

블루투스(Bluetooth) RFIC 기술현황

박성수, 현석봉

한국전자통신연구원 반도체 원천기술연구소

I. 서론

근거리에서 데이터 전송에 필요한 모든 케이블을 없애는 것을 목표로 지난 1998년 SIG(Special Interest Group)가 결성된 후 급속한 기술 발전을 보여온 블루투스는, 예상했던 초기 시장 형성이 더디게 진행되고 경쟁관계로 여겨져 온 IEEE 802.11b 기술 등이 대두됨에 따라 회의적인 전망도 받아 왔지만, 수 많은 반도체 업체들의 경쟁적인 노력에 의해 기술적 난제들이 대부분 해결되고 본격적인 시장 형성을 목전에 두고 있는 상황이다. 본 고에서는 블루투스 라디오 기술의 개요와 주요 해결 과제들을 소개하고, 지금까지 발표된 상용 RF 칩들의 주요 특징을 비교 설명하고자 한다.

통상적으로 블루투스라고 하면 지난 1999년 6월과 2001년 2월에 발표된 버전 1.0 및 1.1에 명시된 규격을 만족시키며, 제조사와 응용 기기 종류가 서로 달라도 상호운용성(interoperability)을 갖는 근거리 무선 기술을 의미한다^{[1][2]}. 블루투스는 국제 공통으로 전파법상 일정 기술기준을 만족하면 사용허가가 필요없는 2.4GHz ISM(Industrial Scientific Medical) 주파수 대역에서 동작하며, 반경 10m 거리 내에서 1Mbps의 비트 전송률로 비동기 채널은 최대 721 kbps까지 데이터 전송이 가능하고, 회로 교환(circuit switching)과 패킷 교환이 모두 가능하며 동시에 3개의 동기식 음성 채널을 지원할 수 있다. 블루투스 라디오가 갖는 주요 특징으로는 초당

1600회의 빠른 주파수 도약(hopping)을 통해 타 통신이나 피코넷과의 간섭과 페이딩 영향을 비교적 적게 받고, 송수신기의 복잡성을 최소화하도록 이진 가우시안 FM 변조 방식을 택하고 있으며, 송수신간 구분은 시간분할 다중 방식(Time-Division Duplex)을 사용하고 있는 점이다. 이러한 라디오 규격들은 비교적 단순하고 전력 소비가 적어서 유럽 방식의 DECT(Digital European Cordless Telephone)와 마찬가지로, 저가의 저전력 무선통신 구현에 주안점을 두고 고안된 것임을 알 수 있다. 같은 주파수대의 IEEE 802.11b 무선 LAN(Wi-Fi)과 비교할 때, 빠른 주파수 도약 특성을 갖는 블루투스는 일부 패킷이 주파수 선택적 페이딩 채널에 해당되어 소실된다 하더라도 곧바로 다른 채널로 이동하여 패킷 전송이 가능하며, 이진 FM 변조방식은 선형 증폭기를 요구하지 않고 주파수 오프셋의 보정도 적은 수의 프리앰블(pre-ambble)만으로 쉽게 이루어지므로, 전송 속도가 낮다는 점을 제외하면 기존의 무선 LAN에 비해 물리계층(PHY) 설계가 매우 용이하다. 따라서 블루투스는 고주파 특성이 Si-bipolar나 화합물 반도체에 비해 불리하다고 여겨지는 CMOS 기술로도 충분히 구현할 수 있어서, 국제고체전자회의(ISSCC)의 패널 세션^[3]에서도 언급된 바와 같이 그동안 상용화 실적이 거의 없었던 CMOS 라디오 기술이 주류 기술로 인정되는 최초의 사례가 될 것이다.

