

논문 2004-41TC-11-11

CDMA 역방향 링크의 상관된 SIMO 채널을 위한 복합형 빔 성형 방식

(Hybrid Beamformer of CDMA Reverse Link
in the Correlated SIMO Channel)

최영관*, 김동구*

(Young-Kwan Choi and Dong Ku Kim)

요약

부호분할다중접속(CDMA: Code Division Multiple Access) 시스템의 역방향링크에서 수신 빔 성형 기법을 사용할 경우, 빔 성형 이득을 얻는 반면 전력 제어에 의해 불충분한 파일럿 전력으로 인해 채널 추정이 부정확해진다. 이 논문에서는 상관된 단일-입력 다중-출력(SIMO: Single-Input Multiple-Output) 채널에서 불충분한 파일럿 전력으로 인한 문제를 해결하기 위한 수신 빔 성형 방식을 제안하고자 한다. 제안된 복합형 빔 성형 방식(hybrid beamformer)은 수신 안테나들을 그룹 지어서, 각 그룹 당 수신 빔 방향(DOA: Direction-of-Arrival) 기반의 빔 성형 후에, 그룹별 출력을 최대 비 결합(MRC: Maximal Ratio Combining)하는 방식으로, 공간적으로 상관된 SIMO 채널의 디버시티 이득을 얻으면서 더 정확한 채널추정과 간섭제거 효과를 제공한다. 배열 안테나의 수가 여섯 개 이상인 경우, 복합형 빔 성형 방식은 빔 수신 각 범위(AOS: Angle-of-Spread)가 30°이하에서 일반적인 MRC 빔 성형 방식보다 더 좋은 성능을 보인다.

Abstract

Hybrid beamformer composed of Direction-of-Arrival (DOA) based scheme followed by Maximal Ratio Combining (MRC) is proposed to overcome the degradation due to inaccurate channel estimation caused by insufficient pilot power, which happens in conventional Single-Input Multiple-Output (SIMO) Code Division Multiple Access (CDMA) reverse link. The proposed scheme could provide more accurate channel estimation and interference reduction at the expense of diversity gain in the spatially correlated SIMO channel. As a result, hybrid scheme outperforms conventional MRC beamformer for six or more antennas in the channel environment, in which Angle-of-Spread (AOS) is within 30°.

Keywords: CDMA, SIMO, Hybrid beamformer, MRC beamformer, DOA based beamformer

I. 서론

최근에 CDMA 역방향링크에서의 수신 빔 성형 방식이 여러 논문에서 연구되었다^{[1][2]}. 다중안테나의 사용은 기지국에서 다중화(diversity) 이득 이외의 간섭 제거도 가능하게 하였다. 수신 빔 성형 방식에서 전력제어를 사용함으로써, 안테나의 수가 늘어날수록 전력효율이 더 높아지게 된다. 하지만 CDMA 역방향 링크에서의

전력제어는 안테나의 수가 늘어날수록 통화 채널 전력뿐만 아니라 파일럿 채널의 전력도 함께 감소시킨다. 송신 통화 채널 전력과 파일럿 채널의 전력이 통화 대 파일럿 전력 비(TPR: Traffic-to-Pilot power Ratio)에 의해 고정되어 있기 때문이다. cdma2000에서 제안한 TPR은 데이터 전송률이 9.6kbps일 경우 3.75dB이다^[3].

지금까지의 연구들에서는 SIMO 시스템의 송신 파일럿 전력이 불충분하여 생기는 부정확한 채널추정으로 인한 성능감소에 대한 분석이 부족하다. 불충분한 파일럿 전력을 보상하기 위해, 통화 채널 전력은 그대로 유지하면서 파일럿 전력을 높이면 TPR이 감소하게

* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과
(Yonsei University, Dept. of Electrical and
Electronic Engineering)
접수일자: 2004년8월19일, 수정완료일: 2004년10월20일

