

그룹별 가변 길이 직교코드 다중화를 이용한 OFDM 전송방식의 성능분석

권기범, 오성근, 선우명훈
아주대학교 전자공학부

Analysis of an OFDM Transmission Scheme Using Groupwise Variable Length OCM

Ki Bum Kwon, Seong Keun Oh, and Myung Hoon Sunwoo

School of Electrical & Computer Engineering, Ajou University

E-mail: {wrecker, oskn, sunwoo}@ajou.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화를 이용한 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 전송방식의 제안하고, 그룹별로 동일한 부반송파 개수를 가정하여 코드 길이에 따른 시스템 성능과 복잡도를 분석함으로써 최적의 시스템 파라미터들을 결정한다. 제안된 방식에서는 상호 상관성이 낮은 부반송파들로 동일 반송파 그룹으로 구분함으로써 부반송파 전체를 다수의 부반송파 그룹으로 나누고, 그룹마다 부반송파 개수와 동일한 길이의 직교코드들을 사용하여 다중화하여 전송한다. 따라서, 제안된 시스템을 사용하면 적절한 시스템 파라미터의 선정을 통하여 부반송파 전체를 하나의 그룹으로 하는 기존의 직교코드 다중화 방식에[2] 비하여 다이버시티 이득은 유지하면서 시스템 복잡도를 크게 줄일 수 있다. 또한, 제안된 직교코드 다중화 전송방식에서는 수신기에서 직교코드들간의 직교성 복원이 필수적이며, 수신기에서 불완전한 채널등화는 인접한 직교코드들 간에 상호 간섭을 유발하는 요인이 된다. 따라서, 채널추정 오류의 정도가 증가함에 따라 직교코드들 간의 상호 간섭으로 인하여 증가하는 비트오류를 줄이기 위하여 채널추정 오류의 정도에 따라 블록길이와 블록 인터리버 구조를 조절하여 시스템을 최적화 한다. 가변 길이 직교코드로는 길이에 상관 없이 직교성을 유지하며 에너지의 균등 분배가 가능한 DFT (discrete Fourier transform) 코드를 사용한다. 최적 시스템 파라미터를 결정하기 위하여 모의실험을 통하여 코드 길이에 따른 시스템 성능을 분석한다. 또한, 채널추정 오류가 존재하는 경우에 시스템 성능을 분석한다. 마지막으로, 채널 부호화를 적용하는 경우에 시스템 파라미터들을 최적화함으로써 부호화 이득이 시스템 성능과 시스템 복잡도 감소, 채널추정 오류의 극복에 미치는 영향을 분석한다.

I. 서론

OFDM 전송방식[3-4]은 고속 데이터 스트림을 다수의 저속 데이터 스트림으로 나누고 대역이 겹치는 상호

직교하는 부반송파들을 사용하여 병렬로 전송함으로써, 지연 확산에 따른 인접 심벌간 간섭을 효과적으로 줄일 수 있는 효율적인 전송방식이다[3-6]. 또한, 이 방식은 FFT (fast Fourier transform)을 이용한 고속 구현이 가능하며, 매 심벌마다 지연확산 길이보다 긴 순환 접두부를 삽입함으로써 부채널간의 직교성을 유지할 수 있어, 부반송파별 단일 탭 등화기를 사용할 수 있다[3]. 따라서, OFDM 전송방식은 주파수 선택적 페이딩 채널에서 고속 데이터 전송을 위하여 가장 많은 주목을 받고 있다.

