

Near Zero IF를 갖는 2.4 GHz WLL 기지국용 하모닉 Cascode FET 혼합기 설계 및 제작

Design and Implementation of a Near Zero IF Sub-harmonic Cascode FET Mixer for 2.4 GHz WLL Base-Station

이 혁 · 정윤석 · 김정표 · 최재훈*

Hyok Lee · Youn-Suk Jeong · Jeong-Pyo Kim · Jea-Hoon Choi*

요 약

본 논문에서는 LO 신호의 2차 하모닉 성분을 이용하여 2개의 FET를 cascode 구조로 구성한 near zero IF 특성을 갖는 하모닉 혼합기를 설계, 제작하였다. 호모다인 방식에서 사용되는 혼합기는 DC offset이 가장 심각한 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 단자간 분리도를 좋게 하고 near zero IF를 사용하여 혼합기를 설계하였다. 본 논문에서 구현된 혼합기는 간결한 구조에 비해 LO-RF 단자간 분리도가 우수하다. 설계된 혼합기에서 RF 입력 전력 -30 dBm, LO 입력 전력 6 dBm에 대해, 변환이득은 6.7 dB, 잡음지수는 8.4 dB, LO-RF 단자간 분리도는 31.5 dB, IIP3는 -1.9 dBm, IIP2는 -2.8 dBm이다.

Abstract

In this paper, a near zero IF mixer was designed in cascode structure by using two single-gate FETs. Since it is driven by the second order harmonic of LO signal, a sub-harmonic cascode FET mixer has good LO-RF port isolation characteristic. In order to solve DC offset of a homodyne system, near zero IF is used instead of zero IF and the mixer is driven by sub-harmonic of LO signal. As RF input power was -30 dBm and LO power was 6 dBm, the designed mixer had 6.7 dB conversion gain, 8.4 dB noise figure, 31.5 dB LO-RF port isolation, -1.9 dBm IIP3 and -2.8 dBm IIP2.

Key words : Homodyne, Direct Conversion, Zero IF, Sub-Harmonic Mixer

I. 서 론

혼합기는 수신기에서는 RF(Radio Frequency) 신호를 IF(Intermediate Frequency) 신호로 하향 변환시키고, 송신기에서는 반대로 IF 신호를 RF 신호로 상향 변환시키는 주요 RF 부품이다.

그림 1의 헤테로다인 수신방식의 경우 2개의 혼합기를 사용해 1차 혼합기로 RF 신호를 IF 신호로 변환하고, 2차 혼합기를 이용해 IF 신호를 다시 기

저 대역까지 하향 변환시킨다. 이와 비교해 그림 2의 호모다인(zero IF) 수신기의 경우 한 개의 혼합기만을 사용하여 RF 신호를 기저 대역까지 한번에 하향 변환시킨다. 호모다인(Homodyne, Direct conversion) 수신방식은 zero IF를 사용하기 때문에 이미지 제거 필터와 IF 필터가 필요하지 않다. 따라서 시스템 구조가 간단해지고, 낮은 전력으로도 구동이 가능해지며, 소규모, 저전력 특성을 통해 가격경쟁력을 갖출 수 있다. 또한, 헤테로다인 방식에서는 각

「본 연구는 2002년도 대학 IT 연구센터(HY-SDR 연구센터) 육성·지원 사업의 연구결과로 수행되었음.
한양대학교 전자통신전파공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University)
*한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University)
· 논문 번호 : 20021221-178
· 수정완료일자 : 2003년 3월 5일

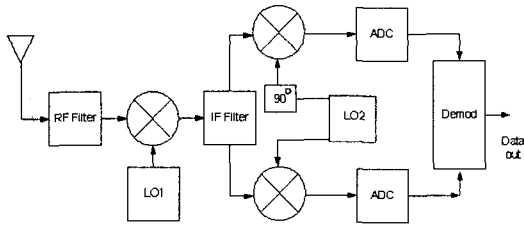


그림 1. 헤테로다인 수신방식
Fig. 1. Heterodyne receiver.

