

다중 대역 RF 단말 적용을 위한 RF MEMS 기술 동향

국내에 휴대폰이 등장한지는 30년이 채 되지 않았지만, 그 동안 눈부신 기술 발전이 이루어져 왔다. 최근 휴대폰 기술 발전은 한층 더 가속화 되고 있는데, 이는 IT 기술 통합 트렌드가 원인이 되고 있다. IT 기술 통합 트렌드 중 단말기 통합 컨버전스는 하나의 단말이 다중 대역에서 작동하도록 기술의 발전을 촉진하고 있는데, 이를 통해 하나의 단말로 다양한 서비스 이용이 가능하다. 또한 휴대폰 기술의 표준을 결정하는 ITU-R은 차세대 이동 통신 서비스인 IMT-Advanced 기술 표준에 IT 기술 통합 트렌드를 수용하여, 차세대 단말, 중 계기에 다중 대역 구현을 요구하고 있다. 따라서 앞으로 다중 대역 단말 구현 기술은 활발히 연구될 것으로 판단된다. 본고에서는 다중 대역 단말 구현에 적합한 RF MEMS 조정 회로에 대한 최근의 연구 결과를 살펴보고자 한다.

글: 박형진, 강병현, 김문일, 주병권
고려대학교 전기전자전파공학과
www.korea.ac.kr/ hjpark1019@gmail.com

IT 통합 기술과 다중 대역 단말 개발의 필요성

지속적인 기술의 발전 및 융합으로 구현의 어려움이 감소하면서, 최근의 IT 트렌드는 유무선 네트워크, 각 서비스, 그리고 서비스용 단말이 하나로 통합되는 컨버전스 시대로 진입하고 있다. 그 동안 단말기는 각각의 서비스, 시스템에 따라 독립적인 단일대역을 이용하여 왔으나, 향후는 하나로 통합될 것이다. 따라서 기존의 각 사업자가 사용해 왔던 각각의 주파수 대역을 단 하나의 단말로 이용 가능하도록 다중 대역 단말기 개발 필요성이 제기 되어 왔다. 또한 이와 더불어 단말 중 가장 큰 시장을 차지하는 휴대폰 단말의 경우, 차세대 이동 통신 기술인 IMT-Advanced 기술이 이종망간의 호환

(interoperability)를 위한 다중 대역 단말 구현을 요구하고 있으며, 이에 대한 표준화가 2010년 하반기를 목표로 진행 중이기 때문에, 현재 다중 대역 단말 개발에 대한 관심이 어느 때보다 높다.

