

УДК 621.317.7

В.П. Куценко (канд. техн. наук, доц.)

Донецький національний технічний університет,

Інститут інформатики і штучного інтелекту, м. Донецьк, Україна

Казенне науково-виробниче підприємство «Кварсит», м. Костянтинівка, Україна

E-mail: donetsk50@mail.ru

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКІВ ВХІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НЗВЧ-РАДІОМЕТРІВ, ЯК ОСНОВНИХ ДЖЕРЕЛ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ НИЗЬКОІНТЕНСИВНИХ СИГНАЛІВ

Проаналізовані підходи і методи математичного та комп'ютерного апарату до розрахунків вхідних НЗВЧ-елементів радіометрів, розглянуті джерела похибок вимірювання низькоінтенсивних сигналів. Показані умови до розрахунків цих вузлів радіометрів, що вимірюють сигнали, рівень потужності яких порівнюємо з паразитними шумами вхідних елементів.

Ключові слова: радіометр, радіохвильовий аналіз, вимірювання, електромагнітне випромінювання.

Вступ. При аналізі структурних схем радіометрів надзвичайно високочастотного (НЗВЧ) діапазону з періодичним порівнянням видно, що приблизно понад 90% складають низькочастотні ланцюги, а 10% високочастотні. У той же час дослідження похибок вимірювання цих систем показує протилежну ситуацію — понад 90% похибок вносять високочастотні ланцюги, а 10% низькочастотні [1-5]. Тому одною з головних проблем, що стоять перед розробниками високочутливої радіометричної апаратури НЗВЧ-діапазону є забезпечення високої точності вимірювання параметрів сигналів, а отже і необхідної завадозахищеності, що вимагає оптимізації параметрів роботи вхідних НЗВЧ-елементів (мікрохвильові вузли) схеми, як основних джерел похибок вимірювань. Відмінність параметрів вузлів радіометричних вимірювальних систем від розрахункових приводить до погіршення їх основних метрологічних характеристик: чутливості, точності, широкосмуговості та ін.

Метою даної роботи є проведення аналізу підходів до розрахунків вхідних елементів НЗВЧ-радіометрів, розгляд джерел похибок вимірювання низькоінтенсивних сигналів і визначення умов до розрахунків цих вузлів радіометрів, що вимірюють сигнали, рівень потужності яких порівнюємо з власними паразитними шумами вхідних елементів.

Основна частина. В радіометричних системах з періодичним порівнянням у вхідних каскадах використовуються комутаційно-модуляційні перемикачі, подвійні хвильоводні трійники, спрямовані хвильоводні відгалужувачі та інші елементи НЗВЧ-діапазону.

У класичному виді завдання розрахунків їхніх характеристик і похибок розроблені й викладені в літературі [6-9]. Автори при цьому використовують апарати векторного аналізу, диференціальних рівнянь, теорії функцій комплексних змінних і матричної алгебри. Розгляд завдань ведеться, найчастіше, з позиції еквівалентних схем.

Пропонуються також теорії звичайних електричних кіл із зосередженими постійними, довгих ліній і матричний аналіз. Поряд із чисто електродинамічними методами, застосовуваними при розрахунку характеристик окремих НЗВЧ-елементів, роль яких, як і раніше, залишається значною, використовуються також для цих цілей методи теорії ланцюгів. При цьому як математичний апарат застосовуються різного роду матриці та їх перетворення: хвильові, повних опорів, провідностей і інш. Використання хвильових матриць дозволяє встановлювати в загальному виді співвідношення між комплексними амплітудами хвиль у різних крапках мікрохвильових вузлів, визначати коефіцієнти відбиття і передачі для цих ділянок.

Для розрахунків НЗВЧ-елементів застосовується також топологічний спосіб представлення і визначення залежностей між змінними, заснований на застосуванні орієнтованих графів. Цей метод тісно пов'язаний з матричним аналізом і використовується, по суті, при рішенні аналогічних завдань проектування [10].

Підвищення вимог до точності розрахунку НЗВЧ-елементів створює необхідність у застосуванні спеціального програмного забезпечення. Розроблено велику кількість програм, які різняться за своїми можливостями, сферами застосування і закладеними у них методами [11]. До найпоширеніших програмних продуктів електромагнітного моделювання належать Ansoft HFSS, CST Microwave Studio, Quick Wave, Microwave Office. Серед них найбільш швидкодіючим і менш вимогливим до обчислювальних ресурсів є Microwave Office. Програмні пакети CST Microwave Studio і QuickWave можуть використовуватися для моделювання НЗВЧ-елементів, але їх математична основа — метод кінцевих різниць, накладає серйозні обмеження на конструкції об'єктів аналізу.

