RF Front-end를 응용한 UWB(초광대역)수신부의 LNA와 Mixer에 대한 분석 및 설계

곽재광, *고광철
한양대학교 전자전기컴퓨터공학부, *한양대학교 전자전기컴퓨터공학부
전화 : 02-2290-0348 / 핸드폰 : 017-808-3272

Design and analysis of UWB Receiver's LNA(Low Noise Amplifier) and Mixer using RF Front-end

Jae Kwang Kwak, Kwang Cheol Ko
Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University
E-mail : jguy04@empal.com

Abstract

This paper has been studied about UWB(Ulra wide-band)'s LNA(Low Noise Amplifier) and Mixer. The UWB is a new technology that is being pursed for both commercial and military purposes.

Direct conversion architectures that convert RF signals have potential to achieve such terminals, because they eliminate the need for non-programmable image-rejection filters and IF channel filters. And this architecture promises better performance in power, size, and cost than existing heterodyne-based receivers.

This Receiver architectures combines low-noise amplifier, mixer. And then this paper has designed suitable UWB's LNA and Mixer.

I. 서론

주파수 자원의 부족 현상과 고속 데이터 전송에 대한 요구가 높아짐에 따라 통신시스템에서는 새로운 무선 기술을 요구하게 되었고 따라서 IEEE802.15.3a라는 초광대역 통신 규격인 UWB가 등장하게 되었다. 기존의 협대역 통신과 달리 1ns 이하의 짧은 펄스파를 이용하여 저전력, 100 Mbps이상의 고속 전송이 가능한 신뢰성 있는 통신을 보장함으로써 현재 WPAN(Wireless Perso-nal Area Network)에서 부터 군사기술에 이르기 까지 다양한 응용 분야를 망라하고 있다.

본 논문은 기존의 RF Front-end 디자인에 필요했던 여러 공정들을 바탕으로 초광대역 통신에 적합한 블럭을 설계하고자 한다. 즉, 기본적인 RF Front-end 블럭인 LNA, Mixer등에 대해 분석하고 UWB에 적합한 블럭들을 설계하여 이를 CMOS 구동 회로에 적용하여 궁극적인 SoC(System on Chip) 설계에 도움이 되고자 한다.

II. Receiver Architecture

2.2 직접변환(Direct Conversion)방식의 기본구조

이 구조는 Zero-IF와 혹은 Homodyne으로도 불리며 수신된 RF 신호를 바로 baseband상에서 down-conversion 시켜서 처리하는 구조이다.

일반 헤테로다인(Heterodyne)방식에서는 중간 주파수단에 종종 VGA(Variable Gain Amplifiers)가 사용되

어지는데 반해 직접 변환 방식에서는 IF stage가 없고 gain control 기능을 위한 RF amplifier가 요구된다. [1]

따라서 Saw filter와 Mixer등을 절약할 수 있기 때문에 저가격과 SoC(System on Chip) 구현이 용이하며 IF를 사용하는 헤테로다인 방식이 주파수 변환 특성상 IP3, 즉 3차 IMD(InterModulation Distortion) 항이 중요한데 반해 IF를 사용하지 않는 직접 변환 방식의 경우에는 2차 IMD 항의 영향이 더 커지게 된다.

직접 변환 방식의 전체적인 구성을 보게 되면 그림 1과 같이 LNA(Low Noise Amplifier), I/Q Mixer, anti-aliasing과 channel selection을 위한 두개의 LPF(Lowpass Filter), A/D 변환기등으로 구성된다.

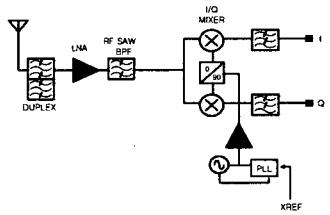


그림 1. Direct Conversion Architecture

이 방식의 장점은 IF가 0이기 때문에 image rejection filter가 필요 없으며 내부에서 처리될 필요가 없기 때문에 LNA가 50 Ω load에서 구동되지 않아도 된다. 또한 IF SAW filter와 subsequent stage가 LPF(Low-Pass Filter)와 Baseband Amplifier들로 대체 되어질 수 있는데 이것은 채널 선택이 기저대역에서 수행 가능하기 때문이다.

