

차세대 대용량 광전송 기술

1. 서론

지난 이십여 년간 매년 40~50%씩 지수적으로 증가해 온 데이터 트래픽은 최근 동영상, 무선 데이터, 그리고 클라우드 서비스(cloud service) 등의 데이터 응용 서비스의 지속적인 트래픽 증가로 인하여 그 증가세가 유지되고 있으며, 사물 인터넷 등의 새로운 서비스의 도입으로 적어도 향후 수년간 이러한 추세가 지속될 것으로 예측되고 있다 [1], [2]. 데이터 트래픽 증가를 수용하기 위하여 광전송 시스템은 다양한 진보된 기술을 사용하여 진화되어 왔다. 1990년 대에는 어븀 첨가 광섬유 증폭기(erbium-doped fiber amplifier)와 파장 분할 다중화 방식 기술이 도입되어 전송 용량을 경제적으로 증가시킬 수 있었으며, 2000년대 초 중반부터는 직접 검출

$\log_2(M)$ 배 많은 정보를 전달할 수 있다. 그러나, 레벨 수가 증가할수록 특정 비트 오류율(bit-error rate)을 만족시키기 위한 신호 대 잡음비 역시 증가하므로, 다치 변조 방식을 이용하여 광전송 시스템의 용량을 증대시키기 위해서는 전송 거리를 줄이거나 광증폭기 간의 간격을 좁히는 등 신호의 왜곡 및 잡음 누적을 감소시키는 방안이 병행되어야 한다. 편광 분할 다중화 방식은 두 직교 편광에 독립적인 신호를 인가하여 전송하는 방식으로 광섬유의 주파수 효율성을 두 배 향상시킬 수 있다. 편광 역다중화는 편광 분할 다중화된 광신호의 편광 축을 편광 분할기의 편광 축에 정렬시킴으로써 가능하다. 그러나, 광섬유를 진행하는 광신호의 편광은 통상 시변(time varying)하므로 동적 편광 조절기를 사용하여 광신호의 편광 축을 편광 분할기의 편광 축에 정렬시켜야 한다. 그

특집 ■ 광통신

차세대 대용량 광전송 기술

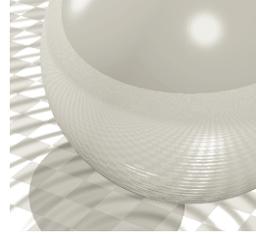
김 훈*

(direct-detection) 위상 변조 방식이 광통신에 적용되어 용량 증대를 이끌었다 [3].

최근 광통신 시스템의 용량을 크게 증가시킨 기술로는 다치 (multi-level) 변조 방식, 편광 분할 다중화 방식, 그리고 코히어런트(coherent) 광수신기를 들 수 있다. 하나의 심볼(symbol)에 여러 비트의 정보를 전송할 수 있는 다치 변조 방식은 광섬유의 주파수 효율성(spectral efficiency)을 크게 증가시킬 수 있다. 예를 들면, M 개의 레벨을 가진 변조 방식의 신호(예, 64-QAM)는 동일 대역폭을 차지하는 OOK 이진 변조 방식 신호에 비하여

럼에도 불구하고 동적 편광 조절기를 사용하는 편광 역다중화 방식은 수신단의 복잡도를 증가시킬 뿐만 아니라 어떠한 편광 변화에도 단시간의 편광 축 불일치 없이 동작하는 수신기의 구현이 까다로우므로 그 사용이 매우 제한적이다 [4]. 이에 반하여 코히어런트 광수신기는 전기적 영역에서 디지털 신호 처리 기술을 이용하여 편광 역다중화를 수행할 수 있다. 코히어런트 광수신기는 광신호의 편광, 세기, 주파수, 위상 정보를 손실 없이 전기적 영역으로 변환시키므로 유한 응답 특성 필터 (finite impulse response filter)를 사용하여 신호의 역다중화

