

## 무인 항공 시스템 데이터링크 기술 동향 및 성능 분석

# Technology Trends and Performance Evaluation for Unmanned Aircraft System Datalink

황현수 · 정용철 · 정윤호\*

한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부

Hyunsu Hwang · Yongcheol Jung · Yunho Jung\*

School of Electronics, Telecommunication and Computer Eng. Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

### [요 약]

무인 항공 시스템(UAS)은 무인 항공기 운용에 필요한 장비, 네트워크 및 운용 인원을 포함하는 시스템을 통칭한다. 이러한 무인 항공 시스템은 과거 군사적인 목적으로 주로 이용되었으나, 최근 기술 발전에 힘입어 점차 민간용 시장으로 확대되고 있으며, 국가 공역내 통합되어 시장 규모가 급격히 성장할 것으로 예상된다. 따라서, 공역내 안정적인 통합을 위해 표준화된 무인기 제어 및 비임무용(CNPC; control and non-payload communication) 통신시스템의 구축 필요성이 증대되고 있으며, 미국, 유럽을 비롯한 선진국에서는 높은 신뢰성을 제공 가능한 제어용 통신 기술 개발을 진행하고 있다. 본 논문에서는 무인 항공 시스템의 CNPC 데이터링크의 기술개발 동향을 기술하고, IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템을 개량한 CNPC 시스템의 성능 분석 결과를 제시한다.

### [Abstract]

Unmanned aircraft systems (UAS) are defined as the system whose components include the necessary equipment, network, and personnel to control an unmanned aircraft. In the past, UAS were predominately operated for military operations. However, nowadays, the applications of UAS to commercial area are explosively augmented and UAS are being expected to be integrated in national airspace. Therefore, the need for the standardized datalink systems rapidly and the development of control and non-payload communication (CNPC) system are being processed for integration in national airspace in United States and Europe. In this paper, the technology trends for UAS CNPC datalink are explained and presented the performance evaluation results for CNPC system, which is the modified version of IEEE 802.15.4 ZigBee system.

**Key word** : Unmanned aircraft systems, Control and non-payload communication, Datalink, IEEE 802.15.4 ZigBee, Double-correlation.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.4.329>



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** 15 July 2016; **Revised** 20 July 2016

**Accepted (Publication)** 29 August 2016 (30 August 2016)

\***Corresponding Author** : Yunho Jung

**Tel:** +82-2-300-0133

**E-mail:** yjung@kau.ac.kr

## 1. 서론

무인 항공 시스템 (UAS)은 구성 요소에 필요한 장비, 네트워크 및 인원을 포함하는 무인 항공기를 제어하는 시스템을 말한다. 이러한 무인 항공 시스템은 과거 항공표적, 무인정찰, 감시 등 주로 군사적인 목적으로 이용되었으나 최근 기술 발전에 힘입어 점차 민간용 시장으로 확대되고 있으며, 그 시장규모가 급격히 성장할 것으로 예상된다. 현재 항공영상촬영, 교통감시, 재해·재난 대처, 감시·치안, 산불감시·진화, 운송, 농약살포, 통신 중계용 등 다양한 민간 공공분야에서 활용가치를 높게 평가받으며, 활동영역이 점차 커지고 있는 추세이다[1],[2].

특히, 무인기를 안정적으로 운용하기 위해서는 신뢰성 높은 데이터링크의 구축이 매우 중요하다. 군용 UAS 데이터 링크의 경우는 대표적으로 표 1과 같이 군용 특수성으로 인해 T/CDL (tactical/common data link) 혹은 자체 규격을 적용하여 데이터 링크를 개발하고 있고, 장거리 운용 특성으로 인해 위성 데이터 링크를 보편적으로 탑재하고 있다. 반면에 민수용 UAS 데이터 링크의 경우는 표 2와 같이 단거리 및 스마트 디바이스와의 확장성에 대한 요구로 인해 주로 IEEE 802.11n/ac Wi-Fi 시스템을 UAS 데이터 링크로 활용하고, 2.4/5GHz를 구분하여 조종 통제 및 임무용 데이터 링크로 활용하고 있다. 그러나, 고정형으로 개발된 Wi-Fi 특성으로 인해 이동성 및 장거리 지원에 한계를 가지고 있으며, 공역에 접근이 불가능하므로 VLOS (visual line of sight) 운용만 가능하다. 따라서 민수용 UAS의 경우, 다양한 운용이 가능하도록 공역 내 진입을 위해 조종 통제용 데이터링크에 대한 새로운 표준 개발이 필요한 실정이다. 따라서, 무인기의 안정적 운용 및 시장 확대를 위한 무인기 제어 전용 주파수 할당 및 효율적 활용, 표준화된 제어용 통신 기술 및 시스템 구축 필요성이 증대되고 있다 [3].

