

FPGA를 이용한 무인기 항법용 방위각 발생기 및 획득기 구현

Implementation of Azimuth Generator and Acquisition Device for UAV Navigation Using FPGA

이경순* · 조용운 · 김민정
우리항행기술 기술연구소

Kyung-Soon Lee* · Yong-Un Cho · Min-Jung Kim

Research & Development Center, Woori Navigation Technology, Gyeonggi-do, 10090, Korea

[요 약]

무인기 항법용 방위각 발생기와 획득기는 기존 민항기의 DVOR과 유사한 개념으로 무인기가 자신의 진행 방위각을 세밀하게 파악할 수 있도록 도와주는 시스템이다. 이 시스템은 도플러 효과에 의한 방위각 신호를 발생하는 지상 기지국과 방위각 신호를 수신하여 무인기의 진행 방위각을 도출하는 신호획득 단말기로 구성된다. 본 연구는 기존 UAM에서 주로 사용하는 GNSS 항법을 보완하기 위해 지상기반 C밴드 주파수 (5.03~5.15 GHz)를 이용한 전파항법 VOR 구현에 관한 것이다. 이는 항공우주를 감독하는 미연방항공국 규칙 Title 14 CFR- Aeronautics and Space 135.165에서 제시한 ‘2개 이상의 독립적인 항법소스를 비행체에 적용’ 규정 사항을 충분히 만족할 수 있는 항법기술 중 하나이다. 본 연구에서는 FPGA를 사용하여 시스템의 핵심기술 분야인 방위각 신호발생, 방위각 도출에 필요한 Sine/Cosine 신호 발생, AM/FM 신호의 위상검출 비교기 그리고 도플러 효과를 위한 안테나 스위칭용 블렌딩 신호발생기 등에 대한 설계와 구현을 수행하여 1000회 샘플링의 연속 방위각 도출 결과는 최대 편차 $\pm 1.1^\circ$ 이내로 ICAO 규격인 $\pm 3^\circ$ 를 만족함을 확인하였다.

[Abstract]

The azimuth generator and acquirer for UAV navigation is a system that helps UAVs to precisely determine their own azimuth while they are flying, similar to the DVOR of existing civil aircraft. This system consists of a ground base station that generates an azimuth signal by the Doppler effect and a signal acquisition terminal that receives the azimuth signal and derives the azimuth of the UAV. This study focuses on the implementation of C-band radio navigation in the 5.03 ~ 5.15 GHz terrestrial band to cooperate with GNSS navigation mainly used in existing UAMs. This is one of the navigation technologies that can fully satisfy the requirements of Title 14 of CFR-135.165. According to the FAA, the use of two or more independent navigation sources for aircraft is proposed for aircraft. In this study, the design and implementation of the core technologies of the system, such as azimuth signal generation, sine/cosine signal generation required for azimuth derivation, phase detection comparator of AM/FM signals, and blending signal generator for antenna switching for the Doppler effect, were performed using FPGA. The results of azimuth derivation for 1000 samplings were confirmed to satisfy the ICAO standard of $\pm 3^\circ$ with a maximum deviation of $\pm 1.1^\circ$.

Key word : Doppler VHF omni range, Field programmable gate array, Ground-based radio navigation, Urban air mobility.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.5.582>



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 4 September 2024; Revised 26 October 2024

Accepted (Publication) 29 October 2024 (31 October 2024)

*Corresponding Author; Kyung-Soon Lee

Tel: +82-31-976-0160

E-mail: telematics@anfilogy.com

1. 서론

도심항공교통 (UAM; urban air mobility)은 친환경·저소음 소형항공기와 버티포트를 활용하여 도심에서 승객과 화물을 안전하고 편리하게 수송하는 항공교통체계로, 초기에는 조종사가 탑승하여 기존 헬기고도로 운항하지만 2035년 이후 자율비행으로 운항할 것으로 전망된다. UAM은 기체 양산에서부터 인프라 구축, 인력 관리, 운송서비스 및 플랫폼 등 다양한 산업 분야가 유기적으로 연결된 거대 모빌리티 생태계이다 [1].

