

# 가시선(Line of Sight) 장거리 무선 통신 2×2 다중입출력(MIMO) 채널 에서 공간 다이버시티에 관한 연구

이우용, 김영균<sup>o</sup>

한국전자통신연구원 이동통신연구본부 6G 무선방식연구실, (주)위즈노바<sup>o</sup>

## A Study on Spatial Diversity in Long-distance LOS-2×2 MIMO Channel Environment

Lee Woo Yong and Kim Younggyun<sup>o</sup>

Mobile Communication Research Division, Telecommunication & Media Research Laboratory

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI),

Wiznova, Inc.<sup>o</sup>

wylee@etri.re.kr and ykim@wiznova.com<sup>o</sup>

### 요 약

옥외 가시선(LOS: Line of Sight) 이동통신 환경은 전자파 산란이 거의 없는(Poor Scattering) 채널 이다. 특히 이러한 이동 무선채널 환경에서 50km 이상 장거리로 10Mbps 이상의 고속 통신을 위하여 기존에 채택해 왔던 다중입출력(MIMO) 시스템에서 공간 다중화(Spatial Multiplexing) 방식은 거의 작동하지 않는다. 본 논문은 전자파의 산란 없는 간섭 채널 환경에서 공간 다중화와 공간 다이버시티(Spatial Diversity) 이득을 분석하여 장거리 고속 이동 무선통신 시스템 구현 가능성을 제안하기 위한 사전 연구이다. 본 논문에서는 간섭 채널 환경에서 2×2 가시선 다중입출력 통신 시스템의 공간 다중화와 공간 다이버시티 이득을 분석하고, 10km 이상의 장거리 통신에서 최대 공간 다중화와 공간 다이버시티 이득 달성 가능성을 모의 실험한다.

### I. 서론

공간 다중화는 전자파의 충분한 산란(Rich Scattering)이 있는 실내 무선채널(NLOS: Non Line Of Sight) 환경에서 대용량 통신에 효과적이었다[1, 2]. 그러나 전자파 산란이 거의 없는 옥외 가시선 무선채널환경에서 공간 다중화 이득은 거의 없다[2]. 한편 공간 다이버시티는 전자파 산란이 거의 없는 옥외 가시선 무선채널환경에서 효과적으로 작동할 수 있다[3].

공간 다이버시티 이득을 높이기 위한 방법으로 빔 포밍 기술을 사용할 수 있고, 최근 연구는 안테나 혼련 시간과 관련 오버헤드를 줄이기 위한 계층적 빔 포밍이다[4]. 계층적 빔 탐색의 단점은 넓고 좁은 빔의 비대칭 영역이다. 넓은 빔을 여러 번 전송하면 빔 정렬 지연이 증가하고, 넓은 빔을 전송하는 데 더 많은 전력을 할당하고 좁은 빔을 전송하는 데 더 작은 전력을 할당하려면 전력 증폭기의 넓은 동적 범위가 필요하기 때문에 계층적 빔 검색이 복잡해진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 동일한 위상 편이가 각 아날로그 부배열(Subarray)에 적용된다는 가정하에서, 부배열에 기반한 상호 상관 기반 빔 검색 기법을 제안하고[5], 부분 공간 투영 기반 AoA (Angle of Arrival) 기법을 제안했다[6]. 부배열 기반 방법에서 AoA 검출의 위상 모호성은 추가 혼련 심볼을 통해서, 주파수 영역에서의 후처리로, 잡음 부분 공간 투사 및 반복 갱신으로 해결한다[7].

본 논문에서는 전자파의 산란이 없는 간섭채널 환경에서 2×2 가시선 다중입출력 통신 시스템의 공간 다중화와 공간 다이버시티 이득을 분석하고, 10km 이상의 장거

리 가시선 통신에서 최대 공간 다중화와 공간 다이버시티 이득 달성 가능성을 분석한다.

### II. LOS-2×2 MIMO 채널 공간 다중화와 다이버시티 분석

전자파의 산란 거의 없는 간섭 채널 환경에서  $N$  개의 송신기가  $M$  개의 수신기에 동시 전송하려는 경우, 송신기들은 각 수신기에 간섭을 일으킨다. 송신  $x$  와 수신  $y$  사이의 간섭을 일으키는 관계는 수식(1)과 같이 수신 신호  $y \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  의 영역으로 표현된다.

$$y = Hx + n. \quad (1)$$

여기서,  $H \in \mathbb{C}^{M \times N}$ : 채널 벡터,  $x \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ : 송신신호 벡터,  $n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ : AWGN (additive white Gaussian noise) 잡음이다.

