

셀간 협력 통신 기반의 적응적 다중 사용자 다중 안테나 전송 기법

이진희¹, 고영채^{1,a}

¹ 고려대학교 전기전자공학과

Adaptive Multiuser MIMO Transmission in Wireless Systems with Cooperating Cells

Jinhee Lee¹ and Young-Chai Ko^{1,a}

¹ The School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, KOREA

(Received December 16, 2010; Revised January 10, 2011; Accepted January 14, 2011)

Abstract: In multicell wireless systems with insufficient frequency reuse, user transmission will suffer other-cell interference (OCI). Cell cooperation is an effective way to mitigate OCI and increase the system sum rate. An adaptive scheme for serving one user in each cell was proposed in [1]. In this paper, we generalize that scheme by serving two users in each cell with adaptive zeroforcing beamforming (ZF) strategies. Based on our derived statistics of the signal-to-noise plus interference ratios, we choose the scheme to maximize the total ergodic sum-rate based on user locations. Through the numerical examples, we show that the total system sum rate can be improved by selecting appropriate transmitting strategy adaptively. As a result, our proposed system can explore spatial multiplexing gain without additional power and thus improves total system sum rate significantly.

Keywords: Multicell wireless system, multiuser multiple-input multiple-output, other cell interference, cell cooperation, and zeroforcing beamforming.

1. 서론

기지국이 다수의 사용자와 통신하는 MU-MIMO (multiuser multiple input multiple output) 시스템은 단일 셀을 기반으로 하는 네트워크 상에서 높은 총 전송률 이득을 얻을 수 있다 [2]. 특히 MU-MIMO 시스템의 하향링크 (downlink)에 경우 전송단에서 DPC (dirty paper coding)을 사용하여 최적의 총 전송률을 얻을 수 있지만 시스템의 복잡도가 높아진다는 단점이 있기 때문에 실제 시스템에서 DPC를 활용하기 어렵다 [3]. 선형 빔포밍은 DPC보다 적은 시스템 복잡도를 가지고 DPC와 동일한 총 전송률의 스케

일 범칙을 얻을 수 있는 기법이다 [4-6]. 예를 들어 전송단과 수신단 모두 채널에 관한 정보를 완벽하게 알고 있을 경우 ZFBF (zeroforcing beamforming)을 통해 다른 사용자들의 채널이 형성하는 공간의 영공간 (null space)에서 전송 빔포밍 벡터를 만듦으로써 어시토틱 (asymptotic)한 최적의 총 전송률을 얻을 수 있다.

반면에 기존의 단일 셀 기반의 MU-MIMO 하향링크 전송 기법들은 다중 셀 환경 하에서는 높은 OCI (other cell interference)로 인하여 총 전송률이 저하된다는 문제점이 있다 [7]. 전통적으로 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 주파수 재사용 계수를 높이는 방법이 널리 사용되었지만 이 방법의 경우 주파수 효율성이 낮고 이로 인해 총 전송률이 제

a. Corresponding Author; koyc@korea.ac.kr

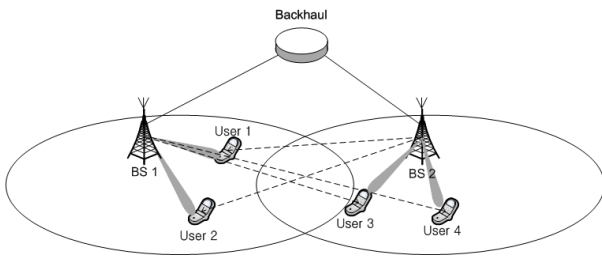


Fig. 1. System model of 2-cell 2-user network.

한된다는 단점이 있다.

최근에는 다수의 기지국들의 협력을 통하여 OCI의 영향을 완화하는 다중 셀 협력 통신 시스템이 많은 각광을 받고 있다 [8-10]. 이 시스템에서는 고속의 백본 (backbone)으로 연결된 기지국들이 공동으로 전송 빔포밍을 구성하여 OCI를 제거 혹은 감소시킴으로써 시스템의 총 전송률을 높일 수 있다. 특히 이 시스템은 기지국과 사용자의 안테나 개수가 증가할수록 더욱 효율성이 높아진다.

