

# 한반도 지역에서의 저궤도 위성 통신 시스템의 도플러 편이 분석 및 보상 방안

이희원\*<sup>1</sup>, 하태식\*<sup>2</sup>, 윤원상\*\*<sup>2</sup>, 김영재\*\*\*<sup>1</sup>, 김성호\*\*\*<sup>2</sup>

## Analysis and Compensation of Doppler Shift for Low Earth Orbit Satellite Communication in Korean Peninsula

Hee-Won Lee\*<sup>1</sup>, Tae-Sik Ha\*<sup>2</sup>, Won-Sang Yoon\*\*<sup>2</sup>, Youngjae Kim\*\*\*<sup>1</sup>, and Sungho Kim\*\*\*<sup>2</sup>

본 논문은 2022년 한화시스템(주)의 지원으로 이루어진 연구결과물임

### 요약

본 논문에서는 한반도 지역에서 저궤도 위성의 고도 및 하향링크 주파수에 따른 도플러 편이를 분석하여 기술하고, 도플러 편이에 의한 DBPSK, DQPSK 변조 방식에서의 비트오율 열화와 이를 보상하기 위해 요구되는 클럭 보정 간격에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 저궤도 위성 통신에서는 정지궤도 위성을 이용한 통신과 달리 위성과 지상국간의 상대 속도 차이로 인해 도플러 편이가 발생하게 되어 통신 성능이 저하되는 요인이 된다. Matlab 시뮬레이션을 통해 지상국의 위치를 대전으로 가정하였을 경우 550km 고도의 위성체가 반송파 주파수 7.75GHz를 사용할 때 도플러 편이의 최대값은  $\pm 170.6\text{kHz}$ 로 분석되었으며, 이를 보상하기 위해서는 DBPSK, DQPSK 변조 방식에서의 클럭 보정이 최소한 17초와 6.9초 이내에 이루어져야 한다.

### Abstract

In this paper, we analyze the Doppler shift according to the altitude and downlink frequency of low-earth orbit(LEO) satellites in the Korean peninsula region, and present simulation results for the degradation of bit error rate caused by the Doppler shift and the required clock recovery intervals to compensate for it in DBPSK and DQPSK modulation schemes. In LEO satellite communication, the Doppler shift occurs due to the relative velocity between a satellite and a ground station unlike geostationary satellite communication, which causes degradation of communication performance. From the simulation results using Matlab, assuming that the location of the ground station is Daejeon, when a satellite at an altitude of 550km uses a carrier frequency of 7.75GHz, the maximum Doppler shift is analyzed to be  $\pm 170.6\text{kHz}$  and clock recovery intervals of 17 and 6.9 seconds are required in DBPSK and DQPSK system in order to compensate for the Doppler shift, respectively.

### Keywords

low earth orbit satellite communication systems, Doppler shift, low earth orbit satellite, bit error rate

\* 호서대학교 전자디스플레이공학과

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-9188-5382>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-8026-4871>

\*\* 호서대학교 전자공학과 부교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1125-384X>

\*\*\* 한화시스템 항공우주사업부문 위성시스템4팀

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0001-3960-3381>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0009-0001-7973-1193>

· Received: Feb. 26, 2023, Revised: Mar. 20, 2023, Accepted: Mar. 23, 2023

· Corresponding Author: Won-Sang Yoon

Division of Electronic Engineering, Hoseo University, 20,

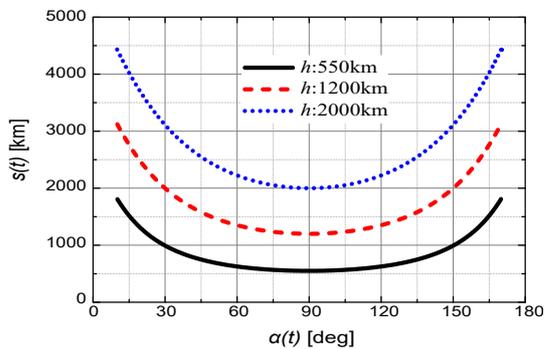
Hoseo-ro 79 beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea

Tel.: +82-41-540-5661, Email: [wsoon@hoseo.edu](mailto:wsoon@hoseo.edu)

