

릴레이 기반 셀룰러 네트워크를 위한 간섭 회피 빔 성형 기법

Interference Avoidance Beamforming for Relay-Based Cellular Networks

문 철 · 정 창 규

Cheol Mun · Chang-Kyoo Jung

요 약

본 논문에서는 빔 성형(beamforming) 기술을 사용하는 릴레이 기반 셀룰러 네트워크에서, 순방향 링크 채널 상태에 대한 제한된 피드백 정보를 이용하여, 동시에 전송되는 송신기와 수신기 사이의 직접 링크(direct link)와 중계기(relay station)와 수신기 사이의 중계 링크(relaying link) 간의 간섭을 효과적으로 억제하는 간섭 회피(interference avoidance) 빔 성형 기술을 제안한다. 이를 위해 송신기는 빔 성형을 사용하여 한정된 공간으로만 직접 링크 신호 전력을 전송하고, 송신기의 간섭 전력이 도달하지 않는 공간 영역에 위치한 릴레이들의 relaying을 허용함으로써, 효과적으로 직접 링크와 중계 링크간 간섭을 억제할 수 있는 충돌 회피(collision avoidance) 스케줄링 기술을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술이 중계 링크의 전송 용량을 보장하면서 동시에 전송되는 직접 링크 전송 용량을 최대화 할 수 있음을 보인다.

Abstract

In this paper, for a relay-based cellular network, a interference avoidance beamforming technique is proposed to enhance direct link capacity while minimizing loss in the capacity of concurrent relaying link. A direct link is transmitted by beamforming at the transmitter, and the relaying link with the least interference to the direct link is scheduled to transmit data by a collision avoidance scheduling algorithm. Simulation results show that the proposed IA beamforming provides a considerable direct link capacity enhancement while minimizing relaying link capacity loss by effectively mitigating inference between concurrent direct and relaying links only with limited feedback.

Key words : AF Relaying, Beamforming, Scheduling, Radio Resource Management, Interference Mitigation

I. 서 론

다중 안테나 기술은 무선 통신 시스템의 채널 용량 또는 성능을 개선시킬 수 있는 핵심 기술로서 많은 연구가 진행되었다. 한편, 중계기(relay station)의 중계를 통해 셀 가장자리나 음영 지역에서의 성능을 개선하는 릴레이 통신 기술은 넓은 서비스 영역을 가지는 광대역 무선 접속 네트워크 구현을 위한 핵심 기술로서 대두되고 있다^{[1],[2]}. 따라서, 이러한 장점들을 결합한 다중 안테나 기술을 사용하는 릴레이 기

술은 차세대 무선 통신 네트워크 구현을 위한 매우 중요한 후보 기술로서 연구가 수행되고 있다^{[3],[4]}.

참고문헌 [5]는 기존 셀룰러 시스템의 요소 기술인 다중 사용자 다이버시티(multiuser diversity), opportunistic 스케줄링, 그리고 스펙트럼 재사용(spectrum reuse) 기술을 릴레이를 기반으로 하는 셀룰러 네트워크로 확장 적용하여 해당 기술들의 중요 장점들을 분석하였다. 특히, BS(Base Station)와 수신기간 직접 링크(direct link)와 중계기(relay station)와 수신기간 중계 링크(relaying link)가 동일한 시간 슬롯에

「이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2008-2-D00660).」

국립충주대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communications Engineering, Chungju National University)

· 논문 번호 : 20100906-126

· 교신저자 : 문 철(e-mail : chmun@cjnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 10월 5일

서 전송되는 스펙트럼 재사용 기술을 제안하고, 이론적인 용량 분석 및 시뮬레이션을 통해 직접 링크와 중계 링크가 서로 다른 시간 슬롯에 전송되는 직교 전송 방식보다 우수한 주파수 효율을 가짐을 보였다.

