

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.4.105>

IIBC 2015-4-14

다중 셀 MIMO 하향채널의 셀 에지 SINR

Cell Edge SINR of Multi-cell MIMO Downlink Channel

박주용*, 김기중*, 김정수**, 이문호***

Ju-Yong Park*, Ki-Jung Kim*, Jeong-Su Kim**, Moon-Ho Lee***

요약 본 논문에서는 PRC (polar-rectangular coordinate) 에 대한 2 tier 19 셀에 대해 고려해보고, BS 와 같은 셀 중앙으로 부터의 거리에 기반해 셀룰러 망의 셀 에지(edge) 성능을 제시한다. BS 들은 하향링크 다중 셀 시스템에서 ICI (intercell interference) 제거를 위한 자신들의 SINR (signal-to-interference-noise ratio) 을 개선하기 위해 셀 에지 user 와 협력하여 송신한다. 제안한 새로운 모델은 다중 셀 시스템의 MIMO DC sum rate 용량을 계산한다. 이 모델은 협력 하향 링크 다중 셀 시스템에서 셀 간 간섭을 제거해 셀 에지 user 의 성능을 개선시킨다. 모의실험 결과 제안한 방법이 망 경로 지수에 최소 영향을 주어 셀 에지 SINR 관점에서 기존 방법들보다 좋은 성능을 보였다. 경로손실 지수가 3.6인 경우에는 reuse-1에 비해 reuse-3을 사용한 결과 셀 에지 SINR에서 대략 13 dB가 개선되었다.

Abstract In this paper, we consider 19 cells with the two tiers for polar-rectangular coordinates (PRCs) and provide the cell edge performance of cellular networks based on distance from cell center i.e., BS (base station). When FFR is applied(or adopted) to cell edge, it is expected that BS cooperation, or a coordinated multipoint (CoMP) multiple access strategy will further improve the system performance. We proposed a new method to evaluate the sum rate capacity of the MIMO DC of multicell system. We improve the performance of cell edge users for intercell interference cancelation in cooperative downlink multicell systems. Simulation results show that the proposed scheme outperforms the reference schemes, in terms of cell edge SINR (signal-to-interference-noise ratio) with a minimal impact on the network path loss exponent. We show 13 dB improvements in cell-edge SINR by using reuse of three relative to reuse of one. BS cooperation has been proposed to mitigate the cell edge effect.

Key Words : Multi cell MIMO, Sum rate, cell edge, Distributed remote antenna units (RAUs).

1. 서론

기존 셀룰러 망에서 시스템 성능에 지대한 영향을 끼치는 요인은 셀 간 간섭 (ICI : inter-cell interference)이다. 이 간섭은 같은 주파수대역을 사용하는 이웃 주변 셀에 의해 야기된다. 이 ICI 는 user 터미널에 막대한 성능손실을 초래하며, 특히 셀 경계부근에 위치해 있는 셀 에

지 user들에게 더욱 큰 영향을 준다. 이러한 ICI를 줄이기 위한 여러 가지 기술들이 권고되고 있다^{[1][2]}. 기지국 (BS : base station) 에 가까운 user들은 일반적으로 높은 SINR을 갖는 반면에 셀 교차지점에 있는 user들은 SINR 레벨이 낮아 문제가 되고 있다. 이동통신에서 높은 스펙트럼과 고 전력효율을 얻을 수 있는 유력한 방법으로 MIMO (multi-input multi-output)가 떠오르고 있다^{[3][4]}.

*정희원, 신경대학교 인터넷정보통신학과

**정희원, 숭실사이버대학교 컴퓨터정보통신학과

***정희원, 전북대학교 전자정보공학부(교신저자)

접수일자 2015년 7월 2일, 수정완료 2015년 8월 1일

게재확정일자 2015년 8월 7일

Received: 2 July, 2015 / Revised: 1 August, 2015 /

Accepted: 7 August, 2015

***Corresponding Author: moonho@jbnu.ac.kr

Dept: Division of Electronic Engineering, Chonbuk National University, Korea

MIMO 하향링크채널에 대한 achievable rate region 은 MIMO DC (downlink channel) 의 용량 영역이 저하되지 않은 하향링크채널에 대한 일반적인 이론의 부재로 인하여 풀리지 않은 문제로 남아있지만, MIMO 의 achievable region 과 capacity region 의 쌍대성 (duality) 이 공존하는 송신단에 DPC (dirty paper coding)^[6]를 적용하여 얻어진다. 따라서 이 결과 MIMO DC의 합 용량에 대한 해답은 일반적으로 비 볼록 (convex) 최적화인 반면, MIMO MAC 은 볼록 최적화에 의해 풀릴 수 있기 때문에, MIMO DC 에 대한 합 용량을 풀 수 있게 된다. 본 논문에서는 다중 셀 망에 대해 논의하고 있으며, 여기서 주 셀 에지 user들은 셀 주변에 위치해있기 때문에 심한 ICI 를 받는다. 이에 대한 해결 방안으로 주 셀 에지 user들을 도와주기 위해 인접 주 셀들의 경계 부근에 셀들을 배치함으로써, 주 셀 에지 user들에게 가해지는 ICI 를 줄이는 문제, 즉 이 시스템의 셀 에지 문제에 대해 논의한다. 간섭을 줄일 수 있는 기술은 수신기의 처리과정을 통해 간섭을 줄이는 방안과 주파수 도약 (frequency hopping) 으로 간섭을 랜덤화 하는 방안, 자원 분할과 전력 할당^[9]의 관점에서, 자원을 재사용에 의한 간섭 회피 등과 같은 세 부류로 나눌 수 있다. 셀 간 협력 (coordination)를 이용하는 ICIC (Inter-cell interference coordination) 기술이 공격적으로 주파수를 재사용하는 다중 셀 환경에서 검토되고 있다. 최근 몇 년 동안 FFR (fractional frequency reuse) 방법이 여러 다른 표준화 단체와 포럼에서 연구원들의 관심을 끌고 있다. 후에 등장한 FFR은 셀의 중앙 부위에 있는 MS (mobile station)가 낮은 경로 손실 때문에 간섭에 더욱 강하고, 이들이 높은 간섭뿐 아니라 높은 경로손실^{[10][11]}을 겪고 있는 셀 경계의 MS들에 비해서, 더 많은 주파수 재사용을 할 수 있다는 사실을 맞고 있다. 따라서 셀 중앙과 셀 에지에 있는 MS들이 서로 다른 정도의 reuse factor를 사용 하도록 해야 한다. BS (base station)가 있는 망에서 FFR의 일반적인 예가 셀 중앙 과 셀 에지 영역에서 reuse factor가 각각 1, 3 과 7 로 되어 있다 (그림 2참조). 이 방법의 성능은 몇몇 기준 방법들과 비교되고 있는데, 예를 들면 reuse-1, reuse-3 과 reuse-7 방법이다^{[13][14]}. reuse-1 방법은 비 coordination의 경우를 나타내고, 나머지 둘은 static 방법으로 coordination이 사용되는 경우를 나타낸다. 본 논문이 기여한 바를 요약하면 다음과 같이 요약할 수 있다 :

