

ICTL을 이용한 소형화된 하이브리드 Rat-Race 결합기

이 창 언, 이 진 택, *김 상 태, 신 철 재

아주대학교 전자공학부, *ITEP

전화 : 031-219-2374 / 핸드폰 : 017-722-1976

Design of Compact Hybrid Rat-Race Couplers via ICTL

Chang On Lee, Jin-Taek Lee, *Sang Tae Kim, Chull-Chai Shin

Division of Electrical & Computer Engineering, Ajou University, *ITEP

E-mail : c.o.lee@ieee.org

Abstract

In this paper, we introduce the concept of ICTL(inductively compact transmission line) that is new type of compact transmission line. As using the ICTL, the compact microstrip hybrid rat-race coupler was designed. It's new type compact rat-race couplers. The designed compact rat-race couper at 1.8 GHz has area of 1182 mm², and it is 58% for conventional rat-race couplers. Measured results are agree with predicted results.

I. 서 론

Rat-race 결합기는 간단한 구조를 가지면서도 전력 분배에 있어 광대역 특성을 가지기 때문에 증폭기나 믹서, 주파수 체배기등, RF/Microwave영역의 다양한 회로에 응용되어온 핵심 소자 중 하나이다.^[1,2] 하지만 낮은 초고주파영역에서의 일반적인 rat-race 결합기는 타 시스템에 비하여 큰 크기와 면적을 차지한다. 소자가 커지게 되면 전력소비가 크질 뿐만 아니라 통신 시스템의 비용도 증가하게 되는 원인이 된다. 따라서 보다 작은 물리적 크기로 동일한 효과를 나타낼 수 있는 소형화된 rat-race 결합기의 설계에 대한 연구가 다양

한 방법으로 연구되고 있다.^[1-5] 가장 일반적으로 회로를 소형화하는 방법으로는 선로를 굽혀서 회로를 구성하는 이른바 meander-line을 사용하는 방법이 있다.^[2-4] 이러한 방법은 매우 효율적이기는 하지만, 실제로 전송선로의 길이를 줄이는 것이 아니라 단순히 접는 것이기 때문에 근본적인 해결책이라 할 수 없다.^[6] 또한 이러한 접힌 선로를 사용할 경우 접힌 영역에서 발생하는 불연속면에 대한 고려와 인접선로와의 간섭등을 고려하여야 되기 때문에 매우 복잡한 계산이 필요로 할 수 있다.^[5] 최근 전송선로에 주기적으로 병렬 커패시턴스 역할을 하는 개방 stub를 달아주어 전송선로의 물리적 길이를 줄이는 ATL (artificial transmission line)을 이용하여 성공적으로 rat-race 결합기를 비롯한 여러 소자를 소형화 하였다.^[5,6] 이처럼 병렬 커패시턴스를 부과하여 전송선의 물리적 길이를 줄이는 ATL은(이하 본 논문에서는 이런 선로를 CCTL (capacitively compact transmission line)이라 칭한다.) 성공적인 물리적 길이의 감소에도 불구하고 마이크로스트립 선로에 구현될 때, 몇 가지 문제점이 있다. 먼저 병렬커패시턴스가 부가되면 CCTL의 임피던스는 낮아지기 때문에 요구되어지는 임피던스의 CCTL을 구현하기 위해서는 CCTL을 구성하는 주 전송선로의 특성임피던스가 높아져야 하고, 이에 마이크로스트립으로 구현되는 전송선의 선폴은 좁아지게 된다. 이는 때때로 구현하기 힘들만큼 선폴이 좁아질 수

있기 때문에 문제가 될 수 있다. 또 다른 문제로는 부가된 stub의 길이로 인해 CCTL의 전체 폭이 넓어지므로 회로구현에 유연성이 떨어질 수 있다.

본 논문에는 주기적인 직렬인덕턴스를 이용하여 전

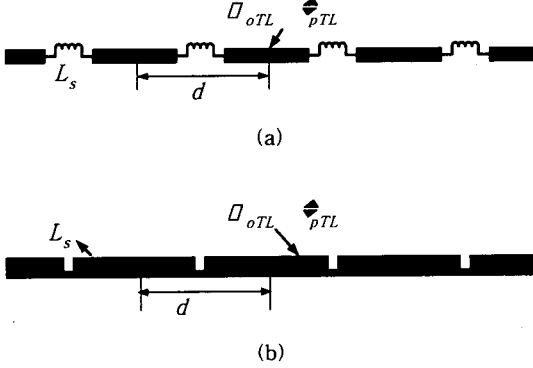


그림 1. inductively compacted transmission line (a) 주기적으로 직렬 인덕턴스가 부가되어 소형화 되는 전송선로 (b) 마이크로스트립 선로에서 좁은 폭의 슬릿으로 구현되는 ICTL

송선로의 물리적 길이를 줄인 전송선로를 제안하고 이를 마이크로스트립에서 구현하여 하이브리드 rat-race 결합기에 적용하여 이를 소형화시켰다. 이처럼 주기적인 직렬 인덕턴스에 의해 소형화 되는 전송선로를 이하 본 논문에서는 앞의 CCTL과 구분하기 위하여 ICTL(inductively compact transmission line)이라 칭한다. 마이크로스트립 라인에서 직렬 인덕턴스를 구현하기 위하여 좁은 폭의 slit^[7]을 이용하였다.

