

UAV 공중 네트워크를 위한 손실 없는 Polyphase I/Q 네트워크 및 능동 벡터 변조기 기반 빔-포밍 수신기

정 원 재*, 홍 남 표*, 장 중 은**, 채 형 일***, 박 준 석^o

Polyphase I/Q Network and Active Vector Modulator Based Beam-Forming Receiver For UAV Based Airborne Network

Won-jae Jung*, Nam-pyo Hong*, Jong-eun Jang**, Hyung-il Chae***, Jun-seok Park^o

요 약

본 논문은 무인기(UAV) 기반 공중 네트워크 시스템을 위한 polyphase In-phase/Quadrature-phase(I/Q) 네트워크 기반 빔-포밍 수신부를 제안한다. 제안하는 polyphase I/Q 네트워크는 낮은 Q-factor와 높은 임피던스를 갖기 때문에 작은 손실로 벡터 변조기를 구동할 수 있다. 벡터 변조기는 가변 이득 증폭기(VGA)로 구성되며, In-phase 및 Quadrature-phase 위상 신호의 진폭 제어 및 벡터 합을 통해 위상을 가변한다. 제안하는 빔-포밍 수신부는 TSMC 0.18 μ m CMOS 공정을 통해 구현하였다. 프로토타입은 5-6GHz 주파수 대역(-40dB 입력)에서 검증하였다. 6bit 벡터 변조기 제어를 통해 5.6° LSB (least significant bit)로 360° 위상 가변이 가능하다. 위상 오차는 평균 1.6°이며, 진폭 오차는 평균 0.3dB이다.

Key Words : Airborne network, UAV, beam-forming, phase shifter, vector modulator

ABSTRACT

This paper presents a beam-forming receiver with polyphase In-phase/Quadrature-phase (I/Q) network for airborne communication. In beam-forming receiver, the insertion loss (IL) difference between input path increases the receiver noise figure (NF). The major element for generating IL difference is the impedance variation of phase shifter. In order to maintain a constant IL in every phase, this paper propose a lossless polyphase I/Q network based beam-forming receiver. The proposed lossless polyphase I/Q network has low Q-factor and high impedance for drive back-end VGA (Variable gain amplifier) block with low insertion loss. The 2-stage VGA controls in-phase and quadrature-phase amplitude level for vector summation. The proposed beam-forming receiver prototype is fabricated in TSMC 0.18 μ m CMOS process. The prototype cover the 360° with 5.6° LSB. The average RMS phase error and amplitude error is approximately 1.6° and 0.3dB.

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2016-H8601-16-1010)

** 본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(R7117-16-0165, 스마트카 및 디바이스를 위한 Hall Effect 센서 반도체 개발)

• First Author: Kookmin University Department of Secured Smart Electric Vehicle, jungwon627@gmail.com, 학생회원

^o Corresponding Author: Kookmin University Department of Electrical Engineering, jspark@kookmin.ac.kr, 정회원

* Kookmin University Department of Secured Smart Electric Vehicle, nampyo@kookmin.ac.kr

** Epic Solution Co., Ltd., jjang@epicsolution.co.kr

*** Kookmin University Department of Electrical Engineering, hichae@kookmin.ac.kr

논문번호: KICS2016-08-216, Received August 30, 2016; Revised October 19, 2016; Accepted October 24, 2016

I. 서론

무인기(UAV) 또는 항공기를 활용하여 공중중계 통신체계 구축을 통해 전송정보통신체계의 효율성 극대화를 위한 연구가 활발히 진행되었다^[1]. 특히, 공중 유닛(헬기, 무인기 등)의 확장성 및 대용량 정보 전송의 한계 극복을 위해 그림 1 (a)와 같이 망 기반 없이 모든 공중 유닛이 개별 노드로 동작하여 상호 정보 공유가 가능하고, 지상 유닛과 연계가 가능한 Ad-hoc 네트워크 기술에 대한 연구가 진행되었다^[2,3]. 하지만, 산과 같이 가시선(LOS: Line of Sight) 차단 요소가 많은 지리적 특성으로 통신 단절 문제가 발생한다. 가시선 차단 문제 극복을 위해 공중 유닛에 빔-포밍 기술을 적용하는 연구가 활발히 진행되었다^[4,5]. 빔-포밍은 그림 1 (b)와 같이 0 ~ 360° 빔 방향 조향이 가능한 위상배열안테나 및 위상가변 시스템을 통해 빠르게 움직이는 이동체를 효과적으로 추적할 수 있다. 일반적으로, 빔-포밍 시스템은 그림 2와 같이 수신부와 송신부로 구분된다^[6]. 수신부(그림 2 (a))는 In-phase/Quadrature-phase (I/Q) 네트워크, 저잡음 증

