

저궤도 위성 통신 채널 특성 및 송수신 방법

최은성, 유승형*, 최진석
한국과학기술원, 울산과학기술원*

요약

지상 기지국에 의존하지 않는 저궤도 위성 통신은 차세대 통신 수단으로써의 잠재력을 인정 받으며 활발히 연구되고 있다. 최근에는 전세계의 커버리지를 확보하여 지상국이 없는 지역에서도 지상국을 통한 통신 속도를 넘어서는 등 저궤도 위성 통신의 발전 속도가 가속화되고 있다. 이러한 저궤도 위성 통신은 지상국 및 이종 위성군 통신과 함께 활발히 연구되고 있다. 따라서 본고에서는 최근들어 주목받고 있는 저궤도 위성 통신의 특성 및 송수신 방법과 저궤도 위성의 국내외 연구 동향에 대해서 알아본다.

I. 서론

위성(satellite)은 높은 계층에 시중을 드는 사람이라는 뜻의 라틴어인 satellitem의 어원에서 유래되었다. 이러한 유래로부터, 위성은 훨씬 더 큰 행성 주변을 도는 천체 혹은 우주로 발사되어 지구, 달, 혹은 태양 주변을 도는 인공적인 기계를 통틀어 부르고 있다.

최초의 인공위성은 소비에트 연방에서 발사한 저궤도 위성인 스푸트니크 1호이며, 1957년 10월 4일에 발사되었다. 이 위성에는 20.005MHz와 40.002MHz 주파수 대역에서 작동하는 라

디오 송신기가 장착되어 있었다. 첫 인공위성인 스푸트니크 1호는 금속 구 모양의 본체에 4개의 안테나가 달려있어 규칙적인 신호음을 전 세계로 송신했으며, 이 신호를 시작으로 본격적인 우주 경쟁이 시작되었다.

국내에서는 1992년 8월 11일 대한민국 최초의 인공위성인 우리별 1호가 남아메리카 프랑스령 기아나의 쿠루에 위치한 기아나 우주 센터에서 발사되었다. 우리별 1호는 국내 최초의 인공위성으로, 지구 표면 촬영 및 음성자료와 화상정보 교신 등의 실험 등을 수행하였다. 또한 인공위성 개발 기술의 습득, 위성 관련분야의 전문인력 양성, 국내 우주 산업 활성화 및 우주 환경에 관한 연구 수행의 밑바탕이 되었다. 우리별 1호의 공식 수명은 5년이었지만, 1997년 임무가 종료된 이후에도 7년 동안 더 작동하였으며, 2004년 말에 교신을 마쳤다.

저궤도(LEO) 위성 통신은 지구 표면 위 180~2000km 사이를 공전하는 위성을 사용하여 다양한 통신 서비스를 제공한다. 공전 주기는 약 84~127분이며 이는 대략 초속 7.8km에 해당한다. LEO 위성은 정지궤도 위성과 비교하였을 때 상대적으로 짧은 궤도 주기를 가지므로 지연 시간이 짧고 통신 속도가 빠르다. 저궤도 위성군의 도입으로 우주 기반의 통신 트렌드를 재편함에 따라, 전세계의 저궤도 위성 통신 산업은 전례 없는 속도로 확장되고 있다. 이러한 발전의 배경에는 다양한 기술적 혁신과 함께 통신 인프라의 필요성이 크게 작용하고 있다. 특히, 저궤도 위성은 지리적 제약을 극복하고 전 세계 어디서나 안정적인 통신을 제공할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 이에 따라 저궤도 위성 통신은 자연재해로 인한 통신 두절, 오지 지역의 통신망 부족 등의 문제를 해결할 수 있는 중요한 솔루션으로 부상하고 있다. 또한, 저궤도 위성은 지연 시간이 짧고 높은 데이터 전송 속도를 제공하여, 실시간 스트리밍, 고해상도 비디오 통화, 원격 의료 등 다양한 응용 분야에서 활용될 수 있다. 이러한 이유로 많은 국가와 기업들이 저궤도 위성 통신 기술 개발에 막대한 투자를 하고 있으며, 앞으로의 발전 가능성이 매우 높다는 것이 입증되었다[1]. 또한, 실시간 통신 및 사물인터넷(IoT) 기기 연결에 대한 수요가 급격히 증가함에 따라 저궤도 위성 통신 시장은 위성 기술과 함께 발전하고 있다.

