

# 전 광학적인 차동 검출 방법을 이용한 코히런트 시간 광 CDMA 시스템에서의 다중접근 간섭 제거

김선종<sup>†</sup> · 김태영 · 박철수 · 박창수

광주과학기술원 정보통신공학과  
Ⓣ500-712 광주광역시 북구 오룡동 1번지

(2004년 3월 11일 받음, 2004년 5월 24일 수정본 받음)

본 논문에서는 코히런트 시간 광 CDMA 시스템에서 발생하는 다중접근 간섭(MAI)을 제거하기 위한 전 광학적인 차동 검출 방법을 제안한다. 비선형 광학루프 거울(NOLM)은 두 제어 포트에 인가되는 광파워의 차를 출력으로 내 보내는 역할, 즉 전 광학적 차동 검출기로서 동작한다. 따라서, 같은 파형과 광 파워로 입력되는 MAI는 NOLM에서 차동 검출되어 제거된다. 실험을 위하여 두 개의 채널이 인코딩/디코딩 되었다. 디코딩된 신호는 NOLM의 두 제어 포트에 보내어지고, 출력단에서 MAI가 크게 제거된 반면, 높은 자기상관 피크를 가진 신호가 관측되었다. NOLM 통과 후, 신호-대-간섭 비는 7 dB만큼 개선되었다.

주제어 : optical CDMA, nonlinear optical loop mirror, multiple-access interference

## I. 서 론

높은 비확성과 시스템 융통성 때문에 최근 광 코드 분할 접속(CDMA:code-division-multiple access) 시스템에 대한 관심이 매우 높아지고 있는 추세이다.<sup>[1,2]</sup> 광 CDMA 시스템의 성능은 주로 타 채널에 의해 발생하는 다중접근 간섭(MAI:multiple-access interference)에 의해 악화되는 것으로 알려져 있다. 한편, 위상에 근거하여 인코딩과 디코딩을 수행하는 코히런트 광 CDMA 시스템은<sup>[3,4]</sup> 디코딩 후 상대적으로 높은 자기상관 피크와 적은 MAI를 갖지만, 채널 수가 증가함에 따라 MAI에 의한 성능악화는 피할 수 없다. 따라서, 이 MAI를 감소시키기 위해 time-gating 방법이 제안되었다.<sup>[5,6]</sup> 기존의 광 시분할 다중 시스템에서 채널을 역다중화시키기 위해 사용된 방법으로, 자기상관 피크와 같은 시간대에 존재하는 MAI 성분을 제거할 수 없는 단점이 있다. 다른 방법으로, balanced 광 검출기를 이용하는 방법이 있다. 광 검출기에 인가되는 두 신호의 차를 출력으로 내보내기 때문에, 두 입력 신호의 공통성분이 쉽게 제거 될 수 있다. 이러한 특성은 1-채널 코히런트 정합 디코딩 시스템에서 MAI를 감소시키기 위하여 이용되었다.<sup>[7,8]</sup> 이 시스템은 광섬유 지연선과 2×2 광학 커플러의 조합에 의해 이루어지기 때문에, ladder 네트워크로 불리운다. 디코더는 두 개의 출력 포트를 가지며, 인코더와 정확히 정합된 디코더가 사용될 때, 디코더의 두 출력 신호는 중앙의 칩 시간대에서 서로 다른 파형을 가진다. 반대로, 다

른 채널로 부터의 신호(즉, MAI)는 디코더 출력단에서 같은 파형으로 나타난다. 따라서, balanced 광 검출기를 통과하면서, 자기채널의 자기상관 피크는 손실 없이 검출되나, MAI 성분은 제거될 수 있다. 그러나, 이 시스템의 동작 속도는 광 검출기의 동작 속도에 의해 제한되며, 최근 빠르게 증가하고 있는 코드 속도를<sup>[5,6,9]</sup> 수용하기 위해서, 속도 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 전혀 새로운 방법에 대한 연구가 필요하게 되었다.

따라서, 본 논문에서는 코히런트 시간 광 CDMA 시스템에서 발생하는 MAI를 감소시키기 위한 방법으로, 두 제어 포트를 가진 비선형 광학루프 거울(DC-NOLM: dual-control nonlinear optical loop mirror)를 이용한 차동 검출 방법을 제안한다. 제안된 방법은 전 광학적이기 때문에, 근본적으로 속도 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 실험적인 증명을 위하여, 두 개의 채널이 인코딩 되었다. 디코딩된 신호는 DC-NOLM을 통과하면서 MAI가 크게 감소되었고, 결과적으로, 약 7 dB의 신호-대-간섭 비(SIR:signal-to-interference ratio) 개선 효과가 관측되었다.

