

장거리 공대공 데이터링크를 위한 저 전력 웨이브폼 설계

Design of Power Efficient Waveforms for Long Range Air-to-Air Data Links

Haeuk Lee¹ · Je Heo² · Gijung Yang² · Taehee Lim² · Hyukjun Oh^{1*}

¹Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897, Korea

²PGM Research Center, LIG Nex1, Gyeonggi-do, 13488, Korea

[Abstract]

This paper proposes a low-power waveform for a long-range air-to-air data link. In the case of an air-to-air data link, data communication is performed in the air and high Doppler shift may occur depending on the flight speed, so a waveform based on the non-coherent method is suitable. In addition, since it is mounted on an aircraft, it must have low power characteristics. This paper proposes a waveform that combines a modulation technique based on frequency modulation and pulse position modulation that can turn on/off the transmission signal. As a result of the performance analysis, it was shown that the performance was suitable for air-to-air operation while showing low power characteristics.

Key word : Air-to-air, Data link, FSK, BPM, Power consumption.

I. 서론

최근 드론을 포함한 다양한 무인기에 대한 사회적 관심과 이를 기반으로 이에 요구되는 다양한 핵심기술에 관한 연구가 매우 광범위하게 진행되고 있다. 이러한 드론을 포함한 무인기에 있어 중요한 핵심기술 중의 하나가 각종 데이터를 상호 송수신하거나 중요 제어 정보를 전달하는 데이터링크이다[1]. 드론과 같은 무인기뿐만 아니라 고전적인 일반 비행기나 로켓 등을 포함한 일반적인 모든 비행체는 신뢰성이 높은 데이터링크 장치를 확보하는 것이 실제 해당 비행체가 수행하는 임무의 성공적인 완수를 위하여 매우 중요하다.

비행체와 비행체 사이에서 이루어지는 데이터링크의 경우 공대공 환경에서 이루어지므로 가시선이 확보되는 양호한 무선전송채널 환경을 갖게 되고 이에 따라 장거리 통신이 가능하게 된다. 반면에, 고속으로 기동하는 비행체의 특성으로 인하여 통신이 이루어지는 상호 비행체간 적지 않은 도플러 천이가 발생할 수 있고 상호 비행체의 운동 궤적에 따라서는 시간에 따라 변화하는 도플러 천이가 나타나기도 한다[2].

장거리 공대공 통신에 있어서 또 한 가지 중요한 설계조건은 전력 소모이다. 드론과 같은 소형 비행체뿐만 아니라 고출력의 전력증폭기를 탑재하는 대형 비행체도 저전력 특성을 갖는 데이터링크를 탑재하는 것이 중요하다[3].

본 논문에서는 장거리 공대공 데이터링크를 위한 저전력 통신 시스템으로 주파수변조 기반의 변조 기법과 송신 신호를 항상 송출하지 않아도 되는 변조 기법을 결합한 웨이브폼을 제안한 후, 해당 웨이브폼의 성능 분석을 수행하였다.

II. 공대공 채널 모델

공대공 데이터링크의 경우, 일반적으로 그림 1처럼 LOS (line of sight) 경로에 1~2개의 다중 경로가 존재하는 형태의 라이시안(Rician) 채널 모델로 볼 수 있다. 식(1)에서 a_n 은 각 경로의 진폭에 대한 통계적 특성을 나타내는 값으로, 도심이 아닌 들뜬과 같은 트인 지역에서는 a_0 의 경우 라이시안 분포를 갖고 그렇지 않으면 레일리(Rayleigh) 분포를 갖는다. $g_n(t)$ 복소 가우시안(Gaussian) 프로세스이다.

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.2.250>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 8 April 2024; Revised 22 April 2024

Accepted (Publication) 25 April 2024 (30 April 2024)

*Corresponding Author; Hyukjun Oh

Tel: +82-2-940-5132

E-mail: hj_oh@kw.ac.kr

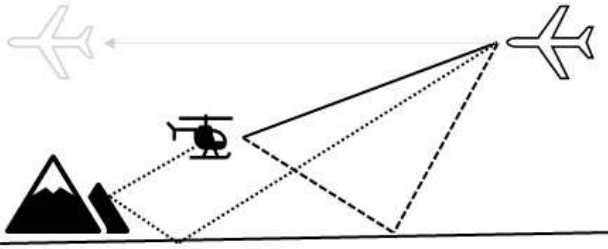


그림 1. 공대공 데이터링크 무선전송 채널
Fig. 1. Typical air-to-air propagation channel model.