폭기(LNA), 결합기(Combiner) 및 이상기(Phase Shifter)로 구성되며, 송신부(그림 2 (b))는 전력 증폭기(PA) 및 이상기로 구성된다. 수신부 이상기는 N개의 RF 입력 신호 믹싱(Mixing)을 통해 위상을 가변한다. 이때, 빔-포밍 수신부의 입력 선로 간 삽입손실 차이는 잡음지수(Noise Figure)를 증가시킨다^[7]. 수신부 입력 선로 간 삽입손실의 차이는 이상기의 가변 커패시터의 차이로 발생한다. 이상기 삽입손실 차이를 줄이기 위해 능동 이상기를 적용한 빔-포밍 수신부에 대한 연구가 진행되었다^[8]. 하지만 시스템의 복잡하고 수동 결합기 사용으로 빔-포밍 수신기 크기의 증가를 피할 수 없다.

본 논문은 빔-포밍 시스템의 위상오차 및 진폭오차 감소를 위해 손실 없는 Polyphase I/Q 네트워크 및 능동형 벡터 변조기(Vector Modulator)를 사용한 빔-포밍 수신부를 제안한다. 그림 3은 제안하는 빔-포밍 시스템의 수신부 블록도이다. 일반적인 R-C Polyphase 필터의 차동형 I/Q 네트워크를 적용을 통해 기존 빔-포밍 수신기의 RF 믹싱회로를 제거할 수 있다. 또한, Polyphase I/Q 네트워크의 Q-Factor 제어를 통해 위

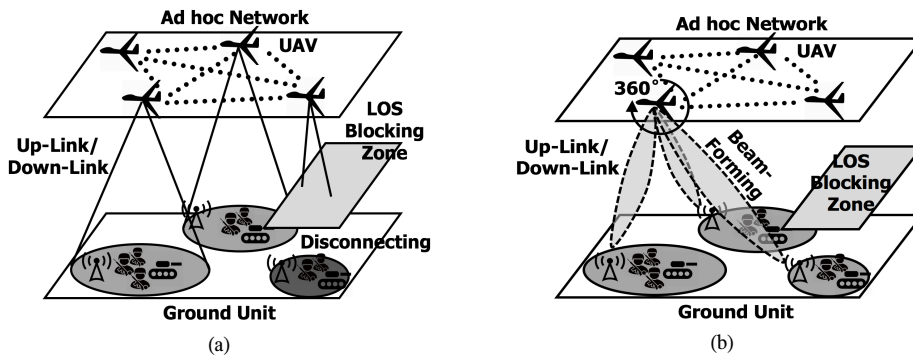


그림 1. UAV 기반 공중 네트워크 (a) Ad-hoc, (b) 빔-포밍 기반 Ad-hoc 네트워킹
Fig. 1. Airborne network using UAV (a) Ad-hoc networking, and (b) beam-forming based Ad-hoc networking

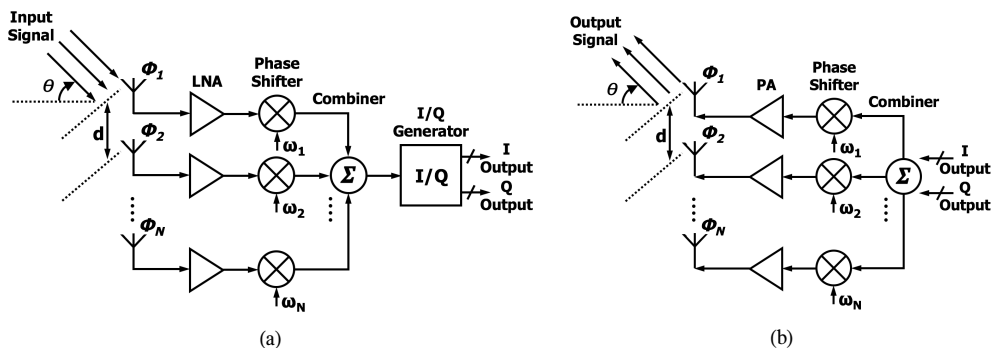


그림 2. 위상 이동 기반의 빔-포밍 시스템 블록도 (a) 수신부, (b) 송신부
Fig. 2. Block diagram of the beam-forming system (a) receiver, and (b) transmitter

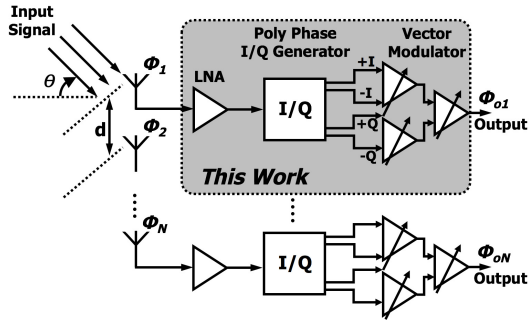


그림 3. 제안하는 손실 없는 I/Q 네트워크 및 벡터 변조기를 적용한 빔-포밍 수신부 블록도
 Fig. 3. Proposed beam-forming receiver block diagram with lossless I/Q network and vector modulator

