

새로운 발룬 회로를 이용한 2 GHz 대역 이중 평형 Star 혼합기의 설계 및 제작

김선숙^{*}
충남대학교 전파공학과
sskim@active.cnu.ac.kr

Design and Fabrication of 2 GHz Double Balanced Star Mixer Using a Novel Balun

Kim, Sun-Sook
Department of Radio Science and Engineering , Chungnam
National University, Dae-jeon, Korea

Abstract

In this paper, a DBM(double balanced mixer) of 2 GHz is implemented on FR4($h = 1.6 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 4.6$) substrate. The structure of double balanced

mixer requires, in general, two baluns and a quad diode. For balun, a novel planar balun using microstrip to CPS(Coplanar Strip) is suggested and designed. The suggested balun shows the phase imbalance of $180^\circ \pm 1.5^\circ$ and the amplitude imbalance of $\pm 0.2 \text{ dB}$ for 1.5 to 2.5 GHz. Using the balun, DBM is succesfully implemented, and the measured conversion loss of up/down converter show about 6 dB over the bandwidth.

The balun may be applicable for MMIC(Monolithic Microwave Ingtegrated Circuit) DBM with the process supporting backside via thourgh more study.

Key words : Star 혼합기, 이중 평형 혼합기, Marchand 발룬

I. 서론

이중 평형 혼합기는 최소 4개의 정합된 비선형 소자와 2개의 발룬 회로로 구성된다. 4개의 비선형 소자를 구동시키기 위해, 일반적으로 단일 종단(single ended mixer) 또는 단일 평형 혼합기(single balanced mixer) 보다 더 높은 LO 전력을 요구하며 변환 손실 또한 높다. 그러나, 혼합기의 포트(LO, IF, RF)간의 자연스러운 격리도와 탁월한 고조파(spurious) 신호 제거 특성, 상·하향 주파수 변환기로 사용 가능, IMD3가 높음으로 인해 가장 많이 채택되는 구조이다.

평형 신호를 인가하는 발룬으로는 기존의 낮은 RF 주파수에서는 ferrite 소재에 3선을 병렬로 권선하여 얻어지

는 트랜스포머가 사용됐었지만, 혼합기의 동작 주파수가 높아짐에 따라 이러한 트랜스포머 발룬은 더 이상 사용할 수가 없게 된다.

이보다 높은 주파수에서는 고주파 특성이 우수한 평판형의 2D parallel plate line 발룬을 이용한 링 혼합기가 널리 사용되었다. 그러나, parallel plate line 발룬의 경우, even 모드 특성 임피던스가 odd 모드 임피던스보다 10배 이상이 되어야 하기 때문에^[2] suspended 구조로 구성하여야 하는 단점이 있다. 또한 링 혼합기에 적용할 경우, IF 출력단의 blocking 캐패시터와 DC bypass 인덕터 사용은 IF 통과 대역 내에서 공진을 일으켜 IF의 동작 주파수 대역을 제한하는 단점^[2]이 있다. 이러한 점에서 광대역 특성을 갖는 star 혼합기가 개발되기 시작하였다. Star 혼합기의 경우 4개의 다이오드 연결점이 자연스러운 IF 출력점이 되며 별도의 DC block이나 DC bypass 인덕터를 요하지 않게 된다.

Pavio^[1]는 이러한 트랜스포머를 대신하고, 포선이 필요 없는 3D 구조에서 broadside coupling을 갖는 이중(dual) Marchand 발룬을 이용한 star 혼합기를 구현한 바 있는데, 이는 여전히 후면 공정을 포함하며, 공정이 까다로우며, packaging시 이 부분을 suspended 구조로 구성하여야 하는 단점이 있다. 이는 보통 RF에서 사용하는 2D 평판 구조와는 거리가 있고 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)의 구현에는 상당한 거리가 있다.

