

A Frequency Adjustable Double Lorentz CRLH Transmission Line using DGS

임종식[†] · 이재훈^{*} · 이준^{*} · 정용채^{**} · 한상민^{***} · 안달[§]
 (Jongsik Lim · Jaehoon Lee · Jun Lee · Yongchae Jeong · Sang-Min Han · Dal Ahn)

Abstract - In this paper, a double lorentz composite right left handed(DL-CRLH) transmission line is designed using defected ground structure (DGS) and varactor diodes. Previously, the diode has been adopted only selectively for one of parallel or series resonators, and the balanced frequency as well as triple band frequencies were fixed. However in the proposed DL-CRLH transmission line, the balanced frequency, where the resonant frequencies of the series-connected parallel resonator and shunt-connected series resonator are the same, is adjustable. In addition, the triple band frequencies are controlled, too. The measured balanced frequency varies between 3.42~4.8GHz according to the controlled bias voltage. Under the same bias condition for the balanced frequency, the adjusted frequencies are 2.22~2.77GHz, 3.7~5.2GHz, 7.32~8.23GHz, 3.42~4.8GHz, and 4.44~5.92GHz for the conditions that $\beta d = +0.5\pi, -0.5\pi, 2nd +0.5\pi, \omega_{\infty},$ and $\omega_0,$ respectively.

Key Words : CRLH, DGS, Defected ground structure, Transmission line

1. 서론

일반적으로 자연계에 존재하는 전송선로(TL, transmission lines)들의 단위 길이당 등가회로는 그림 1(a)와 같이 직렬 인덕턴스와 셉트 커패시턴스로 표현할 수 있다. 보통 군속도(group velocity)와 위상속도가 같은 방향이고, 유전율과 투자율이 (+)의 값을 가진다. 오랫동안 이러한 표준형 전송선로 구조는 전송선로 자체의 용도로서, 그리고 수많은 전자파 회로의 구성요소로서 널리 사용되어 왔다[1,2].

이에 비하여 단위 길이당 등가회로가 그림 1(b)와 같이 직렬 커패시턴스와 셉트 인덕턴스로 표현되는 인위적인 전송선로 구조가 제안된 적이 있다[3]-[5]. 이 구조에서는 유전율과 투자율이 (-)의 값을 가지며, 군속도와 위상속도가 서로 반대의 방향을 취하므로 이를 LH(left handed) 전송선로라고 한다. 이에 대한 상대적인 개념으로 종래의 표준적인 전송선로를 RH(right handed) 전송선로라고 한다.

직렬 공진회로와 병렬 공진회로가 직렬형 또는 셉트형으로 연결되어 결과적으로 LH와 RH 구조가 혼재한 형태의 CRLH(composite right/left handed) 전송선로 구조가 최근에 제안되고 이에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있다

[6]-[10]. CRLH 구조는 LH와 RH 전송선로의 특성을 모두 나타내므로 전기적 길이가 +90도와 -90도인 주파수 대역이 따로 존재하는 이중대역 특성을 보인다. 그림 2(a)는 CRLH 구조로 처음 발표된 구조이며(Conventional-CRLH, C-CRLH), 그림 2(b)는 C-CRLH와 쌍대적 구조를 지니는 구조이다(Dual-CRLH, D-CRLH).

한편 최근에 이중 대역 주파수 특성이 가변될 수 있음을 보이는 D-CRLH 구조가 제안된 적이 있다[11]. 이 연구결과에 의하면 직렬로 연결된 LC 병렬회로 또는 셉트로 연결된 LC 직렬회로 내의 커패시터를 가변함으로써 이중 대역의 특성을 보이면서 주파수 가변성이 있는 D-CRLH 전송선로를 설계할 수 있다. 본 논문에서는 [11]의 연구내용을 확장하여 DL-CRLH(double-lorentz CRLH) 전송선로에 관한 연구결과를 기술한다. 실제로 D-CRLH 전송선로를 구현하면 전송선로 내의 기생성분(parasitic) 성분들에 의하여 높은 주파수 쪽에서 또 하나의 응용 가능한 주파수 대역이 형성될 수 있다. 그런데 전송선로의 특성 임피던스 결정에 깊게 관여하는 유전율(permittivity, ϵ) 또는 투자율(permeability, μ) 이 특정 주파수에서 공진의 관계 즉 부호의 반전 특성 가질 경우 이것을 Lorentz 특성(현상)이라 한다. 만약에 유전율과 투자율이 모두 공진의 관계식을 가질 경우에는 double-lorentz(DL) 특성을 지니는 CLRH 전송선로(이하 DL-CRLH 전송선로)가 된다[12,13].

