

지상-위성 통합 운용 환경에서의 채널 추정 및 CFO 보정: 분리 설계의 한계와
공동 추정 설계 원칙, 그리고 성능-복잡도 절충 분석
채대명, 김도은, 정수현, 김현찬, 정수민*

금오공과대학교 전자공학부/IT융복합공학과
coeoaud0802@kumoh.ac.kr, *sumin.jeong@kumoh.ac.kr

Channel Estimation and CFO Compensation in Integrated Terrestrial-LEO Networks: Limitations of Separate Design, Principles of Joint Estimation, and Performance-Complexity Trade-off Analysis

Daemyeong Chae, Doeun Kim, Suhyeon Jeong, Hyunchan Kim, Sumin Jeong*

Kumoh National Institute of Technology

요 약

차세대 무선 통신은 초고용량/초저지연/전 지구적 서비스 영역을 동시에 요구하며 이를 위해 지상 영역에서 대규모 다중 안테나와 비지상 영역에서 저궤도 위성망, 두 체계의 동시 접속 기반 통합 운용이 해결책으로 기대받고 있다. 본 논문에서는 통합 운용 성능의 병목을 유발하는 핵심 제약을 채널 추정과 반송파 주파수 오차(CFO)로 규정한다. 아울러 분리 설계의 한계를 지적하고, 파일럿 효율과 추종 응답성을 높이기 위한 공동 채널 - CFO 추정의 설계 원칙과 성능-오버헤드-복잡도 간 정량적 절충 지침을 제시한다.

I. 서론

차세대 무선 통신은 초고용량과 초저지연, 전 지구적 연속 서비스 영역(coverage)을 동시에 요구한다 [1]. 이러한 요구를 충족하기 위한 핵심 기술로 지상 영역의 대규모 다중 안테나(massive MIMO)와 비지상 영역의 저궤도 위성망(LEO)이 각각 주목과 기대를 받는다. 대규모 다중 안테나는 공간 다중화와 정밀한 빔 형성을 통해 동일 자원에서 다수 사용자를 수용하고 간섭을 억제하여 스펙트럼 효율과 에너지 효율을 높이며, 채널 하드닝으로 전송 신뢰도를 향상시킨다. 동시에 사용자 수와 안테나 수, 대역폭이 커질수록 채널 상태 정보 획득에 필요한 파일럿과 연산 부담이 증가하고, 시변 환경에서는 추정값의 유효 시간이 짧아지는 한계를 가진다 [2]. 저궤도 위성망은 낮은 왕복 지연과 광역 커버리지를 제공하여 지상 인프라의 공백을 보완하고 재난 상황에서의 복원력을 높일 수 있다. 반면 빠른 궤도 운동으로 인한 큰 도플러 편이와 잦은 가시성 변화, 빔 전환과 제한된 빔 자원 등 운용 제약이 존재한다 [3].

두 체계의 강점과 약점은 상보적이므로 단순 대체가 아니라 동시 접속을 전제로 한 통합 운용이 필요하다 [4]. 단말은 지상 기지국과 위성 링크에 동시에 접속하고, 네트워크는 두 경로에 대해 공동 스케줄링과 공동 빔 관리, 부하 분산과 경로 결합을 수행한다. 이를 위해 두 링크는 공통 파일럿 구성과 시간 주파수 기준을 공유하며, 시공간 기하가 빠르게 변하는 통합 환경에서 발생하는 잔차 오차를 일관되게 제어해야 한다. 특히 직교 다중 방식에서는 도플러에 기인한 반송파 주파수 오차(CFO)가 부반송파 간 직교성을 약화시켜 간섭을 유발하고, 고차원 채널에서의 추정 오차와 결합될 때 다중 사용자 간섭(MUI)과 프리코딩 성능의 저하를 증폭시킨다. 따라서 본 논문은 통합 운용의 필요성과 이점을 개관하고, 통합 환경에서 성능을 제한하는 핵심 제약으로 채널 추정과 CFO 보정을 규정한다. 아울러 분리 설계의 한계를 검토하고, 파일럿 효율과 추종 응답성을 확보하기 위한 방안으로 공동 채널 및 CFO 추정의 설계 원칙을 정리하며, 시나리오별 운용 파라미터에 따른 성능과 오버헤드와 복잡도 사이의 정량적 절충 관점을 제시한다.

