

UAV 운영 신뢰성 개선을 위한 SATURN 통신망 항재밍 프레임 오류율과 해밍코드 반복 전송 향상 기술[☆]

Improved Anti-Jamming Frame Error Rate and Hamming Code Repetitive Transmission Techniques for Enhanced SATURN Network Reliability Supporting UAV Operations

황 윤 하¹ 백 정 석¹ 구 교 안¹ 정 중 문^{1*}
Yoonha Hwang Jungsuk Baik Gyoan Gu Jong-Moon Chung

요 약

기술 발전에 따라 UAV(Unmanned aerial vehicle)의 성능이 향상되고 가격이 낮아지면서 미래에는 다양한 분야에서 UAV의 활용도가 높아질 것으로 예상된다. UAV를 안정적으로 운용하기 위해서는 제어 신호와 영상정보 통신을 유지하는 것이 매우 중요하며 예기치 못한 재밍 공격에 통신이 교란되면 치명적인 UAV 추락 사고가 발생할 수 있다. 반대로 원자력발전소 등의 주요 시설을 보호해야 하는 입장에서는 적군의 UAV들과 민간 목적으로 사용하는 상용 드론들의 위협을 고려 해야할 필요성이 있다. 본 연구에서는 SATURN(Second generation Anti-jam Tactical UHF Radio for NATO)과 같은 UHF 무전기를 사용한 UAV 설계 시 FEC(Forward error correction) 기술 중 하나인 해밍코드와 MSK(Minimum Shift Keying) 변조를 사용하는 시스템에 반복 전송 기법과 결합하여 항재밍 성능을 높여 UAV 운영 환경에서 지연시간이 낮은 안정적인 통신링크를 유지하도록 제안한다.

☞ 주제어 : UAV, 재밍, 항재밍, 변조방식, 해밍코드

ABSTRACT

As the performance of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are improving and the prices are lowering, it is expected that the use of UAVs will continuously grow in the future. It is important to always maintain control signal and video communication to operate remote UAVs stably, especially in military UAV operations, as unexpected jamming attacks can result in fatal UAV crashes. In this paper, to improve the network reliability and low latency when supporting UAV operations, the anti-jamming performance of Second generation Anti-jam Tactical UHF Radio for NATO (SATURN) networks is analyzed and enhanced by applying Forward Error Correction (FEC) and Minimum Shift Keying (MSK) modulation as well as Hamming code based multiple transmission techniques.

☞ keyword : UAV, Jamming, Anti-Jamming, Modulation, Hamming code

1. 서 론

항공/전자기술의 발달로 UAV의 성능은 빠르게 향상되고 가격은 낮아지면서 다양한 분야에서의 활용 가능성이 높아지고 있다. 이러한 추세에 따라 전세계적으로 여러 기업들이 UAV 개발에 앞장서고 있다. UAV는 조종자

가 탑승하지 않고 지상에서 제어하기에 통신링크의 불안정은 추락이나 충돌 등을 야기할 수 있어 UAV의 통신링크를 안정적으로 유지하는 것이 매우 중요하다. 그리고 UAV 단가가 낮아지면서 일반인들에게도 상용 UAV가 다수 판매되었다. 이러한 UAV는 크기가 작고 촬영기능이 내장되어 있어 원자력발전소나 공항 및 군사시설처럼 시설 보안이 필요한 곳에 매우 위협적이다. 특히 공항 근처에서 비행하는 상용 드론은 이착륙하는 항공기 엔진에 피해를 입히기 충분하며 각종 테러 등에 이용되기 쉽다. 그러므로 테러에 쉽게 이용될 수 있기에 공항이나 원자력발전소 등 주요시설 근처를 비행하는 소형 UAV의 비행을 중단시키거나 재밍을 통해 제어 및 영상신호를 차단하여야 한다. 이때 공항으로부터 허가되어 이·착륙 중인 UAV가 비허가된 UAV와 동시에 있는 상황이라면 허

¹ School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

* Corresponding author (jmc@yonsei.ac.kr)

[Received 30 December 2021, Reviewed 12 January 2022(R2 27 April 2022), Accepted 18 May 2022]

[☆] This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.2019-0-00685, Free space optical communication based vertical mobile network).

가된 UAV도 통신에 영향을 받을 수 있기에 기본적인 항재밍 능력을 탑재하는 것이 필요하다. 또한 원거리를 비행하는 중고고도 UAV의 경우에도 군사용으로 많이 사용되는데 이러한 UAV들은 지상국에서 먼 곳을 비행하며 통신 신호의 강도는 약해지고 예기치 못한 강한 재밍에 노출될 가능성이 크다. 재밍으로 인해 데이터 전송에 실패한다면 재전송이 지속적으로 발생하고 이러한 재전송 증가는 채널의 전송효율을 저하시키기도 하지만 UAV의 경우 제어신호와 영상신호의 전달이 늦어지게 되어 조종자의 조종을 매우 어렵게 만든다. 본 논문에서는 SATURN같은 UHF 무전기를 통해 제어되는 중장거리를 비행하는 UAV 운영환경을 가정하고 재밍이 있는 상황에서도 제어에 필요한 최소한의 영상과 제어신호를 지연시간 증가 없이 안정적으로 전송할 수 있는 다이나믹 다중 프레임 전송기술을 제안한다. 본 기술을 통해 재전송에 따른 지연시간 증가를 최소화하여 안정적인 UAV 운영이 가능해질 것이다.

2장에서는 Jamming / Anti-Jamming 기술에 대해 간략히 설명하고 3장에서는 변조방식에 따라 항재밍 능력이 다를 수 있음을 확인한다. 변조방식에 따른 FER(Frame Error Rate)를 계산하고 해밍코드를 적용함으로써 FER이 개선될 수 있음을 확인하며 이를 바탕으로 프레임 크기와 재전송 수를 조정하여 재밍 상황에서 안정적인 통신할 수 있는 다이나믹 다중 프레임 전송기술을 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 앞의 기술의 성능을 확인한다.

2. Jamming / Anti-Jamming 기술

2.1 일반적인 Jamming 기술

일반적으로 재밍은 물리 계층과 링크 레이어에서 재밍을 시도한다.[1] 본 논문에서는 단순한 구조의 상용 UAV부터 항재밍 성능을 가진 무전기까지 주파수를 활용하는 시스템에 대해 범용적으로 재밍할 수 있고 재밍 대상에 대한 정보가 적게 필요하며 시스템이 단순한 물리 계층에서의 재밍을 기준으로 설명하고 분석한다.