본 논문은 릴레이 기반 셀룰러 네트워크의 하향 링크에서 스펙트럼 재사용 기술에 의한 스펙트럼 효율을 증가시키기 위해, 동시에 전송되는 직접 링크와 중계 링크 간의 간섭을 효과적으로 억제하는 간섭 회피(interference avoidance) 빔 성형 기술을 제안한다. 이를 위해 BS는 빔 성형을 사용하여 한정된 공간으로만 직접 링크 신호 전력을 전송하고, 직접 링크의 간섭 전력이 도달하지 않는 공간 영역에 위치한 릴레이들의 relaying을 허용함으로써, 효과적으로 직접 링크와 중계 링크간 간섭을 억제하는 충돌 회피(collision avoidance) 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 또한, 시뮬레이션을 통해 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술이 중계 링크의 전송 용량을 보장하면서 동시에 전송되는 직접 링크 전송 용량을 최대화 할 수 있음을 보인다.

II. 시스템 모델

셀룰러 네트워크의 하향 링크에서 릴레이에 기반한 다중 사용자 통신(multiuser communication)을 고려한다. 하나의 BS와 M 개의 RS, 그리고 BS의 직접 링크에 의해 서비스 받는 K_d 수신기들과 각 RS의 중계 링크에 의해 데이터를 수신하는 K_r 수신기를 가정한다. RS는 multihop routing 기술을 통해 BS에 의해 직접 서비스 받기 힘든 수신기들에게 더 나은 품질의 링크를 제공하여 용량면에서 서비스 영역을 증가시킨다. 이를 위해 첫 번째 hop에서 BS는 고용량의 무선 backhaul 링크를 통해 RS에 데이터를 전송하고, 두 번째 hop에서 RS는 수신된 신호를 amplify-and-forward(AF) 방식으로 전달한다. 즉, time division 기반(half duplex 방식)으로 동작하는 AF 릴레이 protocol을 가정한다.

고려하는 relay 기반 셀룰러 네트워크에는 다음과 같은 세 가지 형태의 링크가 존재한다. (i) L_{sd} : BS와 K_d 수신기들 간의 직접 링크, (ii) L_{sr} : BS와 RS 간의 무선 backhaul 링크, (iii) L_{rd} : 각 RS와 K_r 수신기들

간의 중계 링크. 위의 세 링크 간의 간섭을 제거하기 위해서는 직교 채널 즉, 서로 다른 시간 슬롯에 각각 전송하면 된다. 그러나, 이와 같은 직교 전송 방식은 많은 시간 자원을 요구하기 때문에 시스템의 주파수 효율을 떨어뜨리게 된다.

따라서, 본 논문에서는 BS와 수신기 간 직접 링크, L_{sd} 와 RS와 수신기 간 중계 링크, L_{rd} 가 동일한 시간 슬롯에서 전송되는 주파수 재사용 기술이 적용된 방식을 고려한다^{[1],[5]}. 이와 같은 주파수 재사용 방식의 주파수 효율은 동시에 전송되는 두 링크 L_{sd} 와 L_{rd} 간의 간섭이 증가할수록 감소하게 된다. 특히, L_{sd} 링크에 의해 데이터를 수신하는 수신기가 중계기 서비스 영역 근처에 위치할 경우, 직접 링크 L_{sd} 의 수신 신호 전력에 비해 RS로부터 수신되는 간섭 신호 전력이 상당히 크기 때문에 L_{sd} 링크 용량이 크게 감소하게 된다. 이러한 용량 감소를 최소화하기 위해서는 RS의 전송 전력을 감소시켜야 하지만, 이는 RS의 중계 링크 L_{rd} 의 용량을 감소시킨다. 따라서, L_{rd} 링크의 용량을 보장하면서 직접 링크 L_{sd} 의 용량 감소를 최소화할 수 있는 기술이 필요하게 된다.

