

개방형 비지상 네트워크 구조에서의 상향 링크 프레임의 데이터 및 파일럿 송신 전력 및 압축률 최적화

이준석*, 조충호°, 유희정°

Optimization of Power Allocation and Compression Rate for Uplink Data and Pilot in Open NTN Architecture

Junseok Lee*, Choong-Ho Cho°, Heejung Yu°

요약

본 논문에서는 저궤도 (Low Earth Orbit; LEO) 위성 기반의 비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Network; NTN)에서 사업자 간의 위성 공유를 통한 효율적 네트워크 구성을 위한 개방형 NTN (Open NTN) 구조를 제안한다. 특정 한 국가에 통신 서비스를 제공하는 통신 사업자라도 원활한 NTN 서비스를 위해서는 전 지구를 커버할 수 있을 정도의 다수의 위성이 필요하다. 이와 같은 NTN 설치 비용을 절감하기 위해서는 국가간, 사업자간의 LEO 위성 공유가 필요하고 이를 위한 해결책으로 Open NTN 구조를 제안한다. 그리고, 상향링크 전송률 제약하에서 위성 간 링크 (Inter-Satellite Link; ISL) 요구 대역폭을 최소화하기 위하여 데이터 및 파일럿 송신 전력 및 ISL 프론트홀 (Fronthaul) 압축률 최적화를 수행하였다.

키워드 : 비지상 네트워크, 개방형 RAN, 개방형 NTN, 전력할당, 압축률, 최적화

Key Words : NTN, ORAN, Open NTN, power allocation, compression rate, optimization

ABSTRACT

In this paper, we propose an Open Non-Terrestrial Network (Open NTN) architecture in which Low Earth Orbit (LEO) satellites can be shared by multiple service operators for cost-effective network deployment in LEO-based NTNs. A service provider that provides network services to a specific area requires a large number of satellites covering the entire earth for smooth NTN service. In order to reduce NTN deployment costs, sharing of LEO satellites between countries and operators is necessary, and the Open NTN structure is proposed as a solution for LEO satellite sharing. In such open NTN architecture, data and pilot transmission power and ISL fronthaul compression rate can be optimized to minimize the required bandwidth of the Inter-Satellite Link (ISL) under uplink transmission rate constraints.

* 본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원 (No. 2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)과 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 RS-2020-KA157018)으로 수행되었음.

• First Author : Department of Electronics and Information Engineering, Korea University, Sejong, Korea, wnstjr752000@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Computer Convergence Software Department, Korea University, Sejong, Korea. chcho@korea.ac.kr, 종신회원

°° Corresponding Author : Department of Electronics and Information Engineering, Korea University, Sejong, Korea, heejungyu@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202402-022-B-RN, Received January 30, 2024; Revised March 1, 2024; Accepted March 19, 2024

I. 서 론

Beyond 5G 시대가 도래하면서, 3차원 통신 환경을 구성하기 위해 비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Network; NTN)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. NTN은 지상 네트워크 (Terrestrial Network; TN)에 비해 서비스 커버리지 면적이 넓으며, 자연 재해나 물리적 공격에 강인함을 갖고 있다. 또한, 통신 서비스 제공이 취약한 상공, 해양 또는 교외 지역에도 효율적 비용으로 통신 환경을 제공할 수 있다는 이점이 있다. NTN은 위성의 고도에 따라 정지 궤도 (Geostationary Orbit; GEO), 중궤도 (Middle Earth Orbit; MEO), 저궤도 (Low Earth Orbit; LEO)로 분류된다^[3-5]. 그 중, LEO는 타 위성보다 훨씬 낮은 고도 약 160~2,000 km 상공에 위치하여 평균 지연율이 25 msec로 저지연 통신 서비스가 가능한 대표적인 플랫폼으로 논의되고 있다.

특히, LEO 위성 기반의 NTN에서는 하나의 사업자가 자신만의 네트워크를 구성하는데 필요한 위성의 수가 수백에서 수천개까지 될 수 있다. 그리고, 각 LEO 위성은 서비스 지역의 상공을 지나가는 순간에만 사용되고, 서비스 지역을 벗어나는 경우에는 그 사용 빈도가 아주 낮아질 것이다. 이와 같은 특성을 고려할 때 LEO 위성을 국가 간에 또는 사업자 간에 공유함으로써 NTN 네트워크 구성 비용을 절감할 수 있다. 이를 위해서 지상국과 위성 사이, 그리고 위성 간의 인터페이스를 표준화하는 것이 필요하고, 이와 같은 구조를 개방형 NTN (Open NTN)이라고 할 수 있다. 이는 지상망에서의 Open Radio Access Network(ORAN)과 같은 개념이다.

기존에 3GPP에서도 NTN 구조로 기지국의 기능을 통신 프로토콜 스택 관점에서 상위 계층과 하위 계층으로 구분하여, 상위 계층의 기능을 지상국에 배치하고, 하위 계층의 기능을 위성에 배치하는 Regenerative Payload 구조가 제안되었다. 하지만, 해당 구조를 고려한 표준화는 아직 진행되지 않고 있다. 따라서, 위성의 공유를 위한 Open NTN에 대한 구체적인 개념은 아직 많은 연구가 진행되지 않은 상황이다.

이와 같은 Open NTN에서 지상국과 위성 사이의 피더링크(Feeder Link)와 위성 사이의 ISL이 Open RAN에서의 미드홀 (Midhaul)과 프론트홀 (Fronthaul)의 역할을 할 것이다. 특히, 이들이 모두 무선 링크로 구성되기 때문에 대역폭의 제약이 NTN 네트워크의 성능을 좌우할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Open NTN 구조에서 상향링크 전송을 제약 하에서의 ISL 요구 대역폭 최소화 문제를 구성하였고, 최적해를 구한다.

