

УДК 621.317

В.П. Куценко, к.т.н., доц.

Державний університет інформатики і штучного інтелекту

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАПРАВЛЕННОГО ХВИЛЕВІДНОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА В УМОВАХ НИЗЬКОІНТЕНСИВНИХ СИГНАЛІВ

Запропоновано математичну модель спрямованого хвилевідного відгалужувача з урахуванням перетворення низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких зіставимо з паразитними шумами вхідних елементів вимірювальної радіометричної системи.

Вступ. В останнє десятиліття все більша увага вчених приділяється прямим методам реєстрації реакції біооб'єктів і фізичних матеріалів на зовнішні електромагнітні випромінювання (ЗЕВ). Це пов'язано з вивченням можливостей використання низькоінтенсивних ЕМВ мм-діапазону для дефектоскопії, діагностики і терапії [1, 2].

При взаємодії досліджуваних матеріалів із зовнішнім ЕМВ, окрім інтенсивності випромінювання, важливими параметрами можуть бути коефіцієнти поглинання і випромінювання на частоті резонансних проявів, фазові зсуви у відбитому сигналі та ін. Істотним при цьому є те, що вимірювання цих параметрів необхідно здійснювати на рівнях, близьких до рівня власного випромінювання об'єктів дослідження – $1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-15}$ Вт [3].

Реалізація системи для вимірювання поведінки різноманітних об'єктів у зовнішньому полі (рис. 1) передбачає наявність генератора сигналу опромінення (G1) і вимірювально-радіометричного приймача (РП), які підключаються до приймально-передавальної антени X1 через напрямлений хвилевідний відгалужувач A1.

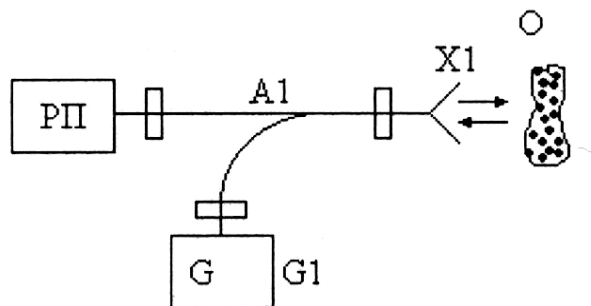


Рис. 1. Схема дослідження об'єктів у зовнішньому електромагнітному полі

Направлені хвилевідні відгалужувачі (НХВ) широко використовуються в радарних системах для розділення випромінюваного і відбитого сигналу при реєстрації залежності інтенсивності власного ЕМВ об'єктів дослідження від інтенсивності зовнішнього опромінення широкосмуговим шумовим сигналом, вимірювання власних резонансних частот матеріалів, оцінки нерівноважної складової [3, 4, 5].

Але, незважаючи на широке застосування НХВ, на сьогодні, як показує аналіз літературних джерел [3, 4, 6, 7], розрахунок параметрів направлених відгалужувачів, що використовуються у високочутливих радіометричних системах, здійснюється без урахування власних шумів вхідних елементів схем, що призводить до додаткових похибок вимірювань.

Постановка завдання. Розробка математичної моделі НХВ мікрохвильового діапазону, який з мінімальними похибками може забезпечувати перетворення відбитих від об'єктів низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких зіставний з паразитними шумами вхідних елементів вимірюваних радіометричних систем, є актуальним завданням в питаннях створення нових покращених зразків радіометричної апаратури.

Основна частина. В направленому відгалужувачі поряд із вхідним плечем, в яке надходить потужність від джерела, і розв'язаним, ізольованим від вхідного, розрізняють два вихідних плеча – прямого зв'язку із входом, яке розміщене в одному хвилеводі із вхідним плечем, і направленою зв'язку, яке розташоване в одному хвилеводі з розв'язаним плечем.

На рисунку 2 зображена конструкція досліджуваного відгалужувача.