된다. 이 경우 채널 추정 성능은 향상되지만, 높은 파워로 인한 부담이 늘어나서 시스템 용량을 저하시킨다^[3]. 따라서 TPR을 줄이는 것은 바람직하지 못하다. 한편 [4]에서는 TPR을 줄이지 않으면서 채널 추정 성능을 향상시키기 위해 파일럿 채널뿐만 아니라 통화 채널까지 이용한 채널 추정에 대한 연구가 소개되었다. 통화 채널의 전송 데이터를 복원 후 수신 신호에 다시 곱하여 전송 데이터의 효과를 제거한 후 파일럿 신호와 함께 채널 추정에 사용하는 것이다. 그러나 이 경우에는 통화 채널의 데이터를 복원 시 오류가 발생하면 채널 추정에도 그 오류를 전파하게 된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 새로운 빔 성형 방식을 적용하여 통화 채널뿐만 아니라 파일럿 채널에서도 빔 성형 이득을 얻어서, TPR을 변화시키지 않으면서 파일럿의 SIR을 향상시켜 채널 추정 성능을 향상시킨다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안된 복합형 빔 성형 방식에 대하여 기술하고, III장에서는 모의실험으로 복합형 빔 성형 방식의 성능을 일반적인 MRC 빔 성형 방식과 비교한다. 그리고 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 복합형 빔 성형 (Hybrid beamformer)

cdma2000 역방향 링크의 i 번째 사용자의 송신 신호 $S_i(t)$ 가 수신 단에서 빔 성형 가중치로 결합된 후의 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i S_i(t) + \sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_k S_k(t) + \mathbf{w}_i^H \mathbf{n}_i(t) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{h}_i 와 \mathbf{w}_i 는 i 번째 사용자의 벡터 채널과 빔 성형 가중치이다. \mathbf{n}_i 는 배열 안테나의 벡터 잡음 신호를 나타낸다.

일반적인 MRC 빔 성형 방식의 경우 빔 성형 가중치는 각 안테나에서 추정된 채널 벡터와 같다.

$$\mathbf{w}_i = [\hat{h}_{i,0}, \hat{h}_{i,1}, \dots, \hat{h}_{i,N-1}]^T \quad (2)$$

여기서, $\hat{h}_{i,m} = h_{i,m} + z_{i,m}$ 이다.

$z_{i,m}$ 는 m 번째 안테나에서의 채널 추정 잡음이다. N 은 수신 안테나의 수이다. MRC 빔 성형 가중치로 결합된 신호의 신호 대 간섭-잡음 비 (SIR)은 다음과 같다.

$$SIR_{MRC} = \frac{\hat{\mathbf{h}}_i^H \mathbf{R}_{\mathbf{h}_i} \hat{\mathbf{h}}_i}{\hat{\mathbf{h}}_i^H \left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{R}_{\mathbf{h}_k} \right) \hat{\mathbf{h}}_i + \hat{\mathbf{h}}_i^H \sigma^2 \mathbf{I} \hat{\mathbf{h}}_i} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{R}_{\mathbf{h}_k}$ 는 k 번째 사용자의 채널 벡터 \mathbf{h}_k 의 상관 행렬(correlation matrix)이다.

반면에 제안된 복합형 빔 성형 방식은 가중치는 그룹별 DOA 기반의 빔 성형으로 SIR이 향상된 신호를 이용하여 추정된 채널로서 구해진다.

$$\mathbf{w}_i = [\hat{g}_{i,0}, \hat{g}_{i,0} e^{j\text{msin}\theta_i}, \dots, \hat{g}_{i,(N-1)/2} e^{j\text{msin}\theta_i}]^T \quad (4)$$

