

# DS/CDMA 시스템에서 적응 배열 안테나에 부귀환 직교 다중사용자 검출기를 결합한 준 최적 수신기에 관한 성능 분석

준회원 조영필\*, 유성균\*, 정회원 이형기\*\*, 객경섭\*\*\*

## Performance Analysis of Suboptimal Receiver Combining Adaptive Array Antenna and Orthogonal Decision-Feedback Detector in DS/CDMA System

Young-pil Cho\*, Sung-Kyun Yu\* *Associate members*  
Hyung-ki Lee\*\*, Kyung-sup Kwak\*\*\* *Regular members*

### 요약

본 논문에서는 DS/CDMA 시스템에서 적응 배열 안테나에 부귀환 직교 다중 사용자 검출기를 결합한 준 최적 수신기에 관한 성능을 분석하였다. 적응 배열 안테나는 빔 형성 기법을 사용하여 사용자 신호 방향으로는 빔을 형성하고 다른 방향의 사용자 신호로는 널(null)빔을 형성하여 공간적으로 간섭을 제거할 수 있다. 그러나 유사한 방향에서 입사하는 사용자들 간에 대해서는 기존의 적응 배열 안테나만으로는 간섭을 제거할 수 없다.

본 논문에서는 적응 배열 안테나에 부귀환 직교 다중 사용자 검출기(ODFD)를 결합함으로써 적응 배열 안테나에서 제거할 수 없었던 유사한 입사각을 갖는 사용자들에 대한 간섭을 제거할 수 있는 수신기의 성능을 비교하여 분석하였다. 또한, 부귀환 역상관 다중사용자 검출기(DDFD)를 채택하였을 경우와도 비교하여 부귀환 직교 다중사용자 검출기를 사용함으로써 성능은 유사한 반면 복잡도를 줄일 수 있음을 보였다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose a suboptimal receiver combining adaptive array antenna and orthogonal decision-feedback detector in DS/CDMA system. Adaptive array antenna can cancel out undesired signal using beamforming scheme. However, if there are interfering signals from undesired users with the same incident angle as that of a desired user, an adaptive array antenna cannot suppress them. The proposed receiver can cancel out remaining interference from users having nearly the same beam pattern. And we employ Orthogonal Decision-Feedback Detector (ODFD) as Multiuser detection. The ODFD performs as good as the decorrelating decision-feedback detector (DDFD) with much less complexity. Simulation results show that the proposed system provides a significantly enhanced performance.

### 1. 서론

오늘날 통신이 고도로 발달함에 따라 무선 통신 서비스 시장이 다양화 되고 급속도로 확산이 이루어

어지면서 용량의 증가, 유연성 있는 채널의 할당은 물론 음성, 데이터 및 동영상과 같은 멀티미디어 서비스를 받을 수 있는 고속 데이터 전송을 요구하고 있다.

이에 대한 요구를 충족할 수 있는 기술로 가장

\* 인하대학교 전자공학과 통신공학연구소(youngpil@korne.net),  
논문번호 : 020184-0418, 접수일자 : 2002년 4월 19일

