

슬롯을 가진 삼각 패치형 인공 전송 선로 결합기

A Slotted Triangular-Patch Type Artificial Transmission Line Coupler

오 송 이 · 황 희 용

Song-Yi Oh · Hee-Yong Hwang

요 약

본 논문에서는 사각형 모양으로 공간 활용성이 높은 콤팩트한 구조를 갖는, 슬롯이 있는 삼각 패치형 인공 전송 선로 결합기를 제안한다. 일반적인 결합기는 $\lambda/4$ 길이의 전송 선로를 사용하기 때문에 소형화의 한계를 가지고 있으나, 이 구조는 $\lambda/4$ 보다 작은 길이일 때 결합기가 최대 결합도를 갖는 특징을 나타내어 소형화에 유리할 뿐만 아니라, 슬롯의 길이를 변화시킴으로써 설계상에 임피던스와 위상 조절에 용이하도록 하였다. 제시된 인공 전송 선로 결합기의 설계 방법을 바탕으로 중심 주파수 2.4 GHz에서 15 dB의 결합기를 시험 제작하여 제시된 방법의 유용성을 보였다.

Abstract

In this paper, an artificial transmission line coupler with slotted-triangular patches, which is compact and space-saving structure, is proposed. The proposed structure has specific features of not only convenience for adjusting the characteristic impedance and the phase of its coupled line by varying the lengths of the slots of the artificial transmission lines in designing a coupler but also the maximized coupling value at less than $\lambda/4$ electrical length so that it can be designed in compact and small dimensions, while conventional coupled line couplers are generally limited in compact and miniaturized designs by their $\lambda/4$ transmission lines. A fabricated 15 dB test-coupler at 2.4 GHz band by proposed design method shows good agreement with theory and simulation.

Key words : Artificial Transmission Line, Coupler, Artificial Transmission Line Coupler, Compact Coupler

I. 서 론

차폐되지 않은 두 개의 전송 선로를 서로 근접시키면, 각 선로의 전자계 상호 결합으로 인해 두 선로가 서로 영향을 미치게 되는데, 이 같은 성질을 이용하여 방향성 결합기, 하이브리드 결합기 등을 실현할 수 있다^{[1],[2]}. 이러한 결합기들은 평형 증폭기, 평형 믹서, 영상 배제 믹서, 위상 천이기와 같은 다양한 마이크로파 회로에서 전력 분배기 및 결합기로서 필수적인 소자로 쓰이고 있다. 최근에는 이동 통신 안테나의 빔 패턴 배열 안테나의 급전 소자인 Butler

Matrix를 구현하는데 중요한 소자로 적용되고 있다^{[3],[4]}. 그러나, 이러한 일반적인 결합기의 경우 $\lambda/4$ 길이의 전송 선로를 사용하고 있기 때문에 결합기의 전체 크기를 소형화하는데 큰 어려움이 있다^[4].

한편, 무선 통신 시스템의 발달로 마이크로회로 소자의 소형화 및 집적도의 요구가 증가함에 따라 최근 인공 전송 선로를 이용한 회로의 소형화를 위한 연구 활동이 증가하고 있다. 인공 전송 선로란 기존의 전송 선로가 가지는 물리적 한계, 즉, 선로의 전기적 길이 및 특성 임피던스의 한계를 보완하기 위하여 도입한 것으로, 전체적으로는 전송 선로의

강원대학교 IT대학 전기전자공학부(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, College of Information Technology, Kangwon National University)

· 논문 번호 : 20101224-174

· 교신저자 : 황희용(e-mail : hyhwang@kangwon.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 4월 25일

특성을 만족시키면서 선로의 폭과 길이를 임의로 조절하여 다양하고 독특한 구조의 합성할 수 있는 선로를 뜻한다^{[5],[6]}.

