

상용 무인기 위협 대응을 위한 Zadoff-chu 시퀀스 기반 통신 신호 분석 및 채널 추정 기법[☆]

A Method for Zadoff-chu Sequence-based Signal Analyzation and Channel Estimation Against Commercial Drone Threats

심 이 삭^{1*} 정 진 우^{1*} 황 진 하¹ 윤 상 범^{1*}
Isaac Sim Jin-woo Jeong Jin-ha Hwang Sang-bom Yun

요 약

본 논문은 현대전에서 주로 사용되는 상용 무인기를 기반으로 하는 공격에 대응하기 위한 프로토콜 분석 방법을 제시한다. 상용 무인기 시장의 90% 이상을 점유하고 있는 DJI사의 무인기에서 사용되는 프로토콜인 Ocusync에 대해 분석하고, 프로토콜의 버전별 특징을 분석하여 해당 신호 수신 후 복조까지의 과정을 기술한다. Ocusync의 채널 추정에 사용되는 Zadoff-chu 시퀀스의 특성과 인자값을 유추하는 알고리즘을 제시한다. 유추한 시퀀스를 기반으로 복조 과정에서 3가지 채널 추정 기법을 제시하고, 각 채널 추정에 대한 복조 성능과 연산량을 시뮬레이션한다. 시뮬레이션을 통해 각 방법별 BER 성능과 연산자원 필요량을 보이고, 이를 통해 각 수신 환경에 맞는 시스템 모델을 제시한다. 본 논문에서 제시한 시스템 모델을 통해 상용 무인기를 사용하여 작전을 수행하는 현대전에서 통신신호 분석 측면에서 이를 대응하는 방향을 제시한다.

☞ 주제어 : 상용 무인기, 주파수 도약, 채널 추정

ABSTRACT

This paper presents a protocol analysis method for countering attacks based on commercial drones used primarily in modern warfare. It analyzes the Ocusync protocol used in drones by DJI, which holds over 90% of the commercial drone market, and describes the process of decoding signals received after analyzing the characteristics of the protocol versions. It presents the characteristics of the Zadoff-Chu sequences used for channel estimation in Ocusync and an algorithm for inferring the sequence parameters. It presents 3 channel estimation techniques in the decoding process and simulates the decoding performance and computational cost for each channel estimation. Through simulation, it shows the BER performance and computational resource requirements for each method, and based on this, it presents a system model suitable for each receiving environment. By presenting the system model in this paper, it provides a direction for countering modern warfare operations using commercial drones in terms of analyzing communication signals.

☞ keyword : Commercial UAV, frequency hopping, channel estimation

1. 서 론

2022년 시작된 우크라이나-러시아 전쟁은 현대전에서 공격 양상을 명확히 드러내고 있다[1]. 특히 상용 무인

기의 하중에 폭탄을 실은 뒤, 기체를 희생하며 공격하는 방식은 기존 미사일 공격 대비 1/100 이하의 비용으로도 같은 효과를 보여 많은 전장에서 운용되고 있다[2].

악의적인 의도를 가지고 운용되는 상용제품 기반의 무인기에 대응하기 위해선 이에 맞는 대응 무기가 필요한데, 현실에선 이를 대응하기 위한 뚜렷한 방법이 존재하지 않고 있다. 만약 기존의 비행체 대응 무기를 이용하여 상용 무인기에 대응하려고 하려면 많은 제약이 존재한다[3]. 상용 무인기의 시장점유율의 90%를 차지하고 있는 DJI사 Phantom 4 모델 기준 기체의 크기 입방체 기준 한 변에 50cm 정도(약 RCS 0.1m³)이며, 이는 기존의 대응 체계에서 사용되는 레이더의 탐지 해상도보다 작아 탐지하기 어렵다. 또한 대부분의 상용 무인기의 신호는 ISM

¹ Cyber Electronic Warfare R&D team 3, LIGNex1, 21, Pangyo-ro 255beon-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13486, Republic of Korea

[†] Co-author

* Corresponding author (sangbom.yun@lignex1.com)

[Received 2 October 2024, Reviewed 22 October 2024, Accepted 31 October 2024]

[☆] This work was supported by KRIT (Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement) grant funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (KRIT-CT-22-074).

