

# 수 10 Gbit/s 모바일 프론트홀 링크에서 색분산에 의한 OFDM 신호 전송성능 열화 분석

## Degradation of OFDM Signal Performance by Chromatic Dispersion in a Several 10 Gbit/s Mobile Front-haul Link

원용욱\*, 서동선\*\*

Yong-Yuk Won\*, Dongsun Seo\*\*

### Abstract

In this paper, an inter-orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) sub-carrier distortion due to fiber chromatic dispersion is investigated. The fiber chromatic dispersion induces phase difference among OFDM sub-carriers, resulting in non-symmetric peak to average power ratio (PAPR) inducing inter-OFDM distortion. Experiments to confirm the fiber dispersion are performed in a direct-detection optical front-haul link. Quadrature phase shift keying (QPSK) encoded OFDM symbols at 25 Gbit/s are transmitted over 100 km fiber and the resulting error vector magnitude (EVM) of 40 % is observed.

### 요 약

본 논문에서는 광섬유 분산에 의한 직교 주파수 분할 다중방식(OFDM: orthogonal frequency division multiplexing)의 부 반송파 신호왜곡에 대해 조사하였다. 광섬유 색 분산은 OFDM 신호 간의 위상차를 발생시키고, 이는 OFDM 신호 왜곡을 유기하는 비대칭 첨두전력대 평균전력 비율을 유기한다. 광섬유 분산의 영향을 확인하기 위한 실험은 직접검출 광 모바일 프론트홀 시스템에서 수행하였다. 4 Gbit/s의 QPSK-OFDM 심볼의 경우, 100 km 전송에서 EVM이 40 %에 도달함을 확인하였다.

*Key words : dispersion, mobile front-haul, orthogonal frequency division multiplexing, peak to average power ratio, quadrature amplitude modulation*

### 1. 서론

\* Dept. of Electronics Engineering, Myongji University

★ Corresponding author ([sdsphoto@mju.ac.kr](mailto:sdsphoto@mju.ac.kr), +82-31-330-6369)

※ This research was partly supported by the ICT program of MSIP/IITP, Republic of Korea (#B0101-15-1347) and was partly supported by the 2014 research fund of Myongji University.

Manuscript received Feb 6, 2016; revised Feb 22, 2016; accepted Feb 22, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Beyond 4G 또는 5G 모바일 서비스를 지원하기 위한 모바일 프론트홀 시스템 관련해서, 국내외 전문가들이 다양하게 기술적 및 서비스적 전망을 내놓고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나, 그들간의 공통적인 기술적 요소는 전송속도가 지금의 CPRI(common public radio interface)기반 모바일 프론트홀 시스템보다 훨씬 증가할 것이라는 점에서는 이견이 없는 것으로 판단된다. 일반적으로, 비제로 복귀 신호(NRZ: non-return to zero)형태의 데이터 및 멀티 변조된 디지털 신호를 20km 광전송시, 최대 25Gbit/s 전송속도 까지는 색분산으로 인한 전송 성능의 열화가 발생하지 않는 것으로 알려져 있

다. 5G 모바일 서비스를 위한 밀리미터파 전송을 위해서 아날로그 광전송기술(RoF: radio over fiber)이 유력하게 검토되고 있는데, 아날로그 광전송의 경우, 직교 주파수 분할 다중방식(OFDM: orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 디지털로 변환하는 과정이 필요없기 때문에, 채널 대역폭을 절약할 수 있게 된다<sup>[2-5]</sup>. 이러한 OFDM 신호를 아날로그 형태로 전송하는 경우에, 색분산 효과가 디지털과는 다른 형태로 영향을 미치게 된다. OFDM 부반송파(subcarrier)가 광전송되는 과정에서, 색분산(chromatic dispersion) 효과는 각각의 OFDM subcarrier들에 대해 시간지연을 일으키게 된다. 이로 인해, 광변조된 OFDM subcarrier들은 광신호 특성상, 음(-)이 아닌 양(+의 특성을 가지기 때문에 최대 전력대 평균전력의 비(PAPR: peak to average power ratio)가 상향으로만 증가하는 결과를 낳게 된다. 이것은 OFDM 신호가 광수신되는 과정에서 왜곡이 발생하게 되며, 전송능력의 열화를 가져오게 된다. 본 논문에서는 색분산 효과가 OFDM 신호에 미치는 영향을 이론적으로 설명하고, 직교 위상 천이 변조(QPSK: quadrature phase shift keying) 심볼을 인코딩한 OFDM 신호의 전송속도 및 전송거리에 따른 오류 벡터크기(EVM: error vector magnitude) 변화를 소규모 광링크를 실험적으로 구현하여 측정된 결과를 제시하였다.

