

## 테라헤르츠 대역 근거리 무선 통신시스템 개발 현황

강철희 | 김문일 | 이재성 | 고영채 | 백상헌 | 허준  
고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 테라헤르츠 시스템랩(TESL)\*

### 요약

300 ~ 3000GHz(현 시점에서 TeraHz 대역으로 분류함) 범위의 무선 근거리 개인 영역 통신(WPAN)에서 20~40Gbps급 데이터 통신을 가능하게 하는 국제 표준화가 현재 IEEE802.15 그룹에서 진행 중이다. 본 논문에서는 주파수 할당과 관련하여, 비허가 주파수 대역의 이용 가능성 여부 및 시기 등에 대하여 지난 수년간 ITU에서 발표된 Tera 대역문서들 중심으로 요약하였고, Tera 대역 물리계층 요소 기술인 저전력 빔포밍 기술을 이용하여 전파의 직진성 및 거리에 따른 전력 감쇄 등을 극복하기 위한 기법을 소개한다. 또한 지향성 안테나 기반의 MAC, 타 통신기술과의 공존 문제, 그리고 상위 응용 계층을 위한 최적화의 관점에서 MAC 계층 주요 논의점에 대하여 언급하며 마지막으로 Tera 대역에서 동작하는 전자소자의 발전추세에 대하여 소개한다. 향후 약 5년 후에 표준화가 완성될 것으로 예상되는 시점에서, 본 논문이 국내의 통신 관련 연구자에게 초고속 데이터 통신을 가능하게 할 Tera 대역 WPAN시스템을 이해하고 동향을 파악하는데 유용한 자료로서 활용될 것을 기대한다.

### 1. 서론

무선 통신 서비스는 셀룰라 기반 개인 휴대 통신 기술의

발전을 계기로 1990년 이후 전 세계의 주요 산업 기반이 되어 왔다. 더욱이 근래에 와서는 개인 사용자의 편의를 증대시켜 주는 고속 데이터 전송 기능을 근/지근거리에서 제공해 주는 개인영역 통신 서비스가 셀룰라 통신과 더불어 그 중요성이 증대되고 있다. 특히 휴대폰 서비스 이외에도 무선 랜(WLAN)을 이용한 무선 인터넷 사용, 블루투스(Bluetooth)를 이용한 지근거리 개인영역 데이터 통신 등은 이미 일반 개인에게 친숙한 무선 서비스가 되었다. 최근 57~66GHz 대역의 밀리미터파 대역을 이용하여 10미터 내외의 거리에서 최고 5Gbps급의 데이터 통신을 가능하게 하는 국제 표준이 IEEE802.15.3c에서 완성이 되었고 [1] 이보다 앞서서 ISO표준을 위하여 ECMA TC48에서 국제 표준이 완성되었다[2]. 초고속 데이터 통신에 의한 응용 서비스로는 고화질(HD)급 영상을 비압축 형태로 실시간 전송하는 것 이외에 노트북과 빔 프로젝터 간의 무선 통신, 외장 메모리 데이터의 파일 전송도 포함 된다. 더 나아가 무선 LAN 시스템에서도 밀리미터파 대역을 이용하여 30m 이상에서도 개인 데이터 통신이 가능하게 하는 표준화 작업이 IEEE802.11.ad에서 진행 중에 있으며 제조업체 및 통신 서비스업체로 구성된 WiGig라는 컨소시엄에서도 표준화 활동이 활발히 진행 중에 있다. 밀리미터파 대역에서의 데이터 통신 서비스가 통신 장비에서만 아니라 일반 가전제품에서도 구현된다는 점에서 그 의미가 크다. 즉 무선통신 장비 시장이 HD급 TV 또는 디지털 카메라 등과 같은 방대한 시장의 가전 제품 영역으로 확대될 수 있다는 것이다.

\* \_ TESL(Terahertz Electronics Systems Lab)은 고려대학교 차세대인터넷연구센터 부설 연구그룹이다.

이러한 근거리 개인 휴대통신 시장의 확장에 맞추어서 2007년 11월에 300 ~ 3000GHz의 Tera 대역을 이용하여 20~40Gbps급의 데이터 통신을 가능하기 위한 국제 통신 표준에 대한 논의가 IEEE802.15그룹에서 시작 되었다. 응용 서비스로는 무선 파일 전송을 포함하여 2012년부터 상용화가 예상되는 초 고화질 (Ultra HD: UHD) 영상 전송이다[3]. 특히 UHD의 데이터를 무선 전송하기 위해서는 최소 20Gbps 급의 데이터 전송이 필요하다. 현재 기존의 기저 대역 및 밀리미터 대역을 이용한 무선 통신 시스템으로서는 데이터 전송 속도를 20Gbps급 이상으로 향상 시키는 데 있어서는 한계가 있다. 이에 따른 새로운 통신 시스템의 개발이 필요했으며 아직 발굴되지 않은 주파수 대역 중에서 가장 넓은 주파수 대역인 Tera 대역이 주목을 받았고 이에 따른 표준이 진행된 것이다. 그러나 Tera 대역을 이용하여 수십 Giga의 데이터 전송을 위해서는 Front-end에서의 초고주파 회로 및 ADC/DAC (Analog-to-Digital Converter/Digital-to-Analog Converter) 등의 하드웨어 설계기술 이외에도 전송 기법 및 MAC계층에서의 데이터 처리를 위하여 개발되어야 할 부분들이 많이 있다.

