

# 차세대 저궤도 위성통신망을 위한 채널 모델링 및 주요 기술 동향

이 병 주\*, 이 남 윤\*, 김 재 현\*\*, 신 원 재<sup>o</sup>

## A Survey of LEO Satellite Networks for 5G and Beyond: Channel Modeling, Research Trends, and Open Challenges

Byungju Lee\*, Namyoon Lee\*, Jae-Hyun Kim\*\*, Wonjae Shin<sup>o</sup>

### 요 약

최근 5G가 상용화되고 6G 시대를 준비하기 위한 본격적인 연구가 착수됨에 따라, 지구 전역에 초고속 인터넷 서비스를 제공할 수 있는 위성통신 기술이 활발히 연구되고 있다. 국제 표준화 단체(3GPP)는 기존의 셀룰라 망 기반 서비스의 커버리지 확장을 위해 5G New Radio(NR) 기반 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN) 연구를 시작하였다. NTN은 5G 지상망이 적용되지 않는 산간오지, 해양 등 인터넷 소외 지역에도 유비쿼터스 5G 서비스를 제공할 것으로 예상된다. 이를 위해서는 5G NR 지상망에서 고려되지 않은 위성의 긴 전파 지연 시간, 큰 도플러 효과, 큰 빔 커버리지 등을 고려해서 새로운 패러다임의 통신 기술 개발이 진행되어야 한다. 본 논문에서는 정지궤도 위성 대비 낮은 전송지연 특성을 가지는 저궤도 위성통신 채널에 초점을 맞추어 3GPP NR 기술보고서의 위성, 무인 항공 시스템 등을 포함하는 비지상 네트워크를 위한 채널 모델링 및 특징을 요약 및 분석한다. 또한, 기술된 채널 모델링 특징을 기반으로 저궤도 위성통신 시스템의 새로운 연구 방향 및 이슈들에 관해 논한다.

**키워드** : 위성통신, 비지상 네트워크, 저궤도, 채널 모델링, 차세대 이동통신 시스템

**Key Words** : Satellite communication, Non-terrestrial network, Low Earth orbit, Channel modeling, Next-generation communication systems

### ABSTRACT

With the recent commercialization of 5G and initiation of 6G research, satellite communication technology that can provide high-speed Internet services all around the Earth is actively being studied. The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) has initiated 5G New Radio (NR) based non-terrestrial network (NTN) research to extend traditional cellular network-based service coverage. NTN is expected to provide ubiquitous services to areas such as mountains and oceans where 5G terrestrial networks cannot be covered. Toward this end, the satellite communication technology should be developed with the consideration of the long propagation delay, large Doppler effect, and large satellite beam coverage, which are not typically considered in 5G NR terrestrial

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성 (Grand ICT연구센터)사업 (IITP-2021-2020-0-016 12)과 대학ICT연구센터지원사업(IITP-2021-2018-0-01424)의 연구결과로 수행되었음.

• First Author : Kumoh National Institute of Technology, Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering, byungju@kumoh.ac.kr, 종신회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Ajou University, Department of Electrical and Computer Engineering, wjshin@ajou.ac.kr, 종신회원

\* POSTECH, Department of Electrical Engineering, nylee@postech.ac.kr, 종신회원

\*\* Ajou University, Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202104-084-C-RU, Received April 16, 2021; Revised April 27, 2021; Accepted April 29, 2021

networks. In this paper, we summarize and analyze the channel modeling and features for NTN including satellites, unmanned aerial systems of the 3GPP NR technical report, focusing on low Earth orbit (LEO) satellite communication channels with lower delay characteristics compared to geostationary (GEO) satellites. Furthermore, we discuss new research trends and open challenges of LEO satellite communication systems based on the described channel characterization and modeling.

## I. 서 론

5G 통신이 상용화된 이후 위성통신 기술은 산간오지, 해양, 공중, 시골 지역 등 인터넷 소외 지역에도 5G 수준의 빠른 속도의 인터넷 서비스를 제공하여 정보 편차를 없앨 수 있다는 점에서 더욱 주목받고 있다<sup>[1,2]</sup>. 위성통신 서비스 용도로는 열차, 보트, 항공기, 선박 등 교통수단과의 연결의 연속성, 긴급 재난 상황에서의 유연한 연결성, M2M(Machine-to-Machine)/IoT(Internet of Things) 기기용 대규모 연결성 향상 등이 있다. 더욱이, 6G가 상용화된 2030년경에는 위성통신 기술이 고도화되어 지구 전역에서 끊김 없이 초고속 인터넷의 사용이 가능할 것으로 예상된다<sup>[3]</sup>.

위성통신 시스템은 고도에 따라 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성, 중궤도(Medium Earth Orbit, MEO) 위성, 정지궤도(Geostationary Orbit, GEO) 위성으로 구분할 수 있다. 위성통신 기술은 주로 정지궤도 인공위성 중심이 되어 왔다. 정지궤도에서의 인공위성 회전 속도는 지구의 회전 속도와 같아서 지상에서 관측 시 항상 같은 지역 위에 떠 있는 것으로 보인다. 즉, 정지궤도 위성은 만유인력과 원심력이 평형을 이루는 고도에만 설치 가능하여 고도의 변화가 불가능하다. 정지궤도 위성 하나로 유럽 전역을 서비스할 수 있어 적은 수의 위성으로도 지구 전 지역을 커버할 수 있는 장점이 있으나 지구 표면에서 약 35,786km 떨어져 있어 왕복 지연 시간(Round Trip Time, RTT)이 약 544ms에 달한다. 따라서 통신 지연 시간을 LTE와 비슷한 수준인 약 4~25ms로 줄일 수 있는 저궤도 위성통신 시스템이 최근 들어 더욱 각광을 받고 있다.

저궤도 위성은 지상에서 관측 시 빠른 속도(지구 표면에서 600km 높이 시 7.56km/s)로 이동하며 이 이동 속도는 고도가 낮을수록 더 빨라진다. 그리고 정지궤도, 중궤도 위성과 비교 시 좁은 영역(600km 고도 기준 직경 1,000km 이상)을 위성 커버리지로 형성한다. 따라서, 지구 전 지역을 커버하기 위해서는 다수의 위성이 필요하다. 위성 크기가 소형화되고 발사 비용 감소 등으로 스페이스X의 스타링크 프로젝트,

아마존의 카이퍼 프로젝트 등에서 수천 혹은 수만 개 이상의 인공위성을 활용할 계획을 발표하고 있다.

위와 같이 군집 저궤도 위성을 활용하여 저궤도 위성통신 시스템 글로벌 인터넷 망 구축 사업이 활성화 될 경우 위성 간 충돌 문제, 주파수 간섭 문제 등을 해결해야 한다. 위성 간 충돌 문제는 미국의 연방통신위원회(FCC)에서 위성 사업자마다 궤도 및 고도를 다르게 조정하고 있다. 또한, 위성 간 링크를 활용하여 충돌을 방지하는 기능도 고려되고 있다. 주파수 간섭 문제를 해결하기 위해서는 주파수 분할, 빔의 모양과 방향 조절 등이 이루어져야 한다. 빔포밍을 적용하여 저궤도 위성통신의 효율을 높이기 위해서는 저궤도 위성과 지상에 있는 터미널 간 신호 전파 모델을 정확히 파악해야 하고, 이러한 채널 모델링을 기반으로 통신 성능 분석 및 시스템 개선이 이루어 져야 한다.