II. Open NTN 시스템 모델

본 논문은 Regenerative Payload NTN에 Open RAN을 접목하여 시스템 모델을 그림 1과 같이 구성하였다. NTN 게이트웨이(Gateway)는 기지국의 Central Unit (CU)의 역할을 수행하며, 게이트웨이와 직접 경로를 갖고 있는 LEO 위성은 Distributed Unit (DU)와 Radio Unit (RU)의 기능을 동시에 수행하고 나머지 LEO 위성들은 RU의 기능만 수행한다. 상향 링크 환경에서 각 User Equipment (UE)는 자신의 상공에 있어 바로 연결되어 있는 LEO 위성으로 패킷을 전송하게 된다. 수신 신호를 수신한 LEO는 RU 기능에 따라서 수신 과정의 일부를 수행하게 된다. 그림 2와 같이, 일

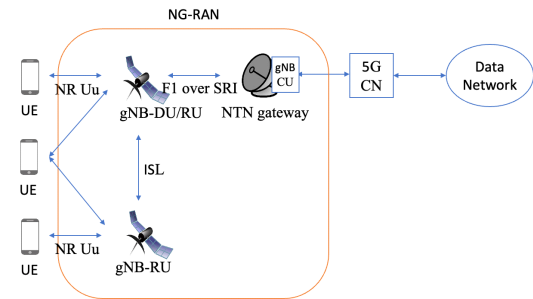


그림 1. Open NTN 개념도
Fig. 1. Network configuration of open NTN.

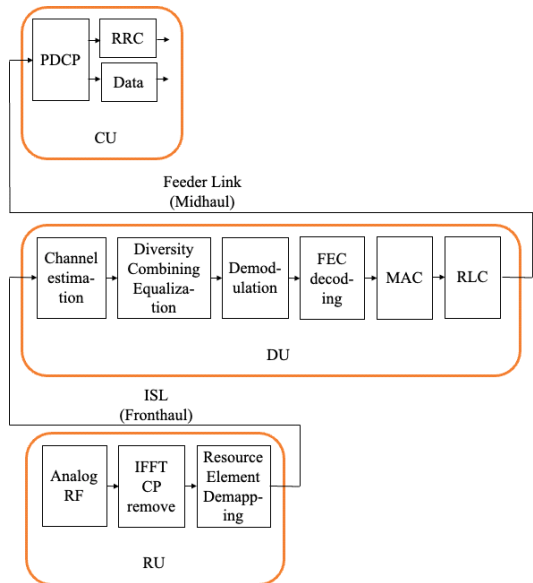


그림 2. Open NTN에서의 RU, DU, CU의 기능 블록 및 기능 분리 경계
Fig. 2. RU, DU, CU function blocks and function split boundaries for open NTN.

반적인 Open RAN의 기능 분리 경계가 그대로 Open NTN에서도 사용된다고 할 경우, RU에서는 OFDM 복조 이후, 데이터 부반송파와 파일럿 부반송파가 각각 구분되어 진다¹⁶⁻⁸¹.

그림 2에서 제시된 기능 분리 경계 외에도 다양한 형태의 CU-DU-RU의 기능 분리도 고려할 수 있다. 3GPP에서 NTN 구조의 예시로 제시하고 있는 Regenerative Payload(또는 Processed-DU Payload)에서는 그림 2의 RU와 DU의 기능을 통합하여 DU로 정의하고 있다. 그리고, 상향링크와 하향링크에서 각각 기능 분리 경계를 다르게 하는 것까지도 고려할 수 있다.

그림 3과 4에서 데이터와 파일럿으로 구성된 패키지 구조는 시간 영역에서의 구분이라기보다는 주파수 영역 구분이라고 해석할 수도 있다.

각 LEO가 n 번째 UE로부터 수신한 신호를 파일럿과 데이터로 구분한 신호는 아래와 같이 표현된다.

$$y_{p_i}(n) = \sqrt{P_{p_i}} h_i p_i(n) + n_{p_i}(n), \quad n = 1, \dots, N_p \quad (1)$$

$$y_{d_i}(n) = \sqrt{P_{d_i}} h_i d_i(n) + n_{d_i}(n), \quad n = N_p + 1, \dots, N_t \quad (2)$$

여기서, $p_i(n)$ 와 $d_i(n)$ 은 각 UE의 파일럿과 데이터 심볼을, P_{p_i} 와 P_{d_i} 는 전송 전력을 의미한다. UE와 LEO 위성 사이의 채널 계수를 $h_i(\sim CN(0,1))$, 이때 추가되는

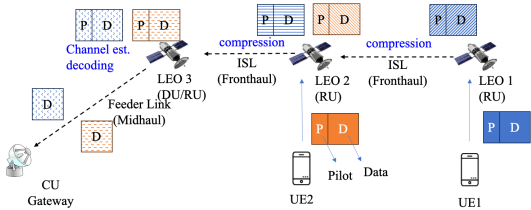


그림 3. 고려하는 Open NTN 시스템 모델
Fig. 3. Open NTN system model.

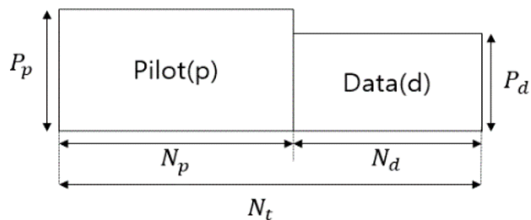


그림 4. 파일럿과 데이터로 구성된 상향 링크 패키지 구조
Fig. 4. Uplink packet structure with pilot and data signals.

잡음은 $n_{p_i}(n)(\sim CN(0,1))$ 와 $n_{d_i}(n)(\sim CN(0,1))$ 로 표기하였다. 채널 계수의 경우, 위성 채널의 특성을 고려하여 Rician 채널 또는 가시 채널 모델을 사용할 수도 있다. 하지만, 채널 모델의 변화가 본 연구의 분석 결과에 영향을 끼치지 않는다는 점도, 또한, 그림 4에서 보는 바와 같이, N_p 와 N_d 는 상향링크 패키지의 파일럿과 데이터 심볼의 수를 나타낸다. 전체 패키지의 길이인 N_t 는 $N_p + N_d$ 로 이루어진다. 본 시스템 모델에서는 단일 안테나를 가정하였으므로, 채널 추정을 위해 필요한 최소 파일럿 심볼의 수인 $N_p = 1$ 로 설정하였다.

