

연구논문

항재밍/저피탐 웨이브폼이 적용된 군 초소형 위성 통신체계 소개

이주형¹, 박해원², 정길수^{1†}

¹국방과학연구소

²한화시스템

Introduction of Military Nanosatellite Communication System Using Anti-Jamming and Low Probability of Detection (LPD) Waveforms

Ju Hyung Lee¹, Hae-Won Park², Kil Soo Jeong^{1†}

¹Agency Defense for Development, Daejeon 34186, Korea

²Hanwha Systems, Seongnam 13591, Korea



Received: March 30, 2023

Revised: April 20, 2023

Accepted: April 24, 2023

†Corresponding author :

Kil Soo Jeong

Tel : +82-42-821-2635

E-mail : ksjeong@add.re.kr

Copyright © 2023 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Ju Hyung Lee

<https://orcid.org/0009-0007-8318-3613>

Hae-Won Park

<https://orcid.org/0009-0006-5375-6065>

Kil Soo Jeong

<https://orcid.org/0000-0001-7824-6914>

요약

기존의 군 위성 통신체계는 적의 재밍 공격 및 신호 수신을 대비한 특수한 통신 탑재체가 장착된 정지궤도 통신위성을 기반으로 하였는데, 무인체계 등 새로운 무기체계가 등장함에 따라 신규 통신 수요를 충족시킬 저궤도 위성 기반의 위성 통신체계의 필요성이 점점 커지고 있다. 본 논문은 큐브 위성 기반의 통신체계에 적합한 다양한 웨이브폼 기술과 미래 군 초소형 위성 통신체계의 운용 개념에 대해 소개한다.

Abstract

The existing military satellite communication system was based on geostationary satellites equipped with special communication payloads against enemy's jamming and signal reception. With the advent of new weapon systems such as unmanned systems, the need for low-orbit satellite-based communication system is increasing. This paper introduces various waveform technologies suitable for cube satellite-based communication system and the operational concept of a future military nanosatellite communication system.

핵심어 : 큐브 위성, 나노 위성, 웨이브폼, 항재밍, 저피탐, 군집

Keywords : cube-satellite, nanosatellite, waveform, anti-jamming, low probability detection, cluster

1. 서론

기존의 군 위성통신체계는 육해공군이 같이 사용하는 정지궤도 통신 위성 기반의 체계였다. 하나의 정지궤도 통신위성으로 육해공군의 요구사항을 반영해야 하기 때문에 다양한 통신 요구사항이 하나의 정지궤도 통신위성에 집중됨에 따라 정지궤도 위성의 통신 탑재체가 복잡해질 수 밖에 없었고 정지궤도 위성의 대형화가 불가피하였다[1]. 하지만 최근 인명을 중시하고

출생률 저하에 따른 병력감소 등의 사회 변화에 따라 로봇 및 AI로 대변되는 다양한 무인체계가 군에 도입되면서 군 통신위성 운용개념이 변화하고 있다. 새로운 무인체계가 나올 때마다 해당 무인체계의 운용에 필요한 새로운 통신 수요가 지속적으로 발생하고 있는데 기존의 정지궤도 통신위성만으로는 새로운 무인체계의 통신 수요를 만족시키기에는 매우 부족하여 새로운 위성 통신체계가 필요함에 따라 저궤도 위성통신에 대한 관심이 커지고 있다. 또한, 군이 운용하는 무인체계는 각 무인체계의 운용개념에 따라 통신 요구사항이 다양한데 예를 들어서, 근접 전투를 수행하는 전투 무인체계는 높은 수준의 이동성과 실시간 통신 기능을 요구하는 반면에 보급, 군수, 부대 관리 등의 전투지원 무인체계는 통신 연결성이 단순하고 실시간성이 크게 요구되지 않을 수 있다. 이와 같이 매우 상반된 요구사항의 통신소요를 기존과 같이 하나의 저궤도 통신위성에 반영하게 되면 위성의 기술적 난이도 및 제작 비용이 기하급수적으로 증가하게 되는데, 고도 500 km 저궤도 통신위성이 한반도 상공에서 통신 서비스를 제공할 수 있는 시간이 약 5-7분에 불과한 상황에서 경제적 부담이 커질 수 밖에 없다. 특히 저궤도 통신위성의 경우, 통신 지속시간 연장을 위해 다수의 위성 발사가 불가피하므로 실용적이며 높은 가성비의 저궤도 통신위성 개발 및 제작이 요구됨에 따라 가성비가 우수한 큐브 통신위성의 활용에 대해 관심이 높아지고 있으며[2,3], 해외 선진국은 이미 상용 서비스를 준비하고 있다[4,5]. 본 논문에서는 국방과학연구소가 수행 중인 큐브 통신위성 과제를 소개하고 미래 큐브 통신위성의 군 활용성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발(1단계)