이러한 장점에도 불구하고 DC offset, Even-order Distortion, flicker noise(1/f)등의 단점이 존재하며 이를 얼마나 잘 보완하느냐가 관건이라 하겠다.[2][3]

III. 회로 설계

3.1 LNA(Low Noise Ampflier)

수신부의 첫 단에 해당하는 LNA(Low Noise Amplifier)는 다음 단계에 노이즈를 극복할 만한 충분한 gain을 공급하는 기능을 하고 있다. LNA의 설계에 있어서는 수신기가 직접 변환 구조를 사용했기 때문에 Differential 방식을 사용하고 있다. 현재 RF 상에 쓰이고 있는 일반적인 LNA의 Topology를 분석하여 UWB에 적합한 LNA를 설계하고자 한다.

3.1.1. LNA Topology

일반적인 LNA Topology에는 Resistive Termination, 1/gm Termination, Inductive degeneration, Shunt-Series Feedback등이 있으며 각각의 특성을 보면 Resistive Termination의 경우에는 그림 2와 같이 입력단에 50Ω의 저항을 달아줌으로써 입력단에서 보았을때 50Ω의 임피던스 매칭이 이루어 지는 구조를 보인다. 하지만 N/F(Nose Figure)가 너무 크기 때문에 광대역에서는 사용이 불가능 하다.

1/gm termination(그림.3)의 경우에는 단순하면서도 정확한 임피던스 매칭을 보장해 주지만 1/gm=50 Ω (gm=20mS)으로 gain이 고정되어 있기 때문에 이것 또한 N/F가 크며 높은 gain을 나타내기엔 어렵다.

다음으로 일반적으로 많이 사용되고 있는 Inductive degeneration LNA(그림 4)의 경우에는 입력 임피던스가 다음식과 같이 나타난다.

$$Z_{input} = \frac{V_{test}}{i_{test}} = SL_s + \frac{1}{SC_{gs}} - \frac{g_m L_s}{C_{gs}}$$

여기서 주목해야 할 것은 인덕터 성분과 커패시터 성분을 잘 조절하게 되면 0의 값으로 만들 수 있고 따라서 $-\frac{g_m L_s}{C_{gs}}$ 값을 50Ω로 맞춰주면 입력 임피던스가 50Ω으로 매칭이 되는 좋은 특성을 보이고 있다. 하지만 이러한 특성은 오직 협대역(Narrow band)상에만 적합한 구조로 광대역의 특성과는 맞지 않는다.

따라서 가장 광대역 특성에 적합한 LNA 설계를 위해서는 Shunt-Series Feedback LNA(그림 5)가 적합하다.(4) 이 Topology의 특징은 입력 bias가 출력 voltage에 고정되어 있으며 일반적으로 50Ω 임피던스 매칭이 이루어지면서 이득의 안정도가 좋다는 것이다. 한 가지 단점은 feedback을 사용하는 구조에서 흔히 발생하는 stability의 문제가 발생하는 데 이것은 원래 feedback이라는 것이 대역폭을 넓히기 위해 이득을 희생하기 때문이다.

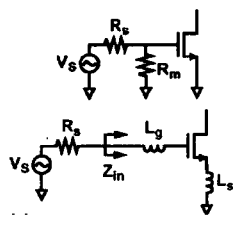


그림 4 Inductive degeneration

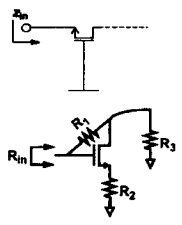
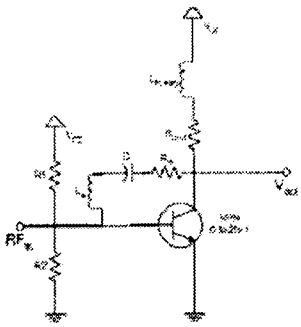


그림 5 Shunt-Series Feedback

그림 2 Resistive Termination 그림 3. 1/gm termination

3.1.2. LNA의 설계 및 분석

피드백 토폴로지를 이용하여 그림 6과 같은 R1 과 R2에 NPN 0.5*20*1 SiGe transistor가 바이어스 되는 회로를 이용하여 성능을 요약하였다.



