

# 자동 변환 임피던스 매칭 네트워크를 갖는 CMOS FM 수신기 프론트엔드 구현<sup>†</sup>

(Implementation of a CMOS FM RX front-end with an automatic tunable input matching network)

김 연 보<sup>1)</sup>, 문 현 원<sup>2)</sup>

(Yeon-Bo Kim and Hyunwon Moon)

**요 약** 본 논문에서 2개의 다른 특성을 갖는 FM 안테나들을 사용할 수 있도록 자동 변환 매칭 네트워크를 갖는 CMOS FM 수신기 프론트엔드 구조를 제안하였고 이를 65nm CMOS 공정을 이용하여 설계하였다. 제안된 FM 수신기는 높은 주파수 선택 특성을 갖는 임베디드 안테나를 사용 시 FM 전체 주파수 밴드에서 일정한 수신감도를 유지하기 위해서 저 잡음 증폭기의 입력 매칭 회로의 공진 주파수를 채널 주파수에 따라 가변이 가능하도록 구현하였다. 구현된 FM 프론트엔드의 시뮬레이션 결과는 약 38dB 전압이득, 2.5dB 이하의 잡음 지수 특성, -15.5dBm의 IIP3 선형성 특성을 보이고 1.8V 전원에 3.5mA 전류를 소모한다.

**핵심주제어** : FM 수신기, 프론트엔드, 임베디드 안테나, 저 잡음 증폭기, 임피던스 매칭 네트워크

**Abstract** In this paper, we propose a CMOS FM RX front-end structure with an automatic tunable input matching network and implement it using a 65nm CMOS technology. The proposed FM RX front-end is designed to change the resonance frequency of the input matching network at the low noise amplifier (LNA) according to the channel frequency selected by a phase-locked loop (PLL) for maintaining almost constant sensitivity level when an embedded antenna type with high frequency selectivity characteristic is used for FM receiver. The simulation results of implemented FM front-end show about 38dB of voltage gain, below 2.5dB of noise figure, and -15.5dBm of input referred intercept point (IIP3) respectively, while drawing only 3.5mA from 1.8V supply voltage including an LO buffer

**Key Words** : FM receiver, Front-end, Embedded antenna, low noise amplifier (LNA), Impedance matching network

## 1. 서 론

FM 방송 시스템은 음성과 음악과 같은 오디오 신호를 FM 변조를 이용하여 무선 전송하는 방법으로 현재 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 무선 통신 시스템이다. 최근에 FM 방송 전파에 데이터를 중첩해 보내는 데이터 방송 표준인 RDS/RBSD (radio data system/radio broadcast data system) 서비스가 유럽

<sup>†</sup> 본 논문은 2013학년도 대구대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

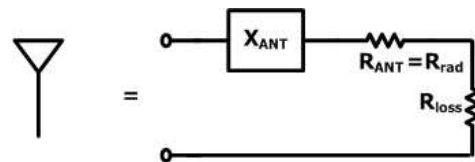
1) 대구대학교 전자전기공학부, 제 1저자  
2) 대구대학교 전자전기공학부, 교신저자  
(e-mail : mhw@daegu.ac.kr)

과 미국에서 현재 널리 사용되고 있다. 따라서 FM 주파수대역 RDS/RDS-D 시스템을 통해서 교통, 날씨, 방송국 정보 등의 간단한 텍스트를 기존 FM 수신기를 이용하여 서비스를 받을 수 있다. 또한 휴대용 전자 기기들인 스마트 폰을 포함한 MP3 플레이어, 휴대용 멀티미디어 플레이어(PMP), 보이스 레코더(voice recorder)등에 FM 송수신 기능이 추가적인 형태로 포함되어 많이 사용되고 있다 [1]. 특히, 긴급 재난 및 위급상황 발생 시 관련 정보를 많은 사람들에게 직접 전달할 수 있는 방법으로 FM 방송 시스템을 이용하는 것이 매우 유용하기 때문이다. 보통 FM 수신기 칩은 단독 형태로 사용하기 위해 구현되기도 하지만 WiFi 및 Bluetooth등의 wireless connectivity 칩 혹은 모바일 TV 수신 칩에 FM 수신 기능이 함께 집적화하여 사용되기도 한다 [2]. 따라서 FM 수신기가 휴대용 전자기기에 포함되어 구현이 많이 되고 있기 때문에 기존의 헤드폰 안테나와 같은 전통적인 긴 안테나의 사용이 용이하지 않게 되었다. 대신 집적화된 형태의 구조로 구현되어야 하기 때문에 짧은 안테나 혹은 PCB 보드 상에서 구현된 임베디드 구조의 안테나를 사용해야 한다 [3]. 그러므로 FM 수신기의 저 잡음 증폭기(low noise amplifier, LNA)는 기존의 긴 안테나와 임베디드 안테나를 모두 지원이 가능하도록 설계되어야 한다. 특히 집적 안테나 및 짧은 길이의 구조를 갖는 소형 안테나의 특성은 긴 안테나를 사용하는 경우와 달리 특성 임피던스가 매우 크고 방사저항이 작기 때문에 효율이 낮다. 또한 LNA 입력단의 Q-factor가 커지고 되고 이로 인해 입력 주파수 특성이 좁아지는 특성을 갖게 된다. 따라서 방송용 FM 주파수 영역인 76 ~ 108 MHz 주파수 대역에서 고른 수신기 특성을 확보하지 못하게 되는 문제가 발생하기 때문에 안테나의 특성 임피던스가 큰 경우까지 고려한 FM 수신 프론트엔드가 설계되어야 한다.

