

대형 어레이 안테나 기반 초광역 무선 백홀망 시스템

고성원*, 김효지*, 이주용°, 조동호**

Ultra Wide Area Wireless Backhaul Network System Based on Large Scale Array Antenna

SeongWon Go*, Hyoji Kim*, Ju Yong Lee°, Dong-Ho Cho**

요약

5세대 이동통신 시스템은 4세대 LTE 시스템의 용량 대비 1000배의 용량 증대를 목표로 한다. 이를 달성하기 위해 많은 수의 소형셀을 활용하는 heterogeneous network 기술이 차세대 이동통신 기술로 각광받고 있다. 5세대 이동통신 시스템에서는 고정형 기지국과 이동형 기지국이 기하급수적으로 늘어날 것으로 예상되는데, 이러한 기지국을 모두 유선으로 연결하는 것은 비용 측면에서 합리적이지 않고, 이동형 기지국을 지원하기 위해서는 유선으로 백홀 링크를 지원하는 것보다 효율적인 무선 백홀망 시스템의 구축이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 배경을 바탕으로 고정 및 이동 액세스 포인트와 무선 백홀 스위치를 기반으로 한 5세대 이동통신 초광역 무선 백홀망 시스템을 제안, 초광역 무선 백홀망의 link budget을 분석하고 대형 어레이 안테나를 활용한 빔 기반 초광역 무선 백홀망 시스템의 성능을 시뮬레이터 분석을 통해 검증을 진행하였다. 초광역 무선 백홀망 link budget 분석을 통해 1 nJ/Gbps의 에너지 효율의 달성 가능성을 확인하고, 전송 시뮬레이터를 통해 무선 백홀 스위치를 중심으로 10 km²의 면적에 이동 액세스 포인트가 여러 위치에 존재할 때 사이드로브를 제어함으로써 빔 간 간섭을 줄일 경우 빔 당 1 W의 전송 전력을 통해 평균 주파수 효율을 5 bps/Hz 이상 달성 가능성을 확인하였다.

Key Words : 5G, wireless backhaul, massive array antenna, beamforming, sidelobe control

ABSTRACT

Heterogeneous network technology is expected to be a core technology for 5G mobile communications. 5G mobile network would be composed of many base stations even have mobility, then the operator should connect base stations through the wireless backhaul technology. This paper presents Ultra Wide Area Wireless Backhaul Network System with massive array antenna. We conducted link budget analysis for Ultra Wide Area Wireless Backhaul Network and performance analysis of massive array antenna system through the transmission simulator based on beamforming technology. In wide area (10 km²) wireless backhaul system composed of massive antenna, we achieved 5 bps/Hz average spectral efficiency with 1 W transmission power per beam.

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신-방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음. [14-000-04-001, 초연결 스마트 모바일 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심기술 개발]

♦ First Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology, go@itc.kaist.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology, jylee@itc.kaist.ac.kr, 정회원

* Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1062914@stein.kaist.ac.kr, 학생회원

** Korea Advanced Institute of Science and Technology, dhcho@kaist.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-04-111, Received April 2, 2015; Revised June 2, 2015; Accepted July 2, 2015

I. 서 론

5세대 이동통신 시스템은 4세대 이동통신망의 용량 대비 1000 배의 용량 증대 및 1000 배의 저전력화, 1000 배의 디바이스 수용, 1000 배 빠른 지연 시간을 목표로 하고 있다¹¹. 4세대 이동통신망의 용량 대비 1000 배의 용량 증대를 위해서, 많은 수의 안테나 엘리먼트를 활용하는 MIMO 시스템이 차세대 이동통신 시스템으로 주목을 받고 있다. MIMO 기술은 안테나가 많아지면 많아질수록 이론적으로 용량이 증가되지만 간섭 등의 문제로 용량향상이 제약되기 때문에 여전히 많은 연구들이 이루어지고 있다¹². 대형 어레이 안테나를 활용하는 시스템에서는 높은 빔포밍 이득을 통해 통신 시 소모 전력 절감과 보다 먼 거리에서 보다 큰 용량 지원이 가능하다. 또한, 5세대 이동통신 시스템에서는 고정형 기지국과 이동형 기지국이 기하급수적으로 늘어날 것으로 예상되는데, 이러한 기지국을 모두 유선으로 연결하는 것은 비용 측면에서 합리적이지 않고, 유선으로 백홀 링크를 지원하는 것보다 효율적인 무선 백홀망 시스템의 구축이 필요하다. 무선 백홀망을 구축할 시에 기존의 고정형 기지국에 더해 이동형 기지국 운용이 가능하기 때문에, 3세대 데이터 통신이 시작된 이후 급증하는 모바일 트래픽 수요에 더욱 유동적으로 대응이 가능하다.

