

무인 항공기의 통신 시스템에 사용되는 C-대역 주파수 상향 변환기 설계

Design of C-Band Frequency Up-Converter in Communication System for Unmanned Aerial Vehicle

이덕형 · 오현석 · 정해창 · 염경환

Duck-Hyung Lee · Hyun-Seok Oh · Hae-Chang Jeong · Kyung-Whan Yeom

요 약

본 논문에서는 무인 항공기의 무선 통신 시스템에 소요되는 주파수 상향 변환기의 설계, 제작 및 평가에 대하여 기술하였다. 무인 항공기내 통신 시스템의 사양은 관제 장비와 무인 항공기간의 최대 통신 거리뿐만 아니라, 배치 및 정비 보수의 용이성을 위해서 특이성이 요구된다. 본 논문에서는 이와 같이 결정된 특이성을 고려하여 C-대역 주파수 5.25~5.45 GHz에 동작하는 주파수 상향 변환기를 설계 구현하였다. 이때 주파수 상향 변환기는 통신 시스템의 최적의 동작을 위하여 일정 출력을 필요로 하는데, 이를 위해 자동 이득 제어 회로를 추가하였다. 제작된 변환기는 -15~-10 dBm 입력에 대해 일정 출력 +2±0.5 dBm을 출력을 보였다. 또한 전 대역에서의 스퓨리어스가 -60 dBc 이하이며 인접 채널에 대한 누설 출력이 -40 dBc 이하의 결과를 보여주고 있다. 뿐만 아니라 다수의 무인 항공기 적용 및 주파수 허가 대역의 이동을 고려하여, 주파수 상향 변환기 내의 국부 발진기 신호를 1 MHz 간격을 갖는 synthesizer로 구현하였으며, 제작된 synthesizer는 offset 주파수 100 kHz에서 -100 dBc/Hz의 위상잡음 특성을 가진다.

Abstract

In this paper, we present design, fabrication, and measured results for a frequency upconverter for a wireless communication system of UAV(Unmanned Aerial Vehicle). The specifications of such wireless communication system requires the special features of maximum range of communication as well as deployment in UAV and repairing. The frequency upconverter operating at 5.25~5.45 GHz in C-band was designed and fabricated considering such special features. The AGC function was included because the required output power should be constant for optimal system operation. The fabricated upconverter showed a constant output power of +2±0.5 dBm for the -15~-10 dBm input. Spuriouses were below -60 dBc and the adjacent leakage power was below -40 dBc. In addition, LO sources in the upconverter was implemented using the frequency synthesizer with step 1 MHz. This is for the application to the situation where multiple UAVs employed and the possible change of the permitted frequency band. The synthesizer showed a phase noise of -100 dBc/Hz at the 100 kHz frequency offset.

Key words : Unmanned Aerial Vehicle, Upconverter, AGC

I. 서 론

무인 항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)는 정

찰, 감시, 전투 등의 군사 임무 수행 및 불법 행위 감시, 야생동물 보호, 기상 관측, 통신 중계, 농약 살포 등 다양한 용도로 사용되는 조종사가 직접 답습하여

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20090513-048

· 수정완료일자 : 2009년 9월 1일

조작하지 않는 항공기를 통칭한다^[1]. 이를 통해 위험 지역에서의 인명을 보호하고 필요한 정보를 얻게 되는 장점이 있다. 이의 유용성은 2차 걸프전에서 활약한 미국의 무인 항공기인 프레데터, 글로벌호크에 의해 이미 입증된 바 있으며, 이로 인해 항공 분야에서 전 세계적으로 주목받고 있다.

이러한 무인 항공기는 주로 Ku-대역, C-대역, UHF-대역 주파수를 통신에 이용하고 있다^[2]. Ku-대역은 위성과 연결되어 무인기의 위치 정보 전송에 사용되며, C-대역은 무인 항공기가 비행 중에 실시간으로 획득한 영상과 무인 항공기의 상태 데이터 전송과 제어 신호 전달을 위한 주 통신 링크로 사용된다. 또한 UHF-대역은 주 통신 링크가 두절되었을 때, 비상 통신망으로서, 무인 항공기의 상태와 제어 신호 전달을 위한 보조 통신 링크로 사용된다. 본 논문은 이러한 여러 통신 시스템중 주 통신 링크를 담당하는 C-대역 주파수 상향 변환기 설계, 제작에 관한 내용이다.

이러한 통신 시스템을 무인 항공기에 적용하기 위해 통상적으로 사용되는 일체형 구성 방법을 이용했을 때 무게가 한쪽으로 쏠리는 문제를 발생시키기 때문에 무인 항공기 자세 제어의 어려움과 통신 장비 이외의 기기를 배치함에 있어서 문제가 따른다. 반면, 그림 1과 같이 분리된 모듈로 구현 시 장비의 무게를 분산과 장비 배치 시 자세 제어의 문제를 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 통신 시스템의 문제가 발생 시 불량 모듈만의 수리 및 교환으로 문제를 해결할 수 있는 유지 보수의 용이성을 갖는다. 그림 1에서 IF 신호처리부에서는 디지털 신호를 IF 대역으로 상향시키며, 주파수 상향 변환기는 IF 신호의 주파수를 상향 변환하며 동시에 고출력 증폭기에 필요한 일정 전력을 공급한다. Duplexer는 주파수 분할 방식의 시스템에서 별도의 송·수신 주파수를 사용되는 두 신호를 격리하며, 수신부는 안테나로 수신

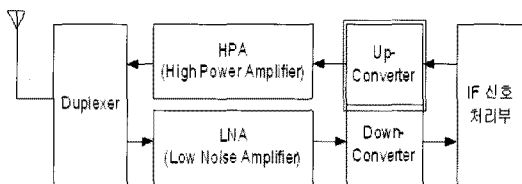


그림 1. 무선 통신 시스템 블록도(IF signal processor)
Fig. 1. Communication system block diagram(IF signal processor).

