
광결정 광섬유를 갖는 WDM-ROF 시스템의 고주파 신호전송특성 분석

김소은* · 박철수** · 이충규***

Analysis of RF Signal Transmission in WDM-ROF Employing Photonic Crystal Fiber

Soan Kim* · Chul Soo Park** · Chung Ghu Lee***

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아
수행된 연구 결과임 (KRF-2007-313-D00551).

요 약

광결정 광섬유를 포함한 WDM-ROF (wavelength division multiplexing - radio over fiber) 시스템의 고주파신호 전송특성을 분석하였다. 기존의 단일모드 광섬유를 사용한 WDM-ROF 시스템에 있어, 각 WDM 채널의 파장에 따른 고주파신호 전송특성을 분석하였다. 이 경우, 원격노드(remote node)에서의 고주파 신호 특성은 단일모드 광섬유의 분산 특성으로 인해 각 WDM 채널의 파장에 따라 고주파신호 수신 파워의 편차를 나타내게 되며, 이는 전체 시스템 설계시 제한 요소로 작용하게 된다. 광결정 광섬유를 단일모드 광섬유와 함께 사용함으로써 광결정 광섬유의 분산 보상 특성을 이용하여 WDM 채널에 따른 고주파 전송특성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

We analyze transmission performance of radio frequency signal in WDM-ROF (wavelength division multiplexing - radio over fiber) system employing photonic crystal fiber. In a WDM-ROF system employing conventional single-mode fiber, transmission performance of radio frequency signal is analyzed depending on each WDM channel. In this case, each WDM channel experiences power fluctuation of received RF signal in remote node because of double sidebands of the modulated signal and wavelength dependent dispersion of single mode fiber. This RF power fluctuation acts as a design constraint in viewpoint of system design. By employing photonic crystal fiber (PCF) with dispersion compensation characteristics, the transmission performance of RF signal can be improved compared with the case with SMF only.

키워드

무선광통신, 파장다중분할, 분산, 파워 손실, 광결정 광섬유

Key word

Radio-over-fiber, wavelength division multiplexing, dispersion, power penalty, photonic crystal fiber

* 정회원 : 광주과학기술원 고등광기술연구소
** 정회원 : Institute for Infocomm Research, Singapore
*** 정회원 : 조선대학교 전자공학과 (교신저자, clee@chosun.ac.kr)

접수일자 : 2010. 09. 17
심사완료일자 : 2010. 10. 05

I. 서론

최근 광통신 기술의 발전 및 무선이동통신기술의 발전과 더불어, 이동 중에 광대역 대화형 멀티미디어 서비스를 제공하는 기술에 관한 관심이 매우 높아졌다. 고주파 통신기술에 기반한 무선이동통신기술은 신호의 대역폭이 증가함에 따라 전송능력이 저하되어 이를 극복하기 위한 증폭기 포설에 따른 비용증가를 가져오게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로서, 광통신 기술을 활용하여 중앙기지국(CS: central station)에서 광학적인 방법으로 고주파신호를 생성하고, 원거리에 위치한 원격노드(RN: remote node)까지 광신호를 통해 고주파 신호를 전송한 후 복원을 수행하는 ROF (radio-over-fiber) 시스템 기술에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다 [1, 2].

한편으로, 장거리 대용량 정보전송을 위해 WDM 기술이 사용되고 있는데 [3, 4, 5], WDM 기술의 장점을 ROF 시스템에 접목함으로써, 시스템 정보전송 용량 증가, 보안성 향상, 및 확장성 확보의 장점을 갖는 WDM-ROF 기술에 관한 연구결과들이 보고되고 있다 [6, 7].

단일 파장의 레이저 다이오드 (LD: laser diode)를 사용하여 광양측파대 (optical double sideband) 변조를 수행하는 ROF 시스템에서 분산(dispersion)에 의한 고주파 신호의 수신파위가 주기적으로 사라지는 현상이 나타나게 되는데 [8], 이렇게 여러 파장의 레이저 다이오드들을 사용하는 WDM-ROF 시스템에서는 이러한 문제가 심화될 수 있으므로, 이에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 이러한 WDM-ROF시스템에서 파장에 따른 고주파 신호의 파워 변화 특성을 분석하고, 이를 개선하기 위한 방법으로서 광결정 광섬유 (PCF: photonic crystal fiber)를 삽입하고 고주파 신호의 파워 특성을 분석한다. 이를 위해 설계된 PCF의 분산특성을 기술하고, 이를 WDM-ROF 시스템에 적용했을 경우 개선된 고주파 신호 전송특성을 분석한다. 이론적 분석을 통해, 제안된 방식이 WDM-ROF 시스템의 고주파 전송특성 개선에 기여하였음을 확인할 수 있다.