상 및 진폭 오차를 저감하였다. 2단으로 구성된 가변 증폭기의 1단에서 In-phase 또는 Quadrature-phase 신호의 크기를 가변하며, 2단 가변 증폭기에서 두 신호의 벡터합을 통해 5.6° LSB(least significant bit)로 360° 위상을 가변할 수 있다. 본 연구는 5 - 6GHz 주파수(입력 전력 -40dBm) 대역에서 프로토타입을 검증하였다. 본 논문이 제안하는 프로토타입은 TSMC 0.18μm CMOS 공정을 통해 구현하였으며, SPI(Serial Peripheral Interface) 블록을 포함하는 수신부 크기는 1873μm × 1340μm이다. 제안하는 I/Q 네트워크 및 벡터 변조기를 적용한 빔-포밍 수신부 평균 진폭 및

위상 오차는 0.3dB, 1.6°이다. 본 논문에서는 2장에서 이상기의 진폭오차가 빔-포밍 시스템에 미치는 영향을 설명하고, 3장에서 손실 없는 Polyphase I/Q 네트워크 및 벡터 변조기에 대하여 설명한다. 마지막으로 4장 및 5장에서 측정 결과를 통한 결론을 맺는다.

II. 이상기 진폭 오차가 빔-포밍에 미치는 영향

그림 4는 일반적으로 사용되는 수동형 아날로그 이상기이다. 바이어스 전압에 따른 가변 커패시터를 통해 입력 선로 간 위상을 가변한다. 하지만, 각 위상별 이상기 커패시턴스 차이로 입력 선로는 서로 다른 임피던스를 갖기 때문에 입력 선로 간 삽입손실의 차이가 발생한다. 그림 4의 이상기^[9-12] 삽입손실 오차는 표 1에 나타내었다.

그림 2 (a)의 ωi는 ωi=A_ie^{jψ_i}로 나타낼수 있다. 이때, A_i는 진폭을 나타내며, ψ_i는 위상을 나타낸다. 각 위상 지연 이후 결합기를 통과한 출력은 식 (1)과 같이 표현된다. 이때, ψ_m=φ_m이며 m은 1과 N사이의 값을 갖는다.

$$S(\psi_1, \dots, \psi_N) = \sum_{m=1}^N \omega_m e^{-j\phi_m} = \sum_{m=1}^N (A_m e^{j\psi_m}) e^{-j\phi_m} \quad (1)$$

$$\Delta\phi_m = \phi_m - \phi_1 = 2\pi(m-1) \frac{d \sin(\theta)}{\lambda} \quad (2)$$

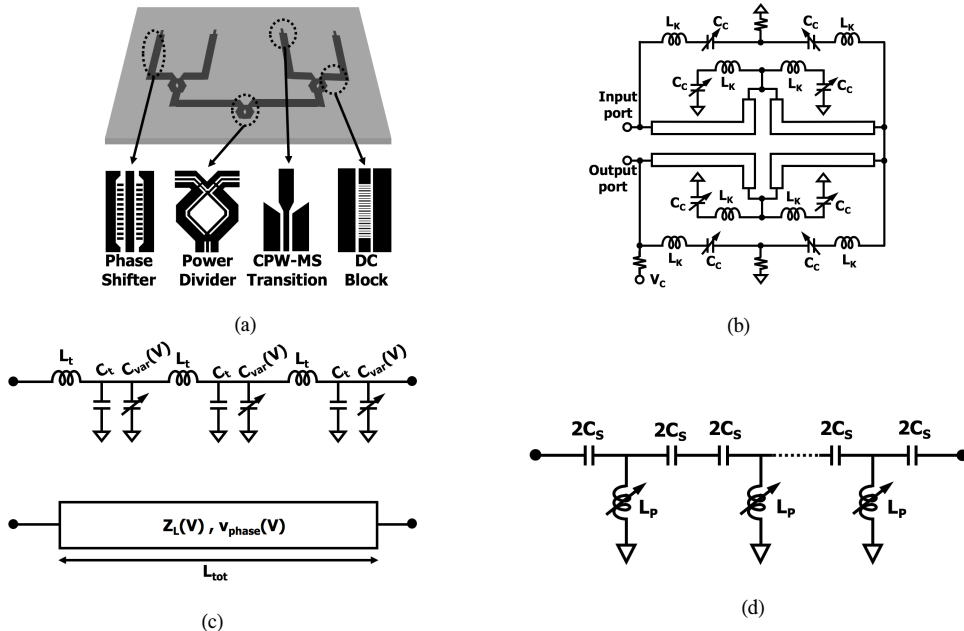


그림 4. 가변 커패시터 기반 이상기
 Fig. 4. Conventional phase shifters with varactor capacitor

