

# OFDM기반 무선 통신시스템에서 다양한 재밍 기법의 성능 분석

이유진<sup>†</sup>, 염정선<sup>†</sup>, 전영일<sup>‡</sup>, 서정현<sup>‡</sup>, 이호원<sup>↓</sup>, 정방철<sup>†</sup>

<sup>†</sup>충남대학교 전자공학과, <sup>‡</sup>LIG 넥스원, <sup>↓</sup>한경국립대학교 전자전기공학부

e-mail : leeu@o.cnu.ac.kr, jsyeom@cnu.ac.kr, youngil.jeon@lignex1.com,  
junghyun.seo@lignex1.com, hwlee@hknu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

## Performance Analysis of Various Jamming Techniques in OFDM-Based Wireless Communication Systems

Yu-Jin Lee<sup>†</sup>, Jeong Seon Yeom<sup>†</sup>, Young il Jeon<sup>‡</sup>, Jung Hyun Seo<sup>‡</sup>,  
Ho Won Lee<sup>↓</sup>, and Bang Chul Jung<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Electronics Engineering, Chungnam National University,

<sup>‡</sup>Cyber&Electronic Warfare R&D, LIG NEX1 Co., Ltd,

<sup>↓</sup>School of Electronic and Electrical Engineering, Hankyong National University

### Abstract

In this paper, we compare the performance of various jamming techniques orthogonal frequency division multiple (OFDM)-based wireless communication systems. The considered jamming techniques include not only well-known Gaussian jamming and symbol level jamming methods, but also single-tone and multi-tone jamming methods that attack the target system at a random frequency within the bandwidth of the target system. Computer simulation results show that the performance of multi-tone jamming method yields the best performance among various jamming techniques.

### I. 서론

최근 4차 산업혁명이 진행되고 있음에 따라 사람이 직접 탑승하여 항공기를 조정하는 방식이 아닌 지상의 조종 장치와 무선 연결되어 운용되는 무인항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)가 다양한 사업에 사용되고 있다. UAV는 다양한 센서나 통신 모듈을 장착할 수 있으며, 6G 무선통신 기술을 사용하여 서로 연결되어 통신할 수 있을 뿐만 아니라 지상의 기지국과도 연결될 수 있다<sup>[1]</sup>.

UAV는 공중에서 장애물 없이 이동할 수 있는 높은 이동성을 특징으로하여 공공 및 민간 응용 분야뿐만 아니라 군용으로써 국경 감시, 정찰 및 타격 용도로 사용되고 있다. 그러므로 적군이 UAV를 통해 정보 수집을 방해하기 위해 전자전의 중요성이 대두되고 있으며 그중 UAV나 드론을 대상으로 하는 소프트 킬 (soft kill)의 한 종류인 재밍 (jamming) 기술이 다양하게 연구되고 있다.

현재의 다수의 UAV나 드론은 데이터를 전송하기 위한 통신 기술로써 서로 직교성을 가지고 있는 여러 부반송파를 이용하여 높은 주파수 효율성을 제공하는 직교 주파수 분할 다중 방식(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 기술을 사용하고 있다.

그러므로 본 논문에서는 재밍 목표 시스템이 OFDM을 사용하여 통신한다고 가정할 때, 재머 (jammer)는 재밍

대상 시스템의 통신을 방해하기 위한 목적으로 재밍 신호를 전송하는 재밍 시스템을 고려한다. 재밍 기법으로는 가우시안 잡음으로 재밍 신호를 모델링하는 가우시안 재밍, 송신 신호의 디지털 변조 기법과 동일하게 재밍 신호를 생성하여 전송하는 심볼 레벨 재밍, 특정 몇몇 주파수만 활성화하여 전파 방사하는 톤 재밍을 고려하였다. 각 재밍 기법의 성능을 알아보기 위해 재밍 목표 시스템의 송신 전력 대비 비트 오류율 (bit-error rate)을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

### II. 적용 재밍 기법 소개

본 논문에서 가우시안 재밍, 심볼 레벨 재밍, 톤 재밍 기법을 고려하였다.