II. WDM-ROF 시스템 구조

WDM 구조에 기반한 ROF시스템은 시스템의 전송 데이터량 증가 뿐만 아니라, 중앙기지국에 연결가능한 원격노드의 수를 증가시킴으로써 수용가능한 가입자 수를 증가시킬 수 있게 된다. 그림 1은 WDM-ROF시스템의 구조를 나타낸다. 그림에서 WDM-ROF OLT는 중앙기지국을 나타내며, WDM-ROF ONU는 원격노드를 나타낸다.

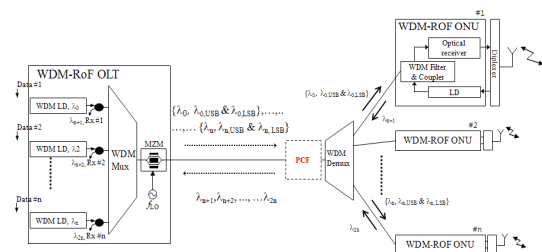


그림 1. WDM-ROF시스템의 구조. OLT: optical line termination, ONU: optical network unit, LD: laser diode, Rx: receiver, MZM: Mach-Zehnder modulator, LO: local oscillator.

Fig. 1. Structure of a WDM-ROF system.

III. 고주파신호 전송특성 분석

중앙기지국의 레이저 다이오드에서 생성된 빛은 각각의 파장별로 할당된 기저대역 데이터 (baseband data)를 변조하여 파장분할 다중화장치 (WDM)로 보내며, 이러한 광신호들은 다음 단계에 위치한 광외부변조기를 통하여 ROF 시스템에 적합하도록 높은 주파수 대역으로 주파수이동이 이루어지게 된다. 이러한 ROF시스템이 WDM기술을 도입함에 따라 다수의 레이저 다이오드들은 ITU-T에서 제시하는 WDM 파장 기준에 적합하도록 파장이 선택되어 WDM광원을 구성하게 된다 [3, 4]. 이렇게 ROF신호로 변조된 WDM-ROF 광신호는 광섬유의 장거리 전송특성을 활용하여 수십 km 이상의 장거리를 광증폭기 없이 전송될 수 있으며, 전송된 WDM-ROF 광신호는 원격노드 측에 위치한 WDM DEMUX에서 WDM 파장할당에 따라 미리 정의된 원격노드로 전송된

후, 광검출기에서 광혼합(optical mixing)에 의해 반송파용 고주파신호와 기저대역 데이터를 복원하게 된다. 이후, 적합한 주파수와 대역폭을 갖는 전기 필터를 통해 두 신호를 분리하여 사용하게 된다.

중앙기지국 측의 WDM 레이저 다이오드로 상향 광신호가 수신되면 안 되므로, WDM MUX 앞단에 광회전기(optical circulator)를 사용거나 송신 레이저다이오드 직전에 광커플러를 사용하여 하향 신호를 광학적으로 분리한 후, WDM DEMUX를 통해 수신 데이터를 복원하게 된다.

고주파 신호의 전송특성(고주파 신호의 수신 파워)은 광신호의 파장 및 해당 파장에서의 분산값에 영향을 받으며, 이는 다음의 식(1)로 표현된다 [8].

$$P_{RF} \propto \cos^2 \left(\frac{\pi L D}{c} \lambda_c^2 f_{RF}^2 \right) \quad (1)$$

여기서 L 은 광섬유 길이, D 는 광섬유의 분산 파라미터, λ_c 는 신호를 전송하는 광신호의 파장, f_{RF} 는 광신호를 변조한 고주파 신호의 주파수를 의미하며, c 는 진공에서의 빛의 속도를 나타낸다.

다음의 식(2)는 정해진 파장에 대해서, 수신 고주파 신호의 파워가 사라지는 지점의 거리를 구하는 식이다.

$$L = \frac{Nc}{2D\lambda_c^2 f_{RF}^2}, \quad N = 1, 3, 5, \dots \quad (2)$$

식(2)로부터 WDM-ROF시스템의 고주파 신호 수신 파워는 각 WDM 채널의 사용 파장에 따라 달라질 수 있으므로, 파장에 따른 고주파 신호의 수신파워를 계산하기 위해 16개의 WDM 채널 파장과 SMF28 광섬유에서 각 파장에 상응하는 분산값에 대한 식을 사용한다 [9].

$$D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 단일모드 광섬유의 분산을 계산하여 표1에 정리하였다.

