

RIS 기반 멀티 빔 위성 통신 시스템에서 위성간 및 빔간 간섭을 고려한 RIS 위상 행렬 설계

정홍재, 정민채*

세종대학교 정보통신공학과, 세종대학교 지능정보융합학과*

xswi000@sju.ac.kr, mcjung@sejong.ac.kr*

RIS-Aided Multibeam Satellite Communication Systems: Phase Shift Matrix Design under Inter-Satellite and Inter-Beam Interference

Hongjae Jeong and Minchae Jung*

Department of Information and Communications Engineering, Sejong University
Department of Artificial Intelligence and Information Technology, Sejong University*

요 약

본 논문에서는 reconfigurable intelligent surface(RIS)를 활용하여 위성-공중-지상 통합 네트워크에서 발생하는 위성 간 및 빔 간 간섭을 완화하기 위한 반사 벡터 최적화 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 각 위성-RIS-사용자 링크의 채널 벡터를 기하학적으로 해석하여 수신단 성능을 최대화하는 RIS 위상 행렬을 효율적으로 도출할 수 있다. 또한, 전역 탐색 방식 대비 낮은 복잡도로 동등한 성능을 달성함을 이론적으로 분석하였고, 이를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이를 통해 RIS의 최적 위상 제어가 차세대 위성-공중-지상 통합 네트워크의 간섭 관리에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

I. 서 론

최근에 위성-지상 단말 간의 링크에서 발생하는 차폐 및 shadowing 문제를 완화하기 위해, reconfigurable intelligent surface(RIS)를 부착한 무인기를 활용하는 위성-공중-지상 통신 구조가 제안되었다 [1]. RIS는 외부 전력 소모 없이 반사 소자의 위상을 조절하여 원하는 방향으로 신호를 재구성할 수 있지만, 신호 증폭 과정에서 inter-satellite interference(ISI) 뿐 아니라 inter-beam interference(IBI) 역시 함께 증폭될 수 있다. 이에 본 논문에서는 RIS가 적용된 위성-공중-지상 통합 네트워크에서 ISI와 IBI가 동시에 존재할 때, signal-to-interference-plus-noise ratio(SINR)를 최대화할 수 있도록 새로운 기하학적 최적화 방법을 활용한 최적 RIS 반사 벡터 설계 방안을 제안한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 타겟 위성-간섭 위성으로 구성된 환경을 고려하며, 타겟 위성은 두 개의 빔을 이용하는 멀티 빔 구조, 간섭 위성은 단일 빔 구조로 동작한다고 가정한다. 통신 성능 향상을 위해 두 대의 무인기가 공중에 배치되고 각 UAV에는 M 개의 반사소자로 구성된 RIS가 탑재된다. RIS는 gateway(GW)를 통해 중앙 집중적으로 제어되며, 이를 통해 위성과 user terminal(UT) 간 간섭 링크가 형성된다. 본 논문에서 GW와 위성 간의 feeder link는 충분한 대역폭과 안정적 링크 품질을 갖는 이상적 채널로 가정한다.

위성-UAV 간 링크는 path-loss, shadowing, 위성-UAV 간의 빔 패턴을 포함하며 채널벡터 \mathbf{h}_T 는 다음과 같이 표현된다[2].

$$\mathbf{h}_T = \lambda \frac{\sqrt{G_T G_R}}{4\pi d_T} \mathbf{f}_T. \quad (1)$$

여기에서 λ 는 반송파의 파장, d_T 는 위성과 UAV 간 거리, G_T 는 위성과 UAV 간의 빔 패턴, G_R 는 수신 안테나 방사 패턴, \mathbf{f}_T 는 위성으로부터의 shadowing 및 small-