2.1.1 대역잡음 재밍

대역잡음 재밍은 재밍해야 할 시스템이 사용하는 주파수에 대해 재밍하는 기법이며 전대역 잡음 재밍과 부분대역 잡음 재밍으로 나누어진다. 전대역 잡음 재밍은 재

밍 대상의 주파수가 발생할 수 있는 전 범위에 대해 재밍하는 것이고 부분대역잡음 재밍은 재밍 대상이 방사하는 주파수 대역 중 일부 대역에 대해서만 재밍을 하는 방식이다. 이 논문에서는 유효한 결과를 확인하기 위하여, 대역잡음 재밍은 SATURN의 주파수 도약 기법과 관계없이 모든 대역에 대해 재밍을 받는다는 가정을 위해 전대역잡음 재밍을 고려하고, 이 재밍 신호는 연속파라 가정하여 단순화하였다.

2.1.2 펄스 재밍

펄스 재밍은 재밍 대상이 사용하는 주파수에 대해 재밍 신호를 펄스 형태로 시간축에 따라 방사 또는 대기를 반복하는 형태이며, 재밍 신호가 존재하는 시간과 없는 시간으로 구분된다. 마찬가지로, 유효한 결과를 확인하기 위하여, 펄스 재밍의 모든 주파수 영역은 재밍의 범위에 있다고 가정한다.

2.1.3 스위프 재밍

주파수 대역에서 낮은 주파수 대역에서 높은 주파수 대역까지 쓸 듯 재밍해 나가는 기법이다. 일반적으로 재밍해야 하는 상대 시스템의 정보가 부족한 경우가 많기 때문에 스위프 재밍을 통해 예상되는 주파수 대역을 훑어내리는 것이다. 본 논문에서는 고려하지 않는다.

2.2 Anti-Jamming 기술

2.2.1 채널 부호화

채널 부호화는 오류정정코드를 사용하여 오류 정정코드의 능력 안에서는 오류를 정정하는 것이다. 일반적으로 FEC(Forward Error Correction)로 오류 정정 코드가 추가되고 오류 정정 코드로 인해 데이터 전송속도는 저하되나 하나의 프레임에서 일부 비트가 손상되더라도 오류 정정 코드가 지원하는 범위 내에서 정상적으로 복구가 가능하며 재밍 환경에서 전송 안정성이 증가한다. 예를 들어 항재밍 기능을 보유한 미군의 SATURN 무전기는 동기 전송 시 FEC를 사용하여 항재밍 성능을 향상시킨다.[2]

본 논문에서는 각 프레임에 오류정정 코드로 해밍코드를 적용하여 채널 부호화를 구현하고 필수적인 신호를 유지하기 위해 FER(Frame Error Rate)을 낮게 유지하도록 하는 다이나믹 다중 프레임 전송기술을 제안할 것이다.

2.2.2 주파수 도약

일반적인 상황에서, 사용 가능한 전 대역에 대해 재밍하는 것은 많은 에너지가 들어가 현실적으로 어렵기 때문에 부분대역 또는 스팟에 대해 재밍이 이루어진다. 주파수 도약은 이런 상황에서 재밍되는 주파수를 회피하고 도약 패턴을 암호화하여 재머가 도약 주파수를 추적하여 재밍하지 못하도록 방지한다.

2.2.3 클리핑/이레이징/필터링

클리핑과 이레이징은 재머에 대한 사전 정보가 부족하다라도 동작하며 간단하게 구현 가능한 기술이다. 클리핑은 정해진 임계치를 넘는 신호를 강제적으로 임계치로 제한하는 기법이다. 이레이징은 재밍에 의해 영향을 받은 신호를 복호 과정에서 삭제하는 기술로 불완전한 정보를 지닌 데이터를 배제하여 시스템 성능을 향상시키는 기술이다. 필터링은 이와 다르게 재밍 신호에 대한 일정 정보가 있는 경우 사용할 수 있다. 통계적으로 재밍 신호에 대해 발생정보를 알 수 있다면 이 정보를 바탕으로 재밍 신호를 필터링하여 성능을 향상하는 기법이다. 이 기술들은 이 논문에서 다루지 않는다.

3. 통신방식과 재밍 환경에 따른 성능분석 및 UAV 통신링크 항재밍 성능 향상기술

3.1 UAV 통신방식

UAV는 용도와 목적에 따라 다양한 통신 방식으로 제어된다. 주로 군용으로 활용되는 중고고도 무인기는 UHF 통신을 기반으로 하며 상용으로 판매되는 소형 UAV는 2.4Ghz를 중심으로 Wi-Fi같은 기술이 사용되기도 하지만 저가형의 경우 FSK 변조방식만을 적용하기도 한다. 이처럼 소형 UAV의 경우 매우 다양한 변조방식을 사용하므로 예측하기 어렵다. 그러므로 재밍 대상의 정보가 부족하다라도 재밍이 가능한 물리 계층에서의 재밍 기법으로 접근하는 것이 효과적이다. 특히 원자력발전소나 공항 같은 주요 시설에 대해 테러 목적으로 사용된다면 통신 시스템을 불법적으로 개조할 수 있기 때문에 재밍 대상에 대한 정보가 부족하다라도 재밍이 가능한 물리계층에서의 재밍으로 접근해야한다.

3.2 재밍 환경에서 UAV의 통신 성능 및 개선기술 제안

3.2.1 UAV 통신방식과 성능

UAV의 통신은 다양하게 설계될 수 있으나 본 논문에서는 군용(美) 또는 주요 사업용 UAV처럼 사고가 발생하지 않도록 항재밍 성능을 고려해야 하는 시스템에 필요한 MSK 변조와 주요 시설에 위협이 될 수 있는 상용 UAV가 사용하는 BFSK 변조 두가지에 대해 분석하였다. MSK는 SATURN 같은 군용 항재밍 무전기가 변조하는 방식으로 항재밍 성능이 우수한 변조 방식이다.[2] BFSK 변조는 상용 UAV의 경우 2.4 Ghz 대역에서 동작하도록 설계되어 나오고 있으나 명확한 표준이 없는 실정이다. 제조사별로 다른 부분이 있으므로 Coherent / Noncoherent BFSK 로 통신하는 경우로 나눠 분석하였다.

3.2.2 변조방식과 재밍 환경에 따른 BER

변조방식과 재밍 환경에 따른 BER을 다음과 같이 유도한다. MSK 변조와, 단순한 저가의 상용 UAV의 Coherent / Noncoherent BFSK 변조의 대역잡음 재밍, 펄스 재밍에 대한 항재밍 성능을 확인하였다. 신호대 재밍 신호비에 따른 BER(Bit Error Rate)을 기준으로 확인하였다.

