

RF 광무선 링크 및 아날로그 광부품 기술은 아직까지 우리나라의 광학 공동체에서 낮은 분야이다. 그러나 국제적으로는 IEEE에서 이미 1992년에 topical meeting 형태의 독립 학회를 결성하여 지금까지 운영하고 있을 정도로 잘 정립되어 있다. 지금 우리의 관심이 모이는 것은 우리나라의 유선·무선통신의 기술 융합화 추세, 광기술의 무선 통신 이용에 대한 새로운 가능성, 테라헤르쯔 포토닉스와 같은 RF/광 응용의 새로운 분야 개척 등의 기대감이 라고 생각된다. 이 기고에서는 마이크로파 포토닉스의 정의와 학술연구분야 및 국제활동을 소개한다. 그리고 그동안 연구결과가 축적되어 실용화를 하고 있거나 아니면 상용 적용을 앞두고 있는 RF 광무선 링크 및 핵심 radio-over-fiber (ROF) 기술의 기술적 요소들을 설명하고, 연구 실행으로서 60GHz 광무선 링크 및 관련 부품기술 개발 현황과 연구 쟁점 등을 정리 보고하도록 한다.

분야가 알려져 있으며, 최근에는 보안기술로서 주목을 받고 있는 테라헤르쯔 포토닉스 (THz photonics) 분야가 이 연구 공동체에 새로 받아들여지고 있는 추세이다. 이 MWP 기술이 부각되고 있는 것은 IT시대의 점증하는 데이터 수요와 유비쿼터스 환경에 적합한 광대역 무선 멀티미디어 가입자 서비스를 위한 유·무선 통합화의 요소기술로 인식되고 있기 때문이다. 즉, 수십 Gbps급의 초고속 광대역성의 특징인 광섬유 통신 기술과 이동성 및 자유공간 활용의 무선 통신 기술과의 연계 혹은 융합화를 가능하게 할 수 있기 때문이다. 특히, 본격적인 무선 멀티미디어 시대에서 활용될 것으로 예측되고 있는 다양한 데이터 프로토콜의 통신 수단을 동시에 만족하는 광대역성의 통신망과 직경 10m 피코셀 단위의 소형 무선 통신 액세스를 가장 효과적으로 제공할 수 있는 기술로서 MWP가 활용될 것으로 기대하고 있다. 이와 같이 MWP 기술은 무

특집 ┃ Microwave Photonics

RF 광무선 링크 및 아날로그 광 부품 기술

김제하 (ETRI)

1. '마이크로파 포토닉스'의 소개

'마이크로파 포토닉스(Microwave Photonics: MWP)'는 마이크로파 및 밀리미터파 기술을 결합 활용함으로써 광학(optoelectronics 및 photonics)기술의 물리적 특성 향상이나 신기능성을 이룩하고자 하는 기술로 정의할 수 있다. 일반적으로는 마이크로파 및 밀리미터파에서 동작하는 초고속 광자(photonics) 부품 기술 (예, 수 10 Gbps급 광변조기 및 포토다이오드, 광수신기), 또한 차세대 무선 멀티미디어 통신을 위한 광무선(fiber-radio) 통신용 radio-over(on)-fiber (ROF) 링크 및 신호처리 기술로 그

선의 마이크로파 전자 기술과 대용량의 광통신 기술의 장점을 복합 이용함으로써 광대역 무선 전송 시스템의 효과적인 구축을 가능하게 하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 한국의 차세대 정보통신 비전인 유비쿼터스 정보 환경 구축에 향후 반드시 이용될 것으로 기대가 되고 있다.

'마이크로파 포토닉스'의 연구 분야는 주제의 그룹화가 달라질 수 있으나 크게 네 분야로 구별할 수 있다: (1) 마이크로파 및 밀리미터파 대역 초고속 광소자 및 부품 기술, (2) fiber-radio 서브-시스템 및 시스템 기술, (3) RF/광 신호처리 기술, 그리고 (4) 신기능 마이크로파 포토닉스 기술. 최근에 신기능 부품 및 신개념 기술 분야 개척으로 동작 대역 및 대역폭을 기존의 밀리미터파/서브-밀리

미터와 대역에서 테라헤르쯔 전자파 영역까지 확장하는 테라헤르쯔 포토닉스 (THz photonics)에 관한 연구가 포함되고 있다. 2005년 10월에 서울에서 개최되었던 MWP 2005, Seoul 의 기술 내용은 다음과 같이 제시되었다.

가) Devices, Components and Subsystem

- High-speed and broadband photonic devices: lasers, detectors, modulators, amplifiers, switches, signal processors, etc.
- Optically controlled electromagnetic wave syntheses and controls: from microwave to THz frequencies
- Packaging issues
- Analog and digital optical fiber links
- Ultra-fast optical probing and measurements
- Optical frequency metrology and controls
- High speed optical analog to digital conversion
- Hybrid and chip level integration of photonic devices and circuits
- Frontiers of microwave photonics device

나) Systems, Applications and Others

- Fiber-fed wireless and cellular radio systems and networks
- Sub-carrier multiplexed and CATV systems
- Fiber-optic communications based on novel modulation formats
- Optically controlled array antenna systems
- Satellite-based applications
- THz systems

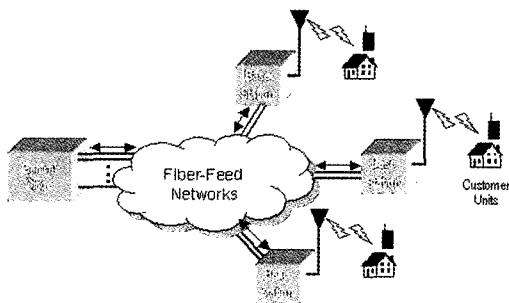


그림 1. 광대역 광무선 액세스 통신망

- Microwave photonic design and modeling
- Field trials
- New horizons of microwave photonics applications

물론 통신 분야이외의 응용으로 의학, 국방기술, 초고속 측정기술 등의 다양한 많은 영역을 개척되고 있다. 일반적으로 MWP기술의 활용은 지역적인/국가적인 응용 목적에 따라 그 이용도가 달리 연구되기도 하는데, 북미의 경우는 군사응용 기술에 보다 많은 관심을 가지고 있으며, 한국, 일본 및 유럽에서는 무선 멀티미디어 액세스를 위한 광무선 융합기술에 보다 많은 연구와 산업화를 지향하고 있다.

