

IM-OFDM-SS/QOS 시스템을 위한 2 단계 검출 방법에 대한 연구

김형석, 김정창, *박성익, *허남호

한국해양대학교, *한국전자통신연구원

hskim19@g.kmou.ac.kr, jchkim@kmou.ac.kr, *psi76@etri.re.kr, *namho@etri.re.kr

A Study on Two-Stage Detection Scheme for IM-OFDM-SS/QOS Systems

Hyeongseok Kim Jeongchang Kim *Sung-Ik Park *Namho Hur

Korea Maritime and Ocean University

*Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

본 논문에서는 IM-OFDM-SS(index modulated orthogonal frequency division multiplexing with spread spectrum)와 IM-OFDM-QOS(IM-OFDM with quasi-orthogonal sequence) 시스템을 위한 2 단계 검출 (2-stage detection) 방법에 대해 연구하였다. IM-OFDM-SS/QOS 시스템은 전송할 수열의 인덱스(index)와 변조 심볼(modulation symbol)을 이용하여 정보를 전달하며, 수신기(receiver)에서는 인덱스와 변조 심볼을 결합하여 동시에 검출하는 최대 우도(maximum-likelihood) 검출 방법을 사용할 수 있다. 그리고, 인덱스를 먼저 검출하고, 검출한 인덱스에 대한 변조 심볼을 이어서 검출하는 2 단계 방법을 적용할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 IM-OFDM-QOS 시스템에 2 단계 검출 방법을 적용하여 성능을 비교한다. 또한, 두 개 이상의 수열을 동시에 전송하는 경우 2 단계 검출 방법의 한계를 논의한다.

1. 서론

인덱스 변조(index modulation)는 인덱스를 사용하여 정보를 전달하는 방법으로서, 높은 에너지 효율성(energy efficiency)을 얻을 수 있다는 장점으로 인해 많은 연구가 이루어지고 있다[1]. 특히, 현재 대부분의 통신 시스템에서 사용되고 있는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)과 결합한 다양한 인덱스 변조 방법이 제안되고 있다[2]-[6]. 그 중, OFDM-IM 방법은 사용 가능한 유효 대역폭(bandwidth)을 여러 개의 그룹으로 나누고, 각 그룹 내에서 전송하고자 하는 정보 비트 값에 따라 활성화할 부반송파(subcarrier)의 인덱스를 결정한다[4]. 이 때, 나머지 부반송파는 비활성화되며, 각 부반송파마다 동일한 파워를 할당한다고 가정할 때 에너지 효율성 측면에서 기존 OFDM 시스템에 비해 큰 이득을 얻을 수 있다. 또한, 변조 심볼(modulation symbol)을 활성화된

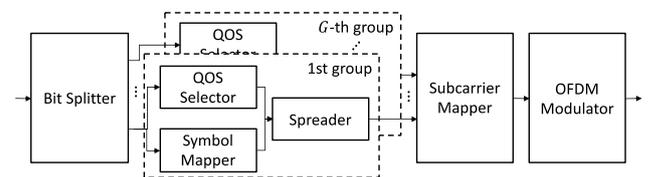


그림 1. IM-OFDM-QOS 시스템의 송신기 구조

부반송파에 맵핑(mapping)함으로써 더 많은 정보 비트를 동시에 전송할 수 있다. 다음으로, OFDM-IM 방법에서 개선된 IM-OFDM-SS(index modulated OFDM with spread spectrum) 방법은 부반송파를 활성화하는 대신 직교 수열(orthogonal sequence)을 이용하여 정보를 전달한다. 전송하고자 하는 정보 비트 값에 따라 사용할 직교 수열을 선택하고, 선택된 수열을 이용하여 변조 심볼을 확산(spreading)시킴으로써 추가 정보를 전송할 수 있다[5]. IM-OFDM-SS는 직교 수열을 사용하여 확산시키기 때문에 OFDM-IM에 비해 페이딩(fading) 환경에서 더 강건하다는 장점이 있다. 최근 개발된 IM-OFDM-QOS(IM-