* KAIST 전기및전자공학과



및 검출이 가능하다. 기존의 직접 검출 광수신기와 비교해서 코히어런트 광수신기의 또 다른 장점으로 디지털 신호 처리 기술을 이용한 복잡한 다차 변조 방식 신호의 복조 및 검출을 들 수 있다. 광 국부 발진기 (optical local oscillator)를 이용하여 전기적 영역으로 변환된 다차 변조 신호는 전기 통신에서 널리 활용되는 코히어런트 검출 방식을 이용하여 최소한의 광전력만으로도 검출이 가능하다. 또한 전기적 필터를 사용하여 파장 분할 다중화된 신호의 역다중화를 수행할 수 있으므로 파장 간격을 최소화할 수 있다는 장점도 있다 [5]. 그 밖에 코히어런트 광수신기는 선형적인 신호 왜곡, 열화, 그리고 누화(crosstalk)를 디지털 신호 처리 기술을 이용하여 보상할 수도 있다. 이러한 수많은 장점을 지닌 코히어런트 광수신기는 광학 전단부(optical front-end)에 광 국부 발진기, 90도 하이브리드(hybrid), 그리고 4개의 광검출기(photo-detector) 등 고가의 광소자가 필요함에도 불구하고 대용량 광통신 시스템에 폭넓게 활용되고 있다.

2. 공간 분할 다중화 방식

서론에서 언급한 기술들을 복합적으로 사용하여 광전송 시스템의 용량을 극대화시키는 노력이 최근 지속되고 있다. 다차 변조 방식 및 편광 분할 다중화 방식을 사용하여 심볼당 10 비트 이상의 정보를 수용하며, 코히어런트 수신 기반 파장 분할 다중화 방식 광전송 시스템에서 파장 간격을 최소화함으로써 광증폭기의 가용 대역폭 내에 최대한 많은 수의 채널을 수용하는 시스템의 구현이 가능해졌다. 일례로 294 Gb/s 128-QAM OFDM으로 변조된 370 개의 WDM 채널이 25 GHz 간격으로 배치되어 전체 전송 용량 101.7 Tb/s의 신호를 단일 모드 광섬유 165 km에 전송한 실험 결과가 보고된 바 있다 [6]. 약 12 THz 에 달하는 C와 L 밴드의 광섬유 대역폭을 10 b/s/Hz 의 주파수 효율성을 가진 신호로 채웠을 때 얻을 수 있는 최대 용량이 120 Tb/s 인 것을 감안하면, 시연된 광통신 시스템의 용량이 Shannon 한계치에 근접했음을 알 수 있다. 광섬유 기반 광통신 시스템의 용량은 전통적인 Shannon 한계 예측과는 달리 광섬유의 비선형성으로 인하여 시스템의 최대 용량을 얻을 수 있는 신호의 세기에 제한이 있다 [7]. 따라서, 상기 기술들을 활용한 광통신 시스템의 용량 증대는

머지 않아 한계점에 도달할 것이므로 지속적인 용량 증대를 위한 새로운 전송 기술이 절실히 요구된다. 최근 공간 분할 다중화(space-division multiplexing) 방식이 이러한 필요를 충족시킬 수 있는 기술로 각광받고 있다. 공간 분할 다중화 방식은 서로 다른 공간을 사용/차지하는 광신호를 다중화하여 전송 용량을 증대시키는 기술로서 이미 광섬유 리본(fiber ribbon)이나 다심 광섬유 케이블의 형태로 상용화되어 널리 사용되고 있다. <그림 1(a)>는 여러 가닥의 광섬유를 사용하는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템을 보여준다. 광섬유 리본이나 다심 광섬유 케이블과 같이 여러 가닥(예, N 개)의 개별 광섬유를 사용하는 시스템의 경우 각 광섬유 코어(core) 마다 클래딩(cladding)과 코팅(coating) 층이 각각 존재하므로 광섬유 간의 누화가 없는 N 개의 독립적인 광전송 시스템으로 간주할 수 있다. 그러나 최근 공간 분할 다중화 방식에 관한 연구는 단순히 여러 가닥의 광섬유를 사용하여 전송 용량을 증가시키기 보다는 공간 분할 다중화 기술을 이용하여 한 가닥의 광섬유가 제공할 수 있는 용량을 증대시키는데 초점이 맞추어져 있다. 이는 N 가닥의 광섬유를 사용하는 시스템은 기본적으로 한 가닥의 광섬유를 사용하는 시스템에 비하여 N 배 많은 공간을 차지할 뿐만 아니라 N 배 비싸기 때문이다. 용량이 N 배 증대된 시스템을 보다 작은 공간에 경제적으로 구현하기 위해서는 광전송 시스템을 구성하는 모든 구성 요소들을 집적화할 필요가 있다. 이는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템을 위한 광수신기를 포함하여 광증폭기, 광학 소자들뿐만 아니라 광섬유 역시 집적화되어야 함을 의미한다. 최근 공간 분할 다중화 방식을 이용하여 한 가닥의 광섬유에 여러 독립적인 정보를 전송하기 위하여 한 개의 광섬유 클래딩에 여러 개의 코어가 존재하는 다중 코어(multi-core) 광섬유와 다중 모드 광섬유