따라서, 본 논문에서는 새로운 구조의 슬롯을 가진 삼각 패치형 인공 전송 선로를 구현하고, 이러한 인공 전송 선로를 이용하여 설계한 결합기를 제안한다. 새롭게 구현된 삼각 패치형 인공 전송 선로는 패치 내부에 삽입된 슬롯의 길이와 패치 상부의 폭을 변화시켜 임의로 인공 전송 선로의 특성 임피던스와 위상 조절에 용이하면서 동시에 전송 선로의 특성을 만족시킨다. 또한, 이러한 삼각형 구조의 인공 전송 선로를 이용하여 결합기를 설계함으로써 결합기의 전체적인 구조가 콤팩트하면서 단순하고, 패치에 삽입된 슬롯으로 인하여 결합기의 크기를 소형화 시키는데 유리하다^[7].

II. 본 론

2-1 삼각 패치형 인공 전송 선로의 구조

그림 1은 슬롯을 가진 삼각 패치형 인공 전송 선로의 기본 구조로서 패치의 평면에 slot 1과 slot 2를 배치하고, 패치 상부에 W 만큼의 폭을 추가하였다. 그림 2는 인공 전송 선로의 일반적인 등가회로를 나타낸 그림으로 Z_0 는 전송 선로의 특성 임피던스, βl 은 선로의 전기적 길이를 나타내며, Z_L 은 부하 임피던스를 나타낸다.

본 논문에서는 먼저, 결합기에 이용되는 인공 전송 선로를 Ansoft사의 HFSSTM를 이용하여 구현한 뒤 동일한 슬롯의 폭에서 각 슬롯의 길이와 인공 전송 선로의 상부 폭인 W 의 변화에 따른 선로의 특성 임피던스 및 위상차 특성에 대해 확인하고, 그림 3~5와 같이 각 특성들을 2중 y축 그래프를 이용하여 왼쪽 y축에는 특성 임피던스 Z_0 , 오른쪽 y축에는 위상차를 나타내었다.

우선, HFSSTM로 구현된 인공 전송 선로를 슬롯의 길이 및 W 의 변화에 따라 시뮬레이션 하여 입력 임피던스와 두 포트 간의 위상차를 확인하였고, 식 (1)과 MathematicaTM 프로그램의 근 추적 기능을 통하여 선로의 특성 임피던스 Z_0 를 구하였다. 이때 부하 임피던스 Z_L 은 50 Ω 으로 중단시켰고, 입력 임피던스 Z_{in} 과 선로 길이 βl 은 시뮬레이션 결과에서 얻어진

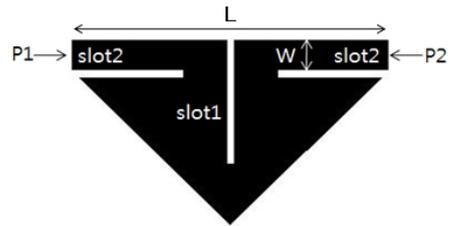


그림 1. 삼각 패치형 인공 전송 선로
Fig. 1. Triangular-patch type artificial transmission line.

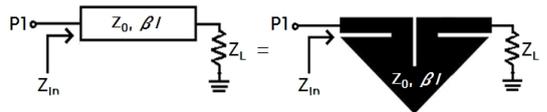


그림 2. 인공 전송 선로의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of artificial transmission line.

값을 사용하였다.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (1)$$

그림 3은 슬롯의 폭을 0.2 mm, slot 2의 길이를 3 mm, W 를 0.5mm로 고정한 뒤 slot 1을 2 mm부터 4 mm까지 0.4 mm 간격으로 길이를 변화시켰을 때 특성 임피던스와 위상차 변화를 나타낸 그래프로서, slot 1의 길이가 길어질수록 특성 임피던스와 위상차가 커짐을 확인할 수 있었다.

그림 4는 슬롯의 폭을 0.2 mm, slot 1의 길이를 3 mm, W 를 0.5 mm로 고정한 뒤 slot 2의 길이를 2 mm부터 3.6mm까지 0.4 mm 간격으로 변화시켰을 때 특성 임피던스와 위상차 특성을 그래프로 나타낸 것이다. 그 결과, slot 2의 길이가 길어질수록 특성 임피던스와 위상차가 커짐을 확인할 수 있었다.