가시선 무선통신시스템에서 다중 송수신안테나를 통하여 데이터를 전송하려는 채널 환경은 그림 1 과 같이 설정이 가능하다.

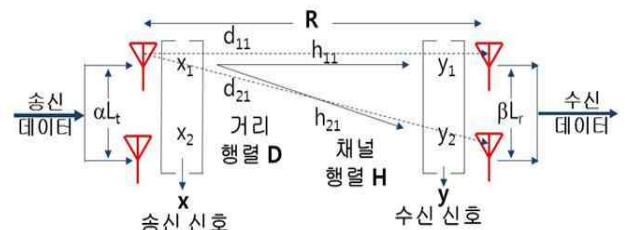


그림 1. 안테나 간격 조정하는 가시선 무선통신시스템에서 송수신안테나 사이의 매개 변수 관계.

여기서  $R$  은 송수신기 사이 거리,  $L_t$ : 송신안테나 이격 거리,  $\alpha > 1$ : 송신안테나 이격 거리 조절 인자,  $L_r$ : 수신안테나

이격 거리, 그리고  $\beta > 1$ : 수신안테나 이격 거리 조절 인자이다. 채널 행렬  $H$  에서  $(m, n)$  번째 복소 채널이득  $h_{mn}$  은 식(2)으로 표현될 수 있다.

$$h_{mn} = \frac{\lambda}{4\pi d_{m,n}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{m,n}} \quad (2)$$

이때  $n$  번째 송신 안테나로부터  $m$  번째 수신안테나까지의 유효 통신거리  $d_{mn}$  는  $\lambda$  가 반송주파수의 파장일 때 다음 (3)으로 표현될 수 있다.

$$d_{mn} \cong R \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{(m-1)\alpha L_T + (n-1)\beta L_T}{R} \right\}^2 \right\} \quad (3)$$

2×2 가시선 다중입출력(LOS-MIMO) 통신시스템의 채널 용량  $C$  은 송신 전력  $E_x$  이고 수신 잡음  $N_0$  이 일 때 다음 수식 (4)와 같다.

$$C = \log_2 \det \left( I_M + \frac{E_x}{NN_0} HH^H \right) \quad (4)$$

여기서 2×2 가시선 다중입출력 채널인 경우,  $HH^H$  는 수식 (5)과 같이 표현될 수 있다.

$$HH^H \cong \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \begin{bmatrix} 2 & 2\cos 2\pi \frac{\alpha^2 L^2}{\lambda R} \\ 2\cos 2\pi \frac{\alpha^2 L^2}{\lambda R} & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

공간 다중화 이득 SMG 은  $SNR \rightarrow \infty$  일 때 다음과 같이 정의된다[3].

$$SMG = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log \det \left( I_M + \frac{SNR}{m} HH^H \right)}{\log SNR} \quad (6)$$

2×2 가시선 다중입출력인 경우, SMG 은 위 식(5)로부터 다음 식(7)으로 간소화 될 수 있다.

$$SMG \cong \log_4 \left\{ 1 - \left( \cos 2\pi \frac{\alpha^2 L^2}{\lambda R} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

공간 다이버시티 이득 SDG 는  $SNR \rightarrow \infty$  일 때 다음과 같이 정의된다[3].

$$SDG = -\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log \left\{ SNR^{-m \left( 1 - \frac{SMG}{\min(m,n)} \right) n \left( 1 - \frac{SMG}{\min(m,n)} \right)} \right\}}{\log SNR} \quad (8)$$

2×2 다중입출력 채널을 고려하면, 식(5)과 식(7)으로부터 SDG 는 수식(9)로 근사할 수 있다.

$$SDG \cong \left[ 2 - \log_4 \left\{ 1 - \left( \cos 2\pi \frac{\alpha^2 L^2}{\lambda R} \right)^2 \right\} \right]^2 \quad (8)$$

### III. 장거리 2×2 LOS MIMO 통신시스템에 대한 공간 다중화와 다이버시티 모의실험

전송거리 최대 10km 이내에서, 반송파 주파수 3GHz( $\lambda=10$ cm), 안테나 이격 거리를  $(\alpha L)^2 = 300$  로 설정한다. 이때 2×2 LOS-MIMO 통신시스템에 대한 공간 다중화 이득에 대한 모의실험 결과는 그림 2 와 같다(채널 용량에 대한 분석은 문헌[2, 8] 참조).

