

CPW やマイクロストリップ線路構造を用いた CRLH-TL 結合線路に関する研究

東京理科大学大学院 理工学研究科 電気工学専攻 勝又雅基

1. はじめに

近年、メタ材料が注目されている。メタ材料とは、誘電率 ϵ 、透磁率 μ が共に負になる自然界にはない人工媒質のことであり、波長に比べ十分に小さい周期構造で形成される。メタ材料の特徴をもつ左手系媒質構成には、右手系(Right Handed, RH)と左手系(Left Handed, LH)を複合した、右手/左手複合線路(Composite Right and Left Handed Transmission Line, CRLH-TL)を考える。CRLH-TLは無損失の同軸線路やプリント回路板などを利用することによって構成できる。CRLH-TLの任意の周波数帯域において任意の位相定数を得る特徴を利用し、デバイスへの応用も考えられる。

本研究では、従来の結合線路では-10dBを超える結合度を得ることが困難という課題を解決するため、CRLH-TLの任意の周波数帯域において任意の位相定数が得られる特徴を利用し、高結合度を得る結合線路を設計し、検討を行った。結合特性の解析にはモーメント法を使用し、試作・実測による検証を行った。

2. 右手・左手系複合結合線路

2.1 右手・左手系複合結合線路の構成方法

本研究で用いた結合線路単位セル等価回路を図1に示す。1→2間を主線路側、3→4間を副線路側とする。RH線路を結合した従来の結合線路を図1(a)に示し、CRLH-TLを結合した結合線路(CRLH-CRLH)のモデルを図1(b)に、主線路側をCRLH-TL、副線路側をRH線路とした結合線路(CRLH-RH)のモデルを図1(c)に示す。

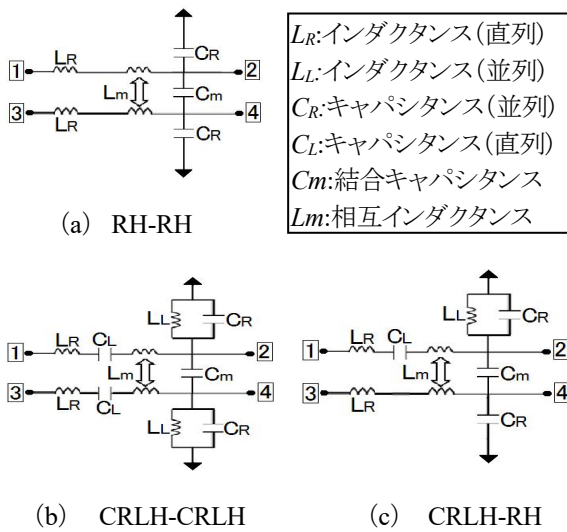


図1. 結合線路単位セル等価回路

2.2 結合特性

結合線路のバックワード方向とフォワード方向の結合度

C_{BWD} , C_{FWD} は、伝送線路の進行波と反射波の重ねあわせで表現できる(式(1)~(6))。右手系結合線路の $\beta_{a,b}$ は式(7)となり、左手系(LH)結合線路の $\beta_{a,b}$ は式(8)に示すように、純実数または純虚数となり、LH線路とRH線路を結合した結合線路の $\beta_{a,b}$ は式(9)に示すように、 C モード、 π モードの β と等価となる。従来の右手系結合線路は-10dB以上の大きい結合を得るには多層などの立体構造や広い面積が必要である。一方でLH結合線路は、任意の $\beta_{a,b}$ を得ることができ、バックワード方向に-3dB程度の大きい結合を得ることが可能である。

$$C_{BWD} = \frac{X \cdot K_{BWD} + Y \cdot K_{FWD}}{K_{BWD}^2 - K_{FWD}^2} = |S_{31}| \quad (1)$$

$$C_{FWD} = \frac{X \cdot K_{FWD} + Y \cdot K_{BWD}}{K_{BWD}^2 - K_{FWD}^2} = |S_{41}| \quad (2)$$

$$C + D = |S_{21}| \quad (3)$$

$$Ae^{-j\beta_a Z}(\beta_{1FWD} - \beta_a) + Be^{-j\beta_b Z}(\beta_{1FWD} - \beta_b) = |S_{11}| \quad (4)$$

$$X = Ae^{-j\beta_a Z}(\beta_{1FWD} - \beta_a) + Be^{-j\beta_b Z}(\beta_{1FWD} - \beta_b) \quad (5)$$

$$Y = Ce^{+j\beta_a Z}(\beta_{1FWD} - \beta_a) + De^{+j\beta_b Z}(\beta_{1FWD} - \beta_b) \quad (6)$$

$$\beta_{a,b} = \pm \sqrt{\beta_{RH}^2 - K_{BW}^2} \quad (7)$$

$$\beta_{a,b} = \pm \sqrt{(\beta_{RH} + \beta_{LH})^2 - K_{BW}^2} \quad (8)$$

$$\beta_{a,b} = \beta_c, \beta_\pi \quad (9)$$

K_{BWD} : バックワード結合係数
 K_{FWD} : フォワード結合係数
 Z : 線路長 β_{1FWD} : 主線路側進行波の位相定数
 A, B, C, D : 振幅定数