본 논문에서는 이어폰 안테나와 같은 긴 안테나와 임베디드 형태의 소형 안테나를 하나의 FM 수신기로 이용하여 동시에 사용할 수 있는 수신 프론트엔드의 구현을 목표로 한다. 이를 위해 사용되는 안테나 특성에 맞추어 FM 수신 프론트엔드의 입력 임피던스를 조절 가능하여 각각의 안테나에 최적화된 FM 수신기를 구현하고자 한다. 또한 임베디드 형태의 안테나의 높은 특성 임피던스로 인해 갖게 되는 좁은 주파수 특성을 보정하기 위한 자동 조절 입력 매칭 회로를

제안한다. 제안된 자동 조절 입력 매칭 회로를 통하여 FM 전 방송대역에서 수신기의 특성을 최적화된 형태로 사용이 가능하다. 제안된 FM 수신기 프론트엔드 구조를 65nm CMOS 공정을 이용하여 설계하였고 시뮬레이션을 통하여 그 특성을 검증하였다.

## 2. 헤드폰/임베디드 안테나를 동시에 사용할 수 있는 FM 수신기의 구현시 고려사항

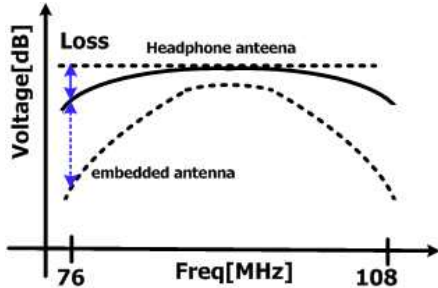


<Fig. 1> Antenna equivalent circuit model

FM 수신기 구현할 때 가장 중요한 특성은 수신감도이다. 수신감도는 FM 수신기가 신호를 복조하는 필요한 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise ratio, SNR) 특성을 확보하면서 수신할 수 있는 가장 작은 신호를 의미한다. 따라서 좋은 오디오 신호를 얻기 위해서는 SNR을 최대화하는 것은 필수적이다. 수신기 맨 앞단에 위치하는 안테나는 전자기와 신호로부터 전기 신호인 전압 신호로 에너지를 변화시키는 역할을 한다. 따라서 안테나로부터 수신기 초단의 LNA까지 수신 전압 신호 전달 특성이 FM 수신기 전체의 수신감도를 결정한다. 따라서 수신감도를 최대화하기 위해서는 안테나로부터의 전압신호의 전달이 최대화 되어야 한다.

<Fig. 1>은 일반적인 안테나의 등가회로로 안테나의 구현 방식이나 물리적인 크기에 따라 정전용량 혹은 인덕턴스의 특성을 나타내는 리액턴스 성분인  $X_{ANT}$ , 전자파 웨이브로부터 생성되는 전기적인 신호의 크기와 연관 있는 방사 저항성분인  $R_{ANT}$ , 열 에너지로 소모되는 전력을 나타내는  $R_{loss}$ 로 구성된다. 안테나로부터 전달되는 FM 신호 성분의 에너지를 최대화하는 방법은 안테나의 리액턴스 성분을 제거하기 위해 공진 회로를 구현해야 한다. 공진이 발생시 안테나가 공진되는 주파수에서 리액턴스 성분이 상쇄되기 때문에 효율은 아래의 식 (1)과 같이 된다.

