

논문 2008-45TC-7-7

셀 간 협조적 공간 다중화 및 빔포밍을 이용한 하향링크 전송 효율 증대 방안

(A Downlink Spectral Efficiency Improvement Scheme Using Intercell
Cooperative Spatial Multiplexing and Beamforming)

장 재 원*, 진 귀 언*, 성 원 진**

(Jaewon Chang, Gwyun Jin, and Wonjin Sung)

요 약

주파수 재사용 기법을 사용하는 셀룰러 시스템의 경우 단말기가 셀 경계로 이동할수록 인접 셀로부터 오는 간섭 신호의 영향을 받게 되어 성능 열화를 겪게 된다. 본 논문에서는 다중 셀 시스템의 하향링크 전송 시, 지리적으로 떨어져 있는 다수의 기지국에서 상호 협력을 통해 다중 안테나 단말기에 협조적으로 신호를 전송하는 경우 기지국들과 단말기 간에 형성된 분산 MIMO (multiple-input multiple-output) 채널을 이용하여 공간 다중화 및 빔포밍 이득을 얻을 수 있는 전송 방안 및 수신 기법을 제안한다. 특히, 주파수 재사용률과 단말기의 수신 안테나 개수의 변화에 따라 제안 기법의 유효 신호 대 간섭 비와 전송 효율을 분석 및 산출하고, 기존 셀룰러 시스템에서 널리 사용되는 MRC (maximal ratio combining) 수신 기법의 성능과 비교한다. 셀 경계에서의 성능 이득을 비교함으로써 인접 셀 간섭이 큰 영역에서 제안 기법을 사용할 때 단말기의 전송 효율 향상 정도를 평가한다.

Abstract

In typical cellular systems using frequency reuse scheme, the terminal suffers a performance degradation due to the intercell interference signals from adjacent cells as the terminal moves toward the cell boundary. In this paper, a signal transmission and reception scheme which achieve spatial multiplexing and beamforming gain from a distributed MIMO (multiple-input multiple-output) channel using multiple-antenna terminal is proposed for the spectral efficiency enhancement in a multi-cell downlink environment, when geographically separated base stations cooperatively transmit signals. In particular, we analyze the effective signal-to-interference ratio and spectral efficiency of the proposed scheme for different frequency reuse patterns and for varying numbers of receive antennas, and compare with the performance of the MRC (maximal ratio combining) reception scheme in typical cellular systems. We evaluate the amount of transmission efficiency of the scheme by comparing the performance near the cell boundary where the strong intercell interference is experienced.

Keywords: 협조적 전송, 주파수 재사용, 공간 다중화, 빔포밍, 분산 MIMO, 다중 안테나 단말기

I. 서 론

최근 무선 이동통신 시스템 분야에서는 멀티미디어 서비스와 같은 고속의 데이터 통신을 지원하기 위하여 셀 간 상호 협력을 통해 신호를 전송하는 협조적 전송 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1~2]. 협조적

전송 기법은 지리적으로 분산돼 있는 기지국들을 이용하여 다수의 경로를 통해 신호를 전송함으로써 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있고, 또한 다수의 수신 안테나를 갖는 단말기를 사용할 경우 협조적으로 신호를 전송하는 기지국들과 지리적으로 분산된 MIMO (multiple-input multiple-output) 채널을 형성함으로써, MIMO 시스템의 특성을 활용하는 기술들을 이용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 분산 MIMO 시스템에서 협조적 전송을 하는 기지국들이 서로 다른 신호를 전송할 경우 단말기에서 ZF (zero-