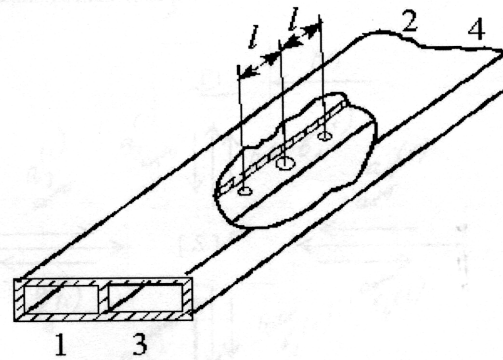


Рис. 2. Конструкція направлено хвильовідного відгалужувача

На рисунку 2 плече 1 є вхідним, плече 2 – плечем прямого зв’язку із входом, 3 – розв’язаним плечем і 4 – плечем направлено зв’язку.

Розглянемо роботу НХВ у схемі автоматизованого контрольно-вимірювального комплексу, вхідна частина якого зображена на рисунку 3 [5].

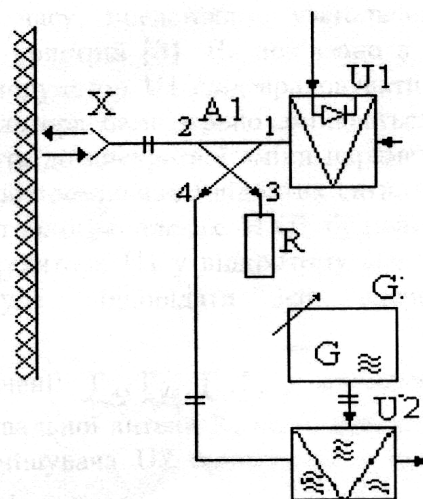


Рис. 3. Функціональна схема вхідного каскаду автоматизованого контрольно-вимірювального комплексу

На функціональній схемі до плеча 1 підключено модератор U_1 , до плеча 2 – приймально-передавальна антена X , до плеча 4 – змішувач U_2 приймального тракту радіометра і до плеча 3 – опір навантаження R . Амплітудний модулятор U_1 комутує подачу в НХВ низькоінтенсивного шумового електромагнітного сигналу НВЧ-діапазону. У відкритому стані U_1 пропускає крізь НХВ A_1 у плечі 2 і 4 низькоінтенсивні шумові сигнали і в закритому стані відбиває прийнятий антеною X від об’єкта дослідження сигнал реакції цього об’єкта, що пройшов від плеча 2 у плече 1, на випромінення у плечах 2 і 4. При подальшому розгляді зробимо такі припущення: в НВЧ-тракті забезпечено широкосмуговий режим роботи; процеси у тракті характеризуються квазістаціонарністю; амплітудний модулятор лінійний; залежність між вихідними сигналами НХВ і потужностями, що надходять на його вхід, лінійна; діелектричним заповненням НХВ є повітря; НХВ виготовлено із провідника, близького до ідеального.

Направлений відгалужувач для розрахунку його комплексних параметрів може бути представлений як восьмиполосник (рис. 4).

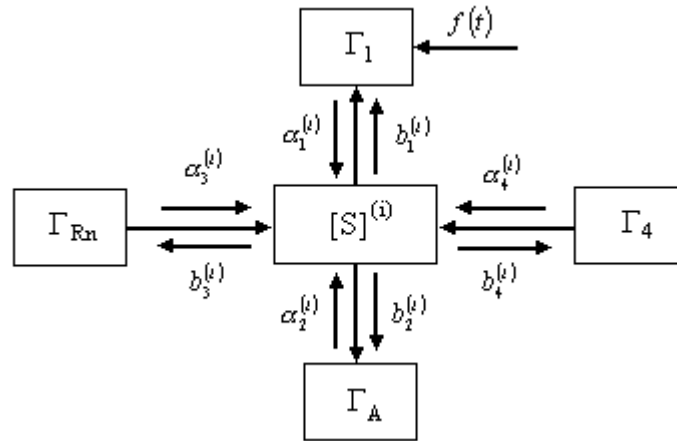


Рис. 4. Узагальнена модель напрямленого хвильовідного відгалужувача як восьмиполіюсника для розрахунку його комплексних параметрів

З точки зору розповсюдження енергії НХВ, що характеризується матрицею розсіяння з елементами, які є функціями часу, представимо узагальненим восьмиполіюсником і будемо розглядати як параметричний пристрій [3]. Це пов'язано з тим, що при дії керуючого сигналу $f(t)$ на амплітудний модулятор U1 слід враховувати виникнення перехідного процесу, при якому параметри модулятора безперервно змінюються в часі від одного стаціонарного стану до іншого, що призводить до дискретної зміни параметрів матриці розсіяння за рахунок проходження у відгалужувачі випромінених і відбитих сигналів.