된 신호를 증폭시키기 위한 저잡음 증폭기와 주파수를 하향 변환시키는 주파수 하향 변화기로 구성된다. 수신부로 이루어진다.

통신 시스템의 최대 통신 거리는 송신측의 송신 출력과 수신측의 수신 감도에 의해 결정되며, 송신 출력은 고출력 증폭기의 출력으로 결정된다. 고출력 증폭기는 성능에 따라 개발 비용을 증가시키기 때문에 효율적인 운용을 위해서 고출력 증폭기의 출력 특성을 최대한 사용할 필요가 있다. 이러한 고출력 증폭기의 출력 특성을 최적화하는 방법으로 증폭기에서 요구되는 입력 신호를 일정하게 하는 것이 필요하다. 따라서 주파수 상향 변환기는 이를 위하여 일정 출력을 공급하여야 하기 때문에 자동 이득의 기능이 필요하게 된다. 또한 무인 항공기를 다수로 운용하기 위해서는 각 항공기마다 개별적인 채널이 요구되기 때문에 다수의 채널을 제공하기 위한 주파수 합성기를 설계하였다. 이를 위해서는 채널 간격을 갖는 주파수 합성기가 필요하지만, 현재 이 주파수 대역은 완전한 허가가 된 것이 아니기 때문에 이의 변동을 고려하여 채널 간격이 아닌 1 MHz 간격으로 설계될 필요가 있다. 또한, 개별적인 채널을 갖는 각각의 무인 항공기는 인접한 채널을 사용하는 무인 항공기에 대한 간섭 발생을 배제하기 위해 인접 채널 신호의 크기를 줄이고 전 대역에서의 불요파를 억압해야 한다.

본 논문은 앞서 설명된 무인 항공기에서 요구되는 경량화, 인접 채널 간섭 억압, 불요파 억압, 그리고 자동 이득 제어를 통해 고출력 증폭기에서 요구되는 최적의 입력 신호를 제공하기 위한 목표를 만족하기 위해 제작되었다. 우선 주파수 상향 변환기에 필요한 목표 사양을 도출하였고, 이를 블록도로 설계하였다. 또한 자동 이득 제어 회로를 추가함으로써 고출력 증폭기에서 요구되는 일정한 입력 신호를 제공하였다. 요구되는 인접 채널 간섭 억압과 불요파 억압 성능은 대역 통과 여파기를 이용하여 만족시키도록 하였다. 이때 구현 방법은 소형 경량화를 위하여 모듈의 상하부를 연결하는 방법을 이용하였다. 제작된 주파수 상향 변환기는 시험 평가 결과 요구된 성능을 만족하는 $-15 \sim -10$ dBm 입력에 대해 일정 출력 $+2 \pm 0.5$ dBm을 출력을 보였다. 또한 전 대역에서의 스퓨리어스가 60 dBc 이하이며, 인접 채널에 대한 누설 출력이 -40 dBc 이하의 결과를 보여주고 있다.

II. 주파수 상향 변환기 설계

2-1 설계사양 도출

무인 항공기에 사용되는 주파수는 미국에서 실제 운용중인 중고도 무인기 “Predator/ RQ-1 B”의 가지 거리(LOS: Line of sight) 통신 주파수^[3]인 5.25~5.85 GHz를 참고하여 선정하였다. 상향 링크와 하향 링크로 구분하기 위해 제작된 상향 변환기의 중심 주파수는 5,350 MHz, RF 대역폭은 200 MHz가 된다. 채널 대역폭은 영상 전송을 위해 10 Mbps의 전송 속도가 요구되고, OQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)로 변조 방식, 디지털 여파기의 roll-off factor를 0.4로 정하면 전송 대역폭은 7 MHz가 되는데, Guard Band 1 MHz를 추가하여 8 MHz로 정했다.

따라서 국부 발진기로 사용되는 주파수 합성기의 간격은 8 MHz 간격으로 설정하면 되는데, 본 논문에서는 1 MHz로 선택 가능하도록 하였다. 8 MHz의 대역폭을 갖는 IF 신호를 상향 변환하기 위한 주파수 합성기의 채널을 1 MHz 간격으로 이동할 수 있도록 한 것은 C-대역 내에서 이미 점유하고 있는 다른 방식의 통신 시스템이 존재하고 있기 때문에, 본 무인 항공기 실험을 위한 주파수 할당이 어려워 보다 유연한 주파수 선택을 도모하기 위해 결정되었다. 즉, 차후 공식적인 허가 주파수 대역의 변동을 고려하여, 실제 채널 대역폭보다 작은 1 MHz로 선정하였다. 따라서 본 주파수 합성기는 C-대역 내에서 허가된 주파수의 가변성에 대해 적극적인 대응이 가능하도록 하였다.