II. 본론

A. Massive MIMO-LEO 통합의 필요성과 시스템적 이점

지상과 위성 체계의 단순한 강점 병렬화로는 통합의 효용을 설명하기 어

렵다. 통합 운용이 제공하는 핵심 이점을 정의하고 그 작동 메커니즘을 다음과 같다 [5]:

- **부하 분산(load balancing) 효과 제공:** 지상 기지국이 혼잡하거나 열악한 전파 환경에 놓일 경우 일부 트래픽을 위성 링크로 분산시킬 수 있으며, 반대로 위성 가시성이 제한된 경우에는 지상망이 우선적으로 사용되어 서비스 품질을 유지한다.
- **서비스 연속성(continuity)을 보장:** 고속 이동 단말이나 재난 상황과 같이 불안정한 네트워크 환경에서 지상망과 위성망 동시 활용으로 연결 단절 확률을 최소화할 수 있다. 또한 위성 링크의 광역 연결은 이동성과 복원력을 제공한다.
- **다중 경로(path diversity)를 활용:** 동일 데이터를 지상망과 위성망을 통해 동시에 전송하거나, 두 경로의 품질을 동적으로 선택/결합함으로써 전송 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다.

지상-위성 통합 운용은 단순히 서비스 영역 확장을 넘어 부하 분산, 서비스 연속성, 경로 다중화라는 구체적 효과를 통해 차세대 통신 요구사항을 실질적으로 뒷받침할 수 있음을 알 수 있다.

B. 성능 제약 요인

- **채널 추정 한계:** 대규모 다중 안테나 기반의 지상 링크에서는 사용자 수와 안테나 수의 증가에 따라 파일럿 자원의 소모와 연산 복잡도가 급격히 커지며, 이로 인해 추정 효율이 저하된다 [6]. 또한 LEO 위성 링크는 빠른 궤도 운동으로 인한 시변 특성이 강해, 추정값의 유효 시간이 짧아지고 잦은 재추정이 요구된다 [7]. 이러한 요인들은 지상과 위성의 이질적 채널 특성이 결합된 통합 환경에서 더욱 두드러지며, 공통 기준을 유지하기 위한 채널 상태 정보의 안정적인 확보를 어렵게 만든다.
- **CFO 보정 한계:** 저궤도 위성의 고속 이동은 큰 도플러 편이를 유발하여 CFO를 발생시키고, 이는 직교 주파수 분할 다중화(OFDM)의 직교성을 약화시킨다. 이로 인해 부반송파 간 간섭이 발생하고, 다중 사용자 환경에서는 간섭이 누적되어 전송 성능이 크게 저하된다. 특히 채널 추정 오차와 CFO 추정 오차가 결합될 경우 다중 사용자 간섭(MUI)이 증폭되며, 프리코딩과 검출기의 성능이 함께 저하되는 문제가 발생한다 [8].

C. 분리 설계의 한계와 공동 추정 원칙

기존의 분리 설계 접근에서는 채널 추정과 CFO 보정을 독립적으로 수행한다. 그러나 지상-위성 통합 환경에서는 두 과정이 상호 의존적이며, 각각의 오차가 결합되어 성능 저하를 증폭시키는 특성이 존재한다 [8]. 예를 들어, 채널 추정 시 CFO가 보상되지 않으면 부반송파 간 직교성이 약화되어 추정 정확도가 떨어지고, 반대로 CFO 추정 단계에서 채널 상태가 부정확하면 보정 과정 자체가 불안정해진다. 이와 같은 상호 영향은 빠르게 변하는 위성 채널 환경에서 특히 심화되며, 결과적으로 분리 설계는 추정 정확도와 응답성을 동시에 확보하기 어렵다는 한계를 가진다.

따라서 통합 운용 환경에서는 공동 추정(joint estimation)을 기반으로 하는 새로운 설계 원칙이 요구된다. 지상과 위성 링크에서 공유가능한 공통 파일럿 구조를 설계하여 중복된 오버헤드를 줄이고, 채널과 CFO를 동시에 추정함으로써 상호 의존적 오차를 최소화해야 한다. 또한 시공간 기하 변화에 대응하기 위해 추적(tracking) 기반의 적응형 보정 기법을 적용함으로써 유효 시간이 짧은 채널에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있다. 이러한 공동 추정 원칙은 파일럿 효율성과 추종 응답성을 동시에 확보할 수 있는 핵심적인 접근 방식으로, 향후 지상-위성 통합 네트워크의 신뢰성과 효율성을 보장하는 데 중요한 역할을 수행할 것이다.