국방과학연구소는 2020년 11월부터 2024년 12월까지 미래도전과제를 통해 “초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발” 과제를 수행 중이다. 미래도전과제는 소요가 결정되지 않거나 소요가 예정되지 않은 무기체계에 적용을 목표로 도전적이고 혁신적인 신개념 기술을 연구 개발하는 과제이다. 본 미래도전과제에서는 Fig. 1과 같이 2대의 지상단말이 6U 형상의 큐브 통신위성을 통해 원격으로 드론을 운용하는 것을 고려하였으며, 1단계에서 제작된 6U 큐브 위성의 내부 구성은 Fig. 2와 같다.

본 과제의 1단계에서 개발된 트랜시버와 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발 결과는 다음과 같다. 여기서 항재밍 웨이브폼은 적의 의도적인 방해 신호(재밍)를 극복할 수 있는 통신 기능이 반영된 신호 방식을 의미하며 저피탐 웨이브폼은 적의 아군의 신호를 탐지할 가능성을 낮춘 신호 방식을 말한다.

하향링크는 패킷 통신에 적합한 scrambling 기반 대역확산 기술을 적용한 저피탐 웨이브폼을 구현하였다. 전송속도 2.4 kbps 이상, DBPSK(differential binary phase shift keying) 변조방식, 채널코딩은 RS(reed solomon) 부호와 CC(convolutional code)를 함께 사용하며, Burst 트래픽이 아닌 continuous 트래픽인 상황을 이용하여 coarse carrier offset은 피드백 형식의 L&R(luise and reggiannini algorithm) 방식을 적용하여 도플러 오차 50 kHz까지 추정 가능하였다.

상향링크는 주파수 도약 방식의 항재밍 웨이브폼을 구현하였다. 하향링크의 수신 동기를 기반으로 주파수 오차를 추정한다. 추정된 주파수 오차는 상향링크 전송 시 기저대역에서 역보정하여 송신을 수행한다. 통신 가능 시간이 짧은 저궤도 위성통신 시스템에서 GPS 기반의

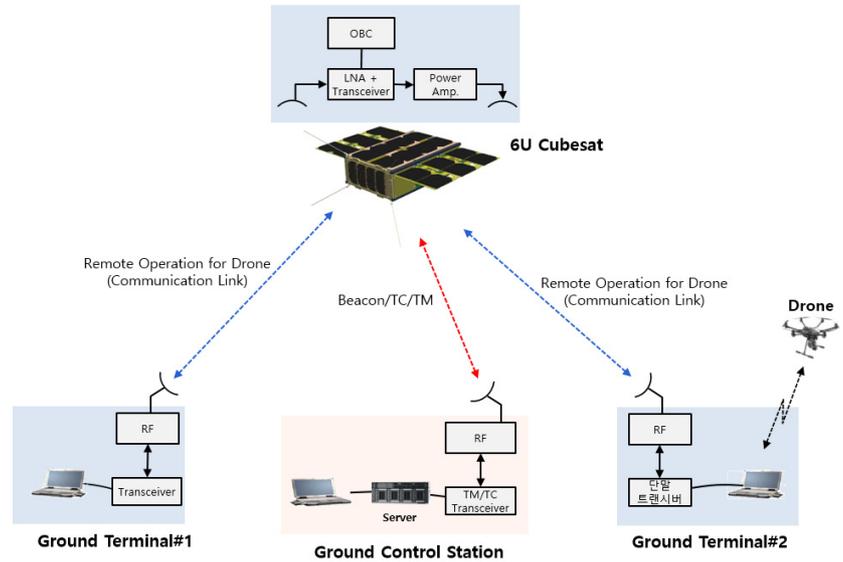


Fig. 1. Operation concept of the nanosatellite communication system. OBC, on-board computer; LNA, low noise amplifier; TC, telecommand; TM, telemetry; RF, radio frequency.