국제 표준화 단체(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)는 기존의 셀룰라 망 기반 서비스의 커버리지 확장을 위해 5G New Radio(NR) 기반 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN) 연구를 시작하였다. NTN 표준화 연구는 Release 15의 Study Item으로 승인되면서 본격적으로 진행되었다<sup>[4]</sup>. 이 Study Item에서는 NTN의 채널 모델을 연구하여 배치 시나리오, 매개 변수를 정의하고 5G NR에 미치는 잠재적 영향을 식별하였다. 해당 논의 결과는 기술 보고서(Technical Report, TR) 38.811에 반영되어 기술되어 있다<sup>[5]</sup>. NTN 프로토콜과 같은 규격 이슈는 Release 16 Study Item으로 승인되어 TR 38.821에 정리되었다<sup>[6,7]</sup>. 최근 들어, NTN은 Release 17의 Work Item으로 승인되었고, 정지궤도 위성, 저궤도 위성, NTN 기반 사물인터넷(IoT) 시나리오를 다루고 있다<sup>[8]</sup>.

본 논문에서는 Beyond 5G 기술 후보군으로 각광 받고 있는 저궤도 위성통신 채널에 초점을 맞추어 3GPP NR 기술보고서의 위성, 무인 항공 시스템 등을 포함하는 비지상 네트워크를 위한 채널 모델링 및 특징을 요약 및 분석한다. 우선, 일반적으로 위성통신 채널 모델링에서 고려하고 있는 요소들을 살펴보고, 저궤도 위성 채널 특징을 살펴본다. 또한, 위성통신 채널

널 모델링 특징을 분석하여 저궤도 위성통신 시스템의 새로운 연구 및 개발 이슈들을 도출한다.

본 논문의 세부 구성은 다음과 같다. II 장에서는 본 논문에서 고려하는 비지상 네트워크 통신 시스템을 소개한다. III 장에서는 저궤도 위성통신망 채널 모델링 요소들을 설명한다. 또한 정지궤도 위성통신 채널 모델과 저궤도 위성통신 채널 모델을 비교 분석한다. IV 장에서는 저궤도 위성통신 시스템 연구 동향을 살펴보고 새로운 연구 방향 및 이슈들에 대해 논하고, 마지막으로 V 장에서 논문의 결론을 지으며 마무리한다.

## II. Beyond 5G에서의 NTN 통신 시스템

비지상 네트워크(NTN) 통신 시스템은 버스, 열차, 선박, 항공기 등 고속으로 이동하는 이동 플랫폼에 탑승한 사용자들에게도 5G 서비스 제공을 가능하게 한다. 이러한 서비스는 비지상 네트워크 단독 또는 지상과 비지상의 통합 네트워크(Space-Terrestrial Integrated Network, STIN)를 통해 제공될 수 있다. 이번 장에서는 3GPP에서 논의되고 있는 GEO 위성, Non-GEO 위성, 무인 항공 시스템(Unmanned Aircraft System, UAS) 또는 성층권 통신 플랫폼(High Altitude Platform Station, HAPS) 배치 시나리오를 우선 살펴보고, 특징을 비교 분석한다. HAPS에는 항공기, 헬리콥터, 드론 등이 포함된다. 구체적인 시나리오는 표 1과 같다<sup>5)</sup>.

표 1. NTN 배치 시나리오 [5]  
Table 1. NTN deployment scenarios [5]

	Platform orbit and altitude	Carrier frequency	Beam pattern	Architecture options
D1	GEO (35786 km)	Ka band	Fixed beams	A3
D2	GEO (35786 km)	S band	Fixed beams	A1
D3	Non-GEO (down to 600km)	S band	Moving beams	A2
D4	Non-GEO (down to 600km)	Ka band	Fixed beams	A4
D5	UAS between 8km and 50km	Below and above 6 GHz	Fixed beams	A2

3GPP TR 38.811에서는 5가지 NTN 배치 시나리오를 소개하였다. 우선, 이동 플랫폼 궤도 및 고도에 따라 나눌 수 있다. GEO 위성은 지구 표면으로부터 35,786 km 떨어져 있다. Non-GEO 위성의 경우, MEO는 7,000 km에서 25,000 km, LEO는 300 km에서 1,500 km 떨어져 있다. 주파수 대역으로는, Ka 밴드는 하향링크에서 19.7~21.2 GHz, 상향링크에서 29.5~30.0 GHz가 고려되고, S 밴드는 하향링크에서 2170~2200 MHz, 상향링크에서 1980~2010 MHz가 고려된다. 빔 패턴 관련해서 고정 빔(Fixed beam)인 경우에는 위성이 지상의 고정 공간으로 서비스를 제공하기 위해 빔포밍 기술을 적용해야 한다. 이동 빔(Moving beam)인 경우에는 위성이 이동함에 따라서 지상의 빔 커버리지 지역이 시간에 따라 바뀌게 된다.

위성은 크게 Transparent 위성과 Regenerative 위성으로 분류될 수 있다. Transparent 위성은 어떠한 신호 처리도 없이 주파수 필터링, 변환 및 증폭 기능만 수행할 수 있는 것으로 정의되었다. Transparent 위성은 gNB(next Generation Node B)로부터 수신하는 페이로드를 UE(User Equipment)로 중계한다. Transparent 위성을 사용하는 경우에는 위성 커버리지 내에 gNB와 UE가 동시에 존재해야 해서 해양 환경 하에서는 서비스가 불가능한 한계점이 있다.

반면에, Regenerative 위성은 Transparent 위성이 수행 가능한 기능들에 더하여 변조, 복조, 코딩, 디코딩, 스위치, 라우팅 등 기능도 수행할 수 있다. Regenerative 위성은 gNB의 전체 또는 일부 기능을 포함하며 위성 간 링크(Inter-Satellite Link, ISL)를 지원한다. 이 경우, 위성에서 ISL을 지원하기 위해 릴레이 노드 기능을 수행할 수 있는 OBP(On Board Processor) 역량이 필요하다. Regenerative 위성을 사용하는 경우에는 위성 가용 전력의 한계 이슈를 해결할 수 있도록 구조 및 설계가 되어야 한다.

Regenerative 위성에서 지원 가능한 ISL의 핵심 기술은 ISL을 생성하고 유지하는 부분에 있다. 두 위성이 각각 다른 위성 궤도에 존재하는 경우 위성 간의 거리와 방향이 지속해서 변하게 되는데, 이때 한 위성이 다른 위성을 정확히 포인팅해야 한다. 현재까지 ISL 링크는 주로 무선 광통신(Free Space Optics, FSO) 방식으로 연구가 진행되었다<sup>9)</sup>. FSO는 강한 직진성을 가지고 있어 우주와 같이 대기 환경 변화가 적은 곳에서는 FSO가 원활하게 동작할 수 있다. 하지만, FSO는 위성 간 안테나 빔 포인팅 에러가 발생하여 직진성 확보가 되지 않으면 신뢰성 있는 통신 링크를 형성하기 힘들다. 최근 들어, FSO의 빔 포인팅 에러를

보완할 기술뿐만 아니라 밀리미터파 기반 위성 간 통신 시스템도 연구되고 있다<sup>10)</sup>.