## II. 색분산에 의한 QPSK 인코딩된 OFDM 신호 전송능력 열화

그림 1은 최대 25Gbit/s 전송속도를 지원하는 모바일 프론트홀 광전송 링크 구조를 보여주고 있다. 바이너리 입력신호는 멀티 변조과정을 거친 후, OFDM 부반송파에 할당되어 광변조기에 의해 광변조되게 된다. 광 OFDM 변조과정에 의해 변조된 광신호는 20km 광전송 후에, 광수신단에서 OFDM 복조 및 멀티 복조과정을 거치면서 바이너리 출력신호로 변환되게 된다. 여기에서, 광변조 및 수신기법은 10Gbit/s 이하인 경우에, 레이저 다이오드와 포토 다이오드만을 이용하여 직접변조 및 직접 수신하는 과정을 선택할 수 있고, 전송속도가 25Gbit/s인 경우에, 레이저 다이오드, 외부 광변조기, 포토다이오드를 이용하여

구현가능하다. 위에서 언급한 두 종류의 변조 및 수신과정 모두 코히어런트 방식이 아닌 직접 수신하는 방식을 선택하게 된다. 이것은 모바일 프론트홀 광링크 시스템의 경제성을 고려할 때, 장거리 광전송 시스템처럼 고가의 광부품을 사용하기 어렵기 때문에, 직접 및 외부 광변조 및 직접 수신 및 복원하는 기술을 적용할 가능성이 높다. 단일 포토 다이오드만을 이용하여, 모바일 프론트홀 광링크 광수신 모듈을 구현하는 경우에, 전송속도가 10Gbit/s 이상 증가하게 되면서, 전송 거리에 따른 색분산에 의한 영향을 받을 가능성이 높아지게 된다.

광 OFDM 신호가 색분산의 영향을 받는 물리적 과정은 아래와 같이 정리해 볼 수 있다. 광 OFDM 신호,  $a(t)$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} a(t) &= c(t)\cos(2\pi f_{oc}t + \theta_{oc}(t)) \quad (1) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t)\sin(2\pi f_n t)\cos(2\pi f_{oc}t + \theta_{oc}(t)) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) \left[ \sin\{2\pi(f_n + f_{oc})t + \theta_{oc}(t)\} \right. \\ &\quad \left. + \sin\{2\pi(f_n - f_{oc})t - \theta_{oc}(t)\} \right] \end{aligned}$$

여기에서,  $f_{oc}$ 는 광신호의 주파수를 의미하며,  $\theta_{oc}(t)$ 는 시간에 따른 광신호의 위상 변화를 의미한다.  $S_n(t)$ 는 멀티 변조로 인코딩된 신호 심볼을 의미한다. 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이, 광 OFDM신호의 주파수는 일정 주기의 sinusoidal 함수들과 광캐리어 주파수의 합 또는 차를 갖는, 멀티 합성과 형태의 함수로 표현할 수 있다. 이러한 멀티 합성과 형태의 광 OFDM 신호가 단일 모드 광파이버를 기반으로 광전송되는 과정에서 색분산의 영향을 받게 된다. 색분산의 영향으로 발생하는 시간지연 (time delay)을  $\alpha_n, \beta_n$  이라고 할 경우에, 색분산의 영향을 받은 광 OFDM 신호,  $b(t)$ 는 식(2)처럼 표현할 수 있다.