CRLH-TLの結合帯域は式(10)で与えられる。左手系領域のカットオフ周波数と式(11)で与えられる右手系領域のカットオフ周波数から設計することが可能である。

$$f_g = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_L(C_R + 2C_m)}} \quad (10)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_L}} \quad (11) \quad (\text{ただし } L_L C_R = L_R C_L)$$

3. 解析および実験の結果と考察

3.1 マイクロストリップ線路型結合線路の特性解析

ここでは、マイクロストリップ線路構造を利用し、RH線路を結合した従来の結合線路 (RH-RH), CRLH-CRLH, CRLH-RH の三つのモデルの結合特性についてモーメント法⁴⁾を利用し、解析・検討を行った。

RH-RH, CRLH-CRLH のモデルを図2 (a), (b) に、結合特性の解析結果を図3, 4 に示す。Inter Digital 構造を用い C_L を、Stub Inductor を用い L_L を周期的に構成することで CRLH-TL を実現する。CRLH-CRLH は RH-RH に比べ、3.4 ~ 4.6GHz において C_{BWD} (S_{31}) が 7dB 増加し、-3dB 程度の大きな結合度を得る。この帯域において、リターンロス (S_{11}) は -20dB 以下となり、方向性は 20dB 以上となる。

RH-RH, CRLH-CRLH の結合線路間隔と C_{BWD} の関係を図5 に示す。両者とも結合線路間隔を調整することにより、任意の C_{BWD} を得ることができる。RH-RH は -10 ~ -20dB, CRLH-CRLH は -3 ~ -10dB の範囲で任意に設定でき、CRLH-CRLH は RH-RH に比べ、高結合度を得る特徴がある。

CRLH-RH のモデルを図2 (c) に、 C_{BWD} 特性の解析結果を図6 に示す。CRLH-CRLH に比べて、結合帯域を低周波側 (2.0 ~ 4.5GHz) ヘシフトでき、小型化が可能である。しかし、最大結合度が -2dB 低下する。

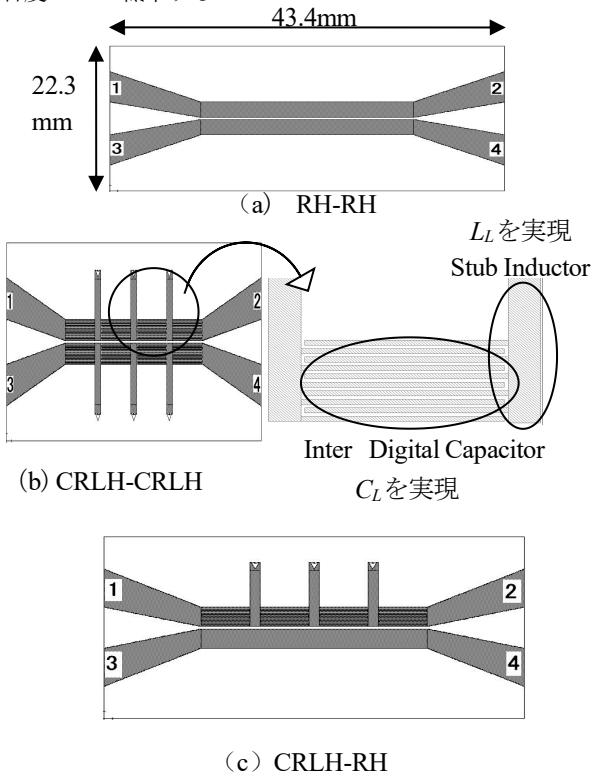


図2. CRLH-CRLH 結合特性

基板材料: $\epsilon_r=2.2$ $h=1.6$ $\tan\delta=0.001$
 Inter Digital Space=0.1mm
 Inter Digital Length=5mm
 Inter Digital Width=0.15mm
 Stub Length=8mm Stub Width=1mm
 Spacing between the Lines=0.3mm

