

Системы телекоммуникации, связи и защиты информации

УДК 621.317+621.37+537.86

О.С. Ящук, Б.М. Шелковников, канд. техн. наук

Системний підхід до моделювання НВЧ пристроїв

В данной статье предложен системный подход моделирования СВЧ устройств. Его основная идея состоит в установлении связей системных параметров устройств с их физическим конструкторско-технологическим исполнением в таких технологиях как LTCC, LCP. В работе рассмотрены уровни моделирования телекоммуникационных беспроводных систем, представлена аналитическая (теоретико-множественная) формулировка задачи, состоящая из входной, выходной информации и алгоритма ее решения. Приведены примеры моделирования LCP-антенны и LTCC-фильтра согласно предложенному подходу.

This paper proposes a system approach to microwave devices modeling. Its basic idea is to establish relations between system parameters of devices and their LTCC, LCP physical implementation. In this work the levels of wireless systems modeling are proposed, an analytical (set-theoretic) formulation of the problem consisting of input and output information and ways to get the result is presented. LCP-antenna and LTCC-filter modeling examples according to the proposed approach are demonstrated.

Вступ

Беспроводовий зв'язок – один з найбільш перспективних на сьогоднішній день напрямків галузі телекомунікацій. Беспроводові телекомунікаційні пристрої (ТКП) повинні забезпечувати ряд вимог користувача не тільки за якістю надання зв'язку, але й за зовнішніми характеристиками пристрою [1]. До цих характеристик можна віднести габарити, масу, енергоспоживання, дизайн та ін. Для реалізації таких характеристик, як габарити та маса, а також деяких інших радіотехнічних характеристик, з успіхом використовують існуючі нанотехнології виготовлення пристроїв. Це технології LTCC (Low-Temperature Cofired Ceramic – низькотемпературна кераміка) та LCP (Liquid Crystal Polymer – рідкокристалічний полімер). LTCC і LCP відносять до багатопарових інтегральних технологій конструкційного виконання ТКП. В світі цей на-

пряма стрімко розвивається: застосування цих технологій знайшло себе у виконанні окремих R, L, C елементів та цілих інтегральних RF (radio frequency - радіочастотний) приймально-передатвальних пристроїв (ППП). Наприклад, для технології LTCC в [2] реалізована антена для WLAN на 5 ГГц, фільтри в міліметровому діапазоні наведені в [3], в [4] представлений RF блок для системи LMDS; для технології LCP в роботах [5, 6, 7] показано результати ефективною реалізації таких пристроїв, як лінії передачі з низькими втратами, високочастотні котушки індуктивності, низькочастотні та широкопasmові фільтри, дуплексери, антени, RF блоки. За допомогою цих технологій можна задовольнити ще одну дуже важливу вимогу до нових ППП – універсальність, тобто їх можливість працювати з різними стандартами на різних частотах. В [6, 8] наведено дводіапазонні фільтри (LCP) та багатостандартна антена (LTCC) відповідно.

Серед основних напрямків розвитку безпроводових телекомунікацій визначені наступні: створення систем у міліметровому діапазоні хвиль та розроблення методів проектування й технології виробництва ТКП [9]. Отже, зважаючи на світову тенденцію розвитку сучасних ТКП надвисоких частот (НВЧ), постає задача створення комплексного системного підходу до їх моделювання.

Мета дослідження: на основі методів та систем автоматизованого проектування (САПР) створити ТКП та ППП з урахуванням реалізації їх в технологіях LTCC, LCP для НВЧ діапазону частоти.

I. Моделювання ТКБС

Розглянемо загальний випадок процесу моделювання телекомунікаційних безпроводових систем (ТКБС) [10].

Математична модель, яка адекватно описує об'єкт, що досліджується, дозволяє з мінімальними часовими й матеріальними витратами знаходити вірні технічні рішення. У випадку дослідження ТКБС урахувати й проаналізувати вплив безлічі факторів, що визначають якість роботи таких систем, неможливо без викори-

стання комп'ютерних моделей, що працюють на програмному забезпеченні (ПЗ) проектування.

Нижче запропонована класифікація й короткий опис рівнів проектування ТКБС і ПЗ, що може бути використане на кожному з рівнів.