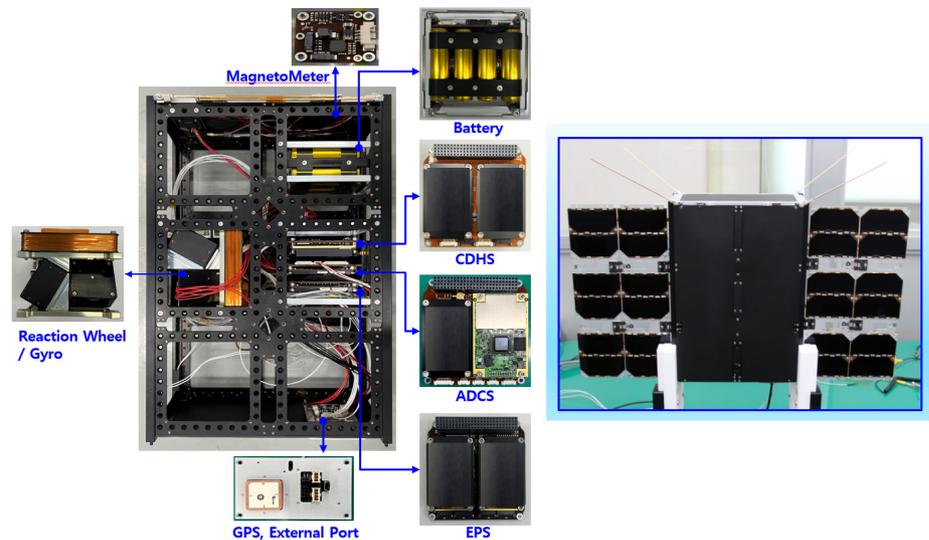


Fig. 2. Internal configuration of nanosatellite. CDHS, command and data handling subsystem; ADCS, attitude determination and control subsystem; EPS, electric power subsystem.

동기화를 구현하여 빠른 초기 동기화가 가능하다. Fig. 3과 같이 하향링크 동기채널을 통해 GPS의 1PPS 기준신호에 맞춰 연속적으로 송신한다. 각 지상단말은 correlation 및 역 확산 코드 등의 하향링크 동기화를 수행한다.

Fig. 4와 같이 초소형 통신위성의 OBP(on-board processor)의 특성을 고려하여 상향링크와 하향링크 채널 환경을 독립적으로 분리하여 통합시험 환경을 구성하였다. 여기서 OBP는 위성에 탑재되는 통신 탑재체를 말하며, 본 과제의 OBP는 수신된 RF 신호를 지상에서 필요한 수신 대역에 맞게 주파수 변환과 전력 증폭하여 재전송하는 bent pipe 구조의 아날로그 방식의 수동 중계기 역할 외에 기존의 위성 중계기가 수행할 수 없었던 변복조, 부호화 및 에

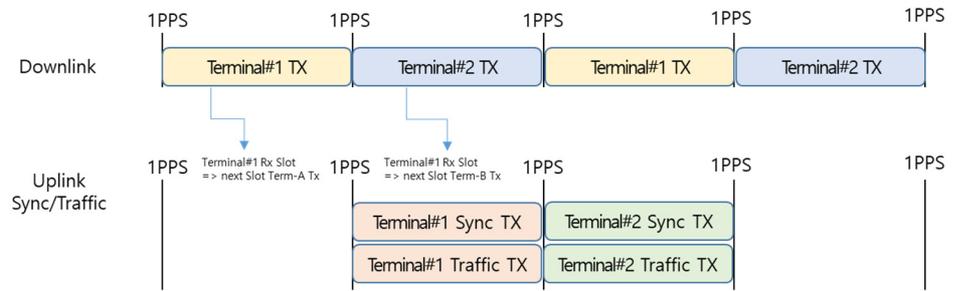


Fig. 3. Synchronization of the nanosatellite communication system. TX, transmit.

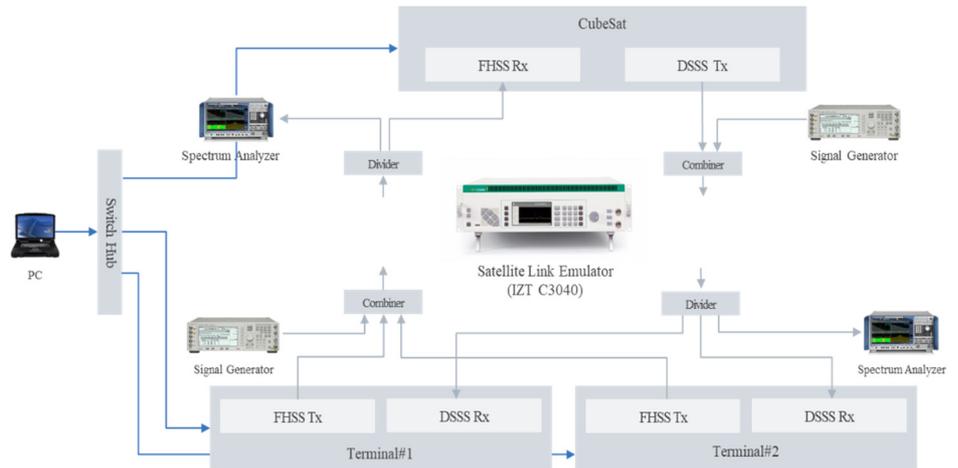


Fig. 4. Verification of the nanosatellite communication system.