## II. 동작원리

DC-NOLM은 50:50 광학 커플러, 비선형 매질로 동작하는 광학 루프, 그리고 루프에 제어 신호를 인가하기 위한 두 개의 WDM(wavelength-division multiplexer)으로 구성된다. DC-NOLM에 인가되는 probe 광파는 펄스가 아닌 연속적인 광파(CW:continuous wave)로서, 루프에서 두 개의 서로 다른

<sup>†</sup>E-mail: csp@gist.ac.kr

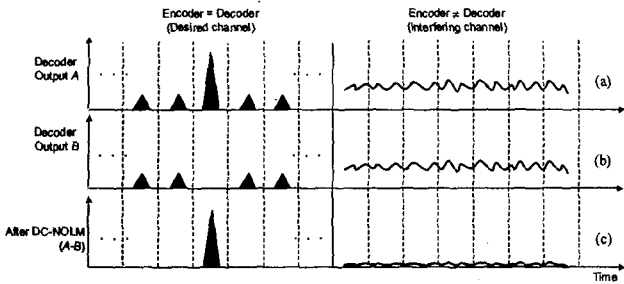


그림 1. 1-채널 코히런트 정합 디코딩 시스템에서 디코더의 두 출력 신호 (a)(b)와 DC-NOLM 통과 후의 probe 광파의 파형 (c).

방향으로 진행한다. 각 광파는 루프를 돌면서, WDM을 통해 인가된 제어신호에 의해 일정한 양의 위상천이를 겪게 된다. 따라서, 루프를 통과한 후, 두 probe 광파 사이에는 상대적인 위상차 ( $\Delta\phi(t)$ )가 존재하게 되는데, 이 위상차의 크기는 두 제어신호의 광 파워 차에 비례한다. 따라서, 같은 크기의 제어신호가 인가될 경우,  $\Delta\phi(t)$ 는 영이 된다. 결국,  $\Delta\phi(t)$ 가 DC-NOLM을 투과하는 probe 광 파워를 결정하게 된다.<sup>[10]</sup>

$$T_{out}(t) = \left(1 - \cos^2\left(\frac{\Delta\phi(t)}{2}\right)\right)$$

정리하면, DC-NOLM을 투과하는 probe 광파의 세기는 인가된 제어신호의 광 파워 차에 비례하여 증가한다. 제안된 방법에서는 디코더의 두 출력 광신호를 DC-NOLM의 두 제어 포트에 보냈다. 그림 1에 MAI가 감소되는 과정을 도식화하여 나타내었다. 먼저, ladder 디코더의 두 출력단에서 자기 채널의 신호는 중앙의 칩 시간대에서 서로 다른 파형을 가지는 반면, MAI가 입력된 경우, 정확히 같은 파형을 가진다(그림 1(a)(b)). 자기채널이 제어신호로 인가될 경우, DC-NOLM에서 출력되는 probe 광파의 세기는 디코더의 두 출력신호의 차에 비례하여 나타난다. 즉, 중앙 칩 시간대에서 한 쪽은 자기상관 피크를, 다른 쪽은 영의 광 파워를 가지고 있기 때문에 차동 검출기로 동작하는 DC-NOLM의 출력단에서는 오직 중앙 칩 시간대에서 probe 광 파워가 관측된다(그림 1(c)). 반면, MAI는 같은 크기와 파형을 가지고 제어신호로 인가되기 때문에, 두 probe 광파에 같은 양의 위상천이가 발생되어  $\Delta\phi(t)$ 은 영이 된다. 이 때 50:50 광 커플러에서 두 probe 광파는 서로 상쇄되어, DC-NOLM을 투과하는 광 파워는 존재하지 않게 된다.

결과적으로 DC-NOLM은 공통적으로 입력되는 파형을 투과시키지 않는, 전 광학적인 차동 검출기로서 동작한다.