[11]에서는 [12]에서 제안하는 가상 상향링크 개념을 바탕으로 다중 셀 네트워크에서 하향링크와 상향링크의 이원화 (duality)에 관하여 기술하였고 이를 이용하여 최적의 전송 및 수신 빔포밍 벡터를 반복 수행 알고리즘을 통하여 얻을 수 있는 기법을 제안하였다. [13]에서는 셀의 개수가 2개이고 각 셀 당 지원하는 사용자가 2명일 경우 반복 수행 없이 최적의 전송 및 수신 빔포밍 벡터를 구할 수 있는 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 MMSE (minimum mean square error) 또는 ZFBF를 이용하여 OCI를 제거함과 동시에 채널 이득을 극대화할 수 있는 전송 및 수신 빔포밍 벡터를 구했다. [1]에서는 각 기지국이 각 셀 당 한 명에 사용자를 지원하는 경우 높은 총 전송률을 얻을 수 있는 적응 공간적 간섭 제거 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 각 기지국이 을 통하여 사용자에게 대한 위치 정보를 교환하고, 이 정보를 토대로 아이겐 빔포밍 (eigen beamforming) 및 셀간 간섭 제거 (intercell interference cancelation) 전송기법들 중 하나를 선택하여 사용자를 지원한다.

본 논문에서는 [1]에서 제안하는 기법을 각 기지국 당 2 명의 사용자를 지원하는 경우로 확장하였다. 제안기법에서는 협력하는 기지국들이 서로 지원하고자 하는 사용자들의 위치에 대한 정보를 교환하고 이를 바탕으로 ZFBF 기법을 이용하여 셀 내의 간섭 신호

혹은 셀간 간섭 신호를 제거한다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 그림 1과 같이 협력 셀의 개수가 2개이고 각 셀 당 M 개의 안테나를 가진 하나의 기지국이 셀 중앙에 위치해 있으며 각 기지국은 2명의 사용자를 지원하는 시스템을 고려하였다. 또한 각 사용자는 하나의 안테나를 가지고 있고 $M \geq 4$ 이다. 편의상 셀1에 위치한 사용자를 사용자 1, 2로 셀 2에 위치한 사용자를 사용자 3, 4로 나타내었다. 협력 기지국들은 백홀을 통해 서로 간에 사용자들의 CSI 및 위치에 관한 정보는 교환할 수 있으나 시스템의 복잡도를 낮추기 위해 다른 셀의 사용자로 전송하는 데이터는 교환할 수 없다고 가정하였다 [1]. 기지국 $i(i=1,2)$ 에서 사용자 $j(j=2(i-1)+1 \sim 2i)$ 로 보내는 전력은 1인 데이터 신호를 s_j 라고 나타냈다. 기지국 i 와 사용자 $k(k=1 \sim 4)$ 사이의 채널 벡터 $h_{i,k}$ 는 $M \times 1$ 가우시안 (Gaussian) 열벡터이고 공분산 (covariance) 행렬이 $E\{h_{i,k}h_{i,k}^H\}=I_M$ 이라 가정하였다. 여기서 $E\{\cdot\}$ 는 평균 연산자를, $\{\cdot\}^H$ 는 허미시안 (hermitian) 연산자를, I_M 은 $M \times M$ 단위행렬을 나타낸다. 기지국 i 에서 사용자 k 사이의 거리가 $d_{i,k}$ 라고 했을 때 거리에 따른 전력 감소는 $\alpha_{i,k} = \alpha_0 d_{i,k}^{-3.7}$ 의 함수를 따른다고 가정하였다. 여기서 α_0 은 셀 경계에서의 SNR (signal to noise ratio) 값을 나타낸다.