대역(2.4/5.8GHz)을 이용하기 때문에 일상 환경에서 자주 사용되는 신호(Wi-Fi AP 등)와 혼재되어 있고, 주파수 도약 확산(Frequency hopping spread spectrum, FHSS)방식을 사용하여 제삼자의 신호 수집을 억제하고 있다[4].

이러한 상용 무인기 기반의 공격무기에 대응하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다[5-9]. 그러나 이러한 연구들은 모두 상용 무인기의 채널 모델링에 대한 최적화 문제를 해결하는 논문이며, 제삼자의 관점에서 이를 분석하는 연구는 아직 활발히 진행되지 않고 있다.

무선 통신에선 송신자와 수신자와의 동기를 맞추기 위해 Local oscillator에 의한 오차를 보정하기 위한 신호를 주고받게 되는데, 해당 신호를 송수신자간에 이미 알고있는 약속된 정보를 가지고 있다. 송수신자가 아닌 제 3자의 입장에서 이를 분석하려면 약속된 신호에 대한 정확한 제원 파악이 필수적으로 이루어져야 한다. DJI 무인기에서 사용되는 약속된 신호는 Zadoff-chu Sequence를 사용하는 것이 파악되었다.

본 논문에서는 해당 시퀀스의 제원을 분석하고 이를 기반으로 미상 제원의 신호를 복조하는 과정을 제삼자의 관점에서 수행하는 방법을 제시한다. 2장 DJI 무인기의 통신 신호 분석에서는 DJI 무인기의 대표적인 프로토콜인 Ocusync 프로토콜을 설명하고, 해당 프로토콜에서 채널을 추정하는 방법을 제시한다. 3장 시스템 모델에서는 Zadoff-chu 시퀀스를 기반으로 채널을 추정하고 이를 통해 복조하는 알고리즘을 제시한다. 4장 시뮬레이션 결과에서는 채널 추정 기법에 따른 복조 성능을 시뮬레이션하고 비교분석을 수행한다. 5장 결론에서는 본 연구 결과의 의의 및 추후 연구 방향을 제시한다.

2. DJI 무인기 통신 신호 제원 분석

2.1 Ocusync 프로토콜의 스펙트로그램 분석

현재 DJI사에서 판매 중인 무인기는 자체적인 통신 프로토콜인 Ocusync를 통해 사용자와 무인기가 통신을 수행하고 있다. 독자적인 프로토콜을 사용하기 때문에 복호 및 데이터 획득은 제한사항이 있으나, 스펙트로그램 상 확인할 수 있는 제원으로 해당 프로토콜의 일부 정보를 특정할 수 있다.

(표 1) Ocusync 프로토콜의 스펙트로그램 제원.

(Table 1) Spectrogram specification of Ocusync protocols.

구분	특징	Ocusync1	Ocusync2	Ocusync3
통신대역		2.4GHz	2.4/5.8GHz	2.4/5.8GHz
대역 전환		None	Adaptive	Adaptive
Offset(f_c)		500kHz		
Downlink	대역폭	13.515MHz		
	주기	TDM with DroneID and Uplink		
DroneID	대역폭	9.015MHz		
	주기	640ms		
Uplink	대역폭	1.095MHz	1.095/2.175MHz	2.175MHz
	주기	4/6ms	10ms	10ms
	패턴	sweep	sequence	sequence & move
	spacing	2/4/6MHz	2NMHz	2NMHz

그림 1은 Ocusync1.0을 사용하는 DJI Mavic2 pro를 운용할 때 수신되는 통신 신호를 1초간 획득한 후, 이를 스펙트로그램으로 전시한 결과이다.