Моделювання ТКБС можна представити у вигляді ієрархічної структури, яку складено в загальному випадку з 4 рівнів: системного (1), пристроїв (2), елементів/компонентів (ЕК) (3) і конструювання (4) (рис. 1).

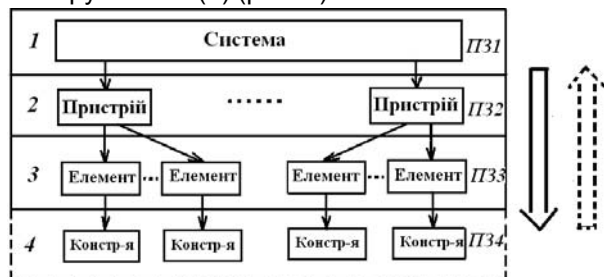


Рис. 1. Структура запропонованої класифікації рівнів моделювання ТКБС

На системному рівні висувають фундаментальні вимоги: тип зв'язку, пропускна спроможність системи й каналів, дальність зв'язку і т.д. Тут використовують ПЗ1: EDXSignalPro™, ComSitePro™, RPS-2. Порівняння цих пакетів із наведенням переваг і недоліків представлено в [11].

Вихідними даними для кожного наступного рівня є результати попереднього. Для рівня пристроїв такими є: потужність передавача, чутливість приймача, модуляція, тип антен та ін. На етапі 2 проектують пристрої (підсилувачі, фільтри, змішувачі, антени, суматори, модулятори) без розгляду ЕК; знаходять й оптимізують їх характеристики й параметри, застосовують ПЗ2: Advanced Design System (ADS), MicroWave Office (MWO) і ін. [11].

На рівні ЕК розглядають різні варіанти схемотехнічної побудови пристрою, здійснюється підбір параметрів і характеристик пасивних й активних елементів і використовують ПЗ3: ADS, MWO, MicroCap, WorkBench [11].

Рівень 3 може бути останнім, однак можна також розглядати рівень 4, на якому здійснюють конструкторсько-технологічне виконання самих елементів або цілих ТКП за допомогою ПЗ4: ADS, MWO, HFSS, CST. На рис. 1 суцільною стрілкою показаний напрямок проектування ТКБС. Якщо на якомусь етапі виявляється неможливість реалізації або нездійсненність критерію якого-небудь варіанта (при розгляді всіх можливих варіантів), тоді процес проектування змінює напрямок (стрілка пунктиром).

В термінах запропонованої класифікації задача полягає в моделюванні на 1-му або 2-му рівні, що залежить від інтегрального виконання ТКП. Це означає, що рівень ЕК не потрібен, що

зменшить час та полегшить процес моделювання. Раніше розглядалися задачі ко-симуляції (co-simulation – моделювання одночасно на різних рівнях), однак рівні були сусідніми: пристрої – елементи [12], елементи – мікросхеми [2]. Ко-симуляція на несуміжних рівнях раніше не розглядалась.

II. Аналітичне теоретико-множинне формулювання задачі

Будь-яку технічну задачу Z можна вирішити й повністю визначити трійкою множин [13]:

$$Z = (A_i, B_j, P_i), \quad (1)$$

де A_i – множина вхідної інформації (вхідні дані), B_j – множина вихідної інформації (вихідні дані, результат), P_i – спосіб (алгоритм) розв'язку цієї задачі.

Для конкретної задачі A_i і B_j можна представити у вигляді множини якісних показників $K_{пex}$ і $K_{пвух}$ відповідно. $K_{пex}$ визначається після моделювання на системному рівні або рівні пристроїв (рис. 1, (1), (2)), $K_{пвух}$ – результат проектування на рівні конструювання (рис. 1, (4)):

$$A_i = K_{пex} = \begin{Bmatrix} P_B \\ E_0 \\ K_{нс} \\ f \\ V_{мод} \\ \dots \end{Bmatrix} \quad \text{або} \quad A_i = K_{пex} = \begin{Bmatrix} K_{п} \\ \Delta F \\ a \\ m \\ n \\ \dots \end{Bmatrix},$$

$$B_j = K_{пвух} = \begin{Bmatrix} \mu_r \\ \varepsilon_r \\ l \\ str \\ \tan \delta \\ \dots \end{Bmatrix} \quad (2)$$