각 기지국은 ZFBF 기법을 사용하여 셀 내의 간섭만을 제거하는 전송 기법 (S-ZF) 및 셀 간의 간섭을 모두 제거하는 전송 기법 (I-ZF) 중 하나를 선택하여 사용자들을 지원한다. 기지국의 전송기법 집합을 $\mathcal{T} = \{S-ZF, I-ZF\}$, 사용자 j 로의 전송 기법을 $t_j (\in \mathcal{T})$ 라 할 때 사용자 1에서의 수신 신호 $y_1(t_1, \dots, t_4)$ 는 다음과 같다.

$$y_1(t_1, \dots, t_4) = \sqrt{\alpha_{1,1}} h_{1,1}^H w_{t_1} s_1 + \sum_{j=3}^4 \sqrt{\alpha_{2,1}} h_{2,1}^H w_{t_j} s_j + \nu_1 \quad (1)$$

여기서 w_{t_j} 는 전송기법 t_j 에 따라 결정되는 전력이 1인 빔포밍 벡터이고, ν_1 는 평균이 0이고 분산이 1인 AWGN (additive white gaussian noise)를 나타낸다.

위 식을 바탕으로 사용자 1의 SINR (signal to interference plus noise ratio)를 나타내면 다음과 같다.

$$r_1(t_1, \dots, t_4) = \frac{\alpha_{1,1} |h_{1,1}^H w_{t_1}|^2}{1 + \sum_{j=3}^4 \alpha_{2,1} |h_{2,1}^H w_{t_j}|^2} \quad (2)$$

이와 같은 방법으로 다른 사용자들의 SINR 값도 구할 수 있다.

2.1 전송 기법에 따른 빔포밍 벡터 형성 방법

S-ZF와 I-ZF는 모두 간섭을 ZFBF를 사용하여 제거하는 기법으로 S-ZF의 경우 셀 내의 다른 사용자에게 미치는 간섭을 제거하고 I-ZF의 경우 모든 셀 내의 사용자에게 미치는 간섭을 제거한다. 사용자 1의 전송 빔포밍 벡터 w_{t_1} 는 다음과 같은 벡터를 표준화 하여 얻을 수 있다.

$$b_1 = (I_M - P_H)h_{1,1} \quad (3)$$

여기서 $P_H = H(H^H H)^{-1}H^H$ 이며, S-ZF의 경우 $H = [h_{1,2}]$ 이고 I-ZF의 경우 $H = [h_{1,2}, h_{2,3}, h_{2,4}]$ 이다. 이와 같은 방식으로 다른 사용자의 전송 빔포밍 벡터를 전송 기법에 따라 구했을 때 사용자 j 의 에르고드적 (ergodic) 전송률 R_j 를 계산하면 다음과 같다.

$$R_j(t_1, \dots, t_4) = E\{\log_2[1 + r_j(t_1, \dots, t_4)]\} \quad (4)$$

최적의 총 전송률을 얻을 수 있는 전송 기법 조합 (t_1^*, \dots, t_4^*) 은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(t_1^*, \dots, t_4^*) = \arg \max_{j=1 \sim 4, t_j \in T} \sum_{k=1}^4 R_k(t_1, \dots, t_4) \quad (5)$$

2.2 전송 기법에 따른 빔포밍 벡터 형성 방법

본 절에서는 먼저 전송 기법 조합에 따른 SINR 값을 구한 후에 이를 이용하여 사용자의 전송률을 구하였다. 우리는 모든 수식에 대하여 일관성을 잃지

않기 위해 사용자 1에 대해서만 유도하였다.

다른 셀에 사용자들의 전송 기법이 모두 I-ZF일 경우 사용자 1의 SINR $r_{1,a}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{1,a} = \alpha_{1,1} |h_{1,1}^H w_{t_1}|^2 = \alpha_{1,1} X \quad (6)$$

여기서 X 는 자유도가 $2N_0$ 인 Chi-square 분포를 따르는 랜덤 변수이고 [14], $X \sim \chi_{2N_0}^2$, $t_1 = S$ -ZF 일 경우 $N_0 = M - 1$, $t_1 = I$ -ZF일 경우 $N_0 = M - 3$ 이다. 그러므로 $r_{1,a}$ 의 CDF (cumulative distribution function)는 다음과 같이 구할 수 있다 [1].

$$F_{r_{1,a}}(x) = \frac{1}{(N_0 - 1)!} \gamma(N_0, x/\alpha_{1,1}) = 1 - \sum_{i=0}^{N_0-1} \frac{x^i e^{-x/\alpha_{1,1}}}{\alpha_{1,1}^i i!} \quad (7)$$

