3단형 과학관측로켓용 탑재 트랜스폰더 시스템 개발

김성완*, 이수진**, 김주년***, 마근수****, 김준규*****

The Development of Onboard Transponder System for KSR(Korea Sounding Rocket)-III

Sung-Wan Kim*, Soo-Jin Lee**, Joo-Nyun Kim***, Keun-Su Ma****, Jun-Kyu Kim*****

Abstract

The position and trajectory of in-flight rocket are important informations to determine the flight safety of rocket. In general tracking system, radar and transponder are used to acquire position information. Rocket position and trajectory can be determined by using RF communication between ground station and in-flight rocket and antenna position data. Onboard transponder system is composed of RF receiving part, RF transmitting one, decoder and single TX/RX antenna. Therefore circulator is necessary for minimizing RF signal interference. In this paper, the radar transponder system was developed to track the trajectory and position of KSR-III by using radar.

초 록

비행하는 로켓의 위치 및 궤도는 로켓의 비행 안정성을 판단하는 중요한 요소이다. 일반적으로 사용되는 추적시스템은 레이다를 사용하여 로켓에 탑재된 트랜스폰더와 통신하면서 얻어지는 데이터와 안테나의 위치 정보를 이용하여 로켓의 위치 및 비행방향에 대한 정보를 취득한다. 레이더 트랜스폰더시스템은 1개의 안테나를 수신 및 송신시 공유하고 있으므로 송신단 및 수신단과 안테나 사이에는 서로간의 신호 간섭을 최소화하기 위해 서큘레이터를 사용하였으며 입력되는 신호가 약속된 신호와 일치하는지를 판단하기 위해 신호해독기를 포함하고 있어야 한다. 본 논문에서는 레이다를 이용하여 로켓의 위치 및 궤도를 추적하는데 필수적으로 사용되는 트랜스폰더시스템을 개발하였다.

키워드 : 3단형 과학관측로켓(KSR-III), 레이다(radar), 트랜스폰더(transponder), 추적시스템(tracking system)

* 로켓탑재기기연구그룹/ sungwan@kari.re.kr
** 로켓탑재기기연구그룹/ sjlee@kari.re.kr
*** 로켓탑재기기연구그룹/ jnkim@kari.re.kr
**** 로켓탑재기기연구그룹/ ksma@kari.re.kr
***** 로켓탑재기기연구그룹/ kjk@kari.re.kr

1. 서 론

비행중인 비행체의 위치 및 궤도를 정밀하게 추적하기 위해서는 레이더 시스템을 사용한다.

레이더를 이용한 추적시스템은 크게 비행체를 향하여 RF신호를 송신한 후 반사되어오는 신호를 검출하는 Skin Tracking과 비행체에 탑재된 트랜스폰더를 향하여 RF신호를 송신하면 탑재된 트랜스폰더에서 이 신호를 검출하고 이에 따른 응답을 이용하여 위치를 추적하는 방식으로 나눌 수 있다. Skin Tracking방식은 미리 비행궤도에 대한 정보를 입력하고 이에 따라 추적 안테나가 시간에 따라 비행궤도를 따라 이동하면서 반사되어오는 신호를 검출하여야 함으로 지상 레이더 시스템을 운영하는데 여러 가지 제약이 따를 수 있으며 또한 미리 예측된 궤도를 벗어나면 정상적으로 추적을 할 수 없다. 그러나 트랜스폰더를 이용한 추적시스템의 경우에는 송신 주파수와 수신 주파수가 다르므로 수신하는 신호의 중심 주파수를 자동으로 추적할 수 있는 안테나를 이용하여 어떠한 궤도도 추적할 수 있다는 장점이 있으므로 대부분의 비행체는 트랜스폰더를 이용한 추적시스템을 채용하고 있다. 따라서 KSR-III에 있어서도 비콘신호를 사용하는 펄스 추적 방식의 트랜스폰더 시스템을 적용하였다.