$$b(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) \left[ \sin\{2\pi(f_n + f_{oc})t + \theta_{oc}(t) + \alpha_n\} \right. \quad (2) \\ \left. + \sin\{2\pi(f_n - f_{oc})t - \theta_{oc}(t) + \beta_n\} \right]$$

여기에서  $\alpha_n$ 과  $\beta_n$ 은 색분산 영향을 받은 후, 각각의 광 OFDM 부반송파 신호가 시간영역에서 발생한 시간지연 값을 의미한다. 식(2)에서 보여지는 것처럼, 각각의 sinusoidal 함수의 주기가 변화된다는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

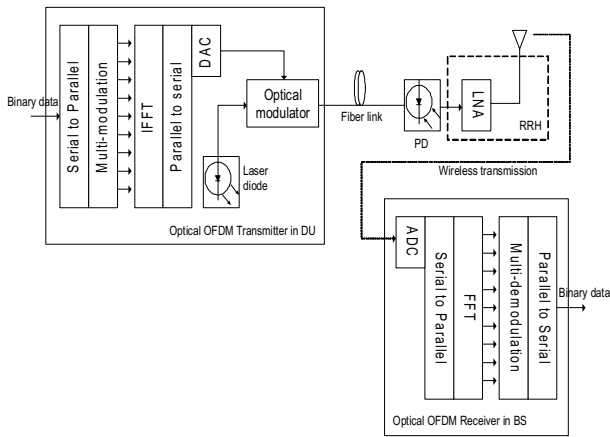


Fig. 1. Scheme for a fast optical OFDM signal transmission system in a mobile front-haul link  
 그림 1. 모바일 프론트홀 기반 고속 광 OFDM 신호 전송 시스템 구조

그림 2는 단일모드 광파이버(SSMF: standard single mode fiber)를 통한 광전송후, 색분산의 영향으로 광 OFDM 부반송파 신호들의 주기가 변화되는 과정을 보여주고 있다. OFDM 신호가 광변조되면서 광 OFDM 신호는 특성상 모두 양 (+)의 값들을 가지게 된다. 따라서, 광 OFDM 부반송파 함수들이 중첩되면서 위쪽으로만 PAPR 값이 증가되는 비대칭적인 광 OFDM 파형이 발생하게 된다. 다시 말하면, 색분산후, 광 OFDM 신호는 왜곡현상이 발생하게 된다. 이러한 왜곡 현상은 OFDM신호 기반 모바일 프론트홀 전송 시스템에서 성능열화의 주요 요인이 될 가능성이 높게 된다. 3절에서는 해당 절에서 언급한 색분산의 영향을 이론적으로 검증하기 위해서 소규모의 프론트홀 광링크를 구현하여 측정된, 다양한 실험 결과를 제시하고 분석하였다.

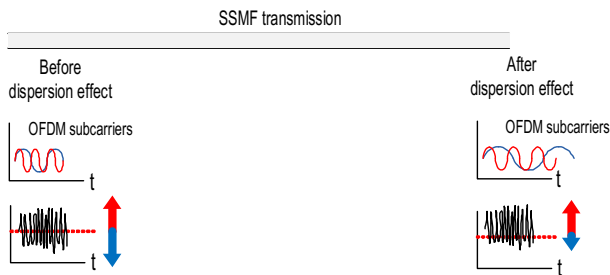


Fig. 2. Conceptual diagram showing OFDM signal distortion by chromatic dispersion in optical transmission  
 그림 2. 광전송과정에서 발생하는 색분산 효과로 광 OFDM 신호 왜곡 발생 과정 개념도

### III 실험결과 및 분석

Table 1. Experimental parameters used in the front-haul optical link test-bed

표 1. 프론트홀 광링크 테스트베드에 사용한 전기 및 광소자 동작 파라미터

Parameters	Value	Unit
10Gbps Single MZM $V_{\pi/2}$	6.32	voltage
DMT(baseband OFDM) signal	16	Gsample/s
OFDM subcarrier	256	개
Modulation format	QPSK, 16QAM	
Wavelength of DFB-laser	1550.01	nm
EDFA optical gain	25	dB
Received optical power @10GHz PD	-8	dBm
Channel bandwidth	4	GHz
LNA gain	20	dB@4.5GHz

