

**LMS기반 PF-OFDM에서의 적응 빔포밍 설계**

오준석, 김재윤, 유경렬  
 한양대학교 전자전기제어계측공학과

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

Jun-Suk Oh, Jae-Yun Kim, Kyung-Yul Yoo

Dept. of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University

**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.

**1. 서 론**

기지국에 배열 안테나를 적용하는 것은 사용자들의 공간적인 분포 상태에 따라 전파를 지향적으로 송수신함으로써 전력 효율의 증대는 물론, 불필요한 간섭을 줄여 궁극적으로 기지국당 수용범위 및 가입자 용량을 증대시켜주는 유효한 방법으로써 많은 연구들이 진행되고 있다 [1]. 시간과 공간적인 필터링을 동시에 충족시키는 적응 빔포밍의 연구는 CDMA/TDMA를 기반으로 하고 있다. 하지만 멀티패스 환경에서 대용량 데이터 전송에서는 데이터의 지연과 함께 다중 객체에 대한 간섭효과로 인한 스펙트럼 저하라는 문제를 가지고 있다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 OFDM 시스템을 기반으로 하는 적응 빔포머가 연구되고 있다. 현재까지 연구되고 있는 OFDM 기반으로 하는 빔포머 시스템에 비하여 스펙트럼 효율이 좋다는 장점을 가지고 있지만[2], 보호구간이라는 불필요한 부분을 추가 삽입하는 효율성 저하의 문제를 가지고 있다. 본 논문에서는 상기 제시된 OFDM의 문제를 해결하기 위하여 다상필터 기반 OFDM 시스템 구조를 제시하였다. 이는 국부화된 원형필터를 사용하여 보호구간없이 ISI (intersymbol interference)를 줄이고, 부반송파의 사이드레브를 낮춤으로써 높은 저지대역 감쇠를 유도함으로써 ICI (interchannel interference)를 완화시키는 역할을 할 수 있다[4]. 다상필터 기반 OFDM 시스템을 위한 적응 빔포밍 알고리즘은 주파수 영역에서 파일럿 심볼과 상응되는 수신 심볼사이의 에러 신호를 계산하고, 주파수 영역에서의 에러신호는 시간 영역에서 에러신호로 변환된 후, MSE를 최소화 하는 적응 빔포머의 계수로 갱신된다. 이는 구조적으로 필터 뱅크 관점에서  $M \times M$  IDFT 구조를 사용하여 기존의 OFDM 비포밍 시스템과 호환성을 유지할 수 있다[2].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 다상 필터 OFDM 송수신기의 유도과정과 특징을 설명하였다. 3장에서는 다상필터 기반 OFDM 시스템을 위한 빔포밍 구

조에 대해 설명하였다. 마지막으로 4장에서는 다상필터 기반 OFDM의 빔포밍의 실험 결과를 보이고 그에 대한 고찰을 하였다.

**2. 본 론**

**2.1 다상필터 OFDM**

일반적으로 두 개의 I/DFT 다상 필터뱅크 구조를 갖는 MDFT 변환다중장치는 한 개의 I/DFT를 사용하는 OFDM 시스템과 서로 호환성의 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 두 개의 M IDFT 다상 필터를 결합함으로써 다상 필터 OFDM 시스템을 구성하였다. 한 개의 I/DFT를 갖는 다상 필터 OFDM 송수신기는 OFDM 시스템의 기본 블록인 I/DFT와 직렬/병렬변환기, 그리고 추가 블록인 다상 필터, up/downsampler로 구성되어 있다. 다상 필터 OFDM 송수신기는 MDFT 변환다중장치의 블록들을 효율적으로 재정렬함으로써 구현된다. 먼저 MDFT 송수신기를 구성하는 두 개의  $M \times M$  I/DFT 다상 필터뱅크를 한 개로 합치기 위하여 임시로 재구성한다. 첫 번째로 송수신기에서 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. 송신기 구조를 단순화시키기 위하여 다음의 연산을 적용한다[3].