본 논문에서는 Tera 대역을 이용하여 초고속 무선 근거리 개인 통신을 가능하기 위하여 현재 논의되고 있는 주요 쟁점들을 살펴보고 이를 해결하기 위한 기술을 물리계층 측면, MAC계층 측면, Tera 소자 및 회로 측면으로 나누어 요약하고자 한다. 물리계층에서는 기존의 다중안테나 시스템 (MIMO)의 한계를 짚어보고 대역폭을 증대시킴으로써 초고속 통신이 가능한 것인지에 대하여 이론적인 검토를 한다. 특히 대역폭이 증대됨으로써 발생하는 잡음 전력의 증가에 대한 영향을 Shannon의 정보이론 측면에서 살펴보고 현실적인 조건에서 통신이 가능한 거리 결과를 소개한다. 또한 전력 손실이 거리에 따라서 상대적으로 다른 주파수에 비해서 큰 Tera 대역의 주파수 특성으로 인하여 통신 거리의 한계성을 극복하기 위하여 물리계층에서의 빔포밍 방식을 소개한다. MAC계층 기술로는 지향성 안테나 특성에 맞춘 MAC 구성과 여러 통신 표준사이의 공존 문제, 그리고 상위 응용 계층을 위한 최적화 문제를 언급한다. 소자 및 회로 측면에서는 Tera 통신시스템 구현 기술을 광소자 기반 기술과 전자소자 기반 기술로 분류하고 Tera 대역에서 동작하는 전자소자의 발전추세에 대하여 소개한다.

## II. 본 론

### 1. 협대역 통신과 광대역 통신 비교

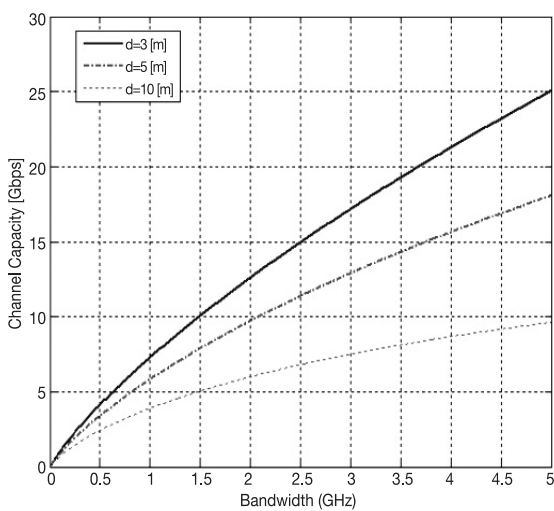
현재 비허가 주파수 대역을 이용하여 개인 사용자에게 가장 많이 사용되고 있는 주파수 대역은 2~10GHz 대역이며 무선 랜, 블루투스, UWB등의 시스템이 있다. 특히 무선 랜과 블루투스는 이미 상당히 개인 사용자에게 서비스가 공급되어 이용되고 있다. 먼저 그 중에서 무선 랜을 살펴보자. 무선 랜은 2GHz대역과 5GHz 대역에서 표준에 따라서 40MHz 또는 80MHz 의 주파수를 할당되어 있으며 현재 완성된 표준 중에서는 IEEE802.11n 표준이 40MHz를 사용하고 전송 단과 수신단에서 4개의 안테나를 바탕으로 공간 다중화 기법 (MIMO)을 이용하여 최고 약 300Mbps급의 전송속도가 가능하다. 실제로 안테나의 개수를 증가시킴으로써 선형적으로 데이터의 전송 속도를 더 높일 수 있으나 구현의 문제와 더불어 안테나 간의 거리가 보장되어야 하는 조건으로 인하여 현실적으로 어려움이 있다. 또한 공간 다중화 기법의 구현에 있어서는 지난 10년 이상의 오랜 기간 동안 연구를 통해서 증명이 된 바와 같이 최대 이득을 얻기 위해서 요구되는 베이스밴드 알고리즘의 하드웨어 구현 복잡성이 문제가 된다. 더 나아가 안테나의 개수를 증가 시키고 다중 사용자의 스케줄링을 통하여 총 사용자의 데이터 전송량을 증가시킬 수 있는 소위 다중사용자 다중 안테나 기법 (Multi-user MIMO) 등이 셀룰라 통신 및 무선 랜 시스템 등에서 고려되고 있으나 구현을 위한 알고리즘은 매우 복잡한 형태를 나타낸다.