III. 상향 링크 신호 복조 및 압축

그림 3에서 CU까지 데이터가 전달되는 과정은 다음과 같다. UE 1과 UE 2 상공에 있는 LEO 1과 LEO 2는 CU 기능을 갖고 있는 지상 게이트웨이와 연결되는 직접 경로를 갖고 있지 않기 때문에 ISL을 통해 데이터를 전달하여 CU와 연결해야 한다. 먼저, LEO 1은 UE 1의 신호(데이터와 파일럿 심볼들)를 LEO 2로 전달하며, LEO 2는 LEO 1에서 전달받은 신호와 UE 2의 신호(데이터와 파일럿 심볼들)를 같이 LEO 3로 전달한다. LEO 간의 ISL 전송을 위한 기술은 광무선통신 등 다양한 방식을 사용할 수 있으며, Integrated Access and Backhaul (IAB) 개념을 사용할 경우, 3GPP 규격에 기반하는 ISL도 고려할 수 있다.

ISL에 할당된 대역폭이 충분하다면 신호들을 그대로 전달해도 되지만, 만약 충분치 않다면 각 LEO는 신호의 압축 과정을 거친 후 다음 LEO 위성에게 신호들을 전달한다. 가장 간단한 압축으로 각 심볼의 I/Q 값에 대한 양자화 비트수를 조절하는 것을 생각할 수 있다. 그래서, UE 1의 신호는 두 번의 압축 과정, UE 2의 신호는 한 번의 압축 과정을 거친다. 그러므로 우리는 압축된 신호 또한 고려해줘야 한다. 각 ISL을 거치면서 압축되어 LEO 3에 도착한 최종 신호는 다음과 같다⁹¹.

$$\hat{y}_{p_1}(n) = \sqrt{P_{p_1}} h_1 p_1(n) + n_{p_1}(n) + q_{p_1}(n) + q_{p_2}(n), \quad (3)$$

$$\hat{y}_{d_1}(n) = \sqrt{P_{d_1}} h_1 d_1(n) + n_{d_1}(n) + q_{d_1}(n) + q_{d_2}(n), \quad (4)$$

$$\hat{y}_{p_2}(n) = \sqrt{P_{p_2}} h_2 p_2(n) + n_{p_2}(n) + q_{p_2}(n), \quad (5)$$

$$\hat{y}_{d_2}(n) = \sqrt{P_{d_2}} h_2 d_2(n) + n_{d_2}(n) + q_{d_2}(n). \quad (6)$$

여기서, $q_{p_i}(n)$ 와 $q_{d_i}(n)$ 는 i 번째 ISL을 거치면서 진행된 압축에 따른 왜곡 잡음을 의미한다. 왜곡 잡음은 원 신호와는 확률적으로 독립이며, 각각의 분포는 $q_{p_i}(n) \sim CN(0, \sigma_{p_i}^2)$ 과 $q_{d_i}(n) \sim CN(0, \sigma_{d_i}^2)$ 라고 가정하였다.

CU에서는 DU로부터 전달받은 압축된 신호를 바탕으로 채널 추정을 진행하고, 각 UE의 상향 링크 데이터 심볼을 복조한다. 이때, 파일럿 신호의 유효 신호 대 잡음비 (effective Signal to Noise Ratio; effective SNR)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{p_1} = \frac{P_{p_1}}{(1 + \sigma_{p_1}^2 + \sigma_{p_2}^2)} \quad (7)$$

$$\gamma_{p_2} = \frac{P_{p_2}}{(1 + \sigma_{p_2}^2)} \quad (8)$$

채널 추정 방식을 최소 평균 자승 오류 (Minimum Mean Square Error; MMSE) 방식을 사용했다고 가정하면, 채널 추정에 따른 추정 채널(\hat{h}_i)과 추정 에러(\tilde{h}_i)의 분산은 다음과 같다.

$$E\left[|\hat{h}_i|^2\right] = \frac{r_{p_i}}{(1 + r_{p_i})} \quad (9)$$

$$E\left[|\tilde{h}_i|^2\right] = \frac{1}{(1 + r_{p_i})} \quad (10)$$

이와 같은 채널 추정을 고려할 때, LEO 3에서의 UE 1과 UE 2의 데이터 심볼은 아래와 같이 재정의된다.

$$y_{d_1}(n) = \sqrt{P_{d_1}} \hat{h}_1 d_1(n) + \sqrt{P_{d_1}} \tilde{h}_1 d_1(n) + n_{d_1}(n) + q_{d_1}(n) + q_{d_2}(n), \quad n = 2, \dots, N_t \quad (11)$$

$$y_{d_2}(n) = \sqrt{P_{d_2}} \hat{h}_2 d_2(n) + \sqrt{P_{d_2}} \tilde{h}_2 d_2(n) + n_{d_2}(n) + q_{d_2}(n), \quad n = 2, \dots, N_t \quad (12)$$

위 식들의 우항에 있는 첫 번째 항이 원하는 데이터 신호이고, 나머지 항들은 유효 잡음으로 작용하여 이로

부터 각 UE의 전송률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{u_1} = \frac{N_d}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{P_{d_1} |\hat{h}_1|^2}{P_{d_1} |\tilde{h}_1|^2 + 1 + \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_2}^2} \right) \right] \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{d_1} E[|\hat{h}_1|^2]}{P_{d_1} E[|\tilde{h}_1|^2] + 1 + \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_2}^2} \right) \doteq \hat{R}_{u_1} \quad (13)$$

$$R_{u_2} \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{d_2} E[|\hat{h}_2|^2]}{P_{d_2} E[|\tilde{h}_2|^2] + 1 + \sigma_{d_2}^2} \right) \doteq \hat{R}_{u_2} \quad (14)$$

여기서, $E\{\log(1 + X/Y)\} \approx \log(1 + E\{X\}/E\{Y\})$ 를 이용하였다.