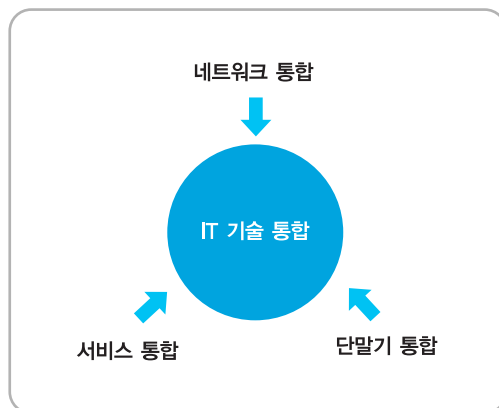


그림 1. IT 기술 통합 트렌드

다중 대역 RF 송수신 시스템의 구성

무선 통신 단말은 RF 주파수 대역을 담당하는 송수신 하드웨어와 모듈레이션을 처리하는 소프트웨어 부분으로 구성되며, 다중

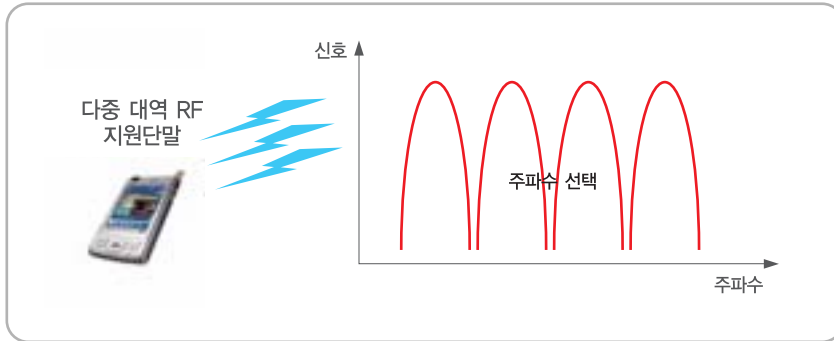


그림 2. 주파수에 따른 다중 대역 신호 분포

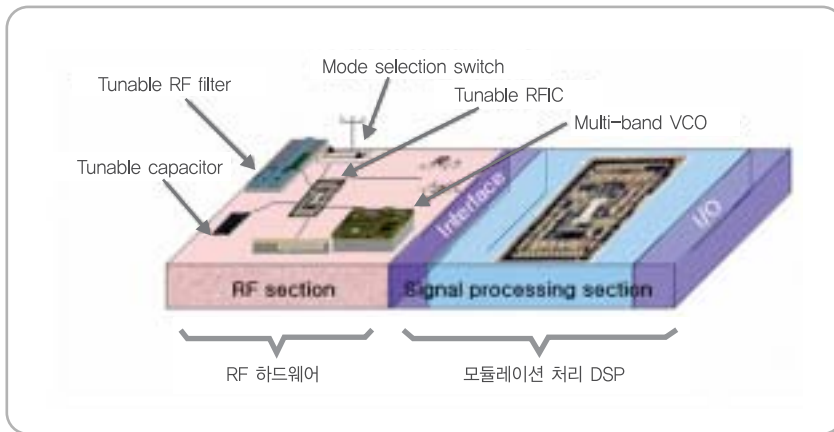


그림 3. 다중 대역 RF 단말의 구성

대역사용이 가능 하려면, 두 부분의 다중 대역 구현이 모두 가능해야 한다.

단말의 소프트웨어 부분은 송수신 방식에 따라 구분될 수 있지만, 실제 모듈레이션/디모듈레이션 처리는 DSP(digital signal processing)을 통해 진행된다. 따라서 다중 대역이라 하더라도 처리를 담당하는 것은 단일의 프로세서이며, 이는 점차 증가하는 프로세서 처리 용량과 함께 구현의 어려움이 빠르게 제거되고 있다.

반면, RF 송수신 하드웨어 회로는 각 대역에 알맞은 RF 송수신 회로를 요구하기 때문에, 해결이 쉽지 않다. 현재까지 알려진 다중 대역의 하드웨어 구현

은 3가지 정도의 방법을 통해 이루어지고 있다. 첫 번째 방법은 각각의 단일 밴드에 해당하는 복수의 하드웨어를 구성하고, 이를 통해 다중 대역 단말을 구성하는 방법이다. 이 방법은 하드웨어의 개수 증가뿐만 아니라 설계의 복잡도까지 증가되어 실제 단말 구성에는 적합하지 않다.

두 번째 방법은 다중 대역에 모두 대응이 가능한 단일의 광대역의 하드웨어를 구성하는 것인데, 이 방법의 경우 각 단일 부품의 광대역 구현이 쉽지 않고, 또한 단일 대역 부품에 비교하여 성능이 상대적으로 저하되는 단점이 존재한다. 세 번째 방식은 조정(reconfigurable)이 가능한 단일의 하드웨어 구현을 통해 다중 대역에 대응하는 것이다.

이 방식은 앞의 두 방법과 달리 하드웨어의 복잡도나 개수를 증가하지 않고, 광대역 부품에 비해 성능 저하가 적어, 보다 단말 적용에 적합한 것으로 판단된다.

그림 4는 다중 대역 RF 부품 구현 방법 예제로, 증폭기(power amplifier) 회로의 구현 방법에 대해 3가지 방법을 비교하고 있다. 세 번째 방법인 조정 회로의 경우, 단일의 증폭기 회로를 구

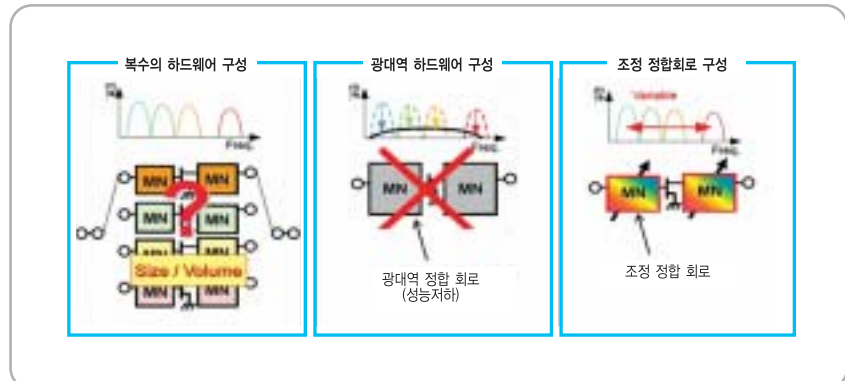


그림 4. 다중 대역 RF 부품 구현 방법 예제

성하고, 앞뒤로 스위치로 구성된 정합회로를 이용, 다중 대역의 증폭기 회로를 구현할 수 있다.