일반적인 OFDM 전송방식은 모든 부반송파에 동일한 변조방식을 적용하고 동일한 전력을 할당하므로 주파수 선택적 페이딩 채널에서는 정보심벌들이 서로 다른 페이딩의 영향을 받아 서로 다른 신뢰도를 갖게 된다. 최근에 정보심벌들을 상호 직교하는 코드들을 사용하여 전체 주파수 영역으로 확산하고 다중화하여 전송함으로써, 주파수 다이버시티 이득을 극대화하고 모든 정보심벌들이 동일한 신뢰도를 갖도록 함으로써 채널상태에 대한 정보를 이용함이 없이도 일반적인 OFDM 전송방식에 비하여 성능을 크게 개선할 수 있는 직교코드 다중화를 사용한 OFDM 전송방식들이 제안되었다[2],[7]. 대부분의 무선채널에서는 임펄스 응답의 길이가 시간적으로 제한되어 있으므로, 인접한 부반송파들 사이에 상관성이 매우 높을 수 있다. 따라서, 인접한 부반송파들 사이에는 충분한 다이버시티 이득을 얻을 수 없게 된다. 이러한 경우, 코드 길이를 길게 하는 것은 다중화와 역다중화에 따른 시스템 복잡도의 증가에 비하여 성능개선의 효과는 미미하다. 또한 OFDM 시스템의 성능은 채널추정 정확도에 따라 크게 영향을 받는다. 제안된 시스템은 특히 코드들간 직교성을 복원하기 위하여 수신단에서 등화기를 사용하므로 채널등화가 불완전한 경우 직교성 파괴로 인하여 시스템의 성능이 크게 저하될 수 있다.

본 논문에서는 상호 상관성이 낮은 부반송파들을 하나의 그룹으로 구분하고 그룹내의 부반송파들을 이용하여 직교코드를 사용하여 정보신호를 다중화 하고 필요에 따라 그룹내의 부반송파의 개수를 조절하는 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화를 이용한 OFDM

전송방식을 제안한다. 제안된 시스템은 그룹별 사용하는 코드길이에 따라 복잡도와 성능이 결정된다. 따라서, 시스템 복잡도와 성능을 고려하여 최적의 시스템 파라미터를 결정한다. 또한, 채널부호화가 시스템 성능에 미치는 영향이 크므로 부호화 이득에 따른 시스템 복잡도 감축의 효과를 분석한다. 또한, 채널추정 오류가 존재하는 경우에 시스템 성능을 분석한다. 마지막으로, 채널 부호화를 적용하는 시스템의 경우에도 시스템 최적화를 통하여 다중화 이득이 시스템 성능과 시스템 복잡도 감소, 채널추정 오류의 극복에 미치는 영향을 분석한다.

II. 시스템 모델

그림 1 은 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화를 이용한 OFDM 전송을 위한 시스템 블록도이다. 송신단에서 부호화된 정보신호는 동일한 형태의 정보심벌로 매핑되고, 유효 반송파 개수 N_{eff} 에 해당하는 정보심벌들이 블록 단위로 직병렬 변환된다. 이때, 정보심벌 블록은 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화 블록을 통과하게 되며, 순환 접두부를 추가하여 일반적인 OFDM 전송방식으로 전송된다.

일반적으로 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화 블록은 상호 상관성이 낮은 부반송파들을 동일한 그룹으로 구분함으로써 전체 부반송파들을 다수의 부반송파 그룹으로 나누며, 그룹별로 부반송파 개수와 동일한 길이를 갖는 직교코드들을 사용하여 부반송파 개수만큼의 정보심벌들을 다중화하여 전송한다. 반송파 그룹핑에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [1]에 있다.

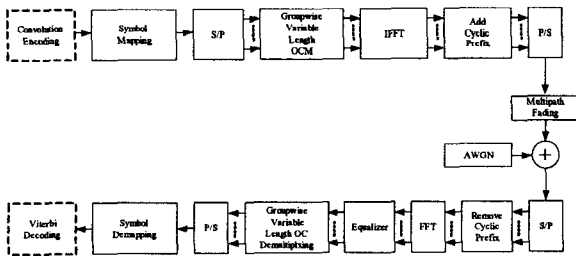


그림 1. 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화 OFDM 전송 시스템 블록도

따라서, 제안된 전송방식의 OFDM 기저대역 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{K-1} \sqrt{P_i} c_{i,m,n} \exp\left(j2\pi \frac{Mn + (m-1)}{T_u} [t - (i-1)T - T_{op}] \right) \cdot p_r(t - iT) \quad (1)$$