ISL 전송에서 수행되는 압축과 요구 전송률 사이의 관계는 전송률-왜곡 이론(Rate-Distortion Theory)으로 정량화할 수 있다. 즉, 압축에 따른 ISL 프론트홀의 요구 전송률은 압축 왜곡 잡음 분산의 함수로 주어지며, 또한 신호의 송신 전력과의 관계 역시 수학적식으로 표현될 수 있다. 우선, UE 1의 데이터와 파일럿을 LEO 1에서 압축한 후의 ISL 프론트홀 전송률은 다음과 같다^{6,8)}.

$$R_{p_1}(\sigma_{p_1}^2) = \frac{1}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_{p_1} + 1}{\sigma_{p_1}^2} \right) \right] \approx \frac{1}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{p_1} + 1}{\sigma_{p_1}^2} \right) \doteq \hat{R}_{p_1}(\sigma_{p_1}^2), \quad (15)$$

$$R_{d_1}(\sigma_{d_1}^2) = \frac{N_d}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_{d_1} + 1}{\sigma_{d_1}^2} \right) \right] \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{d_1} + 1}{\sigma_{d_1}^2} \right) \doteq \hat{R}_{d_1}(\sigma_{d_1}^2). \quad (16)$$

위 간략화 과정에서, $E\{|\hat{h}_1|^2\} = 1$ 와 Jensen의 부등식을 활용하였으며, 부등식의 오차가 크지 않다는 사실을 이용하였다.

또한, LEO 1에서 압축된 UE 1의 신호를 LEO 2에서 다시 한번 압축을 진행한다. 이를 위해서 전달하는 ISL 프론트홀 요구 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 R_{p_1}(\sigma_{p_2}^2) &= \frac{1}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_{p_1} + 1 + \sigma_{p_1}^2}{\sigma_{p_2}^2} \right) \right] \\
 &\approx \frac{1}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{p_1} + 1 + \sigma_{p_1}^2}{\sigma_{p_2}^2} \right) \\
 &\doteq \hat{R}_{p_1}(\sigma_{p_2}^2)
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 R_{d_1}(\sigma_{d_2}^2) &= \frac{N_d}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_{d_1} + 1 + \sigma_{d_1}^2}{\sigma_{d_2}^2} \right) \right] \\
 &\approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{d_1} + 1 + \sigma_{d_1}^2}{\sigma_{d_2}^2} \right) \\
 &\doteq \hat{R}_{d_1}(\sigma_{d_2}^2)
 \end{aligned} \tag{18}$$

위 식에서의 간략화 과정은 (15)과 (16)의 간략화 과정과 같다.

그리고, UE 2의 파일럿과 데이터를 LEO 2에서 압축한 후, 이를 전달하기 위한 ISL 프론트홀 요구 전송률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{p_2}(\sigma_{p_2}^2) &= \frac{1}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_{p_2} + 1}{\sigma_{p_2}^2} \right) \right] \\
 &\approx \frac{1}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{p_2} + 1}{\sigma_{p_2}^2} \right) \doteq \hat{R}_{p_2}(\sigma_{p_2}^2)
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 R_{d_2}(\sigma_{d_2}^2) &= \frac{N_d}{N_t} E \left[\log \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_{d_2} + 1}{\sigma_{d_2}^2} \right) \right] \\
 &\approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{d_2} + 1}{\sigma_{d_2}^2} \right) \doteq \hat{R}_{d_2}(\sigma_{d_2}^2)
 \end{aligned} \tag{20}$$

여기서, (15), (16)에서와 같이, Jensen의 부등식과 $E\{|\hat{h}_2|^2\} = 1$ 임을 이용하였다.

IV. 데이터와 파일럿 신호의 송신 전력 할당 및 ISL 프론트홀 압축률 최적화

앞 장에서 도출한 UE들의 상향 링크 전송률과 ISL 프론트홀 요구 전송률을 바탕으로 UE 서비스 품질 제약 하에서의 ISL 프론트홀의 대역폭을 최소화하는 최적화 문제를 구성할 수 있다. 통신 환경에 맞게 UE의 상향 링크 전송률을 일정 수준 이상으로 보장하면서, 다수의 LEO 위성들이 활용하는 공유 자원인 ISL에 할당되는 대역폭을 낮추는 것은 중요한 문제이다. 우리는

파일럿 신호와 데이터 신호의 송신 전력 및 ISL 프론트홀 압축률 관점에서 목적 함수를 정의하였다. 또한, 파일럿과 데이터 신호 사이의 송신 전력 할당 측면에서도 전체 에너지를 고려해야 한다. 각 UE 별 패킷에서 두 신호 송신 전력과 심볼 수를 고려한 전체 에너지는 일정 에너지 총합(E_t)을 넘을 수 없다.

$$P_{p_i} N_b + P_{d_i} N_d \leq E_t \tag{21}$$

본 연구에서는 파일럿 심볼의 최소 개수인 $N_b = 1$ 을 가정했으므로 $P_{p_i} + P_{d_i} N_d \leq E_t$ 로 재정의할 수 있다.

이와 같은 제약을 고려한 최종 최적화 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 \min_{P_{p_i}, P_{d_i}, \sigma_{p_i}^2, \sigma_{d_i}^2} & BW_{ISL1} + BW_{ISL2} \\
 \text{s.t. } & \hat{R}_{u_1} \geq r_1 \\
 & \hat{R}_{u_2} \geq r_2 \\
 & P_{p_i} + P_{d_i} N_d \leq E_t \\
 & P_{p_i} \geq 0, P_{d_i} \geq 0 \\
 & \sigma_{p_i}^2 \geq 0, \sigma_{d_i}^2 \geq 0
 \end{aligned} \tag{22}$$

위 최적화 문제의 복잡도를 경감하기 위해서, UE 및 ISL 프론트홀의 전송률들을 간략히 할 필요가 있다. 우선, UE 1의 전송률의 다음과 같이 간략화하였다.

