技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.5.461>

과학기술위성 3호 X-대역 송신기 비행모델 설계, 제작 및 시험

서규재*, 이정수, 오치욱, 오승한, 채장수

Design, Implementation and Test of Flight Model
of X-Band Transmitter for STSAT-3

Gyu-jae Seo*, Jung-Soo Lee, Chi-Wook Oh, Seung-Han Oh and Jang-Soo Chae

ABSTRACT

This paper describes the development and test result of X-band Transmitter flight model(FM) of STSAT-3 by satellite research center(SaTReC), KAIST. The communication sub-system of STSAT-3 is consist of two different frequency band channels. S-band frequency is used for Telemetry & Command, and X-band frequency is used for mission data. Payload observations data in Mass Memory Unit (MMU) is modulated by QPSK modulator in X-band Transmitter, and then QPSK modulation signal is transmitted to antenna through transfer switch. In this Paper, we described the results of modulation, low-pass filter design, power amp development, and switch test. The FM XTU is delivered Spacecraft Assembly, Integration and Test(AIT) level through the completion of functional Test and environmental(vibration, thermal vacuum) Test successfully.

초 록

본 논문에서는 현재 KAIST 인공위성 연구센터(SaTReC)에서 개발 진행 중인 과학기술위성 3호(STSAT-3) 위성체의 탑재체 데이터 전송을 위한 X대역 송신기 비행모델 개발 및 시험에 관하여 기술한다. 과학기술위성 3호의 통신시스템은 크게 상태정보, 명령 송수신을 위한 통신채널과 임무데이터 전송을 위한 통신채널로 구성되며 상태 정보 및 명령 송수신을 위하여 S대역을 사용하며 임무데이터 전송용으로 X대역 주파수를 사용하고 있다. 과학기술위성 3호에서는 대용량 메모리 유닛(MMU; Mass Memory Unit)에 저장된 탑재체 관측정보가 X대역 송신기의 QPSK 변조기에서 변조를 하고, 변조된 신호는 스위치를 거친 이후에 안테나를 통해 송신된다. 본 논문에서는 과학기술위성 3호 X대역 송신기 내부의 변조 방식, 저역통과 여파기, power amp, 스위치 등에 대해서 제작된 특성을 기술한다. X-band 송신기의 비행모델은 성능시험, 환경시험(진동시험, 열진공시험)을 성공적으로 마치고 위성체 조립 단계(Assembly Integration and Test, AIT)에 납품되었다.

Key Words : X-Band Transmitter, QPSK

I. 서 론

† 2011년 12월 7일 접수~2012년 4월 17일 심사완료

* 정희원, KAIST 인공위성 연구센터

교신저자, E-mail : gjseo@satrec.kaist.ac.kr

대전광역시 유성구 구성동 373-1

인공위성의 통신계는 일반적으로 지상국으로부터 위성의 제어에 필요한 명령정보(command)

를 수신하고, 위성의 텔레메트리(telemetry) 정보를 지상국으로 송신하는 TT&C 통신 서브시스템과, 탑재체에서 수집한 정보를 지상국으로 송신하는 탑재체 데이터 송신기로 구성된다. 과학기술위성 3호에서는 TT&C 송수신기로 S대역을 사용하며, 탑재체 데이터 송신기로 X대역을 사용한다[1].

해외위성에 탑재되는 X대역 송신기의 사례를 보면, 데이터를 보낼 수 있는 광대역 전송이 가능하고 QPSK 변조뿐만 아니라, OQPSK와 8PSK를 지원한다. 이는 위성의 전력소모 및 주파수 자원의 효율적인 사용을 위함이다. 현재 X대역은 주파수 자원 고갈로 인하여, 광대역의 전송량을 필요로 하는 위성은 X대역에서 K나 Ka대역으로 옮겨가는 추세이다. 다시 말해 X대역도 대역폭이 넓은 경우에는 주파수 사용에 제한을 받을 수도 있다[2]. 현재 국내에서 개발된 위성용 X대역 송신기의 개발과정 및 결과를 자세히 기술한 논문이 없으며, 이에 본 논문을 기술한다.