NTN 구조 옵션들은 그림 1과 같이 네 가지를 나타내었다<sup>5)</sup>. 앞서 설명한 Transparent 위성은 A1과 A3 구조의 위성에 해당하고 Regenerative 위성은 A2와 A4 구조의 위성에 해당한다. 그리고 A1과 A2 구조의 위성은 UE를 서비스하고 A3와 A4 구조의 위성은 릴레이 노드를 서비스한다. 여기서, 위성이 서비스하는 NTN 터미널로는 3GPP UE로 분류되는 Handheld 이나 IoT 단말 또는 위성 시스템 전용 단말기 등이 있다.

NTN 서비스의 경우 초기에는 정지궤도 위성을 통한 위성 방송 서비스에 집중되었다. 정지궤도 위성의 높은 고도로 인해 긴 RTT를 극복하기 위한 프로토콜 구조, 위성 단말별 효율적 자원 분배 등이 주요 기술 사항이었다. 최근 들어, NTN은 중궤도, 저궤도 위성, 무인 항공 시스템, 성층권 통신 플랫폼까지 고려하여 초고속의 개인 서비스와 지상망의 광케이블을 대체하기 위한 목적으로, 5G NR Air 인터페이스를 적용하여 사용자에게 eMBB(enhanced Mobile Broadband) 서비스를 제공하고자 한다. 6GHz 이상의 위성 및 항공 서비스에 할당된 주파수 대역에서 버스, 기차, 선박, 항공기와 같은 이동식 플랫폼에 장착할 수 있는 VSAT(Very Small Aperture Terminal)을 통해 광대역 서비스를 제공한다. 하향링크에서 최소 50 Mbps의 데이터 전송 속도와 최대 수백 Mbps(위성) 또는 심지어 최대 몇 Gbps(항공)의 데이터 전송 속도를 목표로 한다.

NTN으로 IoT 서비스를 제공하기 위해서는 NB-IoT(Narrow Band-IoT), LTE-M(LTE-Machine Type Communication)을 적용한다. 비즈니스 케이스

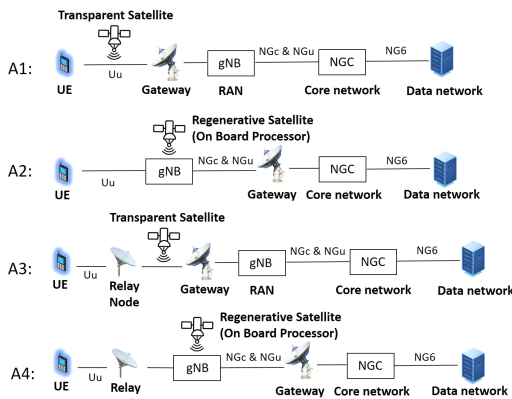


그림 1. NTN 구조 옵션들  
Fig. 1. NTN architecture options

로는, 대규모 동물 관찰 프로젝트인 이카루스 (International Cooperation for Animal Research Using Space, ICARUS) 서비스가 있다. 일반적으로 6 GHz 이하의 위성 또는 항공 서비스에 할당된 주파수 대역에서 협대역 서비스를 제공한다. 하향링크에서 1 또는 2 Mbps 미만의 데이터 속도를 목표로 한다.

위성통신 시스템에서 채널 링크들로는 지상 단말에서 위성으로 페이로드를 전송하는 피더 링크(Feeder Link), 위성 간 링크(ISL), 위성과 지상 사용자 간의 서비스 링크(Service Link)가 있다. 기존에는 GEO 채널 모델링 중심으로 연구가 진행되어 왔으나, 최근 LEO 위성의 소형화, 위성 생산 단가 감소 및 대량 설비 도입, LEO 군집 위성 운용 등으로 LEO 위성이 Beyond 5G 및 6G 통신 기술로 각광을 받고 있어 LEO 채널 모델링 파악하는 것이 중요하다. 따라서 다음 장에서는 LEO 채널 모델링을 중심으로 채널 모델을 살펴볼 예정이다.

### III. 저궤도 위성통신망 기반 채널 모델링

#### 3.1 위성 링크와 지상 모델의 결합

위성통신 채널 모델에서 가장 큰 특징 중 하나는 기존의 셀룰러 통신과 다르게 LoS(Line-of-Sight, 가시 거리) 성분이 주를 이루는 것이다. 위성통신 채널 모델에도 NLoS(Non-Line-of-Sight, 비가시 거리) 성분이 지상 표면 근처에서 나타날 수 있는데, 이는 다중 경로 전파가 지상 터미널 근처 장애물들에 의해 발생하기 때문에 셀룰러 통신의 채널 모델과 매우 유사하다. 그림 2에서 지상파와 비지상파 간 전파 차이를 살펴보면, FR2(6GHz 이상의 대역)와 같은 지상파는

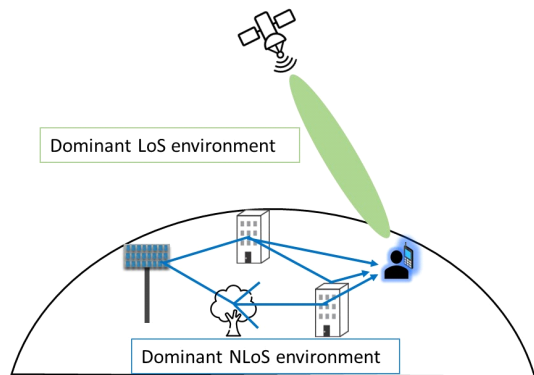


그림 2. 위성과 지상 링크의 채널 환경 비교  
Fig. 2. Comparison between terrestrial link and satellite link channel environment

건물 등으로 인해 다양한 경로를 겪게 되고 건물 등으로 인해 커버리지 손실이 있을 수도 있다. 반면, 비직상과 전파는 경사도가 높아짐에 따라 높은 확률로 LoS 환경에서 지상 터미널에 빔포밍하여 신호 전달이 가능하다.

LoS 확률은 지상 터미널 환경과 고도 각도에 따라 달라진다. 기준 고도 각도는 10° 간격으로 10°~90° 범위 내에서 나타낸다. 위성과 지상 터미널 링크의 LoS 확률은 표 2의 가장 가까운 기준 고도각에서 가져온다. 예를 들어, 위성과 지상 터미널 링크의 고도각이 12.5°인 경우에는 10°의 LoS 확률을 따른다고 가정한다. 그리고 도심 밀집(Dense Urban), 도심(Urban), 교외 또는 시골(Suburban and Rural) 지역에 따라 LoS 확률이 다르게 나타낸다. 가령, 고도각이 10°인 경우 도심 밀집 지역이나 도심 지역에서는 LoS 확률이 20%대로 낮게 나타나는 반면에 교외 또는 시골 지역에서는 LoS 확률이 78.2%로 높게 나타난다. LoS 성분 관점에서는 셀룰러 통신에서 고려하는 요소들 외에 비, 구름, 섬광으로 인한 감쇠, 위성 도플러 시프트 등을 고려해야 한다. 또한, 저궤도 위성은 지상에서 관측 시 빠른 속도로 이동하기 때문에 정지궤도 위성 대비 큰 도플러 주파수를 갖게 된다. 이런 장

에서는 LoS 확률 외에도 경로 손실, shadow fading 등 위성통신 채널 모델링에서 일반적으로 고려해야 하는 요소들을 살펴본다.

