부 어레이 빔포밍을 활용하는 간섭 제어 기법 및 셀룰러 시스템에서의 성능 평가

An Interference Coordination Technique Utilizing Sub-Arrays and Its Performance in Cellular Systems

강 호 식 · 이 동 현 · 성 원 진

Hosik Kang · Donghyun Lee · Wonjin Sung

요 약

늘어나는 트래픽 양을 감당하기 위한 방안 중 하나로, 기지국 간의 간섭을 줄여 데이터 전송 속도를 최대화 시키는 방식의 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서도 간섭 제어를 위해 안테나 부 어레이를 활용하는 빔포밍을 통하여 간섭을 제어하는 두 가지 기법을 제안한다. 첫 번째 방식은 수평 빔 회전방식으로써 세 종류의 좁은 빔 패턴을 만들고, 이 빔 패턴을 시간 축에서 회전시키면서 간섭을 제어하는 방식이다. 두 번째 방식은 사용자 별 부 어레이 빔포밍 방식으로써 전송받는 사용자 위치에 맞춰 빔포밍 행렬을 적용함으로써 여타 사용자에게 대한 간섭을 최소화하는 방식이다. 제안하는 방식의 활용을 통해 셀 내에서 수신 신호 세기 증가 및 외부 셀로부터의 간섭 신호를 억제하는 효과를 얻을 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 제안하는 방식들의 성능 이득을 정량적으로 평가하여 제시한다.

Abstract

To cope with an increasing amount of data traffic, research efforts are being made to maximize the data rate by reducing the interference between the transmission nodes. This paper also focuses on interference control schemes utilizing antenna sub-array beamforming. The first scheme relies on horizontal beam rotation which utilizes three types of narrow beam patterns. Different beam patterns are applied to transmit signals in rotating fashion to control the interference. The second scheme is based on user-specific sub-array beamforming, which uses the precoding matrix based on users' location and controls the amount of interference in the multi-user environment. The performance of the proposed schemes is evaluated using the computer simulation to demonstrate the performance enhancement.

Key words: Beamforming, Sub-Arrays, Interference Control, Beam Rotation, MU-MIMO

I. 서 론

현재 모바일 이용자 수의 급증으로 인하여, 무선 채널에서의 트래픽 양이 늘어나고 있다. 늘어난 트래픽 양을

감당하기 위하여 스펙트럼 효율 및 고속 데이터 전송에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 3GPP LTE 표준 기술에서는 셀 간 간섭 제어를 통하여, 고속 데이터 전송 기술을 지원하고자 한다. 따라

「이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.」

서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

· Manuscript received February 4, 2014 ; Revised April 21, 2014 ; Accepted May 8, 2014. (ID No. 20140204-018)

· Corresponding Author: Wonjin Sung (e-mail: wsung@sogang.ac.kr)

서 고도화된 인접 셀 간 간섭 조정 기술(enhanced Inter-Cell Interference Coordination: eICIC)이 3GPP LTE에서 주요 기술로 각광 받고 있는 상황이다. eICIC에서는 시간 축에서의 간섭 제어인 Almost Blank Sub-frame(ABS) 및 Cell Range Expansion(CRE) 기술에 의하여 간섭이 제어된다. ABS 기술의 경우 ABS가 적용된 구간에서는 전송이 이루어지지 않는다는 문제점을 가지게 되고, CRE의 경우 하향 링크에서 심각한 간섭을 겪게 되는 문제점을 가지고 있다^[1].

또한, 3GPP에서는 고속 데이터 전송에 대한 요구를 충족시키기 위한 방안으로 다양한 빔포밍 기술을 이용하고 있다. 빔포밍은 안테나에서 송출된 신호의 에너지가 특정한 방향을 따라서 집중적으로 전달되도록 안테나를 구현하는 기술이므로, 빔포밍을 통하여 높은 신호 대 잡음 간섭 비(Signal-to-Interference Plus Noise Ratio: SINR)를 얻을 수 있게 된다. 하지만 인접 셀 간의 간섭을 효과적으로 제어할 때 더 큰 성능 향상을 보이게 된다.

기존의 빔포밍의 한계를 해결하기 위하여, 인접 셀 간의 간섭을 제어한 빔포밍 기술이 계속하여 연구되고 있다. 블록 대각화 기법과 최적 결합 기법을 이용하여 각각 셀 내부와 외부의 간섭을 제어하는 연구가 진행되었으며^[2], 채널 환경에 따라 사용자에게는 이득이 적고 인접 셀 사용자에게는 간섭 영향이 큰 고유 안테나를 적응적으로 제거함으로써 간섭을 줄이는 방안도 연구되어 왔다^[3]. 또한, 아날로그 빔과 디지털 빔을 적절히 조합함으로써 간섭과 하드웨어 복잡도를 적절히 제어할 수 있는 하이브리드 빔포밍에 관한 연구도 진행되었다^{[4][5]}.