1dB compression point	-12.9 dBm
Power Consumption	87 mW
Gain	13.2 dB
NF	3.6-3.9 dB
Power Supply	3.3 V
3dB Bandwidth	9.3 GHz

그림 6. Feedback UWB LNA specfications

3.2. Mixer

일반적인 믹서의 특성상 LNA 특성을 받쳐주는 것이 힘들다. 왜냐하면 Mixer가 Amplifier보다 훨씬 Noise figure가 높기 때문이다. 따라서 전단의 LNA의 Gain을 낮춘다거나 높임으로써 조절이 가능하기 때문에 LNA가 Mixer에 종속적으로 적용되는 것이다.

UWB Mixer는 even order distortion과 입출력 LO 포트간의 isolation 특성이 좋은 Gilbert type mixer를 사용하며 수신단의 출력이 I, Q 신호를 가지기 때문에 직접 변환 구조의 수신단은 두개의 Gilbert type mixer를 사용한다. UWB 수신단의 직접 변환 구조에서의 SNR(Signal to Noise)을 낮추는 가장 큰 요인은 flicker noise 인데 이러한 flicker noise를 가장 많이 발생시키는 곳이 바로 Mixer이다.

3.2.1. Mixer Topology

Mixer의 여러 종류 중 Subsampling Mixer가 있는데 보통 믹서는 Switching pair의 ON/Off Duty가 50%가 정확히 되어야 하며 주기는 천천히 변한다.그러나 LO 신호가 RF신호와 비슷하기 때문에 빨리 Switching을 한다는 것이 어렵다. 따라서 Subsampling Mixer는 Sampling을 천천히 하도록 한다는 것인데 Noise가 상당히 나쁘기 때문에(30dB) UWB에서의 사용은 어렵다.

따라서 Double balanced 형태의 mixer를 사용하게 되는데 LO나 RF의 feed through를 없앨 수 있는 근본적인 방식으로 Switching Pair를 copy해서 두개를 놓고 사용하는 것이다. 그러나 TR의 개수를 일반적인 믹서에 비해 2배를 사용하는 단점을 안고 있다.

3.2.2. SSB(Single-Side Band) vs. DSB(Double-Side -Band)

Mixer상에서는 Noise Figure는 SSB(Single Side Band)이냐 DSB(Double Side Band)이냐에 따라 두가지로 나뉘게 된다.

일반적인 Heterodyne방식에서는 보통 SSB를 사용하는데 반해 Direct Conversion에서는 DSB를 사용하고 있다. 두 개의 차이가 최대 3dB까지 차이가 나게 되고 이러한 차이는 그림 7과 같이 Mixer 앞에 image rejection을 할 수 있느냐 없느냐에 달려있다.

Image 신호의 이득과 자신의 이득이 똑같은 wide-band Mixer의 경우는 Noise figure가 2 factor(3dB) 만큼 차이가 난다. 따라서 아래 식과 같이 DSB를 사용하는 Wide-band의 경우에는 SSB보다 3dB 낮은 값으로 나오는 것이다. 즉, Wide-band상에 Mixer는 DSB를 사용함으로써 even order linearity가 향상되는 것이다.