표 1. 단일모드 광섬유의 파장에 따른 분산.
Table 1. Dispersion for wavelengths for a standard single-mode optical fiber.

채널번호	파장 (nm)	분산(ps/(nm,km))
1	1542.94	16.68
2	1543.73	16.72
3	1544.53	16.76
4	1545.32	16.81
5	1546.12	16.86
6	1546.92	16.91
7	1547.72	16.95
8	1548.51	17.00
9	1549.32	17.04
10	1550.12	17.09
11	1550.92	17.13
12	1551.72	17.18
13	1552.52	17.22
14	1553.33	17.27
15	1554.13	17.32
16	1554.94	17.36

여기서 λ_0 는 영분산 파장을 의미하며, SMF28의 경우 1302 nm 에서 1322 nm 사이의 값을 가지며, S_0 는 영분산 기울기를 의미하고 0.092 ps/(nm²·km) 이하의 값을 갖는 것으로 나타나 있다 [9]. 위의 계산에서, λ_0 는 1310 nm로 가정하였고, S_0 는 0.09 ps/(nm²·km)로 가정하였다.

본 논문에서 분석하고자 하는 고주파 신호 수신파워는 최소 변화와 최대 변화의 차이가 전체 시스템 성능에 큰 영향을 미치므로, 위의 표에서 채널 1 (1542.94 nm)과 채널 16 (1554.94 nm)을 선택하여 원격노드에서 광혼합(optical mixing)을 통해 생성되는 고주파 신호의 파워를 계산하였다.

그림 2는 신호 전송거리에 따른 고주파 신호의 파워 변화를 나타낸 그림이다. 채널 1과 채널 16에 대한 그림으로써, 고주파 신호의 변화가 일치하지 않음을 확인할 수 있으며, 거리가 증가함에 따라 차이가 점점 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 특성이 광섬유의 분산에 따라 달라짐을 식(2)로부터 확인할 수 있다.

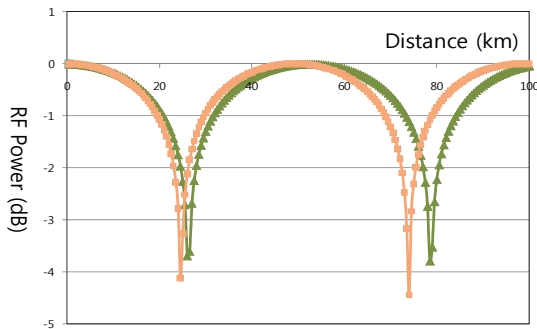


그림 2. 전송 거리에 따른 고주파 신호의 파워 변화.
(▲: 1542.94 nm, ■: 1556.55 nm).

Fig. 2. Power fluctuation of RF signal over transmission distance.

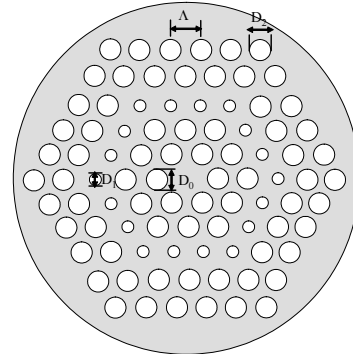


그림 3. 광결정 광섬유 구조.
Fig. 3. Structure of the photonic crystal fiber.

IV. 광결정 광섬유를 사용한 성능개선

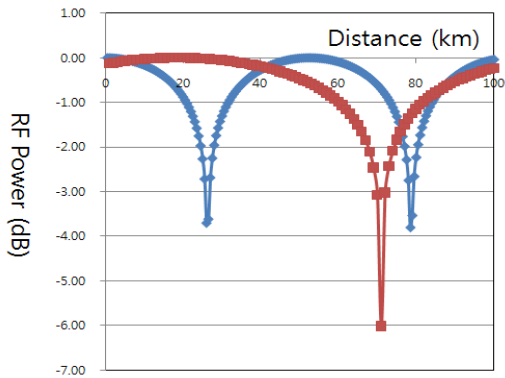
순수 실리카로 이루어진 코어와 공기구멍이 주기적으로 배열된 클래딩 구조를 갖는 광결정 광섬유가 가지는 독특한 광학적 특성에 대한 연구가 활발히 이루어져 오고 있다. [10, 11] 그 중에서도 특히 기존의 계단형 광섬유(step index fiber)가 갖지 못하는 분산 특성은 광결정 광섬유가 가지는 가장 매력적인 요소 중의 하나이다. 이러한 광결정 광섬유의 독특한 분산 특성 중에서도 통신용 파장대역인 1550 nm에서 큰 음의 분산값을 가짐으로써 단일 모드 광섬유의 누적 분산 값을 보상시킬 수 있다는 점이 광결정 광섬유의 중요한 특징 중 하나이며, 분산 보상 광섬유를 개발하기 위해 광결정 광섬유에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [12, 13].

