광학 직교 부호의 확장 방법

구주환, 원아령, 김효원, 정진호*
울산대학교

*jinho@ulsan.ac.kr

An Extension Method for Optical Orthogonal Codes

Juhwan Gu, Arhyeong Won, Hyo-Won Kim, Jin-Ho Chung*
University of Ulsan

요 약

광학 네트워크의 다양한 통신 환경에 따라 새로운 파라미터를 가지는 광학 직교 부호를 설계하는 것은 매우 중요한 문제이다. 본 논문에서는 주파수도약 수열의 성질을 이용해서 기존에 알려진 광학 직교 부호를 확장하는 기법을 제시한다. 주파수도약 수열의 알파벳의 크기와 광학 직교 부호의 무게가 같을 때, 광학 직교 부호의 길이를 주파수도약 수열의 길이만큼 확장하고, 광학 직교 부호의 개수도 특정 조건을 만족시키는 주파수도약 수열의 개수에 따라 확장될 수 있다.

Ⅰ. 서 론

빅데이터 시대에서, 폭증하는 트래픽을 감당하기 어려운 한계에 하였을 때, 광학 통신(Optical Communication) 은 빛을 정보 전달 매체로 사용하여 전송 속도와 대역폭 측면에서 월등한 성능을 제공함으로써 차세대 통신 기술의 핵심 중의 하나로 확고하게 자리 잡았다. 특히, 초고화질 미디어 스트리밍, 사물 인터넷(IoT), 인공지능(AI) 서비스 등의 확산으로 초고속 데이터 전송이 요구되는 5G 및 그 이상의 통신 네트워크, 방대한 데이터를 처리해야 하는 데이터 센터 간의 연결, 그리고 완벽한 보안이 필수적인 양자 통신 등 다양한 미래 응용 분야에서 광학 통신의 중요성은 날이 갈수록 커질 것으로 전망된다 [1-3].

광학 통신 환경에서 다중 사용자 환경에서의 간섭(Interference) 문제는 수많은 사용자가 한정된 광 네트워크 자원을 공유하며 동시에 통신을 수행할 경우, 각 사용자의 신호가 서로에게 원치 않는 잡음으로 작용하는 '다중 접속 간섭(multiple access Interference)'로 인해 발생한다. 이러한 간섭은 통신 품질을 저하시키고 데이터 오류율을 높이며, 결국 전체 시스템의 용량과 안정성을 제한하는 결정적인 병목 현상으로 작용한다. 따라서 다중 사용자 환경에서도 각 신호의 독립성을 보장하고 간섭을 최소화하여 데이터가 정확하고 안정적으로 전송될 수 있도록 하는 정교한 부호화 및 다중접속 기법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 광학 직교 부호의 길이와 부호의 개수를 확장하는 방법을 제시한다. 주파수도약 통신에서 사용되는 수열군의 성질을 이용해서, 주어진 광학 직교 부호의 상관 특성은 유지하면서, 다른 파라미터들을 확장한다. 이를 통해 더욱 다양한 광통신 환경에 적합한 부호들을 얻을 수 있다 [4-8].

Ⅱ. 배경

광학 직교 부호 (Optical Orthogonal Codes)는 특정한 수학적 규칙에 따라 설계된 '0'과 '1'의 펄스 배열로, 각 사용자에게 고유한 부호(signature code)를 할당하는 데 사용됩니다. 가장 중요한 특징은 낮은 상호상관으로서, 특정 사용자의 부호가 다른 사용자의 부호와 겹치더라도 서로를 거의 완벽하게 구분할 수 있음을 의미한다. 수신기는 할당된 고유의 광학 직교 부호를 이용해 수많은 신호 속에서 원하는 사용자의 데이터를 추출할 수 있다. 이러한 특성 덕분에 광학 수열은 광 부호분할 다중접속(Optical Code Division Multiple Access) 시스템의 핵심 요소로 활용되고 있다. 또한 광학 직교 부호의 예측 불가능성과 고유성은 제 3 자가 신호를 도청하거나 위조하기 어렵게 만들어 보안 통신 분야에서도 응용 가능성을 보여주고 있어서 미래 통신 환경의

다양한 시나리오에서 간섭을 억제하고, 데이터를 안정적으로 전송하며, 보안성까지 강화할 수 있는 부호 체계로 평가받고 있다. 이에 따라, 더 많은 사용자를 수용하고, 더 높은 성능을 발휘할 수 있도록 광학 수열을 최적화하고 발전시키기 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있는 상황이다.