Для спрощення відлік сигналів у плечах НХВ будемо здійснювати в моменти часу, що відповідають знаходженню модулятора U1 у відкритому або закритому i -му стані. Кожному i -му стану модулятора буде відповідати i -те значення параметрів узагальненого восьмиполіюсника $S_{mn}^{(i)}$.

На схемі (рис. 4) позначені: $\Gamma_A, \Gamma_{Rn}, \Gamma_1, \Gamma_3$ – комплексні коефіцієнти відбиття (ККВ), відповідно, приймально-передавальної антени X, навантаження R, амплітудного модулятора U1, підключеного до плеча 1, і змішувача U2 приймального тракту радіометра, підключеного до плеча 4.

Визначимо залежність вихідних сигналів ЕВЧ перетворювача НХВ як восьмиполіюсника від параметрів $S_{mn}^{(i)}, \Gamma_A, \Gamma_{Rn}, \Gamma_1, \Gamma_3$ і електричних компонентів шумових корисних і паразитних сигналів, що надходять на всі плечі відгалужувача. Для цього використаємо відомий взаємозв'язок падаючих і відгалужених хвиль на полюсах восьмиполіюсника [8, 9]:

$$\begin{cases} b_1^{(i)} = S_{11}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{12}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{13}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{14}^{(i)} a_4^{(i)}, \\ b_2^{(i)} = S_{21}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{22}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{23}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{24}^{(i)} a_4^{(i)}, \\ b_3^{(i)} = S_{31}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{32}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{33}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{34}^{(i)} a_4^{(i)}, \\ b_4^{(i)} = S_{41}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{42}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{43}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{44}^{(i)} a_4^{(i)}, \end{cases} \quad (1)$$

де $a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}, a_4^{(i)}$ – нормовані падаючі хвилі у плечах 1, 2, 3, і 4 НХВ; $b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, b_3^{(i)}, b_4^{(i)}$ – нормовані відбиті хвилі відповідно в тих же плечах НХВ.

Граничні умови на полюсах узагальненого восьмиполіюсника в i -му стаціонарному стані (рис. 4) записуються так:

$$\begin{cases} a_1^{(i)} = E_1^{(i)} + b_1^{(i)} \Gamma_1^{(i)}, \\ a_2^{(i)} = E_A + b_2^{(i)} \Gamma_A, \\ a_3^{(i)} = E_{Rn} + b_3^{(i)} \Gamma_{Rn}, \\ a_4^{(i)} = E_4 b_4^{(i)} \Gamma_4, \end{cases} \quad (2)$$

де E_A і E_{Rn} – відповідно електричні компоненти сигналів від приймально-передавальної антени і від опору навантаження; $E_1^{(i)}$ складається із суми сигналів E_1^1 і E_1^M – відповідно електричних компонентів сигналів від генераторного блока, які проходять крізь амплітудний модулятор, і радіотеплових шумів модулятора при його відкритому стані, та E_1^2, E_1^M – відповідно електричних компонентів сигналів, що

надходять із плеча 2, і радіотеплових шумів модулятора при його закритому положенні; E_4 – електрична компонента сигналів радіотеплових шумів змішувача приймального тракту радіометра.

Підставляючи (2) в (1) і перегрупувавши складові системи рівнянь, отримаємо справа від знака рівності величини, що залежать тільки від параметрів восьмиполосника, а зліва – пов’язані з параметрами шумових сигналів:

