

## Adaptive beamforming for a PF-OFDM system using LMS algorithm

吳俊錫<sup>†</sup> · 柳京烈<sup>\*</sup>  
(Jun-Suk Oh · Kyung-Rul Yoo)

**Abstract** - The orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) technique is well known to be robust against the frequency-selective fading in wireless channels. It is due to the exploitation of a guard interval that is inserted at beginning of each OFDM symbol. Based on the conventional OFDM and a polyphase filtered orthogonal frequency division multiplexing (PF-OFDM) technique, we developed an adaptive beamforming algorithm for antenna arrays. The proposed algorithm would lead to an efficient use of channel, since it is possible to eliminate a guard interval and also easily suppress interchannel interference at the same time. In this paper, a series of computer simulations have been provided to show the performance of the proposed system.

**Key Words** : OFDM, LMS, Beamforming, PF-OFDM, 멀티플렉서

### 1. 서 론

제한된 주파수 채널 자원을 최대한 활용하기 위하여 다양한 연구가 진행되어 있다. 이러한 노력의 일환으로 최근에는 전파 전파(wave propagation)의 지향적인 특성을 최대한 활용하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1]. 특정한 방향에서 입사되는 수신 신호만을 선별적으로 안테나에서 수신할 수 있다면, 간섭과 시간확산을 감소시킬 수 있음은 물론, 서비스 영역을 확대하고 페이딩에 대한 대응책을 제시할 수 있다. 이러한 목적을 위하여 개발된 기기가 빔포밍(beam forming) 기법에 기반한 적응 안테나이다. 적응 안테나가 전파를 지향적으로 송수신함으로써 전력 효율의 증대와 더불어 불필요한 간섭을 줄여 기지국당 수용범위 및 가입자 용량을 증대시켜주는 유효한 방법으로 OFDM 시스템을 기반으로 하는 적응 빔포밍이 연구되고 있다. 현재까지 연구되고 있는 OFDM을 기반으로 하는 빔포밍 시스템은 스펙트럼 효율이 좋다는 장점을 가지고 있지만 다음과 같은 개선의 여지를 지니고 있다. 먼저 기저함수의 특성 상 인접한 OFDM 부대역으로 전송된 신호 스펙트럼이 서로 중첩되고, 이는 ISI(intersymbol interference)의 원인이 된다. OFDM에서는 ISI를 최소화하기 위하여 보호구간(guard interval)을 사용하고 있으나, 고속 데이터 전송의 경우 주파수 효율을 감소는 피할 수 없다. 아울러, DFT(discrete fourier transform) 기저함수 스펙트럼의 측엽(sidelobe)이

-13dB 정도로 비교적 크기 때문에 ICI(interchannel interference)와 협대역 간섭이 발생하는 것으로 알려져 있다. OFDM의 장점을 유지하면서 그 단점을 보완하는 여러 기법이 발표된 바 있으며, 이들 중 대표적인 것이 OFDM/OQAM(OFDM with offset QAM), MDFT(modified DFT), 그리고 PF-OFDM(polyphase filter-based OFDM) 기법 등이 있다. 특히 PF-OFDM 기법은 국부화된 기저함수를 최적으로 설계하여 보호구간 없이도 ISI를 현저히 감소시키는 것은 물론 ICI 역시 완화시킬 수 있다. 본 논문에서는 PF-OFDM 통신 시스템에서 동작하는 적응 빔포밍을 설계하였다. I/DFT(inverse and forward DFT)와 직/병렬 변환기로 구성된 OFDM 시스템의 기존 골격에 다상 필터와 up/downsampler를 첨가하여 시스템을 구성하였다[2].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 다상필터 OFDM 송수신기의 유도과정과 특징을 설명하였다. 2.2절에서는 다상필터 기반 OFDM 시스템을 위한 빔포밍 구조에 대해 설명하였다. 마지막으로 3장에서는 다상필터 기반 OFDM의 빔포밍의 실험 결과를 보이고 그에 대한 고찰을 하였다.