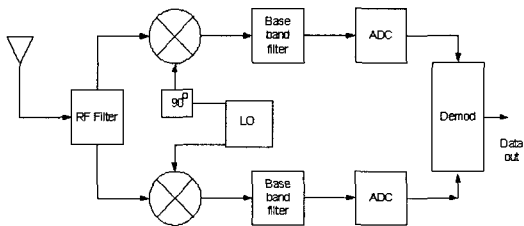


그림 2. 호모다인 수신방식
Fig. 2. Homodyne receiver.

각의 채널과 대역폭 등에 따른 다른 규격의 SAW 필터가 필요하지만 zero IF인 호모다인 방식에서는 일정한 기저대역 필터만으로 모든 채널에 대해 규격화 시킬 수 있다. 이런 이유들 때문에 최근 호모다인 방식에 대한 관심이 높아지고 있으며, 시스템 구현을 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다.

그러나 호모다인 방식은 DC offset, I/Q 불균형, 2차 왜곡, flicker 잡음 등의 문제점을 안고 있다. 이 중 가장 심각한 문제가 그림 3에서 보는 바와 같이 RF와 LO(Local Oscillator) 주파수가 비슷한 경우

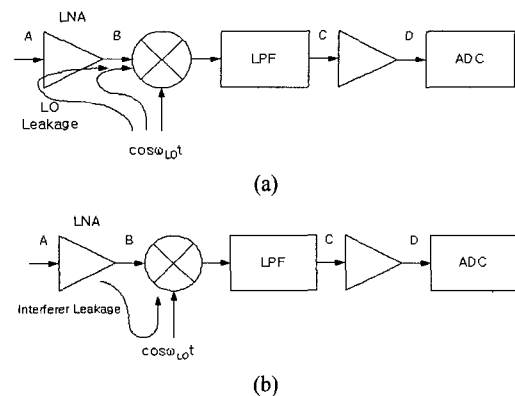


그림 3. (a) LO 신호, (b) 간섭 신호에 의한 자가혼합
Fig. 3. Self-mixing of (a) LO signal, (b) a strong interferer.

LO 신호가 RF 입력 단자로 누설되거나 RF의 간섭 신호가 LO 입력 단자로 누설되어 발생하는 DC offset이다^{[1],[2]}.

이러한 DC offset 문제점을 해결하기 위해 여러 방법들이 연구되고 있다^[2]. 본 논문에서는 DC offset 문제점을 해결하기 위해 2가지 방법을 사용하였다. 첫째, 완전한 zero IF가 아닌 near zero IF를 사용하였다. 둘째, LO 신호의 2차 고조파 성분과 cascode FET 구조의 사용으로 단자간 분리도를 향상시켜 누설 전력을 줄이고자 하였다. 이때, 하모닉 cascode FET 혼합기는 2개의 ATF-54143을 cascode 구조로 구성하였고, Agilent-ADS^[3]를 이용하여 설계하였다.

II. 하모닉 Cascode FET 혼합기의 이론

2-1 혼합기의 동작원리

Cascode FET 혼합기는 그 모델을 정확히 만드는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 그림 4와 같이 single-gate FET의 cascode 구조로 해석한다^[4].

일반적으로 cascode FET 혼합기는 FET1은 선형 영역에서 동작하고 FET2는 포화영역에서 동작한다. 이는 전달 컨덕턴스와 드레인-소스 컨덕턴스의 비선형성을 이용한 것으로, LO 신호에 의해 FET1의 드레인 전압이 강제적으로 변하면서 주파수 혼합 동작을 한다. FET1의 드레인 전압이 낮으면 전달 컨덕턴스가 낮아지고, 드레인-소스 컨덕턴스는 커진다. 또한 FET1의 드레인 전압이 높아짐에 따라

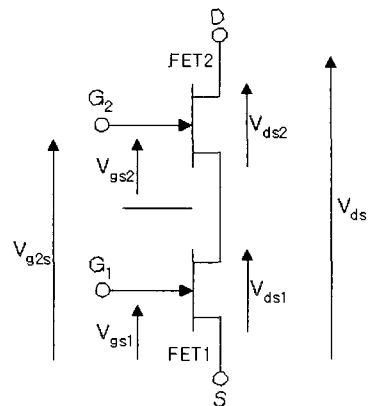


그림 4. Cascode FET 구조
Fig. 4. Cascode FET structure.