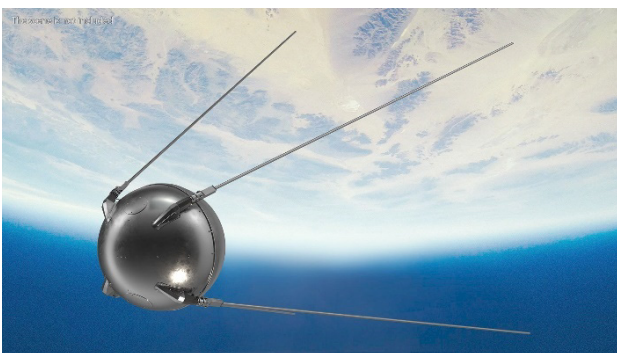


그림 1. 세계 최초의 인공위성 “스푸트니크 1호” (1957)

본 고에서는 최근에 관심이 증가하고 있는 저궤도 위성 통신의 특징과 송수신 방법, 국내외 연구 동향에 대해서 알아본다.

II. 저궤도 위성 통신의 특징

본 장에서는 국제 표준화 단체(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)의 5G New Radio(NR) 기반 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN) 모델 38.811[2]을 통해 저궤도 위성 통신의 특징에 대하여 알아본다.

1. 저궤도 위성 통신의 특징

가. 저궤도 위성 통신 채널의 특징

위성통신 채널 모델의 주요 특징 중 하나는 지상 통신과 달리 주로 LoS(Line-of-Sight) 성분을 포함한다는 점이다. NLoS(Non-Line-of-Sight) 성분도 위성통신 채널 모델에서 지상 근처 장애물로 인해 다중 경로 전파가 발생해 지상 통신 채널 모델과 비슷한 양상을 보일 수 있다. <그림 2>에서 지상파와 비지상파 간의 전파 차이를 보면, FR2(6GHz 이상의 주파수 대역)와 같은 지상파는 장애물로 인해 다양한 경로로 전파되며 건물 등에 의해 커버리지 손실이 발생할 수 있다. 반면 비지상파 전파는 높은 경사도로 인해 주로 LoS 환경에서 지상 터미널로 빔포밍되어 신호를 전달할 수 있다.

위성 통신에서 LoS 확률은 지상 터미널 환경과 고도 각도에 따라 달라진다. 고도 각도는 10° 단위로 10°~90° 범위에서 측정된다. 도심 밀집, 도심, 교외, 시골 지역에 따라 LoS 확률도 다르게 나타난다. 예를 들어, 고도 각도가 10°일 때 도심 밀집 지역이나 도심 지역에서는 LoS 확률이 20%대로 낮은 반면, 교외나 시골 지역에서는 78.2%로 높다. LoS 성분을 고려할 때, 셀룰러 통신에서 중요하게 다루는 요소들 외에도 비, 구름, 섬광에 의한 감

쇠와 위성 도플러 시프트 등을 고려해야 한다. 특히, 저궤도 위성 은 지상에서 빠르게 이동하기 때문에 정지궤도 위성에 비해 더 큰 도플러 주파수를 갖는다. 이번 장에서는 LoS 확률뿐만 아니라 경로 손실, shadow fading 등 위성통신 채널 모델링에서 필수적으로 고려해야 할 요소들을 다룬다.

위성통신 시스템의 채널 모델링은 3GPP 38.901 기술 보고서(TR)의 지상 모델[3]에 더해, 위성 궤도, 경사도, 도플러 시프트, 대기, 섬광 등 위성 채널의 특징들을 추가로 고려한 모델로 구성된다.

나. 경로 손실

위성과 지상 터미널 간의 신호 경로는 다양한 형태의 감쇄를 겪으며, 경로 손실(Path Loss, PL)은 여러 경로 손실 요소들의 합으로 구성된다.

$$PL = PL_b + PL_e + PL_g + PL_s$$

여기서, PL 은 총 경로 손실이며, PL_b 는 기본 경로 손실, PL_e 는 건물 진입 손실 PL_g 는 대기 가스로 인한 감쇄, PL_s 는 이온권 또는 대기권 섬광으로 인한 감쇄이다.

기본 경로 손실은 거리로 인한 감쇄와 주변 건물 및 지상의 물체에 의해 발생하는 감쇄를 모델링한다. 이 기본 경로 손실에 더해, 총 경로 손실은 건물 내부 진입으로 인한 손실, 대기 가스 및 이온권, 대기권 섬광으로 인한 손실을 포함하여 모델링된다.