- (가) 하향링크 시스템을 위한 다중 셀 MIMO 구조를 제안하고, 셀룰러 망에서 셀 에지 user의 하향링크 용량을 관찰하고, BS 협력이 스펙트럼 효율을 개선하는지 조사한다.
- (나) BS 협력 하향링크 시스템에서 ICI 제거를 위해 셀 에지의 성능을 개선시킨다.
- (다) 셀 중앙으로 부터의 거리에 기반해 ICI가 있는 경우와 없는 경우 모두에 대해 셀룰러 시스템의 셀 에지 성능 metric 을 제시한다.
- (라) 2 tier 에 기반한 19 셀을 고려하고, 극좌표와 직각좌표로 셀 에지 MS 의 간섭을 측정한다.
- (마) 경로 손실 지수 3.6에서 FFR 에 기반해 reuse-1 에 비해 reuse-3을 사용하면 셀 에지 SINR의 13 dB 성능 개선을 달성하였다. 반면 reuse-7 은 셀 에지 SINR 을 8 dB 개선한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 시스템 모델이 II장에서 서술되고, III 장에서는 단말기 위치-스펙트럼 효율의 성능 metric 에 대해 서술하며, IV장에서 ICI 기술 제어에 대해 기술한다. V장에서 ICI를 갖는 다중 셀 MIMO에 대해 분석하고, VI 장에서는 기지국당 전력 제한에 대해 소개하며, 모의실험 결과를 VII 장에 제시하고, 마지막으로 VIII장 에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

이동 셀룰러 시나리오에서 무선신호의 전파는 3가지 독립적인 현상, 즉 거리에 따른 경로손실 변화, 대규모 shadowing, 소규모 페이딩의 특성을 가지고 있다. 대규모 주파수 재사용 인자는 셀을 격리시키기 위해 고려된 것이며, 조정된 BS 들 간에 스펙트럼을 조심스럽게 할당 하면 ICI 는 무시할 정도가 된다. 셀룰러 시스템은 각각 M 개의 안테나를 갖는 L 개의 조정된 셀을 갖는다고 가정한다. 각 셀은 N 개의 안테나를 갖는 K 명의 user 가 있다. BS 에서는 완벽한 ICI 가 가정되고, 모든 MS 를 위한 프리코딩 (precoding) 행렬이 공동으로 설계되어 있다고 가정한다. 또한 각 셀은 각 BS 와 같은 것으로 고려한다. MS 의 프리코딩된 송신신호 벡터 \mathbf{x}_k 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{T}_k \mathbf{s}_k \quad (1)$$

여기서 \mathbf{T}_k 는 프리코딩 행렬이며 \mathbf{s}_k 는 user k 에 대한 데이터이다. 따라서 user k 의 수신 신호 벡터를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = \underbrace{\mathbf{H}_k \mathbf{x}_k}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq k}^L \mathbf{H}_k \mathbf{x}_j}_{\text{ICI}} + \mathbf{n}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{s}_k + \sum_{j=1, j \neq k}^L \mathbf{H}_k \mathbf{T}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_k \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{KN \times KM}$ 는 채널행렬이며 \mathbf{n}_k 는 분산이 σ^2 인 Gaussian 잡음 벡터이다. 또한 모든 간섭이 제거되기 때문에 채널 스위칭 시스템을 가정한다. 더욱이 $\text{tr}\{\mathbf{Q}_k\} \leq P_k$ 이 때 $\mathbf{Q}_k = \mathbf{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$ 인 셀 당 전력 constraint 는 전송 벡터의 공분산(covariance) 행렬이고, P_k 는 총 전송 전력이다. 페이딩 계수는 한 블록 시간동안 quasi-static 상태로 남아 있다가 블록 사이에서 개별적으로 변한다. 따라서 MS- k 로부터 l 번째 셀 중양까지의 채널은 다음과 같은 $N \times M$ 랜덤 행렬로 모델화 할 수 있다^[17,20].

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{cd_{l,k}^{-\alpha}} \mathbf{s}_{l,k} \mathbf{W}_{l,k} \quad (3)$$

여기서 $cd_{l,k}^{-\alpha}$ 는 경로손실을 나타낸다. $d_{l,k}$ 는 MS- k 와 BS 사이의 거리(km)를 나타낸다. α 는 경로손실 지수이고, c 는 기준 거리가 1 km인 평균 경로손실의 중앙값이며, $\mathbf{s}_{l,k}$ 는 분산을 가진 log-normal로 분포된 shadow 변수 및 $\mathbf{W}_{l,k} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 는 small-scale 페이딩을 나타낸다.

셀에서 각 MS 는 공간적으로 다중화 된 데이터 스트림을 갖게 되면 MIMO 채널과 MIMO 용량의 랭크에 의해 높은 SINR 을 할당 받는다. 셀 주변에서 협력을 추구하는 MS 가 단일데이터 스트림을 얻게 되면 낮은 SINR 을 할당 받는다. SINR 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{SINR} = \frac{\mathbf{H}_k^H \mathbf{T}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{j=1}^L \mathbf{H}_{i,j}^H \mathbf{T}_{i,j}^H \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{T}_{i,j} + \sigma^2 \mathbf{I}} \quad (4)$$

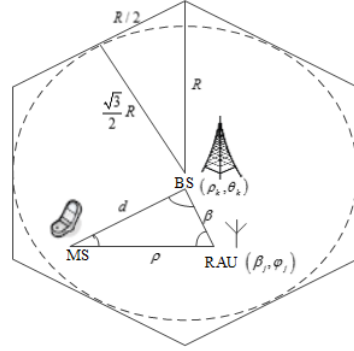


그림 1. BS(기지국)-RAU(원격 안테나 유닛)-MS(단말기)의 극좌표와 직각좌표 모델
 Fig. 1. The polar and rectangular coordinate model of BS-RAU-MS.

III. 시스템 모델 matrices

거리 $d_{j,k}$ 는 그림 1에 보인바와 같이 MS와 BS, RAU (remote antenna unit) 의 위치에 따라 결정됨을 알 수 있다. (β_j, φ_j) 가 셀에서 j -번째 RAU의 극좌표를 나타내고, (ρ_k, θ_k) 는 k -번째 MS 의 극좌표를 나타내도록 놓는다. BS-MS 간 거리는 다음과 같이 주어진다.

$$d_{j,k} = \sqrt{\rho_k^2 + \beta_j^2 - 2\rho_k \beta_j \cos(\theta_k - \varphi_j)} \quad (5)$$

셀 에지 성능을 계산하기 위해 먼저 단말기 위치의 하향링크 스펙트럼 효율을 정의한다^[17]. 다중 셀 환경에서 무선채널의 상호정보량은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{LM} + \frac{P}{M} \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \right) \\ &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{P}{M} \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \right) \\ &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{Pc}{M} \sum_{j=1, j \neq k}^L \frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \mathbf{W}_{j,k}^H \mathbf{W}_{j,k} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이것은 페이딩 조건에 따라 변하는 랜덤변수이다. 단말기 위치 스펙트럼효율은 식 (7) 과 같은 shadowing 과 소규모 페이딩 계수에 대해 식 (6) 의 평균값을 취함으로써 얻어질 수 있다.

$$C(\rho_k, \theta_k) = E \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{Pc}{M} \sum_{j=1, j \neq k}^L \frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \mathbf{W}_{j,k}^H \mathbf{W}_{j,k} \right) \right] \quad (7)$$

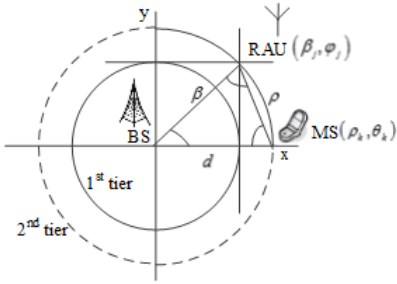


그림 2. DS-RAU-MS 의 직각좌표에 대한 극좌표
Fig. 2. The polar to rectangular coordinate of DS-RAU-MS.

