

5G 및 위성통신 표준을 기반한 위성-HAPS-지상 다운링크 중계 통신 성능 분석

장기원, *최지환

한국과학기술원 항공우주공학과

wkdrldnjs9@kaist.ac.kr, *jhch@kaist.ac.kr

Performance Analysis of Satellite-HAPS-Terrestrial Downlink Relay Networks Based on 5G and Satellite Communication Standards

Gee Won Jang, *Jihwan Choi

Dept. of Aerospace Eng., KAIST

요 약

본 논문에서는 위성-지상 다운링크 네트워크 사이에 HAPS 를 중계 노드로 활용하였을 때의 통신 성능을 분석하였다. 3GPP 와 ITU 표준을 활용해 시나리오를 설정하였고, DVB-S2 표준을 기반으로 통신 시스템 모델을 설계하였다. Amplify-and-Forward(AF)와 Decode-and-Forward(DF) 두 가지 중계 통신 방식에 대해 시뮬레이션을 진행하였으며, 두 경우 모두 FEC 부호율이 2/3, 위성 CNR 이 4.5dB 이상일 때 에러가 거의 없는 통신이 가능함을 확인하였다. 또한 DF 방식의 경우 AF 방식에 비해 HAPS CNR 이 낮아도 원활한 통신이 가능하고, HAPS 가 16QAM 과 같은 위성과 다른 데이터 변조 방식을 활용할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU)에서 발행한 RR(Radio Regulation)은 High Altitude Platform Station(HAPS)를 “고도 20 에서 50km 사이의 지구를 기준으로 지정된 고정점에 위치한 스테이션”이라고 정의한다. 최근의 HAPS 배치 계획은 고도 18 에서 21km 사이를 목표로 하고 있으며[1], 이를 통해 HAPS 를 UAV 와 함께 위성-지상간 통신을 지원하는 공중 노드로 활용할 수 있을 것이다.

최근 HAPS 를 매우 거대한 기지국으로 활용하는 HAPS-Super Macro Base Station(SMBS)에 관한 연구와 국제이동통신(ITU)을 지원하는 기지국으로 활용하는 HAPS as IMT Base Station(HIBS)에 관한 연구가 등장하고 있다 [1, 2]. HAPS 는 특정한 사용자 장비나 스펙트럼 대역을 사용해야 하는 저궤도위성과는 다르게 이미 지상에서 사용되는 스펙트럼 대역이나 장비를 그대로 사용할 수 있고, 또한 위성에 비해 장비를 공중에 올리기가 쉽다는 장점을 갖는다. 이러한 장점을 활용하면 지상-위성간 통신 시 HAPS 를 중계 노드로 이용해 더 높은 통신 성능을 가져올 수 있을 것이다.

본 논문에서는 위성-지상 다운링크 네트워크 환경에 HAPS 를 중계 노드로 추가해 중계 통신의 성능에 관한 연구를 수행하였다. 몬테카를로 방법을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였고, 시뮬레이션 파라미터는 3GPP 의 TR 38.821 표준 문서와 ITU 의 ITU-R F.2439-0 문서로부터 인용하였다. 또한 중계 통신 시스템 모델은 위성 통신 표준인 DVB-S2 표준을 기반으로 설계하였다. 또한 HAPS 에서의 중계 방식으로는 증폭 후 전달 (AF relay) 방식과 복호 후 전달 (DF relay) 방식을 활용하였다.

II. 시뮬레이션 모델

DVB-S2 표준[3]은 위성에서의 데이터 변조 방식으로

QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK 방식을 제안하며, 부호화를 마친 데이터 한 프레임의 길이를 64800 비트 또는 16200 비트로 규정한다. 또한 전진 에러 수정(Forward Error Correction, FEC) 부호화로 BCH 와 저밀도 패리티 검사 코드(Low Density Parity Check, LDPC)의 연결 부호를 제안한다. 본 연구에서는 위성에서 QPSK 변조 방식을 사용하는 것으로, 데이터 한 프레임의 길이는 64800 비트로 고정하였으며, FEC 부호화는 LDPC 만 이용하였다.