### III. 실험 및 결과

실험은 그림 2와 같이 구성하여 수행되었다. 입력 광 펄스는 1552 nm에서 중심 파장을 갖는 레이저 다이오드(LD1)가 1.25 GHz의 반복률을 갖는 RF 신호 발생기에 의해 gain-

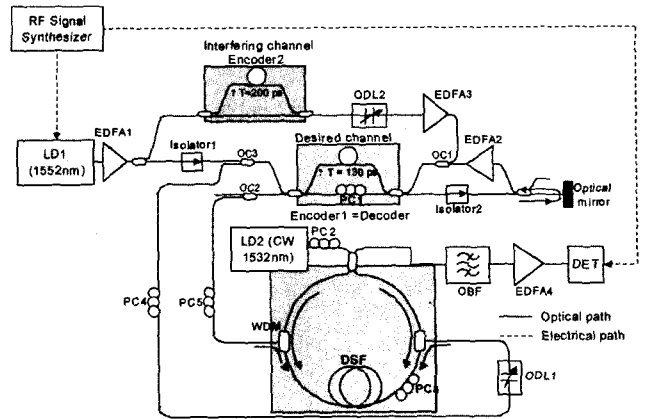


그림 2. 실험 구성도 LD: laser diode, PC: polarization controller, OC: optical coupler, DET: photodetector and sampling oscilloscope, WDM: 1532/1552 nm wavelength-division multiplexer, DSF: dispersion-shifted fiber, ODL: variable optical delay line, OBF: optical bandpass filter, EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

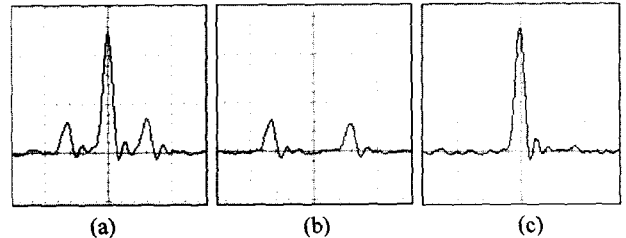


그림 3. 자기채널만 존재할 경우, DC-NOLM을 통과하기 전(a, b)과 후(c)의 시간 파형

switching되어 발생되었다. 발생된 광 펄스는 광섬유 증폭기(EDFA1)로 증폭되어지고, 광 파워가 분기되어 각각 130 ps와 200 ps의 1-단의 시간지연을 갖는 encoder1(자기채널)과 encoder2(간섭채널)로 보내어진다. 여기에서, 디코더가 자기 채널의 인코더에 대해 코히런트 정합 필터로 작용하기 위해서는 각 단의 시간지연이 입력 광파의 코히런트 시간(수 백 fs) 이내에서 인코더의 시간지연과 일치해야 하며, 광섬유의 온도변화에 의해 발생될 수 있는 두 코더간 위상차이가 보상되어야 한다. 이러한 문제는 위상 변화치를 능동적으로 보상 및 제어할 수 있는 전기적인 위상 잠금 회로를 디코더의 각 시간 지연단에 사용함으로써 해결되었다.<sup>[7,8]</sup> 따라서, 본 실험에서는 셋업의 복잡도를 피하기 위하여 encoder1가 자신의 디코더로 재 사용되도록 하였다. 즉, encoder1 다음 단에 광학 거울을 위치시켜, 인코딩된 광 펄스가 encoder1로 되돌아 오게 함으로써, 인코딩과 디코딩이 완전히 같은 물리적인 경로를 진행하도록 하였다. 따라서, 자기채널의 경우, 두 출력 포트(OC2, OC3)에서의 파형은 중앙의 칩 시간동안 상반 관계에 놓이게 된다. 1-단의 ladder 인코더/디코더에 대하여 상대적인 광 파워는 각각 (1,0,4,0,1)과 (1,0,0,0,1)로 계산된다. 한편, 간섭채널은 encoder2를 통하여 발생되며, OC1(optical

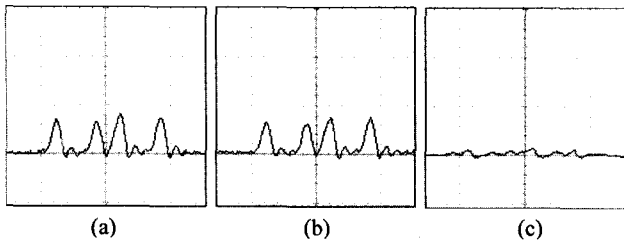


그림 4. 간섭채널만 존재할 경우, DC-NOLM을 통과하기 전(a, b)과 후(c)의 시간 파형.

