

C-Band용 FG-CPW 단일 평형 다이오드 혼합기

A FG-CPW Single Balanced Diode Mixer for C-Band Application

배중선 · 이종철 · 김종현 · 이병제 · 김남영

Joung-Sun Bae · Jong-Chul Lee · Jong-Heon Kim · Byung-Je Lee · Nam-Young Kim

요 약

본 논문에서는 FG-CPW (Finite-Ground Coplanar Wave-Guide) 구조의 평형 다이오드 혼합기에 대해서 논의된다. 주파수 대역은 C-band로 선택하였고, RF는 5.72~5.82 GHz, LO는 5.58~5.68 GHz, 그리고 IF 신호는 140 MHz가 사용되며, 이와 동일한 조건에서 마이크로스트립 혼합기를 제작하여 그 특성들을 비교하여 C-band 대역에서의 FG-CPW의 응용 가능성을 제시한다. 단일 평형 형태를 위해 rat-race 결합기가 이용된다. CPW 구조를 갖는 LPF (low pass filter)가 우수한 변환 손실 특성과 불필요한 하모닉들의 억제에 대해 사용된다. 5.635 GHz에서 4 dBm의 출력을 갖는 LO 신호가 입력될 때 6.2 dB의 혼합기 변환 손실을 얻는다. 또한, LO-RF 격리특성과 LO-IF 격리특성은 각각 30 dB와 40 dB의 특성을 얻는다. 제시된 혼합기는 무선 LAN 분야에 응용될 수 있으리라 기대된다.

Abstract

In this paper, FG-CPW (Finite-Ground Coplanar Wave-Guide) balanced diode mixer is presented. Frequency bandwidth is selected for a C-band, which is 5.72~5.82 GHz for RF, 5.58~5.68 GHz for LO, and 140 MHz for IF signals. A rat-race hybrid is designed for the accomplishment of single balanced type. A low pass filter (LPF) with CPW structure is used for good conversion loss and unwanted harmonics suppression. When LO signal with the power of 4 dBm at 5.635 GHz is injected, a conversion loss of 6.2 dB is obtained for the mixer. Also, the LO to RF and LO to IF isolation of 30 dB and 40 dB are obtained, respectively. This mixer can be used in the area on wireless LAN application.

I. 서 론

최근 들어 통신시스템에서는 더 많은 정보를 신속하게 제공하기 위하여 광대역, 초고주파 사용의 추세로 발전되어지고 있다. CPW(Coplanar Wave Guide)는 구조적인 장점으로 인하여 광대역 특성을 보일 수 있다. 또한 공정시 back-side공정이 필요치 않게 됨에 따라 공정을 단순화 시킬 수 있다. 특히 IF 여파기 단의 높은 임피던스 구현을 위한 컨덕터

손실은 기존의 마이크로스트립 선로에 비교하여 우수한 특성을 가지며, 회로 크기를 줄일 수 있고, 단일 칩 초고주파 집적회로 (Monolithic Microwave Integrated Circuit: MMIC)와 집적이 용이함 등 많은 장점을 가진 구조이다^{[1],[2]}. 본 논문에서는 rat-race 구조를 이용하여 필터 없이 LO 단과 RF 단의 분리도를 확보하고 구조를 단순화 시키며, FG-CPW (Finite-Ground-CPW) 구조를 이용하여 접지면 사이에서 존재하는 기생모드를 줄일 수 있는 평형 구조

「본 연구는 2000년도 광운대학교 교내 연구비 및 정보통신부의 대학정보통신 연구센터(ITRC) 사업의 지원으로 수행되어졌음」
광운대학교 RFIC 연구 및 교육센터/미션테크놀로지 연구센터(RFIC Research and Education Center & Mission Technology Research Center, Kwangwoon Univ.)

· 논문 번호 : 20000922-107

· 수정완료일자 : 2001년 2월 12일

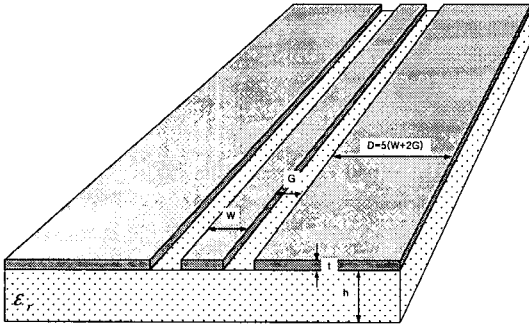


그림 1. Finite Ground CPW 구조
Fig. 1. Structure of the Finite Ground CPW.