무인 항공기는 정찰 범위에 따라 근접, 저고도, 중고도, 고고도 무인기로 분류가 된다. 정찰범위는 최대 통신거리와 동일하며 이러한 성능은 일반적으로 안테나, 수신 감도, 고출력 증폭기의 성능을 통해 결정된다. 최대 통신거리가 100 km이면, 중심 주파수 5,350 MHz를 기준으로 자유 공간 손실은 147 dB가 된다^[4]. 또한 수신 감도가 -90 dBm인 수신기를 사용하면 16 dBi 안테나와 41 dBm 이상의 고출력 증폭기가 필요하게 된다. 본 시스템에서는 이득이 40 dB인 고출력 증폭기를 사용하기 때문에 주파수 상향 변환기는 2±0.5 dBm의 일정 출력 신호가 요구되며, 이때 인접 채널에 대한 누설 출력은 -40 dBc 이하

표 1. Up-converter 설계 목표

Table 1. Goal for specifications of up-converter.

| 항 목 | 규 격 | 단 위 | 비 고 |
|--------------|-------------|-----|--------------------|
| IF 대역 입력 주파수 | 1,900 | MHz | -10~-15 dBm |
| 출력 주파수 | 5,250~5,450 | MHz | |
| 대역폭 | 8 | MHz | OQPSK 변조 |
| 출력 파워 | 2±0.5 | dBm | |
| 인접 채널 간섭 | ≥40 | dBc | @ $f_0 \pm 10$ MHz |
| 스푸리어스 | ≥60 | dBc | |

로 채널간 간섭을 피하도록 할 필요가 있다. 또한 타 통신 시스템의 영향을 최소화하기 위해 전 대역에서 스푸리어스를 -60 dBc 이하로 설계 목표를 결정하였다. 표 1에는 이것을 정리하여 보였다.

2-2 주파수 상향 변환기 블록 설계

그림 2는 이러한 주파수 상향변환부의 블록다이 어그램을 보인다. 주파수 변환 방식은 단일 변환(single conversion) 방식을 이용하여 블록을 구성했다. 변조되어 입력된 IF 신호는 자동이득제어기(AGC: Auto Gain Controller)를 통하여 일정한 출력의 신호로 증폭되고, 이 신호는 구동증폭기를 통해 혼합기의 IF입력 신호로 전달된다. 이때 자동 이득 제어기는 로그 검출기(log detector)와 가변 이득 증폭기로 구성된다.

PLL(Phase Locked Loop)을 이용하여 3.45 GHz의 주파수 합성기를 구성하고 혼합기의 LO(Local Oscillator) 신호로 사용하기 위해서 구동증폭기로 증폭되어 혼합기로 전달된다. 이 LO 신호에 의해 신호는 혼합기를 통해 상향 변환되어 RF 신호로 출력된다. 이때 혼합기로부터 발생한 변환 손실은 C-대역 구동

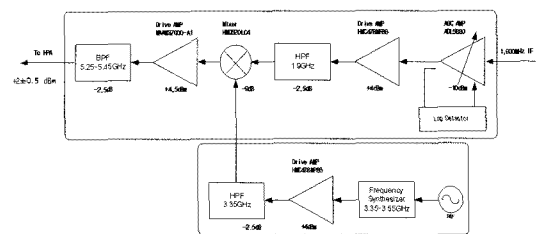


그림 2. Up-converter 블록도

Fig. 2. Block diagram of up-converter.

증폭기를 통해 증폭되며 혼합기에 의해 발생하는 불요파는 최종단에 위치한 대역 통과 여파기를 통해 저지된다. 그림 2에서 삽입된 HPF는 혼합기에서의 신호의 간섭보다는 사용된 증폭기가 저역 주파수에서는 불안정성을 보이기 때문에 이를 억제하기 위하여 삽입된 것이다.

2-2-1 자동 이득 제어 회로 구성

그림 2에서 보는 주파수 상향 변환기의 입력은 중심 주파수 1.9 GHz에서 OQPSK로 변조된 -10 dBm의 신호이며, 이의 전력은 상당한 변화가 있게 된다. 따라서 고출력 증폭기의 출력 특성을 최적화하는 방법으로 증폭기에서 요구되는 입력 신호를 일정하게 하는 것이 필요하다. 또한 자세 제어를 위해 분리되어있는 주파수 상향 변환부로 동축선을 통해 전달되는데, 사용된 동축선들은 제작상 동일한 손실을 보이지 않으며 환경적인 요인에 의해 그 손실이 변할 수 있기 때문에 이것에 대처하는 방법이기도하다. 주파수 상향 변환기로 입력되는 신호의 변화가 -10 ~ -15 dBm일 때도 일정한 크기의 신호가 고출력 증폭기로 전달되도록 하는 목표로 제작이 요구된다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위한 자동 이득 증폭기는 전압을 이용하여 이득 조절이 가능한 증폭기와 증폭기의 출력을 검출하는 log detector로 구성되며, 그림 3과 같은 블록을 갖는다. 본 연구에서는 가변 이득 증폭기는 10 MHz ~ 3 GHz의 주파수 동작범위를 갖고 60 dB의 가변 이득을 제공하는 Analog Devices사의 ADL5330^[5]로 선정하였다. 또한 log detector는 1 MHz ~ 8 GHz에서 신호 검출이 가능한 Analog Devices사의 AD8318^[6]을 선정하였다. 이때 Log Detector와 가변 이득 증폭기는 페루프로 이루어져 있으며, Log Detector는 검출된 신호를 전압으로 변환하

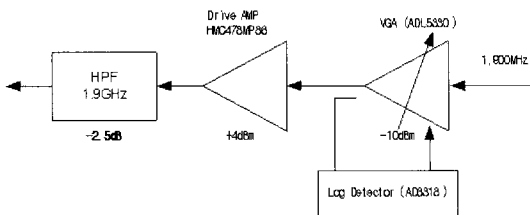


그림 3. 자동 이득 제어기 블록도
Fig. 3. Block diagram of automatic gain controller.

여 가변 이득 증폭기의 비교값으로 입력된다. 가변 이득 증폭기는 미리 설정된 전압과 log detector로부터 입력된 전압과의 차이를 이용하여 이득 조절을 수행하고, 혼합기 전단에 위치하고 있는 구동 증폭기로 일정한 입력을 제공한다.