그러나 블루투스에서 기대되는 이러한 장점에도 불구하고 회의론도 많이 있었는 데, 그 요인은

로는 최근의 통신 기술분야 경기침체와 통신 서비스 업체의 채택 지연, 무선 LAN과의 간섭 및 보안 문제, 상호운용성을 보장하기 어려운 점, 블루투스의 목표 가격인 \$5대와는 거리가 있었던 지금까지의 높은 솔루션 비용 문제가 지적되어 왔다. 이러한 문제들 중에서 기술적인 부분들은 상당부분 해결되고 있으며, 특히 '매직 \$5대' 벽을 넘을 수 있는 단일칩 솔루션들이 속속 발표되고 있다. 여기서 단일 칩이라고 하면 기존의 SoC(System-on-Chip)가 디지털 부분만 또는 라디오 부분만 단일 칩으로 집적하는 것에서 더 나아가, 칩 내에 라디오와 디지털 프로세서가 모두 포함되어 있어서 어플리케이션 개발자에게는 소프트웨어 작업만 요구할 수 있는 것이다. 이를 위해서는 RFIC 부분이 디지털 프로세서와 동일한 CMOS 공정으로 설계될 필요가 있으며, 잡음에 민감한 아날로그 부분을 디지털로부터 보호하는 문제, 많은 시간이 소요될 수 있는 라디오와 디지털 혼성신호 시스템의 적절한 시뮬레이션 방법, 공정변화 영향을 최소화하는 설계 기법 및 튜닝의 자동화 소프트웨어화 문제, 모듈 가격의 상당부분을 차지했던 외부 부품, 특히 중간주파수 필터를 요구하지 않는 직접변환(direct-conversion) 또는 Zero-IF와 Low-IF 구조의 회로설계 문제가 해결되어야 한다. 물론 블루투스 규격이 발표되고 나서 얼마 지나지 않아 캠브리지 실리콘 라디오(Cambridge Silicon Radio, CSR)사에서 최초로 CMOS 단일칩 솔루션을 발표하였지만 최근까지도 백만개 단위의 대량 구매시 메모리 제외하고도 \$8대의 블루투스로서는 매우 높은 비용을 요구하고 있었다. 현재는 Broadcom과 TI 등 다수 업체들이 \$5대 단일칩을 발표하였고 CSR사에서도 \$5대의 인화 계획을 발표하여 당초 예상인 2004년 보다 빠른 시기에 목표 단가에 도달할 것이 예상되고 있으며, 이를 통하여 지금까지 수많은 연구에도 불구하고 상용화에는 더딘 경향을 보였던 RF CMOS 기술, 직접변환방식 등의 RFIC 기술이 비로소 대규모 상용 시장에 진입하는 계기가 마련되고 있다.

