

논문 2008-45TC-3-1

# 무선랜용 이중대역 I/Q 모듈레이터의 설계 및 특성 해석

(Design and Analysis of Dual Band I/Q Modulator For Wireless LAN)

박 현 우\*, 구 경 현\*\*

(Hyun Woo Park and Kyung Heon Koo)

## 요 약

본 논문에서는 2.4GHz 및 5GHz의 이중대역에서 동작하는 I/Q 모듈레이터를 설계하였다. 광대역 믹서에 90° 위상천이기를 이용하여 quadrature 신호를 입력하여 베이스밴드 신호를 변조된 RF 신호로 출력한다. 제안한 I/Q 모듈레이터의 변환 손실은 2.4GHz에서 약 15dB이고 5.8GHz 대역에서 약 16dB이다. 사이드밴드 억압특성은 2.4GHz/5GHz에서 각각 15dBc, 16dBc이며, carrier suppression 은 두 대역에서 약 40dBc이다. 또한 11Mbps 의 QPSK 신호입력시의 EVM 특성은 2.4GHz에서 약 8.5%, 5GHz에서 10% 이며, 반송파 억압은 두 대역에서 40dB 이상으로, 무선 랜 신호를 인가시 출력 스펙트럼 규격을 만족하였다.

## Abstract

A dual band I/Q modulator which converts baseband input signals to 2.4GHz or 5GHz RF output has been proposed. The dual band I/Q modulator for 2.4GHz and 5GHz wireless LAN applications consists of 90° phase shifter and wideband mixer. The I/Q modulator showed 15dB conversion loss at 2.4GHz and 16dB conversion loss at 5GHz. The sideband suppression is about 15dBc at 2.4GHz and 16dBc at 5GHz. Measured data shows 8.5% EVM at 2.4GHz, and 10% EVM at 5GHz for QPSK with symbol rate of 11Mbps. A carrier rejection is about 40dBc at 2.4GHz/5GHz band, and the I/Q modulator satisfied the output wireless LAN spectrum mask with baseband input signal.

**Keywords:** WLAN, Mixer, I/Q Modulator

## I. 서 론

오늘날 무선통신시스템으로 다양한 방식들이 제안되어 셀룰러 전화, 무선랜, 와이브로, 지상 및 위성 디지털 멀티미디어 방송, 블루투스 등이 서비스되며 이동통신 수요가 증가하고 있다. 새로운 무선통신 시스템은 영상, 음성 및 데이터 등 멀티미디어 통신 서비스 요구가 증가하여 고속, 대용량 전송에 대한 필요성이 증대하고 있으며, 이를 지원하기 위하여 다양한 주파수 대역에서 각기 다른 통신 방식을 지원하는 다중 대역, 다중 모드 통신 단말기의 필요성이 증대하고 이에 대한 연구 개발이 진행되고 있다. 다중 대역, 다중 모드 시스템 연구는 융합 단말 및 시스템 개발에 필요한 중요 기술로 소프

트웨어기반 무선기술(SDR) 등에도 활용이 기대되며, 이를 위한 다양한 표준안을 지원하는 무선 모듈에 대한 연구가 진행되고 있다. 단일 단말기로 두 가지 이상의 통신방식을 지원하는 시스템 개발을 위해서는 각 부품의 소형화, 다기능화, 단일 칩 구현 등이 요구된다.<sup>[1]</sup>

무선 통신기술의 발전과 함께 단말 및 기지국에 활용되는 시스템 및 부품 개발도 빠르게 발전하고 있다. 오늘날 널리 보급되고 있는 무선 랜은 기존 유선 랜의 장점을 포함하면서 무선통신 기술의 장점인 이동성과 결합하여 고속으로 데이터를 주고받는 기능을 제공한다. 단거리 무선 통신망에서 무선 랜은 이동성, 휴대성, 확장성, 구축의 유연성 등의 장점을 제공하며 별도의 허가 필요 없는 ISM대역 및 U-NII 대역을 사용하고 있다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 CMOS로 구현한 광대역 RFIC 믹서에 하이브리드 마이크로파 집적회로 (HMIC) 기술을 이용한 전력분배기 및 결합기, 90° 위상변환 네트워크를 결

\* 학생회원, \*\* 정회원, 인천대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronics Eng., University of Incheon)  
\* 본 연구에 사용된 CAD tool은 IT-SoC 사업단 및 IDEC의 지원을 받았습니다.  
접수일자: 2008년1월 3일, 수정완료일: 2008년2월28일

합하여 직접변환 송신기로 사용 가능한 광대역 I/Q 모듈레이터를 설계하고 측정 결과를 제시하였다.