본 논문에서는 또 다른 간섭 제어 방식으로, 부 어레이 빔포밍을 통하여, 큰 방향성을 가진 빔을 형성해 간섭을 제어하는 2가지 기법을 제안한다. 첫 번째 기법은 수평 빔 회전방식이고, 두 번째 기법은 사용자 별 부 어레이 빔포밍 방식이다. 2가지 방식의 적용을 통하여, 간섭을 제어함을 보이는 것을 목표로 한다.

이하의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델과 시뮬레이션 환경을 정의하며, III장에서는 부 어레이를 활용한 방향성 빔포밍 방식을 설명하고, IV장에서는 부 어레이 빔포밍을 활용한 간섭 제어 방안을 제안한다. V장에서는 제안한 방식을 SINR 측면과 전송률 측면에서

성능을 평가하고, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

부 어레이 적용을 위해 그림 1과 같은 7셀 21섹터의 셀룰러 시스템을 고려한다. 기지국은 64개의 섹터 안테나 원소를 갖음을 가정하며, 많은 수의 안테나 원소를 활용하여 셀 내 다양한 방향으로의 방향성 빔포밍이 적용될 수 있다.

i 는 송신 노드의 인덱스이고, 인덱스 i 의 집합이 C 가 되며, k 는 수신 단말의 인덱스이다. i 번째 송신 노드의 송신 파워를 P_i , 경로 감쇄와 셰도잉 및 안테나 빔 패턴이 적용된 large-scale 페이딩을 $s_{k,i}$, small-scale 페이딩을 $h_{k,i}$ 로 각각 나타내기로 한다. 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 잡음을 z_k 그리고 송수신 벡터를 각각 $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_k$ 로 나타낼 때 단말에서 수신되는 신호는

$$\mathbf{y}_k = \sum_{i \in C} \sqrt{P_i s_{k,i}} \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{x}_i + z_k \quad (1)$$

와 같이 표현될 수 있다. 그리고 k 번째 단말이 속한 셀의 인덱스를 n 으로 놓고, 자신이 속한 셀과 그 외의 셀로 구분하여 나타낸 수신 신호는

$$\mathbf{y}_k = \sum_{i \in A_n} \sqrt{P_i s_{k,i}} \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{x}_i + \sum_{j \neq n} \sum_{i \in A_j} \sqrt{P_i s_{k,i}} \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{x}_i + z_k \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 j 번째 셀에 속한 송신 노드 인덱스들의 집합을 A_j 라 한다^[6]. 이 때 k 번째 단말의

그림 1. 7셀 21섹터 셀룰러 시스템 모델
Fig. 1. 7-cell 21-sector cellular system model.

SINR은

$$\gamma_k(n) = \frac{\left| \sum_{i \in A_n} \sqrt{P_{i s_{k,i}}} \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{x}_{i,k} \right|^2}{I_{k,in} + I_{k,out} + \sigma^2} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 단말이 속한 n 번째 셀 내에는 3개의 송신 노드가 있고, 각 단말은 최대 1개의 송신 노드에 스케줄링 되어 신호가 전송된다. 스케줄링 된 노드 이외의 모든 송신 노드의 신호는 간섭 신호로 작용한다. 이로 인한 셀 내 간섭은

$$I_{k,in} = \sum_{\substack{m \in S_n \\ m \neq k}} \left| \sum_{i \in A_n} \sqrt{P_{i s_{k,i}}} \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{x}_{i,m} \right|^2 \quad (4)$$

와 같이 나타내며, S_n 은 n 번째 셀에서 스케줄 된 단말들의 집합이다. 셀 외부의 송신 노드들에 의한 셀 간 간섭은

$$I_{k,out} = E \left| \sum_{j \neq n} \sum_{i \in A_j} \sqrt{P_{i s_{k,i}}} \mathbf{h}_{k,i}^H \mathbf{x}_{i,j} \right|^2 \quad (5)$$

와 같이 나타낸다. 여기서 $I_{k,out}$ 의 경우, $I_{k,in}$ 에 비해 크기가 작아 SINR 측면에서 영향이 적다. 따라서 계산량을 줄이기 위하여 평균 셀 간 간섭을 구하고, 그 값을 셀 간 간섭 값으로 고정하여 사용한다.