MWP 기술의 국제 학술교류는 이 분야를 처음 기획하고 창안한 IEEE LEOS와 IEEE MTT-S 공동체에 의하여 주도되고 있다. 광학기반의 LEOS와 마이크로파 및 무선 기반의 MTT-S 에서는 매년 LEOS (Lasers and Electro-Optics Societies) 학회와 IMS (International Microwave Symposium) 학회에서 각각 독립적인 학술 세션을 유지하고 있다. 또한, 이 두 공동체가 함께 설립한 주제별 학술회의로서 'international topical meeting on microwave photonics (MWP)' 학술대회가 1992년 이후 매년 개최되고 있으며, MWP 2005 학회가 지난 2005년 10월 12~14일 서울(Seoul Olympic Parktel)에서 한국에서는 처음으로 개최되었다. 후속으로 MWP 2006 (www.mwp2006.org)가 Grenoble (프랑스)와 MWP 2007가 Victoria (Canada)에서 예정되고 있다. 이 외에 OFC(Optical Fiber Conference) 및 ECOC(European Conferences of Optical Communications) 등에 항상 연구 발표 세션이 구성되고 있다. 또한, 지역별 학술교류도 활발하게 진행되고 있다. 2000년 이래 한국 MWP 그룹과 일본 IEICE의 MWP 연구회가 공동으로 Korea-Japan Joint Workshop on Microwave and Millimeter-Wave Photonics가 지난 6년 동안 매년 한국과 일본에서 개최하였으며, 2006년부터는 Asia-Pacific MWP 국제 학술대회(AP-MWP 2006, www.ap-mwp.org, Kobe, 2006.4.24~26.)로서 확대 발전될 예정이며, AP-MWP 2007의 한국개최가 예정되어있다. 유럽연합(EU)에서는 NEFERTITI 기술교류 워크숍으로 2005년에 그 10번째 Millimeter-Wave Photonic Devices and Technologies for Wireless Communication and Imaging (MWPI) 및

2005년 6월에 12번째 워크숍으로 Photonics in Wireless Communication: cost-effective solutions and future technologies가 스웨덴에서 개최되었다. 국내 학술교류로서 매년 '광전자 및 광통신 학술회의 (COOC)' 과 '광자 기술 학술회의 (PC)' 에서 마이크로파 포토닉스 세션 및 주제별 워크숍이 열리고 있다.

2. 광 무선 액세스 (fiber-radio access)

현재의 급증하는 IT수요를 충족하기 위한 차세대 통신 서비스는 단순한 음성신호 통신이 아닌 수 Gbps급 이상의 막대한 전송용량이 필요한 데이터 통신을 가능하게 할 무선 멀티미디어를 위한 광대역 광무선 액세스 통신망의 구성(그림 1)을 필요로 하고 있다. 이 광대역 무선 액세스 통신망의 구성은 광대역 데이터 전송을 위한 광섬유 공급망 (optical feeder network)의 기간 통신망 (backbone network)과 가입자를 자유공간상에서 연결하는 무선 링크 (radio link)로 구별할 수 있다. 전자는 현재 광가입자망에서와는 달리 서비스 정보를 처리하는 중앙국(central station: CS)과 유선상의 신호를 무선 변환하는 기지국(Base Station: BS)으로 구성되며, 이 두 구성요소를 연결하는 망 구성을 광무선(fiber-wireless)혹은 RF/광 (fiber-radio)라고 부른다. 이 망의 연결은 기존의 유선통신에서 활용되었던 파장다중 방식 (wavelength division multiplexing; WDM) 및 망구조 (tree or cascade network architecture)가 모두 활용될 수 있다. 그리고 광통신망을 통한 광신호 전송은 중앙국에서 가공된 디지털 데이터를 기지국의 안테나를 통하여 무선 전송을 목적으로 하기 때문에 일반 광통신과 구별된다. 이 신

호전송 링크를 radio-over-fiber (ROF) 링크라고 정의한다. 또한, 이와 같은 광무선 차세대 무선 액세스를 구현하기 위하여 해결해야하는 가장 중요한 요소는 기지국(BS)의 구성이다. 이 BS의 구성에 따라 광무선 통신망의 구성요소가 모두 변화할 수 있기 때문이다. 이 BS의 특징은 기능적으로 단순하고(simple) 작게 만들어(compact) 저야 하며, 구성상 광 및 전자 부품, 안테나 등이 모노리식 혹은 하이브리드 방식으로 제작할 수 있다.

그림 2는 광무선 링크의 가장 기본적인 단순한 형태를 보이고 있다. 구성은 CO (central office), BS (base station 혹은 Access Point: AP), 그리고 WT (wireless terminal)로 되어 있다. CO의 역할은 데이터를 광에 결합하거나 무선전송을 거쳐 전송된 광신호로부터 데이터를 추출하는 기능을 하며, BS는 전송의 방향에 따라 광신호와 무선신호를 변환하고 안테나를 통한 무선 링크를 담당하고 있다. WT는 일반 핸드폰이나 무선 터미널과 동일하다. 즉 반송파에 실린 디지털 데이터를 추출하거나 결합하는 기능을 하게 된다. 여기서, CO와 BS사이의 구간을 ROF 링크로서 정의한다.