II. XTU 비행모델 설계 및 제작

2.1 XTU의 구성

XTU(X-band Transmission Unit)는 XTX(X-band Transmitter) primary(주)/ redundant(부)와 하나의 transfer 스위치로 구성이 되며, 각각의 출력이 하나의 스위치의 입력으로 들어가게 되고, 스위치의 선택에 따라 하나의 XTX 출력이 안테나로 송신되게 된다. 대용량 메모리 유닛(이하 MMU)과의 데이터 송수신을 위한 연결은 opto-coupler를 사용하며, 주/부의 복층 구조로 인하여, MMU 주/부에 각각 연결이 되어 있다. MMU의 주/부를 선택하기 위한 MUX가 존재하며, 들어온 신호의 대역폭 축소를 위한 여파기가 존재한다. 이 여파기는 일반적인 주파수 차단역할을 하는 여파기와 다르게 대역폭 축소를 위함이다. QPSK 변조와 주파수 변환은 과학기술위성 2호와는 다르게 두 번의 주파수 변환을 거친다. OCOXO를 몇 체배한 신호에 QPSK변조를 걸고 위상고정형 유전체발진기(PLDRO; Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator)에서 나온 신호와 다시 주파수 변환을 거쳐 X대역으로 주파수 상향이 이루어진다. 이 신호는 power amp를 거쳐 증폭이 되고, 스위치를 거쳐 X대역 안테나로 전송이 된다. Transfer 스위치는 안정성과 삽입손실 특성이 좋은 제품을 사용한다. Fig. 1은 XTU의 기본 구성도이다.

Fig. 1. XTU 기능 블록도

2.2 XTU 요구사항

XTU는 과학기술위성 3호의 설계 요구사항에 맞게 설계되었다. 전송 주파수는 KAIST 인공위성센터에서 국제전기통신연합(ITU)에 등록된 주파수인 8GHz 대의 X대역을 주파수를 사용하였고 RF 전송 전력은 임무 수행을 위한 지구저궤도 기준으로 링크 버짓을 계산하여 산출된 1[W]로 설계되었다. 변조 방식은 QPSK 방식을 사용하며, 전송 데이터 에러율(bit error rate)은 $\leq 1 \times 10^{-6}$ 을 만족해야 한다.

Table 1. XTU 요구사항

전기적 요구사항	
XTX Frequency	8127 [MHz]
Data rate	16 [Mbps]
Output Power	≥ 30 [dBm]
Bit Error Rate	$\leq 1 \times 10^{-6}$
Supply Voltage	28 [V]
Supply Current	1.5 [A]
Power Consumption	≤ 42 [W]
Transfer 스위치 요구사항	
Supply Voltage	12 [V]
Supply Current	0.4 [A]
Power Consumption	≤ 4.8 [W]
Insertion Loss	≤ 1 [dB]
환경적 요구사항	
동작온도	-10 [°C] to +45 [°C]
Vibration	14.1 [grms]
Radiation Hardening	10 [krad]
기계적 요구사항	
Size	$\leq 295 \times 215 \times 105$ [mm]
Mass	≤ 5.4 [Kg]

XTU는 로켓 발사 환경에서의 진동과 지구 저궤도 환경에서의 극심한 온도차이 등을 고려하여 이러한 가혹한 환경 조건을 견딜 수 있게 환경적 요구 사항도 만족하도록 부품 선정을 하여야 한다. Table 1에 XTU 비행 모델의 전기적 요구사항, 환경적 요구사항, 그리고 기계적 요구사항을 정리하였다.

