значення

$$f_{\text{рф}} = f_\Gamma + f_{\text{пч}}, \quad (3)$$

де  $f_{\text{пч}}$  – центральне значення частоти вибіркового підсилювача 8.

Напруга сигналу частоти ( $\Delta f_c$ ), що поступає на вхід балансного змішувача 6, визначається смугою пропускання  $\Delta f_\phi$  електрично керованого фільтра 5 (рис.2, б). Сигнали по дзеркальному каналу  $\Delta f'_c$  (рис. 2, в) відносно частоти електрично керованого гетеродина 7 затримуються електрично керованим смуговим фільтром 5 і на балансний змішувач 6 не потрапляють. В результаті на виході балансного змішувача 6 формуються частоти нижньої та верхньої проміжних частот (рис.2, г):

$$\Delta f'_{\text{пч}} = \Delta f_c + f_\Gamma, \quad \Delta f_{\text{пч}} = \Delta f_c - f_\Gamma. \quad (4)$$

Вибірковим підсилювачем 8 проміжної частоти виділяється різницевий сигнал  $\Delta f'_{\text{пч}}$ , а сумарний сигнал  $\Delta f'_{\text{пч}}$  затримується (рис.2, д).

За періодичної роботи хвилевідного діодного ключа 2 у відкритому стані на виході вибіркового підсилювача 8 проміжної частоти формується сигнал, дисперсію якого можна представити як

$$\overline{U_{8(1)}^2} = S_1 \cdot (\overline{U_c^2} + \overline{U_1^2} + \overline{U_{6,7}^2}) \cdot \Delta f_{\text{пч}}, \quad (5)$$

де  $S_1$  – крутизна гетеродинного перетворення потужності НВЧ в модуляційного радіометра  $\overline{U_c^2}$  – дисперсія вхідного сигналу в смузі  $\Delta f_c$ ;  $\overline{U_1^2}$  – дисперсія шумів приймальної широкосмугової антени 1;  $\overline{U_{6,7}^2}$  – дисперсія шумів балансного змішувача 6 та електрично керованого гетеродина 7.

В закритому стані хвилевідного діодного ключа 2 отримуємо

$$\overline{U_{8(2)}^2} = S_1 \cdot (\overline{U_4^2} + \overline{U_{6,7}^2}) \cdot \Delta f_{\text{пч}}, \quad (6)$$

де  $\overline{U_4^2}$  – дисперсія шумів поглинального навантаження 4.

В результаті періодичного відкриття та закриття хвилевідного діодного ключа 2 в часовій послідовності імпульсів з амплітудами (5) і (6) на виході фільтра 10 нижніх частот з'являється змінна складова

$$U_{10} = S_1 \cdot S_2 \cdot \frac{\overline{U_{8(1)}^2} - \overline{U_{8(2)}^2}}{2} = \frac{S_1 S_2 K_1}{2} \cdot (\overline{U_c^2} + \overline{U_1^2} - \overline{U_4^2}) \cdot \text{sign} \sin \Omega t \cdot \Delta f_{\text{ПЧ}}, \quad (7)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт передачі фільтра 10 нижніх частот;  $S_2$  – крутизна перетворення квадратичного детектора 9;  $\Omega$  – частота комутації приймальної широкопasmової антени 1.

За умови рівності шумів приймальної широкопasmової антени 1 та поглинального навантаження 4 ( $\overline{U_1^2} = \overline{U_4^2}$ ) вираз (7) можна записати у вигляді

$$U_{11} = \frac{1}{2} \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \overline{U_c^2} \cdot \text{sign} \sin \Omega t \cdot \Delta f_{\text{ПЧ}}. \quad (8)$$

Сигнал (8) подається через вибірковий підсилювач частоти комутації 11 на синхронний детектор 12, на другий вхід якого поступає опорний сигнал частоти  $\Omega$  від мікроконтролера 14.

В результаті синхронного детектування та усереднення інтегруючим аналого-цифровим перетворювачем 13 виділяється постійна складова, яка перетворюється в цифровий код

$$N = \frac{1}{2q} \cdot S_1 S_2 S_3 K_1 K_2 K_3 \cdot \overline{U_c^2} \cdot \Delta f_{\text{ПЧ}}, \quad (9)$$

де  $S_3$  – крутизна перетворення синхронного детектора 12;  $K_2$  – коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача частоти комутації 11;  $K_3$  – коефіцієнт перетворення інтегруючого аналого-цифрового перетворювача 13;  $q$  – одиниця молодшого розряду аналого-цифрового перетворювача 13.

Остаточно вираз (9) можна записати наступним чином:

$$N = \frac{1}{2q} \cdot S_0 \cdot \overline{U_c^2} \cdot \Delta f_{\text{ПЧ}}, \quad (10)$$

де  $S_0 = S_1 S_2 S_3 K_1 K_2 K_3$  – сумарний коефіцієнт перетворення сигналу в радіометричному каналі від антени 1 до входу мікроконтролера 14.

Частота налагодження електрично керованого смугового фільтра 5 може автоматично змінюватися в межах  $f_{\Phi_{\min}} - f_{\Phi_{\max}}$ , а вихідна частота електрично керованого гетеродина 7 змінюється при цьому від значення  $f_{\Gamma_{\min}}$  до  $f_{\Gamma_{\max}}$  з постійним зміщенням відносно частоти смугового фільтра 5.

Введення джерела 17 постійного струму та суматора струму 18 формує автоматичне зміщення частоти смугового фільтра 5 по відношенню до частоти гетеродина 7 на постійне значення проміжної частоти  $f_{\text{ПЧ}}$ .

