

О. Б. ЗАЙЧЕНКО, Н. Я. ЗАЙЧЕНКО

БАГАТОЗОНДОВИЙ МІКРОХВИЛЬОВИЙ МУЛЬТИМЕТР З ОБРОБКОЮ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ ФІЛЬТРОМ КАЛМАНА

Предметом дослідження в статті є процес вимірювання параметрів сигналів і трактів надвисоких частот (НВЧ). **Мета** роботи – реалізація на ПЛІС багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів з підвищенням точності за рахунок оптимальної обробки інформації, отриманої з датчиків. У статті вирішуються наступні **завдання**: створення моделі багатозондового мікрохвильового мультиметра з надмірною кількістю датчиків використання фільтрації Калмана у методі багатозондових мікрохвильових вимірювань і його реалізація на програмованих логічних інтегральних схемах (ПЛІС). Використовуються такі методи: лінійна алгебра при визначенні проміжних змінних зі зворотної матриці системи рівнянь, що описують багатозондову систему при побудові алгоритму обробки сигналів датчиків при непрямому вимірюванні потужності і коефіцієнта відбиття сигналів датчиків, теорія оцінювання при фільтрації проміжних змінних, як цільова функція при цьому виступає сума елементів головної діагоналі матриці дисперсії і коваріації (чим менше ця сума, тим менше похибка) за аналогією з методом найменших квадратів, де при D-оптимальному плануванні експерименту мінімізують добуток елементів головної діагоналі матриці дисперсії і коваріації, тому що добуток елементів головної діагоналі вносить основний вклад в обчислення визначника при зневажливо малих внедіагональних елементах матриці дисперсії і коваріації, в свою чергу визначник матриці дисперсії і коваріації візуалізується еліпсоїдом розсіювання, чим менше який, тим точніше вимірювання. Отримані наступні **результати**: удосконалена математична модель багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ, яка ґрунтується на перетворенні сигналів датчиків, розташованих вздовж напрямку передачі потужності у тракті у падаючу, відбиту та ту, що проходить, потужності і комплексний коефіцієнт відбиття навантаження, яка відрізняється фільтрацією проміжних змінних, що дозволило збільшити точність, запропоновано кінцевий автомат з такими станами, як прогнозування і оновлення алгоритму фільтра Калмана та його моделювання за допомогою ПЛІС. **Висновки** удосконалення обробки сигналів датчиків багатозондового мікрохвильового мультиметра дозволили збільшити точність вимірювань.

Ключові слова: багатозондовий мікрохвильовий мультиметр; фільтр Калмана; кінцевий автомат; ПЛІС; алгоритм обробки; надмірність.

Вступ

Технічний стан НВЧ-апаратури для зв'язку, супутникового телебачення, радіолокації визначають шляхом вимірювань параметрів електромагнітних коливань і параметрів передавальних трактів, серед яких основними є потужність і комплексний коефіцієнт відбиття навантаження.

Особливістю вбудованого контролю є неможливість безпосередньої участі оператора в процесі вимірювань, а також експлуатація вимірювальних засобів в жорстких кліматичних і механічних умовах під впливом широкого діапазону температур, вібрацій, ударів і інших чинників. У цих умовах використання відомих методів побудови автоматизованих вимірювальних приладів ускладнене, оскільки вони не забезпечують при малих габаритах перетворювачів збереження метрологічних характеристик протягом довгого часу в заданих межах, що призводить до зниження надійності та достовірності контролю.

З вбудованих засобів вимірювання і методів, на яких вони засновані, найбільш універсальним, і тому перспективним, є багатозондовий метод. Цей метод здатний забезпечити одночасне вимірювання як імпедансних характеристик тракту, так і енергетичних характеристик сигналу. На відміну від методу спрямованого відгалужувачі, він здатний працювати в трактах з великим розузгодженням, менш чутливий до позасмугових складових сигналу генератора. Однак цей метод вимагає підвищення точності. Підвищення точності за рахунок апаратних засобів, таких як

розробка нових датчиків, досягло межі. Залишився шлях підвищення точності багатозондового методу за рахунок дослідження маловивчених джерел похибок і їх усунення обробкою сигналів датчиків за оптимальними алгоритмами.

Застосування більш точних засобів вимірювання, принцип дії яких заснований на багатозондовому методі, доцільно і актуально, оскільки забезпечить економію енергоносіїв при експлуатації обладнання НВЧ, особливо при великих рівнях потужності за рахунок узгодження тракту, яке виконується за результатами вимірювань, а також в критичних ситуаціях сприятиме попередженню виходу з ладу генераторного обладнання.