이러한 Pavio^[1]의 구조를 Maas^[2]는 비아가 없는 GaAs substrate상에서 Pavio의 밑판의 이중 발룬을 위로 edge coupling시킨 CPW(Coplanar Waveguide) Marchand 발룬 형태와 HBT 쇼트키 다이오드를 이용 2D 평판 MMIC star 혼합기를 구현하였다. 이러한 구조는 보통 선호하는 비아 공정에 적당하지 않으며, 다른 부품과 집적시에는 문제를 야기 시키게 된다. 따라서 Ryu^[5]는 CPW를 기반으로 한 Maas의 star 혼합기를 비아 공정이 있는 마이크로스트립 환경으로 수정하였다. 이러한 dual 발룬을 사용한 두 혼합기는 layout시 전형적인 star 혼합기에서와 같이 다이오드의 공통 단자에서 IF 출력을 얻는 대신에, 얇은 스트립 라인으로 다이오드들을 링으로 감싼 후 한쪽 끝에서 IF 출력을 얻을 수밖에 없다. 이는 회로의 대칭성을 감소시키며, 얇은 스트립 링으로 인한 인덕턴스 성분은 IF 동작 주파수 대역을 제한하는 단점이 있다.

반면, Chang^[3]은 dual 발룬 대신에 평판형의 Mouw의 hybrid junction^[4]을 이용하여, Al₂O₃ substrate상에서 광대역의 star 혼합기(2 - 36 GHz)를 구현하였다. 이 구조는 쿼드 다이오드들의 중심 공통 단자에서 출력을 얻을 수 있어 우수한 대칭성을 보일 것이며, 발룬회로와 다이오드와의 결선이 용이하고, 이로 인한 기생성분 또한 작을 것으로 예상된다. 그러나, hybrid 발룬을 이용한 혼합기가 동작 특성이 우수하다 할지라도, substrate가 가능한 두꺼워야 하며 비아 공정이 없어야 하므로 현재의 마이크로스트립 환경에는 부적합한 바 있다.

따라서, 본 논문에서는 Chang의 혼합기에 적용한 Mouw junction 발룬을 substrate 두께가 얇으면서, 비아 공정을 포함하는 마이크로스트립 환경으로 수정하여 새로운 발룬 구조를 제안하였다. Chang의 Mouw junction은 직접 마이크로스트립 환경으로 적용할 경우 microstrip대 CPS(Coplanar Strip) mode converter의 부재로, CPS를 이용한 발룬이 even mode 억제능력을 상실하게 되어 문제를 발생시키게 된다. 따라서 CPS 발룬 대신에 CPS를 이용한 Marchand 발룬을 사용함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있었다.

이렇게 새로이 제안된 발룬 회로를 HSMS-286R의 star 쿼드 다이오드와 조합하여 2 GHz 대역에서 이중 평형 star 혼합기를 구현하였다.

현재 대부분의 회로가 비아 공정이 있는 마이크로스트립 환경에서 구축되므로, 이러한 발룬 구조를 사용하여 제작된 혼합기는 밀리미터파 대역의 다른 비아 공정이 있는 마이크로 스트립 기반 MMIC 소자들과 호환에 유용할 것이다.

II. 발룬회로의 설계 및 제작, 측정

Chang의 Mouw의 hybrid junction^[4]을 이용한 star 혼합기^[3]의 발룬 구조를 그림 1에 보였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, IF는 와이어 본딩으로 A의 중앙과 평형(balanced) CPW와 연결되고, 출력단 가까이에서 불평형(unbalanced) CPW 형태로 출력을 얻었다. Star 혼합기에서 다이오드 쿼드 A로의 RF와 LO에 평형 신호를 만들기 위해 C부와 같은 CPS를 사용하였는데, CPS에 평형 신호를 불평형 CPW로 인가하기 위해, B와 같이 테이퍼를

갖는 transition 패턴을 이용했다.

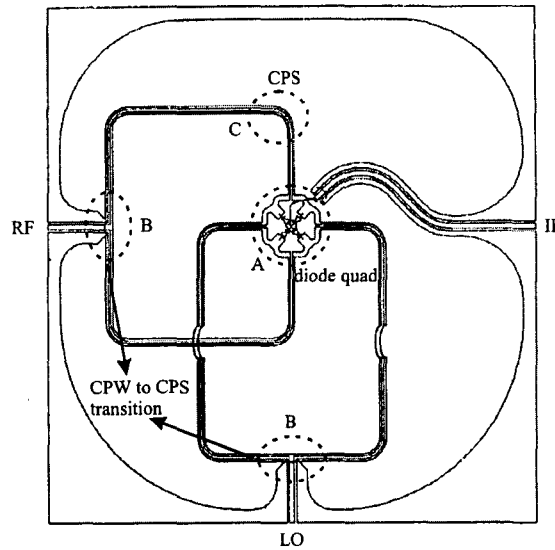


그림 1. Mouw의 hybrid junction을 이용한 star 혼합기
Fig. 1. Star mixer using Mouw's hybrid junction