UAM의 운항에 필요한 항법은 기존에 주로 위성항법시스템 (GNSS; global navigation satellite system)을 사용하여 이륙, 운항 및 착륙 접근에 이르기까지 필수적으로 사용되는 기능이지만, 도시화에 의한 점점 더 많은 장애물이 발생하는 환경에 노출되어 GNSS의 음영 또는 간섭신호 등에 의한 정밀도 수준 또한 저하될 우려가 존재한다. 이러한 현상에 대응하기 위하여 미 연방항공국(FAA; Federal Aviation Administration)의 항공우주 규정집인 Title 14 of CFR-135.165에서는 2개 이상의 독립적인 항법소스를 적용하도록 규정하고 있으며, GNSS 항법을 기본으로 하면서 보완적인 항법을 추가로 복합하여 사용하는 복합 항법 기술에 관한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다 [2].

본 연구는 기존 민항기에서 수십 년 이상 운용되며 안정성이 확보된 항행항법시스템인 DVOR (doppler VHF omni-directional range)을 기반으로 하고, 국제전기통신연합 (ITU; International Telecommunication Union) 산하의 세계전파통신회의(WRC-12)에서 할당된 무인항공기용 주파수 5.03~5.15 GHz를 사용한 GRNS 항법기술 개발을 목표로 수행하였다. UAM의 대체항법 기술 중의 하나인 진행 방위각 정보를 알 수 있도록 도와주는 도플러 방위각 시스템인 DVOR의 지상 기지국과 수신 단말기의 설계에 핵심적인 역할을 담당하는 신호발생 및 처리부분에 FPGA (field programmable gate array)를 사용하여 설계하였으며 시제품 제작 및 시험을 통해 주요 성능을 확인하였다.

기존 민항기용 DVOR 시스템에서는 주로 상대적 저집적도인 CPLD (complex programmable logic device)를 복수로 사용하여 고정된 위상을 갖는 신호발생기, 처리기 및 검출기 등 각각의 회로를 담당하도록 설계되었으나, 본 연구에서는 발생된 신호의 위상 오프셋을 조정하는 위상가변기, 블렌딩 신호발생기 및 위상 검출기 등의 모든 회로를 고집적도인 FPGA 1개를 사용하여 설계하였다. 이를 통해 FPGA용 기준클럭이 동일한 소스를 사용하게 되어 FPGA 내부에서 발생하는 여러 신호들의 시간적 동기를 일치시켜 위상검출 성능을 향상할 수 있으며, 구현된 보드의 크기는 28cm x 28cm 정도로 소형화되어 기지국은 물론 무인기에 장착할 수 있는 경량화를 달성하였다.

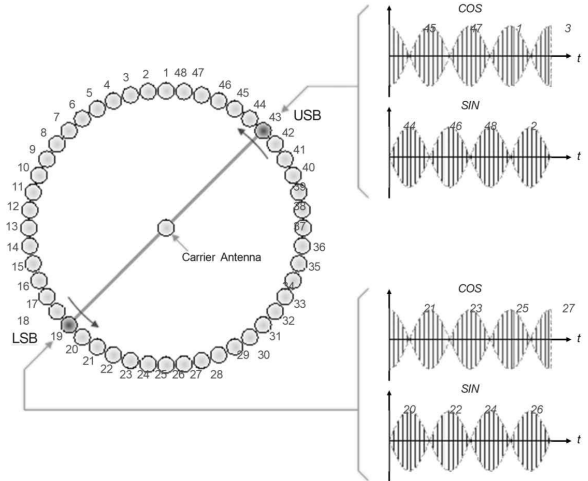


그림 1. 기존 민항기용 안테나 블렌딩 신호 구성도
Fig. 1. Antenna blending signal configuration for existing civil aircraft.

