
광대역 RF 전단부 구조에 관한 연구

고민호* · 표승철** · 박효달*

Study on the Broadband RF Front-End Architecture

Min-Ho Go* · Seung-chul Pyo** · Hyo-dal Park*

요 약

본 논문에서는 광대역 신호를 수신할 수 있는 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조를 제안하고 이의 타당성을 설계, 제작 및 실험을 통하여 검증하였다. 제안한 혼성변환 방식의 RF 전단부는 상향변환 블록을 적용하여 광대역 수신시 고조파 변환 및 영상신호 변환에 의해 발생하는 기존 RF 전단부의 성능 저하 문제를 개선했으며, 부고조파 혼합기에서 대역폭이 증가되는 원리를 적용하여 광대역 LO 신호의 구현을 위해 여러 개의 국부발진기를 사용하는 기존 RF 전단부 구조들의 복잡도 문제를 개선하였다. 제작한 회로들은 실험 결과 도출한 설계 규격을 만족하였고 RF 전단부 또한 80 dB 이상의 이득, 6.0 dB 이하의 잡음지수, 최소 이득 조건에서 -5.0 dBm 이상의 IIP3 특성으로 목표 규격을 만족하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose RF front-end architecture using hybrid conversion method to receive broadband signal. The validity is verified by design, fabrication and experiment. The proposed RF front-end architecture due to up-conversion block improves the deficiency of performance deterioration to be generated through harmonic signal and image signal conversion in the conventional RF front-end, and improves the deficiency of the complexity that is from to adopt a multiple local oscillators for the generation of wideband LO signal in the conventional RF front-end by applying the principle that tuning bandwidth is multiplied at sub-harmonic mixer. Manufactured circuits satisfy the deduced design specification and target standard with gain above 80 dB, noise figure below 6.0 dB and IIP3 performance above -5.0 dBm for the condition of the minimum gain in RF front-end.

키워드

Broadband, RF front-end, link-budget, DVB-H, receiver

1. 서 론

차세대 무선 통신 시스템은 음성 중심의 협대역 시스템에서 초고속 대용량의 멀티미디어 데이터를 위한 광대역 특성과 단일 단말기로 복잡적이고 다양한 서비스를 구현할 수 있는 다중대역 특성을 갖는 시스템으로

발전하고 있다. 이러한 무선 통신 시스템의 발전 동향에 따라 통신 시스템의 주요 블록인 RF 전단부 또한 광대역을 수신할 수 있어야 하며, 동시에 낮은 전력소모, 소형 및 경량화를 구현할 수 있는 새로운 구조에 대한 연구가 요구되고 있다. 광대역과 다양한 통신 시스템을 하나의 시스템으로 구현할 수 있는 방법으로

* 인하대학교 전자공학과
접수일자 : 2009. 07. 10

** 삼성전기 중앙연구소
심사완료일자 : 2009. 08. 19

SDR (Software Defined Radio) 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 이러한 방법은 아날로그-디지털 변환기의 전력 소모, 처리 대역폭 및 동작영역등과 같은 성능적인 제약으로 인하여 현재의 기술로는 구현이 불가능하기 때문에 광대역 및 다중대역 RF 전단부를 사용하여 디지털화하는 방법이 사용되고 있다. 광대역을 수신해야 RF 전단부는 광대역 신호를 수신하는 과정에서 발생하는 고조파 변환 및 영상신호 변환에 의해서 수신기 성능이 저하되지 않도록 구성해야 한다. 또한 광대역 신호를 기저대역 신호로 변환하기 위해 넓은 튜닝 대역폭 특성과 동시에 낮은 위상잡음 특성을 갖는 국부발진기 회로를 구현해야 한다. 하지만 기존의 광대역 및 다중대역 RF 전단부 구조들은 광대역 신호를 수신하는 과정에서 고조파 변환 또는 영상신호 변환에 의해 성능이 저하되는 문제를 갖고 있으며 광대역 튜닝 대역폭과 동시에 낮은 위상잡음을 갖는 국부발진기를 구현하기 위해 여러 개의 국부발진기를 사용하거나 주파수 분배회로를 적용하여 전단부 구조가 복잡해지는 문제를 나타내고 있다[1-3]. 본 논문에서는 기존 RF 전단부 구조들이 갖는 문제점들을 개선하기 위해 혼성변환 방식의 광대역 RF 전단부 구조를 제안하고, 광대역 특성 수신이 요구되는 DVB-H 수신기에 적용하여 제안 구조의 타당성을 검증한다.