Аналіз стану та перспектив багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ

У книзі [1] на сучасному рівні викладено практичне використання дванадцятиполюсників для мікрохвильових вимірювань, бездротових мереж і ін. Дванадцятиполюсні рефлектометри з'явилися в 70-х роках минулого століття і були розроблені Г.Ф. Енгеном. Одночасно у вітчизняній літературі опубліковані відомості про прилади з аналогічним принципом дії із різними назвами, такими як ватметри, багатозондові вимірювальні лінії, аналізатори кіл, рефлектометри, серед яких виділяється назва мультиметр, тому що вимірюється одночасно кілька параметрів: потужність, яка характеризує генератор і коефіцієнт відображення,

який характеризує навантаження. Таку назву як мультиметр введено А.І. Механніковим, авторитетним російським вченим з ВНДІФТРВ. Мультиметр, розроблений у ВНДІФТРВ, використовується в еталоні потужності, тобто його відрізняє висока точність. Визначення багатозондового відноситься до багатозондового методу вимірювань, а мікрохвильовий підкреслює, що цей радіовимірювальний прилад відноситься до діапазону надвисоких частот. Таким чином, багатозондовий мікрохвильовий мультиметр за міжнародною класифікацією відноситься до дванадцятиполюсних рефлектометрів і аналізаторів кіл, останні із згаданих пристроїв визначають матрицю розсіювання

тестованих пристроїв, оскільки, як відомо, з параметрами відбиття пов'язані параметри матриці розсіювання.

Багатозондовий мікрохвильовий мультиметр може одночасно вимірювати параметри сигналу, такі як відбита, падаюча і прохідна потужність, і параметр тракту, такі як модуль і фаза коефіцієнта відбиття навантаження, де навантаженням виступає тестований пристрій (DUT) [1-3]. Багатозондовий мікрохвильовий мультиметр має такий склад: два вхідних порти і чотири вихідних порти (рис. 1), сигнали чотирьох вихідних портів є чотирма різними лінійними комбінаціями хвиль, присутніх на його входах.

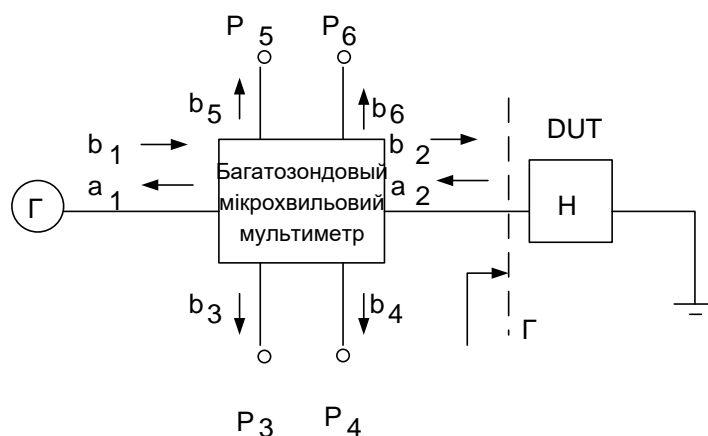


Рис. 1. Багатозондовий мікрохвильовий мультиметр (Г–генератор, Н–навантаження)

За більш ніж п'ятидесятирічну історію дванадцятиполюсні рефлектометри переживали і популярність і забуття, проте стабільно є об'єктом уваги, оскільки набагато дешевше векторних аналізаторів кіл, за рахунок більш простих датчиків, з сигналів яких шляхом обчислень отримують векторні величини комплексного коефіцієнта відбиття. Сучасні публікації в основному зосереджені на практичних додатках. Велика частина з них присвячена радарам на базі дванадцятиполюсних рефлектометрів, починаючи від [3], до сучасних [14–15], в тому числі медичні додатки [2]. Практичні напрямки більш привабливі тим, що в них отримання результатів відбувається швидше, ніж у теоретичних. Це пояснюється тим, дванадцятиполюсники в цілому і мультиметри зокрема характеризуються розвиненим і усталеним математичним апаратом, що включає графоаналітичне подання рішень у вигляді перетину кіл на площині комплексного коефіцієнта відбиття, введено Г.Ф. Енгеном і яке згодом стало візитною картою даного методу вимірювань. Поряд з графоаналітичним поданням моделі існує також і аналітичне подання, що полягає в описі системи за допомогою лінійної алгебри. Приблизно тоді ж на початку 70-х Г.Ф. Енгеним опублікована перша робота про застосування методу найменших квадратів в обробці сигналів датчиків у припущенні про їх надмірну кількість, тобто, якщо в класичному дванадцятиполюснику чотири датчика, то збільшення кількості датчиків може підвищити точність

