

논문 2008-45SD-4-13

2.4 GHz 저전력 차동 직접 변환 CMOS RF 수신기를 위한 새로운 하이브리드 발룬 회로

(A Novel Hybrid Balun Circuit for 2.4 GHz Low-Power
Fully-differential CMOS RF Direct Conversion Receiver)

장 신 일*, 박 주 봉**, 신 현 철***

(Shinil Chang, Jubong Park, and Hyunchol Shin)

요 약

2.4 GHz 대역 완전차동 직접변환 수신기를 위한 저전력, 저잡음, 고선형성을 가지는 새로운 구조의 하이브리드 발룬(Hybrid Balun) 회로를 제안한다. 제안된 하이브리드 발룬은 수동형 트랜스포머(Passive Transformer)와 손실 보상용 보조 증폭기(Loss-compensating Auxiliary Amplifiers)로 구성된다. 트랜스포머와 보상용 증폭기 사이의 신호의 분리와 결합에 대한 설계 이슈들을 제시하였다. 0.18 μm 공정으로 제작된 하이브리드 발룬은 수동형 발룬에 비해 2.4 GHz 대역에서 이득은 2.8 dB 높고 잡음지수는 1.9 dB 낮으며, 측정된 IIP3는 +23 dBm 이다. 전체 전력소모는 1.2 V 전원 전압에서 0.67 mA로서 저전력으로 구현되었다. 하이브리드 발룬 기술을 적용하여 설계된 무선센서노드용 CMOS 직접변환 수신기는 수동형 발룬을 사용했을 때 비해 0.82 mW의 추가 전력소모만으로 전체 잡음 지수를 현저히 낮출 수 있음을 확인하였다.

Abstract

A low-power, low-noise, highly-linear hybrid balun circuit is proposed for 2.4-GHz fully differential CMOS direct conversion receivers. The hybrid balun is composed of a passive transformer and loss-compensating auxiliary amplifiers. Design issues regarding the optimal signal splitting and coupling between the transformer and compensating amplifiers are discussed. Implemented in 0.18 μm CMOS process, the 2.4 GHz hybrid balun achieves 2.8 dB higher gain and 1.9 dB lower noise figure than its passive counterpart and +23 dBm of IIP3 only at a current consumption of 0.67 mA from 1.2 V supply. It is also examined that the hybrid balun can remarkably lower the total noise figure of a 2.4 GHz fully differential RF receiver only at a cost of 0.82 mW additional power dissipation.

Keywords : Balun, Receiver, CMOS, RFIC.

I. 서 론

유비쿼터스 통신을 위한 무선송수신기를 구현하기

* 학생회원, *** 평생회원, 광운대학교 전파공학과
(Radio Science and Engineering Dept., Kwangwoon University)

** 정회원, PHYCHIPS
(PHYCHIPS Inc., Daejeon, Korea)

※ 본 연구는 서울시 기술기반구축사업(GR070039) 및 2007년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

접수일자: 2007년11월26일, 수정완료일: 2008년3월31일

위해서는 저전력 CMOS RF 집적회로가 필수적이다. 최근에는 CMOS RF 송수신기 집적회로와 디지털 모뎀 회로를 한 칩에 집적하는 SoC (System on a Chip) 형태로 구현하는 것이 기술진보의 방향이다.^[1] 이 경우 디지털 집적회로에서 발생하는 스위칭 잡음이 미세한 신호를 처리하는 RF 저잡음 증폭기에 심각한 영향을 줄 수 있음은 많이 알려져 있다. 이를 극복하기 위해 저잡음 증폭기 앞단에 발룬을 추가함으로써 저잡음 증폭기를 완전 차동형 (Fully Differential)으로 구현하면 동상 잡음 (Common-mode noise)을 효과적으로 제거 할 수

있다.

일반적으로 발룬은 두 가지 종류가 있다. 첫째로 수동형 발룬(Passive Balun)은 트랜스포머로 구현된다. 예를 들어 한 칩에 트랜스포머 발룬을 집적한 2.4 GHz CMOS Bluetooth 수신기가 보고된 바 있다.^[2] 일반적으로 On-chip 트랜스포머는 무한한 선형성과 광대역에서 아주 좋은 성능의 대칭성을 제공하며 전류 소모가 없다는 것이 장점이다. 그러나 신호의 전달 손실이 커서 (일반적으로 2~4 dB) 전체 RF 수신단의 수신 감도와 잡음지수를 열화시킨다. 일반적인 RF 수신기의 잡음지수가 5~8 dB 인 것을 고려해 볼 때 RFIC 설계자들이 수동형 발룬의 2~4 dB 손실을 떠안기에는 큰 부담이 될 수 있다. 이러한 이유로 많은 RF 수신기들은 여전히 낮은 손실을 갖는 외부 발룬을 사용한다.^[3-4] 이런 경우 단일 칩 집적이 불가능하고 생산 단가의 상승을 가져온다. 반면에 능동형 발룬(Active Balun)의 경우에는 신호의 이득을 얻을 수 있어서 손실을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.^[5] 그러나 능동 소자를 이용함으로써 인해 과도한 전력을 소비하게 되고 차동신호의 대칭성이 수동형 발룬에 비해 좋지 않은 단점이 있다. 또한, 능동형 발룬은 트랜지스터를 포함하고 있기 때문에 선형성에도 제한을 가지게 된다. 이러한 모든 면을 고려해 보았을 때 수동형 발룬의 삽입 손실 문제가 해결된다면 일반적으로 능동형 발룬보다는 수동형 발룬이 우수하다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 수동형 발룬에 손실 보상용 증폭기를 추가하여 새로운 구조의 발룬의 제안하고 이를 하이브리드 발룬(Hybrid Balun)이라고 명칭 하였다. 하이브리드 발룬은 트랜스포머로 대부분의 신호를 전달하여 신호의 대칭성과 선형성은 수동형 발룬의 성능을 거의 유지하게 되고 손실 보상용 증폭기로 삽입 손실은 상당히 낮아진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 새로운 하이브리드 발룬에 대한 개념과 설계에 대하여 기술하였고 시뮬레이션을 통하여 수동형 발룬과 비교하였다. III장에서는 실험 결과에 대해서 기술하였다. IV장에서는 결론을 맺는다.

II. 하이브리드 발룬

1. 개념 및 설계

그림 1은 하이브리드 발룬의 기본 개념을 보여준다. 수동형 발룬은 일반적으로 능동형 발룬 보다 신호에 대

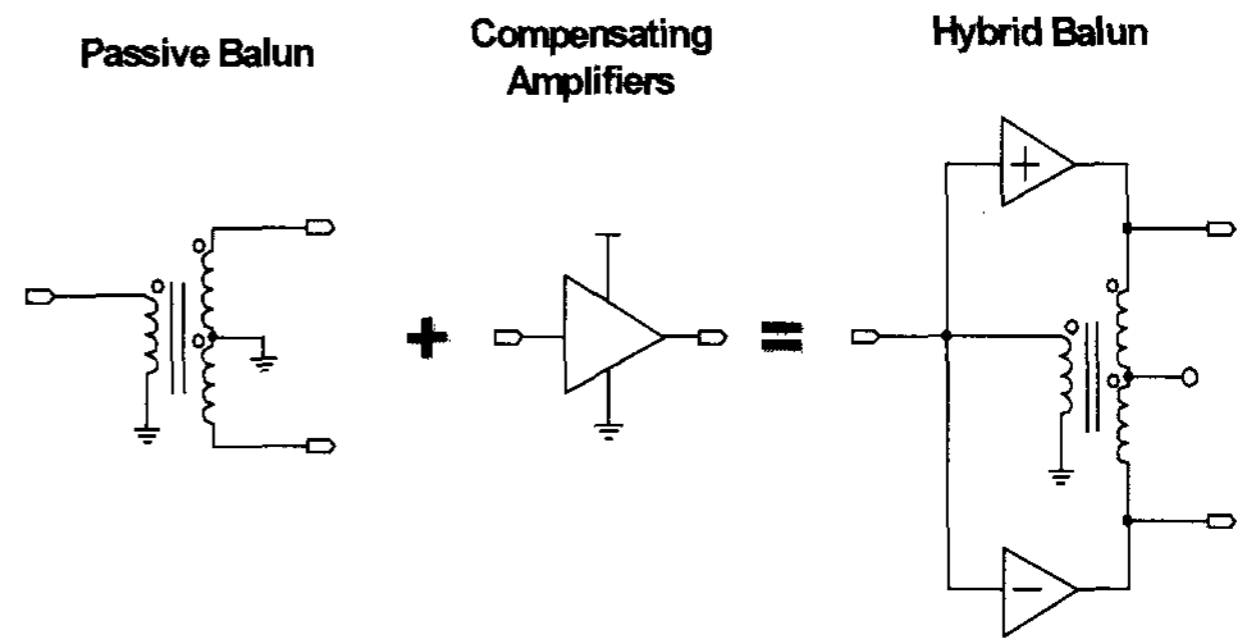


그림 1. 하이브리드 발룬의 기본 개념
Fig. 1. Basic idea of hybrid balun.