II. 본 론

2.1 DVB-H 시스템 개요

광대역 수신시에 기존의 RF 전단부 구조가 갖는 문제점들을 개선하기 위해 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조를 제안한다. 제안한 구조의 검증을 위해 광대역 수신이 요구되는 DVB-H 시스템에 적용한다. DVB-H 시스템은 유럽방송 연합이 주도하고 있는 디지털 지상파 방송 규격인 DVB-T에서 확장된 개념으로 다채널 고품질 및 데이터 서비스를 이동 중에는 수신할 수 있도록 개발되었다. 현재 상용화를 위해서 각 휴대폰 메이커들이 앞 다투어 모바일 방송 대응 단말기 개발을 적극적으로 추진하고 있다[4]. DVB-H 시스템의 주요 규격은 유럽의 경우는 VHF/UHF 대역(470~892 MHz), 미국의 경우는 L 대역(1670~1675 MHz)을 할당하고 있다[5]. 그러므로 DVB-H 수신기

의 RF 전단부는 400 MHz 이상의 광대역 및 국제적으로밍을 위해 L 대역의 다중대역을 수신할 수 있어야 하며, 동시에 이동수신을 위한 저전력 및 소형화 설계가 필수적으로 요구되고 있다.

2.2 제안한 광대역 RF 전단부 구조

기존의 DVB-T 수신기용 전단부 구조들이 광대역 수신시 다중 국부발진기 및 주파수 분배기를 사용하는 문제점들 개선하기 위해 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조를 제안하였다. 그림 1은 광대역 및 다중대역 수신을 위해 본 논문에서 제안하는 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조를 나타내었으며 크게 상향변환 블록과 직접변환 블록으로 구성된다. VHF/UHF 대역의 광대역 신호는 상향변환 블록의 부고조파 혼합기를 사용하여 입력 신호보다 높은 1차 중간주파수로 변환시킨 후 직접변환 블록에서 기저대역 I/Q 신호로 변환하는 방식이다.

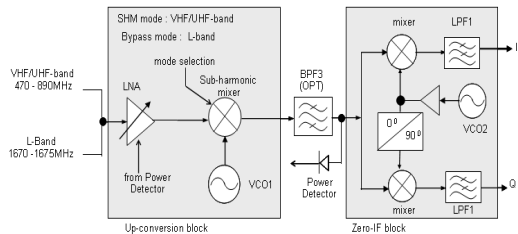


그림 1. 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조
Fig. 1 The front-end architecture with hybrid-conversion method

혼성변환 방식 RF 전단부의 광대역 VHF/UHF 대역 수신을 위한 동작 원리 및 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 그림 1처럼 저잡음 증폭기(LNA)에서 증폭된 입력 신호 f_{RF} 는 단일 국부발진기(VCO1)와 부고조파 혼합기(SHM)로 입력된다. 부고조파 혼합기는 $|2f_{LO} \pm f_{RF}|$ 성분이 최대가 되는 주파수로 주파수 변환을 하며, 영상신호 $|2f_{LO} + f_{RF}|$ 성분은 대역통과필터(BPF3)에 의해서 제거되고, 원하는 $|2f_{LO} - f_{RF}|$ 신호는 대역통과필터를 거쳐 직접변환 블록에 의해서 기저대역 I/Q 신호로 변환된다. 직접변환 블록은 혼합

기(mixer)와 국부발진기(VCO2)에 의해서 주파수 변환 후 원하는 신호만 저역통과필터(LPF1)로 선택하여 I/Q 신호로 변환한다.