다. 도플러 편이

저궤도 위성은 지상에서 볼 때 고정된 것처럼 보이는 정지궤도 위성과 달리 매우 빠르게 이동한다. 따라서 저궤도 위성 채널의 특성을 이해하기 위해서는 도플러 편이의 영향을 고려해야 한다. 도플러 편이는 송신기와 수신기 간의 상대적인 속도로 인해 신호 도착 시간이 변하면서 수신 주파수가 변하는 현상이다. 이 도플러 편이는 비지상 플랫폼의 상대 속도, 사용자 이동 속도, 그리고 반송파 주파수에 따라 변화한다.

저궤도 위성은 지상에서 관측할 때 빠르게 이동하므로, 위성과

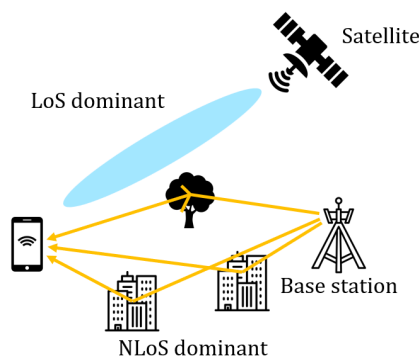


그림 2. 지상과 위성의 채널 환경

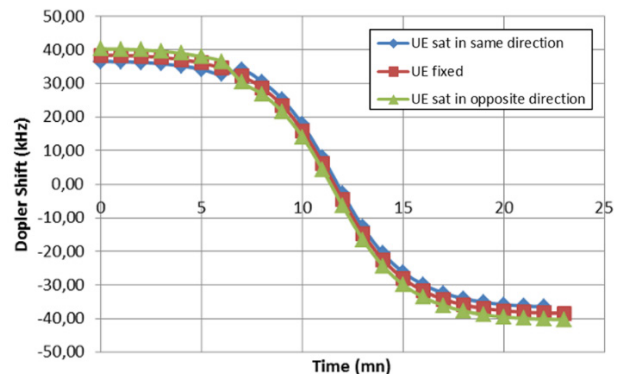


그림 3. 위성과 사용자의 상대적 위치에 따른 도플러 편이[2]

지상 터미널 모두에서 도플러 편이가 발생한다. 특히, 수신기가 항공기나 고속 열차에 있을 경우, 수신기의 자체 속도로 인해 추가적인 도플러 편이가 발생할 수 있다. 정지궤도 위성의 경우 도플러 편이는 주로 사용자의 속도에 의해 발생하는 반면, 저궤도 위성에서는 위성의 이동에 따른 도플러 편이가 사용자의 이동에 따른 것보다 훨씬 더 크게 나타난다.

또한, 도플러 편이는 지상 사용자가 위성을 관측하는 각도에 따라 달라질 수 있으며, 시간에 따른 변화를 <그림 3>을 통해 확인할 수 있다. 지상 사용자와 위성의 고도 각도가 90도에 가까울 때, 도플러 편이는 거의 0에 가깝게 나타난다. 이러한 도플러 효과를 보완하기 위해 위성의 위치와 궤도 정보를 활용해야 한다.

라. 안테나 게인

이번에는 위성통신 채널에서의 안테나 게인의 모델링을 살펴본다. N_t 개의 안테나를 가진 위성이 K 명의 사용자에게 송신하는 경우, 하향링크 위성 채널인 H 는 다음과 같이 모델링 된다[4].

$$H = B \circ Q$$

여기서 \circ 는 Hadamard 곱을 나타내며, B 는 수신 안테나 이득, 자유공간 경로 손실, 그리고 위성의 다중빔 안테나 게인을 포함하는 행렬이다. B 의 (n, k) 번째 요소는 다음과 같다.

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

여기서 G_R 는 사용자 터미널의 안테나 이득, d_k 는 k 번째 사용자와 위성과의 거리, λ 는 반송파의 파장, κ 는 Boltzmann 상수, T_{sys} 는 수신 시스템 잡음 온도, B_w 는 사용자 링크의 대역폭, $G_{n,k}$ 는 위성의 n 번째 빔에서 k 번째 사용자로의 안테나 이득을 나타낸다.

또한 Q 행렬은 비와 같은 기상현상으로 인해 발생하는 감쇄 효과와 신호의 위상 변화를 모델링한다. 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 가정하는 것이 가능하다.