результатів, причому незначно ускладнюючи і збільшуючи вартість пристрою. Метод найменших квадратів наразі розвивається представниками саратовської школи під керівництвом А.А.Львова [4, 12, 13], де отримано ряд цікавих наукових і прикладних результатів в вимірюванні параметрів діелектриків, інтернеті речей та ін. в прикладному плані, а також калібрування і розглядання в метрологічному сенсі математичної моделі і алгоритму з точки зору D-оптимального планування експерименту, заснованого на методі найменших квадратів з рядом цікавих висновків в теоретичному плані. Наш інтерес до даної теми [5, 7, 11] пояснюється історичними передумовами у вигляді існування харківської школи мікрохвильових вимірювань на базі ХНУРЕ, і в зазначених публікаціях [5, 7, 11] показаний перехід від методу найменших квадратів до фільтру Калмана [6] і процедури Робінса-Монро, а також проведено порівняння точності при обробці даними методами. Проведене моделювання і його результати призвели до наступного етапу – реалізації. Причому вибрано для реалізації обладнання не найпростіше з точки зору чисельних методів – ПЛІС [10].

Метою роботи є реалізація на ПЛІС багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів з підвищенням точності за рахунок оптимальної обробки інформації, отриманої з датчиків.

Математична модель багатозондового мікрохвильового мультиметра з надмірною кількістю датчиків, обробкою фільтром Калмана і отримані алгоритми

Фізична модель для багатозондового методу – це довільне кількість датчиків, встановлених на рівній відстані уздовж мікрохвильового тракту. Сигнали датчиків різні через те що пропорційні різній фазовій відстань від навантаження, що визначається їх розташуванням вздовж тракту. Математична модель багатозондового методу – система лінійних рівнянь. Система лінійних рівнянь пов'язує сигнали датчиків P_1, P_2, P_3 з невідомою падаючої потужністю P_{nao} і комплексним коефіцієнтом відбиття навантаження Γ, ϕ .

Зв'язок між ними здійснюється через проміжні змінні b_0, b_1, b_2 .

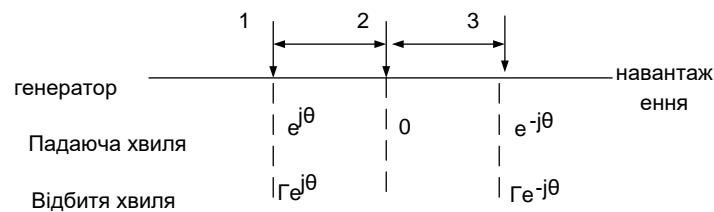


Рис. 2. Розташування трьох датчиків в вимірювальній секції

Після тригонометричного перетворення система лінійних рівнянь (1) в матричній формі має вигляд

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{nao}(1+\Gamma^2) \\ P_{nao}\Gamma \cos \phi \\ P_{nao}\Gamma \sin \phi \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Введемо проміжні змінні на основі виразу (2) і позначимо її

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{nao}(1+\Gamma^2) \\ P_{nao}\Gamma \cos(\phi) \\ P_{nao}\Gamma \sin(\phi) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матриця системи рівнянь A

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Матриця сигналів датчиків

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Математична модель мікрохвильового рефлектометра з трьома датчиками в матричному вигляді

$$[P] = [A][b]. \quad (6)$$

Математична модель дванадцятиполюсного пристрою являє собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Для вирішення системи рівнянь використовується апарат лінійної алгебри.

Модель для вимірювальної секції з трьома датчиками

$$\begin{cases} P_1 = P_{nao}(1+\Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\phi - \theta)) \\ P_2 = P_{nao}(1+\Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\phi)) \\ P_3 = P_{nao}(1+\Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\phi + \theta)) \end{cases}, \quad (1)$$

де Γ – модуль коефіцієнта відбиття, ϕ – фаза коефіцієнта відбиття, θ – фазова відстань між сусідніми датчиками, P_{nao} – падаюча потужність. Розташування трьох датчиків в вимірювальній секції показано на рис. 2.

Вона має рішення в матричному вигляді

$$[b] = [A]^{-1} \cdot [P], \quad (7)$$

де 1 – знак інверсії.