이와 반면에 한 사용자가 이용할 수 있는 주파수 대역이 수 백 Mega 또는 그 이상인 경우에 있어서 수 기가 비트의 전송속도를 위한 통신은 현재의 반도체 기술을 고려해보면 훨씬 수월하다. 이를 Shannon의 채널 용량 식으로 살펴보면 다음과 같다.

$$C = W \log(1+P/NW)$$

위에서 W는 한 사용자가 이용가능한 주파수 대역폭을 나타내며 P는 수신 전력, N은 백색잡음밀도를 나타낸다. 위에서 W를 증가시킴에 따라서 거의 선형적으로 채널 용량이

증가 될 수 있는 것을 살펴볼 수 있다. 한 가지 예로써 전송 전력을  $P_t=20\text{dBmW}$ 이고 잡음 밀도가  $-173.9\text{ dBW/Hz}$ 인 경우에 free space공간 환경에서의 대역폭  $W$ 를 증가함에 따라 채널 용량의 증가를 통신 거리가 3미터, 5미터와 10미터인 경우에 대하여 각각 살펴본 결과가 (그림 1)에 있다. (그림 1)에서 보는 바와 같이 대역폭의 증가는 채널 용량을 거의 선형적으로 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

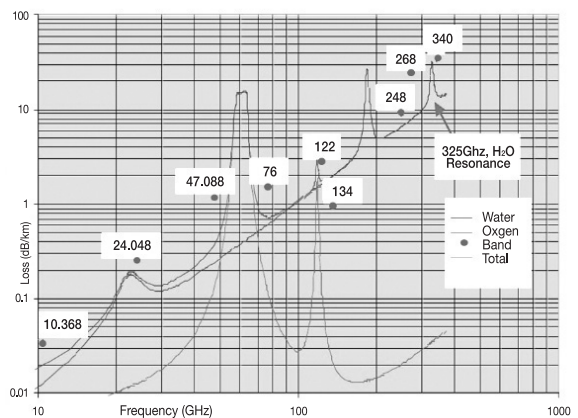


(그림 1) 거리(d)가 3m, 5m와 10m인 경우에 대하여 주파수대역 폭(Bandwidth)에 따른 Shannon의 채널 용량 (Channel Capacity)

따라서 광대역의 주파수 대역폭이 존재한다면 굳이 MIMO 기술과 같이 복잡도를 요구하는 시스템보다 초고속 데이터 전송을 위해서 더욱 적합할 것이다. 그렇다면 광대역 주파수 대역폭이 존재하는지 살펴볼 필요가 있다. 우선 밀리미터파 대역에서는 57~66GHz 대역이 거의 세계 모든 국가에서 비허가 주파수 대역으로 할당이 되었으며 IEEE802.15.3c에서는 위의 주파수 대역을 4개의 채널로 분할하여 한 채널당 약 2GHz를 할당하는 것으로 되어있다. 이러한 광대역 주파수를 이용하면 위의 그림에서 이론적으로 10미터 거리에서 약 13.5 Gbps의 데이터 전송이 가능하다. 그러나 UHD의 무선전송에 필요한 20Gbps급 이상의 데이터 전송을 위해서는 더 넓은 주파수 폭이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 아직 발굴 되지 않은 주파수 대역인 300GHz 이상의 주파수 대역에 대한 관심도가 높아지고 있다.

## 2. Tera 대역 주파수 현황

앞 절에서 언급한 바와 같이 초고속 데이터에 대한 요구와 필요성으로 Tera 대역의 발굴에 대한 관심도가 높아지고 있다. 최초로 Tera대역에 대한 사용을 국제 전기통신 연맹 (ITU)의 World Radio Conference (WRC)를 통하여 제안한 곳은 IARU (International Amateur Radio Union)이다. IARU는 2007년 2월에 비엔나에서 개최한 회의에서 275-1000GHz 대역에 대하여 IARU가 단독으로 사용할 수 있도록 주파수 분할을 요구한 것에 대한 논의를 하였다<sup>4)</sup>. 특히 IARU는 제출한 보고서에서 Tera 대역에 대한 주파수 특성을 상세히 연구하였고 이를 바탕으로 아마추어의 활용을 위한 주파수 분할의 필요성을 언급하였다. Tera대역에 대한 논의는 2007년 2월 WRC 회의의 후속으로 2011년 WRC의 중요 의제로 남겨놓은 상태다. 중요 의제는 정확히 Agenda Item 1.6으로 되어 있는데 275GHz에서 3,000GHz까지의 주파수 대역에 대하여 수동적 사용 (passive service)을 위한 주파수 할당에 관한 논의를 지칭한다. 여기에서 수동적 사용이란 과학 또는 의학과 같은 영역에서 실험용 목적으로 사용하는 것을 지칭한다. 예를 들어 275-323 GHz, 323-371 GHz, 388-424 GHz를 포함하여 총 8개 주파수 대역을 전파천문서비스 (radio astronomy service)를 위한 목적으로 수동적 사용으로 할당되어 있다. 한 가지 주목할 점은 수동적 사용인 주파수 대역은 주파수 간섭을 피할 수만 있다면 능동적 사용 (active service)으로도 ITU에서 할당할 수 있다. 그 밖에 여러 주파수 대역에서 지구 탐험 위성 서비스를 위하여 수동적 서비