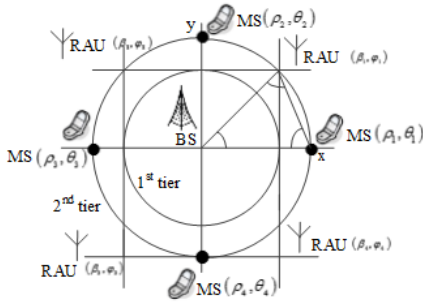


그림 3. 움직이는 MS 의 직각좌표에 대한 극좌표
Fig. 3. The polar to rectangular coordinate for moving MS.

그림 2 와 3 으로부터 단말기 위치 스펙트럼 효율에 근거하여 다음과 같은 성능 metric 이 셀 에지 효과를 계산하기 위해 제안된다.

(가) 첫 번째 metric 은 반경이 $\frac{\sqrt{3}}{2}R$ 인 원에서 평균 스펙트럼 효율이다. 즉,

$$C_{circle} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C\left(\left[\frac{\sqrt{3}}{2}R\right]_k, \theta_k\right) d\theta_k \quad (8)$$

(나) 두 번째 metric 은 식 (9)와 같은 worst-case 의 위치 스펙트럼 효율이다.

$$C_{worst} = \min_{(\rho_1, \theta_1) \in \text{Cell}} C(\rho_1, \theta_1) \quad (9)$$

[17, 식 (20)] 에 의하면 반경이 $\frac{\sqrt{3}}{2}R$ 인 원에서 CAS (collocated antenna system) 의 평균 스펙트럼 효율은 다음 식에 의해 경계가 주어진다.

$$C_{circle} \geq M \log_2 \left[1 + \frac{P_c}{M(\sqrt{3}R/2)^2} \times \exp\left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \phi(LN+1-m)\right) \right] \quad (10)$$

여기서 $\phi(\cdot)$ 은 Euler's digamma 함수이다. 원에서 DAS (distributed antenna selection) 를 위한 평균 스펙트럼 효율은 [17, 식 (43)] 에 의해 다음과 같이 얻어진다.

$$C_{circle} \simeq \frac{M}{2\pi} \int_0^{2\pi} \log_2 \left[1 + \frac{P_c}{M} \exp\left(\frac{1}{2} \lambda^2 \sigma^2\right) \times \frac{\prod_{j=1}^N \Gamma(N-j+1/M+1)}{\prod_{j=1}^N \Gamma(N-j+1)} \sum_{j=1, j \neq k}^L \frac{1}{d_{j,k}^\alpha} \right] d\theta_k, \quad (11)$$

여기서 $d_{j,k} = \sqrt{\frac{3}{4}R_k^2 + \beta_j^2 - 2\frac{\sqrt{3}}{2}R_k\beta_j \cos(\theta_k - \varphi_j)}$ 이다. 이 때 식 (11) 은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$C_{circle} \simeq \frac{M}{2\pi} \int_0^{2\pi} \log_2 \left[1 + Z \sum_{j=1, j \neq k}^L \frac{1}{d_{j,k}^\alpha} \right] d\theta_k \quad (12)$$

식 (12) 의 우측 항에 Jensen 의 부등식을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$C_{circle} \simeq \frac{M}{2\pi} \int_0^{2\pi} \log_2 \left[1 + Z \sum_{j=1, j \neq k}^L \exp(-\alpha \ln d_{j,k}) \right] d\theta_k \\ \geq M \log_2 \left[1 + Z \sum_{j=1, j \neq k}^L \exp\left(-\alpha \int_0^{2\pi} \frac{\ln d_{j,k}}{2\pi} d\theta_k\right) \right] \quad (13)$$

logarithm 함수를 이용하면 식 (13) 의 우측 항에서 integral 의 닫힌 형태의 표현은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\int_0^{2\pi} \frac{\ln d_{j,k}}{2\pi} d\theta_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \sqrt{\frac{3}{4}R_k^2 + \beta_j^2 - 2\frac{\sqrt{3}}{2}R_k\beta_j \cos(\theta_k - \varphi_j)} d\theta_k \\ = \ln \sqrt{\frac{3}{4}R_k^2 + \beta_j^2} + \frac{1}{4} \ln \left(1 + \frac{\sqrt{3}\beta_j R_k}{\sqrt{\frac{3}{4}R_k^2 + \beta_j^2}} \right) - \frac{1}{4} \ln 2 \quad (14)$$

가장 나쁜 경우의 위치 스펙트럼 효율을 찾기 위해서는 식 (14) 의 마지막 항을 최소화 할 수 있는 worst-case 위치를 찾을 필요가 있다. 만약 MS 까지의 최적거리를 (β, φ) 로 나타내는 BS 의 극좌표를 정의하면, 이 항의 하위 경계가 다음 식으로 표시된다.

$$\sum_{j=1, j \neq k}^L \frac{1}{d_{j,k}^\alpha} \geq L \left[\rho_k^2 + \beta_j^2 - 2\rho_k \beta_j \cos(\theta_k - \varphi_j) \right]^{-\alpha/2} \geq L(\rho_k + \beta_j)^{-\alpha}. \quad (15)$$

$L(\rho_k + \beta_j)^{-\alpha}$ 의 최소값이 ρ_k 에 의해 결정되기 때문에, worst-case 의 스펙트럼 효율은 ρ_k 가 최대값을 갖는 위치가 된다.

IV. 셀 간 간섭 기술 제어

셀 에지 성능은 잡음이 제한되거나 간섭이 제한 될 수 있다. 교외지역의 대형 셀에서 자주 발생하는 잡음이 제한된 상황에서는 성능이 전력을 공급함으로써 일반적으로 개선된다^[15,20].

1. 셀 간 간섭 : 2-셀 MIMO 경우의 예

수신 신호 강도는 BS로부터 멀어짐에 따라 경로 손실이 증가하기 때문에 약해진다. MS가 한 BS로부터 멀어져 가면 그림 4에 보인 바와 같이 자연스럽게 다른 BS에 가까워지기 때문에 ICI는 증가하게 된다. 더욱이 BS1 과 BS2 모두가 같은 주파수 자원을 사용한다는 의미의 일반적인 주파수 재사용을 가정한다. 여기서 각 BS 는 M 개의 안테나를 보유하고, 각 셀은 N 개의 안테나를 갖는 K user로 구성된다. 따라서 eNB2 로부터 전송된 신호는 MS 에게는 간섭으로 나타난다.