표 1. 일반적인 이장기의 삽입손실 오차
Table 1. The insertion loss error of the conventional phase shifter

Type	Insertion Loss(IL) [dB]	IL Difference (Max. - Min.) [dB]	Frequency [GHz]
Fig. 4(a)[9]	0.4 to 2.6	2.2	12-14
Fig. 4(b)[10]	2.5 to 4.7	2.2	12-14
Fig. 4(c)[11]	1.7 to 4.2	2.5	20
Fig. 4(d)[12]	0.3 to 1.1	0.8	12-14

$$\omega_i = A(v_1)e^{j\psi(v_i)} \Rightarrow \omega_i = A(\psi_i)e^{j\psi_i}$$

$$S = \sum_{m=1}^N A(\phi_1 + \Delta\phi_m) \tag{3}$$

첫 번째 입력 선로와 m 번째 입력 선로의 위상차는 식 (2)와 같이 입력 주파수 파장(λ) 및 입력각(θ)에 의존한다. 앞서 언급한 바와 같이, 가변 커패시터의 커패시턴스는 바이어스 전압에 따라 변하기 때문에 각 위상별 삽입손실의 차이가 발생한다. 따라서 진폭 및 위상을 바이어스 전압에 대한 식으로 변환하면, 식 (3)과 같이 표현된다. 식 (3)을 통해 삽입손실의 차이가 결합기 출력에 영향을 미침을 알 수 있다.

III. 손실없는 Polyphase I/Q 네트워크 및 벡터 변조기 기반 빔-포밍 수신부

그림 3은 제안하는 빔-포밍 수신부를 나타낸다. 입력 RF 신호는 저잡음 증폭기를 통과하며 증폭되며, polyphase I/Q 네트워크를 통해 차동 I/Q 위상 신호를 생성한다. 가변 이득 증폭기 기반 벡터 변조기는 I/Q 위상 신호의 진폭을 제어하며, 벡터 합을 통해 원하는 위상 신호를 생성한다. 본 장에서는 손실 없는 polyphase I/Q 네트워크 및 벡터 변조기에 대하여 설명한다.

3.1 작은 진폭 오차를 갖는 I/Q 네트워크 설계

그림 5 (a)는 일반적인 RC-CR 기반 수동형 Quadrature 네트워크이다. 그림 5 (b)와 같이 그림 5 (a)의 I, Q 단에 다중 R-C polyphase 필터 적용을 통해 동작 주파수 범위를 향상시킬 수 있다. 하지만 넓은 주파수 범위를 위한 R-C polyphase 필터를 적용하는 것은 I/Q 네트워크의 손실을 증가시킨다[13-15]. 그림 5 (c)와 같이 L-C 공진 기법을 통해 식 (4)과 같이 전압 손실 없이 Quadrature 위상 신호를 생성할 수 있다.

$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R} = 1 \Leftrightarrow R = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ and } \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} V_{I\pm} \\ V_{Q\pm} \end{bmatrix} = V_{in} \times \begin{bmatrix} s^2 + \frac{2\omega_o}{Q}s - \omega_o^2 \\ \pm \frac{2\omega_o}{Q}s + \omega_o^2 \\ s^2 - \frac{2\omega_o}{Q}s - \omega_o^2 \\ \mp \frac{2\omega_o}{Q}s + \omega_o^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

우선, I/Q 진폭이 모든 ω에서 동일하다고 가정한다. 그림 5 (c)의 polyphase I/Q 네트워크의 전달함수는 식 (5)와 같이 표현되며, 0.8 ≤ Q ≤ 1의 Q-factor에서 2 - 3dB 전압 이득을 갖는다. 하지만, polyphase