FET1은 포화 영역으로 들어가고 전달 컨덕턴스는 비교적 커지며, 드레인-소스 컨덕턴스는 작아진다. FET2는 포화 영역에서 동작을 하기 때문에 IF 신호에 대한 증폭기로서의 역할 뿐만 아니라 LO 신호에 대해서는 소스 폴로워로서 동작을 하여 드레인 전류를 증폭시킨다. 따라서 낮은 LO 전력으로도 FET1을 구동시킬 수 있고, FET2를 이용하여 변환 이득을 크게 함과 동시에 LO 신호의 RF 신호에 대한 간섭을 줄일 수 있다⁵⁾.

2-2 하모닉 혼합기

하모닉 혼합기는 밀리미터파 대역에서 하향 변환시킬 때 낮은 LO 주파수를 이용하기 위해 많이 사용되었고, 최근에는 호모다인 방식에서 DC offset 특성을 개선하기 위한 방안으로 연구되고 있으며, 실리콘 bipolar 기술에서는 PWM(Pulse Width Modulation)을 이용한 저주파수 응용에 이용되고 있다⁶⁾.

일반적인 하향 변환 방식에서 혼합기의 출력 주파수는 $IF = RF - LO$ 와 같다. 하지만 단일 종단 혼합기의 경우 그 구조가 간단한 반면 RF 신호의 주파수와 LO 신호의 주파수가 인접하여 있기 때문에 단자간 분리도 특성이 좋지 않다. 그리고 이를 보상하기 위해 결합기나 필터를 사용한다.

반면에 고조파 성분을 이용한 혼합기의 출력 주파수는 $IF = RF - 2LO$ 와 같다. 따라서 RF 신호 주파수와 LO 신호 주파수는 $IF + LO$ 의 이격을 갖고 동작하게 된다. 이는 단순히 뛰어난 단자간 분리도 뿐만 아니라 보다 낮은 주파수의 LO 신호에 따른 낮은 잡음과 적당한 전력으로 발진기를 구동하는 장점이 있다⁷⁾.

III. 혼합기 설계 및 제작

3-1 하모닉 cascode FET 혼합기 설계

본 논문에서는 Agilent사의 ATF-54143 FET 2개를 cascode 구조로 연결하여 혼합기를 설계하였다. FET1은 선형영역에서 동작하고 FET2는 포화영역에서 동작하도록 $V_{DD} = 2.9\text{ V}$, $I_D = 27.2\text{ mA}$ 의 바이어스를 인가하였다. 설계 주파수는 RF 신호는 2,320 MHz, LO 신호는 1,156 MHz, IF 신호는 8 MHz로 WLL 기지국 수신 주파수로 선정하였다. 그리고 게

이트 1에는 RF 신호를, 게이트 2에는 LO 신호를 인가하여 주파수를 하향 변환시켰다.

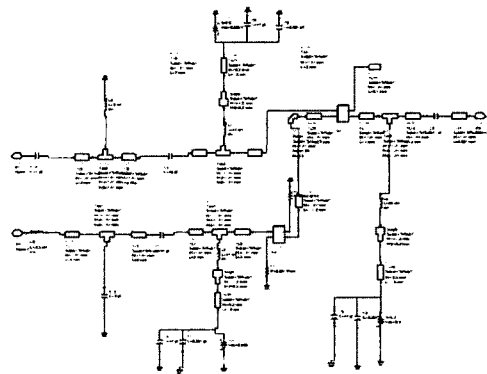
3-2 제작한 하모닉 cascode FET 혼합기의 특성

설계하고 제작한 하모닉 cascode FET 혼합기는 그림 5와 같다.