DL-CRLH 전송선로가 먼저 발표된 C-CRLH, D-CRLH 전송선로에 비하여 차이가 나는 것은, 삼중 대역의 특성을 얻을 수 있다는 점이다. C-CRLH나 D-CRLH 전송선로가 이중대역 특성을 가짐은 이미 선행연구를 통하여 많이 발표되었다. 그러나 최근의 다양한 무선통신 서비스 관련 시스템을 살펴보면 이중 대역을 넘어서 삼중 대역에의 기술적

† 교신저자, 정회원 : 순천향대 전기통신공학과 조교수 · 공박
 E-mail : jslim@sch.ac.kr
 * 비회원 : 순천향대 전기통신공학과 석사과정
 ** 정회원 : 전북대 전자정보공학부 교수 · 공박
 *** 비회원 : 순천향대 정보통신공학과 조교수 · 공박
 § 비회원 : 순천향대 전기통신공학과 교수 · 공박
 접수일자 : 2010년 6월 22일
 최종완료 : 2010년 7월 5일

수요가 서서히 발생하고 있는 실정이다. 또한 향후에 주파수 자원의 고갈로 인한 주파수 자원의 재사용 측면에서도 삼중 대역 또는 사중 대역 등 다중 대역 주파수 응용에 대한 기술적 수요가 증가할 것으로 전망된다[14]-[17]. 따라서 이러한 기술적 요구 전망에 부응하기 위해서도 삼중대역 특성을 갖는 DL-CRLH 전송선로에 대한 연구를 시도하는 것이 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 삼중대역의 주파수 특성을 가지는 DL-CRLH 전송선로 구조를 제안하고, 또한 여기에 다시 주파수 가변성을 유도하는 회로 부분을 인가하여 가변성이 있는 삼중 대역 DL-CRLH 전송선로를 설계할 수 있음을 보이고자 한다.

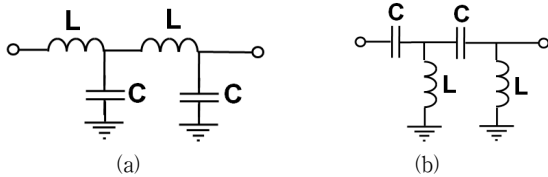


그림 1 RHTL과 LHTL의 등가 회로 표현 (a) RHTL (b) LHTL
 Fig. 1 Basic equivalent circuit of RHTL and LHTL (a) RHTL (b) LHTL

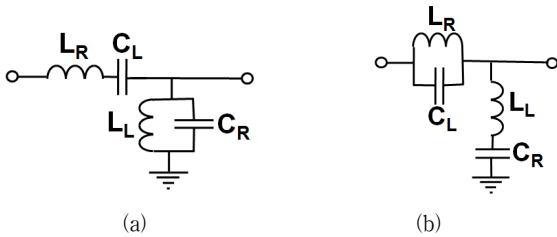


그림 2 CRLH 전송 선로의 등가 회로 표현 (a) conventional(C)-CRLH (b) dual(D)-CRLH
 Fig. 2 Basic equivalent circuit of CRLH transmission lines (a) conventional(C)-CRLH (b) dual(D)-CRLH

2. DL-CRLH 전송선로

D-CRLH 전송선로의 주파수 가변성에 대하여는 이미 발표된 바 있다[11]. 그런데 D-CRLH 전송선로를 실제로 구현하면 회로 구성 소자들이 갖는 기생성분(parasitic elements)이나, 또는 의도적인 회로소자 추가에 의하여 D-CRLH 전송선로의 동작 주파수보다 높은 곳에서 또 하나의 유의미한 전기적 길이(주로 + 또는 -90도)를 갖는 주파수가 형성된다. 즉, 제 3의 주파수 특성을 얻기 위하여 D-CRLH 전송선로를 변형하여 DL-CRLH 전송선로를 설계할 수 있는 것이다.

그림 3은 DL-CRLH 전송선로의 등가회로 구조를 보여주고 있다. 여기서 L_p, C_p 는 DL-CRLH 특성을 위하여 의도적으로 삽입되거나 또는 기생성분(parasitics)에 의한 것인데, 결과적으로 DL-CRLH 전송특성을 보이는 원인이 된다. 이 그림에서 직렬 선로 부분 즉 L_p, L_r, C_L 에 의한 단위 길이당 임피던스는 식 (1)과 같고, 선트 선로 부분 즉 C_p, L_L, C_R 에 의한 단위 길이당 어드미턴스는 식 (2)와 같다. 그리고 균일 매질 DL 전송선로(homogeneous DL TL) 조건하에서

분산 관계식(dispersion relation)은 식 (3)과 같고, 이 때 전체적인 특성 임피던스($Z_h(\omega)$)를 유도해 보면 식 (4)와 같다 [12]. 식 (3)과 (4)를 살펴보면 분산 관계식과 전체 임피던스 수식의 분모 항에 두 번의 공진 관계가 존재함을 알 수 있는데, 이것 때문에 “double lorentz” 특성을 지니는 전송선로가 되는 것이다[13].