* 학생회원, ** 중신회원, 서강대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

접수일자: 2008년2월5일, 수정완료일: 2008년7월21일

forcing) 또는 MMSE (minimum mean-square error) 방식과 같은 공간 역다중화 기법을 이용하여 공간 다중화 수신을 하거나 협조적 전송을 하는 기지국에서 채널 정보를 활용할 수 있는 경우에는 지리적으로 분산돼 있는 다수의 안테나를 이용하여 빔포밍 이득을 얻을 수 있다. 또한 셀 경계와 같이 인접 셀 간섭의 영향이 큰 영역에서는 주파수 재사용^[3-4]과 같이 인접 셀 간섭을 회피할 수 있는 기법을 선택적으로 사용하여 시스템의 성능을 추가적으로 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 기지국간 상호 협력을 통해 다중 안테나 단말기에 신호를 전송하는 경우 기지국들과 단말기에 형성되는 분산 MIMO 채널을 이용하여 공간 다중화 이득 및 빔포밍 이득을 얻을 수 있는 전송 방안 및 수신 기법을 제안한다. 특히, 셀 경계와 같이 인접 셀 간섭이 큰 영역에서 셀 간 협조적인 신호 전송시 제안한 수신 기법과 주파수 재사용 기법을 적용할 때 단말기의 수신 안테나 개수에 따른 유효 신호 대 간섭 비를 구하고, 모의실험을 통해 평균 전송 효율을 산출한다. 또한 일반적인 셀룰러 시스템과 같이 각각의 기지국이 서비스 영역에 속해 있는 단말기에 신호를 전송하는 경우 수신 다이버시티 기법 중 최적의 성능을 갖는 MRC (maximal ratio combining) 수신 기법과의 비교를 통해 셀 경계에서 제안 기법을 사용할 때 성능 향상 정도를 평가한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 실험 및 분석에 사용한 시스템 모델을 기술하고, III장에서는 셀 간 비협조적 신호 전송시 단말기에서 MRC 수신 기법을 사용하는 경우와 협조적 신호 전송시 제안한 수신 기법을 사용하는 경우 주파수 재사용 기법과 수신 안테나 개수에 따른 수신 신호의 유효 신호 대 간섭 비와 전송 효율을 구한다. IV장에서는 III장에서 정의한 각 시스템의 성능을 분석하고, 모의실험을 통해 제안한 수신 기법의 성능 이득을 제시하며, V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

분석 및 성능 평가에 사용되는 다중 셀 모델은 그림 1과 같이 $K = 19$ 개의 셀로 구성되어 있다. 셀 커버리지를 나타내는 육각형의 한 꼭지점과 기지국 간의 거리 D 는 1로 정규화하여 표현하고, 각 기지국은 한 개의 송신 안테나를 가지며 단말기는 M_R 개의 수신 안테나를 사용한다. 각각의 기지국 BS_i 에서 단말기에 수신되는 신호의 전력을 $P_i = P d_i^{-\gamma}$ 로 나타낼 때 P 는

기지국의 송신 신호 전력을 의미하고, d_i 는 기지국 BS_i 와 단말기 간의 정규 거리이며, γ 는 기지국과 단말기 간의 거리에 따른 경로 손실을 반영하는 경로 손실 지수이다. 백색 잡음의 영향이 미미한 잡음 제한적인 환경에서 단말기에 수신된 신호 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_{M_R}]^T$ 은 통신 중인 기지국의 신호와 인접 셀 기지국의 간섭 신호를 이용하여

$$\mathbf{r} = \sum_{i \in S} \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i + \sum_{i \in I} \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i \quad (1)$$

와 같이 표현된다. S 는 단말기와 통신 중인 기지국의 인덱스 집합을 나타내고, I 는 간섭 신호를 전송하는 인접 셀 기지국의 인덱스 집합을 나타낸다. s_i 는 BS_i 에서 송신하는 평균 전력이 1인 전송 심볼이고, $\mathbf{h}_i = [h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,M_R}]^T$ 는 BS_i 와 단말기 사이의 $M_R \times 1$ 인 채널 벡터로써 각각의 원소는 서로 독립적이고, 평균 전력이 1인 복소 가우시안 변수이다.

셀룰러 시스템에서 인접 셀 간섭을 회피하기 위하여 사용되는 주파수 재사용은 전체 시스템 대역폭을 여러 개의 주파수 영역으로 분할하여 동일 주파수 영역을 사용하는 인접 셀들을 정해진 주파수 배치 패턴에 따라 배타적인 주파수 영역에 할당하는 기법이다. 전체 시스템 대역폭을 f_1, f_2, f_3 주파수 영역으로 동일하게 분할할 경우 주파수 재사용률 1인 시스템은 각각의 셀들에서 f_1, f_2, f_3 주파수 영역 모두를 사용하고, 주파수 재사용률 2/3인 시스템은 그림 2와 같은 주파수 배치 패턴에 따

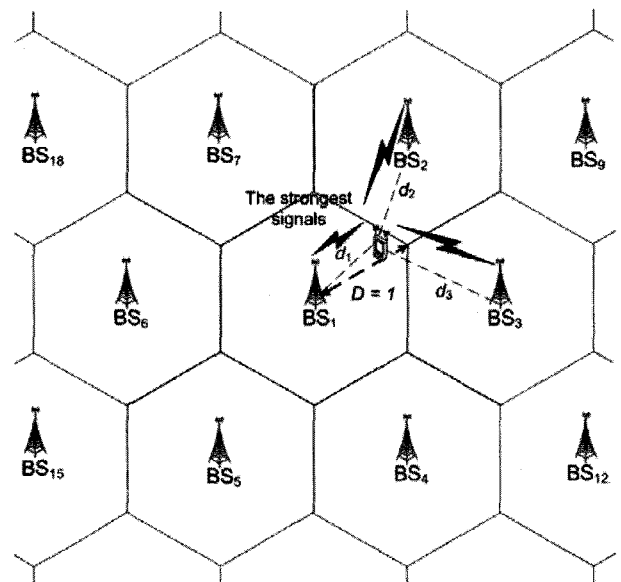


그림 1. 다중 셀 환경에서 전송 모델

Fig. 1. Transmission model in a multi-cell environment.