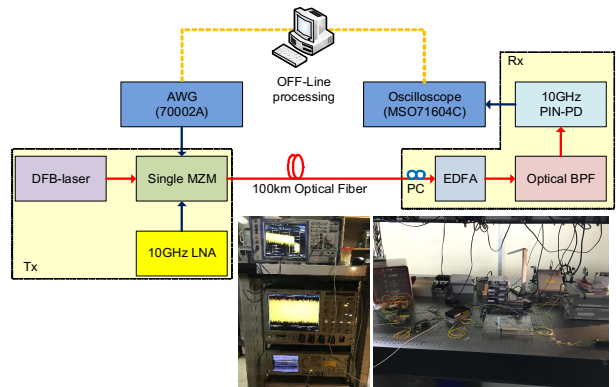


Fig. 3. Front-haul optical link test-bed to examine the effect of fiber chromatic dispersion at multi-level modulation/demodulation

그림 3. 다 준위 변복조 관련 색분산 영향을 검증하기 위한 프론트홀 광링크 테스트 베드 구조

색분산의 영향을 분석하기 위한 소규모 프론트홀 광링크 실험 환경은 표 1과 같다. 그림 3은 다 준위(multi-level) 변복조관련 전송능력 검증을 위한, 모바일 프론트홀 광링크 테스트베드 구조를 보여주고 있다. 그림 3의 광링크에서 색분산의 영향을 다각적으로 분석하기 위해서, 3가지 기준(멀티레벨 변조 방식, 전송속도, 전송거리)에 따라서 멀티 변조된 데이터 심볼의 EVM을 측정하고 분석을 수행하였다. 광 OFDM 신호를 수신

하는 광수신기(Optical receiver)에 입력되는 광전력은  $-8\text{dBm}$ 으로 고정하였다. 이러한 이유는 수신되는 광전력의 변화에 따라 광신호대 잡음비나 광신호 이득비가 달라지게 되므로 정확한 전송 성능 비교 및 분석을 수행하기 어렵기 때문이다.

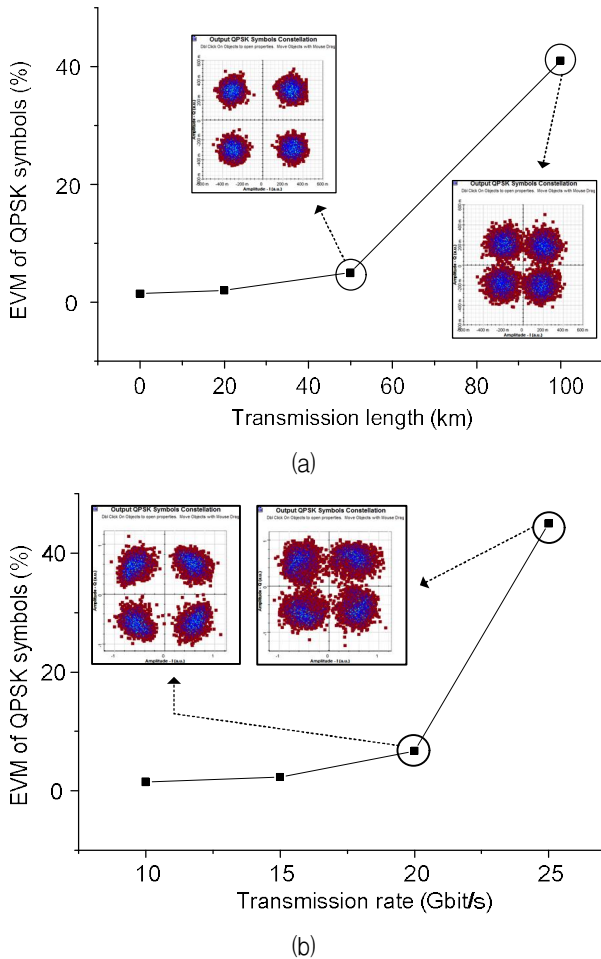


Fig. 4. EVM variations of QPSK symbols, depending on (a) transmission distance and (b) transmission speed