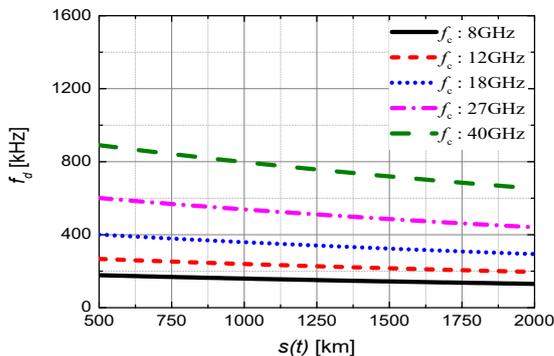


식 (1)에서  $r_e$  는 지구의 반경,  $r_s$  는 지구 중심으로부터 위성체간 거리,  $\omega_F$  는 위성과 지상단말 간 상대 각속도,  $\alpha_{max}(t)$  는 위성체와 통신이 가능한 최대 양각범위,  $\psi(t) - \psi(t_0)$  는 위성의 현재 위치와 최대 양각이 되는 위치 사이의 이격각을 나타낸다. 먼저, 주요 매개변수 변화에 따른 도플러 주파수 편이의 변동 경향을 분석하기 위해 위성 궤도 높이에 따른 도플러 편이를 그림 2에 나타내었다.

지상국의 위치를 위도 36.34°, 경도 127.25°인 대전으로 설정하고, 위성 궤도 높이  $h$ 를 550km, 위성의 이동속도  $v_{sat}(t)$  를 7.59km/s로 설정하였을 때, 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 양각  $a(t)$  가 변함에 따라 위성과 지상 단말간의 직선거리  $s(t)$  가 550km에서 1815km로 변화하며, 동일한 반송파 주파수 사용시 위성의 고도가 높아지면 도플러 편이가 감소하는 것을 그림 2(b)의 결과를 통해 확인할 수 있다.



(a) 양각  $\alpha(t)$ 에 따른 위성과 지상 단말의 거리  $s(t)$   
 (a) Distance  $s(t)$  between the satellite and ground terminal according to the elevation angle



(b) 위성 궤도 높이에 따른 도플러 편이 최대값  
 (b) Maximum doppler shift according to altitude of the satellite orbit

그림 2. 위성 궤도 높이에 따른 도플러 편이

Fig. 2. Doppler Shift according to altitude of the satellite orbit

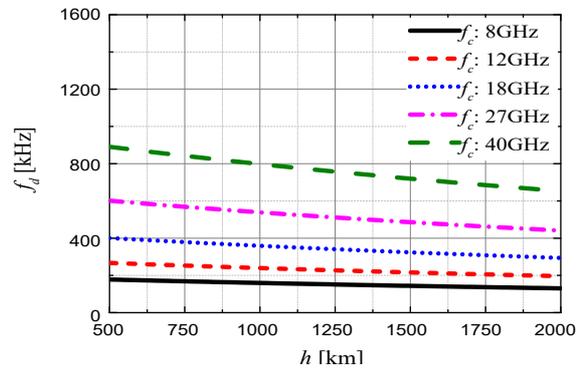


그림 3. 위성 궤도 높이 550km일 때의 반송파 주파수 변화에 따른 도플러 편이 분석 결과

Fig. 3. Doppler shift according to the carrier frequency at a satellite orbit altitude of 550km

또한, 위성의 이동에 따라 발생하는 도플러 편이의 변화를 그림 3에 나타내었다. 최대 도플러 주파수 편이는 8GHz에서 185kHz, 12GHz에서 275kHz, 18GHz에서 413kHz, 27GHz에서 619kHz, 40GHz에서 917kHz로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

지상 단말과 통신을 할 수 있는 위성의 최소 양각  $a_{min}(t)$  를 10°로 설정하였을 때, 위성의 궤도 높이에 따른 통신 가능 범위를 그림 4에 나타내었다.

위성 궤도 높이가 550km일 때 통신이 가능한 위도의 범위  $\Delta T_{550}$ 는 14.95°, 경도의 범위  $\Delta G_{550}$ 는 18.56°로 나타났으며, 위성 궤도 높이를 2000km로 설정할 경우의 위도 범위  $\Delta T_{2000}$ 는 31.06°, 경도 범위  $\Delta G_{2000}$ 는 38.57°로 나타났다. 궤도 높이가 550km, 이동 속도 7.59km/s인 저궤도 통신 위성의 이동에 따른 도플러 편이 분석을 위한 분석 모의 환경을 그림 5에 나타내었다.