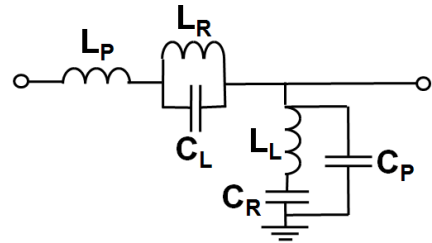


그림 3 DL-CRLH 전송선로의 등가회로
 Fig. 3 Equivalent circuit of the DL-CRLH transmission line

$$Z(\omega) = j\omega L_p \frac{\omega^2 - \omega_o^{se2}}{\omega^2 - \omega_\infty^{se2}} = j\omega \mu_o \mu_r(\omega) \tag{1}$$

$$\text{여기서 } \omega_\infty^{se} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_L}}, \omega_o^{se} = \sqrt{\frac{L_r + L_p}{L_r C_L L_p}}$$

$$Y(\omega) = j\omega C_p \frac{\omega^2 - \omega_o^{sh2}}{\omega^2 - \omega_\infty^{sh2}} = j\omega \epsilon_o \epsilon_r(\omega) \tag{2}$$

$$\text{여기서 } \omega_\infty^{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}, \omega_o^{sh} = \sqrt{\frac{C_R + C_p}{L_L C_R C_p}}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z(\omega)Y(\omega)} \text{ 그리고} \tag{3}$$

$$\kappa = -j\gamma = \beta - j\alpha = -\sqrt{-Z(\omega)Y(\omega)} = \frac{\omega}{\omega_p} \sqrt{\frac{\omega^2 - \omega_o^{se2}}{\omega^2 - \omega_\infty^{se2}} \frac{\omega^2 - \omega_o^{sh2}}{\omega^2 - \omega_\infty^{sh2}}}$$

$$\text{여기서 } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}}$$

$$Z_h(\omega) = \sqrt{\frac{Z(\omega)}{Y(\omega)}} = \sqrt{\frac{L_p}{C_p}} \sqrt{\frac{\omega^2 - \omega_o^{se2}}{\omega^2 - \omega_\infty^{se2}} \frac{\omega^2 - \omega_o^{sh2}}{\omega^2 - \omega_\infty^{sh2}}} \tag{4}$$

3. 주파수 가변성을 갖는 DL-CRLH 전송선로

이제 그림 3의 구조에서 C_L 또는 C_R 를 가변시킨다면, 그림 4와 같은 주파수 가변성을 갖는 DL-CRLH 전송선로의 개념도를 그릴 수 있다. 그리고 식 (1)~(4)에서 C_L 또는 C_R 이 가변된다면 전송선로의 주파수 특성이 달라질 것임은 자명하며, 또한 동시에 L_p, C_p 에 의한 효과, 즉 삼중 대역 주파수 특성을 얻을 수 있다. 이에 대한 설명이 본 장과 다음 장에 기술된다.

본 연구에서는 직렬 연결된 병렬 공진회로(L_r-C_L)를 결합점지구조(DGS)로 구현하고자 하므로 그림 4(b)는 그림 5와 같이 대체될 수 있다. 더 나아가서는 궁극적으로 삼중대역 주파수를 모두 가변하려는 시도으로써, 그리고 평행 주파수를 가변해 보려는 목적을 위해 그림 6과 같이 C_L 과 C_R 을 모두 가변시켜 특성을 변화시키는 시도를 하고자 한다. 한

편 CRLH 선로에서 left-handed 영역에서 right-handed 영역으로의 천이가 bandgap 없이 원활하게 되는 경우에 평형 (balanced) 상태라 하는데, 이 때의 평형 주파수는 직렬 연결된 병렬 공진회로와 셉트 연결된 직렬 공진회로의 공진주파수가 서로 같은 경우이다.

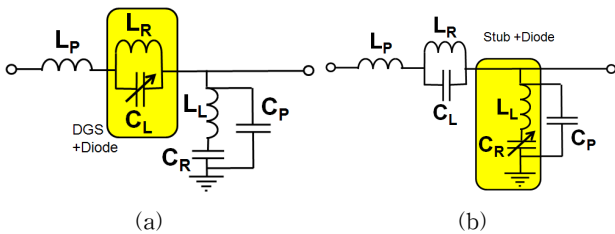


그림 4 주파수 가변성을 갖는 DL-CRLH 전송선로 (a) 직렬 연결된 병렬공진 회로의 C_L 을 가변 (b) 셉트 연결된 직렬공진 회로의 C_R 을 가변

Fig. 4 Frequency adjustable DL-CRLH transmission line (a) series-connected parallel resonator with variable C_L (a) shunt-connected series resonator with variable C_R