$$\begin{cases} -S_{11}^{(i)}E_1^{(i)} - S_{12}^{(i)}E_A - S_{13}^{(i)}E_{Rn} - S_{14}^{(i)}E_4 = b_1^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + b_2^{(i)}S_{12}^{(i)}\Gamma_A + b_3^{(i)}S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn} + b_4^{(i)}S_{14}^{(i)}\Gamma_4, \\ -S_{21}^{(i)}E_1^{(i)} - S_{22}^{(i)}E_A - S_{23}^{(i)}E_{Rn} - S_{24}^{(i)}E_4 = b_1^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} + b_2^{(i)}(S_{22}^{(i)}\Gamma_A - 1) + b_3^{(i)}S_{23}^{(i)}\Gamma_{Rn} + b_4^{(i)}S_{24}^{(i)}\Gamma_4, \\ -S_{31}^{(i)}E_1^{(i)} - S_{32}^{(i)}E_A - S_{33}^{(i)}E_{Rn} - S_{34}^{(i)}E_4 = b_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} + b_2^{(i)}S_{32}^{(i)}\Gamma_A + b_3^{(i)}(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1) + b_4^{(i)}S_{34}^{(i)}\Gamma_4, \\ -S_{41}^{(i)}E_1^{(i)} - S_{42}^{(i)}E_A - S_{43}^{(i)}E_{Rn} - S_{44}^{(i)}E_4 = b_1^{(i)}S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} + b_2^{(i)}S_{42}^{(i)}\Gamma_A + b_3^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn} + b_4^{(i)}(S_{44}^{(i)}\Gamma_4 - 1) \end{cases} \quad (3)$$

Знайдемо із (3) відношення між нормованими відбитими хвилями у 2 і 4 плечах НХВ і електричними компонентами шумових сигналів:

$$\begin{aligned} & b_2^{(i)} \left[\frac{S_{13}^{(i)}(S_{22}^{(i)}\Gamma_A - 1) - S_{23}^{(i)}S_{12}^{(i)}\Gamma_4}{S_{13}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{S_{42}^{(i)}\Gamma_A(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{32}^{(i)}\Gamma_A S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] + \\ & + b_4^{(i)} \left[\frac{\Gamma_4(S_{13}^{(i)}S_{23}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{14}^{(i)})}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{(S_{44}^{(i)}\Gamma_4 - 1)(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{34}^{(i)}\Gamma_4 S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] + \\ & + E_1 \left[\frac{S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{11}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{1}{\Gamma_1^{(i)}} \right] + \\ & + E_A \left[\frac{S_{13}^{(i)}S_{22}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{12}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{S_{42}^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{32}^{(i)}S_{42}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] + \\ & + E_{Rn} \frac{S_{42}^{(i)}[(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})]}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}} + \\ & + E_4 \left[\frac{S_{13}^{(i)}S_{24}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{14}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{S_{44}^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{34}^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для спрощення співвідношення між нормованими відбитими хвилями введемо узагальнені комплексні константи, що характеризують у цілому параметричний восьмиполосник. Ці константи визначаються за такими формулами:

$$\alpha = \frac{S_{13}^{(i)}(S_{22}^{(i)}\Gamma_A - 1) - S_{23}^{(i)}S_{12}^{(i)}\Gamma_A}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{S_{42}^{(i)}\Gamma_A(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{32}^{(i)}\Gamma_A S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\Gamma_4(S_{13}^{(i)}S_{23}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{14}^{(i)})}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{(S_{44}^{(i)}\Gamma_4 - 1)(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{34}^{(i)}\Gamma_4 S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{11}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}}; \quad (7)$$

$$\delta = \frac{S_{13}^{(i)}S_{22}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{12}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{S_{42}^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{32}^{(i)}S_{42}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \quad (8)$$

$$\theta = \frac{S_{42}^{(i)}[(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})]}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \quad (9)$$

$$\vartheta = \frac{S_{13}^{(i)}S_{24}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{14}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} + \frac{S_{44}^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{34}^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{S_{41}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn}) + S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{43}^{(i)}\Gamma_{Rn}}. \quad (10)$$

Після введення узагальнених комплексних констант модель, що є нелінійною системою рівнянь (1)–(3), набуде вигляду:

$$b_2\alpha + b_4\beta + E_1\gamma + E_A\delta + E_{Rn}\theta + E_4\vartheta = 0. \quad (11)$$