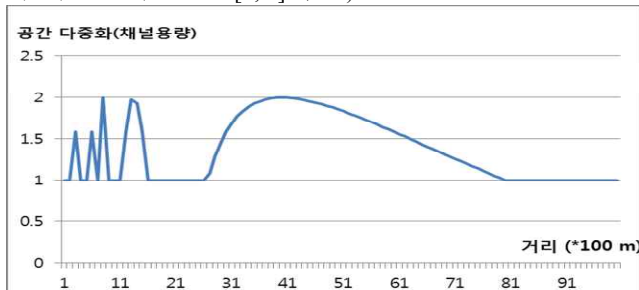


그림 2. 가시선 통신의 거리에 대한 공간 다중화 이득.

모의실험 환경에서 송수신 안테나 이격 거리를  $(\alpha L)^2 = 300$  로 고정했다고 가정한다. 장거리 2×2 LOS-MIMO 통신 시스템에 대한 공간 다중화 이득에 대한 모의실험은 결과가 그림 3 과 같다.

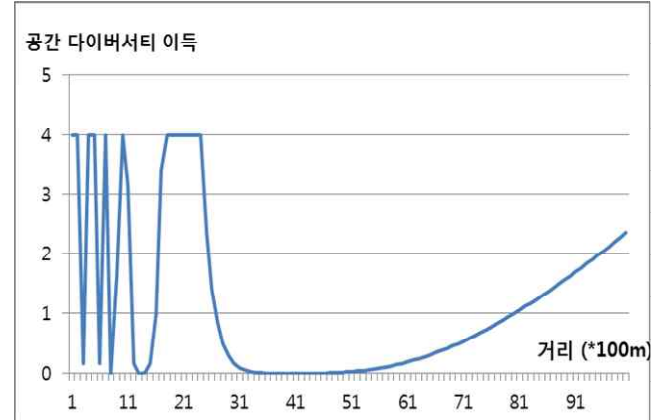


그림 3. 가시선 무선 통신시스템에서 거리에 대한 공간 다이버시티 이득.

### 3. ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다. [No.2021-0626, IoET 를 위한 극한지 통신 및 장비 기술 개발].

### 4. 참고 문헌

- [1] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," Eur. Trans. Telecommun., vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Nov. Dec. 1999.
- [2] 이우용, "LOS 다중입출력 채널 환경에서 극한 채널용량에 관한 연구," 제 17 회 전자정보통신 학술대회, pp. 1-4, 2015 년 12 월.
- [3] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 49, no. 5, pp. 1073-1096, May 2003.
- [4] S. Noh, J. Song, and Y. Sung, "Fast Beam Search and Refinement for Millimeter-Wave Massive MIMO Based on Two-Level Phased Arrays," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 19, no. 10, pp. 6737-6751, Oct. 2020.
- [5] J. Zhang, X. Huang, V. Dyadyuk, and Y. Guo, "Massive hybrid antenna array for millimeter-wave cellular communications," IEEE Wireless Commun., vol. 22, no. 1, pp. 79-87, Feb. 2015.
- [6] F. Shu et al., "Low-complexity and high-resolution DOA estimation for hybrid analog and digital massive MIMO receive array," IEEE Trans. Commun., vol. 66, no. 6, pp. 2487-2501, Jun. 2018.
- [7] C. Qin, J. A. Zhang, X. Huang, and Y. J. Guo, "Virtual-subarray-based angle-of-arrival estimation in analog antenna arrays," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 9, no. 2, pp. 194-197, Feb. 2020.
- [8] 이우용, 권동승, 고영조, "가시선(Line of Sight) 2×2 다중입출력(MIMO) 지능형 재구성 채널 환경에서 채널 용량에 관한 연구," 제 31 회 통신정보 합동학술대회, pp. 245-246, 2021 년 4 월.