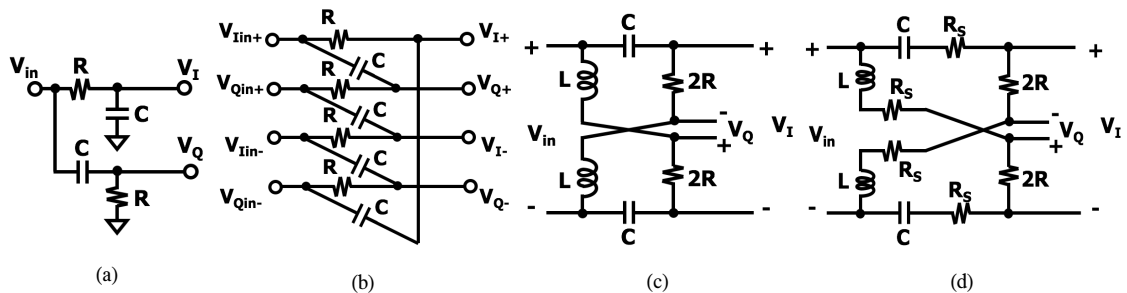


그림 5. 기본적인 I/Q 네트워크 (a) RC-CR 90° 위상 네트워크, (b) 다중 R-C polyphase I/Q 네트워크, (c) LC 공진 기반 손실 없는 I/Q 네트워크, (d) 제안하는 polyphase I/Q 네트워크
Fig. 5. The basic I/Q networks (a) RC-CR quadrature network, (b) multi R-C polyphase network, (c) LC resonance based lossless I/Q polyphase network, and (d) proposed polyphase I/Q network

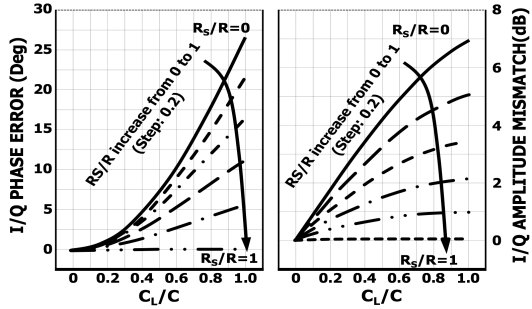


그림 6. 제안하는 I/Q 네트워크의 위상 및 진폭 오차
Fig. 6. I/Q phase error and amplitude mismatch of proposed polyphase I/Q network

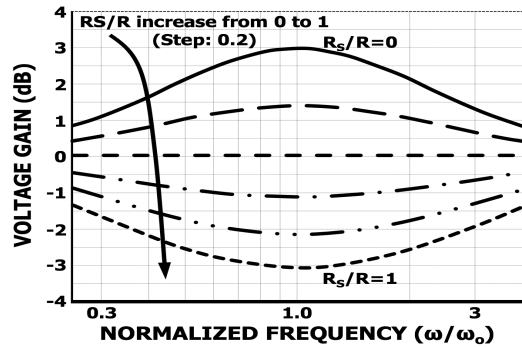


그림 7. 정규화 주파수에 따른 polyphase I/Q 네트워크의 전압 이득
Fig. 7. Voltage gain versus normalized frequency of polyphase I/Q network

I/Q 네트워크의 기생 커패시턴스(C_L)는 In-phase와

Quadrature-phase의 위상 오차를 증가시키는 요인이 된다. 위상오차의 감소를 위해 C_L/C 를 줄이는 것(C 증가)은 I/Q 네트워크의 임피던스를 낮추기 때문에 다음 단 부하의 구동을 어렵게 한다. 따라서 본 연구는 그림 5 (d)와 같이 직렬저항 성분인 R_S 를 추가하여 작은 Q-factor 구현을 통해 부하 커패시터에 대한 민감도를 낮추었다. 그림 5 (d)의 전달함수는 식 (6)과 같이 표현되며, 식 (6)의 $(1+R_S/R)$ 에 의해 Q-factor를 감소시킬 수 있어, 다음 단 부하 구동의 능력을 잃지 않고 부하 커패시터에 대한 민감도를 낮출 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{I\pm} \\ V_{Q\pm} \end{bmatrix} = V_{in} \times \begin{bmatrix} s^2 + \frac{2\omega_0}{Q}s - \omega_0^2 \\ \pm \frac{2\omega_0}{Q} \left(1 + \frac{R_S}{R}\right)s + \omega_0^2 \\ s^2 - \frac{2\omega_0}{Q}s - \omega_0^2 \\ \mp \frac{2\omega_0}{Q} \left(1 + \frac{R_S}{R}\right)s + \omega_0^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 6 및 그림 7은 제안하는 직렬 저항성분을 포함하는 polyphase I/Q 네트워크의 I/Q 위상 오차와 전압 이득의 시뮬레이션 결과이다. $R_S/R = 0$ 일 때 I/Q 위상 오차가 가장 크며 $R_S/R = 1$ 에 가까워질수록 위상 오차가 감소한다. 반면에 전압 이득은 반대 경향을 보이므로, 0보다 큰 전압 이득을 갖는 R_S/R 에서 허용 가능한 위상오차를 갖는 R_S 및 R 을 적용하였다.