OFDM with quasi-orthogonal sequence)는 IM-OFDM-SS 의 직교 수열 대신 준직교 수열을 사용하는 방법으로, IM-OFDM-SS 에 비해 더 높은 주파수 효율성(spectral efficiency)을 얻을 수 있다[6]. 준직교 수열은 직교 수열과 비교하여 약간의 직교성(orthogonality)을 희생하는 대신 동일한 수열 길이에서 더 큰 수열 집합 크기를 갖기 때문에[7][8], 동일한 대역폭에서 IM-OFDM-QOS 는 IM-OFDM-SS 에 비해 더 많은 정보 비트를 인덱스로 전송할 수 있다.

본 논문에서는 IM-OFDM-SS/QOS 시스템을 위한 2 단계 검출(2-stage detection) 방법에 대해 연구한다. [5]에서는 IM-OFDM-SS 신호의 검출을 위해 인덱스와 변조 심볼을 동시에 검출하는 최대 우도(maximum-likelihood) 검출 방법과 사용된 수열의 인덱스를 먼저 검출한 후 검출한 인덱스에 대한 변조 심볼을 이어서 검출하는 2 단계 검출(2-stage detection) 방법이 제안되었다. [9]와 [10]에서 IM-OFDM-QOS 시스템의 성능에 대해 연구되었지만 최대 우도 검출 방법에 대한 분석만 제시되어 있기 때문에, 본 논문에서는 IM-OFDM-QOS 시스템에 2 단계 검출 방법을 적용하여 수신 성능을 분석한다. 또한, 두 개 이상의 수열을 동시에 전송할 경우, 2 단계 검출 방법에서 첫 번째 단계인 인덱스 검출에 대한 한계를 논의한다.

2. 시스템 구조

그림 1 은 IM-OFDM-QOS 시스템의 송신기 구조를 나타낸다. 입력된 정보 비트는 비트 분배기(bit splitter)를 통해 각 그룹으로 분배되고, 이어서 준직교 수열 선택을 위한 인덱스 비트와 변조 심볼 맵핑을 위한 변조 비트로 나뉜다. 각 그룹 내에서는 준직교 수열 선택기(QOS selector), 심볼 매퍼 (symbol mapper), 확산기(spreader)로 구성되어 있으며, 각 그룹은 독립적으로 동작한다. 먼저, 준직교 수열 선택기는 인덱스 비트 값에 대응되는 준직교 수열을 선택한다. 이 때, 하나 또는 여러 개의 수열을 동시에 전송할 수 있다. 심볼 매퍼는 변조 비트를 변조 심볼로 맵핑하는 역할을 하며, 동시에 전송되는 수열의 개수만큼 변조 심볼이 생성된다. 확산기는 앞서 생성된 변조 심볼을 선택된 수열에 하나씩 할당하여 확산시키는 역할을 한다. 각 그룹 내에 있는 부반송파의 개수를 n 이라고 하면, 선택 가능한 준직교 수열의 집합 크기는 n^2 과 같다. 따라서, \mathcal{V} 개의 준직교 수열을 동시에 전송한다고 하면 각 그룹 내에서 전송할 수 인덱스 비트 개수는 $\lfloor \log_2 C(n^2, \mathcal{V}) \rfloor$ 와 같다. 여기서, $\lfloor \cdot \rfloor$ 와 $C(n^2, \mathcal{V})$ 는 각각 버림 함수(floor function)와 가능한 n^2 개의 수열 중에서 \mathcal{V} 개의 수열을 선택하는 모든 가능한 조합(combination)의 개수를 의미한다. 또한, 변조 차수(modulation order)를 M 이라고 하면, 각 그룹 내에서 $\mathcal{V} \log_2 M$ 개의 변조 비트를 전송할 수 있다.

