

논문 2011-48SD-4-1

Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA를 위한 변형된 Modified Double Weight Code

(Reconstructed Modified Double Weight Codes for
Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA)

지 윤 규*

(Yoon Kyoo Jhee)

요 약

변형된 modified double weight code를 사용하여 효율적인 spectral-amplitude-coding optical CDMA를 구현하였다. 수신단의 optical decoder 앞에 fiber Bragg grating(FBG)을 사용하여 이 시스템의 주된 잡음인 phase-induced intensity noise(PIIN)를 대폭 줄여 향상된 시스템의 특성을 보일 수 있었다.

Abstract

A new code structure for spectral-amplitude-coding optical CDMA based upon reconstructed modified double weight codes is proposed. The newly proposed code possesses ideal cross-correlation properties. By using fiber Bragg grating(FBG) in front of optical decoder, we can get the improved performance of the proposed system with the consideration of phase-induced intensity noise(PIIN).

Keywords : reconstructed modified double weight code, phase-induced intensity noise, optical CDMA

I. 서 론

Optical code-division multiple access (OCDMA)는 엄격한 파장제어 없이 네트워크에 비동기적으로 접속할 수 있는 장점이 있다. 이상적인 spectral-amplitude-coding (SAC) OCDMA 시스템은 bandwidth $\Delta\nu$ 구간에서 균일한 unpolarized source spectrum을 가정한다. Broadband source 출력의 spectrum은 N개의 직사각형조각으로 나누어지고 사용자의 code에 따라서 amplitude masking된다. Address sequence로 사용하는 서로 다른 code sequence를 각각 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$

과 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 으로 가정할 때 in-phase cross correlation(CC)은 $\lambda = \theta_{XY} = \sum_{i=1}^N x_i y_i$ 로 정의된다. Code 길이가 N이고 weight가 w이고 in-phase CC가 λ 인 code는 (N, w, λ) 로 표시하고 $\lambda=1$ 인 경우는 일반적으로 구현할 수 있는 최소값이기 때문에 ideal in-phase CC라 일컫는다. 수신기에 입력되는 신호에는 필요한 정보와 더불어 불필요한 multiuser interference(MUI)가 공존하고 있어 이 MUI가 SAC OCDMA 시스템의 성능을 제한하는 주된 요소가 된다. 따라서 이를 제거하는 것이 SAC OCDMA 시스템의 구성에 필수적이다^[1-3]. SAC OCDMA 시스템에서 MUI는 사용자의 address sequence(code sequence)간의 in-phase CC 값에 의해 결정된다. 이 시스템에서 address sequence 간의 in-phase CC 값이 상수로 고정되고 address sequence

* 정회원, 이화여자대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Ewha Womans University)
접수일자: 2010년9월6일, 수정완료일: 2011년4월1일

의 weight가 모든 사용자에서 일정하면 balanced detection receiver 구조를 이용하여 MUI를 완전히 제거할 수 있다.

Balanced detection receiver 구조를 이용하여 MUI를 제거한 SAC OCDMA 시스템은 broadband source를 spectral encoding한 light field의 incoherency로 인하여 시스템 성능이 저하된다. 실제로 light source의 incoherency로부터 발생하는 phase-induced intensity noise(PIIN)가 SAC OCDMA 시스템의 성능을 제한하는 주된 요소가 된다. 따라서 SAC OCDMA 시스템에서는 PIIN을 줄이고 유연한 길이의 code를 구하는 것이 중요한 연구 방향이다.

본 논문에서는 modified double weight(MDW) code를 변형하여 “1”을 인접한 두 개로 유지하면서 “11” 사이의 “0”의 개수를 2 이상으로 증가시켜 fiber Bragg grating(FBG)의 요구 사항을 완화시키고 balanced receiver앞에 또 하나의 FBG를 사용하여 PIIN의 영향을 무시할 수 있을 정도로 줄이는 방법을 제안한다. .

II. 변형된 MDW Code와 PIIN의 최소화

1. 변형된 MDW Code의 구성

MDW code^[4]는 “11”사이에 “0”이 하나만 존재하는 경우가 발생하는데 code의 길이는 그대로 유지한 채로 “11”사이에 “0”이 두 개 이상 존재하도록 변형시켜 변형된 MDW code를 얻는다. 변형된 MDW code는 code weight가 2보다 큰 짝수로 구성할 수 있다. Code weight $w=4$ 인 경우를 예를 들어 $K \times N(3 \times 9)$ matrix를 아래 식과 같이 구성할 수 있다.