2.3 XTU 설계 및 제작

2.3.1 저역통과 여파기 설계 및 제작

XTU 에 내부에는 여러 개의 여파기가 들어간다. 대부분 불필요한 주파수의 차단을 목적으로 하는 대역통과 여파기며, 저역통과 여파기가 한 종류 들어가게 된다. 저역통과 여파기의 목적은 MMU에서 opto-coupler를 통해 들어온 신호가 넓은 주파수 대역폭을 가지는 구형파(square wave)이므로, 신호의 판별에는 영향을 주지 않으면서, 대역폭의 제한을 하기 위함이다. 이때 사용되는 여파기는 다른 대역통과 여파기와는 다르게 고려해야 할 사항이 있다. 우선시 되어야 할 것이 군지연(group delay) 문제이다. 일반적인 여파기 설계 방식이 주로 butterworth 또는 tchebyscheff 방식을 사용하나, XTU에서는 군지연이 일정한 방식의 여파기를 사용해야만 한다. 또한 op-amp를 이용한 active 방식의 여파기는 소자의 주파수 특성으로 인하여 여파기의 차단특성이나, 군지연 특성에 영향을 미칠 수가 있다. 과학기술위성 3호에서는 인덕터, 커패시터를 이용한 bessel 방식의 5단 여파기를 설계 및 제작하였다. 인덕터, 커패시터를 이용할 경우에는 소자값의 오차로 인하여, 여파기의 특성이 달라지는 문제가 있을 수 있다. 특히 인덕터의 경우가 더 심한 차이를 나타내므로, 여러 번의 제작을 통하여 튜닝 포인트를 찾아야 하며, XTX 주에 두 개의 저역통과 여파기가 들어가므로 두 개의 특성이 동일해야만 한다. Fig. 2에 저역통과 여파기의 I 및 Q 채널의 군지연 특성을 나타내었다. Fig. 3에는 여파기 입력전과 입력 후의 신호의 변화를 나타내었다. 차단주파수가 너무 낮을 경우, 파형의 모양은 정현파의 기울기처럼 깎이게 될 것이며, 주파수 스펙트럼 상에서는 통과 대역이 줄어드는 모양이 될 것이나 신호의 판별에 있어 영향을 주게 되므로 대역폭을 줄이려는 과도한 차단주파수의 결정은 성능에 좋지 않은 영향을 미친다. 반대로 너무 차단주파수가 너무 높을 경우에는 대역폭이 넓어지나, 신호의 전달특성은 왜곡이 없이 전달되게 된다.

Fig. 2. LPF I&Q 군지연 특성

Fig. 3. LPF 입력 전/후 파형

2.3.2 변조

과학기술위성 2호에서는 8GHz 중심주파수로의 direct 변조를 사용함으로써, 주파수 변환과 변조를 동시에 수행하였다. 이때 사용하는 변조기는 passive 변조기로 대부분 RF 소자를 이용하여 만든 제품이었다. 과학기술위성 3호에서는 낮은 주파수에서 변조를 한 후에, 주파수 상향하는 방식으로 제작하였다. 이 방식의 장점은 8GHz 직접 변조 방식의 passive 변조기에 비해 신호의 크기 및 위상의 오차율이 적다는 장점이 있다. 물론 modulation 이후의 왜곡은 포함하지 않은 변조 자체의 비교일 경우이다. 또 다른 장점은 주파수의 변환이 쉽다는 것이다. X대역이 아닌 K나 혹은 Ka 대역으로 주파수 상향을 할 경우에 위상고정형 유전체발진기의 주파수만 바꾸면 쉽게 가능하다. 아래 Fig. 4는 변조후의 파형을 나타내었다.

Fig. 4. XTU 출력 주파수 특성

2.3.3 Power amp단 설계 및 제작

XTU에 들어가는 power amp단은 레벨 버짓상 1 watt (30dBm) 이상의 출력 파워에 약 40dB 이상의 이득이 필요하다. power amp단은 총 2단으로 제작되었으며, 내부에 isolator 및 출력파워 관찰을 위한 log detector와 온도센서를 포함하고 있다. 제작에 사용된 2단 중 drive amp단은 MAAM28000-A1을 사용하였으며, 데이터 시트상의 P1dB는 약 14dBm이며, 전달특성은 약 17dB이다. 최종단 power amp는 FMM5057VF를 사용하였으며, 데이터 시트상의 P1dB는 약 34dBm이며, 전달특성은 약 26dB이다. Fig. 5에 power amp단 전체 전달특성을 나타내었으며, Fig. 6은 P1dB 특성을 나타내었다. 그래프에서 보듯이 전달특성은 약 45dB 이상이며, P1dB는 약 33dBm 근처인 것을 알 수 있다.