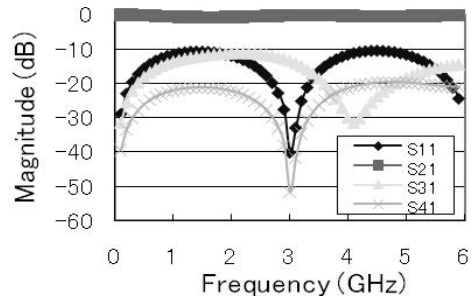


図3. RH-RH 結合特性

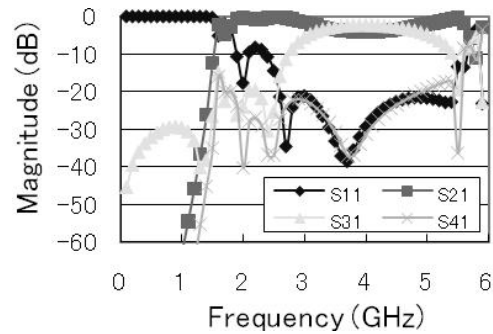


図4. CRLH-CRLH 結合特性

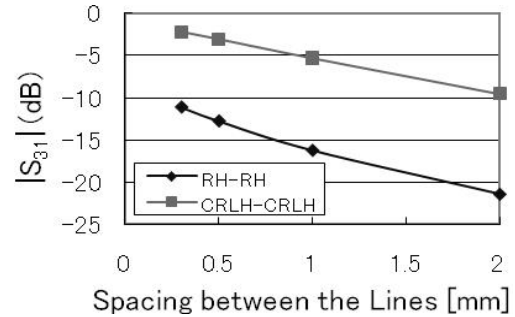


図5. 線路間隔と C_{BWD} 特性

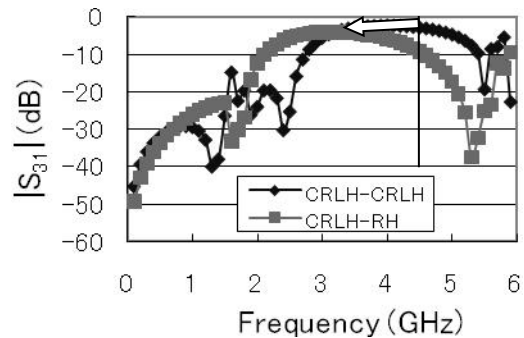


図6. C_{BWD} 特性比較

3.2 マイクロストリップ線路型結合線路の試作と実測

解析モデルを試作し、ネットワークアナライザを用いて実測を行った。試作した結合線路を図7 (a), (b) に、特性の

測定結果を図8, 9に示す。2.8~4.7GHzにおいて、-3dBの高結合を得ることができた。しかし、 S_{11} は解析結果に比べ、-20dB増加した。これは、テーパ線路を結合線路に接合したことやコネクタを取り付け、浮遊容量が発生したため等と考えられる。

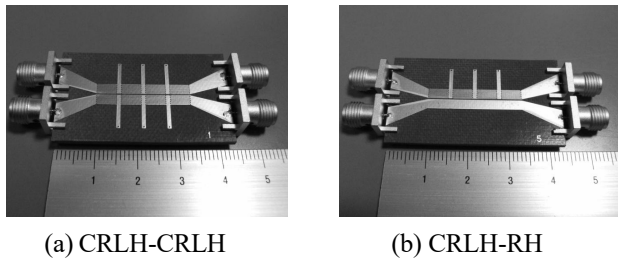


図7. 試作した結合線路

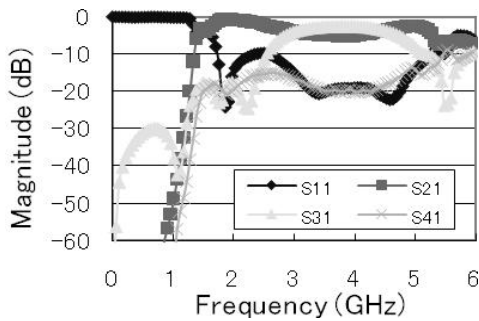


図8. CRLH-CRLH 結合特性

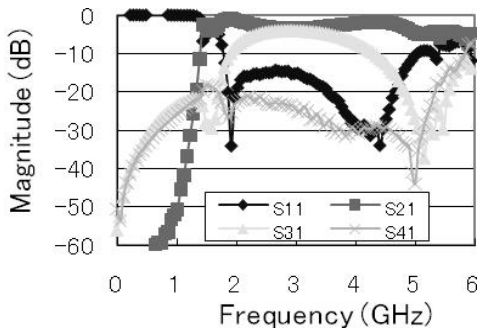


図9. CRLH-RH 結合特性

3.3 CPW 型結合線路の特性

マイクロストリップ線路型CRLH-RHは小型化が可能であるが、最大結合度が-2dB低下した。この問題を解決するために、低周波数帯において整合がとれるCPW型結合線路の検討を行った。RH-RH, CRLH-CRLHのモデルを図10(a), (b)に、結合特性の解析結果を図11, 12に示す。なお、Chip Capacitorを用い C_L を、Stub Inductorを用い L_L を周期的に構成することでCRLH-TLを実現している。CRLH-CRLHはRH-RHに比べ3~6GHzにおいて C_{BWD} が7dB増加し、-3dBの高結合度を得る。