이와 관련하여 ITU (International Telecommunication Union)에서는 WRC-12 (World Radiocommunication Conference-12)를 통해서 CNPC 서비스 및 필요 데이터량, 운용 시나리오 등에 따른 주파수 소요량을 분석하였고, 예측결과에 따라, C-Band (5030~5091 MHz) 61 MHz 대역폭을 신규 분배하였고, 전파규칙 개정을 통해서 L-Band (960~1160 MHz)를 무인기 제어용 주파수 대역으로 사용 가능하도록 하였다 [4]. 또한, 전파규칙 개정을 통해 L-Band (960~1160 MHz)를 기존 항공무선항행 시스템에 혼선을 주지 않는 조건하에 무인기 제어용으로 사용 가능하도록 규정하였다. 또, WRC-15를 통해서 고정위성 업무용 주파수 대역에 해당하는 Ku-Band (10.95~14.5 GHz), Ka-Band (17.8~20.2 GHz)을 무인기 제어용 주파수로 규정하였다 [5]. 이에 맞춰 미국, 유럽을 비롯한 선진국에서는 무인기의 국가 공역으로의 안정적 진입을 위해, 고신뢰성 제어용 통신 기술 개발 및 표준화를 이미 시작하였다.

미국의 경우, 당초 2015년 9월까지 무인기의 공역 내 완전한 통합을 목표로 하였으나, 2020년으로 일정이 지연되었다. 미국은 NASA (National Aeronautical and Space Administration)을

중심으로 NextGen (next generation air transportation systems) 프로젝트를 통해 무인기 제어용 통신 기술 개발을 진행 중이며, NASA의 기술 개발 및 연구결과는 미국의 항공무선기술 표준화 기구인 RTCA (Radio Technical Communication for Aeronautics)에서 진행 중인 무인기 제어용 통신링크 표준 개발에 활용되고 있다. RTCA는 항공기 시스템의 최소운용 성능표준 (MOPS; minimum operation performance standard)을 개발하여 미국연방항공청인 FAA (Federal Aviation Administration)에 제언하는 역할을 하고 있으며, 2013년 5월, SC-228 구성하여 무인항공기 충돌회피 (WG-1) 및 제어용 통신링크 (WG-2) 기술에 대한 MOPS 개발을 진행하였고, 현재 지상 제어용 MOPS 표준 개발이 진행 중이며, 추후 위성 데이터 링크 기술에 대한 표준화를 진행할 예정이다. RTCA 표준 제정 범위는 무선인터페이스 성능요구사항, 주파수 제사용 방법, 동적 스펙트럼 할당방법, 검증 및 인증 방법 등 주로 물리계층 및 링크계층에 대한 정의로 규정되었다 [6].

유럽의 경우, 2028년까지 무인기의 공역 내 완전한 통합을 목표로 하고 있다. 유럽은 Eurocontrol 등을 중심으로 SESAR (single European SKY ATM research) 프로젝트를 진행 중이며, Eurocontrol의 기술 개발 및 연구 결과는 유럽 항공장비기술 표준화 기구인 EUROCAE (European Organization for Civil Aviation Equipment)의 표준 개발에 활용되고 있다. EUROCAE는 WG-73을 구성하여 무인기 유럽 공역내의 안정적 진입을 위한 표준을 개발 중이고, WG-93을 구성하여 소형 무인기의 유럽 공역 내의 안정적 진입을 위한 표준 및 권고 사항을 개발 중이다[7]. 국제민간항공기구인 ICAO (International Civil Aviation Organization)는 2007년부터 무인항공기 연구그룹 UASSG (UAS study group)를 결성하여 무인항공기 관련 업무에 대한 국제적 상호 협력, 관련 규정 및 매뉴얼 개발, 기술적 세부사항과 SARPs (standard and recommended practices)의 개정에 대한 절차를 진행 중이며, 기술적 세부사항에 대한 연구는 RTCA와 EUROCAE를 통해 진행하기로 하였다 [8].