### 2. 다상필터 OFDM 및 적응 빔포밍의 구현

#### 2.1 다상필터 OFDM

OFDM 시스템이 가지고 있는 ISI와 ICI의 문제를 극복하기 위해 보호구간을 삽입하는 방법을 사용하고 있으나, 이는 스펙트럼 효율을 저하시킨다. 또한, 변조과정에서 DFT에 기반한 필터를 사용하여 부반송파의 첫 번째 사이드로브(sidelobe)의 레벨이 -13dB 정도로 매우 높기 때문에, 부반송파 사이에 심한 스펙트럼 중첩이 발생한다. 이것은 ICI와

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 漢陽大 工大 電子工學科 碩士課程

E-mail : land2sky@empal.com

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 漢陽大 工大 電子工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2005年 10月 12日

最終完了 : 2005年 12月 23日

협대역 잡음 간섭 등의 문제를 초래한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 필터뱅크 이론에 기반한 변환다중장치의 개념을 기반으로 하는 기법이 제시되고 있다. 그중 변환다중장치 기법을 기용한 방식은 크게 두 가지 장점을 갖는다. 첫째, ISI의 제거를 위해 사용되는 보호구간이 불필요하게 된다. 필터뱅크 관점에서 OFDM과 같은 DFT 기반 다중반송파 전송기법은 구형파를 원형필터로 사용하여 변조함으로써 부반송파를 만드는 것으로 해석할 수 있다. 둘째, 원형필터가 주파수 영역에서 높은 저지대역 감쇠 특성을 갖도록 설계할 수 있기 때문에 ICI와 협대역 잡음 간섭을 줄일 수 있다. 그러나 이러한 접근 방법에는 입력 신호를 실수 형태로 처리하기 때문에 I/Q(in-phase and quadrature) 신호를 독립적으로 처리해야 하며, 일반적인 필터뱅크를 사용하는 구조, 즉, I/DFT가 없는 구조이므로 기존의 OFDM과 상이한 송수신기 구조를 피할 수 없다. MDFT 변환다중장치를 OFDM 송수신기와 역호환성을 갖도록 한 개의 I/DFT 다상필터뱅크를 갖는 구조로 변환한 것이 다상필터 OFDM(PF-OFDM) 시스템이다.

한 개의 I/DFT를 갖는 다상필터 OFDM 송수신기는 OFDM 시스템의 기본 블록인 I/DFT와 직렬/병렬변환기, 그리고 추가 블록인 다상필터, up/downsampler로 구성되어 있다. 다상필터 OFDM 송수신기는 MDFT 변환다중장치의 블록들을 효율적으로 재정렬함으로써 구현된다. 먼저 MDFT 송수신기를 구성하는 두 개의  $M \times M$  I/DFT 다상필터뱅크를 한 개로 합치기 위하여 임시로 재구성한다. 첫 번

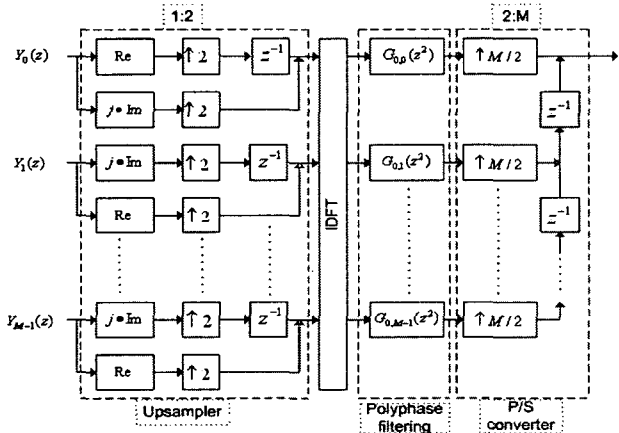


그림 1 다상 필터 OFDM 송신기  
Fig. 1 PF-OFDM transmitter

째로 송신기에서 지연  $z^{-M/2}$ 를 IDFT 블록앞으로 옮기고 upsampling 연산인 ( $\uparrow M$ )을 ( $\uparrow 2$ )와 ( $\uparrow M/2$ )으로 나눈다. 두 번째로 위와 아래의 IDFT 다상 필터뱅크가 같은 구조를 갖기 때문에 하나의 IDFT 다상 필터뱅크로 결합시킨다. 마지막으로 ( $\uparrow M/2$ )를 다상 필터 뒤에 위치시키고,  $G_{0,k}(z^M)$ 은 upsampling 일치 연산을 적용하면 결과적으로  $G_{0,k}(z^2)$ 으로 대체된다. 송신기도 같은 단계를 거치면, 다상필터 OFDM 수신기를 쉽게 얻어진다. 그림 1, 2는 최종적인 다상 필터 OFDM 송수신기를 보여주고 있다.