본 논문에서는 무선 백홀 스위치와 고정 및 이동 액세스 포인트를 기반으로 한 5세대 이동통신 초광역 무선 백홀망 시스템을 제안한다. 초광역 무선 백홀망은 하나의 무선 백홀 스위치와 다수의 고정 및 이동 액세스 포인트로 구성되며, 고정 및 이동 액세스 포인트는 무선 백홀 스위치로부터 대용량의 무선 백홀 링크를 지원받는다. 제안 시스템의 가능성을 검증해보기 위한 방법으로 첫째, 초광역 무선 백홀망 link budget 분석을 진행하였다. 이동 액세스 포인트가 열악한 NLoS 환경에서 무선 백홀 스위치로부터 3 km 떨어져 있는 경우 1 W의 전송 전력을 활용하여 7 bps/Hz의 용량이 지원 가능하다는 것을 검증하였다. 둘째로 대형 어레이 안테나를 활용한 초광역 무선 백홀망 시스템을 위한 빔 기반 전송 시뮬레이터의 개발 및 성능 평가를 진행하였다. 이를 위해 대형 어레이 안테나 시스템 기반 빔 간 간섭 제어 세밀 빔 설계와 3D 채널 모델링, 3D RF 빔포밍 기술을 적용하고, 빔 기반 대형 어레이 안테나 시스템에서 빔 간 간섭을 고려하여 SINR 계산이 가능하도록 시뮬레이터를 개발하였다. 전송 시뮬레이터의 경우 무선 백홀 스위치에서 400 개 안테나 소자의 어레이 안테나를 사용 시, 10 km²

의 면적에 이동 액세스 포인트가 여러 위치에 존재할 때 사이드로브 제어를 통해 빔 간 간섭을 줄인 경우 빔 당 1 W의 전송 전력을 활용하여 평균 주파수 효율 5 bps/Hz 이상을 달성함을 확인하였다.

II. 초광역 무선 백홀망 개념

제안하는 무선 백홀망은 무선 백홀 스위치와 고정 및 이동 액세스 포인트로 구성이 된다. 무선 백홀 스위치는 수천 개~수만 개의 안테나 엘리먼트를 통해서 다수의 빔을 지원할 수 있도록 구성된다. 또한 고정 및 이동 액세스 포인트는 수백 개의 안테나 엘리먼트로 구성되어 수신 빔포밍과 송신 빔포밍 기능을 지원한다.

그림 1은 무선 백홀 스위치에서 이동 액세스 포인트를 서비스하는 시나리오에 대해서 설명하고 있다. 실외에서 차량 등은 이동 액세스 포인트가 될 수 있으며, 무선 백홀 스위치로부터 수신 빔포밍을 통해서 대용량 서비스를 받을 수 있다. 실외 환경에서 가로등과 같은 고정 액세스 포인트가 무선 백홀 스위치와 연결될 수 있으며, 실내 환경의 경우 가전 등과 같은 고정 액세스 포인트가 무선 백홀 스위치와 연결될 수 있다. 하나의 무선 백홀 스위치는 지상으로부터 수십~수백 m의 높이에 위치하며 수십 km² 이상의 영역을 커버하고, 커버리지 내의 고정 및 이동 액세스 포인트에 대용량의 무선 백홀 링크를 지원한다. UE(User Equipment)는 기존 유선 기지국에 추가로 고정 및 이동 액세스 포인트로부터 대용량의 이동 통신 서비스를 받을 수 있다.

WiFi 업계에서는 5 GHz 대역 중 unlicensed 대역이라고 볼 수 있는 5.150~5.350 GHz 대역 8 채널(W52, W53), 5.470~5.725 GHz 대역 11 채널(W56)

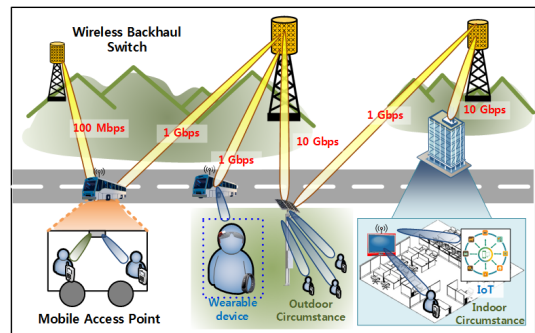


그림 1. 초광역 무선 백홀망 구조
Fig. 1. Configuration of Ultra Wide Area Wireless Backhaul Network

을 무선LAN(IEEE 802.11 시리즈) 용도로 책정하고 있다. 미래전파공학연구소의 [국내의 이동통신용 주파수(380 MHz~6.7 GHz) 분배 및 이용현황-2014년 2월 기준]^[11]에 따르면, 한국의 경우에도 5.150~5.350 GHz 대역과 5.470~5.650 GHz 대역을 특정소출력 무선접속시스템 용도로 책정하고 있는데, 5.650~5.850 GHz 대역과 같이 무선데이터 통신/아마추어(ISM) 용도의 대역을 활용하여 초광역 무선 백홀망 시스템을 운용할 수 있다.

해외의 경우 먼저 일본을 예로 들면, 5.470~5.725 GHz 대역은 실내/실외 무선LAN 용도이고, 5.150~5.350 GHz 대역은 실내 무선LAN을 위한 대역이기 때문에 5.150~5.350 GHz 대역은 실외 무선 백홀 시스템 용도로 활용이 가능하다. 그 이외의 ISM 대역도 한국과 같이 초광역 무선 백홀 시스템 용도로 활용할 것으로 보인다. 또한 미국의 경우, WifiForward라는 단체를 중심으로 5 GHz unlicensed 대역을 WiFi 용도로 활용하고자 하고 있고, Qualcomm사는 5 GHz unlicensed 대역을 LTE-U (LTE-Unlicensed Spectrum) 용도로 활용하고자 하고 있다. 정세가 어떻게 변하고 어떠한 논의가 이루어지느냐에 따라 주파수 대역을 유동적으로 활용할 필요가 있다.

초광역 무선 백홀망 시스템에서는 무선 백홀 링크 용도로 무선LAN 전용 대역을 제외한 5 GHz 대역에서 200 MHz의 대역폭을 활용한다고 가정한다. 무선 백홀 스위치와 고정 및 이동 액세스 포인트 사이의 백홀 링크와 고정 및 이동 액세스 포인트와 UE 사이의 액세스 링크는 서로 다른 주파수 사용을 통해 간섭을 회피한다.