그림 2처럼 LO의 고조파 신호 및 영상신호가 원하는 대역 밖에서 존재하기 때문에 고조파 신호 변환 및 영상신호 변환 문제를 해결할 수 있으며, 광대역 신호가 상향변환 블록에 의해서 1672.5 MHz 단일 주파수로 변환되어 직접변환 블록으로 입력되기 때문에 광대역 신호의 변환 과정에서 발생하는 직접변환 블록의 I/Q 부정합에 의한 문제를 개선할 수 있다.

그러나 제한한 구조는 상향변환 블록의 부고조파 혼합기 및 직접변환 블록의 혼합기에 의해서 발생하는 스퓨리어스 성분이 광대역 VHF/UHF 대역내에 발생하여 수신기의 성능을 저하시키는 문제를 발생한다. 이는 IMT(Inter-Modulation Table)를 사용하여 발생 가능한 스퓨리어스 특성을 분석 후 구성회로의 설계를 통하여 개선하였다.

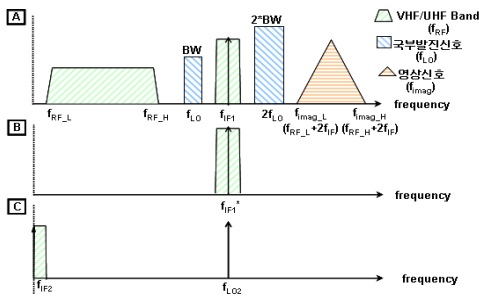


그림 2. 혼성변환 방식의 광대역 수신 동작시 주파수 스펙트럼

Fig. 2 The frequency spectrum of the proposed architecture for broadband operation

III. DVB-H용 RF 전단부의 파라미터 도출

3.1 이득 규격

상용 DVB-H 복조기의 입력 조건은 -12 dBm ~ -5 dBm 사이를 갖는다. 수신기의 감도 기준인 -81.9 dBm 입력신호 조건인 경우, RF 전단부의 출력 단자에서 -10 dBm 출력을 얻기 위해서 최소 71.9 dB 이

득이 요구되며, -95.6 dBm 입력신호 조건인 경우에는 최대 85.6 dB의 이득이 요구된다.

3.2 잡음지수 규격

RF 전단부의 잡음지수는 수신기의 감도 특성에 직접적인 영향을 준다. 잡음지수 규격을 유도하기 위해 변조방식의 조건은 대역폭 8 MHz, 64QAM, 부호율= $2/3$, $C/N=17.3$ dB이고 신호 조건은 약전계인 경우는 -81.4 dBm, 강전계인 경우는 -28 dBm으로 하였다. 채널대역폭 내에 존재하는 입력 잡음전력 N_{in} 은 식 (1)을, 입력 신호대 잡음비 SNR_{in} 는 식 (2)을 사용하여 계산할 수 있다. 여기서, -174 은 열잡음 전력, BW 는 채널 대역폭, P_{in} 은 입력신호를 의미한다.

$$N_{in} = -174 + 10\log(BW) \quad (1)$$

$$SNR_{in} = P_{in} - N_{in} \quad (2)$$

출력 신호대 잡음비 SNR_{out} 은 C/N 값과 동일하기 때문에 전체 잡음지수 NF_{max} 는 식 (3)을 이용하여 계산한다.

$$NF_{max} = SNR_{in} - SNR_{out} \quad (3)$$

수신기는 약전계 신호를 에러없이 복원하기 위한 RF 전단부의 전체 잡음지수는 6.05 dB 이하가 되도록 설계해야 한다. 반면에, 강전계 신호의 경우는 감도 특성이 잡음지수에 영향을 민감하지 않다. 하지만 AGC 회로의 동작으로 RF 전단부의 전체 이득이 낮아지므로 신호대 잡음비 측면에서 잡음의 영향을 고려해야 한다.