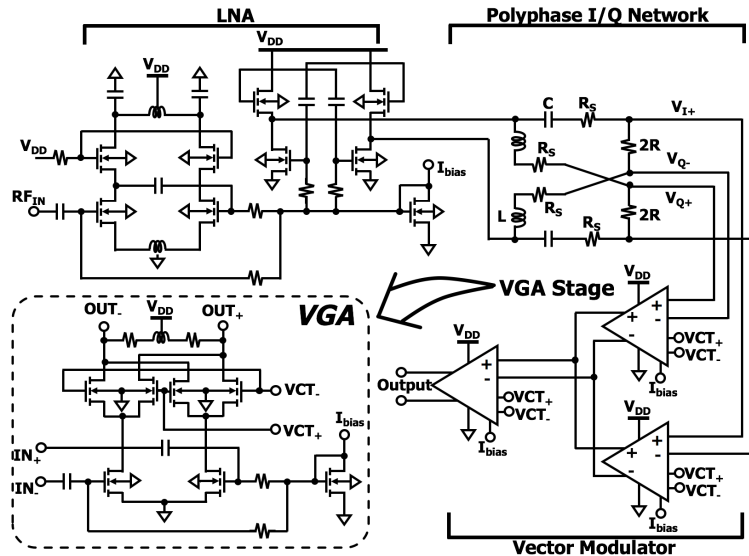


그림 8. Polyphase I/Q 네트워크 및 벡터 변조기를 포함하는 빔-포밍 수신기의 회로도
Fig. 8. Schematic of the proposed beam-forming receiver with polyphase I/Q network and vector modulator

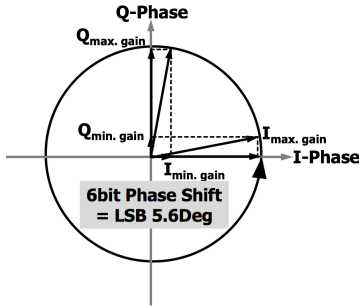


그림 9. 가변이득증폭기 벡터합을 통한 벡터 변조기 개념
Fig. 9. The concept of VGA based vector modulator

3.2 작은 위상 오차를 갖는 벡터 변조기 설계

그림 8은 제안하는 빔-포밍 시스템의 수신단의 회로도이다. 제안하는 벡터 변조기를 포함하는 빔-포밍 수신단은 TSMC 0.18 μ m 공정을 통해 설계 하였다. 입력된 RF 신호는 차동 출력을 갖는 저잡음 증폭기를 통해 증폭된다. 이때 저잡음 증폭기 차동 출력단은 버

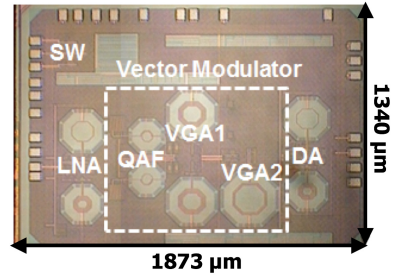


그림 10. 빔-포밍 수신기 IC의 칩 사진
Fig. 10. Die photograph of the beam-forming receiver prototype

퍼 역할을 할 수 있도록 푸시-풀(push-pull) 구조로 설계하였다. 증폭된 RF 신호는 R_s 를 갖는 polyphase I/Q 네트워크를 통과하며 차동 Quadrature 위상 신호를 생성하며, I/Q 위상 신호의 출력은 2단 가변 이득 증폭기로 입력된다. 가변 이득 증폭기는 I/Q 위상 신호의 증폭도를 제어하며, 그림 9와 같이 벡터 합을 통

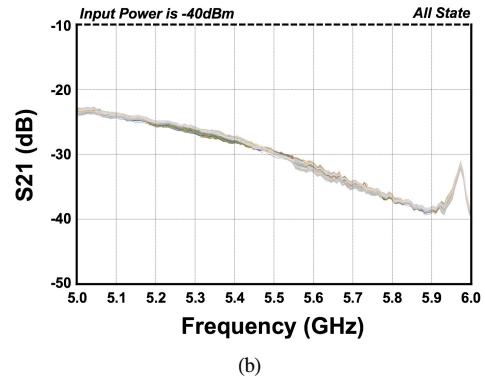
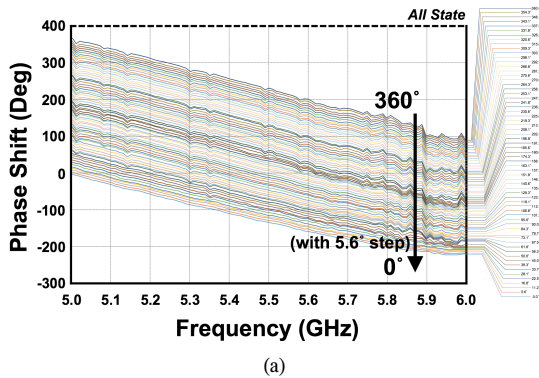