$$e_s = \frac{R_{rad}}{rad + R_{loss}} \quad (1)$$



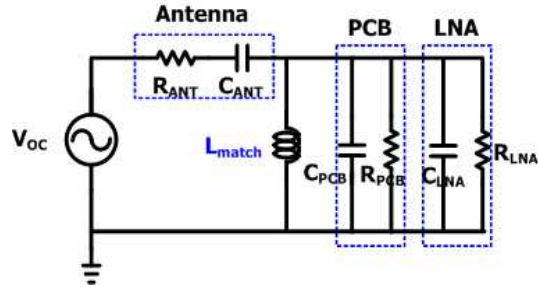
<Fig. 2> Fixed resonance antenna frequency performance in FM band

보통 안테나의 방사 저항은 구현되는 안테나의 물리적인 크기에 비례한다. 전통적인 FM 안테나로 사용하는 헤드폰 안테나와 같이 비교적 길이가 긴 안테나의 경우 충분히 FM 전자파 에너지를 전압으로 전달하기 때문에 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 임베디드 안테나와 같이 짧은 길이를 갖는 소형 안테나를 사용하는 경우 방사 저항이 작아 효율을 높이기 위한 노력을 해야 한다. 일반적으로 Q-factor는 안테나 네트워크에서 에너지의 소모 혹은 방사되는 에너지 대비 얼마나 많은 에너지를 저장하느냐에 따라 결정되므로 공진회로를 갖는 안테나의 등가회로의 경우 Q-factor는 아래의 식 (2)로 결정된다.

$$Q = \frac{2\pi f L_p - 2\pi f C_p}{R_{rad} + R_{loss}} \quad (2)$$

따라서 임베디드 용도의 짧은 안테나인 경우 Q-factor가 커지는 문제가 발생하여 FM 주파수 대역의 중심에서 공진특성을 갖는 경우 <Fig. 2>에서와 같이 밴드 끝 부분에서 손실이 커져 FM 채널별 수신 감도 특성의 차이를 발생 시킨다. 따라서 임베디드 안테나를 사용 시에는 채널 주파수에 따라 수신 감도 특성이 감쇄되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 임베디드 안테나를 사용해야 하는 휴대용 전자기기용 FM 수신기를 구현할 때는 안테나와 연결되는 LNA를 설계할 때 입력단의 높은 Q-factor 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 또한 전통적인 헤드폰 안테나의 사용

도 또한 사용 가능하도록 구현해야 한다.