이러한 불평형 CPW와 CPS를 이용한 Mouw junction 발룬 패턴을 마이크로스트립 환경으로 수정하여 새로운 발룬 회로를 제안하였으며, 그림 2와 같다. 0.25λ CPS 형태의 coupled line으로 마이크로스트립 환경에서 구현할 수 있다 할지라도, 출력 포트가 floating되어 있을 경우, even mode 전압이 출력 포트에서 동위상의 무한 전압이 걸리며, 각각의 grounded 부하를 갖는다 할지라도, 임의의 임피던스에 비해 coupled line의 even mode 임피던스가 출력의 임피던스보다 훨씬 커야 even mode 전압이 억압되므로 구현하기 어려운 단점이 있다. 따라서, 그림 1의 CPS 패턴을 그림 2의 B와 같이 Marchand 발룬 형태로 대체하였다. 그림 2의 Marchand 발룬의 각 부분별 길이는 0.25λ 이다^[6]. 여기에 그림 2의 A 지점에 불평형 마이크로스트립 mode가 인가되면, coupled 마이크로스트립으로 동작하는 불평형 even mode와 CPS의 평형 odd mode가 있게 되는데, Marchand 발룬에서는 even mode를 억압시켜, 평형 출력 port 2와 3에서 CPS mode가 나오게 된다. 즉, Marchand 발룬에서 불평형 even mode는 open stub의 끝에서, 전류가 0 A가 되며, 전압이 무한대가 된다. Open stub로부터 0.25λ 에서의 even mode 전압은 임피던스가 short로 되어 0 V가 된다. 따라서, 출력을 위한 port 2 - 5에서의 even mode 전압은 0 V가 되어 출력으로 나오지 않게 되며, 그림 1의 B와 같은 테이퍼를 갖는 transition이 필요없게 된다.

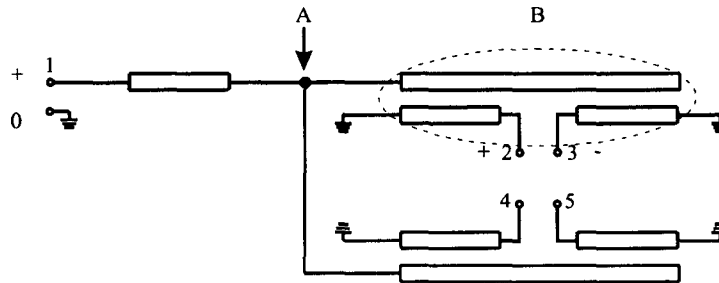


그림 2. Microstrip과 CPS를 이용한 새로운 발룬회로
Fig. 2. A novel balun using microstrip to CPS

그림 3은 그림 2의 Marchand 발룬이 되는 각 부분을 일직선이 되도록 하여 제작한 사진이다. Port 1에 불평형 신호를 인가했을 경우, 평형 신호가 port 2와 3에 나타나게 되며, 동일한 신호가 port 4와 5에 나타난다. 이 때, Z_{oe} 는 133Ω , Z_{oo} 는 39.8Ω 이다. Z_{oe}/Z_{oo} 의 비율이 약 3.3으로 Marchand 발룬에서 추천하는 3.0 - 5.0 이상을 만족하지만, 3.3은 구현 가능한 패턴을 얻기 위한 임피던스에서 얻어진 최대의 비율이므로 광대역의 발룬 특성을 얻기는 어려울 것이다.