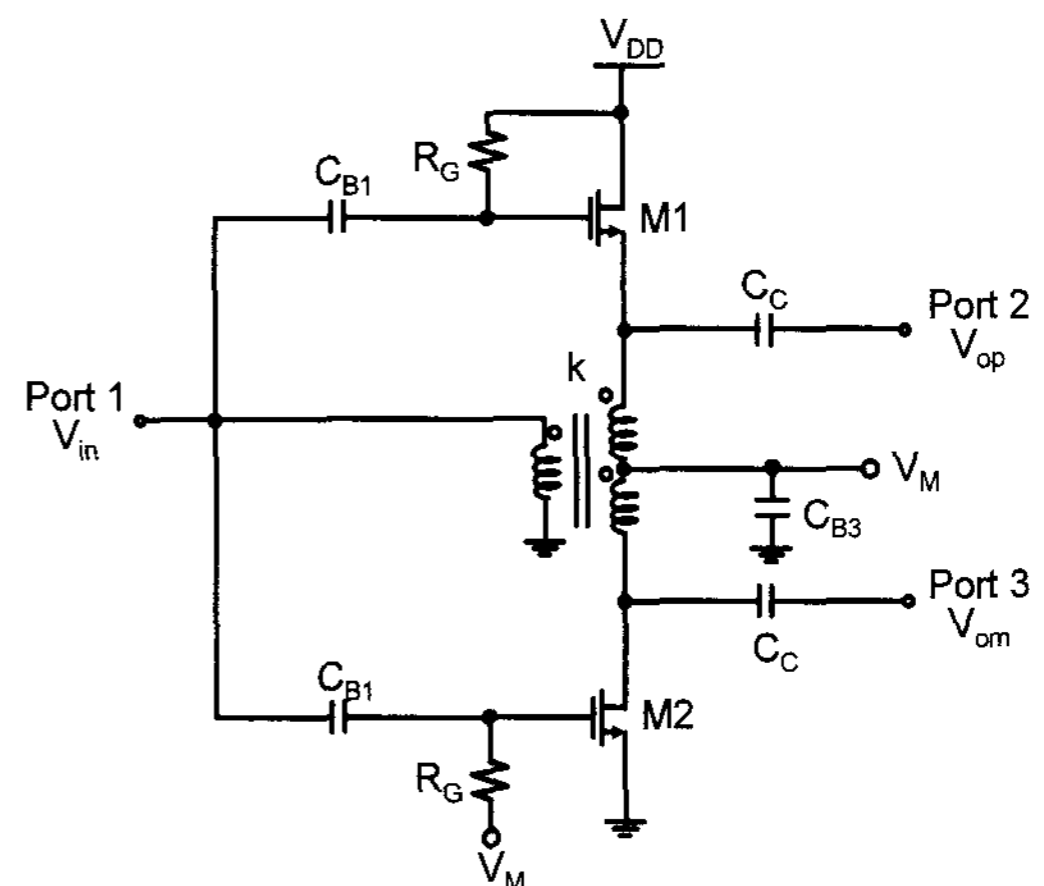


그림 2. 하이브리드 발룬 회로도
Fig. 2. Circuit schematic of a hybrid balun.

한 대칭성과 선형성이 뛰어나기 때문에 single-to-differential 변환을 위한 대부분의 RF 신호는 트랜스포머를 이용한 수동형 발룬으로 처리된다. 이때 트랜스포머의 높은 삽입 손실은 트랜스포머에 의해서 발생하는 차동신호와 적절하게 위상이 결합된 보상용 증폭기들에 의해 보상된다.

그림 2는 하이브리드 발룬 회로도이다. common-drain (M1)과 common-source (M2) 증폭기들은 각각 동위상과 역위상 신호를 보상하는 역할을 하게 된다. 그리고 트랜스포머의 인덕턴스는 보상용 증폭기의 부하 역할을 하게 된다.

그림 3은 신호의 흐름도를 통하여 손실이 보상되는 메커니즘을 설명한다. 하이브리드 발룬에 RF 신호가 인가 되면 트랜스포머의 동위상 출력은 common-drain 증폭기를 지난 신호와 결합하여 전체 동위상 출력을 만들고 반면 트랜스포머의 역위상 출력은 common-source 증폭기를 지난 신호와 결합하여 전체 역위상 출력을 만든다. 그리고 두개의 보상용 증폭기들의 바이어스 전류는 하이브리드의 전체 전류소모를 줄이기 위해

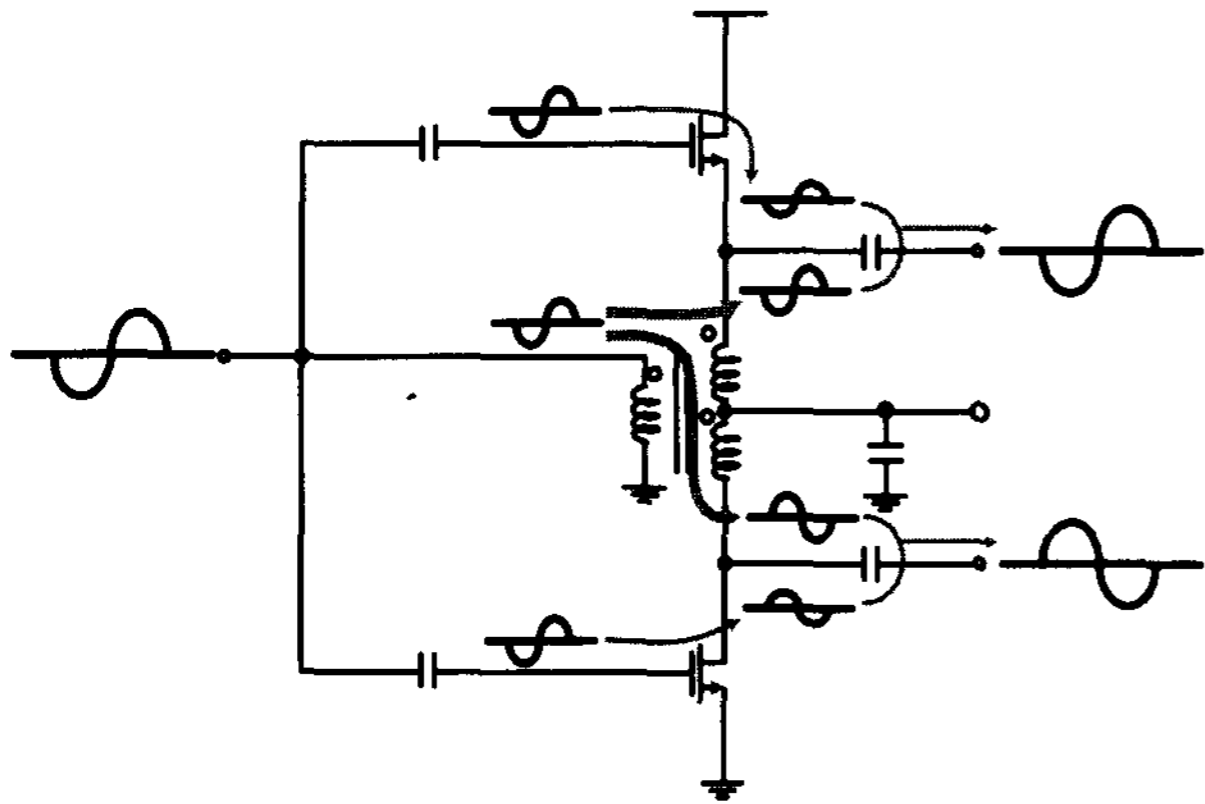


그림 3. 하이브리드 발룬의 RF 신호 흐름도
Fig. 3. RF signal flow diagram in hybrid balun.

공유하게 된다.

하이브리드 발룬은 수동형 발룬이 가진 기존의 장점들을 그대로 유지하면서 삽입 손실로 생기는 문제점을 보상용 증폭기를 통하여 해결 하였다. 대부분의 신호 전달은 트랜스포머를 통하여 유지되는 반면 보상용 증폭기는 입력 신호 파워의 작은 일부만을 사용하게 된다. 이러한 특성들은 시뮬레이션을 통하여 확인 하였다.

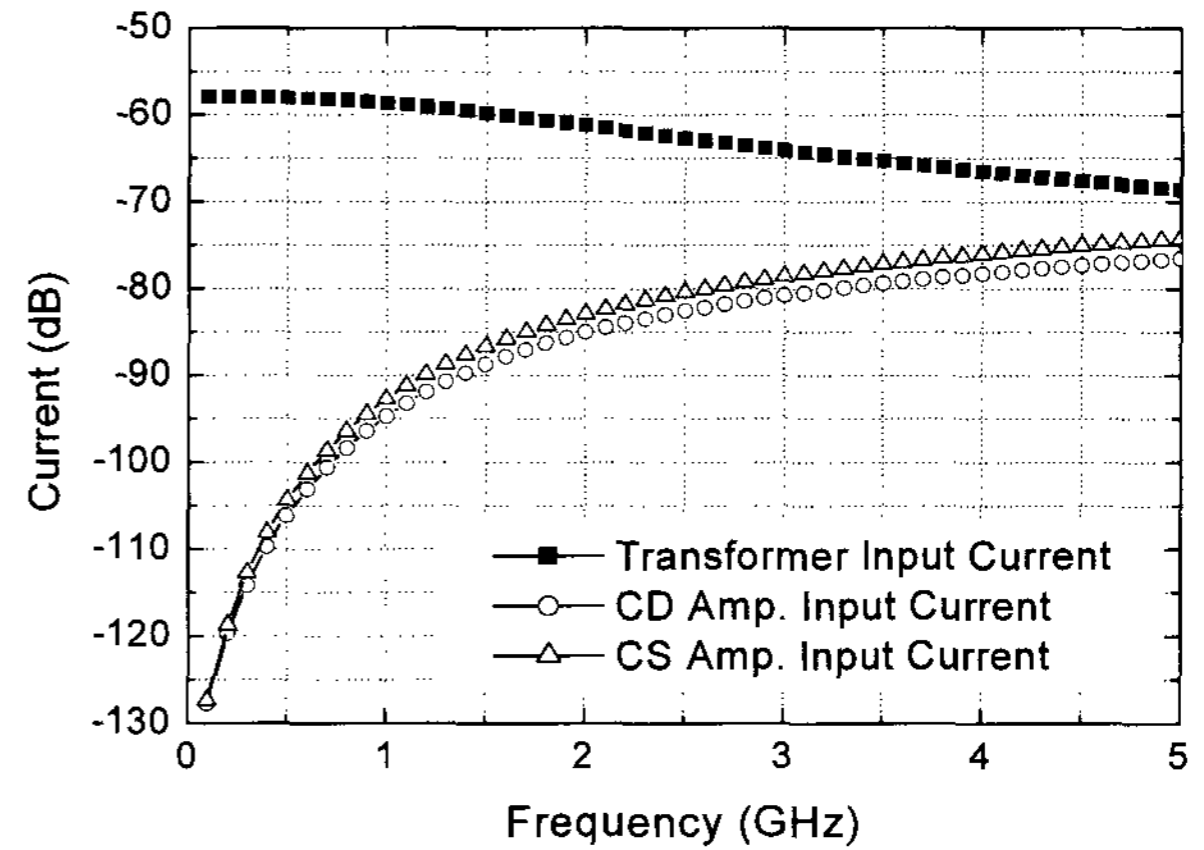
그림 4(a)에서 볼 수 있듯이, 보상용 증폭기에 전달되는 입력 RF 신호 전류는 수동형 발룬에 전달되는 전류보다 2.4 GHz에서 거의 20 dB 낮은 것으로 나타났다. 이 결과는 거의 모든 입력 신호 전력이 트랜스포머에 전달되는 반면 입력 신호 전력의 단지 10%만이 보상용 증폭기에 들어가 처리 된다는 것을 나타낸다. 따라서 앞에서 언급한 것과 같이 하이브리드 발룬은 기존의 능동형 발룬 보다 대칭성과 선형성 면에서 좋은 특성을 가지는 수동형 발룬의 거의 모든 특성을 그대로 유지 한다는 것을 예상 할 수 있다.