MSK변조는 OQPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying)을 변형시킨 방식이다. OPQSK에서 구형과 대신 반 파장 정현파로 펄스 정형한 것으로 OQPSK와 동일한 BER값을 갖게 된다.[4] 자연 환경에서 발생하는 노이즈를 AWGN(Additive White Gaussian Noise)으로 고려하며 이를 N_0 라 한다. 재밍이 발생하면 AWGN에 재밍신호가 더해지게 되며 AWGN은 재밍신호에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 또한 비행 중 UAV의 자세 변화 시 Shadowing 이 발생할 수 있고 원거리를 비행하는 UAV의 경우 실제 환경에서 다양한 환경변수로 인해 통신이 원활하지 않을 수 있다. 지상국에서 항공기까지 LoS(Line of Sight) 가 지평선이나 산 능선같은 지형에 걸리면서 영향이 발생하거나 지표면 반사, 기상이나 예상치 못한 다양한 환경으로 인한 영향을 받기에 실제 운영 환경에서 환경적 요인으로 인해 통신 신호가 감쇄되는 정도를 고려하여야 하며 이를 α 라 한다. 이를 통해 전송 과정에서 환경적 요인에 대해 시스템 설계에서 반영 가능하다. α 는 0에서 1 사이에서 존재하며 전송 환경이 악화되는 경우 0에 가까워지고 전송환경이 개선되면 1에 가까워진다. 이때 상대방의 재밍 신호가 일정하다고 가정하면 α 가 0에

가까워짐에 따라 신호대 재밍신호비의 악화로 이어지게 된다. 반대로 전송환경이 매우 좋다면 α 는 1에 가깝게 운영될 것이고 동일한 재밍 환경에서도 양호한 신호대 재밍신호비를 보이게 된다.

MSK 변조의 대역잡음 재밍에 대한 BER인 P_{BER} 은 (1)과 같이 유도된다.[4, 5]

(E_b : 통신 신호의 세기, JN : 재밍 신호의 세기)

$$P_{BER} = Q\left\{\left(\frac{2\alpha E_b}{N_o + JN}\right)^{0.5}\right\} \approx Q\left\{\left(\frac{2\alpha E_b}{JN}\right)^{0.5}\right\} \quad (1)$$

펄스 재밍에서 MSK의 BER은 재밍이 있는 부분과 없는 부분을 나눠 유도된다. Duty Cycle을 ρ , 재머가 재밍에 사용하는 총 에너지량은 (1)의 대역잡음 재밍과 동일하다고 보면 BER은 (2)와 같이 유도된다.

$$P_{BER} = \rho Q\left\{\left(\frac{2\alpha E_b}{N_o + JN/\rho}\right)^{0.5}\right\} + (1-\rho) Q\left\{\left(\frac{2\alpha E_b}{N_o}\right)^{0.5}\right\} \\ \approx \rho Q\left\{\left(\frac{2\alpha E_b}{JN/\rho}\right)^{0.5}\right\} \quad (2)$$

상용 UAV를 가정한 Coherent BFSK에 대역잡음 재밍이 발생할 때 BER은 (3)과 같이 유도된다.

$$P_{BER} = Q\left\{\left(\frac{\alpha E_b}{N_o + JN}\right)^{0.5}\right\} \approx Q\left\{\left(\frac{\alpha E_b}{JN}\right)^{0.5}\right\} \quad (3)$$

Noncoherent BFSK의 대역잡음 재밍 시 BER은 (4)와 같이 유도된다.

$$P_{BER} = \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha E_b}{2(N_o + JN)}} \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha E_b}{2JN}} \quad (4)$$

펄스 재밍 상황에서 Coherent BFSK의 BER은 재밍이 있는 부분과 없는 경우로 나뉘며 (5)와 같이 유도된다.

$$P_{BER} = \rho Q\left\{\left(\frac{\alpha E_b}{N_o + JN/\rho}\right)^{0.5}\right\} + (1-\rho) Q\left\{\left(\frac{\alpha E_b}{N_o}\right)^{0.5}\right\} \\ \approx \rho Q\left\{\left(\frac{\alpha E_b \rho}{JN}\right)^{0.5}\right\} \quad (5)$$

펄스 재밍, Noncoherent BFSK의 BER은 (6)과 같다.

$$P_{BER} = \frac{1-\rho}{2} e^{-\frac{\alpha E_b}{2N_o}} + \frac{\rho}{2} e^{-\frac{\alpha E_b}{2(N_o + JN/\rho)}} \\ \approx \frac{\rho}{2} e^{-\frac{\alpha E_b \rho}{2JN}} \quad (6)$$

3.2.3 FER(Frame Error rate) 향상을 위한 다이나믹 이중 프레임 전송기술

다양한 재밍 환경에서 변조방식에 따른 BER을 계산가능함을 확인하였다. UAV의 무선 통신 시 프레임 단위로 전송되며 BER을 기반으로 FER(Frame Error Rate)을 구하고 이를 최적화할 필요가 있다. 프레임은 여러 비트로 구성되며 프레임에 자동 복원이 가능한 오류 정정 코드를 사용하지 않는다면 단 하나의 비트가 손상되더라도 해당 프레임은 사용할 수 없다. 이로 인해 BER이 높아지거나 하나의 프레임에 전송하는 비트수가 커질수록 FER은 커지게 된다.

항재밍 성능을 보장하기 위해 비트 오류를 자동 정정 가능한 오류 정정 코드를 사용하는 시스템으로 설계하였다. 이때 오류를 자동으로 정정하기 위해 수신측에서 하나의 비트 오류에 대해 자동 정정이 가능한 해밍코드를 SATURN에서 사용하는 것으로 가정하고 설계하였다. 오류 자동 정정이 가능한 코드를 사용하면 항재밍 성능이 향상되며 빠른 속도로 비행하는 UAV에서 재밍으로 인한 통신링크 중단 및 사고 발생 가능성을 크게 줄일 수 있다.

해밍코드는 데이터 전송 시 1비트의 에러를 정정할 수 있는 FEC(Forward Error Correction) 기술 중 하나이다. 해밍코드는 데이터 비트 사이에 오류를 감지하고 수정 가능하도록 패리티 비트를 삽입하며 패리티 비트는 한 프레임에서 전송해야 하는 데이터 비트 숫자에 의해 다음과 같이 계산된다.

(P : 필요 패리티 비트 수, D : 전송 데이터 비트 수)

$$2^P \geq P + D + 1 \quad (7)$$

해밍코드에서 추가해야 할 패리티 비트의 수는 수식 (7)을 만족하는 최소의 P 값이다. 예를 들어 전송해야 하는 데이터 비트 D 가 4개라면 패리티 비트 수 P 는 3이 된다. 또한 패리티 비트가 삽입되는 위치는 2^n ($0 \leq n < P-1$)으로 결정된다. 만약 데이터 비트를 4개 전송한다면 다음 표 1과 같은 형태로 구성되어 전송된다.