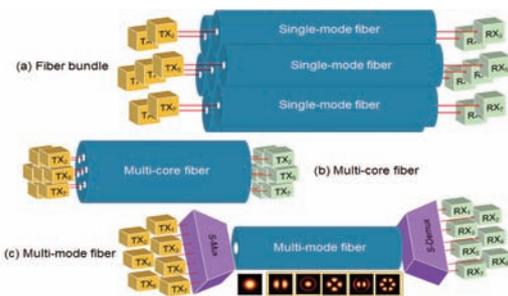


그림 1. (a) 광섬유 다발 기반, (b) 다중 코어 광섬유 기반, (c) 다중 모드 광섬유 기반 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템

차세대 대용량 광전송 기술

의 각 모드에 독립적인 정보를 실어 전송하는 모드 분할 다중화 방식에 대한 연구가 활발하다. <그림 1(b)와 (c)>는 각각 다중 코어 광섬유와 다중 모드 광섬유를 사용하는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템을 보여준다. 본 고에서는 상기 광섬유를 사용하는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템을 소개하고, 최근 연구 동향 및 기술적인 문제점을 개괄한다.

3. 다중 코어 광섬유 기반 공간 분할 다중화 기술

한 개의 클래딩에 여러 개(예, N 개)의 코어가 분포되어 있는 다중 코어 광섬유는 기존의 단일 모드 광섬유와 비교하여 유사한 공간을 차지하면서 최대 N 배 광전송 시스템의 용량을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 다중 코어 광섬유는 기본적으로 코어 간에 광신호의 누화가 크지 않도록 설계/제작하여 수신단에서 각 코어 별로 독립적으로 신호를 수신 검출하는 것을 가정한다. 물론 광섬유 코어 간의 누화가 상당하여도 다중입력 다중출력(multiple input multiple output: MIMO) 디지털 신호처리 기법을 활용하여 광섬유 코어 간의 누화를 보상할 수 있지만 코어 수가 증가할수록 수신단의 MIMO 신호처리 복잡도가 크게 증가하므로 코어 간의 누화를 적정 수준 이하로 제한하여 누화 보상 없이 수신기를 구성하는 것이 바람직하다. <그림 2>는 다차 변조 방식 별로 누화의 양에 대한 수신단에서 요구되는 광신호 대 잡음비(optical signal-to-noise ratio: OSNR)를 보여준다 [8]. 광신호 대 잡음비 페널티(penalty)를 2 dB 이하로 설정할 경우 QPSK 변조 방식은 전송 후 누적 누화가 12