러 정정 등의 디지털 신호처리를 수행하는 차세대 위성통신 기술이다. 항재밍/저피탐 웨이브폼의 검증 및 성능 분석을 위해 위성채널 모의기와 신호발생기를 통해 초소형 통신위성 궤도와 동일한 환경을 제공하고 재밍 신호를 모의한다. 다음과 같은 시험환경에서 초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발의 트랜시버 설계 및 제작에 대한 검증과 웨이브폼 성능분석에 대한 결과를 도출하였다.

1단계 개발을 통해 저궤도 통신위성에서 기본적으로 요구되는 도플러 주파수 보정 기술을 확보하고 상향링크 신호의 수신 및 하향링크 신호 생성을 수행하는 full-OBP 기반으로 상향링크를 분리하여 상향링크는 적의 재밍 공격에 대응할 수 있는 주파수 도약 방식의 항재밍 웨이브폼을, 하향링크는 적의 신호 수신을 고려한 저피탐 웨이브폼을 적용하였다. 또한, OBP 기반의 저궤도 통신위성에 맞게 지상단말과 위성 간 interactive 기반의 동기획득 기술을 개발하였다.

3. 초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발(2단계)

본 과제의 2단계에서는 1단계 개발 결과를 바탕으로 상향링크에 NOMA(non-orthogonal multiple access)를 적용하여 2개의 지상단말 신호를 동일 주파수에 중첩시키고, 위성 OBP에서 순차적 간섭제거기법(successive interference cancellation, SIC)을 통해 각 신호를 수신하는 기술을 구현하고자 한다. Fig. 5는 2단계에서 상향링크 신호의 위성 OBP 수신 개념을 보여주는데, 위성 OBP는 strong user의 신호를 먼저 수신 및 복조한 후에 수신된 상향링크

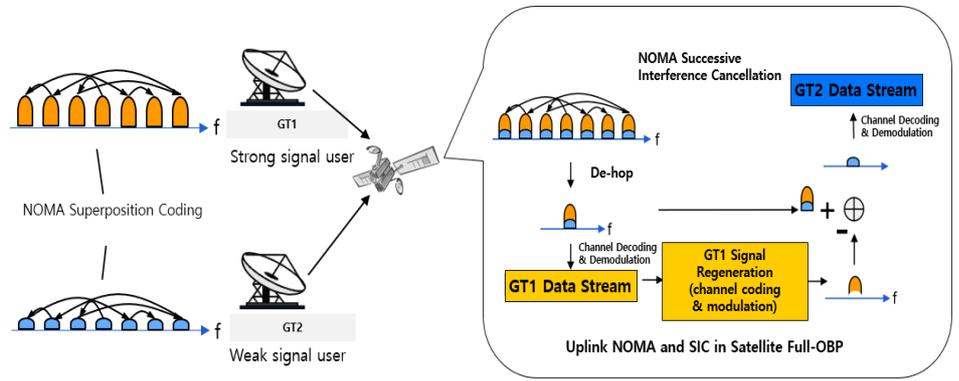


Fig. 5. Uplink NOMA and SIC in nanosatellite. NOMA, non-orthogonal multiple access; SIC, successive interference cancellation.

링크 신호에서 복조된 데이터를 기반으로 재생산된 strong user의 신호를 감산한 후에 weak user의 신호를 수신하는 순차적 간섭제거를 수행한다. 이러한 수신 구조는 지상단말의 수가 많을수록 위성 OBP의 복잡도가 높아지기 때문에 큐브 위성체계는 한정된 주파수 대역에서 제한된 수의 지상단말 간 고속 데이터 전송이 요구되는 상황에서 적합할 것으로 판단된다[6].