Аналогічні дії виконаємо з другим і четвертим рівняннями системи (3), після перетворення отримаємо:

$$\begin{aligned}
 & b_2^{(i)} \left[\frac{S_{43}^{(i)}(S_{22}^{(i)}\Gamma_A - 1) - S_{23}^{(i)}S_{42}^{(i)}\Gamma_4}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{\Gamma_A [(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{12}^{(i)} - S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{32}^{(i)}]}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] + \\
 & + b_4^{(i)} \left[\frac{S_{43}^{(i)}S_{24}^{(i)}\Gamma_4 - S_{23}^{(i)}(S_{44}^{(i)}\Gamma_4 - 1)}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{\Gamma_A [(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{14}^{(i)} - S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{34}^{(i)}]}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] + \\
 & + E_1 \left[\frac{1}{\Gamma_1^{(i)}} + \frac{(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{11}^{(i)} - S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{31}^{(i)}}{S_{23}^{(i)}(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) - S_{13}^{(i)}S_{21}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}} \right] + \\
 & + E_A \left[\frac{S_{43}^{(i)}S_{22}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{42}^{(i)}}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{12}^{(i)} - S_{13}^{(i)}S_{32}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] + \\
 & + E_{Rn} \frac{S_{13}^{(i)}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}} + \\
 & + E_4 \left[\frac{S_{43}^{(i)}S_{24}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{44}^{(i)}}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{S_{14}^{(i)}(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1) - S_{34}^{(i)}S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}} \right] = 0. \tag{12}
 \end{aligned}$$

Для спрощення співвідношення між нормованими відбитими хвилями введемо допоміжні узагальнені комплексні константи, що також характеризують параметричний восьмиполосник:

$$\alpha' = \frac{S_{43}^{(i)}(S_{22}^{(i)}\Gamma_A - 1) - S_{23}^{(i)}S_{42}^{(i)}\Gamma_A}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{\Gamma_A (S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{12}^{(i)} - S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{32}^{(i)}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \tag{13}$$

$$\beta' = \frac{S_{43}^{(i)}S_{24}^{(i)}\Gamma_4 - S_{23}^{(i)}(S_{44}^{(i)}\Gamma_4 - 1)}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{\Gamma_4 [(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{14}^{(i)} - S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{34}^{(i)}]}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \tag{14}$$

$$\gamma' = \frac{1}{\Gamma_1^{(i)}} + \frac{(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{11}^{(i)} - S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{31}^{(i)}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}S_{31}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}}; \tag{15}$$

$$\delta' = \frac{S_{43}^{(i)}S_{22}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{42}^{(i)}}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1)S_{12}^{(i)} - S_{13}^{(i)}S_{32}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \tag{16}$$

$$\theta' = \frac{S_{13}^{(i)}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}}; \tag{17}$$

$$\vartheta' = \frac{S_{43}^{(i)}S_{24}^{(i)} - S_{23}^{(i)}S_{44}^{(i)}}{\Gamma_1^{(i)}(S_{23}^{(i)}S_{41}^{(i)} - S_{43}^{(i)}S_{21}^{(i)})} - \frac{S_{14}^{(i)}(S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn} - 1) - S_{34}^{(i)}S_{13}^{(i)}\Gamma_{Rn}}{(1 - S_{33}^{(i)}\Gamma_{Rn})(S_{11}^{(i)}\Gamma_1^{(i)} - 1) + S_{13}^{(i)}\Gamma_1^{(i)}S_{31}^{(i)}\Gamma_{Rn}}. \tag{18}$$

Після введення узагальнених комплексних констант (13)–(18) модель, що являє собою нелінійну систему рівнянь (1)–(3), матиме вигляд:

$$b_1\alpha' + b_2\beta' + E_1\gamma' + E_2\delta' + E_R\theta' + E_A\vartheta' = 0. \tag{19}$$

Розв'язавши разом (11) і (19), знайдемо вирази для нормованих відбитих хвиль b_2 , b_4 через узагальнені комплексні константи, що характеризують параметричний восьмиполосник, і електричні компоненти шумових сигналів.

$$b_2 = \frac{1}{\alpha'\beta' - \alpha'\beta} [E_1(\gamma'\beta - \gamma\beta') + E_A(\delta'\beta - \delta\beta') + E_{Rn}(\theta'\beta - \theta\beta') + E_4(\vartheta'\beta - \vartheta\beta')]; \tag{20}$$

$$b_4 = \frac{1}{\alpha'\beta' - \alpha'\beta} [E_1(\gamma'\alpha - \gamma\alpha') + E_A(\delta'\alpha - \delta\alpha') + E_{Rn}(\theta'\alpha - \theta\alpha') + E_4(\vartheta'\alpha - \vartheta\alpha')]. \tag{21}$$

Представлення еквівалентних констант через S -параметри узагальненого восьмиполосника за допомогою (5)–(11) і (13)–(19) дозволяє оцінити їх значення розрахунковим шляхом на стадії проектування або за результатами вимірювання після виготовлення НХВ. Ці значення можуть бути використані при реалізації алгоритмів обробки вимірювальної інформації, а також для точного визначення цих констант і оцінки похибок при реалізації процедури настроювання вимірювального НХВ.