여기서, P_i 는 각 정보심벌의 전력을 나타내며, $c_{i,m,n}$ 는 그룹 인터리빙이 마무리된 후 i -번째 OFDM 심벌의 m -번째 부반송파 그룹을 통하여 길이 K 인 직교코드들을 이용하여 다중화된 K 개의 정보심벌들에 의하여 생성된 n -번째 칩(chip)을 나타낸다. $p_r(t)$ 는 한 OFDM 심벌 주기인 $0 \leq t \leq T$ 구간에서 크기가 1 인 구형펄스를 나타내고, OFDM 심벌 주기 $T = T_u + T_{op}$ 는

유효 심벌 주기 T_u 와 순환 접두부 주기 T_{op} 의 합으로 구성된다.

송신단에서 생성된 그룹별 직교코드 다중화된 OFDM 신호는 다중경로 페이딩 채널을 통과하고 백색 가우시안 잡음이 부과되어 수신기로 입력된다. 제안된 시스템의 수신단에서는 주파수 선택적 페이딩에 따른 채널 왜곡을 보상하여 신호들의 직교성을 복원하기 위한 주파수 영역 단일 탭 채널 등화기를 사용하는 것을 제외하고는 송신기의 역과정을 수행한다. 본 논문에서는 시스템 동기는 완벽하다고 가정하며, 채널정보는 추정오류가 존재한다고 가정한다. 문제를 단순화시키기 위하여 채널추정 오류는 실제의 채널정보에 가우시안 분포를 갖는 랜덤신호를 가산하여 생성한다. 채널등화기로는 MMSE (minimum mean squared error) 등화기를 사용한다[8].

제안된 시스템에서는 부호화 이득이 시스템 성능 및 복잡도에 영향을 미치므로 코드 길이에 따른 성능변화를 분석한다. 위 방식은 2 단계 인터리빙과 그룹별 직교코드 다중화를 통하여 연접오류를 효과적으로 분산하여 랜덤오류로의 변환이 가능하므로 연접오류에 강한 RS (Reed-Solomon) 부호의 사용은 고려하지 않으며, 랜덤오류에 강한 컨벌루션 부호만을 고려한다. 이를 위하여 부호화기로는 복잡도에 비하여 우수한 성능을 갖는 부호화율이 1/2 이며 구속장이 7 인 최적의 컨벌루션 부호를 사용하며, 복호시에는 연관정 비터비 복호 방식을 사용한다[9].

III. 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화

우선적으로 부반송파 그룹핑을 위하여 유효 부반송파 전체를 상호 상관성이 낮은 부반송파들로 구성되는 그룹으로 구분하고, 그림 2 에서와 같이 블록 인터리버와 직교코드들을 사용하여 정보심벌들을 직교코드 다중화하며, 마지막으로 인접 그룹간 상호 상관성에 따른 연접오류의 가능성을 줄이기 위하여 그룹 인터리버를 사용한다[1].

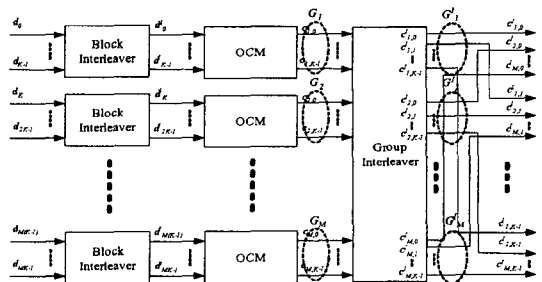


그림 2. 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화 블록

제안된 직교코드 다중화 전송방식에서 신호들 간의 직교성 복원은 매우 중요하며, 수신기에서 불완전한 채널등화는 인접한 직교코드들 간에 상당한 상호 상관성을 유발하는 요인이 된다. 따라서, 인접한 직교코드로 전송되는 정보심벌들 간의 상관성으로 인하여 발생이 가능한 연접오류의 가능성을 막기 위하여 그룹내에서 정보심벌들에 대한 블록 인터리빙을 수행한다. 본 논문에서는 최적 인터리버 설계보다는

시스템 성능의 영향을 평가하기에 적합한 그림 3 과 같은 단순한 블록 인터리버를 사용한다[1].