dB 이하, 64-QAM 변조 방식은 27 dB 이하로 억제되어야 한다. 다중 코어 광섬유에서 코어 간 누화는 코어 간 간격과 코어 간의 전파 상수(propagation constant) 차이가 클수록 감소한다. 광섬유의 코어 간 간격을 늘리는 방법은 코어 간 누화를 손쉽게 감소시킬 수 있다는 장점이 있으나, 광섬유의 공간 효율성 역시 감소시킨다는 단점이 있다. 특히, 광섬유 포설 중 언제나 발생할 수 있는 광섬유의 구부러짐과 뒤틀림에도 실리카 광섬유의 기계적 견고성을 확보하기 위해서는 클래딩 직경이 230~250 μm 이하로 제한되어야 하므로 [9] 단순히 코어 간의 간격을 늘리는 방법으로는 광섬유의 공간 효율성을 극대화하는데 한계가 있다. 촘촘히 배열된 광섬유 코어에서 누화를 억제할 수 있는 또 다른 방법은 서로 다른 종류의 코어(즉, 다른 도파로 구조 또는 굴절률을 지닌 코어)를 교대로 배치하여 인접한 코어 간의 전파 상수 차이를 늘리는 방법이 있다 [10]. 이 방법은 코어 간의 간격을 최대 절반까지 좁힐 수 있어 광섬유의 공간 효율성을 두 배 가량 높일 수 있을 것으로 기대된다. 상기 언급된 방법과 더불어 코어 주변에 굴절률 해자(trench)를 삽입하여 광신호를 코어 내에 국한 시키는 방법이 최근 각광받고 있다. 이 방법은 광신호의 모드 필드 지름(mode field diameter)을 감소시킴으로써 인접 코어로 결합(coupling)되는 광전력을 억제시키므로 광섬유의 공간 효율성을 더욱 향상시킬 수 있다. 최근 이러한 방법을 활용하여 코어 간 누화를 -70 dB 이하로 억제한 17.4 km의 7 코어 광섬유가 보고된 바 있으며 [11], 19개의 코어를 배치한 다중 코어 광섬유도 시연된 바 있다 [12].

다중 코어 광섬유 기반 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템의 구현에 필수적으로 요구되는 소자 중 하나는 다중 코어 광섬유와 단일 모드 광섬유를 이어주는 팬인 팬아웃(fan-in fan-out)이다. 이 소자는 다수의 단일 모드 광섬유 기반 광소자와 다중 코어 광섬유를 연결하거나, 두 개의 서로 다른 다중 코어 광섬유를 서로 연결할 때 사용된다. 구현 방법으로는 여러 개의 단일 모드 광섬유 다발의 폭을 점차 감소시키는(tapering) 방식과 렌즈를 사용하여 광신호를 각 코어에 인가하는 방식이 흔히 사용된다 [13], [14]. N 개의 코어를 지닌 다중 코어 광섬유 기반 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템이 N 개의 단일 모드 광섬유로 구성된 시스템보다 우수한 경제성으로 구현되기 위해서는 다중 코어 광섬유 증폭기가

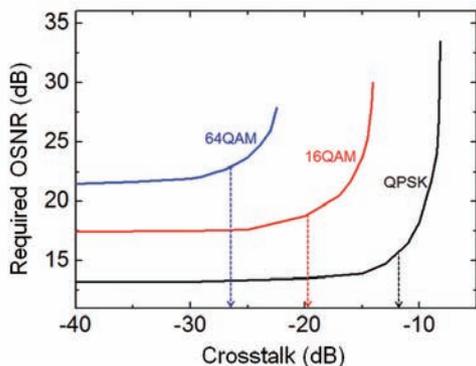
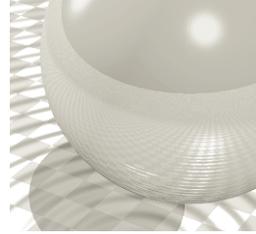


그림 2. 변조 방식별 누화에 따른 요구되는 광신호대 잡음비



필수적으로 요구된다. 이 광증폭기는 다중 코어 광섬유의 신호를 N 개의 개별적 단일 모드 광섬유 신호로 변환하지 않고 동시에 증폭할 수 있는 소자이다. 현재 다중 코어 광증폭기를 구현할 수 있는 기술로서 가장 각광받는 기술은 클래딩 펌프 기반 광증폭기이다 [15]. 단일 펌프 광을 이용하여 다중 코어의 어븀 원소를 여기 시킴으로써 다중 코어 광섬유 구조를 유지하면서 다중 코어의 신호를 동시에 증폭할 수 있다. 다중 코어 간 증폭 이득 차이가 발생할 경우 이득 등화기(equalizer)를 이용하여 그 차이를 보상할 수 있을 것으로 기대된다 [16]. 그 밖에도 다중 코어 광섬유 기반 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템이 경제적으로 구현되기 위해서는 상기 개괄한 몇몇 광학 소자 이외에도 다양한 광학 소자들(예, 광결합기, 광학 필터, 광학 스위치 등등)이 다중 코어 광섬유 기반으로 개발되어야 한다.