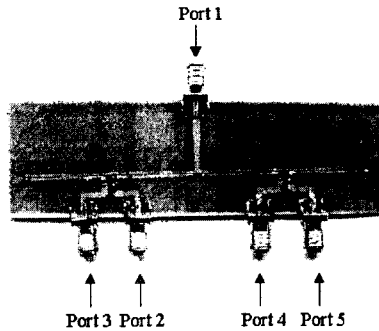


그림 3. 제작된 발룬 회로
Fig. 3. Manufactured balun circuit

그림 4는 그림 2의 발룬 회로에 대한 모멘텀 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하였다. 평형 포트간의 불평형 정도에 대한 결과로, 위상의 불평형 정도는 평형 포트간의 위상이 180° 에서 어느 정도 벗어나는지에 대한 결과이고, 진폭의 불평형 정도는 평형 포트간의 진폭이 어느 정도 벗어나는지에 대한 결과이다. 측정 결과, 입력 주파수 1.5 GHz에서 2.5 GHz 대역에서의 진폭의 불평형 정도는 ± 0.2 dB 이내로 시뮬레이션과 측정결과 값이 유사한 특성을 보였다. 하지만, 위상의 불평형 정도가 대략 $180^\circ \pm 1.5^\circ$ 이내로, 주파수 대역 내에서 측정치가 튀는 것을 볼 수 있는데, 이는 VNA(Vector Network Analyzer) HP8510C로 위상 측정 시의 오차로 보여진다.

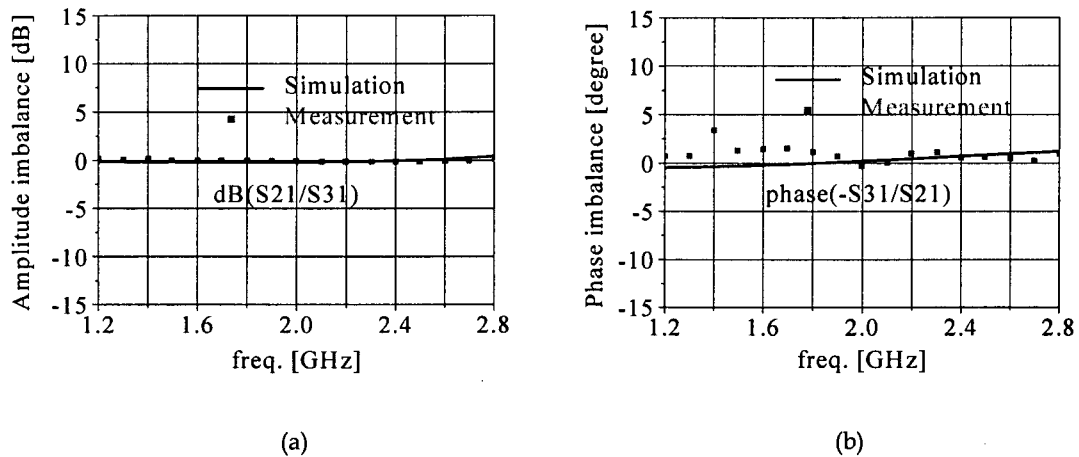


그림 4. 시뮬레이션 및 측정 결과
(a) 진폭 불평형 정도 (b) 위상 불평형 정도
Fig. 4. Results of simulation and measurement
(a) Amplitude imbalance (b) Phase imbalance

III. 이중 평형 star 혼합기 제작 및 측정

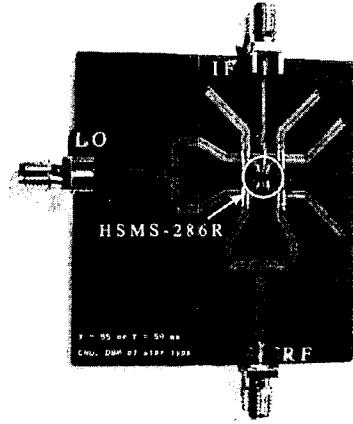


그림 5. 제작된 이중 평형 star 혼합기의 사진
 Fig. 5. The photograph of the manufactured double balanced star mixer

그림 5는 발룬 회로와 쿼드 다이오드 HSMS-286R를 조합하여 이중평형 star 혼합기를 제작한 사진이다. PCB 크기는 가로가 55 mm이며, 세로가 59 mm 이다. 발룬은 쿼드 다이오드와의 직접 연결을 위해, 라인에 bending을 주어 조정하였으며, 신호선의 처음과 끝에 비아 시작점이 같도록 약간의 패턴을 추가하여 비아를 형성하였다. 또한, Marchand 발룬 간의 불필요한 커플링을 최대한 줄이기 위해 라인을 각각 45° 각도를 주었다. LO은 왼쪽에서 RF는 아래쪽에서 IF는 위쪽에서 마이크로스트립 라인과 연결되어 있다. RF와 LO의 평형 신호 인가를 위해 2개의 발룬을 사용하였다. 중앙에 쿼드 다이오드(HSMS-286R)가 연결되어 있으며, 대칭성을 고려하여 쿼드의 중앙에서 IF 출력을 얻고자 하였다. 4개의 다이오드를 구동시키기 위해, 높은 LO 전력이 요구되므로 IF에서 강한 LO 신호의 커플링 영향을 최대한 줄이기고자 IF와 LO 단자간에 90° 가 되도록 배치하였다.

