

Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) 기반 위성 통신 시스템 성능 연구

정민채

세종대학교 전자정보통신공학과

mcjung@sejong.ac.kr

Performance Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) Assisted Satellite Communications

Minchae Jung

Department of Electronics and Information Engineering, Sejong University

요 약

본 논문에서는 재구성 가능한 지능형 반사 표면 (RIS: reconfigurable intelligent surface) 기반의 위성 통신 시스템에 대해서 연구한다. 특히, RIS 를 탑재한 unmanned aerial vehicle (UAV)가 위성으로부터의 신호를 반사하여 지상에 위치한 사용자에게 신호를 전달하는 시스템 환경을 고려한다. 본 논문에서는 점근적으로 최적의 성능을 달성할 수 있는 RIS 에서의 수동 빔포밍 방법을 제안하고 이때의 capacity 에 대해서 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통해 분석 결과는 RIS 기반 위성 통신 시스템의 성능을 정확하고 분석적으로 예측할 수 있음을 보여주며, 제안된 기술의 점근적 최적성을 확인한다.

I. 서 론

수많은 수동 반사 요소들의 신호 반사 효과를 결합한 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)은 미래 무선 네트워크를 위한 스펙트럼과 에너지 효율을 향상시키는 중요한 기술로 부상했다 [1]-[4]. RIS 는 추가적인 에너지를 소비하지 않고 입사된 신호파를 지능적으로 재구성하고 원하는 대상에 반사할 수 있는 특징을 가지고 있다 [1]-[4]. 에너지 효율적인 RIS 는 배터리에 제한이 있는 unmanned aerial vehicle (UAV)에 효율적으로 배치될 수 있으며, 결과적으로 위성 통신에서 지상과 네트워크에 접근할 수 없는 영역에 대한 커버리지 확보와 성능 향상에 기여할 수 있다.

RIS 가 장착된 UAV 의 활용은 최근 몇 년 동안 많은 관심을 받아오고 있다. 대부분의 UAV 는 배터리가 제한되어 있기 때문에 네트워크에서 지속적으로 동작하기 위해서는 에너지 효율적으로 작동해야 한다 [4]. RIS 가 장착된 UAV 를 배치하여 기존 위성 통신 시스템을 보완하고 접근 불가능한 지상/비지상 영역을 커버하면서 동시에 데이터 요구사항의 급격한 증가를 충족하기 위한 추가 용량을 제공함으로써 잠재적으로 네트워크 용량을 향상시킬 수 있다 [5]. 본 논문에서는 이러한 위성 통신 환경에서 점근적으로 최적의 성능을 달성할 수 있는 수동 빔포밍 방법을 제안하고 이때의 capacity 에 대해서 분석한다.

II. RIS 기반 위성 통신 시스템

그림 1 과 같이 1 개의 earth station (ES)이 위성을 이용하여 단일 안테나를 가지고 있는 K 명의 사용자에게 신호를 전송하는 환경을 고려한다. 각 사용자들은 RIS 가 부착된 UAV로부터 반사된 신호를 수신하며, 각 RIS 는 N 개의 reflecting element 를 가지고 있다고 가정한다. Multibeam 기반의 위성 통신 시스템은 spectral efficiency 를 향상시키기 위해 빔 공간의 격리 특성과 자원 할당의 이점을 활용할 수 있다 [6]. UAV 의 위치에