그림 5(a)에서는 지상 단말의 위치에 따른 도플러 편이 편차를 알아보기 위해 대전을 중심으로 통신 가능 범위 및 위성의 경로를 설정하였다. 대전을 가로질러 가는 최장 경로를 Orbit 1으로 설정하고, 경로에 따라 도플러 편이의 현상이 달라지는 것을 비교하기 위하여 Orbit 1보다 경로 길이가 짧은 Orbit 2, Orbit 3을 추가로 설정하였다.

그림 5(b)는 대전과 통신하기 위한 대향 단말의 위치를 한반도 동, 서, 남, 북의 극지점인 독도, 백령도, 마라도, 온성으로 설정하여 통신하는 상황으로 가정하고, 각 극점에서 동일한 경로를 지나는 위성을 관측할 때, 변화되는 통신 가능 교차 범위를 나타내었다.

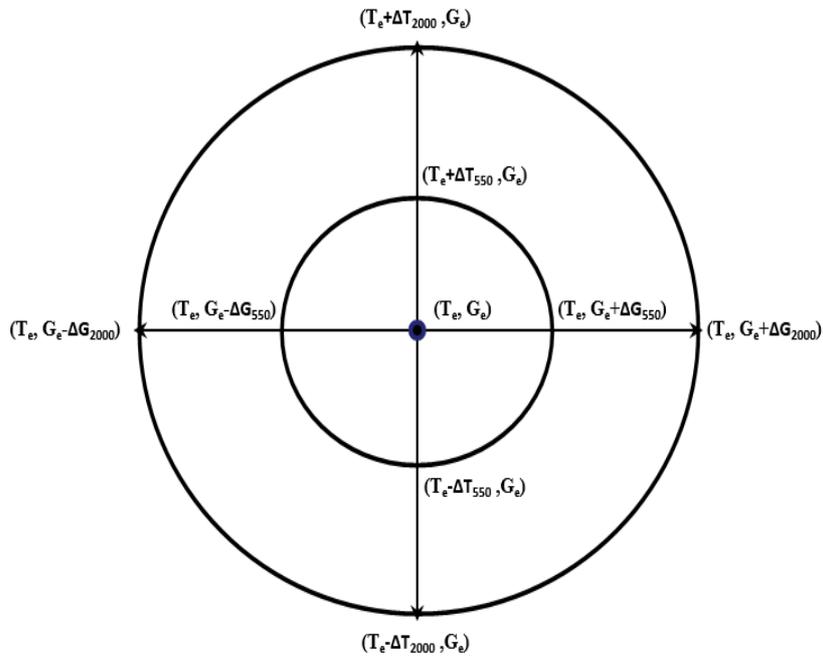
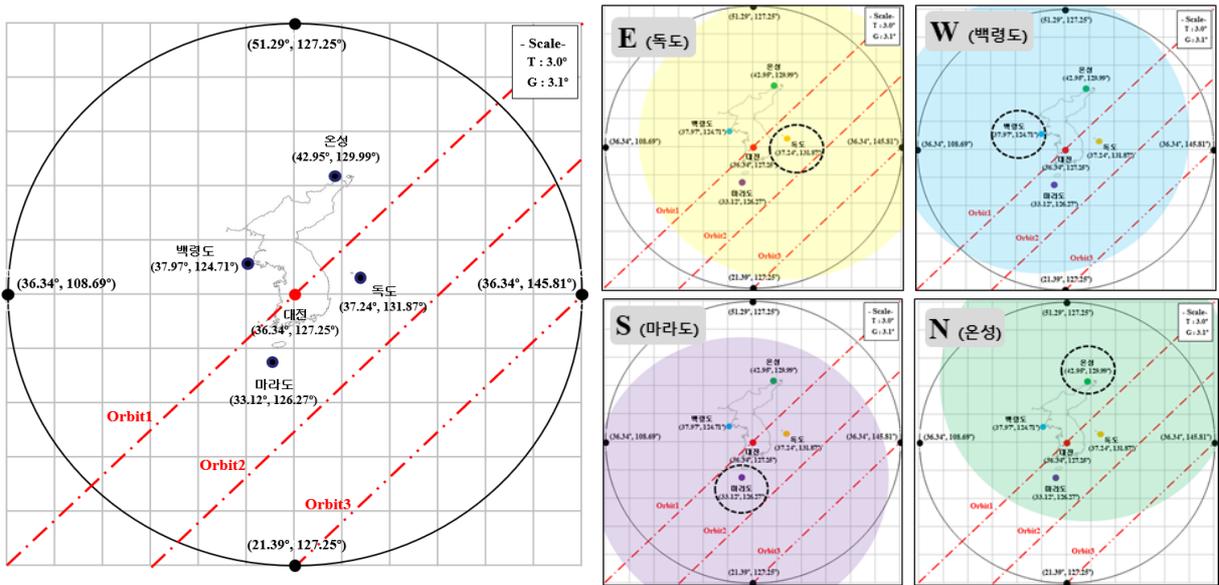