본 논문에서는, BS는 빔 성형을 통해 직접 링크를 전송하고, 동시에 전송되는 직접 링크와 중계 링크 간의 간섭을 최소화하도록 joint 스케줄링을 수행하는 간섭 회피 빔 성형 기술을 제안한다. 그림 1은 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술의 개념을 보여 준다. BS는 빔 성형을 통해 서비스 영역 중에서 한정된 공간으로만 직접 링크 신호를 전송하고, BS 직접 링크

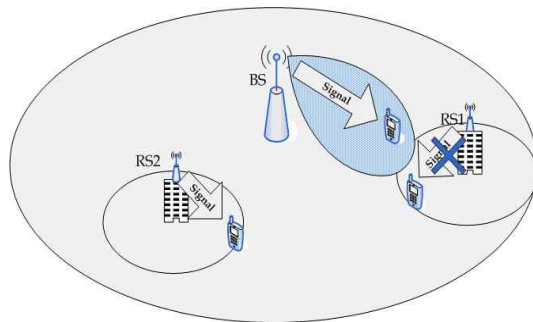


그림 1. 제안하는 릴레이 통신을 위한 간섭 회피 빔 성형 기술

Fig. 1. Conceptual diagram of the proposed interference avoidance beamforming for relay-based cellular network.

간섭 전력이 도달하지 않는 공간적인 영역에 위치한 RS들에게 중계 링크 통신을 허용함으로써, 동시에 전송되는 직접 링크와 중계 링크들을 공간적으로 분리하여 서로 간의 간섭을 최소화 하여 중계 링크의 전송 용량을 보장하면서 직접 링크 전송 용량 감소를 최소화 한다.

III. 간섭 회피 빔 성형 기술

BS는 n_T 개의 송신 안테나를 사용하고, 모든 수신기는 n_R 개의 수신 안테나를 사용하며, RS는 하나의 송수신 안테나를 사용한다고 가정한다. BS에는 M 개의 RS가 BS의 셀 내에 위치하고, BS와 RS에 각각 K_d 와 K_r 수신기들이 균일하게 분포한다고 가정한다.

x 를 BS에서의 송신 신호, y_k 는 BS로부터의 직접 링크에 의해 서비스 받는 k 번째 수신기의 $n_R \times 1$ 수신 신호 벡터라고 하고, 주파수 비선택적 페이딩을 가정하면 수신 신호는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = \sqrt{\frac{\gamma_k}{n_T}} \mathbf{H}_k \mathbf{f} x + \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{\gamma_{k,i}}{n_T}} \mathbf{h}_{k,i} \bar{x}_i + n_k \quad (1)$$

여기서 γ_k 는 k 번째 수신기가 BS로부터 수신한 평균 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를, $\gamma_{k,i}$ 는 i 번째 간섭 RS로부터 k 번째 수신기로의 평균 SNR이다. \mathbf{H}_k 는 BS에서 k 번째 수신기로의 $n_R \times n_T$ 복소 채널 행렬을, $\mathbf{h}_{k,i}$ 는 i 번째 간섭 RS로부터 k 번째 수신기로의 $n_R \times 1$ 복소 채널 벡터를 나타내며, n_k 는 $n_R \times 1$ AWGN(Additive White Gaussian Noise) 벡터를 나타낸다. \mathbf{H}_k 와 $\mathbf{h}_{k,i}$ 의 원소는 평균이 0이고, 분산이 1인 i.i.d. (independent and identically distributed) 복소 랜덤 변수이다. 또한, \mathbf{f} 는 BS에서 사용하는 $n_T \times 1$ 크기의 가중치 벡터를 나타내며, \bar{x}_i 는 i 번째 간섭 RS의 간섭 신호이다.

제한하는 간섭 회피 빔 성형 기술을 위해, BS의 직접 링크 L_d 를 통해 데이터를 수신하려는 K_d 수신기들이 수행하는 동작은 다음과 같다.

