

위성 통신 시스템에서의 거대 다중 입출력 다중 스트림 전송

김성현, 김건주, 이경재
국립한밭대학교 전자공학과

lbkim0410@naver.com, golho2006@naver.com, kyoungjae@hanbat.ac.kr

Massive MIMO Multi-stream Transmission in Satellite Communication Systems

Seonghyun Kim, Kunju Kim, Kyoung-Jae Lee
Hanbat National University

요약

본 논문은 다중 사용자가 존재하는 위성 통신 시스템에서 다중 스트림을 전송할 때 스펙트럼 효율을 분석하였다. 레일리 페이딩 채널모델과 ITU-R P.681 문서에서 제시한 채널모델을 사용하였으며, 최대비율결합(MRC) 및 간섭제거빔포밍(ZF) 송수신기 필터를 사용했을 때 스펙트럼 효율을 비교 분석하였다.

I. 연구 배경

5G 이후의 무선통신 시스템을 위한 연구를 위해 대규모 다중 입출력 통신시스템(massive MIMO, mMIMO)과 저궤도 위성을 이용한 통신 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. mMIMO 에서 기지국(BS)은 여러 사용자에게 서비스를 제공하기 위해 다중 안테나를 가지고 있다. 이는 신호의 간섭을 줄이고 다이버시티 이득 및 멀티플렉싱 이득으로 인해 높은 데이터 속도를 제공한다 [1]. 위성 통신 시스템은 지상 통신 네트워크를 보완하고 확장하기 위해 원활한 커버리지를 제공하며, 지속적인 표준화 논의를 통해 5G 및 그 이후 세대의 네트워크에서 사용될 것으로 예상된다 [2].

본 논문에서는 이러한 흐름에 맞춰 저궤도 위성이 존재하는 다중 사용자 다중 입출력 안테나 시스템에서 최대비율결합(MRC) 및 간섭제거빔포밍(ZF)을 적용했을 때의 스펙트럼 효율을 비교 분석한다.

II. 시스템 모델링 및 시뮬레이션 결과

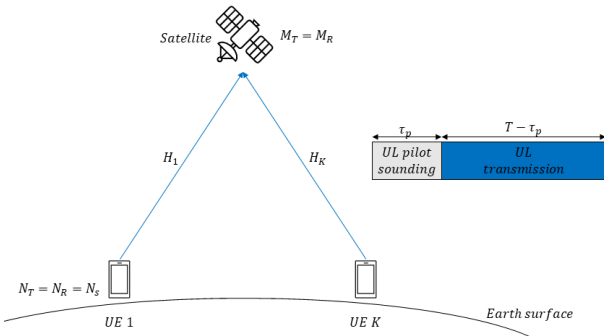


그림 1. 제안된 시스템 모델의 상향링크 전송

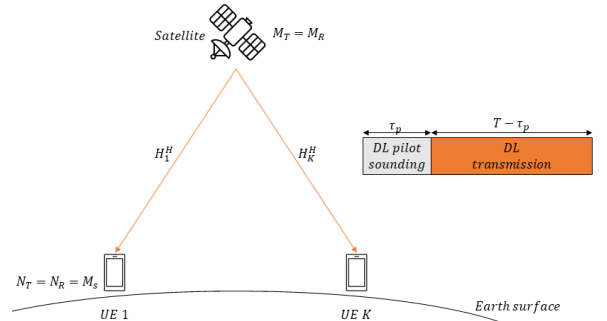


그림 2. 제안된 시스템 모델의 하향링크 전송

그림 1 과 그림 2 는 제안된 시스템 모델에서의 상향링크 및 하향링크 전송을 보여준다. 송수신은 시간 분할 이중통신(TDD)로 동작한다. $N_R = N_T$ 개의 동일한 송수신안테나를 가진 K 명의 사용자는 저궤도 위성으로 $N_S = N_T$ 개의 다중 스트림을 전송한다. 반대로, $M_R = M_T$ 개의 동일한 송수신 안테나를 가진 위성은 K 명의 사용자에게 $M_T = M_S$ 개의 다중 스트림을 전송한다. 이 때, 위성의 수신신호와 l 번째 사용자의 수신신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}^b = \sqrt{p^s} \mathbf{W}^b \mathbf{H} \mathbf{x}^s + \mathbf{W}^b \mathbf{n}^b.$$

$$\mathbf{y}_l^s = \sqrt{p^b} \mathbf{H}_l^H \mathbf{W}_l^s \mathbf{x}_l^b + \sqrt{p^s} \sum_{k \neq l} \mathbf{H}_k^H \mathbf{W}_k^s \mathbf{x}_k^s + \mathbf{n}_l^s.$$

여기서 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_K]$ 는 채널, \mathbf{x}^s 는 사용자의 송신 심볼, \mathbf{x}_l^b 는 l 번째 사용자의 송신 심볼, p^s 와 p^b 는 전송 전력, \mathbf{n}^b 와 \mathbf{n}_l^s 는 각각 위성과 l 번째 사용자의 잡음이다. 이때, 송신 및 수신 필터는 다음과 같다.

$$\mathbf{W}^b = \begin{cases} (\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-1} \hat{\mathbf{H}}^H, & \text{for ZF} \\ \hat{\mathbf{H}}^H, & \text{for MRC} \end{cases}$$

$$\mathbf{W}_l^s = \begin{cases} \hat{\mathbf{H}}_l (\hat{\mathbf{H}}_l^H \hat{\mathbf{H}}_l)^{-1}, & \text{for ZF} \\ \hat{\mathbf{H}}_l, & \text{for MRC} \end{cases}$$