여기서 $\gamma(c, x) = \int_0^x e^{-t} t^{c-1} dt$ 는 [15, Eq. 8.352]의 불완전 감마 함수 (incomplete Gamma function)이다. 식 (7)을 이용하여 사용자 1의 에르고드적 전송률 $R_{1,a}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{1,a} &= E\{\log_2(1 + r_{1,a})\} = \log_2(e) \int_0^\infty \ln(1+x) dF_{r_{1,a}}(x) dx \\ &= \sum_{i=0}^{N_0-1} \frac{\log_2(e)}{\alpha_{1,1}^i i!} \left[(-1)^{i-1} e^{\alpha_{1,1}^{-1}} \text{Ei}(-\alpha_{1,1}^{-1}) + \sum_{j=1}^i (j-1)! (-1)^{i-j} (\alpha_{1,1}^{-1})^j \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\text{Ei}(-x) = e^{-x} \left[-x^{-1} + \int_0^\infty \frac{e^{-t}}{(x+t)^2} dt \right]$ 는 [15, Eq. 8.352]의 지수적 적분 함수 (exponential integral function)이다.

다른 셀에 사용자의 전송 기법 중 하나 이상이 S-ZF일 경우 간섭 신호 $|h_{2,1}^H w_{t_3}|^2$ 와 $|h_{2,1}^H w_{t_4}|^2$ 가 서로 독립적이고 모두 자유도가 2인 Chi-square 분포를 따르는 랜덤 변수이므로 사용자 1의 SINR $\gamma_{1,b}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{1,a} = \frac{\alpha_{1,1} Z}{1 + \alpha_{2,1} Y} = X \quad (9)$$

여기서 랜덤 변수 $Z \sim \chi_{2N_0}^2$, $Y \sim \chi_{2N_f}^2$ 이고 N_f 는 다른

셀에서 S-ZF를 전송 기법으로 선택한 사용자의 수이다. Baye's 법칙에 따라 X 의 CDF를 조건부 CDF $F_{X|Y}(x|y)$ 와 Y 의 PDF $f_Y(y)$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_X(x) = \int_0^\infty F_{X|Y}(x|y)f_Y(y)dy \quad (10)$$

여기서 $F_{X|Y}(x|y)$ 와 $f_Y(y)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{X|Y}(x|y) = 1 - e^{-\frac{1+\alpha_{2,1}y}{\alpha_{1,1}}x} \sum_{i=0}^{N_0-1} \frac{\left(\frac{1+\alpha_{2,1}y}{\alpha_{1,1}}\right)^i}{i!} \quad (11)$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{(N_I-1)!} y^{N_I-1} e^{-y} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 식 (10)에 넣고 $(1+\alpha_{2,1}y)^i$ 에 이항정리를 적용하면 다음과 같이 X 의 CDF를 얻을 수 있다.

$$F_X(x) = 1 - \sum_{i=0}^{N_0-1} \sum_{j=0}^i \frac{\alpha_{1,1}^{j+N_I-i}}{\alpha_{2,1}^{N_I}} \frac{(N_I+j-1)!}{(i-j)!(N_I-1)!j!} \frac{x^i e^{-\alpha_{1,1}x}}{\left(x + \frac{\alpha_{1,1}}{\alpha_{2,1}}\right)^{N_I+j}} \quad (13)$$

위 식과 [1, Eq. 26]에서 사용한 기법을 이용하여 다음과 같이 사용자 1의 전송률을 구할 수 있다.

$$R_{1,b} = \log_2(e) \int_0^\infty \frac{1-F_X(x)}{x+1} dx = \log_2(e) \sum_{i=0}^{N_0-1} \sum_{j=0}^i \frac{\alpha_{1,1}^{N_I+j-i}}{\alpha_{2,1}^{N_I}} \frac{(N_I+j-1)!}{(i-j)!(N_I-1)!j!} I_1\left(\alpha_{1,1}^{-1}, \frac{\alpha_{1,1}}{\alpha_{2,1}}, i, N_I+j\right) \quad (14)$$

여기서 $I_1(i, j, k, l) = \int_0^\infty \frac{x^k e^{-ix}}{(x+1)(x+j)^l} dx$ 이고 이 식의 닫힌 표현식은 [1]에 주어져있다.