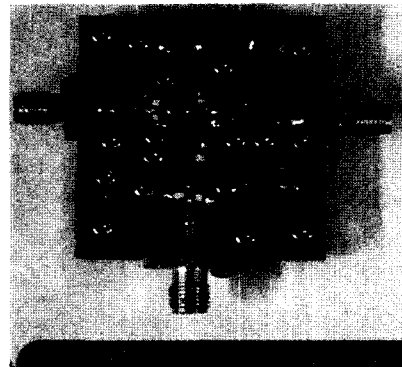
LO 전력은 6 dBm, RF 전력은 -30 dBm을 인가하였을 때 혼합기를 거쳐 출력된 8 MHz의 IF 출력은 그림 6에 나타내었다.

8 MHz IF 주파수에서 시뮬레이션 한 출력 전력은 -20.4 dBm, 측정된 결과는 -23.28 dBm으로 혼합기의 이득은 각각 9.6 dB, 6.72 dB이다. 이득이 발생하는 것은 다이오드를 사용한 수동회로와 비교해 FET를 사용한 능동회로의 장점이다.

혼합기는 RF 단에 2톤의 신호를 인가하였을 때 3



(a)



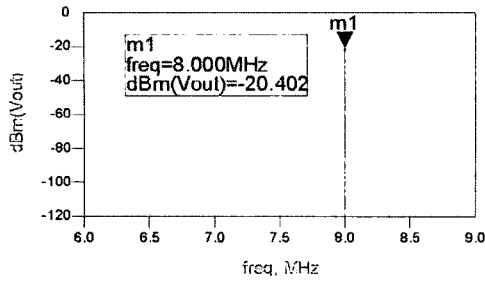
(b)

그림 5. Cascode FET 혼합기

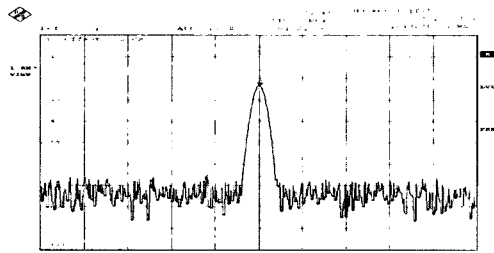
(a) 시뮬레이션된 회로, (b) 제작된 회로

Fig. 5. Cascode FET mixer.

(a) simulated circuit, (b) manufactured circuit



(a)



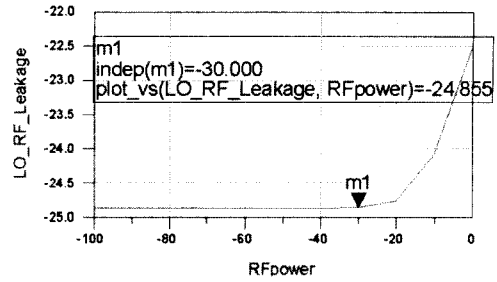
(b)

그림 6. IF출력 전력

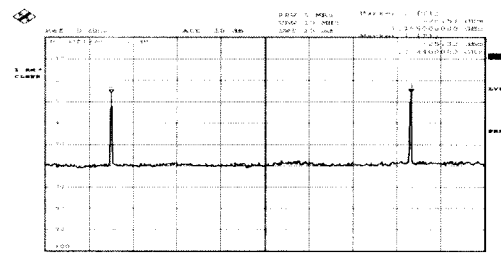
(a) 시뮬레이션, (b) 측정

Fig. 6. IF output power.