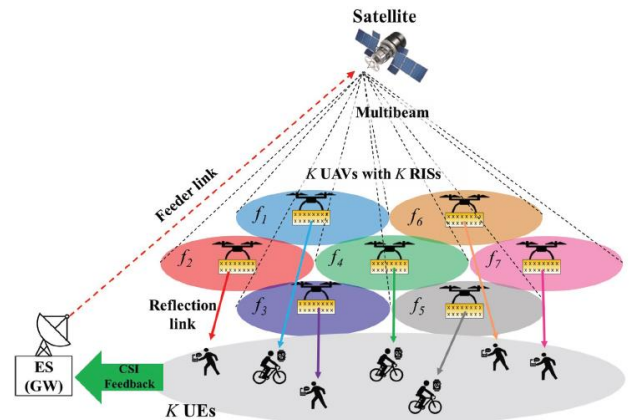


그림 1. 고려하는 RIS 기반 위성 통신 시스템 모델

따라서 서로 멀리 위치한 UAV 들은 빔 공간 격리로 인한 빔 간섭을 받지 않는 반면 유사한 위치를 갖는 UAV 들은 빔간 간섭으로 인해 성능이 저하될 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 우리는 ES 가 그림 1 과 같이 동적 스펙트럼과 전력 할당을 지원하는 자원 할당 접근법을 사용하여 유사한 위치를 가진 UAV 들 사이에 직교 자원을 할당한다고 가정한다 [7]. 결과적으로, 고려하는 multibeam 위성 통신 시스템은 빔간 간섭이 없는 환경으로 구성될 수 있다. 이 때, k 번째 사용자의 수신 capacity 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_k = \log \left(1 + \rho_k \xi_k^2 a_k |c_k| \left| \sum_{n=1}^N f_{k,n}^* e^{j\theta_{k,n}} \right|^2 \right) \quad (1)$$

여기서 ρ_k 는 전송 signal-to-noise ratio (SNR)이며 ξ_k 와 a_k 는 path loss 와 beam pattern 의 효과에 따른 coefficient 를 의미한다. 또한 $|c_k| \sim L^2 N(\mu_0, \sigma_0^2)$ 는 double log-normal rain fading 채널 이득을 의미하며 $f_{k,n}$ 는 k 번째 사용자와 n 번째 RIS element 사이의 채널, $\theta_{k,n}$ 는 k 번째

Parameter	Value
Orbit (d_k)	GEO (35786 Km)
Carrier frequency	18 GHz
Number of beams (K)	7
Bandwidth per beam	50 MHz
Transmission power (P_k)	20 dBW
Maximum beam gain (G_{\max})	9.5 dB
Boltsman's constant	1.38×10^{-23} J/m
Noise temperature at UE	207 K
Half-power beam angle (ϕ_{3dB})	0.4
RIS element spacing	$\lambda/2$
Average rain attenuation	3 dB ($\mu_k = 0.6, \sigma_k = 1$)

그림 2. 실험 환경

RIS의 n 번째 reflecting element에서의 phase shift를 의미한다. 여기서 ES는 global navigation satellite system을 이용하여 UAV와 UE의 3차원 위치를 알 수 있다 [8]. 따라서 ES는 두 개체 사이의 거리 정보를 통해 $f_{k,n}$ 의 line-of-sight 성분인 $\bar{f}_{k,n}$ 를 예측할 수 있다. 따라서 ES에서는 해당 채널 정보를 기반으로 RIS의 위상 천이를 다음과 같이 조절할 수 있다.

$$\theta_{k,n} = -\angle \bar{f}_{k,n}^* \quad (2)$$

이 때, capacity와 ergodic sum capacity는 다음과 같이 점근적으로 분석될 수 있다.

$$R_k \approx \log \left(N^2 \rho_k \xi_k^2 a_k |c_k|^2 \frac{\kappa_k}{\kappa_k + 1} \right) \quad (3)$$

$$E[R] \approx \frac{2K}{\ln 2} \left(\ln N + e^{\mu_0 + \frac{\sigma_0^2}{2}} \right) + \sum_{k=1}^K \log \left(\rho_k \xi_k^2 a_k \frac{\kappa_k}{\kappa_k + 1} \right) \quad (4)$$

여기서 κ_k 는 k 번째 RIS와 k 번째 사용자 사이의 Rician factor를 의미한다. 식 (3)과 (4)를 통해 k 번째 사용자는 N^2 에 비례한 SNR을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 식 (2)를 통해 RIS의 위상 천이를 적용할 경우 asymptotic optimality를 얻을 수 있다.