N개의 linear array를 사용하는 경우 3 dB 빔 폭은 식 (1)과 같다^[2].

$$\Delta\phi_{3dB} = \frac{50.76 \lambda}{\sin\phi_0 N a} \quad (1)$$

여기서 ϕ_0 는 빔 방향을 나타내고, a 는 안테나 어레이 간 거리를 나타낸다. $\phi_0 = \pi/2$, $a = \lambda/2$ 인 경우, 3 dB 빔 폭은 식 (2)와 같다.

$$\Delta\phi_{3dB} = \frac{101.52}{N} \quad (2)$$

그림 2는 무선 백홀 스위치의 예를 보이고 있다. 가로 200 개, 세로 200 개의 안테나를 활용하여 40,000 개의 안테나를 이용하는 경우 최소 빔 폭은 가로 0.5

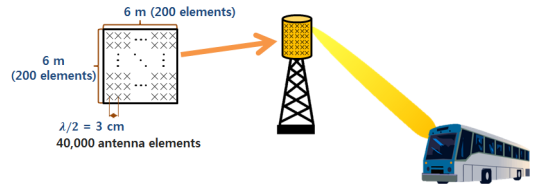


그림 2. 5 GHz 대역 무선 백홀 스위치 어레이 안테나
Fig. 2. Array antenna for Wireless Backhaul Switch at 5 GHz Band

도, 세로 0.5 도의 빔을 형성할 수 있다.

무선 백홀 스위치의 커버리지가 100 km²이고, 40,000 개의 안테나를 사용해서 10,000 개의 빔을 형성한다고 가정하면 한 개의 빔은 약 10,000 m²를 커버한다고 볼 수 있으며 이는 가로 100 m, 세로 100 m 영역에 해당된다.

그림 3은 무선 백홀 스위치로부터 하나의 빔에 대한 커버리지를 보이고 있다. 일반적인 MIMO 시스템에서는 가중치 값과 위상을 정확하게 조절할 수 있는 디지털 빔포밍을 통해서 좋은 성능을 얻을 수 있지만, 그러기 위해서는 각 안테나마다 RF 체인이 필요하므로 가격, 복잡성, 전력 소비 측면에서 효율적이지 못하다^[9]. 무선 백홀 스위치는 아날로그 빔포밍을 통해서 빔 간 간섭은 최소가 되도록 함으로써 빔 용량을 최대화한다. 아날로그 빔포밍을 통해서 형성된 빔은 spot zone을 형성하며, spot zone의 크기는 빔 폭, 채널 상황에 따라서 off-line으로 결정된다. 거리가 멀면 spot zone의 크기는 커진다. 빔이 무선 백홀 스위치로부터 spot zone에 도달하는 사이에 건물이나 산 등의 지형지물로 인해서 LoS가 확보가 안 되는 경우, 고정 액세스 포인트 배치를 통한 relay 구조를 형성하여 LoS 확보 및 간섭 관리를 수행할 수 있도록 한다. 빔 간 간섭을 최소화할 수 있도록 빔을 설계하는 경우 빔 폭이 넓어질 수 있으며, orthogonal beam의 개수도 줄

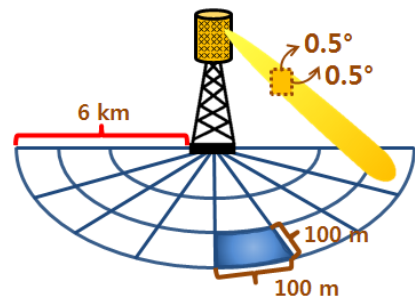


그림 3. 무선 백홀 스위치의 빔 커버리지
Fig. 3. Coverage of Wireless Backhaul Switch

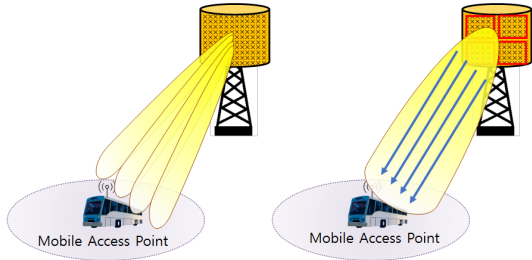


그림 4. 세밀빔을 통한 spot zone 커버(왼쪽)와 광역빔의 멀티 스트림을 통한 spot zone 커버(오른쪽)
 Fig. 4. Covering of spot zone by narrow beams(left) and by wide beam with multi stream(right)

어울 수 있다. 무선 백홀 스위치와 고정 및 이동 액세스 포인트 간 LoS가 확보되는 상황이라면 그림 4의 왼쪽 그림과 같이 빔 간 간섭이 제거된 세밀빔을 활용하여 백홀 링크를 지원할 수 있다. 그러나 무선 백홀 스위치와 고정 및 이동 액세스 포인트 간 LoS가 확보되지 않는 상황이라면 세밀빔 간 간섭이 증가할 수 있기 때문에 그림 4의 오른쪽 그림과 같이 광역빔을 활용하여 spot zone 내에서 MIMO 신호처리를 통해 빔 간 간섭을 제거하는 것이 효과적이다.

아래에서 무선 백홀 스위치의 특징을 나열하였다.

(1) 무선 백홀 스위치는 많은 고정 또는 이동 액세스 포인트에 대용량 링크를 지원할 수 있다.