(표 1) 프레임에서 4 bit 의 데이터를 전송할 때 패리티 비트와 데이터 비트 위치

(Table 1) Parity bit and data bit position when transmitting 4 bits of data in a frame

| 위치 | 1(=2 ⁰) | 2(=2 ¹) | 3 | 4(=2 ²) | 5 | 6 | 7 |
|----|---------------------|---------------------|------|---------------------|------|------|------|
| 기호 | Parity | Parity | Data | Parity | Data | Data | Data |

이를 바탕으로 XOR 연산을 통해 전송측에서 패리티 비트 값을 삽입하고 수신측에서는 오류를 검출한다. 해밍 코드는 1개 비트의 오류를 감지하고 자동으로 수정할 수 있으며 2개까지의 오류 발생을 감지할 수 있다. 다음 표 2처럼 프레임당 비트 수가 커진다면 해밍코드의 데이터 전송 효율은 증가하나 2개 이상의 비트 오류로 데이터를 복원할 수 없게 될 확률도 증가한다.

(표 2) 해밍코드의 프레임 구성과 데이터 전송효율
(Table 2) Frame composition of Hamming code and data transmission efficiency

| 프레임당 비트 수 | Data bit | Parity bit | 데이터 전송 효율 |
|-----------|----------|------------|-----------|
| 3 | 1 | 2 | 0.333 |
| 7 | 4 | 3 | 0.571 |
| 15 | 11 | 4 | 0.733 |
| 31 | 26 | 5 | 0.839 |
| 63 | 57 | 6 | 0.905 |
| 127 | 120 | 7 | 0.945 |
| 255 | 247 | 8 | 0.969 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

해밍코드를 사용하는 경우 1개 까지의 비트 에러는 자동 수정 가능하므로 BER과 프레임의 크기에 의해 FER는 다음과 같이 유도된다.

(P_{FER} : Frame Error Rate, FS : 프레임당 비트 수)

$$P_{FER} = 1 - [(1 - P_{BER})^{FS} + FS(1 - P_{BER})^{(FS-1)}P_{BER}] \quad (8)$$

식 (8)을 통해 안정적인 전송채널을 유지하기 위해 FER을 낮추기 위해서는 프레임 크기를 변화하거나 재밍에 유리한 변조방식을 사용하여 BER을 낮추는 것이 필요함을 확인할 수 있다. 식 (8)로부터 재밍 환경에서 시스

템에서 유지해야 할 최대 FER 값이 있을 때 현재 BER에서 목표 FER을 유지하기 위한 프레임 크기를 알 수 있다.

본 논문에서는 재밍으로 인해 BER이 높아지는 상황에서 목표한 FER를 유지하도록 BER이 높아질수록 낮은 데이터비트를 쓰는 낮은 차수의 해밍코드를 적용하고 데이터를 전송한다. 해밍코드가 포함된 경우 프레임 크기가 작아질수록 표 2과 같이 데이터 전송 효율은 저하되어 속도가 느려지나 안정성이 높아진다. 그러나 조종자에게 보내는 영상이 조종자가 조종하는데 불편함을 발생시키지 말아야 하며 프레임 크기를 무조건 줄일 수 없다. 재밍이 심하면 목표 FER에 맞춰 미리 동일한 프레임을 여러개 보내는 다중 프레임 전송을 시행한다.

다중으로 동일한 프레임 전송 시 FER은 전송한 동일한 모든 프레임에서 오류가 발생할 확률이다. 다중 프레임 전송에서 오류 확률을 P_{MFER} 이라 하고 다중 전송횟수를 R 이라 하면 다중 전송한 모든 프레임에서 프레임 오류가 발생할 확률이므로 다음과 같이 구해진다.

$$P_{MFER} = P_{FER}^R \quad (9)$$

높은 재밍 환경에서도 안정적인 통신링크를 유지할 수 있도록 본 논문에서는 다이나믹 다중 프레임 전송기술을 다음과 같이 제안한다.

[1단계] 사전에 시스템에서 가능한 최대 FER값을 설정하고 이를 Max FER 로 한다. 시스템에서 지원 가능한 해밍코드가 적용된 프레임 크기의 최댓값을 Max Framesize 로, 최솟값을 Min Framesize 로 설정하고 최대 반복전송 횟수를 Max Repeat 라 한다. 통신 신호와 재밍

신호 크기를 통해 $\frac{E_b}{JN}$ 를 도출하고 변조방식에 맞춰 BER을 계산한다.

[2단계] 1단계에서 계산된 BER을 통해 수식 (8)과 (9)로 현재 반복전송 횟수에서 Max Framesize 에서 Min Frame size까지 FER을 계산하고 FER sets{} 집합에 저장한다. FER Sets{} 의 모든 값이 Max FER 보다 크면 반복전송 수를 증가한다. 현재 반복전송 수가 최대 반복전송 상태라 반복전송 수 증가가 어려우면 프레임 크기를 최 소로 운영한다.

[3단계] 2단계에서 FER Sets{}의 모든 값이 Max FER 보다 크지 않다면 현재 반복전송 수가 1인 경우는 FER Sets{}의 값 중 Max FER 이하를 만족하는 최대 프레임 크기로 운영한다. 현재 반복전송 수가 1이 아닌 경우 반복 전송 수가 1이 줄어들 때의 FER Sets{}을 계산한다. 반복 전송 수가 1이 줄어들 때 FER Sets{}의 모든 요소가 Max FER 보다 크면 반복전송 수를 유지하고 현재 반복전송 수에서 FER Sets{}의 값 중 Max FER 이하를 만족하는 최대 프레임 크기로 운영한다. 반복전송 수가 1이 줄어들 때 Max FER 넘지 않는 FER Sets{}의 값이 있다면 반복 전송 수를 1 감소하고 2단계로 돌아간다.

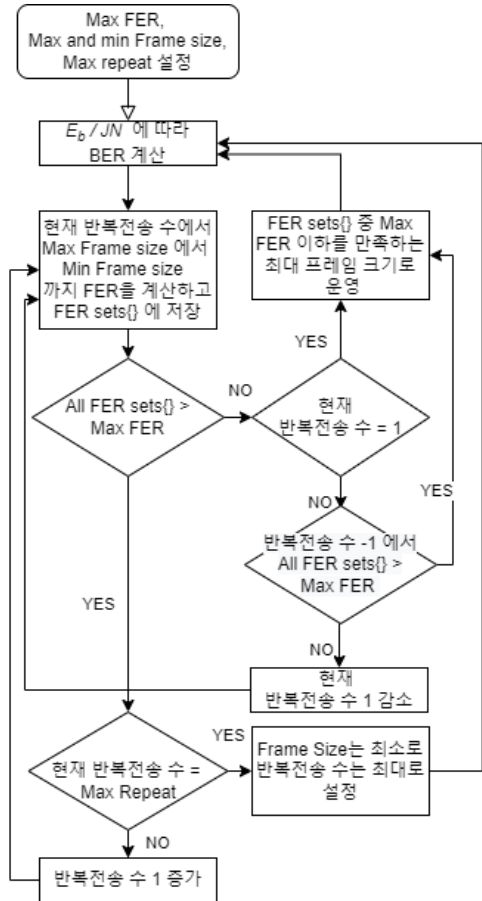
[4단계] 1~3 단계 과정을 통해 도출된 프레임 크기를 바탕으로 낮아진 대역폭에 맞춰 제어신호나 기체 상태 관련된 필수적인 데이터를 우선 전송하고 특히 용량이 큰 영상정보의 비트레이트를 낮춘다.