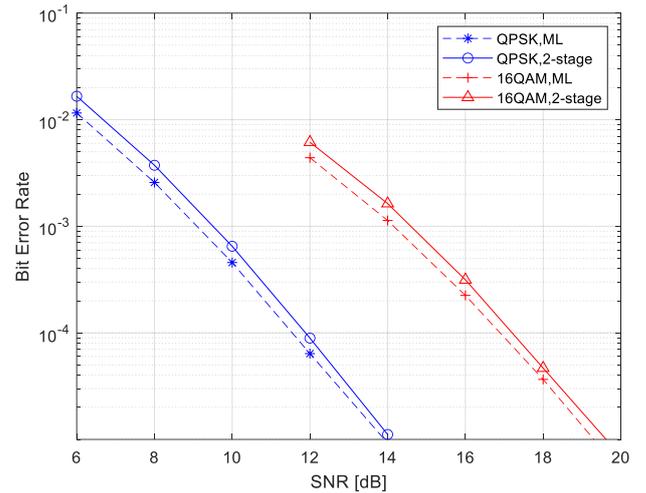


그림 2. IM-OFDM-QOS 시스템의 최대 우도 검출 방법과 2 단계 검출 방법에 대한 성능 비교

따라서, 하나의 그룹에서 전송 가능한 정보 비트 개수는 $\{\lfloor \log_2 C(n^2, \mathcal{V}) \rfloor + \mathcal{V} \log_2 M\}$ 와 같다. 각 그룹에서 독립적으로 생성된 신호는 부반송파 매퍼(subcarrier mapper)에서 해당하는 부반송파에 맵핑되고, 이어서 OFDM 변조기(OFDM modulator)를 통해 최종 송신 신호가 생성된다.

IM-OFDM-QOS 시스템의 수신기에서는 OFDM 복조기(OFDM demodulation)를 통해 수신 신호는 주파수 영역의 신호로 변환되고, 각 그룹마다 독립적으로 인덱스 및 변조 심볼 검출을 수행한다. 최대 우도 검출 방법은 인덱스와 변조 심볼을 동시에 검출하는 방법으로서, 다음과 같이 인덱스와 변조 심볼을 추정할 수 있다.

$$(\hat{i}, \hat{s}) = \arg \min_{i \in \mathcal{X}_i, s \in \mathcal{X}_s} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}(c_i \hat{s})\|^2 \quad (1)$$

여기서, (\hat{i}, \hat{s}) 는 추정된 인덱스와 변조 심볼을 의미하며, $\mathbf{y} = [y_0, \dots, y_{n-1}]^T$, $\mathbf{H} = \text{diag}\{h_0, \dots, h_{n-1}\}$, $\mathbf{c}_i = [c_{i,0}, \dots, c_{i,n-1}]^T$ 는 각각 수신한 신호, 송신기와 수신기 사이의 채널 이득(channel gain), i 번째 준직교 수열을 의미한다. \mathcal{X}_i 와 \mathcal{X}_s 는 각각 가능한 인덱스 및 변조 심볼들의 집합을 의미한다. 최대 우도 검출 방법은 최적의 해를 찾을 수 있지만 매우 높은 복잡도(complexity)를 갖는다는 단점이 있다.

3. 2 단계 검출 방법

IM-OFDM-QOS 시스템에서 최대 우도 검출 방법의 높은

복잡도를 해결하기 위해 2 단계 검출 방법을 적용할 수 있다. 2 단계 검출 방법은 수신기에서 전송된 수열에 대한 인덱스를 먼저 검출한 후, 변조 심볼을 이어서 검출한다. 동시에 전송하는 수열의 개수가 한 개일 경우, 2 단계 검출 방법 중 첫 번째 단계인 인덱스 검출은 수신 신호와 가능한 모든 수열들의 상관(correlation)을 구한 후 크기가 가장 큰 수열을 선택하는 방법을 적용할 수 있으며, 다음과 같이 인덱스를 추정할 수 있다.

$$\tilde{i} = \arg \max_{i \in \mathcal{X}_i} \left| \sum_{k=0}^{n-1} \{(h_k^* c_{i,k}^*) y_k\} \right|^2. \quad (2)$$

이어서, 검출된 수열에 확산된 변조 심볼은 다음과 같이 계산하여 추정할 수 있다.