이 ROF 기술의 응용은 여러 가지 장점을 제시하고 있다. 무엇보다도, 광섬유를 통한 RF 신호의 전송은 수 Gbps급으로 광대역성을 제공하면서도 전송 손실이 coaxial 케이블에 비하여 월등히 적다는 것이다. 이외에도 전송 시 통신비밀이 보장되고 EMI가 원천적으로 불가능하며, 낮은 잡음지수(noise figure), 높은 dynamic range 등을 확보할 수 있다. 이 뿐만 아니라 저 가격의 BS의 제작/활용이 가능하고, 피코셀 단위의 차세대 무선망을 구성하는데 있어서 무선용량의 확장과 서비스 지역 확대 등이 용이한 망 유연성을 제공한다. 가장 중요한 요소 중 하나는 이용하고자 하는 데이터 프로토콜에 대한 투명성(transparency)이다. 그림 3는 다양한 데이터 방식을 공통 플랫폼을 이용한 ROF전송 실험을 개념적으로 보이고 있다. 지금 가장 많이 연구되고 있으며, 활용을 시도하고 있는 방식은 이더넷과 WLAN 방식이다. 즉, 두 가지 방식의 신호를 광섬유를 통하여 동시에 무선 가입자나 FTTH (fiber-to-the-home)가입자에게 선별적으로 서비스를 제공할 수 있다는 점이 큰 장점이다. ROF 링크를 이용한 광무선 시스템의 WDM 기술^[1]을 이용하게 될 경우 더 많은 가입자에게 무선 멀티미디어 서비스가 가능할 것이다. 그리고 WLAN과의 결합을 이용할 경우에는 기지

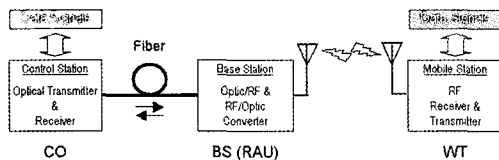


그림 2. 광무선(fiber-radio) 링크의 개념

국 (혹은 Access Point; AP)을 임의로 원거리에 펼쳐 (remote antenna unit; RAU) 배치함으로써 서비스 이용 영역의 효과적인 확대를 달성할 수 있다. 실내 이용뿐만 아니라 ROF 기술을 지능형 교통시스템 (intelligent transportation system; ITS)^[2]에 활용하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 이와 같이 ROF 기술은 광통신과 마이크로파 무선통신기술을 접목, 융합시킬 수 있는 요소기술이며, 4세대 이동 무선 통신이나 혹은 광대역 통합통신망 (broadband convergence network; BCN)의 실현을 위한 first mile solution으로 FTTH (fiber-to-the-home) 광가입자망의 한 중요한 방안으로서 활용될 수 있다.

ROF 링크를 통하여 RF가 결합된 광신호를 전송하게 될 때, 디지털 광통신에서와 마찬가지로 광섬유의 비선형성, 색분산 등의 특성으로 인하여 많은 영향을 받게 된다. 특히, 단일 파장을 사용할 경우에 광섬유의 비선형성으로 인하여 주기적인 신호 소멸 현상 (nulling effect)가 발생한다. 즉 전송 거리에 따른 RF 출력변화는

$$\cos^2 \left(\frac{\pi \cdot L \cdot D}{c} \lambda^2 \cdot f^2 \right) \text{의 함수로 표시된다.}$$

여기서, D는 광섬유의 분산 ($D = 17\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$), λ 는 사용 광파장, c는 광속도를 의미한다. 즉, 주파수가 커짐에 따라 신호 소멸현상이 발생하는 거리간격은 짧아지게 된다. 특히, 60GHz 대역에서는 첫 번째 소멸 거리가 약 1km 정도에 미친다. 이를 극복하기 위하여 광 single side band (SSB) 신호 활용과 분산 보상 기법 등의 연구가 많이 진행되고 있다. 그리고 RF 신호를 전송하기 때문

에 CO와 BS의 E/O (혹은 O/E; optical to electrical) 변환 소자의 비선형성에 의한 전송 신호의 상호변조왜곡 현상 (intermodulation; IMD)과 광전 변환 효율 (conversion efficiency) 및 링크 이득률 (link gain) 등이 많은 영향을 받게 된다. 이러한 부분이 아날로그 광부품의 주요변수들이 되면 또한 연구개발의 주제가 된다. 이 부분에 대한 논의는 나중에 더 설명하기로 한다.

광링크를 통한 RF 신호 전송 방식은 크게 3가지로 분류될 수 있다: (가) 기저밴드의 data를 광섬유를 통하여 보내는 baseband (BB)-over-fiber 방식, (나) 중간 반송파를 광섬유를 통하여 보내는 intermediate frequency (IF)-over-fiber 방식, (다) 최종 무선 반송파를 직접 광섬유를 통하여 보내는 RF-over-fiber. 이 분류의 기준은 무선 공간에서 이용되는 RF 반송파를 어느 위치에서 생성하느냐를 기준으로 하고 있으며, 더불어 BS의 구조는 이 방식에 따라 그림 4와 같이 구성하게 된다. (가) BB-over-fiber의 경우 기저밴드의 데이터를 광링크를 전송하기 때문에 저가의 광부품, 모든 성숙된 광통신 기술의 활용 등의 장점이 있다. 그러나 기지국(BS)에서 무선 전송에 필요한 RF로 상향 변환하여야 하므로 가장 복잡한 구성이 필요하다는 것이 단점이다. 다음으로 (나) IF-over-fiber의 경우는 기저대역의 신호를 CO에서 1~2 GHz 대역으로 상향변환하여 광전송한 후 기지국(BS)에서 RF로 상향변환하는 무선 전송하게 된다. 비교적 낮은 마이크로파 주파수를 ROF 링크에서 이용하기 때문에 저가의 광/전자 부품의 사용이 가능한 구조이고, 망제어 기능 또한