(2) 무선 백홀 스위치는 수 km의 반경에서 Tbps급 용량을 수십~수천 개의 빔을 통해서 지원해줄 수 있도록 함으로써 다수의 고정 및 이동 액세스 포인트를 통해서 사용자를 지원할 수 있다.

(3) 무선 백홀 스위치는 고정 및 이동 액세스 포인트의 요구에 따라 빔 자원을 할당해주며 고정 및 이동 액세스 포인트는 다수의 무선 백홀 스위치로부터 빔 자원을 받아들일 수 있다.

(4) 무선 백홀 스위치는 항상 대용량을 제공해줄 수 있으며, 고정 및 이동 액세스 포인트의 성능에 따라 수 Tbps에서 수 Gbps까지 제공이 가능하다.

(5) 무선 백홀 스위치는 수십 km²의 커버리지를 확보하기 위해서 수십~수백 m 높이에 설치한다.

다음은 고정 및 이동 액세스 포인트의 특징이다.

(1) 고정 및 이동 액세스 포인트는 다수의 무선 백홀 스위치로부터 필요한 용량을 원하는 만큼 받아들일 수 있다.

(2) 고정 및 이동 액세스 포인트는 사용자 주변에서 쉽게 접근할 수 있는 차량 또는 가전 등에 설치함으로써 사용자는 원하는 통신 용량을 확보할 수 있다.

(3) 이동 액세스 포인트가 이동하는 차량일 경우 차

량 내에 있는 사용자에게 WiFi 또는 mmWave 대역을 활용하여 대용량 트래픽을 서비스해줄 수 있다.

(4) 고정 액세스 포인트는 실외의 경우 가로등에 부착될 수 있으며, 실내의 경우 가전 등이 활용될 수 있다.

(5) 고정 및 이동 액세스 포인트는 기존 단말 외에 사물 인터넷, 웨어러블 단말 등 새로운 형태의 단말 등을 지원한다.

III. 초광역 무선 백홀망 link budget 분석

본 장에서는 제안된 초광역 무선 백홀망의 link budget 분석을 통해서 제안된 망의 성능에 대한 검증 을 수행한다. Reference position이 d_0 인 경우 거리 d 의 위치까지의 path loss는 식 (3)과 같다⁵⁾.

$$PL(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

(λ : wavelength, n : path loss exponent)

5 GHz 환경에서 파장 $\lambda = 6\text{ cm}$, $d_0 = 5\text{ m}$ 인 경우, path loss는 식 (4)와 같다.

$$PL(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi \cdot 5}{0.06}\right) + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{5}\right) \quad (4)$$

따라서, $n=2$ 인 LoS 환경과 $n=4$ 인 NLoS 환경에서의 path loss는 표 1과 같다.

200 MHz를 사용할 경우 noise power는 식 (5)와 같다. (Noise figure는 7 dB로 가정한다.)

$$N_0 W = -174\text{ dBm/Hz} + 83\text{ dB} + 7\text{ dB} \\ = -84\text{ dBm} \quad (5)$$

초광역 무선 백홀망 시스템에서 무선 백홀 스위치는 수천 개에서 수만 개의 안테나 엘리먼트를 활용한다. 어레이 안테나의 각각 안테나 엘리먼트가 전방향 안테나라고 가정하더라도, 안테나 각 엘리먼트의

표 1. Path loss 값
 Table 1. Path loss calculation

	LoS case (n=2)	NLoS case (n=4)
d= 1 km	PL = 106 dB	PL = 152 dB
d= 3 km	PL = 116 dB	PL = 172 dB
d= 6 km	PL = 122 dB	PL = 184 dB

weight 조절을 통해 다양한 세밀빔을 형성할 수 있다. 어레이 안테나에서 이렇게 세밀한 빔을 활용할 경우 전방향으로 방사할 경우보다 전력 이득을 얻을 수 있는데, 이것을 표현한 식이 식 (6), (7)이다¹⁰⁾.

$$G_T = \eta \frac{4\pi}{BW_{T,\phi} BW_{T,\theta}} \quad (6)$$

$$G_R = \eta \frac{4\pi}{BW_{R,\phi} BW_{R,\theta}} \quad (7)$$

여기서, G_T 와 G_R 는 각각 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득이고, $BW_{T,\phi}$ 와 $BW_{T,\theta}$ 는 각각 송신 단에서의 azimuth beamwidth, elevation beamwidth이다. 또한 $BW_{R,\phi}$ 와 $BW_{R,\theta}$ 는 수신단에서의 azimuth beamwidth, elevation beamwidth이며, η 는 방사효율을 나타낸다.

따라서, 송신단에서 가로 0.5 도, 세로 0.5 도의 빔 폭을 가지고, 수신단에서 가로 5 도, 세로 5 도의 빔 폭을 가지는 경우 빔포밍 이득은 식 (8), (9)와 같다.

$$G_T = 0.5 * \frac{4\pi}{(0.5 * 2\pi / 360)^2} = 49 \text{ dBi} \quad (8)$$

$$G_R = 0.5 * \frac{4\pi}{(5 * 2\pi / 360)^2} = 29 \text{ dBi} \quad (9)$$

송신 power를 P_T 이라고 하면, 수신 power와 수신 SNR은 식 (10), (11)과 같이 표현이 가능하다.

$$(\text{수신 power}) = P_T + G_T + G_R - PL \quad (10)$$

$$(\text{수신 SNR}) = P_T + G_T + G_R - PL - N_0 W \quad (11)$$

다음 LoS 환경과 NLoS 환경의 두 가지 경우에 대한 link budget을 살펴본다. 표 2는 두 가지 경우에 대

표 2. Case 1, 2에 대한 link budget
Table 2. Link budget in case 1 and 2

	Case 1	Case 2
Received power	4×10^{-4} mW (-34 dBm)	4×10^{-7} mW (-64 dBm)
SNR	40 dB	20 dB
Spectral efficiency	13 bps/Hz	7 bps/Hz

한 link budget 결과이다.