\*\* 재능대학 전자통신과, \*\*\* 인하대학교 정보통신대학원

최근 주목받는 기술이 CDMA(Code Division Multiple Access) 기술이다. 그러나 이러한 CDMA 이동통신 시스템에서 용량과 성능을 제한하는 주요 제한 요소들이 존재한다<sup>[1][2]</sup>. 첫째, 서로 다른 경로로 수신기에 도착한 신호의 위상 차이에 의해서 발생하는 다중경로 페이딩이다. 이러한 페이딩은 신호의 크기를 감소시키므로, C/I (Carrier-to-Interference) ratio를 악화시켜, 전송에러를 집중적으로 발생시킨다. 두 번째 요인으로는 지연확산을 들 수 있다. 이는 수신기에 도달하는 신호들 사이의 위상 차이 때문에 페이딩의 반사벽의 거리가 데이터 신호의 파장과 비슷한 경우가 많으므로 직접 수신되는 신호와 반사파 신호 사이의 도착 시간 차이가 크게 된다. 이렇게 지연 확산된 다중 경로에 의해 ISI (InterSymbol Interference)가 생기게 된다. 마지막 세 번째 요인으로는 CDMA 방식은 인접 기지국 간에 동일한 주파수를 사용하므로 기지국 간의 간섭으로 인한 동일 채널 간섭이 발생하게 된다. 이러한 요인에 의해 제한받는 시스템의 용량과 성능 향상을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 다중경로 페이딩, 즉 시간차가 있는 두 신호를 분리해 낼 수 있는 기능을 제공하는 레이크 수신기(Rake receiver)가 있으며, 또 MAI (Multiple Access Interference) 제거를 위한 다중 사용자 검출기 등 많은 기술이 발표 되었다<sup>[3]</sup>.

최근에는 수신기의 성능을 보다 향상시킬 수 있는 스마트 안테나(Smart antenna)에 대한 관심이 커지고 있다. 스마트 안테나란 주어진 신호 환경에 반응하여 자신의 방사 빔 패턴을 자동적으로 변화시킬 수 있는 지능형 안테나를 말한다<sup>[1][2]</sup>. 특히 스마트 안테나에서 가장 대표적인 적응 배열 안테나

(Adaptive array antenna)는 각 안테나에 입사되는 신호의 위상 정보를 통해 원하는 신호원의 방향으로 최대의 이득을 얻는 최적의 빔을 형성하며 간섭 신호들은 널(Null)에 의해 제거되어 용량의 증대를 가져올 수 있다<sup>[2]</sup> (그림 1-a). 그러나 원하는 사용자 신호와 간섭신호가 동일한 빔 패턴에 존재하게 된다면 적응배열 안테나는 간섭신호를 널(Null)빔에 의해 제거할 수 없게 된다(그림 1-b).

따라서 본 논문에서는 원하는 사용자 신호와 간섭신호가 유사한 입사각을 가졌을 시 부귀환 직교 다중사용자 검출기<sup>[4]</sup>를 결합하여 간섭 신호를 제거함으로써 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 준최적 수신기에 관한 성능을 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템에 사용된 신호 모델을 제시하고, III장에서는 제안된 시스템에 대한 설명을 했으며 IV장에서는 모의실험과 그에 따른 결과에 대해 논의하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 신호 모델

본 논문에서는 K명의 사용자가 L개의 다중 경로 채널을 통해 BPSK 변조방식으로 신호를 전송하는 DS/CDMA 시스템을 고려하였다. k번째 사용자의 채널 임펄스 응답 벡터는 식 (1)과 같이 표현된다<sup>[2][7]</sup>.

방향으로 최대의 이득을 얻는 최적의 빔을 형성하며

$$h_k(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a(\theta_{k,l}) \beta_{k,l}(t) e^{j\phi_{k,l}} \delta(t - lT_c) \quad (1)$$

위 식에서  $\beta_{k,l}(t)$ 는 평균이 0이고 상호 독립적인 복소 가우시안(Gaussian) 변수인 채널 계수이며  $\phi_{k,l}$ 는 시변환경에 따른 위상의 변화를 나타낸다. 여기서 안테나 조정 벡터(steering vector)는 식 (2)와 같다<sup>[2]</sup>.

$$a(\theta_{k,l}) = [1 \ e^{j\phi_{k,l}} \ e^{j2\phi_{k,l}} \ e^{j3\phi_{k,l}} \ \dots \ e^{j(M-1)\phi_{k,l}}]^T \quad (2)$$

위 식에서,

$$\phi_{k,l} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_{k,l}) \quad (3)$$

d는 안테나 배열 간격, λ는 반송파 파장이고 M은 안테나의 전체 어레이 개수를 나타낸다.