$$h(t, \tau) = a_0 g_0(t) \delta(\tau) + \sum_{n=1}^N a_n g_n(t) \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (1)$$

충분히 높은 고도에서 통신이 이루어지는 경우, 강한 가시선이 확보 되어 다중 경로로 인한 신호의 왜곡이 미비해지며, 고도가 낮은 경우에는 지상에서 반사되는 전파나 주변 높은 산지의 영향으로 인하여 다중 경로의 영향을 고려하여야만 한다. 이러한 고도에 따른 채널의 변화는 K인자(K-factor)를 조정하여 근사화할 수 있다. 본 논문에서는 실제 공대공 운용 환경을 고려하여 충분한 고도에서의 운영으로 가시선이 명확하게 확보되는 무선 전송채널 환경을 고려한다.

고속으로 비행하는 공대공 비행체 사이에서 운용해야 하는 데이터 링크의 경우, 상호 간 비행 속도 차이에 의한 도플러 천이 현상이 발생 하게 된다. 항공기의 고속 이동으로 인하여 또 한 가지 나타날 수 있는 현상은 도플러 천이 현상이 시간에 따라 변하게 된다는 것이다. 그림 1에서 보듯이 보다 높은 고도에서 고속으로 비행하는 항공기가 낮은 고도에서 저속으로 진행하는 비행체를 상공에서 지나가는 경우, 도플러 주파수의 변화 속도가 최대에 달하게 된다. 따라서, 이러한 순간적인 도플러 주파수의 변화에 대응할 수 있는 웨이브폼의 설계가 요구된다.

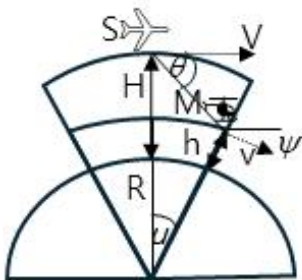


그림 2. 공대공 채널 도플러 주파수 편이 모델링
Fig. 2. Air-to-air Doppler frequency shift modeling.

이러한 비행체 고속 이동으로 인한 도플러 천이 현상에 대한 모델링 방법은 저궤도위성에 대한 채널 모델링 방법과 유사하다[4]. 그림 2는 비행체의 고속이동으로 인한 도플러 천이 현상을 모델링 하기 위한 기하학적 방법론을 나타내고 있다. [4]와 같은 방법으로 모델링을 수행하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

도플러 천이 값에 영향을 미치는 요인 중 하나는 \overline{SM} 과 속도 벡터 \vec{V} 사이의 각도 θ 와 벡터 \vec{v} 사이의 각도 ψ 이다. 고속 비

행체와 저속 비행체가 각각 고도 H와 h에 있고, 지구 반지름이 R이며 해당 비행체의 속도가 각각 V와 v이고, 전송 주파수가 F_c 일 때, 도플러 주파수 F_d 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_d = \frac{F_c}{c} (V - v \cos \psi) \frac{\sin u}{\sqrt{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos u}} \quad (2)$$

$\gamma = (R+H)/(R+h)$ 이고, u 는 지구 중심을 기준으로 고속 비행체 S와 저속 비행체 M이 이루는 각도이다. 최대 도플러 천이는 데이터링크의 최대 통달 거리에서 나타나게 되고, 최소 도플러 천이는 0으로써 고속 비행체가 저속 비행체 상공을 지나 가는 순간 발생하게 된다.

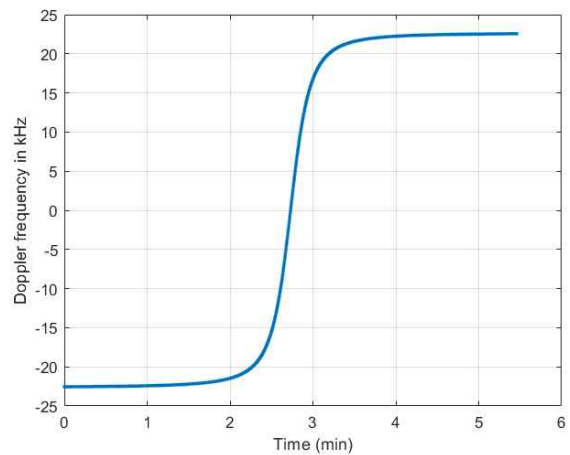


그림 3. 공대공 채널 도플러 주파수 천이를
Fig. 3. Doppler shift variation rate for air-to-air link.