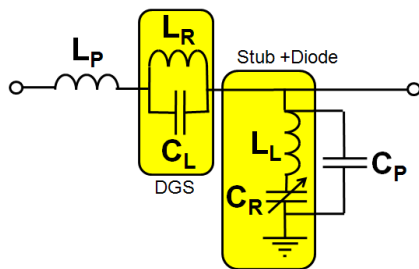


그림 5 그림 4(b)에서 병렬 공진기 부분에 DGS를 사용하는 경우에 대한 개념도

Fig. 5 Concept for the use of DGS replacing the parallel resonator in Fig. 4(b)

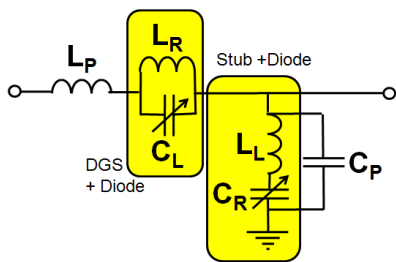


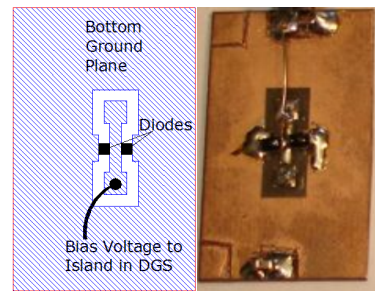
그림 6 삼중 대역 주파수 및 평형 주파수 가변이 가능하도록 제안하는 DL-CRLH의 전송선로

Fig. 6 The proposed DL-CRLH transmission line in order for the triple band characteristics and balanced frequency to be variable

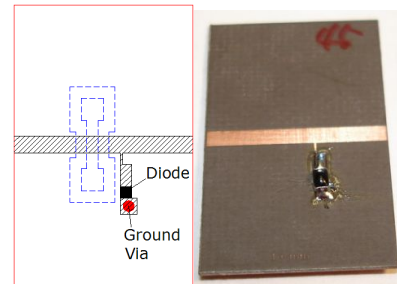
본 연구에서 제안하려고 하는 주파수 가변적인 DL-CRLH 전송선로 구조는 DGS 전송선로를 포함하는데, 그림 6에 보인대로 두 커패시터를 모두 가변하기 위하여 두 곳에 버랙터 다이오드를 사용하고 이들을 가변하면서 측정 한 결과를 이용하여, 제안한 구조가 DL-CRLH 전송선로의

특성을 가짐을 보인다. 또한 측정 결과로부터 삼중대역 특성이 있으며, 이 삼중대역 특성이 가변되며, 두 공진회로의 평형조건도 가변할 수 있음을 보이고자 하는 것이다.

그림 7은 본 논문에서 설계한 삼중대역 DL-CRLH의 전송선로 구조를 보여준다. 이 구조에서는 마이크로스트립 기판의 상,하면 모두에 다이오드가 부착된다. 본 연구에서 사용한 다이오드는 Aeroflex metelics社의 MSV34,060-0805이고, 비유전율이 2.33이고 두께가 20mils(0.508mm)인 유전체 기판이 사용되었다. 먼저 그림 7(a)는 기판 하면에 있는 DGS, 내부 격리패턴(island) 및 다이오드를 보여주는데, 그림 6의 직렬 연결 회로 부분(L_P, L_R, C_L)에 해당한다. 한편 그림 7(b)는 상면 기판에 있는 셉트 스템브와 다이오드인데, 그림 6의 셉트 연결 회로 부분(C_P, L_L, C_R)에 해당한다.



(a)



(b)

그림 7 DL-CRLH 전송선로의 레이아웃과 제작사진 (a) 회로 아랫면 (b) 회로 윗면(점선은 아랫면 회로의 위치를 표시)

Fig. 7 Layout and photgraph of the fabricated DL-CRLH transmission line (a) bottom side (b) top side (dotted line means the position of the circuit on the bottom side)

그림 8은 각 부분 회로별 특성에서 DL 특성을 유발하는 L_P, C_P 성분이 고주파 영역에서 나타남을 확인하기 위하여, 먼저 상면과 하면 부분 회로를 따로 제작하고 여기에 다이오드를 부착하여 그 성능을 측정 한 결과 그래프인데, 예로써 바이어스 전압(V_b)이 0V인 경우에 대하여 보인 것이다. 먼저 그림 8(a)는 그림 7(a)의 회로를 제작하여 측정 한 예인데, 윗면 회로는 없고 바닥면 회로만 있는 경우의 측정 결과이다. 그리고 그림 8(b)는 그림 7(b)의 회로를 제작하여 측정 한 예인데, 바닥면 회로는 없고 윗면 회로만 있는 경우의 측정 결과이다.