$$\begin{aligned}
 \hat{R}_{u_1} &= \frac{N_d}{N_t} \times \\
 & \log \left(1 + \frac{P_{d_1} P_{p_1}}{(1 + \sigma_{p_1}^2 + \sigma_{p_2}^2) P_{d_1} + (1 + \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_2}^2) (P_{p_1} + 1 + \sigma_{p_1}^2 + \sigma_{p_2}^2)} \right) \\
 & \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_1} P_{p_1}}{(1 + \sigma_{p_1}^2 + \sigma_{p_2}^2) P_{d_1} + (1 + \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_2}^2) P_{p_1}} \right)
 \end{aligned}$$

위 간략화 과정에서 파일럿 전력이 잡음 및 압축 왜곡에 비하여 아주 크다는 일반적인 가정을 하였다. 즉, $P_{p_1} \gg 1 + \sigma_{p_1}^2 + \sigma_{p_2}^2$. 유사한 가정을 통하여 UE 2의 전송률 역시 간략화하였다.

$$\hat{R}_{u_2} \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_2} P_{p_2}}{(1 + \sigma_{p_2}^2) P_{d_2} + (1 + \sigma_{d_2}^2) P_{p_2}} \right)$$

또한, ISL 프론트홀의 전송률 간략화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{R}_{p_1}(\sigma_{p_2}^2) &= \frac{1}{N_t} \log \left(1 + \frac{P_{p_1} + 1 + \sigma_{p_1}^2}{\sigma_{p_2}^2} \right) \\ &\approx \frac{1}{N_t} \log \left(\frac{P_{p_1}}{\sigma_{p_2}^2} \right) \end{aligned}$$

여기서는 $P_{p_1} \gg 1 + \sigma_{p_1}^2$ 을 가정하였다.

$$\hat{R}_{d_1}(\sigma_{d_2}^2) \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_1}}{\sigma_{d_2}^2} \right)$$

$$\hat{R}_{p_2}(\sigma_{p_2}^2) \approx \frac{1}{N_t} \log \left(\frac{P_{p_2}}{\sigma_{p_2}^2} \right)$$

$$\hat{R}_{d_2}(\sigma_{d_2}^2) \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_2}}{\sigma_{d_2}^2} \right)$$

$$\hat{R}_{p_1}(\sigma_{p_1}^2) \approx \frac{1}{N_t} \log \left(\frac{P_{p_1}}{\sigma_{p_1}^2} \right)$$

$$\hat{R}_{d_1}(\sigma_{d_1}^2) \approx \frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_1}}{\sigma_{d_1}^2} \right)$$

최적화 문제 (22)에서 BW_{ISL1} 은 LEO 1과 LEO 2 사이의 ISL 프론트홀에서, BW_{ISL2} 는 LEO 2와 LEO 3 사이의 ISL 프론트홀에서 요구되는 대역폭을 각각 의미하는데, 이들은 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} BW_{ISL1} &= \frac{1}{C_1} (\hat{R}_{d_1}(\sigma_{d_1}^2) + \hat{R}_{p_1}(\sigma_{p_1}^2)) \\ &\approx \frac{1}{C_1} \left[\frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_1}}{\sigma_{d_1}^2} \right) + \frac{1}{N_t} \log \left(\frac{P_{p_1}}{\sigma_{p_1}^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} BW_{ISL2} &= \frac{1}{C_2} (\hat{R}_{d_1}(\sigma_{d_2}^2) + \hat{R}_{p_1}(\sigma_{p_2}^2) + \hat{R}_{d_2}(\sigma_{d_2}^2) + \hat{R}_{p_2}(\sigma_{p_2}^2)) \\ &\approx \frac{1}{C_2} \left[\frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_1}}{\sigma_{d_2}^2} \right) + \frac{1}{N_t} \log \left(\frac{P_{p_1}}{\sigma_{p_2}^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{N_d}{N_t} \log \left(\frac{P_{d_2}}{\sigma_{d_2}^2} \right) + \frac{1}{N_t} \log \left(\frac{P_{p_2}}{\sigma_{p_2}^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

그리고 r_i 는 i 번째 UE의 최소 요구 전송률을, C_1 은 LEO 1과 LEO 2 사이 ISL의 주파수 효율 (Spectral Efficiency; SE)를, C_2 는 LEO 2와 LEO 3 사이 ISL의 SE를 나타낸다. C_1 과 C_2 는 두 LEO 사이의 거리와 송신 전력에 의해 결정되는 상수로 가정하였다.

데이터와 파일럿 심벌의 전력 할당의 경우, 전체 에너지 제약 하에서 할당할 수 있는 전력을 모두 할당하는 것이 항상 최적이라는 것은 자명하다. 따라서, (22)에 있는 전체 에너지 제약식은 부등식이 아닌 아래와 같은 등식으로 전환할 수 있고, 파일럿의 송신 전력을 아래의 식으로 치환할 수 있다⁶⁾.

$$P_{p_i} = E_i - N_d P_{d_i} \quad (25)$$

그리고, 데이터 송신 전력의 범위 역시 아래와 같이 재정의할 수 있다.

$$\frac{E_i}{N_d} \geq P_{d_i} \geq 0 \quad (26)$$

또한 최적화 문제 (22)는 다수의 변수 및 복잡한 문제 구조로 인하여 바로 해를 찾을 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 송신 전력 최적화 문제와 압축률 최적화 문제로 나누어 접근하였다.

우선, 송신 전력 최적화 문제 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{P_{d_i}} & BW_{ISL1} + BW_{ISL2} \\ \text{s.t.} & \hat{R}_{w_1} \geq r_1 \\ & \hat{R}_{w_2} \geq r_2 \\ & E_i/N_d \geq P_{d_i} \geq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

그리고, ISL 압축률 최적화 문제는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \min_{\sigma_{d_i}^2, \sigma_{p_i}^2} & BW_{ISL1} + BW_{ISL2} \\ \text{s.t.} & \hat{R}_{w_1} \geq r_1 \\ & \hat{R}_{w_2} \geq r_2 \\ & \sigma_{d_i}^2 \geq 0, \sigma_{p_i}^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

2개의 부최적화 문제의 해는 KKT 조건을 이용하여 구할 수 있다. 단, 구체적으로 해를 유도하는 과정은 참고 논문¹⁰⁾을 참고하기 바란다. 본 연구의 최종 목표인 최적화 문제 (22)의 해를 구하기 위해서는 부최적화 문제인 (27)과 (28)을 순차적으로 풀면서 해가 수렴할 때까지 반복하는 교차 최적화 (Alternating Optimization) 기법을 활용할 수 있다. 또한 각 부최적화 문제에서도 다수의 변수 중에서 나머지를 고정하고, 하나의 변수에 대해서 해를 구하는 방식을 반복적으로

적용한다.