## II. 본 론

### 2.1 능동 발룬 및 믹서 설계

본 논문에서 설계한 CPOS 광대역 믹서는 길버트 셀 구조를 이용하였으며 RF와 LO의 입력단에 single-ended 신호와 differential 신호간 변환을 위한 능동 발룬을 결합하였으며, 광대역 입력 특성을 위해 출력저항, 바이어스, 게이트 폭을 시뮬레이션하여 설계하였다. 믹서의 이중평형 구조는 RF, LO 및 IF 신호 포트들이 서로 분리되어 각 포트간에 높은 격리도(isolation) 특성을 가질 수 있고, 위상차에 의해 짝수차 고조파 성분이 상쇄되는 특성을 갖는다. 설계된 믹서는 TSMC 0.18 CMOS 공정을 사용하여 제작되었고, 2.4~5GHz 대역에서 약 8dB의 변환 손실을 갖는다. 믹서에 사용된 발룬의 회로도는 그림 1에 제시하였으며 single-ended 신호를 differential 신호로 변환하는 LO 포트 능동 발룬의 구조를 나타내고 있다.

그림 1은 기본 구조로 하나의 CMOS를 이용하여 게이트와 드레인, 소스간의 위상 차이를 이용하였으며 두 LO의 요구 광대역 출력 특성을 얻기 위해 입출력 정

합회로치, 바이어스 전압, 게이트 폭을 최적화하여 설계하였다. 설계된 발룬은  $V_{ds}=1.8V$ ,  $V_{gs}=1V$  바이어스에서 드레인 전류는 약 4mA, 150um의 게이트 폭으로 결정되었다. 그림 2는 설계된 LO 능동 발룬의 위상오차와 이득오차를 나타낸다. 차동 신호로 나오는 두 출력간의 소신호 이득 차이는 2.4GHz부터 5GHz 대역에서 0.3dB 이하이다. 두 출력 신호의 위상은 180° 차이가 있어야 하는데 시뮬레이션 결과 2.4GHz~5GHz 대역에서 0.1° 이하의 위상 차이를 보인다.

그림 3은 믹서의 RF 출력의 differential 신호를 single-ended 신호로 변환하기 위한 공통 소스-공통 드레인 (CS-CD) 구조의 RF 능동 발룬 회로도이다. CMOS 두 개가 캐스코드 형태로 연결되어 두 게이트로 출력되는 180° 위상차이가 나는 RF 신호는 각 CMOS의 드레인과 소스로 출력되어 0°의 위상차를 갖는 single-ended 신호로 출력된다. 설계된 능동 발룬은 전압  $V_{ds}=1.8V$ ,  $V_{gs}=1V$  에서 드레인 전류는 약 5mA가 흐르며, 230um의 게이트 폭으로 설계되었다.

그림 4는 설계된 RF포트 능동 발룬의 이득 및 위상 불균형 특성을 나타낸다. 차동 신호로 나오는 두 출력간의 소신호 이득 차이는 2.4GHz~5GHz 대역에서 0.8dB 이하이며, 두 출력 신호의 위상은 180° 차이가 나야하는데 시뮬레이션 결과 전체 대역에서 0.1° 이하의

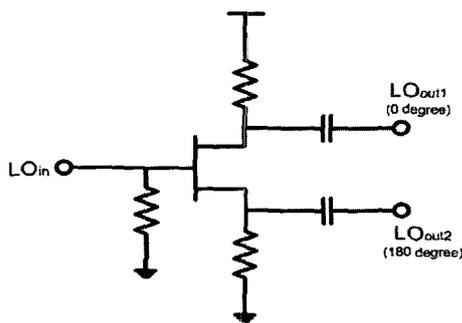


그림 1. LO 포트 능동 발룬의 회로도.  
Fig. 1. Active balun circuit for LO port.