3.3 위상잡음 규격

위상잡음 특성은 인접채널에 의해서 초래되는 C/N 영향 및 GSM 신호에 의한 영향들을 고려해야 한다. 일반적으로 수신기의 단일톤 조건에서 유도할 수 있으므로 MBRI 규격에서 명시된 S1 패턴 조건에서 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 여기서, N_{pm} 은 위상잡음에 의한 잡음전력, P_{in} 은 입력신호, BW 는 채널 대역폭을 의미

한다. 오프셋 주파수는 1.25MHz와 9.25 MHz으로 하였다

$$PN [dBc/Hz] = N_{pn} - P_{in} - 10\log(BW) \quad (4)$$

3.4 IIP3 규격

MBRI 규격의 S1/S2 패턴에서 인접 간섭신호들의 2차 또는 3차 상호변조 성분이 회파 채널 내에서 잡음을 발생시켜 수신기 성능의 저하를 초래한다. IIP3 규격은 감도 특성 및 위상잡음 특성이 만족되어야 하므로 위상잡음 규격과 유사한 방법으로 계산하였다. IIP3 규격과 IIP2 규격은 식(5)과 식(6)을 이용하여 계산했고, $P_{blocker,in}$ 은 입력 간섭신호의 크기, $N_{IM3,in}$ 은 3차 상호변조에 의한 잡음을 의미한다.

$$IIP3 = P_{blocker,in} + \frac{P_{blocker,in} + N_{IM3,in}}{2} \quad (5)$$

$$IIP2 = P_{blocker,in} + P_{blocker,in} + N_{IM3,in} \quad (6)$$

일반적으로 강전계 조건에서 최적의 신호대 잡음비 성능을 유지하기 위해 RF와 기저대역에서 자동 이득제어 회로를 사용하여 선형성 규격을 만족하도록 하였다.

3.5 동작주파수

동작 주파수는 유럽의 DVB-H 규격인 VHF/UHF 대역과 미주 규격인 L 대역을 선정하였으며, 주파수 대역폭은 8 MHz를 기준으로 하였다.

IV. Link Budget를 통한 RF 전단부 설계

본 논문에서 제안하는 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조를 적용하여 MBRAI에서 권고하는 DVB-H 수신기 성능 규격을 만족하는 RF 전단부의 설계 파라미터의 도출하였다. 동작 주파수 항목은 유럽의 DVB-H 규격인 VHF/UHF 대역과 미주 규격인 L 대역을 선정하였으며, 주파수 대역폭은 국가별로 차이가 있지만 일

반적인 8 MHz를 기준으로 한다. 시스템 성능 평가를 위해 적용했던 가우시안 채널 조건과 변조방식 64 QAM, 부호율 2/3, C/N=17.3 dB의 조건에서 RF 전단부의 설계 목표는 이득 72 dB 이상, 잡음지수 6.0 dB 이하, IIP3 -6.0 dBm 이상으로 설정한다.

그림 3(a)는 RF 전단부의 전체 이득은 75 dB 이상, 전체 잡음지수는 6.0 dB 이하가 되도록 설계한 결과를 종속 연결된 구성 회로별로 나타낸 것으로 전체 이득은 각 구성 회로에 의해 영향을 받는 반면에 잡음지수는 첫 번째 증폭기의 잡음지수 특성에 가장 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)는 RF 전단부의 전체 IIP3는 18 dBm 이상, 신호대 잡음비는 약전계 조건에서 16 dB 이상이 되도록 설계한 결과를 구성 회로별로 나타냈으며, 전체 IIP3 특성은 각 구성 회로에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