다운링크 통신 네트워크는 단일 위성, 단일 HAPS, 단일 지상 장비로 가정하였다. 위성과 HAPS 의 고도, 송신 주파수, 감쇠 등의 파라미터는 표 1 과 같이 정리되며, 이를 통해 필요한 반송파 대 잡음비(CNR)를 계산할 수 있다. TR 38.821 문서에서는 아래의 식을 이용해 CNR 을 계산한다.

$$CNR[dB] = EIRP[dBW] + G/T[dB/K] - k[dbW/K/Hz] - PL_{FS}[dB] - PL_A[dB] - PL_{SM}[dB] - PL_{SL}[dB] - PL_{AD}[dB] - B[dBHz] \quad (1)$$

여기서 $EIRP$ 는 실효 등방성 복사전력, G/T 는 이득 대 잡음 온도비, k 는 볼츠만 상수, PL 은 각종 감쇠, B 는 채널의 대역폭이다. 각 파라미터와 식 (1)을 활용하면 최대 CNR 은 표 1 과 같이 계산된다.

HAPS 와 위성은 높은 상공에 위치해 있기 때문에 각각의 다운링크 통신 채널을 라이시안 페이딩으로 모델링할 수 있으며, 참조한 논문[4]을 근거로 HAPS 와 위성 모두 라이시안 분포의 K 값을 10 으로 설정하였다. 또한 시뮬레이션은 주파수 비선택적 페이딩 환경에서 이루어졌으며, 도플러 천이에 의한 페이딩 영향은 완벽하게 보상할 수 있다고 가정하였다.

III. AF relay 성능분석

AF 방식의 경우 위성에서 송신한 신호를 HAPS 가 수신 후 증폭하여 지상으로 송신한다. 단순히 수신한 신호의 크기를 변경해 송신하기 때문에 중계가 빠르게 이루어지지만, 수신 시 발생한 잡음도 증폭되며, HAPS 또한

표 1. 시뮬레이션 파라미터

	위성	HAPS
고도[km]	1200	20
수신측 안각[°]	30	25
송신주파수[GHz]	20	25
대역폭[dB]	400/3	225
최대 EIRP[dBW]	31.25	25
G/T [dB/K]	16.3	20.9
PL_A [dB]	0.1	0.85
PL_{SM} [dB]	0	0
PL_{SL} [dB]	0	0.39
PL_{AD} [dB]	3	0
최대 CNR[dB]	7.4958	35.89

위성에서 이용하는 변조 방식을 동일하게 이용할 수밖에 없다는 단점이 있다. 그림 1 은 AF 환경에 대해 각 상황에서 HAPS CNR 대비 비트 오류율을 시뮬레이션한 결과이다. 지상에서 데이터를 수신 후 LDPC 복호화를 50 번 시행하였으며, FEC 부호율이 2/3 이고 위성 CNR 이 4.5dB 이거나 그 이상일 때 지상에서 거의 에러 없이 데이터를 수신하는 것이 가능함을 확인할 수 있다.

IV. DF relay 성능분석

DF 방식의 경우 HAPS가 신호를 수신 후 복호화해 원래 데이터를 추정하고, 추정한 데이터를 다시 부호화하여 지상으로 송신한다. AF 와는 다르게 잡음을 줄여 송신할 수 있고, HAPS 가 위성이 이용하는 변조 방식뿐만 아니라 QAM 과 같이 효율이 더 뛰어난 변조 방식을 사용할 수도 있다. 그러나 AF 대비 통신에 필요한 시간이 길어지고, 수신 신호를 올바르게 복호화하지 못하면 에러가 전파되는 현상이 관측된다 [5].