이를 Flow Diagram (Chart) 로 표현하면 그림 1과 같은 알고리즘으로 동작한다.

다이나믹 다중 프레임 전송기술은 고속으로 비행하는 UAV에서 조종자가 보는 영상과 조종 신호 전송과정에서 지연시간이 커지면 쉽게 사고로 직결되기에 필요한 기술이다. 대역폭을 효율적으로 활용하기 위해서는 재밍으로 인해 에러가 발생한 프레임만 재전송을 요청하는 것이 효율적이나, 매우 짧은 순간에도 사고가 발생할 수 있는 UAV에서는 조종자가 보는 영상과 제어 신호에 대해 영상이 조금 깨지거나 제어신호가 아주 조금 끊기더라도 지연이 없도록 하는 것이 필요하다.

특히 본 논문에서 제안하는 다이나믹 다중 프레임 전송 기술은 고정익 형태로 고속으로 비행하는 중고고도 UAV나 지상의 단일 지상국에서 수십 Km 이내로 비행하는 군용 UAV 운영 환경에서 크게 유용하다. 이러한 UAV 들은 재밍 공격을 받을 가능성이 매우 높으며, 본 논문에서 제안하는 기술을 적용할 경우 높은 재밍 환경에서도 일부 영상의 화질 저하는 발생하지만 영상과 제어신호는 낮은 지연시간을 지속적으로 유지할 수 있고 높은 항재밍 성능도 기대할 수 있기 때문이다.

UAV 통신 시스템에서 낮은 지연시간 유지는 실시간으로 지상에서 UAV를 조종 중인 조종사 입장에서는 중요하다. UAV에서 전송되는 영상의 화질 저하보다 영상이나 조종신호가 높은 지연시간으로 인해 늦게 전달되는 것이 조종을 훨씬 어렵게 만들기 때문이다. 높은 지연시간은 조종자가 느끼기에 기체가 매우 느리게 반응하는



(그림 1) 다이나믹 다중 프레임 전송기술의 Flow Diagram (Figure 1) Flow Diagram of dynamic repetitive frame transmission techniques

것과 같이 느껴지고 UAV는 고속으로 비행하기에 치명적인 사고 위험도 높아진다. 예를 들어 고정익기의 착륙 과정에서 최종 접지 전 플레어 조작이나 이륙시 축선을 유지하는 것처럼 매우 짧은 시간에 기체가 반응하지 않으면 사고로 직결되므로 군용 UAV는 재밍으로 인해 제어를 잃어 기체 손실로 이어질 위험도 높기에 군용 UAV 설계에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

물론 재밍이 심해 통신이 끊겼을 때 자동으로 비행하거나 정해진 행동을 수행하도록 한 정책 테이블을 UAV에 지속 업데이트해 두는 알고리즘[6]처럼 자율적인 비행을 고려한 방식도 제안되고 있으나 본 논문에서 고려하는 의도적인 재밍 공격 상황에서는 상황이 장기간 지속되기에 적용하기 어렵다. 또한 Trust 기반 보안 알고리즘

을 사용하여 FANET(Flying Ad-hoc network)에서의 보안성을 향상시키는 등[7] UAV 군집화에 대한 설계들이 연구되고 있는데 이러한 FANET을 사용하기 위해서는 각 UAV간의 통신 안정성이 중요하며 활용성을 고려한다면 항재밍 성능이 높은 통신망을 설계하는 것이 유리하다.

본 논문에서 제안하는 다이나믹 프레임 다중전송은 높은 재밍 환경에서 UAV에 필요한 통신링크를 유지시키고 안정적인 시스템 동작을 보장할 것이다.

4. 시뮬레이션

4.1 재밍 환경과 변조방식별 성능차이

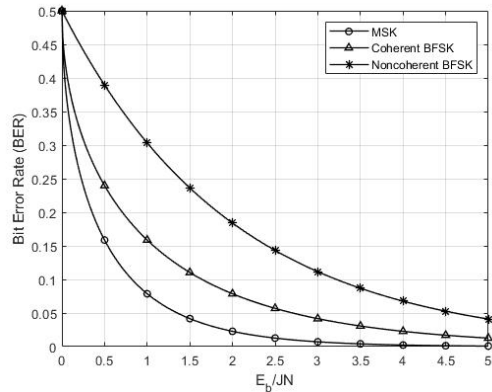
시뮬레이션은 SATURN 통신링크의 MSK 변조와 일반적인 소형 상용 무인기에서 저렴하게 설계되는 Coherent / Noncoherent BFSK 변조에 대해 분석하였다. 재밍은 일반적으로 쓰이는 대역잡음 재밍과 펄스 재밍을 사용하였으며 UAV가 사용하는 주파수 대역에서 재밍이 이뤄지는 것으로 가정하였다. 전송 과정에서 환경이나 UAV자세 변화에 따른 통신 신호 감쇄변수는 0.99로 가정하였다. 시스템 설계시 실시간으로 물리적 전송 과정에서의 통신의 감쇄를 반영할 수 있으나 비행 상황과 자연 환경에 의한 감쇄는 매우 다양하다. 시뮬레이션에서는 재밍에 의한 영향성을 확인하는 것이 목표이며 전송환경이 일정하다고 가정하고 0.99의 고정된 값으로 설정하고 진행하였다. Matlab R2021a update 4 version 으로 시뮬레이션을 시행하였다.

4.1.1 대역잡음 재밍에서 BER, FER

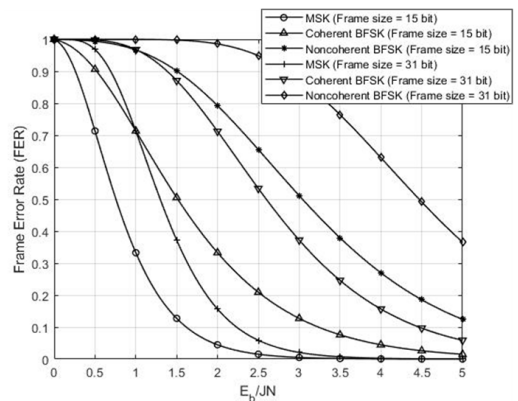
대역잡음 재밍 시 신호대 재밍신호비에 따른 변조방식별 BER 성능은 다음과 같다.

그림 2에서 MSK가 가장 우수한 항재밍 성능을 보이며 Coherent BFSK, Noncoherent BFSK 순으로 항재밍 성능이 떨어짐을 알 수 있다.