예를 들어, 고도 10km 상공을 속도 마하 2로 초고속 비행 중인 고속 비행체에 대하여, 중심주파수 10GHz에 대한 도플러 주파수 천이는 그림 3과 같다.

III. 공대공 데이터링크 웨이브폼 설계

II장에서 기술한 공대공 데이터링크 웨이브폼 설계 요구사항을 고려할 때, 다중 경로로 인한 신호 왜곡이 크지 않은 상황에서 정밀한 채널 추정이 필요 없고 도플러 천이 현상에 대응이 쉬운 논코히어런트 방식에 기반한 통신기법을 사용하는 것이 유리하다. 이에 따라, 진폭의 크기를 가변하거나 온오프하는 방식, 차분 위상변조 방식, 그리고 주파수 변조 방식을 고려할 수 있다.

공대공 데이터링크의 경우, 무선전송채널 자체가 가시선이 확보되는 안정적인 상태이므로 장거리 통신을 고려하여 고풍력 전력증폭기를 사용하나, 이에 따라 비행기의 탑재 용이성이나 전력 소모 측면에서 부정적인 문제가 발생하는 경우가 적지 않다. 따라서, 일부 성능을 낮추더라도 가시선이 확보되는 양호한 무선전송 환경임을 고려하여 저전력 또는 전력증폭기의 효율을 극대화할 수 있는 웨이브폼의 설계가 요구된다. 이에 따라, CPM[5] 계열의 변조기법을 채택하는 것이 타당하다.

고출력 전력증폭기의 경우 최대 출력을 유지할 수 있는 시간에 제한이 있고, 전력증폭기를 온오프하는 일종의 스위칭 운용의 경우에는 스위칭 속도에 한계가 존재하는 경우가 많다. 하지만, 최근 전력증폭기 기술의 발달로 과거에 비해 최대 출력 유지 시간이 증가하고, 스위칭 속도도 빨라지고 있다. 이러한 점을 고려할 때, 전력증폭기의 최대 출력을 유지하는 시간을 극대화하고, 빨라진 스위칭 속도로 인한 이득을 활용하기 위하여 상대적으로 어느 정도 빠른 속도로 온오프하면서 운용함으로써 전력증폭기의 효율을 극대화하고 전력 소모를 최소화하는 변조 기법을 고려할 수 있다.

위에서 기술한 내용을 기반으로, 본 논문에서는 CPM 계열의 주파수 변조 기법을 PPM 변조 기법과 같은 온오프 스위칭이 이루어지는 변조 기법과 융합하여 사용하는 공대공 데이터링크를 위한 논코herent 웨이브폼을 제안한다. 일반적으로 폭넓게 사용되는 CPM 계열의 주파수 변조 기법으로는 FSK/GFSK/MSK/GMSK 등이 있으나, 어떠한 변조 기법을 사용하더라도 스펙트럼 특성과 BER 성능 사이에 상호 보완적인 관계가 존재할 뿐 눈에 띄는 큰 차이가 있다고 보기는 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 변조 방식 중 가장 대표적인 FSK 변조 기법과 이진 PPM 기법의 조합을 사용하는 식(3)과 같은 웨이브폼을 제안한다.

$$x(t) = Ap\left(t - i_n \frac{T}{M}\right) e^{j2\pi f_n t}, nT \leq t < (n+1)T \quad (3)$$

식(3)에서 A 는 CPM의 상수 진폭을 나타내는 값이며, $p(t)$ 는 전력증폭기의 온오프 파형 형태로서 PPM 변조 방식에 사용되는 파형의 모양으로 볼 수도 있다. f_n 은 nT 심볼 타이밍에서의 FSK 알파벳 크기 L 중에서 송신 데이터에 대치된 특정 주파수 값이고, i_n 은 PPM 알파벳 크기 M 중에서 송신 데이터에 대한 파형의 위치를 나타낸다. 따라서, 제안하는 방법은 한 심볼 구간 내에서, 한 번에 총 $\log_2 L + \log_2 M$ 비트를 송신할 수 있다.

FSK 변조에 기반한 기본적인 웨이브폼 설계에 있어 같은 데이터 전송률과 유사한 대역폭을 기준으로 할 때 최적의 변조 알파벳 크기를 결정하여야 한다. 예를 들어, W 대역폭을 기준으로 $W/2$ 심볼 전송률을 사용하여 4-FSK로 전송하는 방법과 W 심볼 전송률로 BFSK로 전송하는 방법이 존재한다.