본 논문에서는 무인 항공 시스템의 CNPC 데이터링크의 기술개발 동향에 대해 설명하고, IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템을 개량한 CNPC 시스템의 성능 분석 결과를 제시하고, 이에 대한 결론을 맺는다.

## II. UAS 데이터링크 기술 동향

NASA는 Rockwell Collins사와 함께 waveform trade study, communication technology assessment를 진행하여 SWAP-C (size, weight, power and cost), 시스템 용량, 복잡도 등의 측면에서 지상 CNPC 후보 waveform 기술의 평가를 진행하였다 [9-10]. 후보 기술은 cellular, IEEE 802 derivatives, public safety, custom, military, satellite 등의 여러 통신기술 카테고리에서 선정되었다. 평가 결과 CNPC 기술에 완벽하게 대응하는 기술이 발견되지는 않았지만, IEEE 802.16 WiMAX, LTE, P-34, TEDS

표 1. 군용 UAS 데이터링크

Table 1. Military UAS datalink.

Country	Name	Data-link
U.S.A.	Global Hawk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ground Communication : CDL (Common Data Link)</li> <li>• Satellite Communication : Ku/UHF-Band SATCOM (SATellite COMmunication), INMARSAT (INternational MARitime Satellite Organization), ATC Voice (Air Traffic Control Voice)</li> <li>• Modulation Scheme : SS-QPSK (Spread Spectrum-Quadrature Shift Keying), O-QPSK (Offset-QPSK), RS(247,231) (Reed-Solomon(247,231)), CC-1/2 (Convolutional Coding-1/2)</li> </ul>
	Predator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ground Communication : C-Band Tactical CDL (Common Data Link)</li> <li>• Satellite Communication : Ku-band SATCOM</li> <li>• Modulation Scheme : SS-QPSK, O-QPSK, RS(247,231), CC-1/2</li> </ul>
Israel	Heron	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ground Communication : LOS CDL (Common Data Link)</li> <li>• Satellite Communication : Ku-Band SATCOM</li> <li>• Modulation Scheme : STANAG 7085 compatible (NATO Standardization Agreement 7085)</li> </ul>
Korea	Smart UAV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Main Communication : C/Ku-Band, Up-link (28.8Mbps), Down-link (10Mbps)</li> <li>• Side Communication : UHF-Band, Up-link/Down-link (19.2Kbps)</li> <li>• Modulation Scheme : DSSS/BPSK (Direct Sequence Spread Spectrum / Binary Phase Shift Keying), D/QPSK (Differential / QPSK), TPC-0.79 (Turbo Product Code-0.79), BCH-3/4 (Bose, Chaudhuri, and Hocquenghem code-3/4), LDPC-3/4 (Low-Density Parity-Check code -3/4)</li> </ul>
	MALE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Main Communication : Ku-Band, FDMA/FDD (Frequency Division Multiple Access/Frequency Division Duplexing)</li> <li>• Side Communication : UHF-Band, TDMA/TDD (Time Division Multiple Access/Time Division Duplexing)</li> <li>• Modulation Scheme : DSSS/QPSK, TCM-8PSK (Trellis Coded Modulation -8PSK), CTC (Chinese Telegraph Code)</li> </ul>

표 2. 민간용 UAS 데이터링크

Table 2. Commercial UAS datalink.