Case 1) LoS (n=2) 환경에서 200 MHz 대역폭, 0.5 도 송신빔, 5 도 수신빔 사용, 10 mW (10 dBm) 송신 power를 사용하고 송신단과 수신단이 6 km 떨어져 있는 경우

Case 2) NLoS (n=4) 환경에서 200 MHz 대역폭, 0.5 도 송신빔, 5 도 수신빔 사용, 1 W (30 dBm) 송신 power를 사용하고 송신단과 수신단이 3 km 떨어져 있는 경우

각 빔 당 5 bps/Hz의 용량이 지원 가능하고, 200 MHz를 사용한다면 빔 당 1 Gbps의 용량 지원이 가능하다. 따라서, 무선 백홀 스위치에서 10,000 개의 빔이 지원된다면 10 Tbps의 무선 백홀 스위치 용량의 달성이 가능하다. 또한 1 W를 사용해서 1 Gbps의 용량이 달성 가능하다면 1 W/1 Gbps = 1 nJ/bit의 에너지 효율 지원이 가능하다.

IV. 초광역 무선 백홀망 성능 분석

4.1 빔 간 간섭 제거를 위한 사이드로브 제어 세밀빔 설계

본 절에서는 빔 간 간섭 제거를 위한 사이드로브 제어 세밀빔 설계에 관하여 기술한다. 초광역 무선 백홀망 전송 시뮬레이터에서는 6 GHz 이하 대역을 활용하여 10 km²(반경 2 km의 원형 영역)의 영역에서 무선 백홀 스위치가 이동 액세스 포인트에 무선 백홀 링크를 지원하는 시나리오를 가정한다. 무선 백홀 스위치는 120 도 섹터 안테나(수평 방향, 수직 방향 20 by 20, 즉 400 개 안테나 소자로 구성된 사각 배열 안테나)를 활용하여 사이드로브를 -20 dB 이하로 줄이도록 세밀빔을 설계하였다.

안테나는 수직방향 20 개, 수평방향 20 개, 총 400 개의 안테나 소자를 갖는 uniformly distributed rectangular array antenna이다. 안테나 각 소자의 weight 조절을 통해 다양한 세밀빔을 설계할 수 있다. 안테나 기저에 데이터를 맵핑시키면 안테나의 방사 패턴이 변화하게 되고, 물리적으로는 기생소자의 리액턴스를 조절하여 안테나의 방사 패턴을 조절할 수 있다⁸⁾. 초광역 무선 백홀망 시스템의 세밀빔 설계 시 메인 빔 방향이 0도로 향하는 빔을 하나 생성하고 위상 변이(phase shift)를 통해 다른 방향의 빔을 생성하여 빔을 배치시켰다. 0도 방향 빔 생성 시에는 사이드로브 범위를 정하여 이 범위 밖의 최대 사이드로브가 최소화되도록 하였다. 이 때 모든 빔의 최대 크기는 0 dB로 정규화하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (12)

와 같다.

$$\begin{aligned} \min_{w_n} [\max_{\theta \in \Theta} |f(w_n, \theta)|] \\ \text{subject to } |f(w_n, 0)| = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $f(w_n, \theta)$ 는 w_n 의 weight, θ 방향에서의 빔패턴을 의미한다. Θ 는 사이드로브의 범위이다. 이 문제를 풀기위해 유전 알고리즘 (genetic algorithm)을 이용하였다. 유전 알고리즘은 최적해를 찾을 수는 없지만 모든 문제에 대해 최적에 가까운 해를 구할 수 있어 여러 분야에 널리 사용되는 기법이다. 메인 빔이 0도를 향할 때는 각 안테나 소자의 weight가 실수 값이 되므로 제한 조건을 만족하는 랜덤한 실수 weight를 여러 개 발생시켜 최대 사이드로브 값이 낮은 weight만을 선택한다. 선택된 weight들을 서로 조합하여 새로운 weight 후보군을 생성한 후 선택하는 과정을 여러 번 반복하여 최대 사이드로브 값이 충분히 낮은 값을 고른다.

설계된 세밀빔은 그림 5, 6과 같다. 그림 5는 수직 방향, 그림 6은 수평방향의 빔 배치도이다. 그림 5, 6은 하나의 빔이 주변 1-tier 떨어진 빔에 허용 사이드로브(-24 dB) 이상의 간섭 신호를 주지 않도록 하고, 2-tier 이상 떨어진 빔에는 허용 사이드로브(-29 dB) 이상의 간섭 신호를 주지 않도록 하며, 3-tier 이상 떨어진 빔에는 허용 사이드로브(-35 dB) 이상의 간섭 신호를 주지 않도록 세밀빔을 배치한 결과이다. 120 도 섹터 영역(3.3 km²의 면적: 수평방향 120 도, 수직방향 80 도)에서 수평방향 7 개의 빔과 수직방향 5 개의