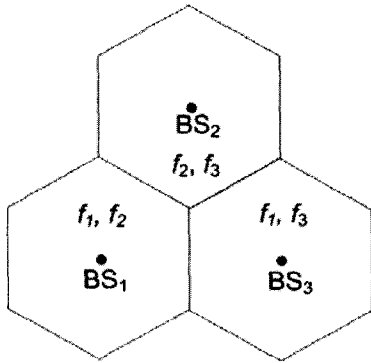


그림 2. 주파수 재사용률 $r = 2/3$ 일 경우 적용되는 주파수 배치 패턴
 Fig. 2. Frequency allocation pattern for frequency reuse factor of $r = 2/3$.

라 전체 주파수 대역폭을 나누어 사용한다. 셀 간 동일한 주파수 자원의 사용으로 인한 인접 셀 간섭은 주파수 재사용률을 낮추어 사용함으로써 극복할 수 있는 반면 셀 당 사용되는 주파수 자원은 감소한다. 따라서 실제 시스템에서 주파수 재사용 기법을 활용하여 시스템의 전송 용량을 향상시키기 위해서는 고려하는 환경에 따라 주파수 재사용 기법의 효과적인 적용이 필요하며, 단말기의 위치에 따라 가장 효율적인 주파수 재사용률은 변할 수 있다. 제안 기법의 성능 평가는 주파수 재사용률 $r = 1$ 또는 $2/3$ 를 기반으로 수행하며, $r = 1/3$ 의 경우 셀 당 사용하는 주파수 자원의 손실이 인접 셀 간섭 감소로 인한 이득보다 더 큰 경우임이 실험적으로 검증되어 고려 대상에서 제외하였다.

III. 수신 기법에 따른 셀 당 전송 효율

1. 비협조적 전송 시 기존 수신 기법

다중 경로로 전송된 신호의 통계적 특성을 이용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 다이버시티 기법에는 MRC, EGC (equal gain combining), SC (selection combining) 와 같은 수신 기법 등이 있으며 무선 채널 환경에서 MRC 수신 기법은 다른 다이버시티 기법에 비해 우수한 성능 향상 효과를 갖는 수신 기법으로 알려져 있다^[5~7].

본 절에서는 일반적인 셀룰러 시스템과 같이 기지국들이 커버리지 안에 속해 있는 단말기에 신호를 전송하는 경우 다수의 수신 안테나를 이용하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 MRC 수신 기법 및 주파수 재사용 기법 적용 시 셀 당 전송 효율 산출 방식을 기술한다. 각 기지국간 협력없이 신호를 전송하는 경우 M_R 개의

수신 안테나를 갖는 단말기에 수신된 신호는 식 (1)과 같이 표현되고, 단말기와 통신 중인 기지국의 인덱스 집합은 $S = \{1\}$ 로 정의되며, 간섭 신호를 전송하는 인접 셀 기지국들의 인덱스 집합은 $I = \{2, 3, \dots, K\}$ 로 나타내어진다. 통신 중인 기지국 BS₁과 단말기 사이의 채널 벡터 h_1 을 정규화한 수신 가중치 벡터^[8] $w = h_1^H / |h_1|$ 를 이용하여 MRC 수신 기법을 적용할 경우 수신기를 통과한 신호 y 는

$$y = wr$$

$$= \sqrt{P_1} wh_1 s_1 + \sum_{i \in I} \sqrt{P_i} wh_i s_i \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 이때, MRC 수신 기법을 적용한 신호의 유효 신호 대 간섭 비 μ 는

$$\mu = \frac{P_1 |wh_1|^2}{\sigma_I^2} = \rho_{MRC} |h_1|^2, \quad \rho_{MRC} = \frac{P_1}{\sigma_I^2} \quad (3)$$

와 같이 표현되며, $\sigma_I^2 = E[\sum_{i \in I} P_i |wh_i|^2]$ 은 MRC 수신 기법을 적용할 경우 인접 셀 간섭 신호들의 전력의 합을 나타낸다. 주파수 재사용 기법을 적용한 경우 셀 당 전송 효율 η 는 채널 용량 수식을 이용하여

$$\eta = r \times \log_2(1 + \mu) \text{ [bps/Hz/cell]} \quad (4)$$

와 같이 산출되며, 주파수 재사용률 r 은 각각의 기지국 BS_i가 데이터 전송을 위하여 사용한 전체 시스템 대역폭 대비 주파수 영역의 비율을 나타낸다.