의 다이오드 혼합기를 제안한다. 또한 CPW 구조의 문제로 대두 되는 슬롯(slot)모드의 억압과 접지면의 연속성을 확보하기 위해 와이어 본딩을 사용하며, 대칭구조를 사용하여 불연속 문제점을 최소화 한다. 그림 1은 Finite ground CPW 구조를 나타낸 그림이다. 신호선과 슬롯 사이의 간격보다 5배 이상 접지면의 면적이 넓으면 신호가 접지면으로 인식해서 그 이상의 접지 면적이 필요치 않아 회로 크기를 줄일 수 있으며, 접지면의 기생모드를 억제하게 된다 [6],[7].

II. FG-CPW 구조의 180° Rat-race 하이브리드와 저역 통과 여파기

2-1 FG-CPW 구조의 180° Rat-race 하이브리드

본 논문에서 제시하고자 하는 단일 평형 주파수 혼합기는 Rat-race와 저역통과 여파기를 필요로 한다. 이는 혼합기의 성능을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 단자간 분리도와, 반사손실, 그리고 스퓨리어스 응답을 결정짓는 중요한 부분은 Rat-race이며, 그림 2에 FG-CPW 링 구조의 하이브리드를 표시하였다. 특히 각 포트 부분에서 천이문제(transition)가 발생되므로 본 논문에서는 Agilent 사의 EM 소프트웨어인 HFSS™ [5]를 이용하여 설계 및 제작하였다. Rat-race는 4개의 기본적 포트를 가지고 있으며, 각 단자의 폭은 50 Ω에 해당한다. 링 자체의 두께는 임피던스 계산에 의해 70.7 Ω에 해당되며, 1번부터 4번까지의 단자간 전기적 거리는 λ/4이고, 3

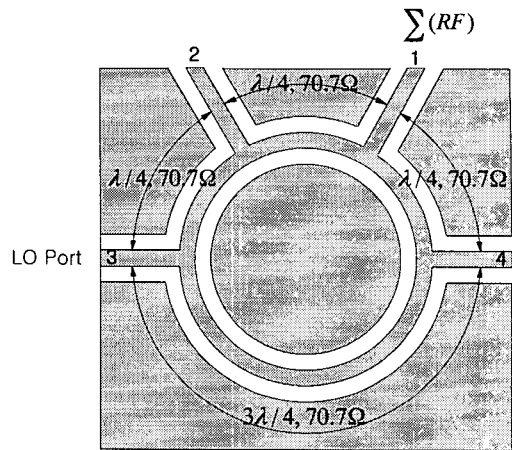
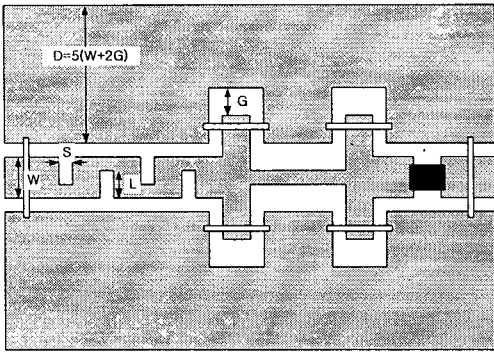


그림 2. FG-CPW Rat-race 하이브리드
Fig. 2. FG-CPW rat-race hybrid.

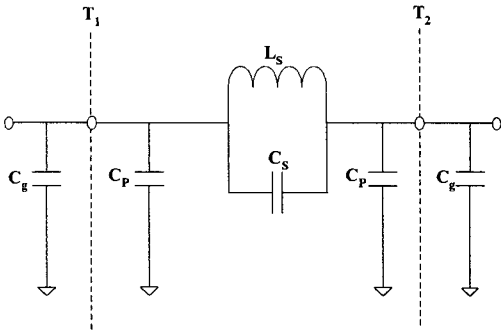
번과 4번 단자 사이의 길이는 3λ/4이다. 이 전기적 길이로 인한 위상차로 인하여 그림 2에서 1번 단자로는 RF 신호를, 3번 단자로는 LO신호를 인가시키며 비선형 소자의 위치는 2번과 4번 단자에 위치하게 되는데, 1번 단자로 인가된 신호는 두 소자에 역위상으로 인가된다. 이를 이용하여 LO신호에 의한 잡음 성분과 스퓨리어스 성분을 상쇄시킬 수 있다 [6],[7].