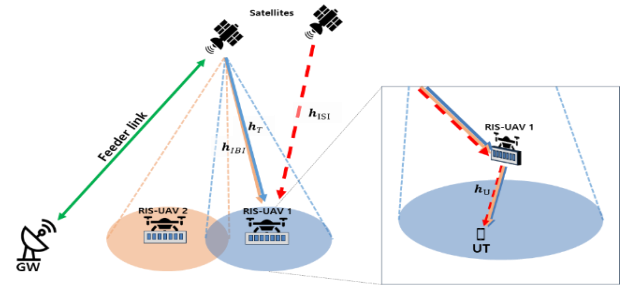


그림 1. 고려하는 위성-공중-지상 통합 시스템 모델

scale fading을 나타낸다. 이때 타겟 위성-과 UAV 간의 빔 패턴 G_T 는 다음과 같이 표현된다[2].

$$G_T = G_{max} \left(\frac{J_1(u_T)}{2u_T} + 36 \frac{J_3(u_T)}{u_T^3} \right)^2. \quad (2)$$

여기에서 $u_T = 2.07123 \frac{\sin \theta_T}{\sin \theta_{3dB}}$ 이고 θ_T 는 빔의 중심과 타겟 UAV 간의 각도를 나타내며 θ_{3dB} 는 빔의 3-dB 각도를 의미한다. 또한, 간섭 빔의 채널 \mathbf{h}_B 와 간섭 위성의 채널 \mathbf{h}_S 도 (1)과 동일한 형태로 정의될 수 있다. 그리고 UAV와 UT 간 채널벡터 \mathbf{h}_U 는 다음과 같이 표현될 수 있다[2].

$$\mathbf{h}_U = \sqrt{PL} \mathbf{f}_U. \quad (3)$$

여기에서 PL 는 path-loss 성분을 의미하며, \mathbf{f}_U 를 통해 Rician fading이 적용된 채널을 가정한다. 따라서 위성에서 UT까지의 채널은 $\mathbf{h}_{k,U} = \mathbf{h}_k \mathbf{h}_U$, $k \in \{T, B, S\}$ 와 같이 표현될 수 있다. 위 (1)-(3) 수식을 통해 UT에서의 수신 신호 \mathbf{y} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{\gamma_D}{2}} \mathbf{h}_{T,U} \boldsymbol{\varphi} x_T + \sqrt{\frac{\gamma_B}{2}} \mathbf{h}_{B,U} \boldsymbol{\varphi} x_B + \sqrt{\frac{\gamma_S}{2}} \mathbf{h}_{S,U} \boldsymbol{\varphi} x_S + \mathbf{n}. \quad (4)$$

여기에서 γ_D, γ_S 는 각 위성의 송신 SNR, x_T 는 목표 신호, x_B, x_S 는 간섭신호, \mathbf{n} 은 분산이 1인 백색 Gaussian 잡음을 의미한다. 또한 $\boldsymbol{\varphi}$ 는 $\|\boldsymbol{\varphi}\|^2 = M$ 를 만족하는 RIS에서의 반사 벡터를 의미한다. 따라서, (4)를 통해 UT에서의 수신 SINR은 다음과 같이 표현될 수 있다.

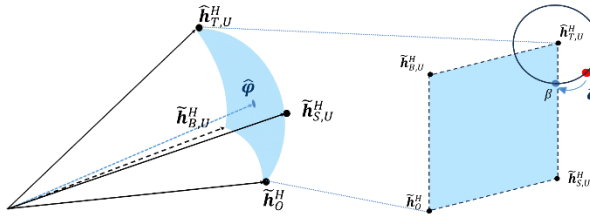


그림 2. 구면 사각뿔과 $\hat{\phi}$ 의 존재영역에 대한 기하학적 분석

$$\text{SINR} = \frac{\frac{\gamma_D}{2} M \|\mathbf{h}_{T,U}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H \hat{\phi}|^2}{\frac{\gamma_D}{2} M \|\mathbf{h}_{B,U}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H \hat{\phi}|^2 + \gamma_S M \|\mathbf{h}_{S,U}\|^2 |\hat{\mathbf{h}}_{S,U}^H \hat{\phi}|^2 + 1}. \quad (5)$$

여기에서 $\hat{\mathbf{h}}_{T,U}$, $\hat{\mathbf{h}}_{B,U}$, $\hat{\mathbf{h}}_{S,U}$, $\hat{\phi}$ 는 각각 $\mathbf{h}_{T,U}$, $\mathbf{h}_{B,U}$, $\mathbf{h}_{S,U}$, ϕ 의 벡터 크기를 1로 정규화 한 정규 벡터이다.