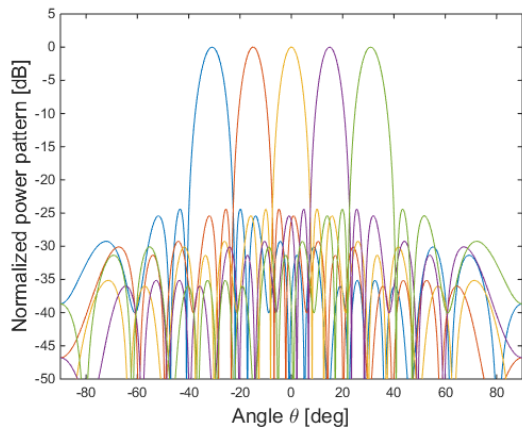


그림 5. 빔 간 간섭을 제어한 수직방향 빔 배치 (N=20, 80° range)
Fig. 5. Beam design in elevation direction without inter-beam interference (N=20, 80° range)

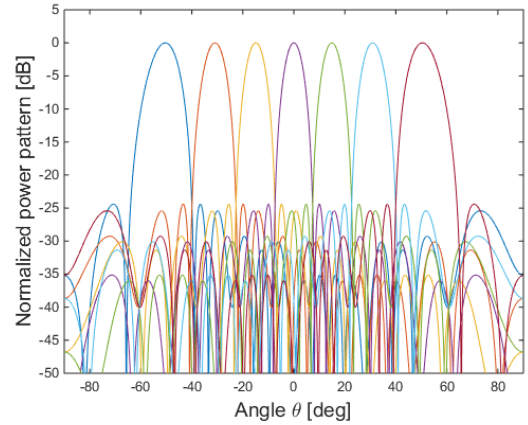


그림 6. 빔 간 간섭을 제어한 수평방향 빔 배치 (N=20, 120° range)
Fig. 6. Beam design in azimuth direction without inter-beam interference (N=20, 120° range)

표 3. 수직방향 각 빔의 메인로브 각도와 FNBW(First Null Beam Width)
Table 3. Mainlobe angle and FNBW(First Null Beam Width) in the elevation direction

Elevation angle (N=20, 80° range)	
Mainlobe angle (°)	FNBW (°)
0	14.7
-6.9, 6.9	15.1
-21.1, 21.1	16.9

표 4. 수평방향 각 빔의 메인로브 각도와 FNBW(First Null Beam Width)
Table 4. Mainlobe angle and FNBW(First Null Beam Width) in the azimuth direction

Elevation angle (N=20, 80° range)	
Mainlobe angle (°)	FNBW (°)
0	14.7
-14.9, 14.9	15.1
-30.9, 30.9	16.9
-50.4, 50.4	22.1

빔을 통해 총 35 개의 빔을 활용하는 것이 가능하다. 표 3, 4는 수직, 수평 방향에 각각 할당된 빔의 위치와 FNBW(First Null Beam Width)를 정리한 것이다. 35 개의 이동 액세스 포인트는 120 도 섹터 영역에 표 3, 4와 같이 메인로브 방향의 각도에 위치한다고 가정하였다.

4.2 대형 어레이 안테나 기반 무선 백홀망 3차원 채널 모델링

본 절에서는 대형 어레이 안테나 기반 무선 백홀망

빔 기반 채널 환경에 대해서 기술한다. 초광역 무선 백홀망 시스템에서 무선 백홀 스위치 안테나

높이가 수십~수백 m로 높고, 무선 백홀 스위치가 수십 km² 이상의 초광역 영역을 커버하는 시나리오로, 이와 같은 환경에서의 채널 모델은 존재하지 않기 때문에 기존 채널 모델을 인용 및 확장하여 사용하였다. 초광역 무선 백홀망의 long-term 채널 모델의 경우(Large scale path-loss 모델) SCM^[4]의 urban-macro scenario를 사용하였고, short-term 채널 모델의 경우 one-ring 모델^{[6],[7]}을 two-sphere 3차원 MIMO 채널 모델^[3]로 확장하여 모델링하였다. 그림 7과 같이 무선 백홀 스위치(Tx 안테나)와 이동 액세스 포인트(Rx 안테나)의 각 sphere 위에 scatterer가 분포되어 있는 구조에서 모델링을 진행한다. 무선 백홀 스위치는 지상으로부터 100 m 이상의 높이에 위치하기 때문에 무선 백홀 스위치와 이동 액세스 포인트 사이의 scatterer는 주로 이동 액세스 포인트 부근에 위치한다고 가정하자.

열악한 환경인 NLoS 성분만을 고려하여 이동 액세스 포인트 부근에 위치한 scatterer의 분포는 식 (13)과 같이 이동 액세스 포인트를 중심으로 한 라플라스 분포를 따른다고 가정한다. 이때 라플라스 분포는 elevation angle θ 와 azimuth angle ϕ 를 변수로 한 2변수 라플라스 분포 $p(\theta, \phi)$ 를 사용하고, θ 와 ϕ 가 독립이라고 가정하였다.

$$p(\theta, \phi) = \left(\frac{1}{2b}\right)^2 \exp\left(\frac{-|\theta| - |\phi|}{b}\right) \quad (13)$$

여기서, 2변수 라플라스 분포의 평균은 0, 분산은 $2b$ 가 된다. 이때, angular spread σ 를 파라미터로 시물레이션 결과를 도출하였다($\sigma^2 = 2b$). x_m 를 m번째 엘리먼트의 x축 좌표, z_m 를 m번째 엘리먼트의 z축 좌표라고 하자. 위의 식 (13)을 활용하여 rectangular planar array 안테나가 그림 7의 x-z 평면 위에 위치하