N 개의 안테나 원소로 구성된 부 어레이들이 M 개의 안테나 포트를 형성하는 안테나 어레이를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 부 어레이의 형태는 1×2 , 1×4 와 같은 선형 어레이(linear array)와 2×2 , 2×4 와 같은 평면 어레이(planar array) 등이 가능하다. 그림 2에는 $N=2 \times 2$ 의 부 어레이들이 $M=16$ 개의 안테나 포트를 형성하고 있는 총 $M'=64$ 개의

그림 2. $M=64(N=2 \times 2)$ 안테나 어레이
Fig. 2. $M=64(N=2 \times 2)$ antenna array.

원소를 가진 안테나를 나타내었다($M'=M \times N$).

대규모 안테나 어레이를 부 어레이로 나누어, 부 어레이 내 원소들은 방향성 빔포밍에 활용하고, 다수개의 부 어레이들의 집합은 다중 사용자 다중 입출력(Multiple-Input Multiple-Output; MIMO) 빔포밍에 활용한다. 이를 위해 부 어레이 내 원소들은 원소 간 적절한 이격 거리를 사용하며, 각각의 원소마다 개별적인 디지털 위상 천이기를 사용한다. 채널 추정 시 부 어레이 내 안테나 원소들은 단일 안테나 원소로 간주되며, 채널 추정을 위해 동일한 파일럿 자원을 활용한다. 그리고 M 개의 부 어레이 집합은 최대 M 개의 레이어를 활용한 다중 사용자 MIMO 전송을 수행하며, 이를 위해 M 개의 파일럿 자원이 필요하다.

III. 부 어레이를 활용한 방향성 빔포밍

송신기에서 안테나 어레이 형태에 따라 특정 방향으로 좁은 빔 폭의 빔을 갖도록 설계하는 것이 가능하다. 이러한 특성을 이용하여 부 어레이를 생성하고 활용하는 것을 목표로 한다. 먼저 선형 어레이와 평면 어레이를 이용하여 생성된 빔을 분석한다.

3-1 선형 어레이

그림 3에는 $N=1 \times 4$ 의 부 어레이를 나타내었다. 부 어레이의 원소들은 x 축 방향으로 배치되어 있으며, ϕ 와 θ 는 각각 안테나 어레이와 단말 사이의 방위각(azimuth angle)

그림 3. $N=1 \times 4$ 선형 안테나 어레이
Fig. 3. $N=1 \times 4$ linear antenna array.

그림 4. 선형 안테나 어레이
Fig. 4. Linear antenna array.

과 상하각(elevation angle)을 의미한다. 그림 3과 같이 x축에 배치된 선형 안테나 어레이에 의해 형성되는 AF(Array Factor)는

$$AF = \sum_{s=0}^S v_s e^{-j\beta s d_x \cos \phi \sin \theta} \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다^{[7],[8]}. β 는 $2\pi/\lambda$ 를, d_x 는 원소 간 이격을 나타내며, v_s 는 빔포밍 벡터의 s 번째 원소이다. λ 는 빛의 파장으로써 중심주파수가 f_c 이고, 빛의 속도를 c 로 나타낼 때 c/f_c 로 구해진다.

단말의 지리적 위치를 정확히 추정할 수 있다면, 빔포밍 벡터를 활용하여 해당 위치로의 방향성 빔포밍을 형성할 수 있다. 예를 들어, 단말이 방위각 60° ($\phi=\pi/3$)와 상하각 105° ($\theta=7\pi/12$)를 갖는 위치에 있을 때 빔포밍 벡

터는

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\beta d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12}} & e^{j2\beta d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12}} & e^{j3\beta d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 빔포밍 벡터를 적용한 안테나 패턴을 그림 4에 나타내었다. 부 어레이 내 원소들이 x축을 따라서 배치되어 있는 형태이므로 수평 빔 패턴의 경우 빔 폭이 좁은 것을 알 수 있다. 하지만 z축에는 하나의 원소만 있는 형태이므로 빔 폭이 넓은 수직 빔 패턴이 형성된 것을 확인할 수 있다.

3-2 평면 어레이

그림 5에는 $N=2 \times 2$ 의 부 어레이를 나타내었다. 부 어레이의 원소들은 x축 방향과 z축 양방향으로 배치되어 있다. 그림 5와 같이 x축과 z축에 배치된 평면 안테나 어레이에 의해 형성되는 AF는

$$AF = \sum_{t=0}^T \sum_{s=0}^S v_{t,s} e^{-j\beta(s d_x \cos \phi \sin \theta + t d_z \cos \theta)} \quad (8)$$

와 같이 나타낼 수 있다. d_x 와 d_z 는 원소 간 이격을 나타내며, $v_{t,s}$ 는 빔포밍 행렬의 원소이다. 앞의 예에서와 같이 단말이 방위각 60° ($\phi=\pi/3$)와 상하각 105° ($\theta=7\pi/12$)를 갖는 위치에 있을 때, 해당 방향으로의 빔포밍 행렬은

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\beta d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12}} \\ e^{j\beta d_z \cos \frac{7\pi}{12}} & e^{j\beta(d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12} + d_z \cos \frac{7\pi}{12})} \end{bmatrix} \quad (9)$$

그림 5. $N=2 \times 2$ 평면 안테나 어레이
Fig. 5. $N=2 \times 2$ planar antenna array.