Найбільш привабливим для розрахунків мікрохвильових вузлів на сьогодні є пакет програм Ansoft HFSS, що обчислює S -параметри і компоненти електромагнітного випромінювання (ЕМВ) для тривимірної структури довільної форми. Результати розрахунків можуть експортуватися в програми аналізу лінійних і нелінійних схем, а також у математичний пакет MATLAB. Однак, даний пакет, дозволяє проводити електромагнітний аналіз і розрахунок тільки пасивних елементів і може бути успішно застосований для розрахунку подвійних хвильоводних тройників і спрямованих хвильоводних відгалужувачів. Наміру застосувати для комутаційних модуляційних перемикачів мм-діапазону метод розрахунку узгоджених мод дає можливість аналізувати загальні властивості НЗВЧ-структур, але не дозволяє повністю вирішити завдання. Тут потрібно застосовувати комплексний підхід до моделювання, використовуючи аналітичні методи визначення електричних параметрів елементів, чисельні методи з використанням пакета Ansoft HFSS і методи теорії НЗВЧ-ланцюгів із застосуванням матриць розсіювання і орієнтованих графів [10].

Разом з тим при розрахунках вказаних вхідних мікрохвильових вузлів, як правило, використовуються рівні потужності сигналів, що перевищують значно власні шуми вхідних елементів, підключених до пліч створюваного багатополосника, а самі сигнали розглядаються як гармонійні або певного типу, без обліку того, що, залежно від умов поширення сигналів, мають місце вищі типи хвиль.

При розрахунках змішувачів звичайно їх розглядають як нелінійні елементи із квадратичною вольт-амперною характеристикою, що забезпечується обмеженням амплітуди гетеродину. При цьому допускається, що нелінійність більш високого порядку можна не враховувати. Це невиправдано знижує нелінійні перекручування, внесені змішувачем у вимірюваний низькоінтенсивний широкопasmовий шумовий НЗВЧ-сигнал. У той час особливістю радіометричних вимірювань зазначених сигналів є те, що фазова характеристика не є інформаційною, а корисну інформацію несе енергія вимірюваного сигналу й тому оптимізація змішувача буде відрізнятися від оптимізації звичайного перемножника [12-14].

Як показує аналіз [3, 15], розрахунки параметрів мікрохвильових вузлів зазначених високочутливих радіометрів здійснюється без обліку власних шумів вхідних елементів схем, що приводить до додаткових похибок вимірювань. Крім того при розрахунках допускаються наближення симетричності пристрів і узгодженості пліч, що на практиці складно здійснюється і, відповідно, ці спрощення споконвічно закладають додаткові похибки при розрахунках [10].

Такі спрощення не можна застосовувати при розрахунках вхідних НЗВЧ-елементів, що працюють в умовах низькоінтенсивних сигналів, порівнянних з рівнем паразитних шумів. У цьому випадку сумірність корисних і паразитних сигналів вимагає максимальної оптимізації комплексних параметрів розрахунків мікрохвильових вузлів (коефіцієнти відбиття пліч і коефіцієнти зв'язку між плечима), які обумовлюють в остаточному підсумку похибки вимірювань.

У загальному випадку багатополосний мікрохвильовий вузол описується S -матрицею, елементи якої являють собою комплексні коефіцієнти відбиття (ККВ) від входів

або комплексні коефіцієнти передачі між відповідними плечима пристрою. Вимірювання елементів матриці розсіювання дозволяє ідентифікувати всі зовнішні параметри мікрохвильового вузла і у процесі настроювання досягти близьких до оптимального значення характеристик як окремих елементів, так і всієї радіометричної системи в цілому.

Похибки вимірювання значною мірою визначаються структурою спектра ЕМВ і рівнем шумів прийомної частини радіометра. При цьому на похибки перетворення сигналів у вхідних НЗВЧ-вузлах впливає їх неузгодженість з елементами тракту, між якими вони включені, оцінити які можливо з використанням наступної еквівалентної схеми (рисунок 1).

На прикладі чотирьохполосника розглядається включення одного плеча аналізованого вхідного елемента (комутаційно-модуляційного перемикача, подвійного хвильоводного трійника, спрямованого хвильоводного відгалужувача) у схему, що має ККВ із боку вхідного вузла \tilde{A}_1^1 і навантаження \tilde{A}_2^2 .