RF MEMS 기술

RF MEMS 기술은 미세가공기술인 MEMS 공정을 이용하여 고성능 RF 회로들을 구현하는 것을 일컬으며 일반적으로 다음과 같은 장점을 보유한다.

첫째로, RF MEMS 기술은 대량 생산에 적합하다. 많은 MEMS 공정 기술은 실리콘 공정 기술과 유사하며, 이는 대량생산에 적합하다.

둘째로, RF MEMS 기술은 고성능을 보유한다. RF 회로 성능은 구성된 전송 선로의 손실에 비례하고, 이는 기판의 손실(tangent loss)에 영향을 받는다. 집적화가 가능한 실리콘 기판의 경우 일반적으로 낮은 비저항 특성으로 인해, RF 회로 구현 시 높은 손실이 야기된다. 반면 MEMS 기술 접목된 경우 부분적으로 기판을 제거하는 등의 공정을 통해, 회로의 특성 향상을 이룰 수 있다.

셋째로, RF MEMS 기술은 RF 회로의 소형화를 가능하게 한다. 2D 구조가 아닌 3D 구조를 가능하게 하는 MEMS 기술이 접목될 경우 소형화의 가능성이 존재하고, 추가적으로 전기-기계 신호 변환 등의 특성을 이용하면, 회로의 크기 감소가 가능할 수 있다.

마지막으로 RF MEMS 기술은 저전력 구동이 가능하다. 일반적으로 RF MEMS 스위치의 경우 액츄에이터(actuator) 구동이 전력 손실 없이 가능하기 때문에, 저전력 회로의 구현이 가능하다. 보통 휴대 단말기의 경우 제한된 전력원인 배터리를 사용하기 때문에 이 점은 작동 시간의 증가로 이어질 수 있다. 따라서 RF MEMS 기술의 장점이 단말기 구현에 접목될 경우 저 전력, 대량 생산, 소형 구현, 고 성능 특성을 가능하게 하여, 차세대 단말의 요구사항에 적합하다.

하지만, RF MEMS 스위치는 휴대 단말 적용 시 다음의 문제점을 해결해야 한다. 첫째, RF MEMS 스위치의 신뢰성 문제가 해결되어야 한다. RF MEMS 스위치 소자 중 직접 접촉 형태의 경우, 낮은 삽입 손실과, 높은 ON/OFF 비율에도 불구하고 접촉 시에 발생하는 마모현상은 신뢰성을 악화시킨다. 따라서 기존 스

위치 소자인 다이오드 등에 비해 신뢰성 확보가 어려운 단점이 존재한다. 둘째로, RF MEMS 스위치의 동작 전압이 수 볼트 이내로 감소되어야 한다.

현재 대부분의 RF MEMS 스위치의 구동 전압은 수십 볼트 정도로 일반적인 휴대 단말이 공급할 수 있는 전압을 초과하고 있다. 따라서 추가적으로 회로 구현이 필요하며, 이는 곧 비용 증가로 이어질 수 있다. 또한, 표준화된 CMOS MEMS 공정의 통합이 이루어져야 한다. 그 둘은 유사한 공정을 가지기 때문에, 부분적으로 통합이 가능하나 현재로서는 통합된 표준이 존재하지 않으며, 표준 설계 환경이나 측정 환경이 정의되어 있지 않다. 따라서 향후 업체 간의 논의를 통해 상업적 개발을 위한 환경이 조성되어야 한다.