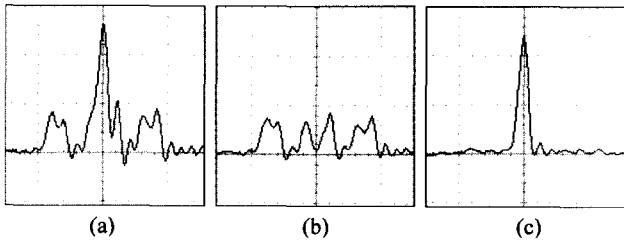


그림 5. 두 채널이 모두 존재할 경우, DC-NOLM을 통과하기 전(a, b)과 후(c)의 시간 파형.

coupler)을 통해 자기채널과 광 커플링된다. 디코더의 두 출력 단에서 간섭채널은 같은 파형을 가지며, 순간적인 피크 없이 시간적으로 분산된다. CW probe 광파는 1532 nm 중심 파장을 갖는 LD2로부터 발생된다.

DC-NOLM을 통과하기 전과 후의 측정된 시간 파형은 그림 3-5와 같다. 그림 3은 자기채널만 존재하는 경우를 나타낸다. 예상대로, 디코더의 두 출력 포트에서 중앙 칩 시간동안 각각 자기상관 피크와 영의 광 파워가 관측되었다. DC-NOLM 통과 후, side lobe 없이 자기상관 피크만 관측되었다. Side lobe 성분은 DC-NOLM을 통과하면서 차동 검출되어 제거되었다. 그림 4는 자기채널 없이 간섭채널만 존재하는 경우의 측정 결과를 나타낸다. 디코더의 시간 지연(130-ps)이 간섭채널의 시간 지연(200-ps)과 정합되지 않았기 때문에 디코더의 두 출력단에서 같은 파형이 관측되었다(그림 4 (a)(b)). 이 신호에 대해 DC-NOLM은 차동 검출기로서 동작하여, 출력 광 파워가 크게 감소되었다(그림 4(c)). 그림 5는 두 채널이 동시에 존재하는 경우의 측정 결과를 나타낸다. DC-NOLM을 통과하기 전, 간섭채널의 피크 광 파워는 자기채널의 자기상관 피크의 1/4이었다. 여기서 SIR을  $10\log_{10}(I_s/I_i)$ 로 정의하면(여기에서  $I_s$ 와  $I_i$ 는 디코딩 후 각각 자기채널과 간섭채널의 피크 광 파워임), DC-NOLM 통과 전의 SIR은 6 dB로 계산된다. DC-NOLM을 통과한 후, MAI와 side lobe 성분들이 크게 감소하면서, SIR은 13 dB까지 향상되어, 약 7 dB의 SIR개선이 관측되었다.

지금까지의 실험은 간섭채널로 부터의 광 파워가 자기채널의 자기상관 피크와 정확히 겹쳐지지 않은 경우에 한정된 것이다. 그러나, 실제 시스템에서는 보다 많은 채널이 비동기 상태로 동시에 전송되므로, 간섭채널로부터의 파워는 비트 시간의 어떤 시간 위치에도 존재할 수 있게 된다. 따라서, 이러

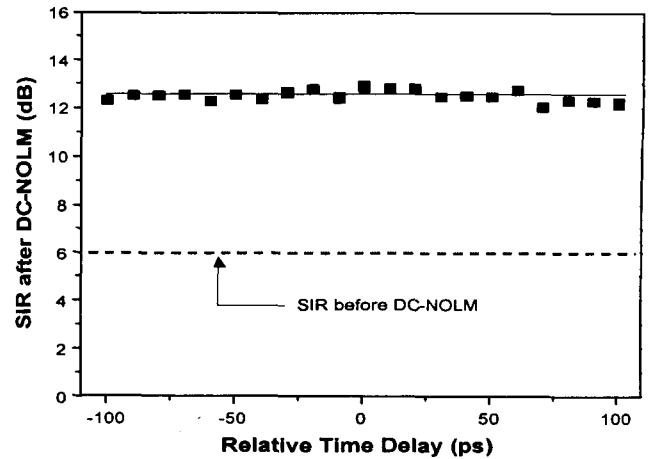


그림 6. 두 채널간 상대적인 시간 지연에 대한 SIR 변화.