II. DVOR 설계 및 분석

2-1 도플러 효과에 의한 방위각 발생 개요

현재 전 세계적으로 운용 중인 민항기용 DVOR은 국제민간항공기구 (ICAO; International Civil Aviation Organization)에서 항공용 표준항법 시스템으로 지정한 전방향표지시설로 항공기가 공항을 찾아가는 데 사용되고 있는 항법시스템이다. DVOR은 지상에서 방위각 정보를 송출하는 2개의 30Hz 신호 즉, 기준 위상 신호 (reference phase signal)와 가변위상 신호 (variable phase signal)의 위상관계에 있다. 기준위상 신호는 30 Hz 정현파로서 주반송파에 진폭 변조되어 전방향으로 복사되며, 수신기가 어느 방위에 있던지 위상은 동일하게 수신된다. 가변위상 신호는 동일한 30 Hz 정현파이지만, 초당 30회 속도로 회전하며 반반송파에 도플러 효과에 의한 주파수변조로 복사되고 수신기의 위치에 따라 관측되는 위상이 달라진다. 예를 들어 관측자의 위치가 동쪽에 있다면 가변위상 신호의 위상은 기준위상 신호보다 90° 앞서게 된다. DVOR 수신기는 이들 두 신호의 위상차를 구하여 방위각을 얻는다.

DVOR에서 필요한 가변 위상신호를 발생하기 위해서 24개의 안테나를 일정한 원주상에 배치하고 순차적으로 급전함으로써 전기적으로 회전하는 효과를 얻도록 한다. 안테나의 순차적인 급전은 안테나를 스위칭함으로써 이루어지나, 안테나의 순차적인 스위칭만으로는 그 회전효과가 불연속적이므로 연속적인 회전효과를 위해 블렌딩 (blending) 기술이 적용되었다.

즉, 연속적인 회전효과를 내기 위해 두 개의 인접한 안테나에 서로 다른 크기의 전력을 동시에 공급한다. 이때 두 안테나에 가해지는 전력은 정해진 블렌딩 함수에 따라 변조되며, 한쪽 변조 신호의 크기가 최대가 되는 순간에 다른 쪽 변조 신호의 크기는 0 이 되도록 선택된다. 이렇게 두 안테나에 변조 위상이 다른 두 신호를 가함으로써, 특정 수신지점에서는 두 안테나로부터의 신호가 벡터 합성되어 나타난다. 결국 안테나 스위칭 타이밍과 블렌딩 함수를 적절히 선택하면 안테나가 연속적으로 회전하며 복사하는 것과 같은 효과를 얻는다 [3].

가변위상 신호는 주반송파에 진폭 변조된 9960 Hz 부반송파에 실려 송출된다. 실제로는 9960 Hz 부반송파가 주반송파에 직접 변조되는 것은 아니고 별도의 안테나에서 방사되어 공간적으로 주반송파에 진폭변조된다. 9960 Hz 부반송파는 주반송파 안테나를 중심으로 일정 거리에 있는 측파대 안테나에서 방사된다. 측파대 안테나는 주반송파 안테나를 중심으로 초당 30 회의 비율로 연속적인 회전효과를 갖는다. 따라서 어느 특정 수신지점에서 9960 Hz 부반송파는 초당 30회의 비율로 변화된다. 송수신 지점 사이의 거리가 시간에 따라 변화하므로 도플러 효과가 일어나고 9960 Hz 부반송파 신호에 30 Hz 주기의 주파수 편이가 발생된다. 이것은 9960 Hz 부반송파신호가 30 Hz 가변 위상신호에 의해 주반송파에 주파수 변조된 형태가 된다. 가변 위상신호가 도플러 효과에 의해 주파수 변조될 때 그 최대주파수 편이 Δf 은 아래의 식에 따른다.

$$\Delta f = \frac{vf}{c} = \frac{\omega Rf}{c} \tag{1}$$

여기에서 c = 빛의 속도 (3×10^8 m/sec), R = 측파대 안테나의 회전 반경, f = 송신 주파수이며, 5.1 GHz의 주파수에서 $\Delta f = 480$ Hz를 얻기 위해서는 측파대 안테나 반경 0.15 m가 필요하다.

2-2 블렌딩 신호 발생기 설계

기존 민항기용 Blending 신호는 주반송파 108~118 MHz를 사용하여 총 48개의 안테나를 반지름 약 6.7 m의 원주에 약 0.87 m 등간격으로 배열하여 720 Hz의 주파수를 사용하고 있다. 여기에 사용한 전방향 안테나의 지름은 약 0.48 m 정도이므로 0.87 m 등간격 배열이 가능하다. 본 연구에서는 5.1 GHz 대역의 주반송파에 반지름 0.15 m의 원주에 안테나를 배열하게 되었고 안테나의 지름이 약 20 mm 정도임을 감안하여 약 40 mm 등간격으로 총 24개의 안테나로 구성하였다. 총 24개의 안테나는 다시 Sine과 Cosine 위상을 갖는 12개의 안테나를 Sine과 Cosine 안테나를 교번하여 배열한다. 30 Hz의 가변신호 위