가우시안 재밍 기법은 재밍 신호가 시간 영역에서 가우시안 잡음 분포를 따른다. 하지만, 백색 가우시안 신호를 인위적으로 생성하는 것은 불가능하므로 재밍 목표 대상의 통신 대역폭만큼에 대해서 재밍 신호를 생성한다. 또한, 무한대 신호 크기를 구현하지 못하므로 디지털 단에서 크기의 상한이 존재하는 신호를 생성한다. 심볼 레벨 재밍 기법은 재밍 대상 시스템과 동일한 디지털 변조를 파악하여 동일 변조 기법을 사용하여 재밍 신호를 생성하여 전송한다. 이런 경우, 재밍 대상의 시스템과 유사한 전력으로 재밍 신호가 수신되기 때문에 재밍 대상 시스템은 재밍 여부를 파악하기 어렵다. 가우시안 재밍과 심볼 레벨 재밍은 모든 주파수 대역에서 재밍 신호를 전송하는 전대역 재밍 (Barrage jamming, BJ)과 일정 주파수 대역에서만 재밍 신호를 전송하는 부분 대역 재밍 (Partial band jamming, PBJ)으로 나눌 수 있다. 톤 재밍은 특정 주파수에만 재밍 신호를 전송하는 기법으로 시간 영역에서 단일 정현파 혹은 다수의 정현파의 합으로 표현된다. 사용되는 주파수 개수에 따라 단일 톤 재밍과 다중 톤 재밍으로 분류된다. 톤 재밍 신호는 식 (1)과 같은 표현할 수 있다<sup>[2]</sup>

$$J(t) = \sum_{-i=1}^K a_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i), \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 톤의 개수이며,  $a_i$ ,  $f_i$ ,  $\theta_i$ 는 각각  $i$ 번째 재밍

신호의 크기, 주파수, 위상을 나타낸다.

### III. OFDM 기반 재밍 시스템 모델

본 시스템에서는 OFDM 기술을 기반으로 통신하는 단일 송수신기 쌍을 재밍하는 시나리오를 고려한다.

OFDM 시스템은 대역 내에서 동일 주파수 간격으로 존재하며 직교하는  $2^k$  개 ( $k \in \mathbb{Z}$ ) 부반송파에 독립적인 신호를 전송하는 기술이다. 그러므로 주파수 영역에서의  $N$  개의 신호  $s$ 를 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 행렬을 이용하여 시간 영역에서 전송될  $N$ 개의 신호  $x$ 로 변환하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x[0] \\ \vdots \\ x[n] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & e^{j2\pi f \frac{n}{N}} & \cdots & e^{j2\pi f \frac{n(N-1)}{N}} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & e^{j2\pi f \frac{(N-1)}{N}} & \cdots & e^{j2\pi f \frac{(N-1)(N-1)}{N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(0) \\ \vdots \\ s(n) \\ \vdots \\ s(N-1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

재밍 목표 시스템의 송신기에서 전송된 OFDM 신호는  $M_j$ 개의 다중 채널을 거쳐 수신기에 수신되며 재머로부터 수신기까지는  $M_j$ 개의 다중 채널이 있다고 가정한다. 이때, 수신기는 송신기까지의 채널은 완벽하게 알고 있다고 가정한다.

수신기는 시간 영역에서 수신한 OFDM 신호를 FFT (Fast Fourier Transform) 연산을 취하여  $n$  번째 부반송파에 대한 송신기의 신호와 재밍 신호가 중첩된 수신 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Y(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} \left( \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{l=0}^{N-1} s(l) h_m e^{j2\pi f \frac{l(n-\tau_m)}{N}} + \sum_{u=1}^{M_j} \sum_{i=1}^{N-1} s_j[l] h_{j,i} e^{j2\pi \frac{u(n-\tau_{j,i})}{N}} \right) \\ &\quad \times e^{-j2\pi f \frac{kn}{N}} + w(n) \\ &= s(n) \sum_{m=1}^{M_j} h_m e^{j2\pi f \frac{-n\tau_m}{N}} + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{u=1}^{M_j} s_j(u) h_{j,i} e^{j2\pi \frac{u(n-\tau_{j,i})-fkn}{N}} + w(n), \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $s_j(u)$ 와  $F_j$ 는 주파수  $u$ 로 전송되는 재밍 신호와 재밍 주파수 집합을 각각 의미하고  $h_m$ 과  $\tau_m$ 은 각각 송수신단 간  $m$  번째 다중 경로의 페이딩 채널과 전파 지연 시간을 의미하며  $h_{j,i}$ 와  $\tau_{j,i}$ 는 각각 재밍 신호의  $i$  번째 다중 경로의 페이딩 채널과 전파 지연 시간을 의미한다. 또한,  $w(n)$ 은  $n$  번째 부반송파에 대한 가산 백색 가우시안 잡음을 의미한다. 재밍 주파수  $u$ 가 재밍 목표 시스템의 부반송파와 다른 주파수라면 재밍 주파수는 재밍 목표 시스템의 신호 모두와 직교하지 않으므로 모든 부반송파에 재밍신호를 미칠 수 있다.