III. 본론

길이가 N 인 두 광학 직교 부호 C_i 와 C_j 의 상호상관 값은 다음과 같이 정의된다:

$$\Lambda_{i,j}(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} C_i(t)C_j(t+\tau)$$

여기서 τ 는 가능한 시간 지연을 의미한다.

광학 직교 부호는 각 부호어에서 1 의 위치를 기준으로 정의된다. 주어진 길이 N 의 광학 직교 부호의 1 의 위치의 인덱스를 길이 M 인의 주파수도약 수열군과 합성할 수 있다. 이 때, 주파수도약 수열군의 값은 CRT (중국인 나머지 정리)에서 첫번째 좌표에, 원래 광학 직교 부호의 인덱스는 CRT 의 두번째 좌표에 할당하는 방법으로 합성한다.

이러한 방법으로 합성했을 때, 새롭게 설계된 광학 직교 부호는 길이가 MN 이고, 부호어의 개수도 주파수도약 수열군의 개수 만큼 확장될 수 있다. 표 1 에서는 이러한 예시를 보여주고 있다. 여기서 C 는 주파수도약 수열군의 수열 개수이고, δ는 주파수도약군의 최대 상관값이다.

광학 직교 부호	길이	부호어 개수	상관값
원래 부호	N	K	λ
확장 부호	MN	CK	$\lambda\delta$

IV. 결론

본 연구에서는 주파수도약 수열군을 이용해서 광학 직교 부호를 확장하는 방법론을 제시하였다. 길이와 부호어의 개수에서 기존 부호에 비해 확장된 부호들을 얻을 수 있었다. 구체적인 파라미터들의 설정을 통해 각 통신 환경에 대해서 최적의 실제 부호를 찾는 것은 다음 연구 주제가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT). (No. RS-2023-00279714), and in part by the "Regional Innovation System & Education (RISE)" through the Ulsan RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Ulsan Metropolitan City, Republic of Korea.(2025-RISE-07-001).

참 고 문 헌

[1] F. R. K. Chung, J. A. Salehi, V. K. Wei, “Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications,” IEEE Transactions on Information Theory, 35(3), 595-604, 1989. doi:10.1109/18.30982.

[2] G. C. Yang and T. Fuja, “Optical orthogonal codes with unequal auto- and cross-correlation constraints,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 41, no. 1, pp. 96-106, Jan. 1995.

[3] G. Ge and J. Yin, “Constructions for optimal (v,4,1) optical orthogonal codes,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 47, no. 7, pp. 2998-3004, Sep. 2001.

[4] Y. Chang, R. Fuji-Hara, and Y. Miao, “Combinatorial constructions of optimal optical orthogonal codes with weight 4,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 49, no. 5, pp. 1283-1292, May 2003.

[5] J.-H. Chung and K. Yang, “Asymptotically optimal optical orthogonal codes with new parameters,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 59, no. 6, pp. 3999-4005, Jun. 2013.

[6] C. Zhao, Y. Chang, and T. Feng, “The existence of optimal (v,4,1) optical orthogonal codes achieving the Johnson bound,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 70, no. 12, pp. 8746-8757, Dec. 2024.

[7] S.-Y. Pak, H.-W. Kim, D. Ahn, and J.-H. Chung, “New variable-weight optical orthogonal codes with weights 3 to 5,” Entropy, vol. 26, no. 11, p. 982, Nov. 2024.

[8] H.-W. Kim, A. Lee, S.-Y. Pak, D.H. Ahn, and J.-H. Chung, A Design of Extended Optical Orthogonal Codes with Subsets of an Integer Ring, J. Inf. Commun. Converg. Eng. vol, 23, no. 3, pp. 155-161, Sept. 2025.