

OFDM 시스템에서 PAPR 감소방안

*신태철, **김순영, *이문호

전북대학교 정보통신연구소

*전북대학교 정보통신공학과,**컴퓨터공학과

E-mail : tcshin@hanmail.net

요 약

본 논문에서는 차세대 이동통신분야에서 고속의 데이터 전송과 무선 환경극복을 위해 사용되는 OFDM 시스템에서 전송되어지는 신호들의 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)를 감소시키는 방안을 제시한다. PN 시퀀스로 쓰이는 두 개의 직교 시퀀스, 즉 Walsh-Hadamard 시퀀스와 Golay complementary 시퀀스의 PAPR 성질을 살펴보고 그 결과를 보인다. 즉, 상대적으로 적은 채널사용자일 때 Walsh-Hadamard 시퀀스는 매우 큰 PAPR를 가지며, 반면 Golay complementary 시퀀스는 이론값에 근접한 안정된 상태를 보인다. 이 두 시퀀스의 장단점을 이용하여 채널사용자 수에 따른 직교 시퀀스의 결정으로 OFDM 시스템의 PAPR를 줄이는 방법을 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 감소효과를 검증한다.

1. 서 론

MC-CDMA 방식은 다중반송파변조(MCM : Multi Carrier Modulation)를 근간으로 하는 기술로서 고속의 데이터를 여러 개의 병렬 데이터열로 나누어 전송하므로 데이터 심볼구간이 길어지고 심볼간 간섭에 의한 영향이 적어진다. 이 병렬데이터열을 서로 직교적인 반송파에 각각 변조시켜 전송해야 하므로 예전에는 안정된 다수의 반송파용 발진기의 구현이 난제였으나, 이산 푸리에 변환을 DSP기법을 이용하여 등가 신호를 발생시킬 수 있게 됨에 따라 최근에는 CDMA 이동통신방식에 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)기술을 결합하므로써 기존의 DS-CDMA 방식보다 고속 데이터 전송성능이 우수한 MC-CDMA 방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1][2].

다중경로 페이딩 채널 환경에서 MC-CDMA 구조의 주요한 장점이라면 높은 대역 효율성과 채널 페이딩에 강하여 등화기의 구조가 간단하다는 것이다. 또한 앞으로는 CDMA 이동통신에서 무선 인터넷 서비스와 같은 광대역 이동 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해서는 대역

제한된 시스템 환경에서 보다 대역 효율을 갖는 새로운 구조가 요구될 것이다.

다중반송파변조 또는 직교성 주파수분할 다중화 변조시스템(OFDM)은 복잡한 적응등화기의 사용없이 다중경로 페이딩에 강한 성질을 가지고 있어, 차세대 무선통신시스템에 대한 가장 신뢰받는 기술로 알려졌다[3]. 현재 다중반송파 코드분할 다중접속(MC-CDMA) 또는 OFDM-CDMA 라고 불리우는, OFDM과 대역확산 다중화기법이 결합된 새로운 구조가 무선통신시스템과 옥내통신을 위한 시스템으로 주목을 받고 있다. 순방향채널에서의 수많은 이점 때문에 MC-CDMA는 차세대 무선 네트워크에 대한 하나의 기술로 인식되어 있다. 그러나 OFDM 신호는 응용면에서 심각한 제한요소인 큰 평균전력 대 신호전력비(PAPR, peak to average power ratio)를 가지고있고, 또한 MC-CDMA 방식도 기본적으로 OFDM 시스템과 동일하므로, PAPR의 문제점은 계속 남게 된다. OFDM의 PAPR감소를 위해 수많은 방법들이 제안 되어 왔으나, MC-CDMA에 대한 제안들은 현재 많지 않다.