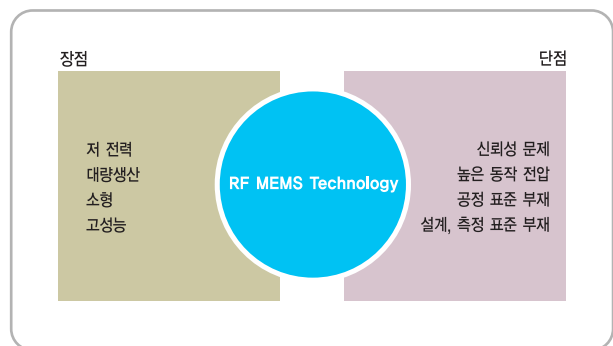


그림 5. RF MEMS 기술의 장점 및 단점

RF MEMS 조정 회로 연구 현황

스위치 소자

스위치는 조정 회로를 구성하는 기본 소자로, 모든 조정 회로에 필수적으로 사용된다. RF MEMS 스위치는 그 형태에 따라 직접 접촉식과 정전 용량 형으로 나눌 수 있는데, 직접 접촉식의 경우는 ON/OFF 구현이 액츄에이터의 실제 접촉을 통해 이루어지며, 이로 인해 ON/OFF의 분리가 극명하고, 각 상(state)의 DC 분리가 가능하다. 하지만, 스위치의 작동이 기계적 접촉에 의존하기 때문에, 반복 사용 시 액츄에이터의 마모 현상이 일어나고, 이는 신뢰성 악화로 이어져 상업화로 이어지기 어렵다. 반면 정전 용량 형태의 스위치는 직접 접촉 없이 액츄에이터의 위치 변화에 따른 정전용량 변화로 ON/OFF 상태를 구별하게 되고, 이

Parameter	RF MEMS	PIN	FET
Voltage (V)	20-80	±5-5	3-5
Current (mA)	0	3-20	0
Power consumption* (mW)	0.05-0.1	5-100	0.05-0.1
Switching time	1-100 μs	1-100 ns	1-100 ns
C _{on} (series) (fF)	1-6	40-80	70-140
R _{on} (series) (Ω)	0.5-2	2-4	4-6
Capacitance ratio [†]	40-500 [‡]	10	n/a
Cutoff frequency (THz)	20-80	1-4	0.5-2
Isolation (1-10 GHz)	Very high	High	Medium
Isolation (10-40 GHz)	Very high	Medium	Low
Isolation (60-100 GHz)	High	Medium	None
Loss (1-100 GHz) (dB)	0.05-0.2	0.5-1.2	0.4-2.5
Power handling (W)	<1	<10	<10
Third-order intercept point (dBm)	>60-80	>27-45	>27-45

*Includes voltage overshoot or drive circuitry.

[†]Capacitive switch only. A ratio of 500 is achieved with high- ϵ_r dielectrics.

표 1. FET, PIN 다이오드, RF MEMS 스위치 소자의 성능 비교

에 따라 신뢰성 측면에서 장점을 가지고, 보다 상업적 적용에 유리하다 하겠다.

한편, 기존의 다른 스위치 소자와 비교하면, 정전 용량 RF MEMS 스위치는 단말에 적용하기 위해, 실 동작 주파수가 UHF, VHF 대역 정도로 낮아져야 한다.

이는 곧 정전용량의 증가를 요구하고, 그 결과 정전 용량을 위한 스위치 면적 증가가 발생한다. 연속적으로 큰 스위치 면적은 스위치 주변의 기생 성분 증가를 일으키고, 이는 RF 회로구현 시 성능 감소로 이어질 수 있다. 따라서 단말에 적합한 스위치 개발을 위해서는 큰 면적에서도 기생 성분이 감소한 스위치 구조 구현이 요구된다.

이에 대한 연구로 미국 UCLA 대학은 대칭형으로 설계된, 정

전 용량 스위치를 발표하였다. 이러한 스위치 구조는 기존의 일반적인 사각 형태 스위치가 갖는 기생 성분을 감소함과 동시에 다단구성(cascaded configuration)이 가능해져, 사용 주파수에 따라 원하는 정전용량의 구현이 쉽다. 스위치의 작동 대역은 단말에 적합한 0.1~2GHz로 설계되었고, 2x2, 2x6 확장 형태의 스위치가 구현되었다.

일반적으로 휴대 단말기기는 5.0V 이내의 낮은 동작 전압을 요구하는데, 이는 RF MEMS 스위치의 사용을 어렵게 만들고 있다. 저 전압 구동 스위치의 대한 연구로 일본 Toshiba社は 압전 물질을 액츄에이터 구동부에 접목한 정전 용량 스위치를 발표하였고, 3.0V의 동작전압을 보고하였다. 이는 휴대 단말에서 전압 변환기(upconverter)없이 작동이 가능한 수준이다. 또한 저 전압 정전 용량 스위치를 이용해 4개의 스위치로 구성된 배렉터(Varactor)의 시연에 성공하였다.

필터 회로

필터는 주파수 선택을 위해 필수적인 수동회로로, 다중 대역 중 원하는 주파수 대역의 선택을 위해 사용된다. 또한, 주파수 전환(frequency-mixing)이 후 발생하는 다양한 믹싱(mixing), 배수(harmonic) 성분의 제거를 위해서도 이용된다. 필터 회로는 그동안 가장 연구가 활발한 분야이며, 상용화에도 가장 앞서있다.