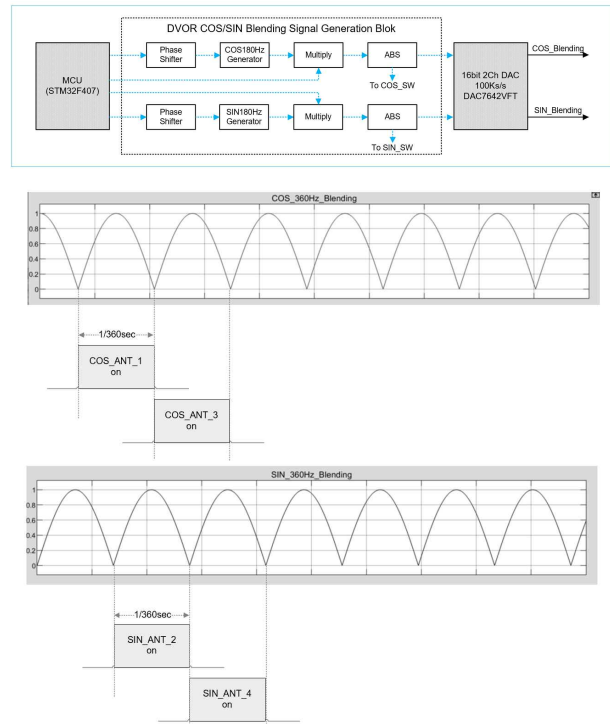


그림 2. 블렌딩신호 발생기 구조 및 위상관계
 Fig. 2. Blending signal generator structure and phase relationship

상 주기를 만들기 위해 12개의 안테나는 360 Hz의 속도로 회전 하도록 설계하였다 [4]. 그림 2와 같이 360 Hz의 블렌딩 신호는 FPGA 내부에서 180 Hz 신호를 생성한 뒤 절대값을 취해 360 Hz 반파 신호로 만든다.

2-3 기준위상 신호 및 테스트 신호 발생기 설계

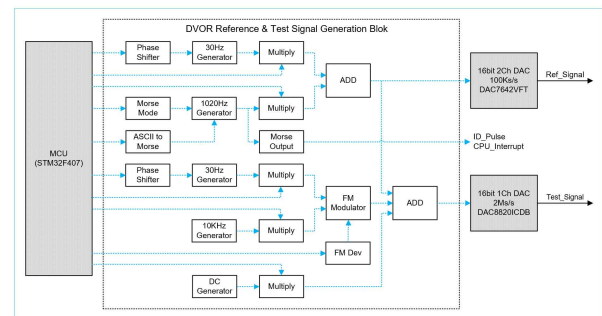


그림 3. 기준신호 및 테스트신호 발생기 구조
 Fig. 3. Reference signal and test signal generator structure.

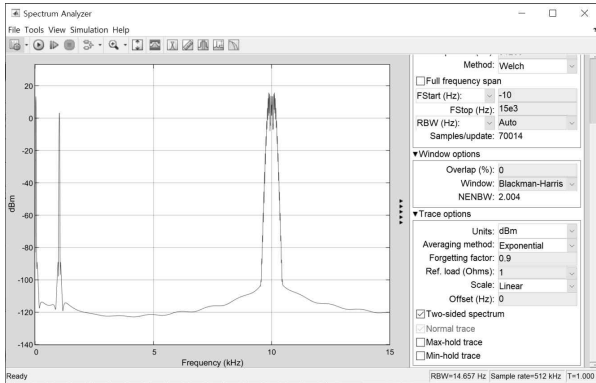


그림 4. 기준신호 및 테스트신호 발생기 구조
 Fig. 4. Reference signal and test signal generator structure.