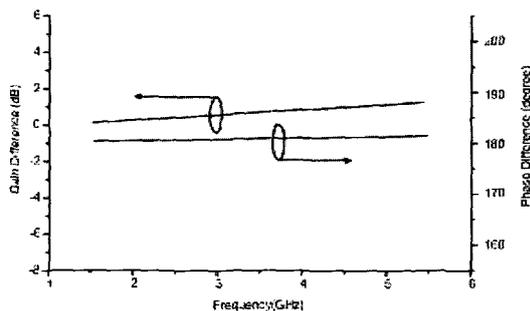


그림 2. LO 포트 능동 발룬의 이득 및 위상 특성  
Fig. 2. Gain and phase of active balun for LO port.

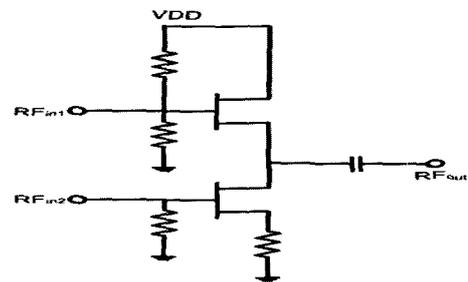


그림 3. RF 포트 능동 발룬의 회로도.  
Fig. 3. Active balun circuit for RF port.

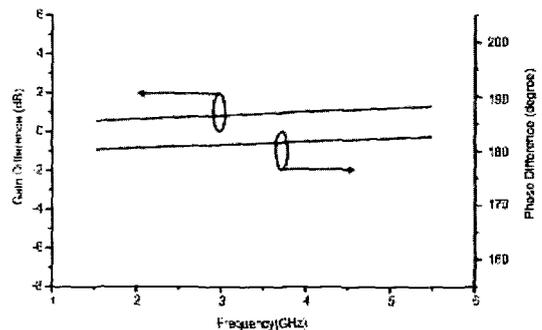


그림 4. RF 포트 능동 발룬의 이득 및 위상 특성.  
Fig. 4. Gain and phase of active balun for RF port.

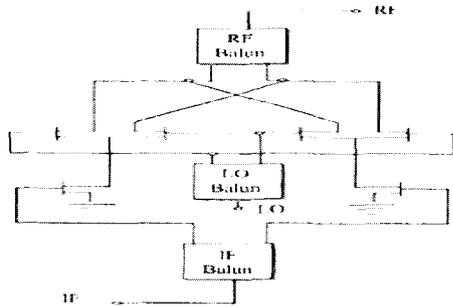


그림 5. 설계된 CMOS 믹서의 회로도.  
Fig. 5. Circuit of the desogned CMOS mixer.

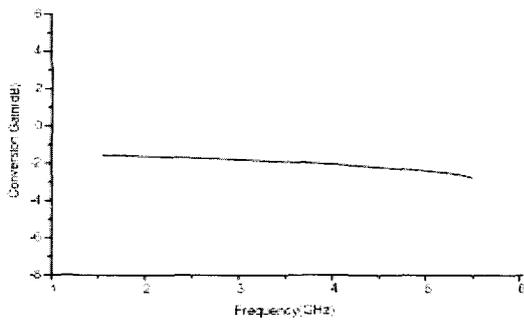


그림 6. 설계된 CMOS 믹서의 변환이득.  
Fig. 6. Conversion gain of the designed CMOS mixer.

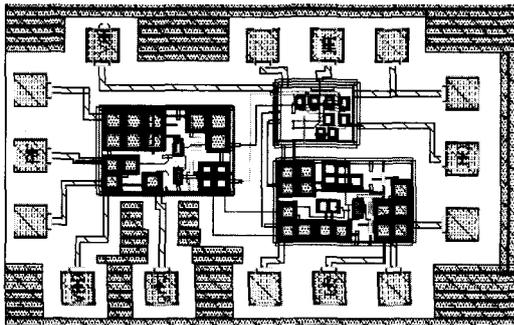


그림 7. CMOS 광대역 믹서의 레이아웃  
Fig. 7. Layout of the designed CMOS mixer.

위상 차이를 보인다.

그림 5는 설계된 믹서의 회로도를 나타내는데 앞에서 기술한 RF, LO 능동 발룬을 결합하여 입출력 광대역 특성을 얻도록 설계하였고, 바이어스는 2V, 출력저항은 50 Ohm으로 사용하였고, 스위칭 코어단과 트랜스 컨덕턴스단의 게이트 폭은 각각 180um와 230um로 2.4GHz~5GHz 대역에서 0dBm의 LO 전력에 대하여 약 -2dB의 변환이득을 얻도록 설계하였다.<sup>[6]</sup>

그림 6은 발룬을 포함하여 설계된 광대역 CMOS 믹서의 상향 변환이득 특성을 나타내며, 설계한 광대역 믹서의 레이아웃 회로를 그림 7에 제시하였는데 믹서의 크기는 1mm×1mm이다.