2. 저궤도 위성의 송수신

가. 저궤도 위성의 송신

저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)의 송신 방법은 고도와 이동 속도로 인해 지상의 송신 시스템과 차별화된다. LEO 위성은 고도 각도와 궤도 정보에 따라 지상 터미널에 빔포밍을 통해 신호를 전송한다. 빔포밍 기술을 통해 특정 지역에 집중적인 신호 전송이 가능하며, 이는 신호 강도를 높이고 간섭을 줄이는 데 도움을 준다. 또한, LEO 위성은 빠르게 이동하므로 특정 지점에 머무는 시간이 짧다. 따라서 위성은 주기적으로 새로운 지상 터미널과 연결

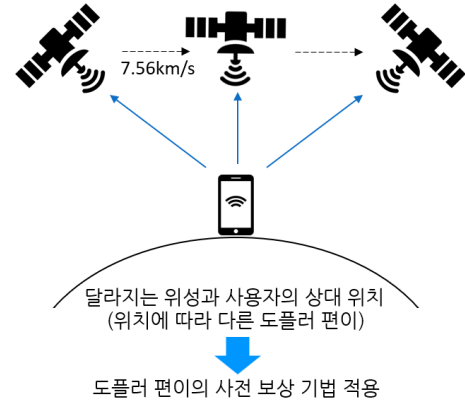


그림 4. 상대 위치에 따른 도플러 편이 사전 보상 기법

을 설정해야 하며, 이를 위해 빠른 핸드오프(handoff) 기술이 필요하다. 핸드오프 과정에서는 위성 간의 원활한 통신 전환이 중요하며, 데이터 손실을 최소화하기 위한 방법들이 적용된다.

또한, 도플러 편이에 의한 주파수 변동을 보상하기 위해 송신단에서 주파수 보상 기술이 사용된다. 위성이 빠르게 이동하므로, 송신 주파수는 지상 수신기의 위치와 이동 속도에 맞춰 실시간으로 조정되어야 한다. 이를 통해 수신기에서 발생하는 도플러 편이를 최소화하고 안정적인 통신을 유지할 수 있다. LEO 위성의 송신 시스템은 이러한 기술적 요소들을 포함하여, 높은 이동성과 다양한 환경 변화에 대응할 수 있도록 설계된다.

나. 저궤도 위성의 수신

저궤도 위성은 약 7.8 km/s의 속도로 공전하고 있으며, 지상국의 상공을 지나가는 시간은 위성의 궤도 및 고도에 따라 최소 5분에서 최대 20분 정도이다. 지상국에서 저궤도 위성하고 데이터를 송수신할 수 있는 시간을 최대한 활용하기 위해 저궤도 위성이 지평선에서 관측되는 순간부터 추적하면서 데이터를 수신하며, 데이터를 수신할 수 있는 횟수는 하루에 3번 정도이다[5]. 위성은 지구를 빠르게 공전하므로, 지상 수신기는 짧은 시간 동안 여러 위성으로부터 신호를 받아야 한다. 이를 위해 지상 수신기는 고도각과 위성의 위치 정보를 실시간으로 추적할 수 있는 능력이 필요하다. 고도각이 변할 때마다 최적의 신호를 수신하기 위해 지향성 안테나가 사용되며, 자동 추적 시스템이 이를 지원한다.

또한, 도플러 편이는 수신 주파수에 변화를 일으키므로, 지상 수신기는 이를 보상하기 위해 <그림 4>와 같이 주파수 오프셋(Carrier Frequency Offset, CFO) 조정 기술을 적용한다. 이는 위성의 궤도와 위치 정보를 활용하여, 예상되는 주파수 변화를 미리 보정하는 방식으로 이루어진다. 또한, 저궤도 위성 통신은 주변 환경에 따른 신호 감쇄를 고려해야 하며, 이를 위해 수신기

는 다양한 경로 손실과 감쇄 요소들을 보정하는 기능을 갖추고 있다. 이러한 보정 과정은 신호의 품질을 높이고 안정적인 데이터 전송을 가능하게 한다.

3.저궤도 위성 통신의 도전과제

이번 장에서는 저궤도 위성 통신과 관련된 주요 도전과제를 살펴본다. 저궤도 위성 통신 시스템은 신호의 품질과 안정성을 유지하기 위해 여러 가지 기술적 과제를 해결해야 한다. 대표적인 과제로는 위성통신 보안, 도플러 효과, 핸드오버 관리, 간섭 문제, 에너지 효율성, 안테나 배열 기법 등이 있다.

가. 위성통신 보안

저궤도 위성 통신 시스템의 보안은 매우 중요한 도전과제이다. 위성 통신은 <그림 5>에서와 같이 군사, 정부, 상업 등 다양한 분야에서 사용되므로 높은 수준의 보안이 요구된다. 위성 통신 시스템은 신호의 도청, 위변조, 재밍(Jamming) 등의 보안 위협에 노출될 수 있다. 이를 방지하기 위해 강력한 암호화 기술과 인증 메커니즘이 필요하며, 보안 위협에 대한 실시간 감시와 대응 시스템이 구축되어야 한다.