그림 4. 위성 궤도 높이에 따른 위성 통신 가능 범위 비교  
 Fig. 4. Comparison of the coverage area for satellite communication according to the satellite orbit altitude



(a) 임의의 위성궤도에 대한 통신가능 범위  
 (a) Coverage range for arbitrary satellite orbit

(b) 대전과 한반도 내 극점에서의 통신 범위 차이  
 (b) Difference in the coverage of satellite communication between Daejeon and the poles on the Korean Peninsula

그림 5. 대전을 중심으로 한 저궤도 위성 통신 가능 범위  
 Fig. 5. Coverage area of low-earth orbit satellite communication centered at Daejeon

지상 단말의 위치에 따라 위성과 통신이 가능한 시점과 양각이 상이하므로 위성과의 통신이 시작되는 시점 및 도플러 주파수 편이 값이 달라지게 되

며, 이에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 6과 표 1에 나타내었다.

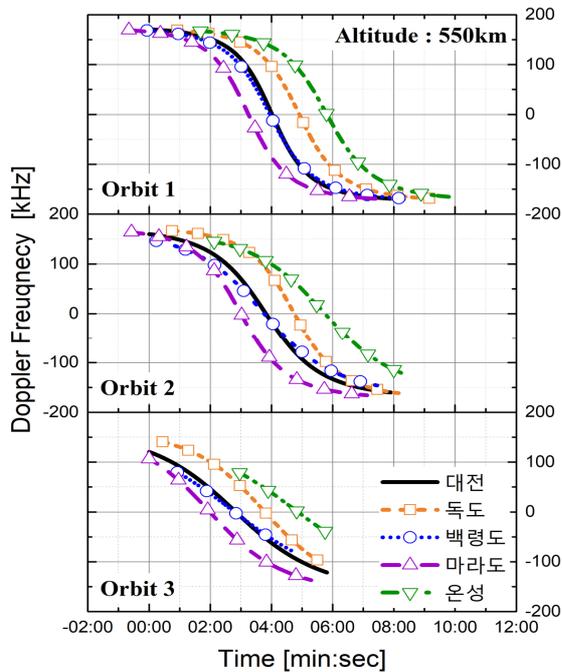


그림 6. 한반도 내 단말의 위치에 따른 도플러 편이 비교  
 Fig. 6. Comparison of Doppler shift according to the locations of terminals on the Korean Peninsula

표 1. 한반도 내 단말 위치에 따른 최대 도플러 편이( $f_c$ : 7.75GHz)

Table 1. Maximum Doppler shift according to the location of terminals on the Korean Peninsula( $f_c$ : 7.75GHz)

Location of terminals	$f_{d,max}$ [kHz]		
	Orbit 1	Orbit 2	Orbit 3
Daejeon	170.6	160.0	120.6
Dokdo	168.9	166.7	140.7
Baengnyeongdo	168.3	146.2	79.3
Marado	169.3	163.9	106.6
Onseong	166.5	141.6	64.1

지상 단말이 대전에 위치하고, 반송파 주파수가 7.75GHz일 때, 임의의 궤도 Orbit 1, Orbit 2, Orbit 3에 대한 도플러 주파수 편이 최대값은 170.61kHz, 160.0kHz, 120kHz로 나타났다. Orbit 3를 따라 이동하는 위성이 독도와 온성에 위치한 단말과 통신할 때, 도플러 주파수 편이 최대값이 각각 140.7kHz, 64.1kHz로, 두 지역 간의 도플러 편이의 차이가 76.6kHz인 것으로 나타났으며, 동일한 시간에 최대 53kHz의 도플러 편이 편차가 나타나는 것을 알 수 있으며, 저궤도 위성 통신에서 단말 위치에 맞는 적절한 도플러 편이 보상이 없을 경우 서로 간의 반송파 주파수에 편차가 발생함을 알 수 있다.

