

一種新型雙頻兼具諧波抑制之微小化 CCS 分合波器

陳志強^a、王舜煥^a、陳明瑜^a、李沅龍^a
逢甲大學 電機工程學系^a

摘要 本研究成功地結合開路殘段、步階阻抗及 CCS 合成傳輸線二維緊湊佈局的技術，開發出一種建構開路殘段、步階阻抗 CCS 分合波器的微小化單元模組，並適當地運用上述單元模組實現了一種新型微小化、雙頻且具有諧波抑制之 CCS 分合波器(rat-race)。相關電路佔用面積僅為傳統微帶(Microstrip, MS)環形(ring-shape) $(6/4)\lambda_g$ (at 2.45-GHz) 分合波器的 13.3%，且在雙頻(2.45/5.8-GHz)的電氣特性及諧波抑制的表現上皆有不錯地效果，已達成雙頻、諧波抑制且微小化的預期目標。¹

關鍵字—合成波導結構、傳輸線、180°分合波器、微波積體電路

一、簡介

為滿足未來市場用戶需求、提高產品競爭力，各式無線通信產品多朝向可攜式、高附加價值及降低成本等方向努力研發，以達成小型化、多功能及較低成本的研發目標。然相關產品電路模組的縮裝將是達成目標的關鍵技術之一。其中分合波器(rat-race)除了具有功率分配及合成的功能，亦同時具有同相(in-phase)/反相(out-of-phase)信號輸出功能，是組成微波產品/系統之關鍵電路模組。近年來有關 rat-race 電路之研發方向，計有諧波抑制 [1-5]、多頻 [6-13] 及微小化等議題的研究設計。

針對 Rat-Race 電路之諧波抑制的研究議題相關的成果參考如論文 [1-5]，其諧波抑制的設計技術計有：採用週期步階阻抗諧振器 [1]、低通濾波器單元結構 [2]、電容器加載 [3]、帶斥濾波器單元 [4] 及 T 型開路殘段 [5] 等方式，相關操作頻率僅單頻，且多在 0.5 – 2.45 GHz 等低頻段。由研究成果顯示：其中開路殘段及步階阻抗的方式，具有不錯地諧波抑制效果。

另針對有關 Rat-Race 多頻設計的研究成果參考如論文 [6-13]，其多頻的設計技術計有：採用 450° 傳輸線及兩個並聯殘段 [6]、270° 傳輸線及兩個開路殘段 [7]、步階阻抗結合開路殘段 [8]、T 型開路殘段單元 [9]、微波 C-section [10]、步階阻抗殘段線 [11]、T 型阻抗轉換器 [12] 及合成右/左-手半模基質整合導波管 [13] 等方式，相關研究則多為雙頻操作。由研究成果顯示：其(高/低)頻率比多在 1.60~2.42 之間，高頻率多在 6 GHz 以下。針對微小化、雙頻且兼具諧波抑制之 Rat-Race 設計研究的整合議題，則極少被談及。

近年來被提出且持續被研究及應用於微小化設計的一

種新型發展的合成近橫向電磁模(Synthetic quasi-TEM)傳輸線(transmission line, TL)結構，又稱互補傳導線帶傳輸線(complementary-conducting-strip TL, CCS TL)獲致相當不錯地微小化成效 [14-22]，特別值得一提的是在 [22] 論文中首次針對 Rat-Race 採用 CCS 合成傳輸線來實現雙頻(10/24-GHz)的設計，但其雙頻電路架構需加入兩組穿孔接地路由(Vias)、信號路徑總長大(720°)、電路佔用面積仍有研究改善的空間且未涉及諧波抑制等研究議題。至今針對有關運用 CCS TL 來設計微小化、雙頻且具有諧波抑制之 CCS Rat-Race 的設計及整合縮裝研究則從未被提出。

因此，本文擬開發一種整合開路殘段及步階阻抗及 CCS 合成波導結構的新型微小化單元的建構模組，進一步實現一種新型的微小化、具有諧波抑制、雙頻 Rat-Race 之整合縮裝設計研究，來達成微波電路產品多功能、高品質且更微小化之設計目標。