그림 4(b)는 코어 트랜스포머와 보상용 증폭기로부터 전달되는 신호의 위상 차이를 보여 준다. 보상용 증폭기의 입력 임피던스를 최적화시켜서 2.4 GHz에서 위상 차이를 약 15° 정도로 얻을 수 있다. 이론적으로, 하이브리드 발룬의 전체 이득은 식(1)에 의해 주어진다.

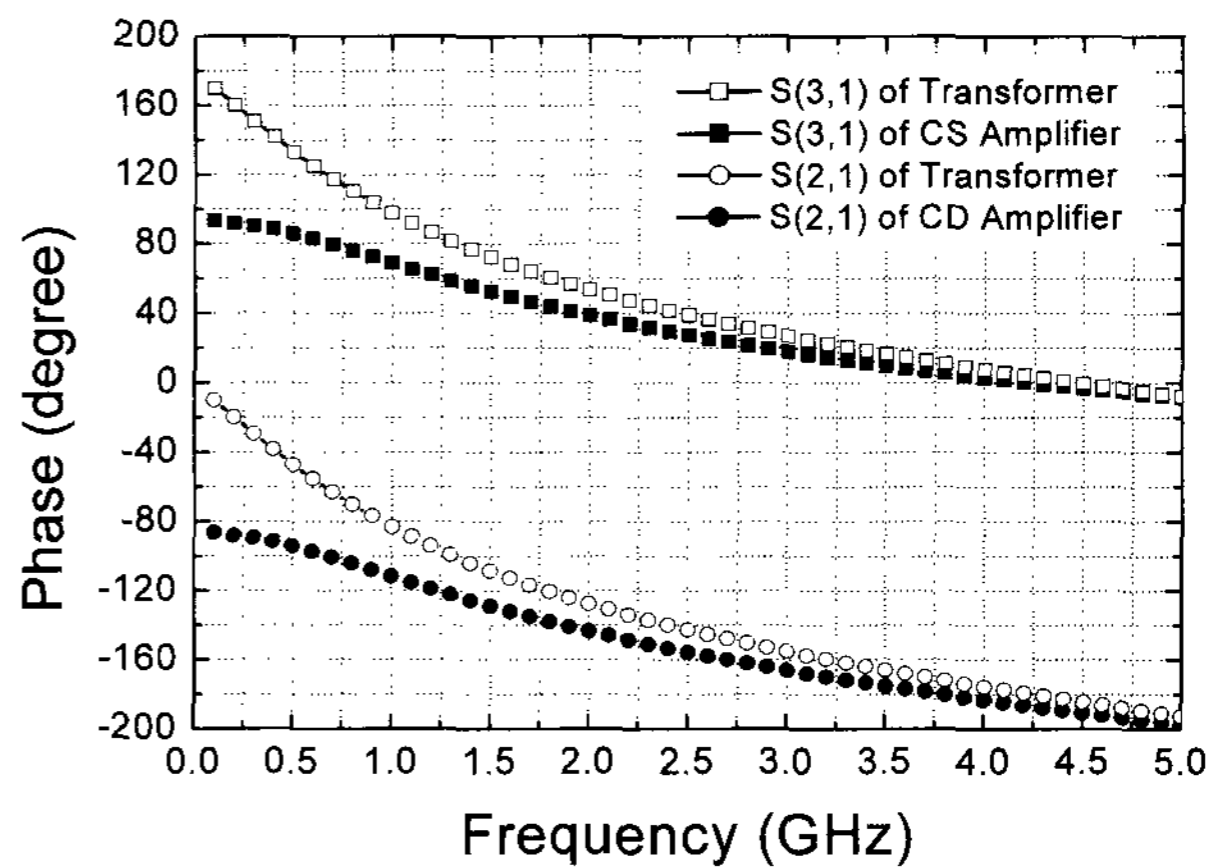
$$Gain = A_{XF} \cdot \sqrt{(\alpha \sin \phi_m)^2 + (1 + \alpha \cos \phi_m)^2} \quad (1)$$

여기에서 A_{XF} 는 트랜스포머의 이득이고, ϕ_m 는 코어 트랜스포머와 보상용 증폭기 사이에 위상차이고, α 는 보상용 증폭기의 이득이다.

그림 5는 식(1)에 대한 트랜스포머와 보상용 증폭기의 관계를 간단하게 보여준다. 그리고 그림 6은 식(1)로부터 계산된 이득을 보여준다. A_{XF} 는 0.7, α 는 0.6, 그리고



(a)



(b)

그림 4. (a) 트랜스포머와 보상용 증폭기에 커플링 되는 신호 전류 (b) 트랜스포머와 보상용 증폭기를 통과한 신호의 위상차

Fig. 4. (a) Signal currents coupled to the transformer and the compensating amplifier. (b) Phases of the signals through the transformer and the compensating amplifiers.

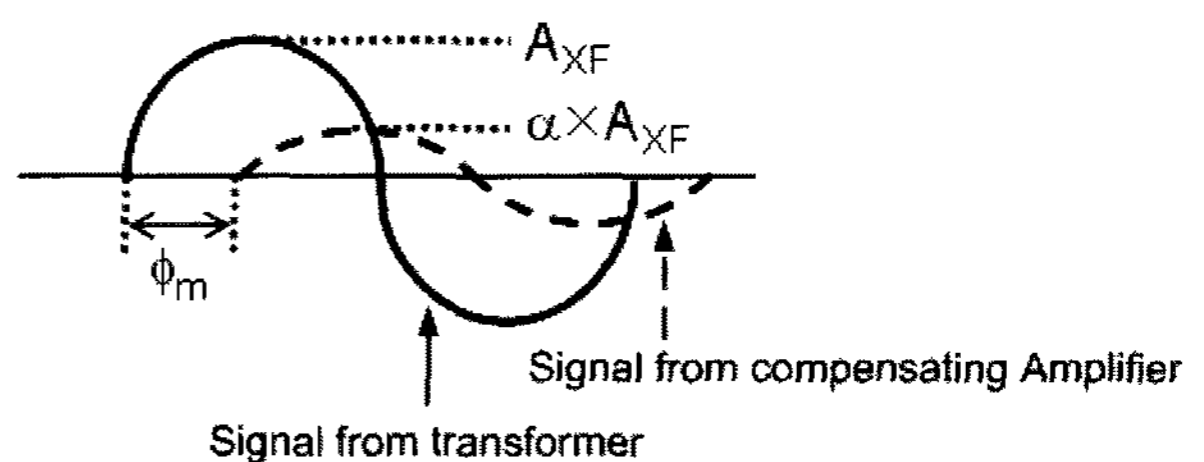


그림 5. 트랜스포머와 보상용 증폭기가 커플링 되는 신호 개념

Fig. 5. Signal concept coupled to the transformer and the compensating amplifiers.

ϕ_m 을 15° 로 가정했을 때 하이브리드 발룬 전체 이득은 3.8 dB 개선됨을 예상 할 수 있다.