혼합기의 입력 신호는 최종 출력 크기와 혼합기에서 발생하는 변환 손실로 결정되기 때문에 요구되는 입력을 만족시키기 위한 구동 증폭기로 HMC-478MP-86^[7]을 추가로 사용하였다. 이때 구동 증폭기에 의해 1 GHz 이하에서 불요파의 증폭이 발생되었다. 따라서 이를 없애기 위한 고역 통과 여파기가 필요하며, 이 여파기는 정확한 여파기 특성이 필요하지 않고 낮은 주파수에서 감쇄만이 필요하기 때문에 간단하게 L, C 집중소자를 이용하여 구성하였다. 이때 L, C 소자가 갖고 있는 자기 공진 주파수에 의한 영향을 네트워크 분석기를 이용하여 확인했고, 특성을 최적화하는 방식으로 소자 값들을 선정하였다.

2-2-2 주파수 합성기 구성

PLL 주파수 합성기는 기준 발진기, PLL(Phase Locked Loop), VCO(Voltage Control Oscillator), 위상 검출기, R 분주기, N 분주기 그리고 루프 여파기로 구성된다. 위상 검출기는 기준 발진기의 R 분주 신호와 VCO출력의 N 분주 신호를 위상비교하며 검출된 위상 차이만큼 전류를 발생시킨다. 이 전류는 루프 여파기를 통해 전압으로 바뀌며 위상 검출기의 평균 출력이 0이 되도록 VCO의 출력 주파수를 변경한다. VCO의 출력 신호는 자동 이득 제어기와 마찬가지로 HMC478-MP86 구동 증폭기와 LC 집중 소자를 이용한 고역 통과 여파기를 통과하여 혼합기의 LO 입력단이 요구하는 13 dBm으로 증폭되어진다. 기준 발진기는 온도에 따라 주파수 변동을 최소화하기 위해 20 MHz 온도 보상 발진기^[8]를 선정하였고, PLL

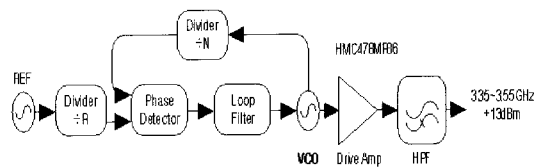


그림 4. 주파수 합성기 블록도
Fig. 4. Block diagram of frequency synthesizer.

은 Analog Device사의 ADF4113^[9]을 선정하였다. 또한 VCO는 3.35~3.55 GHz의 발진주파수를 가지며, 조정 전압은 0~10 V인 Hittite사의 MMIC, HMC-389LP4^[10]를 선정하였다.

본 연구는 운용중인 비행체의 경우 주파수 변환으로 인한 비행체와 지상 통신 장비간 통신 두절을 방지하기 위해 주파수를 변환하지 않는다. 따라서 루프 여파기 설계 시 잠금 시간은 고려하지 않고 최적의 위상 잡음 및 불요파 특성을 갖도록 설계하였다. 디지털 변조된 신호의 인접 채널 간섭은 위상 잡음과 관계가 있기 때문에 위상 잡음은 100 kHz offset에서 -100 dBc/Hz 이하를 요구한다. 따라서 기준 발진기의 위상 잡음과 VCO의 위상 잡음 특성을 이용한 최적의 루프 여파기 대역폭은 120 kHz가 되며^[11], 불요파 특성을 제거하기 위해서는 3단 이상의 루프 여파기가 필요하게 된다. 또한, PLL로부터 출력되는 전압은 VCO로부터 원하는 주파수를 얻기에 낮은 전압이기 때문에 그림 5와 같은 3단 능동형 루프 여파기 방식^[12]을 선택하였다. 선택된 위상 검출기의 K_d 는 5 mA, VCO의 K_v 는 42 MHz/V이며, 위상 여유를 45°로 선택하면 각 루프 여파기의 소자값은 $C_1=2.2$ n, $C_2=47$ n, $C_3=180$ p, $R_2=1.2$ k, $R_3=3.9$ k가 된다. 이와 같이 설계된 주파수 합성기는 중심 주파수 3.45 GHz에서 200 MHz 대역을 1 MHz 간격으로 위상 잠금되며, 원하는 출력 13 dBm과 100 kHz offset에서 -102 dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 만족하였다.

2-2-3 대역 통과 여파기 설계

주파수 상향 변환기에 사용된 혼합기는 불요파 발생을 줄이기 위해 LO-RF 격리도가 43 dB, 이미지 제거 27 dB를 만족하는 DBM(Double Balanced Mixer)인 Hittite사의 MMIC, HMC620LP4^[13]를 선정하였다. 또한 혼합기에서 발생하는 변환 손실을 보상하기 위한 구동 증폭기를 필요로 하며, 이를 위해 3.5~7 GHz 대역에서 15 dB의 이득과 +14 dBm의 P1dB의 출력 전력 특성을 갖는 MA-COM사의 MMIC, MA-AM37000-A1^[14]을 선정하였다.

혼합기는 IF 신호와 LO 신호를 이용하여 주파수 상향변환이 이루어지는 반면, IF 신호와 LO신호에 의한 고차항의 불요파를 동반한다. 이를 실제 측정하여 그림 6과 같은 스펙트럼 특성을 얻었다.

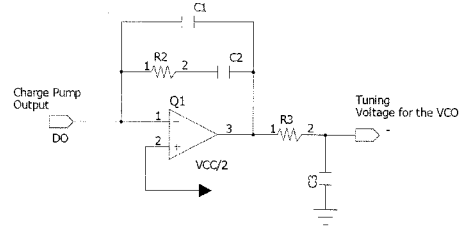


그림 5. 3차 능동형 루프 여파기
Fig. 5. Third order active loop filter.