$$H_{m1} = \begin{bmatrix} 000 & 110 & 011 \\ 011 & 000 & 110 \\ 110 & 011 & 000 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 변형된 basic MDW code는 (9, 4, 1)로 나타낼 수 있으며 세 개의 row는 address sequence가 되며 세 code sequence간의 CC는 $\lambda=1$ 이 유지된다. 이 matrix에서 $K=3$ 개의 row는 최대 사용자 수가 되며 $N=9$ 개의 column은 minimum code length가 된다. 사용가능한 code 수를 증가시키기 위해서는 아래 식과 같이 변형된 basic MDW H_{m1} 을 mapping 시켜야 한다.

$$H_{m2} = \begin{bmatrix} 0 & H_{m1} \\ H_{m1} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위의 식의 결과를 이진수로 표시하면 아래 식이 된다.

$$\begin{bmatrix} 000 & 000 & 000 & 000 & 110 & 011 \\ 000 & 000 & 000 & 011 & 000 & 110 \\ 000 & 000 & 000 & 110 & 011 & 000 \\ 000 & 110 & 011 & 000 & 000 & 000 \\ 011 & 000 & 110 & 000 & 000 & 000 \\ 110 & 011 & 000 & 000 & 000 & 000 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위의 식에서 보듯이 최대 사용자 수 K 를 늘리기 위해서는 code length N 도 따라서 증가하게 된다. 이 경우 K 와 N 과의 관계식은 다음 식으로 주어진다.

$$N = \begin{cases} 3K+2, & \text{for } K=3n+2 \\ 3K & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

위의 식에서 n 은 자연수이므로 특별한 제한 없이 원하는 사용자 수를 갖는 시스템을 구현할 수 있다. 위와 같이 “1”이 짝을 이루고 “11”사이의 “0”이 두 개 이상으로 연속되면 encoder와 decoder에 사용하는 grating 수를 줄일 수 있다. 즉 연속된 “1”에 두 개의 grating을 사용하지 않고 chip bandwidth의 두 배가 되는 grating을 사용하여 시스템 구성을 쉽게 하고 아울러 비용도 절감할 수 있다.

2. 시스템 구성

SAC를 이용한 fiber-optic CDMA 네트워크는 일반적으로 그림 1과 같이 구성할 수 있다. N 개의 송신기가 star coupler를 통하여 서로 연결되어 있다. k 번째 사용자의 송신기는 광대역 incoherent optical source인 LED(light emitting diode)로부터 나오는 빛에 electro-optic modulator(EOM)를 이용하여 on-off keying 형태로 사용자의 정보를 실는다.

각 데이터에 해당하는 광신호는 FBG를 지나며

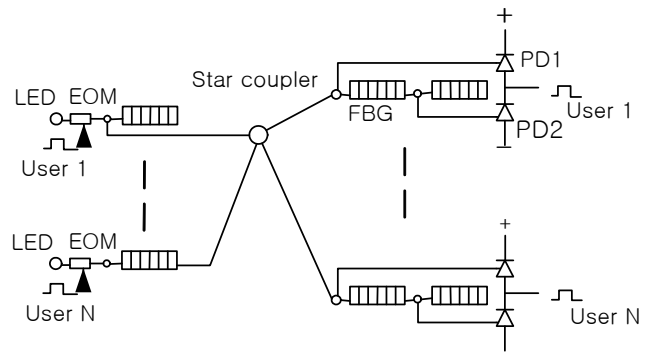


그림 1. Spectral-amplitude coding OCDMA 시스템
Fig. 1. Spectral-amplitude coding OCDMA system.

spectral slicing 형태로 encoding된다. FBG에서 반사된 spectrum은 사용자의 address code에 해당된다. $N \times N$ 의 passive star coupler는 이 시스템에서 local network 사용자를 연결하는 역할을 하므로 각 사용자의 송신기는 spectrum encoded 신호를 모든 수신기에 broadcast한 것이 된다. 따라서 수신된 신호 spectrum은 모든 사용자가 송신한 신호의 합이 된다. 수신기는 FBG로 구성된 optical correlator를 사용하여 수신된 전체 신호로부터 원하는 신호를 추출해 낸다. Correlator의 출력에는 원하는 신호와 원하지 않는 신호인 multiuser interference(MUI)가 혼재되어 있으므로 MUI를 없애기 위하여 orthogonal code를 사용한다.