2. 협조적 전송 시 제안 수신 기법

다수의 기지국간 상호 협력을 통해 하나의 단말기에 협조적인 신호 전송을 할 경우, 셀 경계에 있는 단말기의 전송 효율을 향상시킬 수 있는 수신 기법이 존재하며 주파수 재사용률 변화에 따라 셀 당 전송 효율도 변하게 된다. 셀 경계에 위치한 단말기에 가장 큰 영향을 미치는 기지국 BS₁, BS₂, BS₃ 들이 협조적 전송을 할 경우 단말기에 신호를 전송하는 기지국들의 인덱스 집합은 $S = \{1, 2, 3\}$ 로 정의되고, 간섭 신호를 전송하는 인접 셀 기지국들의 인덱스 집합은 $I = \{4, 5, \dots, K\}$ 로 나타낸다.

가. CT-SD (Cooperative Transmission with Spatial Demultiplexing)

다중 송수신 안테나를 갖는 MIMO 시스템 전송 효율

을 증대시키기 위하여 다수의 송신 안테나에서 서로 다른 신호를 전송하고, 수신단에서는 ZF 또는 MMSE 방식과 같은 공간 역다중화 (spatial demultiplexing: SD) 기법을 이용하여 수신 안테나 개수 만큼의 전송 신호를 검출할 수 있다^[9-10]. 따라서 한 개의 송신 안테나를 갖는 기지국들로 구성된 다중 셀 환경에서 M_R 개의 수신 안테나를 갖는 단말기는 지리적으로 떨어져 있는 M_R 개의 기지국들이 전송하는 신호를 검출할 수 있다. M_R 개의 수신 안테나를 갖는 단말기는 협조적으로 신호를 전송하는 기지국들의 인덱스로 구성된 집합 S 의 기지국에서 전송하는 신호와 집합 S 의 인덱스를 제외한 $M_R - n(S)$ 개의 인접 셀 기지국들에서 전송하는 간섭 신호를 추가적으로 검출할 수 있다. 이때, $n(U)$ 는 임의의 집합 U 를 구성하는 원소의 개수를 나타내는 기호이다. 단말기에서 검출 가능한 인접 셀 기지국들의 인덱스 집합 $I_0 = \{i_1, i_2, \dots, i_{M_R - n(S)}\}$ 로 정의하고, 각 원소는 단말기에 수신된 신호의 전력이 가장 큰 기지국의 인덱스로 구성한다. 또한 제한한 수신 기법을 적용할 경우 검출이 불가능한 인접 셀 기지국들의 인덱스 집합 $I_1 = I - I_0$ (즉, $I_0 \cup I_1 = I$)로 정의한다. 이때, 단말기에 수신된 신호는

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \sum_{i \in S} \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i + \sum_{i \in I_0} \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i + \sum_{i \in I_1} \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i \\ &= \mathbf{H}\mathbf{s} + \sum_{i \in I_1} \sqrt{P_i} \mathbf{h}_i s_i, \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} \mathbf{h}_1 & \dots & \sqrt{P_{n(S)}} \mathbf{h}_{n(S)} & \sqrt{P_{i_1}} \mathbf{h}_{i_1} & \sqrt{P_{i_2}} \mathbf{h}_{i_2} \\ & & & \dots & \sqrt{P_{i_{M_R - n(S)}}} \mathbf{h}_{i_{M_R - n(S)}} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{s} &= [s_1 \dots s_{n(S)} \quad s_{i_1} \quad s_{i_2} \dots s_{i_{M_R - n(S)}}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 표현할 수 있으며, \mathbf{H} 는 단말기에 협조적으로 신호를 전송하는 기지국들의 채널 정보 \mathbf{h}_i ($i \in S$)와 인접 셀 기지국들의 채널 정보 \mathbf{h}_i ($i \in I_0$)로 이루어진 채널 행렬을 나타내고, \mathbf{s} 는 단말기에서 검출 가능한 신호를 전송하는 기지국 BS_i ($i \in \{S \cup I_0\}$)에서 전송하는 심볼 벡터를 나타낸다. 전송 심볼 벡터 \mathbf{s} 를 검출하기 위하여 ZF 수신 방식을 이용하는 경우 단말기에서 사용되는 행렬 \mathbf{W} 는

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{M_R} \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 행렬 \mathbf{W} 의 행벡터들의 Frobenius norm

은 1로 정규화 되어 있고, 협조적으로 신호를 전송하는 기지국에서 전송된 심볼 s_i ($i \in S$)는 \mathbf{w}_i ($i \in S$) 벡터를 이용하여 다음과 같이 검출할 수 있다.