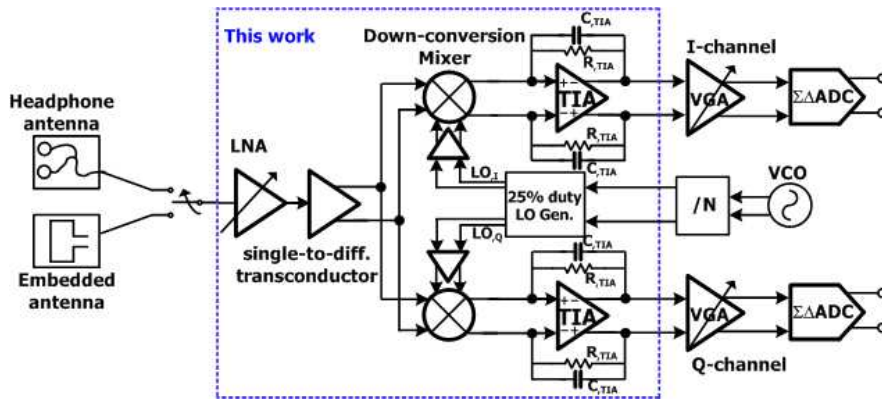


<Fig. 3> Fixed resonance antenna frequency performance in FM band

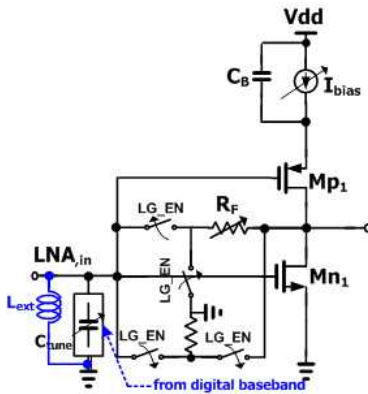
<Fig. 3>은 안테나와 수신기 입력단의 인터페이스의 간략화된 등가회로 모델이다. 이 등가 모델에서  $V_{oc}$ 는 무선 FM 전자파 신호를 안테나가 수신하여 FM 수신기로 전달하는 등가적인 전압원이며  $R_{ANT}$ 와  $X_{ANT}$ 는 안테나의 등가 특성 임피던스이다. 또한 저 잡음 증폭기의 입력 임피던스인  $R_{LNA}$ ,  $C_{LNA}$ 와 안테나로부터 저 잡음 증폭기 입력 핀까지 PCB 패턴 트레이스 길이에 의해 결정되는  $R_{PCB}$ 와  $C_{PCB}$  성분이 또한 존재한다. 따라서 전 FM 대역에서 저 잡음 증폭기 입력단에 최대 전압을 전달하기 위해서는 <Fig. 3>에서와 같이 매칭 인덕터( $L_{match}$ )를 사용하여 병렬 공진 특성을 이용하여 리액턴스 성분을 제거하여야 한다. 병렬 공진회로를 등가적으로  $R_p$ ,  $C_p$ ,  $L_p$ 로 나타낸다면 병렬 공진회로의 Q-factor는 식(3)과 같이 된다.

$$Q = \frac{R_p}{L_p C_p} \quad (3)$$

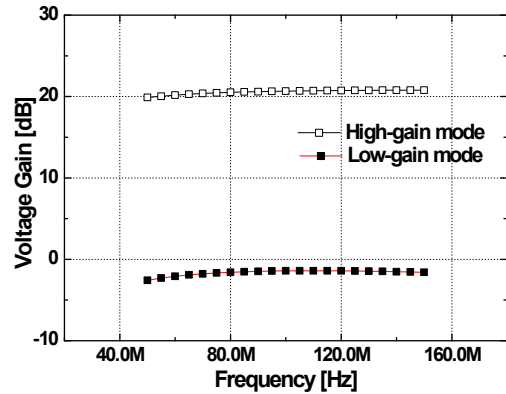
식(3)에 의해 FM 전 대역에서 평탄한 주파수 특성을 유지하기 위해서는 Q-factor 값을 낮추어야 하기 때문에 병렬 캐패시턴스 값을 최소화 하여야 한다. 하지만 <Fig. 2>에서 보듯이 소형 안테나를 사용하는 경우 공진 특성으로 높은 전압 이득 특성을 얻을 수 있지만 높은 Q 값을 갖는 임베디드 안테나로 인하여 좁은 대역 특성을 갖게 된다. 따라서 FM 전 대역에서 평탄한 이득 특성을 얻기 위해서는 LNA 입력단에 공진 주파수를 선택한 FM 주파수 채널에 따라 자동으로 조절되는 회로를 포함하는 구조가 필요하다.



<Fig. 4> Block diagram of the proposed FM radio receiver architecture



<Fig. 5> LNA with an automatic tunable input matching network

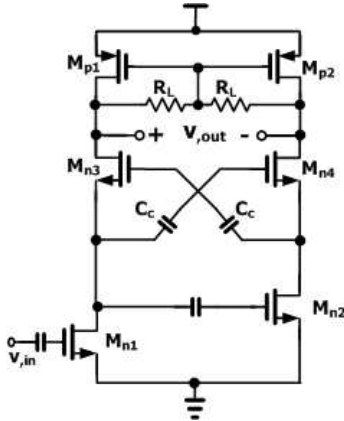


<Fig. 6> Frequency response of LNA voltage gain with two gain modes

### 3. 제안된 FM 수신기 구조 및 프론트엔드 회로 설계 결과

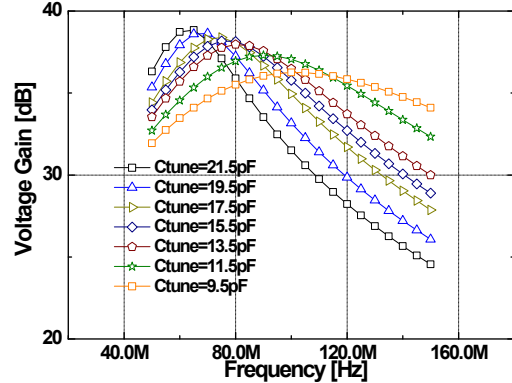
<Fig. 4>는 FM 수신기에 사용되는 전통적인 헤드폰 안테나와 포터블 전자기에 적합한 임베디드 형태의 소형 안테나를 동시에 사용 가능하도록 제안된 FM 프론트엔드 수신기 구조이다. 제안된 FM 수신기 구조는 완전 집적화와 저 전력 소모를 위해 digital low-IF 이미지 수신기 구조를 선택하였다 [4]. 사용되는 안테나에 따라 특성이 최적화 되는 LNA를 이용하여 안테나로부터 최대의 전압을 전달 받아 증폭한다. LNA를 통해 증폭된 FM 신호를 차동 신호처리를 위하여 LNA 다음 단계 single-to-differential 변환기를 사용한다. 차동 구조의 LNA를 사용하지 않는 이유는