그림 11. 제안하는 빔-포밍 수신기의 측정결과 (a) 5.6° 간격 위상 변화, (b) 삽입손실
Fig. 11. Proposed beam-forming receiver measurement result (a) Phase shift with 5.6degree step, and (b) insertion loss (5 - 6GHz)

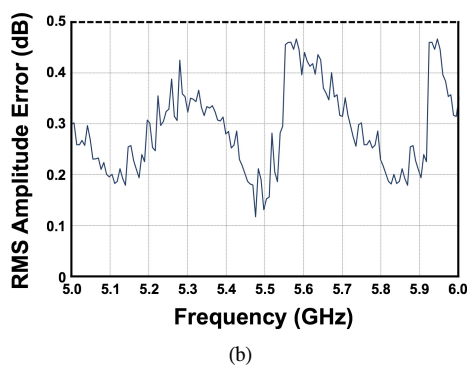
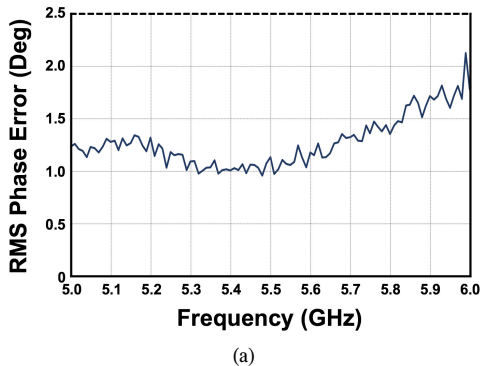


그림 12. 빔-포밍 수신부 측정결과 (a) 위상오차 (평균 1.6°), (b) 진폭 오차 (평균 0.3dB)
Fig. 12. The result of the beam-forming receiver (a) RMS phase error (Avg. 1.6°), and (b) RMS amplitude error (Avg. 0.3dB)

해 0 - 360° 위상을 변화 시킬 수 있다. 이때, 위상은 6bit으로 제어되어 LSB는 5.6° 이다.

IV. 빔-포밍 수신부 구현 및 검증

본 논문에서 제안하는 손실 없는 polyphase I/Q 네트워크 및 벡터 변조기를 포함하는 빔-포밍 수신부는 CMOS 0.18 μ m 공정(TSMC)을 통해 구현하였으며, SPI 제어부를 포함한 전체 Chip 크기는 1873 μ m × 1340 μ m 이다. 손실 없는 polyphase I/Q 네트워크 및 6bit벡터 변조기를 통해 5 - 6GHz 주파수 대역에서 0 - 360° 위상을 5.6° 간격으로 가변할 수 있다(그림 11 (a)). 이때, 그림 11 (b)와 같이 가변 위상별 삽입 손실을 일정하게 유지할 수 있다. 제안하는 빔-포밍 수신부의 RMS 위상 오차의 평균값은 1.6° 이고, RMS 진폭 오차의 평균값은 0.3dB이다(그림 12).

V. 결 론

본 논문은 UAV 공중 네트워크를 위한 빔-포밍 수신기의 손실 없는 polyphase I/Q 네트워크 및 벡터 변조기를 설계하고 검증하였다. 본 연구를 통해 구현한 빔-포밍 수신기의 위상 오차는 5 ~ 6GHz 범위에서 2.2°를 넘지 않으며, 진폭 오차는 0.5dB 이하이다 (그림 12 (a)). 그림 11 (b)와 같이 하나의 주파수에서 각 위상에 따른 삽입손실은 일정하지만, 모든 주파수 대역에서 동일한 삽입손실을 얻기 위한 추가 연구가 필요하다. 향후 UAV의 공중 네트워크를 위한 주파수 대역의 할당 후, 해당 주파수 대역에서의 재측정이 필요하지만, 본 연구의 결과를 토대로 주파수 대역 이동 후에도 비슷한 수준의 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

References

[1] H. Y. Seok and Y. H. Sang, "A study for development of airborne relay communication system to military tactical communication networks," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 1544-1545, 2010.

[2] S. Kim and J. Lee, "A study on the routing algorithm in the large scale ad hoc airborne network," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 120-121, 2012.

[3] S.-H. Kim, B.-H. Jung, and D.-K. Sung, "Adaptive beamforming antenna scheme to

minimize the Interface in a unmanned aerial vehicle (UAV) MANET," *2009 IEEE 20th Int. Symp. Pers., Indoor Mob. Radio Commun.*, pp. 813-817, Sept. 2009.

[4] H.-S. Yeom, J.-H. Oh, and D.-Y. Sung, "Development of an airborne telemetry relay system using aircraft," *J. Korean Soc. for Aeronautical and Space Sci.*, vol. 40, no. 1, pp. 93-100, 2012.