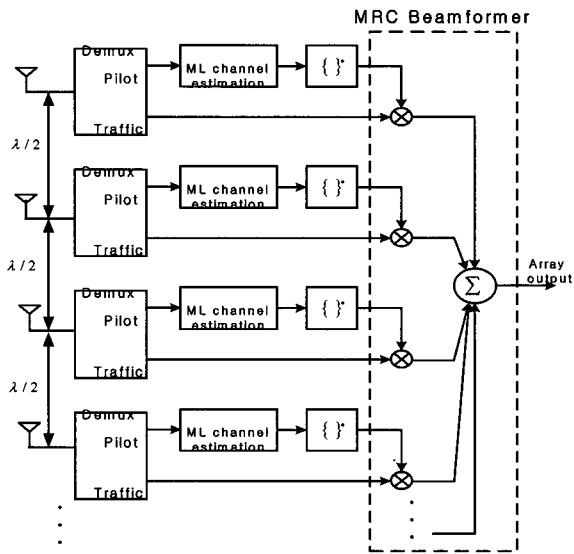
여기서, $\hat{g}_{i,n}$ 는 i 번째 사용자의 n 번째 그룹의 가중치로, $\hat{g}_{i,n} = h_{i,2n} + h_{i,2n+1} e^{-j\text{msin}\theta_i} + z_{i,2n} + z_{i,2n+1} e^{-j\text{msin}\theta_i}$ 이다. 이는 DOA 기반의 빔 성형 후의 그룹단위로 결합된 채널을 추정된 값이다. θ_i 는 i 번째 신호의 DOA이다. 반 파장 거리로 배치되어 있는 선형 배열 안테나의 경우 한 그룹 안에서 한 안테나의 채널과 인접한 안테나의 채널의 상관도가 매우 높으면 두 채널은 오직 $e^{j\text{msin}\theta_i}$ 의 위상 차만을 갖게 된다^[5]. DOA 기반의 빔 성형은 두 채널을 통해 수신된 신호를 동위상으로 결합시키는 반면 수신 빔 방향이 랜덤한 간섭 신호는 동위상으로 결합 되지 않는다. 이와 같은 간섭 감소 효과에 의해 정보 검출에서뿐만 아니라 채널 추정에서도 SIR이 향상된다.

식 (4)와 같이 구해진 가중치로 결합된 신호의 SIR은 다음과 같이 나타난다.

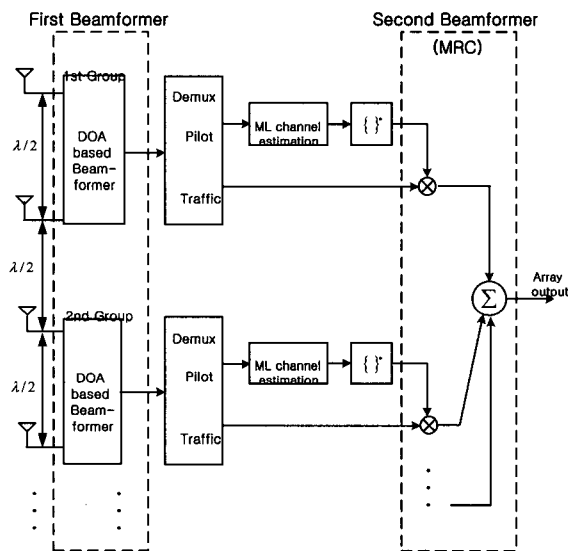
$$SIR_{MRC} = \frac{\hat{\mathbf{g}}_i^H \mathbf{R}_{\mathbf{g}_i} \hat{\mathbf{g}}_i}{\hat{\mathbf{g}}_i^H \left(\sum_{k=1, k \neq i}^K \mathbf{R}_{\mathbf{g}_k} \right) \hat{\mathbf{g}}_i + \sigma^2 \hat{\mathbf{g}}_i^H \hat{\mathbf{g}}_i} \quad (5)$$

여기서, $\mathbf{R}_{\mathbf{g}_k}$ 는 k 번째 사용자의 DOA 기반의 빔 성형 후의 채널 벡터 \mathbf{g}_k 의 상관 행렬(correlation matrix)이다.