де P_B – потужність випромінювання приймача, E_0 – чутливість передавача, $K_{нс}$ – граничний коефіцієнт нелінійних спотворень, f – частота, $V_{мод}$ – вид модуляції, $K_{п}$ – коефіцієнти підсилення підсилувачів, ΔF – смуги пропускання фільтрів, a – згасання в смугі затримки фільтрів, m , n – числа, що визначають кількість складових на виході змішувача, μ_r – відносна магнітна проникність, ε_r – відносна діелектрична проникність, l – кількість шарів в конструкції, str – структура блока, яка включає всі лінійні розміри, $\tan \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат матеріалу.

Вихідні параметри залежать від вхідних, тобто $K_{пвух}$ – деяка функція F залежності від $K_{пex}$:

$$K_{пвух} = F(K_{пex}) \quad (3)$$

P_i – це складена математична модель конкретної задачі та її реалізація за допомогою САПР, тобто це залежність F з рівняння (3), а також його представлення в засобах моделювання. Враховуючи (2), (3) запишемо задачу (1) наступним чином:

$$3 = (K_{пвух}, K_{пвух}, K_{пвух} = F(K_{пвух})) \quad (4)$$

Однозначне визначення задачі 3 й складання її математичної моделі на теоретико-множинному рівні завершено. Далі представлені 2 приклади моделювання відповідно до запропонованої методики.

III. Результати моделювання

Далі розглянуто моделювання антени за допомогою технології LCP та смугового фільтра за технологією LTCC.

Для антени важливими атрибутами, з точки зору користувача, є малі фізичні розміри, відповідна смуга робочих частот і достатнє підсилення:

1. Фізичні розміри. Друкована антена на підложці має розміри, що є функцією властивостей підложки (μ_r, ϵ_r) та довжини хвилі (λ):

$$l \propto \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (5)$$

2. Смуга робочих частот (BW). Для антени смуга ($F_{max} - F_{min}$) розраховується в процентах по відношенню до центральної частоти (F_{center}):

$$BW = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{center}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Якщо BW відповідно до (6) дорівнює 5%, то антена вузько смугова, якщо 30% і більше – широкосмугова.

3. Підсилення. Підсилення вимірюється в дБі – відношення потужності, що випромінює направлена антена до потужності, що випромінює ізотропна антена. Підсилення – функція багатьох факторів, найбільш важливим серед яких є узгодження.

Зв'язок між системним параметром «частота», що визначає довжину хвилі, та розмірами зосереджений в (5). Цю залежність для антени можна використати як (3). Вхідні дані: частота 6,2 ГГц, параметр розсіювання не гірший ніж -25 дБ на центральній частоті.

В результаті моделювання отримано двошарову антену (рис. 2): верхній LCP-шар – 25 мікронів товщиною, розміром 18мм-25мм, відносна діелектрична проникність 2,95, тангенс кута втрат – 0,002, нижній твердий (основний) шар – 508 мікронів завтовшки, 18мм-9мм, тангенс кута втрат 0,0037, відносна діелектрична проникність 3,48.

Характерною властивістю матеріалів LCP є гнучкість. В ADS є можливість моделювання ан-

тени в різних станах. На рис. 3 зображено залежність параметра розсіювання S_{11} від частоти для 3-х станів антени: Straight (без згинання), Folded (зігнута), Rolled (кручена в циліндр). Як видно з рис. 3, всі вимоги витримані і навіть в зігнутих станах антена здатна виконувати свої функції. Слід зазначити, що зміна станів антени не дуже впливає на параметр розсіювання.