### III. 저궤도 위성 통신 시스템에서의 도플러 편이 보상을 위한 수신동기부 클럭 보상 방안

II장에서 분석한 도플러 편이 현상에 의해 지상국에서 수신된 신호에서 발생하는 CFO(Carrier Frequency Offset)가 실시간으로 변화하게 된다. 이로 인해 수신부에서 동기 에러가 발생하며, BER 성능을 저하시킨다. 이를 방지하기 위하여 수신부로 입력되는 신호에 더 높은  $E_b/N_o$  특성이 요구되나 이는 지상 단말 및 위성체의 송신부가 더 높은 송신 출력을 보내는 것을 의미하므로 단말의 크기, 무게 및 가격을 높이는 요소로 작용하게 된다.

따라서, 수신부에서 CFO가 발생하는 것을 반영하여 PLL(Phase Locked Loop) 회로 또는 NCO(Numerically Controlled Oscillator)의 출력 주파수를 보정하여 도플러 편이를 보상하는 것이 더 경제적인 방법이다. 다만, 클럭을 보정하기 위해 수반되는 CPU, FPGA등의 연산량 증가를 최소화하기 위해 클럭 주파수의 보정 간격과 BER 성능 열화간의 트레이드오프가 필요하게 된다.

그림 7에 나타난 것과 같이, 일반적으로 저궤도 위성과 지상 단말의 상대속도가 0에 가까워지고 도플러 편이 주파수 변화율  $\Delta f_d/\Delta t$ 가 최대인 범위에서 CFO의 최대값  $\Delta f_{max}$ 가 나타나게 되며, 만약 클럭 보정 간격  $\Delta t_{max}$ 이 길어진다면  $\Delta f_{max}$ 가 증가하여 BER의 성능 열화가 커지게 된다.

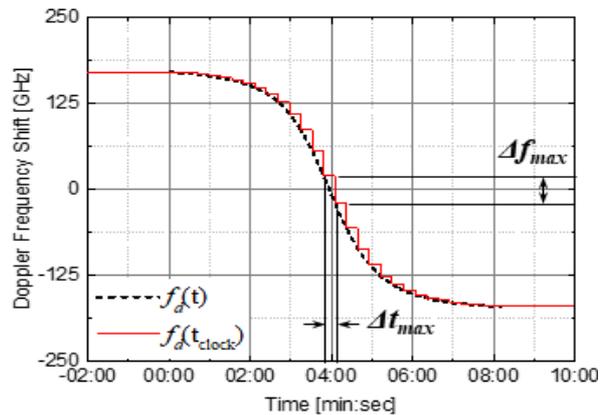
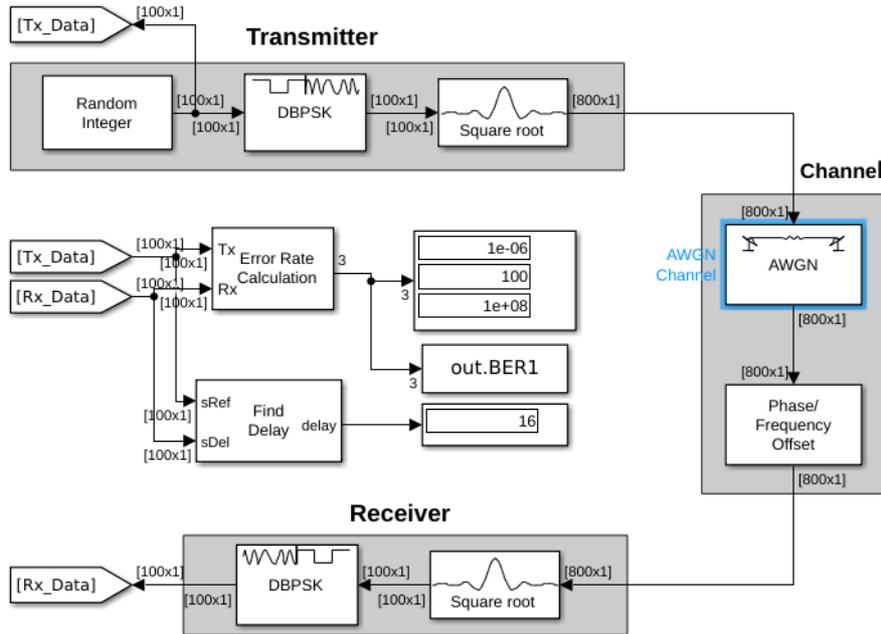