그림 1 (a)는 일반적인 MRC 빔 성형 시스템의 수신 구조이다. 이 빔 성형 방식은 반 파장 거리로 배치되어 있는 수신 안테나에서 각각 채널을 추정하여, 각 안테나에서 수신된 신호를 MRC방식에 의해 결합시킨다. 송신 전력은 전력제어에 의해서 수신 신호 대 간섭 전력



(a)



(b)

그림 1. 빔 성형 방식에 따른 수신기 구조 (a) MRC 빔 성형 방식 (b) 복합형 빔 성형 방식
Fig. 1. The receiver structure of beamformer (a) MRC beamformer (b) Hybrid beamformer.

비(SIR: Signal-to-Interference Ratio)와 통화 채널의 프레임 오류에 따라 결정된다. 따라서 TPR이 고정되어 있는 경우 송신 통화 채널의 전력 감소는 파일럿의 전력을 감소시켜 결과적으로 채널추정의 정확도를 감소시킨다. 이로 인해 채널 추정이 이상적인 경우에 비해 성능 저하가 발생된다.

반면에 그림 1 (b)는 복합형 빔 성형 시스템의 수신 구조이다. 이 빔 성형 방식은 수신 파일럿을 향상시키기 위해서, 채널 추정 전에 각 그룹별로 DOA 기반의 빔 성형 방식을 도입한다. 이는 일반적인MRC 빔 성형

방식에 비해서 수신 파일럿 전력을 더 향상시켜 채널 추정을 할 수 있게 한다. 이 논문에서는 두 개의 안테나를 하나의 그룹으로 고려한다. 일반적인 DOA 기반의 빔 성형은 각 그룹 안에서 채널이 공간적으로 완벽하게 상관되어 있다고 가정한다^[5]. 하지만 완벽하지는 않지만 충분히 크게 공간적으로 상관된 채널의 경우에도, DOA 기반의 빔 성형 방식은 파일럿 전력을 향상시킨다. 복합형 빔 성형 방식은 DOA기반의 빔 성형기를 사용한 후 정보검출을 위해 MRC기법을 사용한다. DOA 기반의 빔 성형은 간섭을 줄여주며, 동시에 MRC기법을 사용하여 다중화 이득을 얻는다. 따라서 제안된 복합형 빔 성형 방식은 공간적으로 상관된SIMO 채널에서 불충분한 송신 파일럿 전력을 가지고도 더 정확한 채널추정을 할 수 있게 하지만, 전체 다이버시티 이득을 잃어버린다. 다음 장에서는 복합형 방식과 MRC방식의 성능을 안테나 배열의 공간적인 채널 상관도에 따라 비교한다.

III. 모 의 실험

1. 모의실험 환경

기본 시스템은 cdma 2000 1x 역방향 링크로 9.6bps 기본 통화 채널과 파일럿 채널이 I-Q 채널에 할당되어 있고, TPR이 3.75dB인 20ms 프레임의 radio configuration 3에 기반하고 있다^[3]. 채널 코딩으로는 1/4 코딩을 가지는 길쌈부호(conventional codes)를 사용한다. 전력제어는 내 루프(inner loop)과 외 루프(outer loop)이 모두 적용되었으며, 내 루프 전력제어의 전력제어 간격은 0.5dB이다. 채널 추정 방식은 복잡도가 작은 ML 채널 추정 방식을 사용한다. 채널 추정 구간은 채널의 코히어런스 (coherence) 구간에 따라 결정된다. 이 방식은 도플러 주파수가 커질수록 코히어런스 구간이 줄어들고, 따라서, 채널 추정 구간이 줄어들어 채널 추정이 부정확해진다.

두 빔 성형 방식의 우열을 가리기 위한 기초 연구이므로 채널 모델은 간략화 하여 레일리(Rayleigh) 주파수 비 선택적 페이딩 채널을 가정한다. 최대 도플러 주파수, f_d 는 10Hz와 200Hz의 두 경우를 고려한다. 반송파 주파수가 2 GHz일 때, 최대 도플러 주파수에 따라 이동체의 속도는 각각 5.4km/hr, 108km/hr이다. 채널의 공간적인 상관도는 DOA, AOS, 안테나간의 거리에 의해 결정된다^[6]. 모의실험에서는 여러 DOA와 AOS에 따라 성능을 분석하였다. 이 논문에서 고려된

표 1. DOA와 AOS에 따른 공간적인 상관도
Table 1. Spatial correlation for each DOA and AOS.