다상 필터의 도입으로 인하여 다중경로 페이딩 채널에서 ISI와 ICI를 완화시킬 수 있다. 그림 1과 그림 2에서 보여지

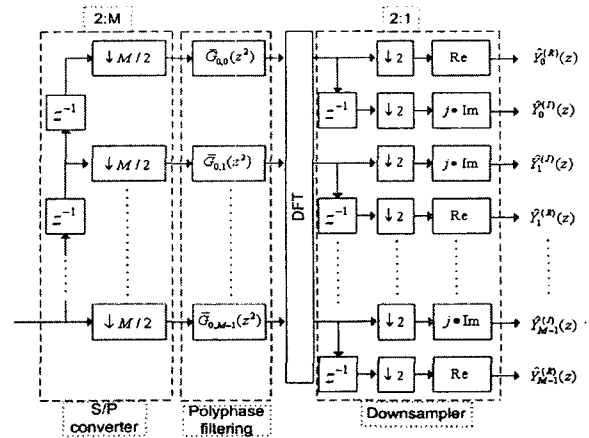


그림 2 다상 필터 OFDM 수신기  
Fig. 2 PF-OFDM receiver

는 다상 필터의 형태는 각 부밴드를 구성하는데 시간과 주파수 영역에서 국부화된 원형필터가 사용이 되면, 다상 필터 OFDM 시스템은 ISI에 영향을 덜받게 되고, ICI를 줄이는데 용이하다. 다상 필터, 즉 원형필터는 채널 환경이나 다양한 응용분양에 맞게 적용시킬 수 있다. 기존 OFDM 송수신기와 다상 필터 OFDM 송수신기의 호환성, 즉 다상 필터 OFDM 송수신기를 이용해서 OFDM 신호를 보낼 때, 다상 필터 송수신기에서 up/downsampler와 다상 필터를 우회시키고, 직렬/병렬 변환기의 up/downsampler비율을  $M/2$ 에서  $M$ 으로 증가시킨다. 그림 3에서는 기존의 OFDM 시스템과 호환성을 유지하며, 스펙트럼 효율성을 갖는 다상 필터 OFDM 시스템의 블록을 보여주고 있다.

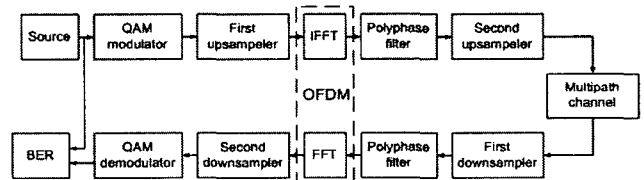


그림 3 다상 필터 OFDM 시스템 구성  
Fig. 3 PF-OFDM System architecture

## 2.2 다상필터 OFDM 시스템을 위한 빔포밍 구조

다상 필터 기반 OFDM 시스템을 적용한 빔포밍의 구조는 그림 4와 같다. 기존 OFDM 방식의 빔포밍 설계와 유사한 구조를 가지고 있음을 볼 수 있다. 구조적인 측면에서 대표적인 차이점은 기존 OFDM 송수신기와 다상 필터 OFDM 송수신기의 호환성을 위해 직렬/병렬 변환기의 up/downsampler비율을  $M/2$ 에서  $M$ 으로 증가시킨 후,  $M \times M$  IDFT 다상 필터뱅크 구조를 적용한 곳에서 찾을 수 있다. 비록 단순한 변화임에도 불구하고 기존 OFDM 시스템의 빔포밍과 호환성을 유지하는 동시에 다상 필터 OFDM의 고유 장점인 다중 경로에서 지연으로 인해 발생하는 연속한 심볼에 대한 간섭을 최소화 할 수 있다. PF-OFDM의 채널상에서 전송된 파일럿 심볼과 수신된 파일럿 심볼사이의 에러 신호는 적응 빔포머를 위한 가중치

갱신을 위해 사용된다. 즉 파일럿 심벌의 제곱오차를 최소화 하는 MSE 방식에 의해 유도된다. 시간 영역에서 파일럿 심벌의 응답하는 MSE는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$E[e_p^2(n)] = E[E_p^H(n) E_p(n)] \quad (1)$$