V. 모의 실험 결과

제한한 패킷 내 송신 전력 할당 및 ISL 프론트홀의 압축에 따른 왜곡 분산값들을 최적화하는 방식에 따른 ISL 요구 대역폭의 절감을 검증하기 위해서 모의 실험을 수행하였다.

ISL 프론트홀 링크의 주파수 효율은 위성들 사이의 거리와 위성에서의 송신 전력에 의존하는 값이다. 그래서 본 모의 실험에는 C_1 , C_2 는 각각 6bps/Hz로 설정했으며, UE 들의 상향 링크에서 최소한 보장하고자 하는 서비스 품질 즉, 상향 링크 전송률 최소값인 r_1 , r_2 는 3bps/Hz로 설정했다. 여기서, ISL의 주파수 효율인 C_1 , C_2 는 LEO 위성 간의 거리 및 송신 전력, 안테나 구조 등에 따라서 결정된다. 본 연구에서는 임의로 6bps/Hz로 설정한 것이며, 이는 ISL 전송률 요구량과 대역폭을 연결하는 단순 상수 역할이라 전체적인 분석 결과에는 영향이 없다 할 수 있다. UE의 상향링크 전송률은 LEO 위성들의 고도와 UE 단말의 송신 전력에 영향을 받는다. 상향 링크 패킷의 총 길이(또는 OFDM에서의 총 부반송파 수)인 N_f 는 100으로 잡았고, 앞서서도 언급한 바와 같이, 위성 통신은 가시 채널이 대부분 보장되기 때문에, 지상 네트워크에서와 같이 전체 대역에 골고루 퍼져있는 구조의 다수의 파일럿 심볼이 필요없을 수 있다. 그리고 단일 안테나를 사용하기 때문에 다중 안테나 채널 추정도 필요없다. 따라서, $N_p = 1$ 로 가정하였고, $N_d = 99$ 가 된다. 또한 UE에서 LEO까지의 서비스 링크의 평균 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio; SNR)는 20 dB로 가정하였다. 이를 위해서, 총 패킷 전송에 사용되는 에너지인 $E_t = 10000$ 으로 설정하였다. 즉, 전체의 심볼수 $N_f = 100$ 이기 때문에, 평균 송신 전력이 $E_t / (N_d + N_p) = 100$ 이고, 잡음 전력은 1이므로, 평균 SNR이 20dB라 할 수 있다. 신호의 전력 및 왜곡 분산의 경우, 1로 정규화된 잡음 전력을 기준으로 한 상대치를 표기하여 단위가 없이 표기하였다.

우선, ISL 프론트홀 압축에 따른 UE 전송률과 ISL 요구 대역폭의 변화를 그림 5와 6에서 확인할 수 있다. 예상할 수 있는 바와 같이, $\sigma_{d_1}^2$ 가 증가할수록, 신호의 왜곡에 따른 유효 잡음이 증가하여 UE 전송률이 낮아진다. 그리고 약 5dB 이상의 압축 왜곡이 생기면, 최소 서비스 품질인 3bps/Hz를 보장할 수 없다. 그리고, $\sigma_{d_1}^2$

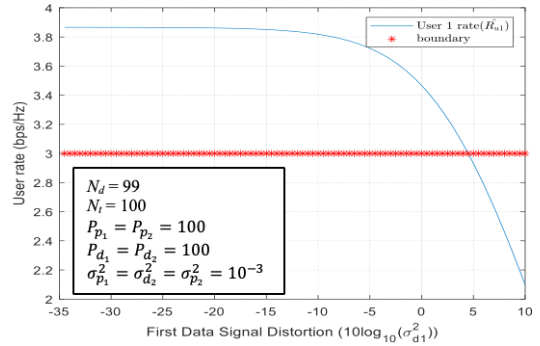


그림 5. LEO 1과 2 사이의 ISL의 데이터 압축($\sigma_{d_1}^2$)에 따른 UE 1 전송률 변화
Fig. 5. Uplink rate of UE 1 depending on data signal compression ($\sigma_{d_1}^2$) in ISL between LEO 1 and 2.

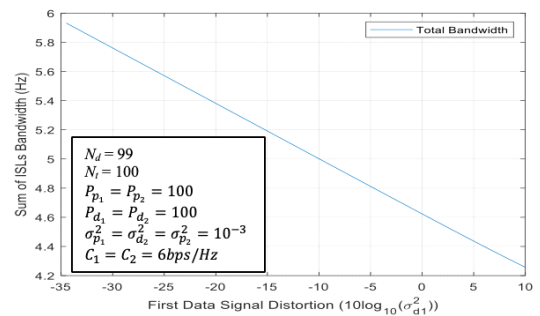


그림 6. LEO 1과 2사이의 ISL의 데이터 압축($\sigma_{d_1}^2$)에 따른 ISL 대역폭 변화
Fig. 6. ISL bandwidth depending on data signal compression ($\sigma_{d_1}^2$) in ISL between LEO 1 and 2.

가 증가할수록 압축률이 증가하여 ISL 요구 대역폭이 감소한다는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다.