	DOA 0°	DOA 30°	DOA 60°	DOA 90°
AOS 15°	0.892	0.919	0.972	0.999
AOS 30°	0.624	0.708	0.891	0.992

송신 신호의 DOA는 0°, 30°, 60°, 90°이며, AOS는 15°와 30°이다. 표 1은 각각의 DOA와 AOS에 따른 인접한 안테나간의 공간 상관도이다. 복합형 빔 성형 방식은 상관도가 낮은 채널, 즉 AOS가 큰 채널에서 성능이 떨어진다. 따라서 상관도가 낮은 (AOS가 큰) 채널은 환경은 모의실험에서 제외한다. 또한 간섭 신호 모델링은 셀 내에 10개의 간섭 신호가 균일하게 분포 되어 있다고 가정하였다.

2. 모의실험 결과

Monte Carlo 모의실험을 사용하여, 앞 절에서 가정한 DOA와 AOS, 안테나 수에 따라 1% 프레임 오류율 (FER: Frame Error Rate)을 만족시키기 위한 안테나 당 SIR을 구하였다.

그림 2는 최대 도플러 주파수가 10Hz일 때 원하는 사용자의 DOA가 0°, 30°, AOS가 15°, 30° 일 때의 모의실험 결과이다. 점선은 MRC 방식(conventional BF로 표시)의 성능을 실선은 복합형 방식(hybrid BF로 표시)의 성능을 나타낸다. 먼저 DOA가 0°인 경우를 살펴보면 AOS가 30°에서 15°로 변환에 따라 공간적인 상관도가 커진다. 이 경우 MRC 빔 성형 방식은 다중화 이득을 잃게 되므로 성능이 더 나빠진다. 반면에 복합형 방식은 MRC 결합 전에 그룹별로 DOA 기반의 빔 성형을 하여, 공간 다중화 이득은 어느 정도 잃어버리지만 간섭 제거로 인한 SIR 향상을 얻는다. 따라서 복합형 방식은 공간적으로 상관도가 큰 SIMO 채널에서 더 좋은 성능을 보인다. 특히 원하는 신호의 DOA가 0°(broadside, 안테나 배열에 직각)에 가까워짐에 따라 빔 폭이 줄어들어, 간섭 제거가 더 잘되어 빔 성형 이득이 증가한다.

표 2에는 최대 도플러 주파수, f_d 에 따른 MRC 방식에 대한 복합형 방식의 이득이 정리되어 있다. 표 2 (a)는 최대 도플러 주파수가 10 Hz 인 경우의 DOA와 AOS에 따른 복합형 빔 성형 방식의 이득을 보인다. 복합형 방식은 수신 신호의 DOA가 60°보다 커지면, DOA기반의 빔 성형기에 의해 만들어진 빔의 폭이 넓어져 간섭을 효과적으로 제거 할 수 없어 이득이 작다.

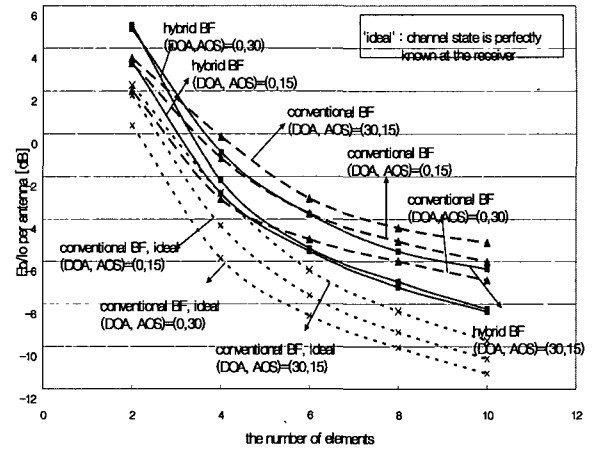


그림 2. 복합형 방식과 MRC 빔 성형 방식의 성능비교 ($f_d=10\text{Hz}$)

Fig. 2. Performances of hybrid and conventional beamformer($f_d=10\text{Hz}$).