식 (5)로부터 $\theta=90^\circ$, $\beta=0$ 을 고려하면, 극좌표의 경우 $d=\rho$ 를 가정할 수 있다. BS2 로부터 거리 d 만큼 떨어진 MS에서 측정된 SINR 은 직각 좌표계로 나타내면 식 (4) 와 유사한 방법으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SINR = \frac{P_k d_k^{-\alpha}}{\sum_{j \neq k} P_2 (2R-d)_j^{-\alpha} + N_0} \quad (16)$$

여기서 α 는 경로손실 지수이고, N_0 는 잡음, P_k 는 k 번째 BS에 대한 송신전력이다. 또한 R 은 BS1 과 BS2 사이의 거리가 2R 인 셀 반경이다.

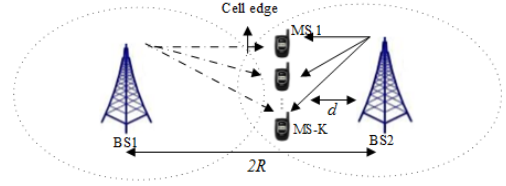


그림 4. 직각좌표계에 의한 셀 간 간섭 downlink 채널
 Fig. 4. An inter-cell interference downlink channel based on rectangular coordinate.

일반적으로 시스템에서 모든 BS 들은 같은 송신 전력을 사용하기 때문에 $P_1 = P_2$ 을 가정한다. 간섭이 아주 엄격하게 제한된 시나리오에서는 배경잡음 N_0 이 무시될 수 있다.

위 식 (16) 은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$SINR = \frac{P_k d_k^{-\alpha}}{\sum_{j \neq k} P_2 (2R-d)_j^{-\alpha} + N_0} = \frac{P_k d_k^{-\alpha}}{\sum_{j \neq k} P (2R-d)_j^{-\alpha}} \quad (17)$$

거리 d 가 증가함에 따라 SINR 이 줄어들 든다는 사실을 알게 되는데, 주어진 $d < R$ 에 대해서는 경로손실 지수 α 가 증가함에 따라 SINR이 증가하게 된다. 이 이유는 $d < R$ 일 때에는 더 먼 거리까지 도달하고, α 가 커질수록 감소하기 때문이다. $d=R$ 인 셀 에지에서 최대 SINR 은 0 dB 로 제한됨을 알 수 있다. 원하던 BS1 (PL_s) 에 대해 경로손실 모델을 가정하고 간섭원 BS2 (PL_i) 에 대해서도 같은 경로손실 모델을 가정한다.

이때 MS 에서 측정되는 SINR 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SINR_{With-ICI} = \frac{P \left(10^{\frac{PL_s}{10}} \right)}{N_0 + P \left(10^{\frac{PL_i}{10}} \right)} \quad (18)$$

ICI 가 존재하지 않은 경우 MS의 SINR 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SINR_{Without-ICI} = \frac{P \left(10^{\frac{PL_s}{10}} \right)}{N_0} \quad (19)$$

그러나 다중 사용자 MIMO 를 사용한 하향링크의 경우 셀 에지에 존재하는 많은 user 들은 그림 4 에 보인 바와 같이, 그들과 통신하고 있는 BS2 셀로부터 하향링크 신호를 수신한다. BS2 내의 셀 에지에서 수신중인 한 user 는 BS2 로부터 자신에게 전송되어 오는 전력과, 거의 같은 양의 다중 간섭을 BS2 에서 만나게 된다. 이렇게 간섭을 일으키는 BS1 사용자들의 수는 2 이상이고, 하향링크에서 측정될 수 있는 SINR 은 간섭이 제한된 시나리오에서 상향링크의 SINR 보다 적을 수 있다.

2. 주파수 재사용을 위한 다중 셀 MIMO의 경우 : 셀 에지 성능

육각형 셀 형태와 2 티어(tier) 간섭 그리고 보편적인 주파수 재사용의 경우에 대해 생각해보자. 그림 5에 셀 에지 MS가 받는 간섭의 예를 보이고 있다.

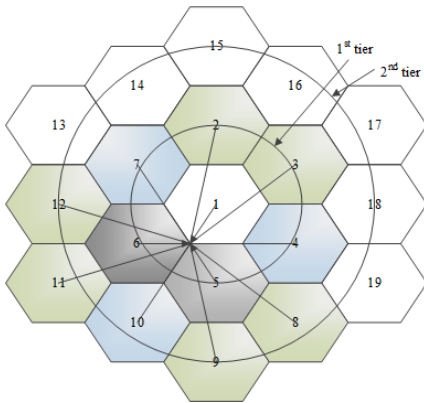


그림 5. 직각좌표계에 의한 셀 에지 MS 가 받은 간섭
Fig. 5. An interference experienced by a cell edge MS based on rectangular coordinate.

19 개의 셀로 구성된 망이 그림 5 에 보이고 있다. 셀 1 은 셀 2-셀 7까지의 6개의 이웃 셀로 둘러 쌓여있다. 각 셀은 M 개의 송신 안테나를 갖는 BS 로부터 서비스를 받고, 셀 내의 K user 는 각각 N 개의 수신안테나를 가지고 있다. 각 셀의 반경은 R 이고, 셀 간 조정 거리라 부르는 부가적인 셀 변수가 그림 6에 제시되어 있다. 이 거리는 셀 중심과 주변 사용자들 간의 주변 거리를 나타낸다.

셀 내의 조정은 MU(multi user)-MIMO 를 위해 같은 클러스터 내의 BS 들을 크로스(cross)해 프리코딩한 결과이고, 반면에 셀간 조정은 이웃 셀의 에지에 존재하는 user 들을 위해 간섭을 미리 제거하는데 사용된다. 이러

한 방법으로 셀 내와 셀 에지 사용자들 모두를 위해 간섭을 효과적으로 줄일 수 있다.

주파수를 재사용하면 셀 에지에 위치한 user 들은 이웃 셀들로부터 간섭을 더 많이 받을 수 있다. 다중 이웃 셀들은 에지 user 들의 채널 정보를 가지고 있어서, 데이터 전송을 위해 조정될 수 있다. 이러한 셀 중에 한 개는 홈(home) 셀로 작용하여 데이터를 다른 한 사용자에게 전송할 수 있고, 다른 이웃 셀들은 이 사용자를 프리코딩 행렬 설계 시에 고려하게 된다.

Home 셀에 의해 셀 내의 간섭이 선 제거되고, 다른 이웃 셀에서 셀 간 간섭이 선 제거되면, 이러한 셀로부터 이 에지 user 에게 더 이상 간섭으로 작용하지 않게 된다.

이러한 조정 방법을 이용하면 셀 내부와 셀 에지 user 들은 효과적으로 간섭을 줄일 수 있다. FFR 은 BS 들이 다른 하향링크 대역폭 내에 있는 user 들을, 협력적으로 조정하는 또 다른 간섭 관리 기법이다. 그러나 FFR 은 주파수 영역에서 간섭을 관리하는 기법이다. 이 조정 방법은 공간영역에서 사용하는 방법으로, 일반적인 주파수 재사용으로 실현될 수 있다.