다음에는 UE 1의 데이터에 할당된 송신 전력 (P_{d_1})의 증가에 따른 UE 1의 상향 링크 전송률과 ISL 요구 대역폭의 변화를 살펴보자. 그림 7에서는 P_{d_1} 가 증가할수록 데이터에 전력이 많이 할당되기 때문에 전송률이 증가한다. 하지만, 임계치 이상으로 너무 많은 전력이 데이터 할당되면, 파일럿에 할당된 전력이 너무 많아서, 채널 추정 오류가 너무 커서 전송률이 낮아진다. 그리고 그림 8에서는 데이터의 전력이 커질수록, 같은 왜곡 분산을 달성하기 위해서는 압축률이 낮아야 하고, 따라서 ISL 요구 대역폭이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 앞에서 신호 압축의 예로 든 것과 같이 신호의 양자화 형태로 압축을 구현할 경우, 양자화 비트 수가 ISL 요구 대역폭이 될 것이다. 그래서, 송신 전력이 큰 신호와 작은 신호가 있을 경우, 이 둘의 양자화 오류(왜곡)를

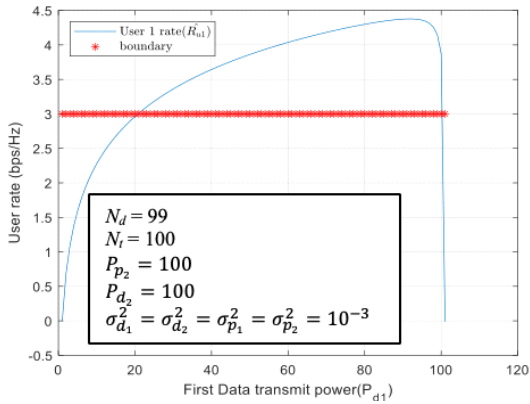


그림 7. UE 1의 데이터 전력(P_{d_1})에 따른 UE 1의 전송률 변화
 Fig. 7. Uplink rate of UE 1 depending on data power allocation (P_{d_1}) for UE 1.

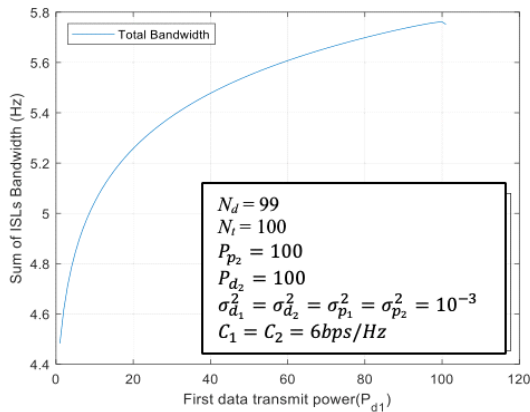


그림 8. UE 1의 데이터 전력(P_{d_1})에 따른 ISL 대역폭 변화
 Fig. 8. ISL bandwidth depending on data power allocation (P_{d_1}) for UE 1.

같은 수준으로 맞추려면, 큰 신호는 더 많은 양자화 비트 수가 필요할 것이다. 이와 같은 개념으로, 같은 왜곡 분산 조건에서의 신호의 전력과 ISL 요구 대역폭과 관계를 확인할 수 있다.

끝으로, 본 연구에서 제안된 최적화 과정을 통하여 절감할 수 있는 ISL 프론트홀 요구 대역폭을 알아보자. 앞에서 설명한 모의 실험 환경에서 UE 패키지의 데이터와 파일럿 전력만을 최적화한 경우 (그림 9), ISL 프론트홀 압축률을 최적화한 경우 (그림 10), 그리고 송신 전력과 압축률을 동시에 최적화한 경우 (그림 11)의 성능을 비교하였다. 우선 3가지 경우, 모두 전역 탐색 (Full Search)를 통하여 얻을 수 있는 최소 대역폭의 결과와 교차 최적화를 통하여 얻을 결과가 거의 일치하

는 것을 확인할 수 있다. 비교 대상으로 삼은 전역 탐색 (Full Search) 방식에서는 고려하는 최적화 변수의 범위를 양자화하여 모든 가능한 조합에서 제약식을 만족하면서 대역폭을 최소로 요구하는 변수의 조합을 찾았다. 그리고 전력과 압축률을 모두 최적화하는 경우에도 약 30~40 회의 반복 최적화 과정을 통하여 수렴한 해를 구할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

주어진 모의 실험 환경에서는 파일럿 심볼의 수는 1개인 것에 반해 데이터 심볼의 수는 99개이기 때문에 송신 전력을 파일럿에 더 많이 할당하고, 압축 과정에서도 파일럿 신호는 압축을 덜하여 신호의 왜곡을 최소화하는 것이 효과적인 방안이라는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 전력과 압축률을 모두 최적화하는 경우는 둘

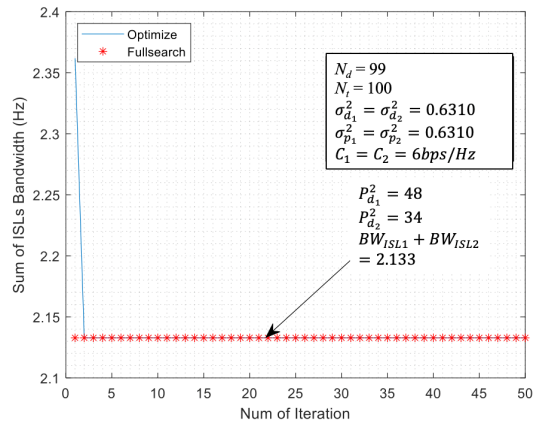


그림 9. UE 패키지의 전력만 최적화한 경우의 ISL 요구 대역폭 (ISL 프론트홀 압축률은 고정)
 Fig. 9. Required ISL bandwidth with optimal power allocation (fixed ISL fronthaul compression).

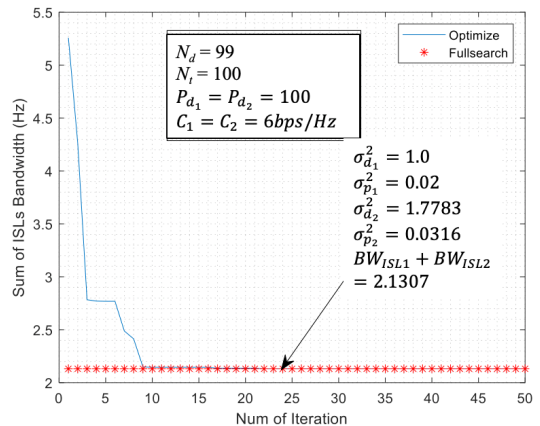


그림 10. ISL 프론트홀의 압축률을 최적화한 경우의 ISL 요구 대역폭 (UE 패키지의 데이터 및 파일럿 전력은 고정)
 Fig. 10. Required ISL bandwidth with optimal ISL fronthaul compression (with fixed power allocation).

