

새로운 3-라인 발룬 설계

A Design of the New Three-Line Balun

이 병 화 · 박 동 석 · 박 상 수

Byoung-Hwa Lee · Dong-Seok Park · Sang-Soo Park

요 약

본 논문에서는 새로운 형태의 3-라인 발룬을 제안하였다. 먼저 3-라인 발룬의 등가회로를 제시하였고, 이 등가회로의 각 포트에서의 전압과 전류의 관계를 이용하여 임피던스 행렬, $[Z]$ 를 구하고 이를 $[S]$ 파라미터로 변환하여 제시하였다. $[S]$ 파라미터를 이용하여, 제시한 등가회로가 발룬으로 동작할 수 있도록 하는 설계식을 도출하였다. 본 논문에서 제안한 등가회로와 설계식의 타당성 및 유용성을 검증하고자 2.4 GHz ISM 대역에서 동작하는 MLC(Multi-layer Ceramic) 칩 발룬을 설계하였고, LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 기술을 이용하여 제작하였다. 새로운 3-라인 발룬의 등가회로와 LTCC 기술을 이용한 다층구조를 동시에 적용함으로써 2012 사이즈의 초소형 발룬을 구현할 수 있었다. 제작된 발룬의 측정 결과는 3차원 전자장 시뮬레이션 결과와 매우 유사하였고, 넓은 대역에서 매우 우수한 위상 및 진폭 평형 특성을 보였다. 본 논문에서 제안한 3 라인 발룬은 본 논문에서 보인 것처럼 LTCC 기술을 이용하여 매우 쉽게 구현이 가능할 뿐만 아니라 인쇄회로기판상의 마이크로 스트립라인 등을 이용하여도 구현이 가능하며 작은 사이즈의 우수한 특성을 가진 발룬이 요구되는 무선랜이나 블루투스 등의 무선 통신 시스템 등에 매우 유용하게 적용될 수 있다.

Abstract

This paper proposes a new three-line balun. The equivalent circuit of the proposed three-line balun is presented, and impedance matrix $[Z]$ of the equivalent circuit is derived from the relationship between the current and voltage at each port. The design equation for a given set of balun impedance at input and output ports is presented using $[S]$ parameters, which is transferred from impedance matrix, $[Z]$. To demonstrate the feasibility and validity of design equation, multi-layer ceramic(MLC) chip balun operated in the 2.4 GHz ISM band frequency is designed and fabricated by the use of the low temperature co-fired ceramic(LTCC) technology. By employing both the proposed new three-line balun equivalent circuit and multi-layer configuration provided by LTCC technology, the 2012 size MLC balun is realized. Measured results of the multi-layer LTCC three-line balun match well with the full-wave electromagnetic simulation results, and measured in band-phase and amplitude balances over a wide bandwidth are excellent. This proposed balun is very easily applicable to multi-layer structure using LTCC as shown in the paper, and also can be realized with microstrip lines on PCB. This distinctive performance is very favorable for wireless communication systems such as wireless LAN(Local Area Network) and Bluetooth applications.

Key words : LTCC, Multi-Layer, Three-Line Balun, Wireless LAN, Bluetooth

I. 서 론

최근의 무선랜이나 블루투스 등의 무선 통신 시스템에서는 평형 신호를 불평형 신호로 또는 불평

삼성전기 중앙연구소 CAE팀(CAE Team, R&D Center, Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.)

· 논문 번호 : 20030409-057

· 수정완료일자 : 2003년 6월 10일

형 신호를 평형 신호로 변환하는 발룬이 널리 사용되고 있다. 발룬을 필요로 하는 무선 통신 시스템은 일반적으로 double-balanced mixer^[1]나 push-pull amplifier^[2] 등을 포함하고 있으며, 발룬은 이러한 부품들과 불평형신호를 입출력으로 하는 부품을 연결하는 경우에 사용된다.