### 2.2 90° 위상천이기 회로 설계

I/Q 모듈레이터 설계시 LO 신호는 90°의 위상차를 갖는 두 개의 신호로 나누어 각각의 믹서 회로에 인가하여야 한다. 본 논문에서는 RC-CR 위상천이기를 사용하였으며 그 구조는 그림 8과 같다. RC-CR 위상천이기에서 이중대역 특성을 얻기 위해 소자값을 해당 주파수에 최적화하여 설계하였다.

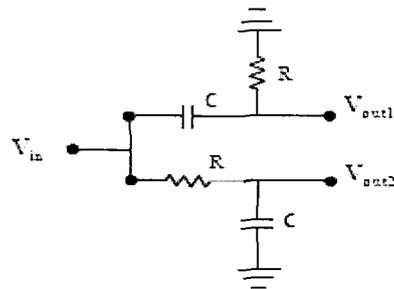


그림 8. 90° 위상 천이용 RC-CR 네트워크.  
Fig. 8. 90° Phase shift RC-CR network.

RC-CR 위상천이 네트워크는 간단한 90° 위상 변환기로 신호를 ±45°로 위상 변환시키는 것이다. 입력주파수  $\omega$ 는 위상천이 되어  $V_{out1}(t)$ 과  $V_{out2}(t)$ 는  $\pi/2 - \tan^{-1}(RC\omega)$ 와  $-\tan^{-1}(RC\omega)$ 가 된다. 따라서  $V_{out1}(t)$ 과  $V_{out2}(t)$ 는 입력주파수에 관계없이 출력되는 신호의 위상은 항상 90°의 차이를 가지며 출력 신호의 크기는 입력주파수  $\omega = 1/RC$ 에 대해서만 동일한 값을 갖는다.<sup>[4]</sup>

이 때 두 경로상의 R, C 소자의 부정합으로 인하여 이득과 위상에 오차가 생길 수도 있는데, RC-CR 위상천이 네트워크는 대역폭이 제한되어 있다는 단점이 있다. RC-CR 위상천이 네트워크를 복수단으로 구성하여 R, C 부정합에 의한 이득과 위상 왜곡을 감소시킬 수 있는데, 본 연구에서는 대역 특성을 얻기 위해 R, C 소자값을 해당주파수에 맞추어 설계하였다.

### 2.3 윌킨슨 전력분배기 설계

I/Q 모듈레이터에서 RF 출력 신호는 두 믹서의 출력을 합하여 하나로 만들어 구현하여야 하기 때문에 본 논문에서는 윌킨슨 분배기를 결합기로 사용하였다. 그림 9는 설계된 윌킨슨 분배기의 회로도이다.

윌킨슨 전력분배기는 널리 사용되는 하이브리드형 분배기로 출력을 결합하면 전력결합기로도 사용할 수 있다. 이 회로는 50Ω 특성임피던스를 갖는 입력포트에

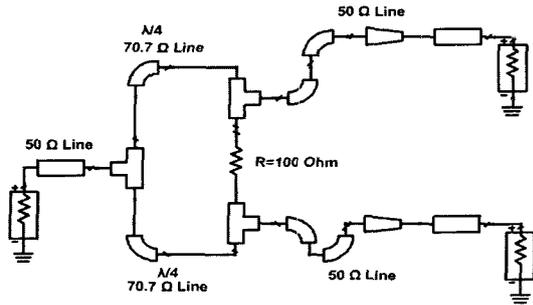


그림 9. 3dB 전력분배기 회로도.  
Fig. 9. 3dB power divider circuit.

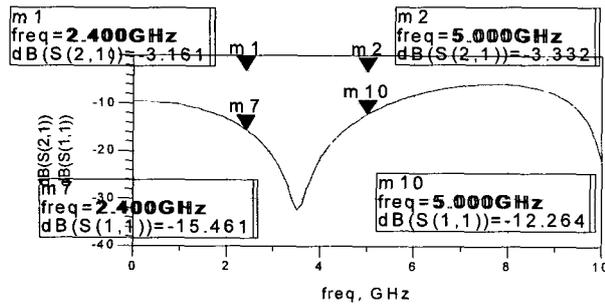


그림 10. 3dB 전력분배기 특성.  
Fig. 10. 3dB power divider characteristics.