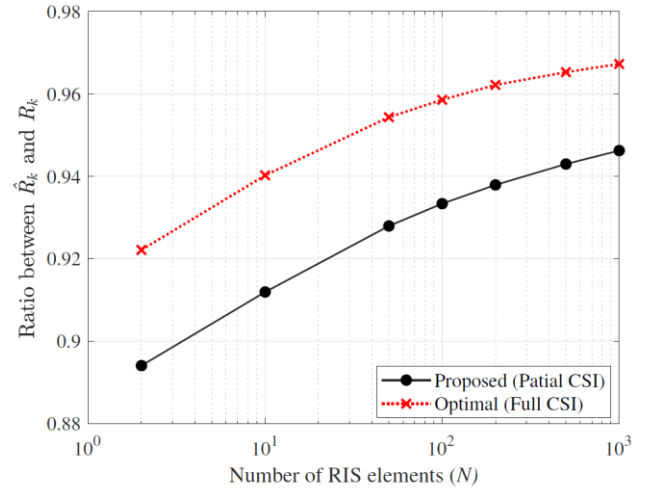
III. 실험 결과

본 실험에서는 그림 2와 같은 실험 환경을 고려하였다. 한 개의 multibeam GEO 위성이 7개의 multibeam을 통해 신호를 전송하고, 7개의 RIS가 부착된 UAV가 신호를 각각 반사하여 7명의 사용자에게 신호를 전달하는 환경을 고려하였다. 즉, single feed per beam을 고려하여 빔별로 한 개의 UAV 및 한 명의 사용자가 할당된 상황을 고려하였다.

그림 3은 제안하는 방법과 최적의 phase shift를 적용하였을 경우에 대한 성능 비교 결과를 보여준다. N 값이 증가함에 따라 제안하는 기술이 최적 성능에 수렴함을 확인할 수 있으며 이를 통해 asymptotic optimality를 검증할 수 있다. 또한, 식 (4)에서 유도한 ergodic capacity는 실험을 통해 도출된 실제 capacity와 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 점근적으로 최적의 성능을 달성할 수 있는 RIS에서의 수동 빔포밍 방법을 제안하고 이때의

그림 3. N 에 따른 제안 기법의 성능 비교 결과

ergodic capacity에 대해서 분석하였다. 제안 방법은 RIS 기반 위성 통신 시스템에서 채널 정보에 대한 오버헤드와 피드백 양을 크게 줄이면서 동시에 asymptotic optimality를 얻을 수 있는 방법으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R1C1C1012950).

참고 문헌

- [1] M. Jung, W. Saad, M. Debbah, and C. Hong, "On the Optimality of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs): Passive Beamforming, Modulation, and Resource Allocation," IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 69, no. 5, May 2021.
- [2] M. Jung, W. Saad, and G. Kong, "Performance Analysis of Active Large Intelligent Surfaces (LISs): Uplink Spectral Efficiency and Pilot Training," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 5, pp. 3379-3394, May 2021.
- [3] M. Jung, W. Saad, Y. Jang, G. Kong, and S. Choi, "Performance Analysis of Large Intelligent Surfaces (LISs): Asymptotic Data Rate and Channel Hardening Effects," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 2052-2065, Mar. 2020.
- [4] J. He, H. Wymeersch, and M. Juntti, "Leveraging location information for RIS-aided mmWave MIMO communications," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 7, pp. 1380-1384, Jul 2021.
- [5] Q. Zhang, W. Saad, M. Bennis, X. Lu, M. Debbah, and W. Zuo, "Predictive deployment of UAV base stations in wireless networks: Machine learning meets contract theory," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 1, pp. 637-652, 2021.
- [6] M. Jia, X. Zhang, X. Gu, Q. Guo, Y. Li, and P. Lin, "Interbeam interference constrained resource allocation for shared spectrum multibeam satellite communication systems," IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 4, pp. 6052-6059, 2019.
- [7] M. Jia, X. Gu, Q. Guo, W. Xiang, and N. Zhang, "Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5G," IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 6, pp. 96-106, 2016.
- [8] I. Ahmad, K. D. Nguyen, N. Letzepis, G. Lechner, and V. Jorroughi, "Zero-forcing precoding with partial CSI in multibeam high throughput satellite systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 2, pp. 1410-1420, 2021.