표 2. MRC 방식에 대한 복합형 방식의 빔 성형 이득 [dB] (a) $f_d=10\text{Hz}$ (b) $f_d=200\text{Hz}$

Table 2. Hybrid beamformer gain [dB] over conventional beamformer(a) $f_d=10\text{Hz}$ (b) $f_d=200\text{Hz}$.

(a)

Number of antennas	DOA 0°		DOA 30°		DOA 60°		DOA 90°	
	AOS 15°	AOS 30°	AOS 15°	AOS 30°	AOS 15°	AOS 30°	AOS 15°	AOS 30°
	2	-0.06	-3.09	-1.37	-4.75	-0.65	-2.78	0.29
4	1.64	-0.88	0.73	-1.05	-0.08	-0.36	0.10	-0.07
6	1.78	0.43	0.74	-0.05	0.17	-0.12	0.15	0.03
8	2.15	0.96	1.11	0.09	0.21	-0.10	0.13	0.11
10	2.33	1.37	1.24	0.18	0.30	-0.10	0.05	0.23

(b)

Number of antennas	DOA 0°		DOA 30°		DOA 60°		DOA 90°	
	AOS 15°	AOS 30°	AOS 15°	AOS 30°	AOS 15°	AOS 30°	AOS 15°	AOS 30°
	2	1.59	0.62	0.53	-0.33	0.22	-0.44	0.20
4	2.24	1.30	1.05	0.40	0.25	-0.14	0.24	0.25
6	2.37	1.62	1.12	0.50	0.26	-0.01	0.27	0.25
8	2.68	1.96	1.38	0.70	0.33	0.01	0.28	0.16
10	2.78	1.97	1.51	0.90	0.46	0.15	0.30	0.15

하지만 안테나의 수가 6개 이상이고 AOS가 30°이하인 경우 MRC 방식에 비해 더 좋은 성능을 나타낸다. 안테나 수가 6개일 때 최대 1.78 dB 까지 이득을 얻을 수 있다. 안테나의 수가 4개 이상인 경우에는 AOS가 15°보다 작으면 복합형 방식이 일반적인 MRC 방식에 비해 더 우수한 성능을 보인다.

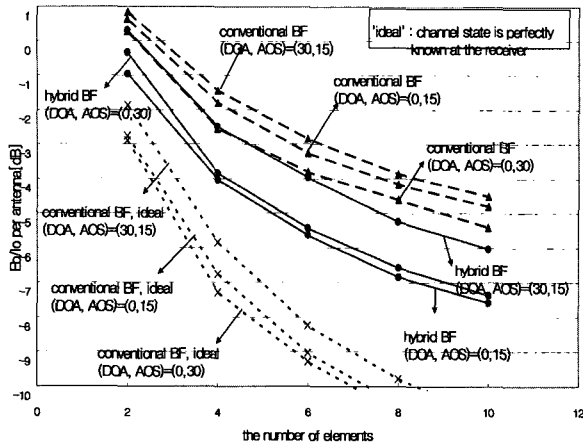


그림 3. 복합형 방식과 MRC 빔 성형 방식의 성능비교 ($f_d=200\text{Hz}$)

Fig. 3. Performances of hybrid and conventional beamformer ($f_d=200\text{Hz}$).