(그림 2) 주파수 대역에 따른 신호감쇠 (dB/km)

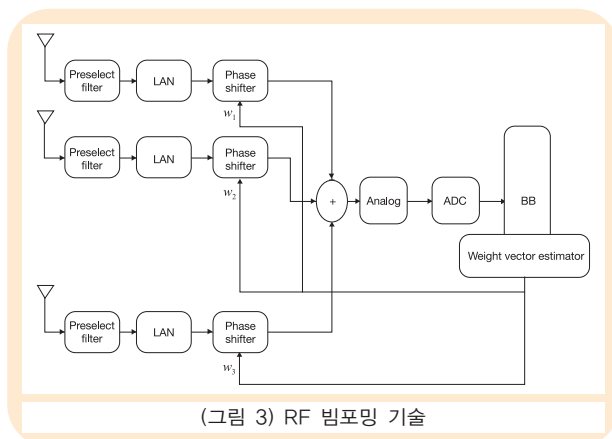
스로 할당되기도 했다. 그러나 개인 사용자의 서비스를 위한 능동적 사용에 대한 논의는 앞으로 다가오는 2011년 WRC에서 논의하지 않기로 했다. 이에 대하여 IEEE802.15의 Tera 대역을 위한 Interest Group (IGthz)은 수동적 사용을 위한 주파수 분할이 Tera 대역을 이용한 개인 통신 개발에 장애가 되지 않아야 하는 점과 개인사용자 서비스를 위한 능동적 사용의 필요성을 IEEE802를 통하여 공식적으로 ITU에 요청을 하였다. 더불어 IEEE802.15의 IGthz에 참여하고 있는 세계 우수 기업들과 대학 및 연구소에서도 각국에서 Tera대역의 능동적 사용 및 비허가 주파수 대역으로 할당을 받기위하여 공동 노력을 진행 중에 있다[5]. 이에 대한 가시적인 결정은 2013년 WRC회의에서 결정될 것으로 예상되며 각국의 노력으로 상당 영역의 주파수 대역이 능동적 사용 또는 비허가 주파수 대역으로 할당 될 것으로 예상되고 있다.

### 3. Tera 대역 물리계층 주요 논의점

Tera대역을 이용한 통신에서 가장 어려운 점은 Tera대역의 전파 특성인 직진성 및 거리에 따른 큰 신호감쇄일 것이다. 이러한 문제점은 밀리미터파 대역에서도 나타나는 현상이며 특히 거리에 따른 신호감쇄는 (그림 2)에서 보는 바와 같이 상당히 크다. 예를 들어 340GHz 대역에서의 거리에 따른 신호감쇄는 약 35dB/km 이다. 거리에 따른 신호감쇄는 간섭을 일으키지 않는다는 점에서 장점일 수도 있지만 통신 비거리의 단축이라는 단점도 있다. 이를 극복하기 위하여 여러 가지 기술들이 제안되고 있는데 특히 가장 주목받는 것으로는 다중 안테나를 이용한 빔포밍 기술이 있다. 빔포밍 기술은 안테나 이득을 통하여 비직진성 채널 및 통신 거

리 확장을 위한 목적으로 밀리미터파 대역을 이용한 WPAN 표준 시스템에 채택되었다. 그러나 밀리미터파대역 WPAN 표준 시스템에서도 지적된 바와 같이 다중의 안테나를 사용했을 경우에 전력 소모량의 증가 및 구조의 복잡성으로 문제점이 많다. 따라서 복잡도가 낮고 전력소모량이 적은 빔포밍 구조 및 알고리즘이 필요하다. 특히 다중 안테나를 사용하면 안테나 개수 만큼의 RF-chain의 개수 및 ADC/DAC가 필요하다. 예를 들면 모뎀에서 ADC가 소모하는 전력이 약 50[mW]인데 N개의 안테나를 사용할 경우 N배의 전력 소모가 소요된다. 복잡도 측면에서 살펴보면 수신기의 베이스밴드 영역에서 N개의 안테나를 사용하여 N개의 ADC에서 출력되는 신호를 처리하기 위하여 N배의 신호처리 능력이 필요하다. 이러한 복잡도의 문제점은 데이터 전송율이 높은 경우에 더 심각해진다. 예를 들어 20Gbps급의 데이터를 처리하기