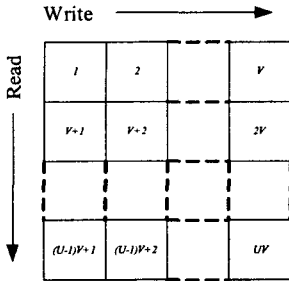


그림 3. 그룹내 심벌 블록 인터리버 구조

제한된 시스템에서 한 OFDM 심벌에서 그룹내 심벌 인터리버를 통하여 블록 인터리빙된 j -번째 정보심벌 d'_j 는 그룹별로 길이가 K 개인 DFT 직교코드를 사용하여 직교코드 다중화 된다. 이 때, 다중화에 사용되는 DFT 직교코드는 다음과 같다.

$$\mathbf{O}_{n+1}^{(K)} = \left[e^{j\frac{2\pi n}{K}}, e^{j\frac{4\pi n}{K}}, \dots, e^{j\frac{2\pi n(M-1)}{K}} \right], (n = 0, 1, \dots, K-1). \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{O}_{n+1}^{(K)}$ 은 길이가 K 인 n -번째 직교코드를 나타낸다. 이 DFT 직교코드들을 사용하여 m -번째 그룹에 속하는 K 개의 정보심벌들에 의하여 직교코드 다중화된 신호벡터 \mathbf{C}_m 은 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_m = \sum_{n=0}^{K-1} d_{K(m-1)+n}^{(K)} \cdot \mathbf{O}_{n+1}^{(K)}, (m = 1, 2, \dots, M). \quad (3)$$

마지막으로, 다중화된 심벌들은 그룹 단위로 그룹 인터리빙을 통과하게 된다. 그룹 단위의 인터리버는 무선채널에서 그룹 크기가 작은 경우에 인접한 그룹에서의 심벌들 사이에 높은 상관성을 가질 수 있으므로 이를 방지하여 연접오류의 가능성을 줄이기 위하여 사용된다. 그룹 인터리버는 그림 3 에서의 심벌 인터리버와 동일한 형태를 갖는다[1].

IV. 모의 실험 및 분석

본 절에서는 모의실험을 통하여 주파수 선택적 페이딩 채널에서 직교코드 길이에 따른 시스템의 성능과 복잡도를 비교 분석하여 최적의 시스템 파라미터를 도출한다.

모의실험을 위해 사용된 주요한 OFDM 파라미터는 표 1 과 같다. DFT 직교코드 길이는 192 개의 유효 반송파를 가정하여 192, 16, 12, 8, 6, 4 개로 선정하였고, 그룹의 개수는 코드 길이에 따라 각각 1, 12, 16, 24, 32, 48 개로 선정하였다. 다중 경로 페이딩 채널로는 최대 지연 시간이 $1 \mu\text{s}$ 이며 평균 지연 확산 시간이 $0.1 \mu\text{s}$ 를 가지며, 평균 전력 프로파일은 지수적으로 감소되는 모델에 사용하였고 25 개의 다중경로를 가정하였다. 각각의 경로성분은 Rayleigh 페이딩을 가정하였으며

임펄스 응답에 의한 전력 변환 비율이 1 이 되도록 정규화 하였다. 시스템 성능을 평균하기 위하여 50 개의 독립적인 채널을 사용하였으며 매 채널마다 6000 개의 OFDM 심벌을 사용하였다. 또한, 채널추정 오류를 모델링하기 위하여 실제의 채널에 가우시안 랜덤신호를 추가하여 사용하였다.

표 1. OFDM 시스템 파라미터.