보통 안테나 입력 단이 1개의 포트 구성되며 또한 차동 구조의 LNA를 사용할 경우 2배의 전류 소모가 필요하기 때문이다. LNA로부터 증폭되어진 RF 신호는 200kHz의 IF 신호로 passive 형태의 down-conversion mixer를 통해 주파수 변환이 이루어진다. passive mixer를 통해 IF 주파수로 변환된 전류 신호를 전압 신호로 바꾸어주기 위하여 트랜스 임피던스 증폭기(trans-impedance amplifier, TIA) 사용하였다. 200kHz의 IF 주파수는 1/f 잡음 특성의 영향을 거의 받지 않아 잡음 특성이 우수하고 baseband 회로의 전력소모를 최소화 할 수 있는 최적의 IF 주파수이다. 또한 매우 높은 dynamic 영역을 갖는 저 전력 시그마-델타 ADC를 이용하여 아날로그 필터 사용을 최소화 하였다.



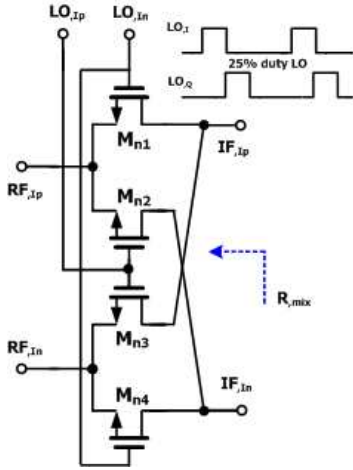
<Fig. 7> Schematic of single-to-differential converter

<Fig. 5>는 두 개의 다른 안테나 특성에 모두 적용할 수 있도록 제안된 LNA의 회로도이다. 설계된 LNA는 일반적인 인버터 형태의 CMOS 증폭기 구조를 선택하였으며 피드백 저항  $R_F$ 로 입력과 출력 전압이 고정되는 형태로 구현하였다. 매우 큰 interference가 입력될 때에도 수신 감도특성을 유지하기 위해 LNA는 높은 이득과 낮은 이득 2개의 이득 모드를 지원한다. <Fig. 5>에서 알 수 있듯이 LG\_EN 제어 신호가 선택되면 LNA 내부 스위치들이 on/off 동작을 통해 입력과 출력이 바로 연결되어 낮은 이득이 구현되고 동시에 바이어스 전류를 전달하지 않아 필요 없는 전류 소모를 줄인다. <Fig. 6>은 LNA의 2개의 이득 모드에 따른 FM 전 대역에서의 주파수특성을 보여준다. 정상 동작모드에서 LNA의 전압이득은 약 20dB이고 낮은 이득 모드에서는 -1dB로 대략 21dB 정도의 이득 변화를 LNA 회로에서 담당한다. FM 수신기의 전체 자동 이득 조절기능(AGC)은 LNA, 아날로그 전압이득제어 증폭기 (VGA), 디지털 프로그램어블 이득 증폭기(PGA)를 통하여 전체 1dB 단계로 이루어진다. 또한 앞서 언급한바와 같이 임베디드 안테나를 지원하기 위해서 LNA의 입력 단에 입력 매칭 주파수 특성을 변화할 수 있도록 <Fig. 5>에서 알 수 있듯이 가변 capacitor 어레이 셀( $C_{tune}$ )을 사용하였다. 따라서 선택된 채널 주파수에 맞추어 입력 공진 특성이 변경이 되어 전체 FM 밴드 주파수 영역에서 수신 감도 특성에 문제가 발생하지 않는다. 사용한  $C_{tune}$ 은 PVT 변화와 외부에 사용하는  $L_{ext}$ (220nH,  $Q > 30$ ) 및



<Fig. 8> Frequency response of RF amplifier voltage gain according to  $C_{tune}$  values