$$(\uparrow M)G(z) = G(z^M)(\uparrow M) \tag{1}$$

$$G(z)(\downarrow M) = (\downarrow M)G(z^M) \tag{2}$$

식 (1)을 이용하여 송신기와 같은 단계를 거치면, 다상필터 OFDM 수신기를 쉽게 얻어진다. 그림 1은 최종적인 다상 필터 OFDM 송수신기를 보여주고 그림 2는 수신기 블록들을 보여준다. 기존 OFDM 송수신기와 비교하여 다상 필터 OFDM 송수신기는 up/downsampler 비율이 M에서 M/2로 바뀌었다. OFDM 심볼보다 IDFT 단계 앞에서 다상 필터 OFDM의 심볼 비율이 두 배 높다. 그러나 OFDM과 다상 필터 OFDM의 전체 심볼 변환 비율은 1:M으로 동일하다. 다상 필터의 도입으로 인하여 다중경로 페이딩 채널에서 ISI와 ICI를 완화시킬 수 있다. 그림 1와 그림 2에서 보여지는 다상 필터의 형태는 각 부밴드를 구성하는데 시간과 주파수 영역에서 국부화된 원형필터가 사용이 되면, 다상 필터 OFDM 시스템은 ISI에 덜 영향을 받게 되고, ICI를 줄이는데 용이하다.

**2.2 다상필터OFDM시스템을위한빔포밍구조**

다상 필터 기반 OFDM 시스템을 적용한 빔포밍의 구조는 그림 3과 같이 표현할 수 있다. OFDM 송신부에서

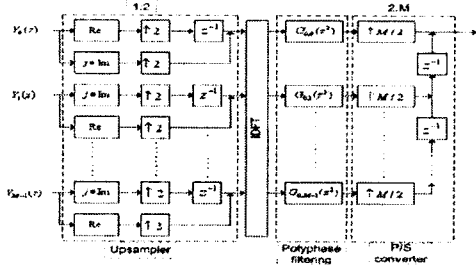


그림 1. 다상 필터 OFDM 송신기

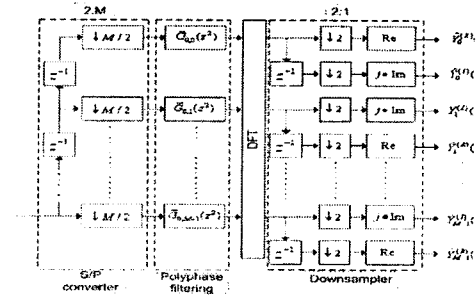


그림 2. 다상 필터 OFDM 수신기

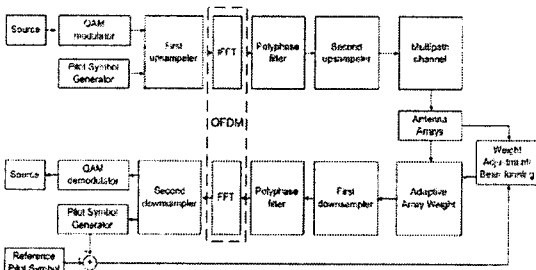


그림 3. 다상 필터 OFDM 기반 빔포밍 구조

데이터 심벌과 파일럿 심벌로 구성된 입력이 IFFT 연산에 의해서 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환이 된다. 변환된 신호는 다상필터를 거친후 두 번째 upsampling 된 후 채널에 송신된다. 송신된 다상 필터 OFDM 신호는 수신단에서 빔포머의 배열 인자에 의해 곱셈 연산을 거친다. 다음 변환된 신호는 FFT에 의해서 주파수 영역에서 시간영역으로 변환되어진다. 이때 적응 빔포머의 가중치는 파일럿 심벌과 이에 상응하는 응답 수신 신호간의 여러 신호에 의해서 갱신된다. 빔포머의 가중치는 빔의 원하는 방향을 형성하기 위해서 MSE가 최소가 되는 방향으로 갱신되어진다. 그림 3에서 나타나듯이 다상 필터 OFDM 구조를 이용한 빔포밍 설계는 기존 OFDM 방식의 빔포밍 설계와 비교 하였을 때 동일한 구조를 가지고 있다. 하지만 기존 OFDM 송수신기와 다상 필터 OFDM 송수신기의 호환성을 위해 직렬/병렬 변환기의 up/downsampler비율을 M/2에서 M으로 증가시킨다. 이와 같이 2배 증가된  $M \times M$  IDFT 다상 필터뱅크 구조를 도입함으로써 기존 OFDM 시스템의 빔포밍과 호환성을 유지하는 동시에 다상 필터 OFDM의 고유 장점인 다중 경로에서 지연으로 인해 발생하는 연속된 심벌에 대한 간섭을 최소화 할 수 있다. 그림 3에서 빔포머를 위한 적응 배열 가중치는 MSE기법을 이용하여 적응화 시킬 수 있다. 즉, 송신되는 파일럿 심벌과 수신된 파일럿 심벌의 차이의 제곱을 최소화 하는 방법으로 유도되는데[4], 그 식은 다음과 같다.