그림 2 는 DF 환경에 대해 각 상황의 지상 복호화 횟수에 따른 비트 오류율을 시뮬레이션한 결과이다. HAPS 에서 데이터 복호화를 위해 LDPC 복호화를 최대 25 번 시행하였으며, 지상에서의 복호화는 AF 방식과 마찬가지로 50 번 시행하였다. HAPS 가 위성과 같은 데이터 변조 방식인 QPSK 를 이용하는 경우 HAPS 에서 데이터 복호화가 원활하게 이뤄지고, 따라서 AF 방식 대비 더 낮은 CNR 로 송신하여도 원활한 통신이 가능함을 확인할 수 있다. 또한 HAPS 의 데이터 변조 방식으로 QPSK 뿐만 아니라 16QAM 에 대해서도 분석을 진행하였다. HAPS 가 QPSK 를 사용할 때보다 더 높은 CNR 로 데이터를 송신해야 지상에서 거의 에러 없이 수신함을 확인할 수 있으며, HAPS 가 데이터 송신에 많은 자원을 할당할 수 있으면 보다 높은 차원의 변조 방식을 이용하는 것을 제안할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 3GPP 및 ITU 표준에서 제안하는 시나리오를 기반으로 HAPS 의 중계 통신 성능을 분석하였다. 위성이 QPSK 변조 방식을 이용하는 경우 FEC 부호율이 2/3 이며 위성 CNR 이 4.5dB 이상이면 AF 중계 방식을 사용할 경우 지상에서 데이터 수신에 원활하게 이루어짐을 확인하였다. DF 방식을 사용할 경우 AF 방식에 비해 HAPS 의 CNR 이 낮은 경우에도 데이터 통신이 원활함을 확인하였으며, HAPS 가 데이터 송신에 자원을 더 할당하면 16QAM 또는 그 이상의 변조 방식도 이용할 수 있음을 확인하였다.

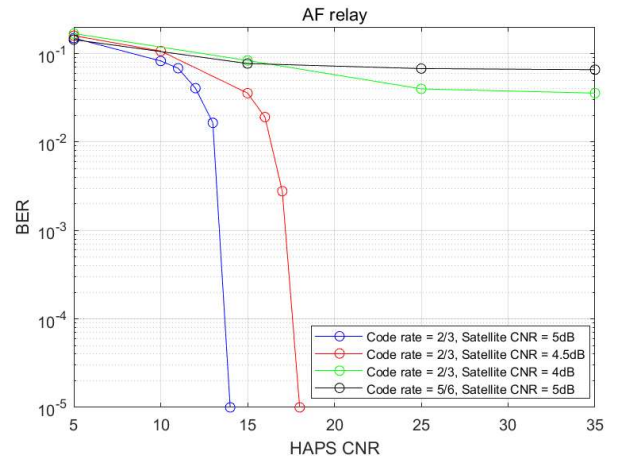


그림 1. AF relay 에서 HAPS CNR 에 따른 BER 성능

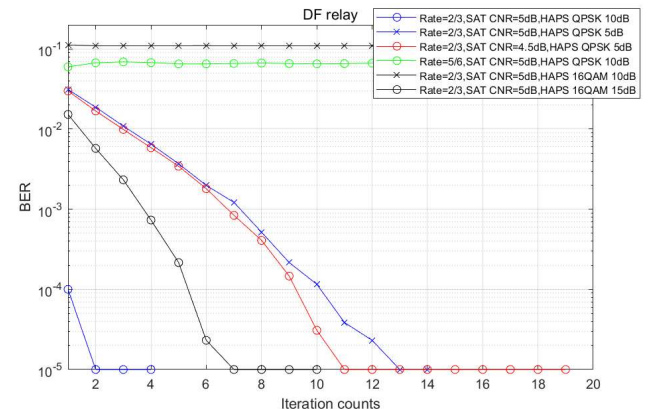


그림 2. DF relay 에서 복호화 횟수에 따른 BER 성능

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2022 년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2069728)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] Alam, Md Sahabul, et al. "High altitude platform station based super macro base station constellations." IEEE Communications Magazine 59.1 (2021): 103-109.
- [2] Alexandre, Luciano Camilo, et al. "High-Altitude Platform Stations as IMT Base Stations: Connectivity from the Stratosphere." IEEE Communications Magazine 59.12 (2021): 30-35.
- [3] ETSI EN 302 307: "Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)".
- [4] Wang, Dengke, et al. "The potential of multilayered hierarchical nonterrestrial networks for 6G: A comparative analysis among networking architectures." IEEE Vehicular Technology Magazine 16.3 (2021): 99-107.
- [5] Declercq, David, Marc Fossorier, and Ezio Biglieri. Channel Coding: Theory, Algorithms, and Applications: Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications. Academic Press, 2014.