

차세대 RF 트랜시버 기술 동향

Technical Trend of Next-Generation RF Transceiver for Mobile Terminals

이동통신과 방송기술 개발 현황 특집

김준형 (J.H. Kim)	이동RF연구팀 연구원
정재호 (J.H. Jung)	이동RF연구팀 선임연구원
권현국 (H.G. Gwon)	이동RF연구팀 선임연구원
이광천 (K.C. Lee)	이동RF연구팀 팀장

목 차

-
- I. 서론
 - II. 차세대 RF 트랜시버
 - III. 국외 기술 현황
 - IV. 국내 기술 현황
 - V. 결론

차세대 이동통신 서비스나 Beyond 4G 이동통신 서비스의 단말기는 유비쿼터스 정보화 사회의 도래에 발맞춰 기존의 single mode 시스템에서 탈피하여 3G LTE, Mobile WiMAX(WiBro), DMB, IEEE 802.11b/g/n 등의 다중 이동통신 서비스를 지원하는 단말기로 발전하는 추세이다. 또한 고속 데이터 전송을 위한 MIMO 및 스마트 안테나 등의 다중 접속 기능은 다중 밴드/다중 모드/다중 경로 처리 구조의 RF transceiver를 요구하고 있다. 이러한 융합 universal 단말기를 구현하기 위해서는 여러 이동통신 서비스를 지원하는 “Reconfigurability and Convergence” RF transceiver가 필요하지만 현재의 집적 기술로는 0~수 GHz에 할당되어 있는 모든 이동통신 서비스를 지원하는 단말기 구현에 제약사항이 많기 때문에 미국 및 유럽의 국외 연구기관과 기업에서는 2~3개의 선택적인 이동통신 서비스를 지원하는 RF transceiver를 개발하여 세계 시장에서 경쟁 준비를 하고 있다. 본 고에서는 차세대 이동통신 단말기의 RF transceiver 칩 셋 기술과 국내외 개발 동향에 대해 살펴보고자 한다.

I. 서론

세계 이동통신 단말기는 2007년 9천 9백억 달러의 시장을 형성하였으며 2011년까지 8.7%의 연평균 성장률(CAGR)로 증가할 것으로 예상된다[1].

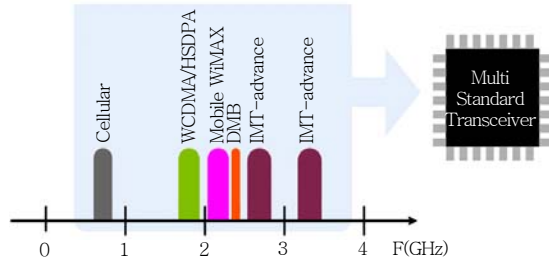
특히 4세대 이동통신 시스템의 강력한 후보군인 3GPP LTE 시스템이 국내 기술로 구현 성공함에 따라 4세대 이동통신 서비스의 상용화는 더욱 박차를 가할 것으로 예상되며 2011년 즈음에 본격적으로 4세대 이동통신 시스템 시장이 구축될 것으로 예상된다. 4세대 이동통신 서비스는 단지 고속 데이터 전송 목적에 국한되지 않고 사용자의 취향에 따라 다양한 이동통신 서비스를 선택 혹은 동시 지원하는 융합 서비스 형태로 발전하게 되는데, 이러한 요구 조건에 맞춰 RF transceiver부도 여러 신호를 동시에 처리할 수 있는 구조이어야 한다. 이를 위하여 가장 이상적인 단말기의 RF 구조는 1995년도 J. Mitola가 제안한 SDR 구조로 송신부는 DAC 외 PA 부만 내장되며, 수신부는 LNA 후의 신호처리를 바로 샘플링하여 여러 주파수대에 걸쳐 있는 신호를 처리할 수 있다. 하지만 ADC/DAC의 bit-resolution 과 sampling speed의 trade off 관계의 제약성, 수신부의 잡음 특성 및 전력 소비량을 고려할 때 현재 집적 기술로는 구현이 어렵기 때문에 가능한 집적 기술력을 바탕으로 여러 가지 형태의 대체적인 re-configurable and scalable RF transceiver 구조들

이 개발되고 있다. 본 고에서는 최근 이슈화가 되고 있는 RF transceiver의 구조 및 설계 기술 동향에 대하여 알아보고, 향후 RF transceiver 기술에 대해서 전망해 본다.