그림 4. (a)전송거리 및 (b)전송속도 변화에 따른 QPSK 심볼의 EVM 변화

그림 4(a)는 전송거리, 그림 4(b)는 전송속도 변화에 따른 QPSK심볼의 EVM 변화를 보여주고 있다. 그림 4에서 보여지는 것처럼, 전송거리가 100km, 전송속도가 25Gbit/s에서는 QPSK 심볼의 EVM이 40%를 초과함을 알 수 있다. QPSK의 경우, 에러 정정 코드를 이용하여 에러를 복원할 수 있는 최소 EVM 한계값이 32%로 알려져 있으므로, 색분산 효과를 보상하는 기법

을 적용하지 않으면, 전송거리 및 전송속도 측면에서 한계가 존재함을 말해주고 있다. 이러한 EVM 열화 원인은 색분산 효과가 전송속도 및 전송거리가 증가함에 따라 광 OFDM 파형의 PAPR을 비대칭적으로 변화시키는 정도가 극심해지게 되면서 파형의 왜곡을 수반하기 때문이다.

#### IV 결론

본 논문에서는 10 Gbit/s 이상의 전송속도를 보여주는 모바일 프론트홀 시스템에서 OFDM 신호를 아날로그 형태로 전송하는 경우에 색분산 효과가 전송성능에 미치는 영향을 분석하였다. QPSK심볼의 경우, 색분산 효과로 인해, 전송거리가 100km, 전송속도가 25 Gbit/s에서는 QPSK 심볼의 EVM이 40%를 초과함을 확인하였다. 이는 밀리미터파를 위한 아날로그 광전송시 모바일 프론트홀 시스템의 전송성능 관련하여, 색분산 효과로 인한 성능열화 보상기법 연구가 요구됨을 의미한다.

#### References

- [1] J. Zhang, Y. Jianjun, F. Li, X. Li, J. Xiao, and G.-K. Chang, "Demonstration of 24-Gb/s carrier-less amplitude and phase modulation (CAP) 64QAM radio-over-fiber system over 40-GHz Mm-wave fiber-wireless transmission," in Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (San Francisco, 2014), 1-3 (2014).
- [2] C. Lei, M. Chen, H. Chen, S. Yang, Y. Yu, and S. Xie, "1-Tb/s WDM-OFDM-PON System With Subband Access Scheme and Flexible Subcarrier-Level Bandwidth Allocation," IEEE Photonics Journal, 5, 7900208 (2013).
- [3] T. Takahara, T. Tanaka, M. Nishihara, Y. Kai, L. Li, Z. Tao, J. C. Rasmussen, "Discrete Multi-Tone for 100 Gb/s optical access networks," in Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (San Francisco, 2014), 1-3 (2014).

[4] Q. W. Zhang, E. Hugues-Salas, Y. Ling, H.B. Zhang, R.P. Giddings, M. Wang, and J.M. Tang, "17.125Gb/s over 25km transmissions of real-time dual-band optical OFDM signals modulated by 1GHz RSOAs," in Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (San Francisco, 2014), 1-3 (2014).

[5] J.-M. Joo, M.-K. Hong, D.-T. Pham, and S.-K. Han, "20-Gb/s AMO OFDM Transmission Over 20-km Bidirectional Link by Separate I/Q Baseband Delivery Using Remotely Fed 1-GHz RSOAs," J. Lightw. Technol., 30, 2661-2667 (2012).

## BIOGRAPHY

### Yong-Yuk Won (Member)



1997 : BS degree in Radio Engineering, Yonsei University.

1999 : MS degree in Radio Engineering, Yonsei University.

2008 : PhD degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

1999~2002 : Research Engineer, Samsung Electronics.

### Dongsun Seo (Life Member)



1980 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1985 : MS degree in Radio Engineering, Yonsei University.

1989 : PhD degree in Electrical Engineering, the University of New Mexico.

1980~1986 : Research Engineer, the Agency for Defense Development.

1986~1990 : Research staff member, the Center for High Technology Materials, the University of New Mexico.