측정 결과를 보면 두 경우 모두 기본적인 공진주파수 (F_0)가 존재하는데, 이것은 L_p , C_p 성분과는 무관하게 나타나는 기본적인 공진회로 즉, 각각 선트 연결된 직렬공진회로 (L_L-C_R)와 직렬 연결된 병렬공진회로 (L_R-C_L) 회로의 특성을 보인다. 그러나 두 경우 모두 높은 주파수 영역에서 또 하나의 유의미한 notch 주파수가 보이고 있는데 이것이 바로 L_p , C_p 성분에 의한 것이다. 따라서 널리 알려진 공진 주파수 결정 방법을 적용하여 L_p , C_p 성분을 구할 수 있는 것이다. 그리고 이에 의하여 그림 6의 DL-CRLH 전송선로 구조가 형성됨을 설명할 수 있다. 예로써, 그림 8(a)의 특성으로부터 얻은 선트 연결부분 회로의 소자값들은 각각 $L_L=2.255nH$, $C_R=1.154pF$, $C_p=0.195pF$ 이다. 또한 그림 8(b)의 특성으로부터 얻은 직렬 연결부분 회로의 소자값들은 각각 $L_R=1.76H$, $C_L=1.518pF$, $L_p=0.629nH$ 이다.

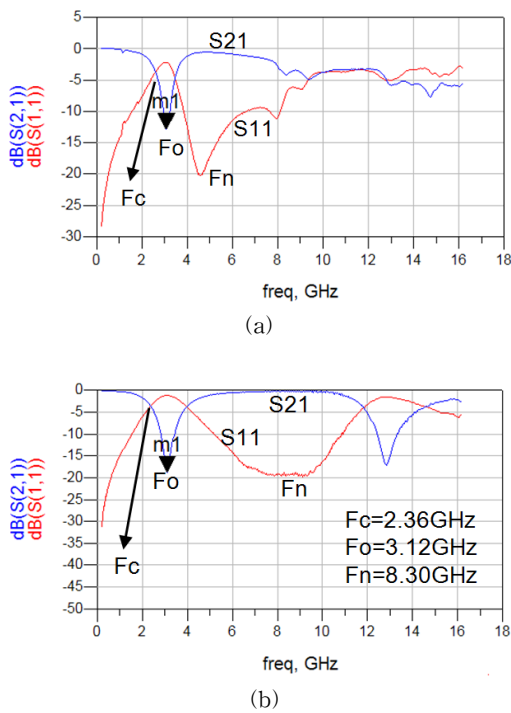


그림 8 제안하는 DL-CRLH 선로의 부분 회로별로 측정된 특성의 예 ($V_r=0V$) (a) 그림 7(a)에 보인 아랫면 회로만 제작하여 측정된 특성 (b) 그림 7(a)에 보인 윗면 회로만 제작하여 측정된 특성

Fig. 8 Example of the measured S-parameters of the proposed DL-CRLH transmission line ($V_r=0V$) (a) for the circuit only on the bottom plane in Fig. 7(a) (b) for the circuit only on the top plane in Fig. 7(b)

지면 관계상 모든 바이어스 전압(V_r)에 따른 측정 데이터를 많이 보이지는 않았으나, V_r 을 조절하면 측정된 S-파라미터 데이터가 조금씩 가변되므로 이에 상응하는 등가회로도 바이어스에 따라 각각 변한다. 따라서 그림 6의 등가회로에서 V_r 에 따른 주파수 특성이 변한다고 할 수 있으므로 결국 전체적인 주파수 특성이 변하게 되는 것이다. 한편 V_r 을 0~15V 사이에서 1V 간격으로 변화시켰을 때 F_0 , F_c , F_n 주파수도 가변됨이 측정되었는데, 이로부터 DL-CRLH

전송선로는 이 주파수 영역에서 평형조건을 이루는 주파수가 가변됨을 예측할 수 있다. 또한 이로부터 삼중대역을 보이는 주파수도 각각 변함을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서 이루고자 하는 삼중대역 특성 확보, 삼중대역 특성의 주파수 가변성, 그리고 직렬 공진기 부분과 병렬공진기 부분의 공진주파수가 일치하는 평형조건을 이루는 주파수의 가변성을 얻을 수 있는 것이다.

4. SIAD 전송선로의 제작 및 측정결과

본 장에서는 비유전율이 2.33이고 두께가 20 mils인 유전체 기판을 사용하여 그림 7과 같은 DL-CRLH 회로를 제작하고 측정된 특성을 살펴보고자 한다. 기판의 윗면과 바닥면에 모두 다이오드가 존재하므로 다양한 바이어스의 조합이 가능하다. 편의상 윗면과 아랫면 회로에 있는 다이오드에 인가하는 바이어스 전압을 각각 $V_{r,up}$, $V_{r,down}$ 이라 부르기로 한다.