D. 분리 설계의 한계와 공동 추정 원칙

공동 추정 기법은 채널과 CFO를 동시에 고려함으로써 통합 운용 환경에서의 신뢰성과 효율성을 향상시키지만, 필연적으로 연산 복잡도와 신호 오버헤드 증가를 동반한다. 즉, 추가적인 파일럿 전송과 행렬 연산은 성능 개선을 가능하게 하지만, 동시에 단말과 기지국/위성 간 처리 부담을 가중시킨다. 따라서 성능 이득과 자원 소모 사이의 정량적 절충(trade-off)을 규명하는 것이 실질적 운용에 필수적이다. 이러한 절충 관계는 스펙트럼 효율과 에너지 효율, 지연과 신뢰도 등 다양한 지표에 걸쳐 상호 연계되므로, 단일 성능 지표의 극대화보다는 복합 지표 간 균형점을 찾는 것이 중요하다.

또한 운용 시나리오에 따라 적합한 파라미터 선택이 달라진다. 예를 들어, 고정 사용자 환경에서는 상대적으로 긴 코히런스 시간을 활용하여 파일럿 비율을 줄이고 연산 복잡도를 완화할 수 있다. 반면, 고속 이동 단말이나 LEO 위성 링크가 포함된 환경에서는 채널 시변성이 강하기 때문에 더 빈번한 추정과 보정이 필요하며, 이는 필연적으로 오버헤드를 증가시킨다. 유사하게 단일 위성 링크 기반 구조에서는 상대적으로 단순한 동기화 기법이 충분할 수 있으나, 다중 위성 접속 환경에서는 사용자 간 간섭과 빔 전환으로 인해 더욱 정교한 공동 추정 및 자원 관리가 요구된다. 결국, 이러한 파라미터 선택 과정은 지상-위성 통합 운용 성능의 실제적 한계를 규정하며, 상황별 맞춤형 설계와 동적 자원 관리가 통합 네트워크의 실효성을 좌우하게 된다.

III. 결론

본 논문은 차세대 무선 통신의 초고속/초저지연/전 지구적 연속 서비스 영역을 달성하기 위해 지상-위성 통합 운용의 필요성과 이점을 개관하고, 통합 환경에서 성능을 제한하는 핵심 제약으로 채널 추정과 반송파 주파수 오차(CFO) 보정을 규정하였다: 아울러 분리 설계의 한계를 지적하고, 공통 파일럿 구조 설계, 채널-CFO 동시 추정, 시변 채널에 대응하는 추적 기반 보정 등 공동 추정의 설계 원칙을 제시하였으며, 성능 이득과 연산-오버헤드 간의 정량적 절충 관계 및 고정/고속 이동 단말, 단일/다중 위성 접속 등 운용 시나리오별 파라미터 선택 기준을 논의하였다: 향

후 연구는 실제 지상-위성 복합 채널과 다양한 서비스 요구를 반영한 실험적 검증으로 확장되어야 하며, 이를 통해 통합 운용의 이론적 타당성과 실질적 실효성을 동시에 확보할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신 기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201612).

참 고 문 헌

- [1] M. S. Akbar et al., "On challenges of sixth-generation (6G) wireless networks: A comprehensive survey of requirements, applications, and security issues," in *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 233, no. 104040, 2025, doi.org/10.1016/j.jnca.2024.104040.
- [2] S. Willhammar, J. Flordelis, L. Van Der Perre and F. Tufvesson, "Channel Hardening in Massive MIMO: Model Parameters and Experimental Assessment," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 501-512, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.2987704.
- [3] I. Leyva-Mayorga et al., "LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184955-184964, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029620.
- [4] Y. Xiao et al., "Space-Air-Ground Integrated Wireless Networks for 6G: Basics, Key Technologies, and Future Trends," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 42, no. 12, pp. 3327-3354, Dec. 2024, doi: 10.1109/JSAC.2024.3492720.
- [5] X. Zhu and C. Jiang, "Integrated Satellite-Terrestrial Networks Toward 6G: Architectures, Applications, and Challenges," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 437-461, 1 Jan.1, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3126825.
- [6] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta and S. Vishwanath, "Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 2640-2651, August 2011, doi: 10.1109/TWC.2011.060711.101155.
- [7] P. Zheng, A. Chaaban, M. J. Hossain and T. Y. Al-Naffouri, "A Statistical Evaluation of Coherence Time for Non-Terrestrial Communications," in 2025 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom), Nice, France, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/MeditCom64437.2025.11104425.
- [8] S. Jeong, A. Farhang, N. S. Perović and M. F. Flanagan, "Joint CFO and Channel Estimation for RIS-Aided Multi-User Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 9, pp. 11800-11813, Sept. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3268247.