(a) 수평축 안테나 패턴($\phi=60^\circ$)
(a) Horizontal axis antenna pattern($\phi=60^\circ$)

(b) 수직축 안테나 패턴($\theta=105^\circ$)
(b) Vertical axis antenna pattern($\theta=105^\circ$)

그림 6. 평면 안테나 어레이
Fig. 6. Planar antenna array.

와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 빔포밍 행렬을 적용한 안테나 패턴을 그림 6에 나타내었다. 선형 어레이의 경우에 비교해 x축을 따라서 배치되어 있는 원소의 수가 절반이 되었으므로 그림 6(a)의 빔 폭이 그림 4(a)에 비해 넓어진 것을 알 수 있다. 반면, z축을 따라서 배치되어 있는 원소의 수는 두 배가 되었으므로 그림 6(b)의 빔 폭이 그림 4(b)의 빔 폭보다 좁아진 것을 확인할 수 있다.

IV. 부 어레이를 활용한 인접 셀 간섭 제어 방안

4.1 수평 빔 회전

수평 빔 회전 기법을 위한 안테나는 $N=1 \times 4$ 의 부 어레이

그림 7. 3 섹터 빔 패턴과 $N=1 \times 4$ 부 어레이 빔 패턴 비교
Fig. 7. 3-sector beam pattern compare with $N=1 \times 4$ sub-array beam pattern.

이 4개($M=4$, $M'=16$)로 구성된 안테나를 고려한다. 기존의 3 섹터 안테나 빔 패턴과 $N=1 \times 4$ 부 어레이의 수평 빔 패턴을 그림 7에 나타내었다. 기존의 3 섹터 3 dB 빔 폭은 70° 인데 반해, $N=1 \times 4$ 부 어레이의 3 dB 빔 폭은 약 26° 로 좁아진 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 그림 8과 같이 한 섹터 내에서 30° 의 간격으로 세 종류의 빔 패턴을 만들고, 이들을 시간 축에서 회전시켜가면서 사용하는 방식을 제안한다. 3 dB 빔 폭이 26° 인 빔 패턴을 30° 간격으로 배치하였기 때문에, 총 3 dB 빔폭이 78° 가 되어 세 패턴이 커버하는 영역은 기존의 3섹터 시스템의 커버리지 영역보다 넓어지게 된다. 기존의 3섹터 시스템에서 단말은 각각의 송신 노드들에 대해서 수신 SINR을 측정하여 자신의 서비스 노드를 결정하였다. 하지만 제안하는 방식에서 단말은 하나의 송신 노드에 대해서도 3가지 빔 패턴에 대해

그림 8. $N=1 \times 4$ 부 어레이를 통한 3 섹터 빔 패턴
Fig. 8. 3-sector beam pattern ways through $N=1 \times 4$ sub-array.

그림 9. 기지국 별 빔 회전 패턴
Fig. 9. Beam rotation pattern of base station.

각각 수신 SINR을 측정한다. 단말은 선호하는 송신 노드와 해당 송신 노드의 특정 패턴을 선택하여 피드백한다.

기지국에서는 세 빔 패턴에 대해서 각각 스케줄 후보 사용자 집합을 구성한 후, 현재 전송 빔 패턴에 맞춰 사용자를 스케줄링 한다. 여기서 스케줄 후보라는 것을 정의하면, 사용자들이 3가지의 빔 패턴 각각에 대한 채널 정보를 피드백함으로써 각 빔 패턴 별로 스케줄링 된 사용자들의 집합을 의미한다. 그리고 각각의 빔 패턴 시간에 맞추어 사용자들이 스케줄링 된다. 이 후보 또한 기지국들은 인접 셀 간섭 효과를 감소시키기 위하여 그림 9와 같은 방식으로 주변 셀들과 동기를 맞춘다. 사용자들은 자신이 선호하는 빔 패턴에 대해서만 신호를 전송 받을 수 있으므로 스케줄링 확률은 줄어들게 되지만, 스케줄링 됐을 때의 신호 세기는 강해지고 외부 셀 간섭 신호는 매우 작아지므로 수신 SINR 및 순간 전송률 측면에서 성능 향상을 기대할 수 있다.