2-2 CPW 구조의 저역통과 여파기

그림 3에는 저역통과 여파기를 표현하였는데, LO와 IF, RF와 IF 분리도를 결정하며, 그밖의 혼합기 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 특히 CPW 구조에서는 광대역 특성을 보이므로 더욱 구현이 어려우며, 회로 크기도 증가하게 된다. CPW구조는 기존의 회로 시뮬레이터로는 불연속에 대한 해석이 아직 완전하지 않으므로 인해 상용 소프트웨어로 특성을 예측하기 어렵다. 이런 이유로 대칭 구조를 사용하여 불연속에 대한 회로의 영향을 최소화 하였다[7]. 이런 문제를 해결하기 위하여 저역통과 여파기와 Rat-race는 EM 해석을 통하여 S-파라미터를 추출하여 회로 시뮬레이션에 이용하였다. 신호선에 얇은 슬릿을 삽입함으로써 회로 크기를 줄이면서 광대역의 스퓨리어스 성분들을 억압할 수 있는 여파기를 제안하였다. 이는 12 GHz~50 GHz의 넓은



(a)



(b)

그림 3. (a) 슬릿을 삽입한 변형된 CPW 저역통과여파기 및 (b) 등가 회로
Fig. 3. (a) A revised CPW lowpass filter with slit and (b) Equivalent circuit.

대역에서 스푸리어스 성분을 억압시켜 주고, 구현이 간단해지며 여파기의 특성을 조절할 수 있는 장점이 있다.

슬릿 구조를 삽입한 저역통과 여파기는 슬릿의 길이에 의해서 인덕턴스(L) 성분을 조절할 수 있다. 아래식 (1)~(4)는 슬릿 구조를 해석하기 위한 수식을 나타내고 있다. 슬릿의 삽입으로 인하여 그 구조는 대칭, 비대칭 구조로 변형된다. 따라서 그 구조에 따라서 유효 유전율 ϵ_{eff} 와 특성 임피던스 Z_0 가 바뀌어진다. 위와 같은 원리를 이용하여 슬릿의 길이에 따른 인덕턴스 L_s 값을 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$L_s = \frac{\mu_0 \pi}{20} \left(1 - \frac{Z_{0,CPW} \sqrt{\epsilon_{eff,CPW}}}{Z_{0,ACPW} \sqrt{\epsilon_{eff,ACPW}}} \right)^2 \quad (1)$$

또한 C_p 는 불연속 기준면으로부터의 거리 (l)와 총전하 Q_{total} , 단위 길이에 대한 conductor 내부의 전하 Q' 와 관련된 식 (2)와 같이 표현되며, C_s 는 odd 모드와 even 모드시의 C_p 인 C_{podd} 와 C_{peven} 의 관계식 (3)으로 표현된다.

$$C_p = (Q - lQ') / V \quad (2)$$

$$C_s = 0.5(C_{podd} - C_{peven}) \quad (3)$$

인덕턴스 (L_s)와 병렬로 놓여지는 C_g 는 전체 신호선과 접지면 사이의 전위에 의해 발생되며, 이는 식 (4)로 표현된다.

$$C_g = 2\epsilon_0 \left(2 \frac{K(k_1)}{K'(k_1)} + (\epsilon_r - 1) \right) \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \quad (4)$$

여기서 $K(*)$ 와 $K'(*)$ 는 각각 제1차 elliptic 적분 함수와 그 complement 이다. 위의 식들로부터 슬릿의 길이가 증가할수록 인덕턴스 L_s 가 증가하며, 접지면에 대한 필드 분포에 의한 커패시턴스 C_p , C_g 에 의해서 저역통과 여파기를 구현할 수 있고, 슬릿 길이와 슬릿의 넓이에 의해서 필터 특성을 변화시킬 수 있게 된다. 이와 같은 슬릿 구조의 삽입으로 인하여 여파기의 크기를 1/3가량 줄일 수 있다. 그림 4에는 슬릿을 삽입한 저역 통과 여파기의 측정치를 나타내고 있다. 차단 주파수가 1.8 GHz 이고, 고조파 억제가 우수한 특성을 보이고 있음을 확인할 수