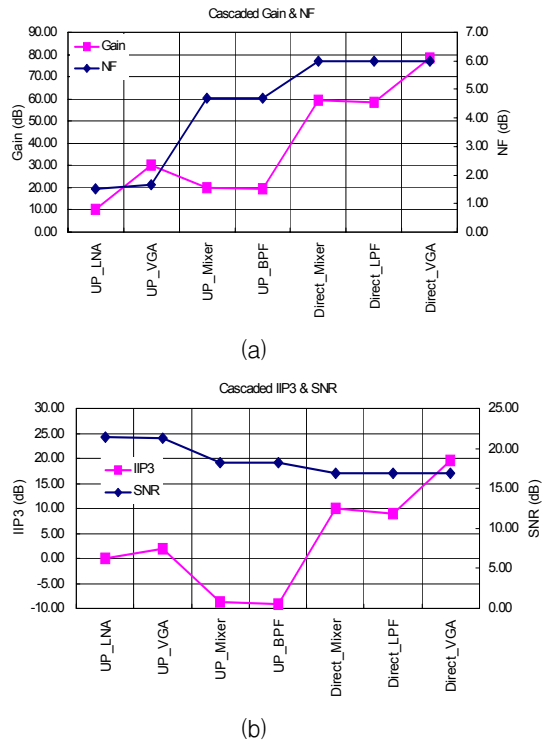


그림 3. 광대역 Link-Budget 결과
 (a) 종속이득 및 잡음지수, (b)종속 IIP3 및 신호대잡음비
 Fig. 3 The result of link-budget for broadband reception.
 (a) cascaded gain and NF, (b) cascaded IIP3 and SN

V. 제안한 RF 전단부의 구현 및 실험

링크 버짓 방법으로 결정한 RF 전단부의 설계 규격을 만족시킬 수 있도록 각 구성회로들을 설계하고 비유전율 4.6, 기판 두께 1.0 mm 에폭시 기판에 제작하였다. 그림 4는 RF 전단부 측정을 위해 상향변환 블록과 직접변환 블록을 구성하는 회로들을 고조파 케이블로 연결하여 구성한 실물도를 나타낸 것으로 DVB-H 수신기의 동작 주파수에서 낮은 삽입손실 특성을 갖는 고조파 케이블을 사용하였다. RF 입력 신호의 경우, 1-tone 발생은 신호 발생기 Agilent 사 E4438B를 사용했고, IIP3 및 IMD 측정을 위한 2-tone 신호는 전력 분배기와 2 대의 E4438B를 사용하여 발생시켰다. 이득 및 IIP3 측정은 Agilent사 스펙트럼 분석기 E4405B, 잡음지수는 Agilent사 잡음지수 분석기 N8975A를 사용하여 각각 측정하였다.

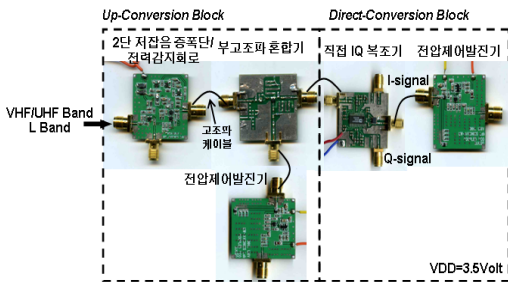


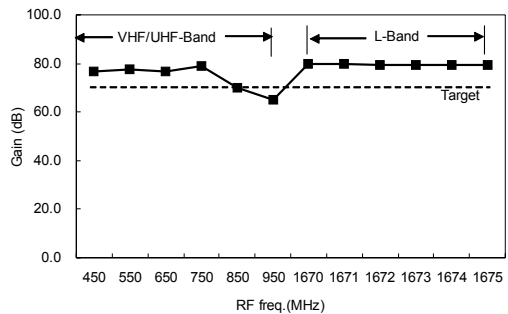
그림 4. 제작한 RF 전단부의 실물도
Fig. 4 Photograph of the fabricated RF front-end

상향변환 블록의 저잡음증폭기는 광대역에서 저잡음과 고이득 특성을 구현하기 위해 공통 에미터 구조의 초단 증폭기와 캐스코드 구조의 가변이득 증폭기를 중속 연결하여 2단으로 구성하였다. 초단 증폭기는 광대역의 모든 주파수 대역에서 낮은 잡음지수와 적절한 이득 특성을 갖도록 하였고, 가변이득 증폭기는 높은 이득과 인가되는 제어 전압에 따라서 이득이 가변되도록 하여 강전계 신호 조건에서 선형적인 동작이 가능하도록 하였다.