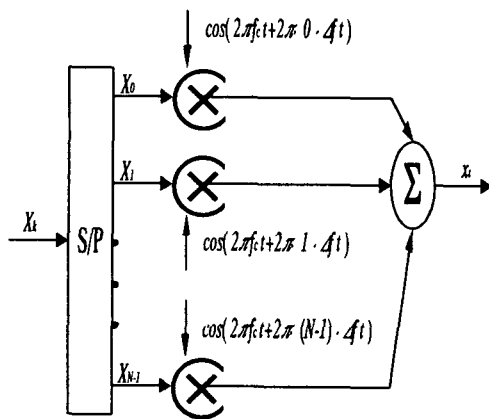
본 논문에서는 대역확산을 위해 두 개의 직

교 시퀀스(Walsh-Hadamard sequence, Golay complementary sequence)를 사용하는 순방향 채널 시스템을 가정하고, 대역확산코드를 이용해서 간단히 PAPR을 감소시키는 구조를 제안한다.

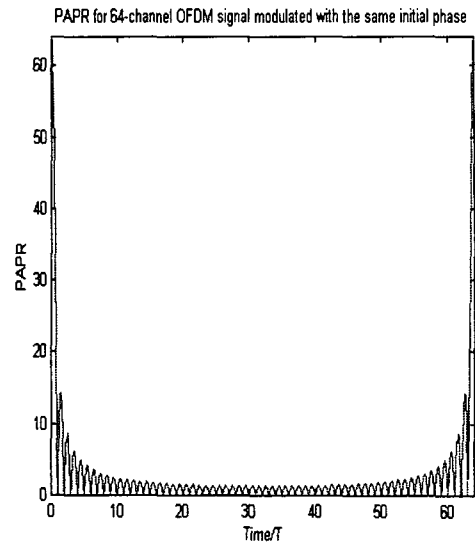
본 논문의 구성은 2장에서 OFDM 시스템에서의 PAPR 특성을 설명하고, 3장에서 효과적인 PAPR 감소 방법에 대해서 설명한다. 4장에서는 제안하는 방법의 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증과 분석을 하고, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 기술한다.

2. OFDM에서 PAPR 특성

OFDM 신호는 [그림 1]과 같이 여러개의 독립적으로 변조된 부채널(M)로 이루어지는데, 이 N 개의 신호가 한 순간에 동일한 위상으로 합쳐졌을 때 PAPR 문제가 발생하게 된다. 예를 들어 [그림 2]는 64 채널 OFDM 시스템에서 입력되는 신호가 모두 같은 이진신호일 경우에 평균전력의 64 배인 PAPR를 표시한 것이다. PAPR의 값이 커지면 송신단과 수신단의 A/D · D/A 변환기의 구조가 복잡해지고, RF 전력선형증폭기에서 효율성이 감소되므로 전체 시스템의 성능을 크게 저하시키는 요인이 된다.



[그림 1] OFDM 시스템의 송신기 구조



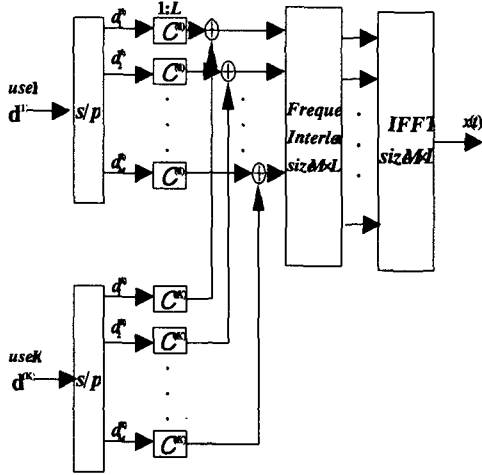
[그림 2] 모든 부채널이 같은 위상을 갖은 상태에서의 OFDM 신호의 PAPR

PAPR 감소를 위해서 여러 기술들이 발표되었는데, 크게 세가지로 구분되어질 수 있다. 먼저, 부채널신호의 최대전력을 비선형적으로 왜곡시킴으로써 PAPR을 감소시키는 신호 왜곡기술(clipping, peak windowing, peak cancellation), 채널코딩기법을 이용한 코딩 기술, 그리고 각각 다른 scrambling 시퀀스를 OFDM 심볼에 곱하여, 그중 가장 적은 PAPR을 가지는 시퀀스를 선택하는 방법 등이 있다 [3].