$$\begin{aligned} y_i &= \mathbf{w}_i^H \mathbf{r} \\ &= \sqrt{P_i} \mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i s_i + \sum_{j \in I_1} \sqrt{P_j} \mathbf{w}_j^H \mathbf{h}_j s_j, \quad i \in S \end{aligned} \quad (7)$$

이와 같은 수신 기법을 적용하여 검출한 신호 y_i ($i \in S$)의 유효 신호 대 간섭 비 μ_i ($i \in S$)는

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{P_i |h_i|^2}{\sigma_{I_1}^2} = \rho_{CT-SD} |h_i|^2, \\ \rho_{CT-SD} &= \frac{P_i}{\sigma_{I_1}^2}, \quad i \in S \end{aligned} \quad (8)$$

와 같이 구해진다. $\sigma_{I_1}^2 = E[\sum_{i \in I_1} P_i |\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i|^2]$ 은 검출이 불가능한 인접 셀 간섭 신호들의 전력의 합이고, 행렬 \mathbf{W} 의 정규화된 행벡터에 의해 $h = \mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i$ 는 평균 전력이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수로 표현된다^[11]. 주파수 재사용 기법을 적용한 경우 셀 당 전송 효율 η 는

$$\eta = \frac{r}{n(S)} \times \sum_{i \in S} \log_2(1 + \mu_i) \quad [\text{bps/Hz/cell}] \quad (9)$$

과 같이 산출되며, 집합 S 의 원소를 인덱스로 가지는 기지국들의 자원을 사용하여 데이터를 전송하므로 셀 당 전송 효율은 $1/n(S)$ 을 곱하여 정규화한다.

나. CT-BF (Cooperative Transmission with Beamforming)

다중 송수신 안테나를 갖는 MIMO 시스템의 채널 정보를 송수신단에서 활용할 수 있는 경우 송신단과 수신단에 적절한 가중치 벡터를 적용하여 빔포밍 이득을 얻을 수 있다^[12-13]. 협력적으로 신호를 전송하는 기지국 BS_i ($i \in S$)와 M_R 개의 수신 안테나를 갖는 단말기 사이의 $M_R \times n(S)$ 인 채널 행렬 \mathbf{H} 에 SVD (singular value decomposition) 연산을 수행하면

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \dots \mathbf{h}_{n(S)}] = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (10)$$

와 같이 분해된다. 이때, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_{M_R}]$ 는 $M_R \times M_R$ 인 unitary 행렬이며, $\mathbf{\Sigma}$ 는 고유값 (singular value) $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_q$ 들로 구성된 대각 행렬이고, q 는 채널 행렬 \mathbf{H} 의 랭크를 나타낸다. \mathbf{V}^H 는 $n(S) \times n(S)$ 인

unitary 행렬 $V = [v_1 \cdots v_{n\{S\}}]$ 에 hermitian 연산을 수행한 것이다. 협력적으로 신호를 전송하는 기지국 BS_i ($i \in S$)들은 가장 큰 고유값 λ_1 에 해당되는 송신 가중치 벡터 $v_1 = [v_{1,1} \cdots v_{1,n\{S\}}]^T$ 을 이용하여 심볼 $s_i = \sqrt{n\{S\}}v_{1,i}s$ ($i \in S$)를 전송하고, 협조적인 전송을 하는 각 기지국들은 평균 전력이 1인 동일한 심볼 s 를 전송한다고 가정한다. $\sqrt{n\{S\}}$ 는 협조적 전송을 하는 기지국에서 전송하는 신호의 전력을 정규화하기 위한 계수이다. 이때, 단말기에 수신된 신호는 식 (1)과 같이 표현되며, 협조적으로 신호를 전송하는 기지국에서 전송된 심볼 s 는 가장 큰 고유값 λ_1 에 해당되는 수신 가중치 벡터 $w = u_1^H = [u_{1,1} \cdots u_{1,M_R}]$ 를 이용하여 다음과 같이 검출할 수 있다.

$$y = wr$$

$$= \sum_{i \in S} \sqrt{P_i} u_1^H h_i s_i + \sum_{i \in I} \sqrt{P_i} u_1^H h_i s_i \quad (11)$$

단말기가 셀 경계에 있을 경우, 협조적 전송을 하는 기지국으로부터 단말기에 수신되는 신호의 전력 P_i ($i \in S$)는 서로 동일하므로 식 (11)은

$$y = \sqrt{n\{S\}} P_1 \lambda_1 s + \sum_{i \in I} \sqrt{P_i} u_1^H h_i s_i \quad (12)$$