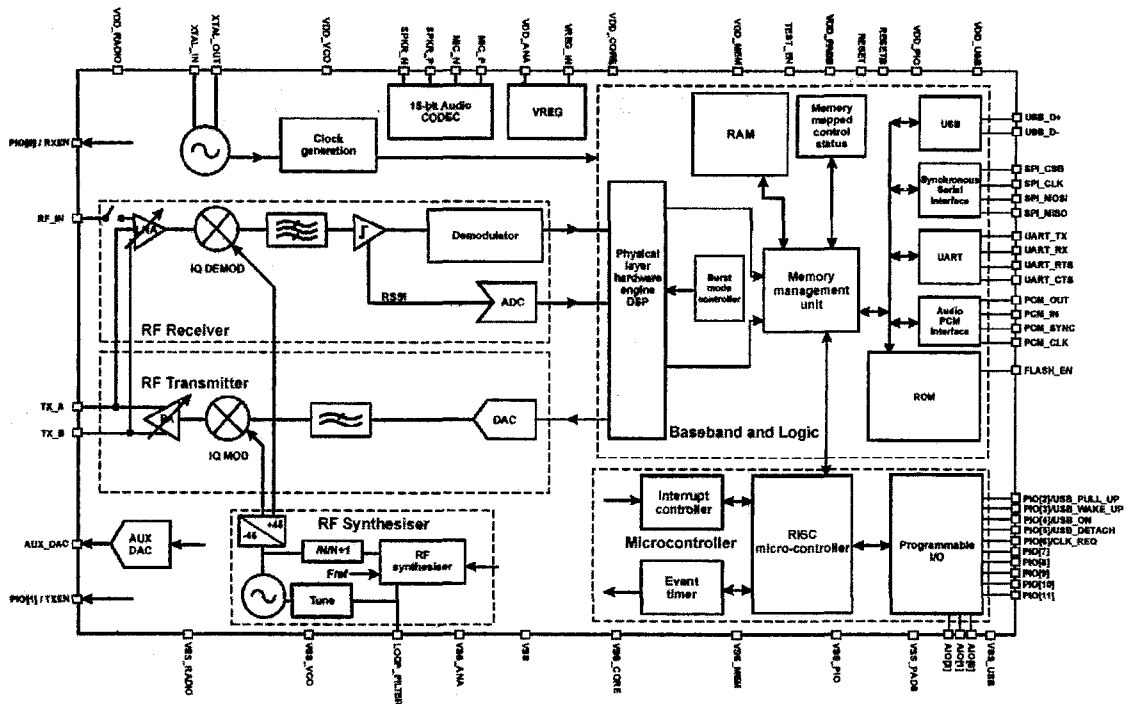
II. 블루투스 상용 RFIC 현황

초기에는 1세대 블루투스 라디오라고 할 수 있는 헤테로다인 방식 칩들이 National Semiconductor, TEMIC사 등에서 발표되었으나 2001년 이후로는 단일칩 솔루션에 유리한 직접변환방식 및 Low-IF 구조의 칩들이 주류를 이루고 있으며, 공정기술 측면에서는 저전력 특성이 강하게 요구되는 일부 분야에 SiGe 및 SOI(Silicon-on-Insulator) BiCMOS 기술이 적용되고 있으며 대부분은 CMOS 기술이 주류가 된 상황이다. 우선 상용화된 CMOS 단일칩을 살펴보고, 라디오와 베이스밴드의 two-chip 솔루션들을 소개하고자 한다.

1. CMOS 단일칩

세계 최초로 단일칩을 출시하여 세계 블루투스 칩 시장의 반 이상을 점유하고 있으며, 샘플 수요만으로도 작년엔 1백만 개의 칩을 선적한 것으로 알려진 영국 CSR사(www.csr.com)의 BlueCore01은 0.35um 표준 CMOS 공정으로 제작되었으며, Flash memory를 제외한 Radio, 베이스밴드 DSP, RISC 컨트롤러, RAM, USB 등을 한 칩에 포함하고 있다^[4]. Radio 쪽은 2.4 GHz대의 RF 신호를 수백 kHz대로 낮추는 very Low-IF 또는 near Zero-IF 구조를 택하여 일반적인 Zero-IF 구조에서 나타나는 DC-offset과 flicker 잡음 문제를 피하고 있으며, On-chip VCO 등이 내장되어 있어서, 안테나, 저가의 유전체 필터, 4~5개의 캐패시터 외에는 외부 부품을 요구하지 않는다. 이러한 구조는 최근 0.18um CMOS 공정으로 제작된 BlueCore02에도 <그림 1>과 같이 그대로 적용되고 있다^[5]. CSR사의 칩은 80% 이상의 국내 응용제품 개발 업체들이 채택할 정도로 잘 알려져 있으므로 세부적인 설명은 생략하고자 한다.

CSR보다 늦게 2001년 초반에 상용 칩을 발표한 미국 실리콘밸리의 Zeevo사(www.zeevo.com)



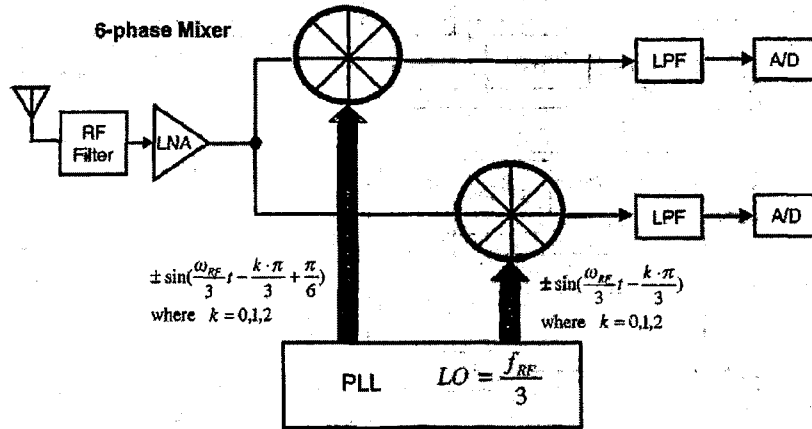
<그림 1> CSR사 Bluecore02 block diagram^[5]

TC2000칩도 CSR과 거의 유사한 집적도를 보이고 있는데, 실리콘 칩 내에는 포함되어 있지 않지만 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 패키지 내에 고주파 필터, 스위치, 매칭 회로를 내장하고 있어서, 안테나와 크리스탈 클록 등 단 7개의 외부부품만 추가하면 블루투스 모듈이 완성된다. Flash memory도 내장되어 있으므로 별도의 모듈을 제작할 필요 없이 칩을 바로 사용할 수 있다는 장점이 있으며 TSMC의 RF CMOS 0.18um 공정으로 제작되었고 1백만개 단위 구입시 개당 \$17대로 제공 가능하다. 특히 이 칩은 direct-conversion 후 1.5MHz IF 주파수로 다시 up-conversion하는 독특한 구조를 택하여 일반적인 direct-conversion에서 나타나는 DC-offset 등의 문제를 회피하고 있으며, Zeevo사 고유의 압축 알고리즘을 적용한 터보모드를 이용할 경우 최대 3Mbps까지 전송 속도를 높일 수 있다.