무선통신 시스템에서 요구하는 발룬은 사이즈가 작으면서도 넓은 대역에서 우수한 위상 및 진폭 평형 특성을 가져야 한다. 이러한 요구를 만족하기 위하여 현재까지 다양한 형태의 발룬이 연구되어 왔다^{[3]~[10]}. 그 중에서도 가장 간단한 형태의 발룬은 $\lambda/4$ (λ =동작 중심주파수에서의 파장) 길이의 전송선과 $3\lambda/4$ 길이의 전송선을 이용한 발룬^[3]일 것이다. 그러나 이러한 형태의 발룬은 대역폭이 매우 좁다는 단점을 가지고 있다. 따라서 구조는 좀 복잡하지만 넓은 동작 주파수를 갖고 또 우수한 위상 및 진폭 평형 특성을 갖는 평면구조(planar)의 Marchand 발룬이 널리 사용되고 있다. 평면구조(planar)의 Marchand 발룬은 2개의 결합부(Coupled Section)로 이루어져 있고 각 결합부는 2개의 $\lambda/4$ 길이의 전송선으로 구성된다. 이 결합부는 마이크로스트립 결합선로^[4], Lange 커플러^[5] 또는 나선형 형태의 결합선로^{[6],[7]}로 구현되어질 수 있다. 최근에는 LC 공진 방법을 이용하거나^[8], 계단 임피던스 방법을 이용하여^[9] Marchand 발룬을 소형화하기 위한 노력이 이루어졌다. 위에서 언급한대로 다양한 형태의 Marchand 발룬과 또 이를 소형화 하기 위한 방법들이 있으나 결국 이들 모두 총 4개의 $\lambda/4$ 의 전기적 길이를 갖는 전송선으로 구성되므로 Tsai가 제안한 3개의 $\lambda/4$ 전기적 길이를 갖는 전송선으로 구성된 3-라인 발룬에^{[10],[11]} 비해 소형화에 불리하다. 그러나 이 3-라인 발룬 역시 그림 1에 도시한 바와 같이 불평형 포트로부터 $\lambda/4$ 길이의 접지된 전송선을 두 부분으로 분리하여 대칭인 2개의 결합부(Coupled Section) A와 B로 구현한 형태의 발룬이므로 완전한 형태의 3-라인 발룬이라 말하기 어렵고 결합부 A와 B를 항상 대칭으로 유지해야 하기 때문에 3개의 $\lambda/4$ 길이의 전송선으로 구성되었다 할지라도 소형화를 위해 나선형 형태나 Meander 형태의 전송선으로 구현하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 Tsai가 제안한 발룬과 달리, 3개의

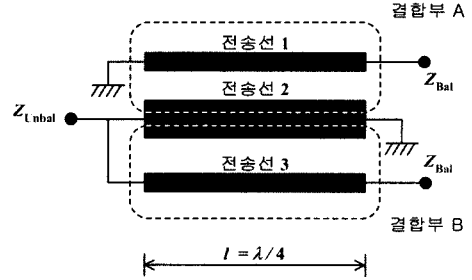


그림 1. Tsai가 제안한 3-라인 발룬의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of the 3-line balun by Tsai.

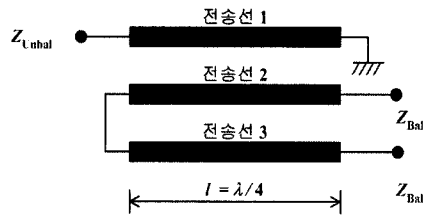


그림 2. 제안한 3-라인 발룬의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the proposed balun.