와 같이 표현된다. 이와 같은 수신 기법을 적용하여 검출한 신호 y 의 유효 신호 대 간섭 비 μ 는

$$\mu = \frac{n\{S\} P_1 \lambda_1^2}{\sigma_I^2} = n\{S\} \rho_{MRC} \lambda_1^2 \quad (13)$$

와 같이 구할 수 있으며, $\sigma_I^2 = E[\sum_{i \in I} P_i |wh_i|^2]$ 은 인접 셀 간섭 신호들의 전력의 합을 나타낸다. 주파수 재사용 기법을 적용한 경우 셀 당 전송 효율 η 는

$$\eta = \frac{r}{n\{S\}} \times \log_2(1 + \mu) \quad [\text{bps/Hz/cell}] \quad (14)$$

와 같이 산출된다.

IV. 성능 비교 및 분석

III장에서 정의한 각 시스템의 전송 효율을 분석하기 위하여 Monte-Carlo 모의실험 결과를 살펴보고, 셀 간 협조적 신호 전송 시 수신 안테나 개수에 따른 전송 효율 측면에서의 성능 이득을 평가한다. 모의실험의 기본

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

종류	값
셀 구성	19 셀
기지국의 안테나 수	1
단말기의 안테나 수	M_R
주파수 재사용률(r)	1, 2/3
채널 환경	Quasi-static flat fading
경로 손실 지수(γ)	3.76
기지국 간 거리	2 km
기지국 송신전력	43 dBm

환경은 표 1에 기술된 바와 같다. 표현의 간소화를 위해 셀 간 비협조적 신호 전송 시 단말기에서 MRC 수신 기법을 사용하는 시스템의 경우는 NCT-MRC (non-cooperative transmission with MRC)로 나타내고, 협조적 신호 전송 시 제안한 수신 기법을 사용하는 시스템의 경우는 III장에서 기술한 바와 같이 CT-SD와 CT-BF로 나타낸다.

그림 3과 4는 주파수 재사용률 1과 2/3 인 다중 셀 환경에서 수신 안테나 개수의 변화에 따른 셀 경계 $D = 1$ 인 위치에 있는 단말기의 평균 전송 효율을 나타낸다. 그림 3과 같이 주파수 재사용률 1인 시스템에서 $M_R = 2$ 인 경우 CT-BF가 가장 높은 전송 효율을 가지며, $M_R = 2$ 인 경우를 제외하면 CT-SD가 CT-BF와 NCT-MRC보다 전송 효율이 높은 것을 알 수 있다. 이는 기지국 BS_1, BS_2, BS_3 에서 전송한 신호가 셀 경계에 있는 단말기의 성능에 가장 큰 영향을 미치는데 $M_R = 2$ 경우에는 두 개의 신호만을 검출할 수 있으므로 CT-SD를 통해 제거되지 않은 신호가 인접 셀 간섭 신호로 작용하여 성능을 열화시킨다. 주파수 재사용률을 2/3 로 낮춰 사용하는 경우, 각 셀들에서 전체 시스템 대역폭의 2/3 에 해당되는 주파수 영역만을 사용하므로 $M_R = 2$ 인 단말기가 CT-SD를 통해 두 기지국의 전송 신호를 검출하고, 나머지 한 기지국의 전송 신호는 주파수 재사용 기법을 이용하여 회피함으로써 전송 효율을 향상시킬 수 있으며, 그 평균 전송 효율은 그림 4에 나타내어진 바와 같다. 그러나 CT-BF와 NCT-MRC는 주파수 재사용률을 낮춰 사용할수록 인접 셀 간섭의 양은 줄어들지만 셀 당 사용되는 주파수 자원의 감소로 전송 효율이 낮아지고, 주파수 재사용률을 1/3로 더 낮출 경우 전송 효율은 감소된다. $M_R = 2$ 경우에 주파수 재사용률 2/3인 CT-SD는 주파수 재사용률 1인

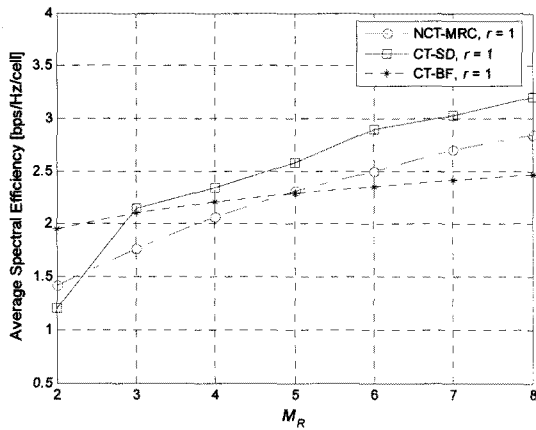


그림 3. 수신 안테나의 개수 변화에 따른 셀 경계에서의 평균 전송 효율 ($r = 1$)

Fig. 3. Average spectral efficiency at the cell boundary for different numbers of receive antennas ($r = 1$).