다음으로 2단계에서는 저궤도 통신위성의 이동에 따른 양각 변화를 고려하여 1단계에서 개발된 하향링크 저피탐 웨이브폼에 물리계층 보안 기술을 추가하고자 한다. 저궤도 위성은 한반도 상공을 빠른 속도로 통과하는데 Fig. 6과 같이 위성의 위치에 따라 지상단말과 위성 간 양각이 지속적으로 변화한다. 일반적으로 양각이 클수록 위성/단말간 경로가 짧아져서 수신신호의 레벨이 높아지는데 위성의 위치에 따라 적의 수신기에 높은 레벨의 신호가 수신되는 시간 구간에서는 아군의 신호를 탐지할 가능성이 높아진다. 이러한 상황은 저궤도 위성에 발생되는데 참고로 기존의 정지궤도 통신위성은 위성의 위치가 고정되어 있고, 북한에 위치한 단말의 양각은 남한에 위치한 단말의 양각보다 항상 작기 때문에 일반적인 저피탐 웨이브폼 적용이 가능하였다. Fig. 7은 2단계에서 개발할 물리계층 보안 기술의 개념도이다. 초소형 위성의 통신 탑재체는 하향링크 데이터 신호에 의도적 간섭신호를 추가하여 송신하고 지상단말은 해당 간섭신호를 제거한 후에 데이터 신호를 수신한다. 적 지상단말은 의도적 간섭신호에 대한 사전정보를 가지고 있지 않기 때문에 의도적 간섭신호 제거가 불가하여 높은 양각

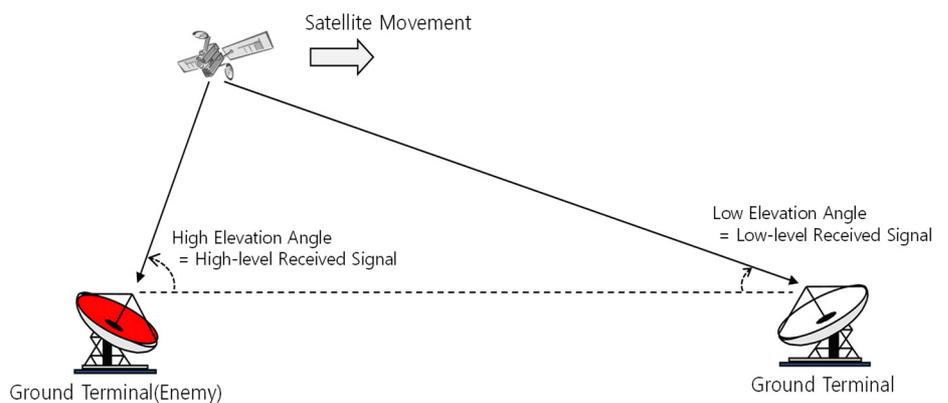


Fig. 6. Variation of elevation angle due to satellite movement.

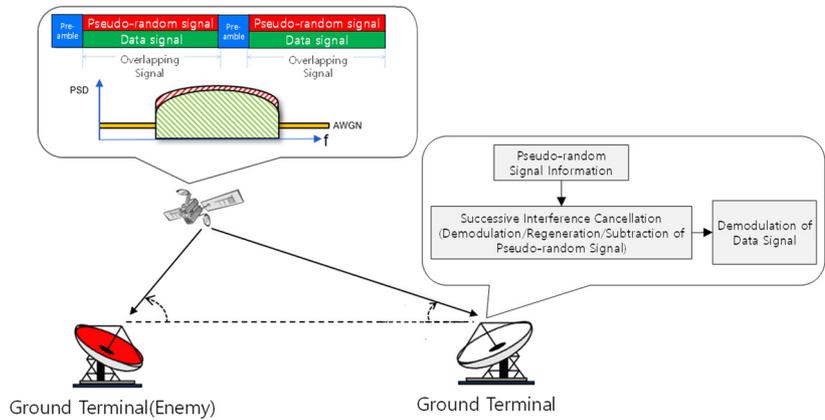


Fig. 7. Concept of physical layer security in downlink.

구간에서 수신 신호의 레벨이 크더라도 데이터 신호를 수신할 수 없게 된다. 저궤도 위성의 특성을 감안하여 기존의 저피탐 개념에 물리계층 보안을 추가하여 새로운 방식의 신호 보호 기법을 개발하고자 한다[7].