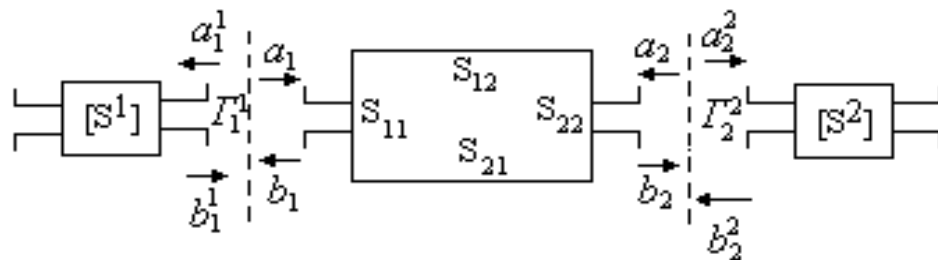


Рисунок — 1 Еквівалентна схема включення чотирьохполосника у вимірювальну систему

Власні коефіцієнти матриці розсіювання чотирьохполосника позначаються S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} і пов'язані з нормованими падаючими і відбитими хвилями співвідношенням [16, 17]

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2, \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2, \end{cases} \quad (1)$$

де a_1 , a_2 , — нормовані падаючі хвилі в плечах 1 і 2, b_1 , b_2 — нормовані відбиті хвилі відповідно до пліч 1 і 2 чотирьохполосника.

Еквівалентний коефіцієнт відбиття на вході чотирьохполосника буде

$$\Gamma_1 = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_2^2}{1 - S_{22}\Gamma_2^2}. \quad (2)$$

З вираження (2) слідує, що у випадку повного узгодження ($\Gamma_2^2 = 0$) з боку навантаження $\Gamma_1 = S_{11}$. Коефіцієнт передачі S_{21} буде визначатися відношенням сигналу на виході b_2 до сигналу на вході b_1^1 (при непогодженості вхідного елемента $[S^1]$ із чотирьохполосником значення сигналу на його виході буде $b_1^1 = a_1 - b_1\Gamma_1^1$) і можна записати $b_2/b_1^1 = b_2/a_1 \times a_1/b_1^1$. Оскільки $b_2/a_1 = S_{21}/(1 - S_{22}\Gamma_2^2)$, а $a_1/b_1^1 = 1/(1 - \Gamma_1\Gamma_1^1)$, те, відповідно,

$$\frac{b_2}{b_1^1} = \frac{S_{21}}{(1 - \Gamma_1\Gamma_1^1)(1 - S_{22}\Gamma_2^2)}. \quad (3)$$

З (3) видно, що при повному узгодженні з боку навантаження ($\Gamma_2^2 = 0$) і входу ($\Gamma_1^1 = 0$) коефіцієнт передачі S_{21} буде мати оптимальне значення. Звідси можна зробити висновок, що непогодженість елементів вимірювального тракту, яка характеризується

вираженням $\frac{1}{(1 - \Gamma_1 \Gamma_1^*)(1 - S_{22} \Gamma_2^*)}$ буде визначати похибку коефіцієнту передачі S_{21} чотирьохполосника. При цьому слід враховувати граничні умови на його полюсах, які в даному випадку записуються наступним співвідношенням [16, 17]:

$$\begin{cases} a_1 = b_1^1 + b_1 \tilde{A}_1^1, \\ a_2 = b_2^2 + b_2 \tilde{A}_2^2, \end{cases} \quad (4)$$

де $b_1^1 = E_x + E_{\theta 1}$ — включає в себе відповідно електричні компоненти сигналів від НЗВЧ-елемента з матрицею розсіювання $[S^1]$ і радіотеплові шуми від цього елемента; $b_2^2 = E_{\theta 2}$ — відповідно радіотеплові шуми від НЗВЧ-елемента з матрицею розсіювання $[S^2]$.

Таким чином, розрахунки високоякісних мікрохвильових вузлів, що з мінімальними похибками можуть забезпечувати перетворення низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких порівнюється з паразитними шумами вхідних елементів вимірювальних радіометричних систем, є актуальним завданням у питаннях створення нових зразків радіометричної апаратури.

Висновки

Розглянутий аналіз підходів до розрахунків вхідних елементів НЗВЧ-радіометрів, як основних джерел похибок вимірювання низькоінтенсивних сигналів, показує, що:

– в якості математичного апарату можуть застосовуватися матриці розсіювання, які дозволяють встановлювати в загальному виді співвідношення між комплексними амплітудами хвиль у різних крапках мікрохвильових вузлів, визначати коефіцієнти відбиття і передачі для цих ділянок; метод орієнтованих графів тісно пов'язаний з матричним аналізом і використовується, по суті, при рішенні аналогічних завдань проектування;

– найбільш привабливим для розрахунків мікрохвильових вузлів є пакет програм Ansoft HFSS, що може експортуватися в програми аналізу схем, а також у математичний пакет MATLAB;

– розрахунки вхідних елементів НЗВЧ-радіометрів в умовах низькоінтенсивних сигналів слід здійснювати з обліку власних шумів вхідних вузлів, враховувати можливу асиметричність елементів і неузгодженість їх пліч.