하이브리드 발룬을 0.18 μm CMOS 공정을 사용하여 2.4 GHz 주파수에서 설계 하였다. 첫째로, 코어 트랜스

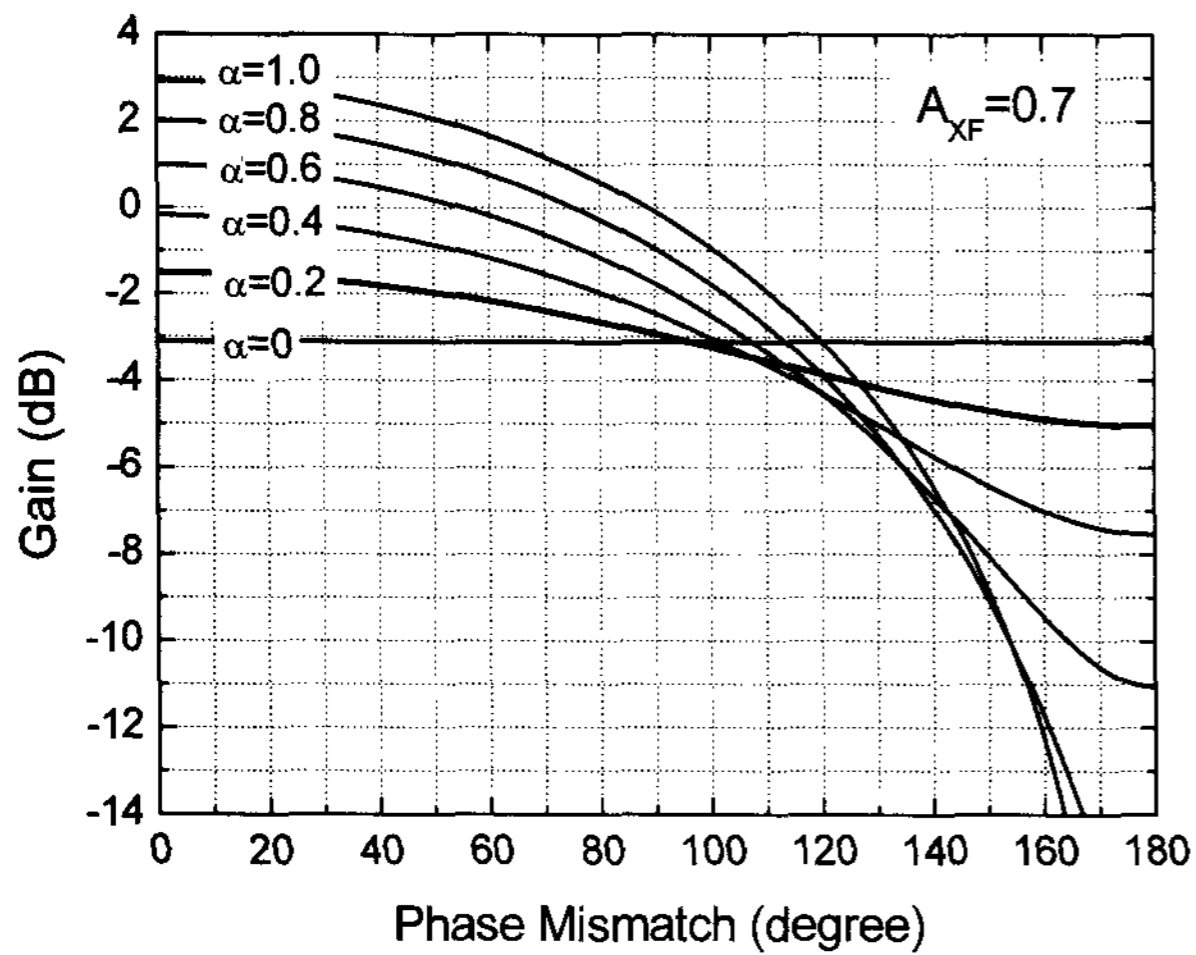


그림 6. 트랜스포머와 보상용 증폭기(Φ_m) 사이에 위상 차이와 보상용 증폭기의 이득(α)에 대한 하이브리드 발룬의 계산된 이득
 Fig. 6. Calculated gain of the hybrid balun with respect to the gain of the compensating amplifiers (α) and the phase mismatch between the transformer and compensating amplifiers (Φ_m).

포머는 HFSS 시뮬레이션을 기반으로 설계 되었다. 트랜스포머의 메탈 폭/간격은 $15\ \mu\text{m}/2\ \mu\text{m}$, 내부 반지름은 $90\ \mu\text{m}$ 그리고 회전수와 인덕터 값은 각각 4와 3.5 nH로 설계 되었다. 그림 7은 설계된 완전 대칭 적층형 발룬을 보여준다. 설계된 트랜스포머의 특성을 보면 Coupling factor(k)는 0.83, Self Resonance Frequency 는 4.5 GHz로 각각 나타났다.

다음으로 트랜스포머의 3-Port S-parameters를 이용하여 하이브리드 발룬을 설계하였다. 이때 낮은 잡음지수, 높은 선형성, 두 개의 출력 사이에 크기와 위상차 그리고 최적의 신호 분리와 커플링에 초점을 맞추어 설계를 수행 하였다. 보상용 증폭기의 FET 게이트 사이즈는 길이/폭 $0.18\ \mu\text{m}/48\ \mu\text{m}$ 로 설계되었다.

트랜스포머와 하이브리드 발룬의 크기와 위상차는 각각 $0.07\ \text{dB} / 2.79^\circ$ 와 $0.57\ \text{dB} / 1.93^\circ$ 로 얻었다. 따라서 하이브리드 발룬의 크기와 위상 차이는 수동형 트랜스포머와 유사하는 성능을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

그림 8은 수동형 발룬과 하이브리드 발룬의 이득과 잡음지수에 대한 설계 결과를 나타낸다. 수동형 발룬의 이득과 잡음지수는 각각 $-2.75\ \text{dB}$ 와 $2.75\ \text{dB}$ 로 나타났다. 반면, 하이브리드 발룬의 경우 1.2 V 전원에 0.67 mA 전류만으로 이득은 $0.45\ \text{dB}$, 잡음지수는 $2.4\ \text{dB}$ 얻을 수 있었다. 이 결과는 수동형 발룬보다 각각 이득은

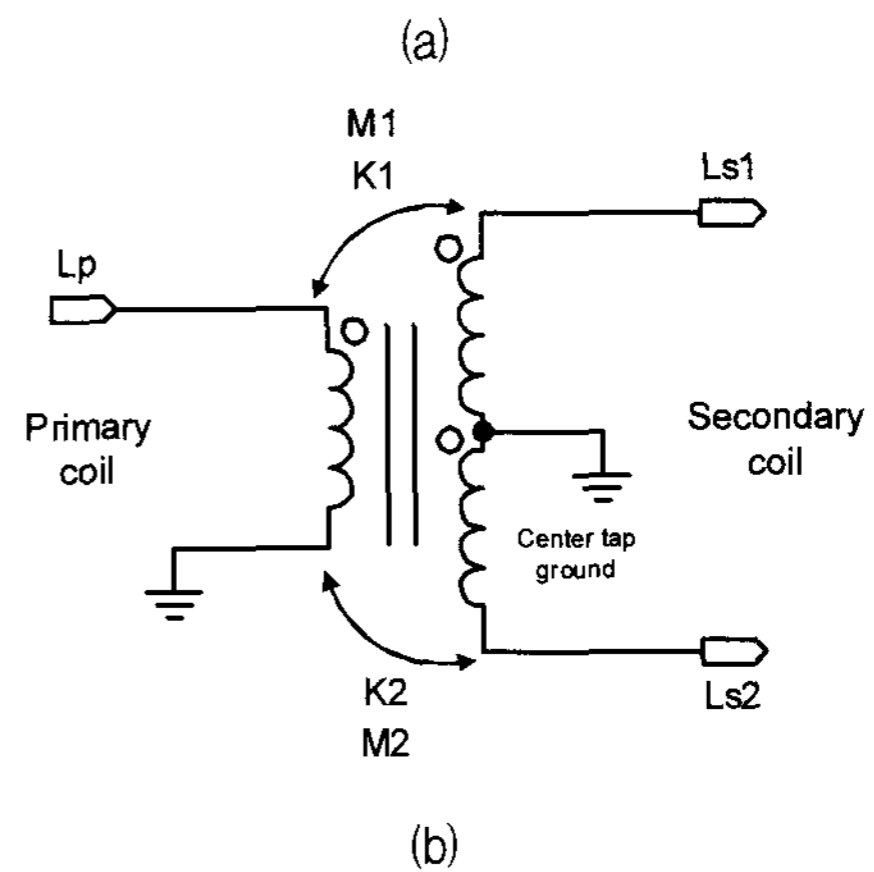
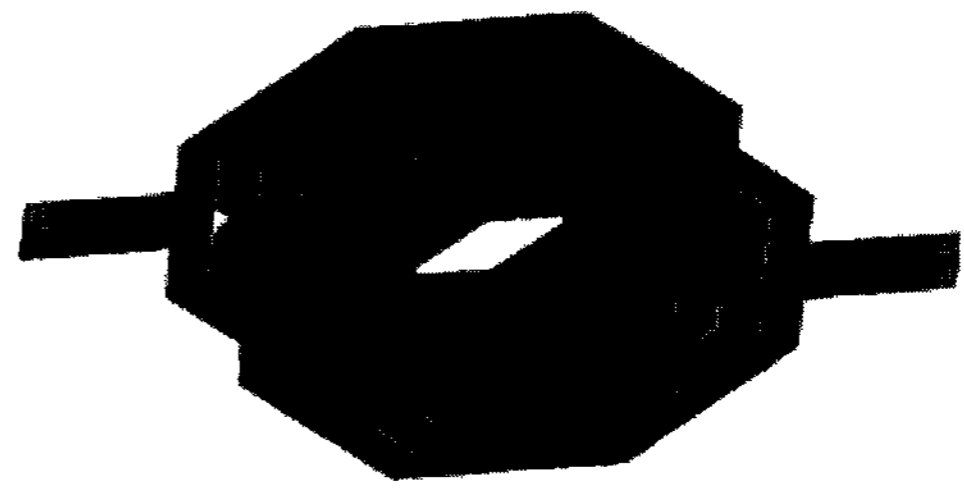


그림 7. 완전 대칭 적층형 발룬의 (a) 3차원 구조도 (b) 회로기호

Fig. 7. (a) structure graph of three dimensions and (b) circuit symbol of fully symmetric stacked balun.