여러형태의 MC-CDMA가 제안되어 왔으나, 본 논문에서는 주파수 영역에서 대역확산코드를 사용해서 데이터열을 여러 다른 부반송파에 걸쳐 확산하는 시스템 모델 [그림 3]을 사용한다[4]. 대역확산코드로서 직교성이 유지되는 시퀀스가 선호되는데, 이는 직교성이 부반송파간의 상호상관성을 없애주기 때문이며 그로 인해 AWGN 채널상에서 다중사용자간의 간섭을 없앨 수 있다.

순방향 MC-CDMA의 송신기 구조 [그림 3]에서 $\mathbf{d}^{(l)} = [d_1^{(l)}, d_2^{(l)}, \dots, d_M^{(l)}]$ 는 l 번째($l=1, 2, \dots, L$) 사용자의 M 개의 데이터 심볼을 나타낸다. 이 심볼들은 직렬열변환(S/P conversion)를 거친후에, 각각의 심볼은 PN 코드 $\mathbf{c}^{(l)} = [c_1^{(l)}, c_2^{(l)}, \dots, c_L^{(l)}]$ 에 의

해 대역확산된다. 총 사용자 L 명 중에 K 명이 현재 데이터를 전송한다고 가정하면 K 명의 확산데이터 심볼들은 더해지고 주파수 영역에서 인터리빙 된다. 최대 다이버시티 효과를 얻기 위해서, $M \times L$ 블록 인터리버를 사용한다.



[그림 3] MC-CDMA 시스템의 송신기 구조

두 번째 직렬변환(S/P) 후에 인터리브된 $M \times L$ 개의 병렬 데이터들은 변조되기 위해 $M \times L$ 크기의 IFFT에 입력된다. 하나의 OFDM 블록에 ($0 \leq t < T_s$) 대한 기저대역 전송 신호의 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K d_m^{(k)} c_l^{(k)} e^{j2\pi(M \cdot (l-1) + (m-1))t/T_s} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=1}^K d_m^{(k)} c_l^{(k)} e^{j2\pi n t/T_s}
 \end{aligned}
 \quad f(x_n) = \frac{1}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{x_n}{\sigma_s^2}\right)
 \quad (1)$$

여기서 T_s 는 한 OFDM 심볼 주기이고 $n \equiv M \cdot (l-1) + (m-1)$ 이다. 본 논문에서는 guard interval과 ISI의 영향에 관해서는 고려되지 않는다.

OFDM 기법을 CDMA에 적용하는 기본적인 이유는 주파수 다이버시티 효과가기 때문에 시스템 파라미터 L 과 M 은 채널모델에 크게 의존한다. 파라미터 M 은 똑같은 정보를 전송하

는 인접한 부반송파들 사이의 간격에 일치하므로 M 의 결정은 주파수 다이버시티효과를 얻을 수 있도록 크게 선택되어야 한다.

PAPR(Peak to Average Power Ratio)는 다음과 같이 정의된다[3].

$$\lambda = \max_{0 \leq t < T_s} \frac{|x(t)|^2}{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} |x(t)|^2 dt}
 \quad (2)$$

이산적인 표현으로 바꾸면,

$$\lambda = \max_{0 \leq n < N} \frac{\left| \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K d_m^{(k)} c_l^{(k)} e^{j2\pi n k/N} \right|^2}{\sigma_s^2}
 \quad (3)$$

이고,
여기서

$$\sigma_s^2 \equiv N \cdot E \left\{ \left| \sum_{k=1}^K d_m^{(k)} c_l^{(k)} \right|^2 \right\} = MK \cdot E \{ |d_m^{(k)}|^2 \}$$

, $E\{\cdot\}$ 은 기대값을 나타낸다. 중심극한 정리에 의해, 큰 N 에 대해서는, $x(t)$ 의 실수부와 허수부는 $(m, \sigma_s) = (0, 1/2)$ 인 가우시안 분포의 형태로 나타나며, 따라서 OFDM 신호의 진폭은 Rayleigh 분포로, 전력분포는 평균이 0이고 2차 자유도를 가진 chi-square 형태를 가진다 [3]. 즉,

그리고 누적분포함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Prob[x_n < X_0] &= \int_0^{X_0} f(x_n) dx_n = 1 - \exp\left(-\frac{X_0}{\sigma_s^2}\right) \\
 &= 1 - \exp(-z) \\
 &= F(z)
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