З урахуванням цього, у процесі настроювання НЗВЧ-елементів вдається досягти близьких до оптимального значення як їх характеристик, так і всієї радіометричної системи в цілому.

Список використаної літератури

1. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / [Валитов Р. А., Скресанов В. Н., Фисун А. И. и др.]; под ред. Р. А. Валитова и Б. И. Макаренко. — М.: Радио и связь, 1984. — 296 с.
2. Скрипник Ю.О. Проектування засобів вимірювання з періодичним порівнянням / Ю.О. Скрипник, М.О. Пресенко, В.О. Дубровний. — Кн. 1: Структура і похибки: навч. посібник. — Київ, 1997. — 163 с.
3. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / [Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф.]. — Донецьк: ППШ «Наука і освіта», 2011. — 324 с.
4. Яненко О.П. Основні принципи побудови високочутливих комутаційно – модуляційних радіометрів міліметрового діапазону / О.П. Яненко // Вісник ЖІТІ. — 1998. — №8. — С. 111–118.
5. Кириленко А. А. Системы электродинамического моделирования СВЧ-КВЧ устройств / А. А. Кириленко, В. И. Ткаченко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1996. — 39, № 9. — С. 17–28.
6. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / под ред. В.В. Никольского. — М.: Радио и Связь, 1982. — 272 с.

7. Fujimoto K. Mobile Antenna Systems Handbook / K. Fujimoto, J.R. James. - [2nd edition]. - Artech House, 2001. – 710 p.
8. Разевиг В.Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office / В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин; под ред. В.Д. Разевига. — СОЛОН-Пресс, 2003. — 496 с. - (серия «Системы проектирования»).
9. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. — К.: Наук. Думка, 1985. — 216 с.
10. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. - М.: Изд. Сов. Радио, 1970. — 248 с.
11. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е. Банков, А.А.Курушин, В.Д. Разевиг. — М.: Солон, 2004. - 283 с.
12. Куценко В.П. Анализ спектра мощности случайных сигналов на выходе смесителя радиометра крайне высокой частоты / В.П. Куценко, С.П. Сергиенко // Штучний інтелект: науково-теоретичний журнал. — 2010. — Вип. 4. — С. 229–235.
13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. — [3-е изд., перераб. и доп.]. — М.: Радио и связь, 1989. — 656 с.
14. Богатырев В.А. Математическое моделирование работы радиометра с шумовым гетеродином / В.А. Богатырев, С.П. Сергиенко, Н.Ф. Шпаренко // Весник Донецкого университета. Серия А. «Природничі науки». – 2005. - №1. - С. 230.
15. 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.
16. Куценко В.П. Математическая модель двойного волноводного тройника в условиях низкоинтенсивных сигналов / В.П. Куценко // Штучний інтелект: науково-теоретичний журнал. - 2010. - Вип. 3. - С. 590-598.
17. Куценко В.П. Математичне моделювання комутаційно-модуляційного перемикача низькоінтенсивних мм-сигналів / В.П. Куценко, О.П. Яненко, С.П. Сергієнко // КП: Вісник Національного технічного університету України. Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». — 2011. — Вип. 45. — С. 111–119.

Надійшла до редакції:
17.02.2012 р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф., Зорі А.А.

V.P. Kutsenko. Analysis of approaches to the estimation of the input of the elements of SHF-band radiometers, as the main sources of errors the measurement of low-intensity signals. Analyzed approaches and methods of mathematical and computer unit to the estimation of the input of EHF-elements of radiometers, reviews the sources of measurement errors of low-intensity signals. Shows the calculation of the units of radiometers, when measuring the signal power level which is comparable with parasitic noise of the input elements.

Keywords: *radiometr, the radio wave analysis, properties, electromagnetic radiation.*

В.П. Куценко. Анализ подходов к расчетам входных элементов КВЧ-радиометров, как основных источников погрешностей измерения низкоинтенсивных сигналов. Проанализированы подходы и методы математического и компьютерного аппарата к расчетам входных КВЧ-элементов радиометров, рассмотрены источники погрешностей измерения низкоинтенсивных сигналов. Показаны условия расчетов этих узлов радиометров, при измерении сигналов, уровень мощности которых сравним с паразитными шумами входных элементов.

Ключевые слова: *радиометр, радиоволновой анализ, измерение, электромагнитное излучение.*

© Куценко В.П., 2012