변조방식	QPSK
총 반송파 개수 (N)	256
유효 반송파 개수 (N_{eff})	192
주반송파 주파수 (f_c)	5.2 GHz
전송 대역폭 (B)	25 MHz
반송파 간격 (Δf)	97.656 kHz
샘플링 주기 (T_{sam})	40 ns
유효 심벌 주기 (T_s)	7.68 μs
순환 접두부 주기 (T_{cp})	2.56 μs
심벌 주기 (T)	10.24 μs

그림 4 는 채널 부호화를 사용하지 않는 경우의 BER 성능이고, 10^{-3} BER 기준에서 0.5 dB 이내의 성능을 유지하는 최소의 코드길이인 16 을 최적 코드길이로 선정하였다. 그림 5 는 구속장이 7 이며 부호율이 1/2 인 컨벌루션 부호와 연접 비터비 복호를 사용한 경우에 코드길이에 따른 BER 성능이다. 이 경우, 성능 대비 복잡도 측면에서 가장 바람직한 구조로 코드길이를 6 으로 설정할 수 있다[1].

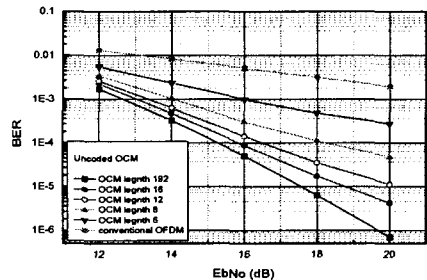


그림 4. 코드 길이에 따른 BER 성능 [부호화 없음]

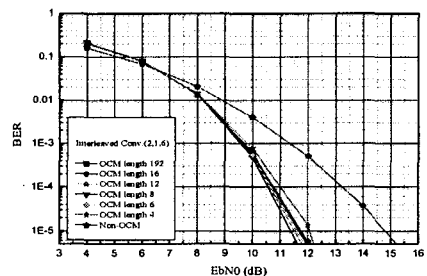


그림 5. 코드 길이에 따른 BER 성능 [부호화 사용]

그림 6은 채널 부호화가 없는 경우, 채널추정 오류에 따른 BER 성능을 나타내고 있다. 채널추정 오류가 증가함에 따라 시스템 성능이 급격히 저하되며 신호 대 잡음비가 증가할수록 채널추정 오류에 의한 영향이 높아진다. 또한, 코드 길이가 길어질수록 평균효과로 인하여 채널추정 오류에 강인한 효과를 갖는다. 채널추정이 완벽한 경우 최적 코드 길이었던 16을 사용하는 경우 채널추정 오류에 따라 성능차이가 크다. 따라서 채널을 정확히 알 수 없는 시스템일 경우 코드 길이를 증가시키는 것이 바람직하다. 그림 7은 채널 부호화 사용시 채널추정 오류에 따른 BER 성능을 나타내고 있다. 부호화 사용시 채널추정 오류의 효과가 부호화 이득으로 보상이 되므로 코드 길이에 따라서는 큰 성능 차이를 야기시키지 못한다.

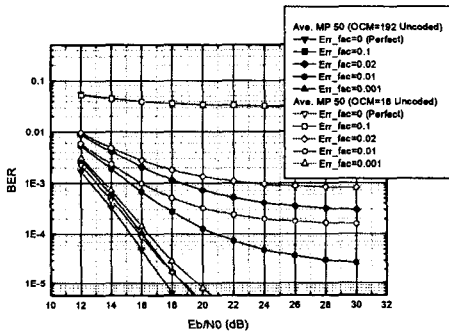


그림 6. 채널추정 오류에 따른 BER 성능 [부호화 없음].

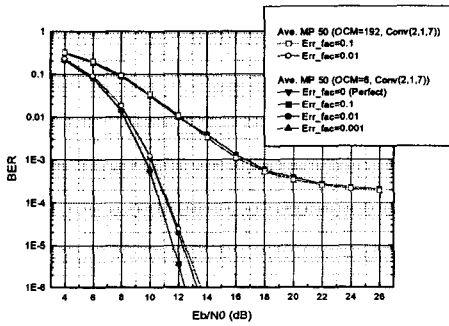


그림 7. 채널추정 오류에 따른 BER 성능 [부호화 사용].