Рішення для проміжних змінних як функцій сигналів датчиків з виразу (7) має вигляд

$$b_0 = P_{nao}(1+\Gamma^2) = \frac{-P_1 + 2P_2 \cos \theta - P_3}{2(\cos \theta - 1)}, \quad (8)$$

$$b_1 = P_{nao}\Gamma \cos \phi = \frac{P_1 - 2P_2 + P_3}{2(\cos \theta - 1)}, \quad (9)$$

$$b_2 = P_{nao}\Gamma \sin \phi = \frac{P_1 - P_3}{2 \sin \theta}. \quad (10)$$

З проміжних змінних невідома передана потужність розраховується відповідно до її визначення

$$P_{prox} = \sqrt{b_0^2 - b_1^2 - b_2^2}. \quad (11)$$

Для фіксованої частоти і фазової відстані між сусідніми датчиками $\pi/2$

$$P_{prox} = \sqrt{(b_0 - b_2)(b_0 + b_2) - b_1^2}, \quad (12)$$

тоді

$$P_{prox} = \sqrt{P_1 \cdot P_3 - (2 \cdot P_2 - P_1 - P_3)^2}, \quad (13)$$

або для

$$P_{\text{прох}} = \sqrt{(b_0 - b_1)(b_0 - b_1) - b_2^2}, \quad (14)$$

тоді

$$P_{\text{прох}} = \sqrt{P_2 \cdot (2 \cdot P_2 - P_1 - P_3) - \left(\frac{P_1 - P_3}{2}\right)^2}. \quad (15)$$

У сигналах реальних датчиків через радіоперешкоди присутні випадкові похибки. Це означає, що наведена вище модель потребує вдосконалення, щоб залишатися точною. Точність може бути поліпшена шляхом усереднення і компенсації випадкових похибок. Умовою застосування такого підходу є надмірна кількість датчиків. Сигнали надлишкового числа датчиків обробляються алгоритмом фільтрації Калмана, який добре відомий в теорії управління [6]. Це покрокове уточнення оцінки шляхом обробки сигналів додаткових датчиків. Важливим моментом є те, що датчики в мікрохвильовому дванадцятиполюсному рефлектометрі просторово дискретні уздовж хвилевідного тракту, в той час як в класичній моделі фільтрації Калмана ці сигнали дискретні в часі.

Рівняння фільтрації

$$b(k+1) = b(k) + K(k)[P(k) - A(k)b(k)], \quad (16)$$

де $K(k)$ – коефіцієнт посилення, який забезпечує збіжність процедури

$$K(k) = \left(M^{-1} + A(k)^T R(k)^{-1} A(k)\right)^{-1} A(k)^T R(k)^{-1} = D(k)A(k)^T R(k)^{-1}, \quad (17)$$

де $D(k)$ – апостериорна дисперсія, для першого кроку ітерації вона дорівнює

$$D(k) = \left(D(k-1)^{-1} + A(k)^T R(k)^{-1} A(k)\right)^{-1}, \quad (18)$$

$b(k+1)$ – проміжна змінна на $k+1$ кроці, $b(k)$ – проміжна змінна на попередньому кроці, матриця R визначає похибку поточного вимірювання сигналів датчиків, матриця визначає стандартну девіацію проміжних змінних на даному етапі, T – знак транспонування матриці,

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos k\theta & -\sin k\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos(i-1)\theta & -\sin(i-1)\theta \end{bmatrix},$$

де i кількість датчиків, $i=1,2,\dots,8$. Крок $k=1$ відповідає $i=3$ датчикам, $k=2$ відповідає $i=4$ датчиків и та ін.

Перша ітерація для проміжних змінних обчислюється з виразів (8)–(10). Ці самі вирази служать для обчислення матриці M діагональних елементів. Діагональні елементи M є середньоквадратичними відхиленнями (8)–(10), за

умови, що сигнали датчиків мають однакове стандартне відхилення і некорельовані

$$M = \sigma^2 \begin{bmatrix} \frac{2 \cos^2 \theta + 1}{2(\cos \theta - 1)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2(\cos \theta - 1)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2 \sin^2 \theta} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де σ – стандартне відхилення.

Рівняння фільтрації Калмана (17) може бути надано структурною схемою (рис. 3), фізичний зміст якої полягає в тому, що вимірювані сигнали датчика надходять на вхід, проміжні змінні формуються на виході. Проміжні змінні, які отримані з виходу зберігаються в пристрої зберігання і, в той же час, помножені на $A(k)$, стають обчисленим сигналом датчика, який подається на другий вхід. Цей розрахований сигнал і вимірний сигнал віднімаються. Результуюча різниця множиться на коефіцієнт посилення $K(k)$. Добуток додається до вимірюваного сигналу. Це уточнена оцінка. У той же час він зберігається для наступного кроку і є вихідним сигналом. Процес ітеративний.

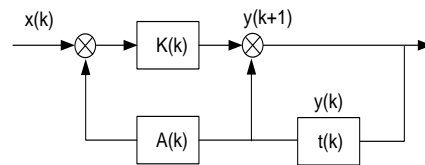


Рис. 3. Структура ітеративного алгоритму фільтра Калмана

Результати моделювання багатозондового мікрохвильового мультиметра з надмірною кількістю датчиків, обробкою фільтром Калмана та їх обговорення

Розглянемо застосування описаної процедури обробки сигналів датчиків дванадцятиполюсного рефлектометра за допомогою програмованої вентиляльної матриці (FPGA). Завдання цього підрозділу – використовувати FPGA при моделюванні та валідації запропонованого алгоритму для сигналу датчиків з обробкою за допомогою фільтра Калмана. Був обраний поведінковий підхід в програмуванні ПЛІС, тому що структурний підхід громіздкий [7–8].