국내 업체로는 GCT 반도체(www.gctsemi.

com)가 최초로 라디오 트랜시버와 베이스밴드 컨트롤러를 CMOS 단일칩으로 집적한 GDM 1101칩을 발표하였다. 외부 Flash memory를 요구한다는 점을 제외하면 CSR칩과 유사한 높은 집적도를 보이며 0.18um RF CMOS 공정으로 제작되었다. 이 회사는 고유의 직접변환방식^[6]을 이용하여 RF 신호를 베이스밴드 신호로 변환시킬 수 있는데(그림 2 참조), 이 방식에서는 LO 신호 주파수가 RF 신호 주파수와 다르므로 LO 누설에 의한 DC-offset 문제를 회피할 수 있고, LO 주파수가 낮으므로 위상 잡음이 작은 CMOS VCO를 구현하기 용이하다는 장점이 있다. 대부분의 블루투스 단일칩들이 밴드폭이 제한되어 있는 Low-IF 구조를 택하여 11Mbps 급 무선 LAN이나 광대역 블루투스 등으로 확장하기 어려우나, 이 칩은 직접변환방식으로 구현되어 향후 광대역으로의 확장에 유리할 것으로 예상된다.

2002년 6월에 개최되었던 블루투스 congress



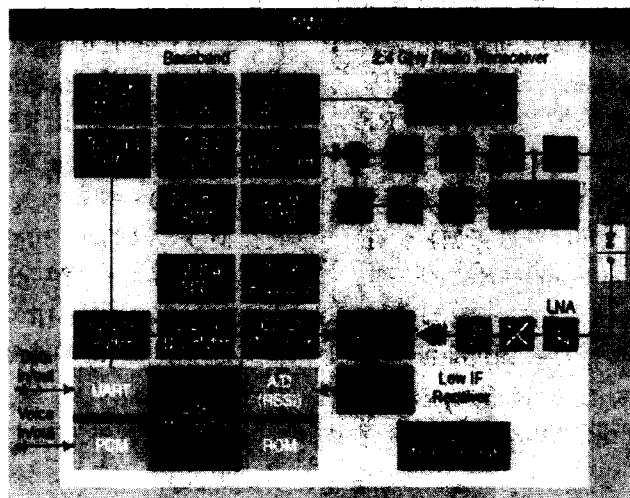
〈그림 2〉 GCT의 다중위상 직접변환 믹서 구조^[6]

2002에서는 다수의 업체들이 \$5대의 벽을 넘어서 \$4 이하대의 단일칩을 발표하여 대규모 소비자 시장의 형성 가능성이 더욱 높아졌다.

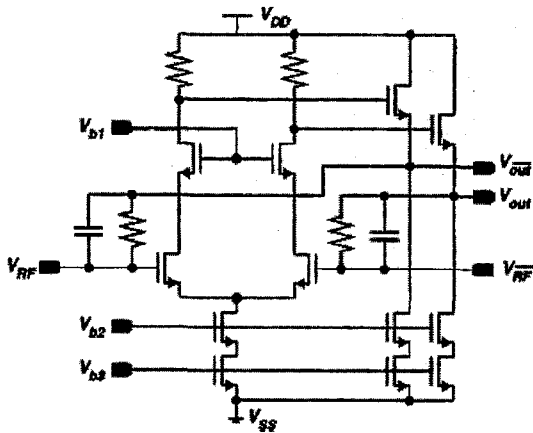
우선 독일의 인피니언(www.infineon.com) 사에서는 자사의 0.13um 표준 CMOS 공정기술을 이용한 단일칩 BlueMoon Universal을 발표했는데, 라디오 구조와 성능 측면에서는 다른 회사와 마찬가지로 Low-IF 구조(그림 3 참조)를 택하였고 수신감도 -82 dBm을 얻고 있다. 이 칩의 특징은 라디오 부분에서 가장 면적을 많

이 차지하는 On-chip 인덕터의 수를 1개 정도로 줄여서 대량 생산시의 단가를 \$3.75대로 낮춘 것이다. On-chip 인덕터는 VCO에만 쓰이고 있으며, LNA는 다음 〈그림 4〉와 같이 인덕터 없는 cascode 차동 증폭기 구조를 적용하였다^[7]. 이 회로에서는 통상적으로 50 ohm 저항 매칭을 위해 사용하는 인덕터 대신 저항과 캐패시터 피드백을 이용하여 입력 임피던스를 정합시키고 있다.