Fig. 5. Power amp 전달 특성

Fig. 6. Power amp P1dB 특성

2.3.4 Transfer Switch

과학기술위성 3호에서는 과학기술위성 2호에서는 없던 transfer 스위치라는 부품을 새로 탑재하였다. 이는 2개이던 안테나수가 하나로 바뀌므로써, 두 개의 XTX출력이 하나의 안테나로 가기 위해 아래와 같은 특성을 가지는 Dowkey사의 401 Series의 스위치를 선택하였다.

- SPDT(Single Pole Double Throw)
- Mechanical Switch
- High Isolation
- Long Life : 100,000 Cycle이상
- Failsafe

SPDT방식은 하나의 입력과 두개의 출력 또는 두개의 입력과 하나의 출력으로 사용할 수 있으며, 기계적 스위치의 경우, 삽입손실 및 안정성이 전기적 스위치 제품보다 우수하다. 또한 100,000 cycle이상의 동작횟수를 보장하며, failsafe을 택함으로, 전원이 들어가지 않을 경우에도 하나의 입력과 출력사이의 전송은 이루어진다. 즉 스위

Fig. 7. Transfer 스위치 전달 특성

Table 2. Transfer 스위치 전달 특성

	요구사항		측정치		부합여부	
	0V	12V	0V	12V	0V	12V
전달특성 (S21)	> -1 dB	> -1 dB	-0.188 dB	-0.215dB	적합	적합

치에 전원이 인가되지 않은 경우에도 최소 하나의 Path에 대하여서는 전송이 이루어 질 수 있다. Fig. 7에 전원이 인가되지 않았을 때의 Transfer 스위치의 전달 특성을 나타내었다. Table 2는 스위치의 전달특성을 표기하였다.

2.3.5 XTU 제작

아래 Fig. 8에 XTU 주의 전면, 제작 사진을 나타내었다. Fig. 9에는 제작이 완료된 XTU이다. 전면부는 Modulation Board와 OCXO로 구성되어 있다. Modulation Board에는 전원부, MMU로부터 전원을 받아서 신호를 판별하는 비교기와, 신호 가공을 위한 필터, 및 변조기로 구성된다. 후면에는 주파수 변환을 위한 mixer, amp 단 및 필터로 구성된다.

Fig. 8. XTU 전면 제작 사진

Fig. 9. XTU 비행모델 조립사진

Fig. 10. XTU-MMU 연동시험 환경

Table 3. XTU-MMU 연동시험 결과

항목	시험결과
전송시간	900초
Packet 수	5,118,644
Error count	0
BER ($\leq 1 \times 10^{-6}$)	Complied

2.4 XTU 연동시험 및 환경시험

2.4.1 XTU-MMU 연동시험

XTU는 각 부분의 제작 및 기능시험을 거친 후 조립이 완료된 이후에 MMU와의 연동시험을 실시한다. Fig. 10은 MMU와 XTU간의 연동시험을 나타내었으며, Table 3은 연동시험 결과이다. 실제 시험은 수십 차례 이상 실시하였으며, 유선 연결 상태에서 에러는 발생하지 않았다.