$\lambda/4$ 전송선이 상호 결합된 형태의 새로운 발룬을 제안하였다. 새로운 3-라인 발룬의 등가회로를 제시하였고 각 포트에서 정의된 전압과 전류의 관계식을 이용하여 임피던스 행렬, $[Z]$ 를 도출한 다음 이 $[Z]$ 를 $[S]$ 파라미터로 변환하여 제시하였다. 그리고 제안한 발룬의 $[S]$ 파라미터에 이상적인 발룬이 가져야 할 조건을 적용하여 발룬의 설계식을 도출할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 발룬의 등가회로와 설계식의 타당성 및 유용성을 검증하고자 2.4 GHz ISM 대역에서 동작하는 MLC 칩 발룬을 설계하였고 LTCC 기술을 이용하여 제작하였다. 새로운 형태의 3-라인 발룬 등가회로와 다층 구조를 동시에 적용함으로써 2012 사이즈의 초소형 발룬의 구현이 가능하였고, 제작된 발룬의 측정치는 3차원 전자장 시뮬레이션 결과와 매우 유사했으며 넓은 통과 대역에서 매우 우수한 위상 및 진폭 평형 특성을 얻을 수 있었다.

II. 해석 및 설계

위의 그림 2에 본 논문에서 제안한 3개의 $\lambda/4$ 길이의 전송선으로 이루어진 발룬의 등가회로를 나타

내었다. 불평형 포트 1에 소정 주파수의 불평형 신호를 인가하면, 각 전송선간의 전자기적인 결합에 의해 평형포트 2와 3으로 서로 크기가 같고 180°의 위상차를 가지는 신호가 각각 출력되게 된다. 역으로, 서로 크기가 같고 180°의 위상차를 갖는 신호를 각각 평형포트 2와 3으로 입력하면, 불평형 포트를 통해 불평형 신호가 출력된다. 위와 같이 구성된 발룬의 [S] 파라미터를 얻기 위하여는 먼저 각 포트에서의 전압과 전류를 정의하고 이들의 상호관계를 이용하여 임피던스 행렬, [Z]를 먼저 도출할 필요가 있다. 포트 1, 포트 2, 포트 3에서의 전압과 전류를 각기 V_1, V_2, V_3 와 I_1, I_2, I_3 이라 정의하고 [Z]를 이용하여 전압과 전류의 관계를 표현하면 아래의 식 (1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = [Z] \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 Z_{12} 와 Z_{13} 을 캐패시턴스 행렬^[12]을 이용하여 나타내면 아래의 식 (2), (3)과 같다.

$$Z_{12} = \frac{-j(C_{23} + C_{33})}{\nu C_{12}(C_{23} + C_{33}) - \nu C_{13}(C_{22} + C_{23})} \quad (2)$$

$$Z_{13} = \frac{j(C_{22} + C_{23})}{\nu C_{12}(C_{23} + C_{33}) - \nu C_{13}(C_{22} + C_{23})} \quad (3)$$

여기서 ν 는 전파속도(wave propagation velocity)를 나타낸다. 위 [Z]를 [S] 파라미터로 변환하여 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} & S'_{13} \\ S'_{21} & S'_{22} & S'_{23} \\ S'_{31} & S'_{32} & S'_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 [S] 파라미터 값은 다음과 같이 표시된다.

$$S'_{11} = -Z_{Unbal}Z_{Bal} - Z_{12}^2 - Z_{13}^2 \quad (5)$$

$$S'_{22} = -Z_{Unbal}Z_{Bal} - Z_{12}^2 + Z_{13}^2 \quad (6)$$

$$S'_{33} = -Z_{Unbal}Z_{Bal} + Z_{12}^2 - Z_{13}^2 \quad (7)$$

$$S'_{12} = S'_{21} = 2\sqrt{Z_{Unbal}Z_{Bal}}Z_{12} \quad (8)$$

$$S'_{13} = S'_{31} = 2\sqrt{Z_{Unbal}Z_{Bal}}Z_{13} \quad (9)$$

$$S'_{23} = S'_{32} = -2\sqrt{Z_{Unbal}Z_{Bal}}Z_{12}Z_{13} \quad (10)$$

$$D = Z_{Unbal}Z_{Bal} - Z_{12}^2 - Z_{13}^2 \quad (11)$$

위 식에서 Z_{Unbal} 과 Z_{Bal} 는 각각 불평형포트 임피던스와 평형포트 임피던스를 나타낸다. 이상적인 발룬의 [S] 파라미터는, $S_{11}=0$ 과 $S_{21}+S_{31}=0$ 을 동시에 만족해야 하므로, 위의 식 (5), (8), (9) 그리고 (11)로부터 다음과 같은 식 (12)와 (13)을 도출할 수 있다.