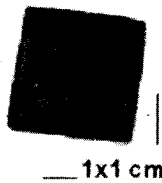
텍사스 인스트루먼트(TI, www.ti.com)에서



〈그림 3〉 Infineon 사의 블루투스 단일칩 블록 다이어그램



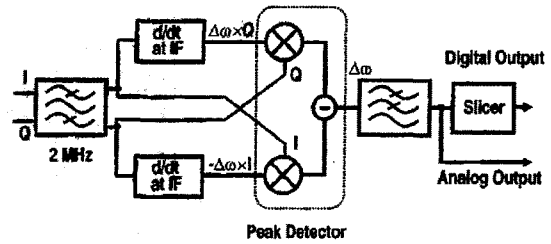
〈그림 4〉 Infineon사의 Inductorless LNA schematic^[7]



〈그림 5〉 TI의 단일칩을 이용한 블루투스 모듈

도 기존의 라디오와 베이스밴드 투칩을 0.13um CMOS 공정을 사용하여 단일칩화 하면서 양산 시에 \$4 이하대의 단가가 가능하다고 발표하였다. 이 칩의 특징으로는 RF 블록의 상당 부분을 디지털화하여 공정변화 영향을 적게 받고, scalable하여 선 폭이 변하더라도 설계 변경이 용이하며, 최대 전류 소모가 25mA 수준으로 기존 CMOS 단일 칩에 비해 전류소모를 절반 정도 줄인 점을 내세우고 있다. 또한 클록용 크리스탈 등의 외부 부품을 포함하더라도 다음 〈그림 5〉와 같이 가로 세로 1cm 이내에 블루투스 모듈을 완성할 수 있어서 크기와 가격이 중요한 휴대폰 응용에 적합하다.

미국의 이노베트 시스템을 인수한 브로드컴 (www.broadcom.com)에서도 2001년도에 블루투스 단일칩 BCM2033을 발표한 바 있으며 수신부는 다른 칩들과 마찬가지로 2MHz의 Low-IF 구조를 채택하고 있다. 브로드컴은 CSR이나



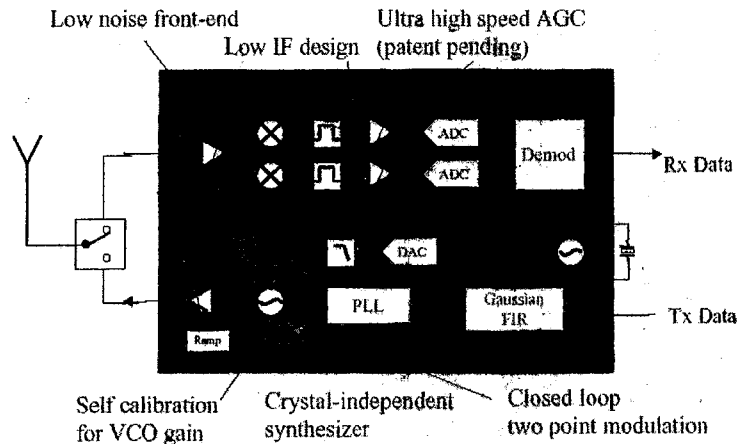
〈그림 6〉 브로드컴의 FM 복조기 회로 구조^[8]

Zeevo와 달리 다양한 투칩 솔루션도 제공하며, 타사가 RF부를 아날로그 CMOS 공정으로 설계한 것과 달리 표준 디지털 CMOS 공정으로 구현하였음을 특징으로 내세우고 있다.