그림 3과 같이 기준위상 신호는 주반송파에 진폭변조용 30 Hz 정현파와 모리스 코드 형태의 1020 Hz ID (identifier) 신호로 구성되며, 테스트 신호는 수신 단말기의 성능시험을 위해 물리적인 안테나의 도플러 복사와 유사한 환경의 신호를 FPGA에서 생성하여 송출하는 기능을 갖는다. 테스트 신호는 기준위상 AM 30 Hz 신호, 10 kHz 부반송파 및 가변위상 FM 30 Hz 신호 등의 합으로 구성된다. ID 신호는 지상 기지국의 고유번호로 보통 4개의 영어 문자열로 구성되며, 총 30초의 주기에 3회 신호송출 1회 휴지기로 반복 수행된다.

그림 4는 테스트 신호의 발생결과를 매트랩으로 전산모의 실험한 결과로 주반송파를 DC (direct current)로 놓고 기준위상 신호 AM (amplitude modulation) 30 Hz, 부반송파 10 kHz 및 부반송파에 480 Hz 편이로 주파수 변조된 가변위상 FM (frequency modulation) 30 Hz 등이 합성된 스펙트럼을 보여준다.

2-4 방위각 신호 검출 및 위상비교부 설계

방위각 수신 단말기에서는 5.1 GHz 대역의 RF 신호를 수신하여 포락선 검파를 통해 주반송파의 크기는 DC로 천이되고 AM 30 Hz, ID 1020 Hz, 부반송파 10 kHz 및 FM 30 Hz 등의 복합성분 신호로 검파된다. 이 신호는 16 bit ADC를 통해 디지털 신호로 변환되어 FPGA에 입력된다. 그림 6과 같이 FPGA 내부의 10 kHz FM 복조기에서 주파수 변조된 FM 30 Hz 오디오 신호를 검출하여 변조도, 주파수 측정 및 방위각 검출용 위상비교에 사용한다. 그리고 진폭 변조된 AM 30 Hz 오디오 신호를 검출하여 변조도, 주파수 및 FM 30 Hz와 위상비교를 통해 방위각을 도출한다. 또한 진폭변조된 ID 1020 Hz 오디오 신호를 검출하여 신호의 주기에서 모리스 부호로 변환한 뒤 최종적으로 해당되는 영어 문자를 획득한다.

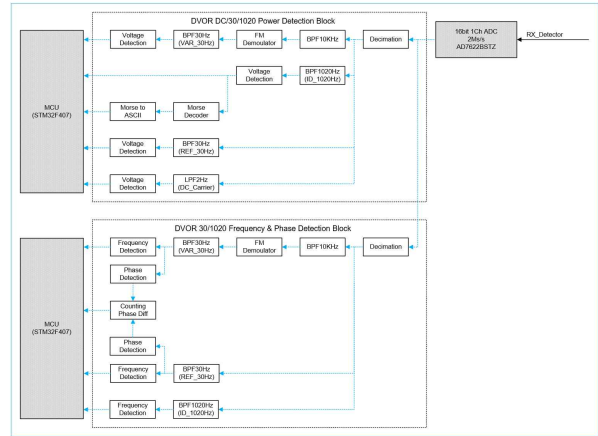


그림 5. 방위각 신호 검출 및 위상 비교 구조
 Fig. 5. Azimuth signal detection and phase comparison structure.

III. 시제품 제작 및 측정

3-1 블렌딩 신호 및 테스트 신호 측정

방위각 발생기는 기준신호와 가변신호를 발생하는 디지털 신호처리 보드와 5.1 GHz RF (radio frequency)로 변조 및 송출하는 RF 보드로 구성된다. 또한 디지털 신호처리 보드의 주요 구성 요소로는 FPGA, ADC 및 DAC 등으로 구성된다. FPGA는 215K의 로직셀과 740개의 DSP (digital signal processing)을 갖는 Xilinx사의 Artix 7계열 XC7A200T를 사용하였으며 제작된 디지털 신호처리 보드와 RF 보드는 아래 사진과 같다.

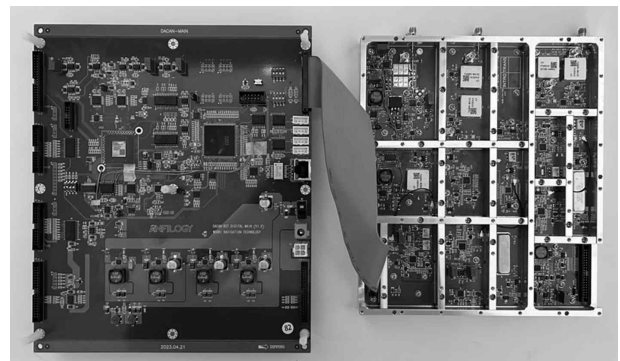


그림 6. 제작된 디지털 보드(좌) 및 RF 보드(우) 사진
 Fig. 6. Photo of the fabricated digital board (left) and RF board (right).