그림 5. 차세대 위성통신망의 응용 분야

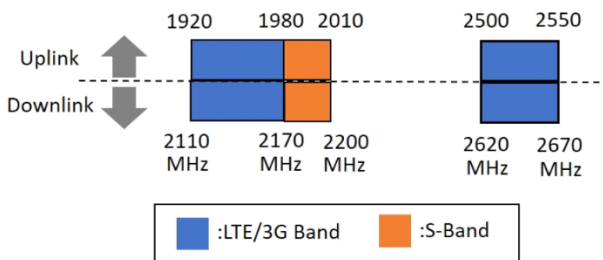


그림 6. NTN의 S 밴드와 LTE/3G 밴드의 주파수 공존

나. 도플러 효과

저궤도 위성은 빠르게 이동하므로, 도플러 효과가 발생한다. 도플러 효과는 송신기와 수신기 사이의 상대적인 속도 때문에 신호 주파수가 변하는 현상으로, 이는 통신 품질에 큰 영향을 미친다. 또한, 저궤도 위성 통신에서 사용하는 주파수 대역은 주로 Ka 밴드 또는 S 밴드이다. 특히 S 밴드 상향링크(1980~2010 MHz)는 <그림 6>에서와 같이 LTE/3G 대역과 인접해 있어 주파수 공존성을 필수적으로 고려해야 한다. 위성과 지상 수신기 간의 도플러 편이를 보상하기 위해서는 도플러 편이를 사전에 보상해주는 CFO 조정 기술이 필요하다.

다. 핸드오버 관리

저궤도 위성의 빠른 이동으로 인해 지상 단말기는 자주 핸드오버를 해야 한다. 핸드오버는 한 위성에서 다른 위성으로 연결을 전환하는 과정으로, 빈번한 핸드오버는 통신의 연속성을 유지하는 데 어려움을 초래할 수 있다. 따라서 핸드오버 과정이 원활하게 이루어지도록 효율적인 핸드오버 전략이 필요하다. 또한, 많은 단말기가 동시에 핸드오버를 진행하면 시스템 부하가 증가할 수 있으므로 이를 관리할 수 있는 기술적 방안이 요구된다.

라. 간섭 문제

저궤도 통신 시스템에서는 위성의 고도에 따른 3D 네트워크 간섭을 고려해야 한다. 위성이 높은 고도에 있을수록 LoS 성분이 강해지고, 넓은 빔 폭으로 인해 셀 간 간섭이 증가할 수 있다. 또한, 위성의 빠른 이동으로 인해 빔 간의 중첩이 발생할 가능성이 있다. 이러한 간섭 문제를 해결하기 위해 GEO(Geostationary Earth Orbit)와 LEO 위성을 결합한 계층적 네트워크 구조를 활용하거나, 협력 빔포밍과 같은 협력 통신 방법을 도입하는 것이 효과적이다.

마. 에너지 효율성

저궤도 위성 통신 시스템에서 에너지 효율성은 중요한 문제로 대두된다. 위성은 태양광 패널을 통해 에너지를 수집하고 저장하는 등 제한된 전력 자원을 가지고 있으며, 효율적인 전력 관리가 필수적이다. 이를 위해 위성 통신 시스템은 전력 소모를 최소화할 수 있는 효율적인 전송 기술과 전력 제어 메커니즘을 개발해야 한다. 에너지 효율성을 높이기 위해서는 저전력 통신 프로토콜을 사용해야 한다. 또한, 네트워크 트래픽을 관리하여 불필요한 데이터 전송을 줄이고, 데이터 압축 기술을 사용하여 전송 데이터를 최소화하는 방법도 고려할 수 있다. 지상 단말기의 배터리 수명을 연장하기 위해 에너지 효율적인 프로토콜과 알고리즘을 필요로 한다.