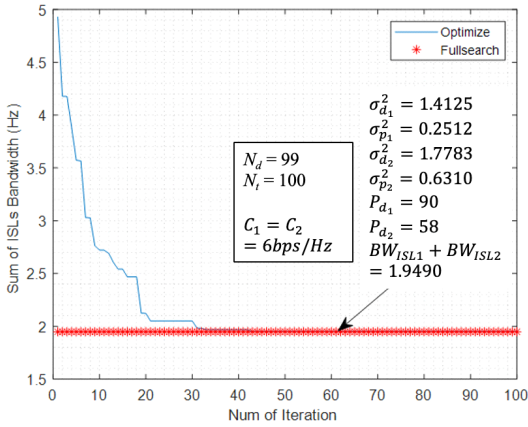


그림 11. UE 패킷의 전력과 ISL 프론트홀의 압축률을 동시에 최적화한 경우의 ISL 요구 대역폭

Fig. 11. Required ISL bandwidth with joint optimization of power allocation and ISL fronthaul compression.

중 하나만을 최적화하는 경우에 비하여 약 8.5%의 ISL 대역폭을 절감할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 LEO 기반의 NTN의 효율적 구축을 위한 Open NTN 아키텍처를 제안하였다. 5G 기지국을 위해서 제안된 ORAN의 개념을 이용하였다. 하지만, 위성 통신의 특성상 프론트홀 및 미드홀이 LEO 위성 간의 ISL과 피더링크와 같은 무선 구간이라는 점에서 차별성을 갖는다. LEO 기반 통신 환경에서 주어진 주파수 자원이 제한적일 때, 사용자의 최소 전송률을 보장 하면서 ISL 프론트홀에 할당되는 대역폭을 최소화하는 최적화 문제를 구성하고, 최적화 해를 제시하였다. 본 연구의 확장으로, 송신 전력 조절과 더불어 전체 패킷 길이 제약하에서 파일럿과 데이터 길이를 조절하는 접근방법으로 패킷 구조를 최적화하는 연구도 진행할 수 있다.

References

[1] H. Yu, H. Lee, and H. Jeon, "What is 5G? Emerging 5G mobile services and network requirements," *Sustainability*, vol. 9, pp. 1-22, Oct. 2017. (<https://doi.org/10.3390/su9101848>)

[2] M. Shahjalal, W. Kim, W. Khalid, S. Moon, M. Khan, S. Liu, S. Lim, E. Kim, D. Yun, J.

Lee, W. Lee, S. Hwang, D. Kim, J. Lee, H. Yu, Y. Sung, and Y. Jang, "Enabling technologies for AI-empowered 6G massive radio access networks," *ICT Express*, vol. 9, no. 3, pp. 341-355, Jun. 2023.

(<https://doi.org/10.1016/j.icte.2022.07.002>)

[3] X. Lin, S. Rommer, S. Euler, E. A. Yavuz and R. S. Karlsson, "5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks," *IEEE Commun. Std. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 147-153, Dec. 2021.

(<https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.011.2100038>)

[4] M. Giordani and M. Zorzi, "Non-Terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 244-251, Mar./Apr. 2021.

(<https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000493>)

[5] D.-H. Jung, G. Im, J.-G. Ryu, S. Park, H. Yu, and J. Choi, "Satellite clustering for non-terrestrial networks: Concept, architectures, and applications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, no. 3, pp. 29-37, Sep. 2023.

(<https://doi.org/10.1109/MVT.2023.3262360>)

[6] H. Yu and H. Lee, "Joint optimization of power and fronthaul compression for data and pilot signals in uplink C-RANs," *IEEE Syst. J.*, vol. 14, no. 4, pp. 4990-5001, Dec. 2020.

(<https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2980164>)

[7] H. Yu and J. Joung, "Optimization of frame structure and fronthaul compression for Uplink C-RAN under time-varying channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 1278-1292, Feb. 2021.

(<https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3032432>)

[8] H. Yu and T. Kim, "Optimization of uplink rate and fronthaul compression in cloud radio access networks," *Future Generation Comput. Syst.*, vol. 102, pp. 465-471, Jan. 2020.

(<https://doi.org/10.1016/j.future.2019.08.019>)

[9] J. Lee and H. Yu, "Efficient bandwidth allocation in LEO communication with joint optimization of power and compression for data and pilot signals," in *Proc. KICS Summer*

Conf., pp. 133-134, Jeju Island, Korea, Jun. 2023.

- [10] J. Lee, H. W. Kim, J-G. Ryu and H. Yu, "Optimization of Power Allocation and Compression Rate for Uplink Data and Pilot in Open NTN Architecture," in preparation for submission.

이 준 석 (Junseok Lee)



2023년 : 고려대학교(세종) 전자
및정보공학과 학사

2023년~현재 : 고려대학교(세종)
전자정보공학과 석사과정

<관심분야> 무선/위성통신, 강
화학습

조 총 호 (Choong-Ho Cho)



1981년 : 고려대학교 산업공학
과 학사

1983년 : 고려대학교 산업공학
과 석사

1989년 : INSA de Lyon(프)
컴퓨터공학과 공학박사

1990년~1993년 : 순천향대학교
조교수

1994년~2022년 : 고려대학교 부교수/교수

2022년~현재 : 고려대학교 명예/특임교수

<관심분야> 스마트모빌리티, 자율주행

유 희 정 (Heejung Yu)



1999년 : 고려대학교 전파공학
과 학사

2001년 : KAIST 전기전자공학
과 석사

2011년 : KAIST 전기전자공학
과 박사

2001년~2012년 : ETRI 선임연
구원

2012년~2019년 : 영남대학교 교수

2019년~현재 : 고려대학교 교수

<관심분야> 무선/위성통신, 통계적 신호처리

[ORCID:0000-0001-8046-2376]