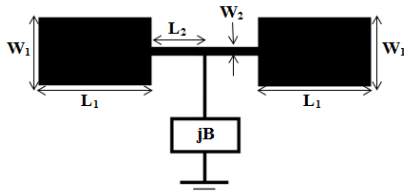
二、單元模組之建構及參數分析

本文提出一種建構雙頻(f_1/f_2)兼具諧波抑制功能之 rat-race 電路的新單元模組，示意如圖一所示，係由左右對稱“步階阻抗段”及中心並聯電納元件所組成。為提高可應用的頻段及簡化製作流程，有關並聯電納元件在此選用傳輸線開路殘段來取代，相關電路示意如圖二所示。為進一步瞭解相關電路元件參數尺寸($W_1 \sim W_3$, $L_1 \sim L_3$)對於此單元模組之電氣性能的影響，我們選用 RO4003C (板厚 20-mil, 銅厚 1OZ/1OZ) 的板材資料及 70.7-Ω 的系統參考阻抗，並運用微波電路模擬軟體(ex. Agilent ADSTM etc.) 來執行單元模組微帶電路之 S 散射參數頻率響應分析。藉由觀察 $|S_{11}|$ (dB) 振幅頻率響應(the first dip frequency: f_1 / the second dip frequency: f_2) 及 $\angle S_{21}$ 相位頻率響應 (the first -90° frequency: f_1 / the first $+90^\circ$ frequency: f_2)，隨著電路元件參數尺寸($W_1 \sim W_3$, $L_1 \sim L_3$)的變化情形，其中變數 W_1 之 S 散射參數頻率響應如圖三所示。當尺寸 W_1 遞增時， f_1 頻率先遞增，之後，再遞減； f_2 頻率則是持續遞增；而 f_1 及 f_2 則皆呈現遞減的結果。有關 W_1 及其他尺寸變數對 f_1 、 f_2 及 f_1 、 f_2 之觀察結果，彙整成表 I 單元模組設計之定性分析表。

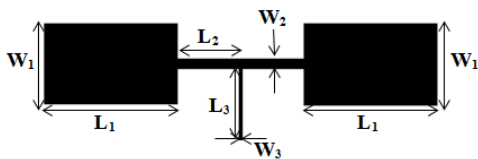
參考表 I，適當地調整電路元件參數尺寸($W_1 \sim W_3$, $L_1 \sim L_3$)，使 $f_1 = f_1$ 且 $f_2 = f_2$ ，即可獲致建構雙頻(f_1/f_2)兼具諧波抑制功能之 rat-race 電路的單元模組，進而獲致建構此單元模組所需相對之特性阻抗($Z_1 \sim Z_3$)及電長度($\theta_1 \sim \theta_3$)，其中 Z_i 、 θ_i 分別代表線寬 W_i 、線長 L_i 之傳輸線的特性阻抗及在 f_i 頻率下的電長度， $i = 1 \sim 3$ 。其中一種建構雙頻(2.45/5.8-GHz) 兼具諧波抑制功能之 rat-race 的

¹ 本研究由國科會贊助，計畫編號 NSC 101-2221-E-035-051-及 NSC 102-2221-E-035-008-。

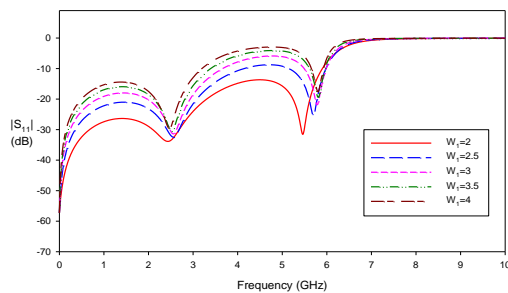
設計應用例，其單元模組電路各段之特性阻抗 $Z_1 \sim Z_3$ 分別為 42Ω 、 143Ω 及 108Ω ，而相對之電長度 $\theta_1 \sim \theta_3$ 分別為 21° 、 15° 及 29° ，下一節將以新發展之 CCS 合成傳輸線架構來實現一種新型微小化、雙頻兼具諧波抑制功能的 rat-race 分合波器。