바. 안테나 배열 기법

저궤도 위성 통신 시스템은 데이터 센터, 코어 네트워크, 게이

트레이를 통한 피더 링크, 위성 간 링크, 지상 고정국 또는 모바일 단말과의 서비스 링크 등 다양한 채널 링크를 포함한다. 위성 간 링크는 FSO(Free Space Optics) 또는 밀리미터파 기반 채널이 고려될 수 있으며, 피더 링크와 서비스 링크는 경사각에 따라 주로 LoS 성분이 주를 이룬다. 이러한 LoS 환경에서도 고정형 송수신 MIMO 안테나 계인을 얻을 수 있는 안테나 배열 기법 또한 존재한다[6]. 하지만 빠르게 이동하는 저궤도 위성의 특성상, 피더 링크와 서비스 링크 모두에서 LoS MIMO 계인을 최대화하기 위해 저궤도 위성의 궤적을 고려한 정확한 우주 전파 환경 및 채널 모델링이 필요하다.

III. 국내외 연구 동향

본 장에서는 저궤도 위성 통신과 관련된 국내외 연구 동향에 대해 알아본다.

1. 국외 연구 동향

가. 위성 통신 보안

- 독일 리바다는 지상 게이트웨이 연결 없이 100% 위성 간 통신을 통해 보안성 높은 서비스를 제공하는 것을 초점으로 두고 있으며, 2028년까지 총 600개의 저궤도 위성을 발사하고 위성간 레이저 통신을 통해 글로벌 point to point 통신망을 구축할 예정이다. 또한, 최근 국내기업 KT와 협력하여 군, 정부, 금융 분야 등 보안에 민감한 고객을 중심으로 고속의 위성망을 제공할 계획이다.
- 중국 하얼빈 공업대학에서는 유연하고 더욱 지능적으로 저궤도 위성 사이의 간섭을 억제하도록 하기 위해, AI 기술을 활용하는 연구를 진행하였다[7]. 전 세계적으로 위성 커버리지 퀄리티에는 큰 차이가 있기 때문에, AI를 이용하기 위해서는 커버리지 영역 내에서 주요 트래픽 흐름, 서비스 유형 및 channel-to-interference ratio (CIR)를 기록하고 학습 및 분석을 해야 한다. 또한, 지상에서의 풍부한 컴퓨팅 자원과는 달리, 우주에서의 제한된 상황에서도 효율적인 운용이 가능한 저복잡도 우주 기반 AI 알고리즘 개발이 필수적으로 진행되어야 함.
- 호주 뉴사우스웨일스 대학에서는 현대 반도체 기술이 나노 스케일로 진화하면서 양자 물리학의 영역에 들어서게 되었고, 이는 기존의 무선 시스템을 완벽히 보안된 양자 통신 시스템으로 전환하려는 동기를 바탕으로, continuous variables(CV) 양자통신을 활용하여 보안성을 높이려는 시도를 보였다[8]. 특히, 복제 불가능성 정리와 같은 양자 물리

학 원리에 기반하여, 무조건적인 보안을 제공할 수 있으며, 현재는 소형 위성 및 새로운 양자 중계기 기술의 도입으로 위성 기반 양자 통신의 실용화 가능성이 커졌다.

나. 지상-위성 통합 네트워크

- 중국 자오퉁 대학에서는 이중 지상국 및 위성 네트워크의 효율적인 통합을 위해, 유연한 네트워크 아키텍처 HetNet을 제안하였다[9]. HetNet은 Locator/ID 분리과 정보 중심 네트워킹을 결합하여, 일반적인 네트워크 아키텍처를 구축하는데, 이를 통해 이중 네트워크 융합, 라우팅 확장성, 이동성 지원, 트래픽 엔지니어링, 효율적인 정보 전달을 달성할 수 있을 것으로 보고 있다.
- 사우샘프턴 대학에서는 멀티캐스트 전송에서 발생하는 in-band interference를 효율적으로 완화시키기 위해, cloud-based terrestrial-satellite networks (CTSN) 개념을 이용하여 위성국과 지상국이 각자의 무선 또는 유선 backhaul link를 통해 클라우드 컴퓨팅 기반 중앙처리장치에 연결되도록 하는 연구를 진행했다[10]. 이러한 중앙처리장치에서 Imperfect CSI를 가정하여 더욱 practical하게 CTSN을 위한 빔포밍 알고리즘을 개발하였다.