4.2 사용자 별 부 어레이 빔포밍

수평 빔 회전 기법에서는 하나의 안테나 어레이에 포함된 모든 부 어레이들이 특정 전송시간에 동일한 방향성 빔포밍을 사용하는 방식을 제안하였다. 반면, 사용자

그림 10. 부 어레이 별 빔포밍 적용
Fig. 10. Beamforming applied to sub-array.

별 부 어레이 빔포밍 기법에서는 부 어레이들이 고정된 빔포밍 행렬을 사용하는 것이 아니라, 스케줄링된 사용자의 위치에 맞춰 빔포밍 행렬을 적용하는 방식을 제안한다.

그림 10에 나타난 부 어레이 ($N=2 \times 2$, $M=4$) 안테나를 활용하여 두 사용자에게 신호를 전송할 때, 안테나 포트를 통한 수신 신호는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \\ w_{31} & w_{32} \\ w_{41} & w_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

와 같이 표현할 수 있다. $\mathbf{H}$ 행렬과 $\mathbf{W}$ 행렬은 각각 기지국 안테나 포트와 단말 사이의 무선 채널과 프리코딩을 나타내며, $\mathbf{x}$ 벡터는 송신 신호이다. 그림 10에서와 같이 기지국과 두 단말 사이의 방위각과 상하각에 대한 추정치 완벽할 때, 첫 번째 사용자 (UE #1)를 위한 빔포밍 행렬 $\mathbf{V}_1$ 는

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\beta d_x \cos \frac{\pi}{2} \sin \frac{2\pi}{3}} \\ e^{j\beta d_x \cos \frac{2\pi}{3}} & e^{j\beta (d_x \cos \frac{\pi}{2} \sin \frac{2\pi}{3} + d_x \cos \frac{2\pi}{3})} \end{bmatrix} \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 두 번째 사용자 (UE #2)를 위한 빔포밍 행렬 $\mathbf{V}_2$ 는

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\beta d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12}} \\ e^{j\beta d_x \cos \frac{7\pi}{12}} & e^{j\beta (d_x \cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{7\pi}{12} + d_x \cos \frac{7\pi}{12})} \end{bmatrix} \quad (12)$$

와 같이 나타낼 수 있다. $\mathbf{W}$ 행렬은 다중 사용자 MIMO를

위한 프리코딩 행렬로써, 첫 번째 열은 UE #1을 위한 그리고 두 번째 열은 UE #2를 위한 프리코딩 벡터이다. 이때 $\mathbf{W}$ 행렬의 첫 번째 열에는 UE #1을 위한 빔포밍 행렬인 $\mathbf{V}_1$ 을 적용시키고, 두 번째 열에는 UE #2를 위한 빔포밍 행렬인 $\mathbf{V}_2$ 을 적용시킴으로써 사용자 별 신호의 세기는 키워주고, 간섭의 영향은 감소시킬 수 있다. 따라서 $\mathbf{W}$ 행렬에 사용자별 부 어레이를 위한 $\mathbf{V}_1$ 과 $\mathbf{V}_2$ 행렬이 적용된 $\mathbf{W}'$ 행렬은

$$\mathbf{W}' = \begin{bmatrix} a_{11}w_{11} & b_{11}w_{12} \\ a_{12}w_{11} & b_{12}w_{12} \\ a_{21}w_{11} & b_{21}w_{12} \\ a_{22}w_{11} & b_{22}w_{12} \\ \vdots & \vdots \\ a_{11}w_{41} & b_{11}w_{42} \\ a_{12}w_{41} & b_{12}w_{42} \\ a_{21}w_{41} & b_{21}w_{42} \\ a_{22}w_{41} & b_{22}w_{42} \end{bmatrix} \quad (13)$$

와 같이 나타낼 수 있다. $\mathbf{W}$ 행렬은 기지국 안테나 포트들과 단말들 사이의 프리코딩 행렬이었다면, $\mathbf{W}'$ 행렬은 기지국 안테나 원소들과 단말들 사이의 프리코딩 행렬이 된다. 부 어레이 내 원소들은 동일 채널을 갖는다고 가정하였기 때문에, 기지국 안테나 원소들과 단말들 사이의 채널 행렬은

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{11} & h_{11} & h_{11} & h_{12} & h_{12} & h_{12} & h_{12} & h_{13} & h_{13} & h_{13} & h_{13} & h_{14} & h_{14} & h_{14} & h_{14} \\ h_{21} & h_{21} & h_{21} & h_{21} & h_{22} & h_{22} & h_{22} & h_{22} & h_{23} & h_{23} & h_{23} & h_{23} & h_{24} & h_{24} & h_{24} & h_{24} \end{bmatrix} \quad (14)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

V. 성능평가

제안한 방식들을 적용한 시뮬레이션을 통하여 성능 향상 정도를 확인한다. 시스템 파라미터는 표 1에 주어진 값들로 설정하였다. 스케줄링 방식으로는 비례 공정(proportional fairness) 스케줄링을 사용하여, 사용자의 현재 채널 상태와 현재까지 전송된 데이터의 평균 전송률(T_k)의 비가 큰 사용자를 선택함으로써, 시스템의 공정성과 수율

표 1. 시스템 파라미터

Table 1. System parameters.