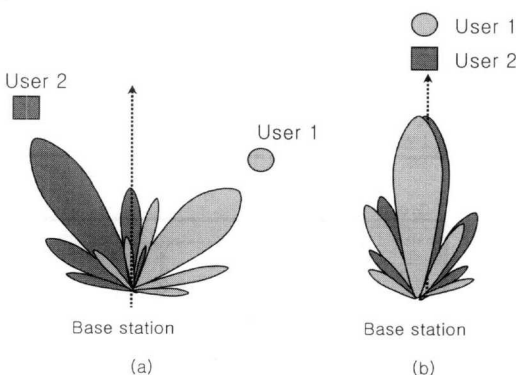


그림 1. (a) 입사각이 다른 사용자간의 빔 형성  
(b) 입사각이 유사한 사용자간의 빔 형성

안테나에 수신된 각 사용자의 수신 신호는 각 사용자의 송신신호와 임펄스 응답의 곱셈 연산을 통해 구해진다. 따라서 어레이 안테나에 입력되는 전체 K명의 사용자 기저 대역 신호는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \sum_{k=1}^K \sqrt{E_k} b_k(t) s_k(t - lT_c) * h_k(t) + n(t) \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=1}^K a(\theta_{k,l}) \sqrt{E_k} \beta_{k,l}(t) s_k(t - lT_c) b_k(l) e^{j\phi_{k,l}} + n(t)
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $b_k$ 와  $s_k$ 는 k번째 사용자의 데이터와 확산신호를 나타내며,  $E_k$ 는 k번째 사용자의 송신 전력을 나타낸다.  $n(t)$ 는 평균값이 0이고 분산이  $\delta^2 I$  인 백색 가우시안 잡음(AWGN)을 나타낸다.

### III. 제안된 시스템의 메카니즘

#### 1. 빔형성 기법

그림 2는 제안된 시스템의 블록 다이어그램을 보여주고 있다. 먼저 이 시스템에서는 빔 형성 기법에 의해 간섭 신호를 제거하게 된다. 빔 형성 기법에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 간단하며 많이 쓰이는 Least Mean Square(LMS) 알고리즘을 사용하였다<sup>[2][5]</sup>.

k번째 사용자의 출력 신호와 가중치 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_k(n) = [u_{k,0} \quad u_{k,1} \quad u_{k,2} \quad u_{k,3} \quad \dots \quad u_{k,M-1}]^T \tag{5}$$

$$\mathbf{w}_k(n) = [w_{k,0} \quad w_{k,1} \quad w_{k,2} \quad w_{k,3} \quad \dots \quad w_{k,M-1}]^H \tag{6}$$

LMS 알고리즘을 적용한 가중치 벡터 값은 다음 과정을 통해 구해진다.

$$z_n = \hat{\mathbf{w}}_n^H \mathbf{u}_n \tag{7}$$

$$e_n = d_n - z_n \tag{8}$$

$$\hat{\mathbf{w}}_{n+1} = \hat{\mathbf{w}}_n + \mu \mathbf{u}_n e_n^* \tag{9}$$

여기서 가중치 벡터 초기값 ( $\hat{\mathbf{w}}_0$ )은 0벡터이며  $\mu$ 는 스텝크기(step size)를 나타낸다.

이 빔 형성 기법에 의하여 다른 입사각을 갖는 사용자들의 간섭 신호는 제거가 되지만 유사한 입사각을 갖는 사용자들의 간섭신호는 제거가 불가능하다.

#### 2. 가중치 벡터간의 상관도 계산에 따른 그룹 형성

먼저, 유사한 입사각을 갖는 사용자들에 대해 그룹을 형성하기 위해 M개의 어레이(array)에 갱신되는 가중치 벡터 사이의 상관도를 다음과 같이 계산한다.

$$\rho_{uv} = \frac{w_u w_v^H}{|w_u| |w_v|} \tag{10}$$

이때,  $u=1,2,3,\dots,k$ 이고  $v=1, 2, 3,\dots,u-1$ 이다.