칩에서부터 안테나까지 PCB 라우팅 길이에서 발생하는 기생 capacitance( $C_{PCB}$ )등을 고려하여 0.5pF 단위 step으로 0.5pF ~ 31.5pF까지 변화가 가능하도록 하기 위해 6-bit의 바이너리 가중치를 갖는 가변 capacitor bank를 사용하였다. 설계된 capacitor bank의 Q-factor 값은 100MHz 주파수 기준으로  $C_{min}$ 에서 75,  $C_{max}$ 에서 150 정도의 특성을 갖는다. 입력 매칭 공진 주파수는 FM 수신기의 채널 주파수가 선택 혹은 변경될 때마다 수신기에서 측정되는 RSSI 값이 최대가 되는  $C_{tune}$ 의 값이 자동적으로 선택되도록 디지털 신호 처리 블록과 LNA 사이에 피드백 루프가 형성되어 동작한다.  $C_{tune}$ 이 선택된 후 RSSI에 측정된 수신 신호의 크기 값은 이후 수신기의 이득 제어 루프로 이득 조절하여 FM 수신기의 입력 신호에 맞는 최적의 수신 신호 감도를 유지한다. 또한 사용하는 안테나의 특성 임피던스 크기에 따라 LNA의 피드백 저항인  $R_F$ 를 크기를 맞추어 조정하여 안테나에서 LNA로 전달되는 전압 전달 특성을 최대로 하여 LNA의 이득 특성을 일정하게 유지하여 FM 수신기 프론트엔드 특성이 일정하게 유지 될 수 있다. <Fig. 7>은 전원단과 접지 등에서 발생하는 공통 잡음 영향에 둔감하게 하기 위해서 LNA로부터 입력되는 single-ended RF 신호를 LNA이후의 회로에서 차동 신호로 변환해주는 single-to-differential 증폭기의 회로도이다.  $M_{n1}$ 과  $M_{n2}$ 로 구성된 2개의 공통 소스 접지 증폭기를 사용하여 single-ended신호로부터 차동신호를 발생시키고  $M_{n3}$ ,  $M_{n4}$ ,  $C_C$ 로 구성된 capacitive cross-coupled 구조



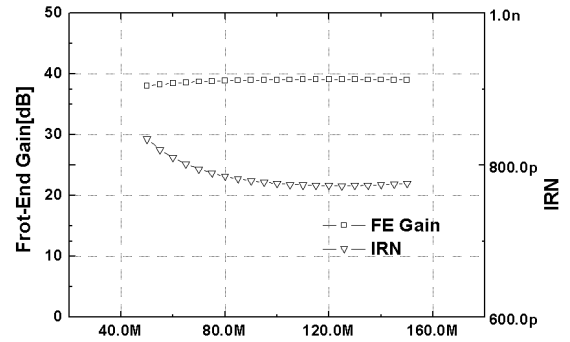
<Fig. 9> Schematic of switching stage using 25% duty LO signal

는 발생된 차동 신호간의 크기와 위상 에러를 상쇄시켜주는 역할을 한다 [5]. <Fig. 8>은 차동신호 변환 증폭기를 포함한 LNA의 주파수에 따른 전압 이득 특성을 Ctune값에 따른 특성을 보여준다. <Fig. 8>에서 알 수 있듯이 임베디드 안테나를 적용할 때에도 적합한 Ctune값이 피드백 동작에 의해 자동 선택되어 FM 주파수 전 대역에서 수신감도 특성을 거의 일정하게 얻을 수 있음을 알 수 있다. 수신된 FM 신호를 IF 주파수인 200kHz로 바꾸어 주는 회로인 down-conversion mixer는 <Fig. 9>와 같다. 매우 높은 선형성 특성과 낮은 1/f 노이즈특성을 갖는 전류 모드 passive 형태의 스위칭 셀을 사용하였고 낮은 잡음 특성을 위해 25% duty LO 신호를 적용하였다. 또한 IF 주파수로 변환된 전류 신호를 전압 신호로 바꾸어주는 역할을 하는 TIA를 mixer의 load로 사용하였다. 또한 TIA는 수신기 선형성 향상을 위해 interference를 제거해주는 LPF (low pass filter)의 역할도 한다. 스위치로 사용되는 트랜지스터의 on 저항 (R<sub>mix</sub>)의 값에 따라 선형성 및 노이즈 특성이 결정된다. 특히 잡음 특성은 TIA의 노이즈 특성이 mixer의 스위칭 동작에 의해 식 (4)에서와 같이 TIA 출력에서 노이즈는 증폭되어 나타나게 되는 특성을 갖는다 [6].