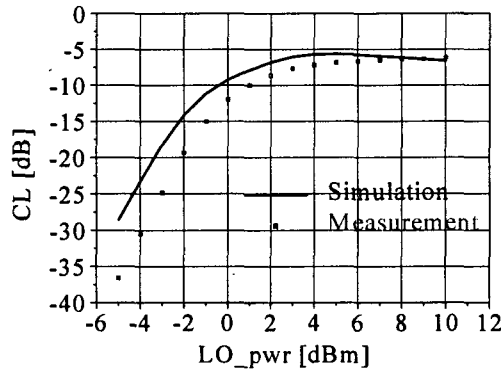


그림 6. LO 전력에 따른 변환 손실 곡선
 Fig. 6. LO characteristics

그림 6은 제작된 혼합기의 LO 전력에 따른 변환 손실의 시뮬레이션과 측정 결과를 나타낸 그래프이다. RF 주파수를 1.8 GHz, LO 주파수를 2.0 GHz로 고정한 후, LO 전력을 - 5 dBm에서 + 11 dBm까지 1 dB 간격으로 변화시켰다. 두 결과, LO 전력이 약 + 6 dBm 정도에서 변환 손실 곡선이 완전 포화 상태가 되었다. 따라서, 혼합기를 동작시키기 위해서는 + 6 dBm

이상의 LO 전력이 필요 하게 된다.

그림 7은 주파수를 상·하향 변환할 때의 시뮬레이션과 측정 결과의 변환 손실을 나타낸 그래프이다. 그림 7-(a)는 RF 주파수가 1.4 GHz에서 1.99 GHz까지 변화시킬 때 LO 주파수를 2.0 GHz로 고정 시키고, RF 주파수가 2.0 GHz에서 2.49 GHz까지 변화시킬 때 LO 주파수를 2.5 GHz로 고정 시킨다.