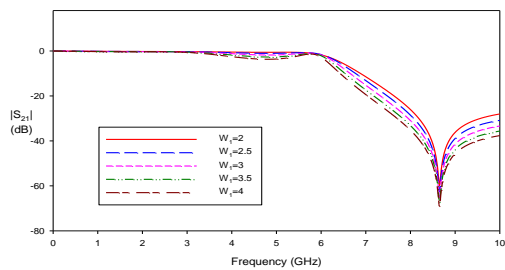
圖一：單元模組電路示意圖-內含步階阻抗段及並聯電納元件



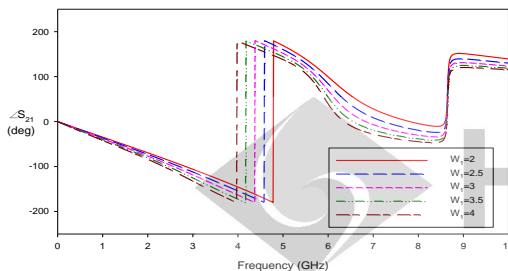
圖二：單元模組電路示意圖-內含步階阻抗段及並聯開路殘段



(a)



(b)



(c)

圖三：變數 W_1 (unit: mm)之 S 散射參數頻率響應 (a) $|S_{11}|$ (dB)，(b) $|S_{21}|$ (dB)及(c) $\angle S_{21}$ (Deg.).

表 I
單元模組設計之定性分析表

Variation increase	first dip point (f_1)	second dip point (f_2)	-90 degree (f_1')	+90 degree (f_2')
W_1	↗↘	↗	↘	↘
W_2	↗	↗	↗	↗
W_3	↗	↘	↘	↘
L_1	↘	↗	↘	↘
L_2	↘	↘	↘	↘
L_3	↗	↘	↘	↘

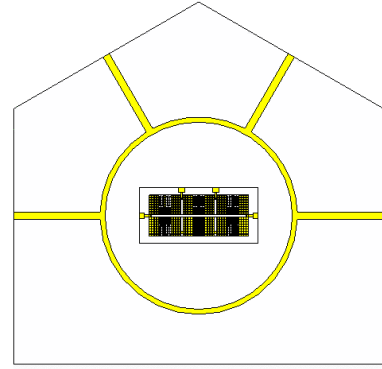
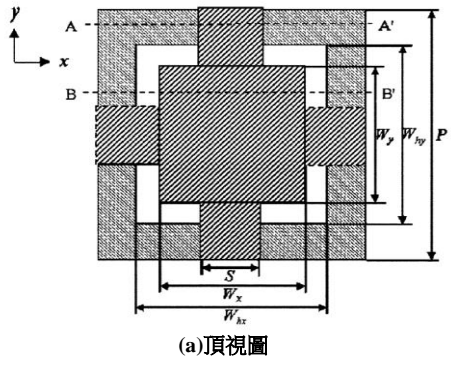
三、 雙頻兼具諧波抑制 CCS 分合波器之模擬分析

3.1 所需 CCS 傳輸線之波導特性分析

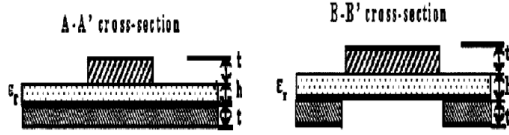
建構 CCS 傳輸線之單元細胞結構之頂視及側視分別如圖四(a)及圖四(b)所示，係由微帶線及信號線提高之共平面波導(co-planar waveguide, CPW)所合成[14]，藉由單元細胞各結構參數尺寸(週期 P 、信號矩形貼片寬 W_x 、 W_y 、連接臂寬 S 及接地面矩形穿孔寬 W_{hx} 、 W_{hy})的選用與調整及其二維緊密佈局，即可獲致建構微小化、雙頻兼具諧波抑制功能 rat-race 電路所需之不同特性阻抗的二維(two-dimensional, 2-D) CCS 傳輸線。在此選用 $P = 450 \mu\text{m}$ 、 $W_x = W_y$ 及 $W_{hx} = W_{hy}$ 之 CCS 單元細胞結構，經設計萃取所需 CCS 傳輸線及比較之 $70.7\text{-}\Omega$ MS 傳輸線之波導特性[14, 20, 23]—特性阻抗(Z_c)及慢波因子(slow-wave factor, $\text{SWF} = \beta/k_0$)，分析結果分別如圖五(a)、(b)所示，滿足設計所需之特性阻抗值。