위성통신 시스템의 채널 모델링은 3GPP 38.901의 기술 보고서(TR) 지상 모델<sup>[11]</sup>에 그림 3과 같이 위성에서 추가로 고려해야 하는 위성 궤도, 경사도, 도플러 시프트, 대기, 섬광 등을 결합한 모델이 된다.

### 3.2 경로 손실 모델

성과 지상 터미널 간의 신호 경로는 몇 가지 감쇄를 겪게 되며, 경로 손실(Path loss, PL)은 다음과 같이 나타낸다.

$$PL = PL_b + PL_e + PL_g + PL_s \quad (1)$$

여기서, PL은 총 경로 손실,  $PL_b$ 은 기본 경로 손실,  $PL_e$ 는 건물 진입 손실,  $PL_g$ 는 대기 가스로 인한 감쇠,  $PL_s$ 는 이온권 또는 대기권 섬광으로 인한 감쇠이다. 본 논문에서는 해당 파라미터들은 dB 단위로 표시한다.

이 절에서는 자유 공간 전파, 새도원(Shadowing), clutter 손실을 포함하는 기본 경로 손실 모델을 먼저 설명하고, 건물 진입 손실, 대기 가스 및 섬광으로 인한 감쇄를 이어서 살펴본다.

우선, 기본 경로 손실  $PL_b$ 의 수식은 다음과 같다.

$$PL_b = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c) \quad (2)$$

여기서,  $FSPL(d, f_c)$ 는 거리  $d$ 가 미터(m)스케일이고  $f_c$ 가 기가헤르츠(GHz)스케일 때의 dB값이고 다음과 같이 나타낸다.

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20\log_{10}(f_c) + 20\log_{10}(d) \quad (3)$$

지상에 있는 터미널과 위성과의 거리  $d$ 는 그림 4와 같이 위성/HAPS 고도  $h_0$ 와 고도각  $\alpha$ , 지구 반지름  $R_E$ 를 활용하여 계산할 수 있다.

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \alpha + h_0^2 + 2h_0 R_E} - R_E \sin \alpha \quad (4)$$

SF는 Shadow 페이딩으로 로그 정규 분포  $SF \sim N(0, \sigma_{SF}^2)$ 를 따른다.  $CL(\alpha, f_c)$ 은 clutter 손실로 주변 건물과 지상의 물체에 의해 발생하는 감쇄를

표 2. LoS 확률 [5]  
Table 2. LoS probability [5]

Elevation angle	Dense urban	Urban	Suburban and Rural
10°	28.2%	24.6%	78.2%
20°	33.1%	38.6%	86.9%
30°	39.8%	49.3%	91.9%
40°	46.8%	61.3%	92.9%
50°	53.7%	72.6%	93.5%
60°	61.2%	80.5%	94.0%
70°	73.8%	91.9%	94.9%
80°	82.0%	96.8%	95.2%
90°	98.1%	99.2%	99.8%

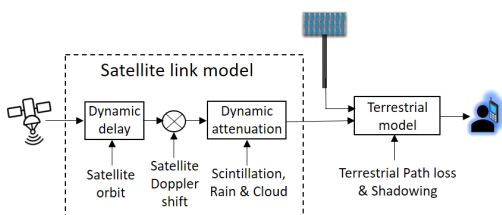


그림 3. 위성 링크와 지상 모델의 결합  
Fig. 3. Combined satellite and terrestrial channel models

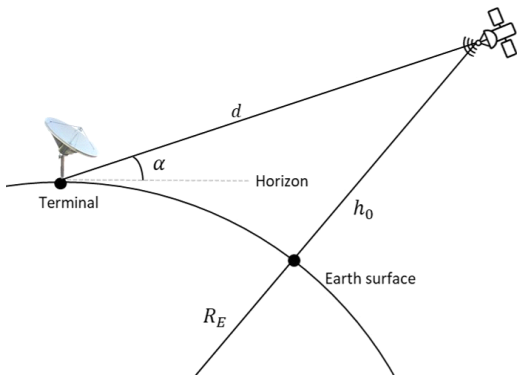


그림 4. 지상 터미널과 위성과의 거리 계산 방법  
Fig. 4. Methodology to compute the distance between the terrestrial terminal and satellite

모델링한 것으로 고도각  $\alpha$ , 반송 주파수  $f_c$  및 환경에 따라 다른 값을 갖는다. 만약 지상 UE가 LoS 환경에 있는 경우는 clutter 손실은 무시해도 될 정도로 작으므로 0 dB로 설정하면 된다. 표3과 표4에 각각 주파수 대역이 Ka 밴드, S 밴드일 때, 도심 밀집 지역 시나리오의  $\sigma_{SF}$ 와 CL을 나타내었다. 지상 UE의  $\sigma_{SF}$ 와 CL의 값은 표의 가장 가까운 기준 고도각에서 가져온다. 한편, 표 3에서 LoS 환경과 NLoS 환경에서 고도각에 따른 Shadowing 영향을 정리하였다. 이론적으로 완벽한 LoS 환경에서는 Shadowing에 의한 감쇄는 고려되지 않는다. 하지만, LoS 환경에서도 단말이 지상 근처에 있어 지형지물의 영향을 조금이라도 받게 되고 현실적으로 완전한 LoS 환경을 확보하기 힘들기 때문에 적은 값의 Shadowing이 나타난다.

표 3. Dense urban 시나리오 Ka 밴드에서의 새도잉(Shadowing)과 clutter 손실 [5]  
Table 3. Shadow fading and clutter loss for Ka-band dense urban scenario [5]

Elevation angle	LoS	NLoS	
	$\sigma_{SF}$ (dB)	$\sigma_{SF}$ (dB)	CL (dB)
10°	2.9	17.1	44.3
20°	2.4	17.1	39.9
30°	2.7	15.6	37.5
40°	2.4	14.6	35.8
50°	2.4	14.2	34.6
60°	2.7	12.6	33.8
70°	2.6	12.1	33.3
80°	2.8	12.3	33.0
90°	0.6	12.3	32.9

표 4. Dense urban 시나리오 S 밴드에서의 새도잉(Shadowing)과 clutter 손실[5]  
Table 4. Shadow fading and clutter loss for S-band dense urban scenario [5]