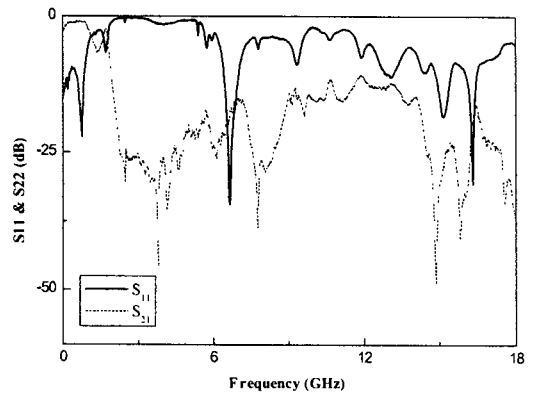


그림 4. 슬릿을 삽입한 구조의 저역통과 여파기 측정치
Fig. 4. Experimental results for the LPF with slit.

있다. 특히 LO 주파수의 2차, 3차, 4차 고조파가 30 dB 이하로 억압되며, 대역내(pass band)의 손실은 0.5 dB 이내의 특성을 보이고 있다. 이와 같은 고조파 억압 특성은 그림 6의 출력 스펙트럼 결과에서도 확인할 수 있다.

III. 혼합기 설계

그림 5에는 설계된 FG-CPW혼합기의 레이아웃을 표시하였다. CPW구조는 개방 단(open end)이나 단락 단(short end)을 사용하여 회로 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있어, 임피던스 정합을 위한 회로 크기를 감소시킬 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 전체 회로 크기를 줄일 수 있다. CPW구조는 신호선과 슬롯(slot)의 비로 임피던스가 결정되므로, 바이어스 단은 그 비를 크게 하여 RF 신호를 차단하였다. 또한 불연속 지점과 접지면 사이의 전기적 차이를 줄이기 위하여 사용된 와이어 본딩에 의해 발생하는 기생 성분들은 0.62 nH/mm 값을 설계 시 고려하였다. 와이어 본딩을 하지 않을 경우에는 임피던스 매칭을 위한 개방 단이나 바이어스 단이 각각 공진기처럼 동작하고 슬롯 모드가 발생되게 된다. 또한 고유전체 (high dielectric substrate)의 사용으로 인한 유전체 손실을 줄이기 위해서 전류차단 회로는 커패시터를 사용하였다.

표 1에는 혼합기의 설계규격과 그에 대한 시뮬레이션 값을 나타내고 있다.

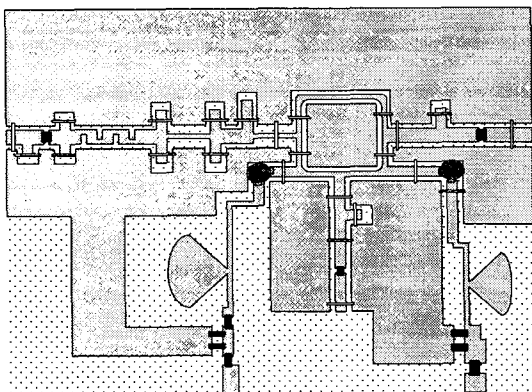


그림 5. 설계된 혼합기의 레이아웃(55mm×55mm)
Fig. 5. Layout for the designed mixer.

표 1. 혼합기의 설계규격과 시뮬레이션 결과

Table 1. Design specification and simulation results for the mixer.