전력을 인가하면 전력의 크기와 위상이 동일하게 분배되어 두 개의 출력포트에 나타나는데, 입력포트의 50Ω 특성 임피던스는 두 개의 100Ω 특성임피던스를 병렬로 연결한 것과 동가이므로 두 출력 포트의 부하저항을 50Ω이라 하면 주어진 결합기가 λ/4 선로를 사용하여 100Ω을 50Ω으로 정합하는 것으로 생각하므로 이를 이용하여 λ/4 선로의 특성 임피던스를 구할 수 있다. 그림 10은 설계된 3dB 전력분배기의 특성을 나타낸다. 두개 포트가 각각 최대 3.161dB, 3.332dB 변환 손실과 양호한 광대역 입력정합특성을 보여준다. 윌킨슨 분배기는 2.4/5.8 대역에서 10dB 이하의 반사손실과 0.1dB 이하의 이득의 차이를 나타낸다.

2.4 I/Q 모듈레이터 블록 설계

I/Q 모듈레이터는 위상천이기, 믹서, 전력 결합기등으로 구성되며, 무선 랜 대역에서 동작하는 I/Q 모듈레이터는 요구대역에서 90° 위상천이기와 광대역 특성을 가지는 믹서가 요구된다. LO 신호는 위상 천이기를 거쳐 90° 위상 차이를 갖는 두개의 신호로 분리된 후 각각 I, Q신호와 믹싱을 하여 그 두 개의 주파수를 결합하여 RF 출력대역 신호를 생성한다. I/Q 모듈레이터에서 LO 출력을 90° 위상 차이를 갖도록 분배하는 위상천이기는 특성상 이득 부정합(gain mismatch)와 위상

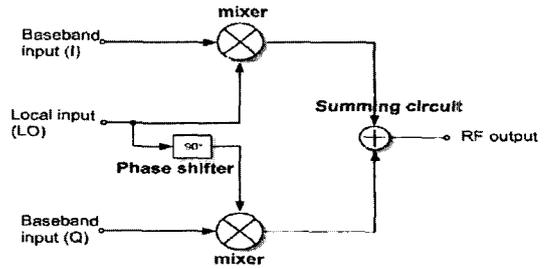


그림 11. I/Q 모듈레이터의 블록도.  
Fig. 11. Block diagram of I/Q modulator.

표 1. I/Q 모듈레이터의 출력  
Table 1. I/Q modulator output.

vbaseband	minus3BB	Pout_LSB	Pout_LO	Ptot_USB	plus3BB
0.100	-59.910	-47.928	-45.688	-26.689	-69.589
0.600	-57.475	-48.432	-43.503	-25.015	-68.062
1.000	-55.238	-47.605	-44.426	-25.078	-67.171
2.100	-54.451	-52.010	-43.865	-27.010	-65.877
3.100	-53.867	-53.076	-44.074	-28.688	-64.967
5.000	-52.051	-54.019	-44.218	-28.868	-62.156
8.000	-54.017	-58.402	-46.095	-29.015	-59.563
9.000	-54.423	-61.287	-49.576	-29.889	-56.834
10.000	-56.782	-64.817	-50.058	-29.279	-54.567

부정합(phase mismatch)이 발생한다. 모듈레이터에서 허용이 가능한 이득 불일치는 보통 2dB이내이며, 위상 부정합은 5° 이내이다. 무선 랜의 이중대역 또는 이와 유사한 넓은 주파수 대역에서 이득 정합과 위상 정합을 구현하는 것은 단일대역 설계 시 보다 매우 어렵기 때문에 이득 부정합과 위상 부정합은 각각 3dB, 5°이내로 요구하기도 한다.<sup>[4~5]</sup> 그림 9에 구현된 I/Q 모듈레이터의 블록도를 제시하였다.