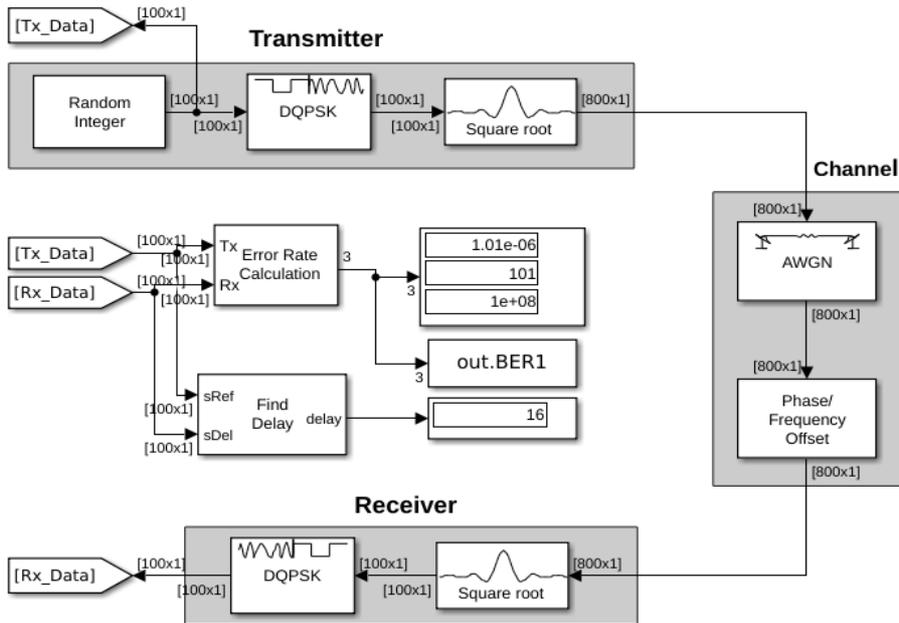
그림 7. 도플러 편이를 보상하기 위한 클럭 보정 간격  
 Fig. 7. Clock recovery interval for compensating Doppler shift

이에 본 논문에서는 위성과 지상 단말이 AWGN 채널에서 통신할 경우를 가정하여 DBPSK 및 DQPSK 변조 방식에서 도플러 편이, 즉 CFO 값에 따른 BER의 성능 변화를 Matlab을 이용하여 시뮬레이션하고, 이를 보상하기 위한 최적의  $\Delta t_{max}$ 를 제

시하였다. 시뮬레이션을 위해 그림 8에 나타난 것과 같이 DBPSK, DQPSK 변조 신호를 적용한 송신기, 수신기, AWGN 채널을 구성하였으며, 반송파에 발생하는 도플러 편이를 모의하기 위한 CFO를 발생시키는 블록을 추가하여 시스템을 구성하였다.



(a) DBPSK 변조  
(a) DBPSK modulation



(b) DQPSK 변조  
(b) DQPSK modulation

그림 8. 도플러 편이가 반영된 AWGN 채널에서의 BER 시뮬레이션 블록도  
Fig. 8. Block diagram for BER simulation in AWGN channel with Doppler shift

그림 9와 표 2에 CFO에 의해 BER 특성이 열화되는 정도의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 요구 BER을  $10^{-6}$ 으로 설정하였을 때, CFO가 없는 상태에서의 required  $E_b/N_0$ 은 DBPSK 방식에서 11.1dB, DQPSK 방식에서 12.8dB로 각각 나타났으며, CFO가 발생하였을 때, BER이  $10^{-6}$ 을 유지하기 위하여 요구되는 수신 신호의  $E_b/N_0$ 가 상승하는 것을 알 수 있다.  $E_b/N_0$ 가 1dB 열화되는 지점의 도플러 편이값은 DBPSK 적용시 41kHz이며 최소한 17초마다 수신부의 클럭 주파수를 보정해 주어야 도플러 편이가 41kHz로 유지되어 BER이  $10^{-6}$ 이하로 유지될 수 있음을 알 수 있다. 또한, DQPSK 적용시에는  $E_b/N_0$ 가 1dB 열화되는 지점의 도플러 편이값은 17kHz이며, 클럭 보정은 6.9초 간격 이내로 이루어져야 한다.