본 논문에서는 orthogonal code로 변형된 MDW code를 사용하고 optical correlator인 FBG와 balanced receiver 앞에 그림 2와 같이 또 하나의 FBG를 삽입하여 수신단으로 사용한다. LED에서 나온 broadband optical pulse는 data가 “1”일 때는 specified spectral distribution($A(\nu)$)으로 encode되어 송신되고 data bit가 “0”일 때는 아무런 신호도 보내지지 않는다. 식 (3)의 code를 사용하는 경우를 예로 들면 수신단에서는 또 하나의 FBG가 세 사용자마다 하나씩 위치하여 “0”만으로 구성되어 있는 부분을 제거하고 “1”이 포함된 부분만 반사시키도록 구성하여 code length $N=9$ 인 code가 되어 balanced receiver로 보내진다. 따라서 다른 그룹에 속해있는 수신신호는 이 FBG에서 모두 차단되므로 PIIN가 줄어든다. 동일한 또 하나의 FBG에 속해있는 세 가입자가 동시에 수신하고 있는 경우를 가정하면 나머지 두 가입자 때문에 MUI가 발생하게 되는데 이를 $1:\alpha$ coupler와 balanced receiver를 이용하여 완전히

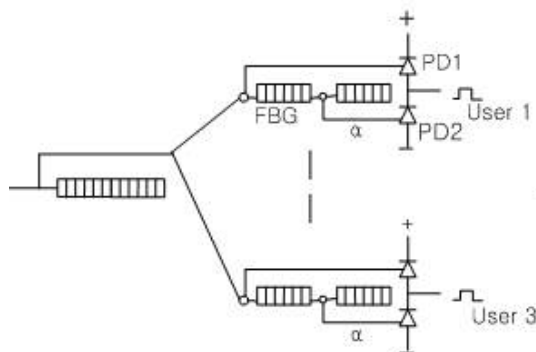


그림 2. Spectral-amplitude coding OCDMA 시스템의 수신단 구조

Fig. 2. Receiver structure of spectral-amplitude coding OCDMA system.

제거할 수 있다.

이 과정을 자세히 설명하면 또 하나의 FBG를 통과한 code들은 최대 $K=3$ 개가 된다. 이 중에서 원하지 않는 두 개는 MUI가 된다. Coupler의 splitting ratio를 나타내는 $\alpha = \lambda / (w - \lambda) = 1/3$ 로 상수 값이 된다. 변형된 MDW code는 $w=4$ 로 고정되어 있어 $\theta_{XY} = \lambda = 1$ 과 $\theta_{\bar{X}\bar{Y}} = w - \lambda = 3$ 로 유지된다. 따라서 first photodetector (PD1)로 입력되는 MUI는 $\lambda(K-1) = 2$ 이고 PD2로 입력되는 MUI는 $\alpha(w-\lambda)(K-1) = 2$ 로 동일하므로 balanced photodetection을 통하여 완전히 제거된다. 즉 $\theta_{XY} - \alpha\theta_{\bar{X}\bar{Y}} = \theta_{XY} - (\lambda / (w - \lambda))\theta_{\bar{X}\bar{Y}} = 0$ 이 된다.

이 시스템의 동작을 자세히 설명하기 위하여 수신기 1번이 (3)식의 첫 번째 code(첫 행)를 사용한 경우를 예로 든다. 수신기의 앞쪽에 위치한 또 하나의 FBG는 뒤의 9개만 반사시키므로 4, 5와 6번 code는 수신단으로 입력되지 않도록 차단되고 000110011, 011000110과 110011000 code만을 통과시킨다. 수신기 1번의 두 번째 FBG는 000110011 code의 1에 해당하는 파장을 반사시키고 0에 해당하는 파장은 통과시키며 세 번째 FBG는 서로 다른 파장 성분의 round-trip delay를 보상하기 위해서 필요하다. 사용자 1 번에게 신호를 보내기 위해서는 000110011 code를 사용해야 하므로 두 번째 FBG에서 4 단위의 신호가 반사되어 PD1(photodiode)에서 수신되며 PD2에 수신되는 신호는 없으므로 출력은 4 단위가 된다. 나머지 두 개의 code들은 사용자 1번에게는 모두 interference가 된다. 즉 011000110 code와 110011000 code들은 각각 수신기 1번의 두 번째 FBG에서 1 단위가 반사되어 PD1에 입력되고 3 단위씩 통과된 후에 1/3로 감쇠되어 PD2에 입력되므로 balanced detector 구조에서 서로 상쇄되어 수신되는 신호가 없어 MUI가 모두 제거되는 구조이다.

수신기 4번이 (3)식의 네 번째 code를 사용한 경우는 다른 그룹에 속해 있으므로 첫 번째 FBG가 앞의 9개만 반사시키도록 구성한다. 따라서 1, 2와 3번 code는 수신단으로 입력되지 않고 차단되며 4, 5와 6번 code의 앞부분인 000110011, 011000110과 110011000 code만을 통과시므로 역시 PIIN을 줄일 수 있다.