$$\tilde{s} = \arg \min_{\hat{s} \in \mathcal{X}_s} \left| \sum_{k=0}^{n-1} \{(h_k^* c_{i,k}^*) y_k\} - \hat{s} \sum_{k=0}^{n-1} |h_k|^2 \right|^2. \quad (3)$$

두 가지 검출 방법의 복잡도 분석을 위해 본 논문에서는 가능한 조합 개수를 복잡도로 정의하였다. 먼저, 최대 우도 검출 방법의 복잡도는 모든 가능한 인덱스와 변조 심볼 조합의 집합 크기인 $\{C(n^2, \mathcal{V}) \times M\}$ 이고, 2 단계 검출 방법의 복잡도는 모든 가능한 인덱스 값과 변조 심볼 개수의 합인 $\{C(n^2, \mathcal{V}) + M\}$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서, 2 단계 검출 방법은 최대 우도 검출 방법에 비해 낮은 복잡도를 갖는다.

4. 전산 실험 결과

본 논문에서는 전산 실험을 위한 송수신기 간 채널 환경으로서 $L = 10$ 개의 지연 탭(delay tap)을 갖는 주파수 선택적(frequency-selective) 레일리(Rayleigh) 페이딩 환경을 고려하였고, 이 때, 각 탭은 $\mathcal{CN}(0, 1/L)$ 의 분포를 따르는 복소 가우시안 랜덤 변수 (complex Gaussian random variable)의 임펄스 응답(impulse response)을 갖도록 설정하였다. 그림 2 는 IM-OFDM-QOS 시스템의 최대 우도 검출 방법과 2 단계 검출 방법에 대한 비트오율(bit error rate: BER) 성능을 나타낸다. 그림 2 에 대한 시스템 파라미터로서, FFT(fast Fourier transform) 길이는 128, 수열의 길이 n 은 8 및 동시에 전송하는 수열의 개수 \mathcal{V} 는 한 개로 설정하였다. 변조 차수 M 은 4 와 16 의

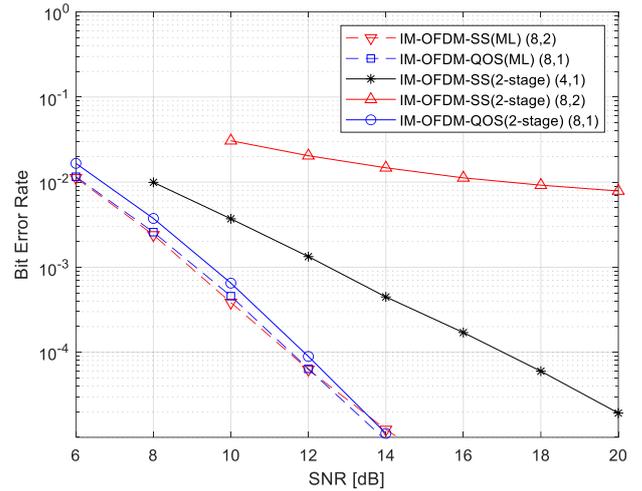


그림 3. IM-OFDM-SS 와 IM-OFDM-QOS 시스템에서 다양한 파라미터에 대한 최대 우도 검출 방법과 2 단계 검출 방법의 BER 성능(데이터율=128 bit/symbol)