Item	목표치	설계치
LO 주파수	5.635 GHz	5.635 GHz
RF 주파수	5.775 GHz	5.775 GHz
IF 주파수	140 MHz	140 MHz
LO-RF간 분리도	25 dB 이상	27 dB 이상
LO-IF, RF-IF간 분리도	35 dB 이상	42 dB 이상

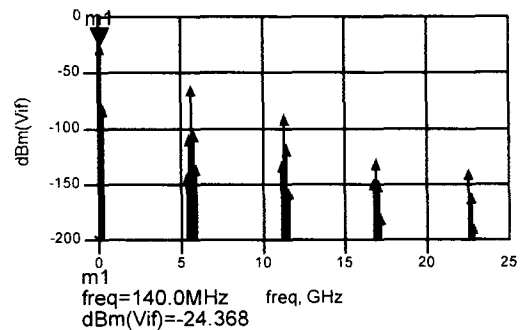


그림 6. 출력 포트에서의 전력 스펙트럼(LO: 4 dBm)

Fig. 6. Power spectra at output port(LO: 4 dBm).

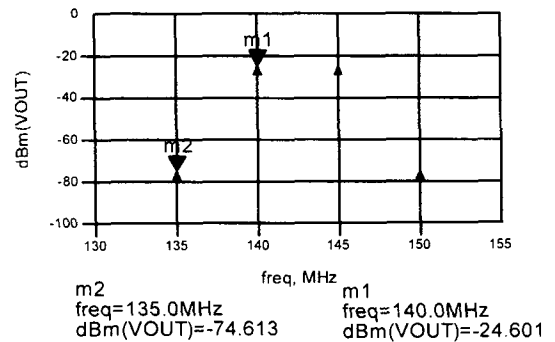


그림 7. 혼합기의 IMD 시뮬레이션 결과(RF : -20 dBm, LO : 2 dBm)

Fig. 7. Simulation results of IMD for the mixer (RF: -20 dBm, LO : 2 dBm).

시뮬레이션 결과 전력 스펙트럼은 그림 6과 같고,

그림 7에서는 IMD 특성을 보여주고 있다. LO Power가 4 dBm이고 RF Power가 -20 dBm일 경우 4.37 dB의 변환손실을 가지며, 또한 그림 7로부터 LO Power가 2 dBm이고 RF Power가 -20 dBm 일 경우에 50 dBc의 우수한 IMD특성을 보인다.

IV. 회로 제작 및 측정

CPW 혼합기는 유전율 (ϵ_r) 10.2, 높이 0.635 mm, 도체두께는 0.018 mm의 기판을 사용하여 구현하였다. 또한 측정 장비로서는 HP 8510C 회로망 분석기와 HP 8563E 스펙트럼 분석기, Wiltron 6147B-40 신호 발생기, 그리고 HP 83623B 신호 발생기를 사용하였다. 또한 사용된 소자로는 Fujitsu 사의 FHX35LG 저잡음 HEMT 비선형 소자를 사용하였다. 이 HEMT 소자는 게이트 길이가 $0.25 \mu\text{m}$ 이고 게이트 넓이가 $280 \mu\text{m}$ 인 소자이다. 그림 9와 그림 10은 제작된 혼합기의 변환손실(conversion loss)에 대한 특성을 나타낸 그래프와 전력 스펙트럼이다. 본 절에서는 기존의 마이크로스트립 구조의 혼합기와 비교를 위하여 동일한 조건 하에서 FG-CPW 구조의 혼합기와 마이크로스트립 혼합기의 특성을 비교하도록 한다. 마이크로스트립 혼합기는 링 하이브리드와 IF 필터단으로 인해 전체 회로 크기가 CPW 혼합기의 경우보다 30 % 정도 커지게 된다^[8]. RF 전력은 -20 dBm으로 고정시킨 상태에서 LO 전력을 -10 dBm에서 12 dBm까지 증가하며

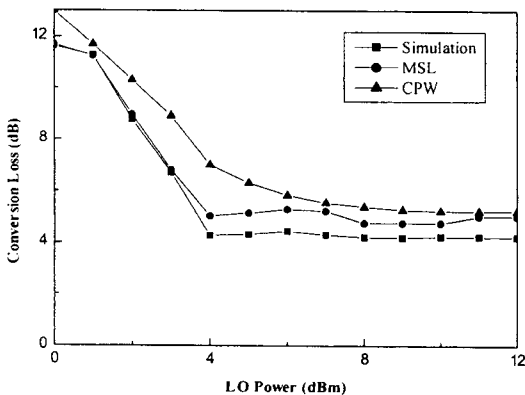


그림 8. LO 전력에 따른 변환손실
Fig. 8. Conversion loss vs. LO power.