ICTL을 사용하여 1.8 GHz에서 구현된 새로운 형태의 소형화 된 rat-race 결합기는 계산결과 1182 mm²의 면적을 가지며, 일반적인 rat-race결합기에 비해 그 크기가 58%정도이다.

II. Inductively Compact Transmission Line Theory

그림 1(a)는 주기적인 직렬 인덕턴스에 의해 소형화 되는 전송선을 보여준다. 짧은 간격인 d간격으로 배열된 인덕턴스 L_s에 의해 ICTL의 특성을 결정하는 특성 임피던스(Z_{oICTL})와 위상속도(v_{pICTL})는 (단, lossless라 가정)

$$Z_{oICTL} = \sqrt{\frac{L + \frac{L_s}{d}}{C}} \quad (1)$$

$$v_{pICTL} = \frac{1}{\sqrt{\left(L + \frac{L_s}{d}\right)C}} \quad (2)$$

여기서 L, C는 각각 ICTL을 이루는 주 전송선로의 단위길이당 인덕턴스와 커패시턴스를 나타낸다. 식 (1)에서 보듯이 주기적으로 인덕턴스가 전송선로에 부가될 때, 전송선로의 특성임피던스는 올라가기 때문에 마이크로스트립으로 구현된다면 넓은 선폴을 가질 수 있음을 의미한다. 식 (2)에서 부가된 인덕턴스의 영향으로 ICTL의 위상속도는 낮아지게 된다. 위상속도가 낮아진다는 것은 임의의 전기적 길이에 대한 물리적 길이가 감소함을 의미한다. n개의 인덕턴스를 갖는 ICTL의 전기적 길이는

$$\phi_{ICTL} = \frac{ndw_o}{v_{pICTL}} = ndw_o \sqrt{\left(L + \frac{L_s}{d}\right)C} \quad (3)$$

이며, 여기서 w_o는 설계하고자 하는 각 주파수를 나타낸다. 이 식으로부터 구하고자 하는 nd는 구하고자 하는 전기적 길이에 대한 물리적 길이가 된다.

그림 1(b)는 ICTL을 마이크로스트립 선로에서 구현되는 본 논문에서 제안한 모습이다. 마이크로스트립 선로이외에 부가적인 소자들이 소요되지 않도록 하기 위하여 인덕터 역할을 할 수 있는 좁은 폭의 슬릿을 신호의 진행방향으로 배열하였다.^[7] 마이크로스트립 ICTL을 이용하여 어떤 소자를 설계하고자 할 때, 임의의 전기적 길이와 임피던스를 갖는 ICTL을 물리적인 변수로 나타내어야 한다. 임의의 전기적 길이를 물리적인 길이(l)로 나타내면 식 (3)으로부터

$$l = \frac{\phi_{ICTL} v_{pICTL}}{w_o} = \frac{\phi_{ICTL}}{w_o \sqrt{\left(L + \frac{L_s}{d}\right)C}} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있고, 마이크로스트립 라인에서 슬릿에 의한 인덕턴스 L_s는

$$L_s = \frac{\mu_o h \pi}{2} \left(1 - \frac{Z_{TL}}{Z_{TL}} \sqrt{\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_{eff}}}\right)^2 = \frac{\mu_o h \pi}{2} \left(1 - \frac{Z_{TLair}}{Z_{TLair}}\right)^2 \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다.^[7] 여기서 ' 표시는 슬릿으로 인해 좁아진 마이크로스트립 라인을 표시하고, 아래첨자의 'air'라는 표시는 기판 유전체의 유전율이 공기(ε_r = 1)로 채워져 있는 마이크로스트립 선로를 뜻한다. 그리고 식 (4)에서 L과 C는 각각 ICTL의 주 전송선로의 특성임피던스와 위상속도로부터 구할 수 있다. 주 전송선의 특성임피던스와 위상속도는 슬릿에 의한 인덕턴스 양과, 구하여야 될 임의의 ICTL의 특성임피던스로부터 유추해낼 수 있다.