필터는 공진기(resonator)로 구성되며, 필터의 응답은 공진기 특성에 영향을 받는다. 공진기는 다양한 형태로 구성이 가능한데, 특히, 3D 구조가 가능한 MEMS 기술을 공진기 제작에 접목할 경우, 성능 향상이 기대된다.

또한, 공진기의 손실은 주로 기판 손실에 좌우되는데, suspended MEMS 기술 등 손실이 적은 전송 선로를 구현할 경우 특성 향상이 기대된다. 다중 대역 필터의 구현은 각 공진기에 RF MEMS 스위치를 적절히 배치하여 공진 주파수를 변경하는 방식으로 구성되며, 공진기 형태, 스위치 개수 등에 따라서 대역 응답 능력이 결정된다. 대역 조정 필터의 가장 중요한 지표(parameter)는 주파수

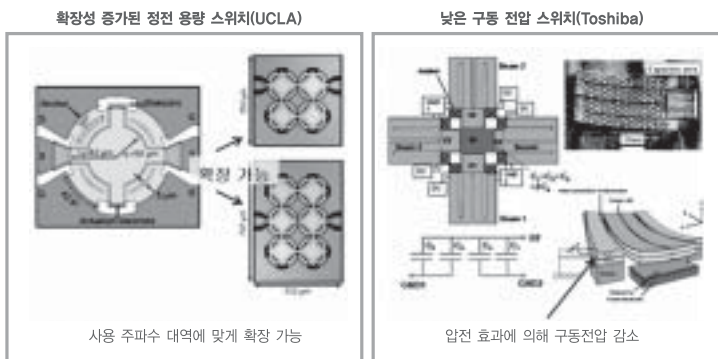


그림 6. 휴대 단말에 적합한 RF MEMS 스위치 연구 결과

기관	중심 주파수 (GHz)	조정범위 (GHz)	삽입손실 (dB)	회로면적 (mm ²)
Mitsubishi	1.7	0.7~2.3	< 6.4	5.2×12.3
UCSD	2.0	1.6~2.4	< 3.0	20×12
NG	1.3	0.8~1.8	< 4.0	4.0×4.0
XLIM	1.9	1.5~2.3	< 5.1	-
Raytheon	0.9	0.9~1.0	< 7.3	3.5×4.0
Qualcomm/UCSD	5.0	4.5~5.5	< 5.4	7.2×9.0×11.5mm ²

표 2. 다중 대역 필터 연구 동향

조정 범위(tuning range)와 삽입손실(insertion loss)로, 조정 범위가 넓을수록 요구되는 필터 개수가 감소하고, 손실이 적을수록 신호의 감쇄가 적다. 표 2는 휴대 단말에 적합한 형태의 대역 조

정 필터의 특징을 정리한 것으로 각 필터의 조절 범위와 삽입손실을 비교하였다.

회로의 면적은 대부분 단말에 실장할 수 있을 정도로 작아지고 있으며, 조정범위는 점차 늘고 있는 추세다. 몇몇 연구는 약 100% 정도의 조정대역을 보유하고 있으며, 이는 VHF, UHF를 모두 만족할 수 있는 수준이다. 그림 7은 UCSD 대학에서 최근 발표한 대역 조정 필터 회로로써, MEMS 기술을 이용 suspended 구조의 기판을 사용하여 삽입 손실측면에서 매우 뛰어난 성능을 갖고, RF MEMS 스위치를 적절히 배치하여 1.6~2.4GHz 대역을 모두 만족하는 대역 조정 필터 회로를 제작하였다. 이 필터는 여태까지 알려진 RF MEMS 필터 회로 중 가장 손실이 적다.