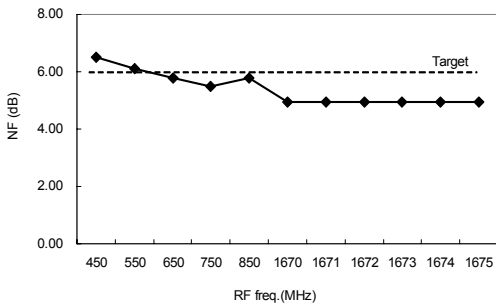
역병렬 다이오드 부고조파 혼합기는 역병렬

다이오드 (Anti-Parallel Diode)로 구현하여 제어 전압 및 국부발진기의 유무에 따라서 주파수 변환을 수행하는 혼합기로 동작하거나 감쇄기로 동작하도록 하였다. 국부발진기는 고조파 왜곡 성분을 억압하여 위상잡음 특성을 개선할 수 있는 결합구조의 마이크로스트립 공진기 회로를 적용하여 광대역과 낮은 위상잡음을 갖도록 하였다. 직접변환 블록은 설계 규격을 만족시키기 위해 상용 IC를 사용하여 설계하였다.

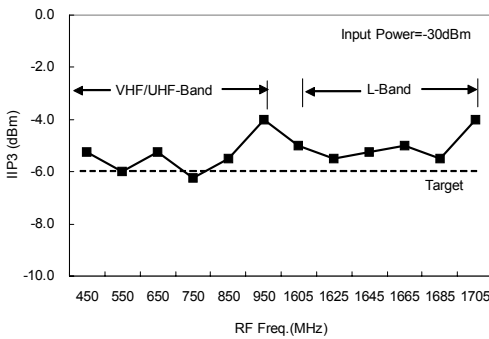
그림 5(a)는 VHF/UHF 대역 및 L 대역에서 RF 전단부의 전체 이득 특성을 나타낸 것으로 두 대역에서 80 dB의 이득 특성을 나타내고 있다. RF 전력은 -80 dBm 신호를 입력했으며, RF 이득제어 전압과 베이스밴드 이득제어 전압은 최대 이득을 위한 조건으로 설정하여 측정하였다. 그림 5(b)는 VHF/UHF 대역 및 L 대역에서 RF 전단부의 전체 잡음지수 특성을 나타낸 것으로 VHF/UHF 대역에서 6.5 ~ 5.5 dB 잡음지수 특성을 나타내고 있다. 그림 5(c)는 강전계 신호 조건에서 RF 전단부의 IIP3 특성을 나타낸 것으로 입력 신호는 강전계 신호 조건보다 높은 -30 dBm을 입력하였으며, RF AGC와 베이스밴드 AGC는 최소 이득조건에서 측정하였다. 도출한 RF 전단부의 IIP3 규격인 -6.0 dBm을 대체로 만족시키고 있지만 특정 대역에서는 -0.5 dBm 저하되는 특성을 나타내고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5 RF 전단부의 성능 (a) 전체 이득, (b) 전체 잡음지수, (d) IIP3

Fig. 5 The performance of RF front-end (a) total gain, (b) total NF, (c) IIP3

위상잡음 특성은 각각의 읍셋 주파수에서 설계 규격과 동일한 특성을 나타내고 있지만 온도 및 소자 오차를 고려한다면 추가적인 회로 보완이 요구된다. 구현된 RF 전단부 구조의 변환이득 특성은 비교 구조들의 특성과 유사한 결과를 나타내고 있다. 잡음지수는 Vassiliou *et al.*[6]이 얻은 결과와 비교했을 때 최대 2.8 dB 특성이 저하되는데 이는 2단 증폭단의 잡음지수 및 이득 특성과 변환 손실을 갖는 부조고파 혼합기 특성으로 기인한 것으로 능동 구조의 부조고파 혼합기를 집적회로로 구현하여 보상할 수 있을 것으로 판단된다. IIP3 특성은 비교 구조들 간의 측정 방법에 차이는 있지만 제안한 RF 전단부의 이득 변화량이 100 dB의 높은 특성을 갖기 때문에 강전계 조건에서도 수신기의 성능에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 비록 위상잡음의 측정 결과를 나

타내지는 않았지만, 위상잡음은 읍셋 주파수 10 KHz에서의 결과를 제외하고는 특성은 Vassiliou *et al.*[6], Microtune[7]이 제시한 결과와 유사한 특성을 나타내고 있다. 하지만 기존의 구조들은 여러 개의 국부발진기와 분배 회로를 사용해야 하는 단점을 갖는다.