SINR을 최대화하기 위해서는 반사 벡터 $\hat{\phi}$ 가 IBI 또는 ISI를 최소화하거나 타겟 채널 이득을 최대화해야 한다. $\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H$ 는 $\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H$ 영공간에 위치한 벡터라고 할 때, IBI를 제거하면서 채널이득 최대화하기 위해 $\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H$ 는 $\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H$ 와 $\hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H$ 가 span하는 평면 상에 위치해야 하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{h}}_{B,U}^H = \frac{\hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H - (\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H \hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H) \hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H}{\|\hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H - (\hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H \hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H) \hat{\mathbf{h}}_{B,U}^H\|}. \quad (6)$$

$\tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H$ 의 영공간에 존재하는 벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H$ 또한 위와 같은 방법으로 정의할 수 있다. ISI와 IBI를 동시에 제거하는 벡터를 $\tilde{\mathbf{h}}_O^H$ 라고 정의할 때, 그림 2는 최적 $\hat{\phi}$ 가 벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_{T,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_{B,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_O^H$ 간 형성하고 있는 구면 사각뿔 영역 내에 존재함을 보여준다. 만약 그림 2와 같이 $\hat{\phi}$ 가 구면 사각뿔의 외부 지점 α 에 존재할 경우, $\hat{\mathbf{h}}_{T,U}^H$ 와 동일한 각도를 유지하면서 동시에 $\tilde{\mathbf{h}}_{B,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_O^H$ 모두와 각도가 더 작은 또 다른 지점 β 는 필연적으로 존재하게 된다. 따라서 α 는 최적 벡터가 될 수 없고 최적 $\hat{\phi}$ 는 네 벡터가 정의하는 구면 사각뿔의 영역 내에 존재함을 기하학적으로 입증할 수 있다. 따라서, 최적의 반사 벡터 $\hat{\phi}$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{\phi} = \frac{t_1 \tilde{\mathbf{h}}_{T,U}^H + t_2 \tilde{\mathbf{h}}_{B,U}^H + t_3 \tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H + t_4 \tilde{\mathbf{h}}_O^H}{\|t_1 \tilde{\mathbf{h}}_{T,U}^H + t_2 \tilde{\mathbf{h}}_{B,U}^H + t_3 \tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H + t_4 \tilde{\mathbf{h}}_O^H\|}, t_k \geq 0. \quad (7)$$

여기에서 t_1, t_2, t_3, t_4 는 네 벡터에 대한 가중치를 의미한다. 이때, 최적 반사 벡터 ϕ^* 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi^* = \max_{t_k \geq 0} \text{SINR}(\hat{\phi}). \quad (8)$$

(8)은 비선형 문제이기 때문에 닫힌 해를 구하기 어렵고, M 이 증가할수록 벡터 차원이 확장되기 때문에 전수 조사의 계산 복잡도가 급격히 증가한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 탐색 범위를 축소함으로써 계산 복잡도를 크게 줄일 수 있기 때문에 다수의 반사 소자를 사용하는 RIS 환경에서 효과적이다. 따라서 [2]와 같이 큰 수의 RIS 소자를 고려하는 RIS 기반 위성통신 환경에서 제안하는 기법은 낮은 복잡도를 보이면서 전수 조사에 수렴하는 성능을 보일 수 있는 장점이 있다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 IBI와 ISI가 공존하는 멀티 빔 저궤도 위성 통신 환경을 고려하여, 반사 소자 수에 따른 평균 용량의 변화를 분석하였다. 시뮬레이션은 2개의 빔을 사용하는 타겟 위성과 단일 빔을 사용하는 간섭 위성, 그리고 M 개의 반사 소자를 탑재한 UAV 및 단일 UT를 가정하였다. 또한, 목표 위성과 간섭 위성의 송신 전력은 각각 70, 67 dB로 설정하였다. 나머지 시뮬레이션 파라미터는 [2]에서 고려한 설정 값을 사용하였다.