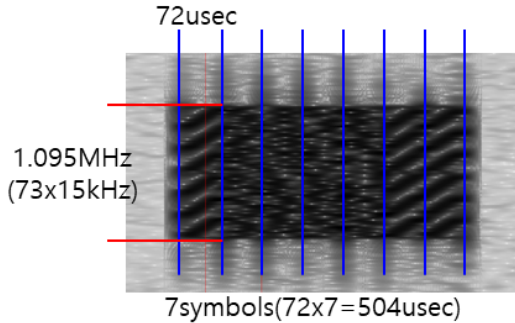
(그림 1) Ocusync 1.0 프로토콜의 스펙트로그램 (80MHz, 1초).
(Figure 1) Spectrogram of protocol Ocusync1.0 (80MHz, 1 second).

해당 스펙트로그램에서 다음과 같은 3가지 신호를 확인할 수 있다:

- 1. Uplink(C2) : 조종기에서 보내는 조종 신호
- 2. Downlink(Video) : 무인기에서 보내는 영상정보
- 3. DroneID : 무인기에서 보내는 메타데이터

또한 해당 스펙트로그램을 통해 상기 3가지 신호가 서로 같은 대역을 사용하고, 시간영역에서 겹치지 않도록 멀티플렉싱(Time division multiplexing, TDM)을 이용하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 특히 Uplink 신호의 경우, FHSS 도약 시퀀스가 Ocusync의 버전별로 다르다는 점을 이용하여 해당 프로토콜을 특정할 수 있게 된다. 표 1은 Ocusync 프로토콜의 버전별 스펙트로그램 상에서 확인할 수 있는 제원을 정리한 결과이다.

2.2 C2 신호의 제원 추정



(그림 2) Ocusync1 C2 신호
(Figure 2) C2 signals of Ocusync1

그림 2는 그림 1의 C2(Uplink) 버스트 하나를 확대하여 전시한 결과이다. 해당 스펙트로그램에서 보이는 신호 서브심플 한 개의 지속시간이 72usec인 점, 또한 홉 하나의 occupied bandwidth가 73개(1.08MHz = 73 * 15kHz)인 점을 통해 LTE standard 기반의 통신 모델을 사용한다는 것을 확인할 수 있다[10]. 상기 그림의 양옆에 보이는 정규화된 신호는 Zadoff-chu 시퀀스로 무선 신호의 채널을 추정하고 이를 보상할 수 있는 정보를 제공한다.

Zadoff-chu 시퀀스의 수식은 다음과 같다:

$$x_q(m) = e^{-j\frac{\pi qm(m+1)}{N}}, 0 \leq m \leq N-1 \quad (1)$$

위 식에서 q 는 시퀀스의 root 값, N 은 시퀀스의 길이를

의미한다. Zadoff-chu 시퀀스는 채널 보상에 사용되는 시퀀스로, 자기 자신과의 상관도 연산은 값이 존재하고 다른 시퀀스와의 상관도 연산은 0으로 수렴하는 CAZAC (Constant amplitude and zero-auto correlation) 특성이 있어 정확한 위상 및 진폭 보정이 필요한 변조가 사용되는 채널의 보상에 주로 사용된다.

Zadoff-chu 시퀀스에 적용되는 상관도 연산식은 다음과 같다:

$$\Psi_{ZCS}(\tau) = \frac{1}{N} \int z(t)g^*(t-\tau)dt \quad (2)$$

위 식에서 N 은 Zadoff-chu 시퀀스의 길이, $g^*(t)$ 는 수신 신호의 켈레복소수, τ 는 시간 축에서의 샘플 차이이다. zero-auto correlation 특성에 의해 정확한 샘플 위치에서 상관도 값이 1에 가까운 값으로 존재하게 되고, 나머지 샘플 위치에서 상관도 연산 또는 다른 변수를 가지는 시퀀스와의 상관도 연산은 0에 가까운 값을 가지게 된다. 만약 해당 신호의 수신자가 Zadoff-chu 시퀀스의 정확한 제원을 모르면, 해당 신호에 대한 정확한 위상을 보상할 수 없게 되므로 신호를 복조할 수 없게 된다. 본 논문에선 해당 시퀀스의 정확한 제원을 모르는 제삼자의 관점에서 이를 파악하는 방법을 제시한다.