위 (10)식을 이용하여  $\rho_{uv} > \rho_{threshold}$  인 사용자들을 그룹화 하였다. 따라서 전체 K명의 사용자들을

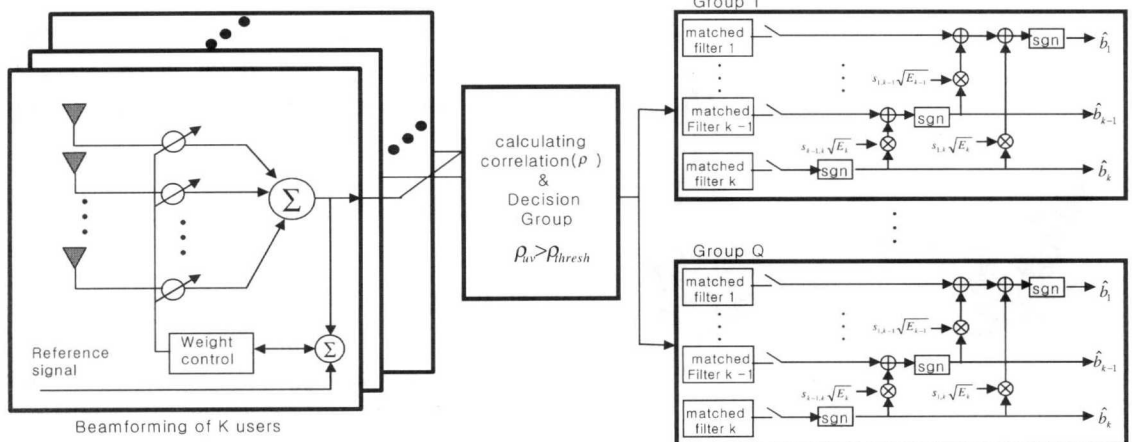


그림 2. 적응 배열 안테나에 부귀환 적교 다중사용자 검출기를 결합한 준 최적 수신기



Q개의 그룹중 하나의 그룹으로 편성되어진다.

이렇게 각각 나누어진 그룹들은 서로 독립적으로 부귀환 직교 다중사용자 검출기에 의해 간섭신호들을 제거할 수 있다.

### 3. 각 그룹내에서의 다중사용자 검출

부귀환 직교 다중사용자 검출기는 부귀환 역상관 다중사용자 검출기와 비교시 동일한 성능을 보이지만 복잡도(complexity)는 대폭 감소된다 (표 1 참조)<sup>[4][6]</sup>.

먼저, q 그룹안에 Kq명의 사용자가 있다고 가정하면, q 그룹안의 기저대역 신호는<sup>[7]</sup>,

$$\begin{aligned}
 u_{K_q}(t) &= \sum_{k=1}^{K_q} \sqrt{E_k} \beta_k(t) s_k(t - T_c) w_k^H(i) a(\theta_k) b_k(i) e^{j\phi_k} + n(t) \\
 &= \sum_{k=1}^{K_q} m_k(t) a_k(t) b_k(i) + n(t) \quad (11)
 \end{aligned}$$

단,  $m_k = s_k^T \sqrt{E_k} \phi_k \beta_k$ ,  $a_k = w_k^H(i) a(\theta_k)$  이고  $\phi_k = e^{j\phi_k}$  이다.

위 식을 행렬표현으로 다시 쓰면,

$$u_{K_q}(t) = S^T E \Phi B A b + n(t) \quad (12)$$

이때,  $S = [s_1^T s_2^T \dots s_{K_q}^T]^T$ ,  $E = \text{diag}(e_1 e_2 \dots e_{K_q})$ ,  $\Phi = \text{diag}(\phi_1 \phi_2 \dots \phi_{K_q})$ ,  $B = \text{diag}(\beta_1 \beta_2 \dots \beta_{K_q})$ ,  $A = \text{diag}(a_1 a_2 \dots a_{K_q})$ ,  $b = [b_1 b_2$

$\dots b_{K_q}]$ 이다.