두 가지를 고려하였고, 각각 QPSK (quadrature phase shift keying)와 16QAM(quadrature amplitude modulation)을 의미한다. 그림 2 에서 최대 우도 검출 방법은 2 단계 검출 방법에 비해 QPSK 와 16QAM 모두에서 약 0.3 dB 의 SNR(signal-to-noise ratio) 이득을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 3 은 IM-OFDM-SS 와 IM-OFDM-QOS 시스템에서 동일한 데이터율(data rate)을 만족하는 다양한 파라미터에 대한 최대 우도 검출 방법과 2 단계 검출 방법의 BER 성능을 나타낸다. 본 논문에서 데이터율은 128 bit/symbol 로 설정했으며, 설정한 데이터율을 만족하기 위한 선택된 수열 길이 및 개수의 조합 (n, \mathcal{V}) 으로서 IM-OFDM-SS 에서 (4,1)과 (8,2) 및 IM-OFDM-QOS 에서 (8,1) 조합을 고려하였다. 또한, 본 논문에서는 Zadoff-Chu 수열을 IM-OFDM-SS 시스템의 직교 수열로 사용하였다. 먼저, 그림 3 의 2 단계 검출 방법에서 IM-OFDM-QOS 가 IM-OFDM-SS 의 (4,1) 조합에 비해 BER=10⁻⁴에서 약 5 dB 의 SNR 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 최대 우도 검출 방법을 사용한 경우에는 BER=10⁻⁴에서 IM-OFDM-SS 의 (8,2) 조합과 IM-OFDM-QOS 의 성능이 동일함을 알 수 있다. 그러나, IM-OFDM-SS 의 (8,2) 조합은 2 단계 검출 방법을 사용할 경우 대략 BER=10⁻²에서 error floor 가 발생한다. 직교 수열을 사용하는 IM-OFDM-SS 는 페이딩 환경 하에서 수열의 직교성이 보장되지 않으므로, 최대 우도 검출 방법과 2 단계 검출 방법을 비교했을 때 매우 큰 성능 차이가 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 수식 2 와 같이 신호의 크기를 기반으로 하는 검출 방법은 기존 IM-OFDM-SS/QOS 시스템에서 두 개 이상의 수열을 동시에 전송하는 조합에 적합하지 않다. 그러므로, 최대 우도 검출 방법에 조금 더 가까운 성능 및 낮은 복잡도를 가지면서 두 개 이상의 수열을 동시에 검출하기 위한 다른 검출 방법의 연구가

필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 IM-OFDM-QOS 시스템에 2 단계 검출 방법을 적용하였다. IM-OFDM-QOS 시스템에서의 최대 우도 검출 방법과 2 단계 검출 방법이 설명되었고, 각 검출 방법의 복잡도를 분석하였다. 전산 실험을 통해 IM-OFDM-QOS 시스템에서 낮은 복잡도를 갖는 2 단계 검출 방법이 최대 우도 검출 방법과 거의 유사한 성능을 보이는 것을 확인하였다. 또한, IM-OFDM-SS/QOS 시스템에서 두 개 이상의 수열을 동시에 전송할 경우에는 다른 수열 간의 간섭으로 인해 2 단계 검출 방법이 한계가 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.2017-0-00081, Development of Transmission Technology for Ultra High Quality UHD).

참고문헌

- [1] E. Başar *et al.*, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693-16746, 2017.
- [2] R. Abualhiga and H. Haas, "Subcarrier-index modulation OFDM," in *Proc. of the International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Tokyo, Japan, Sep. 2009.
- [3] D. Tsonev, S. Sinanovic, and H. Haas, "Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM," in *Proc. of IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 728-732, Dec. 2011.
- [4] E. Başar, U. Aygölü, E. Panayırçı, and H. V. Poor, "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 22, pp. 5536-5549, Nov. 2013.
- [5] Q. Li, M. Wen, E. Basar, and F. Chen, "Index modulated OFDM spread spectrum," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2360-2374, Apr. 2018.
- [6] H. Kim, M. Yeom, and J. Kim, "Index modulated orthogonal frequency division multiplexing with quasi-orthogonal sequence," in *Proc. of European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Valencia, Spain, Jun. 2019.
- [7] K. Yang, Y.-K. Kim, and P. V. Kumar, "Quasi-orthogonal sequences for code-division multiple-access systems," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 3, pp. 982-993, May 2000.
- [8] J. Kim, K. Cheun, and S. Choi, "Unitary space-time constellations based on quasi-orthogonal sequences," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 35-39, Jan. 2010.
- [9] H. Kim and J. Kim, "Further results on performance of LDPC coded IM-OFDM-QOS system," *Journal of Broadcast Engineering*, vol. 24, no. 7, pp.1221-1227, Dec. 2019.
- [10] 김형석, 김정창, "IM-OFDM-QOS 시스템의 성능에 관한 연구," 대한전자공학회 하계학술대회, Aug. 2020.