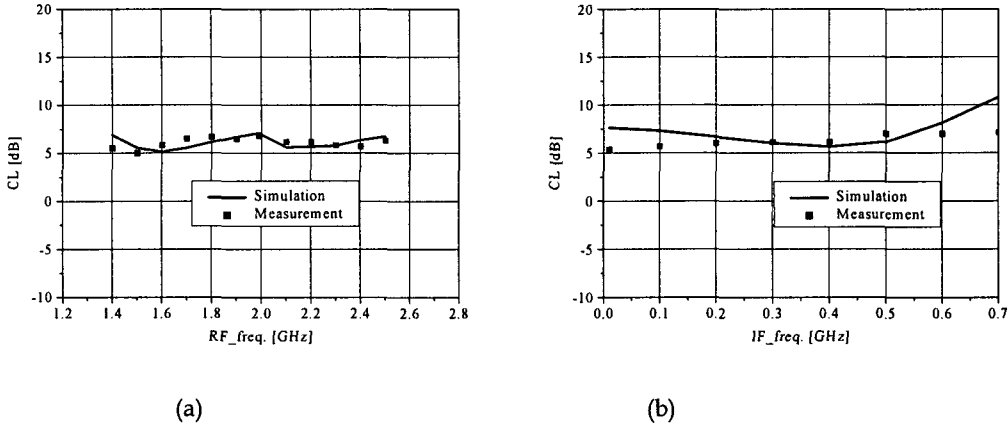


그림 7. 주파수에 따른 변환 손실
(a) 주파수 하향 변환기 (b) 주파수 상향 변환기

Fig. 7. Conversion loss vs. frequency
(a) Downconverter (b) Upconverter

이 때, LO 전력은 + 6 dBm이며, RF 전력은 - 30 dBm이 인가된다. 시뮬레이션 결과, 변환손실은 1.5 GHz에서 5.1 dB부터 2.5 GHz의 7.1 dB 정도까지 변화폭이 있었다. 측정 결과, 1.5 GHz에서 5.0 dB부터 2.5 GHz의 6.8 dB 정도까지 변화폭이 있었다. 1.5 GHz에서 2.5 GHz의 대역에서 벗어나면 변환 손실 값이 급격히 저하되는데, 이는 발문 회로의 동작 주파수 대역에 의해 제한을 받기 때문이다. 그림 7-(b)는 주파수를 상향 변환할 때의 변환 손실 특성을 나타내었다. IF 포트에서 신호가 입력되며, RF 포트에서 출력 신호를 얻게 된다. IF 전력을 - 30 dBm으로, LO 전력을 + 6 dBm으로 고정하여 인가한다. 이 때, IF 주파수를 10 MHz에서 700 MHz까지 변화시키며 변환 손실을 측정하였다. 시뮬레이션 결과, IF 주파수 400 MHz에서 변환 손실이 5.6 dB가 되며, 10 MHz에서 약 7.61 dB 정도가 된다. 측정 결과, IF 주파수 10 MHz에서 변환 손실이 5.3 dB가 되며, 500 MHz에서 약 7.0 dB 정도가 된다. 이로써, 이중 평형 star 혼합기가 주파수 상·하향 변환용으로 동작 가능함을 확인할 수 있었다.

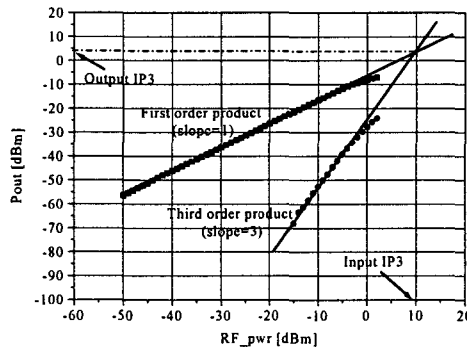


그림 8. Intercept point 추출을 위한 외삽
Fig. 8. Extrapolation of Intercept point

그림 8은 2-tone 입력 신호의 크기에 따른 기본차 신호와 3차 상호 왜곡 신호의 출력 특성을 측정하여 얻은 결과를 보였다. RF 주파수 1.8 GHz를 중심으로 0.5 MHz 씩의 간격에 동일한 전력을 갖는 두 신호가 입력된다. Multi-tone 신호를 발생 시키기 위해 E4432B를 사용하였다. 이 때, RF 입력 주파수는 1.8005 GHz와 1.7995 GHz가 되며, LO 주파수는 2.0 GHz로 고정하고 + 6 dBm의 LO 전력을 인가시킨다. RF 전력을 - 50 dBm에서 + 2 dBm까지 변화시켜며 IF 출력단에서의 기본차 신호와 3차 상호 왜곡 신호의 출력에 대한 값을 읽어 곡선으로 나타낸 후 외삽하였다. 결과, 입력 IP3 지점은 약 + 10 dBm 정도가 되며, 출력 IP3 지점은 약 + 5 dBm 정도가 된다.

그림 9는 기본차 신호와 3차 상호 왜곡 신호의 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로, 그림 8과 동일한 조건에서 수행되었다. 이 때, IF에서의 출력 신호 역시 200 MHz 중심주파수에서 0.5 MHz 간격으로 IF의 기본차 신호가 나타난다. 기본차 신호와 3차 상호 왜곡 신호의 차를 IMD3라 하며 측정 결과, - 43.67 dBc를 보였다.

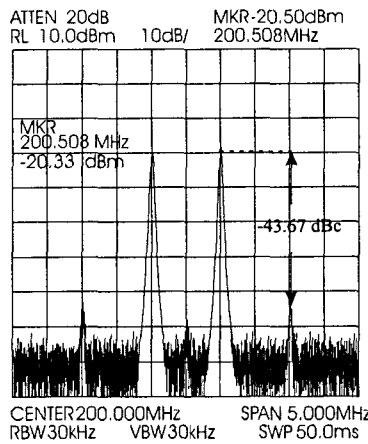


그림 9. 3차 상호 왜곡 신호의 출력 스펙트럼

Fig. 9. Output spectrum of third order product

위의 결과들에서 알 수 있듯이, microstrip과 CPS를 이용한 발륜을 2 GHz 대역의 star 혼합기에 적용하였을 때, 발륜 회로의 동작 주파수 대역내에서 혼합기로 잘 동작하며, 또한 주파수 상·하향 변환기로 동시에 사용 가능함을 보였다.

표 1은 본 논문의 이중 평형 star 혼합기의 성능 평가를 위해, Mini-Circuits사의 상용 제품인 트랜스포머 및 링 다이오드 쿼드를 이용한 이중 평형 혼합기 ADE-18W와 주요 성능을 비교하였다.