만약 가우시안 재밍을 사용한다면 재머는  $s(n)$ 을 가우시안 분포를 통해 임의로 생성한 신호로 고려하며 심볼 레벨 재밍을 사용한다면 재밍 목표 시스템과 동일하게 디지털 변조된 신호로  $s(n)$ 을 고려한다. 또한, 부분 대역 재밍을 사용한다면 일부의 부반송파에 신호를 전송한다.

톤 재밍의 경우 재밍 신호는 1로 가정하며 재밍 주파수  $u$ 를 임의의 유리수로 설정한다. 다중 톤 재밍이라면 식 (3)에서 집합  $F_j$ 의 크기는 1보다 큰 값이 된다.

### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

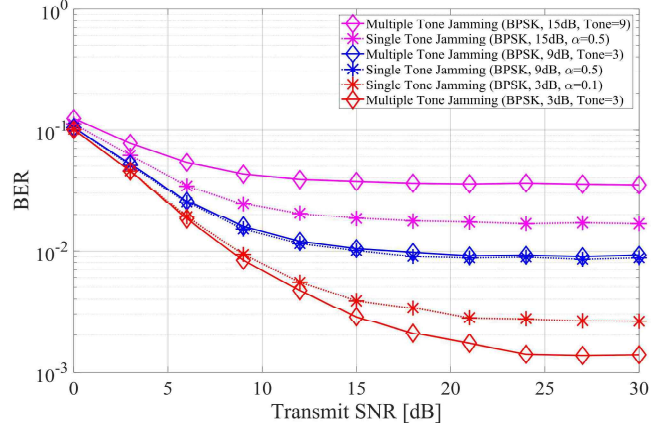


그림 1 다중 톤 재밍과 단일 톤 재밍 기법의 BER 성능 비교

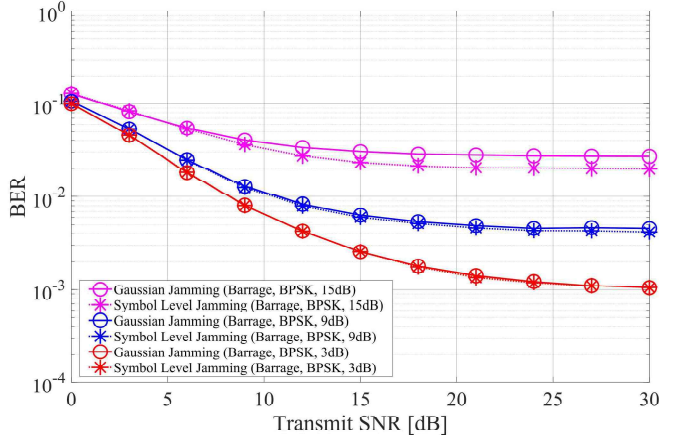


그림 2 가우시안 재밍과 심볼 레벨 재밍 기법의 BER 성능 비교

그림 1, 2는 BPSK 신호를 전송하는 OFDM 전송 시스템에서 서로 다른 재밍 기법을 적용했을 때의 BER 결과이다. 그림1 상단 범례의 Tone은 다중 톤 재밍에서 사용된 톤의 개수이며,  $\alpha$ 는 재밍 주파수  $u$ 가 가장 가까운 정수에서 떨어진 정도이다. 재밍 신호 잡음비(Jamming to noise ratio, JNR)가 15dB에서 다중 톤 재밍은 단일 톤 재밍 대비 성능이 우수함을 보이는 반면, JNR이 3dB에서는 단일 톤 재밍이 다중 톤 재밍 대비 성능이 우수함을 보인다. 그림 2는 전대역 재밍을 고려하며, JNR이 15dB 환경에서 가우시안 재밍 기법이 심볼 레벨 재밍 대비 성능이 우수함을 보여주는 반면, JNR이 3dB, 9dB 환경에서는 두 기법의 성능 차가 미미함을 보인다.

### Acknowledgement

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 LIG넥스원 지원을 받아 수행된 연구임. (계약번호: 2022U145009)

### 참고문헌

- [1] P. Yang, X. Cao, Tony Q. S. Quek, and D. O. Wu, "Networking of Internet of UAVs: Challenges and Intelligent Approaches," *IEEE Wireless Commun.*, Dec. 2022 (early access).
- [2] C. Shahriar, S. Sodagari, R. McGwier, and T. Clancy, "Performance Impact of Asynchronous Off-Tone Jamming Attacks Against OFDM," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, June 2013.