파라미터	값
시스템 레이아웃	7셀 21섹터
	기지국 간 거리: 500 m
사용자 분포	섹터 당 30 사용자
경로감쇄	UMa NLOS for Macro BS
쉐도우 페이딩	6dB std. dev. for Macro BS
페이딩	레이리 페이딩
중심주파수	2 GHz
대역폭	10 MHz
잡음	-104 dBm/10 MHz
스케줄링	비례 공정 스케줄링
프리코딩	Zero-forcing 빔포밍

을 고려하였다. 그리고 안테나의 개수가 늘어나더라도, 전체 안테나 어레이에 인가되는 총 파워를 동일하게 정규화시킴으로써 제안 방식들의 성능 평가에 공정성을 유지하였다. 성능 평가의 척도로써 SINR, 평균 전송률을 측정하여 시스템 내에서의 전반적인 전송률을 측정하였다.

5-1 수평 빔 회전 성능 평가

수평 빔 회전 방식의 적용을 통한 성능 향상 정도를 확인한다. 3 섹터 빔의 경우, 기존의 동종 네트워크 시스템을 기반으로 하며, 기지국의 안테나 원소의 개수와 포트의 수는 모두 4개로 동일하다. 3 섹터 안테나 패턴이 적용되었으며, 단말은 선호하는 송신 노드로부터 신호를 전송받는다. 제안한 빔 회전의 경우, 기지국의 안테나 포트의 수는 4개로 동일하지만 부 어레이를 사용하므로 총 안테나 원소의 개수는 16개로 증가하였다. 이를 이용해 3가지 빔 패턴이 생성되고, 시간 축에서 회전하게 된다. 단말은 선호하는 송신 노드의 특정 한 빔 패턴으로부터 신호를 전송받는다.

그림 11과 12 그리고 표 2와 3에서는 기존의 3 섹터 방식($M=4$)과 제안한 빔 회전 방식을 SINR 측면과 T_k 측면에서 비교하여 나타내었다. 빔 패턴 회전 방식을 적용한 경우, 평균 SINR 측면에서는 2.46 dB 그리고 하위 5% 사용자의 SINR 측면에서는 2.36 dB의 성능 향상이 나타난

그림 11. 빔 회전 패턴 방식 적용에 따른 SINR 성능
Fig. 11. SINR performance according to application beam rotation pattern.

그림 12. 빔 회전 패턴 방식 적용에 따른 T_k 성능
Fig. 12. T_k performance according to application beam rotation pattern.

것을 알 수 있다. 섹터 전송률 측면에서도 각각 126 %, 133 %로 성능이 향상되었다. 이를 통해 제안한 방식이 셀 내에서 수신 신호의 세기를 키워주며, 외부 셀로부터의 간섭 신호는 효과적으로 억제시켜준다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 기존의 3섹터 방식($M=16$)과 제안한 방식을 비교할 수 있는데, 기존의 3섹터 방식의 경우 안테나 개수

표 2. 빔 회전 패턴 방식 적용에 따른 SINR 성능

Table 2. SINR performance according to application beam rotation pattern.

	3-sector beam with $M=4$ [dB]	Beam rotation $M'=16$ ($N=1 \times 4$) [dB]	3-sector beam with $M=16$ [dB]
Average	9.54	12.00 (+2.46)	7.95 (—)
Median(50 %)	8.94	11.55 (+2.61)	7.40 (—)
Low 5 %	-0.65	1.71 (+2.36)	-4.23 (—)

표 3. 빔 회전 패턴 방식 적용에 따른 T_k 성능

Table 3. T_k performance according to application beam rotation pattern.