Elevation angle	LoS	NLoS	
	$\sigma_{SF}$ (dB)	$\sigma_{SF}$ (dB)	CL (dB)
10°	3.5	15.5	34.3
20°	3.4	13.9	30.9
30°	2.9	12.4	29.0
40°	3.0	11.7	27.7
50°	3.1	10.6	26.8
60°	2.7	10.5	26.2
70°	2.5	10.1	25.8
80°	2.3	9.2	25.5
90°	1.2	9.2	25.5

식 (1)에 나와 있는  $PL_e$ 은 지상 단말과 인접 실외 경로 사이의 추가 손실인 건물 진입 손실로 지상 단말이 실내에 있는 경우 고려해야 한다. 건물 진입 손실은 건물 유형, 건물 내 위치 및 건물 내 이동에 따라 달라진다. 건물 진입 손실은 다음과 같이 나타난다.

$$PL_e(P) = 10\log(10^{0.1A(P)} + 10^{0.1B(P)} + 10^{-0.3}) \quad (5)$$

여기서  $P$ 는 건물 진입 손실이  $PL_e$  보다 작거나 같을 확률로 0과 1 사이의 값을 가진다.  $A(P) = F^{-1}(P)\sigma_1 + \mu_1$ ,  $B(P) = F^{-1}(P)\sigma_2 + \mu_2$ ,  $F^{-1}(P)$ 는 확률  $P$ 에 대한 정규 분포 CDF 역함수이고  $\mu_1 = L_h + L_e$ ,  $\mu_2 = w + x\log(f)$ ,  $\sigma_1 = u + v\log(f)$ ,  $\sigma_2 = y + z\log(f)$ 이다.  $L_h = r + s\log(f) + t(\log(f))^2$ 는 수평 경로의 손실 중앙값이고  $L_e = 0.212|\theta|$ 는 고도각이  $\theta$ 일 때 건물 표면에서 경로의 고도각 보정이다.  $r, s, t, u, v, w, x, y, z$ 는 건설자재의 열효율에 따라 "Traditional"과 "Thermally-efficient"의 두 그룹으로 분류가 된다. 구체적인 값은 아래 표 5에 나타내었다.

식 (1)에 나와 있는  $PL_g$ 는 전파가 대기를 통과할 때 대기 가스(분자) 성분에 의해 흡수 감쇠를 반영한 계수이다. 주로 주파수, 고도각, 해수면 위 고도 및 수증기 밀도에 따라 달라진다. 10 GHz 미만의 주파수 대역에서는 일반적으로 무시될 수 있다.

마지막으로, 식 (1)에 나와 있는  $PL_s$ 는 수신된 신호 진폭 및 위상의 급격한 변동인 이온권 또는 대기권 섬광에 의한 감쇠로 3 GHz 이하의 대역에서 가장 심한 장애 중 하나이다. 섬광에 의한 감쇠는 때때로 10 GHz까지 관측될 수 있다.



표 5. 건물 타입 및 열효율에 따른 clutter 손실 [5]  
Table 5. Clutter loss for different building types [5]

Parameters	Building Type 1: Traditional	Building Type 2: Thermally-efficient
$r$	12.64	28.19
$s$	3.72	-3.00
$t$	0.96	8.48
$u$	9.6	13.5
$v$	2.0	3.8
$w$	9.1	27.8
$x$	-3.0	-2.9
$y$	4.5	9.4
$z$	-2.0	-2.1

### 3.3 도플러 시프트

본 절에서는 저궤도 위성 채널의 특징을 살펴보기 위해 도플러 시프트 영향을 분석한다. 도플러 시프트는 송신기와 수신기 사이에 상대적인 속도가 존재할 때, 신호가 도착하는 시간이 변화함에 따라 수신기에서 관찰한 신호 주파수가 변하는 현상을 가리킨다. 도플러 시프트는 비지상 플랫폼의 상대적 속도, UE의 속도 및 반송파 주파수에 따라 달라진다.

정지궤도 위성은 지상에서 관측 시 고정되어 있는 것으로 보이기 때문에 지상 터미널 이동 외에는 도플러 시프트가 유발되지 않는다. 반면에, 저궤도 위성의 경우 지상에서 관측 시 위성이 빠르게 이동하기 때문에 위성파와 지상 터미널 모두에 의해 도플러 시프트가 발생한다. 우선, 도플러 시프트를 계산하는 방법을 살

펴보고 앞 장에서 살펴본 NTN 배치 시나리오들에서의 도플러 시프트를 분석한다.

저궤도 위성통신 시스템의 도플러 시프트 계산 방법을 그림 5를 통해 알아본다. 움직이는 위성과 지상 터미널은 y-z 평면 좌표계에 있다고 가정한다. 고정된 지상 터미널이 경험하는 도플러 시프트를 시간 함수로 표현한다.

$$f_d(t) = \frac{f_0}{c} \frac{\mathbf{d}(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{x}_{\text{SAT}}(t)}{\partial t}}{|\mathbf{d}(t)|} \quad (6)$$

여기서  $f_0$ 는 반송파 주파수,  $\mathbf{d}(t)$ 는 위성과 수신기 사이의 거리 벡터이며,  $\mathbf{x}_{\text{SAT}}(t)$ 는 위성 위치의 벡터이다.  $\mathbf{d}(t)$ 와  $\mathbf{x}_{\text{SAT}}(t)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{d}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ (R_E + h) \sin(\omega_{\text{SAT}} t) \\ (R_E + h) \cos(\omega_{\text{SAT}} t) - R_E \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_{\text{SAT}}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ (R_E + h) \sin(\omega_{\text{SAT}} t) \\ (R_E + h) \cos(\omega_{\text{SAT}} t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $R_E$ 는 지구 반지름,  $h$ 는 위성 고도,  $\omega_{\text{SAT}}$ 는 위성 각속도이다. 수식 과정을 거친 후에 도플러 시프트는 다음과 같이 고도각의 함수로 나타난다.

$$f_d(t) = \frac{f_0}{c} \omega_{\text{SAT}} R_E \cos[\theta(t)] \quad (9)$$

여기서 각속도는 중력 상수  $G$ 와 지구 질량  $M_E$ 에 의해  $\omega_{\text{SAT}} = \sqrt{\frac{GM_E}{(R_E + h)^2}}$  로 계산된다.

수신기가 항공기나 고속 열차에 탑승하는 경우, 자체 속도에 따라 추가적인 도플러 시프트가 있을 수 있다. 정지궤도에서의 도플러 시프트는 주로 UE 이동에 의해 발생하고 정지궤도 위성이 아닌 경우에는 위성 이동에 따른 도플러 시프트가 UE 이동에 따른 것보다 훨씬 더 크다.

다음은 앞서 살펴본 NTN 배치 시나리오들과 기존 셀룰러 시나리오에서의 도플러 시프트, 도플러 시프트 변동성, 전파 지연을 비교 분석한다. 표 6에 시나리오 별로 도플러 관련 변수 값들을 나타내었다. 표 7에는 위성의 고도와 주파수에 따른 도플러 시프트 값을 나타내었다.