При проектуванні цифрових пристроїв модель кінцевого автомата (FSM) широко поширена. Розглянемо можливість застосування FSM з фільтром Калмана. Було запропоновано чергувати в фільтрі Калмана стани "Припущення", "Оновлення", "Припущення1", "Оновлення1", "Припущення2" і так далі. Чергування відбувається по передньому фронту сигналу Clock. Був використаний VHDL для реалізації кінцевого автомата (FSM). Код VHDL складається з трьох процесів: STATE MEMORY, NEXT STATE LOGIC и OUTPUT LOGIC [11].

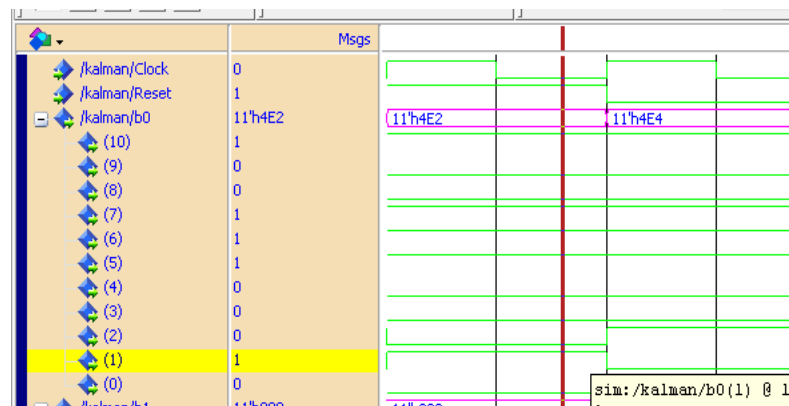


Рис. 4. Результати моделювання для проміжної змінної b_0 на першому кроці ітерації (три датчика)

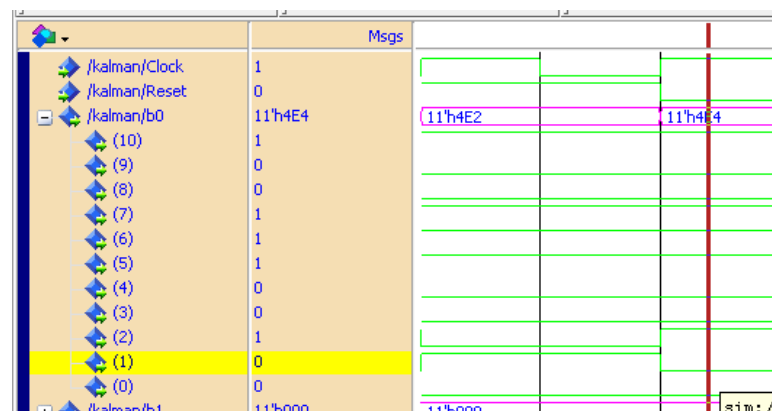


Рис. 5. Результати моделювання для проміжної змінної b_0 на другому кроці ітерації (чотири датчика)

Вихідними даними для моделювання є матриці системи $A(k)$, матриця вхідних сигналів $P(k)$, матриці M , $R(k)$ обчислені заздалегідь для k кроків, тобто для трьох, чотирьох, п'яти і т.д. датчиків. Вихід - це матриця проміжних змінних $b(k)$.

Для моделювання був використаний Modelsim-SE-64 10.5. Рис. 4 і 5 демонструє результати моделювання. На рис. 4 показано значення змінної b_0 на першому кроці ітеративного процесу, на рис. 5 показано значення змінної b_0 на другому кроці ітеративного процесу. Змінна b_0 по фронту сигналу Clock отримує наступне значення, яке наближується до істинного значення.