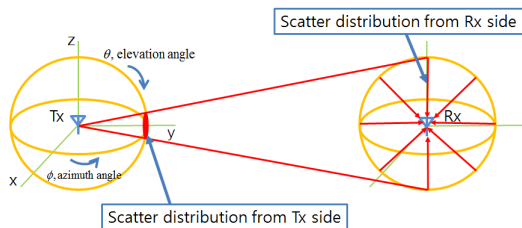


그림 7. 초광역 무선 백홀망의 3차원 채널 모델링
Fig. 7. 3-D channel modeling for Ultra-Wide Area Wireless Backhaul Network

고 있을 때의 채널 correlation matrix의 (m,n)번째 성분 $r_{m,n}$ 은 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$r_{m,n} = \iint_{-\Delta}^{\Delta} \left[\exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}((x_n - x_m)\sin\theta\cos\phi) + (z_n - z_m)\cos\theta))p(\theta, \phi)\cos\theta \right] d\theta d\phi \quad (14)$$

이를 통해서 short-term fading 채널 모델링을 수행하였다.

빔 설계는 1절의 세밀빔 설계를 고려하였다. 세밀빔 설계에서 rectangular planar array antenna가 그림 7의 x-z 평면에 위치하고 있을 때, elevation angle θ 와 azimuth angle ϕ 방향으로 사이드로브를 제어하여 빔포밍하기 위한 beamforming weight vector를 구해 이동 액세스 포인트가 위치한 방향으로 빔포밍 한다. 이 경우 이동 액세스 포인트에서의 수신 신호는 식 (15)와 같이 표현된다.

$$y = Hw s + n \quad (15)$$

여기서, 송신 안테나 개수가 m , 수신 안테나 개수가 1일 경우 s 는 하나의 송신 신호, w 는 $m \times 1$ 의 beamforming weight vector, H 는 $m \times m$ 채널 행렬, n 은 noise, y 는 수신 신호를 나타낸다. 이동 액세스 포인트가 N 개 존재하여 k 번째 이동 액세스 포인트의 채널 행렬이 H_k ($k = 1, 2, \dots, N$)라고 하자. k 번째 이동 액세스 포인트를 위한 송신 신호는 s_k , beamforming weight vector는 w_k 라고 가정한다. 이때, m 번째 이동 액세스 포인트의 희망 수신 신호는 $y_{m,S} = H_m w_m s_m$ 이 되고, 나머지 빔 성분들은 $y_{m,I} = \sum_{k \neq m} H_m w_k s_k$ 로서 간섭으로 간주된다. 시물레이션에서는 이와 같이 빔 간 간섭을 계산한다.

4.3 성능 평가

무선 백홀망 성능 평가를 위한 시물레이션 환경은 1절 그림 5, 6의 세밀빔 설계를 활용한다. 무선 백홀 스위치 1대(Tx 높이 500 m)를 중심으로 하나의 셀 10 km²(반경 2 km의 원형 영역)에서 35 개의 이동 액세스 포인트를 120 도 섹터 영역에 표 3, 4의 메인로브 방향의 각도에 배치한 후, 빔 당 1 W의 전송 전력을 이용할 경우의 빔 간 간섭을 고려하여 총 35 개 이동 액세스 포인트의 SINR 및 주파수 효율을 구한다.

빔 간 간섭을 고려하여 주파수 효율을 구한 결과는

V. 결 론

본 논문에서는 이동 액세스 포인트와 무선 백홀 스위치를 기반으로 한 5세대 이동통신 초광역 무선 백홀망 시스템을 제안하였다. 제안 시스템을 검증하기 위한 방법으로 초광역 무선 백홀망 link budget 분석을 진행하고, 빔 기반 송수신 환경을 통해 1 nJ/Gbps의 에너지 효율을 달성 가능함을 확인하였다. 또한, 대형 어레이 안테나를 활용한 빔 기반 초광역 무선 백홀망 시스템을 위한 전송 시뮬레이터를 개발하여 빔 간 간섭을 고려한 무선 백홀 스위치와 이동 액세스 포인트 간 SINR 결과를 바탕으로 주파수 효율을 도출하였다. 전송 시뮬레이터의 빔 간 간섭을 줄이기 위해 사이드로브를 제어한 세밀빔을 활용하여, 무선 백홀 스위치 1 개와 이동 액세스 포인트 35 개가 10 km²의 영역에 산재해 있을 시에 빔 간 간섭을 고려하여 평균 5 bps/Hz 이상의 주파수 효율 성능을 얻을 수 있었다. 향후에는 안테나 엘리먼트가 400 개 이상인 대형 안테나 어레이 무선 백홀 스위치를 기반으로 하여, 이동성을 갖고 있는 이동성 액세스 포인트를 대상으로 더 넓은 커버리지에서의 성능 분석을 수행할 계획이다.