4. 미래 군 초소형 위성 통신체계(안)

미래에 초소형 통신위성이 군 위성통신체계에 적용하기 위해서는 초소형 위성의 기능 및 성능상의 한계를 극복하여 군 요구사항을 충족할 수 있어야 하는데 대용량의 고속 데이터 통신에 요구되는 충분한 전송속도 확보가 우선 요구된다. 통신 전송속도를 높이는 다양한 방안이 존재할 수 있는데 초소형 통신위성의 구조적 특징에 주목할 필요가 있다. 초소형 위성은 탑재체 공간 제약으로 인하여 위성의 통신 및 RF 기능이 제한적이다. 반면 지상단말은 초소형 통신위성에 비해 고속의 데이터 통신을 감당할 수 있는 하드웨어 적용이 상대적으로 용이하다. 이로 인하여 링크버짓 상에서 하향링크가 상향링크보다 더 열악하다[8].

이러한 구조적 한계를 극복하고자 Fig. 8과 같이 하향링크 신호를 여러 초소형 통신위성이 분할하여 전송하는 상하향링크 비대칭 전송 구조를 생각해 볼 수 있다. 군집 초소형 통신위성

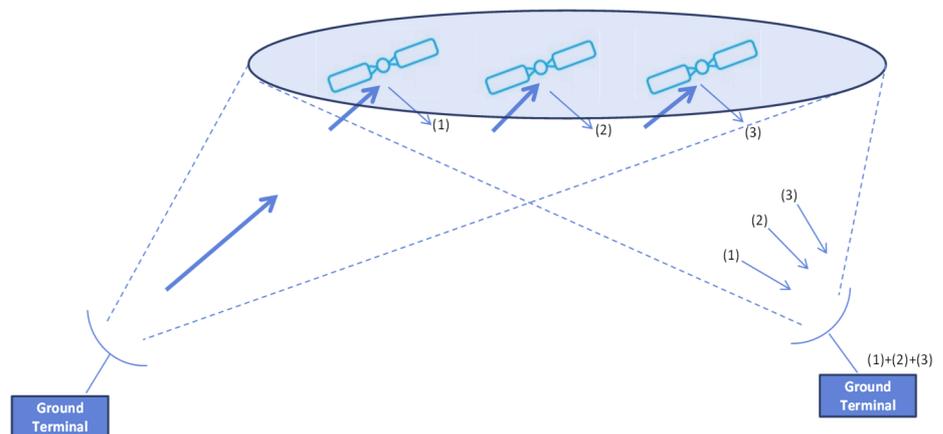


Fig. 8. Concept of up/downlink asymmetry transmission in future nanosatellite communication system.

은 지상단말로부터 고출력/고속의 상향링크 신호를 수신하고 각 초소형 통신위성은 사전에 정해진 규칙에서 따라 상향링크 수신 데이터를 1/N씩 분할하여 상향링크 대비 1/N배의 전송속도로 하향링크 신호를 생성하여 전송한다. 지상단말은 N개의 초소형 통신위성이 전송하는 하향링크를 모두 수신하여 각각 하향링크 데이터를 합하여 원래의 데이터를 복원한다. 이러한 상하향링크 비대칭 전송을 통해 개별 위성이 전송하는 하향링크의 전송속도를 낮춤으로써 초소형 통신위성에서 하향링크의 링크마진 부족을 극복하면서 전체 전송속도를 높일 수 있다[7].

다음으로 적 재밍 공격에 대한 항재밍 기능 및 성능 개선이 요구된다. 기존 정지궤도 위성의 경우, 특별한 재밍 제거 기법이 적용된 군 전용 탑재 중계기를 통해 높은 항재밍 성능을 얻을 수 있었다. 하지만 초소형 위성에서는 형상 제약으로 인하여 군 전용 중계기 탑재가 제한적이다. 이러한 문제점을 극복하고자 상향링크 빔 도약을 제안한다. 빔 도약은 송신신호가 도달하는 영역을 주기적으로 변경하는 것을 말하는데 Fig. 9는 상향링크 빔 도약의 예시이다. 한반도 상공에 A-D의 4개의 군집 위성 그룹이 존재하는데 적 지상단말이 군집 위성 그룹 C에 재밍 공격을 하고 있다고 가정한다. 이러한 상황에서 아군 지상단말은 상향링크 빔 도약을 통해 상향링크 신호를 중계할 군집 위성 그룹을 주기적으로 변경한다. 다시 말해서 지상단말 1과 2는 특정 시각에는 군집 위성그룹 A가 존재하는 위치(영역)으로 지상단말 안테나를 지향시켜 군집 위성그룹 A에 있는 초소형 통신위성을 통해 신호가 중계되도록 하고, 일정 시간이 경과한 후 지상단말 1와 2는 사전에 정해진 규칙에 따라 동시에 지상단말 안테나 지향 위치를 다른 군집 위성그룹의 위치로 변경하여 통신을 수행한다. 이와 같이 주기적으로 군집 위성그룹을 변경하게 되면 지상단말간 통신시간 중에서 적의 재밍 공격을 받는 군집 위성 그룹 C를 경유한 통신시간이 짧아지기 때문에 적 재밍의 영향성을 경감시키는 항재밍 효과를 기대할 수 있다[7].