BS의 직접 링크 L_d 를 통해 데이터를 수신하려는 K_d 수신기들은 인접한 M 개의 RS로부터 파일럿 채널을 수신하여, M 개의 RS로부터 k 번째 수신기로의

채널 $\{\mathbf{h}_{k,i}\}_{i=1,\dots,M}$ 을 추정하고, k 번째 수신기에 간섭을 많이 주는 RS들의 index로 구성된 간섭 중계기 집합 I_k 를 결정한다. 다음 식 (2)와 같이 M 개의 중계기 중에서 간섭량이 많은 M^* 개의 RS의 index를 간섭 중계기 집합 $I_k = \{m_1, m_2, \dots, m_{M^*}\}$ 의 원소로 결정할 수 있다.

$$\frac{\gamma_{k,m_1} \|\mathbf{h}_{k,m_1}\|^2}{n_T} \geq \dots \geq \frac{\gamma_{k,m_{M^*}} \|\mathbf{h}_{k,m_{M^*}}\|^2}{n_T} \quad (2)$$

식 (2)에서 M^* 는 직접 링크를 수신하는 수신기가 RS로부터 수신 허용할 수 있는 최대 간섭량에 영향을 주는 시스템 파라미터로서, 릴레이 통신 환경 및 채널 환경에 따른 최적화가 필요하다.

또한, 각 수신기는 BS에서 수행되는 CA 스케줄링을 통해, 해당 수신기의 간섭 중계기 집합 I_k 에 속하는 RS가 스케줄러에 의해 relaying을 허가 받지 못할 것으로 가정하고, k 번째 수신기가 $M - \text{card}(I_k)$ 개의 RS들로부터 수신하는 평균 간섭 전력 ρ_k 를 다음과 같이 구한다.

$$\rho_k = \frac{1}{M - \text{card}(I_k)} \sum_{i=1, i \notin I_k}^M \frac{\gamma_{k,i} \|\mathbf{h}_{k,i}\|^2}{n_T} \quad (3)$$

여기서, $\text{card}(I_k)$ 는 I_k 집합의 원소의 개수를 나타낸다.

각 수신기는 각 수신기로의 채널 이득을 최대화 하는 빔 성형 가중치 \mathbf{f}_k^* 를 codebook P 에서 다음과 같이 선택한다.

$$\mathbf{f}_k^* = \arg \max_{\mathbf{f}_i \in P} \|\mathbf{H}_i \mathbf{f}_i\|^2 \quad (4)$$

여기서, P 는 BS와와 수신기들 간에 미리 약속된 빔 성형 가중치들로 구성된 codebook이다. 따라서, BS에서 \mathbf{f}_k^* 를 사용하고 간섭 중계기 집합 I_k 에 속한 RS들이 relay 전송하지 않을 경우, 수신기가 실제로 수신 가능한 SINR은 다음과 같다.

$$\mu_k = \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{f}_k^*\|^2}{\rho_k + N_o} \quad (5)$$

각 수신기는 BS로의 역방향 링크 피드백 채널을 이용하여, 식 (2)를 통해 구한 간섭 중계기 집합 I_k , 식 (4)에서 구한 각 수신기의 채널 이득을 최대화 하는 빔 성형 가중치 벡터 \mathbf{f}_k^* 의 codebook index, 그리고

식 (5)의 BS에서 f_k^* 를 사용하고 간섭 중계기 집합 I_k 에 속한 RS들이 relay 링크를 전송하지 않을 경우의 CQI(Channel Quality Information), 즉, 각 AT의 수신 가능 SINR μ_k 를 BS로 피드백한다.

한편, relay 링크를 통해 데이터를 전송하려는 RS들은 다음의 동작을 수행한다. 각 RS는 서비스 영역에 있는 K_r 수신기들로부터 수신 가능 SINR을 피드백 받고, 이를 이용하여 수신기들 중에서 가장 높은 스케줄링 priority를 갖는 수신기를 선택하고, 선택된 수신기로의 중계 링크 데이터 전송을 BS에 요구한다. 이후 각 RS는 중계 링크를 통한 데이터 전송을 위한 허가를 BS로부터 기다린다. 이는 BS가 BS에서 수신기로의 직접 링크와 RS에서 수신기로의 중계 링크 간의 간섭을 최소화하도록, 수행되는 CA 스케줄링의 결과를 기다리는 것이다.