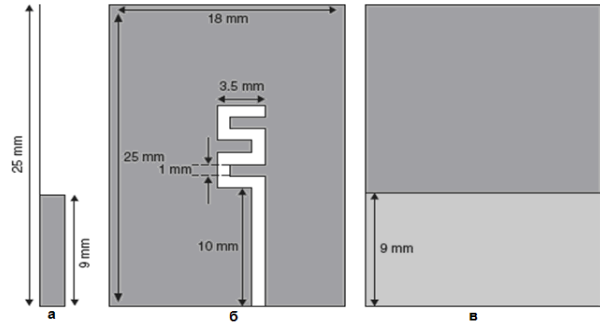


Рис. 2. Двошарова антена: а) вид збоку, б) вид зверху, в) вид знизу

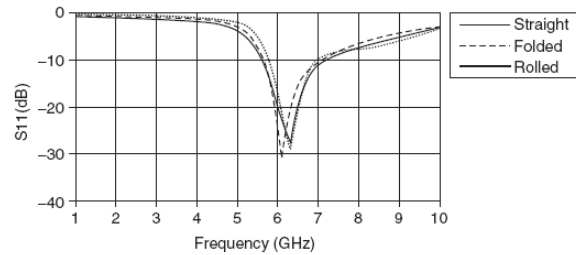


Рис. 3. Параметр розсіювання S_{11} LCP-антени на 6,2 ГГц при різних станах залежно від частоти

За аналогічною процедурою розроблено смуговий фільтр на частоті 2,4 ГГц за технологією LTCC. На рис. 4 представлено зображення фільтра на площині та в просторі.

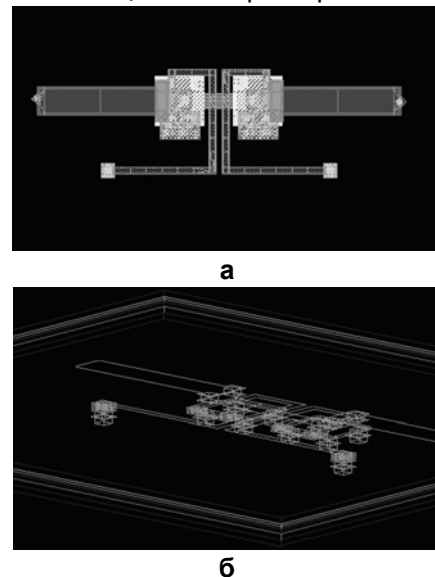
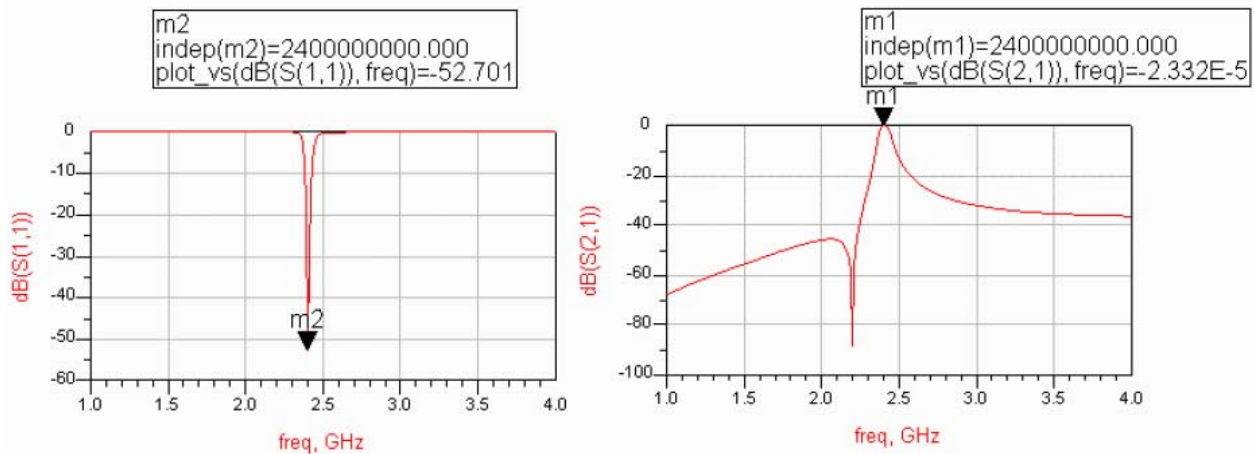


Рис. 4. Смуговий LTCC фільтр на 2,4 ГГц: а) 2D – б) 3D – зображення

На рис. 5 наведено результати моделювання: параметри S_{11} та S_{21}

Рис. 5. Параметри S_{11} та S_{21} смугового ЛТСС фільтра

Висновки

Основними результатами роботи можна вважати такі:

- обґрунтовано доцільність використання технологій LTCC та LCP під час конструювання пристроїв ТКБС;
- проведено класифікацію рівнів моделювання, що дозволить чітко відділяти етапи проектування один від одного;
- запропоновано новий системний підхід до моделювання НВЧ пристроїв, суть якого полягає у зв'язку системних параметрів з параметрами конструювання;
- складено аналітичний теоретико-множинний вираз задачі;
- наведено приклади моделювання відповідно до нового підходу: LCP антена на 6,2 ГГц та смуговий LTCC фільтр на 2,4 ГГц.