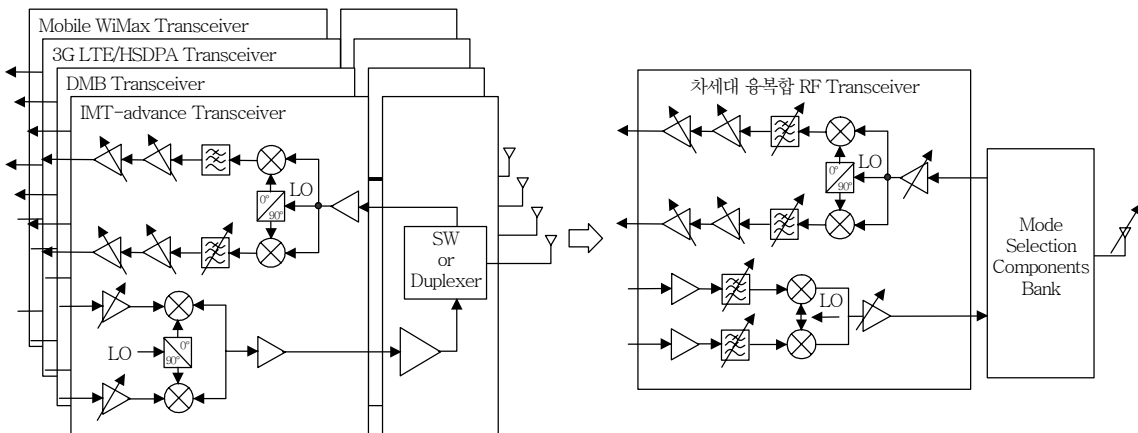
II. 차세대 RF 트랜시버

향후 무선 통신 단말기 기술 동향은 (그림 1)에서 볼 수 있듯이 2세대 이동통신인 셀룰러부터 3세대의 WCDMA와 DMB, 3.5세대의 Mobile WiMAX (WiBro)를 포함하여 4세대 이동통신인 IMT-Advanced까지의 모든 이동통신 서비스 표준을 탑재한다는 것이다.

이러한 융합 단말기는 멀티미디어 및 고속 데이터 접속 등 동시 접속 빈도를 증가시키고 급격한 단말기의 전력 소모를 야기시키기 때문에 기존의 독립적인 여러 경로의 RF 집적 형태의 기술은 경쟁력을



(그림 1) 차세대 융합 RF Transceiver 개념도



(그림 2) 차세대 융합 RF Transceiver 내부 회로도

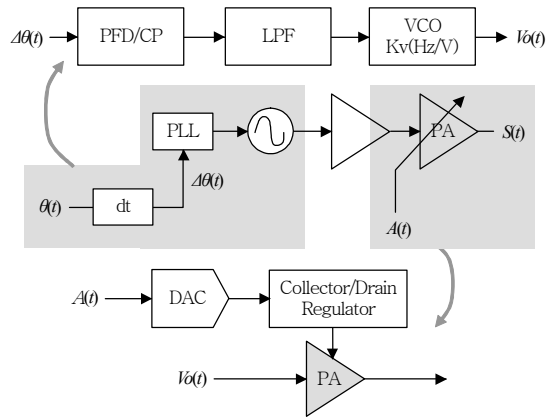
크게 떨어뜨린다. 따라서 기존의 칩 면적을 증가시키지 않으며 전력 소모를 최소화하는 (그림 2)와 같은 융합 RF transceiver 기술이 최근 화두가 되고 있다. 하지만 (그림 2)에서 볼 수 있듯이 단위 개별 소자인 PLL, VGA는 광대역 특성이 요구되며, 이로 인해 phase noise 및 in-band noise floor 증가를 야기시킬 뿐만 아니라 LNA부를 포함한 FE부의 selectivity가 우수하지 않을 경우 ADC 이후의 증폭된 잡음량이 증가하여 SNR이 열화될 수 있으며, 또한 PA의 광대역 특성 구현의 어려움이 있다. 이러한 현실적인 문제를 극복하기 위해서 현재 융합 RF transceiver 구조로 화두되고 있는 방식이 multi-chain, polar transmitter, subsampling receiver 방식이다.

1. Multi-Chain 구조

Multi-chain 방식이란 말 그대로 몇 가지의 이동통신 서비스를 처리하기 위해서 독립적인 RF transceiver 경로를 여러 개로 집적화하는 방법이다. Multi-chain 방식은 기존 기 개발된 RF 송수신 경로를 이용하기 때문에 개발이 용이하다는 장점을 가지고 있지만 한정된 경로의 집적 제약성, 경로 수 증가에 따른 전력의 비효율성 및 소형화의 제약성 등의 단점을 안고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 수신부의 몇 개의 블록에 대한 공통 사용 구조를 채택하거나 송신부의 PAM의 전력 소모를 줄이는 방법 등이 꾸준히 개발되고 있다.

2. Polar 송신 구조

Polar transmitter의 구조는 송신신호를 크기 정보와 위상정보로 나누어 위상정보는 VCO 및 PLL를 사용하여 위상변조(PM) 후 전력증폭기로 전송하고, 크기 정보는 전력 증폭기의 바이어스 전류/전압을 제어하여 송신하는 방식이다(그림 3) 참조. 일반적인 direct conversion의 송신 신호 $s(t)$ 의 $I(t)$, $Q(t)$ 는 in-phase의 $\cos(\omega_c t)$ 와 quadrature-phase의 $\sin(\omega_c t)$ 와 결합하여 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.