2. Two-Chip 블루투스의 RFIC 현황

투칩 솔루션은 블루투스의 라디오 부분이 별도의 칩으로 구성된 구조인데, 독립적인 블루투스 모듈 구성시에는 단일칩에 비해 모듈 구성 비용이 높으나, 호스트 기기에 내장되는 응용분야, 예를 들어 휴대폰이나 PDA 등에 내장되는 경우에는 베이스밴드 프로세서 기능을 고성능의 호스트 쪽 프로세서가 담당할 수 있으므로 라디오 부분만 집적된 칩도 필요하다. 이를 라디오 단일칩이라고 부를 수 있는데, 삼성전자를 비롯하여 필립스, 인피니온, 에릭슨, 커넥트 등의 주요 종합 반도체 메이커들이 대부분 상용화에 성공했거나 개발 완료한 상태이며, ETRI에서도 10Mbps급 고속 블루투스 또는 블루투스 High-Rate mode를 동시에 지원할 수 있는 라디오 단일칩을 개발하고 있다. 단일칩이 블루투스 모듈 가격과 크기를 줄이는데 유리한 반면, 투칩 솔루션에서는 라디오와 베이스밴드 칩이 개별적으로 제작되므로, 가격보다는 수신감도나 전력소모 등에서 높은 성능이 요구되는 응용분야에 사용될 수 있으며, 라디오 칩은 CMOS 외에도 SiGe, SOI BiCMOS 등의 다양한 기술로 제작되고 있다.

에릭슨(www.ericsson.com)의 블루투스 칩은 가장 초기에 제작되어, 수 많은 응용시스템 개발자들의 개발보드에 활용되어 왔고, CSR칩과



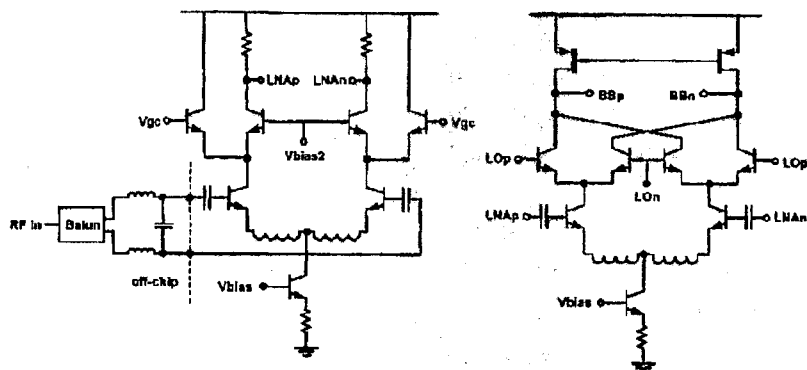
<그림 7> 커넥센트사 (구 Philsar 반도체)의 라디오 칩 구조도^[9]

함께 블루투스 레퍼런스 디자인으로 널리 사용되어 왔다. LTCC 기판 상에 필터, 발룬, VCO tank, 스위치 등의 수동 부품들이 실장되어 있고 플립 칩 기술로 BiCMOS RFIC가 실장되어, 성능은 우수하나 비교적 고가이므로 양산 제품에는 활용되기 어려웠다.

미국 커넥센트(www.conexant.com)사에 합병된 구 Philsar 반도체의 PH2401 또는 CX 72302는 전력소모 특성이 가장 우수한 SiGe 기술로 설계되어 송신 및 수신시의 최대 전력소모량이 각각 19mA, 25mA에 불과하다는 장점이 있다. 이러한 저전력소모 특성은 휴대폰에 내장될 경우 특히 중요시된다. 송신부는 fractional PLL 기술을 활용하여 VCO에 직접 변조신호를

인가하는 방식인데, 이러한 직접 변조 방식은 베이스밴드에서 FM 변조 후 상향변환 믹서를 이용하는 일반적인 구조에 비해 전력소모가 적다. 또한 FM 변조가 PLL 루프의 lock 상태를 유지하면서 이루어지므로 개방 루프(open loop) 변조에서 일어날 수 있는 주파수 드리프트 현상도 거의 없다.

SOI 기술의 선도 업체인 SiliconWave사에서는 우수한 고주파 특성을 갖는 0.35um SOI BiCMOS 공정으로 블루투스를 비롯한 다양한 RFIC를 양산하고 있다. 바이폴라 소자가 MOSFET에 비해 1/f 잡음이 적으므로 블루투스 및 같이 협대역 변조방식에 대해서도 성공적으로 direct-conversion을 적용할 수 있었으며 GFSK 모뎀



<그림 8> SiliconWave사의 direct-conversion 라디오 LNA 및 믹서 회로^[10]

이 라디오 칩 내에서 전부 디지털로 구현되어 공정 변화에 따른 재설계가 필요 없고 동작이 안정적인 장점을 갖고 있다. 수신부 LNA는 20dB 간격으로 이득 조절이 가능하며 일반적인 inductive degeneration 차동 증폭회로로서, 16dB 이득과 5dB의 잡음지수, -10dBm의 IIP3 성능을 보인다. 믹서를 포함한 고주파 front-end는 특기할 사항이 없는 매우 일반적인 회로이며, SOI 공정이 갖는 우수한 on-chip isolation 특성에 의해 LO leakage와 디지털 스위칭 잡음의 혼입을 막고 있다.