$$C_{22} = C_{33} \quad (12)$$

$$C_{13} - C_{12} = \pm \sqrt{\frac{2}{Z_{Unbal}Z_{Bal}}} \quad (13)$$

위의 식 (12)와 (13)을 동시에 만족하는 설계식을 캐피시턴스 행렬값과 특성임피던스의 관계식^[12]을 이용하여 나타내면 아래의 식 (14)와 같다.

$$\frac{1}{Z_{o,13}} - \frac{1}{Z_{o,12}} = \frac{1}{Z_{o,22}} - \frac{1}{Z_{o,33}} = \pm \sqrt{\frac{2}{Z_{Unbal}Z_{Bal}}} \quad (14)$$

여기서 $Z_{o,13}, Z_{o,12}$ 는 각기 전송선 1과 3의 커플링, 그리고 전송선 1과 2의 커플링을 나타내는 특성 임피던스이고, $Z_{o,22}, Z_{o,33}$ 는 각기 전송선 2와 3의 특성 임피던스이다. 주어진 불평형포트 임피던스, Z_{Unbal} 와 평형포트 임피던스, Z_{Bal} 에 대해 식 (14)를 만족하는 $Z_{o,13}$ 과 $Z_{o,12}$, 그리고 $Z_{o,22}$ 과 $Z_{o,33}$ 의 조합은 다양하다. 등가회로 시뮬레이션을 통하여, 이 해의 조합에 따라 발룬의 대역폭은 달라지게 됨을 알 수 있었고, 발룬 설계식 (14)의 변수로 포함되지는 않지만 $Z_{o,11}$ 과 $Z_{o,23}$ 또한 발룬의 대역폭을 결정하는 중요한 변수임을 알 수 있었다.

III. 설계 예

상기 식 (14)의 유용성과 타당성을 증명하기 위하여 2.4 GHz ISM 대역에서 동작하는 발룬을 설계 및 제작하였다. 본 절에 구현한 발룬은 그림 2의 일반적인 3-라인 발룬의 특별한 경우로서, 그림 3에 도시한 등가회로와 같이 전송선 1과 전송선 3사이에 Ground 층을 삽입하였다. 이는 본 논문에서 제안한 발룬이 이 경우에 가장 넓은 대역폭을 가지며 또한 한 전송선을 다른 전송선들과 고립(Isolation)시킴으로써 비교적 설계가 용이해지는 장점이 있기 때문이다. 따라서 그림 3의 등가회로에서는 전송선 1과

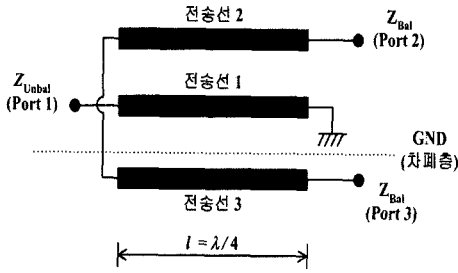


그림 3. 설계 및 제작된 3-라인 발룬의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of the designed and fabricated balun.

전송선 3과의 전자기적 결합을 무시할 수 있으므로 식 (14)의 설계식은 아래의 식 (15)와 같이 변환된다.

$$-\frac{1}{Z_{o,12}} = \frac{1}{Z_{o,22}} - \frac{1}{Z_{o,33}} = -\sqrt{\frac{2}{Z_{Unbal}Z_{Bal}}} \quad (15)$$

본 논문에서 식 (15)를 이용하여 발룬을 설계한 방법은 다음과 같다. 첫째로, 불평형포트 임피던스와 평형포트 임피던스를 각각 50 Ω : 50 Ω으로 가정하였다. 둘째로, 구현 가능한 특성 임피던스 범위