본 논문에서 제안한 광결정 분산보상 광섬유 (그림 3)는 분산 보상 광섬유의 일반적인 구조인 이중 코어 광섬유를 서로 다른 크기의 공기구멍을 이용해 내부 코어와 외부 코어의 이중 코어를 구성하였다. 이중 코어를 가진 광섬유에서의 분산 특성은 내부 코어에서 전송되는 모드가 외부 코어의 전송모드로 결합되는 과정에서 음의 값을 갖게 된다. 세 개의 서로 다른 공기구멍의 직경을 D_0 , D_1 , 그리고 D_2 라 하고, 공기구멍 사이의 간격을 Λ 라 할 때, 광결정 광섬유의 분산 특성을 빔전파방법(Beam Propagation Method)을 이용하여 계산하였다. 이때, $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$, $D_0/\Lambda = 0.52$, $D_1/\Lambda = 0.38$, 그리고, $D_2/\Lambda = 0.55$ 이다.

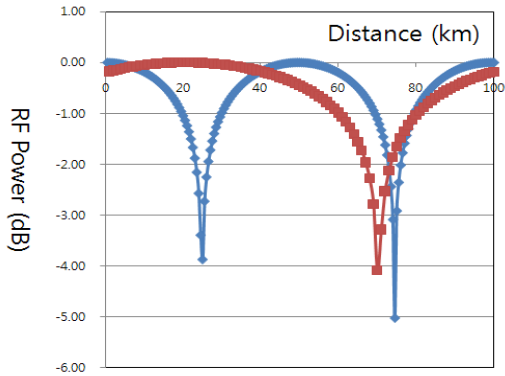
광결정 광섬유를 WDM-ROF에 사용하여 고주파 신호 전송 특성이 개선됨을 확인하기 위하여, 표1에서 제시된 16개의 WDM 채널 파장과 광결정 광섬유를 사용했을 경우, 해당 채널의 파장에 해당하는 분산값을 계산하여 표2에 정리하였다. 표2의 분산값은 참고문헌[14]의 방법으로 계산하였다.

표 2. 광결정 광섬유의 파장에 따른 분산.
Table 2. Dispersion over wavelengths for the photonic crystal fiber.

채널번호	파장 (nm)	분산(ps/(nm,km))
1	1542.94	-77.10
2	1543.73	-78.25
3	1544.53	-79.06
4	1545.32	-79.86
5	1546.12	-80.68
6	1546.92	-81.49
7	1547.72	-82.31
8	1548.51	-83.10
9	1549.32	-83.93
10	1550.12	-84.74
11	1550.92	-85.56
12	1551.72	-86.37
13	1552.52	-87.18
14	1553.33	-88.00
15	1554.13	-88.90
16	1554.94	-89.64



(a)



(b)

그림 4. 광결정 광섬유를 사용한 WDM-ROF시스템의 전송거리에 따른 고주파 신호 수신 파워의 변화 (◆: 단일모드 광섬유, ■: 단일모드 광섬유 + 광결정 광섬유). (a) Channel 1 (1542.94nm) (b) Channel 16 (1554.94 nm)

Fig. 4. Power fluctuation of RF signal over transmission distance in the WDM-ROF system employing a photonic crystal fiber.

그림 4는 광결정 광섬유를 사용한 WDM-ROF시스템의 고주파 신호 파워의 변화를 보여주는 결과이다. 그림 4(a)는 채널 1(1542.94 nm)에 대해 단일모드 광섬유만을 통한 전송(◆)의 경우와 단일모드 광섬유 끝단에 광결정 광섬유를 사용하여 전송한 경우(■)를 비교하여 보여주는 그림이다. 그림 4(b)는 채널 16 (1554.94 nm)의 경우에 대한 비교 결과이다. 양쪽 모두 광결정 광섬유를 사용함으로써 고주파 신호의 광파워 변화 지점을 크게 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 광결정 광섬유를 사용함으로써 WDM-ROF시스템의 WDM 채널들의 고주파 신호 파워변화를 감소시킴으로써, 보다 자유로운 WDM-ROF 시스템 설계가 가능함을 보일 수 있었다. 또한, 기존의 분산보상 방법은 특정 파장에 해당되는 광신호의 분산을 보상하기 위한 방법들이지만, 본 연구결과를 통해 WDM-ROF 시스템에 있어 여러 파장에 걸쳐 있는 광신호의 분산특성에 대해, 파장 간 분산에 따른 고주파신호의 파워 변화 차이를 감소시키기 위해 PCF를 사용하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다. 향후 시스템 성능을 나타내는 다양한 변수들에 대한 분석 및 시뮬레이션을 통해 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