[5] F. Jiang and A. L. Swindlehurst, "Optimization of UAV heading for the ground-to-air uplink," *J. Delected Areas in Commun.*, vol. 30, no. 5, pp. 993-1005, Jun. 2012.

[6] A. Safarian, L. Zhou, and P. Heydari, "CMOS distributed active power combiners and splitters for multi-antenna UWB beamforming transceivers," *IEEE J. Solid-State Cir.*, vol 42, no. 7, pp. 1481-1491, Jun. 2007.

[7] M. Fakhrazadeh, P. Mousavi, S. Safavi-Naeini, and S. H. Jamali, "The effects of imbalanced phase shifters loss on phased array gain," *IEEE Ant. Wirel. Propaga. Lett.*, vol. 7, pp. 192-196, Mar. 2008.

[8] A. Natarajan, S. K. Reynolds, M. D. Tsai, S. T. Nicolson, J. H. C. Zhan, D. G. Kam, D. Liu, Y. L. O. Huang, A. Valdes-Garcia, and B. A. Floyd, "A fully-integrated 16-element phased-array receiver in SiGe BiCMOS for 60-GHz communications," *IEEE J. Solid-State Cir.*, vol. 46, no. 5, pp. 1059-1075, Apr. 2011.

[9] T. Ji, H. Yoon, J. K. Abraham, and V. K. Varada, "Ku-band antenna array feed distribution network with ferroelectric phase shifters on silicon," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, pp. 1131-1138, Mar. 2006.

[10] H. Hayashi, T. Nakagawa, and K. Araki, "A miniaturized MMIC analog phase shifter using two quarter-wave-length transmission lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, pp. 150-154, Jan. 2002.

[11] A. S. Nagra and R. A. York, "Distributed analog phase shifters with low insertion loss," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, pp. 1705-1711, 1999.

- [12] L. H. Lu and Y. T. Liao, "A 4-GHz phase shifter MMIC in 0.18- μm CMOS," *IEEE Microw. Compon. Lett.*, vol. 15, pp. 694-696, Oct. 2005.
- [13] M. A. F. Borremans, C. R. C. De Ranter, and M. S. J. Steyaert, "A CMOS dual-channel, 100-MHz to 1.1-GHz transmitter for cable applications," *IEEE J. Solid-State Cir.*, vol. 34, no. 12, pp. 1904-1913, Dec. 1999.
- [14] F. Behbahani, Y. Kishigami, J. Leete, and A. A. Abidi, "CMOS mixers and polyphase filters for large image rejection," *IEEE J. Solid-State Cir.*, vol. 36, no. 6, pp. 873-887, Jun. 2001.
- [15] K.-J. Koh, M.-Y. Park, C.-S. Kim, and H.-K. Yu, "Subharmonically pumped CMOS WCDMA direct-conversion transceiver," *IEEE J. Solid-State Cir.*, vol. 39, no. 6, pp. 871-884, Jun. 2004.

정 원 재 (Won-jae Jung)



2010년 9월 : 국민대학교 전자공학부 졸업
 2012년 9월 : 국민대학교 전자공학부 석사
 2012년 9월~현재 : 국민대학교 보안-스마트 전기자동차학과 박사과정

<관심분야> Wireless power harvesting, Analog IC, RFIC, Sensors

홍 남 표 (Nam-pyo Hong)



2007년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 졸업
 2009년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 석사
 2015년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사
 2015년 3월~현재 : 국민대학교 보안-스마트 전기자동차 학과 연구교수

<관심분야> CMOS IC Design, Signal detection for optical bio sensor

장 종 은 (Jong-eun Jang)



1996년 : UCLA 전자공학과 졸업
 1999년 : UCLA 전자공학과 석사
 2005년~2009년 : (주)유컴테크 놀리지 연구소장
 2009년~현재 : (주)에픽솔루션 대표
 <관심분야> Analog IC, RFIC, Sensor, 중계기

채 형 일 (Hyung-il Chae)



2004년 : 서울대학교 전기공학과 졸업
 2009년 : Univ. of Michigan 전기공학 석사
 2013년 : Univ. of Michigan 전기공학 박사
 2013년~2015년 : Qualcomm Senior Engineer

2015년~현재 : 국민대학교 조교수

<관심분야> Analog IC, RFIC

박 준 석 (Jun-seok Park)



1991년 : 국민대학교 전자 공학부 졸업
 1993년 : 국민대학교 전자 공학부 석사
 1996년 : 국민대학교 전자공학부 박사
 1998년~2003년 순천향대학교 전기기술공학부 조교수

2003년~현재 : 국민대학교 교수

<관심분야> IT 융합기술, Mobile RFIC, 무선전력 전송