2.3 Zadoff-chu sequence 및 채널 추정

Ocusync1 기준 생성할 수 있는 Zadoff-chu 시퀀스는 총 9,344개(=73roots * 128bin)이며, 일반적인 PC의 계산 자원으로 연산할 수 있다. 이를 고려하여 본 논문에선 Brute-force 기반 상관성 분석을 통한 Zadoff-chu 시퀀스

(코드 1) Zadoff-chu 시퀀스 파라미터 획득 코드
(Code 1) Pseudo-code for acquiring Zadoff-chu sequence parameters

```
int bin = 128 # Ocusync1 기준. 고정
arr sample = getFromReceiver(); # 실측 데이터
int max_corr = -1, max_root = -1, max_length = -1
for index = 0 to sample.size():
    for length = 16 to bin:
        for root = 0 to length:
            seq = getZCS(root, length, bin) # 수식 1
            corr = calcCorr(seq, sample) # 수식 2
            if (corr > max_corr)
                max_corr ← corr
                max_root ← root
                max_length ← length
return max_root, max_length
```

매개변수 탐색 알고리즘을 사용하였다.

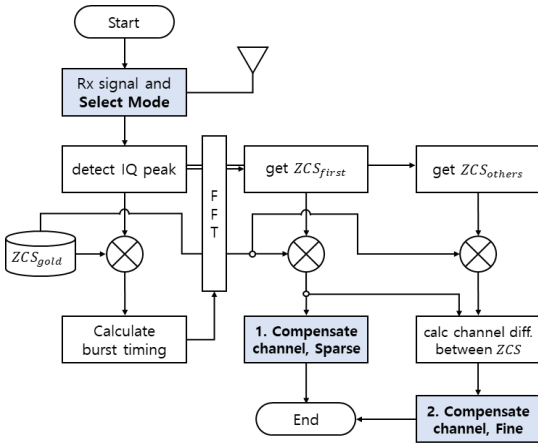
코드 1은 상기한 Brute-force 알고리즘에 대한 의사코드이다. 해당 방식을 통해 연산을 모두 수행하여도 Tera cycle 이내의 연산(3.0GHz clock 기준 약 5분)으로 Ocusync의 Zadoff-chu 시퀀스 파라미터를 획득할 수 있다.

표 2는 코드 1을 기반으로 파악한 Ocusync 버전별 Zadoff-chu 시퀀스의 파라미터이다. 파라미터 중 extend는 시퀀스의 시작 지점을 값만큼 반복하는 것을 의미하며, Ocusync3의 경우 144, 145번째 값은 0, 1번째 값과 같다.

(표 2) Ocusync 프로토콜의 Zadoff-chu 시퀀스 정보.
(Table 2) Zadoff-chu Sequence Parameters of Ocusync protocols.

Param	Ocusync1	Ocusync2	Ocusync3
bin	128	Ocusync1 또는	256
length	73		143
root	6	Ocusync3 시퀀스 중 하나 선택	63
cyclic	0		0
extend	0		2

3. 시스템 모델



(그림 3) 시스템 모델
(Figure 3) System model

본 논문에서 제시하는 시스템 모델은 수신된 신호의 Zadoff-chu 시퀀스 파라미터를 코드 1의 과정을 거쳐 사전에 파악하고 있음을 전제로 설계되었다. 그림 3은 본 논문에서 제시하는 Ocusync 무인기의 통신 신호 복조 모

델이다. 위 그림에서 ZCS_{gold} 는 사전에 아는 Zadoff-chu 시퀀스(이하 골드시퀀스), ZCS_{first} 와 ZCS_{others} 는 실신호에서 얻을 수 있는 Zadoff-chu 시퀀스들을 의미한다. 버스트 형태로 들어오는 신호를 진폭 검출기를 통해 존재 여부를 파악하고, 골드시퀀스와의 상관도 연산을 통해 정확한 버스트신호의 시작점을 알아낼 수 있다. 본 논문에선 채널 보상을 위한 두 가지 모델을 제시한다.