본 논문에서는 실제 비행체에 장착된 데이터링크의 RF 및 아날로그 부를 모델링하고, 이렇게 모델링된 RF 및 아날로그 부와 통합된 시뮬레이터를 개발하여 스펙트럼 특성과 SER (symbol error rate) 성능을 토대로 공대공 데이터링크를 위한 FSK 변조 방식의 알파벳 크기를 결정하였다. 그림 4에서 도시된 바와 같이 BFSK와 4-FSK의 두 가지 주파수 변조 기법의 송신 전력 스펙트럼을 분석한 결과, 99% OBW (occupied bandwidth) 기준으로 BFSK는 0.126이고 4-FSK는 0.202로써 BFSK가 4-FSK에 비해 더욱더 효율적임을 알 수 있다. 다음으로 오직 변조 방식에 의한 성능 차이만을 확인하기 위하여 이상적인 채널 환경에서 채널 코딩이 포함되지 않은 순수한 SER만을 비교하였다. 비교 결과, 그림 5에서 보듯이 두 변조 방식 사

이에 큰 성능 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

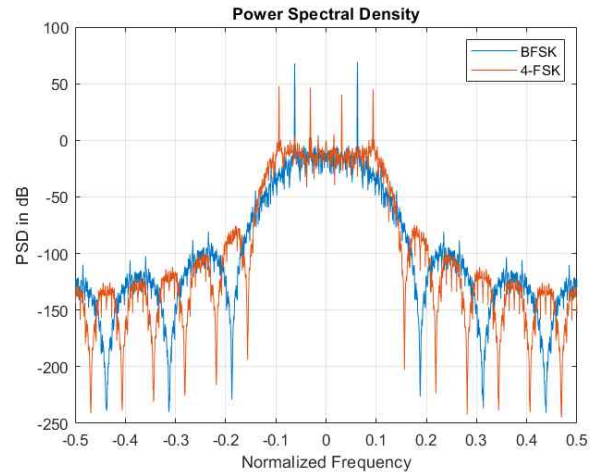


그림 4. 동일 데이터 전송률 기준 BFSK와 4-FSK 변조 방식의 스펙트럼 비교

Fig. 4. Spectrum comparison between BFSK and 4-FSK modulations with the same data rate.

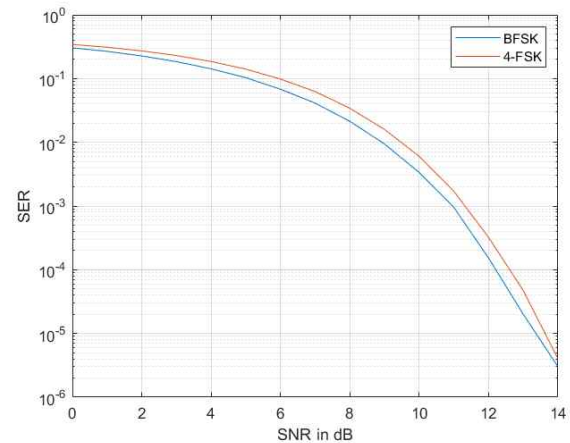


그림 5. 동일 데이터 전송률 기준 BFSK와 4-FSK 변조 방식의 성능 비교

Fig. 5. Symbol error rate comparison between BFSK and 4-FSK modulations with the same data rate.

따라서, 본 논문에서는 PPM 변조로 인한 불연속적인 송신이 발생함에 따라 저전력 설계를 지향하는 측면에서 전력 스펙트럼의 효율성이 중요하므로 BFSK 변조 기법을 PPM 변조 방식과 융합하여 사용하는 웨이브폼을 제안한다. 송신 데이터 '10010011'에 대한 제안된 웨이브폼의 송신 신호는 그림 6과 같이 나타난다.

설계된 웨이브폼은 CPM 계열의 주파수 변조 기법과 50% 통신 시간에 대하여 송신 신호를 송출하지 않는 PPM 변조 기법이 동시에 사용되므로 저전력 및 높은 효율을 달성할 수 있다. 전력증폭기 온오프를 위한 일종의 파형 제어 신호 $p(t)$ 는 램프업 (ramp-up)과 램프다운 (ramp-down)으로 구성된 신호를 사용한다.