만약 주 전송선로가 임의의 선로 폭 W_{TL} 을 갖는다면, 슬릿간의 간격 d_s 를 두고(즉, $d = d_s + W_{slit}$) 깊이가 a 인 슬릿이 주기적으로 배열되는 ICTL의 물리적 길이는 주어진 기판의 유전율(ϵ_r)과 선로 폭 W_{TL} 으로부터 주 전송선로의 특성임피던스와 위상속도를 구할 수 있고, 이로부터 주 전송선로의 L 과 C 를 구할 수 있다. 한편 슬릿의 깊이 a 로부터 슬릿에 의해 부과되는 인덕턴스 L_s 를 구할 수 있다. 이러한 값들로부터 원하는 ICTL의 특성임피던스를 구하기 위해 사용되어야 하는 슬릿의 양이 식 (1)에 의해 결정되고, 또한 ICTL의 위상속도도 구할 수 있게 된다. 따라서 식 (4)로부터 물리적 길이를 구할 수 있다. 여기서 흥미로운 것은 ICTL의 위상속도를 구하지 않아도 물리적 길이는 nd 이므로 쉽게 구할 수 있다.

마이크로스트립 선로로 구현된 ICTL에서 식 (1)의 의미를 다시 살펴보면, ICTL은 주 전송선로보다 부가된 직렬인덕턴스의 영향으로 높은 임피던스 라인을 형성한다. 따라서 기존의 CCTL과는 달리 주 전송선의 선폭이 넓어지므로, 선폭이 줄어들어 제작이 힘들어질 가능성이 존재하던 CCTL의 보완적 성격을 가질 수 있다.

III. ICTL을 이용한 소형화된 마이크로 스트립 Rat-Race 결합기 설계

하이브리드 rat-race 결합기는 그림 2(a)와 같이 90°와 270°의 전기적 길이를 갖고 특성임피던스가 $\sqrt{2}Z_0$ 인 선로로 구성된 4 포트 소자이다. 그림에 나타난 1 포트는 입력포트이고 2,3 포트는 출력포트, 그리고 4 포트는 격리 포트가 된다. 이러한 rat-race 결합기는 전기적 길이가 길기 때문에 일반적으로 물리적 길이가 길어져 소자가 차지하는 비중이 커지게 된다. 따라서 전기적 길이는 동일하면서 물리적 길이가 작은 ICTL을 이용하여 rat-race 결합기는 소형화될 수 있다.

마이크로스트립 ICTL을 이용하여 소형화된 하이브리드 rat-race 결합기가 1.8 GHz의 설계 주파수를 가지고 그림 2(b)와 같이 설계되었다. 이때 사용된 유전체는 유전율이 2.2($\epsilon_r = 2.2$)이고 높이가 0.7874 mm ($h = 0.7874$ mm)인 duroid 기판이다. 슬릿의 폭은 0.2 mm로 하였으며, 깊이 a 는 주 전송선로 폭(W_{TL})의 80%로 계산하였다. 슬릿사이의 간격 d_s 는 2.4 mm로 하였으며 90° 선로를 구성하기 위하여 8개의 슬릿을 사용하여 ICTL을 구성하였다. 270°는 간략하게 90°선로의 3배가 되도록 구성하였다. 본 논문에서는 특성임피던스

가 $\sqrt{2}Z_0$ 인 ICTL을 구성하기 위하여 주 전송선로의 마이크로스트립 선로 폭은 2.4 mm로 하였으며 50Ω의 피드라인의 폭도 2.4 mm이다. 표 1에서는 앞 절에서 설명한 ICTL의 이론을 적용하여 quasi-static analysis를 바탕으로 계산한 계산결과와 MoM(method of moments)을 바탕으로 한 full-wave analysis를 사용하

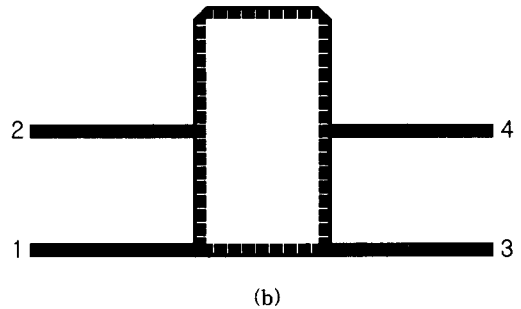
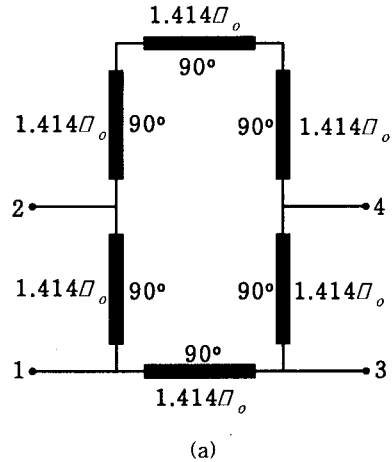