Country	Name	Data-link
China	Phantom	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control and Non-Payload Communication : 2.4GHz Wi-Fi</li> <li>• Payload Communication : Video Transmission (5.8GHz, 720p @ 30fps)</li> <li>• etc : 2.4GHz Bluetooth Datalink for Ipad</li> </ul>
	Ghost	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control and Non-Payload Communication : 2.4GHz Wi-Fi</li> <li>• Payload Communication : Live Stream Video (5.8GHz, 1920 x 1080p @ 30fps)</li> <li>• etc : G-BOX - mobile compatible, WiFi(IOS), Bluetooth(Android)</li> </ul>
Europe	Bebop	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control and Non-Payload Communication: 2.4GHz / 5GHz MIMO Wi-Fi</li> <li>• Payload Communication : 5.8 GHz Wi-Fi Live Stream Video</li> <li>• etc : Select the desired frequency, depending on the network load</li> </ul>
America	Solo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control and Non-Payload Communication : 2.4GHz 3DR Link secure Wi-Fi</li> <li>• Payload Communication : Live Stream Video (720p on Mobile)</li> </ul>
Korea	PETRONE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control and Non-Payload Communication : Bluetooth 4.0</li> <li>• Payload Communication : 2.4GHz Wi-Fi (1280 x 720 Video Streaming)</li> </ul>

등의 후보 기술을 도출하였다. 이 중, IEEE 802.16 WiMAX 시스템에 기반하여 개발된 AeroMACS (aeronautical mobile airport communication systems) [11]와의 호환성 및 기술 성숙도를 고려하여 IEEE 802.16 WiMAX 프로토콜을 CNPC 프로토타입 시스템의 상위 프로토콜로 채택하였다. 이중화 방식으로는 주파수 문제를 고려하여 TDD (time division duplexing) 방식을 기

반으로, 상향링크접속 방식은 TDMA (time division multiple access)를 선택하였고, 하향링크접속 방식은 FDMA (frequency division multiple access)를 선택하였다. 변조 방식은 구현 복잡도를 고려하여 IEEE 802.16 WiMAX 시스템과 달리 GMSK (gaussian minimum shift keying) 방식을 적용하였다. GMSK 변조방식은 단일 반송파 전송방식으로, 전송효율은 낮지만 전력

소모가 적어 무인항공기 제어 및 통신만을 고려했을 때 적합하다고 평가되었다.

또한, NASA와 Rockwell Collins사는 지상 및 UAS용 CNPC 시스템을 개발하여 시연 검증하는 목표로 2011년 11월 연구 프로젝트를 시작하였다. 이는 NASA의 "UAS Integration In NAS (national air space)" 프로젝트의 sub-project로써, NASA는 communication mgmt subsystem 개발을 진행하였고, Rockwell Collins사는 Radio subsystem 개발을 진행하였다. First flight test는 2013년 5월에 진행되었다. First flight test는 L-band만을 이용하여 진행되었고, 하나의 지상국과 하나의 무인기가 통신하는 point-to-point 통신 방식으로 진행되었다. 상향링크 접속은 TDMA 방식으로 1, 4, 8, 12, 16, 20 slots을 이용하였고, 하향링크 접속은 FDMA 방식으로 3 service channel (c2, weather, video)을 두어 진행하였다. Second flight test는 2014년 3월과 9월에 진행되었다. Second flight test는 L-band를 주대역으로 하고 C-band를 부대역으로 이용하여 진행되었다. 두 개의 지상국과 하나의 무인기가 통신하여 hand-off 기능을 검증하였고 C-band를 위한 Doppler 정보를 업데이트하는 방향으로 진행되었다. Final flight test는 2015년 5월, 2016년 3월에 진행되었다. Final flight test는 역시 L-band를 주대역으로 하고 C-band를 부대역으로 이용하여 진행되었으며, 하나의 수신기에 다중터널을 사용하였다. 또한 필요한 경우에 adaptive equalization을 사용하였고, security 관련 실험도 진행되었다 [12].

### III. ZigBee 기반 CNPC 데이터링크

#### 3-1 시스템 모델

IEEE 802.15.4 ZigBee 물리계층 규격은 직접대역확산방식인 DSSS (direct sequence spread spectrum)와 MSK (minimum shift keying) 변조 기법을 명시하고 있어, 낮은 SNR (signal-to-noise ration) 환경에서도 안정적인 통신 데이터 링크를 제공할 수 있다 [13]. 또한, IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템은 저전력 구현이 가능하여 짧은 배터리 수명으로 인해서 상용화의 어려움을 겪는 무인 항공 시스템에 응용 가능할 것으로 예상된다. 그러나, IEEE 802.15.4 ZigBee 규격에서는 2.4 GHz 대역에 대해서 250 Kbps의 단일 전송률만을 규정하고 있어, 넓은 통달거리 및 다양한 응용을 지원하는데 있어 한계가 존재하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 250 kbps 보다 낮은 전송률을 지원하지만, 다양한 응용을 위하여 넓은 통달거리를 지원할 수 있도록 CNPC 시스템을 정의 하였다. 이는 그림 1과 같이 반복

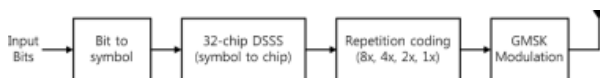


그림 1. 시스템의 송신단 구조

Fig. 1. Transmitter structure of the systems.