$$E_p(n) = X_{p,m}(n) - \tilde{X}_p(n) \quad (2)$$

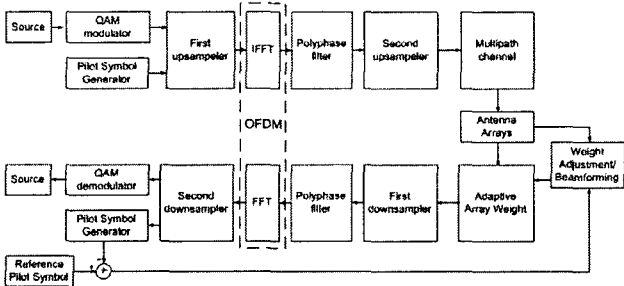


그림 4 다상 필터 OFDM 기반 적응 빔포머  
Fig. 4 Adaptive beamformer based on PF-OFDM System

$E_p(n)$ 은  $m$ 번째 사용자의 파일럿 심벌의 에러 벡터, 즉 송신된  $X_{p,m}(n)$ 의 파일럿 벡터를 이에 응답하는 수신 파일럿 신호  $\tilde{X}_p(n)$ 와의 차이이다. 시간 영역에서 빔포머의 가중치를 갱신하기 위해서는 에러 신호도 반드시 시간 영역에서도 이용할 수 있어야 한다. 하지만 실제적인 상황에서는 송신된 파일럿 벡터에 해당하는 수신 신호를 수신측에서 분간해 내기가 어렵다. 그래서 다른 방법으로 시간 영역에서의 얻어진 신호를 주파수 영역에서의 에러 벡터로 변환하여 표현하는 방법을 이용할 수 있다. 즉 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$E_p(n) = F_p^H(n) E_p(n) \quad (3)$$

$$X_{p,m}(n) = F_p^H(n) Y_p^H(n) \quad (4)$$

$$\tilde{X}_p(n) = F_p^H(n) \tilde{Y}_p(n) \quad (5)$$

$$F_p(n) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{2\pi(N-1)dn}{N}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi(N-1)(N-1)dn}{N}} \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi(N-1)dn}{N}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi(N-1)(N-1)dn}{N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi(N-1)dn}{N}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi(N-1)(N-1)dn}{N}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

시간 영역에서 빔포머를 위한 가중치 벡터의 갱신은 일반적으로 복소 LMS 알고리즘을 이용하여 다음과 같이 필터계수를 갱신 한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(n+1) &= \mathbf{W}(n) - \mu \frac{\delta E[e^2(n)]}{\delta \mathbf{W}^*} \\ &= \mathbf{W}(n) - 2\mu \frac{\delta E_p^H(n)}{\delta \mathbf{W}^*} E_p(n) \end{aligned} \quad (7)$$

시간 영역에서의 에러 벡터와 기울기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p(n) = X_{p,m}(n) - V^H(n) \mathbf{W}(n) \quad (8)$$

$$\frac{\delta E_p^H(n)}{\delta \mathbf{W}^*} = -\mathbf{V}(n) \quad (9)$$

식 (8), (9)를 식 (7)에 적용을 하게 되면 최종적인 PF-OFDM 빔포머의 안테나 배열을 위한 갱신 과정은 다음과 같다.

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\mu \mathbf{V}(n) F_p^H(n) (Y_{p,m}(n) - \tilde{Y}_p(n)) \quad (10)$$

식 (10)에서 알 수 있듯이 주파수 영역에서의 에러 신호는  $F_p^H(n)$ 에 의해서 송신된 파일럿 심벌과 수신된 심벌간의 에러를 주파수 영역에서 계산한 후에 시간 영역 에러 신호로 변환 되어진다. 이러한 계산 과정을 거친 후에 시간 영역에서의 에러 신호를 이용하여 가중치는 갱신된다. 빔포머의 가중치는 빔의 원하는 방향을 형성하기 위해서 MSE가 최소가 되는 방향으로 갱신되어진다.

### 3. 모의실험

논문에서 제시한 빔포머의 특성을 검증하기 위하여 기존 OFDM 기반의 빔포머와 그 성능을 비교하였다. 가능한 범위 내에서도 시스템이 동일한 사양을 갖도록 설계하였다. 다상 필터 OFDM 시스템이 갖는, 기존 OFDM 기법 대비 향상된 채널효율이 실질적인 빔포머 구현에서 부작용 없이 유지될 수 있는지를 검증하고자 하였다. 먼저 모의실험에서 사용한 구조는 표 1과 같다.

