

OFDM 통신 시스템에서 Off-Tone 재밍 기법의 BER 성능 분석

이유진¹, 염정선², 이호원³, 전영일⁴, 서정현⁴, 정방철¹

¹충남대학교, ²한경국립대학교, ³아주대학교, ⁴LIG 넥스원

leeuj@o.cnu.ac.kr, jsyeom@hknu.ac.kr, howon@ajou.ac.kr,

youngil.jeon@lignex1.com, junghyun.seo@lignex1.com, bcjung@cnu.ac.kr

1. 서론

최근 제 4차 산업혁명 시대가 도래함에 따라 항공기와 무선으로 연결된 지상의 컨트롤러를 통해 조종하는 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히 5세대 이동통신이 적용된 UAV는 무선 컨트롤 신호 뿐만 아니라 영상 데이터 등의 신호도 전달할 수 있어서 다양한 용도로 활용될 수 있다. 그러므로 최근 UAV와 관련한 이동통신 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]. UAV는 민간용 외 정찰 및 감시 등과 같은 임무를 수행하는 군용으로 사용되고 있으며, 전자전이 중요한 현대 전장에서는 UAV가 수집한 정보를 적군에게 전달되는 것을 방해하기 위해 재밍과 관련하여 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 본 논문에서는 OFDM을 사용하여 신호를 송수신하는 통신 시스템과 단일 톤을 사용하여 통신 신호의 모든 주파수에 재밍을 미칠 수 있는 오프 톤 재밍 시스템의 비트 오류율 (Bit-Error Rate, BER) 성능을 분석한다.

2. OFDM 통신 시스템 모델

본 논문에서는 OFDM 통신 시스템에 재밍 신호를 전송하는 시스템을 고려한다. OFDM 기술은 동일한 주파수 간격을 유지하는 2^k 개 ($k \in \mathbb{N}$)의 직교 부반송파를 사용하여 2^k 개의 독립적인 신호를 송수신한다. 다음 수식은 N 개의 독립적인 부반송파 신호 X 를 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 행렬을 사용하며 시간 영역의 신호 x 로 변환하는 과정을 표현한다. 본 논문에서 편의상 $\cdot(n)$ 은 n 번째 부반송파에 관한 것을 의미한다.

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

OFDM 통신 시스템은 일반적으로 다중 경로 채널을 고려하며 본 논문에서는 M_S 개의 다중경로를 가정한다. 수신단에서 FFT (Fast Fourier Transform) 연산을 통해 시간 영역의 신호를 다음과 같은 주파수 영역의 신호 Y 로 변환하며 이후 신호 검파 과정을 거치게 된다. 재밍 신호가 존재하지 않는 OFDM 통신 시스템에서의 n 번째 부반송파 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$Y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=1}^{M_S} \sum_{l=0}^{N-1} X(l) h_m(n) e^{j2\pi f_{scs} \frac{l(n-\tau_m)-nk}{N}} + w(n), \quad (2)$$

여기서 $h_m \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 과 τ_m 은 각각 송수신단 사이 m 번째 다중 경로의 레일리 페이딩 채널과 확산 지연 시간을 의미하며, f_{scs} 는 부반송파 간격, $w \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ 는 가산 백색 가우시안 잡음을 의미한다.

3. 오프 톤 재밍 기법과 재밍 시스템 모델

기존의 톤 재밍 기법은 OFDM 통신 시스템의 부반송파와 동일한 주파수를 사용하여 수신단에 재밍 신호를 전송하여 하나의 톤은 하나의 부반송파에만 재밍 영향을 미쳤다. 하지만 본 논문의 재밍 기법은 모든 OFDM 부반송파와 직교하지 않는 오프 톤 재밍 신호를 전송하여 모든 부반송파에 재밍 영향을 미칠 수 있다. n 번째 부반송파에 대한 오프 톤 재밍 신호 $J_r(n)$

은 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$J_r(n) = \sum_{j=1}^{M_j} \sum_{l=1}^T J(P_l + \epsilon_l) h_j(l) e^{j2\pi f \frac{(P_l + \epsilon_l)(-n - \tau_j)}{N}} \frac{e^{j2\pi \epsilon_l} - 1}{e^{j2\pi \frac{\epsilon_l}{N}} - 1} \quad (3)$$

여기서 M_j 와 T 는 각각 재밍 신호의 다중 경로 채널의 개수와 오프 톤의 개수를 나타낸다. 또한, P_l 과 ϵ_l ($0 < \epsilon_l < 1$)은 각각 l 번째 오프 톤 주파수의 정수 인덱스 값과 실수 인덱스 값을 나타내며, $h_j \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 와 τ_j 는 각각 j 번째 다중 경로의 레일리 페이딩 채널과 확산 지연 시간을 의미한다. 그러므로 수신단에서 n 번째 부반송파 수신 신호는 통신 시스템의 송신단에서 전송한 신호와 재밍 신호가 중첩되어 수신되므로 식 (2)와 식 (3)의 합으로 주어진다.

4. 모의실험 결과 및 결론

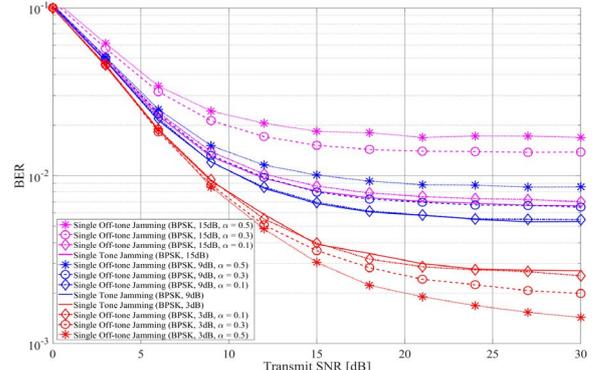


그림 1 톤 재밍과 오프 톤 재밍 기법의 BER 성능 비교

모의실험 환경은 다음과 같다. 통신 시스템은 BPSK 신호를 전송하며 재밍 대 신호 전력 비 (Jamming-to-Signal Ratio, JSR)는 3dB, 9dB, 15dB이며 $\alpha(=\epsilon_l)$ 는 0.1, 0.3, 0.5로 설정하였다. 그림 1은 단일 톤 재밍과 단일 오프 톤 재밍 기법의 BER 성능을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 전체적으로 단일 톤 재밍보다 오프 톤 재밍의 재밍 성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 또한, JSR이 높아질수록 α 값 0.5에 근접할수록 더 우수한 재밍 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

5. ACKNOWLEDGEMENT

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

6. 참고 문헌

- [1] S. Lee *et al.*, "Optimal frequency reuse and power control in multi-UAV wireless networks: Hierarchical multi-agent reinforcement learning perspective," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 39555–39565, Apr. 2022.
- [2] C. Zhong, J. Yao, and J. Xu, "Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 2, pp. 286–289, Feb. 2019.
- [3] 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.