.За цих умов забезпечується проходження вхідного сигналу в заданій смузі аналізу  $\Delta f_c = \Delta f_\phi$  в межах від  $f_{c\min}$  до  $f_{c\max}$  з паралельним придушенням дзеркальної смуги частот  $\Delta f'_c$ .

Використанням в якості переналагоджуваних елементів залізоітрієвих сфер забезпечує можливість роботи радіометра-спектроаналізатора в широкому діапазоні частот від одиниць до десятків ГГц із значним розширенням функціональних можливостей від глибинної радіо термометрії біологічних об'єктів, на частотах 1-6 ГГц, [4] до вимірювачів потужності і аналізу спектрів, наприклад, плазменних процесів та нагрітих фізичних тіл.

Так, наприклад, застосування стандартного смугового фільтра з ЗІГ-перестроюванням фірми [5] забезпечує смугу пропускання 20 МГц в діапазоні частот 1-12 ГГц з розв'язкою на рівні 80 дБ та ослабленням паразитних резонансів  $\geq 50$  дБ, що досить перспективно для побудови радіо термометра із глибинним скануванням джерел термонеоднорідностей біоб'єктів.

### **Висновки**

1. Таким чином, швидкоплинні зміни потужності вхідного широкопсмугового сигналу в режимі безперервного електричного сканування частоти смугового фільтра та гетеродина будуть відображатися на дисплеї радіометра-спектроаналізатора у вигляді зміни його дисперсії  $\overline{U_c^2}$ .

2. Режим сканування та швидкість розгортки кодової послідовності задається оператором програмно з пульта керування та мікроконтролером, що відкриває можливість більш тонкого аналізу сигналів суцільного спектру.

3. Розглянута схема забезпечує збільшення точності аналізу, оскільки, як впливає з виразу (10), результат вимірювання не залежить від рівня шумів як приймальної широкопсмугової антени, так і радіометричного каналу вузькопсмугового модуляційного радіометра-спектроаналізатора.

### **Література**

1. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф. и др. Микроволновая радиометрия физических тел и биологических объектов. – Жит-р.: Вид. «Вольнь», 2003- 408с.
2. Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф., Методы и средства СВЧ- радиометрии- Донецк.: ИПШ ”Наука і освіта“, 2011 – 324с.
3. Патент України №48597, МПК G01R29/08 / Пристрій для вимірювання спектральної щільності потужності низько інтенсивних електромагнітних випромінювань/ Ю.О.Скрипник, О.П.Яненко, О.А.Ваганов; Опубл. 25.03.2010 р., Бюл. № 6. – 5 с.
4. Гаевский В.С., Мешков Ю.В., Туз А.Д. Две модели медицинского радиотермометра / Матер. 20-й межд. конф. “КрыМиКо”, т. 2, Севастополь.-2010- С.1157-1158
5. www.betatvcom.dn.ua (YIG-tuned filter)

*Яненко О.П., Скрипник Ю.А., Куценко В.П. Вузькопсмуговий модуляційний радіометр- спектроаналізатор. В статті розглянута структурна схема автоматизованого вузькопсмугового радіометра – спектроаналізатора з гетеродинним перетворенням для дослідження сигналів суцільного спектра. Особливістю розробленого пристрою є можливість придушення сигналів дзеркального каналу та автоматизоване перенала-*

годжування (сканування) в діапазоні робочих частот. Розроблена схема забезпечує підвищення швидкодії за рахунок використання мікропроцесорного управління та точності і чутливості аналізу швидкоплинних процесів, оскільки результат вимірювання не залежить від рівня власних шумів приймальної антени і радіометричного каналу перетворення вхідного сигналу.

**Ключові слова:** широкопasmовий сигнал, модуляційне перетворення, радіометр-спектроаналізатор, дзеркальний канал., вузькопasmовий фільтр

Яненко А.Ф., Скрипник Ю.А., Куценко В.П. **Узкополосный модуляционный радиометр-спектроанализатор.** В статье рассмотрена структурная схема автоматизированного узкополосного радиометра – спектроанализатора с гетеродинным преобразованием для исследования сигналов сплошного спектра. Особенностью разработанного устройства является подавление сигналов зеркального канала и автоматизированное перестраивание в диапазоне рабочих частот. Разработанная схема обеспечивает увеличение быстродействия за счет использования микропроцессорного управления, а также повышение точности и чувствительности анализа быстропротекающих процессов, поскольку результат измерения не зависит от уровня собственных шумов приемной антенны и радиометрического канала преобразования входного сигнала.

**Ключевые слова:** широкополосный сигнал, модуляционное преобразование, радиометр-спектроанализатор, зеркальный канал., узкополосный фильтр

Yanenko O.P. Skripnik Y.A. Kutsenko V.P. **Narrowband modulation radiometer-spectral analyzer.** This article presents the block diagram of highly automated narrowband radiometer-spectral analyzer which operates by heterodyne signal transformation. It is being used for researching signals with continuous spectrum. The main feature of the device is suppression of the mirror channel signals and a highly automated frequency rebuild (scanning) in the range of operating frequencies. Scheme developed provides increasing of performance being microprocessor driven. Also precision and sensitivity of fast processes analysis is being increased because measurement result doesn't depend on the receiving antenna and feeder noise levels.

**Keywords:** wideband signal, modulation transformation, radiometer-spectral analyzer, mirror channel, narrowband filter.