프레임 오류를 확인하기 위해 BER을 바탕으로 FER을 계산한다. 해밍코드를 적용하고 프레임의 크기는 15 bit (데이터 11 bit, 패리티 4 bit) 와 31 bit (데이터 26 bit, 패리티 5 bit) 두가지 경우를 비교하였다. 대역잡음 재밍에서 신호대 재밍신호비 변화에 따른 변조방식별 FER은 다음과 같다.



(그림 2) 대역잡음 재밍에서 변조방식별 BER (Figure 2) BER of modulation type of band noise jamming



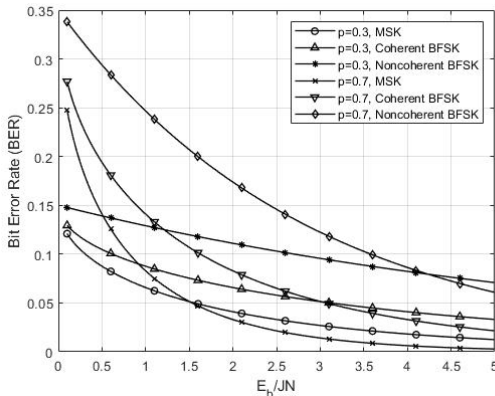
(그림 3) 대역잡음 재밍에서 해밍코드를 사용할 때 변조방식과 프레임 크기에 따른 FER (Figure 3) FER of modulation type and frame size when using Hamming code in band noise jamming

그림 3에서 변조방식에 따라 동일한 신호대 재밍신호비에서도 FER 차이가 크게 발생하게 됨을 알 수 있으며 Noncoherent BFSK 변조방식이 MSK 변조방식에 비해 2배 정도의 신호대 재밍신호비를 유지할 때 동일한 FER이 나타남을 확인할 수 있다. SATURN과 같이 MSK 변조방식을 사용하는 UAV와 BFSK 변조를 사용하는 허가되지 않은 상용 UAV의 혼재 상황에서 상용 UAV에 대한 재밍 시 상용 UAV가 먼저 재밍되기에 SATURN 같은 무전기는 쉽게 재밍되지 않을 것으로 기대된다. 또한 동일한 변조방식이라도 프레임 크기가 작을수록 FER이 낮게 나타

나므로 의도적인 강한 재밍이 방사되는 경우에, SATURN 통신링크의 프레임 크기 조절을 통해 FER을 조정하는 방법을 앞서 제안한 다이나믹 다중 프레임 전송기술처럼 적용 가능함을 알 수 있다. 이후 '4.2 다이나믹 다중 프레임 전송기술' 에서 이 기술에 대해 설명할 것이다.

4.1.2 펄스 재밍에서 BER, FER

펄스 재밍 시 신호대 재밍신호비에 따른 변조방식별 BER 성능은 다음과 같다. 펄스 재밍 Duty Cycle은 0.3과 0.7인 경우에 대해 비교하였다.

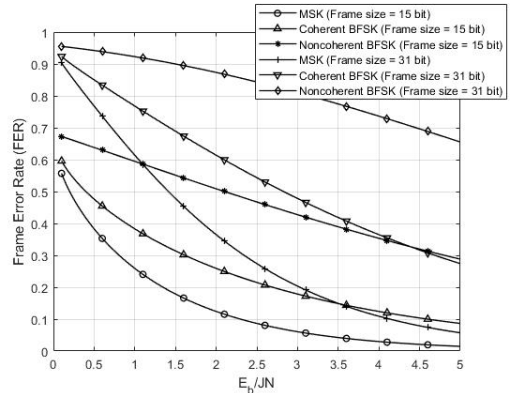


(그림 4) 펄스 재밍에서 변조방식과 Duty Cycle에 따른 BER (Figure 4) BER of modulation type and jamming Duty Cycle in pulse jamming

그림 4에서 펄스 재밍 시 신호대 재밍신호비에 따라 효과적인 Duty Cycle을 확인할 수 있다. 주요 시설을 보호하기 위해 위협적인 UAV를 재밍할 때 대상의 거리와 조종 신호세기에 따라 신호대 재밍신호비를 추정하여 BER을 가장 높일 수 있는 적절한 재밍기법과 Duty Cycle을 사용한다면 지속과를 사용하는 잠음재밍 대비 적은 에너지로도 최적의 재밍 효과를 얻을 수 있을 것이다.

프레임의 크기가 15 bit와 31 bit 이고 해밍코드로 오류를 정정할 때 펄스 재밍에서 신호대 재밍신호비 변화에 따른 변조방식별 FER 성능은 다음과 같다. 재밍 Duty Cycle은 0.3인 경우로 가정하였다.

그림 5처럼 펄스 재밍인 경우에도 변조방식과 프레임의 크기에 따라 동일한 신호대 잠음신호비에서 FER 차이가 크게 나타나며, 군사용으로 사용되는 MSK 변조의 상대적으로 우수한 성능을 확인할 수 있다.



(그림 5) Duty Cycle이 0.3인 펄스 재밍에서 해밍코드를 사용할 때 변조방식과 프레임 크기에 따른 FER (Figure 5) FER of modulation type and frame size when using Hamming code in pulse jamming with Duty Cycle of 0.3

4.2 다이나믹 다중 프레임 전송기술

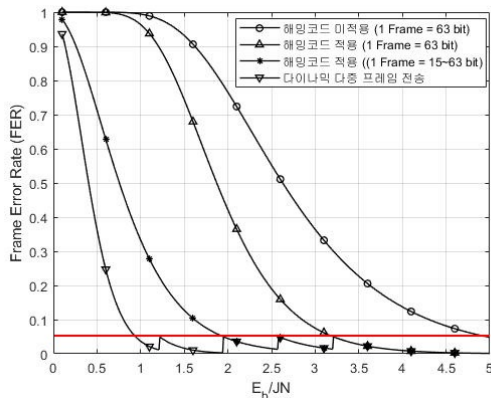
해밍코드 적용 시 프레임의 크기는 표 2에 있는 범위에서 가능하다. 시뮬레이션을 위해 프레임 크기가 15 bit, 31 bit, 63 bit 로 가변적으로 조정 가능한 시스템으로 설계하고 MSK 변조를 하며 대역잡음 환경에서 분석하였다. (1) 프레임당 63 bit로 전송하며 해밍코드를 사용하지 않는 경우, (2) 해밍코드를 적용하고 프레임 크기가 63 bit로 고정된 경우, (3) 해밍코드를 적용하고 목표 FER이 넘을 때 프레임 크기를 15~63 bit 사이에서 가변적으로 조정하는 경우, (4) 프레임의 크기와 프레임 전송 횟수를 가변적으로 조정하여 FER 성능을 최적화하는 다이나믹 다중 프레임 전송기술의 FER을 비교하였다.