그림 3은 최대 도플러 주파수가 200 Hz일 때의 복합형과 MRC 빔 성형 방식의 성능 비교 결과이다. 빠르게 변하는 페이딩 채널에서는 오류 정정 부호로 충분한 시간적 다중화 이득을 얻을 수 있기 때문에, 공간적인 다중화 이득의 손실을 일부 보상한다^[2]. 이것은 그림 3과 표 2(b)에서 보는 것처럼 복합형 빔 성형 방식을 더 유용하게 만들어준다. 안테나의 수가 6개 이상이고 AOS가 30°로 제한되면, 복합형 방식이 MRC 방식보다 더 좋은 성능을 보인다. 안테나가 6개일 때 이득은 최대 2.37dB까지 얻어질 수 있다. AOS가 15°인 채널에서 안테나가 4개 이상이면 복합형이 일반적인 MRC 방식보다 더 좋은 성능을 보인다.

IV. 결 론

복합형 빔 성형 방식은 cdma2000 역방향 링크의 상 관된 SIMO 채널에서 불충분한 파일럿 전력으로 인한 부정확한 채널추정에 따른 성능감소를 극복하기 위해 제안되었다. 복합형 방식은 그룹별 DOA 기반의 빔 성형으로 파일럿 신호의 SIR을 향상시켜 파일럿 전력이 불충분한 경우에도 더 정확한 채널추정을 가능하게 한다. 결론적으로 6개 이상의 안테나를 가지는 복합형 빔 성형 방식은 AOS가 30°이하로 제한된 경우 일반적인 MRC 빔 성형 방식보다 더 좋은 성능을 보인다. 안테나가 6개일 때 천천히 변하는 페이딩 채널 (10Hz 최대 도플러 주파수)과 빠르게 변하는 페이딩 채널 (200Hz 최대 도플러 주파수)에서 각각 1.78 dB, 2.37 dB까지 이득을

얻을 수 있다. 또한 안테나가 4개 이상인 경우에는 채널의 AOS가 15°이하이면 MRC 방식에 비해 우수하다.

참 고 문 헌

- [1] Sang-Hoon Lim, Jeonghwa Lee, and Jongsoo Park, "Performance evaluation of adaptive beam-forming using pilot and traffic channel in cdma2000 reverse link," *Proc. VTC 2002 Fall IEEE*, vol. 4, pp. 2154-2157, Fall 2002.
- [2] R. A. Soni, R. M. Buehrer, and R. D. Benning, "Intelligent antenna system for cdma2000", *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 19, issue 4, pp. 54-67, July 2002.
- [3] S. Sarkar, T. Chen, G. Leung, L. Blessent, and E. Tiedemann, "Cdma2000 reverse link: design and system performance," *Proc. VTC 2000 Fall IEEE*, vol. 6, pp. 2713-2719, Fall 2000.
- [4] Seunghyun Min and Kwang Bok Lee, "Channel Estimation Based On Pilot And Data Traffic Channels For DS/CDMA Systems," *GLOBECOM 98 IEEE*, vol. 3, pp. 1384-1389, Nov. 1998.
- [5] L. C. Godara, "Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations," *Proc. The IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997.
- [6] J. Salz, and J. H. Winters, "Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, issue 4, pp. 1049-1057, Nov. 1994.

저 자 소 개



최 영 관(정회원)
 1998년 연세대학교 전파공학과
 학사 졸업.
 2000년 연세대학교 전기전자
 공학과 석사 졸업.
 2000년 현재 연세대학교 전기전
 자공학과 박사 과정.

<주관심분야: CDMA 이동통신시스템, 순/역방향
 링크 빔 성형 기술, MIMO OFCDM 시스템>



김 동 구(정회원)
 1983년 한국항공대학교 통신
 공학과 학사 졸업.
 1985년 U.S.C. Dept. of Electrical
 Engineering 석사 졸업.
 1992년 U.S.C. Dept. of Electrical
 Engineering 박사 졸업.

1994년 - 현재 연세대학교 전기전자공학과 부교수
 <주관심분야: CDMA 이동통신 시스템, 3G/4G 시
 스템, MIMO-OFDM, Packet Scheduling>