(a) simulation, (b) measurement



(a)



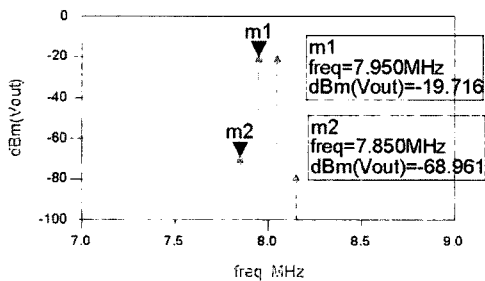
(b)

그림 8. RF단으로 흐르는 LO출력, 2LO출력

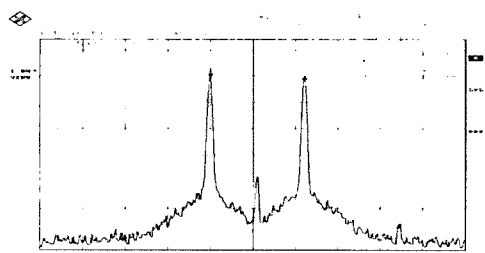
(a) 시뮬레이션, (b) 측정

Fig. 8. LO, 2LO leakage power to RF port.

(a) simulation, (b) measurement



(a)



(b)

그림 7. IIP3 특성

(a) 시뮬레이션, (b) 측정

Fig. 7. Characteristic of IIP3.

(a) simulation, (b) measurement

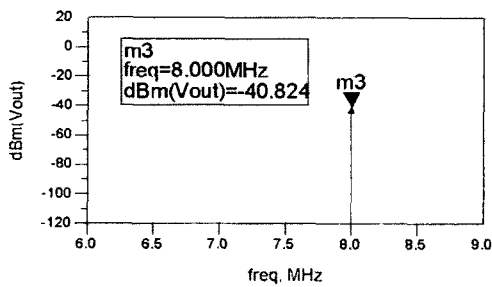
차 IM(intermodulation) 성분이 발생한다. 이것은 원하는 8 MHz의 IF 신호에 대한 잡음이므로 제거시켜야 하는 중요한 요소가 된다. 그림 7은 혼합기 출력에서 본 2톤의 신호와 3차 IM 성분을 나타낸다. 시뮬레이션한 값으로 계산된 IIP3는 -5.37 dBm이고 측정된 값으로 계산된 IIP3는 -1.9 dBm이다. 측정시 3차 하모닉 성분들이 잡음에 묻혀 잘 보이지 않아 가장 좋지 않은 때의 값을 채택한 것이기에 실제로는 더 높은 값을 얻을 수 있다.

그림 8은 LO-RF 단자간 분리도 측정을 위하여 LO 신호가 RF 단으로 흘러가는 성분을 나타낸 것이다. 시뮬레이션에서의 LO-to-RF 단의 누설 전력은 -24.85 dBm이고 측정을 통해 나타난 LO-to-RF 단의 누설 전력은 -25.51 dBm, 2차 고조파 성분의 LO-to-RF단의 누설 전력은 -25.32 dBm이다.

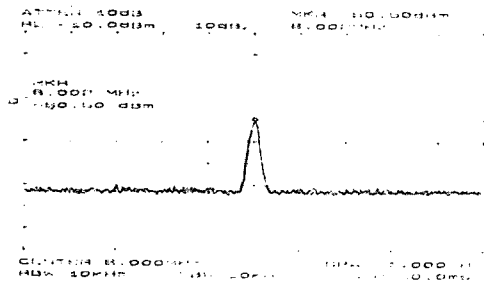
일반적인 혼합기의 경우와 달리 호모다인 방식에서는 낮은 주파수의 IF를 사용하기 때문에 인접 대역의 간섭신호가 혼합기를 통해 들어와서 생기는 2차 왜곡 신호가 문제가 된다. 출력 IF가 8 MHz이기 때문에 8 MHz의 차이를 갖는 간섭신호가 2차 왜곡

신호가 된다. 중심 주파수를 8 MHz로 택한 것은 간섭신호에 영향을 덜 받는 가장 높은 주파수이면서도 디지털 신호처리 부에서 표본화가 쉬운 낮은 주파수를 갖도록 하기 위함이다. 결국 중심주파수의 결정은 DC 성분인 0주파수 값에 가까우면서도 2차 간섭 신호의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다.