UAV의 통신방식은 SATURN 무전기를 통해 항공무선 통신에서 사용되는 UHF 통신을 하는 환경으로 가정하였다. U/VHF 항공무선통신은 대역을 매우 많은 채널로 나눠 각 지상국에 채널을 할당하고 용도에 따라 적절하게 분배한다. 항공무선통신은 모바일 셀룰러 네트워크나 저궤 위성통신처럼 셀로 구성되고 핸드오버를 통해 서비스 되는 형태와 조금 다르며 U/VHF 통신은 매우 장거리 통신도 가능하기에 하나의 지상국과 단일 UAV가 통신하는 환경으로 가정하였다. 또한 데이터 전송 과정에서 영상과 제어신호는 슬롯에 넣어져 같이 전송된다고 보고 영상과 재밍신호는 동일하게 재밍된다고 가정하였다.

다이나믹 다중 프레임 전송 시 동일 프레임의 최대 전송 개수는 3개로 설정하였다. 프레임 재전송에 따른 딜레이

이 없이 안정적으로 통신을 유지하기 위한 최대 FER을 0.05로 설정하고 이를 초과하면 재밍된다고 가정한다.

UAV 통신 시스템 설계 시 최대 FER 값과 프레임당 비트 수의 범위는 UAV 조종자가 화면을 보고 조종이 가능한 수준에 맞춰 설정되어야 할 것이다. 데이터 레이트가 너무 낮거나 프레임 오류가 과도하게 발생하면 UAV의 카메라를 보며 조종하기 어려울 것이다.



(그림 6) 재밍 상황에서 해밍코드 적용과 다이나믹 다중 프레임 전송기술의 성능
(Figure 6) Application of Hamming code and performance of dynamic multi-frame transmission technology in jamming situation

그림 6에서 다이나믹 다중 프레임 전송 기법이 신호대 재밍신호비가 낮아 재밍이 심한 경우에도 FER 성능이 가장 우수하다.

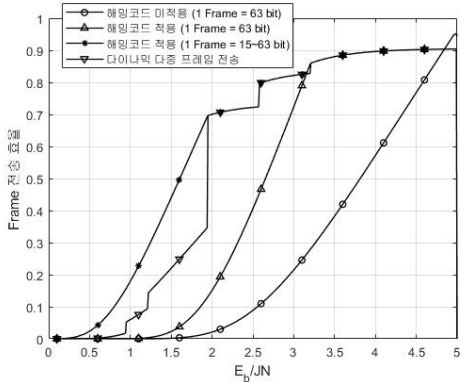
해밍코드를 적용하지 않으면 FER이 가장 높다. 신호대 재밍신호비가 4.91 보다 낮아질 때, 기준 삼은 FER 0.05를 넘게 되며 재밍 신호가 통신 신호의 약 20% 세기로 가해지더라도 재밍될 것으로 예상된다. 해밍코드를 사용하지 않아 63 bit 중 1개의 비트 오류만 발생해도 프레임 오류로 이어지기 때문이다. 해밍코드를 적용하고 1 프레임당 63 bit 로 전송하는 경우 해밍코드를 사용하지 않은 경우보다 성능이 우수해진다. 신호대 재밍신호비가 3.21 보다 낮아질 때 FER 0.05를 넘어가며, 통신 신호 세기의 약 31.1%의 재밍이 가해지면 시스템이 재밍될 것으로 예상된다. 해밍코드를 사용하고 1 프레임당 비트 수를 15~63 bit 로 가변적으로 설정할 경우 성능은 향상된다. 신호대 재밍신호비가 1.95 이하로 떨어지면 기준으로 삼

은 FER 0.05를 넘어가고 시스템이 재밍될 것이다. 통신 신호의 약 51%의 재밍 신호가 발생하면 재밍될 것이다.

다이나믹 다중 프레임 전송기술을 사용한 경우 성능이 가장 우수하다. 해밍코드의 크기를 가변적으로 조정하고 프레임을 다수 전송함에 따라 가장 우수한 성능을 보인다. 다이나믹 다중 프레임 전송기술을 사용할 때 신호대 재밍신호비가 0.94 이하로 떨어지면 기준으로 삼은 FER 0.05를 넘어 시스템이 재밍될 것이다. 이는 통신 신호의 약 106% 크기의 재밍 공격을 받는다면 시스템이 재밍된다는 의미이며 재밍에 매우 강함을 확인할 수 있다.

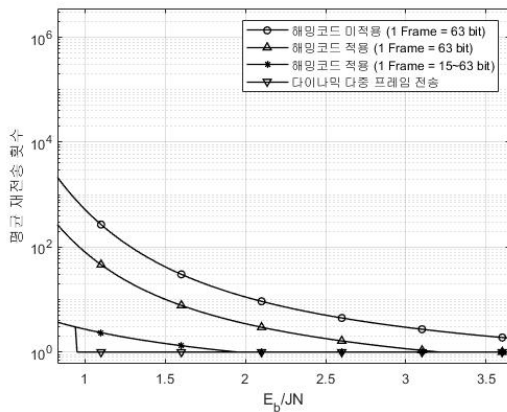
재밍 상황에서 가변 해밍코드 적용과 다이나믹 다중 프레임 전송기술의 효율과 이점을 보이기 위해 그림 6 과 동일한 조건에서 프레임의 전송효율을 분석하였다. 해밍코드를 적용하지 않고 1 프레임 크기가 63bit에 전부 데이터 전송에만 사용하는 경우와 63bit 해밍코드 적용, 15~63bit 가변 프레임 적용, 다이나믹 다중 프레임 전송기술을 적용한 경우의 데이터 전송 효율을 확인하였다. 다만 시스템에서 감당 가능한 최대 FER을 만족하기 위해 모든 조건에서 최대 FER을 만족하는 수준에 도달할 때까지 재전송을 한다고 가정하였고 재전송이 발생하는 만큼 전송효율이 저하될 것이다. 이외에도 재밍으로 인해 데이터 전송에 실패하는 경우, 재전송이 발생하는 경우, 해밍코드를 적용할 때 패리티 비트에 의해 전송 효율이 저하될 것이며 이를 반영하였다. 1개 채널에서 프레임의 비트 전체가 데이터로 전송될 때를 1이라 가정하고 상대적인 효율을 확인하였다. 다중 프레임 전송 시에는 채널 점유가 늘어나므로 1개 채널에서 전송된 데이터량만으로 효율을 계산한다. 또한 신호대 재밍신호비 변화에 따른 평균 재전송 수를 확인하였으며 평균 재전송 수가 증가할 경우 지연시간이 증가한다고 판단할 수 있을 것이다.

그림 7에서 재밍 상황에서 프레임의 전송 효율은 다음과 같이 나타난다. 프레임의 전송 효율은 데이터레이트로 간주하고 다른 시스템과 비교할 수 있다. 다이나믹 다중 프레임 전송 시 다중 프레임 전송 부분부터 채널을 많이 사용하게 되므로 그만큼 전송 효율이 저하된다. 그러나 다이나믹 다중 프레임 전송은 재전송을 수행하기보다 먼저 점유하는 채널을 증가하여 전송하는 프레임 수를 늘려 가변 해밍코드가 적용된 경우(1Frame = 15~63bit)와 동일한 데이터량을 전송하며 이는 지연시간을 낮게 유지하는데 유리하다.