(그림 3) Polar Transmitter의 진폭, 크기 변조 방법

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(\omega_c t) + Q(t) \cdot \sin(\omega_c t) \quad (1)$$

$$I(t) = A(t) \cdot \cos[\theta(t)] \quad , \quad A(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2}$$

$$Q(t) = A(t) \cdot \sin[\theta(t)] \quad , \quad \theta(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{Q(t)}{I(t)} \right\}$$

(1)을 극좌표로 다시 표현하면, (2)와 같다.

$$s(t) = A(t) \cdot \cos[\theta(t)] \cdot \cos(\omega_c t) + A(t) \cdot \sin[\theta(t)] \cdot \sin(\omega_c t) \quad (2)$$

$$= A(t) \cdot \cos[\omega_c t - \theta(t)]$$

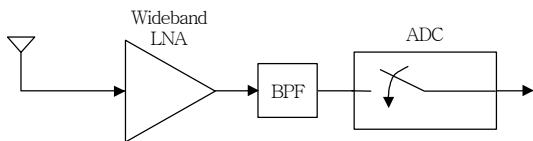
Polar transmitter는 $A(t)$ 와 $\theta(t)$ 를 각각 다른 경로에 따라 증폭하는 방법으로 VCO의 control voltage를 이용하여 $\theta(t)$ 의 정보를 전력 증폭기에 전달하고 (그림 3) 전력 증폭기의 VCC/VDD 등을 제어하여 $A(t)$ 의 정보를 최종적으로 $\theta(t)$ 와 결합하여 증폭시킨다. $\theta(t)$ 는 VCO의 출력으로 크기가 일정하고 위상정보만 실린 신호이기 때문에 전력 증폭기는 선형성이 고려되지 않는 on/off state만을 갖는 switching mode의 전력 증폭기 Class인 Class-D/E/F 급을 사용할 수 있어 전력 효율을 크게 개선시킬 수 있다. 하지만 polar transmitter는 신호의 합성시 위상과 크기의 부정합 및 지연이 일어날 경우 성능이 크게 열화되며 지연이 커지면 최종 spectral mask의 out-band로의 간섭량이 증가하게 된다[2],[3]. 또한 amplitude modulation 시 collector regulator 부에 사용될 수 있는 Class-S 및 Delta-sigma modulator 등의 광대역 특성이 요구되며 위상 정보

의 대역폭 확장 특성으로 인하여 전력 증폭기의 광대역 특성 또한 요구되기 때문에 현재는 협대역 통신 방식인 GSM/EDGE/GPRS 방식에만 주로 적용되고 있다[4],[5]. 최근 DSP 속도의 향상과 오차 보정 알고리즘 기술 개발로 인하여 시험적으로 WCDMA 및 OFDM에 적용된 사례가 논문 및 학회에 보고되고 있으며 향후 수 년 안에 3세대 및 3.5세대 이동통신 서비스 단말기에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

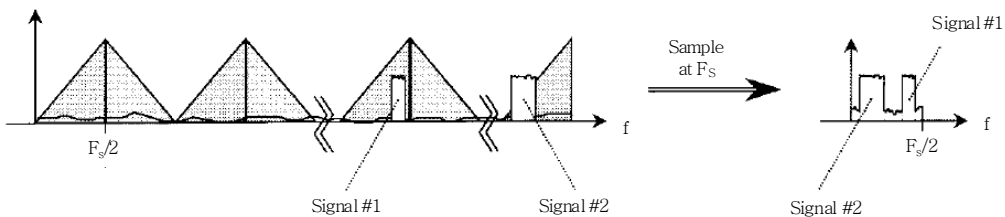
3. Subsampling 수신 구조

가장 이상적인 수신기 구조는 LNA 출력의 신호를 ADC로 직접 변환하는 방식이지만 수십 GHz의 sampling 속도를 갖는 ADC 특성을 요구하기 때문에 현재의 CMOS 기술로는 불가능하다. (그림 4)에 도시된 subsampling 방법은 pass-band sampling 방법으로도 불리며 carrier 주파수와 관계없이 정보를 싣고 있는 신호의 대역폭만 Nyquist sampling 이론을 적용한 방식이다. 즉 sampling 주파수의 배수되는 주파수에 신호 성분이 반복적으로 나타나는 것을 이용하여 중심 주파수 보다 낮은 주파수로 sampling하여 기저대역에서 신호 성분이 나타나도록 sampling 주파수를 선택하는 방법이다[6].