	3-sector beam with $M=4$ [dB]	Beam rotation $M'=16$ ($N=1 \times 4$) [dB]	3-sector beam with $M=16$ [dB]
Average	0.50	0.63 (126 %)	1.12 (—)
Median(50 %)	0.45	0.56 (124 %)	0.87 (—)
Low 5 %	0.21	0.28 (133 %)	0.14 (—)

가 증가하더라도 파워의 총합은 정규화 되어 있기 때문에 $M=16$ 가 $M=4$ 보다 수신 신호는 작아지고, 간섭 신호는 커져서 SINR이 떨어지게 된다. 반면에 많은 안테나 개수를 이용하여 많은 사용자들을 스케줄링할 수 있으므로 사용자 전송률 측면에서는 높은 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

채널 정보 피드백 측면에서 분석을 하면, 제안한 방식의 경우 부 어레이를 이용하였지만, 부 어레이들 간에는 같은 파일럿 자원을 사용하므로 기존 3섹터 방식($M=4$)의 경우와 마찬가지로 4개의 파일럿 자원만 필요하다. 반면에 기존 3섹터 방식($M=16$)의 경우, 16개의 파일럿 자원이 필요하므로 같은 파일럿 자원을 활용하는 $M=4$ 의 경우에 제안하는 방식이 높은 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

5.2 사용자 별 부 어레이 빔포밍 성능 평가

다음 제안 방식인 사용자 별 부 어레이 빔포밍 방식의 적용을 통한 성능 향상 정도를 확인한다. 기존의 동종 네트워크 시스템을 기반으로 하며, 기지국의 안테나 원소의 개수와 포트의 수는 동일하다. 하지만 기존의 3섹터 빔을 사용하여 실험을 진행할 경우, 부 어레이 적용을 통한 정밀한 빔을 얻는 것이 어려워져 성능 향상의 정도를 확인하기 어렵다. 따라서 기존의 3섹터 빔이 적용된 상황에서도 부 어레이의 적용 효과를 얻을 수 있도록 개선 사항이 필요하다. 본 시뮬레이션에서는 부 어레이 적용의 성능을 명확히 확인하기 위하여 ideal 3 섹터 빔 패턴을 적용하여, 섹터 내에서 동일한 이득을 갖도록 설정하였다. 부 어레이내 원소의 개수 및 구조에 따른 성능을 살펴보기 위해 $N=1 \times 2$, $N=2 \times 2$, 그리고 $N=2 \times 4$ 의 경우에 대해 실험하였다.

그림 13과 14 그리고 표 4와 5에는 다양한 사이즈의 부 어레이를 적용한 방식을 SINR과 T_k 측면에서 비교하여 나타내었다. SINR 측면에서 $M=4$ 일 때와 $M=16$ 일 때를 비교해 보면 독립적인 안테나 원소의 수가 증가함에 따라 하위 사용자의 SINR이 더 안 좋아지는 것을 알 수 있다. 하지만 부 어레이를 적용하게 되면 외부 셀로부터의 간섭 신호가 감소하여 SINR이 좋아진다. 그리고 부 어레이의 사이즈에 비례하며, 수평 빔 패턴의 빔 폭을 좁혀줄 때

그림 13. 사용자 별 부 어레이 빔포밍 적용에 따른 SINR 성능

Fig. 13. SINR performance according to application user-specific sub-array beamforming.

표 4. 사용자 별 부 어레이 빔포밍 적용에 따른 SINR 성능
Table 4. SINR performance according to application user-specific sub-array beamforming.

	$M=4$ [dB]	$M=4$ ($N=1 \times 2$) [dB]	$M=4$ ($N=2 \times 2$) [dB]
Average	11.48	14.70 (+3.22)	18.22 (+6.74)
Median(50 %)	10.28	14.10 (+3.82)	17.36 (+7.08)
Low 5 %	-0.95	2.13 (+3.08)	4.47 (+5.42)
	$M=4$ ($N=1 \times 4$) [dB]		$M=16$ [dB]
Average	19.80 (+8.32)		10.44 (-)
Median(50 %)	18.94 (+8.66)		9.37 (-)
Low 5 %	5.64 (+6.59)		-4.16 (-)

그림 14. 사용자 별 부 어레이 빔포밍 적용에 따른 T_k 성능
Fig. 14. T_k performance according to application user-specific sub-array beamforming.

성능 이득이 우수한 것을 알 수 있다. 그리고 안테나 개수가 증가하더라도 파워의 총합은 정규화 되어 있기 때문에 $M=16$ 가 $M=4$ 보다 수신 신호는 작아지고, 간섭 신호는 커져서 SINR이 떨어지게 된다.

표 5. 사용자 별 부 어레이 빔포밍 적용에 따른 T_k 성능
Table 5. T_k performance according to application user-specific sub-array beamforming.