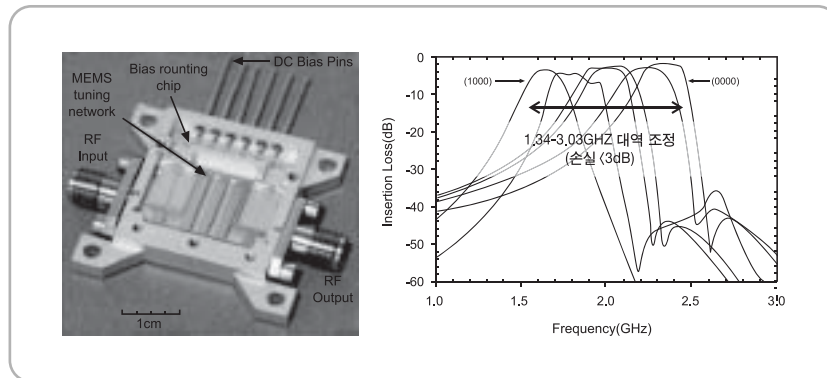


그림 7. 1.6~2.4GHz 대역 RF MEMS 조정 필터

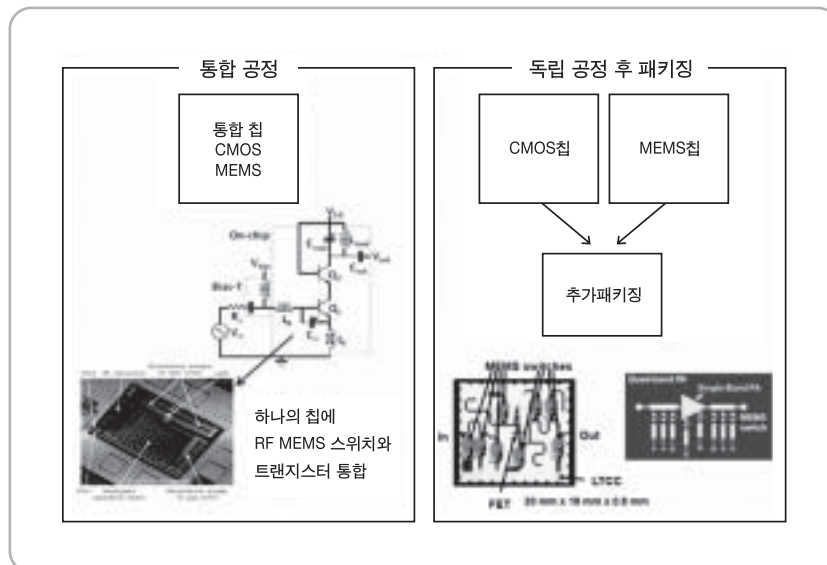


그림 8. 능동 조정 회로 구현 방법 예제

능동 회로

능동 회로는 저잡음 증폭기(LNA), 전력증폭기(PA), 발진기(VCO)등 트랜지스터가 이용된 회로를 일컬으며, RF 송수신 회로에서 신호 증폭, 주파수 변환 등의 역할을 수행한다. 이런 회로는 필터 등의 수동 회로와 달리 능동 소자인 트랜지스터가 반드시 요구된다.

조정 회로의 구현은 입출력의 정합 회로(matching network)를 RF MEMS 스위치로 구성하여 주파수 응답을 조절하는 방법이 주로 사용되고 있다. 이는 하나의 적은 개수의 능동 소자로 구현이 가능하기 때문에 선호되고 있다.

RF MEMS 스위치와 능동 소자의 구현은 두 가지 방법으로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 트랜지스터 공정과 RF MEMS 스위치 공정을 통합하여, 하나의 칩에 구현을 하는 방법으로, 공정이 통합되어 공정 복잡도는 증가하지만, 단일 칩의 구성이 가능하고, 추가적인 패키징(packaging) 비용이 들지 않는 장점이 존재한다. 두 번째 방법은 독립적으로

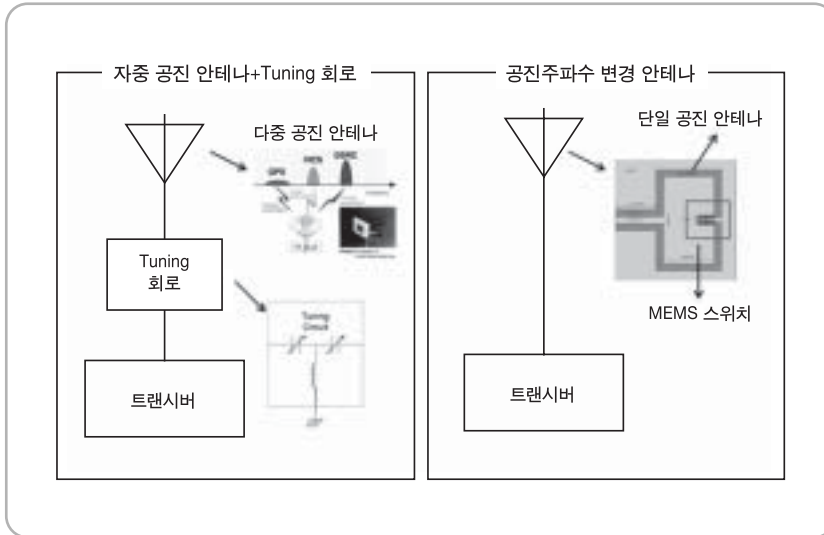


그림 9. 다중 대역 안테나 구현을 위한 방법 비교

능동 회로와 RF MEMS 스위치를 제작한 후, 후에 패키징을 통해 연결을 진행하는 방식으로, 이는 기존 독립적 공정을 그대로 사용할 수 있는 반면, 칩 제조 이후 추가 패키징에 따른 비용 증가가 예상된다.