위해서 N개의 안테나와 N개의 ADC를 사용할 경우 Nyquist Sampling을 고려하면  $N \times 2 \times 20 \times 10^9$ 의 처리 속도가 요구되는데 현재의 하드웨어 수준으로는 구현하기에 어렵다. 이를 해결하기 위한 방법으로 단일 ADC를 사용하고 RF-chain의 개수를 줄일 수 있는 RF 빔포밍 방법이 최근 연구되고 있다. RF 빔포밍 방법은 RF영역에서 페이딩 채널의 위상 값을 보상해줄 수 있는 위상 변환기 (phase shifter)를 사용하면 이루어질 수 있으며 위상 보상 후에 신호를 합성하는 합성기를 이용하면 된다. 이에 대한 구조를 살펴보면 (그림 3)과 같다. (그림 3)에서 보면 위상 변환기가 Low Noise Amplifier (LNA) 다음에 위치함으로써 잡음 지수 (Noise Figure)에 대한 영향을 최소화 할 수 있다. 또 한가지 주목할 점은 신호가 모두 합성된 상태에서 베이스밴드 영역으로 입력이 되므로 각 안테나에 도달하는 페이딩 채널의 위상 정보에 대한 예측 기술이 요구된다. 이를 위하여 베이스밴드에서는 미리 정해놓은 코드북 벡터들을 이용하여 페이딩 채널의 위상값과 가장 근접한 벡터들을 선택하는 알고리즘을 사용하여 채널 정보를 예측할 수 있다. 이에 대한 자세한 사항은 [6]에서 살펴볼 수 있다. 이렇게 RF빔포밍 방법을 사용하면 전력과 복잡도 면에서 단일 개의 안테나를 사용한 수신기에 비하여 거의 차이가 없다. 물론 위상 변환기 및 합성기가 RF단에서 추가되므로 잡음 지수가 증가하여 성능 면에서 일반적인 다수의 RF-chain과 다수의 ADC를 사용





하는 수신 구조에 비하여 저하될 수 있다. 그러나 [6]에서 발표된 바와 같이 성능 저하가 안테나 개수에 상관없이 약 2.5dB의 손실만이 있다는 것을 알 수 있으며 빔포밍을 사용함으로써 얻어지는 이득이 안테나 4개인 경우를 예를 들면 약 20dB이상인 점을 고려하면 이러한 성능 저하는 미비하다고 할 수 있다. 따라서 현실적인 빔포밍 기술을 이용하여 Tera 대역 통신에서 발생하는 문제점을 상당히 해결할 수 있을 것이라고 예상된다.

#### 4. Tera 대역 MAC계층 주요 논의점

현재 Tera 대역을 고려한 MAC 프로토콜에 대한 표준화 작업은 진행되고 있지 않다. 하지만 현재 진행되고 있는 60GHz 대역의 MAC 표준 (IEEE 802.15.3c, ECMA 387, Wigg/IEEE 802.11ad 등) 개발 동향을 통해 향후 Tera 대역에서의 MAC 계층 연구/개발 방향을 파악할 수 있다. 본 고에서는 지향성 안테나 기반의 MAC, 타 통신기술과의 공존 문제, 그리고 상위 응용 계층을 위한 최적화의 관점에서 MAC 계층 주요 논의점을 살펴본다.

##### 1) 지향성 안테나 기반의 MAC 프로토콜

앞서 기술한 바와 같이 Tera 대역의 전파는 높은 직진성과 신호 감쇄를 가지기 때문에 이를 극복할 수 있는 MAC 프로토콜이 필요하다. 이를 위해 Tera 대역에서는 지향성 안테나를 사용하는 것을 가정한다. IEEE 802.11 등에서 사용되는 기존 MAC의 경우 빔이 전방향으로 전달되는 환경을 가정한다. 비해서 지향성 안테나를 사용하는 경우 특정 영역으로만 빔이 형성되기 때문에 새로운 형태의 MAC 프로토콜이 필요하다. 특히, 주변의 노드를 인식하기 위해 여러 방향으로 다수 번 빔을 전송해야 하고 이로 인해 주변 노드 검색에 많은 시간이 소비될 수 있다. 특히, 홈 네트워크 환경에서 비디오 스트리밍을 다수의 단말에게 제공하는 멀티캐스트 시나리오의 경우 하나의 데이터 프레임을 여러 방향으로 중복해서 전송해야 한다. 이 경우 최적의 빔 폭과 해당 영역에서의 최적의 전송률을 결정하는 문제를 해결해야 한다.

또한 지향성 안테나를 사용하는 환경에서 데이터를 멀티홉으로 전송하는 경우에서도 데이터를 전달하는 중간 노드를 탐색하는 이슈와 빔 폭과 데이터 전송율의 Trade-off가 발생하는 문제 등을 해결해야 한다. 한편, 지향성 안테나를

사용하는 경우 하나의 빔에 의해 영향을 받는 영역은 줄어들기 때문에 공간적 재활용성 (Spatial Reuse)이 커진다. 따라서 이러한 특성을 효율적으로 활용할 수 있는 스케줄링 알고리즘 개발이 요구된다[7].

##### 2) 공존 (Coexistence) 문제

현재 60GHz 대역에서의 통신 표준에서의 주요 MAC 이슈 중의 하나는 60GHz 대역을 사용하는 여러 통신 표준 사이의 공존 문제이다. 아직 Tera 대역에서의 통신 표준 개발은 초기 단계이지만 향후 여러 표준화 단체에서 이에 대한 표준화 작업을 진행하게 될 것으로 예상되므로 상이한 표준 간의 공존 문제도 중요하게 다뤄질 것으로 예상된다.