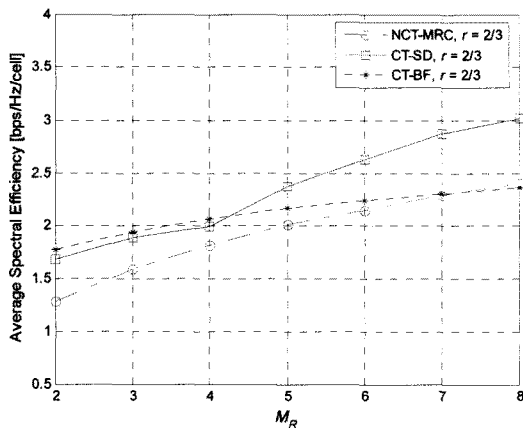


그림 4. 수신 안테나 개수의 변화에 따른 셀 경계에서의 평균 전송 효율 ($r = 2/3$)

Fig. 4. Average spectral efficiency at the cell boundary for different numbers of receive antennas ($r = 2/3$).

CT-SD 대비 0.49 bps/Hz/cell의 성능 이득을 갖고, 주파수 재사용률 1인 NCT-MRC 대비 0.28 bps/Hz/cell의 성능 이득을 얻는다.

그림 5와 6은 $M_R = 2$ 와 4일 경우 주파수 재사용률을 선택적으로 적용할 때 기지국 BS_1 과 단말기 사이의 정규 거리 d_1 의 변화에 따른 평균 전송 효율을 나타낸다. $M_R = 2$ 경우 CT-SD는 정규 거리 0.92부터 셀 경계까지의 구간에서 NCT-MRC에 비해 성능 이득이 있으며 그 평균값은 0.19 bps/Hz/cell이다. 또한 CT-BF는 0.88부터 셀 경계까지의 구간에서 NCT-MRC에 비해 성능 이득이 있으며 그 평균값은 0.29 bps/Hz/cell이다. $M_R = 4$ 경우 CT-SD를 적용할 때 0.95부터 셀 경계까지의 구간에서 NCT-MRC와의 비교를 통한 성

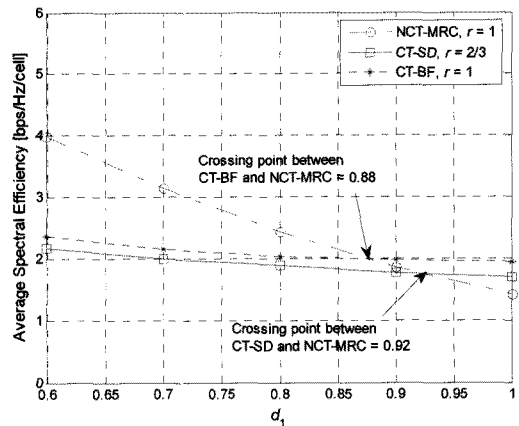


그림 5. 기지국과 단말기 간의 정규 거리 변화에 따른 평균 전송 효율 ($M_R = 2$)

Fig. 5. Average spectral efficiency for varying values of normalized distance ($M_R = 2$).

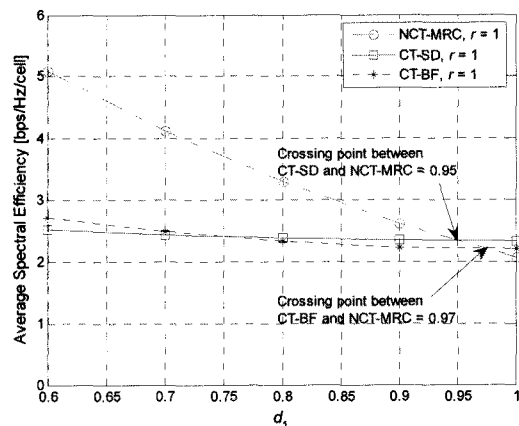


그림 6. 기지국과 단말기 간의 정규 거리 변화에 따른 평균 전송 효율 ($M_R = 4$)

Fig. 6. Average spectral efficiency for varying values of normalized distance ($M_R = 4$).

능 이득의 평균값은 0.17 bps/Hz/cell이며, CT-BF를 적용할 때 0.97부터 셀 경계까지의 구간에서 NCT-MRC와의 비교를 통한 성능 이득의 평균값은 0.12 bps/Hz/cell이다. 따라서 셀 경계와 같이 인접 셀 간섭이 큰 영역에서 적절한 주파수 재사용률과 셀 간 협조적인 신호 전송을 하는 경우 기지국들과 단말기 간에 형성된 분산 MIMO 채널을 이용하는 CT-SD와 CT-BF의 전송 효율이 NCT-MRC보다 우수한 것을 알 수 있다.