부호화를 적용하여 IEEE 802.15.4 ZigBee 규격에서 제안하는 데이터 전송률 250 kbps 이하 125 kbps, 62.5 kbps, 31.25 kbps 까지 지원 가능하도록 구성하였으며, CNPC 표준화 과정에서 GMSK (gaussian minimum shift keying) 변조 기법이 CNPC 변조 기법으로 권고된 것을 고려하여, 기존 ZigBee 규격에 해당하는 MSK 변조기법에 Gaussian Filter를 적용하여 GMSK 변조기법을 구현하였다.

#### 3-2 수신부 알고리즘

시간 동기부에서는 시간 동기를 획득하기 위해 프리앰블 심볼의 상관 연산 결과값을 이용한다. IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템에 정의된 250 kbps의 전송률을 지원하는 프리앰블 구조 및 상관 특성은 그림2와 같다. 상관 연산의 최대값은 동기부 상관기의 윈도우와 수신된 프리앰블 심볼이 정확하게 일치하는 지점에서 검출된다. 따라서, 프리앰블 구간 내 연속적인 위치에서 상관연산의 최대값을 검출할 수 있다. 시스템 모델에서 정의한 시스템의 경우는 가변 전송률을 지원하기 위하여 프리앰블의 길이를 늘려 시간 동기 획득 성능을 증가시켜야한다. 따라서, 가변 전송률을 지원하는 프리앰블 구조는 그림 3과 같이 심볼 전송률에 따라 {0} 이외의 다른 {p}, {q}, {r} 심볼을 추가하여, 가변 전송률 지원 시 정확한 시간 동기를 획득할 수 있도록 하였다.

IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템의 송수신 신호는 식 (1)과 같이 주파수 오차가 반영된 식으로 나타낼 수 있다.

$$r(n) = s(n)e^{j\omega_o n + \theta} + W(n) \tag{1}$$

여기서,  $r(n)$ 은  $n$ 번째 샘플의 수신신호,  $s(n)$ 은 변조된 송신 데이터의 심볼을 나타내고,  $\omega_o$ 는 송수신기 사이의 주파수 오차를 나타내며,  $\theta$ 는 초기 위상오차를 의미 한다. 또한,  $W(n)$ 은  $n$ 번째 샘플에 대한 AWGN (additive white gaussian noise)이다. IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템은 최대  $\pm 40$  ppm의 주파수 오차를 갖는데, 이러한 오차는 수신신호의 위상변화를 야기하게 된다. 따라서, 시간 동기부는 주파수 오프셋에 강한 이중 상관 방식의 알고리즘을 이용하였다[14]. 수식 전개 편의를 위하여 수식 (1)에서 AWGN 성분인  $W(n)$ 을 고려하지 않은 이중 상관 알고리즘은 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{DC}(n) = \sum_{n=0}^{N_s-1} r_l^*(n)r_l(n-N_C)s_m(n)s_m^*(n-N_C) \\ = \sum_{n=0}^{N_s-1} s_l^*(n)e^{-j(\omega_o n + \theta)}s_l(n-N_C)e^{j\omega_o(n-N_C) + \theta} \\ \cdot s_m(n)s_m^*(n-N_C)$$

$$= e^{-j\omega_0 N_C} \sum_{n=0}^{N_S-1} s_l^*(n) s_l(n - N_C) \cdot s_m(n) s_m^*(n - N_C) \quad (2)$$