지금까지 소개한 웨이브폼 기술을 종합하여 Fig. 10과 같은 미래 군 초소형 위성 통신체계의 운용 개념을 생각해 볼 수 있다. 지상단말은 사전에 공유된 임무 스케줄에 따라 자신이 운용할 시점까지 누적된 데이터를 고속으로 전송한다. 이와 유사한 개념으로 군집 위성도 사전

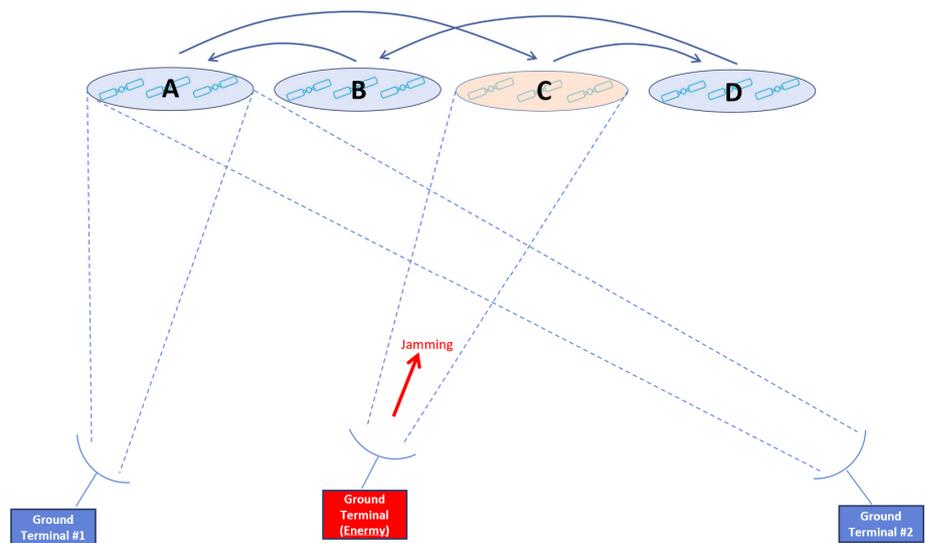


Fig. 9. Concept of uplink beam hopping in future nanosatellite communication system.

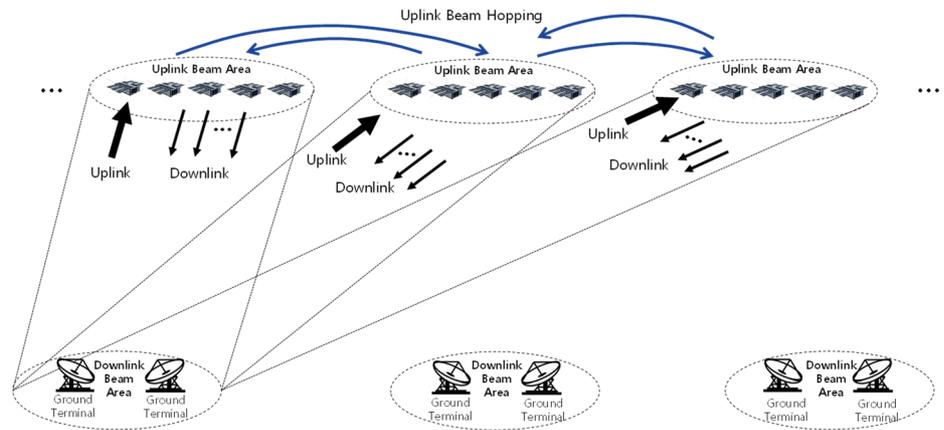


Fig. 10. Operation concept of future nanosatellite communication system.