여기서 $z = X_0/\sigma_s^2$ 이다. 따라서 OFDM 시스템에서 PAPR이 어떤 값 이하로 가질 확률은

$$P(\text{PAPR} \leq z) = F(z)^N = (1 - \exp(-z))^N \quad (6)$$

이고, 그러므로 N 샘플중에서 어떤 PAPR값 ($\lambda_0 = X_0/\sigma_s^2$)을 넘는 샘플들의 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Prob}[\lambda > \lambda_0] &= 1 - \prod_{n=0}^{N-1} \text{Prob}[x_n/\sigma_s^2 < X_0/\sigma_s^2] \\ &= 1 - \{1 - \exp(-\lambda_0)\}^N \end{aligned} \quad (7)$$

3. PAPR 감소방안

MC-CDMA 시스템에서 PN 시퀀스 $\mathbf{c}^{(i)}$ 로 서, 다음 두 개의 직교시퀀스가 쓰인다[5].

3.1. Walsh-Hadamard(WH) 시퀀스

Walsh-Hadamard 시퀀스의 직교코드는 다음 기본식에 의해 반복적으로 생성되어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{2N}^W &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_N^W & \mathbf{H}_N^W \\ \mathbf{H}_N^W & -\mathbf{H}_N^W \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}_2^W &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} + & + \\ + & - \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

역방향 MC-CDMA에 대한 대부분의 모델은 WH 시퀀스의 간단한 부호화 때문에 WH 시퀀스를 사용한다. 그러나 만약 active user의 수가 매우 적을때는, 이러한 WH 시퀀스는 매우 큰 순간 전력을 유발한다.

3.2 Complementary(CP) Golay 시퀀스

비슷한 방법으로, 직교성을 가진 complementary Golay 시퀀스들은 다음과 같이 생성되어진다.

$$\mathbf{H}_{2N}^C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_N^C & \overline{\mathbf{H}}_N^C \\ \mathbf{H}_N^C & -\overline{\mathbf{H}}_N^C \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_2^C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} + & + \\ + & - \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $\overline{\mathbf{H}}_N^C$ 은 \mathbf{H}_N^C 의 행렬에서 오른쪽의 열들이 반전됨을 의미한다. $\mathbf{H}_N^C = [\mathbf{A}_N \ \mathbf{B}_N]$

(여기서 \mathbf{A}_N 과 \mathbf{B}_N 은 $N \times \frac{N}{2}$ 크기의 행

렬)이라면, $\overline{\mathbf{H}}_N^C = [\mathbf{A}_N \ -\mathbf{B}_N]$ 이다.

CP와 WH 시퀀스의 성질은 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_N^C \cdot \mathbf{H}_N^{CT} = \mathbf{I}_N \quad (10)$$

\mathbf{I}_N 은 $N \times N$ 크기의 항등행렬을 의미하고, 따라서 위식은 직교성을 나타내며, 각각의 행은 complementary Golay 시퀀스로 이루어져 있다.

주파수영역에서 시퀀스의 자기상관함수와 시간영역에서의 전력스펙트럼함수는 푸리에변환 쌍이므로, 시퀀스의 PAPR 성질은 주파수영역에서의 시퀀스의 자기상관함수의 sidelobe 의해서 측정할 수 있다. 만약 sidelobe이 큰 값을 가지면, PAPR값 또한 크다. 단일사용자일 때, WH 시퀀스는 위에서 설명한 것과 같이 최대 PAPR값을 가지며, 결과적으로 적은 사용자에 대해서 WH 시퀀스를 확산코드로 쓰는 MC-CDMA 신호는 매우 큰 PAPR값을 가질 수 있다. 또한 블록 인터리빙은, 동일한 간격으로 인터리브된 시퀀스의 자기상관함수의 sidelobe은 변하지 않기 때문에, PAPR 성질에 영향을 주지 않는다. 그러나 WH 시퀀스가 중첩된 형태는 이와 같은 원하지 않는 성질을 가지지 않는다. 더구나 액티브 유저(K)가 큰 경우에는 중첩된 시퀀스는 여러 부채널의 원소를 상쇄시키는 경향이 있어서 실제 전송되는 부채널의 수를 감소시킨다. 그리고 만약 실제 전송되는 부채널이 평균 전력의 변화없이 감소된다면, 실제 PAPR은 더 낮아진다. 그러므로 만약 K/L 의 비율이 항상 1과 가까우면, 위상구조는 효과적으로 PAPR를 감소될 수 있다. 그러나 피크전력을 감소시키기 위해 교의로 사용하지 않는 시퀀스로 추가하여 모든채널(L)이 동