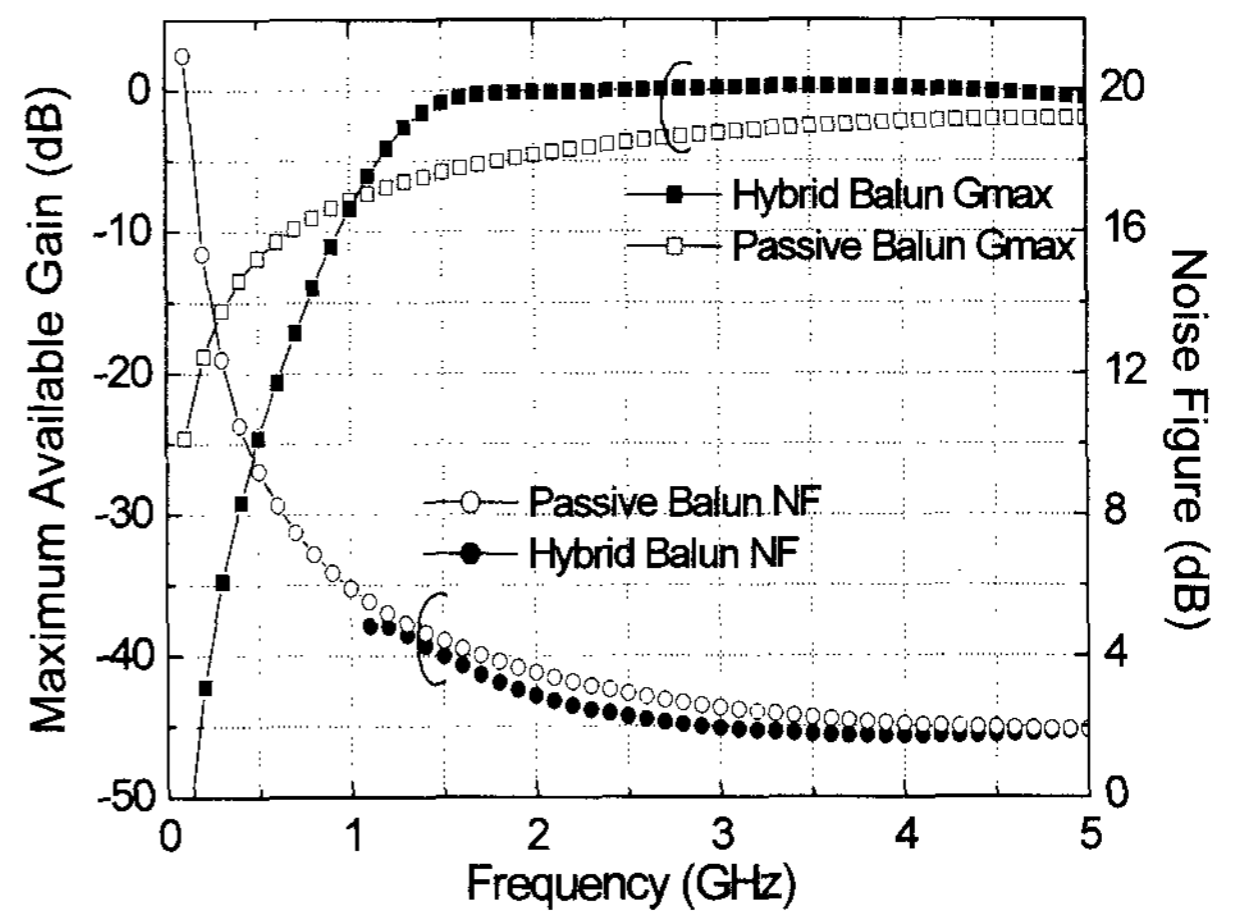


그림 8. 최대 이득과 잡음지수 시뮬레이션 결과

Fig. 8. Simulation results of the maximum available gain and noise figure.

$3.5\ \text{dB}$, 잡음지수는 $0.35\ \text{dB}$ 좋은 성능을 가지게 된다. 이와 같은 하이브리드 발룬의 개선된 성능은 Full 칩 수신기 설계에 대해 틀림없이 매우 유리할 것이다. 식 (2, 3)은 수동형 발룬 수신기와 하이브리드 발룬 수신기

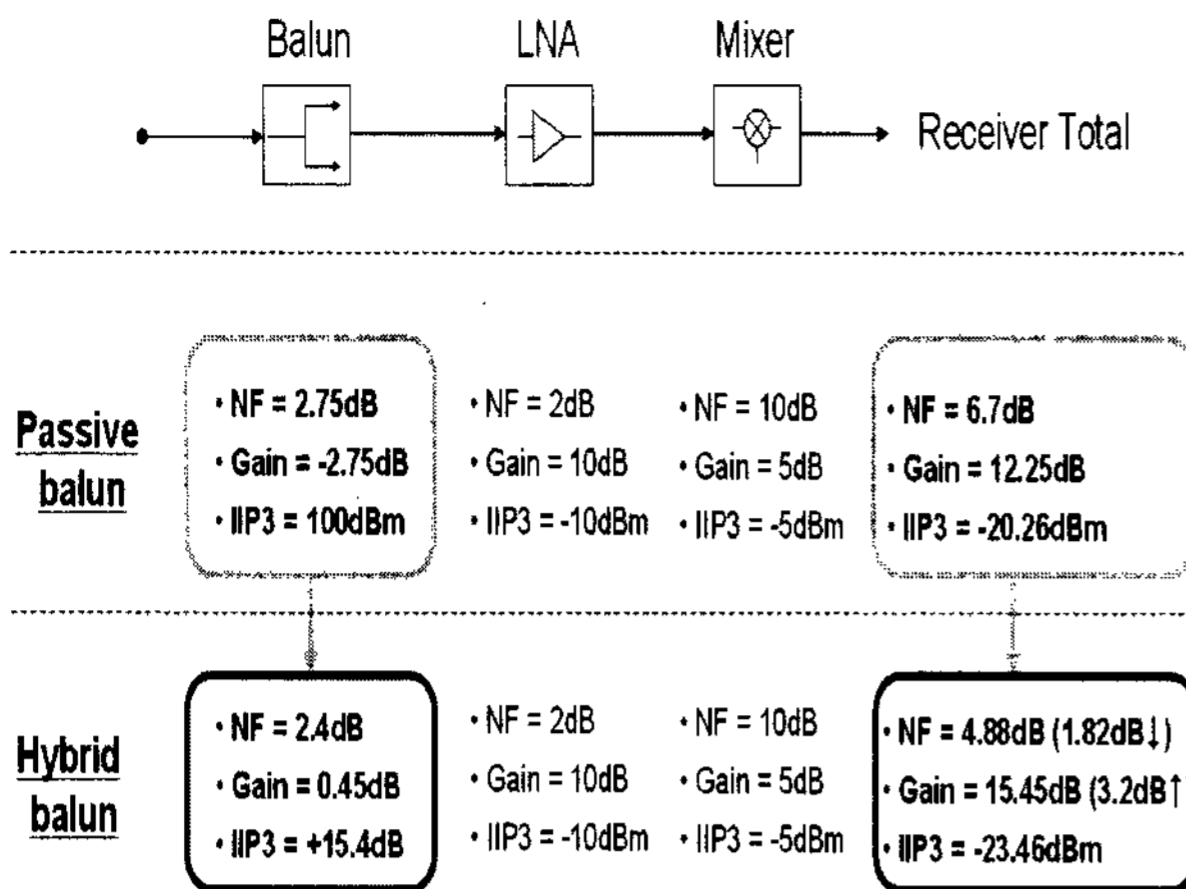


그림 9. 하이브리드와 수동형 발룬 RF 수신기 성능 계산 결과 비교
 Fig. 9. Comparison fo spreadsheet calculation results of RF receiver with hybrid and passive baluns.

의 전체 잡음지수를 계산하는 식이다.^[6] 식 (2)에서 수동형 발룬을 갖는 수신기의 잡음지수는 수동형 발룬의 잡음지수와 LNA의 잡음지수가 그대로 더해져서 나타나게 된다. 반면 식 (3)에서 하이브리드 발룬을 갖는 수신기의 잡음지수는 LNA의 잡음지수가 하이브리드 발룬의 이득으로 나누어지게 된다 따라서 하이브리드 발룬을 적용한 수신기의 전체 잡음 지수는 상당히 낮아질 수 있는 것이다.

$$Rx\ NF\ with\ Passive\ Balun = NF_{PB} + NF_{LNA} + \frac{NF_{Mixer} - 1}{G_{LNA}} \quad (2)$$

$$Rx\ NF\ with\ Hybrid\ Balun = NF_{HB} + \frac{NF_{LNA} - 1}{G_{HB}} + \frac{NF_{Mixer} - 1}{G_{HB} \cdot G_{LNA}} \quad (3)$$

그림 9는 하이브리드 발룬과 수동형 발룬을 RF 수신기의 표 계산 결과를 비교한 것이다. 여기에서 저잡음 증폭기(LNA)와 믹서(Mixer)에는 일반적으로 가지는 잡음지수, 이득 그리고 선형성 등의 값을 넣어 수신기 시스템 Budget을 통해 계산 하였다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 하이브리드 발룬을 RF 수신기에 적용함으로써 잡음지수는 1.8 dB, 이득은 3.2 dB까지 개선될 수 있음을 확인 할 수 있다.