Відповідно до розробленої математичної моделі стаціонарний стан вимірювального направленої хвилевідного відгалужувача характеризується дванадцятьма векторними α , α' , β , β' , γ , γ' , δ , δ' , θ , θ' , ϑ , ϑ' еквівалентними константами. Модель являє собою нелінійну систему рівнянь (20) і (21), що пов'язує вихідні сигнали НХВ і ККВ приймальної антени, навантаження і виходів змішувачів з електричними компонентами шумових сигналів.

Висновки. Розроблена математична модель НХВ, яка дозволяє з розрахунковою похибкою забезпечувати перетворення відбитих від об'єктів низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких співмірний з паразитними шумами вхідних елементів вимірювальних радіометричних систем.

Використання запропонованої математичної моделі при розрахунках НХВ в умовах роботи з низькоінтенсивними сигналами дозволить забезпечити підвищення точності й чутливості радіотехнічних систем.

Дана математична модель може бути реалізована при:

- реалізації алгоритмів обробки вимірювальної інформації, а також як перші наближення для точного визначення наведених констант при реалізації процедури настроювання вимірювального НХВ;
- оцінці значень констант розрахунковим шляхом на стадії проектування або за результатами вимірювань після виготовлення НХВ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Роль резонансных молекулярно-волновых процессов в природе и их использование для контроля и коррекции состояния экологических систем / *В.Н. Петросян, И.И. Сеницин, В.А. Ёлкин* и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 5–6. – С. 62–129.
2. Принципы моделирования и схемотехнической реализации низкоинтенсивной КВЧ диагностической и терапевтической аппаратуры / *И.Г. Дубонская, Н.Е. Житник, А.В. Миронов* и др. // Вестник новых медицинских технологий. – 1996. – Т. 3, № 2. – С. 85–90.
3. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / *Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко, В.П. Манойлов* и др. – Житомир : Вольт, 2003. – С. 232–289.
4. Головки Д.Б. Сверхвысокочастотные методы и средства измерения физических величин : учеб. пособие / *Д.Б. Головки, Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко*. – К. : Лыбидь, 2003. – С. 274–296.
5. *Rutsenko W.P.* Control-measuring complex / *W.P. Rutsenko, N.F. Tregubov* // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Спецвипуск. – Черкаси : Брама Україна, 2009. – С. 57–59.
6. Мищенко С.В. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов / *С.В. Мищенко, Н.А. Малков*. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – 127 с.
7. Карлинер М.М. Электродинамика СВЧ / *М.М. Карлинер*. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 2006. – 258 с.
8. Альтман Дж.Л. Устройства сверхвысоких частот / *Дж.Л. Альтман*. – М. : Мир, 1968. – 482 с.
9. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств / *М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев*. – М. : Сов. радио, 1970. – 242 с.

КУЦЕНКО Володимир Петрович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету інформатики і штучного інтелекту.

Наукові інтереси:
– прилади НВЧ.

Подано 18.05.2010

Куценко В.П., **Математична модель спрямованого хвилевідного відгалужувача в умовах низькоінтенсивних сигналів**

Запропоновано математичну модель спрямованого хвилевідного відгалужувача з урахуванням перетворення низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких зіставимо з паразитними шумами входних елементів виміральної радіометричної системи.

Куценко В.П. **Математическая модель направленного волноводного ответвителя в условиях низкоинтенсивных сигналов**

Предложена математическая модель направленного волноводного ответвителя с учетом преобразования низкоинтенсивных сигналов, уровень мощности которых сопоставим с паразитными шумами входных элементов измерительной радиометрической системы.

Kucenko V.P. **Mathematical model of the directed wave guide in the conditions of low intensive signals**

The mathematical model of the directed wave guide taking into account transformation of low intensive signals which level of capacity is comparable to parasitic noise of entrance elements of measuring radiometric system is offered.