그림 9는 IM2 신호의 출력 전력을 나타낸다. 시뮬레이션 한 IF 출력 전력이 -20.4 dBm, IM2 출력 전력이 -40.8 dBm이고, 이로부터 계산된 IIP2는



(a)



(b)

그림 9. IM2 출력 전력
(a) 시뮬레이션, (b) 측정

Fig. 9. IM2 output power.
(a) simulation, (b) measurement

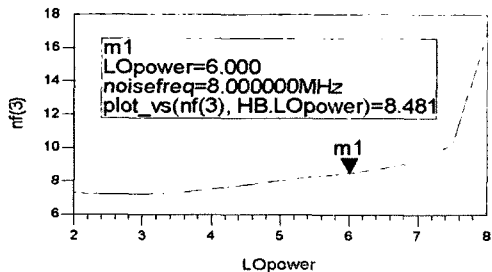


그림 10. LO 전력변화에 따른 잡음지수
Fig. 10. Noise figure for LO power.

-9.6 dBm이다. 측정된 IF 출력 전력이 -23.28 dBm, IM2 출력 전력이 -50.5 dBm이고, 이로부터 계산된 IIP2 값은 -2.8 dBm이다.

그림 10은 LO 신호의 전력 변화에 따른 잡음지수를 나타내었다. 일반적으로 IF 출력 전력이 최대가 되는 LO 전력보다는 잡음지수가 최소가 되도록 LO 전력을 정한다. 하지만 때로는 선형성을 향상시키기 위해서 다른 LO 전력을 선택할 수도 있다. 본 논문에서는 선형성 향상을 위해 6 dBm의 LO 전력을 선택하였다. 이 때의 잡음 지수는 8.48 dB이다.

그림 11은 시뮬레이션한 1 dB compression point에서의 입력 전력 P_{-1dB} 를 나타내었다. 이때, 입력 전력 P_{-1dB} 는 -13.6 dBm이다. 이와 비교해 측정된 입력 전력 P_{-1dB} 는 -6 dBm으로 비교적 좋은 값을 얻을 수 있었다.

혼합기의 출력 단에는 IF 신호, RF 신호, LO 신호 뿐만 아니라 여러 고조파 성분 등 불필요한 주파수 성분도 나타나게 된다. 따라서 이러한 불필요한 성분들을 제거하는 과정이 필요하다. 특히 본 논문에서는 고조파 성분을 이용하여 주파수를 하향 변환하기 때문에 RF-2LO 성분보다 RF-LO 성분의 에너지가 크다. 결국 IF 필터의 성능이 매우 중요하다. IF 단의 저역 통과 필터는 고조파를 제거하고, 단자간 분리도를 향상시킨다. 그리고 기본파를 제외한 고조파들의 출력을 제한하여 출력의 신호 대 잡음 비를 높임으로써 잡음지수를 낮게 한다. 그러므로 각 단과 IF 단과의 분리는 차후에 저역 통과 필터의 사용을 통해 향상시킬 수 있다.

표 1은 제작한 혼합기의 측정 결과와 시뮬레이션한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 측정한 결과가 이득은 낮지만 IIP3, IIP2, Input P_{-1dB} 의 값이 높다.

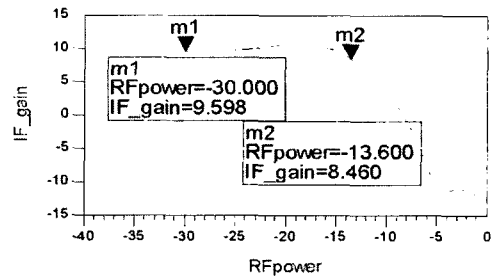


그림 11. 입력 전력 P_{-1dB}
Fig. 11. Input power P_{-1dB} .

표 1. 제작한 혼합기의 특성

Table 1. Characteristics of a designed mixer.