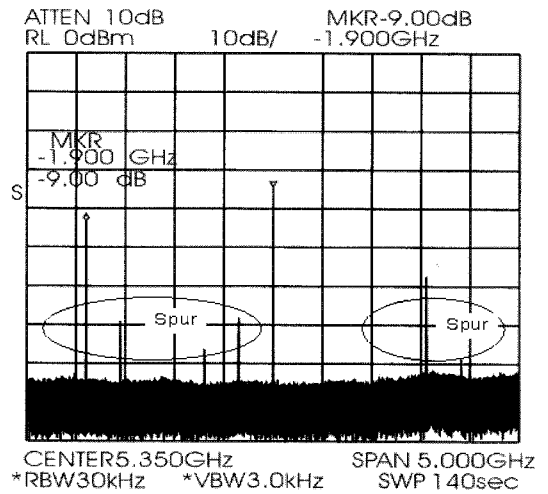


그림 6. 여파기가 없는 혼합기 출력의 불요파 특성 (20 dB 감쇄기 사용)
Fig. 6. Mixer's spurious performance without BPF(included 20 dB attenuator).

그림 6의 결과를 보면 중심 주파수 5.35 GHz에서 가장 근접해 있는 불요파는 5 GHz, 가장 크기가 큰 불요파는 3.45 GHz이다. 본 논문에서 요구되어지는 불요파 억압 특성인 60 dBc를 만족하기 위해 요구되어지는 목표 설계 규격을 표 2에 보였다.

이와 같은 저지 특성을 만족하기 위해서는 여파

표 2. 대역 통과 여파기 설계 규격
Table 2. Goal for BPF.

| 항목 | 규격 | 단위 | 비고 |
|--------|------------|-----|-------------------|
| 중심 주파수 | 5,350 | MHz | $[f_0]$ |
| 대역폭 | 200 | MHz | |
| 삽입 손실 | ≤ 2.5 | dB | |
| 감쇄 특성 | ≥ 20 | dB | @ $f_0 - 350$ MHz |
| | ≥ 50 | dB | @ $f_0 - 1.9$ GHz |

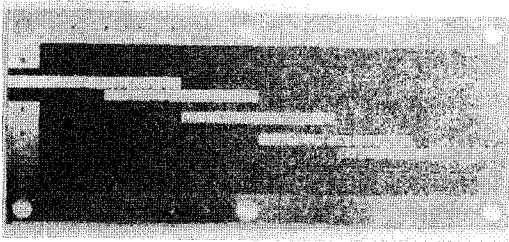


그림 7. 제작된 여파기 사진
Fig. 7. A photo of the fabricated filter.

기의 기본형과 단수를 결정해야 한다. 기본형은 체비셰프형을 선택하였고, 대역폭이 3.75 %이므로 이미 알려진 리플과 여파기 단수에 따른 여파기 특성을 감안할 때 리플은 0.2 dB, 단수는 3단 이상으로 구성하면 그림 6과 같은 불요파를 충분히 제거할 수 있다^[15]. 이와 같이 결정된 저역 통과 기본형을 Cohn의 방법을 이용하여 평행결합 선로여파기^[16]를 설계하였다. 이때 사용된 기판은 마이크로파 대역에서의 손실을 적게 하기 위해 저손실의 기판인 Taconic사의 유전율이 2.2, 두께 20 mil인 TLY-5-0200-CH^[17]를 선정하였다.

이 평행 결합 선로 여파기의 특성은 Agilent사의 ADS를 이용한 회로 시뮬레이션으로 확인하였다. 그러나 회로적으로 구현된 여파기는 실제 구현시 불연속 선로에서 생기는 기생성분 등으로 인한 왜곡 특성이 발생한다. 이를 해결하기 위해서 이미 발표된 EM 조정 방법^[18]을 이용하여 원하는 여파기 특성으로 최적화하여 여파기를 그림 7과 같이 제작하였다.

제작된 여파기 특성은 그림 8에 나타내었다. 점선은 EM 조정된 여파기를 ADS 모멘텀 시뮬레이션 결과이며, 실선은 회로망 분석기(network analyzer)로 측정된 결과로 중심 주파수 5.35 GHz, 대역폭 200 MHz 및 삽입손실 1.80 dB으로 설계한 여파기 특성을 만족하는 것으로 확인할 수 있었다. 또한, 중심 주파수로부터 350 MHz에서 20 dB 이상, 1.9 GHz에서는 60 dB 이상으로 충분한 감쇄 특성을 얻었다. 그러나 중심 주파수로부터 약 1 GHz 떨어진 대역에서의 감쇄 특성이 EM 시뮬레이션과 상이한 결과를 보여주고 있으나, 감쇄 특성이 약 50 dB 이하로 전체적인 특성에 영향을 주지 않을 것으로 측정되었다.

제작된 여파기를 포함하여 혼합기의 특성을 측정 한 결과는 그림 9와 같으며, 그림 6에서 확인되었던

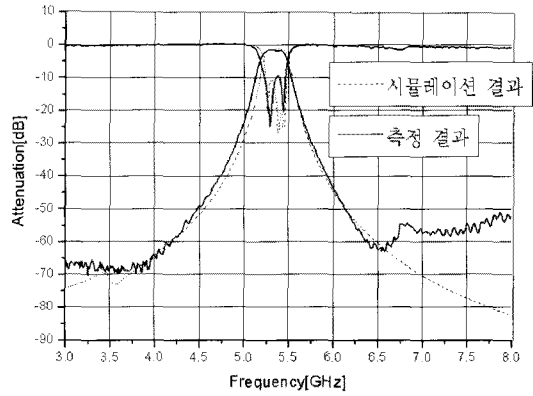


그림 8. 대역 여파기의 모멘텀 시뮬레이션과 측정 결과 비교
Fig. 8. The comparison of the momentum and measured results for BPF.