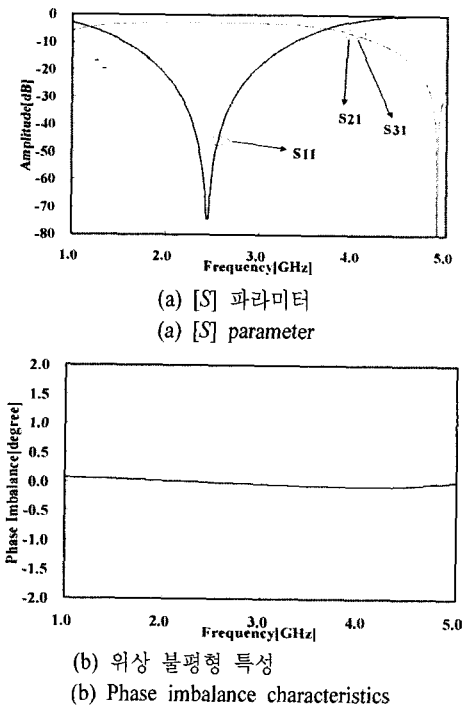


그림 4. 설계된 발룬의 회로 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Circuit simulation results of the designed balun.

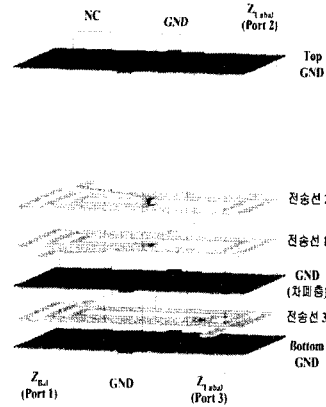


그림 5. 제안한 발룬의 다층구조
Fig. 5. Multi-layer Structure of the proposed balun.

내에서 식 (15)를 만족하는 설계 값을 계산하였다. Z_{Bal} 과 Z_{Unbal} 이 각각 50 Ω이므로 $Z_{o,12}$ 는 35.4 Ω이 되고, $Z_{o,22}$, $Z_{o,33}$, $Z_{o,11}$ 를 각각 200 Ω, 30 Ω, 55 Ω으로 선정하였다. 이들 설계값을 이용하여 회로 시뮬레이션(Serenade Ver. 8.5) 한 결과를 그림 4에 나타내었다. 예상대로 등가회로를 이용하여 계산된 발룬의 [S] 파라미터는 이상적인 발룬의 특성을 보이고 있다. 그림 4(a)에 도시된 바와 같이 S_{21} 과 S_{31} 의 크기는 정확히 일치하고 있으며, 그림 4(b)에서 나타난 바와 같이 위상 불평형 특성 $[180^\circ - \angle S_{21} - \angle S_{31}]$ 은 0° 를 나타내고 있다. 셋째로, 3차원 전자장 시뮬레이션(HFSS Ver. 7.0)을 통하여 각 전송선의 형상(전송선의 폭, 간격, 길이)을 결정하였다. 각 전송선의 형상 결정 방법은 각 전송선의 회로 시뮬레이션 결과와 나선형의 형상으로 이루어진 전송선의 전자장 시뮬레이션 결과가 2.4 GHz ISM 밴드에서 가장 일치하는 전송선의 형상을 채택하였다. 채택된 전송선의 폭과 간격은 각각 80 μm이고 전기적인 길이는 2.45 GHz에서 90° 가 되도록 설계하였다. 마지막으로, 역시 3차원 전자장 시뮬레이션을 이용하여 전송선 간의 간격조절, 즉 커플링을 조절함으로써 발룬의 특성을 얻을 수 있었다.