입력신호  $u_{K_q}(t)$ 는 정합여파기를 통과하게 되며, 주기 T동안 표본화된 출력은 식 (13)와 같다.

$$y = R E \Phi B A b + n \quad (13)$$

단, 상호상관 행렬  $R = \int_0^T S S^T dt$  이며, n은 평균이 0인 가우시안 잡음 행렬이다.

위 (13)식에 Gram-Schmidt Orthogonal (GSO)를 적용하면 R의 QR factorization 에 대한 식으로써 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$R = Q U \quad (14)$$

$$\text{여기서, } U \text{는 } U = \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & u_{1,3} & \dots & u_{1,k-1} & u_{1,k} \\ 0 & u_{2,2} & u_{2,3} & \dots & u_{2,k-1} & u_{2,k} \\ 0 & 0 & u_{3,3} & \dots & u_{3,k-1} & u_{3,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & u_{k,k} \end{bmatrix}$$

와 같은 upper triangular 행렬이며 Q는 직교 행렬을 나타낸다.

위 (14)식을 (13)식에 적용하면,

$$\begin{aligned}
 \bar{y} &= Q^H y = U E \Phi B A b + Q^H n \\
 &= U E \Phi B A b + \bar{n} \quad (15)
 \end{aligned}$$

단,  $\bar{n}$ 은 평균이 0인 백색 가우시안 잡음 (AWGN) 이다.

이 행렬을 전개하면,

$$\begin{aligned}
 \bar{y} &= \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & u_{1,3} & \dots & u_{1,k-1} & u_{1,k} \\ 0 & u_{2,2} & u_{2,3} & \dots & u_{2,k-1} & u_{2,k} \\ 0 & 0 & u_{3,3} & \dots & u_{3,k-1} & u_{3,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & u_{k,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e_{2,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & e_{3,3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & e_{k,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \phi_{2,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \phi_{3,3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \phi_{k,k} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \beta_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{2,2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{3,3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \beta_{k,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{2,2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{3,3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{k,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_k \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} u_{1,1} e_{1,1} \phi_{1,1} \beta_{1,1} a_{1,1} b_1 & u_{1,2} e_{2,2} \phi_{2,2} \beta_{2,2} a_{2,2} b_2 & \dots & u_{1,k} e_{k,k} \phi_{k,k} \beta_{k,k} a_{k,k} b_k \\ 0 & u_{2,2} e_{2,2} \phi_{2,2} \beta_{2,2} a_{2,2} b_2 & \dots & u_{2,k} e_{k,k} \phi_{k,k} \beta_{k,k} a_{k,k} b_k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & u_{k,k} e_{k,k} \phi_{k,k} \beta_{k,k} a_{k,k} b_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_k \end{bmatrix} \quad (16)
 \end{aligned}$$

표 1. 사용자 K명의 ODFD와 DDFD의 비교

	DDFD	ODFD
곱셈 횟수	$\frac{K(3K-1)}{2}$	$K^2$
덧셈 횟수	$K^2$	$\frac{K(K+1)}{2}$
역행렬의 연산	yes	no
행렬의 복잡도	exponential	linear
행렬의 재계산	yes	no

따라서 가장 신호 세기가 큰 마지막 k번째 사용자 신호가 부귀환 없이 먼저 검출된다.

$$\bar{y}_k = u_{k,k} e_k \phi_k \beta_k a_k b_k \quad (17)$$

이 신호는 k-1번째 사용자 신호 검출을 위해 쓰여지게 된다.

일반적인 k번째 사용자의 신호를 검출하는 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{b}_k = \text{sgn}[\bar{y}_k - \sum_{n=k+1}^K u_{k,n} e_n \phi_n \beta_n a_n \hat{b}_n] \quad (18)$$

위 (18)식에서와 같이 간섭신호가 원하는 사용자 신호보다 강한 신호크기를 가지고 있다 하더라도 강한 신호의 성분을 제거할 수 있어 비트 오류에 대한 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