	시뮬레이션값	측정 값
RF frequency (MHz)	2320 (2310~2330: WLL)	
LO frequency (MHz)	1156 (1151~1161)	
IF frequency (MHz)	8 (RF-2LO)	
RF power (dBm)	-30	
LO power (dBm)	6	
IF power (dBm)	-20.4	-23.28
Conversion gain (dB)	9.6	6.72
IIP3 (dBm)	-5.37	-1.9
IIP2 (dBm)	-9.6	-2.8
Noise figure (dB)	8.48	
Input P _{1dB} (dBm)	-13.6	-6
LO-RF port isolation (dB)	30.85(LO)	31.51(LO) 31.32(2LO)

이것은 실제 제작한 혼합기를 선형성 향상에 초점을 맞추어 튜닝하였기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 LO-RF 단자간 분리도 특성을 향상시키기 위해 LO 신호의 2차 고조파를 이용하였으며 2개의 FET를 cascode 구조로 연결하였다. 또한 향상된 단자간 분리도 특성과 near zero IF의 사용을 통해 DC offset 문제를 해결하고자 하였다.

설계된 혼합기의 측정결과는, 변환이득은 6.7 dB, 잡음지수는 8.4 dB, LO-RF 단자간 분리도는 31.5 dB(LO), 31.3 dB(2LO), IIP3는 -1.9 dBm, IIP2는 -2.8 dBm이다. 이런 결과들은 일반적인 헤테로다인 수신기에서 사용되는 혼합기 특성과 큰 차이가

없다. 그러나 본 논문에서 설계 제작한 near zero IF 하모닉 혼합기는 2개의 혼합기를 사용하는 헤테로다인 수신 방식과 비교해 기저대역에 가까운 출력 IF 신호를 갖는 단일 혼합기로서 호모다인의 수신 방식의 DC offset 문제를 해결하면서 호모다인 수신 방식의 장점인 회로의 단순화, 낮은 전력소모, 비용의 효율성 등에 크게 기인할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] B. Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 1998.
- [2] S. G. Lee, V. Krizhanovskii, "Technology trends in direct conversion receivers", *전자공학회지*, 29(9), pp. 1050-1069, 2002년.
- [3] *Agilent-Advanced Design System 2001*, Agilent Technologies, 2001.
- [4] S. A. Maas, *Microwave Mixer*, Artech House, Boston, 1993.
- [5] T. Christos, M. Roman and S. Rainer, "Dual-gate MESFET mixers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 248-255, 1984.
- [6] S. Liwei, C. J. Jonathan and E. L. Lawrence, "A wide-bandwidth Si/SiGe HBT direct conversion sub-harmonic mixer / down-converter", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 9, pp. 1329-1337, Sep. 2000.
- [7] A. C. Azevedo Dias, D. Consonni and M. A. Luqueze, "High isolation sub-harmonic mixer", *SBMO/IEEE MTT-S IMOC '99. proceedings*, vol. 2, pp. 378-381, 1999.

이 혁



2001년 2월: 한양대학교 전자전기
컴퓨터공학부 (공학사)
2003년 2월: 한양대학교 전자통신
전파공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재: LG 정보통신
[주 관심분야] 마이크로파 소자 및
시스템 설계

김 정 표



2000년 2월: 제주대학교 통신공학
과 (공학사)
2002년 2월: 한양대학교 전자통신
전파공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재: 한양대학교 전
자통신전파공학과 박사과정
[주 관심분야] 마이크로파 소자 및
시스템, 전자파 수치해석, 안테나 설계

정 윤 석



1998년 2월: 한양대학교 전파공학
과 (공학사)
1998년 3월~2002년 5월: 삼성전
자
2001년 9월~현재: 한양대학교 전
자통신전파공학과 석사과정
2002년 6월~현재: LG 전자

[주 관심분야] 마이크로파 소자 및 시스템 설계

최 재 훈



1980년: 한양대학교 전자공학과
(공학사)
1986년: 미국 Ohio State University
전기공학과 (공학석사)
1989년: 미국 Ohio State University
전기공학과 (공학박사)
1989년~1991년: 미국 Arizona
state University 연구교수

1991년~1995년: 한국통신 위성사업본부 연구팀장
1995년~현재: 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수
[주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 소자 설계, EMC