그림 2. 하이브리드 rat-race 결합기 (a) 모델 (b)주기적인 슬릿을 이용한 ICTL로 설계된 소형화된 rat-race 결합기

표 1. 70.7Ω의 90° ICTL구성을 위한 설계변수

설계변수	계산결과	최적화된 결과
주 전송선로의 폭, W_{TL}	2.4 mm	2.4 mm
슬릿의 폭, b	0.2 mm	0.2 mm
슬릿의 깊이, a	1.92 mm	1.8 mm
슬릿의 개수, n	8 개	8 개

는 상용 EM(electromagnetic) solver를 이용하여(여기서 이용한 상용 소프트웨어는 Ansoft사의 Ensemble이다) 최적화한 변수 값을 나타내었다. 이때 최적화는 다른 변수는 그대로 두고 슬릿의 깊이만을 변화시켰다. quasi-static analysis를 이용한 계산에서 전술한 slit에 의한 인덕턴스 값이 비교적 큰 오차를 품고 있기 때문이다.

그림 3은 표 1의 최적화된 구조변수를 가지고 설계된 rat-race 결합기의 EM solver의 계산 결과를 이상적인 선로로 구성된 rat-race 결합기의 결과와 비교한 것이다. 그림에 나타난 결과에서 확인된 바와 같이 ICTL로 구성된 소형화된 rat-race 결합기는 이상적인 전송선로로 구성된 결합기처럼 매우 우수하게 동작함

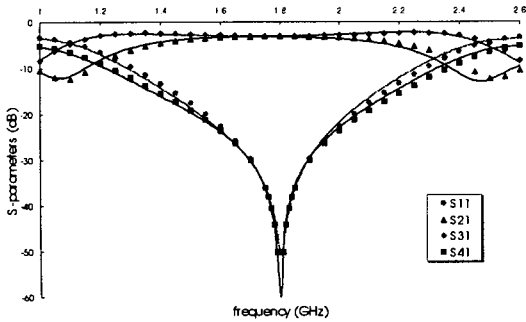


그림 3 최적화된 ICTL의 설계변수를 이용하여 설계된 소형화된 rat-race 결합기의 특성(실선)과 이상적인 선로로 구성된 rat-race 결합기의 특성(점) 비교

을 알 수 있다. 따라서 주기적인 슬릿을 직렬인덕턴스로 활용한 마이크로스트립 ICTL은 rat-race 결합기와 같은 소자들을 효과적으로 축소화시킴을 알 수 있다. 소형화된 rat-race 결합기는 1182 mm²의 면적을 가지므로 2016 mm²를 갖는 일반적인 rat-race 결합기에 비해 58%의 크기를 갖는다.

IV. 결론

본 논문에서는 RF/Microwave 영역에서 소자를 소형화시키기 위해, 병렬커패시턴스를 이용하던 기존의 CCTL과는 달리 주기적인 직렬 인덕턴스를 이용한 ICTL을 소개하였다. 그리고 이러한 ICTL을 마이크로스트립 선로에서 좁은 폭의 슬릿을 이용하여 구현하여 하이브리드 rat-race 결합기에 적용하여 이를 소형화시켰다. 본 논문에서는 1.8 GHz에서 ICTL을 이용한 결합기는 일반적이 결합기 크기의 58% 정도의 크기로 구현되었다.

참고문헌

[1] Y.J. Sung, C.S. Ahn, and Y.-S. Kim, "Size reduction and harmonic suppression of rat-race hybrid coupler using defected ground structure," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 14, no.1 January 2004.

[2] R.K. Settaluri, G. Sundberg, A. Weisshaar, and V.K. Tripathi, "Compact folded line rat-race hybrid couplers," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 2, February 2000.

[3] R. K. Settaluri, A. Weisshaar, C. Lim, and V. K. Tripathi, "Design of compact multilevel folded-line RF couplers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 47, no. 12, December 1999.

[4] V.K. Tripathi, H.B. Lunden, and J.P. Starski, "Analysis and design of branch-line hybrids with coupled lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 32, no. 4, April 1984.

[5] K.W. Eccleston and S.H.M. Ong, "Compact planar microstripline branch-line and rat-race couplers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 51, no. 10, October 2003.

[6] J.S. Hong and M.J. Lancaster, "Capacitively loaded microstrip loop resonator," *IEE Electronics Lett.*, vol. 30, no. 18, September 1994.

[7] W.J.R. Hoefer, "Equivalent series inductivity of a narrow transverse slit in microstrip," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 25, no. 10, October 1977.