여기서  $s_l$ 과  $s_m$ 은 그림 3에서 정의한 각각의 전송률에 해당하는 프리앰블 심볼 중 하나로, 250Kbps는 {0}, 125Kbps는 {0, p}, 62.5Kbps는 {0, p, q, r}, 31.25Kbps는 {0, p, q, r, q, p, 0}를 나타낸다.  $N_S$ 와  $N_C$ 는 각각 누적 샘플의 수, 지연샘플의 수를 나타낸다. 수식 (2)를 보면 수신 신호의 켈레 곱 연산을 통해, 초기 위상 오차  $\theta$ 는 소거되고, 주파수 오프셋의 영향이 상수항인  $e^{-j\omega_0 N_C}$ 으로 정리되므로 위상변화가 최소화됨을 확인할 수 있다. 또한, 수신 신호의 심볼 인덱스  $l$ 과 참조 신호 심볼 인덱스  $m$ 이 동일할 때, 상관연산 결과 최대값을 얻을 수 있으므로, 이를 시간 동기 획득에 이용할 수 있다.

복조부에서는 상관 연산에 사용되는 메모리를 줄이기 위하여 샘플 단위 이중상관 알고리즘을 이용하였고[15], 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m(n) = \sum_{N_C}^{N_S} r_{x,k}^*(n) r_{x,k}(n - N_C) s_{m,k}(n) s_{m,k}^*(n - N_C) = \sum_{N_C}^{N_S} s_{x,k}^*(n) e^{-j(\omega_0 n + \theta)} s_{x,k}(n - N_C) e^{j\omega_0(n - N_C) + \theta} \cdot s_{m,k}(n) s_{m,k}^*(n - N_C) = e^{-j\omega_0 N_C} \sum_{N_C}^{N_S} M_{x,k}(n) M_{x,k}^*(n) \quad (3)$$

여기서,  $N_C = 4$ 이고,  $M_{x,k}(n)$ 은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$M_{x,k}(n) = s_{x,k}^*(n) s_{x,k}(n - N_C) \quad (4)$$

수식 (3)을 살펴보면,  $x$ 와  $m$ 은 각각 수신신호와 참조신호의 인덱스이며,  $N_S$ 와  $N_C$ 는 각각 누적 샘플의 수, 지연샘플의 수를 나타낸다.  $Y_m$ 은 16개의 후보군 중,  $m$ 번째 참조신호와 수신 신호  $r_{x,k}(n)$ 의 상관연산 결과값으로 수신신호의  $x$ 가  $m$ 과 같을 경우 가장 큰 값을 나타낸다. 이에, 수신신호와 16개의 후보군과의 상관연산 결과값  $Y_0 \sim Y_{15}$ 을 비교하여 가장 큰 상관값을 가지는 참조신호로 복조를 수행한다 [15].

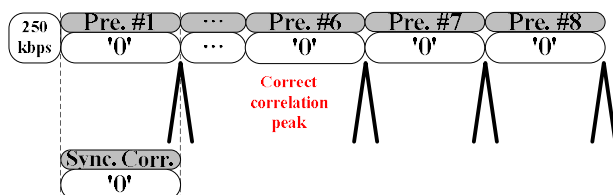


그림 2. 250 kbps 전송률을 지원하는 프리앰블 상관특성  
Fig. 2. Correlation property for the preamble that supports the data rate of 250 kbps.

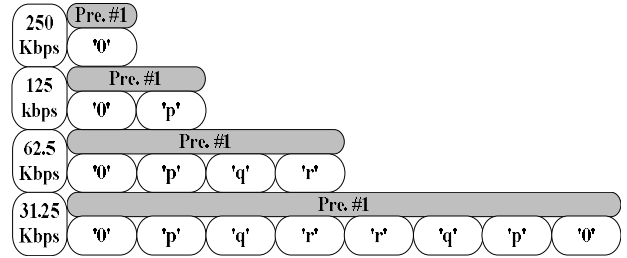


그림 3. 가변 전송률 지원을 위한 시스템 프리앰블 구조 [14]  
Fig. 3. Preamble structure of systems for the support of variable data rate [14].