에 공유된 임무 스케줄에 따라 한반도 진입 시, 자신의 하향링크 안테나 빔을 임무 스케줄에 따라 관심 지역으로 지향한다. 여기서 상향링크 빔 도약을 위해 복수의 군집 위성 그룹이 지상의 동일 지역에 하향링크 빔을 지향하게 되고 지상단말은 빔 도약을 통해 군집 위성 그룹을 주기적으로 변경한다. 시간이 경과하여 임무 스케줄에 따라 지상단말간 고속 데이터 통신이 종료되면 후속으로 한반도에 진입하는 군집 위성 그룹은 임무 스케줄에 따라 다음 임무를 수행할 하향링크 빔 영역을 지향하게 되고 해당 하향링크 빔 영역내 지상단말 간 고속 데이터 통신이 개시된다. 이러한 운용을 위해서 지상 관제국은 지상단말의 트래픽 소요, 과거 임무 수행 결과 및 미래 임무 수행 결과 예측 등을 바탕으로 수립된 임무 스케줄을 지상단말 및 군집 위성에 적절히 전달할 수 있어야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 진행 중인 “초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발” 과제와 1단계 웨이브폼 개발 결과를 소개했다. 또한, 큐브 위성의 형상 제약에 따른 성능 제한을 극복하기 위해 군집 위성 기반의 송수신 비대칭 전송 및 상향링크 빔도약이 적용된 미래 군 초소형 위성 통신체계(안)을 제안하였다. 향후 군집 위성 운용에 요구되는 통합 관제 및 위성간 자세제어 등에 대해서 관련 개발을 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 미래도전국방기술(자체기획) 과제의 “초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발” 성과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

References

1. Lee J, Yoon D, Improved FH acquisition scheme in partial-band noise jamming, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 52, 3070–3076 (2016). <https://doi.org/10.1109/TAES.2016.160071>

2. Sweeting MN, Modern small satellites-changing the economics of space, Proc. IEEE. 106, 343-361 (2018). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2806218>
3. Keller J, DARPA blackjack to develop small, secure military satellites for low-earth orbit (2018) [Internet], viewed 2018 Jun 4-6, available from: <https://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-29/issue-6/news/news/darpa-blackjack-to-develop-small-secure-military-satellites-for-low-earth-orbit.html>
4. Eutelsat, ELO fleet (2023) [Internet], viewed 2023 Jul 10, available from: <https://www.eutelsat.com/en/satellites/elo-fleet.html>
5. Kepler, Our family of satellites (2023) [Internet], viewed 2023 Jul 10, available from: <https://kepler.space/network/>
6. Riazul Islam SM, Avazov N, Dobre OA, Kwak K, Power-domain non-orthogonal multiple access in 5G systems: potentials and challenges, IEEE Commun. Surv. Tutor. 19, 721-742 (2017). <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2621116>
7. Lee J, Choi C, Kim S, Kim H, Kim K, et al., Introduction to the AJ/LPD waveform technologies for LEO nanosatellite communications, in 2023 KICS Summer Conference, Jeju, Korea, 21-24 Jun 2023.
8. Hassainate NE, Said AO, Guennoun Z, Communication link budget estimation between ground IoT terminal and cubesat 3U's SDR, in IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTaIS), Bali, Indonesia, 24-26 Nov 2022.

Author Information

이 주 형 grand_blue@add.re.kr



2002년 국방과학연구소에 입소하여 민군 겸용 정지궤도 통신위성 ANASIS-I 체계개발, 한국형 합동전술데이터링크(JTDL) 체계개발 및 군 최초 독자 정지궤도 통신위성 ANASIS-II 체계개발에서 모뎀, 망제어기, 네트워크 관리시스템 및 보안 모듈 등의 개발 업무를 수행하였고 2018년 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과에서 박사학위를 취득하였다. 현재는 큐브 통신위성 기반의 “초소형 통신위성 항재밍/저피탐 웨이브폼 개발” 과제책임자 업무를 수행 중이며 군집 큐브 통신위성 기반의 신규 미래도전 과제를 준비중에 있다.

정 길 수 ksjeong@add.re.kr



2007년 Toyohashi University of Technology 전자정보공학과에서 박사학위를 취득한 후, 2007년부터 ATR 파동공학연구소, 2009년부터 한국전자통신연구원 및 2011년부터 현재까지 국방과학연구소에서 재직하고 있으며 무선통신시스템 개발 관련 업무를 수행하였으며, 현재 저궤도 통신위성 기반의 지능형 라우터, 빔호핑 모뎀 및 적응형 신호처리 등의 연구를 수행하고 있다.

박 해 원 parkhw@hanwha.com



금오공과대학교 전자공학과에서 2014년 석사학위를 취득한 후, 2016년부터 한화시스템에서 군 최초 독자 정지궤도 통신위성 ANASIS-II 체계개발에서 모뎀 개발 업무를 수행하였으며, 현재는 정지궤도 통신위성, 저궤도 위성의 신호처리 및 모뎀 개발 업무를 수행하고 있다.