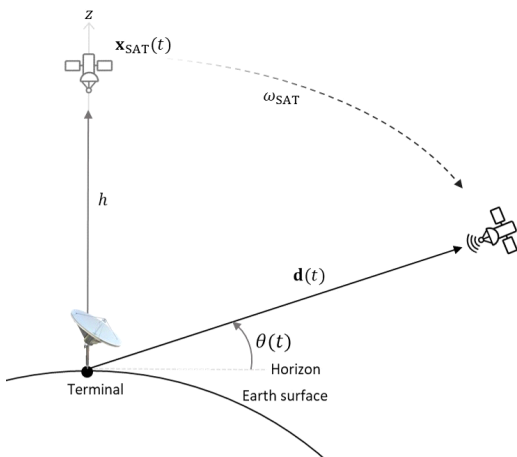


그림 5. 도플러 시프트 계산을 위한 system geometry  
Fig. 5. System geometry for Doppler shift computation

표 6. GEO, LEO, HAPS에서의 도플러 관련 파라미터들 [5]  
Table 6. Doppler related parameters for LEO, GEO, and HAPS [5]

	Max Doppler shift (kHz)	Max Doppler variation (Hz/s)	Max one-way propagation delay (ms)
D1	+/-18.51 kHz @ 20 GHz, +/-27.7 kHz @ 30 GHz (for plane)	Negligible	Transparent: 272.37 ms, Regenerative: 135.28 ms
D2	1.851 kHz @ 20 GHz (for plane)	Negligible	272.37 ms
D3	+/- 48 kHz	-544 Hz/s @ 2 GHz	14.204 ms
D4	+/- 480 kHz @ 20 GHz, +/- 720 kHz @ 30 GHz	-5.44 kHz/s @ 20 GHz (Downlink), -8.16 kHz/s @ 30 GHz (Uplink)	14.204 ms
D5	+/- 100 Hz @ 2 GHz	Negligible	1.526 ms
Cellular	+/- 925 Hz (UE on high speed train)	Negligible	0.03333 ms

표 7. 위성 고도와 주파수에 따른 도플러 시프트 [5]  
Table 7. Summary of Doppler shift and shift variation for different altitude [5]

	Freq (GHz)	Max Doppler (kHz)	Relative Doppler (%)	Max Doppler shift variation (Hz/s)
LEO (600 km)	2	+/- 48	0.0024	-544Hz/s
	20	+/- 480	0.0024	-5.44kHz/s
	30	+/- 720	0.0024	-8.16kHz/s
LEO (1500 km)	2	+/- 40	0.002	-180Hz/s
	20	+/- 400	0.002	-1.8kHz/s
	30	+/- 600	0.002	-2.7kHz/s
MEO (10,000 km)	2	+/- 15	0.00075	-6Hz/s
	20	+/- 150	0.00075	-60Hz/s
	30	+/- 225	0.00075	-90Hz/s

도플러 시프트는 지상에서의 사용자 터미널 또는 위성의 움직임에 의해 발생한다. 또한, 도플러 시프트는 지상에서의 사용자가 위성을 발견하는 각도에 따

라 달라질 수 있는데 그림 6을 통해 시간에 따른 변화로 알아볼 수 있다. 지상 사용자와 위성의 고도각이 90° 근처 일 때, 도플러 시프트 값은 0에 가깝게 나타난다. 반면, 지상 사용자와 위성 간 고도각이 낮아질수록 도플러 시프트 값은 크게 나타난다. 이를 보완하기 위해서는 위성의 위치, 궤도 정보를 활용하여 도플러 효과를 보상해야 한다. 지상에서의 사용자는 위성의 궤도와 위치 정보를 활용하여 수신단에서 주파수 오프셋(Carrier frequency offset, CFO)을 적용하여 도플러를 보상할 수 있다. 또한, 그림 7과 같이 송신단에서 도플러 효과를 사전 보상할 수도 있다.

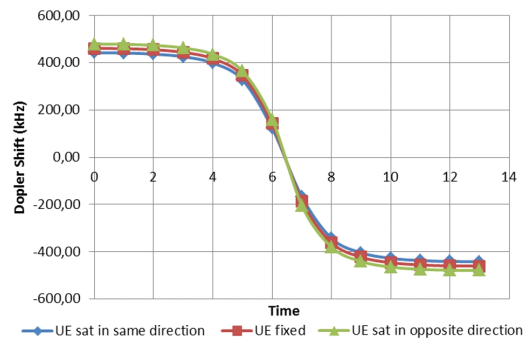


그림 6. 위성과 사용자의 상대 위치에 따른 도플러 시프트 [5]  
Fig. 6. Doppler shift with respect to the movements between the satellite and UE [5]

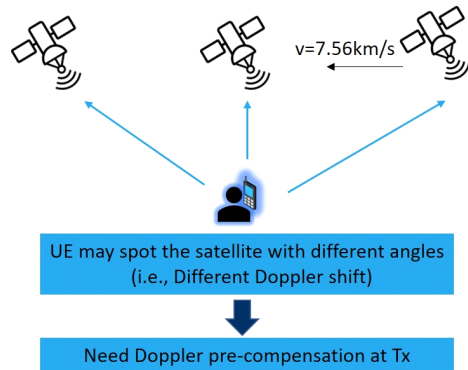


그림 7. 위성과 사용자의 상대 위치에 따라 달라지는 도플러 시프트 사전 보상  
Fig. 7. Doppler pre-compensation with respect to the movements between the satellite and UE

### 3.4 안테나 이득

본 절에서는 위성통신 채널에서의 안테나 이득에 대해 살펴본다. 위성이  $N_f$ 개의 안테나를 가지고  $K$  사용자들을 서비스할 때, 하향링크 채널  $H$ 은 다음과 같



이 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$H = B \circ Q \quad (10)$$

여기서  $\circ$ 는 Hadamard 곱 연산에 해당하고  $B$  행렬은 수신 안테나 이득, 자유공간 경로손실, 위성의 다중빔 안테나 이득 요소들을 포함하고 있다.  $B$ 의  $(n, k)$ -번째 요소는 다음과 같이 나타난다.

$$B_{n,k} = \frac{\sqrt{G_R G_{n,k}}}{4\pi \frac{d_k}{\lambda} \sqrt{\kappa T_{sys} B_w}} \quad (11)$$

여기서  $G_R$ 은 사용자 터미널의 안테나 이득,  $d_k$ 는  $k$ 번째 사용자와 위성과의 거리,  $\lambda$ 는 반송파 파장,  $\kappa$ 는 Boltzmann 상수,  $T_{sys}$ 는 수신 시스템 잡음 온도,  $B_w$ 는 사용자 링크 대역폭이다.  $G_{n,k}$ 는 위성의  $n$ 번째 빔에서  $k$ 번째 사용자로의 안테나 이득이다.  $G_{n,k}$ 는 위성 안테나 방사 패턴과 사용자 위치에 따라 달라지며 다음과 같이 근사화 된다.

$$G_{n,k} = G_{max} \left[ \frac{J_1(u_{n,k})}{2u_{n,k}} + 36 \frac{J_3(u_{n,k})}{u_{n,k}^3} \right]^2 \quad (12)$$

여기서  $u_{n,k} = 2.07123 \sin(\theta_{n,k}) / \sin(\theta_{3dB})$ 는  $k$ 번째 사용자의 위치와 위성의  $n$ 번째 빔과의 각도인  $\theta_{n,k}$ 와 빔 중심에서 3 dB 손실이 일어나는 각도인  $\theta_{3dB}$ 에 의해 계산된다.  $G_{max}$ 는 각 빔 중심에서 얻을 수 있는 최대 이득이고  $J_1$ 과  $J_3$ 는 각각 제1종 Bessel 함수에서 차수가 1과 3인 함수들이다.