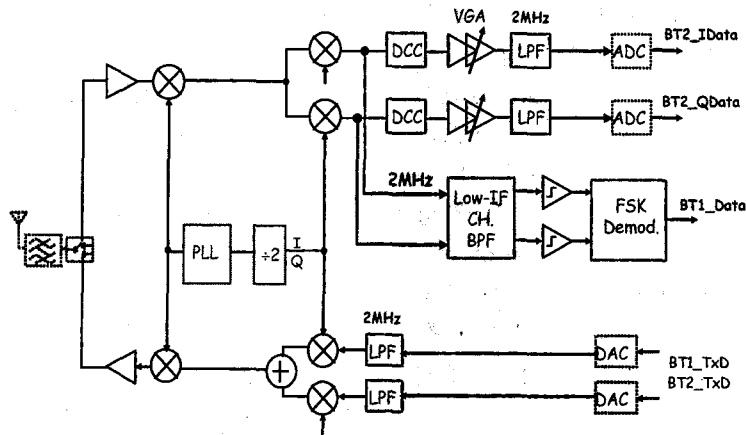
III. 블루투스 및 타 표준과의 공존 및 multi-standard 칩 개발 동향

블루투스 규격 1.1(이하, BT1으로 약칭)로는 멀티미디어 통신에 필요한 2Mbps 이상의 고속 데이터 전송이 불가능하므로 전송 속도를 10Mbps 이상으로 높일 수 있는 고속 블루투스에 대한 연구도 진행되고 있다. 고속 블루투스는 전송 속도를 10Mbps 이상으로 높이기 위해 라디오 2 작업반에서 준비하고 있는 차기 버전의 블루투스 표준안으로서 블루투스 HR mode(BT2)이라고도 불린다. 이를 위해 BT2는 BT1과 동일한 주파수 대를 사용하면서 m-ary DPSK 변조방식을 사용하여 전송속도 4M symbol/sec을 목표로 하여, 8-DPSK 모드로는 12Mbps의 전송률을 얻을 수 있다. BT1의 채널 대역폭이 1MHz로서 비교적 협대역 통신인 반면, BT2는 4MHz 대역폭을 사용한다.

또한 기존의 IEEE 802.11b 무선 LAN과의 공존을 용이하게 하도록 블루투스 및 무선 LAN의 dual-mode 또는 combo 칩셋이 연구되고 있다. 아직까지는 PHY 계층은 별개의 칩을 사용하고 MAC에서 통합 관리하는 방향으로 진행되고 있는데, SiliconWave사는 무선 LAN용 반도체 시장 1위 업체인 Intersil사와 손잡고

Blue802라는 MAC계층 interface 기술을 기반으로 Bluetooth /802.11b 콤보 칩셋을 개발하고 있고, NewLogic사는 블루투스 1.1 표준과 IEEE 802.11b는 물론 802.11a/g 표준도 지원할 수 있는 무선 multi-standard IP를 발표하였다. 한편, Mobilian사는 802.11b와 블루투스 라디오를 통합시킨 TrueRadio 기술을 발표하였다.

ETRI에서는 기존의 BT1과 하위 호환성을 갖고 10Mbps 이상의 전송 속도를 낼 수 있는 BT2 겸용 dual-mode 칩을 CMOS 기반으로 개발하고 있다. 대략적인 구조는 <그림 9>와 같이 라디오 프론트엔드와 PLL 등 주요 구성 블록들을 최대한 공유하면서, 변조 방식에서 차이가 나는 일부 부분을 BT1과 BT2 패스로 나누어 처리하는 구조이다. Double conversion 방식이지만 IF 필터 등의 외부부품을 요구하지 않으며 수신부의 2nd mixer 다음 단에서 BT1과 BT2 신호 path가 분리된다. 제작된 3mm×3mm 칩의 다이 사진은 <그림 10>과 같고 COB(Chip-on-Board)로 측정된 1차 결과로는 시뮬레이션 및 설계 목표에 근접하는 성능을 확인하였다. 이러한 다중 모드 라디오 구조 결정시에 주요한 고려사항은 다음과 같다. BT1 신호의 경우 베이스밴드 신호 스펙트럼이 DC를 중심으로 500kHz 이내에 집중되어 있는 협대역 분포를 가지므로 CMOS 소자 특성상 1/f 잡음 영향을 크게 받는 direct-conversion보다는 Low-IF가 적합한 반면, BT2 베이스밴드 신호는 2MHz 이상의 비교적 광대역 특성을 가지므로 잡음의 영향을 받는 저주파 대역 신호 성분이 상대적으로 적어서 direct-conversion을 적용할 수 있다. 향후 CMOS 소자의 flicker 잡음을 감소시키는 기법이 개발되면 BT1과 같은 협대역 시스템에 대해서도 direct-conversion이 가능하며 multi-standard 라디오의 제작이 더욱 용이해질 것이다. BT1에서 사용되는 GFSK 모뎀은 채널 추정 및 보정 과정이 비교적 단순하므로 라디오 칩 내에 집적시켰고, BT2의 m-ary DPSK 모뎀은