V. 결론

하향링크 셀룰러 환경에서 전송 효율을 향상시키기 위하여 지리적으로 떨어져 있는 다수의 기지국에서 상

호 협력을 통해 다중 안테나 단말기에 협조적으로 신호를 전송하는 경우 기지국들과 단말기 간에 형성된 분산 MIMO 채널을 이용하는 CT-SD, CT-BF와 기존 셀룰러 시스템에서 MRC 수신 기법을 사용하는 NCT-MRC의 유효 신호 대 간섭 비를 구하고, 모의실험을 통해 평균 전송 효율을 산출하였다. 셀 경계에 단말기가 위치할 때 $M_R = 2$ 경우 주파수 재사용률 1인 CT-BF가 가장 높은 전송 효율을 가지며, 주파수 재사용률 1인 NCT-MRC 대비 약 38 % 성능 향상을 얻는다. CT-SD는 $M_R = 2$ 경우 주파수 재사용률 2/3를 적용하면 셀 경계에서 주파수 재사용률 1인 NCT-MRC보다 약 20 % 성능 이득을 얻고, $M_R = 3$ 이상일 경우 CT-BF와 NCT-MRC 보다 높은 성능을 갖는다. 그러므로 셀 경계와 같이 인접 셀 간섭이 큰 영역에서 셀 간 협조적인 신호 전송시 제안한 수신 기법과 주파수 재사용률을 선택적으로 적용하면 기존 셀룰러 시스템에서 MRC 수신 기법을 적용하는 경우에 비해 전송 효율 측면에서 성능이 향상됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] A. A. M. Saleh, A. J. Rustako, and R. S. Roman, "Distributed antennas for indoor radio communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 35, pp. 1245-1251, Dec. 1987.
- [3] Z. Wang and R. A. Stirling-Gallacher, "Frequency reuse scheme for cellular OFDM systems," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 8, pp. 387-388, Apr. 2002.
- [4] L. Haipeng, Z. Lei, Z. Xin, and Y. Dacheng, "A novel multi-cell OFDMA systems structure using fractional frequency reuse," in *Proc. IEEE PIMRC'07*, pp. 1-5, Sept. 2007.
- [5] B. D. Rao and Y. Ming, "Performance of maximal ratio transmission with two receive antennas," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 894-895, June 2003.
- [6] A. Maref and S. Aissa, "Closed-form expressions for the outage and ergodic Shannon capacity of MIMO MRC systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, pp. 1092-1095, July 2005.
- [7] A. Shah and A. M. Haimovich, "Performance analysis of maximal ratio combining and comparison with optimum combining for mobile radio communications with cochannel interference," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 1454-1463, July 2000.
- [8] J. Proakis, *Digital Communications*, 4/e. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [9] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of MIMO communications—A key to gigabit wireless," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198-218, Feb. 2004.
- [10] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *Proc. IEEE ISSSE'98*, pp. 295-300, Sept. 1998.
- [11] S. Catreux, P. F. Driessen, and L. J. Greenstein, "Data throughputs using multiple-input multiple-output (MIMO) techniques in a noise-limited cellular environment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 1, pp. 226-235, Apr. 2002.
- [12] Y. Tokgoz and B. D. Rao, "Performance analysis of maximum ratio transmission based multi-cellular MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 83-89, Jan. 2006.
- [13] J. B. Andersen, "Array gain capacity for known random channel with multiple element arrays at both ends," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, pp. 2172-2178, Nov. 2000.

저 자 소 개



장 재 원(학생회원)
 2003년 서강대학교
 전자공학과 학사 졸업
 2005년 서강대학교
 전자공학과 석사 졸업
 2005년 2월~2007년 3월
 LG전자 이동통신기술
 연구소 주임연구원
 2007년~현재 서강대학교 전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : 디지털 통신, MIMO, 간섭 분석>



성 원 진(종신회원)
 1990년 서울대학교
 전자공학과 학사 졸업
 1992년 University of Michigan
 전기공학과 석사 졸업
 1995년 University of Michigan
 전기공학과 박사 졸업
 1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network
 Systems 책임연구원
 2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 부교수
 <주관심분야 : 이동무선통신, 통계적통신이론,
 MIMO, 위성모뎀>



진 귀 언(학생회원)
 2006년 서강대학교
 전자공학과 학사 졸업
 2008년 서강대학교
 전자공학과 석사 졸업
 <주관심분야 : MIMO, 채널코딩,
 통신공학>