통합 공정에 대한 연구로 피츠버그 대학은 CMOS MEMS 통합 공정을 개발하여 왔으며, 최근에는 통합 환경에서 대역 조정 능동 회로를 구현하는데 성공하였다. MEMS 스위치는 정전용량 형태로 구현되었고, 증폭기 입력력 내부의 정합회로를 RF MEMS 스위치로 구성하여 1~3GHz 대역에서의 증폭기 작동을 확인하였다. 현재까지는 다양한 능동 회로 중 저잡음 증폭기, 전력 증폭기 두 종류의 회로가 제작되었다.

일본 NTT DOMOCO社は 독립 공정 후 패키징 방식을 이용하여, 대역 조정 증폭기 회로를 제작하는데 성공하였다. 대역의 조정은 마찬가지로 정합회로 내에 위치한 스위치 소자를 이용하여 이루어지지만, FET 소자와 RF MEMS 소자는 독립 공정에서 제작되고, LTOC 기판 위에 향후 독립적으로 실장되어 증폭기

회로를 구현한다.

제작 결과 0.9~2.5GHz 대역에서 quad-band 시연이 가능하였고, 이는 현재 단말에 사용하여도 적합한 수준이다.

안테나 회로

안테나는 무선 단말기 종단을 구성하는 부품으로, 송수신 단말의 마지막 부분을 구성하며, 대기 중으로 변환된 RF 주파수 신호를 방출하거나 받아들인다.

다중 대역 안테나 구성 방법은 크게 두 가지 정도로 나뉘어지는데, 첫째는 다중 대역을 만족하는 다중 공진 안테나를 미리 제작하고, 대역의 선택을 외부의 조정 (tuning) 회로를 통해 이루는 방식이다.

조정 회로는 다중 대역 필터를 이용하거나, 정합 회로로 가능하다. 이 방식은 사용된 안테나가 다중 대역을 만족하는 복잡한 다중 공진 안테나이어야 한다.

두 번째 방식은 안테나 내부에 RF MEMS 스위치를 실장하여 안테나의 공진 주파수를 변경하는 방식이다. 이 방법은 외부에 주파수 선택 회로가 제거되어 복잡도가 감소할 뿐만 아니라, 내부 안테나는 단일 공진 안테나로 구현이 상대적으로 쉽다. 대역의 조정은 안테나의 공진 주파수의 변경을 통해 이루어진다. 안

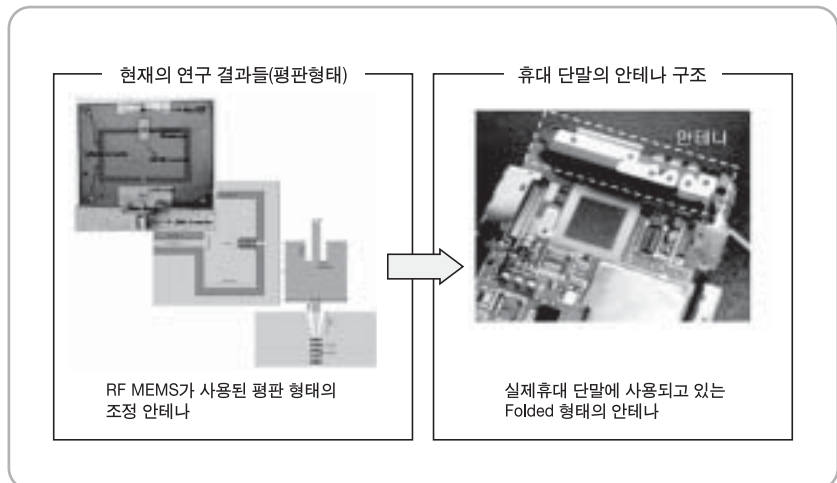


그림 10. 평판 형태의 대역 조정 안테나와 실제 휴대 단말내의 안테나

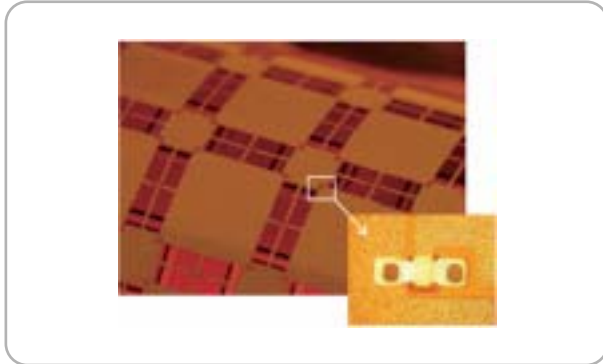


그림 11. 휘어지는 기판 위에 제작된 RF MEMS 스위치 구조


테나 공진기 주변의 배치된 스위치는 상태에 따라 안테나 길이를 조절하고, 이에 따라 안테나의 공진 주파수가 변경된다.