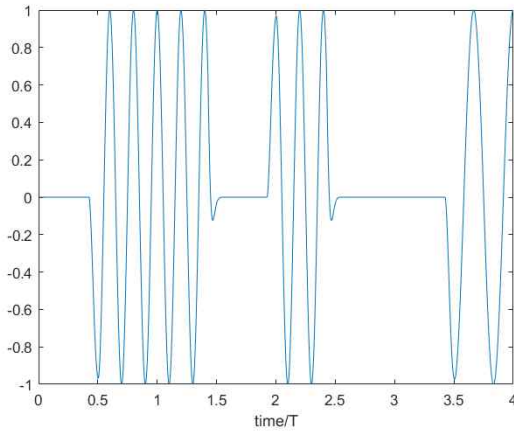


그림 6. 제안하는 데이터링크 웨이브폼의 송신 신호
Fig. 6. Transmitted signal of the proposed waveform.

IV. 모의실험을 통한 성능 분석

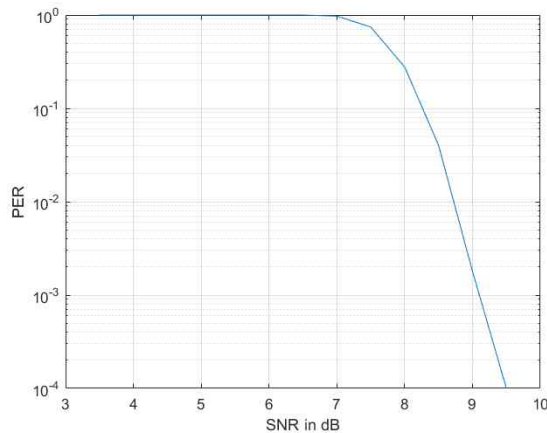


그림 7. 제안하는 공대공 데이터링크 PER 성능
Fig. 7. Packet error rate of the propose air-to-air data link waveform.

제안하는 공대공 저전력 데이터링크를 위한 웨이브폼($L=2, M=2$)의 성능 분석을 위하여 마하 2로 비행하는 고속 비행체를 가정하고 K인자 30 dB을 갖는 라이선 페이딩 채널 모델($N=1$)을 적용하여 모의실험 하였다. II장에서 살펴보았듯이 공대공 데이터링크 무선 전송채널의 경우 충분히 고도가 높은 경우 다중 경로로 인한 신호 왜곡이 크지 않으므로, 블록 채널 코드의 하나인 (255, 223) 리드 솔로몬 코드를 사용하였으며, 시간에 따른 도플러 주파수 천이에 대한 대응은 FFT에 기반한 AFC를 사용하여 추정 및 보정할 수 있도록 하고, 정합 여과기에 기반한 논코히어런트 방식의 FSK 복조기를 사용하였다. 모의실험 결과 기존 주파수변조 기법 대비 2배 높은 전력효율을 보이면서도 우수한 PER (packet error rate) 성능이 보임을 그림 7에서 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 저전력 공대공 데이터링크 통신 시스템을 위한 주파수변조와 펄스 위치 변조 기법의 조합을 제시하였다. 기본적인 공대공 데이터링크 운영환경을 고려하여 공대공 무선 전송 채널 모델을 기술하였으며, 기존의 상시 송신하는 데이터링크와 달리 평균 전력 요구사항의 최소화를 위해 FSK-PPM 결합이라고 하는 새로운 변조기 구조를 제안하였다. 제안된 결합 방식은 평균 전송 전력과 BER 성능 측면에서 전통적인 CPM 계열 방법과 비교할 때, 장거리 공대공 데이터링크로써 충분히 운용할 수 있는 결과를 보였다.

Acknowledgments

본 논문은 2024년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2021M1B3A3102358)과 2023년도 광운대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] I. Bennageh, H. Mahmoudi, H. Hajjaji, I. Laabousse, and A. Hamdouchi, "Predictive modeling of environmental impact on drone datalink communication system," *Modeling and Simulation in Engineering*, Vol. 2024, Article ID 2739649, April, 2024.
- [2] R. T. Rupoma, W. B. A. R. Akash and M. G. Mostafa, "Improved channel model of UAV to UAV millimeter wave link under hovering fluctuations and Doppler effect," in *IEEE 1st DICCT*, Dehradun: India, pp. 575-580, March, 2023.
- [3] C. Zhan and Y. Zeng, "Energy-efficient data uploading for cellular-connected UAV systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 19, No. 11, pp. 7279-7292, Nov. 2020.
- [4] H. Lee, Y. Ryu, and H. Oh, "Performance analysis of low earth orbit satellite communication systems under multi-path fading environments," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-28, Jan. 2023.
- [5] J. Ping, S. Li and Y. Lin, "UAV swarm automatic modulation recognition with multiple interferences," in *IEEE 23rd ICCT*, WuXi: China, pp. 1639-1645, Oct. 2023.