그리고 비로 인한 페이딩 효과나 신호의 위상 변화는  $Q$ 에 나타나고  $(n, k)$ -번째 요소는 다음과 같이 나타난다.

$$Q_{n,k} = \chi_k^{-\frac{1}{2}} e^{-j\phi_k} \quad (13)$$

여기서  $\chi_{k,dB} = 20 \log_{10}(\chi_k)$ 는 로그 정규분포  $\ln(\chi_{k,dB}) \sim N(\mu, \sigma)$ 를 따르고  $\phi_k$ 는 위상 0과  $2\pi$  사이에 균등분포를 따른다.

저궤도 위성통신 환경에서는 LoS 환경이 주를 이루기 때문에 위성 안테나 간격이 통신 거리보다 충분히 크지 않아 페이딩 계수와 위상은 서로 다른 안테나

간에 크게 다르지 않다고 가정해도 무방하다.

#### IV. 연구 동향 및 새로운 연구 이슈

이번 장에서는 지금까지 살펴본 위성통신 채널과 관련된 새로운 연구 방향 및 이슈를 알아본다. 우선, 위성통신 시스템에서 신호를 약화시키는 요소들로는 페이딩, 낮은 전송 전력, 큰 도플러 효과, 긴 종단간 지연, gNB 이동, 잦은 핸드오버 등이 있다.

##### 4.1 자유공간 경로손실

위성통신 시스템에서 자유공간에서의 path loss는 지구 표면과 위성 간의 거리로 인해 196 dB와 같은 상당히 높은 path loss를 갖게 된다. 이를 보상하기 위해서는 위성에서의 빔포밍 및 전송 파워 제어가 효율적으로 적용되어야 한다.

##### 4.2 왕복 지연 시간

왕복 지연 시간(RTT)은 GEO 위성의 경우 최대 평균 약 544 ms, LEO 위성의 경우 약 4~25ms이다. 위성의 높은 고도 혹은 위성의 이동성으로 인해 채널 측정 결과를 받는 시점이 측정 시점보다 늦게 되어 완벽한 채널상태정보(Channel state information, CSI)를 얻기 힘들다. 따라서, 기존 셀룰러 네트워크 프로토콜을 위성 통신에 적용 시, 초기 접속에서의 프리앰블, 타이밍 어드밴스 전략을 잘 적용해야 한다.

##### 4.3 셀 크기

NTN에서의 셀 크기는 그림 8과 같이 위성의 고도와 고도각의 변화에 따라 달라질 수 있다. 위성의 고도가 높을수록 빔 폭이 넓어지고 셀 크기가 커지게 된다. GEO 위성의 경우 약 35,786km 고도에서 최대 3,500km의 빔 폭을 가지며, LEO 위성의 경우 약 600km 고도에서 최대 1,000km의 빔 폭을 가진다. 또한, 위성의 고도각에 따라 빔 폭이 달라지는데, 위성

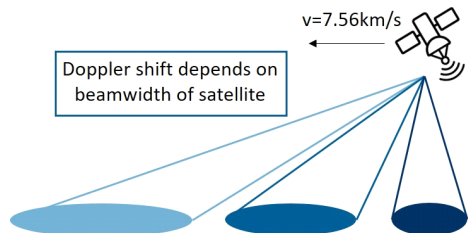


그림 8. 위성 고도각에 따른 빔 폭 및 셀 크기  
Fig. 8. Beam width and cell size with respect to satellite elevation angle

이 셀 정점에 있을 때 빔 폭이 가장 작고 고도각이 작아짐에 따라 빔 폭이 넓어진다. 도플러 시프트와 지연 시간도 이와 유사하다. 위성의 고도각, 빔 폭, 궤도 높이 등의 정보는 글로벌 커버리지를 위해 LEO 및 MEO 군집 위성에 필요한 위성 수를 결정할 수 있게 해준다.

#### 4.4 간섭 관리

기존 지상 네트워크에서의 간섭은 주로 2D 커버리지, 소수의 인접 셀, 네트워크 배치 계획 등을 고려해서 해결책을 세울 수 있다. LEO 통신 시스템에서는 위성의 고도에 따른 3D 네트워크 간섭을 고려해야 한다. 위성의 고도가 높아지게 되면, LoS 성분이 주를 이루게 되고 빔 폭이 넓어져 셀 간 간섭이 강화될 수 있다. 또한, 셀 내의 간섭을 받는 지상 사용자가 더욱 늘어날 수 있다. 그리고 위성의 빠른 이동으로 인해 위성 빔들 간 중첩이 발생할 수 있다. GEO, LEO 위성을 결합하는 계층적 구조를 고려하여 GEO 위성이 LEO 위성을 제어하는 노드로 활용되면 효과적인 간섭 관리를 할 수 있을 것이다. 또한, LEO 위성과의 협력-빔포밍과 같은 협력 통신 방법도 간섭 완화에 매우 유용할 것이다.

#### 4.5 핸드 오버

LEO 위성의 높은 속도로 인해 단말 관점에서 빔 가시성(Beam visibility)은 짧은 시간 동안만 가능하다. 따라서 지상 단말의 이동성 지원을 위해 빈번한 핸드오버가 발생하게 된다. 또한 다수의 단말이 동시에 핸드오버를 진행하게 되면 전체 시스템 관점에서 핸드오버 부하가 상당할 수 있다. 짧은 빔 가시성으로 5G NR 핸드오버 기법을 그대로 적용하기 어렵다. 위성이 빠르게 이동하는 경우 빔들간 중첩이 발생할 수 있는데 지상 단말과 위성 간 고도각에 따른 빔폭, 위성의 이동 스케줄을 고려하여 효율적 이동성 변경 기법이 필요하다.

#### 4.6 시스템 설계

저궤도 위성통신 시스템 설계 관점에서 보면, 주파수 재사용 팩터, 빔 수, 채널 수, 안테나 이득, 등가등방복사전력(Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP), 단일 채널의 대역폭 등을 고려해야 한다. 만약, 드론을 모바일 기지국으로 고려하는 경우, 드론의 3D 위치뿐만 아니라 상하, 좌우, 전진 및 후진 동작도 고려해야 한다.

#### 4.7 주파수 공존성

앞서 기술한 바와 같이, NTN에서 사용하는 주파수 대역은 Ka 밴드 또는 S 밴드이다. S 밴드 상향링크로 1980 - 2010 MHz 대역이 사용되는 데 그림 9와 같이 LTE/3G 대역에 인접하여 공존성 측면을 고려해야 한다. 도플러 시프트 효과로 effective 반송과 주파수가 변하니만 위성 이동 스케줄을 고려하여 송신단에서의 도플러 시프트 사전 보상이 중요하다.