$$Y_{DSB} = (N_I + N_S)/(n_I + n_S)$$

$$Y_{SSB} = N_S/(n_I + n_S)$$

$$(N_S + N_I)/N_S = 1 + N_I/N_S \cong 1 + G_I/G_S$$

$$NF_{SSB}(dB) = NF_{DSB}(dB) + 10\log(1 + G_I/G_S)$$

Image & RF gain is equal, $G_I = G_S$

$$10\log(1+1) = 3dB$$

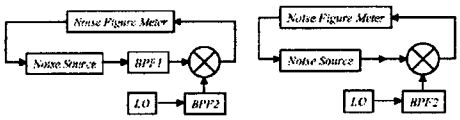


그림 7. SSB Measurment DSB Measurment

3.2.3. Gilbert Double-Balanced Mixer의 설계 및 분석

그림9와 같은 초광대역 특성을 만족하는 Double Balanced Mixer의 구조는 Switching Pair단과 Drive

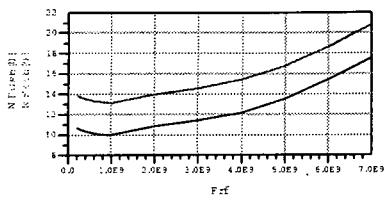


그림 8 SSB and DSB Noise Figures versus RF Input Frequency

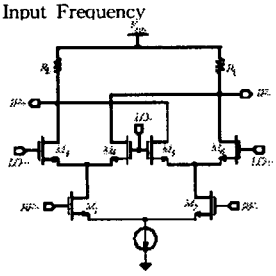


그림 9. Gibert type Double balanced Mixer

Stage단으로 구성되며 특히 Drive단에서 Noise와 선형성이 결정된다.

이 구조는 RF가 IF단으로 나오지 않고 LO 또한 IF단으로 나오지 않기 때문에 IF단에 RF와 LO가 격리(isolation)된 특징을 지니며 만약 완벽한 대칭 구조가 이루어지지 못하면 1/f noise가 출력쪽으로 나올 수 있기 때문에 1/f noise를 잡는 것이 중요하다. [5]

BSIM3모델을 이용한 0.35 μm CMOS의 Gilbert-Mixer의 시뮬레이션을 구동하였다.

변환이득의 값은 다음과 같이 구해진다.

conv_gain=dBm(V_ $IFout^2$/(2*RD))-P_RF

V_IFout=mix(Vout,{-1,1}), {-1,1}=RF_freq-LO_freq

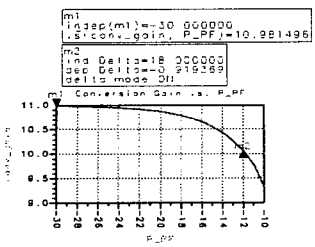


그림 10. Conversion _gain vs. P_RF

이 시뮬레이션에 1dB Gain Compression power를 구하게 되면 약 -12dBm정도의 값을 보이고 있다.

IV. 결론

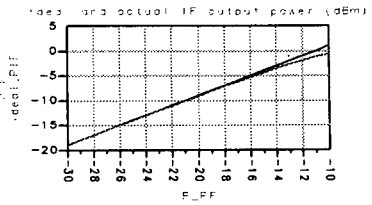


그림 11 Ideal and actual IF output power (dBm)

현재 Heterodyne 방식은 많은 시스템에서 채택하고 있는 방식이기는 하나 IF 주파수를 가지고 있기 때문에 image rejection filter가 필요하며 이로 인해 부피가 매우 커질 수가 있다. 이것은 우리가 추구하는 UWB를 이용한 SoC(System on Chip)의 구현이라는 측면에서 매우 불리하다. 따라서 고직접이면서 전류소모가 적은 Direct Coversion방식을 이용하여 UWB에 적합한 LNA와 Mixer등을 설계해야 한다.

본 논문은 향후 고속, 초광대역 속성을 지닌 RF 회로를 구성하여 UWB 단일 칩을 개발하는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌(또는 Reference)

[1]Tadao Nakagawa, Munenari Kawashima,"A 0.9-2.5Ghz Wideband direcect Conversion Receiver For Multi-band Applications" IEEE GaAs Digest. 2001.

[2]Kong-Pang,Jose Epifanio da Franca and Carlos Azeredo-Leme, "Circuit Design For Wireless Communications" , 2003

[3]Behzad Razavi. "Design Condiderations for Direct-Conversion Receivers" IEEE Transactions on Circuit and Systems, 1997

[4] Sangyoub Lee, "DESIGN AND ANALYSIS OF ULTRA-WIDE BANDWIDTH IMPULSE RADIO RECEIVER", UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA

[5] Anh- Tuan Phan, Chang- Wan Kim, "A High performance CMOS Direct Down Conversion Mixer For UWB System". ICU