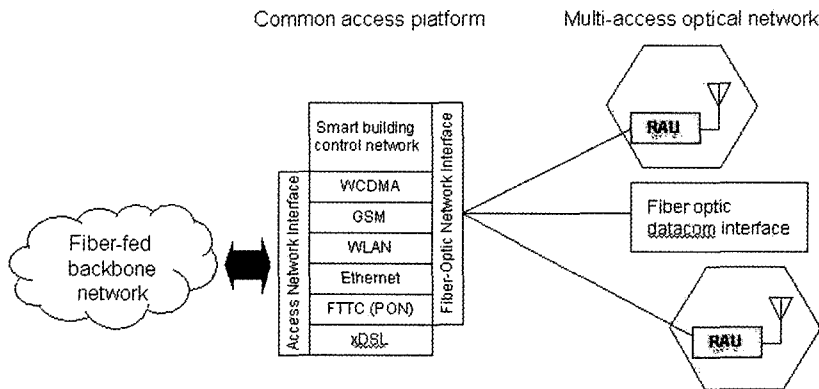


그림 3. 공동 플랫폼을 이용한 여러 종류의 데이터의 ROF전송 실행

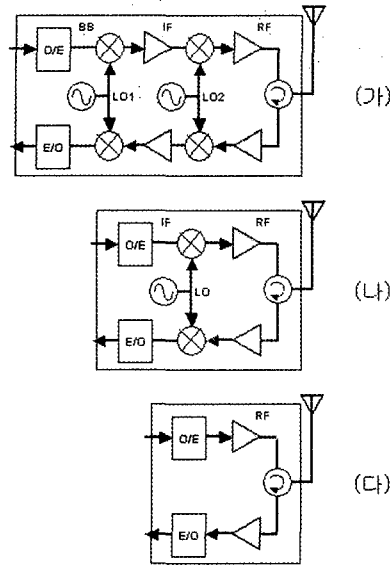


그림 4. RF 신호 전송 방식 vs. BS 구조:
(가) BB-over-fiber, IF-over-fiber, (나) RF-over-fiber

CO에 집중시킴으로써 BS의 복잡도를 해소할 수 있는 유용한 방법이다. 그러나 BB-over-fiber에서와 마찬가지로 BS에서 RF 상향변환에 필요한 회로 구성이 필수적이므로 저가이며 단순하고 집약된 BS의 제작에 다소 불리한 점이 단점이다. 마지막으로 (다) RF-over-fiber의 경우, 모든 기능을 CO에 집중할 수 있어서 가장 간단한 BS를 구성하게 하는 구조이다. 그러나 최종 RF의 선정(2.4GHz ~ 60GHz)에 따라서 고가의 광전변환 부품과 미성숙된 RF MMIC 회로부품 기술 등을 이용해야 하는 기술적 어려움이 있다. 따라서, 간단하고 단순한 BS의 구성이 가능할 지라도 저가화에 불리한 점이 단점이다. 이와 더불어 광링크의 신호 전송 방식에 따른 기저국의 구성과 여러 가지 서브 캐리어 변조(sub-carrier modulation; SCM) 방식이 제시되어 있다^[3].

3. RF fiber-optic 링크 및 부품

가장 간단한 RF 광링크는 광원(레이저다이오드(LD) 혹은 외부광변조기(MOD))와 수신소자(PD)로 구성한다(그림 5). 단순히 LD(혹은 MOD)와 PD로만 구성하는 광링크는 ROF링크의 가장 기본적인 단위이며, 광 반

송파의 생성, 신호 변조 및 검출의 기능을 하게 된다. 또한, 대부분의 아날로그 특성은 이 핵심 부품 소자들에 의하여 결정된다. 물론 광소자를 중심으로 표현된 그림 5의 구역 외부에는 RF 매칭 회로 및 구동회로가 포함되어 있다. 즉, 광소자만으로 표현되는 단위 링크의 외부 연결은 단순히 RF 신호의 입력과 출력으로 표시될 수 있기 때문에 일반적인 RF 시스템의 two-port 부품으로 간주하여 이해할 수 있다. 따라서 이 RF 광링크의 아날로그 특성은 RF 부품과 마찬가지로 (가) RF 이득률(gain), (나) SFDR(spur-free dynamic range), (다) 잡음지수(noise figure; NF)로 설명될 수 있다. 이 특성요소들은 아날로그 광소자의 개발과 RF활용에 있어서 최적화가 필요한 가장 중요한 변수들이다. 그림 5에서 보이듯이 전체 링크의 성능은 LD(MOD)/PD가 함께 영향을 준다. 그러나 광원소자(LD 혹은 MOD)에 비하여 PD의 상대적으로 월등한 선형성 때문에 RF 광링크의 아날로그 특성은 광원소자에 의하여 지배적으로 영향을 받는다. 물론 PD 바이어스 동작 점이 광 포화에 의하여 그 선형 구간을 벗어나지 않는다는 것을 전제로 하는 것이며, 실제로 광원에 비하여 PD는 높은 dynamic range를 보인다.