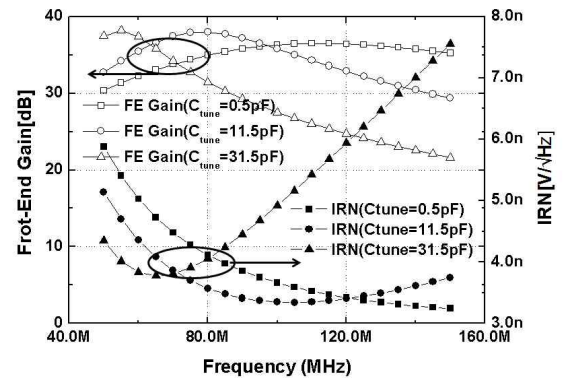
$$v_{out, IA}(f) \approx 1 + \frac{2R_{TIA}}{R_{mix}} \cdot v_{n, TIA}(f) \quad (4)$$

따라서 TIA의 노이즈 특성이 mixer의 on 저항과

TIA의 피드백 저항에 의해 증폭되어 나타나므로 낮은 잡음 특성을 갖도록 설계를 해야 한다. 따라서 TIA의 전류소모가 커지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 25% duty LO의 사용으로 저 전력 TIA의 구현을 하였고 TIA의 노이즈가 증폭되는 정도를 줄이기 위해 mixer의 스위칭 트랜지스터의 사이즈를 선형성 특성에 크게 영향을 주지 않는 범위에서 최소로 하였다. <Fig. 10>은 구현된 FM front-end의 전압 이득 특성과 노이즈 특성을 보여준다. 헤드폰 안테나를 사용하는 모드와 임베디드 안테나를 사용하는 모드 각각에 대한 특성을 보여준다. 헤드폰 안테나를 사용하는 경우 이득은 약 37dB로 FM 전 대역에서 거의 일정한 특성을 보여주며 입력 기준 잡음 (input referred noise, IRN) 특성은 1nV/√Hz 이하의 특성을 보인다.



(a) Headphon antenna + FM front-end



(b) Embedded antenna + FM front-end

<Fig. 10> Simulation results of voltage gain and input referred noise voltage performance

또한 임베디드 안테나 모드일 때의  $C_{tune}$ 에 따라 FM 프론트엔드의 전압 이득 특성과 IRN 특성을 <Fig. 10(b)>에서 볼 수 있다. <Fig. 10(b)>를 살펴보면 FM 채널 주파수는 80.1MHz로 선택되었고 이 때 최대 SNR 특성을 갖는  $C_{tune}=15.5pF$ 으로 결정된다. <Fig. 11>은 선형성 특성을 보여주는 그래프로 inband IIP3 특성이 약 -15dBm 정도의 특성을 나타낸다. 구현된 FM 프론트엔드 수신기의 특성은 <Table 1>에 요약하였다. 따라서 저 전력 소모의 일반적인 FM 안테나와 집적화가 가능한 임베디드 안테나를 동시에 만족하는 FM 프론트엔드를 65nm CMOS 공정을 이용하여 구현하였다.

4. 결론

모바일 기기의 사용이 확대됨에 따라 기존에 널리 사용되는 긴 길이를 갖는 FM 안테나뿐만 아니라 집적화 가능한 구조의 임베디드 안테나의 사용이 필요하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 특성을 갖는 2개의 안테나에 동시에 적용이 가능한 FM front-end 수신기 구조를 제안하였고 이를 65nm CMOS 공정을 이용하여 회로를 설계 하였고 그 특성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 특히 임베디드 안테나를 사용하는 경우 높은 주파수 선택 특성으로 발생하는 문제를 제안된 자동 조절 입력 임피던스 매칭 회로를 이용하여 전체 FM 주파수 대역에서 고른 수신감도 특성을 얻을 수 있었다. 구현된 CMOS FM 프

론트엔드의 특성은 1.8V 전원에서 3.5mA 전류를 소모하며 약 38dB의 전압 이득, 최대2.4dB의 잡음 지수, -15.5dBm의 IIP3 선형성 특성을 얻었다. 따라서 낮은 전력 소모로 구현되었으며 서로 다른 특성을 갖는 헤드폰 안테나 및 임베디드 안테나 사용에 최적화된 FM 수신기용 프론트엔드의 구현이 가능하여 모바일 기기에 널리 사용될 것으로 기대한다.