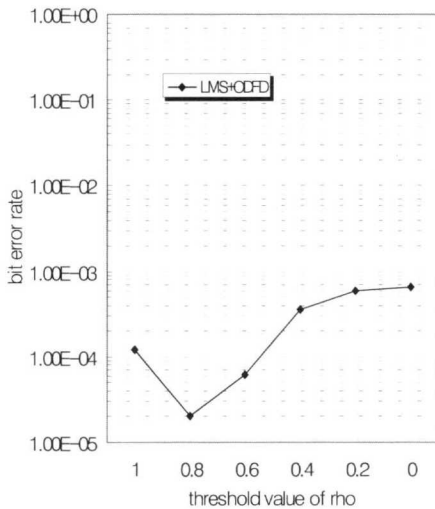


그림 3. 상관계수의 변화에 따른 평균 비트 오류 (Number of users=10,  $E_0/N_0 = 8dB$ )

#### IV. 모의실험 및 결과 고찰

##### 1. 모의실험환경

본 장에서는 전방향성 안테나(Omni directional antenna; conventional antenna), 기존의 적응 배열 안테나 그리고 적응 배열안테나와 직교 부귀환 다중사용자 검출기 및 역상관 부귀환 다중사용자 검출기를 결합한 시스템에 관한 성능을 분석하였다.

모의실험 환경에서는 K명의 동시 사용자가 DS/CDMA 환경에서 BPSK 변조 방식을 사용하여 역방향 링크(reverse link)를 통해 전송한다고 가정한다. 확산 신호로는 길이가 31인 의사잡음 시퀀스(PN-sequence)를 사용하였으며 선형 어레이간의 간격은 반파장 ( $\lambda/2$ )을 갖는 8개로 구성된 배열 안테나를 사용하였다. 또한 각 어레이에 수신된 신호의 전력은 동일하다고 가정하였다. 채널 환경은 다중경로를 고려하지 않고 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널만을 사용하였다. 빔형성 알고리즘으로는 Least Mean Square(LMS)를 사용하였고 스텝크기(step size:  $\mu$ )는  $10^{-4}$ 으로 하였다. K명의 사용자들의 신호 입사각은  $[0 \sim \frac{\pi}{2}]$  범위에서 불규칙(Random)하게 발생한다고 가정하였다.

##### 2. 결과 고찰

그림 3은 상관계수의 임계치 변화에 따른 평균 비트 오류를 보여주고 있다.

임계치가 0일때는 그룹을 편성하지 않고 하나의

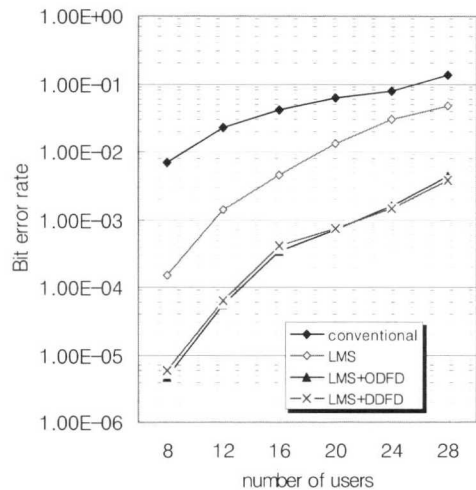


그림 4. AWGN 채널에서 사용자수에 따른 평균 비트 오류

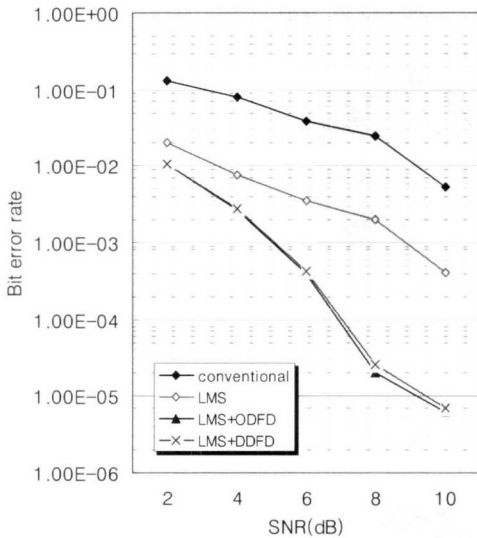


그림 5. AWGN 채널에서 (dB)에 따른 평균 비트 오류

ODFD에 적용하는 것과 같으며 임계치가 1일 때에는 각 사용자당 하나의 ODFD를 사용하기 때문에 부귀환 되지 않은 값 자체로 검출하게 된다. 모의 실험에 의하면 임계치가 0.8일 때 평균 비트 오류율이 가장 작게 나타난다.