표 1 모의 실험 매개변수  
Table 1 Simulation factors

	PF-OFDM	OFDM
Carrier frequency	5GHz	
Sampling frequency	20MHz	
Modulation	QPSK	
Demodulation	Coherent	
Number of FFT point	64	
Number of subcarrier	64	
Useful OFDM symbol duration	3.2μs	
Guard interval duration	0	0.8μs
Overall useful symbol duration	3.2μs	4μs
Number of data symbols per frame	6	
Maximum Doppler frequency	150 Hz	
Mobile velocity( km/h)	70 , 120 , 200	

정방향에서 전송되는 신호와 함께  $\pm 45^\circ$ 의 방향에서 각각 20과 30-dB의 SNR 값을 갖는 간섭신호가 있다고 가정하였다. 그림 5는 본 논문에서 제안한 빔포머의 계수식 식(10)을 통하여 구성된 빔 패턴을 부여하고 있다.  $\pm 45^\circ$ 의 방향에 각각 null이 형성되어 간섭신호를 제거하고 있음을 볼 수 있다. 그림 6, 그림 7, 그리고 그림 8은 제안된 빔포머와 기존 OFDM 빔포머의 BER 특성곡선을 보여주고 있다. 최대 도플러 주파수가  $f_d=150\text{Hz}$ 일 때, 보호구간이 삽입된 기존 OFDM과 제안된 PF-OFDM에서 모바일 속도 변화에 따라서 두 시스템은 거의 동일한 성능을 보여주는 것을 알 수 있다. 즉 PF-OFDM에서는 OFDM에서 사용된 32블럭의 보호구간이 없이 유사한 BER 성능을 보이고 있음을 볼 수 있다.

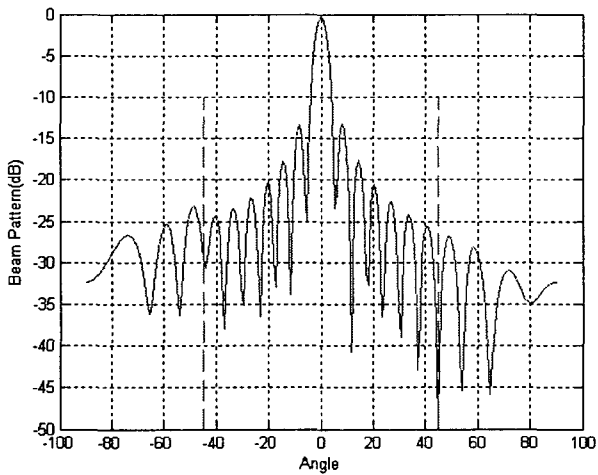


그림 5 2개의 간섭신호에 대한 빔패턴  
Fig. 5 Beam-pattern with two inserted signals

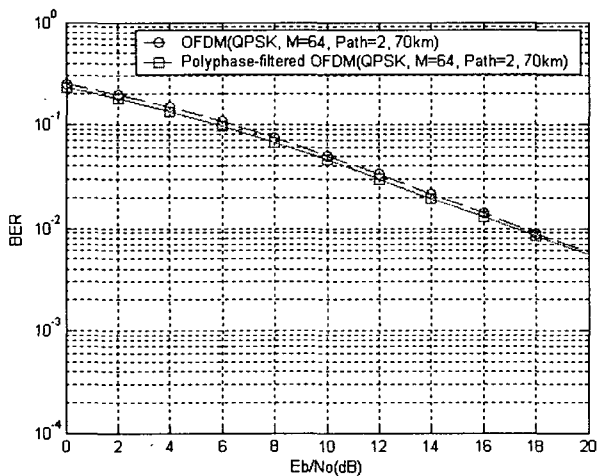


그림 6 모바일 이동속도  $70\text{km/h}$ 일 때, BER  
Fig. 6 BER, when the mobile velocity  $70\text{km/h}$

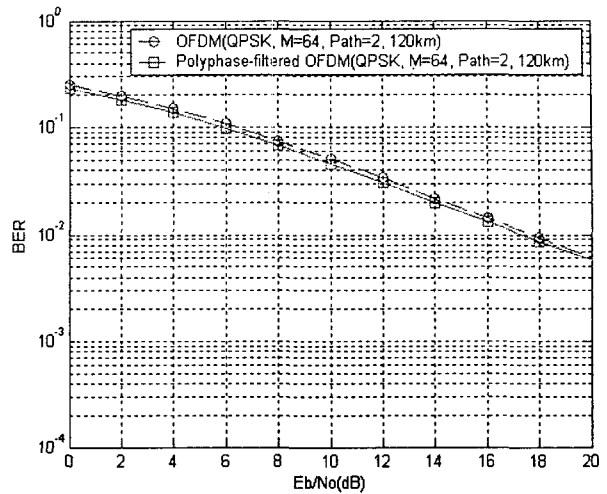


그림 7 모바일 이동속도  $120\text{km/h}$ 일 때, BER  
Fig. 7 BER, when the mobile velocity  $120\text{km/h}$