#### IV. 성능 분석 결과

시간동기 획득 성능은 복조부가 정확한 데이터를 복원할 수 있도록 패킷의 시작 지점을 얼마나 정확하게 획득할 수 있는지에 달려있다. 따라서, 프리앰블 구간 내, 같은 샘플 지점에서 연속된 상관연산 최대값을 검출할 경우를 시간 동기 성공으로 판단하였으며, 잘못된 패킷의 시작 지점을 찾는 경우와 패킷을 검출하지 못하는 경우를 시간 동기 획득 실패로 간주하였다. 시간 동기 알고리즘 성능분석은 IEEE 802.15.4 표준에 명시된 주파수 오프셋 (송/수신 각 최대  $\pm 40$  ppm), 위상 오차 및 AWGN이 존재하는 환경을 가정하여 수행하였다. 시간 동기 알고리즘 성능분석은 IEEE 802.15.4 표준에 명시된 주파수 오프셋 (송/수신 각 최대  $\pm 40$  ppm), 위상 오차 및 AWGN이 존재하는 환경을 가정하여 수행하였다. 그림 4는 가변 전송률을 지원하는 프리앰블 전송구조를 이용한 시간 동기부의 가변 전송률 지원에 따른 시간 동기 획득 성능을 나타낸다. 그림 4를 보면, 가변 전송률 지원에 따른 시간 동기 획득 성능은 250 kbps 기준으로, 가변 전송률 지원에 따른 프리앰블 심볼의 길이 증가로 전송률 별로 약 2 dB 성능 이득을 얻을 수 있다. 따라서, 낮은 SNR 환경에서도 우수한 시간 동기 획득 성능을 나타내는 것으로 보아 통달거리 증대를 기대할 수 있다.

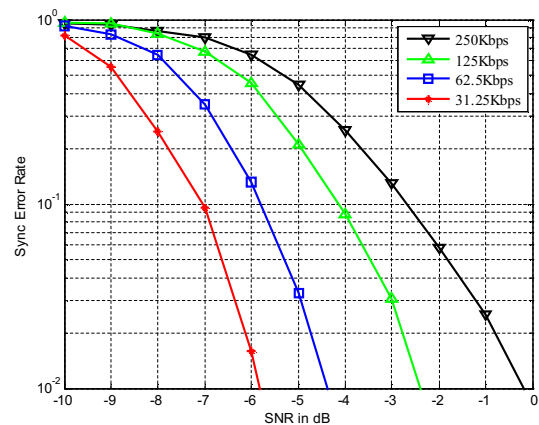


그림 4. 가변전송률 지원에 대한 시간 동기 획득 성능  
Fig. 4. Performance of the time synchronizer for variable data rates.

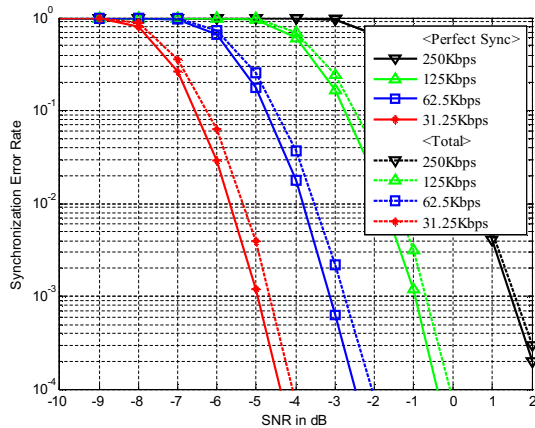


그림 5. 가변전송률 지원에 대한 복조 및 통합 시스템 성능  
 Fig. 5. Performance of the demodulator and total system for variable data rates.

복조 알고리즘의 성능은 perfect synchronization을 가정하여 시간동기 획득 성능을 고려하지 않은 독립적인 복조 알고리즘 성능과 시간동기 획득 성능을 고려한 시스템 전체 복조 알고리즘 성능으로 구분하였다. 복조 알고리즘 성능 분석은 IEEE 802.15.4 표준에 명시된 주파수 오프셋 (송/수신 각 최대 ±40 ppm), 위상 오차 및 AWGN이 존재하는 환경을 가정하여 수행하였다. 그림 5는 가변 전송률 지원에 따른 독립적인 복조 알고리즘과 시스템 전체 복조 알고리즘 성능을 packet error rate (PER) 관점에서 도시한 그림이다. 그림 5를 보면, 가변 전송률 지원에 따른 복조 알고리즘 성능은 250 kbps 기준으로, 가변 전송률 지원에 따른 심볼의 길이 증가로 전송률 별로 약 2 dB 성능 이득을 얻을 수 있다. 따라서, 낮은 SNR 환경에서 우수한 복조 성능을 나타내고 있어 통달거리 증대를 기대할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 무인 항공 시스템 데이터링크 기술 개발 동향이 설명되었고, IEEE 802.15.4 ZigBee 시스템을 개량한 CNPC 시스템의 성능 분석 결과가 제시되었다. 제시된 CNPC 시스템은 낮은 SNR 환경에서도 우수한 성능을 보이며, 다양한 응용에 대한 지원과 함께 통달거리 증대를 기대할 수 있어, CNPC 시스템으로 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