Subsampling 방식은 1개 이상의 신호도 에일리어싱을 피하는 sampling 영역 조건인 (3)과 (4)를 만



(그림 4) Subsampling 수신기



(그림 5) 여러 신호가 존재하는 경우의 Subsampling

족한다면 (그림 5)와 같이 동시에 하향 변환시킬 수 있기 때문에 수신기 구조가 간단해지며 앞서 거론되었던 ADC의 기술적 제한 조건을 완화시킬 수 있으나 sampling시 발생하는 중첩 noise 양이 Nyquist sampling 방법에 비해 2N(N: subsampling ratio) 배가 높고 PLL의 Jitter noise가 Nyquist sampling에 비해 N²배가 되는 단점을 지니고 있다[6],[7].

$$\left(\frac{2f_{U1}}{n_1} \leq f_s \leq \frac{2f_{L1}}{n_1-1}\right) \cap \dots \cap \left(\frac{2f_{UN}}{n_N} \leq f_s \leq \frac{2f_{LN}}{n_N-1}\right), \quad (3)$$

where $1 \leq n_k \leq \lfloor f_{Uk} / BW_k \rfloor$

$$|f_{IFa} - f_{IFb}| \geq \frac{BW_{a,b}}{2}, a, b \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (4)$$

where $BW_{a,b} = BW_a + BW_b$

III. 국외 기술 현황

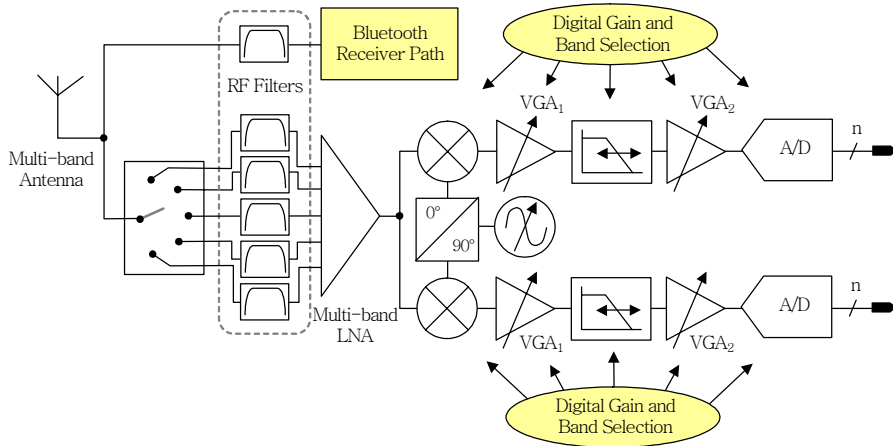
1. Multi-Chain Transmitter and Receiver

현재의 CMOS 기술력으로 가능한 수신기의 구조는 (그림 6)과 같은 multi-mode/band 구조이다[8]. FE 단에 band 및 mode를 선택할 수 있는 RF filter 부가 존재하며 필터링된 RF 신호가 광대역 하향 변환기 등을 거쳐 AD로 신호 처리된다. 현재 LNA는 0~6GHz의 주파수 대역으로 NF가 3dB 이내의 집적화가 가능한 수준이며 VGA 및 demodulator 등의 100MHz 대역까지의 광대역 특성도 가능하기 때문에 하향 변환기 등은 현재 집적 가능하지만 그림에서 볼 수 있듯이 다른 대역의 신호를 필터링하는 RF filter부의 모듈의 소형화가 큰 문제점으로 남아

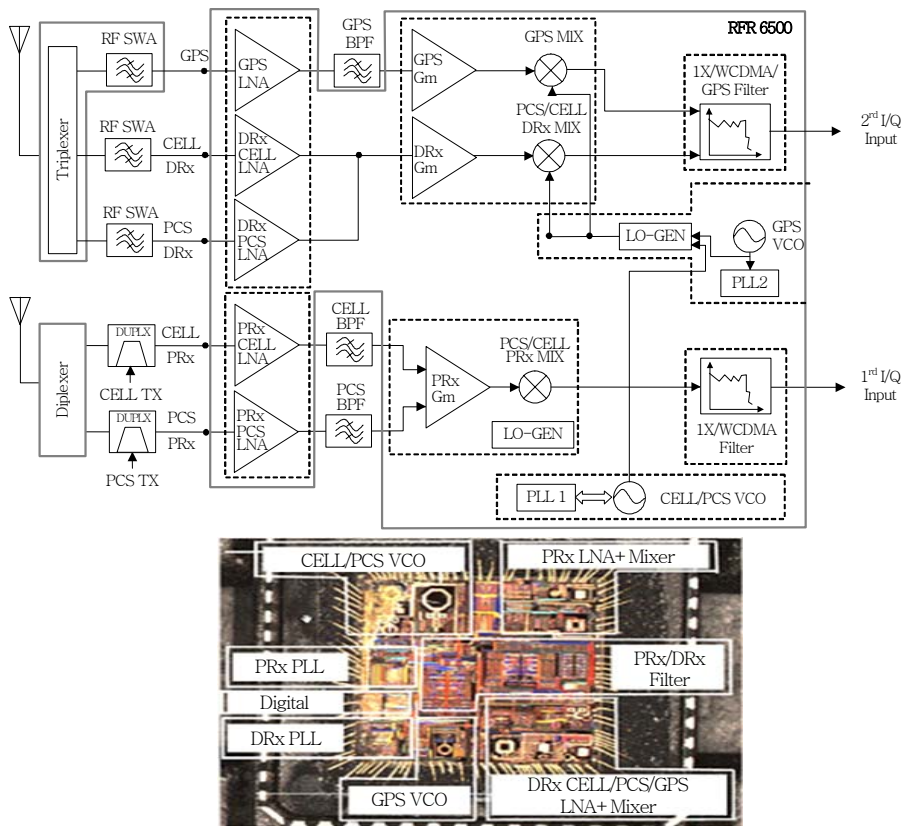
있다. Multi-RF filter부는 최근 RF MEMS 기술로 소형화 연구가 진행중이며 향후 2~3년 안에 여러 필터부를 MEMS 공정을 이용하여 집적시키는 상용 모듈이 개발될 것으로 보인다.