표 2.  $E_b/N_0$  열화에 따른 CFO 및 클럭 보정 간격  
Table 2. CFO(Doppler shift) and required clock recovery interval according to  $E_b/N_0$  degradation

DBPSK					
$\Delta E_b/N_0$	CFO	$\Delta t_{max}$	$\Delta E_b/N_0$	CFO	$\Delta t_{max}$
+0.0dB	0Hz	0.0sec	+0.8dB	37kHz	15.3sec
+0.2dB	1.45kHz	5.9sec	+1.0dB	41kHz	17sec
+0.4dB	23kHz	9.4sec	+2.0dB	65kHz	28sec
+0.6dB	30.8kHz	12.6sec	+3.0dB	83kHz	38.4sec

DQPSK					
$\Delta E_b/N_0$	CFO	$\Delta t_{max}$	$\Delta E_b/N_0$	CFO	$\Delta t_{max}$
+0.0dB	0Hz	0.0sec	+0.8dB	14.2kHz	5.7sec
+0.2dB	4.4kHz	1.7sec	+1.0dB	17kHz	6.9sec
+0.4dB	8.2kHz	3.3sec	+2.0dB	29kHz	11.9sec
+0.6dB	11.2kHz	4.5sec	+3.0dB	29kHz	16.1sec

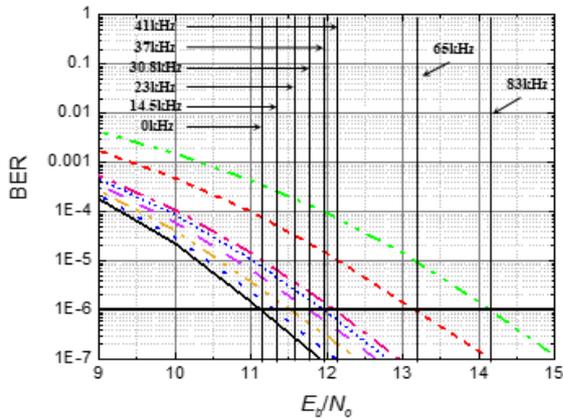
#### IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 한반도 지역에서의 저궤도 위성 통신 시스템에서 발생하는 도플러 편이값과 이에 의한 BER 성능 열화 정도를 DBPSK, DQPSK 변조 방식을 적용하여 분석하고, 이를 보상하기 위해 수신부의 동기부 클럭 보정 간격에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 지상국의 중심 위치를 대전으로 가정하였을 경우, 550km 고도 높이에서 7.59km/s의 속도로 이동하는 위성체가 반송파 주파수 7.75GHz를 사용할 경우 도플러 편이의 최대값은  $\pm 170.6$ kHz로 분석되었으며, 이를 보상하기 위해서는 DBPSK, DQPSK 변조 방법에서 각각 17초와 6.9초 간격으로 클럭 주파수의 보정이 이루어져야 한다는 것을 Matlab 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

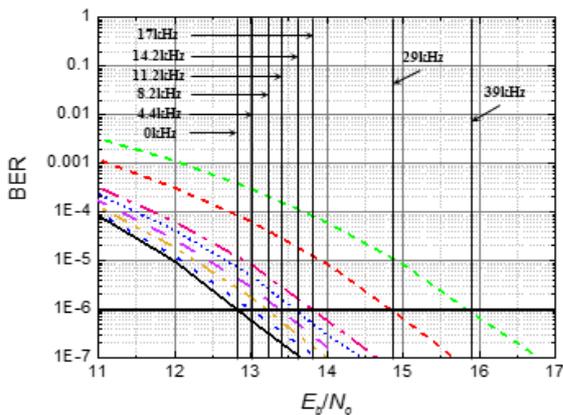
#### References

[1] T. T. Ha and R. C. Robertson, "Geostationary Satellite Navigation Systems", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-23, No. 2, pp. 247-254, Mar. 1987. [https://doi: 10.1109/TAES.1987.313379](https://doi.org/10.1109/TAES.1987.313379).