즉, 그룹이 형성될 때 사용자 신호의 입사각에 따른 최적의 그룹으로 편성이 되어지는 값이 0.8인 것을 알 수 있다.

그림 4와 5는 제안된 시스템의 성능이 우수함을 보여주고 있다. 이때, 임계치는 그림 3의 모의 실험의 결과에 따라 0.8로 하였다. 또한, 부귀환 직교 다중사용자 검출기(ODFD) 대신에 역상관 부귀환 다중사용자 검출기(DDFD)를 사용했을 때와 비슷한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 6에서는 두 가지 경우의 다중사용자 검출기 사용에 따른 복잡도(Complexity)를 비교하여 보여주고 있다. 결과적으로 ODFD가 DDFD와 성능은 동일하게 나타나지만 복잡도 측면에서는 훨씬 적다는 것을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 DS/CDMA에서 적응 배열 안테나에 부귀환 직교 다중사용자 검출기를 결합하여 비트 오류율을 최소화하기 위한 준 최적 수신기에 관한 성능을 분석하는데 목적을 두었다. 유사한 입사각을 갖는 신호들은 적응 배열 안테나에서는 제거가 쉽

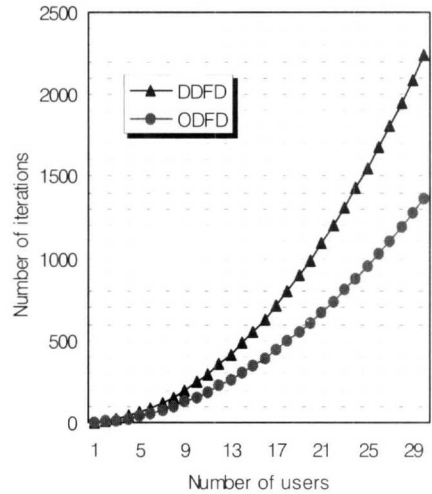


그림 6. ODFD와 DDFD의 계산량 비교

지 않다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 유사한 입사각을 갖는 사용자들을 Q개의 그룹으로 나누었으며 각 그룹 당 부귀환 직교 다중사용자 검출기를 사용함으로써 문제점을 개선 하였다. 또한, 그룹을 형성하는데 기준이 되는 상관계수의 임계치 변화에 따른 모의실험을 통해 최적의 임계치를 도출해 낼 수 있었다.

시스템의 성능을 향상 시키는데 있어 수반되는 문제점의 하나가 복잡도(complexity)의 증가라 할 수 있다. 이에 부응하는 다중사용자 검출기로서 직교 부귀환 다중사용자 검출기가 있다.

따라서 부귀환 직교 다중사용자 검출기를 사용할 때와 역상관 부귀환 다중사용자 검출기를 사용했을 때를 서로 비교 분석함으로써 성능면에서는 동일한 성능을 갖지만 복잡도면에서는 부귀환 직교 다중사용자 검출기가 많은 계산량을 줄일 수 있다는 것을 모의실험을 통해 알게 되었다. 여기서 언급되는 복잡도라는 것은 계산적인 측면(calculation complexity)에서의 복잡성을 의미한다.

향후과제로는 다중경로 페이딩 환경에서의 모의 실험을 통한 성능을 분석하여야 할 것이며 구현상의 문제에 있어서도 복잡도를 줄이는 연구에 대해 보다 많은 시간과 노력이 요구된다.

### 참고 문헌

[1] Jack H. Winters, "Smart Antennas for Wireless