• Qualcomm

Qualcomm은 셀룰러 밴드와 PCS 밴드(혹은 WCDMA) 및 GPS 수신기를 내장한 dual band/dual mode diversity 수신기 “RTR6500”을 발표하



(그림 6) Multi-Chain Receiver 구조



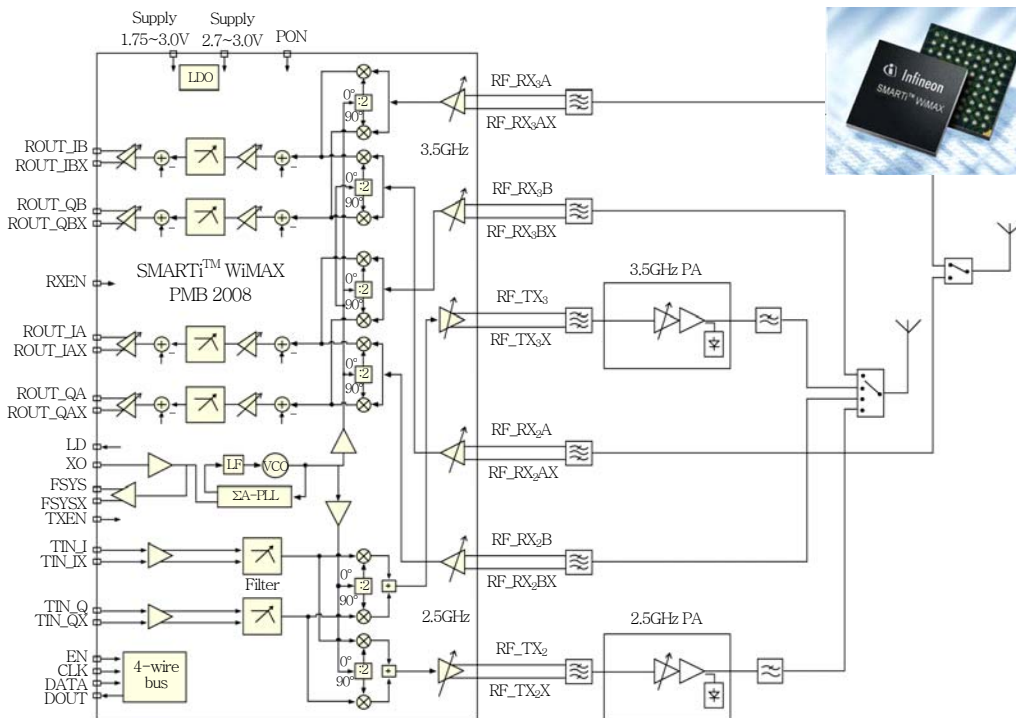
(그림 7) Qualcomm RFR6500 내부 블록 및 칩 도면

였다(그림 7 참조)[9]. 수신 diversity를 지원하기 때문에 수신 안테나가 2개 필요하며 셀룰러와 PCS 밴드별 LNA가 내장되어 있지만 하향 변환기는 한 개의 경로를 사용하는 방식으로 diversity 기능 추가로 인한 전력 소비를 줄이는 구조를 택하였다. 또한 triplexer를 이용하여 셀룰러와 PCS 시스템과 별도로 GPS 시스템을 내장하여 별도의 GPS 수신기를 필요치 않는 장점을 지니고 있다. 송신부는 일반적인 direct conversion 방식의 송신 방식을

가지며 셀룰러와 PCS 대역의 두 가지 송신 경로를 가진다. 칩 사이즈는 8×8mm이며 0.18μm CMOS 공정을 이용하여 QFN package로 제작되었다.

• Infineon

Infineon은 차세대 LTE용 SMARTi를 출시하였다(그림 8 참조)[10]. IEEE 802.16e 및 802.11b/g, 그리고 IEEE Wireless LAN 표준 규격을 모두 만족하며 WFSGA-81 패키지에 5×5mm의 크기로 제공



(그림 8) Infineon SMARTi 내부 블록도 및 패키징 칩 사진

〈표 1〉 국외 산업체들의 상용 Multi-Chain RF Transceiver 목록

연구기관	Application	송수신 방식	동작전압	사이즈	공정
Sierra	WiMAX (2×2 MIMO)	Direct conversion	1.8~2.7	7×7mm ²	CMOS
Analog Device	WiMAX/WiBro (2×2 MIMO)	Direct conversion+ ADC, DAC	3.3	9×9mm ²	CMOS
Qualcomm	Cellular/PCS	Direct conversion	-	8×8mm ²	CMOS
Infineon	WiMAX/WLAN	Direct conversion	-	5×5mm ²	CMOS
Maxim	WiMAX/WiBro	Direct conversion	2.7~3.6	6×6mm	CMOS
Philips	WiMAX (2×2 MIMO)	Direct conversion	2.8	7×7mm	SiGe BiCMOS

된다. 개별 특성으로는 가변 채널 대역폭은 3.5MHz에서 20MHz까지 지원하며 TX EVM은 -34dB, RX EVM은 -30dB의 성능을 가지며, TPC range는 45dB, RX AGC range 101dB의 성능을 가진다.