V. 결 론

WDM-ROF시스템에 광결정 광섬유를 사용함으로써 고주파신호 전송특성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 기존의 단일모드 광섬유를 사용한 WDM-ROF 시스템은, 각 WDM 채널의 파장에 따른 고주파신호 전송특성에 편차가 생기게 된다. 이 경우, 사용한 파장의 범위에 따라, 원격노드에서의 고주파 신호 특성이 달라짐으로써 전체 시스템 성능에 영향을 주는 문제점을 개선하기 위한 방안으로써 광결정 광섬유의 분산보상 특성을 이용하여, 다수의 WDM 채널에 따른 고주파 전송특성이 동시에 개선됨을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구 결과(KRF-2007-313-D00551)로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] R.A. Griffin, H.M. Salgado, P.M. Lane, J.J. O'Reilly, "System capacity for millimeter-wave radio-over-fiber distribution employing an optically supported PLL," J. Lightwave Technology, vol. 17, no. 12, pp. 2480-2487, 1999.

[2] B. Wilson, Z. Ghassemlooy, I. Darwazeh, Analogue optical fibre communications, London, U.K.: IEE, 1995.

[3] A. K. Dutta, N. K. Dutta, M. Fukiwara, WDM Technologies: Passive Optical Components, San Diego, USA:Academic Press, 2003.

[4] ITU-T Recommendation G.694.1 (2002), Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.

[5] I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner, Optical Fiber Telecommunications V, Burlington, USA:Academic Press, 2008.

[6] H. Toda, T. Nakasyotani, T. Kuri, K.-I. Kitayama, "WDM mm-wave-band radio-on-fiber system using single supercontinuum light source in cooperation with photonic up-conversion," International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2004), pp. 161-164, Oct 2004.

[7] Z. Cao, J. Yu, H. Zhou, W. Wang, M. Xia, J. Wang, Q. Tang, L. Chen, "WDM-RoF-PON Architecture for Flexible Wireless and Wireline Layout," J. Opt. Commun. Netw. vol. 2, pp. 117-121, 2010.

[8] G. H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed, "Overcoming Chromatic-Dispersion Effects in Fiber-Wireless Systems Incorporating External Modulators," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 45, no. 8, pp. 1410-1415, 1997.

[9] Corning, "Corining SMF-28 Optical Fiber: Product Information," PI1036, April 2002.

[10] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. Russell, and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," Opt. Lett., vol. 21, no. 19, pp. 1547-1549, 2006.

[11] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell,

"Endlessly single-mode photonic crystal fiber," Opt. Lett., vol. 22, no. 13, pp. 961-963, 1997.

[12] F. Gerome, J. Auguste, and J. Blondy, "Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber," Opt. Lett., vol. 29, no. 23, pp. 2725-2727, 2004.

[13] Soan Kim, Chul-Sik Kee, "Dispersion properties of dual-core photonic quasicrystal fiber," Opt. Express, vol. 17, no. 18, pp. 15885-15890, 2009.

[14] S. Kim and C.-K. Kee, "Dispersion properties of dual-core photonic-quasicrystal fiber," Opt. Express, vol. 17, no. 18, pp. 15885-15890, 2009.

저자소개



김소은(Soan Kim)

1997년 전남대학교 물리학과 (이학사)
2001년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 (공학석사)

2006년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 (공학박사)
2006년 ~ 2007년 광주과학기술원 고등광기술연구소(APRI) 박사후연구과정
2007년 ~ 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소(APRI) 선임연구원
※ 관심분야: 광섬유소자, 광통신시스템



박철수(Chul Soo Park)

1997년 광운대학교 전자재료공학과 (공학사)
1999년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 (공학석사)

2006년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 (공학박사)
2006년 ~ 현재 Institute for Infocomm Research Postdoctoral Research Staff
※ 관심분야: 광통신시스템, 광통신소자



이충규(Chung Ghiu Lee)

1997년 한국과학기술원(KAIST)
전기 및 전자공학과(공학사)
1999년 광주과학기술원(GIST)
정보통신공학과 (공학석사)

2003년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과
(공학박사)

2004년 ~ 2006년 한국광기술원(KOPTI) 연구원,
선임연구원

2006년 ~ 2008년 조선대학교 전자공학과 전임강사

2008년 ~ 현재 조선대학교 전자공학과 조교수

※ 관심분야: 광통신시스템, 광통신소자