그림 5는 슬롯의 폭을 0.2 mm, 길이를 3 mm로 고정시켰을 때 W 의 변화에 따른 특성 임피던스와 위상차 특성을 나타낸 그래프로서, 이때 W 는 0.2 mm부터 1 mm까지 0.2 mm 간격으로 변화시켰다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 인공 전송 선로의 상부 폭인 W 가 좁아질수록 특성 임피던스와 위상차가 커짐을 알 수 있었다.

위의 결과를 통하여 인공 전송 선로의 슬롯의 길이와 인공 전송 선로의 상부 폭인 W 를 변화시킴으로써 선로의 특성 임피던스와 위상차 조절에 용이함

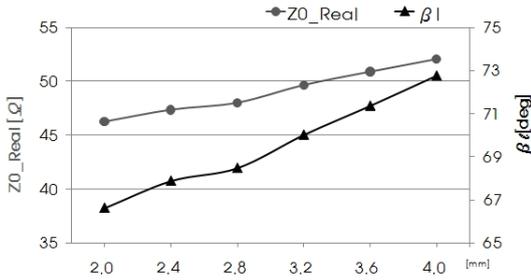


그림 3. Slot 1의 길이 변화에 따른 특성
Fig. 3. Characteristics by length changes of slot 1.

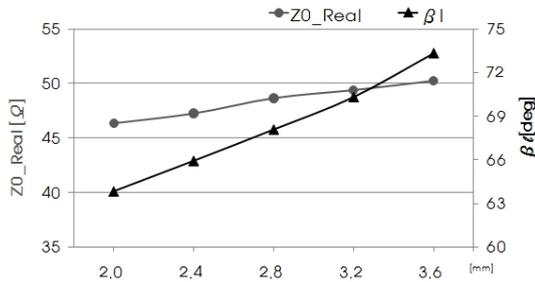


그림 4. Slot 2의 길이 변화에 따른 특성
Fig. 4. Characteristics by length changes of slot 2.

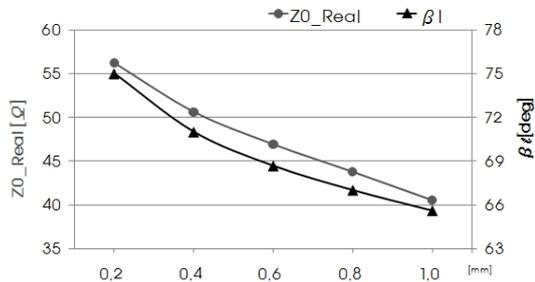


그림 5. W의 폭 변화에 따른 특성
Fig. 5. Characteristics by width of W.

을 확인하였다.

2-2 제안된 결합기의 구조

그림 6은 제안된 결합기의 구조로서 슬롯을 가진 삼각 패치형 인공 전송 선로를 S만큼의 간격을 두고 서로 결합시킨 4포트 구조이다^[7].

이와 같은 결합기는 방향성 결합기로서 포트 1을 입력 포트로 정하게 되면 포트 2는 통과 포트, 포트 3은 결합 포트, 포트 4는 격리 포트가 정해지게 된다. 또한, 통과 포트와 결합 포트의 출력 간에 -90° 의 위상차를 가짐으로써 쿼드러처 하이브리드^[2]로

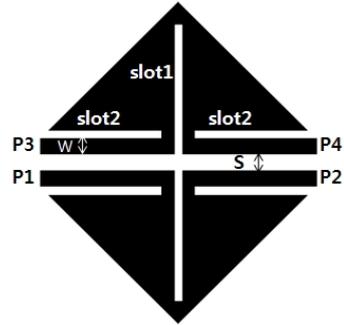


그림 6. 제안된 결합기의 구조
Fig. 6. Proposed coupler structure.