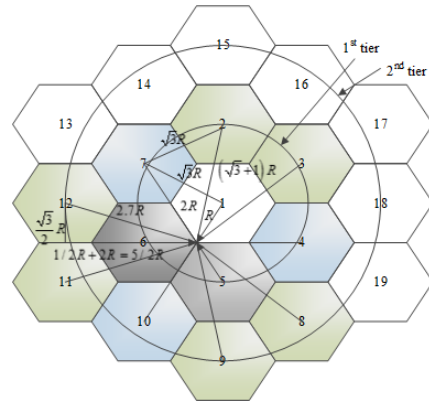


그림 6. 2 Tier 에 따른 19 셀과 MS 간 거리
Fig. 6. The distance between 19 cell and MS based on 2 Tier.

셀 간 조정의 핵심 아이디어는 활동 중인 셀 에지 user 들을 위해 모든 이웃 셀들이 간섭을 선제거하는 것이고, 이 user 에게 정보 데이터를 전송할 하나의 셀을 선택하는 것이다. 셀간 조정을 위해 사용되는 프리코딩 방법은 셀 내의 조정 방법과 같은 다중 셀 MIMO 방법이다. 각 에지 user 는 home 셀 이라 불리는 채널 상태에 의해 하나의 셀을 선택한다. 반면에 다른 이웃 셀들은 데이터 전

송을 위해 협조자로서 작용한다. 나머지 셀들은 간섭원 셀들이다.

(1) Case I : Reuse-1

이 경우는 셀 에지의 한 MS 가 11 개의 셀로부터 간섭을 받는 경우로, 거리 R 에서 2 개의 간섭원 (cell 5, 6) 을 받고, 거리 2R 에서 3 개의 간섭원 (cell 4, 7, 10) 을 받으며, 거리 2.7 R에서 6 개의 간섭원 (cell 2, 3, 8, 9, 11, 12) 을 받는다. 여기서 R 은 반경을 나타낸다. 식 (5) 로부터 $\cos(\rho_k - \varphi_j) = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$ 이고, $\text{distance} = \sqrt{\rho_k^2 + \beta_j^2}$ 이다. 그림 6 에서 6 개의 간섭원 거리를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{distance} &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}R + 2R\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{5}{2}R\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{25}{4}R^2 + \frac{3}{4}R^2} = 2.7R \end{aligned} \quad (20)$$

이 경우 2cell=R, 3cell=2R, 6cell=2.7R 이다. worst-case SINR 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{\text{reuse-1}} &= \frac{R^{-\alpha}}{2 \times R^{-\alpha} + 3 \times (2R)^{-\alpha} + 6 \times [2.7R]^{-\alpha}} \\ &= \frac{1}{2 + 3 \times (2)^{-\alpha} + 6 \times [2.7]^{-\alpha}} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 α 는 경로손실 지수이다. 만약 거리 2.7R 의 6 간섭원을 무시한다면 ($6 \times (2.7)^{-\alpha} = 0$), worst-case SINR 은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{SINR}_{\text{reuse-1}} = \frac{R^{-\alpha}}{2 \times R^{-\alpha} + 3 \times (2R)^{-\alpha}} = \frac{1}{2 + 3 \times (2)^{-\alpha}} \quad (22)$$

간섭원의 수가 많다고 한다면 경로손실 지수가 증가함에 따라 SINR 은 더욱 빨리 증가함을 알 수 있다. 주파수 재사용 요소는 같은 주파수가 망 내에서 사용될 수 있는 rate(C) 이다. 즉 $1/L$ 이며, 여기서 L 은 전송용으로 같은 주파수를 사용할 수 없는 셀의 수를 나타낸다^[21].

$$C_{\text{reuse factor}} = \frac{1}{L} \log_2 (1 + \text{SINR}) \text{ bits/s/Hz} \quad (23)$$

reuse-1 의 셀 에지 user 에 대한 용량 제한은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\text{-----} \quad (24)$$

(2) Case II : Reuse-3

셀 번호 1, 5, 6 의 3 셀 만을 사용한다고 가정하자. 이 경우에 MS 로부터의 거리 R (cell 5, 6) 에서 오는 주요 간섭원의 간섭은 제거된다. 거리 2R 에서는 3셀, 2.7R 에서는 6 셀로부터 간섭이 발생한다. 따라서 결국 worst-case 에 SINR 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{\text{reuse-3}} &= \frac{R^{-\alpha}}{3 \times (2R)^{-\alpha} + 6 \times [2.7R]^{-\alpha}} \\ &= \frac{1}{3 \times (2)^{-\alpha} + 6 \times [2.7]^{-\alpha}} \end{aligned} \quad (25)$$

식 (23) 으로부터 reuse-3 의 셀 에지 사용자에게 대한 용량 제한은 다음과 같다.

$$C_{\text{reuse-3}} = \left(\frac{1}{3}\right) \log_2 (1 + \text{SINR}_{\text{reuse-3}}) \text{ b/s/Hz} \quad (26)$$

(3) Case III : Reuse-7

이제 셀 번호 1-7의 reuse-7에 대해 생각해보자. reuse-3의 경우 거리 R (cell 5, 6) 에서 주도적 간섭자로부터 나오는 간섭과 더불어, 거리 2R (cell 4, 7) 에서의 두 간섭자 및 거리 2.7R (cell 2, 3) 에서의 또 다른 두 간섭자로부터 발생하는 간섭이 제거된다. 결국 worst-case SINR 이 다음과 같이 주어진다.

$$\text{SINR}_{\text{reuse-7}} = \frac{R^{-\alpha}}{(2R)^{-\alpha} + 4 \times [2.7R]^{-\alpha}} = \frac{7}{(2)^{-\alpha} + 4 \times [2.7]^{-\alpha}} \quad (27)$$

유사한 방법으로 식 (23) 으로부터 reuse-7의 경우 용량 제한을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_{\text{reuse-7}} = \left(\frac{1}{7}\right) \log_2 \left(1 + \text{SINR}_{\text{reuse-7}}\right) \text{ b/s/Hz} \quad (28)$$

그러나 예를 들어 reuse-3 과 같은 주파수 재사용 방법을 적용하면, BS1 내의 하향링크에서 수신중인 다중 user 들로부터 나오는 간섭이 제거된다. 이 결과 SINR 이 보다 개선되고, 따라서 하향링크 용량이나 throughput 이 크게 개선된다. 더욱이 reuse-1 로 시작하는 SINR 이 낮기 때문에, 용량은 SINR 과 거의 선형적인 관계를 가지므로 결국 셀 에지 user 들에게는 하향링크 용량에 있어서 보다 높은 이익을 부여한다. 3 가지 주파수 reuse 방법의 비교가 표 1에 제시되어 있다.

표 1. 주파수 reuse 의 SINR 과 셀 에지 채널 용량과의 비교
Table 1. The comparison of frequency reuse SINR and cell edge channel capacity.