I/Q 모듈레이터는 그림 11에 제시한 바와 같이 90° 위상천이기를 사용해서 LO 신호의 In-Phase 및 Quadrature-Phase 출력을 만들고, 이를 입력되는 베이스밴드 I/Q 신호와 각각 곱하여 그 출력을 결합하여 이미지가 없는 상향 변환 신호를 얻게 된다. 위의 모듈레이터의 동작 원리는 다음의 식으로 표현할 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$\sin(\omega_{LO} \cdot t)\cos(\omega_{IF} \cdot t) + \cos(\omega_{LO} \cdot t)\sin(\omega_{IF} \cdot t) = \sin((\omega_{LO} + \omega_{IF}) \cdot t)$$

본 연구에서는 애질런트의 ADS 시스템 시뮬레이터를 사용하여 앞에서 설계한 CMOS 믹서, 90° 위상천이 용 RC-CR 네트워크, 3dB 윌킨슨 분배기 회로를 결합하여 single sideband 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 베이스밴드 신호의 주파수를 바꾸어 가며 출력되는 I/Q 모듈레이터의 특성을 요약한 것이다.

IV. I/Q 모듈레이터의 제작 및 측정

제안한 I/Q 모듈레이터는 RC-CR 네트워크를 사용하여 90° 위상 천이 및 분배된 LO 신호를 두개의 믹서에 공급하여 베이스밴드 I신호와 Q신호를 LO신호와 믹싱하여 주파수 상향 변환한다. 시스템시뮬레이터 및 신호합성기를 이용하여 I신호와 Q신호를 생성하고, 신호발생기로 LO 신호를 입력하며, 스펙트럼 분석기와 네트워크 분석기, 벡터 신호 분석기 등을 이용하여 출력 신호 파형의 위상과 크기 등을 측정하였다. I/Q 모듈레

표 2. I/Q 모듈레이터의 주요 측정 데이터  
Table 2. Measured I/Q modulator data.

Result		
RF Freq	2.4GHz	5GHz
Conversion Loss	-18dB	-21dB
Carrier Rejection	-25dBc	-21dBc
Sideband Rejection	-21dBc	-23dBc
EVM	8%	9.5%
Harmonic Suppression	2.4 GHz	3rd:45dBc/5th:66dBc
	5GHz	3rd:42dBc/5th:63dBc

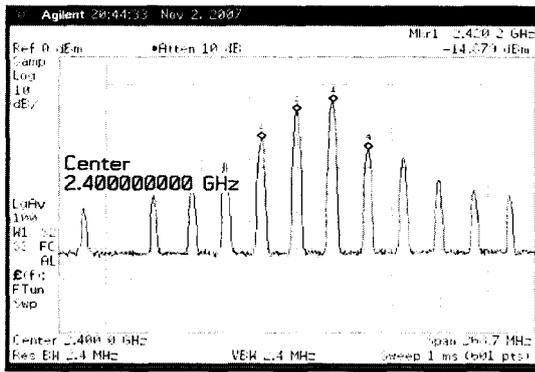


그림 12. I/Q 모듈레이터 출력 스펙트럼(SSB, 2.4 GHz)  
Fig. 12. I/Q modulator output spectrum(SSB, 2.4 GHz).

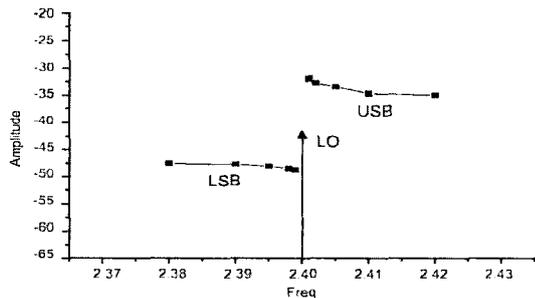


그림 13. IF 변화시 I/Q 모듈레이터 출력 스펙트럼.  
Fig. 13. I/Q modulator output spectrum with IF frequency.

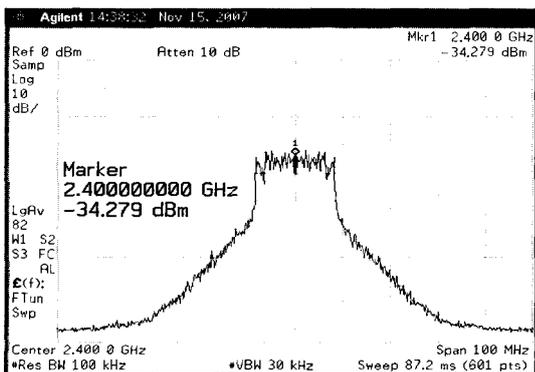


그림 14. 5GHz I/Q 모듈레이터 출력 스펙트럼.  
Fig. 14. 5GHz I/Q modulator spectrum.