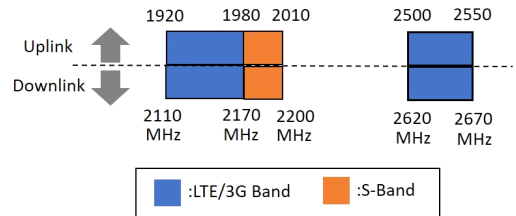


그림 9. NTN의 S 밴드와 LTE/3G 밴드의 공존성  
Fig. 9. Coexistence for LTE/3G band and S-band

#### 4.8 안테나 배열 기법

저궤도 위성통신 채널 링크들로는 데이터 센터, 코어 네트워크, 게이트웨이를 거치는 피더 링크, 위성 간 링크, 위성에서 지상 고정국 또는 모바일 단말로의 서비스 링크가 있다. 위성 간 링크는 FSO 또는 밀리미터파 기반 채널이 고려될 수 있다. 피더 링크와 서비스 링크는 경사각에 따라 LoS 성분이 주를 이룬다. 기존 연구로 LoS 채널 환경에서도 MIMO 이득을 얻는 안테나 배열 기법이 있다<sup>[13]</sup>. 기존 연구는 주로 고정형 송수신 안테나일 때의 배열 기술 개발이었다. LEO 위성은 빠르게 이동하기 때문에 게이트웨이와 위성, 위성과 지상 단말간의 상대 위치가 매우 빠르게 변한다. 따라서 피더 링크와 서비스 링크에 모두 LoS MIMO 이득을 최대로 달성하기 위해서는 LEO 위성 궤적까지 반영하는 정확한 우주 전파 환경 및 채널 모델링이 필요하다.

### V. 결 론

본 논문에서는 6G 시대에서 통신 커버리지를 3차원으로 확장할 수 있는 주요 기술 중 하나인 저궤도 위성통신 시스템에 대해 살펴보았다. 특히 3GPP 기술 보고서에 기반 하여 저궤도 위성통신 채널 모델링 특징을 알아보았고 위성채널 관련된 새로운 연구 및 개발 이슈들을 살펴보았다. 특히 저궤도 위성의 경우 지상에서 관측 시 빠른 속도로 이동하기 때문에 큰 도플러 시프트, 이동성 등을 고려해서 시스템을 디자인해

야 한다. 향후 전 세계에 통신 서비스 제공을 위해서는 위성 간 데이터 전달, 동기화 기술 등이 개발되어 군집 저궤도 위성 운용을 지원해야 할 것이다. 저궤도 위성통신 시스템은 비지상 네트워크 표준의 진화 및 발전에 따라 미래의 주요 소비자가 사물인 차세대 통신 시스템의 핵심 기반 기술로 자리매김 할 것이라 기대된다.

### References

[1] J. H. Kim, et al., “5G Wireless communication technology for non-terrestrial network,” *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 34, no. 6, pp. 51-60, Dec. 2019.

[2] P. Kim, et al., “Research trends in global wireless communication technology based on the LEO satellite communication network,” *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 35, no. 5, pp. 83-91, Oct. 2020.

[3] Samsung Research, “6G: The Next Hyper Connected Experience for All,” Seoul, 2020. [Online]. Available: <https://research.samsung.com/next-generationcommunications>.

[4] RP-17017, “Study on NR to support Non-Terrestrial Networks,” 3GPP RAN#75, Mar. 2017.

[5] 3GPP TR 38.811 v15.4.0, “Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15),” Sep. 2020.

[6] RP-181370, “Study on solutions evaluation for NR to support Non Terrestrial Network,” 3GPP RAN#80, Jun. 2018.

[7] 3GPP TR 38.821 v16.0.0, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16),” Dec. 2019.

[8] RP-193144, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN),” 3GPP RAN#86, Dec. 2019.

[9] E. Zedini, et al., “Performance of multibeam very high throughput satellite systems based on FSO feeder links with HPA nonlinearity,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 19, no. 9, pp. 5908-5923, Sep. 2020.

[10] Q. Huang, et al., “Uplink transmission in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial

networks,” in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Dec. 2020.

[11] 3GPP TR 38.901 v16.1.0, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16),” Dec. 2019.

[12] L. Yin, et al., “Rate-splitting multiple access for multigroup multicast and multibeam satellite systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 2, pp. 976-990, Feb. 2021.

[13] R. T. Schwarz, et al., “MIMO applications for multibeam satellites,” *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 65, no. 4, pp. 664-681, Dec. 2019.

이 병 주 (Byungju Lee)



2008년 2월 : 고려대학교 전파통신공학 학사

2014년 8월 : 고려대학교 전파통신공학 박사

2014년 9월~2015년 8월 : 서울대학교 뉴미디어통신공동연구실 선임연구원

2015년 9월~2017년 5월 : Purdue 대학교 박사후연구원  
2017년 6월~2020년 8월 : 삼성전자 삼성리서치 차세대통신연구센터 책임연구원

2020년 9월~현재 : 금오공과대학교 전자공학부 조교수 <관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 신호처리

[ORCID:0000-0002-1710-2324]

**이 남 윤 (Namyoon Lee)**



2006년 2월 : 고려대학교 전파통신공학 학사  
2008년 2월 : 한국과학기술원 전자공학 석사  
2014년 12월 : The University of Texas at Austin 박사  
2008년 2월~2011년 6월 : 삼성종합기술원 연구원/선임연구원

2014년 11월~2015년 5월 : NOKIA Research Center, Berkeley, USA 선임연구원

2015년 5월~2016년 2월 : Intel Labs, Santa Clara, USA Researcher Scientist

2016년 2월~현재 : 포항공과대학교 조교수, 부교수  
<관심분야> 차세대 MIMO 송/수신기, 기계학습 기반 통신 네트워크 설계

[ORCID:0000-0003-4321-4108]

**신 원 재 (Wonjae Shin)**



2005년 2월 : 한국과학기술원 전자공학 학사  
2007년 8월 : 한국과학기술원 전자공학 석사  
2007년 8월~2013년 10월 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원  
2013년 11월~2014년 2월 : 삼성전자 전자 DMC연구소 책임연구원

2017년 8월 : 서울대학교 전기·정보공학부 공학박사

2017년 9월~2018년 2월 : Princeton 대학교 박사후연구원

2018년 3월~2021년 2월 : 부산대학교 전자공학과 조교수

2021년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 조교수  
<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 머신러닝 및 빅데이터 신호처리

[ORCID:0000-0001-6513-1237]

**김 재 현 (Jae-Hyun Kim)**



1987년~1996년 : 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사 졸업  
1997년~1998년 : 미국 UCLA 전기전자과 박사 후 연수  
1998년~2003년 : Bell Labs, NJ, USA, 연구원  
2003년~현재 : 아주대학교 전자공학과 교수

<관심분야> QoS/QoS, 무선 MAC 프로토콜, IEEE 802.11/15, B5G 통신 시스템, 국방 전용네트워크, 위성시스템 등

[ORCID:0000-0003-4716-6916]