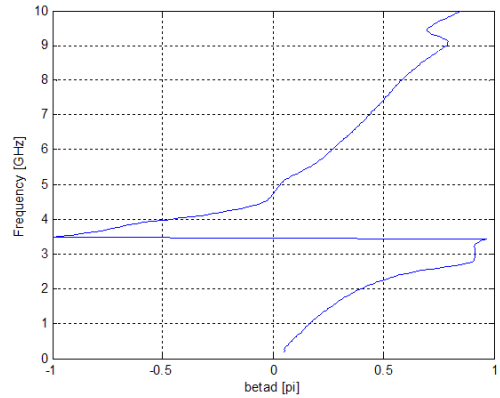


그림 9 DL-CRLH의 $\omega-\beta$ 다이어그램 ($V_{r,up}=0V$, $V_{r,down}=0.5V$)
Fig. 9 $\omega-\beta$ diagram of the measured S-parameters of the fabricated DL-CRLH transmission line ($V_{r,up}=0V$, $V_{r,down}=0.5V$)

그림 9는 측정 결과 제시의 한 예로써, $V_{r,up}=0V$, $V_{r,down}=0.5V$ 인 경우에 측정된 S-파라미터에서 얻은 $\omega-\beta$ 다이어그램이다. 이 그림에 의하면 βd 가 각각 $+0.5\pi$, -0.5π , 두 번째 $+0.5\pi$ 인 주파수 3개와 (2.27GHz, 3.98GHz, 7.44GHz), βd 가 $+\infty$ 에서 $-\infty$ 로 천이하는 주파수 (ω_∞ , 3.46GHz), 그리고 βd 가 $-$ 에서 $+$ 로 천이하는 주파수 (ω_0 , 4.72GHz) 즉 총 5개의 유의미한 주파수가 존재함을 알 수 있다. 따라서 βd 가 각각 $+0.5\pi$, -0.5π , 두 번째 $+0.5\pi$ 인 주파수 3개로부터 삼중대역 특성을 보임을 알 수 있으며, 또한 이 삼중대역 특성이 바이어스 조절에 따라서 가변되고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 연구의 DL-CRLH의 중요한 특성 가운데 하나이다. 왜냐하면 종래의 DL-CRLH는 일단 제작되고 나면 삼중대역 주파수가 고정되었으나[12], 본 연구의 결과에서는 이 삼중대역이 가변되고 있기 때문이다.

측정한 S-parameter로부터 얻은 공진주파수로 판별한 평형 주파수와 이때의 ($V_{r,up}$, $V_{r,down}$) 바이어스 전압쌍을 그림 10에 표시하였다. $V_{r,up}$ 을 1~15V까지 1V 간격으로 바꾸면서

평형 조건을 보이도록 $V_{r,down}$ 을 각각 조절한 결과 $V_{r,down}$ 은 0~3.65V의 범위를 가졌다. 이 때 평형 주파수는 3.42~4.8GHz의 주파수 범위를 가졌다. 측정된 DL-CRLH 선로의 평형 주파수 또한 가변됨을 이 그림으로부터 알 수 있다.

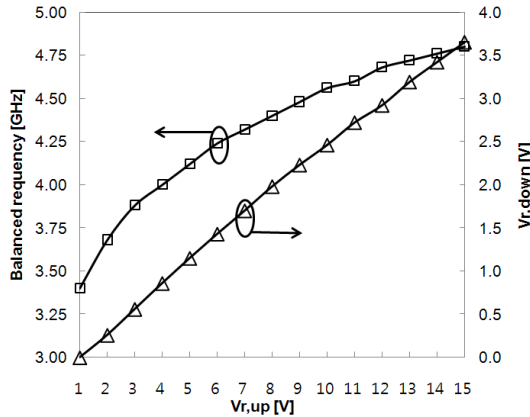


그림 10 바이어스 전압에 따라 가변되는 평형 주파수의 측정 결과

Fig. 10 Measured adjustable balanced frequency vs bias voltages

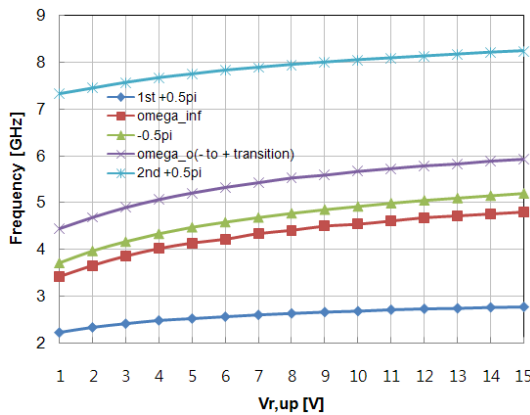


그림 11 평형 주파수 바이어스 조건에서 가변하는 삼중대역 주파수 특성의 측정 결과 ($\beta d=+0.5\pi, -0.5\pi, 2nd +0.5\pi, \omega_\infty, \omega_0$ 인 주파수의 가변성)