그림 3은 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 보여준다. 그림에서 “Proposed”는 (7)과 (8)을 기반으로 도출

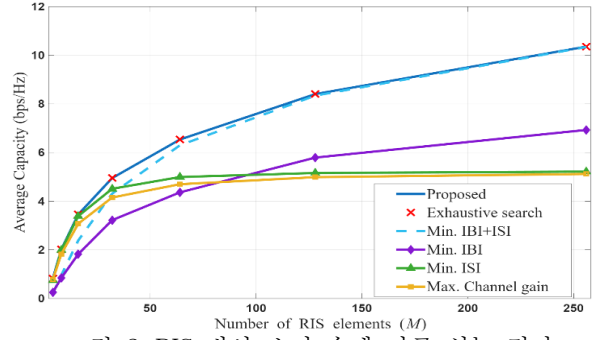


그림 3. RIS 반사 소자 수에 따른 성능 결과

된 RIS 반사 벡터가 적용되었을 경우의 결과를 나타내며, “Exhaustive search”는 전체 탐색 영역에서 전수조사를 통해 최적 반사 벡터를 찾은 결과를 나타낸다. 또한 “Min. IBI + ISI”, “Min. IBI”, “Min. ISI”, “Max. Channel gain”은 구면 사각뿔의 기준 벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_O^H, \tilde{\mathbf{h}}_{B,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_{S,U}^H, \tilde{\mathbf{h}}_{T,U}^H$ 와 반사 벡터가 각각 동일할 경우의 성능을 나타낸다.

그림 3에 나타난 바와 같이, 제안하는 방법은 전수 조사의 경우와 동일한 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 제안 기법을 통해 전수 조사에 비해 획기적으로 복잡도를 줄이면서 동일한 성능을 보장할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있다. 또한, 반사 소자의 수가 증가함에 따라 제안하는 최적 반사 벡터와 “Min. IBI + ISI” 벡터의 성능이 수렴함을 확인할 수 있다. 이는 RIS의 반사 소자 수 M 이 증가함에 따라 간섭에 대한 영향이 상대적으로 커지며, 이에 따라 IBI와 ISI를 동시에 최소화하는 것이 성능 향상에 핵심적인 요인으로 작용하기 때문으로 분석된다. 이러한 간섭 제한적인 성능 경향은 간섭 위성과 타겟 위성 간의 거리, 두 위성의 송신 전력, 각 위성의 멀티 빔 개수에 따라 달라질 것으로 예상된다.

VI. 결론

본 논문에서는 RIS 기반의 위성-공중-지상 통합 네트워크 환경에서 기하학적 분석을 통해 최적 RIS 반사 벡터가 존재하는 영역을 규명하였다. 특히, 위성 간 간섭 채널, 동일 위성 내 빔 간 간섭 채널, 그리고 타겟 채널 각각에 대응하는 벡터를 기반으로 구성되는 구면 사각뿔 내에 최적의 RIS 반사 벡터가 존재함을 기하학적으로 증명하였다. 또한, 제안된 방법으로 탐색된 RIS 반사 벡터가 이론적 최적값과 일치하며, 최적 성능을 달성함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 특히, RIS 반사 소자의 수가 많은 환경에서는 ISI와 IBI를 동시에 제거하는 방식이 최적 벡터와 유사한 성능을 보임을 추가적으로 확인하였다. 따라서 제안한 기법은 RIS 반사 소자를 활용하는 위성-공중-지상 통합 네트워크에서 RIS를 효율적으로 운용할 수 있는 실용적인 해법으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2021R1C1C1012950)과 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. RS-2024-00359235, 3GPP 표준 기반 저궤도 군집 위성통신 지상국 핵심기술 개발)

참고 문헌

- [1] K. Guo and M. Wu, "Deep reinforcement learning and NOMA-based multi-objective RIS-assisted IS-UAV-TNs: trajectory optimization and beamforming design," in *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* vol. 24, no. 9, pp. 10197–10210, Sept. 2023.
- [2] H. Son and M. Jung, "Phase shift design for RIS-assisted satellite-aerial-terrestrial integrated network," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 59, no. 6, pp. 9799–9806, Dec. 2023.