3.2 CCS 分合波器之設計及電氣性能分析

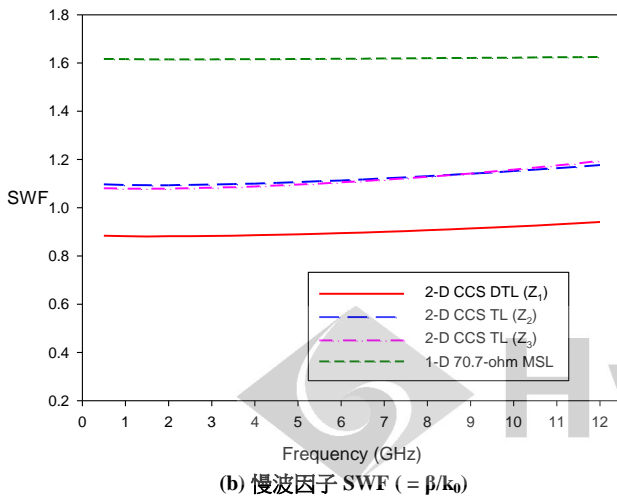
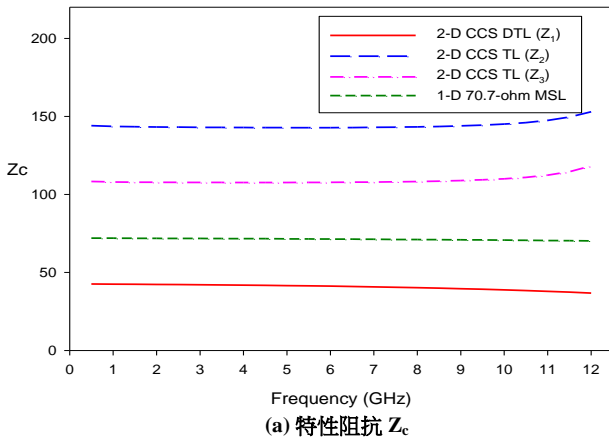
選用各段 CCS 傳輸線之特性阻抗 $Z_1 \sim Z_3$ 分別為 42Ω 、 143Ω 及 108Ω ，而相對之電長度 $\theta_1 \sim \theta_3$ 分別為 21° 、 15° 及 29° ，建構完成 CCS 單元模組電路，進而分別取代 $6/4 \lambda_g$ (單頻 f_1)傳統(conventional) MS 分合波器中各 $1/4 \lambda_g$ 段之電路，而獲致雙頻(f_1/f_2)兼具諧波抑制之微小化 CCS 分合波器電路。有關 CCS (f_1/f_2)分合波器(內圖)及傳統微帶(f_1)分合波器(外圖)比較示意如圖六所示，CCS 分合波器的佔用面積(不含饋入網路)僅為傳統 MS 分合波器之佔用面積的 13.3%；另其輸入損耗($|S_{11}|$, dB)、插入損耗($|S_{21}|$, dB)及隔離度($|S_{41}|$, dB)之電氣性能響應，分別如圖七(a)~(c)所示。由圖七結果顯示，傳統 MS(單頻 f_1 , 2.45-GHz)分合波器具有諧波響應($3 f_1$, $5 f_1$..)，而本研究 CCS 分合波器之電氣性能展現出雙頻(f_1/f_2 , 2.54/5.8-GHz)響應，且兼具 $3 f_1$ 、 $5 f_1$ 諧波抑制的功能，抑制水準達 20-dB 左右。