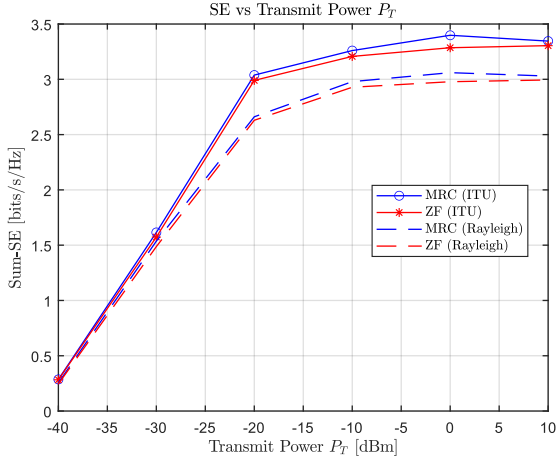


그림 3. 전송 전력에 따른 스펙트럼 효율

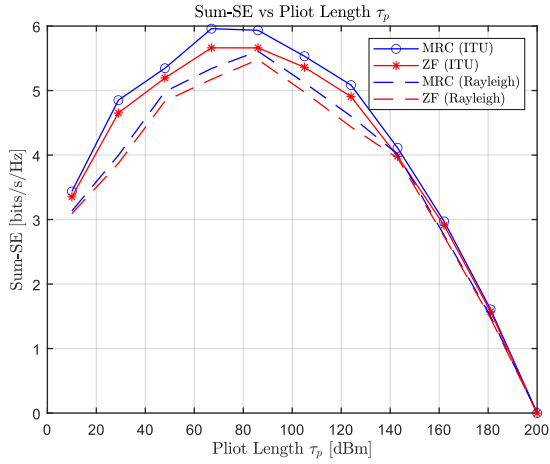


그림 4. 파일럿 길이에 따른 스펙트럼 효율

그 다음, 상향링크와 하향링크의 스펙트럼 효율을 구하면 다음과 같다.

$$R = \frac{T - \tau_p}{T} \log_2 \left(1 + \frac{A_{l,n}^b}{B_{l,n}^b + C_{l,n}^b + D_{l,n}^b + E_{l,n}^b} \right).$$

여기서, T 는 상향시간, $\tau_p = KM_s = KN_s$ 는 파일럿 길이, $A_{l,n}^b = p^s |\mathbb{E}\{\mathbf{w}_{l,n}^b \mathbf{h}_{l,n}\}|^2$, $B_{l,n}^b = p^s \text{Var}(\mathbf{w}_{l,n}^b \mathbf{h}_{l,n})$, $C_{l,n}^b = p^s \sum_{n' \neq n}^{N_s} \mathbb{E}\{|\mathbf{w}_{l,n}^b \mathbf{h}_{l,n'}|^2\}$, $D_{l,n}^b = p^s \sum_{k' \neq l}^K \sum_{n'=1}^{N_s} \mathbb{E}\{|\mathbf{w}_{l,n}^b \mathbf{h}_{k',n'}|^2\}$, $E_{l,n}^b = \mathbb{E}\{|\mathbf{w}_{l,n}^b \mathbf{n}^b|^2\}$, $\mathbf{h}_{l,n}$ 은 \mathbf{H}_l 의 n 번째 열 벡터, $\mathbf{w}_{l,n}^b$ 은 \mathbf{W}_l^b 의 n 번째 열 벡터이다.

그림 3은 사용자 수가 2명이고 송수신 안테나 개수가 $N_s = M_s = N_T = N_R = 5$ 개, $M_R = M_T = 100$ 개 일 때, MRC와 ZF을 적용했을 때의 전송 전력에 따른 스펙트럼 효율을 보여준다. 모든 전송 전력에 대해 MRC를 적용했을 때의 성능이 ZF을 적용했을 때 보다 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, ITU에서 권고한 채널모델이 레일리 페이딩 채널모델보다 더 높은 성능을 보이는 데, 이는 LOS가 존재하는 위성통신의 경우를 고려한 ITU R P.681 채널모델이 더욱 적합하다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 파일럿 길이에 따른 스펙트럼 효율을 보여준다. 파일럿 길이가 낮은 구간에서는 스펙트럼 효율이 증가하지만, 증가하면 증가할 수록 효율이 감소한다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 사용자가 존재하는 위성 통신 시스템에서, 다중 스트림을 전송할 때 MRC와 ZF을 적용한 시스템에서의 스펙트럼 효율을 분석하였다. 이를 확장하여 최적의 안테나 개수를 찾는 알고리즘, 스펙트럼 효율의 닫힌 형태의 해를 제안할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement (KRIT) grant funded by the Korea government (DAPA(Defense Acquisition Program Administration)) (No. 21-106-A00-007, Space-Layer Intelligent Communication Network Laboratory, 2022), and in part by the MSIT (Ministry of Science and ICT), Korea, under the ICAN (ICT Challenge and Advanced Network of HRD) program (IITP-2024-RS-2022-00156212) supervised by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

참고 문헌

- [1] Antwi-Boasiako, Bridget Durowaa, et al. "Multi-Stream Transmission in Massive MIMO Systems with Full-Duplex Bi-Directional Communication Links." IEEE Transactions on Vehicular Technology (2023).
- [2] You, Li, et al. "Massive MIMO transmission for LEO satellite communications." IEEE Journal on Selected Areas in Communications 38.8 (2020): 1851-1865.
- [3] Recommendation ITU-R P.681-10, "Propagation data required for the design of earth-space land mobile telecommunication systems", Dec. 2017.
- [4] Loo, Chun. "A statistical model for a land mobile satellite link." IEEE transactions on vehicular technology 34.3 (1985): 122-127.
- [5] Ngo, Hien Quoc, et al. "Multipair full-duplex relaying with massive arrays and linear processing." IEEE Journal on Selected Areas in Communications 32.9 (2014): 1721-1737.