광원소자에 있어서 직접변조 방식에는 LD의 전류 변화 방식과 외부 변조기의 전압변위에 의한 직접 변조 방식이 사용된다. RF 광링크의 경우, 외부변조기를 이용하는 것이 광 링크 이득률(optical link gain)에서 절대적으로 유리하다. 상대적으로 낮은 주파수(2.5GHz 이하)에서는 직접 변조 방식의 레이저 다이오드를 사용하고 있으나, 고주파(10GHz 이상)반송파에서는 외부 변조기를 대부분 사용하고 있다. 외부 광변조기를 사용할 경우, RF 링크 이득률 G는 다음과 같이 표시된다^[4, 5].

$$G = \frac{p_{out}^{RF}}{p_{inout}^{RF}} = \left(\frac{p_{mod, o}^2}{p_{inout}^{RF}} \right) \cdot t_m^2 \cdot \left(\frac{p_{out}^{RF}}{p_{PD, o}^2} \right) \quad (1)$$

$$= 4(p^{opt})^2 \{ t_m T(V_b)^2 \} \cdot t_f^2 \cdot \eta_{PD}^2 \cdot R_s \cdot R_{load}$$

여기서, p^{opt} 는 외부광변조기에 입사하는 광입력 파워를 나타내며, t_m 은 정규화된 광전달함수이며, $T(V_b)$ 는 지정된 바이어스 전압에서 측정된 전달함수의 기울기이며, t_f 는 광링크에서 발생하는 광출력 손실을, η_{PD} 는 PD의 반응도(A/W)를 나타낸다. 또한, R_s 와 R_{load} 는 각각 광원(변조기)와 수신기의 부하 임피던스(load impedance)를 나타낸다. 외부 변조기에는 두가지 종류가 널리 이용되고 있

는데 Electro-Optic 효과를 이용하는 마하젠다 광변조기 (Mach-Zehndar modulator; MZM)와 전계흡수형 반도체 광변조기(electroabsorption modulator; EAM)가 있다. 동작원리가 상이하지만 EAM의 특성을 MZM의 특성 바이어스 V_π 로 다음과 같이 연계할 수가 있다.

$$V_\pi = \frac{\pi}{2 |T(V_b)|}$$

RF 링크 이득률, G 도 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$G = \frac{(\pi\eta_{PD} P^{opt} t_m t_f)^2 R_s R_{load}}{V_\pi^2} \quad (2)$$

이상의 식 (1) 과 식 (2)에서 알 수 있듯이 RF 링크 이득률, G 는 PD의 반응도(η_{PD})가 일정할 때, 광링크에서 사용되는 광출력의 제곱에 비례하며, V_π 가 작을수록 즉, 광변조기의 전달함수의 1차 기울기가 급격한 특성을 가질수록 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 아날로그 광변조기의 성능 개발에 있어서 중요한 기준이 되고 있다⁶⁾. 그러나 EAM을 아날로그 광링크에서 사용할 경우, 입사 광출력에 의한 EAM의 특성 전달함수가 변화하기 때문에 최고 효율을 갖는 바이어스 동작 범위는 가변적이 될 수 있다.

디지털 신호의 광전송과 달리 RF신호를 전송하게 되는 SCM (sub-carrier modulation) 변조에서는 근접하는 RF 주파수 신호들 간의 상호변조왜곡 특성이 중요하게 된다. 이 현상은 소자의 비선형성에 의하여 생성된 고조파(harmonics)의 간섭에 의하여 발생하게 된다. 이렇게 발생한 신호 잡음은 무선 전송 시스템의 신호대 잡음비

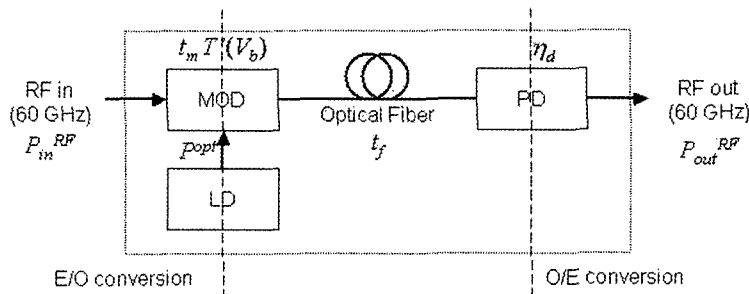
(SNR)에 영향을 주게 되는 것이다. 이 때 신호에 가장 크게 영향을 주는 상호 변조 왜곡은 2차 왜곡 (IMD2)와 3차 왜곡 (IMD3) 이 있다. 전자의 경우는 주로 500MHz 이상의 광대역을 이용하는 CATV 이용에 중요 변수가 되며, 후자의 경우 수 10MHz 정도의 협대역 신호를 이용하는 WLAN 신호전송에 중요 변수로 작용하게 된다. 그림 6 은 RF 입력 대비 출력 특성에서 보이는 모든 RF 변수들을 보이고 있다. 그림에서 보이듯이 상호왜곡(IMDn)에 의한 영향이 없는 잡음출력으로부터 기본 RF 출력의 크기를 SFDR (spur-free dynamic range)로 나타내며 이 값이 클수록 소자의 선형성이 우수한 특성임을 알 수 있게 된다. 60GHz EAM에서도 100dB Hz²/3이상의 광대역의 SFDR을 얻을 수 있다⁷⁾.

잡음지수 (noise figure; NF)는 광링크를 통하여 안테나를 원거리에 배치하고자 하는 antenna remoting 활용에는 매우 중요한 변수이나 CATV 등에서는 비교적 중요성이 덜하다. 이 잡음 지수는 다음과 같이 정의 된다.