• Analog Device

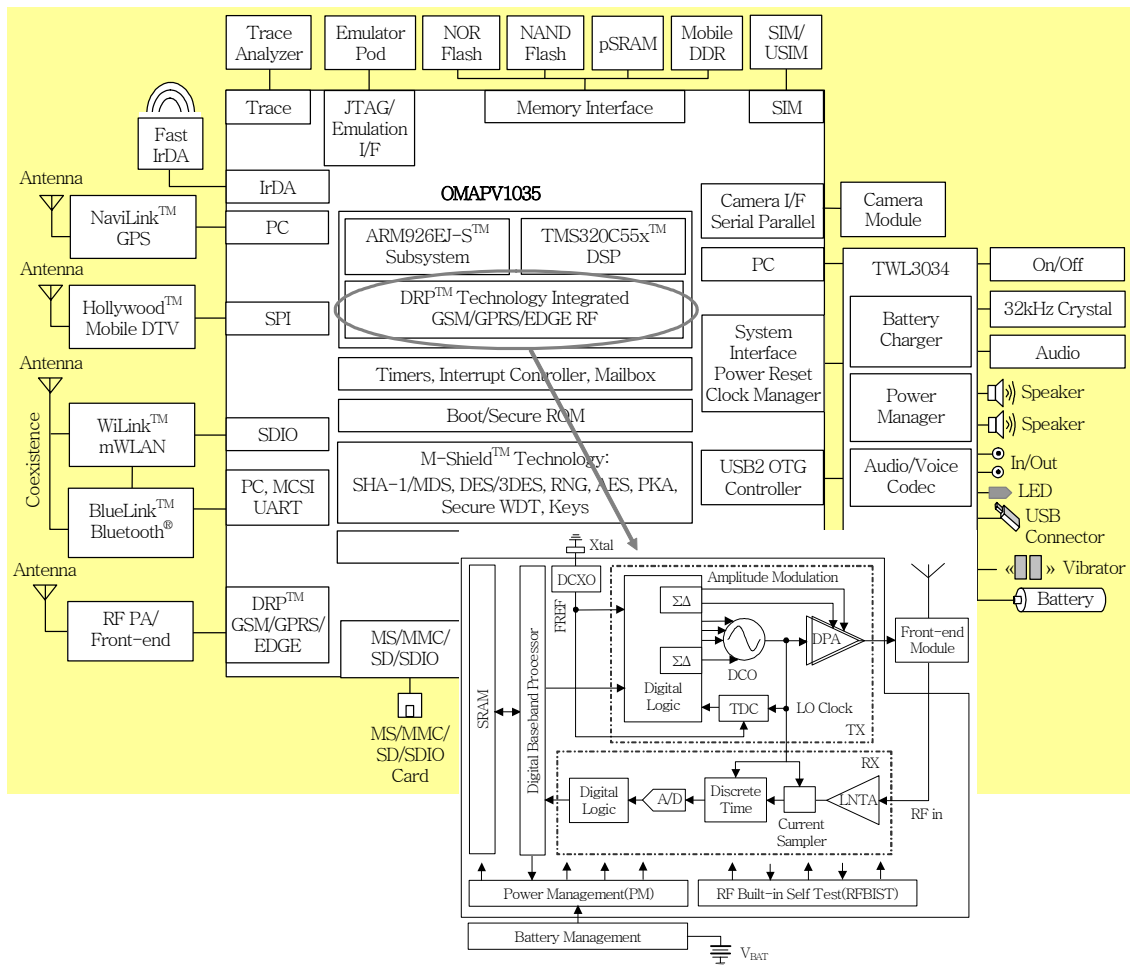
Analog Device사는 IEEE 802-16e를 기반으로 하는 Mobile WiMAX(WiBro)용 RF transceiver 칩을 개발하였다. 우리나라를 중심으로 서비스되고 있는 2.x GHz 대역과 북미를 중심으로 한 3.x GHz 대역의 칩으로 구분을 하였고 3.5MHz<BW<20MHz의 가변 채널 대역폭 특성을 가지며 수신부가 2개이고 송신부가 1개인 MISO 시스템 기능을 지원하도록

설계되었다. 또한 Analog Device사는 ADC와 DAC를 RF transceiver와 같이 집적화시켜 면적의 최소화를 극대화 시켰다.