〈그림 9〉 ETRI의 고속 블루투스 겸용 라디오 구조



〈그림 10〉 ETRI의 고속 블루투스 겸용 single-chip Radio의 die photograph

디지털 베이스밴드 프로세서에서 처리되도록 하였다.

IV. 결 론

블루투스 라디오 기술은 지금까지 축적된 RF CMOS 기술과 direct-conversion, Low-IF 등의 새로운 구조에 대한 연구 결과들을 성공적으로 활용하여 상용화 단계에 이르렀다. 그러나 이러한 결과가 블루투스 라디오의 완화된 요구 규격 때문에 쉽게 얻어질 수 있는 것은 아니며, 아직도 신뢰성 있는 단일칩을 양산할 수 있는 업

체는 소수에 불과하다. 완화된 규격에도 불구하고 블루투스 라디오 구현이 용이하지 않았던 이유는, 타 통신방식에 비해 크기와 가격을 혁신적으로 낮추어야 하므로 RFIC에 고주파 프론트엔드 뿐만 아니라 베이스밴드 아날로그 회로와 주파수 합성부, 디지털 제어회로를 모두 집적시킨 SOC를 설계해야 하기 때문이다. 이러한 고집적도 혼성신호 회로에는 집적도가 낮은 GaAs나 바이폴라 기술보다는 상용칩 동향에서 기술된 바와 같이 디지털 베이스밴드와 통합할 수 있는 CMOS와 BiCMOS가 선택 가능한 공정이 된다. 또한 구조적인 측면에서는 IEEE 802.11a/b/g나 HomeRF 등과 달리 BT1은 협대역 시스템이므로 CMOS 소자로는 flicker 잡음 영향을 많이 받는 Zero-IF 방식이 어려우므로 대부분 Low-IF 방식을 적용하고 있다. 한편으로는 고속, 광대역화에 대한 요구사항이 있으므로 고속 무선 LAN이나 블루투스2와 같은 고속 규격과 블루투스가 공존하며 동시에 지원 가능한 다중 모드 칩에 대한 연구가 진행되고 있다.

참 고 문 헌

- (1) <http://www.bluetooth.org>
- (2) 박성주, 현석봉, "Bluetooth기술 및 관련부

- 품 기술동향”, pp.13-24, 전파진흥 2000년 4월.
- [3] “Ten Years of RF-CMOS, but How Many Products Today?”, panel session, in International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Feb. 2001.
 - [4] M. Philips, “Reducing the cost of Bluetooth systems,” *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp.204-208, Oct. 2001.
 - [5] BlueCore™ 2-Audio Datasheet, Cambridge Silicon Radio, Jul. 2002.
 - [6] Kyeongho Lee, *et. al.*, “A Single-Chip 2.4-GHz Direct-conversion CMOS Receiver for Wireless Local Loop using Multiphase Reduced Frequency Conversion Technique,” *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. 36, no. 5, pp.800-809, May 2001.
 - [7] D. Durdodt, *et. al.*, “A Low-IF Two-Point sigma-delta-Modulation TX CMOS Single-Chip Bluetooth Solution,” *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 9, pp.1531-1537, Sep. 2001.
 - [8] H. Darabi, *et. al.*, “A 2.4-GHz CMOS Transceiver for Bluetooth,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 12, pp.2016-2024, Dec. 2001.
 - [9] CX72302 Datasheet, Conexant Systems Inc., 2001.
 - [10] Glenn Chang, *et. al.*, “A Direct-Conversion Single-Chip Radio-Modem for Bluetooth,” *ISSCC Digest of Technical Papers*, pp.448-449, Feb. 2002.