사용될 수 있다.

2-3 결합기의 설계

일반적으로 결합기의 특성 임피던스와 전압 결합 계수의 값이 정해지면 식 (2)~(4)의 관계를 통하여 우수-기수 모드의 특성 임피던스를 얻을 수 있다^[2]. 여기서, Z_{0e} 와 Z_{0o} 는 각각 우수 모드와 기수 모드의 특성 임피던스를 나타내고, Z_0 는 특성 임피던스, 또한, C 는 전압 결합 계수를 나타낸다.

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+C}{1-C}} \quad (2)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \quad (3)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}} \quad (4)$$

먼저, 기본적으로 식 (2)~(4)와 마이크로스트립 결합 선로를 이용하여 원하는 선로의 특성 임피던스를 갖는 결합기를 구현하고, 여기서 초기 결합 간격 S는 ADS의 line calc을 이용하여 구하였다.

다음으로 마이크로스트립 결합 선로의 선로 하나의 입력 임피던스 Z_{in} 을 그림 7과 같이 스미스 차트를 이용하여 얻었고, 이 값을 이용하여 선로의 특성 임피던스를 식 (1)을 통하여 구하였다. 이렇게 구해진 특성 임피던스와 비슷한 값을 갖도록 그림 3~5에서 나타낸 슬롯의 길이 변화와 W의 폭 변화에 따른 인공 전송 선로의 임피던스 특성 그래프를 통해 삼각 패치형 인공 전송 선로를 얻었다.

마지막으로, 얻어진 인공 전송 선로 두 개를 서로 근접시켜 그림 6과 같이 삼각 패치형 인공 전송 선

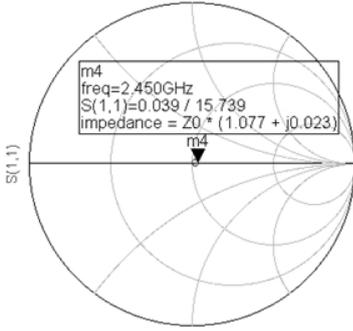


그림 7. 스미스 차트로 확인한 마이크로스트립 선로의 입력 임피던스
Fig. 7. Input impedance of microstrip line confirmed by Smith chart.

로 결합기를 설계하였다. 이때 결합 간격 S 는 인공 전송 선로 결합기를 최적화 시키는 과정을 통해 초기 간격 S 에 대한 임의의 결합도로부터 원하는 결합도를 갖도록 설정한다.

이때, 일반적인 전송 선로를 이용한 결합기의 경우 $\lambda/4$ 의 길이에서 최대 결합도 특성이 나타나게 되지만 제안된 인공 전송 선로의 경우 $\lambda/4$ 길이보다 더 짧은 길이에서 최대 결합도 특성을 나타내는 것이 관찰되었다. 이는 소형화에 아주 유리한 장점이 되므로 이를 정확히 분석하기 위해 보다 세부적인 등가회로인 그림 8을 고려한다. 시뮬레이션 확인 결과, slot 2의 변화는 결합기의 결합도에는 거의 영향을 미치지 않아 slot 2를 통한 결합은 무시하였다.

설계된 삼각 패치형 인공 전송 선로 결합기의 경우 그림 8에서 나타난 등가회로를 통해 알 수 있듯

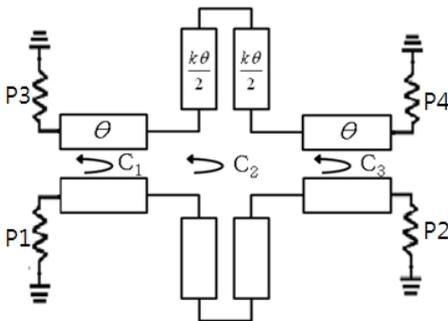


그림 8. 최대 결합도 조건을 구하기 위한 결합기의 세부적인 등가회로
Fig. 8. Detailed equivalent circuit of the coupler for obtain the maximum coupling factor conditions.