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{N_{out}}{G \cdot N_{in}}$$

$$F = 1 + \frac{kT + 2q \cdot I_{PD} \cdot R_{load} + RIN \cdot I_{PD}^2 \cdot R_{load}}{G \cdot kT}$$

여기서, 첫 번째 항은 RF 신호원, 변조기, 광검출기 등의 음 임피던스 (ohmic impedance)에 의한 열잡음 (thermal noise)을 의미하며, 두 번째 항은 광검출 과정



$$G = \frac{P_{in}^{RF}}{P_{out}^{RF}} = 4(P^{opt})^2 [t_m T'(V_b)]^2 t_f^2 \eta_d^2 R_s R_l$$

그림 5. 기본 RF 광링크 구성도

에서 발생하는 shot 잡음을 그리고 마지막 항은 광 RIN 잡음을 의미한다. 레이저를 이용한 광링크에서는 RIN 잡음이 다른 두 영향에 비하여 지배적이지만, 외부 변조기를 이용한 링크에서는 shot 잡음이 더 중요한 변수가 된다. 또한 BS 상향 링크의 잡음 지수를 줄이기 위하여 안테나로부터 입사되는 RF신호의 입력 단에 높은 RF 이득률과 낮은 특성 잡음 지수 (NF)를 갖는 저잡음증폭기 (low noise amplifier; LNA)의 사용이 매우 중요하게 된다.

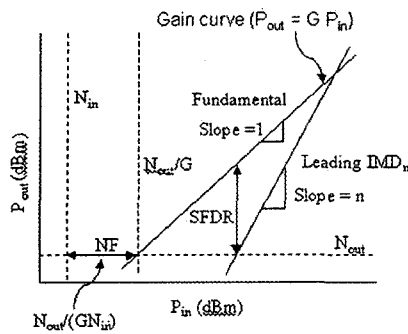


그림 6. RF 입력 vs. RF 출력 특성평가를 위한 모든 RF 변수

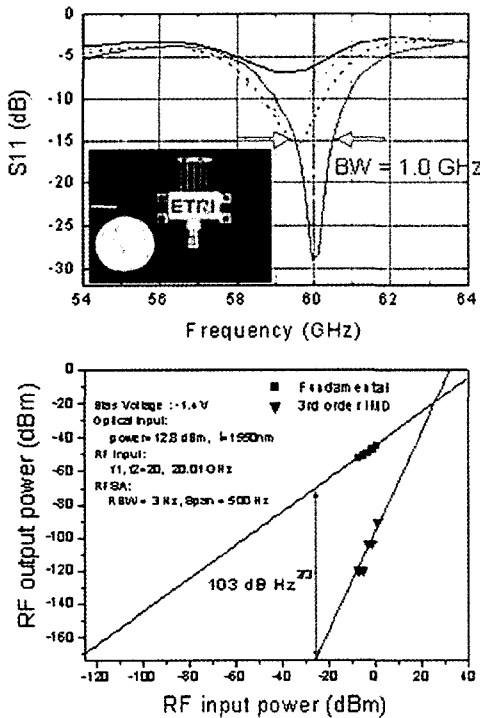


그림 7. 60GHz용 진행파전극이 결합된 전계흡수형 광변조기(TWAM) 모듈 특성

4. WPAN을 위한 60GHz ROF 기술

60GHz는 주파수는 특성상 공기 중의 산소(O₂) 분자에 의한 흡수가 다른 어느 대역보다 많은 흡수 특성을 보이고 있는 주파수 대역이다. 또한, 기존의 WLAN에서 이용하고 있는 2.4GHz ~ 5.8GHz 대역에 비하여 10배 이상의 고주파에 해당된다. 따라서 RF의 대기 중 전파가 더 많은 직진성을 갖고 있다. 그러나 반송파(carrier frequency)로서 60GHz는 작은 주파수에 비하여 수 GHz 대역의 광대역 대역을 이용할 수 있다는 점이 매력으로 인식되고 있다. 이 밀리미터파의 직진성과 대기 흡수 때문에 인접 통신 셀과의 간섭이 최소화될 수 있으며, 결과적으로 높은 정도의 주파수 재사용이 가능하게 되는 이점이 있다. 이러한 고유 특성 때문에 일반적인 개념의 통신에서는 매우 불리하다. 그럼에도 불구하고 10m 내외의 마이크로셀 및 피코셀 무선 통신에의 활용이 적극 검토되고 있다. 전 세계적으로 60GHz의 밀리미터파 주파수 대역의 상용 무선통신 서비스를 위한 주파수 표준화가 IEEE802.15c(WPAN)에서 협의 중에 있으며, 2 ~ 5 GHz 대역의 ISM(industry, science, measurements) 대역에서와 같이 일정 RF 출력 (10mW 이하)에 대하여 누구나 활용할 수 있도록 대역을 개방하고자 하는 추세에 있다. 우리나라도 일부 밀리미터파 주파수를 상용 무선 서비스에 할당하고자 하는 움직임이 최근에 벌어지고 있다.

이와 같은 60GHz 대역의 밀리미터파를 광통신과 결합하여 사용하게 될 경우 여러 가지 기술적인 도전에 직면하게 될 수 있다. 왜냐하면 우선, 60GHz 대역에서 동작할 수 있는 광대역특성을 갖는 광변조기 및 광검출기의 소자개발이 용이하지 않다는 것이다. 이와 더불어 MMIC 증폭소자 (LNA 및 HPA)와 수동소자 (bandpass filter; BPF)등의 기술이 아직 미성숙 단계에 있기 때문이다. 부품 소자의 측면에서만 고려하였을 때, 60GHz ROF 링크를 이용한 무선 통신 시스템의 구성에서 가장 핵심 부분은 어떻게 BS를 그 기능을 손상함이 없이 가장 간단하게 구성할 수 있는가 하는 것이다. 제 2절에서 살펴봐왔듯이 RF 및 광 부품의 고가와 BS의 단순성의 요구 사항을 만족하기 위한 구도는 RF-on-fiber 전송 방식이 가장 적절할 수 있을 것이다. 즉, CO에서 기저 대역의 신호를 RF에 까지 상향변환시키거나 하향변환하는 기능을 부여하게 되면 BS의 구성은 단순히 광전변환 모듈과 MMIC 증

폭기 및 안테나 (혹은 RF 스위치 도 포함)로 구성할 수 있다.