CRLH-RHのモデルを図10(c)に、CRLH-CRLHと比較した C_{BWD} 特性の解析結果を図13に示す。2.5~3.5GHzで-3dBの高結合が得られ、方向性も15dB以上となる。これは、2.5~3.5GHzにおいて整合がとれ、 S_{11} が-10dB以下となるためだと考えられる。また、-3dBの高い結合度を維持したまま結合

帯域を低域側へシフトできるため、小型化が可能であると言える。

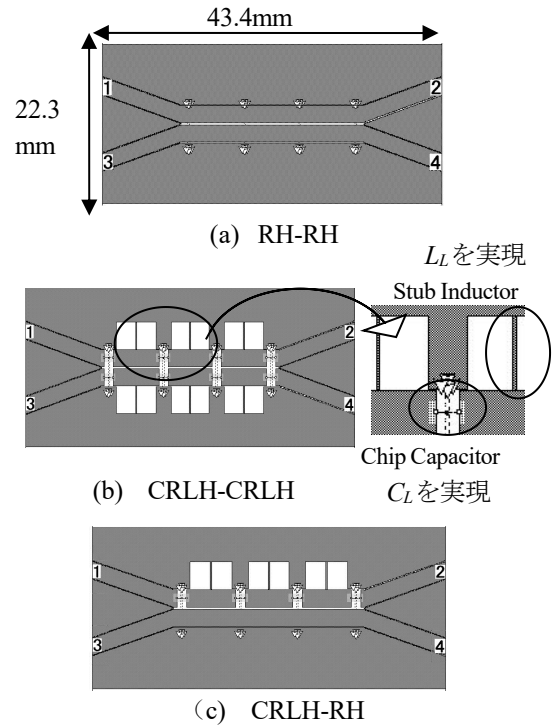


図10. CRLH-CRLH 結合特性

基板材料: $\epsilon_r=2.2$ $h=1.6$ $\tan\delta=0.001$
 Chip Capacitor = 1pf
 Stub Length=5mm Stub Width=0.2mm
 Spacing between the Lines=0.3mm

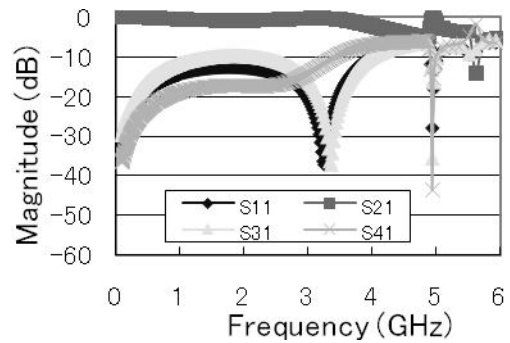


図11. RH-RH 結合特性

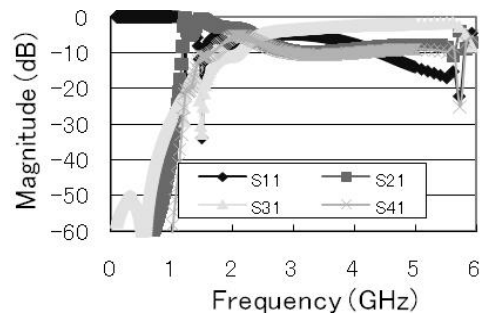


図12. CRLH-CRLH 結合特性

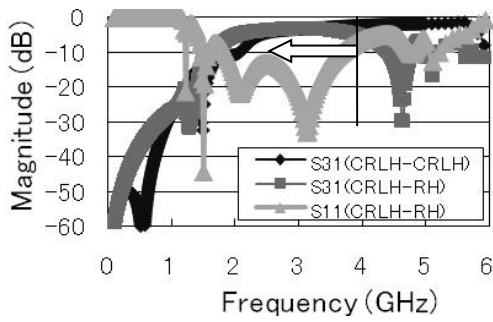


図 13. C_{BWD} 特性比較

3.4 CPW 型結合線路の試作と実測

試作した結合線路を図 14 (a), (b) に, 特性を図 15, 16 に示す。4GHz 以上の特性が解析結果と異なるが, これは高周波数帯のカットオフ周波数が低周波へシフトしたためであると考えられる。