В даний час ПЛІС дуже популярні, оскільки мають низку переваг [3]. Але як показала спроба реалізації алгоритмів мультиметра на ПЛІС зустрічається багато труднощів при спробі реалізації методів обчислювальної математики, які включають в себе ітераційний метод розрахунку системи лінійних алгебраїчних рівнянь на VHDL. Наприклад, реальний тип даних не належить до синтезованого набору мови VHDL, що означає, що арифметичні операції не визначені для таких даних, змінні цього типу не призначаються. Ця проблема була частково вирішена шляхом перетворення типів даних. Знання предметної області дозволило нам перейти від змінних типу real до цілочисельних змінних. Для такого переходу стовпець матриці сигналів датчиків виражається в

мілівольтах, а матриця системи, що складається з синусів і косинусів фазових відстаней, була перетворена в такий спосіб. Ми вибрали фазову відстань між сусідніми датчиками 90 градусів. В цьому випадку були отримані синуси і косинуси як цілочисельні значення. Така програма може бути змодельована і синтезована в VHDL. В даний час виникають проблеми з точністю таких і подібних розрахунків. Перш за все, на рівні алгоритму існує проблема його збіжності до точного рішення. Крім того, ітеративний процес має умову зупинки при досягненні бажаної точності, але це також є джерелом помилки. І, нарешті, можливості обчислювального апарату. Коли перемножуються 16-розрядні числа, виходять 32-розрядні числа і так далі. Тому в подальшому необхідно оцінювати невизначеність результату.

Висновки

Точність може бути поліпшена при усередненні при обробці сигналів датчика рефлектометра з шістьма портами. Найкраща оцінка потужності і коефіцієнта відображення може бути отримана за допомогою фільтрації Калмана. Наведено приклад першої і другої ітерації для обробки на основі трьох сигналів датчиків, а потім додаванні сигналу четвертого датчика. Було доведено, що точність буде поліпшена, якщо додати наступний п'ятий датчик, і так далі.

Була обрана реалізація запропонованого методу на ПЛІС за допомогою VHDL. Часова діаграма (рис. 4, 5) містить вхідні сигнали, такі як Clock, Reset і вихідний сигнал b_0 , поточний стан і наступний стан.

Було показано зміна вихідних даних b_0 на 0 і 2 бітах, що збігаються з очікуванням.

Практична значимість отриманих результатів полягає в розробці методик синтезу та верифікації фільтра Калмана для мікрохвильових вимірювань.

Також зроблено висновок, що обчислення зворотних матриць під час використання алгоритму фільтрації Калмана слід уникати, так як це займає більше часу, ніж інші розрахунки.

Список літератури

1. Ghannouchi F. M., Mohammadi A. The six-port technique with microwave and wireless applications, Artech House, 2009, 231 p.
2. Vinci G., Lindner S., Barbon F., Mann S., Hofmann M., Duda A., Koelpin A., Six-port radar sensor for remote respiration rate and heartbeat vital-sign monitoring. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013, № 61 (5), 2093–2100. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2247055>
3. Li J., Bosisio R. G., Wu K. A collision avoidance radar using six-port phase/frequency discriminator (SPFD). 1994 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, May 1994, P. 1553–1556. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1994.335278>
4. L'vov A. A., Geranin R. V., Semezhev N., L'vov P. A. Statistical approach to measurements with microwave multi-port reflectometer and optimization of its construction. 2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE), P. 1–4, April 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120229>
5. Zaichenko O. B., Klyuchnik I. I., Miroshnik M. A., Tzekhmistro R. I. The comparative analysis of a multiprobe microwave multimeter with involvement of processing by Kalman filter and the least-squares methods with regard for re-reflection of probes. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015, No. 74(1), P. 79–86. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i1.70
6. Gelb A. Applied optimal estimation, MIT press, 1974, 316 p.
7. Zaichenko O., Miroshnyk M., Galkin P. Model and Algorithms for Microwave Mutiport Receiver, Problems of Infocommunications. Science and Technologies. PICST. P. 183–186, October 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061275>
8. Lima J. A. Multi-Port Receivers System Analysis and Modeling. Doctoral dissertation, Carleton University, 2017, 203 p.
9. Spirov R., Grancharova N., FPGA Kalman Filter for Intelligent Heating Technology System, XXIX International Scientific Symposium. Metrology and Metrology Assurance. P. 123–127, September 2019.
10. LaMeres B. J. Introduction to Logic Circuits and Logic Design with VHDL. Springer, 2019, 503 p.
11. Zaichenko O., Galkin P., Zaichenko N., Miroshnyk M. (2020, February). Six-port Reflectometer with Kalman Filter Processing of Sensor Signals. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020, P. 55–58. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061275>
12. Semezhev N., L'vov A., Askarova A., Ivzhenko S., Vagarina N., Umnova E., Mathematical Modeling and Calibration Procedure of Combined Multiport Correlator. Conference on Information Technologies. Springer, Cham. P. 705–719. February, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_57
13. L'vov A. A., Geranin R. V., Semezhev N. V., Solopekina A. A., L'vov P. A. A novel parameter estimation technique for software defined radio system based on broadband multi-port receiver. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). P. 1–5. May, 2015.
14. Moldovan E. A., Tatu S., Gaman T., Bosisio R. New 94-GHz Six-Port Collision-Avoidance Radar Sensor. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*, Vol. 52. № 3. P. 751–759. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.823533>.
15. Lindner S., Barbon F., Linz S., Mann S., Weigel R., Koelpin A. Distance measurements based on guided wave 24GHz dual tone six-port radar. In 2014 11th European Radar Conference, P. 57–60. October, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991206>.