The first author was supported by Expert Education Program of Maritime Transportation Technology (GNSS Area), Ministry of Ministry of Oceans and Fisheries of Korean government.

## 참고 문헌

- [1] C. A. Wargo, G. C. Church, J. Glaneueski, and M. Strout, "Unmanned aircraft systems (UAS) research and future analysis," in *2014 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky: MT, pp. 1-16, March. 2014.
- [2] D. H. Jang, "Global UAS market trends and forecast," in *The Korea Society For Aeronautical And Space Science Conference*, Seoul: Korea, pp. 1140-1145, 2013.
- [3] P. Denise, and M. R. John, Creating unmanned data links, in *Aerospace America Year in Review 2014*, Washington: DC, Vol. 52, No. 11, pp. 44, Dec. 2014.
- [4] International Telecommunication Union (ITU), in *2012 World Radiocommunication Conference*, Geneva: Switzerland, Jan. 2012.
- [5] International Telecommunication Union (ITU), in *2015 World Radiocommunication Conference*, Geneva: Switzerland, Nov. 2015.
- [6] RTCA. SC-228 minimum operational performance standard for unmanned aircraft systems. [Internet]. Available: <http://www.rtca.org/content.asp?contentid=178>.
- [7] EUROCAE. WG-73 unmanned aircraft systems (UAS). [Internet]. Available: <https://www.eurocae.net/wgs/active/?wg=WG-73>
- [8] ICAO. UASSG unmanned aircraft systems study group [Internet]. Available: <http://www.icao.int/Search/pages/Results.aspx?k=UASSG>.
- [9] C. Carlos, H. Bruce, H. Allan, and M. John, Unmanned aircraft (UA) control and non-payload communication (CNPC) system waveform trade studies, NASA, Technical Report CR-2014-216673, June 2014.
- [10] C. Steven, D. William, E. Justin, and T. Christine, communication technology assessment for the unmanned aircraft system (UAS) control and non-payload communication (CNPC) link, NASA, Technical Report CR-2014-216675, June 2014.
- [11] H. Corporation, Aeronautical mobile airport communications system profile, RTCA SC-223. Mar. 2011.
- [12] J. Griner, "Unmanned aircraft systems (UAS) integration in the national airspace system (NAS) project : UAS control and non-payload communication (CNPC) system prototype status," in *2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Dulles: VA, April 2015
- [13] IEEE Std.802.15.4, IEEE standard for wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks, Sep. 2006.
- [14] M. C. Park, D. C. Lee, S. H. Jang, and Y. H. Jung, "Design of time synchronizer for advanced LR-WPAN

systems,” *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 18, No. 5, pp. 476-482, Oct.2014.

[15] D. C. Lee, S. H. Jang and Y. H. Jung, “Design of

non-coherent demodulator for LR-WPAN system,” *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 17, No. 6, pp. 705-711, Dec. 2013.



**황 현 수 (Hyunsu Hwang)**

2015년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)  
2015년 9월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 대학원  
※ 관심분야 : 무선통신 시스템, 항공통신 시스템, VLSI 신호처리, 모뎀 SoC



**정 용 철 (Yongchul Jung)**

2015년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)  
2015년 9월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 대학원  
※ 관심분야 : 무선통신 시스템, 항공통신 시스템, VLSI 신호처리, 모뎀 SoC



**정 윤 호 (Yunho Jung)**

1998년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
2000년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
2005년 ~ 2007년 : 삼성전자 책임연구원  
2007년 ~ 2008년 : 연세대학교 연구교수  
2008년 ~ 현재 : 한국항공대학교 부교수  
※ 관심분야 : 무선통신 시스템, 항공통신 시스템, VLSI 신호처리, 모뎀 SoC