3. Phase-Induced Intensity Noise 분석

SAC OCDMA 시스템에서 MUI가 제거되면 주된 noise는 incoherent source가 mix되어 photodetector에 입사되면서 light field의 phase noise가 photodetector의

출력에서 intensity noise로 나타나는 phase-induced intensity noise(PIIN)가 된다. (N, w, λ) code를 사용한 SAC OCDMA 시스템에서 PIIN으로 인한 signal-to-noise ratio(SNR)을 구하면 다음 식이 된다^[3].

$$SNR = \frac{2(w-\lambda)\Delta\nu}{B\lambda K[K/2+(w-2\lambda/\lambda)]} \quad (5)$$

위의 식에서 B 는 수신기의 noise equivalent electrical bandwidth를 나타내고 K 는 동시 사용자 수를 나타내고 $\Delta\nu$ 는 optical bandwidth(Hz)를 나타낸다. 위의 식의 분모와 분자를 각각 λ 로 나누어 정리하면 다음 식이 된다.

$$SNR = \frac{2(w/\lambda-1)\Delta\nu}{BK[K/2+w/\lambda-2]} \quad (6)$$

위의 식은 $\Delta\nu$, K 와 B 가 주어지면 SNR은 단지 w/λ 로 나타난 code weight와 in-phase CC의 비에 의하여 결정된다.

본 논문의 수신단에서는 또 하나의 FBG를 통하여 decoder에 입력되므로 $\Delta\nu$ 대신에 또 하나의 FBG의 대역폭인 $\Delta\nu'$ 를 사용하고 이 FBG를 통과한 동시 사용자 수는 최대 3이므로 $K=3$ 을 사용한다. 이 시스템 전체의 최대 사용자 수가 60이라 가정하면 $\Delta\nu' = \Delta\nu/20$ 이 된다. Light source가 1550nm의 wavelength에서 동작하고 linewidth가 30nm이면 $\Delta\nu = 3.75$ THz가 되어 $\Delta\nu' = 187.5$ GHz이며 $B=311$ MHz (622 Mb/s)라 가정할 경우 SNR을 계산하면 다음 식과 같이 일정한 값을 갖는다.

$$SNR = \frac{12\Delta\nu'}{21B} \cong 344.5 \quad (7)$$

이 결과는 또 하나의 FBG를 사용하지 않고 사용자 수가 $n=60$ 인 경우에 구한^[4]

$$SNR = \frac{12\Delta\nu}{Bn(n+1)} \cong 39.5 \quad (8)$$

보다 훨씬 큰 값이 되어 매우 향상된 성능을 얻을 수 있음을 보여 준다.

Gaussian approximation의 경우 bit error rate(BER)는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR/8}) \quad (9)$$

본 논문의 변형된 MDW code를 이용한 경우 또 하나의 FBG를 사용함으로써 $P_e \cong 8.4 \times 10^{-21}$ 로 error를

무시할 수 있다. 이 값은 MDW의 경우 $P_e \cong 8.4 \times 10^{-4}$ 보다 훨씬 작은 값이 된다.

III. 결 론

본 논문에서는 변형된 modified double weight code를 사용하여 “11”사이에서 적어도 2개 이상의 “0”을 위치 시킴으로써 FBG의 요구사항을 완화 시킬 수 있었다. 또한 수신단의 optical decoder 앞에 또 하나의 FBG를 사용하여 SAC OCDMA 시스템의 주된 잡음인 PIIN을 아주 낮게 유지할 수 있게 하여 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] E. Smith, R. Blaikie and D. Taylor, “Performance Enhancement of Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Using Pulse-Position Modulation,” IEEE Trans. on Communications, Vol. 46, no. 9, pp. 1176-1185, Sep. 1998.
- [2] Z. Wei, H. Shalaby and H. Ghafouri-Shiraz, “Modified Quadratic Congruence Codes for Fiber Bragg-Grating-Based Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Systems,” J. of Lightwave Technology, Vol. 19, no. 9, pp. 1274-1281, Sep. 2001.
- [3] Z. Wei, and H. Ghafouri-Shiraz, “Codes for Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Systems,” J. of Lightwave Technology, Vol. 20, no. 8, pp. 1284-1291, Aug. 2002.
- [4] S. A. Aljunid, M. Ismail, A. R. Ramli, B. M. Ali, and M. K. Abdullah, “A New Family of Optical Code Sequences for Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Systems,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, no. 10, pp. 2383-2385, Oct. 2004.

저 자 소 개



지 윤 규(정회원)

1978년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.

1980년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.

1984년 The University of Texas
at Austin 전자공학과
박사 졸업.

<주관심분야 : 광통신, 광정보처리>