복잡도 분석을 위해서는 채널추정이 완벽한 경우에 대해서만 코드 길이에 따른 제안된 시스템의 직교코드 다중화 및 역다중화를 위한 복소 곱셈 연산의 개수를 분석한다[1]. 코드 길이가 192인 경우와 비교하면 최적 코드 길이인 16개, 6개일 경우 각각 12배, 32배만큼 복소 곱셈의 개수를 줄일 수 있다. 따라서, 채널 부호화를 적용하는 경우에 추가적으로 2.6배 정도의 복잡도 감소 효과가 있다. 그러나, 2단계 인터리빙으로 인하여 시스템 복잡도는 다소 증가할 수 있으나 그 효과는 그리 크지 않다.

V. 결론

본 논문에서는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 다이버시티 이득을 유지하면서 시스템 복잡도를 크게 줄일 수 있는 DFT 직교코드를 사용한 그룹별 가변 길이 직교코드 다중화를 이용한 OFDM 전송방식을 제안하였다. 제안된 방식에서는 상호 상관성이 낮은 부반송파들을 하나의 그룹으로 구성하여 부반송파 전체를 다수의 부반송파 그룹으로 나누고, 그룹마다 부반송파 개수와 동일한 길이의 직교코드들을 사용하여 다중화하여 전송한다. 채널 부호화를 적용시와 미적용시 채널추정 오류가 있는 경우에 코드 길이에 따른 시스템 성능 변화를 분석함으로써 부호화 이득과 채널추정 오류가 시스템 성능 및 복잡도 감소에 미치는 영향을 분석하였다. 모의실험을 통하여 전체 부반송파 개수가 192개인 시스템에서 부호화를 적용하지 않는 경우에는 코드 길이가 16인 경우가 부호화를 적용한 경우에는 코드 길이가 6인 경우에 성능 대비 복잡도를 최소로 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 각각의 경우, 기존의 전체 부반송파를 단일 그룹으로 하는 직교코드 다중화 방식과 비교하여 다중화와 역다중화를 위하여 복잡도를 12배, 32배만큼 줄일 수 있었다. 또한 채널추정 오류가 존재하는 경우 채널추정 오류가 클수록, 신호 대 잡음비가 클수록 코드 길이에 따라 성능차이가 크게 나타나지만, 부호화 사용시에는 코드 길이에 따른 성능차이는 무시할 수 있었다.

VI. 참고문헌

- [1] 권기범, 오성근, 선우명훈, "그룹별 가변 길이 직교코드 다중화를 이용한 OFDM 전송방식," JCCI2003, 2003.
- [2] S. K. Oh, K. S. Lee, and M. H. Sunwoo, "A new OFDM transmission scheme using DFT code multiplexing," *Telecomm. Review*, vol. 12, no. 4, pp 554-559, Aug. 2002.
- [3] R. Van Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*, Artech House Publishers, 2000.
- [4] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 5-14, May 1990.
- [5] A. Chini, M. S. El-Tanany, and S. A. Mahmoud, "On the performance of a coded MCM over multipath Rayleigh fading channels," in *Proc. ICC'95*, Seattle, WA, pp. 1689-1694, June 1995.
- [6] N. Morinaga, N. Nakagawa, and R. Kohno, "New concepts and technologies for achieving highly reliable and high capacity multimedia wireless communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, pp. 34-40, Jan. 1997.
- [7] Z. Dlugaszewski and K. Wesolowski, "WHT/OFDM - An improved OFDM transmission method for selective fading channel," in *Proc. SCVT 2000, IMEC*, Leuven, Oct. 2000.
- [8] A. Dekorsy and K. D. Kammeyer, "A new OFDM-CDMA uplink concept with M-ary orthogonal modulation," *European Trans. Telecomm. Related Tech.*, vol. 10, no. 4, pp. 377-389, July-Aug. 1999.
- [9] J. G. Proakis, *Digital communications*, McGraw-Hill, 1989.