<Table 1> Performance summary of FM front-end

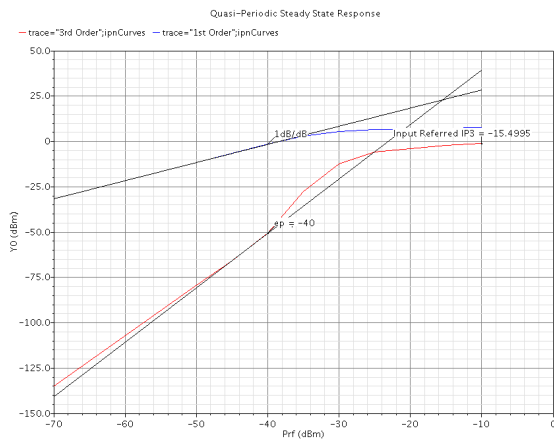
| Parameter                               | 헤드폰 안테나         | 임베디드 안테나          |
|---|-----------------|-------------------|
| Voltage gain [dB]                       | 38              | 37.5 (@res. freq) |
| Input referred noise [nV/ $\sqrt{Hz}$ ] | <0.7            | < 4 (@res. freq)  |
| IP1dB [dBm]                             | -24             | -24.5             |
| IIP3 [dBm]                              | -14.5           | -15.5             |
| 1/f noise corner [kHz]                  | 5               | 5                 |
| Supply voltage [V]                      | 1.8(RF)/1.2(BB) | 1.8(RF)/1.2(BB)   |
| Static current [mA]<br>Normal/low-gain  | 3.48/1.9        | 3.48/1.9          |

참고 문헌

[1] J. T. Ryu, "Development of miniaturized dual-frequency FM transmitter," Journal of the Korea Industrial Information System Research, Vol. 16, No. 5, pp. 31-55, 2011.

[2] M. Jeong, B. Kim, Y. Cho, Y. Kim, S. Kim, H. Yoo, J. Lee, J. K. Kee, K. S. Jung, J. Lee, H. Yang, G. Tayler, and B.-E. Kim, "A 65nm CMOS low power small size multistandard, multiband mobile broadcasting receiver SoC," February 7-11, 2010, San Francisco, CA, USA, pp. 460-461 in IEEE ISSCC Digest.

[3] Y.-M. Kim, M.-S. Park, J.-Y. Chyung, H.-M. Jung, and B.-C. Ahn, "Design of a PCB-embedded antenna for bluetooth applications," Journal of the Korea Industrial Information System Research, Vol. 11, No. 5, pp. 98-104, 2006.



<Fig. 11> IIP3 linearity performance of FM front-end

[4] H. Moon and J.-T. Ryu "A new image rejection receiver architecture using simultaneously high-side and low-side injected LO signals," Journal of the Korea Industrial Information System Research, Vol. 18, No. 2, pp. 35-40, 2013.

[5] H. Moon, S.-C. Heo, H. Yu, J.-S. Chang, S.-I. Choi, S. Lee, W.-S. Choo, and B.-H. Park, "A 27mW 2.2dB NF GPS receiver using a capacitive cross-coupled structure in 65nm CMOS," September, September 19-22, 2010, San Diego, CA, USA, pp. 1-4, in Proc. IEEE CICC

[6] E. Sacchi, I. Bietti, S. Erba, L. tee, P. Vilmercati, and R. Castello, "A 15mW, 70kHz 1/f corner direct conversion CMOS receiver" IEEE Custom Integrated Circuits Conference, Sep., pp. 459-462, 2003.



**김 연 보 (Yeon-Bo Kim)**

- 정회원
- 1979년 2월 영남대 전자공학과 공학사
- 1981년 2월 영남대 전자공학과 공학석사
- 1996년 2월 영남대 전자공학과 공학박사
- 1983년 3월 ~ 현재 대구대학교 정보통신대학 전자전기공학부 교수
- 관심분야 : 전자세라믹 및 초음파공학

**문 현 원 (Hyunwon Moon)**



- 1997년 2월 한양대학교 전과공학과 공학사
- 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
- 2004년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
- 2004년 7월 ~ 2012년 2월 삼성전자 SYSTEM LSI 사업부 책임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 대구대학교 정보통신대학 전자전기공학부 조교수
- 관심분야 : Analog/RF circuit design, PMIC design, Sensor Interface circuit design

논문 접수 일 : 2014년 07월 21일  
 1 차수 정 완료 일 : 2014년 08월 05일  
 2 차수 정 완료 일 : 2014년 08월 14일  
 게재 확정 일 : 2014년 08월 20일