표 1. 상용 제품과의 특성 비교

항목	본 논문	ADE-18W
RF 주파수 [GHz]	1.5 - 2.5	1.75 - 3.5
LO 주파수 [GHz]	1.5 - 2.5	1.75 - 3.5
IF 주파수 [GHz]	DC - 0.7	DC - 0.7
LO 전력 [dBm]	6	7
변환손실 [dB]	6	5.4
LO-RF 격리도 [dB]	36.6	33
LO-IF 격리도 [dB]	23.47	12
Input IP3 [dBm]	10	11

표 1에서 보면, RF/LO의 동작 주파수가 ADE-18W보다 좁은 것을 제외한 다른 특성들에 대해서는 유사한 값을 보였다. 대역이 약간 좁은 것은 제안된 발룬에 광대역 기법이 적용되지 않았기 때문이며, 만일 제안한 발룬에 광대역을 만족하는 발룬 설계 기법이 사용된다면, 트랜스포머 발룬을 사용한 혼합기에 준하는 평판형 이중 평형 star 혼합기를 구현할 수 있을 것이다. 또한 더 높은 주파수에서도 본 논문의 제안은 이중평형 혼합기 제작에 사용될 수 있지만 ADE-18W의 방법은 그렇지 못하게 된다. 따라서, 본 논문에서 제안한 발룬은 설계 주파수 대역이 정해지면, 어느 대역이든 설계 가능하다는 장점을 갖고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이중 평형 star 혼합기에 적합한 새로운 발룬 구조를 제안하였고, 또한 HSMS-286R(star 쿼드)과 조합하여 2 GHz 대역에서 혼합기를 제작, 측정하였다. 발룬 회로는 Chang의 star 혼합기에 적용된 Mouw junction 발룬을 비아 공정을 포함하는 마이크로스트립 환경에 적합하도록 수정하였다. 발룬 측정 결과, 1.5 GHz에서 2.5 GHz의 대역 내에서 위상의 불평형 정도는 $180^\circ \pm 1.5^\circ$ 이내였으며, 진폭의 불평형 정도는 ± 0.2 dB 이내였다. 발룬 회로를 적용한 star 혼합기 제작 결과, 상·하향 주파수 변환 손실은 약 6 dB 정도였으며, 입력 P_{1dB} 는 약 +3 dBm, 입력 IP3는 약 +10 dBm 정도였다. 측정 결과와 같이, 제작된 star 혼합기는 1.5 GHz에서 2.5 GHz의 주파수 대역에서 혼합기로써의 성능을 저하시키지 않고 잘 동작함을 확인할 수 있었다. 제안된 발룬에 광대역의 발룬 설계 기법이 적용된다면, 트랜스포머 발룬을 사용한 혼합기에 준하는 평판형 혼합기를 구현할 수 있을 것이다.

또한 이러한 발룬 구조를 사용하여 제작된 star 혼합기는 밀리미터파 대역의 비아 공정을 포함하는 마이크로스트립을 기반으로 하는 다른 저잡음 증폭기, 및 전력 증폭기 등 다른 MMIC 소자들과 호환 가능할 것이며, 더 나아가 이를 같은 chip 상에 구현하여 더 큰 시스템 블록을 구성할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] G. D. Vendelin, A. M. Pavio, and U. L. Rohde, *Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques*, John Wiley & Sons Inc., pp. 562-570, 1990.
- [2] S. A. Maas, "A broadband planar, doubly balanced monolithic Ka-band diode mixers," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-41 pp. 2330-2335, Oct. 1993.
- [3] C. Y. Chang, "Ultra broad-band doubly balanced star mixers using planar Mouw's hybrid junction," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-41 pp. 1077-1085, Jun. 2001.
- [4] R. B. Mouw, "A broadband hybrid junction and application to the star mixer," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-16 pp. 154-161, Nov. 1968.
- [5] Y. I. Ryu, K. W. Kobayashi, and A. K. Oki, "A monolithic broadband doubly balanced EHF HBT star mixer with novel microstrip baluns," in *IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuit Symp. Dig.*, pp. 119-122, 1995.
- [6] S. A. Maas, *Microwave Mixers*, (2nd ed.) Norwood, MA:Artech House, 1993.