Подальша робота буде проводитись в напрямі моделювання інших пристроїв приймально-передавального тракту (змішувач, підсилювач та ін.) та RF блоку в цілому. Після цього буде розглянута задача, обернена до задачі (4), тобто оптимізація системних параметрів залежно від фізичних.

Комп'ютерне моделювання проведено на ПЗ Advanced Design System фірми Agilent Technologies.

Результати роботи отримано в рамках бюджетної науково-технічної теми «Моделювання та розробка телекомунікаційних пристроїв на основі метаматеріалів та інтегральних багатозарових технологій».

Література

1. Осипчук С.А., Иснюк Т.В., Шелковников Б.Н. Применение технологий LTCC и LCP для построения микроволновых устройств на базе метаматериалов. – В кн.: 19-я Межд. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). – Сев-ль: Вебер, 2009. – с. 575-576.
2. Jin-Seok Kim, et.al. 5 GHz band LTCC antenna for WLAN applications. – IEEE APS, July 2005. – pp.385 – 388.
3. V.Kondratyev et al. On the design of LTCC filter for millimeter-waves. – 2003 IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig. – Philadelphia, PA, June 2003. – pp. 1771-1773.
4. R. Kulke, M. Rittweger, P. Uhlig, C. LTCC – Multilayer Ceramic for Wireless and Sensor Applications. – Gunner IMST GmbH. – Germany, 2008. – 362 p.
5. K. Lim, S. Pinel, M. F. Davis, A. Sutono, C.-H. Lee, D. Heo, A. Obatoynbo, J. Laskar, M. Tentzeris, and R. Tummala RF-SOP for wireless communications. – IEEE Microwave Mag., 2002. – Vol. 3. – P. 88–99.
6. T. Suga, A. Takahashi, K. Saijo, and S. Oosawa New fabrication technology of polymer/metal lamination and its application in electronic packaging. – IEEE 1st Int. Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics Conf., Oct. 2001. – P. 29–34.
7. K. Brownlee, S. Bhattacharya, K. Shinotani, C. P. Wong, and R. Tummala Liquid crystal polymers (LCP) for high performance SOP applications. – 8th Int. Adv. Packag. Materials Symp., Mar. 2002. – P. 249–253.
8. D. Manteuffel, M. Arnold Considerations on configurable multistandard antennas for mobile terminals realized in LTCC technology. – 3rd Eur. Conf. on Antennas and Propagation [EuCAP'2009], 23-27 Mar. 2009. – P. 2541-2545.
9. Семенко А.І. Сучасний стан створення безпроводних телекомунікаційних систем. – Вісник НУ «ЛП» №645. – Львів: вид-во НУ «ЛП», 2009. – с. 56-67.
10. Яцук А.С., Шелковников Б.Н. Моделирование телекоммуникационных беспроводных

- систем.– В кн.: Труды 9-й Межд. научн.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ'2008). Том 1. – Одесса: ART-V, 2008. – с. 243.
11. Яцук А.С., Шелковников Б.Н. Программное обеспечение моделирования беспроводных систем СВЧ связи. – В кн.: 17-я Межд. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007) – Сев-ль: Вебер, 2007. – с. 345-348.
12. Г.В. Сердюк, Б.Н. Шелковников Смешанное моделирование радиочастотных цепей и систем. – В кн.: 15-я Межд. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). – Сев-ль: Вебер, 2005. – с. 439-442.
13. А.С. Яцук, Б.Н. Шелковников Системное моделирование приемопередатчиков спутниковой системы связи в мм диапазоне. – В кн.: 18-я Межд. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). – Сев-ль: Вебер, 2008. – с. 246-249.