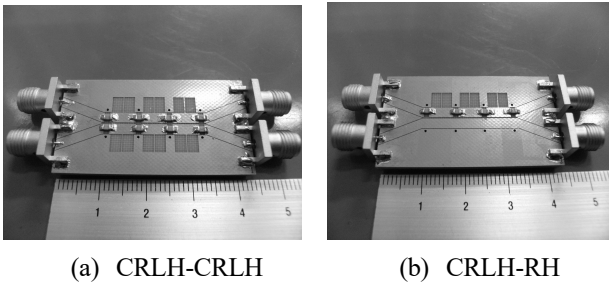


図 14. 試作した結合線路

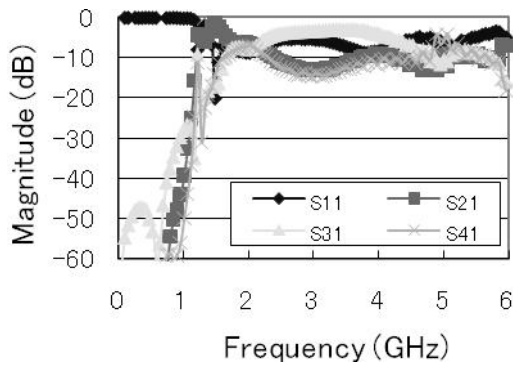


図 15. CRLH-CRLH 結合特性

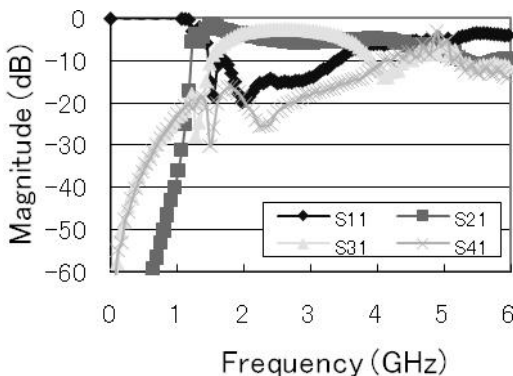


図 16. CRLH-RH 結合特性

4. まとめ

初めに, 配線パターンニングを利用したマイクロストリップ線路型 CRLH-CRLH の結合線路の検討を行ったところ, -3dB の高結合を得ることができた。さらに, 結合線路間隔を制御することにより, 任意の結合度が得られることを示した。次に, マイクロストリップ線路型 CRLH-RH の結合線路を用いて結合線路の小型化の検討を行った。その結果, 結合帯域を低周波側へシフトすることができ, 小型化が可能であることが明らかになったが, 最大結合度が -2dB 低下した。この問題を解決するために, 低周波数帯において整合がとれる CPW 型結合線路の検討を行った。CPW 型 CRLH-CRLH および CRLH-RH 結合線路は, コプレーナ線路上に Chip Capacitor を配置し, さらに配線パターンニングを利用することで実現した。その結果, CPW 型 CRLH-CRLH は -3dB の高結合を得ることが可能であった。また, CPW 型 CRLH-RH 結合線路では -3dB の高結合を維持したまま結合帯域の低周波側へのシフトが可能であった。

5. 参考文献

- 1) H. V. Nguyen, and C. Caloz, "Generalized Coupled-Mode Approach of Metamaterial Coupled-Line Couplers: Coupling Theory, Phenomenological Explanation, and Experimental Demonstration," in *IEEE Trans Microw. Theory.*, vol.55, no.5, May 2007
- 2) 藤森和哉, 越地耕二, 青木広宙: "左手系右手系複合結合線路の結合特性の検討", エレクトロニクス実装学会講演大会論文集, Vol.23, pp153-154, 2009年3月
- 3) R. F. Harrington: "Field Computation by Moment Methods", *IEEE Press, New York, 1993*
- 4) Cheng P. Wen. *Couplanar Waveguide A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications. IEEE Tr. MTT. vol.MTT-17. No.12. pp.1087-1090. 1969.*
- 5) 勝又雅基, 青木広宙, 越地 耕二: 「右手/左手系複合線路を用いたコプレーナ型バックワードカプラ」第 19 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム 講演論文集 p.281-284 (2009年9月11日)
- 6) 勝又雅基, 越地耕二: 「右手・左手系複合線路を用いた線路間の結合特性の検討」第 24 回エレクトロニクス実装学会講演大会 p.124-125 2010年