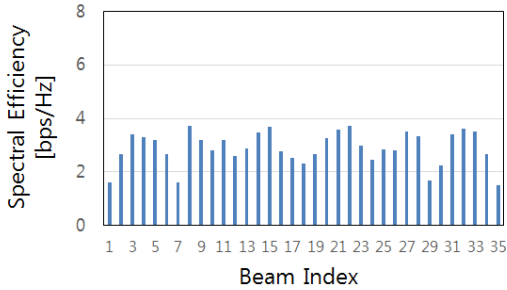


그림 8. 35 개 빔의 주파수 효율 (AS = 5)
Fig. 8. Spectral efficiency of 35 beams (AS = 5)

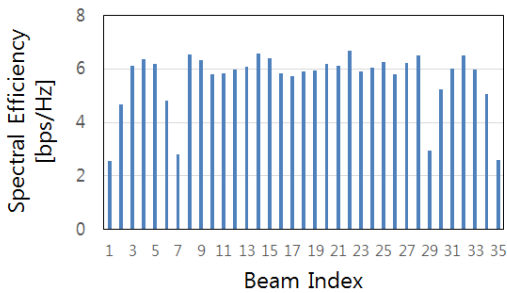


그림 9. 35 개 빔의 주파수 효율 (AS = 2)
Fig. 9. Spectral efficiency of 35 beams (AS = 2)

그림 8 및 그림 9와 같다. 3GPP SCM을 참조하여 angular spread(AS)는 5와 2라는 값을 활용하였다⁴¹. 각 결과 값은 30번 도출해낸 결과에 대해 평균을 구한 값이다. AS = 5일 경우의 결과를 그림 8에, AS = 2일 경우의 결과를 그림 9에 정리하였다. 그림 8에서 AS = 5일 경우에 하나의 빔이 주변 빔에 미치는 간섭이 크기 때문에 빔 당 평균 4 bps/Hz 이하의 열화된 주파수 효율 성능을 볼 수 있다. 그림 8에서 1번과 7번 빔, 29번과 35번 빔을 보면 성능이 열화된 것을 볼 수 있다. 이러한 빔의 경우 세밀빔 설계에서 빔의 각도가 수직/수평방향으로 모두 0에서 멀리 떨어져 있는 빔들로, 빔 이득이 줄어들어 발생한 결과로 생각된다. 또한 12번, 18번, 24번 빔과 같이 여러 빔에 둘러싸여 있는 빔의 경우 빔 간 간섭으로 인해 특히 열화된 성능을 볼 수 있다. 그림 8과 달리 그림 9에서는 angular spread가 작을 시에 하나의 빔이 주변 빔에 미치는 간섭이 줄어들어 빔 하나 당 평균 5 bps/Hz 이상의 주파수 효율 성능을 갖는다. 그러나 그림 9에서도 그림 8과 같이 동일한 이유로 1번과 7번 빔, 29번과 35번 빔을 보면 성능이 열화된 것을 볼 수 있다.

References

- [1] Ministry of Science, *ICT and Future Planning, Mobile Communications Long-term R&D Action Plan Report*, 2014.
- [2] Sophocles J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, Rutgers University, 2014.
- [3] M.-T. Dao, V.-A. Nguyen, Y.-T. Im, and S.-O. Park, “3D polarized channel modeling and performance comparison of MIMO antenna configurations with different polarizations,” *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2672-2682, Jul. 2011.
- [4] 3GPP, *Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations*(Sept, 2003), 2015, from <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25996.htm>.
- [5] Lorne C. Liechty, “Path loss measurements and model analysis of a 2.4 GHz wireless network in an outdoor environment,” Georgia Institute of Technology, 2007.
- [6] S. Da-Shan, et al., “Fading correlation and its

effect on the capacity of multielement antenna systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 3, pp. 502-513, Mar. 2000.

- [7] A. Abdi and M. Kaveh, “A space-time correlation model for multielement antenna systems in mobile fading channels,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 550-560, Aug. 2002.
- [8] J. Choi, C. An, and H.-G. Ryu, “OFDM transmission method based on the beam-space MIMO system,” *J. KICS*, vol. 40, no. 3, pp. 425-431, Mar. 2015.
- [9] M.-J. Kim and Y.-C. Ko, “Channel estimation and analog beam selection for uplink multiuser hybrid beamforming system,” *J. KICS*, vol. 40, no. 3, pp. 459-468, Mar. 2015.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. vol. 1, John Wiley & Sons, 2005.
- [11] *Domestic Mobile Communication frequencies (380 MHz ~ 6.7 GHz) Distribution and Usage* (Feb, 2014), 2015, from <http://ifre.re.kr/index.php>.
- [12] Y.-G. Lim and C.-B. Chae, “Limited Feedback Precoding for Correlated Massive MIMO Systems,” *J. KICS*, vol. 39A, no. 7, pp. 431-436, Jul. 2014.

고 성 원 (SeongWon Go)



2012년 3월 : 일본 전기통신대학 정보통신공학과 졸업
 2014년 3월 : 일본 동경대학 정보이공학계 전자정보학 석사
 2014년 6월~현재 : KAIST KI IT 융합연구소 통신에너지팀 연구원

<관심분야> 5세대 이동통신 기술, Massive array antenna

김 효 지 (Hyoji Kim)

2011년 8월 : KAIST 기계공학과 졸업
 2013년 8월 : KAIST 기계공학과 석사
 2014년 8월~현재 : KAIST 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 전자공학, 통신공학

이 주 용 (Ju Yong Lee)



1995년 : KAIST 공학사
 1997년 : KAIST 공학석사
 2003년 : KAIST 공학박사
 2007년 : 삼성전자 네트워크사
 업무 책임연구원
 2009년 : University of Toronto
 Post-doctoral fellow

2010년 : 성균관대학교 연구교수
 현재 : KAIST KI IT 융합연구소 통신에너지팀 팀장
 <관심분야> 5세대 이동통신

조 동 호 (Dong-Ho Cho)



1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업
 1981년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 1985년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 1985년 3월~1987년 2월 : KIST
 통신공학연구실 선임연구원

1987년 3월~1998년 1월 : 경희대학교 전자계산공학과 교수
 1998년 2월~현재 : KAIST 전기 및 전자공학부 교수
 <관심분야> 이동통신, 무선전력전송, 생명정보학