Fig. 11 Measured triple band frequencies under the bias voltages of the balanced frequencies (adjustable frequencies for $\beta d=+0.5\pi, -0.5\pi, 2nd +0.5\pi, \omega_\infty,$ and ω_0)

그림 11은 평행조건을 얻는 바이어스 전압에 따라서 $\beta d=+0.5\pi, -0.5\pi, 2nd +0.5\pi, \omega_\infty, \omega_0$ 인 주파수가 가변되고 있음을 보여주는 측정결과로, 삼중대역 특성의 가변성을 보여 준다. 그림 10에 보인 평형 조건의 바이어스 전압쌍을 인가하여 측정한 결과 $V_{r,up}=1\sim 15V$ (1V 간격) 사이에서 각각 2.22~2.77GHz, 3.7~5.2GHz, 7.32~8.23GHz, 3.42~4.8GHz, 4.44~5.92GHz의 가변범위를 보였다. 따라서 바이어스 가변에 따라서 $\beta d=+0.5\pi, -0.5\pi, 2nd +0.5\pi, \omega_\infty, \omega_0$ 인 주파수의 가변폭은 각각 0.55GHz, 1.5GHz, 0.91GHz, 1.38GHz, 1.48GHz임을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11의 결과를 선행 연구 결과와 비교해 보면, 선행연구에서는 병렬 공진회로 또는 직렬공진 회로 중 어느 한 곳에 선택적으로 버랙터 다이오드가 사용되어 평형 주파수를 가변할 수 없었으나 본 연구결과는 이것이 가능하다는 의미가 있다. 또한 삼중 주파수 특성에 해당하는 주파수 대역 또한 가변성을 보인다는 장점이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 DGS와 다이오드를 이용하여, 삼중대역 특성 및 주파수 가변성을 갖는 DL-CRLH 전송선로에 대하여 살펴보았다. 제안된 DL-CRLH 전송선로는 선트 스텐브, DGS, DGS내 격리된 island, 버랙터 다이오드로 구성되며, 선트 연결된 직렬회로 부분과 직렬 연결된 병렬회로 부분에 각각 다이오드가 사용되어 가변 커패시턴스에 의한 전체적인 가변 특성을 보인다. 또한 선트연결 회로 또는 직렬연결 회로 부분에서의 고주파에서의 notch 현상으로부터 기생성분이 존재함을 추측하고, 측정된 결과로부터 기생성분을 추출하여, 결과적으로 제안하는 전송선로 구조가 DL-CRLH 전송선로 구조를 지님을 보였다.

제안하는 구조를 제작하여 전송 특성을 측정한 결과 예상대로 삼중대역의 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한 바이어스를 가변하여 그 특성을 살펴보았는데, $V_{r,up}$ 을 1~15V까지 1V 간격으로 가변하고 이 때 평형 상태를 보이도록 $V_{r,down}$ 을 각각 조절한 결과 0~3.65V의 범위를 가졌다. 그리고 이때의 평형 주파수는 3.42~4.8GHz의 가변범위를 가졌다. 한편 평행조건 바이어스에 따라서 $\beta d=+0.5\pi, -0.5\pi, 2nd +0.5\pi, \omega_\infty, \omega_0$ 인 주파수가 가변되고 있음을 확인하였는데, $V_{r,up}=1\sim 15V$ 사이에서 각각 0.55GHz, 1.5GHz, 0.91GHz, 1.38GHz, 1.48GHz의 가변 주파수 폭을 가졌다.

본 논문에서는 S-parameter를 이용하여 DL-CRLH의 주파수 가변성에 대한 분석 결과를 보여주고 있는데, 앞으로 추가적인 연구가 많이 진행되어야 할 주제이다. 특히 삼중대역응용을 위한 고려로써, 삼중 대역에서의 손실을 최소화하고, 전자파 회로에 응용을 용이하게 하는 임피던스 분석 등의 추가적인 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed., Artech House, Boston, 1996.
- [2] B. C. Wadell, *Transmission Line Design Handbook, Second edition*, Artech House, Boston, 1991.
- [3] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Soviet Physics Usp.*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan. 1968.
- [4] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer and P. C. Kremer, "Planar Negative Refractive Index Media Using Periodically L-C Loaded Transmission Lines," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 12,

pp. 2702-2712, Dec. 2002.

[5] C. Caloz and T. Itoh, "Application of the Transmission Line Theory of Left-Handed (LH) Materials to the Realization of a Microstrip LH Transmission Line," *IEEE-APS Int'l Symp.*, vol. 2, pp. 412-415, San Antonio, TX, Jun. 2002.

[6] C. Caloz, "Dual composite right/left-handed (D-CRLH) transmission line metamaterial," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no.11, pp. 585 - 687, Nov. 2006.