결과적으로 식 (8)과 (14)를 이용하여 모든 전송기법 조합의 총 전송률을 구할 수 있고 구한 값을 바탕으로 최적의 전송기법 조합을 선택할 수 있다. 비록 제안기법이 최적의 성능을 얻기 위해서 16가지의 경

우에 수를 따져야 하고 이는 [1]의 제안기법 보다 따져야 하는 경우에 수가 늘어남으로 인해 시스템의 복잡도가 증가하지만 각 셀에서 사용자들에게 동일한 전송 기법을 사용하더라도 최적에 가까운 성능을 얻을 수 있음을 다음 장의 모의실험 결과를 통해 확인하였다. 즉, 본 논문의 제안기법은 기존 논문과 동일한 시스템 복잡도로 최적에 가까운 성능을 얻을 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 절에서는 모의실험을 통해 셀 경계에서의 SNR 값, 사용자의 위치, 그리고 전송 기법의 조합에 따른 총 전송률 관점에서 성능을 분석하였다. 모의실험 상에서 각 기지국에서 해당 셀에 경계까지의 거리를 1 km로, 각 기지국 당 안테나의 개수를 4개로 가정하였다. 또한 모의실험은 Monte-Carlo 방법을 사용하여 10000회 이상의 채널을 발생시켜 수행하였다.

그림 2는 [1]에서 전송 기법으로 사용한 S-BF와 본 논문에서 전송 기법으로 사용한 S-ZF를 비교하였다. 이 그림에서는 다른 셀에 사용자들이 모두 I-ZF를 전송 기법으로 선택했다고 가정하였고 셀 1의 두 사용자가 4개의 서로 다른 전송 기법 조합 $(t_1, t_2) \in \{S-BF, S-ZF\} \times \{S-BF, S-ZF\}$ 을 사용하였을 경우에 셀 1의 총 전송률을 각각에 대해 구하였다. 또한 사용자와 기지국간의 거리가 두 사용자 모두 같을 경우 (그림 2(a))와 사용자 2는 셀 경계에 가까이 위치해 있고 사용자 1은 위치를 변화시킬 경우 (그림 2(b))의 총 전송률도 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 비록 낮은 SNR에서 사용자의 채널 벡터를 표준화하여 빔포밍 벡터로 사용하는 S-BF가 다른 사용자의 채널에 영공간에서 빔포밍 벡터를 생성한 S-ZF에 비해 높은 전송률을 얻지만 그 차이가 크지 않고 SNR이 증가할수록 S-ZF의 총 전송률 이득이 커진다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 셀 당 지원하는 사용자가 늘어날수록 본 논문의 제안기법이 [1]의 제안기법과 비교해서 높은 멀티플렉싱 이득을 얻을 수 있고 이로 인해 총 전송률을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 3에서는 셀 경계에서의 SNR 값이 15 dB일 때 사용자와 기지국 간의 거리에 따라 본 논문의 제안기법과 [1]의 제안기법의 총 전송률을 비교하였다. 또한 본 논문의 제안기법에서 각 셀의 전송기법을 동