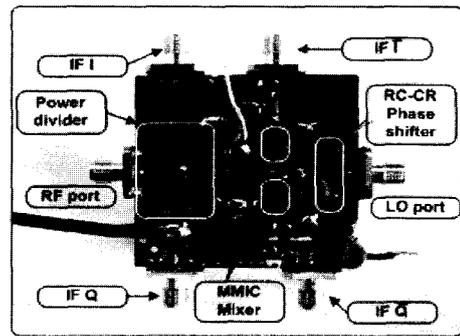


그림 15. 제작된 I/Q 모듈레이터  
Fig. 15. Fabricated I/Q modulator.

이터는 앞에서 설계한 TSMC 0.18 공정의 광대역 믹서 두 개를 이용하였고, 유전율이 3.4, 두께 1.5mm인 테플론 기판에 와이어본딩을 통해 제작 하였다. 그림 12는 2.4GHz SSB 신호 인가시의 모듈레이터 스펙트럼이고, 그림 13은 2.4GHz에서 베이스밴드(IF) 신호를 변화시켜 가며 측정한 출력 스펙트럼이다. 그림 14는 DSB신호인 실제 무선랜 베이스밴드 신호 인가시의 5GHz에서의 스펙트럼을 나타낸다. 표 2는 I/Q 모듈레이터의 측정결과이고 그림 15는 제작된 모듈레이터의 사진이다.

V. 결 론

본 논문에서는 이중대역 무선랜에서 활용이 가능한 I/Q 모듈레이터를 설계하기 위하여 0.18um CMOS공정을 이용한 광대역 능동 발룬과 이를 포함한 2.4GHz ~ 5GHz 대역에서 동작하는 광대역 상향 변환 믹서, 그리고 설계된 믹서를 와이어 본딩하여 하이브리드 형태로 회로 및 모듈레이터를 제작하였다. 설계된 I/Q 모듈레이터는 18~21dBc의 손실을 갖으며, 8~9.5%의 EVM 특성을 갖는다. 설계된 광대역 믹서와 I/Q 모듈레이터는 현재 활용되고 있는 무선랜 표준이 IEEE802.11a/g와 ISM대역의 응용 시스템에 사용될 수 있을 것으로 사료 된다.

## 참고문헌

- [1] J. Ryyanen, K. Kivekas, J. Jussia, A. Parssinen, and K. Halonen, "A dual-band RF front end for WCDMA and GSM applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.50, no.1, pp.288-301, Jan. 2002.
- [2] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4GHz Band, IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [3] D. G. Tucker, "The History of the Homodyne and Synchrodyne," Journal British Inst. Radio Engineers, vol. 14, no. 4, pp. 143-154, 1954.
- [4] S. Hwang, G. Moon, and S. Song, "A GHz I-Q Quadrature Signal Generator Using Cellular Oscillator Network", AP-ASIC '99, pp. 91-94, 1999.
- [5] N. Suematsu, C. Kageyama, K. Nakajima, K.Tsutsumi, E.Taniguchi, and K.Murakami, "0.8-5.2GHz Band SiGe MMIC Q-MOD for Multi-Band Multi-Mode Direct Conversion Transmitters," 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 1600-1603, 2005.
- [6] S. A. Mass, Microwave Mixer, Artech House. 1993.

## 저자 소개



박 현 우(학생회원)  
2006년 인천대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2006년~현재 인천대학교 대학원  
전자공학과 석사과정  
<주관심분야 : 마이크로파 회로  
및 모듈 설계, 이중대역 저잡음 증  
폭기 설계, RFIC 설계 >



구 경 현(정회원)-교신저자  
1981년 서울대학교 전자공학과  
학사.  
1991년 서울대학교 전자공학과  
박사.  
1999년~2000년 UC San Diego  
방문학자.  
2000년~2002년 대한전자공학회 마이크로파 및  
전파전파연구회 위원장.  
2003년~현재 대한전자공학회 평의원, 이사,  
통신 소사이어티 학술이사. 부회장, 회장  
1987년~현재 인천대학교 전자공학과 교수  
<주관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전  
력증폭기 설계 및 선형화, 레이다 전파신호처리>