이 3단으로 된 다단 결합기로서 볼 수 있고, 참고문헌 [2]에 의하면 다단 결합에서 결합도가 작을 때($C \leq -10$ dB 또는 $C \ll 1$) 결합 포트(P3)에 나타나는 총 전압 V_3 은 식 (5)로 주어진다.

$$V_3 = (jC_1 \sin \theta e^{-j\theta}) V_1 + (jC_2 \sin \theta e^{-j\theta}) V_1 e^{-j2\theta} + \dots + (jC_N \sin \theta e^{-j\theta}) V_1 e^{-j2(N-1)\theta} \quad (5)$$

이때, C_n 은 n 단의 전압 결합 계수이고, θ 는 각 단의 결합 선로의 길이이며, V_1 은 입력 포트의 전압을 나타낸다. 인공 전송 선로 결합기의 결합 포트(P3)에 나타나는 총 전압 V_3 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_3 = jC_1 \sin \theta e^{-j\theta} V_1 + jC_2 \sin k\theta e^{-jk\theta} V_1 e^{-j2\theta} + jC_3 \sin \theta e^{-j\theta} V_1 e^{-j2(\theta+k\theta)} \quad (6)$$

여기서 $k\theta$ 는 제 2단의 결합 선로 길이를 나타낸다. 이때, 결합기가 대칭적인 구조이기 때문에 제 1단과 제 3단의 전압 결합 계수는 동일하고, 또한, 그림 8에서 알 수 있듯이 제 2단 결합 선로의 전압 결합률 C_2 는 0으로 볼 수 있기 때문에 식 (6)을 식 (7)과 같이 간략화 된다.

$$V_3 = jC_1 \sin \theta e^{-j\theta} V_1 [1 + e^{-j2(\theta+k\theta)}] = 2jC_1 \sin \theta e^{-j\theta} V_1 e^{-j(\theta+k\theta)} \cos(\theta+k\theta) \quad (7)$$

따라서 중심 주파수에서의 전압 결합률 C_0 는 식 (8)과 같이 정리된다.

$$C_0 = \left| \frac{V_3}{V_1} \right| = 2C_1 \sin \theta \cos(\theta+k\theta) = C_1 [\sin(2\theta+k\theta) - \sin k\theta] \quad (8)$$

여기서 C_0 는 중심 주파수에서의 전압 결합률을 나타낸다. 또한, 전압 결합률 C_0 가 최대가 되는 중심 주파수에서는 다음 식 (9)가 성립한다.

$$\frac{dC_0}{d\theta} = C_1 [(2+k) \cos(2\theta+k\theta) - k \cos k\theta] = 0 \quad (9)$$

따라서, 중심 주파수에서 결합기 전체의 대략적인 길이를 나타내는 2θ 는 k 값을 조정하여 90° 보다 작게 할 수 있다.

이때, 그림 1에서 결합기의 결합 길이 L 의 정확한 길이는 식 (9)을 이용해 정할 수 있는데, 그림 1의 제안된 인공 전송 선로 구조의 slot 1과 slot 2의 길이가

거의 비슷할 경우 길이 L 은 대략적으로 2θ 값인 $\lambda/8$ 길이를 사용하면 적절하다.

2-4 결합기 제작 및 측정 결과

제안된 결합기는 마이크로스트립 기반의 인공 전송 선로를 이용한 결합 선로 결합기로서 큰 결합도 값보다는 작은 결합도 값에 적합한 구조이다. 따라서 제시된 설계 방법과 다단 결합기의 이론식 등을 바탕으로 10 dB보다 낮은 결합도 중 임의로 15 dB의 결합도를 선택하여 결합기를 시험 제작하였다. 그림 9는 15 dB의 일반적인 마이크로스트립 결합 선로 결합기와 제안된 인공 전송 선로를 이용한 결합기를 제작 비교한 그림이다. 제작에는 유전율 4.4, 기판 두께 0.762 mm, 손실 탄젠트 0.025를 갖는 FR4 기판을 사용하였고, 시뮬레이션에는 Ansoft사의 HFSS™을 이용하였다. 표 1은 제작 및 시뮬레이션에 사용된 인공 전송 선로를 이용한 결합기의 파라미터 값이다.