특성을 살펴보면 -10 dBm~0 dBm까지의 구간에서는 변환손실이 급속히 감소하며, 0 dBm 이상의 구간에서는 그 감소 비가 낮아진다. 또한 LO 전력은 약 7 dBm 이상의 전력을 인가하더라도 손실의 감소 비는 현격히 감소하여 포화현상을 보이고 있다.

그림 9는 LO : 4 dBm , RF : -20 dBm일 때 측정된 출력 스펙트럼을 나타내고 있다. FG-CPW 혼합기 시뮬레이션 결과와 측정치가 2.83 dBm의 오차를 보인다. 그 이유는 3차원 구조를 해석함에 있어 S-파라미터 추출 시 오차로 인해 발생하는 전력 정합에서의 차이로 분석되어진다.

그림 10은 LO-RF 분리도를 보여준다. 이는 통신에서 중요한 요소로서 LO나 RF 전력 누수 (leakage)에 의해서 여러 가지 스퓨리어스 성분이 만들어질 수 있다. 최소 27 dB (LO Power: 10 dBm) 이상의 비교적 우수한 분리도를 보이는 이유는 Rat-race에 의해 양호한 분리도 특성이 얻어지며, LO-IF 분리도는 저역통과 여파기에 의해 주로 결정되고, LO power의 변화에 큰 영향 없이 40 dB 이상의 특성을 확보하였다.

그림 11은 IMD3 (Third Order Inter-modulation Distortion)특성을 보여주고 있다. RF 주파수 5.78 GHz와 5.77 GHz를 각각 RF1 과 RF2로 입력하고, LO 주파수를 5.635 GHz로 입력하였을 때 IMD3 성분은 155 MHz와 125 MHz에서 나타난다. 입력 RF 전력들은 각각 -30 dBm~0 dBm 으로 인가하고

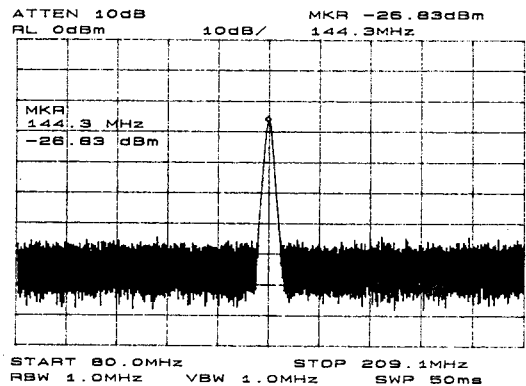


그림 9. IF 스펙트럼(LO:4 dBm, RF:-20 dBm)
Fig. 9. IF Spectrum(LO:4 dBm, RF:-20 dBm).

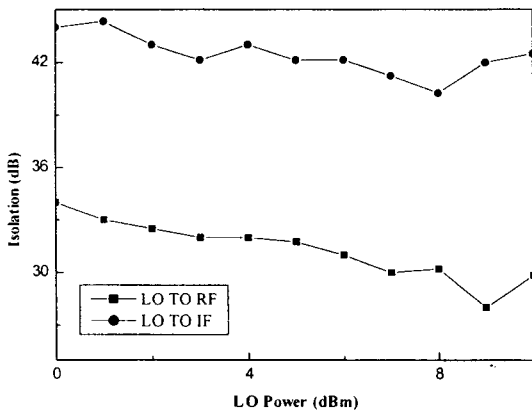


그림 10. FG-CPW 혼합기의 LO 전력에 대한 LO-RF, LO-IF 분리도

Fig. 10. LO-RF and LO-IF isolation characteristics for the FG-CPW mixer as a function of LO power.

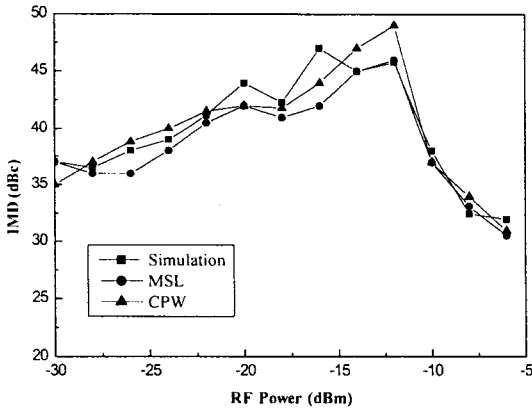


그림 11. RF신호에 대한 IMD 특성

Fig. 11. IMD characteristics as a function of RF power.