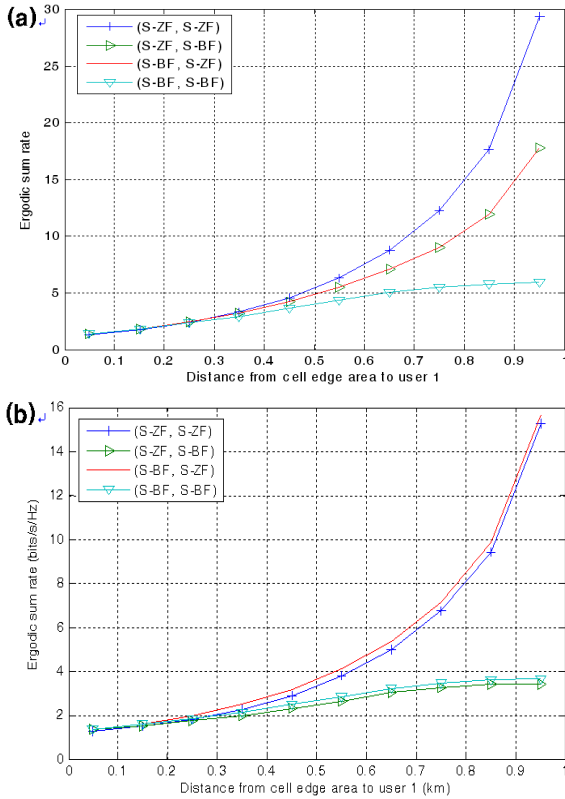


Fig. 2. Comparison of the ergodic sum rate performance among 4 different transmit strategy pairs of the BS 1 for the location of the users at low average cell edge SNR, $\alpha_0 = 5$ dB. (a) User 1 is moving from the cell edge to the BS 1, and user 2 is located at the cell edge area. (b) Both users are moving from the cell edge to the BS 1.

일하게 하였을 경우에 최적의 전송기법 조합과 두 셀 중 하나 이상의 셀에서 사용자들이 서로 다른 전송기법을 사용하였을 경우에 최적의 전송기법 조합의 성능도 모의실험 결과 및 수식 분석 결과를 통해 비교하였다. 이 그림에서는 두 가지 사항을 확인 할 수 있다. 첫 번째 사항은 그림 2에서와 같이 본 논문의 제안기법이 [1]의 제안기법보다 더 좋은 성능을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있고 두 번째 사항은 각 셀에 사용자들이 동일한 전송기법을 쓰는 경우가 가장 좋은 성능을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 비록 공간의 제약으로 본 논문에서 보여주지는 않았지만 다양한 모의실험 결과 사용자들의 위치에 상관없이 대부분의 경우 각 셀의 사용자들이 동일한 전송기법을 사용하였을 경우 최적의 성능을 얻을 수 있었고 최적

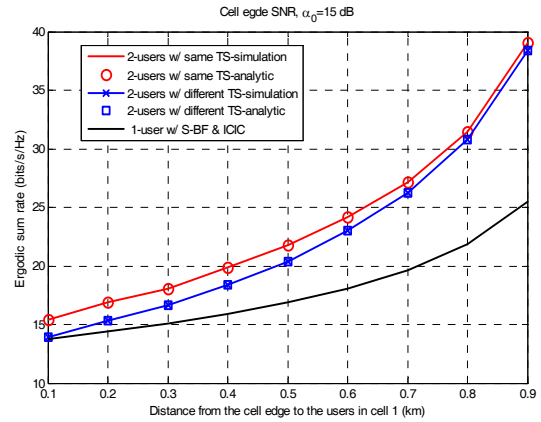


Fig. 3. Comparison of the ergodic sum rate performance between a single user system and the two users system at the average cell edge SNR, $\alpha_0 = 15$ dB.

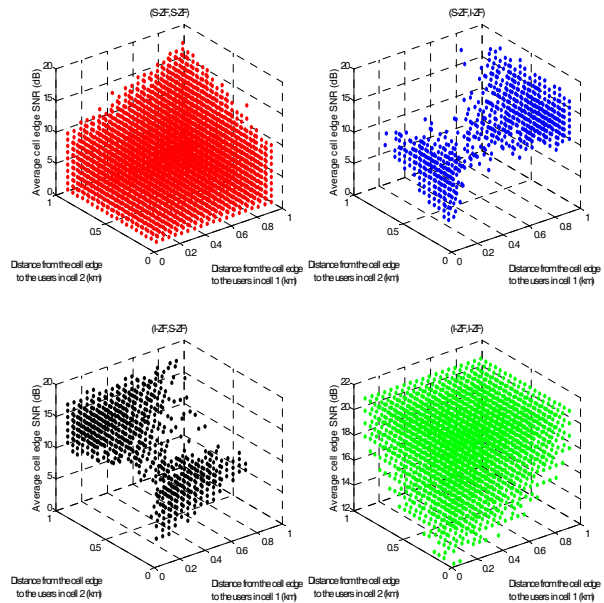


Fig. 4. Sum rate maximizing transmit strategy pairs for the locations of the users and the average cell edge SNRs.