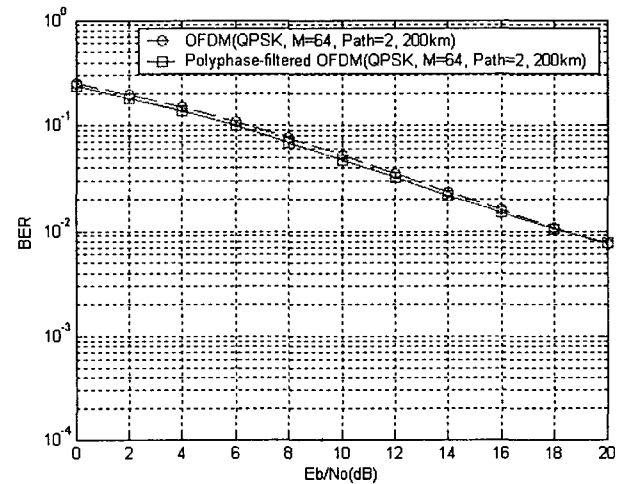


그림 8 모바일 이동속도  $200\text{km/h}$ 일 때, BER  
Fig. 8 BER, when the mobile velocity  $200\text{km/h}$

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 OFDM 시스템과 호환성을 유지하며, 향상된 스펙트럼 효율성을 갖는 다상 필터 OFDM 송수신기 구조를 기반으로 하는 빔포머를 설계하였고, 그 특성을 검증하였다. 기존 OFDM 시스템과 호환성은 MDFT 변환 다중장치의 변환을 통해 구조적으로 동일함을 증명하였다. 특히 다른 필터뱅크를 이용한 변환다중장치들이 복소수 입력을 실수부와 허수부로 독립적으로 처리하는데 반해, 제안된 시스템은 복소수 입력을 동시에 처리 가능하다는 장점을 가진다. 다중경로 채널 환경하에서 기존 OFDM의 경우  $4\mu\text{s}$ 의 심벌주기가 소요되는 반면, 다상필터 OFDM에서는  $3.2\mu\text{s}$ 의 심벌주기가 소요된다. 즉 두 시스템을 비교하였을

때, 다상 필터 OFDM 시스템은 보호구간을 쓰지 않기 때문에 20%의 향상된 데이터 전송효율을 갖는다. 이러한 탁월한 주파수 효율성과 함께 동일한 빔포머 구조에서 기존 OFDM 시스템에 필적하는 BER 특성을 갖고 있음을 실험에서 검증하였다. 결과적으로 높은 스펙트럼 효율성과 기존 OFDM과 비슷한 BER성능을 보장하는 것으로 해석할 수 있다. 본 논문의 결과가 다상 필터 OFDM 시스템의 응용 범위를 확대할 것으로 사료된다. 아울러, 차세대 통신시스템의 변화에 따라 이동환경에서의 특성을 검증하고, 보완하는 방향의 연구가 진행되어야 할 것이다.

**참 고 문 헌**

[1] J. S. Thompson, P. M. Grant, B. Mulgrew, "Smart Antenna Arrays for CDMA Systems," IEEE Pers. Comm., pp.16-25, October 1996.  
 [2] C. S. Lee and K. Y. Yoo, "Polyphase filtered OFDM transmission system," IEEE Electronics Letters, vol. 40, pp.687-688, May 2004  
 [3] A. F. Naguib, A. Paulraj, T. Kailath, "Capacity Improvement with Base-Station Antenna Arrays in Cellular CDMA," IEEE Trans. Veh. Tech., vol.43, no.3, pp.691-698, August 1994.  
 [4] C. K. Kim, "Adaptive beamforming for an OFDM system," IEEE Pers. Comm., pp.484-489 Dec. 1999

**저 자 소 개**



**오 준 석 (吳 俊 錫)**

1977년 5월 8일생. 2004년 한양대 전기 전자공학과 졸업. 2004년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정  
 Tel : 031-400-4111  
 Fax : 031-400-4111  
 E-mail : land2sky@empal.com



**유 경 렬 (柳 京 烈)**

1953년 3월 14일생. 1979년 한양대 졸업. 1983년 동 대학원 대표학과 졸업(공학). 1997년~현재 한양대 조교수  
 Tel : 031-400-4111  
 Fax : 031-400-4111  
 E-mail : drwhoyoo@hanyang.ac.kr