

# Complementary Code Scrambling을 이용한 OFDM 시스템의 Peak-to-Average-Power-Ratio 감소 방안

권기범, 오성근  
아주대학교 전자공학부  
경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5번지  
kkb@madang.ajou.ac.kr

## Reducing peak-to-average-power-ratio for OFDM system by using complementary code scrambling

Ki Bum Kwon, Seong Keun Oh  
School of Electronics Engineering, Ajou University

### 요 약

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 사용되는 부 반송파의 수와 동일한 길이의 complementary code를 사용하여 각 부 반송파 데이터를 frequency 영역에서 scrambling하는 PAPR 감소 방안을 제안한다. 이 방법은 부 반송파의 수와 동일한 길이의 complementary code 집합을 이용하여 주어진 데이터에 부가해서 PAPR 값이 가장 적은 complementary code를 사용하여 scrambled된 데이터를 송신함으로써 PAPR 값을 감소시키는 방법이다. 수신기에서의 복호를 위하여  $N_c$ 개의 complementary code에 해당하는  $\log_2 N_c$  비트의 code 인덱스를 데이터와 함께 전송한다. 이때 code 인덱스 비트가 PAPR 값에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 code인덱스와 데이터가 함께 complementary code로 scrambling되어진다. 제안된 이 방법을 사용하면 주파수 대역효율을 높이면서 PAPR 값을 크게 줄일 수 있다.

### 1. 서 론

최근 개인 이동 통신 시스템과 무선 근거리 통신망(LANs)은 무선 통신 시장에서 빠른 속도로 성장하고 있는 대표적인 분야이다. 이와 함께 다양한 서비스의 제공을 위한 고속의 데이터 전송이 요구되어지고 있다. 단일 반송파 전송 시스템은 다중경로 페이딩에 의한 상호 심볼간 간섭(ISI)이 심하여 시스템 성능과 구현할 수 있는 데이터율에 제한이 따르게 된다. 이에 반해 OFDM 시스템은 주파수 영역에서 서로 직교성을 갖는 다중 부 반송파를 이용하여 입력 데이터를 병렬로 처리하고 블록 단위로 전송한다. 그러므로 다중경로 페이딩에 강하고 고속의 데이터 전송에서도 등화가 없이 보호구간을 삽입하는 방법으로 상호 심볼 간섭을 효과적으로 제거할 수 있다. 그리고 각 부 반송파들은 주파수 대역내에서

상호간에 직교성을 유지하며 가까이 위치함으로써 높은 주파수효율을 나타내며 변조와 복조는 FFT/IFFT 알고리즘을 사용함으로써 효율적인 시스템을 간단히 구현할 수 있는 장점이 있다. 그래서 고속의 데이터 전송을 위한 주목받는 통신 기술로 많은 연구가 이루어지고 있다.[1],[2]

이와 같은 OFDM 시스템의 주된 단점 중 하나는 다중 반송파의 사용으로 송신 신호의 일정하지 않은 포락선에 의해 높은 PAPR 값을 나타낸다는 것이다. 따라서, 높은 PAPR 값을 갖는 OFDM 송신 신호는 증폭기의 비선형 특성에 의해 OFDM 주파수 대역내의 간섭 신호 및 인접 주파수 대역 간섭 신호를 야기시키게 된다. 이러한 송신신호의 비선형 왜곡을 피하기 위해 증폭

기의 큰 input-back-off가 요구되어져 복잡하고 비효율적인 선형 증폭기의 사용이 불가피하게 된다. 이와 같은 높은 PAPR 값을 나타내는 OFDM 시스템의 단점을 해결하기 위해 block coding, 사전왜곡, 클리핑 등 다양한 방법들이 제안되고 있다.[3],[4]

Block coding 방법은 본래의 신호에 전혀 왜곡을 주지 않고 PAPR을 줄일 수 있는 장점이 있으나 부 반송파의 수가 증가함에 따라 code rate 과 주파수 효율이 현저하게 떨어지는 단점이 있다. 반면, 사전왜곡과 클리핑 방법은[4] block Coding 방법[3]처럼 redundancy의 부가로 인해 주파수효율이 떨어지는 영향은 없으나 본래의 송신신호왜곡이 불가피하게 된다.