이때, 제작된 결합기에 이용된 인공 전송 선로의 물리적 길이 2θ 는 중심 주파수 2.4 GHz에서 약 $\lambda/8$ 인 8 mm로서 41.58° 의 전기적 길이를 갖는다. 또한, $k\theta$ 의 경우 식 (9)에 중심 주파수 2.4 GHz에서 2θ 의 길이를 대입하여 값을 구하면 약 28° 의 전기적 길이를 갖고 여기서 k 는 1.35이다. 또한, 이때 중심 주파수 2.4 GHz에서 전압 결합률 C_0 가 최대값을 갖게 된다.

그림 10은 시뮬레이션 및 측정된 S -파라미터를 나타낸 결과이다. 측정 결과, 중심 주파수 2.4 GHz에서 17.7 dB의 결합도 특성(S_{31})을 나타냈고, 20% 대역폭 내(2.16~2.64 GHz)에서 약 ± 0.5 dB의 결합도 변화를

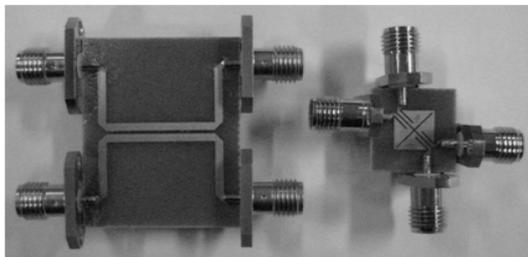


그림 9. 일반적인 결합 선로 결합기와 인공 전송 선로를 이용한 결합기

Fig. 9. Conventional coupled-line coupler and coupler using artificial transmission line.

표 1. 제작에 사용된 파라미터 값

Table 1. Parameter used in fabrication.

	L	Slot 1	Slot 2	W	S
길이(mm)	8.0	4.0	3.0	-	-
폭(mm)	-	0.2	0.2	0.5	0.19

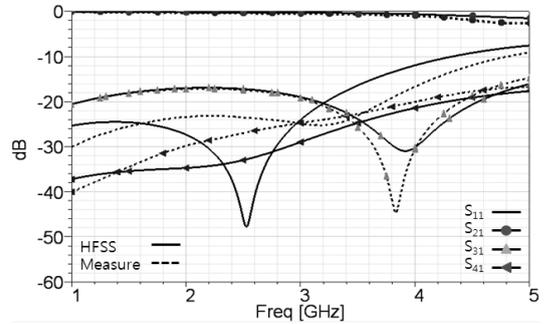


그림 10. 시뮬레이션 및 측정된 S -파라미터

Fig. 10. Simulated and measured S -parameters.

보였다. 이때, 일반적인 결합 선로 결합기의 경우 S_{31} 의 최소점 즉, 최소결합도 특성이 중심 주파수가 2배 되는 지점에서 나타나지만 제안된 결합기는 인공 전송 선로를 사용하여 결합기를 설계하였기 때문에, 중심 주파수의 2배 되는 지점보다 더 낮은 주파수에서 최소 결합도 특성을 나타낸다. 또한, 20% 대역폭 내에서 26 dB보다 큰 격리도 특성(S_{41})과 23 dB보다 큰 반사 손실(S_{11})이 나타났고, 시뮬레이션과 측정치는 그림과 같이 유사함을 보였다.

그림 11은 통과 포트와 결합 포트 간의 시뮬레이션 및 측정된 위상차 특성을 나타낸 그래프이다. 측정 결과, 중심 주파수 2.4 GHz 및 대역폭 내에서 약 $-93.56^\circ \pm 0.5^\circ$ 의 위상차 특성을 나타냈다.