한편, BS는 하향 링크에서 동시에 데이터를 전송할 직접 링크와 중계 링크를 결정하기 위해, 다음과 같은 충돌 회피 스케줄링을 수행한다.

우선 직접 링크를 통해 데이터를 수신할 수신기를 결정한다. BS 스케줄러는 BS로부터 직접 링크를 통해 데이터 수신을 원하는 수신기들로부터 피드백된 CQI 정보를 이용하여, 다음과 같이 최대 스케줄링 priority를 갖는 k^* 번째 수신기를 직접 링크를 통해 데이터를 전송할 수신기로 먼저 선택한다.

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k,k=1,\dots,K} f(\mu_k) \quad (6)$$

여기서, $f(\mu_k)$ 는 각 수신기의 수신 가능 SINR μ_k 의 함수로 표현되는 scheduling priority의 함수이다. 대표적인 scheduling priority 함수로는 proportional fairness 스케줄링이 있다.

이어, BS 스케줄러는 식 (6)에서 스케줄링 된 k^* 번째 수신기와 동시에 데이터를 전송할 RS를, k^* 번째 수신기의 간섭 중계기 집합 I_k 에 속하지 않는 RS들 중에서 다음과 같이 최대 스케줄링 priority를 갖는 RS를 선택한다.

$$m^* = \operatorname{argmax}_{m,m \notin I_k} f(\nu_m) \quad (7)$$

여기서, ν_m 은 m 번째 RS의 중계 링크를 통해 수신 가능한 SINR을 나타낸다. 이는 각 RS에 의해서 BS로 피드백한다.

마지막으로, BS 스케줄러는 식 (6)에서 스케줄링 된 k^* 번째 수신기로의 직접 링크와 식 (7)에서 선택된 m^* 번째 RS의 중계 링크 데이터 전송을 허가한다.

제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술은 역방향 링크의 제한된 피드백 정보를 이용하여, BS에서 수신기로의 직접 링크와 RS에서 수신기로의 중계 링크 간의 간섭을 최소화 하도록, 직접 링크의 수신기에 높은 간섭을 주는 RS가 동시에 중계 링크를 전송하지 않도록, BS에서 centralized scheduling을 수행한다.

IV. 성능 분석

제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한다. 시뮬레이션 환경은 셀 반경 1,000 m와 120도의 서비스 영역을 갖는 단일 셀의 BS로부터 800 m 거리에 4개의 RS가 균일한 방위 각도에 분포하고, 각 RS는 8 dBm 또는 13 dBm의 전송 전력을 사용한다. 또한, 중계 링크 전송을 위한 K_r 개의 AT가 각 RS의 셀 반경 80 m 이내 영역에 균일하게 분포하고, BS로부터 직접 링크를 통해 서비스 받는 K_d 개의 수신기를 BS로부터 700 m 떨어진 거리에서 균일하게 분포시켜 중계기 서비스 영역 근처에 분포하도록 한다. 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술의 직접 링크와 중계 링크 간의 간섭 억제 성능을 분석하기 위해, 직접 링크를 통해 데이터를 수신하는 AT가 중계기의 서비스 영역에 근접해서 분포하도록 함으로서 두 링크 간 간섭이 최대화 되도록 시뮬레이션 환경을 가정한다. $K_r = K_d = K$ 로 가정하고, K 를 증가시키면서 성능을 분석한다. BS는 송신 안테나 간격이 0.5 λ 인 4개의 송신 배열 안테나를 사용하고, 수신기의 수신 안테나 수는 1개, RS의 송신 안테나 수는 각각 1개를 가정하였다. 다음 식을 이용하여 공간 상관도가 있는 multi-input single-output(MISO) 채널을 발생시켰으며, BS의 송신단에서의 공간 상관 행렬 \mathbf{R}_k 는 선형 배열 안테나를 사용하며 angular spectrum이 angle of departure를 중심으로 Δ_T 만큼 균일하게 분포하는 모델을 사용하여 구하였다.