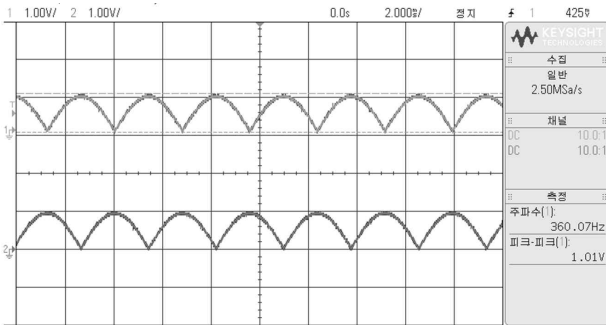


그림 7. 360Hz Cosine(상) Sine(하) 블렌딩 신호 측정결과
Fig. 7. 360Hz Cosine(upper) Sine(lower) blending signal measurement results.

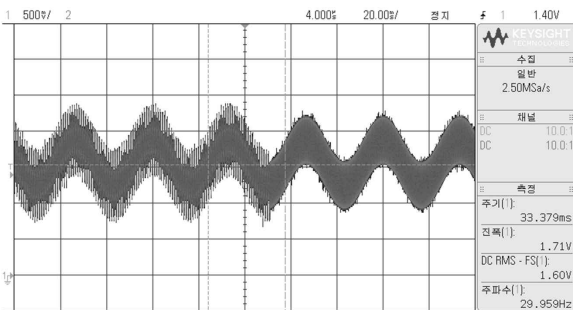


그림 8. 테스트신호 측정결과
Fig. 8. Test signal measurement results.

FPGA 내부에서 생성된 360 Hz 반파 블렌딩 디지털 신호를 외부 16 bit DAC를 사용하여 출력한 블렌딩 신호는 그림 7과 같이 두 신호 위상차 90°를 갖는 Cosine 및 Sine 1Vpp의 크기로 생성되고 있음을 확인하였다. FPGA 내부에서 생성된 기준위상 30 Hz, ID 1020 Hz, 부반송파 10 kHz 및 FM 30 Hz 디지털 신호를 외부 16 bit DAC를 사용하여 출력한 합성 신호는 그림 8과 같이 1.7Vpp로 생성되고 있음을 확인하였다.

3-2 방위각 도출

방위각은 AM 30 Hz 신호의 위상과 FM 30 Hz 신호의 상호 위상차이에 의해 자북기준으로 UAM 진행방향의 방위각을 구할 수 있다.

$$resolution = 360^\circ \times \frac{30Hz}{2MHz} = 0.054^\circ \quad (2)$$

기존 민항기용 DVOR과 같이 두 신호의 위상차가 0°이면 UAM은 북쪽 방향으로 운항 중이고, 위상차가 90°이면 동쪽 방

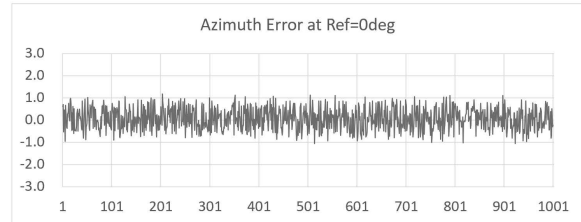


그림 9. FTS 방위각 측정결과
Fig. 9. FTS azimuth measurement results.

향으로 운항함을 알려주도록 설계하였다. FPGA 내부의 위상 검출 및 비교기는 30 Hz에 대하여 2 MHz 샘플링 주파수로 비교하여 360° 구간에서 0.054°의 비교적 정밀한 분해능을 갖도록 설계하였다.

그림 9는 테스트 신호 방위각을 0°로 설정 후 수신기에서 획득한 데이터 1000개에 대한 편차를 보여준다. 방위각 도출에 대한 최대 편차는 ±1.1° 이내로 확인되었다. UAM용 방위각 오차에 대한 국제적인 규격은 현재 정해지지 않았지만, 민항기용 DVOR의 오차에 대한 ICAO 규격이 ±3°임을 감안하면 비교적 정밀한 결과를 획득하였다 [5].