	$M=4$ [dB]	$M=4$ ($N=1 \times 2$) [dB]	$M=4$ ($N=2 \times 2$) [dB]
Average	0.55	0.70 (127 %)	0.83 (151 %)
Median(50 %)	0.43	0.60 (140 %)	0.75 (174 %)
Low 5 %	0.09	0.17 (189 %)	0.27 (300 %)
	$M=4$ ($N=1 \times 4$) [dB]		$M=16$ [dB]
Average	0.90 (164 %)		1.30 (-)
Median(50 %)	0.81 (188 %)		0.99 (-)
Low 5 %	0.31 (344 %)		0.17 (-)

사용자 전송률 측면에서는 부 어레이의 적용에 따른 성능 향상이 나타나지만, 안테나 포트 수에서 제한을 두기 때문에 스케줄링 되는 사용자의 수가 제한되므로, $M=16$ 일 때 성능에는 미치지 못한 것을 확인할 수 있다. 즉, $M=4$ 에 부 어레이를 적용하더라도 4개의 안테나를 이용한 송신과 마찬가지로, 최대 스케줄링 사용자는 4명이 되어서 최대 스케줄링 사용자가 16명이 될 수 있는 $M=16$ 의 성능에는 미치지 못하게 된다.

채널 정보 피드백 측면에서는 5-1의 성능 평가에서와 마찬가지로 부 어레이를 활용할 경우, 부 어레이들 간에는 동일한 파일럿 자원을 활용함으로 채널 정보 피드백량을 줄일 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 부 어레이를 통해 정밀해진 방향성을 이용하여 인접 셀 간 간섭을 제어하는 방식들을 제시하고, 시스템에 적용하여 성능을 분석하였다. 제안하는 방식은 안테나의 빔 패턴을 활용하는 방식과 부분 원소 집합인 부 어레이를 활용하는 방식으로 나눌 수 있다.

먼저, 복수 계층 안테나 어레이를 통해 다수개의 빔 패턴을 만들고, 이를 시간 축에서 회전시키는 수평 빔 회전 방식을 제안하였다. 이 방식을 통하여 셀 내에서 수신 신호의 세기를 키워 주며, 외부 셀로부터의 간섭 신호는 효과적으로 억제시켜줄 수 있음을 확인하였다. 또한, 대규모의 안테나 원소가 적용된 안테나에서 부 어레이를 형성시키고, 부 어레이는 방향성 빔포밍에 사용하고 독립적인 안테나 포트들은 다중 사용자 MIMO 빔포밍에 적용하는 사용자 별 부 어레이 빔포밍 방식을 제안하였다. 이 방식을 통하여 외부 셀로부터의 간섭 신호가 감소함을 확인하였다. 따라서 본 논문의 목표였던 셀룰러 이동통신 시스템의 주요 성능 열화 요인인 외부 셀 간섭의 제어를 제한한 방식을 통하여 가능성을 검증하였다. 수식적 및 실험적인 검증을 통하여 기존 방식들에 대비하여 제안한 방식의 우수성을 확인하였다.

References

- [1] 김성의, 김기수, 홍인기, "이기종 네트워크에서의 간섭 제어 분석", 한국통신학회논문지, 38(3), pp. 268-276, 2013년 3월.
- [2] 김재원, 성원진, "안테나 간 상관도에 강건한 SINR 최대화 협력적 빔포밍 기법", 전자공학회논문지, 46(4), pp. 95-103, 2009년 4월.
- [3] 김승완, 이진욱, 이용환, "다중 셀 환경에서 간섭 제어를 위한 고유 안테나 선택 기반의 송신 빔포밍 기법", 한국통신학회 종합학술발표회 논문집(동계), pp. 53-54, 2010년 2월.
- [4] 황해광, 권중형, 최경준, 김광순, "셀룰러 시스템에서 하이브리드 빔형성을 이용한 간섭완화", 한국통신학회 종합학술발표회 논문집(추계), pp. 274-275, 2012년 11월.
- [5] 김경원, 민병욱, "하이브리드 빔포밍을 위한 비선형 어레이 안테나 배치", 한국통신학회 종합학술발표회 논문집(추계), pp. 281-282, 2012년 11월.
- [6] J. Kim, S. Shin, J. Sung, D. Lee, and W. Sung, "Intercell interference mitigation using the moving coverage boundary of cellular systems employing remote radio

heads", in *Proc. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sydney, Australia, pp. 1120-1125, Sep. 2012.

[7] A. E. Zooghby, *Smart Antenna Engineering*, Artech Hou-

se, pp. 83-105, 2005.

[8] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design, 3rd Edition*, Wiley, pp. 349-369, 2005.

강 호 식

2013년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

2013년 2월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 이동무선통신, MIMO, Cognitive Radio

성 원 진

1990년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1992년 5월: University of Michigan EECS (공학석사)

1995년 12월: University of Michigan EECS (공학박사)

1996년 1월~2000년 8월: Hughes Network Systems 책임연구원

2000년 9월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 이동무선통신, MIMO

이 동 현

2012년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

2014년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

[주 관심분야] 이동무선통신, MIMO, Cognitive Radio