일반적으로 로켓에 탑재되는 전자시스템은 비행체라는 특수성 때문에 지상시스템에 비해서 여러가지 제약 조건과 엄격한 규격이 요구된다. 전원 공급에 있어서는 밧데리를 사용하므로 가능하면 저전력 설계가 요구되고, 비행체의 이동에 따른 수신감도 및 동적범위(dynamic range)가 커야 하며, 송신전력은 지상국과의 안정된 RF 링크(link)를 유지하기 위해서 고출력이 요구된다. 또한 비교적 안정된 지상의 환경과는 달리 온도, 진동, 충격, 가속도 등 열악한 환경조건에서도 그 고유의 기능을 발휘하도록 매우 안정된 시스템 설계가 요구된다.

본 논문에서 레이다 트랜스폰더는 X-밴드를 이용하였으며 입력되는 신호를 감시하고 있다가 미리 약속된 신호(Pulse Width, Pulse Spacing)가 입력되면 일정한 시간 지연을 둔 후에 송신용 Pulse를 발생시키고 이 신호를 변조시켜 지상으로 송신한다. 그러면 지상에서는 수신되는 신호와 안테나의 이동각을 이용하여 비행체의 위치를 추적한다.

2. 본 론

2.1 개요

트랜스폰더는 암호화된 지상 레이더 신호를 받아서 해독하고 입력된 신호가 미리 약속된 신호와 일치하는 경우에는 송신용 Pulse를 발생시켜 지상의 레이더를 향하여 응답 신호를 출력한다. 다음 그림 1은 지상의 레이더시스템과 트랜스폰더 사이의 관계를 보여준다.

지상의 레이더 시스템에서 로켓에 탑재된 트랜스폰더를 향하여 송신되는 신호는 트랜스폰더가 해독할 수 있는 신호(펄스 폭 : 0.5μs, Pulse Spacing : 7μs인 Double Pulse)를 생성하며 이 신호는 미리 약속된 대역의 RF신호로 변조된 신호이다. 그러면 탑재된 트랜스폰더에서는 이 신호를 해독하여 미리 약속된 신호와 일치하는 경우에는 3.5μs의 지연을 준 후에 송신용 Pulse를 발생시켜 지상 레이더를 향하여 응답 신호를 출력한다.

사용되어지는 펄스는 그림1과 같이 구성되어진다. 펄스반복주파수(PRF: Pulse Repetition Frequency)는 640 Hz, 펄스폭(PW: Pulse Width)는 0.5 μs, 더블 펄스의 펄스간격(PS: Pulse Spacing) 은 7.0 μs이다. 이때 송수신 펄스의 시간지연을 T라 하고, 전파의 속도를 c(=3.0×10^5km/ sec)라 하면 지상국과 로켓과의 거리 d는 다음 식 (1)과 같다.

$$d = \frac{c\,T}{2} \tag{1}$$

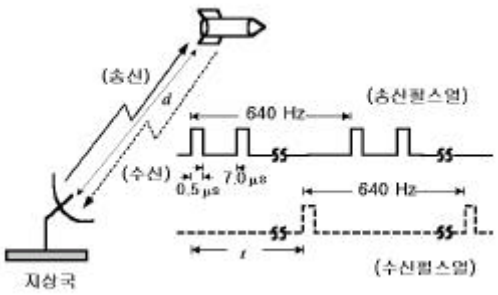
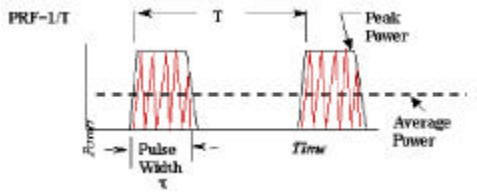
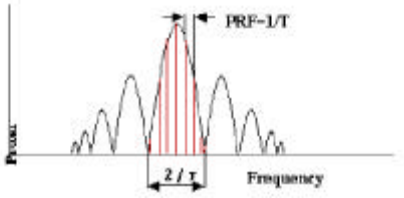


그림 1. Block diagram for the tracking system.