다. 위성 constellation

- OneWeb은 전세계에 원활한 브로드밴드 인터넷 접속 서비스를 제공하기 위해, 초기에는 1,200km 고도에서 각각 87.9도로 기울어진 12개의 원형 궤도와 55도로 기울어진 원형궤도 평면에 716개의 satellite constellation을 설계 하였다. 현재는 5,656개의 위성을 추가하여 인구가 밀집된 지역을 광범위하게 커버하도록 노력하고 있으며, 지상국과의 연동을 통해 유저들이 약 100Mbps의 속도를 달성할 수 있을 것으로 예상하고 있다.
- SpaceX는 위성 constellation을 Ka 밴드와 Ku밴드에서 4,409개의 위성으로 배치할 계획을 세웠으며, V밴드에서 글로벌 고속 저비용 인터넷 서비스를 제공하기 위해 추가로 7,519개의 위성을 계획하고 있다. 현재, 테스트 위성 데이터 및 기타 요소를 고려하여 고도가 328km에서 614km 사이인 75개의 궤도 평면을 목표 궤도로 설정했으며, '스타링크 제너레이션 2 (Gen 2)'라는 이름으로 E밴드를 포함하여 30,000개의 위성을 추가할 계획이다.

2. 국내 연구 동향

국내 위성 통신 분야의 투자는 주로 정부 주도로 이루어지고 있으며, 특히 과학기술정보통신부는 2031년까지 총 14대의 LEO 위성을 발사하고 저궤도 위성을 포함한 10대 전략기술에

2025년까지 2,000억 원을 투자한다고 발표하였다[11].

가. 위성 통신 보안

- 일반적으로 암호화에 있어서 advanced encryption standard (AES) 을 사용하는데, 이는 전송파워와 비교될만큼 큰 전력을 소모하고, 물리 계층 보안 기술을 사용하기 위한 도청자의 채널 정보를 획득하는 것이 어렵다. 따라서, 대구경북과학기술원에서는 다수의 도청자가 존재할 수 있는 위성 환경에서 전송 및 컴퓨팅 파워를 동시에 고려하여, 암호화 신호와 비암호화 신호를 활용한 위성 통신 보안 기법을 제안하였다[12].

나. 지상-위성 통합 네트워크

- SK 텔레콤에서는 5G 이동통신 상공망과 저궤도 위성망을 결합하여 도심항공교통 (UAM) 기체에 끊임없는 통신 서비스를 제공하는 것을 목적으로, UAM 안전 운행을 위한 다중망 연동 기술 개발을 추진하고 있다. 해당 기술은 5G와 위성 신호를 연동하여 한쪽이 중단되어도 통신 서비스를 유지할 수 있는 항공망 안정성 강화 기술이다. 구현에 있어서, 실증 비행항로 구간엔 5G 안테나를 위로 쏘아올린 UAM용 상공망을 구축한 다음, 저궤도 위성망을 연동하여 기지국 전파를 수신할 수 없는 음영지역까지 커버리지를 확보할 수 있다.

- 한국과학기술원에서는 유동적 상황에 대응 가능한 통합적인 통신 기법 개발을 위해 이중 위성군 네트워크 요구사항을 조사하고 지상-저궤도 통합위성망 운용과 관련한 적합한 구조 설계 방향성을 제시하였다. 또한, 제한된 환경 내에서 통신 성능을 높이고, 위성 및 지상국에서의 다양한 통신 링크에 적용하기 위해, 지상-저궤도 통합 위성망에서의 채널 추정 및 데이터 송수신 기법을 최적화하였다[13].

다. 저궤도 위성 네트워크 분석

- 한국과학기술원에서는 저궤도 위성 네트워크 모델의 커버리지 성능을 평가하기 위해서 푸아송 포인트 프로세스 (PPP)를 이용한 모델링을 이용해 위성 네트워크의 커버리지에 대해 분석하였다. 이러한 연구는 위성 네트워크에서의 위성 배치 전략에 대한 핵심 시스템의 통찰력을 제공하였다[14].

3. 국제 표준화 동향

NTN 표준화 연구는 Release 15의 Study Item으로 승인되면서 본격적으로 진행되었으며, 이 Study Item에서는 NTN의 채널 모델을 연구하여 배치 시나리오와 매개 변수를 정의하고 5G NR에 미치는 잠재적 영향을 식별하였다[15]. 해당 논의 결과는 기술 보고서 TR 38.811에 반영되어 있다[2]. 또한, NTN 프로

토콜과 같은 규격 이슈는 Release 16 Study Item으로 승인되어 TR 38.821에 정리되었다. 최근 NTN은 Release 17의 Work Item으로 승인되었으며, 정지궤도 위성, 저궤도 위성, NTN 기반 사물인터넷(IoT) 시나리오를 다루고 있다[16].