[2] W. Lechner and S. Baumann, "Global navigation satellite systems", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 25, No. 1-2, pp. 67-85, Jan. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00056-3).



(a) DBPSK 변조시  
(a) DBPSK modulation



(b) DQPSK 변조  
(b) DQPSK modulation

그림 9. Doppler shift에 따른 BER 성능열화  
Fig. 9. BER degradation according to the doppler shift

[3] Y. W. Cho, "Satellite Link of Rain Attenuation Analysis for Designing Satellite Communication Network on Ka Band", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 11, pp. 33-40, Nov. 2016. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.11.33>.

[4] H. S. Cha, J. M. Kim, B. J. Lim, J. H. Lee, and Y. C. Ko, "A Survey on Inter-Satellite Links for Low-Earth Orbit Satellite Networks", The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 47, No. 10, pp. 1508-1518, Oct. 2022. <https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.10.1508>.

[5] B. J. Lee, N. Y. Lee, J. H. Kim, and W. J. Shin, "A Survey of LEO Satellite Networks for 5G and Beyond: Channel Modeling, Research Trends, and Open Challenges", The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 46, No. 7, pp. 1097-1108, Oct. 2022. <https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1097>.

[6] R. Pritchard-Kelly and J. Costa, "Low earth orbit satellite systems: Comparisons with geostationary and other satellite systems, and their significant advantages", Journal of Telecommunications and the Digital Economy, Vol. 10, No. 1, pp. 1-22, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3316/informit.391994781766329>.

[7] U. Naeem, Z. Jawaid, and S. Sadruddin, "Doppler shift compensation techniques for LEO satellite on-board receivers", Proceedings of 2012 9th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, pp. 391-393, Apr. 2012. <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2012.6177585>.

[8] C. An and H. G. Ryu, "Compensation Systems and Performance Comparison of the Very High Doppler Frequency", 2020 IEEE Eighth International Conference on Communications and Networking, Hammamet, Tunisia, pp. 1-4, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1109/ComNet47917.2020.9306104>.

[9] I. Ali, N. Al-Dhahir, and J. E. Hershey, "Doppler characterization for LEO satellites", IEEE Transactions on Communications, Vol. 46, No. 3,

pp. 309-313, Mar. 1998. <https://doi.org/10.1109/26.662636>.

[10] J. Lin, Z. Hou, Y. Zhou, L. Tian, and J. Shi, "Map Estimation Based on Doppler Characterization in Broadband and Mobile LEO Satellite Communications", 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, Nanjing, China, pp. 1-5, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504336>.

### 저자소개

이 희 원 (Hee-Won Lee)



2022년 2월 : 호서대학교  
전자디스플레이공학부(공학사)  
2022년 3월 ~ 현재 : 호서대학교  
전자디스플레이공학과 석사과정  
관심분야 : 초고주파 능동·수동  
회로, 재구성 회로

하 태 식 (Tae-Sik Ha)



2022년 2월 : 호서대학교  
전자디스플레이공학부(공학사)  
2022년 3월 ~ 현재 : 호서대학교  
전자디스플레이공학과 석사과정  
관심분야 : 초고주파 능동·수동  
회로, 재구성 회로

윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과  
(공학사)  
1999년 2월 : 고려대 대학원  
통신시스템공학과(공학석사)  
2010년 8월 : 고려대 대학원  
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)  
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :  
한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원  
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자공학과 부교수  
관심분야 : RF & Microwave transceivers and sensor  
systems, Reconfigurable RF & Microwave system  
and antennas

김 영 재 (Young-Jae Kim)



이동통신시스템

2004년 2월 : 경북대 전자공학과  
(공학사)  
2004년 1월 ~ 현재 : 한화시스템  
항공우주사업부문 위성시스템4팀  
수석연구원  
관심분야 : 통신 신호처리 및  
시스템, 위성통신시스템,

김 성 호 (Sung-Ho Kim)



항공우주사업부문 위성시스템4팀 수석연구원  
관심분야 : 통신 신호처리 및 시스템, 위성통신시스템,  
이동통신시스템

2000년 2월 : 경남대 전자공학과  
(공학사)  
2002년 2월 : 경남대  
전자공학과(공학석사)  
2010년 8월 : 고려대 대학원  
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)  
2004년 1월 ~ 현재 : 한화시스템