[7] I. H. Lin, C. Caloz, and T. Itoh, "A branch-line coupler with two arbitrary operating frequencies using left-handed transmission lines," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Special session Metamaterials*, Philadelphia, USA, pp. 325-327, Jun. 2003.

[8] I. H. Lin, K. M. K. H. Leong, C. Caloz, and T. Itoh, "Dual-band sub-harmonic quadrature mixer using composite right/left-handed transmission lines," *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 153, no. 4, pp. 153-180, Aug. 2006.

[9] Y. H. Ryu, J. H. Park, J. H. Lee, and H. S. Tae, "DGS Dual Composite Right/Left Handed Transmission Line," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no.7, pp. 434 - 436, Jul. 2008.

[10] C. Caloz, S. Abielmona, H. V. Nguyen, and A. Rennings, "Dual composite right/left-handed (D-CRLH) leaky-wave antenna with low beam squinting and tunable group velocity," *Phys. Stat. Solid (b)*, vol. 244 no. 4, pp. 1219-1226, Apr. 2007.

[11] 임종식, 구자경, 한상민, 정용채, 안달, "주파수 가변성을 갖는 D-CRLH 전송선로", 한국전자과학기술논문지 제 19권, 제 12호, pp. 1375~1383, 2008년 12월.

[12] A. Rennings, T. Liebig, C. Caloz, and I. Wolff, "Double Lorentz transmission line metamaterials and their applications to triband devices," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Honolulu, HI, June 2007, 1427-1430.

[13] N. Engheta, et. al., *Metamaterials Physics and Engineering Explorations*, John Wiley and Sons, Boston, 1996.

[14] G. V. Eleftheriade, "A Generalized Negative-Refractive-Index Transmission-Line (NRI-TL) Metamaterial for Dual-Band and Quad-Band Applications," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no.6, pp. 415-417, Jun. 2007.

[15] M. Studniberg and G. V. Eleftheriades, "Physical Implementation of a Generalized NRI-TL Medium for Quad-Band Applications," in *Proc. European Microwave Conference*, Munich, Oct 2007, 408-411.

[16] H. Lee and S.Nam, "Triband Branch Line Coupler Using Double-Lorentz Transmission Lines," *Microw. and Opt. Tech Lett.*, vol. 50, no.5, pp. 1174 - 1177,

May. 2008.

[17] A. C. Papanastasiou, G. E. Georghiou, and G. V. Eleftheriades, "A Quad-Band Wilkinson Power Divider Using Generalized NRI Transmission Lines," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no.8, pp. 521-523, Aug. 2008.

저 자 소 개

임 종 식 (林 鍾 植)



1991년 서강대 전자공학과 졸업(공학사).
1993년 동대학원 전자공학과 졸업(석사).
2003년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 1993~2005 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원, 2005~현재 순천향대학교 전기통신공학과 조교수.
Tel : (041)530-1332
Fax : (041)530-1548
E-mail : jslim@sch.ac.kr

이 재 훈 (李 在 訓)



2010년 순천향대 정보기술공학부 졸업(공학사). 2010년 동대학원 전기통신공학과 석사과정 재학중.
Tel : (041)530-1607
Fax : (041)530-1735
E-mail : ours_soul@naver.com

이 준 (李 準)



2010년 순천향대 정보기술공학부 졸업(공학사). 2010년 동대학원 전기통신공학과 석사과정 재학중.
Tel : (041)530-1607
Fax : (041)530-1735
E-mail : darkyijun@naver.com

정 용 채 (鄭 龍 采)



1989년 서강대 전자공학과 졸업(공학사).
1991년 동대학원 전자공학과 졸업(석사).
1996년 동대학원 전자공학과 졸업(공학박).
1991~1998 삼성전자 정보통신본부 선임연구원, 1998~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수.
Tel : (063)270-2458
Fax : (063)270-2461
E-mail : ycjeong@jbnu.ac.kr



한 상 민 (韓 相 敏)

1996년 고려대 전파공학과 졸업(공학사).
1998년 동대학원 전파공학과 졸업(석사).
2003년 동대학원 전파공학과 졸업(공박).
2003년 10월~2004년 11월 UCLA Post
Doc., 2005년 1월~2007년 8월 삼성종합기
술원 전문연구원, 2007년 9월~현재 순천
향대학교 정보통신공학과 전임강사.

Tel : (041)530-1348

Fax : (041)530-1548

E-mail : smhan@sch.ac.kr



안 달 (安 達)

1984년 서강대 전자공학과 졸업(공학사).
1986년 동대학원 전자공학과 졸업(석사).
1990년 동대학원 전자공학과 졸업(공박).
1990~1992 한국전자통신연구원(ETRI) 선
임연구원, 1992~현재 순천향대학교 전기
통신공학과 교수.

Tel : (041)530-1331

Fax : (041)530-1609

E-mail : dahnkr@sch.ac.kr