III. 제작 및 측정 결과

하이브리드 발룬은 0.18 μm RF CMOS 공정으로 설계 되었다. 측정시에 3-Port 특성을 보는 것 보다 전형적인 2-Port 특성을 보는 것이 용이하기 때문에 Back-to-

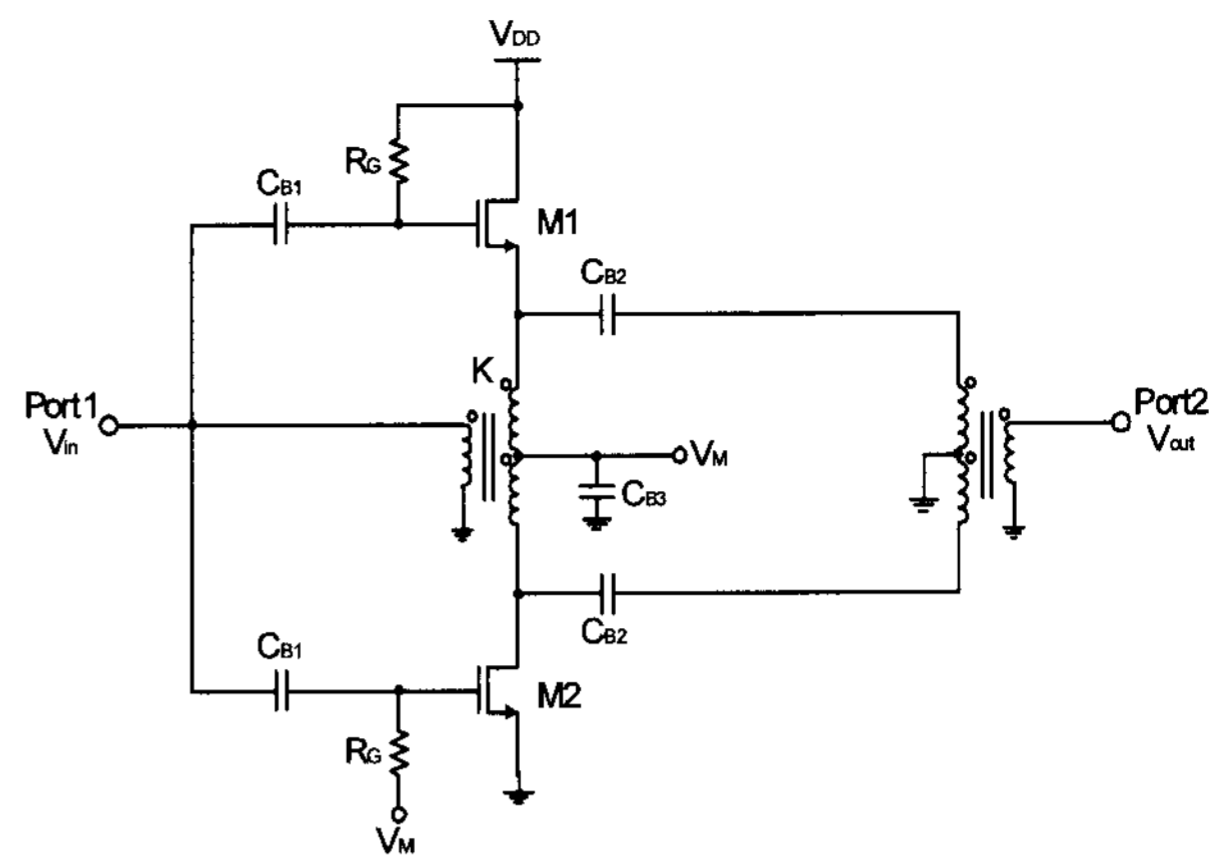


그림 10. 하이브리드와 수동형 발룬 Back-to-Back 연결 회로
 Fig. 10. Back-to-Back circuit schematic connected hybrid and passive balun.

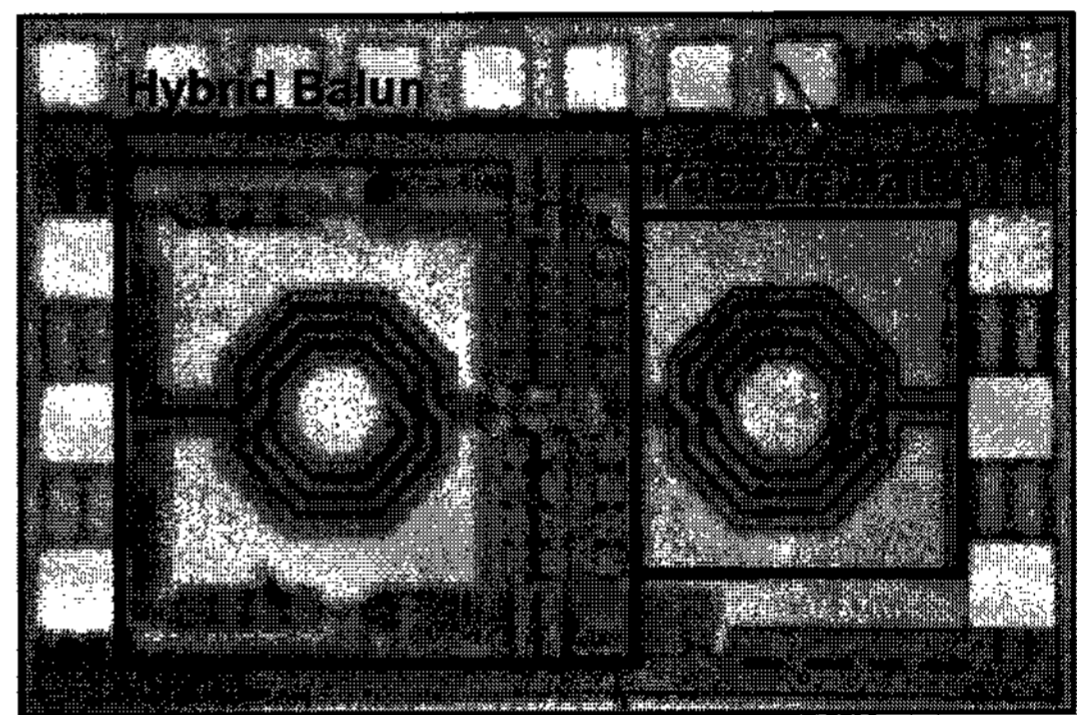


그림 11. 칩 현미경 사진
 Fig. 11. Chip photomicrograph.

Back으로 연결된 하이브리드-수동형 발룬과 수동형-수동형 발룬을 제작하였다.

그림 10은 하이브리드와 수동형 발룬의 back-to-back 연결 회로도를 보여 준다. 그림 11은 칩 현미경 사진이다. 면적은 하이브리드 발룬이 480×480 μm² 이고 수동형 발룬은 320×320 μm² 이다. 보상용 증폭기는 추가적인 면적을 최소화하기 위해서 트랜스포머 주위에 레이아웃을 했다. 측정은 back-to-back된 하이브리드-수동형 발룬과 수동형-수동형 발룬을 HP8510B network analyzer와 Agilent N8975A noise figure analyzer로 측정하였다. 하이브리드 발룬의 코어(core) 성능은 back-to-back 측정 데이터로부터 수동형 발룬의 특성을 추출하여 뺀 나머지로 얻을 수 있다.

그림 12는 하이브리드 발룬과 수동형 발룬의 이득과 잡음 지수에 대한 측정과 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 2.4 GHz에서 1.2 V에 0.67 mA의 전류 소모만으로도 하이브리드 발룬의 이득은 수동형 발룬의 비해 2.8 dB 더 높고, 잡음지수는 1.9 dB 더 낮은 것을 볼 수 있다.

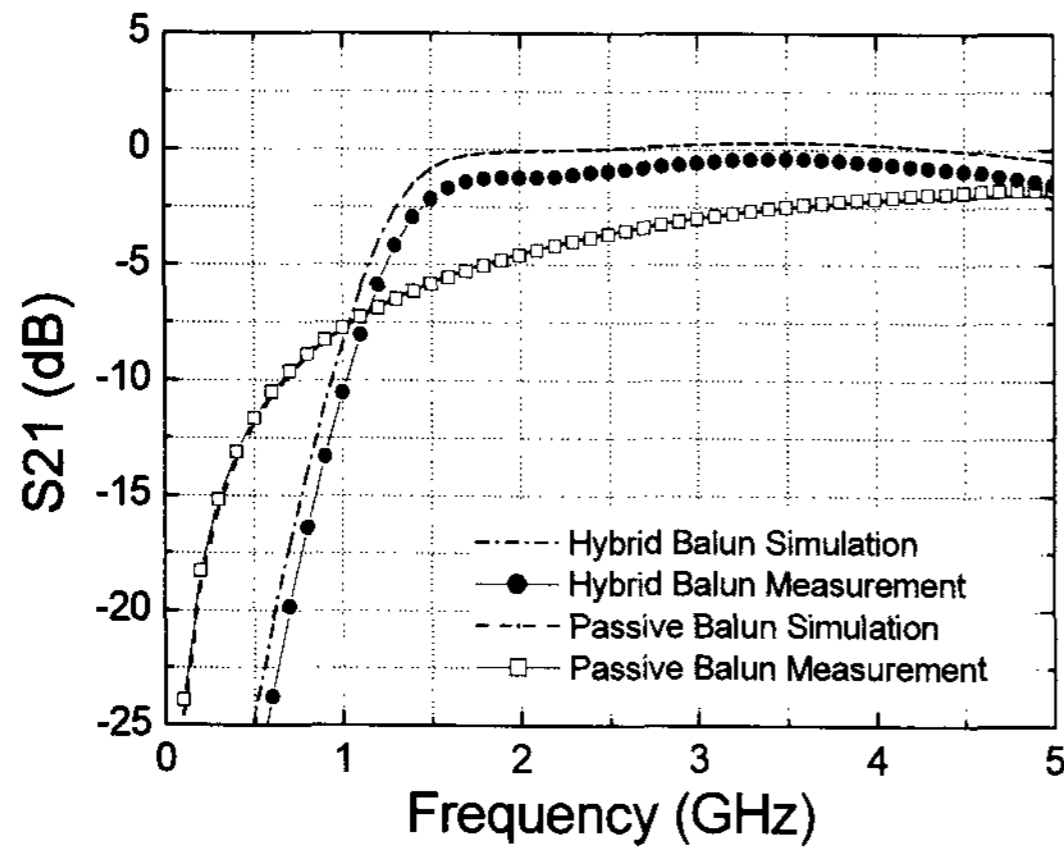


그림 12. 하이브리드와 수동형 발룬 이득과 잡음지수 측정 결과
 Fig. 12. Measured gain and noise figure of the hybrid and passive baluns.