(그림 7) 재밍 상황에서 프레임의 전송 효율

(Figure 7) Frame data transfer efficiency in jamming situations



(그림 8) 재밍 상황에서 프레임 평균 재전송 수

(Figure 8) Average number of frame retransmissions in jamming situations

그림 7과 그림 8에서 신호대 재밍신호비가 1인 경우 다이나믹 다중 프레임 전송의 전송효율이 가변 해밍코드 (1Frame = 15~63bit)를 사용한 경우보다 낮다. 그러나 다이나믹 다중 프레임 전송은 1회 전송으로 목표 FER을 만족할 수 있으나 가변 해밍코드만 적용된 경우(1Frame = 15~63bit)는 평균 2.7213회의 전송이 이루어져야 목표 FER을 유지할 수 있다. ACK나 NAC 신호를 대기하기까지 시간을 고려한다면 지연시간의 큰 증가가 필연적이다. 그림 8은 로그스케일로 작성되었으므로 이외 해밍코드를 사용하지 않은 경우나 63bit 고정 프레임 크기에 해밍코드만 적용한 경우는 매우 높은 재전송 수로 인해 실질적

으로 시스템 사용이 어려울 것이다.

63bit의 해밍코드가 적용된 경우 전송환경이 양호할 때 해밍코드가 적용되지 않은 경우보다 전송효율이 낮으나 약간의 재밍 신호가 발생하더라도 해밍코드를 적용하지 않은 경우보다 전송 효율이 급방 악화되지 않으며 지연시간에서도 성능이 양호하다. 재밍 강도에 따라 해밍코드 적용이 갖는 이점을 확인할 수 있으며 재밍 환경에서 채널을 효율적으로 활용 가능하다.

UAV를 조종하기 위한 영상과 제어신호처럼 필요한 통신에 대해서 다이나믹 다중 프레임 전송기법으로 FER을 낮게 유지하고 지연시간을 낮춘다면 높은 재밍 환경에서도 조종자에게 드론의 영상과 제어신호를 재전송에 따른 지연이나 재밍으로 인한 끊김 없이 제공할 수 있다. 이러한 이점을 통해 높은 재밍 환경에서도 안정적으로 UAV의 통신링크를 유지할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 UHF 통신링크에 의도적인 재밍이 가해질 때 UAV를 제어하는 통신링크를 안정적으로 운용할 수 있도록 돕는 다이나믹 다중 프레임 전송기술에 대해 제안하였다. 조종사는 제안된 기술을 통해 높은 재밍 환경에서도 지연시간의 증가에 따른 문제나 통신 중단에 따른 문제를 겪지 않을 것이며 UAV를 보다 안정적으로 운용할 수 있을 것이다. 향후에는 비트레이트 최적화와 함께 항재밍 성능을 유지할 수 있는 기술에 대해 연구를 진행할 것이다.

참고문헌(Reference)

[1] Du-Ho Lee, Byeong-Hun Go, Gwang-Sun Kim, "Anti-jamming based tactical communication technology", Information and Communications Magazine, vol.24, No.10, pp24-33, 2007.
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200734515968682.page>

[2] Boyd Kaiser, Jarod Droll, "Comparision of SATURN and Have Quick" Collins Aerospace, Mar 2019.
<https://modernbattlespace.com/2019/05/09/comparing-saturn-waveform-havequick-how-improves-battlespace-comms/#.Yc13dWDP2UI>

- [3] Sucheol Yeo, et al. "Study on Data-link Antenna System for UAV" The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences Vol.15, No.1, pp.9-14, 2020.
<https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE09403251>
- [4] Rodger E. Ziemer, William H. Tranter, "Principles of Communications", 563-608, Sigma Press, 2016.
<https://doi.org/10.1002/oca.4660080208>
- [5] Cem Sen, "Digital Communication Jamming", 45-70, US Navy postgraduate school, 2000.
<https://calhoun.nps.edu/handle/10945/32961>
- [6] Zhiwei Li, Yu Lu, Zengguang Wang, Wenxin Qiao, Donghao Zhao, "Smart Anti-jamming Mobile Communication for Cloud and Edge-Aided UAV Network" KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), Vol.14, No.12, pp.4682-4705, 2020.
<https://doi.org/10.3837/tiis.2020.12.004>
- [7] Zhou, Jingxian, Zengqi Wang, "Security Clustering Algorithm Based on Integrated Trust Value for Unmanned Aerial Vehicles Network" KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), Vol.14, No.4, pp.1773-1795, 2020.
<https://doi.org/10.3837/tiis.2020.04.020>

● 저 자 소 개 ●



황 윤 하(Yoonha Hwang)

2012년 공군사관학교 전자공학과(공학사)
2012년~현재 공군 소령
2022년 연세대학교 대학원 전기전자공학과(석사)
관심분야 : 위성통신, 핸드오버, UAV, Anti-Jamming,
E-mail : hyoonha@yonsei.ac.kr



백 정 석(Jungsuk Baik)

2020년 연세대학교 전기전자공학과(공학사)
2020년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
관심분야 : 핸드오버, 5G mmWave, 데이터베이스, etc.
E-mail : standard100@yonsei.ac.kr



구 교 안(Gyoan Gu)

2014년 공군사관학교 항공우주공학과(공학사)
2014년~현재 공군 대위
2021년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
관심분야 : 위성통신, 핸드오버, AI, Anti-Jamming
E-mail : kga0833@yonsei.ac.kr

● 저 자 소 개 ●



정 종 문(Jong-Moon Chung)

1992년 연세대학교 전자공학과(공학사)
1994년 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1999년 Pennsylvania State University 대학원 Electrical Engineering(공학박사)
1997년~1999년 Pennsylvania State University, Electrical Engineering, Faculty Instructor 및 조교수
2000년~2005년 Oklahoma State University, Electrical and Computer Engineering 부교수(정년보장)
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수(정년보장)
2011년~2021 Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology
2013년~현재 KSII Trans. on Internet and Information Systems (TIIS) Co-EiC
2015년~현재 연세대학교 국방융합협동과정 주임교수
2017년~현재 Section Editor, Wiley ETRI Journal
2018년~현재 연세대학교 공과대학 부학장
2019년~현재 한국인터넷정보학회(KSII) 부회장
2019년~현재 연세대학교 의과대학 응급의학교실 (겸직)교수
2019년~현재 IEEE Consumer Electronics Society 부회장
2021년~현재 IEEE Product Safety Engineering Society 부회장
2019년~현재 Senior Editor, IEEE Trans. on Consumer Electronics
관심분야 : 무선통신, 이동통신망, Ad Hoc망, 정보이론, 통신보안
E-mail : jmc@yonsei.ac.kr