의 성능을 얻지 못할 경우에도 최적의 성능과 매우 가까운 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 4는 각 셀의 사용자들이 같이 이동할 경우에 거리에 따라 가장 높은 총 전송률을 얻을 수 있는 전송기법 조합을 보여주고 있다. 이 그림에서는 그림 3의

결과에 따라 각 셀의 사용자는 동일한 전송기법을 사용한다고 가정하였다. 예를 들어 그림에서 (S-ZF, I-ZF)의 경우 셀 1의 사용자들은 S-ZF를 셀 2의 사용자들은 I-ZF를 전송기법으로 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 사용자의 위치에 따라 최적의 전송기법 조합이 결정됨을 알 수 있다. 결과적으로 협력 기지국들은 최초 사용자들의 위치 정보를 교환하고 이 정보를 바탕으로 각 셀의 전송 기법을 결정할 수 있고 I-ZF를 쓰기로 결정한 셀만 다른 셀에 사용자들의 CSI 정보를 받아오면 된다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서 우리는 셀의 개수가 2개이고 각 셀 당 지원하는 사용자의 수가 2명일 경우에 높은 총 전송률을 얻을 수 있는 적응적 협력 전송 기법을 제안하였다. 제안기법에서는 ZFBF를 사용하여 셀 내 또는 셀 간의 간섭을 제거하였으며 수식 분석을 통하여 최적의 전송 기법 조합을 찾을 수 있었다. 모의 실험 결과 각 셀에서 같은 전송 기법으로 자신의 사용자를 지원해도 최적에 가까운 총 전송률을 얻을 수 있다는 것을 보여주었고 이를 통해 각 셀 당 한 명의 사용자를 지원하는 경우와 비교해서 동일한 시스템 복잡도로 더 높은 총 전송률을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서울시 산학연 협력사업 (WR080951)의 연구 결과로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. Zhang and J. G. Andrews, *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, **6**, 3450 (2007).
- [2] K. Kim and S. Oh, *IEEE Vehicular Tech. conf. (VTC'07)*, 2855 (2007).
- [3] J. G. Andrews, W. Choi, and J. R. W. Heath, *IEEE Wireless Commun. Mag.*, **6**, 95 (2007).
- [4] M. K. Karakayali, G. J. Foschini, and R. A. Valenzuela, *IEEE Wireless Commun.*, **13**, 56 (2006).
- [5] S. Shamai, O. Somekh, and B. M. Zaidel, *JWCC Florence, Italy*, (2004).
- [6] S. Venkatesan, H. C. Huang, A. Lozano, and R. Valenzuela, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*.
- [7] G. J. Foschini, M. K. Karakayali, and R. A. Valenzuela, *IEEE Proc. Commun.*, **15**, 548 (2006).
- [8] B. Song, R. L. Cruz, and B. D. Rao, *IEEE Trans. on Commun.*, **55**, 618 (2007).
- [9] F. Rashid-Farrokhi, K. J. Liu, and L. Tassiulas, *IEEE J. on Sel. Areas in Commun. (JSAC)*, **10**, 8, 1437 (1998).
- [10] H. Dahrouj and W. Yu, *Information Sciences and Systems, 2008. CISS 2008. 42nd Annual Conference* **19**, 429 (2008).
- [11] C.-B. Chae, I. Whang, R. W. Heath, and V. Tarokh, *IEEE J. on Sel. Areas in Commun. (JSAC)*, (2009).
- [12] I. E. Telatar, *Europ. Trans. Telecommun.*, **10**, 585 (1999).
- [13] T. Yoo and A. Goldsmith, *IEEE J. on Sel. Areas in Commun. (JSAC)*, **24**, 528 (2006).
- [14] N. Jindal, J. G. Andrews, and S. Weber, *IEEE Int. Conf. Commun., Dresden, Germany*, **1** (2009).
- [15] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7th ed. San Diego, CA: Academic, (2008).