

# 위성통신시스템에서 도플러 효과를 활용한 시공간 다중안테나 빔형성 기법에 대한 연구

윤형탁, 박정훈\*  
연세대학교

yht3114@yonsei.ac.kr, \*jhpark@yonsei.ac.kr

## Exploiting the Doppler Effect for Space-Time Adaptive Beamforming in Satellite Communication Systems

Yun Hyeong Tak, Park Jeong Hun\*  
Yonsei Univ.

### 요 약

본 논문은 지상 사용자들이 밀집된 위성통신시스템에서 발생하는 도플러 효과를 재해석하여 전송률을 향상시키는 빔형성 기법을 제안한다. 실제 위성통신에서 LoS (Line-of-Sight) 채널 특성과 송수신기 간의 먼 거리로 인해 공간 다중화를 통해 서비스하는데 막대한 성능 손실을 가진다. 제안하는 기법은 기존의 위성통신시스템에서 성능을 저해하는 요소로 인식되는 도플러 효과를 활용하여 심볼 확장을 통해 시간 영역에서의 사용자 간 분해능을 향상시키고, 결과적으로 사용자가 밀집된 환경에서도 전송률을 확보할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 기존의 제로포싱 (Zero-Forcing, ZF) 및 TDMA (Time-Division Multiple Access) 방식보다 높은 전송률 달성을 확인하였다. 분석 결과는 기존의 대규모 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 로는 서비스가 불가능했던 밀집 사용자에게 대해서도 효과적인 서비스를 가능케하며 위성통신 상용화의 토대를 마련한다.

### I. 서 론

위성통신은 지리적 제약 없이 넓은 커버리지를 제공하는 이점 때문에 차세대 무선 통신 기술로 각광받고 있다.[1] 그러나 위성통신이 가진 특성들로 인해 상용화에 기술적 과제가 존재한다. 첫번째로, 위성과 지상 사용자 간의 거리가 멀기 때문에 LoS (Line-of-Sight) 채널 특성을 가지며 이에 대한 커버리지 및 간섭 분석에 대한 많은 연구들이 진행되어왔다.[2]-[4] 특히 지상 사용자들이 상대적으로 밀집되어 공간적 거리가 충분치 않아 사용자 간 채널 사이에 높은 상관도가 형성된다.[5] 이로 인해 위성에 탑재된 송신 안테나 수가 제한된 경우, 공간적인 분해능이 떨어져 각 사용자 간에 간섭을 유발하여 큰 전송률 손실을 발생시킨다. 두번째로, 지상 사용자의 이동성으로 인해 도플러 효과가 발생하며, 이는 Ka 밴드와 Ku 밴드를 주로 사용하는 위성통신에서 도플러 효과로 인한 주파수 이동이 더욱 두드러진다. 이러한 주파수 이동은 신호의 위상을 변화시키며 서브캐리어의 직교성을 무너뜨려 반송파 간 간섭을 일으키는 등의 문제를 야기한다.

본 논문에서는 위성통신에서의 두 가지 문제를 해결하기 위해 성능 손실로 인식되는 도플러 효과를 재해석하여 심볼을 확장하는 기법을 제안한다. 우리는 이 기법을 STAB(Space Time Adaptive Beamforming)이라 하며, 시간 영역에서의 분해능을 향상시켜 사용자 간 간섭을 제어하고 전송률을 극대화하고자 한다. 또한 채널

간 상관도를 분석하여 최적의 전송률을 달성할 수 있는 사용자 이동성을 조사하고, 분해능과 심볼 확장 간의 트레이드 오프 (trade-off) 관계를 규명한다. 이후 시뮬레이션 분석을 통해 제안 기법의 실효성을 입증한다.