IV. 결 론

본 연구에서는 드론 및 UAM 등 유무인항공기에서 사용 중인 GNSS 항법과 복합항법을 구성하는 방법으로 C 밴드 5.03~5.15 GHz 주파수를 사용한 지상기반 전파항법시스템에서 방위각 발생기인 DVOR의 24 배열 안테나 스위칭용 블렌딩 신호 및 디지털신호처리 등에 대한 전산모의 실험, 설계 및 시제품 제작 결과를 제시하였다. 지상 기지국용 디지털 신호처리 보드에서 FPGA를 사용하여 DVOR 기준위상 신호, 가변위상 신호 및 안테나 스위칭용 블렌딩 신호를 생성하여 5 GHz 밴드 RF 송신 모듈 및 24 배열 안테나를 통해 도플러 효과를 갖는 방위각 신호를 방사하고, UAM용 단말기에서는 5 GHz 밴드 RF 수신 모듈에서 검파된 신호를 FPGA를 사용하여 신호검출 및 위상비교를 통해 방위각을 획득하도록 설계 및 제작을 하였다. 신호 획득기에서 수신된 최대 편차는 1000회 샘플링에서 ±1.1° 이내의 성능을 갖고 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해 C 밴드 주파수인 5 GHz를 사용하여 지상기반 전파항법 시스템 중 하나인 DVOR 항법기술이 기존 UAM용 GNSS 항법과 병행하여 사용될 수 있는 복합항법으로서의 기술적 성능과 구현에 대한 기초적인 연구결과를 습득하였다. 특히 FPGA를 사용한 설계 및 구현기술은 기존 CPLD를 사용한 시스템 보다 성능의 고도화 및 시스템의 크기를 소형 경량화를

이를 수 있다. 앞으로 실제 UAM 항로 환경조건에서의 성능시험 및 성능 안정화를 위한 고도화 개발을 통해 상용화를 이룰 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgments

본 연구는 2022년도 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 기술키움지원사업에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] H. J. Sim, *Urban air mobility (UAM) global industry trends and future challenges*, Institute for International Trade, Seoul, Trade Focus 21-22, pp. 14-17, Jun. 2021.

[2] V. L. Stouffer, and R. D. Lehmer, *Reliable, secure, and scalable communications, navigation, and surveillance (CNS) options for urban air mobility (UAM)*, Science Applications International Corporation, Reston, Technical Report GS00Q14OADU130, pp. 15-20, Aug. 2020.

[3] K.W. Lee, *MARU220 DVOR technical manual*, Mopience Corporation, Seoul, Technical Manual, 2007.

[4] S. Sandmann, J. Bredemeyer, T. Schrader and H. Garbe, "Numerical time domain method for calculation of the indicated DVOR bearing in dynamically disturbed scenarios," *The Institution of Engineering and Technology*, Vol. 13, No. 15, pp. 2687-2692, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1049/ict-map.2018.5591>

[5] ICAO, Annex 10 Volume I Aeronautical Telecommunications, 7th ed. Montréal, International Civil Aviation Organization, 2018.



이 경 순 (Kyung-Soon Lee)

1993년 2월: 인천대학교 전자공학 (공학사)
 2003년 8월: 연세대학교 경영학 (경영학석사)
 2018년 8월: 인천대학교 전자공학 (공학박사)
 2019년 5월 - 현재: 우리항공기술(주) 기업부설연구소
 ※관심분야: 위성통신, 항행항법, 마이크로파 회로해석



조 용 운 (Yong-Un Cho)

1992년 2월: 동아대학교 전기공학 (공학사)
 2021년 4월 - 현재: 우리항공기술(주) 기업부설연구소
 ※관심분야: 이동통신, 항행안전시설, 고주파 회로해석



김 민 정 (Min-Jung Kim)

2008년 2월: 성신여자대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2019년 2월: 숙명여자대학교 전자계산교육학 (교육학석사)
 2019년 5월 - 현재: 우리항공기술(주) 기업부설연구소
 ※관심분야: 위성통신, 항행항법, 소프트웨어 설계