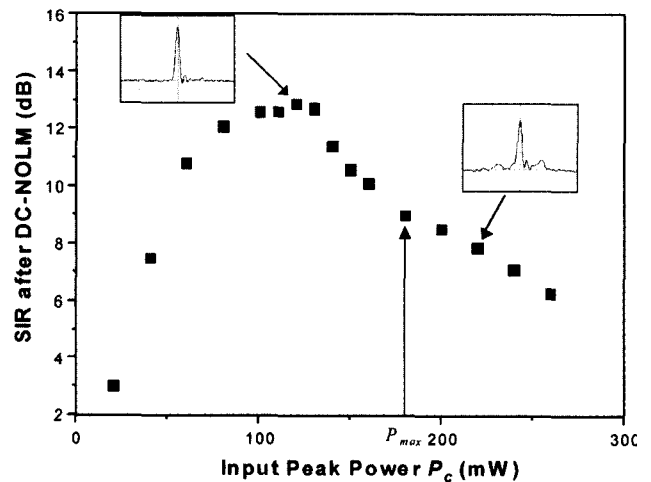


그림 7. 자기채널의 자기상관 피크 파워 ( $P_c$ )의 함수로 측정된 SIR. 삽입 그림은 각각  $P_c$ 가 120 mW와 220 mW일때 측정된 DC-NOLM의 출력 파형을 나타낸다.

한 실제 시스템에서 발생될 수 있는 간섭채널의 영향을 실험적으로 확인해 보기 위하여, 자기채널과 간섭채널 사이에 상대적인 시간 지연을 임의로 변화시키면서, DC-NOLM 출력단에서 SIR을 측정하였다(그림 6). 결과로서 두 채널간 시간 지연의 변화에 대하여, DC-NOLM의 출력 SIR은 크게 영향 받지 않음이 확인되었다.

그림 7은 DC-NOLM에 인가되는 자기채널의 자기상관 피크 파워의 함수 ( $P_c$ )로 측정된 SIR을 나타낸다. 실험 결과로부터 최대 SIR을 갖게 하는 제어신호의 최적의 광파워를 유추할 수 있다.  $P_c$ 가 180 mW일 때, DC-NOLM은 최대의 투과율을 보인다. 그러나, 최대의 SIR은  $P_c$ 가 이보다 조금 낮은 120 mW일 때 얻어진다. 이 차이는 본 실험에서 간섭채널의 파워(MAI)에 대한 제거가 완전하지 않은 것으로부터 기인한다. 즉, DC-NOLM에 인가되는 두 제어신호간 소량의 광파워 차 때문이다. 이러한 파워 불균형은 NOLM을 진행하는 두 probe 광원

간 상대 위상차( $\Delta\phi(t)$ )를 영이 아닌 값으로 만들고, 결과적으로 일정량의 간섭채널의 파워가 DC-NOLM 을 투과하게 된다. 따라서,  $P_c$ 가 증가함에 따라 간섭채널의 파워는 함께 증가한다. 실험에서  $P_c$ 가 120 mW를 지나 180 mW로 가까워 짐에 따라 자기채널의 투과율의 증가속도는 점차 감소하는 반면, 간섭채널의 투과율의 증가속도는 점차 증가한다. 따라서, 자기채널의 파워와 간섭채널의 파워의 비로 나타내어 지는 SIR은  $P_c$ 가 120 mW일때, 최대 값을 갖는다. 삽입 그림은 각각  $P_c$ 가 120 mW와 220 mW일때 관측된 DC-NOLM의 출력 파형을 나타낸다.

#### IV. 토 의

제안된 방법의 가장 큰 장점은 빠른 동작 속도에 있다. NOLM을 이용한 전 광학적인 구조에 바탕을 두고 있기 때문에, 기존의 balanced 광 검출기에 근거한 방법보다 기본적으로 빠른 동작속도를 가질 수 있다. 따라서, 본 연구는 수신단에서의 속도 문제를 해결할 수 있는 새로운 형태의 방법을 제시하였다.

한편, 본 실험에서는 1단 ladder 인코더/디코더를 사용하였다. 결과적으로 디코더의 두 출력단에서 자기채널의 side lobe 성분은 정확히 같은 파형을 가졌으며, DC-NOLM에 의하여 완전히 제거될 수 있었다. 그러나, 보다 긴 어드레스 코드를 사용하는 실제 시스템에서 디코더의 두 포트에서의 side lobe는 정확히 일치 하지 않는다. 예를 들어, 참고문헌<sup>[7]</sup>의 2단 ladder 인코더/디코더에 대하여 디코더 출력의 상대적인 광 파워는 각각 (1,0,1,16,1,0,1)와 (1,4,1,0,1,4,1)이고, 두 신호간 차동 출력은 (0,4,0,16,0,4,0)으로 나타나, main lobe외에 상당한 크기의 side lobe가 나타난다. 이를 제거하기 위해서 time-gating 등의 추가적인 장치가 필요하다. 그러나, 제안된 방법에서 만약 펄스 형태의 probe 광파를 사용하고, 자기상관 피크에 시간 동기를 맞춘다면, 자기채널의 main lobe 만을 쉽게 추출해 낼 수 있다.