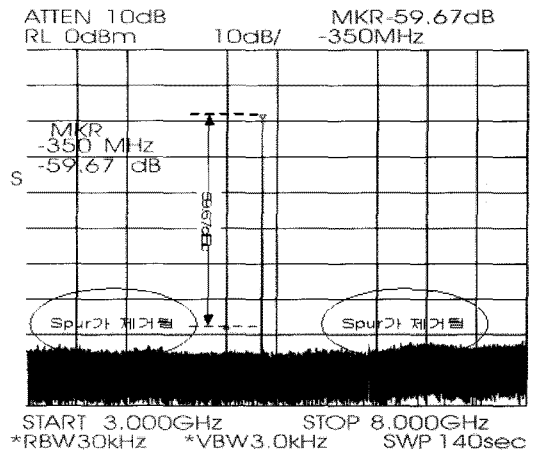


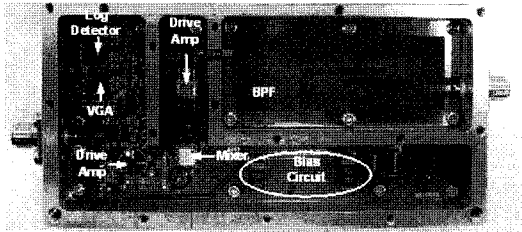
그림 9. 여파기가 추가된 혼합기 출력의 불요파 특성 (20 dB 감쇄기 사용)
Fig. 9. Mixer's spurious performance with BPF(including 20 dB attenuator).

모든 불요파들이 약 60 dBc 이하로 억압되어졌음을 알 수 있다.

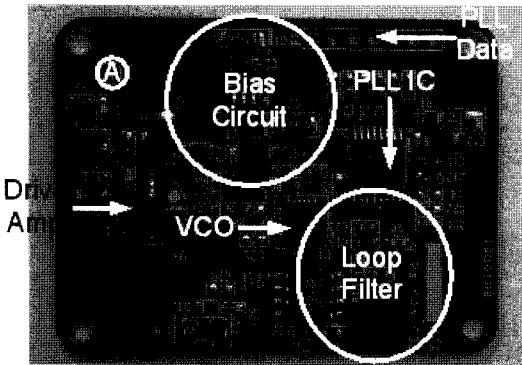
III. 주파수 상향 변환기 제작 및 측정 결과

3-1 주파수 상향 변환기 구성 및 제작

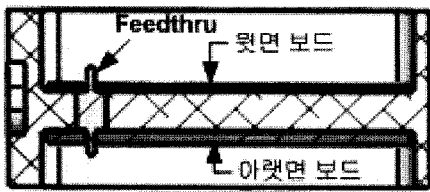
무인 항공기는 비행체로서 무게에 제약이 있다. 이륙 한계 중량이 있고, 장비와 연료 무게에 의해 운용시간이 결정된다. 장비가 무거워지면 시간당 소모되는 연료량이 많아지기 때문에 운용 시간은 줄어들게 된다. 이와 같이 무인 항공기는 적정한 계중량이 있



(a) 윗면(100 mm×44 mm)
(a) Top view(100 mm×44 mm)



(b) 아랫면(43 mm×32 mm)
(b) Bottom view(43 mm×32 mm)



(c) 단면도
(c) Sectional view

그림 10. 제작된 주파수 상향 변환기 모듈 사진
Fig. 10. Photos of the fabricated frequency up-converter of the housing.

어 장비의 무게가 무거운 경우 연료량이 작아져 운용시간이 줄어들게 된다. 따라서 운용 시간을 증가시키기 위해서는 장비의 무게가 줄어들어야 하며, 이를 달성하기 위해서는 개별 부품을 평면적으로 구성하는 것보다 상부와 하부로 나누어 입체적으로 구성하는 것이 바람직하다. 또한 이와 같은 구성은 신호 상호간 간섭을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 입체적 구성을 위해 아랫면과 윗면의 ①점과 모듈의 동일 지점에 그림 10(c)와 같은 구조로 동축형 50 ohm feedthrough^[19]를 이용하여 두 기판을 연결^[20]하였다. 그림 10(a)에 나타난 모듈의 윗

면에 주파수 합성기를 제외한 부분인 자동 이득 제어기와 혼합기, 구동증폭기를 배치한 보드이다. 윗면의 기판의 구조는 모듈 내부적으로 IF와 RF간의 간섭을 줄이기 위해 구동증폭기의 주위를 격벽을 구성하고 이에 적합한 형태인 F자형으로 구성되며 FR4 기판을 이용하여 제작하였다. 아랫면에 위치되는 그림 10(b)는 설계된 주파수 합성기로 13 dBm의 출력 신호를 가지며 일반적인 하우징 내부의 차폐 특성보다 커질 수 있다. 이럴 경우 주파수 합성기에 의한 타 회로에 대한 간섭이 발생할 수 있기 때문에 이를 배제하기 위해 동일평면상에 다수의 격벽과 흡수체가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 요구사항을 피하기 위해 주파수 합성기를 아랫면에 배치하였다.