그림 7은 60GHz 용 진행파진극이 결합된 전계흡수형 광변조기 (TWEAM) 모듈의 특성을 보이고 있다. 그림 7 (가)의 사진은 제작된 모듈그림이며, 그래프는 광모듈의 반사에 대한 주파수 반응특성 (S11)을 보이고 있다. 이 결과로부터 모듈의 동작 중심주파수는 60GHz로 설정되었으며, 동작 대역폭 (fractional bandwidth)이 S11=-10dB에서 $\pm 500\text{MHz}$ 인 1.0GHz의 넓은 대역폭을 보이고 있다⁹⁾. 그리고 그림 7 (나)에는 이 모듈에서 측정된 SFDR이 103dB Hz^{2/3}으로 나타난 것을 보이고 있다.

지금의 모듈 연구는 보다 광전변환 효율의 극대화를 지향하면서 콤팩트하며, 작고, 궁극으로 저가의 요구사항을 만족할 수 있는 공동 RF 패키징에 의한 집적화가 연구되고 있다. 집적화의 방법에는 O/E 및 E/O 변환을 동시에 구현하는 모노리식 집적화 [ref: 강영식]와 전통적으로 밀리미터파 모듈에서 이용하고 있는 공동 RF 패키징에 의한 system-on-package (SOP)를 수행되고 있다. 그림 8

은 ETRI에서 개발한 아날로그 송신기 SOP 모듈과 구성 회로를 보이고 있다. 먼저 구성 요소로는 광전 변환 소자로서 60GHz TWEAM이 이용되었으며, 60GHz 대역통과필터, RF 신호 증폭을 위한 LNA 및 마이크로 스트립을 이용한 임피던스 매칭회로를 모두 포함하고 있다. 그림 8 (나)는 이 모듈의 동작 특성을 보이고 있다. DC 광특성은 1550 nm에서 12dB의 fiber-to-fiber 삽입손실을 보이고 있으며, RF gain은 21dB, 잡음지수는 3.8dB, LNA의 P1dB는 +12 dBm이다. 그리고 변조 대역폭은 그림 8 (나)에 보이듯이 사용가능한 주파수 대역이 59.7GHz ~ 60.7GHz로 약 1 GHz 정도의 광대역 특성을 보이고 있다. DC 바이어스가 -1.6V에서 약 20dB의 최대의 증폭특성을 보이고 있다. 이는 사용된 TWEAM 변조기 모듈의 E/O 변환 효율이 이 바이어스에서 극대화되고 있는 것을 말하고 있다. 이 모듈에 더하여 궁극적으로는 안테나 기능 역시 이 SOP 모듈로 집적화를 할 수 있을 것으로 예상된다. 반면에 60GHz 광수신기 모듈도 역시 유사한 구성과 개발이 가능하며, 연구가 진행되고 있다. 별도의 E/O SOP 모듈과 O/E SOP 모듈을 다시 결합하게 되면 더 높은 기능성을 갖는 가장 콤팩트하며 작은 BS의 구성도 가능할 것으로 예상된다.

이와 같은 하드웨어 모듈 개발과 더불어 60GHz ROF 링크 및 부품 개발 연구에서 반드시 고려해야할 사항은 데이터 처리와 관한 무선 통신 변수들의 표준화 과정이다. 현재 IEEE에서 밀리미터파의 WPAN 응용 표준화는 진행 중이며, 이 결과에 따라 주요 모듈 동작 기능 변수들이 상응하여 변화될 수 밖에 없다. 현대 ETRI에서 제시하고 있는 60GHz WPAN을 위한 무선 모뎀/MAC (media access control) 변수는 표 1 과 같다. 여기서 제시된 여러 변수들 중 BS 모듈 및 광전부품의 사양을 결정할 수 있는 것으로는 반송 주파수 (60 ~ 63GHz), 대역폭 (4 x 120 MHz = 480MHz), 변조 구도 (즉, BPSK, QPSK, QAM 등), 신호전송방식 (time division multiplexing: TDD)와 무선 서비스 반경 (10m 이하), 그리고 데이터 전송속도 (1.0Gbps)가 가장 중요한 변수 들이다.

ROF 링크를 이용한 무선 통신 시스템의 구축을 구현을 위해 필요한 핵심 요소로서 BS구성을 중심으로 살펴 보았다. 앞으로는 지금 보다도 더 나은 기능 (큰 링크 gain 및 SFDR, 낮은잡음지수 등)을 확보하면서도 단순하고 콤팩트하게 하는 것이 추진될 것이다. 이렇게 함으로써