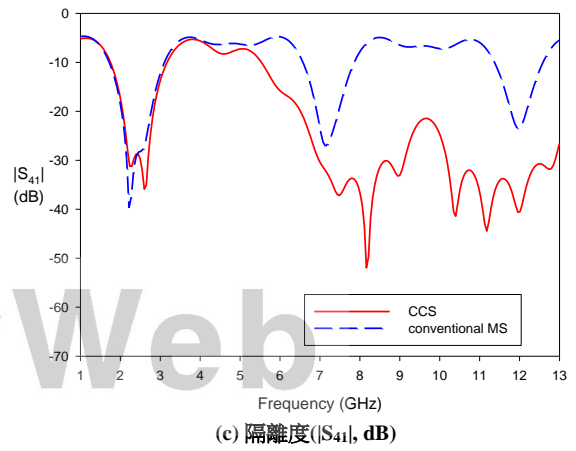
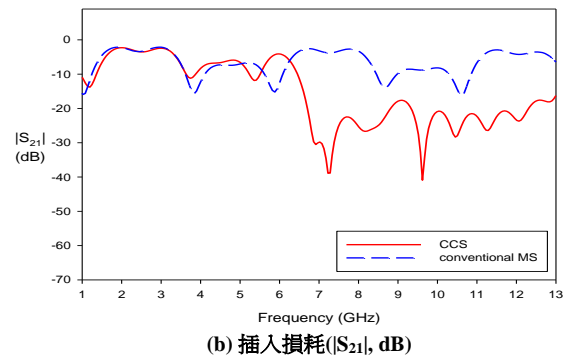
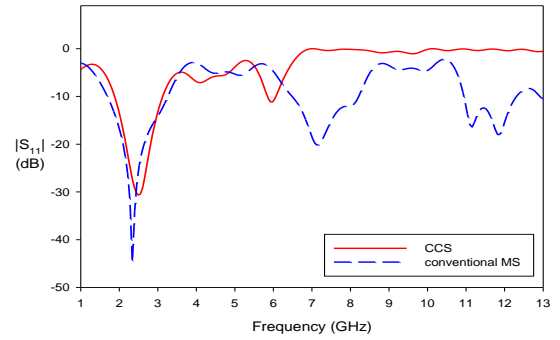
圖六：CCS (f_1/f_2)及傳統微帶(f_1)分合波器比較示意圖



圖四：CCS 單元細胞結構(a)頂視圖、(b)側視圖



圖五：CCS 與 MS 傳輸線之波導特性(a) Z_c 、(b) SWF



圖七：CCS 及傳統 MS 分合波器電氣性能比較(a) 輸入損耗、(b) 插入損耗及(c) 隔離度

結論

本研究成功地結合開路殘段、步階阻抗及 CCS 合成傳輸線二維緊湊佈局的技術，開發出一種建構開路殘段、步階阻抗 CCS 分合波器的微小化單元模組，並適當地運用上述單元模組實現了一種新型微小化、雙頻且具有諧波抑制之 CCS 分合波器(rat-race)。相關電路佔用面積(不含饋入網路)僅為傳統微帶環形(ring-shape) $6/4 \lambda_g$ (at 2.45-GHz) 分合波器的 13.3%，展現出雙頻(2.45/5.8-GHz)的電氣特性，兼具 $3 f_1$ 、 $5 f_1$ 諧波抑制的功能，且抑制水準達 20-dB 左右不錯地效果，已達成雙頻、諧波抑制且微小化的預期目標。相關研究成果，將可提供作為後續執行前瞻微型化多功能系統晶片/ RFIC 開發設計應用之參考。

致謝

作者感謝國家晶片系統設計中心 (CIC) 提供相關製程資料與電路佈局、模擬分析軟體及電路測試支援；作者亦感謝國家高速網路與計算中心 (NCHC) 提供電磁模擬分析軟硬體進行電磁運算，使本計畫得以順利完成。