### II. 본론

본 논문에서는 위성이  $N$ 개의 균일 선형 배열 안테나를 탑재하고 있으며,  $K$  명의 사용자가 서비스를 받는 다중사용자 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 하향링크 위성통신시스템을 고려한다. 위성 통신에서의 LoS 채널 환경을 고려하면 사용자  $k$ 에 대한 채널  $\mathbf{h}_k$ 가 다음과 같이 모델링 된다.[6]

$$\mathbf{h}_k = \alpha_k e^{j2\pi(v_k - f\tau_k)} \mathbf{a}(\theta_k) \in \mathbb{C}^{N \times 1} \quad (1)$$

여기서  $\alpha_k$ 는 채널 이득,  $v_k$ 는 도플러 효과로 인한 주파수 이동,  $\tau_k$ 는 전파 지연,  $\mathbf{a}(\theta_k)$ 는 공간 배열 응답 벡터를 나타낸다. 단순화를 위해  $\alpha_k = 1$ 을 가정한다. 기존 위성시스템의 경우  $v_k$  값을 GNSS(Global Navigation Satellite System) 데이터를 통해 알아내어 보정하고 제거할 수 있다고 가정한다.

STAB 기법은  $v_k$ 를 제거하지 않고 심볼을 시간 간격  $T_r$ 마다  $M$ 번 반복 전송하여 확장된 채널로 재구성할 수 있다. 아래는  $t_m = mT_r, m = 0, \dots, M-1$ 에서 샘플링 되었을 때, 식 (1)에서 시간 영역으로 확장된 채널을 나타낸다.

$$\bar{\mathbf{h}}_k = \mathbf{b}(\omega_k) \otimes \mathbf{a}(\theta_k) \in \mathbb{C}^{MN \times 1} \quad (2)$$

여기서  $\omega_k = v_k T_r$ 는 시간 간격으로 정규화 된 주파수 이동,  $\mathbf{b}(\omega_k) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는  $\omega_k$ 에 대한 응답 벡터,  $\otimes$ 는

Kronecker 곱을 의미한다. 사용자  $i, j$ 에 대한 채널의 상관도는 아래와 같이 유도된다.

$$\bar{\mathbf{h}}_i \bar{\mathbf{h}}_j^H = \frac{\sin(\pi N(\sin \theta_j - \sin \theta_i))}{\sin(\pi(\sin \theta_j - \sin \theta_i))} \cdot \frac{\sin(\pi M(\omega_j - \omega_i))}{\sin(\pi(\omega_j - \omega_i))} \quad (3)$$

따라서 사용자가 밀집된 경우, 식 (3)의 첫번째 항은 1로 가까워지며, 상관도가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 일반적으로 공간 다중화를 통한 전송률 성능은 상관도와 반비례하기 때문에 제안한 기법을 통해 두번째 항을 생성하여 임의로 상관도를 낮출 수 있으며, 성능 향상으로 이어진다. 이는  $(M \times 1)$  개의 가상 안테나 배열이 생성되어 빔폭을 좁게 만들어 사용자 간의 해상도를 높이는 효과로 해석할 수 있다.

STAB 기법을 통해 확장된 채널을 기반으로 제로포싱 기법을 적용하여 사용자에게 신호를 전송한다. 간단한 예시로 두 사용자에게 대한 수신 신호  $y_1, y_2$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{h}}_1 & \bar{\mathbf{h}}_2 \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 & \mathbf{f}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{n}$ 는 각각 빔포밍 프리코더, 심볼, AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 의미한다.  $\mathbf{f}$ 는 확장된 채널 행렬에 대해 제로포싱 기법을 적용하여 구성된다.

STAB 기법의 실효성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 위성 고도 550km, 위성 고도각 60°, 사용자 간 거리 2.7km, 사용자 간 속도 차이 23km/h, 캐리어 주파수 15GHz, 반복 시간 간격 1ms, 반복 전송 횟수 4, 사용자 수 6, 안테나 수 128로 설정하였다. 사용자는 같은 위성 고도각 상에서 원형 형태로 배치하였으며, 동일한 간격으로 떨어져 있다. 또한 식 (3)에서 보인 채널 간 상관관계를 통해 각 채널이 직교하도록 사용자를 선택하였다.