4. 다중 모드 광섬유 기반 공간 분할 다중화 기술

다중 모드 광섬유는 공간적으로 각기 상이한 전자기장의 모습을 지닌 복수 개의 공간 모드를 수용하므로 이러한 모드들에 독립적인 정보를 실어 전송함으로써 전송 용량의 증대가 가능하다. <그림 3>은 계단형 굴절률 분포를 갖는 광섬유(step-index optical fiber)의 정규화된 주파수 V 에 대한 정규화된 전파 상수 b의 관계를 보여 준다. 정규화된 주파수가 2.4 이상이 되면 광섬유는 2개 이상의 공간 모드를 수용한다. 광섬유의 코어 지름이 50 μm 인 다중 모드 광섬유는 1.5 μm 의 파장 대역에서 정규화된 주파수가 ~ 20 이 되며, 약 200 개의 공간 모드를 수용한다. 따라서, 이론적으로 이러한 광섬유를 사용하여 200배의 용량 증대가 가능하다. 그러나, 다중 모드 광섬유의 각 모드에 실린 광신호들은 광섬유를 진행함에 따라 모드 간의 결합이 빈번하게 발생하여 모드 간에 누화를 야기한다. 이는 이상적인 다중 모드 광섬유에서는 모드 간의 결합이 발생하지 않지만, 실제 광섬유는 미세한 굴절률의 변화, 광섬유의 구부림과 뒤틀림 등에 의하여 광섬유 모드 간의 결합이 유도되기 때문이다 [17]. 광섬유의 컨넥터(connector) 중심 축에 오차가 발생하는 경우에도 모드 간의 결합이 발생한다 [18]. 광섬유에서 모드 간의 결합은 모드의 전파 상수 차이에 큰 영향을 받는다. 예를 들어 모드 간 전파 상수 차이가 거의 없는 축

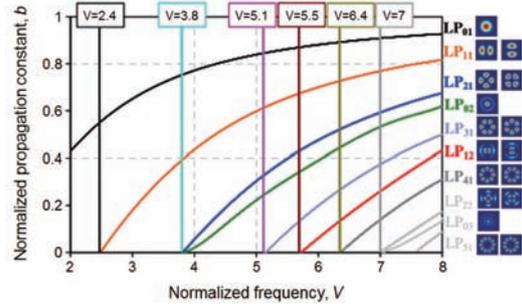


그림 3. 계단형 굴절률 분포를 갖는 광섬유(step-index optical fiber)의 정규화된 주파수 V 에 대한 정규화된 전파 상수 b의 관계

퇴(degenerate) 모드의 경우 수십에서 수백 미터의 전송 거리에도 두 모드 간의 결합이 상당하다고 알려져 있다 [17]. 이에 반하여 모드 간 결합 상수 차이가 큰 비축퇴(nondegenerate) 모드의 경우에는 두 모드 간의 결합이 이루어지는데 수십에서 수백 킬로미터의 길이가 필요하다. 따라서, 다중 모드 광섬유를 사용하는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템은 모드 간의 결합 정도가 미미하여 모드 간의 누화를 보상하지 않아도 되는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분할 수 있다.