III. 결 론

본고에서는 저궤도 위성 통신의 특징, 송수신 방법과 최근 연구 동향에 대하여 살펴보았다. 저궤도 위성 통신은 지상 기지국에 의존하지 않으며, 전 세계 커버리지를 확보해 지상국이 없는 지역에서도 신속한 통신을 제공하는 차세대 통신 수단으로 주목받고 있다. 저궤도 위성 통신의 주요 특징으로는 LoS 성분의 주도, 도플러 효과 등이 있으며, 이를 통해 높은 이동성과 다양한 환경 변화에 대응할 수 있다. 송수신 방법에서는 빔포밍 기술과 주파수 보상 기술이 중요하게 사용되며, 효율적인 핸드오버와 간섭 관리가 필수적이다. 또한, 에너지 효율성과 보안 문제도 중요한 도전과제로 부각되고 있다. 이러한 기술적 도전과제를 해결하기 위한 지속적인 연구와 혁신이 필요하며, 이를 통해 저궤도 위성 통신이 더욱 발전하고, 글로벌 커버리지를 제공하는 데 기여할 것으로 기대된다. 저궤도 위성 통신의 발전은 통신 인프라의 확장뿐만 아니라, 전 세계 모든 지역에서의 연결성을 향상시키는 중요한 역할을 할 것이다.

Acknowledgement

참 고 문 헌

- [1] Samsung Research, "6G: The Next Hyper Connected Experience for All," Seoul, 2020.[Online]. Available: <https://research.samsung.com/next-generationcommunications>.
- [2] 3GPP TR 38.811 v15.4.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," Sep. 2020.
- [3] 3GPP TR 38.901 v16.1.0, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16)," Dec.

2019.

- [4] 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.
- [5] F. Peter, S. Graham, and S. John, Spacecraft Systems Engineering, New York, NY, John Wiley & Sons, 2011.
- [6] R. T. Schwarz, et al., "MIMO applications for multibeam satellites," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 65, no. 4, pp. 664-681, Dec. 2019.
- [7] Q. Y. Yu, H. C. Lin, and H. H. Chen, "Intelligent radio for next generation wireless communications: An overview," IEEE Wireless Commun., vol. 26, no. 4, pp. 94-101, Aug. 2019.
- [8] Hosseinidehaj, Nadasadat, et al. "Satellite-based continuous-variable quantum communications: State-of-the-art and a predictive outlook." IEEE Communications Surveys & Tutorials 21.1 (2018): 881-919.
- [9] Feng, Bohao, et al. "HetNet: A flexible architecture for heterogeneous satellite-terrestrial networks." IEEE network 31.6 (2017): 86-92.
- [10] Zhang, Hongming, et al. "Multicast beamforming optimization in cloud-based heterogeneous terrestrial and satellite networks." IEEE Transactions on Vehicular Technology 69.2 (2019): 1766-1776.
- [11] 차홍설, et al., "저궤도 군집 위성 간 통신 현황 및 주요 기술 동향", 한국통신학회논문지 47.10 (2022): 1508-1518.
- [12] 전수현, et. al., "위성 통신 보안을 위한 온보드 전송 및 계산 전력 최적화", 한국통신학회 학술대회논문집 (2023): 1253-1254.
- [13] 김민제, et al., "이종 위성군 지원을 위한 우주 환경 통신 아키텍처 설계." 한국항공우주학회 학술발표회 초록집 (2023): 53-53.
- [14] 최은성, et al., "저궤도 위성 네트워크 커버리지 분석 서베이", 한국항공우주학회논문집, 2024, 478-479.
- [15] RP-17017, "Study on NR to support Non-Terrestrial Networks," 3GPP RAN#75, Mar. 2017.
- [16] RP-193144, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)," 3GPP RAN#86, Dec. 2019.

약 력



최은성

2022년 울산과학기술원 전기전자공학과 학사
2024년 울산과학기술원 전기전자공학과 석사
2024년~현재 한국과학기술원 전기전자공학과 박사
관심분야: 무선 통신, Physical Layer Security, ISAC 통신



유승형

2022년 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 학사
2022년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 석사
관심분야: 무선 통신, Full duplex, ISAC 통신



최진석

2014년 연세대학교 전기전자공학부 학사
2014년 연세대학교 경영학부 학사
2016년 The University of Texas at Austin, Electrical and Computer Engineering, M.S.
2019년 The University of Texas at Austin, Electrical and Computer Engineering, Ph.D.
2019년~2020년 Senior System Engineer, Qualcomm Wireless R&D
2020년~2023년 울산과학기술원 전기전자공학과 조교수
2023년~현재 한국과학기술원 전기및전자공학부 조교수
관심분야: 무선 통신, ISAC 통신, Full duplex, RSMA, Physical Layer Security, mmWave 통신, 시가반 통신, IoT 통신