또한 지향성 안테나로 인해 좁은 전송 범위를 가지는 Tera 대역의 한계를 극복하기 위해 전방향성을 가지는 2.4/5 GHz 대역을 multi-band 기술을 통해 동시에 사용하는 방안에도 대해서도 논의되고 있다. 이 경우 Tera 대역과 타 대역(낮은 주파수 대역) 간의 세션 유지를 제공하기 위한 Fast Session Transfer (FST) [8] 기술 개발도 필요하다.

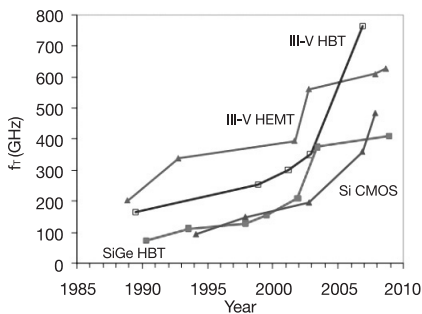
##### 3) 응용 최적화 기술

다양한 인터넷 트래픽을 수용하는 IEEE 802.11 과는 달리 Tera 대역 통신 시스템은 초고화질을 제공하는 HD급 이상의 비디오 스트리밍에 주로 사용될 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 주요 응용의 특성을 고려한 최적화 기법 연구도 향후 활발해 질 것으로 예상된다. 즉, HD 급 이상의 비디오 전송의 QoS 요구 사항 또는 비디오 코덱의 특성 등을 고려한 MAC 프로토콜에 대한 최적화 및 Cross Layering 기반의 최적화 기술 개발이 진행될 것으로 예상된다.

#### 5. Tera 대역 소자 및 회로 주요 논의점

Tera 대역 통신에 있어서의 또 한가지 현실적인 문제는 이러한 높은 주파수 대역을 사용하는 통신시스템의 하드웨어적 구현 가능성이다. Tera 대역은 그 주파수 관점에서 볼 때, 전통적으로 많은 하드웨어적 개발이 이루어져 왔던 두가지 영역, 즉 광소자 기반 영역과 전자소자 기반 영역의 중간 대역에 위치하며, 상대적으로 이들 인접 주파수 대역에 비해 개발이 미진해 온 것이 사실이다. 그러나 최근 들어 Tera 영역에서 동작하는 소자 및 회로를 구현하고자 하는 노력이

크게 늘고 있으며, 이들 노력은 광학소자에 기반하여 그 동작 주파수를 낮추려는 접근 방식과 전자소자에 기반하여 그 동작주파수를 높이려는 접근 방식으로 대별될 수 있다. 현재까지는 광학적 접근 방식이 연구 측면에서 더 활발해 왔던 것이 사실이나, 경제성 및 소형화 측면에서는 전자소자 기반 방식이 더 유리할 것으로 보여진다. 따라서 상용화를 전제로 하는 Tera 통신 시스템의 구현에 있어서는 후자가 더욱 경쟁력을 가지고 있을 것으로 예측된다.



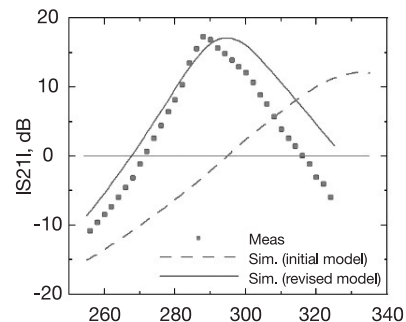
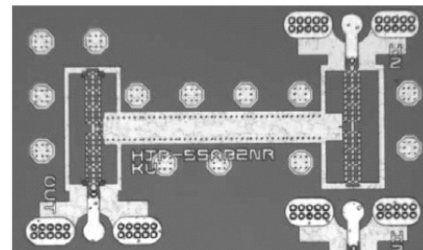
(그림 4) 여러 반도체 소자의 동작속도 향상 경향

Tera 대역 동작 전자소자로는 기존의 통신 시스템 구현의 주축이 되어온 반도체 기반 트랜지스터가 역시 주류를 형성할 것으로 보여지며, 따라서 급격한 반도체기술의 혁신보다는 기존의 반도체 기술 연장선상에서 동작 속도를 향상하는 양상으로 Tera 대역으로의 진입이 예측된다. 구체적으로는 일반적으로 고속 소자 구현에 적합한 것으로 알려진 GaAs, InP 등의 화합물반도체 기반 HEMT (High Electron Mobility Transistor) 혹은 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 소자가 우선적으로 응용 가능할 것으로 보여지며, 이들 소자는 (그림 4)에 나타난 바와 같이 이미 600 GHz - 800 GHz의 차단주파수 ( $f_r$ : 회로이득이 1이 되는 주파수)를 보이고 있다. 이와 함께 기존 통신 시스템의 기반을 이루어 왔던 Si 기반 소자도 그 동작속도가 최근 크게 향상되었으며, SiGe HBT 및 Si MOSFET 두가지 종류의 소자 모두에 대해 400 GHz 이상의 차단주파수성능이 보고되고 있다.