$$E[\varepsilon_p^2(n)] = \sum_{j=0}^{N_p-1} E[|\varepsilon_{j\Delta p+q}(n)|^2] = \sum_{j=0}^{N_p-1} E[|y_{j\Delta p+q}(n) - \tilde{y}_{j\Delta p+q}(n)|^2] \quad (3)$$

여기에서  $\Delta p$ 는 파일럿 심벌간의 주파수 간격,  $q$ 는 첫 번째 파일럿 심벌의 서브캐리어 위치,  $N_p$ 는 PF-OFDM에 삽입된 파일럿 심벌의 수를 각각 나타내고 있다. 또한  $y_{j\Delta p+q}(n)$ ,  $\tilde{y}_{j\Delta p+q}(n)$ 는  $j\Delta p+q$ 번째 서브 캐리어의 송, 수신된 파일럿 심벌을 각각 의미한다. 식 (3)은 벡터 형태로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E[\varepsilon_p^2(n)] = E[\varepsilon_p^H(n) \varepsilon_p(n)] \quad (4)$$

여기에서  $\varepsilon(n) = Y_{p,m}(n) - \tilde{Y}_p(n)$ ,

$$\varepsilon(n) = [\varepsilon_0(n) \varepsilon_{\Delta p}(n) \cdots \varepsilon_{(N_p-1)\Delta p}(n)]^T,$$

$$Y_{p,m}(n) = [y_0(n) y_{\Delta p}(n) \cdots y_{(N_p-1)\Delta p}(n)]^T,$$

$$\tilde{Y}_p(n) = [\tilde{y}_0(n) \tilde{y}_{\Delta p}(n) \cdots \tilde{y}_{(N_p-1)\Delta p}(n)]^T$$

시간 영역에서 빔포머의 가중치를 갱신하기 위해서는 여러 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 여러 벡터로 변환하여 표현하는 방법을 이용할 수 있다. 즉 식 (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$E_p(n) = F_p^H(n) \varepsilon_p(n) \quad (5)$$

여기에서

$$F_p(n) = \begin{bmatrix} 1 & \exp\left(\frac{-j2\pi\Delta p}{N}\right) & \cdots & \exp\left(\frac{-j2\pi(N-1)\Delta p}{N}\right) \\ \exp\left(\frac{-j2\pi(N-1)\Delta p}{N}\right) & \cdots & \exp\left(\frac{-j2\pi(N-1)\Delta p}{N}\right) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \exp\left(\frac{-j2\pi(N-1)\Delta p}{N}\right) & \cdots & \exp\left(\frac{-j2\pi(N-1)\Delta p}{N}\right) & \cdots \end{bmatrix}$$

가중치의 갱신을 위해서 일반적으로 LMS 알고리즘을 수행하는데 이를 식 (5), 그리고 식 (3)에 적용을 하게 되면 최종적인 PF-OFDM의 빔포머의 안테나 배열을 위한 갱신 과정은 다음과 같다.

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu V(n) F_p^H(n) (Y_{p,m}(n) - \tilde{Y}_p(n)) \quad (6)$$

식 (6)에서 알 수 있듯이 주파수 영역에서의 여러 신호는  $F_p^H(n)$ 에 의해서 송신된 파일럿 심벌과 수신된 심벌간의 에러를 주파수 영역에서 계산한 후에, 시간 영역 에러신호로 변환 되어진다. 이러한 계산 과정을 거친 후에 시간 영역에서의 여러 신호를 이용하여 가중치는 갱신된다.

### 3. 모의 실험

본 실험에서는 기존의 OFDM 빔포밍의 보호구간과 같은 불필요한 정보추가 없이도 수렴 성능은 비슷한 다상 필터 OFDM을 이용한 광대역 적응 빔포밍 구조를 위한 비교 실험을 하였다. 동일한 두 시스템의 환경을 위해 Coherent QPSK 변복조 방식을 위해 각각 64개의 부밴드, 5 GHz에서 150Hz의 최대 도플러주파수, two-path