상기와 같은 국외 기관 및 기업체들의 다양한 multi-chain RF transceiver의 상용 칩에 대한 개괄적인 성능 및 특징을 <표 1>에 나열하였다.

2. Digital RF(DRF)

DRF 기술은 현재 GSM/EDGE/GPRS system을 중심으로 활발히 개발되고 있으며 송수신부 RF부를 거의 모두 디지털화 하는 방식이 제공되고 있다. TI사는 GSM/EDGE system의 모든 chip set solu-



(그림 9) TI사의 Total Solution인 OMAPV1035 블록도

tion[11]을 제공하며, Skywork사는 quad-band solution을 제공하고 있다. DRF transceiver의 송신부는 주로 polar transmitter 구조를 가지며 수신부는 subsampling 내지는 IF-subsampling 구조를 갖는 게 특징이다.

• TI

2005년부터 노키아 GSM/GPRS 폰에 탑재된 TI사의 디지털 RF 프로세서는 디지털 베이스밴드, SDRAM, 로직, RF, 전원관리 및 아날로그 기능이 90nm CMOS 공정으로 단일칩화 된 것으로 50% 정도의 시스템 보드 공간을 줄였고, 전력 소모 면에서도 획기적인 성능을 지녔다. 최근 65nm로 게이트 면적을 줄여 GSM/GPRS/EDGE 시스템의 토탈 솔루션인 OMAPV1035도 발표하였다(그림 9) 참조 [11]. OMAPV의 RF를 포함한 DRF의 송신부는 일반적인 polar 구조지만 phase modulation을 VCO가 아닌 DCO를 사용하였고, 수신부는 LNA부 뒷단에 있는 current sampler로 샘플링되어 바로 디지털 신호 처리부로 넘어가게 된다. 이러한 DRF 구조는 RF 부품 수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 RF 파라미터를 변경하기 위해 시스템을 재구성하는 대신 소프트웨어를 통해 간단히 변경시킬 수 있어 SDR 디자인 방식으로 적합하다는 평을 받고 있다.

<표 2>는 국외 기관 및 기업체들의 DRF의 상용 칩에 대한 개괄적인 성능 및 특징을 나열하였다.

<표 2> 국외 산업체들의 상용 DRF Transceiver 목록

연구기관	Application	송수신 방식
TI	GSM/GPRS/EDGE	Polar Transmitter Digital Receiver
RFMD	Quad-Band GSM/EDGE (850/900/1800/1900)	Polar Transmitter Wide Band Direct Conversion Receiver
	Quad-Band GSM/GPRS/EDGE (850/900/1800/1900)	Polar Transmitter Wide Band Direct Conversion Receiver

IV. 국내 기술 현황

국내 산업계에서는 현재 상용화 가능한 DMB,

UWB, ZigBee 등과 같은 싱글 모드 시스템의 칩 셋 솔루션을 제공할 뿐 신개념의 융복합 단말기의 기술 연구는 아직 기초적인 연구단계에 있으며 시험적인 다중 대역/다중 모드의 트랜시버 기술 개발은 주로 연구기관이나 학교에서 주도하고 있다. ERC 연구센터(ICU, KAIST 등)는 tunable RF, 광대역, 저전력 RF 기술을 기반으로 digital, tuned, switched-reconfigurable radio 구조를 연구하고 있으며, 2005~2007년의 1단계 연구목표로 이동통신/WLAN/WPAN을 수용하는 reconfigurable digital transceiver 구조와 내장되는 핵심 부품에 대해서 연구중에 있다. Digital RF transmitter의 국내 기술개발 현황은 아직까지 국내 산업체에서 활발히 연구되고 있는 단계는 아니지만 최근 삼성종합기술원 등 산업체 연구기관에서 digital RF의 송신부 구조의 기초 연구를 시작하는 등 점차 관심을 보이고 있으며 Postech과 KAIST 등의 학교를 중심으로 한 구조 연구가 진행되고 있다. 아직은 초기 기술 연구단계로 시스템의 전체적인 integration 보다 digital RF 송신부를 구성하는 개별적인 소자들의 회로 설계 등이 진행되고 있으며 OFDM 변조방식의 시스템에 대한 적용 여부 등의 연구는 아주 기초적인 단계만 이루어진 상태이다.

V. 결론

차세대 융합 RF transceiver 기술은 최근 CMOS의 집적화 기술 발달로 인하여 많은 RF 블록을 디지털화 하는 기술로 개발하는 추세이다. 현재 DRF의 송신 방식인 polar architecture는 WCDMA 및 OFDM system에 실험적으로 적용되고 있으며, 그와 동시에 오차 보정 알고리즘 및 고속 동작을 위하여 CMOS의 90nm 이하의 기술이 함께 개발되고 있어 빠른 시일 내에 3세대/3.9세대까지의 이동통신 시스템 단말기에도 적용될 것으로 예상된다.