그림 5에 위와 같은 방법으로 설계된 발룬의 다층 구조를 도시하였다. 소형화를 위해 각 전송선은 나선형의 형상으로 설계하였고 위에서 언급한 것처럼 전송선 3을 전송선 1과 2로부터 고립(isolation)시키기 위하여 전송선 1과 3사이에 Ground 패턴을

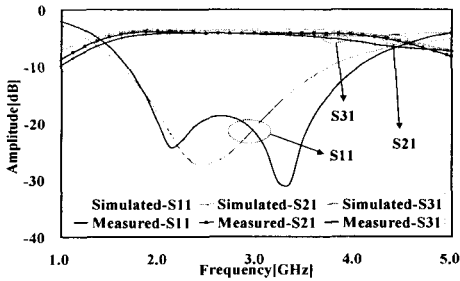
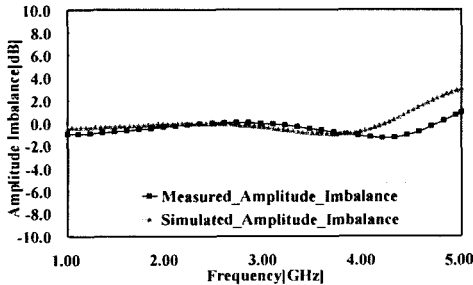
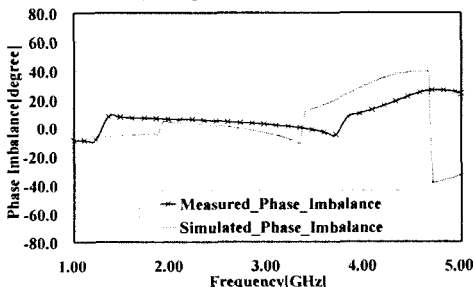


그림 6. 제안한 3-라인 발룬의 [S] 파라미터
Fig. 6. [S] parameter of the proposed balun.



(a) 진폭 불평형 특성
(a) Amplitude Imbalance



(b) 위상 불평형 특성
(b) Phase Imbalance

그림 7. 제안한 3-라인 발룬의 위상 및 진폭 불평형 특성
Fig. 7. Phase and amplitude imbalances of the proposed balun.

삽입하였다. 사용된 LTCC의 유전율과 Loss Tangent 값은 각각 5.6과 0.003이고 내부 전극은 은을 사용하였다. 칩의 크기는 2.0 mm × 1.2 mm로 칩의 두께는 0.95 mm로 각각 설계되었다.

그림 6과 7에 위의 그림 5의 3차원 구조를 이용하여 3차원 전자장 시뮬레이션한 결과와 제작된 칩의 측정 결과를 비교하여 도시하였다. 시뮬레이션 결과와 측정된 결과는 전반적으로 매우 유사함을

보이고 있으나, 부분적으로 두 결과는 차이를 보이고 있다. 이는 설계된 내부 전극 패턴의 치수와 실제 제작된 칩의 내부 전극 패턴의 치수 차이, 또는 설계된 각 층의 두께와 실제 제작된 각 층의 두께의 차이로 추정된다. 특히 측정된 S₁₁ 특성 그래프로부터 전송선 1과 2사이의 유전체 층 두께 또는 전송선 3과 GND간의 유전체 층 두께가 설계치에 비해 얇게 제작되었음을 추정할 수 있다. 그림 6과 7의 측정 결과로부터, S₁₁ 대역폭(20log|S₁₁| < -10 dB)은 2380 MHz였고, 2.4 GHz ISM 대역에서 삽입손실은 0.8 dB로 매우 우수하였으며, S₂₁과 S₃₁의 진폭의 차(20log|S₂₁| - 20log|S₃₁|)는 0.1 dB 이하로 매우 우수한 진폭 평형특성을 보였다. 또한 S₂₁과 S₃₁의 위상차 [180° - |∠S₂₁ - ∠S₃₁|] 역시 5° 이내로 매우 우수한 특성을 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 새로운 형태의 3-라인 발룬을 제안하였고 제안한 발룬의 등가회로 및 설계식을 제시 하였다. 이를 검증하고자 다층 구조의 2012사이즈의 칩 발룬을 설계하고 LTCC를 이용하여 제작 하였다. 제작된 발룬의 측정 결과 광대역에서 매우 우수한 위상 및 진폭 평형 특성을 갖는 발룬을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안한 3 라인 발룬은 본 논문에서 보인 것처럼 LTCC 기술을 이용하여 쉽게 구현이 가능할 뿐만 아니라 인쇄회로기판상의 마이크로 스트립라인 등을 이용하여도 구현이 가능하며 작은 사이즈의 우수한 특성을 가진 발룬이 요구되는 무선랜이나 블루투스 등의 무선 통신 시스템 등에 매우 유용하게 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] H. K. Chiou, C. Y. Chang and H. H. Lin, "A uniplanar broadband double-balanced mixer using a novel balun design", *Proc. Int. Symp. Commun.*, pp. 1221-1228, Dec. 1995.
[2] P. C. Hsu, C. Nguyen and M. Kintis, "Uniplanar broad-band push-pull FET amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, pp. 2150-2152, Dec. 1997.