레이레이 페이딩 채널을 기준으로 하였다. 그리고 제안된 시스템을 위한 빔포밍의 매개변수는 20개의 배열 센서개수,  $\mu=0.003$ , ULA의 조건하에 간섭신호는  $45^\circ$ 에서 SINR이 20dB,  $-45^\circ$ 에서 30dB가 있다고 가정하였다. 그림 4는 제안된 알고리즘을 위한 빔포머의 계수식 (6)을 통해서 구해진 빔패턴  $\phi = -45^\circ, 0, 45^\circ$ 을 보여주고 있다. 그림 5에서 제안된 알고리즘과 기존의 OFDM의 학습곡선을 보여준다. 여기에서 제안된 시스템의 심벌주기는  $3.2 \mu s$ , 기존 OFDM 보호구간 주기  $0.8 \mu s$ 를 포함했을 때  $4 \mu s$ 의 심벌 주기를 가진다. 즉 기존 OFDM의 경우는 보호구간을 32블럭으로 기준했을 경우, 6개의 보호구간 심벌을 삽입하였다. 즉 PF-OFDM에 비하여 20% 이상의 데이터 비율이 증가하였다. 하지만 그림 (5)에서 알 수 있듯이 보호 구간없이 OFDM과 비슷한 성능을 가지면서 보다 나은 효율을 가지는 시스템 성능을 보여주고 있다. 마지막으로 그림 6에서는 동일 조건하에서의 uncoded BER 성능을 비교하였다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 OFDM과 다상필터 기반 OFDM이 같은 환경에서 5개의 파일럿 심벌을 포함한 경우 PF-OFDM이 OFDM보다 약간 낮은 MSE를 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 그 차이는 2~3dB로 무시할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 OFDM 빔포밍의 보호구간과 같은 불필요한 정보추가 없이 수렴 성능은 비슷한 다상 필터 OFDM을 이용한 적응 빔포밍 구조를 제안하였다. 기존의 OFDM과는 구조적으로 호환되는 특징을 가지는 다상 필터 OFDM은 실험 결과에서와 같이 동일한 성능을 가지고 있다. 차후 연구방향으로 보다 빔포머의 가중치를 갱신하는 과정에서 일어나는 계산과정을 단순화하면서 고속화 할 수 있는 알고리즘 연구를 선행해야 할 것이다.

#### [참고 문헌]

- [1] J. S. Thompson, P. M. Grant, B. Mulgrew, "Smart Antenna Arrays for CDMA Systems," *IEEE Pers. Comm.*, pp.16-25, October 1996.
- [2] 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.
- [3] C. S. Lee and K. Y. Yoo, "Polyphase filtered OFDM transmission system," *IEEE Electronics Letters*, vol. 40, pp.687-688, May 2004
- [4] C. K. Kim, "Adaptive beamforming for an OFDM system," *IEEE pers.*, pp.484-489 Dec. 1999

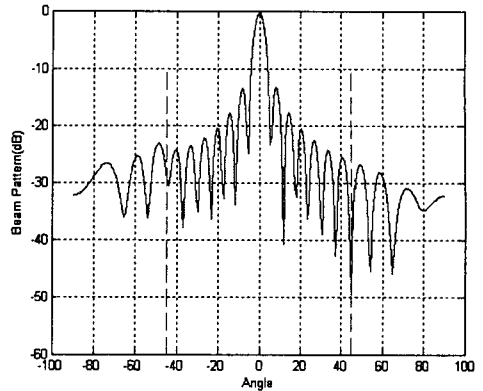


그림 4. 간섭신호 2개( $\phi = -45^\circ, 45^\circ$ )일때, 제안된 알고리즘을 위한 빔패턴

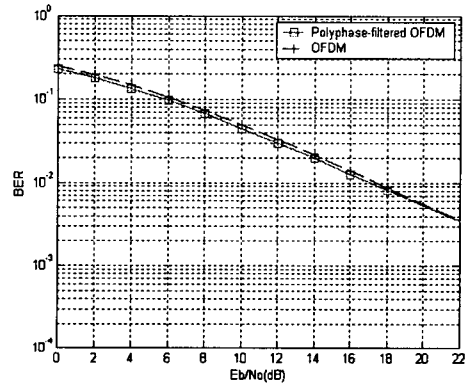


그림 5. 각 시스템에 적응 빔포밍 적용시 BER

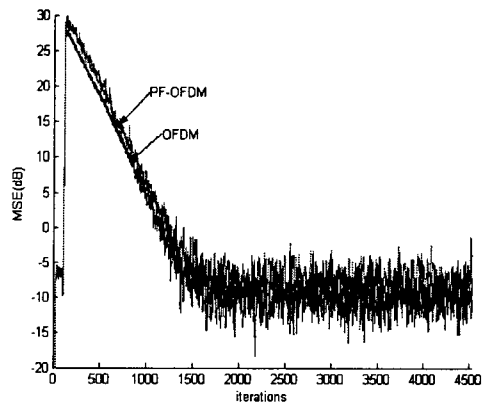


그림 6. 5개 파일럿 심벌일 때, 각 시스템의 학습곡선