작하게 하면 페이딩 채널상의 수신기에 심각한 다중사용자 간섭과 상당한 전력손실이 발생할 수 있다.

직교성을 가진 complementary 시퀀스 사용의 아이디어는 만약 오직 단일 사용자가 하나의 심볼을 전송할 경우, 즉 $K=M=1$, 얻을 수 있는 PAPR은 항상 3dB 이하다는 점이다. 비록 이 성질이 다중사용자의 신호들이 여러 심볼과 중첩되는 역방향 OFDM-CDMA에 대해서는 부적당할 수도 있으나, 만약 K/L 이 작다면 CP 시퀀스는 WH 시퀀스보다 매우 적은 PAPR값을 발생할 것이다. MC-CDMA 신호는 OFDM 시스템과 똑같은 방법으로 생성되어지므로, OFDM 시스템에 제안되었던 최대전력 감소기법들은 MC-CDMA에 적용할 수 있다. 전송하기 전에 여러 OFDM 블록을 선택하는 방법[6][7]은 약간의 변형을 통해서 MC-CDMA의 큰 PAPR을 생성하는 확률을 감소시키는데 적용되어질 수 있다.

WH와 CP의 시퀀스들의 선택적으로 사용해서, 식(7)의 PAPR λ_0 를 넘는 확률을 줄일 수 있다. 각 유저들은 동시에 M개의 심볼들을 각 OFDM 블록에 전송하므로, 시퀀스의 여러 생성패턴이 OFDM 블록에 적용될 수 있다. 시스템에서 각 유저들은 동시에 M개의 symbol들을 각 OFDM block에 전송하게 되므로, 각 OFDM 블록구간에서는 독립적으로 여러 다른 PN 시퀀스의 생성방법이 있을 수 있다.

G_m 를 m번째 심볼에서 사용된 PN 시퀀스라고 가정하고 WH와 CP를 각각 $G_m=0$ 과 $G_m=1$ 라고 하자. 그러면 전체 심볼에 대한 스프레드 시퀀스는 2^M 가지의 패턴이 될 수 있다.

$$G_p = \{G_1, G_2, \dots, G_M\}, (P \in \{1, 2, \dots, 2^M\}) \quad (11)$$

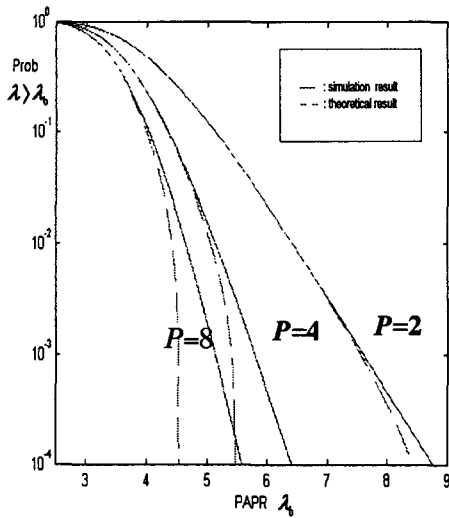
본 논문이 제안하는 PAPR 감소의 기본 방법은 미리 예측된 여러 시퀀스로 인해 발생된 신호중에서 최소의 PAPR를 갖는 신호를 전송하는 것이다. 따라서 각각의 G_p 에 대한 변조기가 필요하고(즉, 최대 $P=2^M$ 개), 또한 이렇