이와 더불어 이들 소자에 기반한 RF 회로에 대한 개발도 활발히 진행이 되고 있다. 화합물반도체 기반회로로서는 InP HEMT 기반 480 GHz 광대역 증폭기 [9], InP HEMT 기반 346 GHz fundamental 주파수 발진기 [10] 등이 개발이 되었

고, Si 기반 회로로서는 RFCMOS 기반 410 GHz harmonic 주파수 발진기 [11], SiGe HBT 기반 325 GHz 신호발생기 [12] 등이 개발된 바 있다. 최근 들어 이와 같은 수백 GHz 대역의 회로에 대한 연구 결과가 크게 증가하고 있어 그 동작 주파수와 성능은 당분간 지속적으로 증가될 것으로 예측된다.

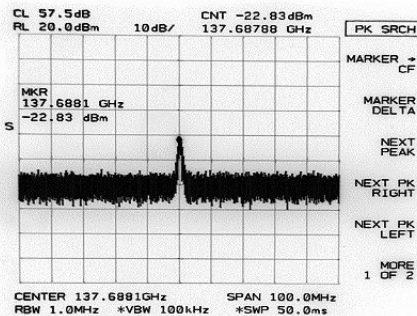
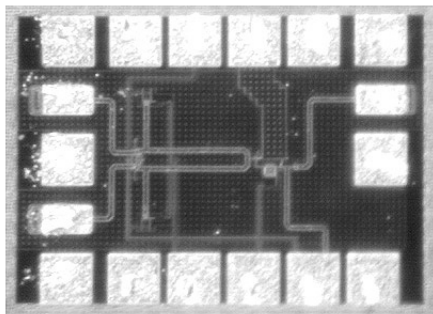
국내에서도 최근 들어 Tera 영역에서 동작하는 RF 회로에 대한 관심이 고조되고 있으며 일부 초기 결과가 발표되고 있다. 화합물반도체 기반 결과로서는 본 연구진에서 개발한 InP HBT 공정에 기반한 300 GHz 증폭기 결과를 들 수 있겠다 [13]. 이 증폭기는 베이스 공통 6단 차등 증폭기의 형태를 띠고 있으며, 전류의 재사용이 가능한 cascade 구조의 바이어스 회로를 도입하여 회로의 면적을 최소화 하였고, 일반적으로 높은 주파수에서의 손실을 가져오는 접지 via를 제거한 inverted 마이크로스트립 구조를 도입하여 최대의 이득을 얻을 수 있는 최적 설계가 도입되었다. 이 증폭기는 290 GHz에서 최대 17.3 dB의 이득을 보였으며, 20 GHz의 대역폭에서 10 dB 이상의 이득을 보였다. (그림 5)에 제작된 칩 사진 및 회로의 이득 성능이 나타나 있다. Si 기반 결과로서는 본 연구진의 90 nm CMOS 공정 기반 140 GHz VCO (Voltage Controlled Oscillator)가 국내에서 가장 앞선 결과로



(그림 5) 본 연구진에서 개발한 InP HBT 300 GHz 증폭기의 제작된 칩 사진 및 특성 [13]

보여진다[14]. Push-push 구조에 기반을 둔 이 발진기는 조정 전압에 따라 137.7 - 141.2 GHz 범위 내에서 발진을 하는 것으로 측정이 되었으며 이 때 15.2 mW의 DC 전력소모를 보이고 -22 dBm의 RF 전력 수준을 나타내었다. (그림 6)에 제작된 칩 사진 및 발진 특성이 나타나 있다.

이들 연구 현황에 기반하여 볼 때, Tera 통신 시스템을 구현하기 위한 하드웨어적 측면에서의 난점은 아직까지 존재하고 있으나, 최근의 추세를 감안한다면 점진적으로 모두 해결되어 나갈 것으로 예측된다.



(그림 6) 본 연구진에서 개발한 Si CMOS 140 GHz VCO 칩 사진 및 특성 [14]

### III. 결 론

본 논문에서는 최근 관심이 증가하는 Tera 대역을 이용한 개인 근거리 통신 방식에 대한 추세, 주파수 할당, 그리고 각 계층별 요소기술을 살펴보았다. 본문에서 언급한 바와 같이 Tera 대역 통신에 의하면 대용량 파일 등을 20Gbps급으로