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{H}_w \mathbf{R}_k^{1/2} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{H}_w 는 $1 \times n_T$ 크기의 i.i.d. 복소 가우시안 벡

터이다. 모든 직접 링크들에 대해 $\Delta_T=10^\circ$ 로 가정한다. 반면, 중계 링크는 RS의 송신 안테나와 수신기의 수신 안테나가 모두 1이므로, 공간 상관 채널 모델이 필요하지 않다. 사용된 경로 손실 모델은 ITU M.1225 경로 손실 모델로 경로 손실이 다음과 같이 구해진다.

$$L = 40\log_{10}R + 30\log_{10}f + 49 \quad (9)$$

여기서, R 은 전파 경로의 길이를 나타내며, 주파수 f 는 2 GHz로 가정한다.

제한된 피드백 정보를 사용하는 빔 성형을 위하여 8개의 discrete Fourier transform 빔 성형 가중치 벡터로 구성된 codebook $P = \{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_8\}$ 를 사용한다^[6].

$$\mathbf{f}_m = \frac{1}{\sqrt{n_T}} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\Delta_m} \\ \vdots \\ e^{j(n_T-1)\Delta_m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $\Delta_m = \pi m/4$ 이며, 모든 피드백 정보에서 에러가 발생하지 않는다고 가정한다.

BS와 각 RS에서 사용하는 스케줄링 알고리즘은 max C/I 알고리즘으로 최대 수신 SINR을 갖는 수신기를 각각 직접 링크와 중계 링크를 통해 데이터를 전송할 수신기로 BS와 RS에서 선택한다.

그림 2와 그림 3은 릴레이 기반 셀룰러 네트워크에서 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술에 의한 성능 이득을 RS의 송신 전력이 각각 8 dBm과 13 dBm일 경우에 대하여 보여준다. 제안하는 충돌 회피 스케줄링을 사용할 경우의 직접 링크와 중계 링크의 용량을 BS와 RS가 독립적으로 스케줄링을 하는(BS에서 간섭 회피 빔 성형 기술이 아닌 일반적인 빔 성형 기술을 사용하는) 경우와 각 링크 용량을 비교한다. 먼저, RS의 송신 전력이 8 dBm일 경우, 간섭 회피 빔 성형에 의한 직접 링크의 용량이 일반 빔 성형 기술에 비해 12.5% 증가하지만, 두 기술의 중계 링크의 용량은 거의 비슷함을 확인할 수 있다. 따라서, 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술은 중계 링크 용량 감소 없이 직접 링크 용량을 효과적으로 개선시킴을 확인할 수 있다.

그림 3은 중계기 송신 전력이 8 dBm에서 13 dBm으로 증가하면서 중계 링크가 직접 링크에 주는 간

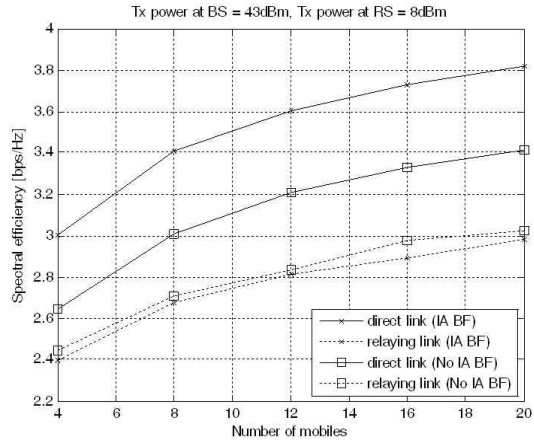


그림 2. 제안하는 간섭 회피 빔 성형 성능 분석(RS 송신 전력: 8 dBm)

Fig. 2. Performance analysis on the proposed IA BF (Transmit power at RS: 8 dBm).