그러나, DC-NOLM은 편광 변화에 민감하고, 긴 광학 루프로 인한 불안정성을 내포하고 있다. 이러한 문제는 그 동안 NOLM과 관련된 연구에서 오랜 연구 주제이었으며, 최근 연구에 빈번히 사용되고 있는 highly-nonlinear dispersion-shifted fiber(HNL-DSF)<sup>[11]</sup>를 사용하면, 루프의 길이를 크게 줄일 수 있어 보다 안정된 루프를 구성할 수 있을 것이다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 DC-NOLM을 이용하여 코히런트 시간 광 CDMA 시스템에서 발생하는 MAI를 감소시킬 수 있는 전 광학적인 방법을 제안하였다. DC-NOLM은 두 제어 포트에 공통으로 입력되는 MAI를 제거하는 차동 검출기로서의 역할을 한다. 두 개의 채널이 인코딩되었으며, 코히런트 정합 조건을 보다 쉽게 만족시키기 위해 그 중 하나가 디코더로

사용되도록 하였다. DC-NOLM을 통과하면서, MAI는 크게 감소하였으며, 높은 자기상관 피크가 관측되었다. DC-NOLM을 사용하기 전의 SIR은 6 dB이었으나, DC-NOLM을 통과시킨 후, 최대 13 dB로 개선되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00327-0)와 두뇌 한국 21의 일부 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] P. R. Prucnal, M. A. Santoro, and T. R. Fan, "Spread spectrum fiber-optic local area network using optical processing," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 4, pp. 547-554, 1986.
- [2] J. A. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part I: Fundamental principles," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 824-833, 1989.
- [3] Y. L. Chang and M. E. Marhic, "Fiber-optic ladder networks for inverse decoding coherent CDMA," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 1952-1962, 1992.
- [4] M. E. Marhic, "Coherent optical networks," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 11, pp. 854-864, 1993.
- [5] H. Sotobayashi, W. Chujo, and K.-I. Kitayama, "1.6-b/s/Hz 6.4-Tb/s QPSK-OCDM/WDM(4OCDM×40WDM×40Gb/s) transmission experiment using optical hard thresholding," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 555-557, 2002.
- [6] N. Wada and K.-I. Kitayama, "A 10 Gb/s optical code division multiplexing using 8-chip optical bipolar code and coherent detection," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 1758-1765, 1999.
- [7] D. D. Sampson and D. A. Jackson, "Coherent optical fiber communications system using all-optical correlation processing," *Optics Lett.*, vol. 15, pp. 585-587, 1990.
- [8] R. A. Griffin, D. D. Sampson, and D. A. Jackson, "Demonstration of data transmission using coherent correlation to reconstruct a coded pulse sequence," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 513-515, 1992.
- [9] S.-J. Kim, T.-J. Eom, B. H. Lee, and C.-S. Park, "Optical temporal encoding/decoding of short pulses using cascaded long-period fiber gratings," *Opt. Express*, vol. 11, pp. 3034-3040, 2003, <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-11-23-3034>.
- [10] M. Jinno, "Effects of crosstalk and timing jitter on all-optical time-division demultiplexing using a nonlinear fiber sagnac interferometer switch," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 30, pp. 2842-2853, 1994.
- [11] S. Watanabe and S. Takeda, "All-optical noise suppression using two-stage highly-nonlinear fibre loop interferometers," *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 52-53, 2000.

**Reduction of multiple-access interference in coherent optical CDMA systems based on all-optical differential detection**

Sun-Jong Kim, Tae-Young Kim, Chul Soo Park, and Chang-Soo Park

*Department of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology  
1, Oryong-dong, Buk-Gu, Gwangju, 500-712, Korea  
Email: csp@gist.ac.kr*

(Received March 11, 2004, Revised manuscript May 24, 2004)

We propose a novel scheme to suppress the multiple-access interference(MAI) in coherent optical CDMA systems. This is based on a differential detection using the dual-control NOLM. For an experimental demonstration, two encoded channels are constructed and decoded. These decoded signals are sent to the dual-control NOLM and a high autocorrelation peak with suppressed MAI at the output of the NOLM is observed. Signal-to-interference ratio is improved by 7 dB.

OCIS Codes : 060.2310, 060.2330, 060.4510.