3.1 Single sequence 기반 sparse 채널 보상

sparse 채널 보상은 한 번의 시퀀스 내적 연산으로 모든 서브캐리어의 채널을 보상하는 방법이다. Sparse 채널 보상은 다음 수식 3을 기반으로 연산한다.

$$\hat{X}_n(f) = ZCS_{first}^*(f) \cdot ZCS_{gold}(f) \cdot X_n(f) \quad (3)$$

위 식에서 $\hat{X}_n(f)$ 는 n번째 서브캐리어의 채널 보상 결과, $ZCS_{first}^*(f) \cdot ZCS_{gold}(f)$ 는 골드시퀀스와 실신호 시퀀스의 내적, $X_n(f)$ 는 n번째 서브캐리어의 주파수 샘플을 의미한다. sparse 채널 보상은 시퀀스를 통한 채널 보상 값을 한번 연산한 뒤, 해당 값으로 모든 서브캐리어에 대한 보상을 수행하게 된다. 그림 3에서 우측 열에 대한 연산을 수행하지 않으므로 연산량이 줄게 되지만, 채널 상태에 좋지 않으면 복조 성능이 떨어지게 된다.

3.2 Multi sequence 기반 fine 채널 보상, 평균 값 이용

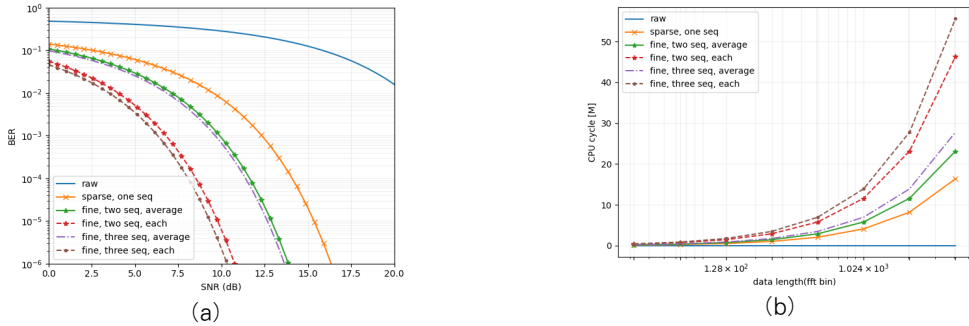
평균값을 이용한 fine 채널 보상은 시퀀스를 통한 채널 보상 값을 여러 번 연산한 뒤, 해당 값의 평균으로 모든 서브캐리어에 대한 보상을 수행한다.

$$\hat{X}_n(f) = ZCS_{avg}^*(f) \cdot ZCS_{gold}(f) \cdot X_n(f) \quad (4)$$

위 연산은 연산이 3.1의 보상 연산보다 증가하지만, 시스템 모델의 일부 연산만 수행하여 sparse 보상보다 정확히 채널 보상을 수행할 수 있다.

3.3 Multi sequence 기반 fine 채널 보상, 심볼 별 차등 연산

심볼별 보상 차를 이용한 fine 채널 보상은 두 개 이상의 시퀀스 내적을 연산한 뒤, 서브캐리어의 위치에 따라 채



(그림 4) 시뮬레이션 결과. (a) 방법별 SNR대비 비트에러율, (b) 방법별 연산량.
 (a) BER vs. SNR for each method, (b) Computational complexity for each method
 (Figure 4) Simulation results.