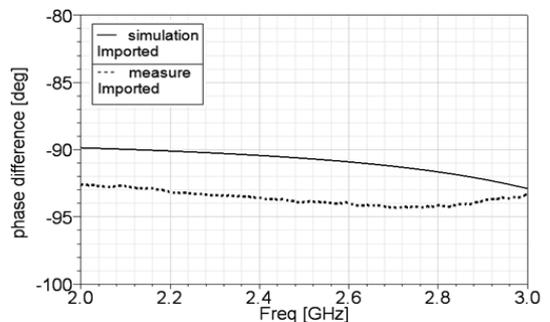


그림 11. 시뮬레이션 및 측정된 위상차

Fig. 11. Simulated and measured differences of phase.

III. 결 론

본 논문에서는 사각형 모양의 공간 활용성이 높은 콤팩트한 구조를 가진, 슬롯이 있는 삼각 패치형 인공 전송 선로를 이용한 결합기를 제안하였고, 임의로 15 dB의 결합도를 갖는 결합기를 시험 제작하였다.

제작된 결합기는 동일한 결합도를 갖는 일반적인 마이크로스트립 결합 선로 결합기에 비해 결합 길이가 약 50 % 줄어들고, 결합 면적은 약 25 % 감소하였다. 또한, 중심 주파수 2.4 GHz에서 17.3 dB의 결합도 특성과 27.5 dB의 격리도 특성을 나타냈고, 통과 포트와 결합 포트간에 -93.6° 의 위상차 특성을 보였다. 제안된 결합기는 삽입된 슬롯의 길이를 변화시킴으로써 결합기의 임피던스와 위상 조절에 용이하고, 또한, 10 dB보다 약한 결합도를 갖는 결합기의 소형화 설계에 큰 장점을 가지고 있다.

참 고 문 헌

[1] J. A. G Malherbe, *Microwave Transmission Line Filter*, Arttech House, pp. 9-10, 1979.
 [2] David M. Pozar, *Microwave Engineering 3rd*, John

Wiley & Sons, p. 337, 2005.

[3] Ching-Ian Shie, Jui-Ching Cheng, Sheng-Chun Chou, and Yi-Chyun Chiang, "Transdirectional coupled-line couplers implemented by periodical shunt capacitor", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 57, no. 12, pp. 2981-2988, Dec. 2009.
 [4] 이승엽, "덧개층이 있는 마이크로스트립 선로를 이용한 브랜치 선로 결합기 해석 및 설계", *한국전자과학회논문지*, 12(5), pp. 795-801, 2001년 8월.
 [5] Twyh-Ghuang Ma, Yu-Ting Cheng, "A miniaturized multilayered marchand balun using coupled artificial transmission lines", *IEEE. Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 446-448, Jul. 2009.
 [6] Kook Hyun Chang, Kyung Min Nam, and Jeong Phill Kim, "Design of various compact branch-line couplers by using artificial transmission lines", *IEEE MTT-S International*, pp. 1726-1729, 2006.
 [7] 오송이, 황희용, "슬롯을 가진 삼각 패치형 인공 전송 선로 결합기의 설계", *한국전자과학회 종합학술발표회*, 20(1), p. 122, 2010년.

오 송 이



2007년 3월~2011년 2월: 강원대학교 IT 대학 전기전자공학과 (공학사)
 2011년 3월~현재: 강원대학교 IT대학 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 수동 소자

황 희 용



1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 2001년 3월~2002년 4월: 메릴랜드 주립대 연구학자
 2002년 5월~2003년 4월: (주)아모텍 연구소장
 2003년 2월~현재: 강원대학교 IT대학 전기전자공학과 부교수
 2010년 3월~2011년 2월: 워싱턴주립대 방문교수
 [주 관심분야] RF, Microwave, Millimeter Wave 분야의 부품 및 시스템