LO 전력은 5.635 GHz에서 5 dBm으로 인가하였다. IMD3특성은 입력 RF 전력이 -13 dBm까지 증가 될 때까지 그 특성이 향상되고 그 이상의 전력이 인가되면 급속히 특성이 악화된다. 대역내에서 최고 47 dBc의 특성을 얻었다.

위의 결과들로부터 FG-CPW 구조의 혼합기는 기존에 상용대역에서 널리 사용되는 마이크로 스트립 구조의 혼합기와 비교하여 대등한 특성을 보이고

있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Finite-Ground CPW 구조를 사용하여 C-band 대역의 혼합기를 설계 및 제작하고, 기존의 마이크로스트립 혼합기와 그 특성들을 비교하였다. 일반적으로 CPW구조가 mm파 대역에서 많은 장점을 가진 구조로 알려져 있지만 본 논문에서는 상용 대역에서의 가능성을 제시하고 있다. 근래에 급속히 발전되고 있는 MMIC와의 집적화의 용이성 등과 같은 장점으로 인해 미래에 더욱 많이 사용되어질 수 있는 구조라 예측된다. 또한 신호선에 슬릿을 삽입한 구조의 저역 통과 필터는 구조의 단순함이나 광대역에서 고조파 성분을 억압하고 회로 크기를 줄일 수 있는 새로운 방식의 필터로써 그 유용성이 클 것이라 판단된다. 180° rat-race 하이브리드를 사용함으로써 LO-to-RF 및 LO-to-IF의 충분한 격리도를 확보할 수 있었다. 변환손실은 최고 6 dB 이상과 45 dBc 이상의 IMD특성을 보여 주고 있다. 이와 같은 FG-CPW구조를 이용한 구조를 다른 종류의 RF회로에 적용한다면 보다 우수한 성능의 회로 제작이 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Naghed and I. Wolff, "Equivalent Capacitances of Coplanar Waveguide Discontinuities and Integrated Capacitor Using a Three-Dimensional Finite Difference Method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 12, pp.1808-1815, Dec., 1990.
- [2] K. P. Ma, Y. Qian and T. Itoh, "Analysis and Applications of a New CPW-Slotline Transition," *IEEE Trans, Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 4, pp. 426-432, April, 1999.
- [3] K. Beilenhoff and W. Heinrich, "Excitation of the Parasitic Parallel-Plate Line Mode at Coplanar Discontinuities," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp.1789-1792, 1991.

- [4] M. Yu and M. Matloubian, "W-band InP-based HEMT MMIC Power Amplifiers Using Finite-Ground CPW," *IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig.*, vol. 3, pp. 1212-1218, 1998.
- [5] Agilent, HFSS ver. 5.5, 1999.
- [6] H. Matsuura, K.T. Tezuka, I. Aoki, M. Yamanaoka and S. Kobayashi, "Monolithic Rat-race Mixers for Millimeter Wave," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 6, pp. 839-841, 1998.
- [7] C. C. Yang, "A Multioctave Bandwidth Rat-Race Singly Balanced Mixer," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 9, pp. 1049-1052, 1999.
- [8] J. S. Bae, "Single Balanced Diode Mixers with FG-CPW and Microstrip Structures For Wireless LAN Application", 광운대학교 석사학위논문, 2001. 2.

배 중 선

1999년 2월: 명지대학교 전기전자공학부(학사)
2001년 2월: 광운대학교 대학원 전파공학과(공학석사)
2001년 2월~현재: 한국전자통신연구원(ETRI) 위성사업
단 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계

이 중 철

2001년 1월호 논문지 (vol. 12, no. 1) 참조

김 중 헌

2001년 1월호 논문지 (vol. 12, no. 1) 참조

이 병 제

2001년 1월호 논문지 (vol. 12, no. 1) 참조

김 남 영

2001년 1월호 논문지 (vol. 12, no. 1) 참조