그림 1은 환경 내 SNR(Signal-to-Noise Ratio)에 따른 합 스펙트럼 효율을 나타낸다. 기존의 제로포싱(ZF) 기법은 채널 행렬의 조건수가 크기 때문에 간섭 신호를 직교 여공간으로 투영할 때 원하는 송신 신호의 진폭이 현저히 감소하여 성능 저하가 발생함을 확인할 수 있다. 특히 SNR이 약 -5 dB 미만인 저 SNR 환경에서는 TDMA 방식이 가장 높은 전송률을 달성하는데, 이는 ZF 프리코딩이 간섭 제거에만 집중한 나머지 신호의 유효 SNR이 크게 저하되는 반면, TDMA는 한 사용자에게 전력을 집중하여 상대적으로 높은 전송률을 확보하기 때문이다. 반면, -5 dB 이상의 환경에서는 STAB 기법이 가장 높은 전송률을 달성한다. STAB 기법은 공간적 해상도가 부족한 ZF와 달리 시간 영역에서 자유도를 부분적으로 희생하여 채널의 직교성을 확보함으로써 전송률을 향상시킨다.

### III. 결론

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO 하향링크 시스템에서 위성통신의 LoS 채널과 사용자 간 높은 공간적 밀집도를 고려한 빔포밍 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 시간 영역에서 심볼을 확장하여 자유도를 일부 희생하는 대신 채널 조건수를 효과적으로 감소시킴으로써 기존의 제로포싱 기법 대비 향상된 합 스펙트럼 효율을 달성하였다. 특히 -5 dB 이상의 구간에서 제안한 STAB 기법이 시간 영역의 자유도와 채널 직교성 간의 균형을 통해 가장 우수한 전송률 성능을 나타냈다.

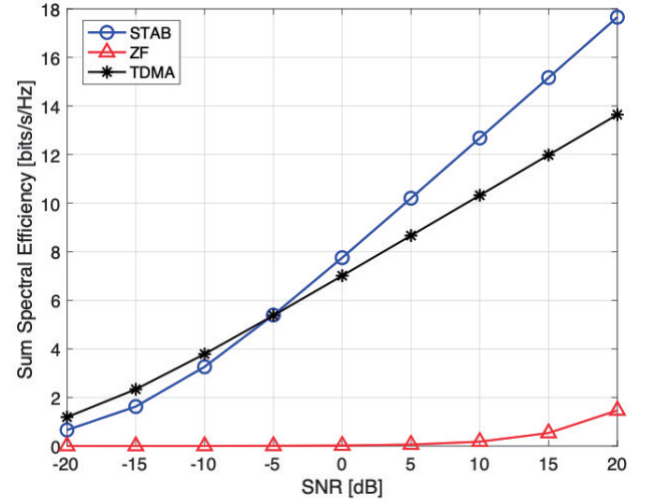


그림 1. SNR에 따른 합 스펙트럼 효율 그래프

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Samsung Research Funding & Incubation Center of Samsung Electronics under Project Number SRFC-IT2402-06.

### 참고 문헌

- [1] J. Heo, S. Sung, H. Lee, I. Hwang and D. Hong, "MIMO Satellite Communication Systems: A Survey From the PHY Layer Perspective," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 25, no. 3, pp. 1543-1570, thirdquarter 2023.
- [2] J. Choi, J. Park, J. Lee, and N. Lee, "Coverage Analysis for Downlink Satellite Networks: Effect of Shadowing," 2023 IEEE International Conference on Communications (ICC).
- [3] J. Park, J. Choi and N. Lee, "A Tractable Approach to Coverage Analysis in Downlink Satellite Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 2, pp. 793-807, Feb. 2023.
- [4] D. Kim, J. Park, and N. Lee, "Coverage Analysis of Dynamic Coordinated Beamforming for LEO Satellite Downlink Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 9, pp. 12239-12255, Sept. 2024.
- [5] S. Kim, J. Choi, W. Shin, N. Lee, and J. Park, "Multibeam satellite communications with massive MIMO: Asymptotic performance analysis and design insights," arXiv preprint arXiv:2407.10461, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.10461>
- [6] L. You, K. -X. Li, J. Wang, X. Gao, X. -G. Xia and B. Ottersten, "Massive MIMO Transmission for LEO Satellite Communications," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 8, pp. 1851-1865, Aug. 2020.