널 보상을 다르게 적용하는 방법이다. Fine 채널 보상은 다음 수식 5를 기반으로 연산한다:

$$\begin{aligned} \hat{X}_n(f) &= H_n^i(f) \cdot X_n(f), \\ H_n^i(f) &= H_0(f) + (H_n(f) - H_0(f)) / N^* n, \\ H_n(f) &= (ZCS_n^*(f) \cdot ZCS_{gold}(f)) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 $H_n^i(f)$ 는 n번째 서브심볼의 채널 보상 값, $H_n(f)$ 는 n번째 시퀀스와 골드시퀀스의 내적값, N은 전체 서브심볼의 개수이다.

위 연산은 각각의 서브심볼마다 채널 보상에 사용되는 내적값을 달리하여 보상을 수행한다. 그림 3에 포함된 모든 연산을 수행하게 되므로 Sparse 채널 보상보다 연산량이 증가하지만, 채널 상태에 좋지 않을 때 더 좋은 복조 성능을 보일 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 해당 시스템 모델을 검증하기 위해 컴퓨터에서 자체적인 C2 신호를 생성하고, 이를 기반으로 복조 성능을 시뮬레이션하였다. 표 3은 시뮬레이션에 사용된 연산자원 및 채널 환경이다.

(표 3) 시뮬레이션 매개변수
 (Table 3) Simulation parameters.

구분	환경
OS	Ubuntu 22.04
Resource	i7-13700, 64GB RAM
Dev. Env.	C++17, gcc-11
Channel	LOS Lician w. AWGN

그림 4는 본 논문의 시스템 모델을 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4(a)는 각 방법별 신호대잡음비 대비 비트에러율을 나타낸 그림이며, SNR이 8.5 이상일 때, 3가지 방법 모두 $10e-4$ 의 비트 에러율을 달성할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 방법별 연산량을 CPU cycle을 기반으로 도시한 결과이다. 하나의 시퀀스로 채널 보상을 수행한 방법과, 두 개의 시퀀스로 채널 보상을 하는 방법 사이에 연산량이 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이를 결과를 근거로 자신의 원하는 성능과 보유한 연산량에 따라 최적의 시스템을 선택하여 운용할 수 있게 된다.

표 4는 시뮬레이션 결과를 통한 채널 보상 방식의 선택 방법을 나타낸다. 각 SNR의 기준은 BER $10e-6$ 을 만족하는 것을 기준으로 산정하였다. 특히 Fading이 고려되어야 하는 환경의 경우, sparse 채널 보상은 SNR이 높은 환경에서도 유의미한 복조 결과를 도출할 수 없다는 점을 확인하였다.

(표 4) SNR 및 채널별 채널 보상 방식 선택
 (Table 4) Channel compensation based on SNR and channel.

채널 환경	SNR [dB]	방식
LOS	$16 \leq$	Sparse
	$13.5 \leq$	Fine, avg
	$11 \leq$	Fine, tuned
Fading	non	Fine, avg
	$16 \leq$	Fine, avg
	$12.5 \leq$	Fine, tuned

5. 결 론

본 논문에서는 DJI 무인기에서 사용되는 Ocusync 프로토콜을 분석하고, 해당 프로토콜에서 사용하고 있는 채널 보상을 위한 Zadoff-chu 시퀀스 기반의 보상 방법을 분석하였다. 또한 실제 판매 중인 무인기의 RF 신호를 녹화하며 시퀀스 생성에 쓰이는 매개변수들을 파악하고, 이를 통한 복조 성능을 나타내었다. 향후 연구에선 본 논문에서 제안한 시스템 모델의 복잡도 개선하기 위한 연구가 진행되고, 이를 기반으로 복조 이후의 단계로 수행할 수 있는 방법이 필요하다.