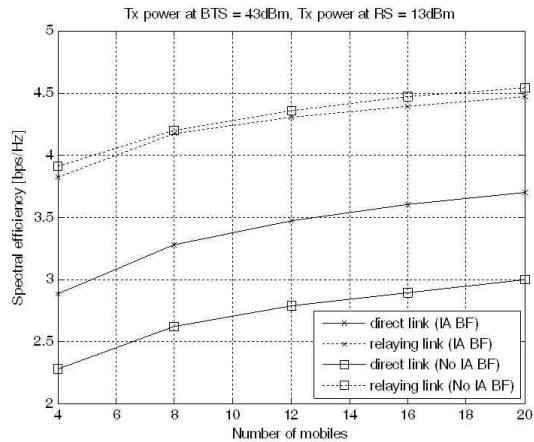


그림 3. 제안하는 간섭 회피 빔 성형 성능 분석(RS 송신 전력: 13 dBm)

Fig. 3. Performance analysis on the proposed IA BF (Transmit power at RS: 13 dBm).

섭이 증가할 경우, 제안하는 간섭 회피 빔 성형 기술에 의한 직접 링크의 용량을 일반적인 빔 성형 기술과 비교한 결과를 보여 준다. 중계기의 송신 전력이 증가함에 따라 두 기술 모두의 중계 링크의 용량이 동일하게 증가하지만, 간섭 회피 빔 성형은 일반 빔 성형에 비해 22% 정도 증가된 직접 링크 용량을 제공한다. 이를 통해 직접 링크에 주는 RS의 간섭이 증가할 경우, 일반 빔 성형에 대해 제안하는 충돌 회피 스케줄링이 제공하는 용량 개선 정도가 12.5%에

서 22 %로 증가함을 확인할 수 있다.

또한, K_d 와 K_r 이 증가함에 따라 직접 링크와 중계 링크의 용량이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 BS와 RS에서 각각 K_d 과 K_r 수신기 중에서 최대 수신 SINR을 갖는 수신기를 각각 선택함으로써 얻어지는 다중 사용자 다이버시티 이득이 반영된 결과이다.

V. 결 론

본 논문에서는 빔 성형 기술을 사용하는 릴레이 기반 셀룰러 네트워크에서, 순방향 링크 채널 상태에 대한 제한된 피드백 정보를 이용하여, 동시에 전송되는 직접 링크와 중계 링크 간의 간섭을 효과적으로 억제하는 간섭 회피 빔 성형 기술을 제안하였다. 모의실험 결과, 제안된 간섭 회피 빔 성형 기술이, 중계 링크의 용량 열화 없이, 동시에 전송되는 직접 링크에 대한 중계 링크의 간섭을 효과적으로 억제함으로써 직접 링크의 용량을 효과적으로 개선시킴을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, and G. Mao, "Relay technologies for WiMAX and LTE-advanced mobile

systems", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 10, pp. 100-105, Oct. 2009.

- [2] Ö. Oyman, J. N. Laneman, and S. Sandhu, "Multi-hop relaying for broadband wireless mesh networks: from theory to practice", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 11, pp. 116-122, Nov. 2007.
- [3] Yi Zhao, Raviraj Adve, and Teng Joon Lin, "Beamforming with limited feedback in amplify-and-forward cooperative networks", *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 7, no. 12, pp. 5145-5149, Dec. 2008.
- [4] B. Khoshnevis, W. Yu, and R. Adve, "Grassmannian beamforming for MIMO amplify-and-forward relaying", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 8, pp. 1397-1407, Oct. 2008.
- [5] O. Oyman, "Opportunistic scheduling and spectrum reuse in relay-based cellular networks", *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 1074-1085, Mar. 2010.
- [6] C. Mun, "Quantized principal component selection precoding for spatial multiplexing with limited feedback", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 56, no. 5, pp. 838-846, May 2008.

문 철



1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

2001년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

2001년 3월~2002년 2월: 삼성전자 네트워크 사업부 선임연구원

2003년 8월~현재: 국립충주대학교 정보통신공학과 교수
[주 관심분야] MIMO 시스템, 채널 모델링 등

정 창 규



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1995년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1995년 9월~현재: 충주대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] MIMO 시스템, 채널 모델링 등