- [3] Dae-won Lew, Jun-Seok Park, Dal Ahn, Nam-Kee Kang, Chan Sei Yoo and Jae-Bong Lim, "A Design of the Ceramic Chip Balun Using the Multilayer Configuration", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 1, pp. 220-224, Jan. 2001.
- [4] A. M. Pavio, A. Kikel, "A monolithic or hybrid broadband compensated balun", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 483-486, 1990.
- [5] C. M. Tsai, "A new compact wide-band balun", *IEEE Microwave Millimeter Wave Monolithic Circuits Symp. Dig.*, pp. 123-125, 1993.
- [6] T. Chen, K. W. Chang, S. B. Bui, H. Wang, G. Samuel, L. C. T. Lui, T. S. Lin and W. S. Titus, "Broadband monolithic passive baluns and monolithic double-balanced mixer", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, pp. 1980-1986, Dec. 1991.
- [7] T. Gokdemir, S. B. Economides, A. Khalid, A. A. Rezazadeh and I. D. Robertson, "Design and performance of GaAs MMIC CPW baluns using over-laid and spiral couplers", *IEEE MTT-S Microwave Symp. Dig.*, pp. 401-404, 1997.
- [8] C. W. Tang, C. Y. Chang, "LTCC-MLC chip-type balun realized by LC resonance method", *Electronics Letters*, vol. 38, pp. 519-520, May 2002.
- [9] Ching-Wen Tang, Jyh-Wen Sheen and Chi-Yang Chang, "Chip-Type LTCC-MLC Baluns Using the Stepped Impedance Method", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, pp. 2342-2349, Dec. 2001.
- [10] C. M. Tsai, K. C. Gupta, "CAD procedures for planar re-entrant type couplers and three-line baluns", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1013-1016, 1993.
- [11] Choonsik Cho, K. C. Gupta, "A New Design Procedure for Single-Layer and Two-Layer Three-Line Baluns", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, pp. 2514-2519, Dec. 1998.
- [12] D. W. Kammler, "Calculation of Characteristic Admittances and Coupling Coefficients for Strip Transmission Lines", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 16, pp. 925-937, Nov. 1968.

이 병 화



1993년 2월: 인하대학교 자동화공학과 (공학사)
 1997년 2월: 임페리얼 공대 기계공학과 (공학박사)
 1997년 1월~현재: 삼성전기 중앙연구소 CAE팀 선임연구원
 [주 관심분야] 전자장 수치해석, 마이크로파 및 밀리미터파 수동소자 해석 및 설계

박 상 수



1998년 2월: 수원대학교 전기공학과 (공학사)
 2000년 2월: 중앙대학교 전기공학과 (공학석사)
 2000년 2월~현재: 삼성전기 중앙연구소 CAE팀 전임연구원
 [주 관심분야] 전자장 수치해석, 마이크로파 및 밀리미터파 수동소자 해석 및 설계

박 동 석



1993년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 8월~현재: 삼성전기 중앙연구소 CAE팀 전임연구원
 [주 관심분야] 전자장 수치해석, 마이크로파 및 밀리미터파 수동소자 해석 및 설계