게 변조된 신호의 PAPR를 비교하고 최소의 값을 가지는 비교·선택기가 필요하게 된다. 미리 예측된 시퀀스를 나타내는 크기가 $\log_2 P$ 의 추가 정보를 보냄으로 인해, 수신기의 구조는 이 추가 정보를 분리할 수 있는 기능만 추가하고 다른 면에서는 기존의 수신기와 같은 구조이면 신호를 복조 할 수 있다. 여기서 추가 정보는 user channel의 일부를 사용해서 FFT block에 입력될 수 있다. 만약 생성된 신호들이 통계적으로 독립이면, 어떤 PAPR값을 넘는 최종 신호의 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Prob} \left[\min_{1 \leq p \leq P} \lambda > \lambda_0 \right] \\ = \text{Prob}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p > \lambda_0] \\ = [1 - \{1 - \exp(-\lambda_0)\}]^P \end{aligned} \quad (12)$$

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

시뮬레이션은 AWGN 환경에서 부채널이 64 ($L=8, M=8$)인 MC-CDMA 시스템과 QPSK 변조방식에서 수행되어졌다. $M=8$ ($2^M=256$)의 모든 경우에서 $P=8$ 까지의 심볼 시퀀스를 랜덤하게 추출하여 실험했다. $K=6$ 인 경우에 대해서 $P=2, 4, 8$ 의 결과는 [그림 4]와 같다. 앞에서 언급했듯이, P 의 값이 증가함에 따라 신호의 peak 감소는 현저히 나타남을 알 수 있다. P 의 증가함에 따라 시뮬레이션값과 이론값의 차는 더욱 커지는데, 이는 실제 P 가 커짐에 따라 생성된 신호들이 독립성을 유지하지 못하기 때문이다. 본 논문에서 제안된 PAPR 감소방법에 따른 단점은, 전송지연을 피하기 위해서 송신기에 병렬적으로 연결된 $P(=2^M)$ 개의 변조기가 필요하다는 것인데, 따라서 이는 시스템의 복잡성이 그다지 큰 문제가 되지 않는 다운링크 시스템에 적합함을 알 수 있다.



[그림 4] $K=6$ 인 경우에 대해서 $P=2, 4, 8$ 의 결과.

5. 결론

본 논문에서는 MC-CDMA에서의 PN 시퀀스로 쓰이는 WH 시퀀스의 PAPR 특성을 살펴 보았고, 채널 사용자가 적을 때의 WH 시퀀스의 단점을 Complementary Golay 시퀀스로 보상하는 방법으로 Multicarrier 시스템의 PAPR를 개선했다. 본 논문에서 제안한 방식으로 시스템을 구성했을 때 다운링크에서 수신기는 큰 수정없이 개선된 PAPR를 갖을 수 있음을 알 수 있다.

[참고문헌]

- [1] Shinsuke Hara, Ramjee Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA", IEEE Communications Magazine, December 1997, pp 126~133.
- [2] S. Hara, R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA," IEEE Commun. Mag., vol. 35, no.12, Dec. 1997.
- [3] Richard van Nee, Ramjee Prasad, OFDM Wireless Multimedia Communications, Artech House, 2000.

[4] K. Fazel, S. Kaiser and M. Schnell, "A Flexible and high performance cellular mobile communications system based on orthogonal multicarrier SSMA", *Wireless Personal Commun.* vol. 2, pp. 121-144, 1995.

[5] Hideki Ochiai, Hideki Imai, "OFDM-CDMA with Peak Power Reduction Based on the Spreading Sequences" *ICC 98*, pp 1299-1303

[6] D.J.G. Mestdagh and P.M.P. Spruyt, "A method to reduce the probability of clipping in DMT-based transceivers", *IEEE Trans. Commun.*, vol COM-44, no.10, pp.1234-1238, Oct. 1996.

[7] R.W. Bauml, R.F.H. Fischer and J.B. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping", *Electron. Lett.* vol. 32, no 22, pp. 2056-2057

[8] Soon Young Kim, Moon Ho Lee, "Performance Evaluation of Turbo Coded MC-DS/CDMA in Wireless Communication Channels", ITC-CSCC '99, July 13~15,1999

[9] 이문호, 실용 디지털통신, 도서출판 영일, 1998.

**“본 연구는 정보통신부의 정보통신
우수 시범학교 지원 사업에 의하여 수
행되었습니다.”**