References

1. Ghannouchi, F. M., Mohammadi, A. (2009), *The six-port technique with microwave and wireless applications*, Artech House, 231 p.
2. Vinci, G., Lindner, S., Barbon, F., Mann, S., Hofmann, M., Duda, A., Koelpin, A. (2013), "Six-port radar sensor for remote respiration rate and heartbeat vital-sign monitoring", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, No. 61 (5), P. 2093–2100. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2247055>
3. Li, J., Bosisio, R. G., Wu, K. (1994), "A collision avoidance radar using six-port phase/frequency discriminator (SPFD)", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, May 1994*, P. 1553–1556. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1994.335278>
4. L'vov, A. A., Geranin, R. V., Semezhev, N., L'vov, P. A. (2015), "Statistical approach to measurements with microwave multi-port reflectometer and optimization of its construction," *2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, P. 1–4, DOI: <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120229>
5. Zaichenko, O. B., Klyuchnik, I. I., Miroshnik, M. A., Tzekhmistro, R. I., (2015) "The comparative analysis of a multiprobe microwave multimeter with involvement of processing by Kalman filter and the least-squares methods with regard for re-reflection of probes", *Telecommunications and Radio Engineering*, No. 74 (1), P. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i1.70>
6. Gelb, A., (1974), *Applied optimal estimation*, MIT press, 316 p.
7. Zaichenko, O., Miroshnyk, M., Galkin, P. (2019), "Model and Algorithms for Microwave Mutiport Receiver," *Problems of Infocommunications, Science and Technologies, PICST*, P. 183–186. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061275>
8. Lima, J. A. (2017), *Multi-Port Receivers System Analysis and Modeling*, Doctoral dissertation, Carleton University, 203 p.
9. Spirov, R., Grancharova, N. (2019), "FPGA Kalman Filter for Intelligent Heating Technology System," *XXIX International Scientific Symposium, Metrology and Metrology Assurance, September 2019*, P. 123–127.
10. LaMeres, B. J. (2019), *Introduction to Logic Circuits and Logic Design with VHDL*, Springer, 503 p.

11. Zaichenko, O., Galkin, P., Zaichenko, N., Miroshnyk, M. (2020), "Six-port Reflectometer with Kalman Filter Processing of Sensor Signals," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, P. 55–58. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061275>
12. Semezhev, N., L'vov, A., Askarova, A., Ivzhenko, S., Vagarina, N., Umnova, E. (2019), "Mathematical Modeling and Calibration Procedure of Combined Multiport Correlator," *Conference on Information Technologies*, Springer, Cham., P. 705–719. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_57
13. L'vov, A. A., Geranin, R. V., Semezhev, N. V., Solopekina, A. A., L'vov, P. A. (2015), "A novel parameter estimation technique for software defined radio system based on broadband multi-port receiver", *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) May, 2015*, P. 1–5.
14. Moldovan, E. A., Tatu, S., Gaman, T., Bosiso, R. (2004), "New 94-GHz Six-Port Collision-Avoidance Radar Sensor," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*, Vol. 52, No. 3, P. 751–759. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.823533>
15. Lindner, S., Barbon, F., Linz, S., Mann, S., Weigel, R., Koelpin, A. (2014), "Distance measurements based on guided wave 24GHz dual tone six-port radar," *In 2014 11th European Radar Conference*, P. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991206>.

Надійшла (Received) 11.08.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зайченко Ольга Борисівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Харків, Україна; email: olha.zaichenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4936-2785>.

Зайченко Ольга Борисовна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов, Харьков, Украина.

Zaichenko Olga – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Design and Operation of Electronic Devices, Kharkiv, Ukraine.

Зайченко Наталія Ярославівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Харків, Україна; email: nataliia.zaichenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9798-7136>.

Зайченко Наталия Ярославовна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств, Харьков, Украина.

Zaichenko Nataliia – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduated Student of the Department of Microelectronics, Electronic Devices and Appliances, Kharkiv, Ukraine.