이와 같은 구성에 사용되어진 FR4 기판은 높은 주파수에서 유전율의 변동과 큰 손실을 갖는 단점을 가지고 있어 잘 사용하지 않는다. 그러나 FR4 기판은 수급이 용이하고 저가로 개발 비용 절감의 효과를 주며, 기판 적층이 용이하여 다층으로 제작이 가능하여 장비의 크기를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 그리고 FR4 기판의 유전율 변동 및 손실로 인한 효과를 최소화하기 위하여 RF적인 연결이 되는 곳은 경로를 최소화하도록 배치하였다. 반면 여파기는 정확한 특성이 요구되어지므로 Duroid 계열의 단층 기판을 사용하였다. 이러한 구성을 갖는 주파수 상향 변환기 모듈은 이러한 입체적 구성을 통해 소형화를 달성할 수 있어 무인 항공기 탑재에 적합할 것으로 사료된다.

3-2 측정 결과

제작된 주파수 상향 변환기는 신호 발생기를 이용하여 신호 변조 후, 파워미터 그리고 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다. 본 논문에서 설계한 주파수 상향 변환기의 인접 채널에 대한 누설 출력 특성 인접 채널 간섭을 확인하기 위하여, Agilent사의 E4438C 신호발생기를 사용하여 입력 신호를 인가하였고, 입력 신호는 1.9 GHz의 중심 주파수에서 8 MHz의 대역을 갖는 OQPSK 변조 신호로 설정하였다. 출력은 스펙트럼 분석기로 계측하였으며, 이 결과를 그림 11에 보았다. 그림 11에 보인 바와 같이 중심 주파수로부터 10 MHz offset에서 -40 dBc 이하

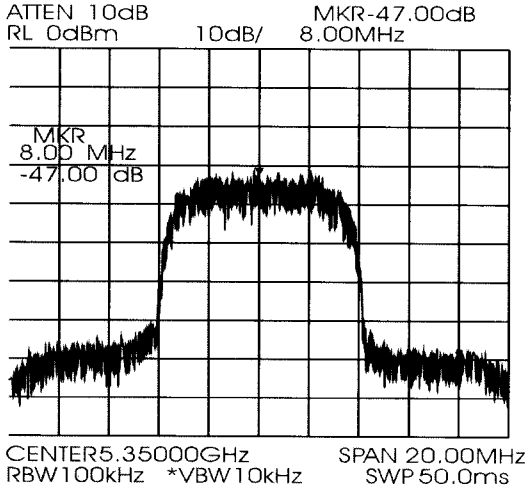
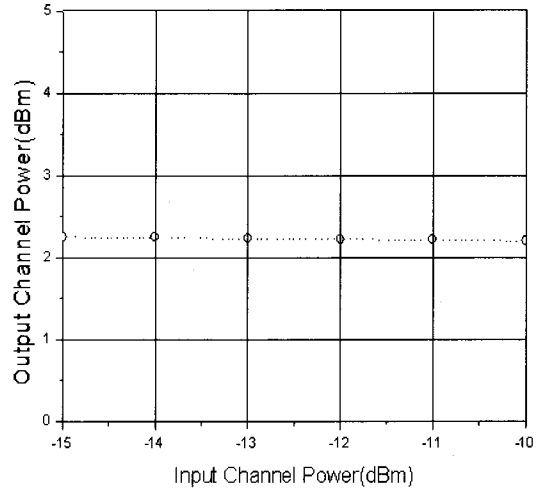


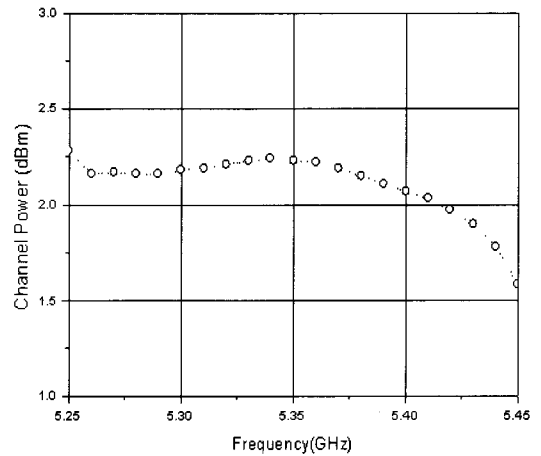
그림 11. 중심 주파수 5.35 GHz에서 8 MHz 대역을 갖는 OQPSK 신호의 인접 채널 간섭
 Fig. 11. Adjacent channel interference with 8 MHz OQPSK signal at center frequency. 5.35 GHz.

를 만족하는 것을 확인하였다. 이 때 주파수 상향 변환기의 국부 발진기로 사용되는 주파수 합성기의 출력 주파수는 3.45 GHz이다.

자동 이득 제어 회로의 성능을 확인하기 위해 인접 채널 간섭 측정시와 같이 입력 신호를 설정하고, 이때 입력 신호의 채널 파워를 -15 ~ -10 dBm까지 조절하면서, 주파수 상향 변환기에서 출력되는 크기를 측정하였다. 이 때 출력을 측정하기 위하여 채널 대역 내의 평균 전력을 측정할 수 있는 파워미터인 E4418B와 파워센서 E9300을 사용하여 측정하였다. 그 결과를 그림 12(a)에 보였으며, 입력 신호의 채널 파워의 변화에 대해 출력은 일정한 것을 알 수 있다. 그림 12(a)에서 입력 채널 전력 크기를 -15 ~ -10 dBm의 변화에 대해서, 출력은 2 dBm의 일정한 출력을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 12(b)는 주파수 상향 변환기는 중심 주파수가 5.35 GHz이고, 200 MHz 대역에서 변경 가능하기 때문에 주파수 합성기의 출력 주파수를 200 MHz 대역 내에서 10 MHz 단위로 변경하면서 주파수 별로 채널 파워를 측정하여 보였다. 그 결과 요구되어지는 200 MHz 내 각 측정 주파수에서 2 dBm을 기준으로 ± 0.5 dB의 평탄한 출력 전력 특성을 보였다. 이와 같이 측정된 결과를 보면 표 4에서 정리해 보였다. 표 3과 같이 제작된 주파수 상향 변환기는 본 논문에서 요구되어지는 설계



(a) 자동 이득 제어 특성
 (a) Performance of AGC



(b) 출력 평탄 특성
 (b) Flatness of output power

그림 12. 주파수 상향 변환기 특성
 Fig. 12. Performance of frequency up converter.