상용 무인기의 통신 신호 변/복조 방식은 공개되어 있지 않고, 독자적인 통신 프로토콜을 개발하여 운용되고 있다. 또한 무인기에 자체적인 부하를 싣고 기존의 통신 신호 프로토콜에 사용자 정의 신호를 내장하여 활용할 수 있다. 상용 무인기를 기반으로 하는 공격 전략은 비용과 무기체계 운용 개념 측면에서 많은 이점이 있어 현대전에서 많이 활용되고 있다. 이러한 무인기는 기존의 대응체계로는 대응하기 어렵다는 것을 인지하고, 이에 관한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

참고문헌(Reference)

- [1] Y. Troshkin, "The role of naval strike drones in the Russia-Ukraine war," *Political Science and Security Studies Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 44-54, 2024.
<http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.12701509>
- [2] M. Kunertova et al., "Drones have boots: Learning from Russia's war in Ukraine," *Journal of Strategic Studies*, vol. 46, no. 5, pp. 1-24, 2023.
<http://dx.doi.org/10.1080/13523260.2023.2262792>
- [3] Drones in Modern Warfare: Lessons Learnt from the War in Ukraine, Australian Army Occasional Paper, no. 29, 2024. [Online]
https://researchcentre.army.gov.au/sites/default/files/241022-Occasional-Paper-29-Lessons-Learnt-from-Ukraine_2.pdf
- [4] Drones in War: Transforming Modern Warfare, Sky Scan Surveys, 2024. [Online]
<https://www.skyscansurveys.co.uk/drones-in-war-transforming-modern-warfare/>
- [5] A. Fotouhi et al., "Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3417-3442, Fourthquarter 2019.
<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228>
- [6] L. Gupta, R. Jain and G. Vaszkun, "Survey of Important Issues in UAV Communication Networks," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, Secondquarter 2016.
<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>
- [7] S. Hayat, E. Yanmaz and R. Muzaffar, "Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2624-2661, Fourthquarter 2016.
<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343>
- [8] Y. Zeng, Q. Wu and R. Zhang, "Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327-2375, Dec. 2019.
<http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2019.2952892>
- [9] H. Shakhathreh et al., "Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- [10] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation," 3GPP TS 36.211, Release 8, v8.9.0, Dec. 2009. [Online]
<https://www.3gpp.org/DynaReport/36211.htm>

◎ 저 자 소 개 ◎



심 이 삭(Isaac Sim)

2016년 광운대학교 전자융합공학과(공학사)
2022년 광운대학교 전자융합공학과(공학박사)
2022년~현재 LIG넥스원 사이버전자전개발단.3팀 선임연구원
관심분야 : RF SW, SDR, 통신신호분석SW
E-mail : isaac.sim@lignex1.com



정 진 우(Jin-woo Jeong)

1999년 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
2001년 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
2016년 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)
2001년~2007년 LG전자 디지털미디어연구소 선임연구원
2016년~2017년 한양대학교 신호정보특화연구센터 연구교수
2017년~2022년 국방정보본부 777사령부 SOI팀장
2023년~현재 LIG넥스원 사이버전자전개발단 수석연구원
관심분야 : 신호정보, 사이버전자전, 안티드론 시스템, 위성통신, 무선통신
E-mail : jinwoo.jeong@lignex1.com



황 진 하(Jin-ha Hwang)

2015년 경상대학교 건축공학과(공학사)
2019년 한성대학교 국방과학대학원 국방M&S학과(산업공학석사)
2024년~현재 가천대학교 일반대학원 정보보호학과(박사과정)
2023년~현재 LIG넥스원 사이버전자전개발단.3팀 선임연구원
관심분야 : RF, SW, 정보보호, Database
E-mail : jinha.hwang@lignex1.com



윤 상 범(Sang-bom Yun)

2002년 고려대학교 학과(공학사)
2002년~현재 LIG넥스원 사이버전자전개발단.3팀 팀장
관심분야 : RF SW, 통신신호분석
E-mail : sangbom.yun@lignex1.com