МНОГОЗОНДОВИЙ МИКРОВОЛНОВИЙ МУЛЬТИМЕТР С ОБРАБОТКОЮ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ ФІЛЬТРОМ КАЛМАНА

Предметом дослідження в статті є процес вимірювання параметрів сигналів і трактів СВЧ. **Цель** роботи – реалізація на ПЛІС багатовимірного методу вимірювання параметрів сигналів і трактів з підвищенням точності за рахунок оптимальної обробки інформації отриманої з датчиків. В статті розглядаються наступні **задачі**: створення моделі багатовимірного мікрохвильового мультиметра з надлишковим числом датчиків застосування фільтрації Калмана в методі багатовимірного мікрохвильового вимірювання і його реалізація на програмуємих логічних інтегральних схемах (ПЛІС). Використовуються такі **методи**: лінійна алгебра при визначенні проміжних змінних з оберненої матриці системи рівнянь, описуючої багатовимірну систему при побудові алгоритму обробки сигналів датчиків при косвенном вимірюванні потужності і коефіцієнта відбиття сигналів датчиків, теорія оцінювання при фільтрації проміжних змінних, як цільову функцію при цьому використовують суму елементів на головній діагоналі матриці дисперсій і коваріацій, чим менше ця сума, тим менше похибка, по аналогії з методом найменших квадратів, де при D-оптимальному плануванні експерименту мінімізують добуток елементів головної діагоналі матриці дисперсій і коваріацій, тому що добуток елементів головної діагоналі вносить основний вклад в вичислення визначника при пренебрежимо малих внедиагональных элементах матриці дисперсій і коваріацій, в свою чергу визначник матриці дисперсій і коваріацій візуалізується еліпсоїдом розсіяння, чим менше котрий, тим точніше вимірювання. Отримані такі **результати**: удосконалена математична модель багатовимірного методу вимірювання параметрів сигналів і трактів СВЧ, заснована на перетворенні сигналів датчиків, розташованих вздовж напрямку передачі потужності в тракті, в падаючу, відбиту і проходять потужності і комплексний коефіцієнт відбиття навантаження, яка відрізняється фільтрацією проміжних змінних, що дозволило підвищити точність, запропонований кінцевий автомат (FSM) з такими станами, як прогнозування і оновлення алгоритму фільтра Калмана і його моделювання з допомогою ПЛІС. **Висновки**: удосконалення обробки сигналів датчиків багатовимірного мікрохвильового мультиметра дозволило підвищити точність вимірювань.

Ключевые слова: багатовимірний мікрохвильовий мультиметр; фільтр Калмана; кінцевий автомат; ПЛІС; алгоритм обробки; надточність.

MULTIPROBE MICROWAVE MULTIMETER WITH PROCESSING OF SENSORS SIGNALS WITH KALMAN FILTER

The **subject** matter of article is the process of measuring the parameters of microwave signals and tracts. The **goal** of work is implementation on FPGA of a multi-robe method for measuring parameters of signals and tracts with an increasing of accuracy due to optimal processing of information received from sensors. The following **tasks** have been solved in the article: creation of a model of a multiprobe microwave multimeter with an redundant number of sensors using Kalman filtering in the method of multiprobe microwave measurements and its implementation on field-programmable gate array (FPGA). The following **methods** were used: linear algebra when defining intermediate variables from the inverse matrix of the system of equations describing a multiprobe system when creating a sensor signal processing algorithm for indirect measuring the power and reflection coefficient from sensor signals, estimation theory when filtering intermediate variables, where the sum main diagonal elements of the variance and covariance matrix is used as an objective function, the smaller this sum, the smaller the error, by analogy with the least squares method, where the D-optimal experiment design minimizes the product of the elements of the main diagonal of the variance and covariance matrix, because the product of the elements of the main diagonal introduces the main contribution to the calculation of the determinant for negligible off-diagonal elements of the variance and covariance matrix, in turn, the determinant of the variance and covariance matrix is visualized by the scattering ellipsoid, the smaller which is, the more accurate the measurement. The following **results** were obtained a mathematical model of a multiprobe method for measuring parameters of signals and microwave tracts, based on the conversion of signals from sensors located along the direction of power transmission in the tract into incident, reflected and passing power and a complex reflection coefficient of the termination, which differs by filtering intermediate variables, which made it possible to improve accuracy; a finite state machine (FSM) was proposed with states such as forecasting and updating the Kalman filter algorithm and its modeling using FPGA. **Conclusions:** improvement of signal processing of multiprobe microwave multimeter sensors has improved the measurement accuracy.

Keywords: multiprobe microwave multimeter; Kalman filter; state machine; FPGA; processing algorithm; redundancy.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Зайченко О. Б., Зайченко Н. Я. Багатозондовий мікрохвильовий мультиметр з обробкою сигналів датчиків фільтром Калмана. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 3 (13). С. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.145>.

Zaichenko, O., Zaichenko, N. (2020), "Multiprobe microwave multimeter with processing of sensors signals with Kalman filter", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (13), P. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.145>.