본 논문에서 제안된 방법은 부 반송파의 수와 동일한 길이의 complementary code(이하 CP code)집합 중에서 PAPR 값을 가장 적게 만드는 CP code를 선택하여, 입력되는 데이터와 선택되어진 CP code의 code 인덱스로 구성되는 데이터를 동시에 scrambling함으로써 OFDM 송신신호의 PAPR 값을 감소시키는 방법이다. 선택된 CP code의 정보는 단지  $\log_2 N_c$  비트만을 필요로 하기 때문에 부 반송파의 수가 증가할수록 side 정보를 보내는데 사용되는 용량(redundancy)비트가 다른 block coding 방법과 비교하여 볼 때 매우 적다. 따라서 이 논문에서 제안되어지는 방법을 적용하면 동일한 PAPR 값을 나타내면서 더 높은 주파수 효율을 얻을 수가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서 이 논문에서 제안하는 OFDM 시스템 모델에 대해서 설명하고, 제3절에서 CP code의 생성 방법 및 선택되어진 CP code 정보를 전송하기 위한 code 인덱스의 생성방법에 대해서 설명한다. 제4절에서는 제안된 OFDM 시스템의 성능 분석을 위한 모의 실험 결과를 기술하고, 제5절에서 결론을 맺는다.

## 2. 제안된 OFDM 시스템

OFDM 시스템은 주파수영역에서  $\frac{1}{T_b}$  만큼의 거리를 유지함으로써 서로 직교성을 갖는 여러 개의 부 반송파를 이용하여 한 OFDM 심분주기 동안 블록화 되어진 데이터 심분들을 병렬로 전송한다. 여기서  $T_b$ 는 부 반송파에 입력되는 데이터 심분의 주기이다.

본 논문에서 제안하는 OFDM 시스템의 블록도를 그림 1에 도시하였다. 이 시스템에서는

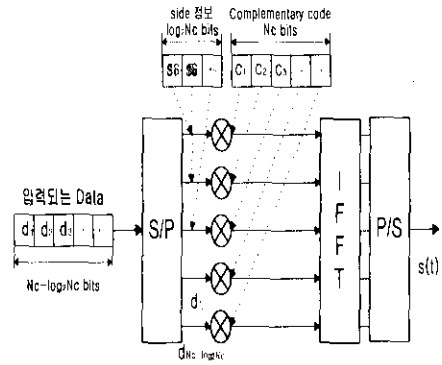


그림 1. 제안된 OFDM 송신 시스템 모델

이와  $N_c$ 인  $N_c$ 개의 CP code set이 사용된다. PAPR 값을 최소로 하는 선택된 CP code가 선택되며 선택된 CP code를 이용하여 데이터와 code 인덱스를 scrambling 하여 전송한다. 선택된 CP code 인덱스는 수신단에서 CP code의 복구를 위하여 side 정보로 전송되며,  $\log_2 N_c$ 비트의 side 정보는 다음과 같이 나타낼 수 있다.  $S^n = [s_0, s_1, \dots, s_{\log_2 N_c - 1}]$ 이다. 길이가  $N_c$ 이고 code 인덱스가  $n$ 인  $C^n = [C_0^n, C_1^n, \dots, C_{N_c - 1}^n]$ 으로 나타내어지고, 전송되는 데이터는  $N_c - \log_2 N_c - 1$  비트가 동시에 전송되며  $d = [d_0, d_1, \dots, d_{N_c - \log_2 N_c - 1}]$ 와 같이 나타내어진다. S/P컨버터를 기친 데이터는 side 정보와 결합되어 다음과 같은  $N_c$  비트의 데이터 block을 구성하며,  $[s_0, \dots, s_{\log_2 N_c - 1}, x_{\log_2 N_c}, \dots, x_{N_c - 1}]$ 와 같이 나타낼 수 있다.

이 논문에서 제안된 OFDM 시스템의 송신신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N_c - 1} x_k C_k^n e^{j2\pi \frac{k}{T_s} t}, \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (1)$$

여기서,  $T_s$ 는 OFDM 심분주기를 나타낸다.

입력되는 데이터에 따라 PAPR 값을 최소로 하는 CP code를 선택하는 과정은 그림2의 흐름도와 같은 방법으로 구현된다. 모든 CP code에 대한 peak 전력 값을 비교하여 가장 작은 peak 전력 값을 갖는 CP code에 의한 신호를 저장하였다가 모든 CP code에 대한 peak 전력값을 비교 한 후에, 저장되어 있던 신호를 사용하여 데이터를 전송 하는 것이다.