현재까지의 관련 연구는 대부분 다중 대역의 시연에는 성공하고 있으나, 대부분의 연구가 단순히 평판 구조로 국한되어 있다. 하지만, 실제 휴대 단말에 삽입되는 안테나의 경우, 단말의 크기 제한 때문에 평판이 아닌, 접힌(folded) 3D 구조로 제작되고 있

고, 따라서 실제 휴대 단말 실장을 위해서는 기존의 평판 형태의 대역 조정 안테나 연구는 개선이 요구된다.

최근 워털루(Waterloo) 대학은 접을 수 있는 MEMS 스위치 구조를 개발하였는데, 회로와 스위치 모두를 접을 수 있도록 구성하였기 때문에, 이 결과를 이용한다면, 실제 휴대 단말에 실장이 가능한 3D 구조의 다중 대역 RF MEMS 안테나 구현이 가능할 것으로 판단된다.

맺음말

RF MEMS 기술 개발은 고주파 특성으로 인해 그 동안 주로 밀리미터파 대역에서 연구가 되어 왔으나, 최근의 변화하는 IT 기술 컨버전스 요구와 IMT-advanced 기술 표준화가 가까워짐에 따라 차세대 단말에 적합한 다중 대역 회로 구현으로 그 중심이 이동하고 있다. 이는 RF MEMS 기술이 대량생산, 소형화, 저전력, 고 성능을 보유하기 때문으로 단말에 적용될 경우, 많은 이점이 예상된다. 

참고문헌

- [1] J. K. Ponder, "Issues Relating To Telecoms & IT Convergence" - NGN Asia, 2006
- [2] Report, "Technology trend" - ITU-R M.2038, 2004
- [3] W. Hu, "ITU-R IMT-Advanced Evaluation Guidelines" - Workshop on IMT-Advanced, 2008
- [4] S. Narahashi, "Future mobile terminals and MEMS technologies" - MEMS Executive Congress, 2009
- [5] G. M. Rebeiz: RF MEMS - Theory, design, and technology, Wiley, 2003
- [6] I. Reines et al., "Cascadable RF MEMS Switched Capacitors for 0.1-2 GHz Applications," IMS 2009, pp. 1157-1160
- [7] T. Nagano et al., "Stable Multi-Step Capacitance Control with Binary Voltage Operation at +/-3V in Integrated Piezoelectric RF MEMS Tunable Capacitors," IMS 2008, pp. 25-28
- [8] T. Nishino et al., "Tunable MEMS Hybrid Coupler and L-band Tunable Filter," IMS 2009, pp. 1045-1048
- [9] I. Reines et al., "1.6-2.4 GHz RF MEMS Tunable 3-Pole Suspended Combine Filter," IMS 2008, pp. 133-136
- [10] C. Y. Ong et al., "Low Loss Switchable Coupled Resonator Bandpass Filter," IMS 2008, pp. 137-140
- [11] S.-J. Park et al., "High-Q RF-MEMS Tunable Evanescent-Mode Cavity Filter," IMS 2009, pp. 1145-1148
- [12] J. Reinke et al., "CMOS-MEMS Variable Capacitors with Low Parasitic Capacitance for Frequency-Reconfigurable RF Circuits," IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium 2009, pp. 509-512
- [13] A. Fukuda et al., "A Novel Compact Reconfigurable Quad-band Power Amplifier Employing RF-MEMS Switches," Proc. 36th European Microwave Conference, pp. 344-347, 2006
- [14] M. Maddela et al., "A MEMS-based tunable coplanar patch antenna fabricated using PCB processing techniques," J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 812-819
- [15] R. Jones, "RF-MEMS Enable Tunable Antennas," Semiconductor International, May 1, 2007
- [16] G. M. Coutts et al., "A MEMS-Tunable Frequency-Selective Surface Monolithically Integrated on a Flexible Substrate," IMS 2007, pp. 497-500