하지만 향후 몇 년 사이에는 분명 동작의 한계성이 있기 때문에 상용화 시장을 선점할 수 있는 방식은 multi-band/multi-mode 방식에 송신부의 구조

를 polar architecture 등의 digital TX 형식을 접목 시키는 방식이라 예상된다. 이미 여러 국외 기관 및 기업체의 RF transceiver 칩의 성능은 거의 평균화 되었다고 해도 과언이 아니다. 이제 RF transceiver 의 시장은 어느 업체가 이식성이 뛰어나고 기저 대역과 인터페이스가 용이한 칩 셋, 즉 토탈 솔루션을 제공하느냐에 따라 달라지며 이와 함께 칩 솔루션의 소형화 및 전력 효율성 등에 따라 판가름 날 것으로 예상된다.

이렇게 차세대 융합 RF transceiver 시장이 수 년 후에 블루오션이 될 것임을 확신하지만 DRF 및 multi-band/multi-mode RF transceiver에 대한 국내 연구 개발은 시장의 불확실성에 따른 위험성으로 인하여 아직 미미한 수준이다. 하지만 CDMA 단말기 경우와 마찬가지로 지금부터라도 개발에 박차를 가하지 않으면 외국업체의 칩 셋 솔루션을 그대로 사용할 수밖에 없는 실정이 되며 이는 단말기 RF transceiver의 원천 기술 종속을 의미한다. 국내 팹리스 업체나 정부 출연기관의 회로 설계 기술은 외국 기술력과 비교하여 뒤쳐지지 않기 때문에 원천기술에 대해 종속되지 않기 위해서는 지금이라도 산업계 및 학계, 정부 출연 연구소 등과 협력하여 DRF 및 multi-band/multi-mode RF transceiver의 원천기술 선점이 절실한 상황이다.

● 용어해설 ●

polar(극좌표): 평면 극좌표만을 정의하는 것으로 2차원 공간에서 정의되는 극좌표로서 반지름(크기) R과 위상각 θ 로 이루어지는 좌표계를 말한다.

Class-D/E/F: 증폭기의 바이어스 및 로드 정합(load matching)을 조절하여 증폭기가 선형적 증폭 기능이 아닌 입력의 threshold 값에 따라 "Turn-on/off" 역할을 하게 하는 class 군을 의미한다.

약어 정리

ADC	Analog to Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
AM	Amplitude Modulation

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DAC	Digital to Analog Converter
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EVM	Error Vector Magnitude
FE	Front-End
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
LNA	Low Noise Amplifier
LTE	Long Term Evolution
MEMS	Micro Electromechanical System
MIMO	Multi Input Multi Output
MISO	Multi Input Single Output
NF	Noise Figure
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PA	Power Amplifier
PAM	Power Amplifier Module
PCS	Personal Communication Service
PLL	Phase Locked Loop
PM	Phase Modulation
SDR	Software Defined Radio
TPC	TX Power Control
UWB	Ultra WideBand
VCO	Voltage Control Oscillator
VGA	Variable Gain Amplifier
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

참고 문헌

- [1] Wm. L. Hahn and Nhat Pham, "Global Telecommunications Market Take, December 2007," Gartner, 2008. 1.
- [2] J. Groe, "Polar Transmitters for Wireless Communications," *Communication Magazine*, Vol.45, Issue 9, Sep. 2007, pp.58-63.
- [3] Patrick Reynaert and Micheil S.J. Steyaert, "A 1.75-GHz Polar Modulated CMOS RF Power Amplifier for GSM-EDGE," *IEEE J. Solid-state Circuits*, Vol.40, No.12, Dec. 2005.
- [4] Tirdad Sowlati, Dmitriy Rozenblit, Raja Pullela, Morten Damagaard, Evan McCarthy, Dongsoo Koh, David Ripley, and Florinel Balteanu, "Quad-Band GSM/GPRS/EDGE Polar Loop Transmitter," *IEEE J. Solid-state Circuits*, Vol.39, No.12, Dec. 2004.

- [5] Alex W. Hietala, "A Quad-Band 8PSK/GMSK Polar Transceiver," *IEEE J. Solid-state Circuits*, Vol.41, No.5, May 2006.
- [6] Dennis M. Akos, Michael Stockmaskter, James B.Y. Tsui, and Joe Caschera, "Direc Bandpass Sampling of Multiple Distinct RF Signals," *IEEE Transaction on Communications*, Vol.47, No.7, July 1999.
- [7] 한건희, "SDR Receiver Architecture," 제7회 RF 집적회로 기술워크숍, Sep. 2007.
- [8] F. Gatta, D. Manstretta, P. Rossi, and F. Svelto, "Toward Multistandard Mobile Terminals-Fully Integrated Receiver Requirements and Architecture," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol.53, No.3, Mar. 2005.
- [9] Prasad Gudem, "Diversity Receivers for Multi-Band/Multi-Mode Handsets," IEEE MTT-s, Workshop pres., Sep. 2006.
- [10] "Single-chip Dual-band WiMAX/WLAN RF Transceiver IC with Standard I&O Interface," Product Brief, [www.infineon.com/RF engine](http://www.infineon.com/RFengine)
- [11] www.ti.com