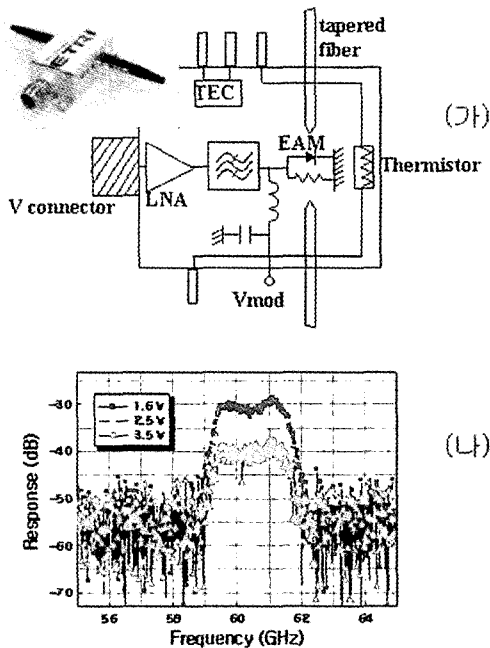


그림 8. 아날로그 송신기 SOP 모듈 및 특성

Feature	Value
Carrier Frequency, f_c	60 ~ 63 GHz
System Bandwidth (Mode0)	120 × 4 MHz
TDD Frame Length, T_f	1.0 ms
OFDM Symbol Length, T_{sym}	2.2667 μ s
FFT/IFFT size, N	256 × 4
Used subcarrier, $N_{used} = N_d + N_p$	(192+8) × 4 (pilot carriers)
Virtual Carrier, N_{vc}	56 × 4
Subcarrier Spacing, Δf	468.75 kHz
Data duration, T_d	2.1333 μ s
Cyclic Prefix, T_{cp}	0.1333 μ s
Modulation Scheme	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256 QAM (optional)
FEC	RS(145,129)-CC(1/2), overall 0.44
Multiplexing	OFDMA/HCCA hybrid
Duplexing	Time Division Duplexing
Mobility	3 m/s(= 10.8 km/h), $f_d = 600$ Hz
Service Range	< 10 m
Data Rate with $R=1/2$ (fixed modulation)	84.08/168.17/252.26/336.32/672.68/1009.04 Mbps

표 1. ETRI의 60GHz 무선 모델 / MAC 사양 목록

저가화가 동시에 달성하게 되면 보다 실용화 및 상용화에 근접할 수 있을 것이라고 생각한다. 이와 더불어 기술외적으로 부가하여 고려되어야할 사항은 제공할 서비스가 전제되어야 한다는 점이 아직 미정으로 남아있다.

5. 맺음말

이 기고문에서 소개한 radio-over-fiber (ROF) 기술과 60GHz 광무선 모듈 및 BS 모듈은 현재 사용되고 있고, 실용화에 근접한 기술이거나, 혹은 수 10Mbps 이상의 대용량 무선 멀티미디어 서비스가 필요한 시점에서 반드시 고려될 수 있는 차세대 핵심 기술로서 매우 중요하다. 이와 같은 연구가 국내 연구진들에 의하여 지속적으로 창조 발전될 수 있기를 바란다. 또한, 이러한 ROF 및 RF/광용

기술과 같은 신기술 개척 및 개발은 전 세계적으로 무선 이동통신 분야에서 우리나라의 선도적 위치를 그 지위를 지속 유지시켜주는 토대를 제공할 수 있을 것으로 믿는다.

마이크로파 포토닉스는 광학(optoelectronics 및 photonics)기술의 물리적 특성 향상이나 신기능성을 이룩하기 위하여 마이크로파 및 밀리미터파 기술을 활용/결합을 이용하는 기술이다. 즉, 지금까지의 광기술과 더불어 무선 및 RF기술의 특징을 적극 이용함으로써 기존의 광특성을 극대화하거나 제3의 신기능성을 확보하는 등 다양한 연구 개발 기회를 제공할 수 있다. 실례로서 MWP 2005 학술대회에서는 RF/광 영상센서^[9], 보안검색을 위한 THz 부품기술^[10] 등 기존의 분야를 초월하는 신기술에 대한 연구결과가 많이 보고 되었다. 국내의 높은 수준의 광기술을 활용하면 새로운 연구/학술 영역을 개척에

있어서 MWP와 같은 기술융합 분야는 많은 새로운 기회를 제공할 수 있을 것이다. 또한, 학술 교류면에서 우리나라는 비교적 적은 규모임에도 불구하고 그 연구 역량이 최근 국제적으로 많은 인정을 받고 있다. 2005년 서울에서 개최한 MWP 2005를 통하여 이러한 추세를 더욱 확고히 하였다. 이 마이크로파 광자기술 융합 분야에서 많은 사람들이 흥미롭고 창의적인 연구 기회를 발견할 수 있기를 희망한다.

참고문헌

- (1) C. Lim, A. Nirmalathas, D. Novak, R. Waterhouse, "Capacity analysis for WDM fiber-radio backbones with star-tree and ring architecture incorporating wavelength interleaving," *J. Lightwave Technol.*, vol.21, pp. 3308 ~ 3315, Dec. 2003.
- (2) H. -H. Lu, Y. -C. Lin, Y. -H. Su, and H. -S. Su, "A radio-on-fiber intelligence transport system based on electroabsorption modulator and semiconductor optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.16, pp.251-253, Jan. 2004.
- (3) K. Kitayama, "Architectural considerations of fiber-radio millimeter-wave wireless access systems," *Fiber and Integrated Optics*, pp.167-186, Taylor & Francis, 2000.
- (4) W. S. C. Chang, "Multiple quantum well electroabsorption modulators for RF photonic links," in *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links*, W. S. C. Chang, Ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2002, pp.133-162.
- (5) C. H. Cox, *Analog Optical Links: theory and practice*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004, ch. 2.
- (6) J. Kim, Y. -S. Kang, Y. -D. Chung, K. -S. Choi, "Development and RF Characteristics of Analog 60 GHz Electroabsorption Modulator Module for RF/optic Conversion," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, to be published.
- (7) Y. -D. Chung, Y. -S. Kang, J. Lim, S. -B. Kim, and J. Kim, "Large enhancement of linearity in electroabsorption modulator with composite quantum-well absorption core," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E88-C, pp.967-972, May 2005.
- (8) J. Lim, S. Jeon, J. Kim, and S. Hong, "A circuit model of traveling wave electroabsorption modulator," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2002, vol. 3, pp. 1707-1710, 2002.
- (9) K. Sasagawa and M. Tsuchiya, "An electrooptic sensor with sub-millivolt sensitivity using a nonlinear optical disk resonator," *Proc. of MWP 2005* pp. 355-358, 2005.
- (10) in *Proc. of MWP 2005*.