Freq. reuse	SINR	Cell edge channel Capacity
Reuse-1	$\text{SINR}_{\text{reuse-1}} = \frac{1}{2+3 \times (2)^{-\alpha}}$ Eq. (24)	$C_{\text{reuse-1}} = \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{reuse-1}})$
Reuse-3	$\text{SINR}_{\text{reuse-3}} = \frac{3}{3 \times (2)^{-\alpha} + 6 \times (2.7)^{-\alpha}}$ Eq. (26)	$C_{\text{reuse-3}} = \left(\frac{1}{3}\right) \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{reuse-3}})$
Reuse-7	$\text{SINR}_{\text{reuse-7}} = \frac{7}{(2)^{-\alpha} + 4 \times (2.7)^{-\alpha}}$ Eq. (28)	$C_{\text{reuse-7}} = \left(\frac{1}{7}\right) \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{reuse-7}})$

V. ICI 가 있는 다중 셀 MIMO의 성능 분석

이 장은 셀 간 간섭을 고려해 셀 에지 성능에 대해서 기술한다. 식 (1)로부터 ICI 와 잡음의 합이 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{\mathbf{n}}_k = \sum_{j=1, j \neq k}^L \mathbf{H}_k \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_k \quad (29)$$

사용자의 위치와 log-normal shadowing의 조건에 따라 공분산 행렬 $\tilde{\mathbf{Q}}_k$ 은 다음과 같이 유도된다.

$$\tilde{\mathbf{Q}}_k = E(\tilde{\mathbf{n}}_k \tilde{\mathbf{n}}_k^H) = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Pc}{M} \sum_{j=2, j \neq k}^L \frac{S_{1,j}}{d_{1,j}^\alpha} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & 1 + \frac{Pc}{M} \sum_{j=2, j \neq k}^L \frac{S_{L,j}}{d_{L,j}^\alpha} & \\ 0 & & & \ddots \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_M \quad (30)$$

여기서 \otimes 은 Kronecker product를 나타낸다. 간섭자의

수가 아주 클 때는, central limit 정리에 따라 ICI 는 점근적으로 Gaussian처럼 볼 수 있다. 따라서 $\tilde{\mathbf{n}}_k$ 는 공분산을 가진 Gaussian 잡음과 동등하게 근사화가 가능하다. 식 (6)으로부터 ICI에 대한 Gaussian 근사화로 채널행렬이 \mathbf{H}_k 이고 잡음 공분산이 $\tilde{\mathbf{Q}}_k$ 로 표시되는 하향링크 채널의 상호정보량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{LN} + \frac{P}{M} \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \tilde{\mathbf{Q}}_k^{-1} \right) \\ &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{LN} + \frac{P}{M} \mathbf{H}_k^H \tilde{\mathbf{Q}}_k^{-1} \mathbf{H}_k \right) \\ &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{Pc}{M} \sum_{j=1}^K \left(1 + \frac{Pc}{M} \sum_{j=2, j \neq k}^L \left(\frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \right)^{-1} \right) \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \right) \\ &= \log_2 \det \left[\mathbf{I}_M + \frac{Pc}{M} \sum_{j=1}^K \left(1 + \frac{Pc}{M} \sum_{j=2, j \neq k}^L \frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \right)^{-1} \times \frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \mathbf{W}_{j,k}^H \mathbf{W}_{j,k} \right] \end{aligned} \quad (31)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{Q}}_k^{-1}$ 는 $\tilde{\mathbf{Q}}_k$ 의 역행렬을 나타낸다. ICI 를 가진 분산 안테나 선택의 단말기 위치 스펙트럼 효율은 다음과 같이 정의된다^[17].

$$C(\rho_k, \theta_k) = E \log \det \left[\mathbf{I}_M + \frac{Pc}{M} \sum_{j=1}^K \left(1 + \frac{Pc}{M} \sum_{j=2, j \neq k}^L \frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \right)^{-1} \times \frac{S_{j,k}}{d_{j,k}^\alpha} \mathbf{W}_{j,k}^H \mathbf{W}_{j,k} \right] \quad (32)$$

VI. 기지국 당 전력 제한

이 장에서는 협력 다중 셀 시스템의 sum rate 최대화 문제를 제시한다. 셀 간 협력 방법의 다양성이 갖춰진 협력망 MIMO로부터 부분적으로 협력하는 beamforming [18-19]에 이르기까지 ICI를 줄이는 방법으로 제시되고 있다. 본 논문에서는 제한적으로만 협력하는 망 MIMO 방법에 초점을 맞추고 있으며, 여기서 BS들은 하나의 분산된 MIMO 송신기로 작동하고 다른 셀로부터 오는 간섭은 잡음처럼 간주된다. BS에 해당하는 전력 constraint 는 다음과 같은 BS-k 의 공분산 행렬을 전송하는데 이용된다.

$$\mathbf{Q}_k = \sum_k \mathbf{V}_k \mathbf{\Omega}_k \mathbf{V}_k^H \quad (33)$$

여기서 Ω_k 는 k-번째 사용자에게 할당된 전력에 해당하는 \mathbf{Q}_k 의 대각 원소를 나타낸다. 따라서 셀 당 전력 제한의 sum rate 최대화 문제는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \arg \max_{\{\mathbf{Q}_k\}} \sum_{j=1, j \neq k}^L \log \left| \mathbf{I} + \mathbf{H}_{j,k} \mathbf{V}_{j,k} \mathbf{Q}_k \mathbf{V}_{j,k}^H \mathbf{H}_{j,k}^H \right| \\ & \text{s.t. } \text{tr} \left\{ \sum_k \mathbf{V}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{V}_k^H \right\} \leq P_k, k=1, \dots, K \\ & \mathbf{Q}_k \geq 0, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (34)$$

따라서 이 문제는 concave 최적화 문제로 분류될 수 있다. 이때 sum-power constraint 는 다음과 같이 주어진다.

$$\text{tr}(\mathbf{Q}_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^L \Omega_k^i \leq P_k \quad (35)$$

여기서 $P_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K P_k$ 이다. sum rate 최대화는 다음과 같이 간소화 될 수 있다.

$$\arg \max_{\{\Omega_k\}} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^L \log \left(1 + \Lambda_k^j \Omega_k^j \right) \quad (36)$$

$j=1, \dots, L$ 인 대각행렬의 원소를 $\Lambda_k^i = \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k$ 로 놓으면, BS당 power constraint에 대해 다음에 주어진 것처럼 Lagrange duality와 sub-gradient 반복법을 쓸 수 있다. 식 (36)의 Lagrange 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$L(\Omega, \lambda) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^L \log \left(1 + \Lambda_k^j \Omega_k^j \right) - \lambda P \quad (37)$$

여기서 $\lambda \geq 0$ 는 BS의 전력 constraint에 해당하는 dual 변수이다. KT(kuhn-Tucker) condition 은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial L}{\partial \Omega_k^j} = \frac{1}{1 + \Lambda_k^j \Omega_k^j} \Lambda_k^j - \lambda \leq 0 \quad (38)$$

q_k^i 에 대해 풀면 다음 결과를 얻는다.

$$\frac{\Lambda_k^j}{1 + \Lambda_k^j \Omega_k^j} - \lambda = 0 \Rightarrow \Omega_k^j = \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\Lambda_k^j} \right]. \quad (39)$$

sum-power constraint에 따른, 식 (32)의 해는 water-filling에 의해 주어진다. 따라서 dual problem은 dual 변수 λ 에 의해 풀릴 수 있다.