표 1. RF 전단부 측정 결과

Table 1. The measurement result of the proposed RF front-end

파라미터	설계 규격	측정 결과
Operating freq. (MHz)	VHF/UHF 대역 : 474 ~ 860 L 대역 : 1670 ~ 1675	
Gain (dB)	72 이상	73 - 80
NF (dB)	6.0 이하	6.5 - 5.5 이하
IIP3 (dBm)	-6.0 이상	-5.0 이상 RF/BB AGC 동작
Phase Noise (dBc/Hz)	-124.02 @1.25MHz -135.02 @ 9.45MHz	-124.0 @ 1MHz -150.0 @ 10MHz

VI. 결론

본 논문은 광대역 수신기에 적합한 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조를 제안하고, 설계, 제작 및 실험을 통하여 제안한 방식의 타당성을 검증한 연구 결과이다. 본 논문에서 제안한 전단부 구조의 검증을 위해 광대역 수신기가 요구되는 DVB-H 시스템에 적용하였다. 이를 위해 RF 전단부 및 이를 구성 회로들의 설계 규격을 국제 표준에서 정의하고 있는 DVB-H 수신기 성능 규격을 토대로 링크 버짓 방법으로 도출하였다.

실험 결과 제안한 RF 전단부는 광대역을 간단한 구조로 수신할 수 있을 뿐만 아니라 기존에 연구된 복잡한 구조의 RF 전단부가 갖는 전기적 특성에 상응하는 성능을 나타내었다.

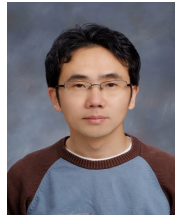
본 논문에서 제안하고 있는 혼성변환 방식의 RF 전단부 구조 및 구성 회로들은 광대역 및 다중대역 무선

통신 단말기에 응용이 가능하며, 특히 MMIC 및 RFIC와 같은 집적화 기술을 통하여 제작된다면, 하이브리드 방식으로 제작된 본 논문의 결과보다 우수한 특성과 저전력, 소형화를 구현할 수 있어 광대역 및 다중대역 무선통신 시스템 구현에 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] Antoine. P *et. al.*, "A Direct-Conversion Receiver for DVB-H", IEEE international Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers, pp.426-607, Feb. 2005.
- [2] Kampe A. and Olsson H, "A DVB-H Receiver Architecture" NORCHIP Conference 23rd, pp. 265-268, Nov. 2005.
- [3] P. Antoine *et. al.*, "A direct-conversion receiver for DVB-H", IEEE J. solid state Circuits, Vol. 40, pp.2536-2546, Dec. 2005.
- [4] DVB, "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers", EN300 401 Vol. 1.3.3, May 2001.
- [5] Mobile and Portable DVB-T/H Radio Access Interface Specification, Version 2.0, June 2007.
- [6] Iason Vassiliou *et. al.*, "A 65nm CMOS Multistandard, Multiband TV Tuner for Mobileand Multimedia Applications", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 43, No. 7, July 2008.
- [7] MT2260 Single-Chip Broadband Tuner Rev. B0, Microtune, 2006.

저자 소개



고민호(Min-ho Go)

2009년 02월 인하대학교 전자공학과 (공학박사)
현재 : 인하대학교 전자공학과 (박사후과정)

※ 관심분야 : 통신 시스템, RFIC/MMIC, 레이더 설계 등



표승철(Seung-chul Pyo)

2009년 02월 인하대학교 전자공학과 (공학석사)
현재 : 삼성전기 중앙연구소 연구원

※ 관심분야 : RFIC/MMIC, LNA 등



박호달(Hyo-dal Park)

1987년 (불)국립항공우주대학 전자공학과 (공학박사)
1992년 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 항공통신 시스템, 초고주파 회로 등