모드 간 발생하는 누화가 특정 변조 방식의 신호를 수신하는데 있어서 큰 페널티를 유발하지 않을 경우에는 수신단의 MIMO 신호 처리 복잡도를 줄이기 위하여 모드 간의 결합에 의한 누화를 상쇄하지 않고 수신할 수 있다. 모드 그룹 다중화(mode group multiplexing)방식은 이러한 전송 기술의 좋은 예가 된다. 이 전송 방식은 유사 전파 상수를 지닌 여러 모드를 하나의 전송 채널로 설정하여 동일 정보를 실어서 전송하는 기술이다. 따라서 수신 단에서는 전파 상수가 유사하여 모드 간 결합이 강하게 발생하는 모드들을 구별하지 않고 하나의 수신기로 신호를 수신한다. 최근 이 방법을 이용하여 5 킬로미터의 다중 모드 광섬유에 10개의 모드 그룹을 전송한 실험 결과가 보고되었다 [19]. 그러나, 다중 모드 광섬유의 모드 간 전파 상수의 차이가 큰 경우에도 모드 간의 결합 정도는 전송 거리와 함께 증가하므로 모드 그룹 다중화 기술은 비교적 전송 거리가 짧은 시스템에만 활용 가능하다. 다중 모드 광섬유 기반 공간 분할 다중화 기술이 장거리 전송 시스템에 사용되기 위해서는 결국 모드 간의 결합에 의한 신호의 누화를 수신단에서 보상해 주어야 한다.

다중 모드 광섬유의 M 개 모드에 M 개의 독립적인 정보

차세대 대용량 광전송 기술

를 실어 전송하는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템은 수신단에서 각 모드를 역다중화하고, M 개의 코히어런트 광 수신기로 이를 각각 수신한 후, MIMO 신호 처리 기술을 이용하여 누화를 상쇄시킬 수 있다. 이 때, 특정 모드의 신호에 누화를 야기하는 모드의 수는 $M-1$ 개가 되며, 따라서 수신단에는 $M \times M$ 격자 구조의 MIMO 등화기가 요구된다 [20]. 모드 수가 증가함에 따라 수신단의 복잡도를 증가시키는 다른 요인은 모드 간의 군속도의 차이 (differential modal delay)이다. 간단한 예로 <그림 4>에서 보듯이 두 개의 모드(LP_{01} 과 LP_{11}) 간의 군속도 차이가 있는 경우를 생각해 보자. 모드 간의 결합이 전송 과정 내내 이루어지므로 전송 후 군속도의 차이에 의하여 LP_{11} 모드의 특정 심볼에 영향을 주는 LP_{01} 모드의 심볼이 넓게 분포하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 수신단에서 특정 심볼에 영향을 미치는 타 모드의 신호에 대한 모든 정보를 수신단에서 확보하여야 모드 결합에 의한 누화를 완벽하게 상쇄시킬 수 있다. 이는 모드 간 최대 군속도 차이가 증가할수록 MIMO 등화기의 크기가 커져야 함을 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 다중 모드 광섬유에서 모드 간의 결합을 일으키는 이유가 온도 및 압력 등에 의한 제어 불가능한 내외적 환경에 있으므로 모드 결합은 시변하는 특징이 있다. 따라서 수신단에서 시변하는 광섬유 채널의 전달 함수를 예측하고 이를 보상하기 위해서는 주기적으로 MIMO 등화기의 계수를 갱신하여야 한다. 이는 MIMO 등화기를 사용하는 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템의 구현 복잡성을 크게 증가시킨다. 이와 같이 모드 수가 증가할수록 수신단의 MIMO 신호 처리 복잡도가 매우 크게 증가하므로 이를 해결하고자 하는 노력이 진행 중이다. 예를 들면 광전송 시스템의 최대 군속도 차이를 감소시켜 MIMO 등화기의 크기를 줄이고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이를 위하여 광섬유의 도파로 구조 및 굴절률 분포를 잘 설계하여 최대 군속도 차이를 감소시키는 방안이 제시된 바 있다 [21]. 또한, 서로 군속도 차이가 다른 이중 광섬유를 활용하여 최대 군속도 차이를 감소시키는 방법도 보고되었다 [22].