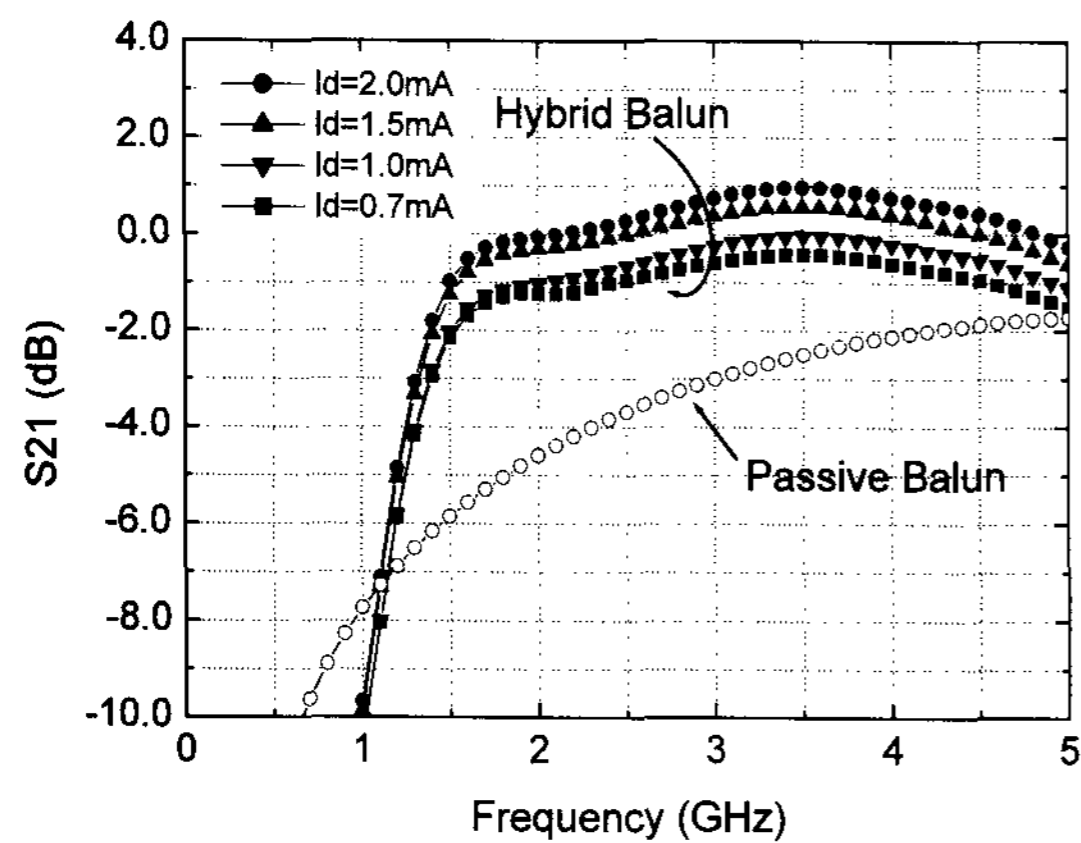


그림 13. 바이어스 전류에 따른 하이브리드 발룬 이득 측정결과
 Fig. 13. Measured gain of the hybrid balun against the bias current.

그림 13은 바이어스 전류에 따른 하이브리드 발룬의 이득 측정 결과이다. 2.4 GHz에서 이득은 $I_d = 0.7 \text{ mA}$ 일 때 -0.8 dB 에서 $I_d = 2.0 \text{ mA}$ 일 때 $+1.33 \text{ dB}$ 까지 증가되는 것을 볼 수 있다. 혼변조 왜곡 특성들은 바이어스 전류에 따라 측정 되어졌다. P1dB는 $+14 \text{ dBm}$ 을 얻었다. 0

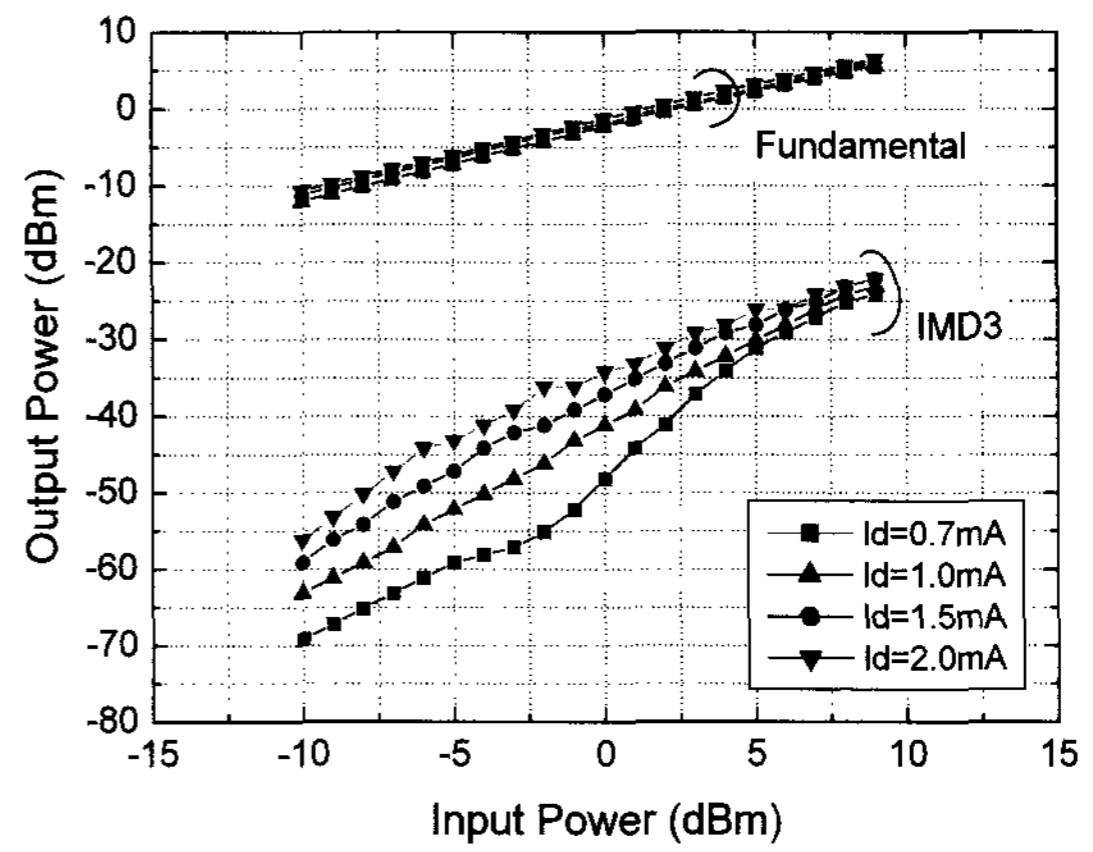


그림 14. 혼변조 왜곡 특성 측정결과
 Fig. 14. Measured intermodulation distortion characteristics.

표 1. 하이브리드와 수동형 발룬의 특성 측정 결과
 Table 1. Measured performances of the hybrid and passive baluns.

	Passive Balun	Hybrid Balun
Frequency of Operation	2.4 GHz	2.4 GHz
Gain (S21)	-3.6 dB	-0.8 dB @ 0.68 mA (-0.54dB@1mA, 0.66dB@1.5mA, 1.33dB@2mA)
Noise Figure	3.6 dB	1.7dB
Input P1dB	infinite	+14 dBm
Input IP3	infinite	+23 dBm @ $P_{in}=0 \text{ dBm}$
Power Consumption	0	$1.2 \text{ V} \times 0.68 \text{ mA} = 0.82 \text{ mW}$

dBm 입력파워에서 IIP3 는 $I_d = 0.7 \text{ mA}$ 경우에는 $+23 \text{ dBm}$ 를 좀 더 높은 $I_d = 2.0 \text{ mA}$ 경우에는 $+16.5 \text{ dBm}$ 으로 감소된 값을 얻었다. 일반적으로, 하이브리드 발룬의 선형성은 무선통신 센서 네트워크를 위한 전형적인 수신기의 전체 선형성에 영향을 주지 않을 만큼 충분히 높다는 사실을 발견했다. 표 1은 하이브리드와 수동형 발룬의 측정된 성능들을 요약한 것이다.

마지막으로 무선 센서 네트워크를 위한 2.4 GHz 대역 저전력 완전차동 직접변환 수신기를 설계하였다. 이 수신기는 게이트-소스간 커패시터와 전통적인 인덕터 Feedback을 사용한 완전차동 캐스코드 저잡음 증폭기, 낮은 $1/f$ 노이즈와 DC 전류 소모가 없는 I/Q 수동형 믹서, 그리고 I/Q 이득조정 OP 앰프 필터로 구성된다.(그림 15) 수신기에 하이브리드 발룬, 수동형 발룬, 손실 없는 이상적인 발룬을 각각 적용하여 시뮬레이션을 통해 성능을 비교했다. 그림 16 에서 볼 수 있듯이 수동형 발룬 수신기가 열등한 성능을 보이는 반면에 하이브리드 발룬 수신기의 이득과 잡음지수는 손실 없는 이상적인 발룬을 적용한 수신기와 거의 같은 성능을 가지는 있다. 또한 하