표 3. 목표와 결과 값 비교

Table 3. The comparison with goal and results.

| 항 목 | 목 표 | 결 과 | 단 위 | 비 고 |
|----------|---------|---------|-----|-------------------------|
| 출력 | 2.0±0.5 | 2.0±0.5 | dBm | 5.25~5.45 GHz |
| 불요파 억압 | ≤ -60 | -59.67 | dBc | |
| 인접 채널 간섭 | ≤40 | ≤47.5 | dBc | @f ₀ ±10 MHz |

목표를 만족하는 것을 알 수 있다.

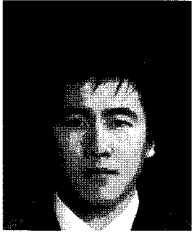
IV. 결 론

본 논문에서는 무인 항공기의 통신 시스템에 사용되는 C-대역 주파수 상향 변환기 설계 및 제작 과정을 보였다. 특히 자동 이득 제어 회로를 추가하여 출력의 안정화를 가져왔고, 각 보드를 따로 설계함으로써 내부에 사용된 칩을 변경하여 다른 주파수 대역에서 동일한 구조를 갖는 주파수 변환기 개발에도 사용이 용이할 것으로 보인다. 제작된 주파수 변환기의 측정 결과 인접 채널 간섭과 불요파 억압 특성 그리고 균일한 출력 전력의 만족스러운 결과를 얻었다. 이러한 C-대역 주파수 상향 변환기는 차후 전체 통신 시스템과의 연동 시험을 통해 성능 향상을 위한 연구가 따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 권강민, "수송 분야 발전을 위한 UAV 운용", 육군 광장, 9/10월호, pp. 86-89, 2004년 9/10월.
- [2] V. Vigliotti, "Demonstration of submarine control of an unmanned aerial vehicle" *Johns Hopkins APL Technical Dig.*, vol. 19, no. 4, 1998.
- [3] UAV CENTER, *Information & Operational Consultation*, Available: <http://www.uavcenter.com/english/wwuavs/northamerica/eMR.asp>
- [4] S. R. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 93-100, 1999.
- [5] ADL5330, *Voltage-controlled Variable Gain Amplifier*, Analog Devices, Available: <http://www.analog.com>
- [6] AD8318, *Logarithmic Detector*, Analog Devices, Available: <http://www.analog.com>
- [7] HMC478MP86, *MMIC Amplifier*, Hittite Microwave Corporation, Available: <http://www.hittite.com>
- [8] STD25GM20.000 MHz, *Temperature Compensated Oscillator*, Sunny Electronics Corporation, Available: <http://www.sunny.co.kr>
- [9] ADF4113, *RF PLL Frequency Synthesizers*, Analog Devices, Available: <http://www.analog.com>
- [10] HMC389LP4, *MMIC VCO*, Hittite Microwave Corporation, Available: <http://www.hittite.com>
- [11] 염경환, 능동초고주파회로 설계 입문, 홍릉과학출판사, 2008년.
- [12] D. Banerjee, *PLL Performance, Simulation and Design*, 2nd Edition, pp. 105-113, 2001.
- [13] HMC620LP4, *MMIC Mixer*, Hittite Microwave Corporation, Available: <http://www.hittite.com>
- [14] MAAM37000-A1, *MMIC Amplifier*, M/A COM RF and Microwave Components, Available: <http://www.macom.com>
- [15] G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, pp. 83-113, 1980.
- [16] J. -S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filter for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 127-129, 2001.
- [17] TLY-50200-CH, *Teflon PCB*, Available: <http://www.taconic.com>
- [18] 양승식, 염경환, "개별공진기의 EM 시뮬레이션에 기초한 새로운 직접결합여파기의 설계방법", 한국전자과학회논문지, 20(4) pp. 333-343, 2009년 4월.
- [19] Thunderline CapFeeds, *Thunderlinez*, Available: <http://www.thunderlinez.com>
- [20] 김현미, 양승식, 이만희, 염경환, "소형화된 Ka-대역 주파수 합성기 모듈 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 18(5), pp. 511-520, 2007년 5월.

이 덕 형



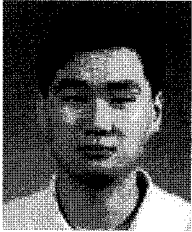
2005년 2월: 충남대학교 정보제어공학
학과 (공학사)
2008년 3월~현재: 충남대학교 전파
공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 능동회로
및 시스템 설계

정 해 창



2008년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학사)
2008년 3월~현재: 충남대학교 전파
공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 능동회로
및 시스템 설계

오 현 석



2005년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학사)
2007년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 충남대학교 전
파공학과 박사과정
[주 관심분야] 마이크로파 회로 설
계

염 경 환



1976년~1980년: 서울대학교 전자
공학과 (공학사)
1980년~1982년: 한국과학기술원 전
기 및 전자과 (공학석사)
1982년~1988년: 한국과학기술원 전
기 및 전자과 (공학박사)
1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품
연구소 선임연구원 (MIC팀 팀장)
1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원
1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원
1991년 8월: (주)LTI
1999년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계