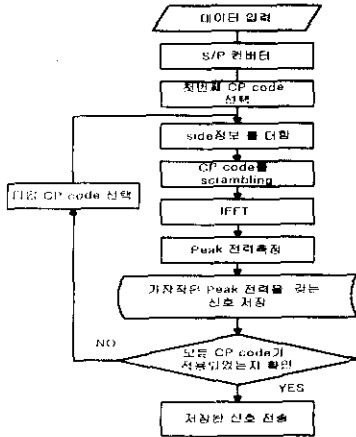


그림 2. 최소 PAPR을 갖는 CP code 선택을 위한 알고리즘

### 3. CP Code 및 Side정보 생성방법

직교성을 갖는 CP code 집합은 다음과 같이 간단한 방법으로 얻을 수 있다.

$$H_{2N}^c = \begin{bmatrix} H_N^c & \bar{H}_N^c \\ H_N^c & -\bar{H}_N^c \end{bmatrix}, \quad H_2^c = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\bar{H}_N^c$ 는  $H_N^c$ 로부터 얻을 수 있는데,  $H_N^c = [A_N \ B_N]$  이라 할 때  $\bar{H}_N^c = [A_N \ -B_N]$ 가 된다. 여기서  $A_N$ 과  $B_N$ 은  $N \times \frac{N}{2}$  행렬이다.[5] 예를 들면,  $N=2$ 인 경우, 다음과 같다.

$$H_4^c = \begin{bmatrix} C^1 \\ C^2 \\ C^3 \\ C^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

여기서  $C^1, C^2, C^3, C^4$ 는 각각 인덱스가 1,2,3,4인 CP code를 나타내고 있다.

위와 같은 방법으로 만들어진  $N_c$ 개의 CP code를 수신기에서 구분하기 위해서는  $\log_2 N_c$  비트의 정보를 필요로 한다. 따라서 각 CP code에 할당되어지는  $\log_2 N_c$ 비트의 side 정보를 생성해서 OFDM 시스템에 적용 해야한다. 그러나 side 정보를 생성하는데 있어서 유의해야 할 것이 있는데, side 정보가 PAPR 값을 더욱 크게 하지 않도록 scrambling 하기 전에 적용되어야 한다는 것과 side 정보가 CP code로 scrambling 되고 난 후에 생성되는  $\log_2 N_c$ 비

트로  $N_c$ 개의 모든 CP code를 구분 할 수 있어야 한다는 것이다. 이 논문에서 제안된 방법은 CP code의 열벡터를 이용하여 code인덱스를 side 정보로 code화하는 것인데 모든 side 정보는  $2N \times \log_2 2N$ 인  $S_{2N}$  행렬로 나타낼 수 있다.

$$S_{2N} = \begin{bmatrix} s^1 \\ s^2 \\ \vdots \\ s^{2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_N & A_N \\ S_N & -A_N \end{bmatrix}, \quad S_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $2N = N_c$ 이고,  $A_N$ 은  $H_N^c$ 행렬의  $\log_2 2N$  번째 열벡터를 나타낸다. 그리고  $s^1, s^2, \dots, s^{2N}$ 는 각각 인덱스가 1,2, ...,  $2N$ 인 CP code의 side 정보를 나타낸다. 부 반송파의 개수가 4일 경우를 예로 들어보면 다음과 같다.

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad S_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} s^1 \\ s^2 \\ s^3 \\ s^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_2 & A_2 \\ S_2 & -A_2 \end{bmatrix}$$

따라서

$$S_4 = \begin{bmatrix} s^1 \\ s^2 \\ s^3 \\ s^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 는 각각 CP code의 code인덱스를 전송하는데 필요한 side 정보이다.

### 4. 성능 분석

모의 실험을 통하여 이 논문에서 제안된 방식을 적용한 OFDM 시스템이 부 반송파의 개수에 따라 갖는 PAPR 값과 scrambling을 하지 않은 원래의 OFDM 시스템의 PAPR 값을 비교하여 제안된 OFDM 시스템의 성능을 분석하고자 한다.

표 1. 제안된 OFDM 시스템의 PAPR

| 부반송파의수      | Maximum PAPR(dB) | 입력 Data bits | 처리된 Data 수 |
|-------------|------------------|--------------|------------|
| 8 Carriers  | 3.0103           | 5 bits       | 32         |
| 16 Carriers | 5.289746         | 12 bits      | 4096       |
| 32 Carriers | 6.867582         | 27 bits      | 1342200    |

이 실험에 적용된 부 반송파의 개수는 8, 16, 32이고 각각의 실험에 적용된 데이터는 BPSK 변조방식을 사용하였다. 제안된 OFDM 시스템과 scrambling을 하지 않은 OFDM 시스템의 PAPR 값은 표 1, 2 와 같다.