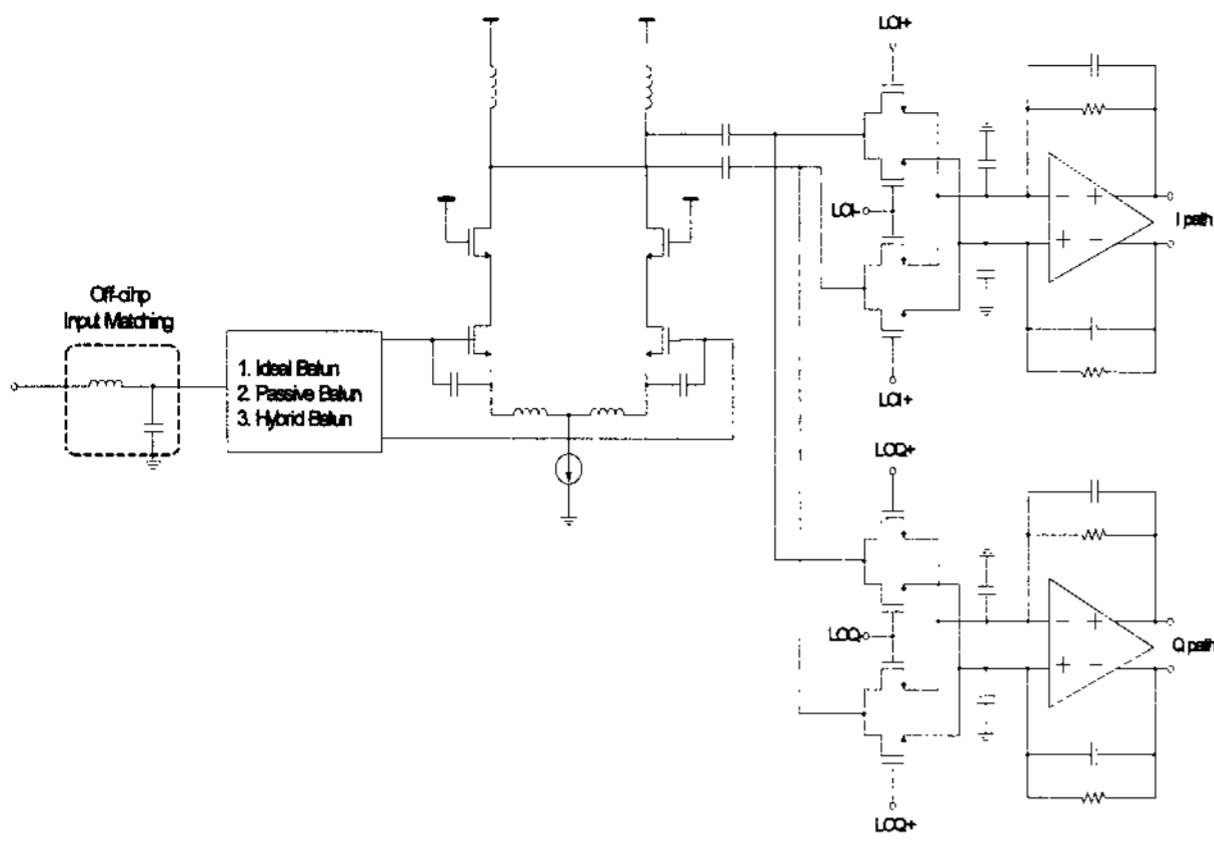


그림 15. 이상형, 수동형, 하이브리드 발룬을 포함한 2.4GHz 완전 차동 직접변환 수신기의 회로도
 Fig. 15. Circuit schematic of a fully differential 2.4GHz direct conversion receiver with ideal, passive, and hybrid baluns.

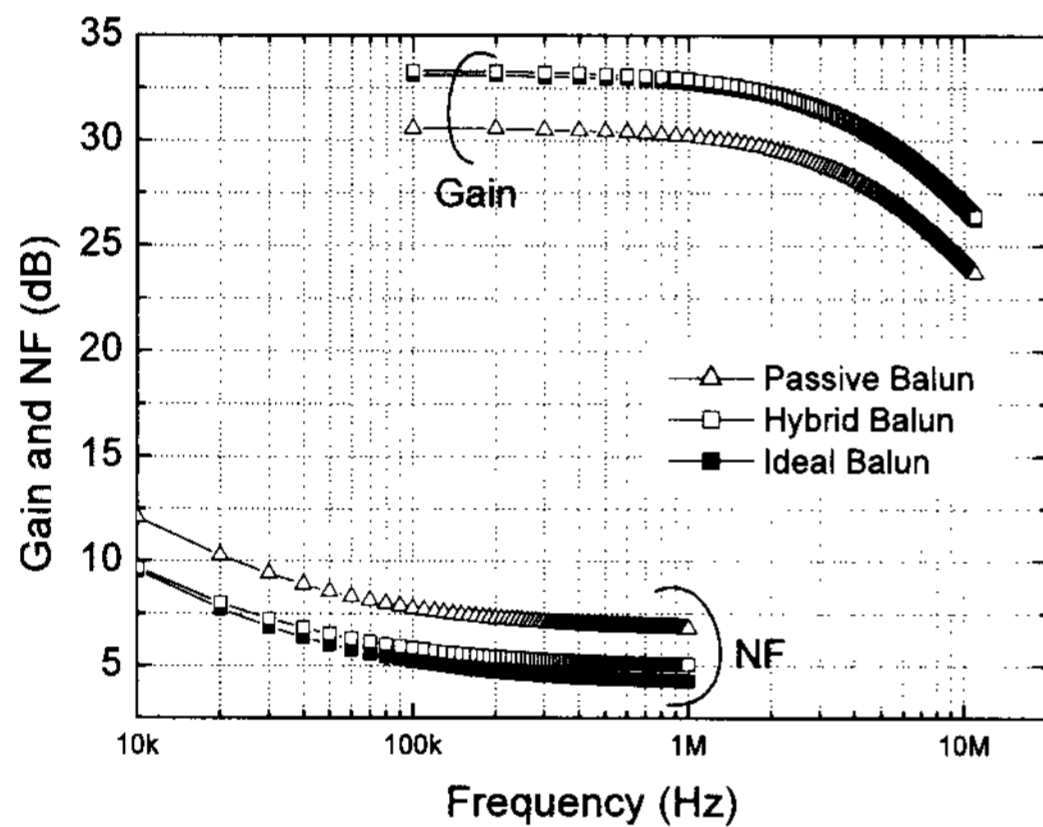


그림 16. 이상형, 수동형, 하이브리드 발룬을 포함한 2.4GHz 완전 차동 직접변환 수신기의 이득과 잡음지수
 Fig. 16. Comparison of gain and noise figure of fully differential 2.4GHz direct conversion receiver with ideal, passive, and hybrid baluns.

이브리드 발룬 수신기는 이상적인 발룬을 적용한 수신기와 거의 같은 IIP3를 제공하고 있다는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

저전력 완전차동 CMOS RF 수신기를 위한 새로운 하이브리드 발룬 회로를 제안하였다. 하이브리드 발룬은 보상용 증폭기를 적용함으로써 수동형 트랜스포머의 삽입손실을 줄일 수 있고 수동형 트랜스포머의 좋은 대칭성과 선형성 특징을 거의 그대로 유지 한다. 2.4 GHz에서 제작된 하이브리드 발룬은 수동형 발룬과 비교해 0.82 mW 추가 전력 소모만으로 이득은 2.8 dB 더 높고 잡음지수는 1.9 dB 더 낮았고 IIP3는 +23 dBm 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] S. S. Mehta, D. Weber, M. Terrovitis, K. Onodera, M. P. Mack, B. J. Kaczynski, H. Samavati, S. H. Jen, W. W. Si, M. Lee, K. Sing, S. Mendis, P. J. Husted, N. Zhang, B. McFarland, D. Su, T. H. Meng, B. A. Wooley, "An 802.11g WLAN SoC," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 12, pp. 2483-2491, Dec. 2005
- [2] I. Bhatti, R. Roufougaran, J. Castaneda, "A Fully Integrated Transformer-Based Front-End Architecture for Wireless Transceivers," in *IEEE International Solid-State Circuits Conference Dig. Tech. Papers*, San Francisco, CA, Feb. 2005, pp. 106-107
- [3] P. Antoine, P. Bauser, H. Beaulaton, M. Buchholz, D. Carey, T. Cassagnes, T. K. Chan, S. Colomines, F. Hurley, D. Jobling, N. Kearney, A. Murphy, J. Rock, D. Salle, C. T. Tu, "A Direct-Conversion Receiver for DVB-H", in *IEEE International Solid-State Circuits Conference Dig. Tech. Papers*, San Francisco, CA, Feb. 2005, pp. 426-4277
- [4] M. Valla, G. Montagna, R. Castello, R. Tonetto, I. Bietti, "A 72-mW CMOS 802.11a Direct Conversion Front-End with 3.5dB NF and 200-kHz 1/f Noise Corner," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 4, Apr. 2005
- [5] H. Ma, S. J. Fang, F. Lin, H. Nakamura, "Novel Active Phase Splitters in RFIC for Wireless Applications", *IEEE Tran. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 12, Dec. 1998
- [6] Y.-C. Wu, M. F. Chang, "On-Chip Spiral Inductors and Bandpass Filters Using Active Magnetic Energy Recovery," in *Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, San Jose, CA, Sept. 2002, pp. 275-278

저 자 소 개



장 신 일(학생회원)
 2006년 8월 광운대학교
 전파공학과 학사 졸업.
 2006년 9월~현재 광운대학교
 전파공학과 석사과정
 <주관심분야 : Transformer,
 Balun, CMOS Receiver Design>



박 주 봉(정회원)
 2001년 2월 한국항공대학교
 항공전자과 학사 졸업.
 2001년 4월~2005년 3월 Microline
 Inc. 주임연구원.
 2005년 3월~2005년 7월 EZ
 Digital Inc. 주임연구원.
 2007년 8월 광운대학교 전파공학과 석사 졸업.
 2007년 8월~현재 PHYCHIP Inc. 선임연구원
 <주관심분야 : CMOS RF/Analog Receiver and
 VCO Design>



신 현 철(평생회원)
 1991년 2월 KAIST 전기 및 전자
 공학과 공학사
 1993년 2월 KAIST 전기 및 전자
 공학과 공학석사
 1998년 2월 KAIST 전기 및 전자
 공학과 공학박사

1997년 4월~1997년 10월 독일 Daimler Benz
 Research Center 연구원
 1998년 1월~2000년 3월 삼성전자 System LSI
 선임연구원
 2000년 4월~2002년 4월 미국 UCLA 박사 후
 연구원
 2002년 5월~2003년 8월 미국 Qualcomm
 RF/Analog IC Design 선임연구원
 2003년 9월~현재 광운대학교 전파공학과 부교수
 <주관심분야 : RF/Analog/Microwave Integrated
 Circuits and Systems>