초고속 전송 할 수 있게 되어 UHD급 영상 무선전송 서비스와 같은 다양한 분야에서의 활용이 기대된다. 이를 위하여 물리계층 및 MAC 계층에서의 통신 방법에 대한 연구와 더불어 RF 및 안테나에서의 각 소자 개발에 대한 연구가 지속적으로 이루어질 필요성이 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), <http://ieee802.org/15/>
- [2] Standard ECMA-387, High rate 60GHz PHY, MAC and HDMI PAL, <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-387.htm> Dec. 2008
- [3] <http://www.ultrahd.tv.net>
- [4] Preliminary views on WRC-11 Agenda Item 1.6, Asia Pacific Telecommunity, The 2nd meeting of the APT Conference Preparatory Group for WRC-2011, 24 June 2009
- [5] Thomas Kurner, "WRC Agenda item 1.6 and its possible implications on THz Communication," IEEE802.15-09-0230-00-thz
- [6] K. Jo, Y. -C. Ko, C.-G. Park, J. Park, "Multiple antenna post low noise amplifier RF combining", 2009 IEEE Globecom workshop on Multi-Gigabit MM-wave and Tera-Hz Systems
- [7] L. X. Cai, L. Cai, and X. Shen, and J.W. Mark, "REX: a Randomized EXclusive Region based Scheduling Scheme for mmWave WPANs with Directional Antenna", IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 9, No. 1, pp. 113-121, 2010.
- [8] Laurent Cariou, "Fast Session Transfer," 802.11-10/0491r2, May 2010.
- [9] W. R. Deal, X. B. Mei, V. Radisic, K. Leong, S. Sarkozy, B. Gorospe, J. Lee, P. H. Liu, W. Yoshida, J. Zhou, M. Lange, J. Uyeeda, and R. Lai, "Demonstration of a 0.48 THz Amplifier Module Using InP HEMT Transistors,"

IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 20, pp. 289-291, 2010.

[10] V. Radisic, X. B. Mei, W. R. Deal, W. Yoshida, P. H. Liu, J. Uyeda, M. Barsky, L. Samoska, A. Fung, T. Gaier, and R. Lai, "Demonstration of Sub-Millimeter Wave Fundamental Oscillators Using 35-nm InP HEMT Technology," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol.17, pp.223-225, 2007.

[11] E. Seok, C. Cao, D. Shim, D. J. Arenas, D. B. Tanner, C.-M. Hung, and K. K. O, "A 410GHz CMOS Push-Push Oscillator with an On-Chip Patch Antenna," in IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2008, pp.472-473.

[12] E. Ojefors, B. Heinemann, and U. R. Pfeiffer, "A 325 GHz frequency multiplier chain in a SiGe HBT technology," in IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2010, pp.91-94.

[13] H. J. Park, J. S. Rieh, M. Kim, and J. B. Hacker, "300 GHz six-stage differential-mode amplifier," in IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2010, pp.49-52.

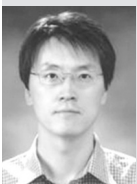
[14] Namhyung Kim, Kyungmin Kim, and Jae-Sung Rieh, "A 70/140 GHz Dual-Band Push-Push VCO in a 90-nm CMOS Technology," in RF Integrated Circuit Technology Workshop, 2010, pp. 451- 452.

약 력



1975년 일본 와세다 대학교 학사  
 1977년 일본 와세다 대학교 석사  
 1980년 일본 와세다 대학교 박사  
 1980년 ~ 1995년 한국전자통신연구소 실장,부장,본부장,단장  
 1998년 ~ 2001년 정보통신부 통신위원회 위원  
 2001년 ~ 2006년 대학 ITRC 협의회 회장  
 2000년 ~ 현재 한국통신학회 부회장,회장,명예회장  
 1995년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 (現 정교수)  
 관심 분야: 차세대 인터넷 기술, WPAN/WLAN, 미래인터넷

강 철 희



1987년 일리노이공대 학사  
 1988년 캘리포니아공대 석사  
 1993년 캘리포니아공대 박사  
 2000년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 (現 정교수)  
 관심 분야: 테라헤르츠 회로설계 및 패키징

김 문 일



1991년 서울대학교 전자공학과 학사  
 1995년 서울대학교 전자공학과 석사  
 1999년 Univ. of Michigan EECS 박사  
 1999년 ~ 2004년 IBM Semiconductor R&D Center  
 2004년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 (現 부교수)  
 관심 분야: 밀리미터파 및 테라헤르츠 소자 및 회로

이 재 성

약 력



1997년 한양대학교 공학사  
 1999년 미네소타대학교 공학석사  
 2001년 미네소타대학교 공학박사  
 2001년 ~ 2004년 Texas Instruments Inc. 책임연구원  
 2004년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수  
 관심분야: 무선이동통신 시스템 송수신 설계

고 영 애



2000년 서울대학교 공학사  
 2005년 서울대학교 공학박사  
 2007년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수  
 관심분야: WPAN/WLAN, 미래 인터넷

백 상 현



1989년 서울대학교 전자공학과 학사  
 1991년 서울대학교 전자공학과 석사  
 2002년 Univ. of Southern California EE 박사  
 1991년 ~ 1997년 LG 전자 영상미디어 연구소  
 2003년 ~ 2006년 건국대학교 조교수  
 2007년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 (現 부교수)  
 관심 분야: 디지털 통신 이론 및 부호 이론

허 준