표 2. Scrambling을 하지 않은 OFDM 시스템의 PAPR

| 부 반송파의 수   | Maximum PAPR(dB) | 입력 Data bits | 처리된 Data 수 |
|------------|------------------|--------------|------------|
| 8Carriers  | 9.0309           | 8 bits       | 256        |
| 16Carriers | 12.0412          | 16 bits      | 65536      |
| 32Carriers | 13.8917          | 32 bits      | 1342200    |

위의 표에서 부 반송파의 수가 8, 16일 때는 모든 가능한 데이터에 대해서 PAPR 값을 구했고, 32일 때는 전체 데이터수의 1%에 해당하는 데이터를 랜덤하게 발생시켜 PAPR 값을 비교하였다. 위의 결과로 볼 때 8개의 부 반송파의 경우 6dB, 16개의 부 반송파의 경우 6.7dB 의 PAPR 값이 줄어 든 것을 알 수가 있다. 그리고 32개일 때 7dB 정도의 PAPR 값이 줄어 들었다. 32일 때의 결과는 모든 데이터에 대한 정확한 값은 아니지만 랜덤하게 발생시킨 data를 두 OFDM 시스템에 적용하였으므로 비교의 가치는 있다.

Complementary code를 block coding 에 적용하도록 [3]에서 제안되었는데, 주파수 효율을 본 논문에서 제안한 방법과 비교해 보면 다음과 같다.

표 3. CP code를 block coding에 사용하였을 때의 주파수 효율 (BPSK 변조 사용)

| 부 반송파의 수 | PAPR (dB) | 주파수 대역 효율 (bit/s/Hz) |
|----------|-----------|----------------------|
| 8        | 3         | 0.5                  |
| 16       | 6         | 0.5                  |
| 32       | 9         | 0.5                  |

표 4. 제안된 OFDM 시스템의 주파수 효율 (BPSK 변조 사용)

| 부 반송파의 수 | PAPR (dB) | 주파수 대역 효율 (bit/s/Hz) |
|----------|-----------|----------------------|
| 8        | 3         | 0.625                |
| 16       | 5.3       | 0.75                 |
| 32       | 6.9       | 0.8438               |

위의 표에서 알 수 있듯이 CP code를 block

coding 에 적용하는 경우 부 반송 파의 수가 증가 할수록 주파수 효율이 상당히 떨어진다. 이 시스템에서 주파수 효율을 유지하기 위해서는 PAPR의 증가를 감수해야 한다. 그러나 본 논문에서 제안된 OFDM 시스템은 더 낮은 PAPR을 유지하면서 주파수 효율이 부 반송파의 수가 증가 할수록 더욱 좋아지는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 CP code scramble을 이용하여 OFDM 시스템에서 PAPR 값을 줄이는 방안을 적은 수의 code로 PAPR을 줄일 수 있는 특성을 갖는 code를 찾는 것이다. 이 방법을 사용한 OFDM 시스템은 scramble을 사용하지 않은 OFDM 시스템보다 6dB이상 PAPR 값이 줄어드는 것을 확인하였다. 그 밖에 CP code를 blocking에 사용한 방법과 비교 해 보았을 때 PAPR 값과 특히 주파수 효율 면에서 매우 좋은 성능을 갖고 있다는 것을 알 수가 있었다.

그러나 제안된 OFDM 시스템에서 부 반송파의 수와 동일한 수의 모든 CP code를 적용하여야 하는 것이 단점이 되고 있다.

앞으로 좀더 연구되어야 할 것은 적은 수의 code로 PAPR을 줄일 수 있는 특성을 갖는 code를 찾는 것과 보다 간단한 방법으로 PAPR을 줄일 수 있는 방안을 찾는 것이다.

본 연구 과정은 정보 통신 연구관리단에서 「98년 대학기초연구 지원사업」의 일환으로 수행된 결과임.

### Reference

- [1] J.A.C. Bingham, "Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come," IEEE Commun. Mag., vol.28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [2] U.P. Bernhard and J. Meierhofer, "Coded OFDM Transmission High-Speed Wireless Access to ATM Networks," Proc. of Wireless '96, Calgary, pp. 102-115, July 1996.
- [3] Richard D. J. van Nee, "OFDM codes for peak-to-average power reduction and error correction," in IEEE Globecom, London, Nov. 1996, pp. 740-744.
- [4] Thomas May and Hermann Rohling, "Reducing the peak-to-average power ratio in OFDM radio Transmission systems" Proc. IEEE VTC '98, pp. 2474-2478, May 1998.
- [5] Hideki Ochiai and Hideki Imai, "OFDM-CDMA with Peak Power Reduction Based on the Spreading Sequences," IEEE ICC '98, pp. 1299-1303, June 1998.