Ⅶ. 모의실험 결과

이 장에서는 셀 에지 성능이 Matlab 시뮬레이션을 통해 계산된다. 수신중인 MS 의 셀 중심 d로부터 거리의 함수인 ICI가 있는 경우와 없는 경우의 SINR을 식 (18-19) 로부터 그림 7 에 도시하였다.

10MHz 대역폭에서 전체 백그라운드 잡음은 $N_0 = -104$ dBm 이다. 또한 eNB 송신 전력을 $P = 43$ dBm로 가정한다. ICI을 제거하고 얻은 SINR 이득은 lower SINR UE 보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 d가 R에 접근할 때 lower SINR이 생기며, 셀 에지 MS들의 경우에 해당한다. ICI 를 제거해서 얻어진 throughput의 상대적 이득은 용량 눈금이 lower SINR에서 거의 선형적인 것처럼 low SINR MS 보다 클 것으로 기대된다. 높은 SINR 사용자에게 대해서는 ICI 제거에 의해 얻어진 적은 SINR 이득이 throughput에서 매우 의미 있는 이득으로 해석되지 않는다.

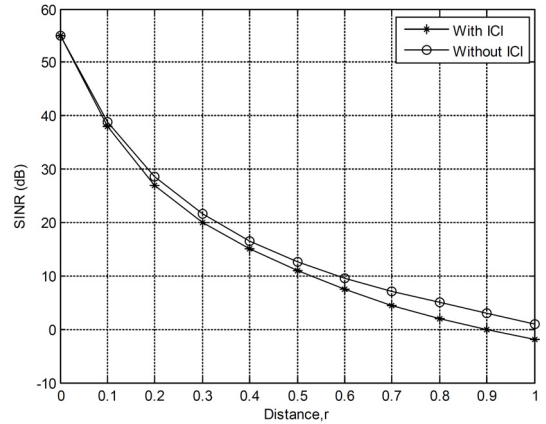


그림 7. 셀 중앙으로부터 거리 함수의 SINR
 Fig. 7. The SINR as a function of distance from cell-center.

이러한 논의로부터 셀 간 간섭이 셀 중앙의 MS에게 보다 셀 에지의 MS에게 보다 중요한 의미를 갖는다는 결론을 얻을 수 있다.

여러 가지 reuse 요소에 대한 셀 에지 SINR이 식 (22, 24, 26) 으로부터 그림 8 에 도시되어 있다. 경로손실 지수가 3.6인 경우에는 reuse-1에 비해 reuse-3을 사용한 결과 셀 에지 SINR에서 대략 13 dB가 개선되었음을 볼 수 있다. reuse-7은 에지 셀 SINR을 8 dB 추가로 증가시킨다. reuse-3 과 7을 사용하면 전송 대역에서 전력 스펙트럼 밀도가 각각 factor-3과 7정도 증가됨을 볼 수 있다. 이러한 이유는 보다 높은 reuse 를 이용하면, reuse 방법의 각 셀에서 사용된 주파수 대역폭이 감소하기 때문이다. 위의 계산에서 이러한 전력 스펙트럼 밀도가 증가됨을 설명했다.

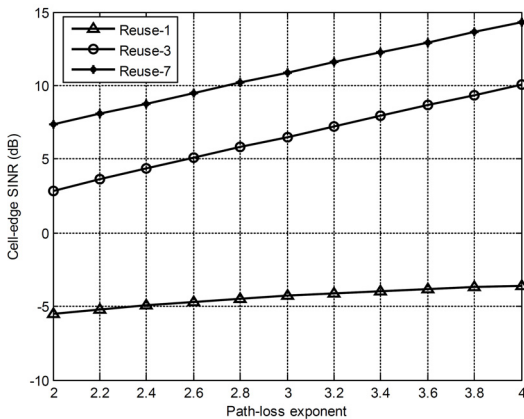


그림 8. 다양한 재사용 factor에 대한 셀 에지 SINR
Fig. 8. The cell edge SINR for various reuse factors.

여러 가지 reuse 요소들에 대한 셀 에지 용량 제한이 식 (23, 25, 27) 로부터 그림 9 에 나타나 있다. 경로손실 지수가 3.6 인 경우에 reuse-3을 사용하면 셀 에지 throughput에서 일반적인 주파수 재사용의 경우에 비해 대략 2배 정도로 개선됨을 보이고 있다. 따라서 잠재적인 성능개선은 셀 에지 사용자들에게 ICIC에 의해 얻어질 수 있는 이득을 나타낼 뿐이다. 더욱이 reuse-7은 일반적인 주파수 재사용 보다는 높은 용량 이득을 제공하지만 reuse-3보다는 성능이 떨어짐을 보였다.

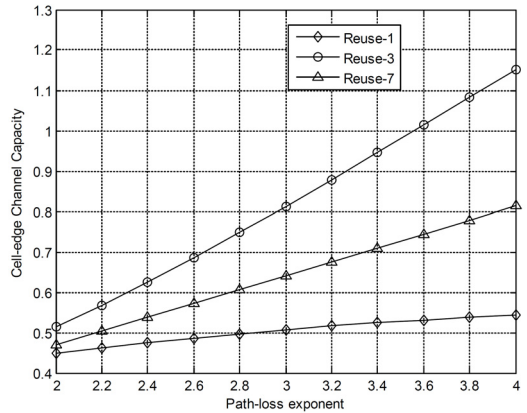


그림 9. 다양한 재사용 factor에 대한 셀 중앙의 SINR
Fig. 9. The cell-center SINR for various reuse factors.

MIMO 채널의 채널 용량은 다음과 같이 표현된다^[21].

$$C = \max_{T(Q_k)=M} \log_2 \det \left(I_N + \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^K H_k Q_k H_k^H \right) \text{ bps / Hz} \quad (40)$$

BS 들이 협력을 하지 않는다면 k 사용자로부터 k 기지국까지, $k \in \{1, 2, 3\}$ 인 채널들이 인접 셀 간에 공유가 되지 않는다. 따라서 용량은 셀들이 협력하지 않을 때 달성되며 그 결과 간섭이 제한된다.

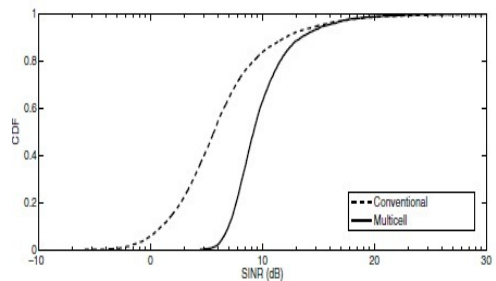


그림 10. 수신된 사용자 SINR 의 CDF 곡선
Fig. 10. The CDF curves of received user SINR.

반면에 같은 주파수에서 동작하는 사용자들에 대해 결합 디코딩을 수행한다는 면에서 모든 셀들은 협력하고 있다고 볼 수 있다. 그러나 협력의 경우에 각 사용자에 대해 총 전력 제한이건 개별 전력 제한이건 간에 전력 할당이 명확하게 수행될 수 있다. 기지국들은 백홀 (backhaul) 에 의해 연결되어 있어서 용량은 협력 셀 수

를 최대화할 수 있다.