2.4.1 XTU 환경시험

기능 시험 및 연동시험을 마친 후 XTU는 진동 시험 및 열진공 시험을 실시한다. 환경시험의 하나인 진동 시험은 KAIST 인공 위성 연구센터에서 시행하였으며, 진동 시험 후, 기능시험을 통하여 이상이 없음을 확인하였다. Table 4에 XTU 비행모델의 진동시험 순서 및 조건을 나타내었으며, Fig. 11은 진동시험 사진이다. 진동시험 이후 열진공 시험을 실시하였으며, 총 2.5 Cycle의 열주기를 거치는 동안, 영하10도에서 영상 45도까지의 진공상태에서 총 9차례의 시험을 실시하였으며, 시험결과 진공 및 온도 변화 상태에서도 정상동작 함을 알 수 있었다. Fig. 12는 열진공 시험 프로파일을 나타내었다.

Table 4. 진동시험 순서 및 상태조건

축(Axis) 시험 순서		X → Y → Z	
각 축별 시험조건 및 순서			
1	진동 장치 셋업		
2	Inspection		
3	pre-test	low level random test	2.0[grms]
4	XTU Functional test and Inspection		
5	Main random test		14.1[grms]
6	XTU Functional test and Inspection		
7	post-test	low level random test	2.0[grms]
8	XTU Functional test and Inspection

Fig. 11. 진동시험 수행 사진

Fig. 12. 열진공 시험 프로파일

2.4 XTU 비행모델 시험 결과

XTU 비행모델의 성능시험, 환경시험을 마친 후, 위성체 조립 및 시험(Assembly Integration and Test, AIT)에 납품 되었으며, 위성체 조립 후 위성체 레벨의 연동시험 및 통신 시험을 마쳤으며, 인공위성 연구센터 13m 안테나를 이용한

Table 5. 성능 및 환경시험 결과

	시험항목	요구 사항		시험결과	
				XTX_P	XTX_R
성능 시험	전력소모	P/R	≤ 42W	≈ 37W	≈ 36W
		S/W	≤ 3W	≈ 2.5W	
	주파수	P/R	8.127 GHz	8.127 GHz	(± 3.4 KHz 이하)
	출력 파워	P/R	≥ 30 dBm	≈ 30.2 dBm	
	전송속도	P/R	16 Mbps	16 Mbps	
	삽입손실	S/W	≤ 1 dB	≤ 0.3 dB	
	BER(PER)	P/R	≤ 1X10 ⁻⁶	만족	
	TLM 체크	P/R	Analog TLM	≈ 4.28V	≈ 4.25V
환경 시험			Digital TLM	≈ 4.8V	≈ 4.8V
	TVT		-10℃ to 45℃ @ 1X10 ⁻⁵ T.	만족	만족
	진동		14.1 grms	만족	만족
AIT	DC check		Power check	만족	만족
	TLM 체크		Analog/Digital	만족	만족
	통신채널		16Mbps@MMU P/R	만족	만족

End-to-End 시험까지 완료 하였다. Table 5에 는 XTU 비행모델의 시험 결과를 나타내었으며, Table에서 보듯이 성능시험, 환경시험, 납품 이후 의 AIT 시험까지 모든 시험결과를 요약하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 과학기술위성 3호 통신서브시스템중의 하나인, XTU의 비행모델을 설계, 제작 및 시험한 결과를 기술하였다. Table 5에서 보듯이, 벤치에서의 성능시험, 연동시험 및 진동 및 열진공의 환경시험을 통하여 성능 검증을 수행함으로써, 과학기술위성 3호의 임무수행에 있어서 충분히 만족함을 보였다. 또한 AIT에 납품 후 다른 서브시스템과 함께 조립 되어, 시험 후 기능 점검 및 통신 시험에서도 정상 동작함을 확인 하였다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부 과학기술위성3호 개발사업의 예산지원을 받아 작성되었습니다.

참고문헌

- 1) 오치욱, 이정수, 서규재, 오승한 “과학기술 위성 3호 통신링크 개념 설계,” 한국항공우주학회 춘계 학술대회, pp.988-991 2008
- 2) Jean-Luc Gerner “BANDWIDTH LIMITING / NEW STANDARD” International EESS Wideband Downlink Workshop, March 2003.