參考文獻

- [1] J.-T. Kuo, J.-S. Wu, and Y.-C. Chiou, "Miniaturized rat race coupler with suppression of spurious passband," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 17, pp. 46–48, Jan. 2007.
- [2] H.-S. Lee, K. Choi, and H.-Y. Hwang, "A harmonic and size reduced ring hybrid using coupled lines," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 17, pp. 259–261, Apr. 2007.
- [3] W. Shao, J. He, and B.-Z. Wang, "Compact rat-race ring coupler with capacitor loading," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, pp. 7–9, Jan. 2010.
- [4] V. K. Velidi, D. K. Pandey, and S. Sanyal, "Microstrip rat-race couplers with predetermined miniaturization and harmonic suppression," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, pp. 30–34, Jan. 2010.
- [5] V. K. Velidi, M. K. Mandal, and A. Bhattacharya, "Uniplanar harmonic suppressed compact rat-race couplers," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 50, pp. 2812–2814, Nov. 2008.
- [6] K.-K. M. Cheng and F.-L. Wong, "A novel rat race coupler design for dual-band applications," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 15, pp. 521–523, Aug. 2005.
- [7] K.-K. M. Cheng and F.-L. Wong, "Dual-band rat-race coupler design using tri-section branch-line," *Electron. Lett.*, vol. 43, pp. 41–42, Mar. 2007.
- [8] C.-L. Hsu, C.-W. Chang and J.-T. Kuo, "Design of Dual-Band Microstrip Rat Race Coupler with Circuit Miniaturization," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2007, pp. 177–180.
- [9] M. K. Mandal and S. Sanyal, "Compact dual-band rat-race couplers," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 50, pp. 277–281, Feb. 2008.
- [10] Y.-C. Chiou, J.-T. Kuo, and C.-H. Chan, "New miniaturized dual band rat-race coupler with microwave C-sections," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2009, pp. 701–704.
- [11] K.-S. Chin, K.-M. Lin, Y.-H. Wei, T.-H. Tseng, and Y.-J. Yang, "Compact dual-band branch-line and rat-race couplers with stepped impedance-stub lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 58, pp. 1213–1221, May 2010.
- [12] Q.-X. Chu and F. Lin, "A novel tri-band rat-race coupler with T-shaped step impedance transformers," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, pp. 1240–1244, June 2010.
- [13] Y. Dong and T. Itoh, "Application of composite right/left-handed half-mode substrate integrated waveguide to the design of a dual band rat-race coupler," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2010, pp. 712–715.
- [14] Chih-Chiang Chen and Ching-Kuang C. Tzuang, "Synthetic Quasi-TEM Meandered Transmission Lines for Compacted Microwave Integrated Circuits," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 6, pp. 1637-1647, June 2004.
- [15] Michael B. Steer, "Editorial- State of this Transactions", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 4, pp. 1121-1123, Apr. 2005.
- [16] Meng-Ju Chiang, Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C. Tzuang, "Design of Synthetic Quasi-TEM Transmission Line for CMOS Compact Integrated Circuit," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 12, pp. 2512-2520, Dec. 2007.
- [17] M.-J. Chiang, H.-S. Wu, and C.-K. C. Tzuang, "Ka-Band CMOS hybrids miniaturization incorporating multilayer synthetic quasi-TEM transmission lines," *Proc. 38th European Microw. Conf. Dig.*, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2008, pp. 329-332.
- [18] Sen Wang, Kun-Hung Tsai, Kuo-Ken Huang, Si-Xian Li, Hsien-Shun Wu, and Ching-Kuang C. Tzuang, "Design of X-Band RF CMOS Transceiver for FMCW Monopulse Radar," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 1, pp. 61-69, Jan. 2009.
- [19] Chih-Chiang Chen, Liang-Cheng Wang and Sao-An Ho, "Comparative Layout Study of Stacked CMOS Synthetic Quasi-TEM Lines Separated by the Meshed Ground Shield and its Application to 180° Hybrid Design," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.21, no. 6, pp.289-291, June 2011.
- [20] Chih-Chiang Chen, Hai-Tao Sun and Yu-Ruei Chen, "A novel unequal-power divider based on synthetic quasi-TEM transmission line design," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 54, issue 2, pp. 535-539, first published date: 15-Dec-2011. (Date accepted: 11-Sep-2011).
- [21] Chih-Chiang Chen, Hai-Tao Sun and Jhen-Jie Cin, "A novel fast-and-effective methodology for CMOS MMIC syntheses," *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 1-13, date accepted: 22-Nov-2011.
- [22] Sen Wang, Bo-Zong Huang, and Zi-Kang Li, "A miniaturized 10/24-GHz rat-race coupler using synthetic transmission lines on glass substrate," *IEICE Electronics Express*, vol. 8, no. 17, pp. 1425-1430, Sep. 2011.
- [23] W. R. Eisenstadt and Y. Eo, "S-parameter-based IC interconnect transmission line characterization," *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol.*, vol. 15, pp. 483–490, Aug. 1992.