하향링크를 위한 수신된 사용자 SINR의 CDF (cumulative distribution function) 곡선이 그림 10에 제시되어 있으며, 이 그림에서 알 수 있듯이 제한한 다중 셀 MIMO 방법은 하향링크에 대해 저 SINR 영역에서 대략 5 dB 정도의 SINR을 개선시킬 수 있고, 고 SINR 영역에서 0에서 2 dB를 개선시킬 수 있다.

VIII. 결론

본 논문에서는 다중 셀 망에서 셀 에지 문제를 다루었다. 다중 셀 MIMO 하향링크 채널의 셀 에지 SINR을 계산하기 위해, 첫째 기지국 BS와 원격 안테나 유닛(RAU)-단말기(MS) 간을 19 셀 2 Tier 원안에서 직각좌표로부터 극좌표로 변환하는 호환 모델을 제시했다. 이때, 단말기 위치는 거리와 각도를 갖으며, Homogeneous 셀 안을 360도로 회전하는 위치에서 놓임을 그림 3에서 볼 수 있다. 둘째, 단말기 경로 손실지수 3.6과 극좌표 각도를 90도로한 직각좌표계 내에 놓인 단말기에서, 주파수 reuse-3이 reuse-1에 비해 셀 에지 SINR이 13dB, reuse-7은 8dB 개선됨을 모의실험을 통해 확인했다. 셋째, 표 1에 주파수 재사용율에 따른 SINR과 셀 에지 채널 용량을 정리했다. Femto, Pico, Macro 셀이 혼재된 Heterogeneous가 있는 셀 해석은 차후 연구과제이다.

References

- [1] A. Yousafzai, M. R. Nakhai, "Block QR decomposition and nearoptimal ordering in intercell cooperative multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing," *IET Commun.*, vol. 4, no. 12, pp. 1452 - 1462, Aug. 2010.
- [2] Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 60-67, Oct. 2004
- [3] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, "The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, pp. 174, June 2004.
- [4] Physical Layer Aspects for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7), 3GPP Technical Report TR 25.814 V7.1.0, Sep. 2006.
- [5] D. Gesbert, S. Hanly, H. Hung, S. S. Shitz, O. Simeone, W. Yu, "Multi-Cell MIMO Cooperative Networks: A new look at interference," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, Dec. 2010.
- [6] R. Zhang, "Cooperative multi-cell block diagonalization with per-base-station power constraints," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 9, pp. 1435 - 1445, Dec. 2010.
- [7] M. Fallgren, "An optimization approach to joint cell, channel and power allocation in multicell relay networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no.8, pp. 2868 - 2875, 2012.
- [8] S. Kiani, D. Gesbert, "Optimal and distributed scheduling for multicell capacity maximization," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol.7, no.1, pp. 288 - 297, 2008.
- [9] L. C. Wang and C. J. Yeh, "3-cell network mimo architectures with sectorization and fractional frequency reuse," *IEEE J. on Sel. Areas in Commun.*, vol. 29, pp. 1185 - 1199, June 2011.
- [10] L. Xu, K. Yamamoto, H. Murata, and S. Yoshida, "Cell edge capacity improvement by using adaptive base station cooperation in cellular networks with fractional frequency reuse," *IEICE Transactions*, pp. 1912 - 1918, 2010.
- [11] 3GPP, R I-082469, "LTE-Advanced- Coordinated Multipoint Transmission/ reception," Ericsson, Jun. 30-Jul. 4, 2008.
- [12] R1-093036, "Practical Analysis of CoMP Coordinated Beamforming," Huawei, 2009.
- [13] A. Mahmud, K. A. Hamdi, N. Ramli, "Performance of fractional frequency reuse with comp at the cell-edge," *2014 IEEE Region 10 Symposium*, Malaysia, 14-16 April 2014.

- [14] OFDMA Downlink Inter-Cell Interference Mitigation, 3GPP Project Document R1-060 291, Feb. 2006.
- [15] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband air Interface Technologies and Performance*, Cambridge University Press, 2009.
- [16] M. Rahman, H. Yanikomeroğlu, "Enhancing cell edge performance: A downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 9, no. 4, April 2010.
- [17] X. You, D. Wang, P. Zhu, B. Sheng, "Cell edge performance of cellular mobile systems," *IEEE Trans. on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 6, June 2011.
- [18] J. V. B. James, B. Ramamurthi, "Distributed cooperative precoding with SINR based co-channel user grouping for enhanced cell edge performance," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 10, no. 9, Sept. 2010
- [19] N. Ul Hassan, C. Yuen, Z. Zhang, "Optimal power control and antenna selection for multi-user distributed antenna system with heterogeneous QoS constraints," *Globecom'12 Workshop: Multicell Cooperation*, California, USA, 3-7, December, 2012.
- [20] M. H. A. Khan, K. M. Cho, M. H. Lee, J. G. Chung, "Performance of cell edge for multicell MIMO broadcast channel," *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, 14-17 September 2014, Vancouver, Canada.
- [21] D. Tse, P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005
- [22] Y. S. Im, E. Y. Kang, "MPEG-2 Video Watermarking in Quantized DCT Domain," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 11, No. 1, pp. 81-86, 2011.
- [23] I. Jeon, S. Kang, H. Yang, "Development of Security Quality Evaluate Basis and Measurement of Intrusion Prevention System," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society (JKAIS)*, Vol. 11, No. 1, pp. 81-86, 2010.

저자 소개

박 주 용(정회원)



- 1994년 : 전북대학교 전자공학과 박사
- 1991년 ~ 2007년 : 서남대학교 전기전자공학과 교수
- 2007년 3월 ~ 현재 : 신경대학교 인터넷정보통신학과 교수

<주관심분야 : 무선이동통신, 통신이론>

김 기 중(정회원)



- 1997년 : 원광대학교 박사
 - 1996년 ~ 2005년 2월 : 광양보건대학 전자계산과 교수
 - 2005년 3월 ~ 현재 : 신경대학교 인터넷정보통신학과 교수
- <주관심분야 : 마이크로프로세서 응용, 임베디드시스템>

김 정 수(정회원)



- 1998년 : 전북대학교 정보통신공학과 석사
 - 2003년 : 전북대학교 컴퓨터공학과 박사 졸업.
 - 2002년 6월 ~ 현재 : 송실사이버대학교 컴퓨터정보통신학과 부교수
- <주관심분야 : 이동통신>

※This work was supported by MEST, 2015R1A2A1A05000977, NRF, Korea.

이 문 호(정회원)



- 1984년 : 전남대학교 전기공학과 박사, 통신기술사
 - 1985년 ~ 1986년 : 미국 미네소타 대학 전기과 포스트닥터
 - 1990년 : 일본동경대학 정보통신공학 과박사
 - 1970년 ~ 1980년 : 남양MBC 송신소장
 - 1980년 10월 ~ 2010년 2월 : 전북대학교 전자공학부 교수
 - 2010년 2월 ~ 2013년 : WCU-2 연구책임교수
 - 2015년 8월 15일 국가 개발 연구우수 성과 100선 선정
 - 현재 : 전북대학교 전자공학부 초빙교수
- <주관심분야 : 무선이동통신>