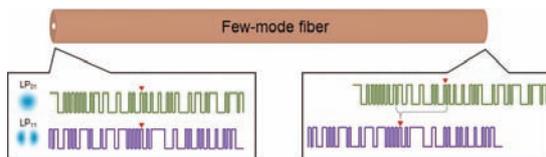
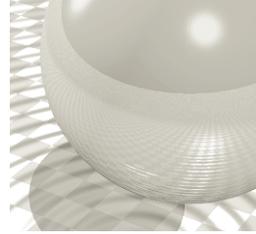


그림 4. 그룹 전파 속도가 상이한 서로 다른 두 모드의 다중 모드 광섬유 전파

다중 모드 광섬유 기반 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템을 구현하기 위해서는 모드 다중화기와 역다중화기가 필요하다. 이 소자는 다수의 단일 모드 기반 광송수신기와 다중 모드 광섬유를 연결하는 수동 소자이다. 이를 위하여 단일 모드 광신호를 다중 모드 광섬유의 개별 모드로 변환한 후 합과하는 방식이 사용될 수 있으나 이 방법은 확장성이 제한된다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 최근 포토닉 랜턴 (photonic lantern) 방식 모드 다중화기/역다중화기에 대한 연구가 활발하다 [23]. 포토닉 랜턴은 유한 수의 단일 모드를 중첩시켜 다중 모드를 근사시키는 소자로서 단일 모드 광섬유 다발의 폭을 점차 감소시키는 방법 등으로 구현 가능하다. 앞 절의 다중 코어 광섬유 기반 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템의 구현에 필요한 광소자와 마찬가지로 다중 모드 광섬유 기반 시스템 역시 다중 모드 광증폭기를 비롯한 다양한 다중 모드 광섬유 기반 광학 소자의 개발이 요구된다.

5. 결론

본 고에서는 최근 광전송 시스템의 용량 증대를 이끌 어온 기술들을 간단히 살펴보고, 향후 이러한 용량 증대를 지속시킬 기술로서 공간 분할 다중화 방식을 개괄하였다. 코히어런트 광수신기의 재 출현으로 빛의 편광, 세기, 주파수, 위상에 실려 있는 정보의 검출이 용이해졌으며, 정보의 밀도 역시 극대화할 수 있게 되어 광전송 시스템의 용량이 머지않아 Shannon 한계치에 도달할 것으로 여겨진다. 이에 지속적인 광전송 시스템의 용량 증대를 이끌 수 있는 방안으로 최근 공간 분할 다중화 방식이 주목 받고 있다. 공간 분할 다중화 방식이 단순히 여러 가닥의 광섬유를 사용하는 것을 뛰어 넘어 효율적으로 광전송 시스템의 용량 증대를 이루기 위해서는 시스템을 구성하는 모든 구성 요소들이 집적화되어야 한다. 이는 광송수신기, 광증폭기, 그리고 광다중화/역다중화기를 비롯한 광학 소자/광전자 소자의 집적화뿐만 아니라 광섬유의 집적화를 의미한다. 따라서, 차세대 대용량 광전송 기술로서 공간 분할 다중화 방식 광전송 시스템을 구현하는 광섬유, 광소자 및 서브 시스템의 집적화에 향후 많은 연구가 이루어질 것으로 예상된다.



참고문헌

- [1] B. Swanson and G. Gilder, "Estimating the Exaflood," www.discovery.org (2008).
- [2] Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2013–2018, Cisco White paper (2014).
- [3] D. Richardson, J. Fini, and L. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fiber," *Nature Photonics*, vol. 7, pp. 354–362 (2013).
- [4] D. H. Sim, H. Kim, and Y. Chung, "Direct-detection receiver for PDM signals," OFC, paper Th1E.1 (2015).
- [5] L. Nelson, S. Woodward, S. Foo, M. Moyer, D. Beckett, M. O'Sullivan, and P. Magill, "Detection of a single 40 Gb/s polarization-multiplexed QPSK channel with a real-time intradyne receiver in the presence of multiple coincident WDM channels," *J. Lightwave Technol.*, vol. 28, pp. 2933–2943 (2010).
- [6] D. Qian, M.-F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, Y. Saho, J. Hu, and T. Wang, "101.7 Tb/s (370x294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3x55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation," OFC, paper PDPB5.1 (2011).
- [7] R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel, "Capacity limits of optical fiber networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 28, pp. 662–701 (2010).
- [8] J. H. Chang, H. G. Choi, and Y. C. Chung, "Achievable capacity improvement by using multi-level modulation format in trench-assisted multi-core fiber system," *Optics Express*, vol. 21, pp. 14262–14271 (2013).
- [9] S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Taniagwa, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 μm ," *Optics Lett.*, vol. 36, pp. 4626–4628 (2011).
- [10] M. Koshiba, K. Saitoh, and Y. Kokubun, "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," *IEICE Electron. Express*, vol. 6, pp. 98–103 (2009).
- [11] T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, E. Sasaoka, "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber," *Optics Express*, vol. 19, pp. 16576–16592 (2013).
- [12] J. Sakaguchi, B. puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s," OFC, paper PDP5C.1 (2012).
- [13] B. Zhu, T. Faunay, M. Yan, J. Fini, M. Fishteyn, E. Monberg, and F. Dimarcello, "Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network," *Optics Express*, vol. 18, pp. 11117–11122 (2010).
- [14] J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "Propagation characteristics of seven-core fiber for spatial and wavelength division multiplexed 10-Gbit/s channels," OFC, paper OWJ2 (2011).
- [15] K. Abedin, T. Taunay, M. Fishteyn, D. DiGiovanni, V. Supradeepa, J. Fini, M. Yan, B. Zhu, E. Monberg, and F. Dimarcello, "Cladding-pumped erbium-doped multicore fiber amplifier," *Optics Express*, vol. 20, pp. 20191–20200 (2012).
- [16] N. Fontain, B. Guan, R. Ryf, H. Chen, A. Koonen, S. Ben Yoo, K. Abedin, J. Fini, T. Taunay, and D. Neilson, "Programmable gain equalizer for multi-core fiber amplifiers," OFC, paper Th5C.5 (2014).
- [17] I. Kaminow, T. Li, and A. Willner, *Optical Fiber Telecommunications VIB*, Chap. 11 (2013).
- [18] S. Warm and K. Petermann, "Outage capacity for spliced mode multiplexed multi-mode fiber links," OFC, paper JW2A.39 (2012).
- [19] B. Franz and H. Bulow, "Mode group division multiplexing in graded-index multimode fibers," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 18, pp. 153–172 (2013).
- [20] I. Kaminow, T. Li, and A. Willner, *Optical Fiber Telecommunications VIB*, Chap. 10 (2013).
- [21] I. Kaminow, T. Li, and A. Willner, *Optical Fiber Telecommunications VIA*, Chap. 8 (2013).
- [22] R. Ryf, S. Randel, N. Fontaine, M. Montoliu, E. Burrows, S. Corteselli, S. Chandrasekhar, A. Gnauck, C. Xie, R. Essiambre, P. Winzer, R. Delbue, P. Pupaiaikis, A. Sureka, Y. Sun, L. Gruner-Nielsen, R. Jensen, and R. Lingle, Jr, "32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber," OFC, paper PDP5A.1 (2013).
- [23] S. Leon-Saval, A. Argyros, and J. Bland-Hawthorn, "Photonic lanterns: a study of light propagation in multimode to single-mode converters," *Optics Express*, vol. 18, pp. 8430–8439 (2010).

약력



김훈

- 2014년 5월 - 현재
KAIST 전기및전자공학과, 부교수
- 2007년 7월 - 2014년 5월
National University of Singapore, 조교수
- 2002년 9월 - 2007년 6월
삼성전자 통신연구소, 책임연구원
- 2001년 4월 - 2002년 7월
Bell Labs, Lucent Technologies, 연구원
- 2000년 9월 - 2001년 3월
KAIST 전기및전자공학과, 연구원
- 1996년 3월 - 2000년 8월
KAIST 전기및전자공학과, 공학박사
- 1994년 3월 - 1996년 2월
KAIST 전기및전자공학과, 석사
- 1990년 3월 - 1994년 2월
KAIST 전기및전자공학과, 공학사