또한 PRF=640 Hz이므로 이 경우 로켓 추적가능 최대거리 d=(3.0×105/640)/2 234 km가 된다. 이 거리 이상에서는 PRF 내에 2개 이상의 펄스가 수신될 경우에 수신펄스에 대한 송신펄스의 기준이 모호해지기 때문에 거리 모호성(range ambiguity)이 발생해서 정확한 거리 계산을 할 수 없게 된다. 따라서 그 이상의 거리를 필요로 하는 비행인 경우에는 최대 거리를 고려하여 PRF를 더욱 작게 해서 펄스열을 구성해야 된다. 이때 PRF를 너무 작게 하는 것은 단위 시간당 지상국 레이다시스템에 도달하는 펄스의 수가 적어지므로 보다 정밀한 추적기능을 하지 못하므로 대부분은 비행 최대거리에 적절한 PRF를 설정해야 된다.



(a)



(b)

그림 2. Time and frequency domain of transmitting pulse.

그림 2는 일반적인 펄스신호와 그에 따른 주파수 스펙트럼의 관계를 나타내주고 있다. 펄스가 그림 2 (a)와 같을 때 주파수 스펙트럼은 푸리에 변환에 의해서 PRF 간격으로 열(train)을 이루며 amplitude는 sinc 함수의 형상을 가진다. 또 첫번째 null point는 중심주파수에서 1/pulse width 지점에서 발생한다. 따라서 개발된 트랜스폰더에서는 640 Hz 간격으로 스펙트럼 열(train)이 발생하며 첫번째 null point는 중심주파수 9.2 GHz에서 2 MHz 떨어진 점에서 발생하게 된다.

개발된 트랜스폰더의 구성은 지상에서 송신되는 레이더 신호를 수신하기 위한 수신단, 수신된 신호로부터 여기에 포함된 정보가 약속된 신호인지를 판단하는 신호 해독부 그리고 수신된 신호가 미리 약속된 신호와 일치하는 경우 응답신호를 출력하는 송신단으로 구성된다.

2.2 수신단

수신단은 지상의 레이더가 송신하는 RF신호를 수신하여 여기에 포함된 정보를 복원하는 역할을 한다. 여기에서 사용되는 복조 방식은 원 RF신호를 중간 주파수로 변환한 후 이로부터 원 신호를 검출하는 Superheterodyne방식을 사용하고 있다. 다음 그림 3에서 Superheterodyne방식 수신단의 구성도를 보여주고 있다.

트랜스폰더는 동일한 안테나를 이용하여 수신 및 송신을 함으로 안테나를 통과한 RF신호는 Circulator를 이용하여 신호의 흐름을 제어해 준다. Circulator를 통과한 신호는 대역통과필터로 입력된다. 지상에서 송신된 신호가 Pulse신호를 RF로 변조한 신호이므로 RF입력신호의 Spectrum을 분석해보면 중심 주파수를 기준으로 좌우로 다른 주파수 성분의 신호들이 존재하게된다. 그러므로 이상적인 신호를 수신하기 위해서는 전 대역의 신호를 다 수신하여야한다. 그러나 이와 같은 경우에는 2대 이상의 각기 다른 중심주파수를 사용하는 Pulse레이더를 동시에 사용하는 경우에는 오동작할 가능성이 매우 커지게 되는 문제점이 있다. 그러므로 대역통과 필터를 사용하여 수신되는 중심 주파수를 기준으로 적절한 대역의 신호만을 수신하고 통과 대역이외에서는 큰 감쇠가 일어나도록 하였다.

대역통과필터를 통과한 신호는 신호 혼합기(Mixer)에서 국부발진기(Local Oscillator)의 출력과 혼합되어 두 신호의 차이에 해당하는 신호와 다양한 고조파(Harmonics)를 발생시킨다. 신호 혼합기의 출력은 입력된 신호와 국부발진기의 차에 해당하는 주파수를 중심 주파수(IF)로하고 적절한 대역폭을 갖는 증폭기를 통과시키면 IF신호

의 Envelope Detection을 하게되고 따라서 DC Pulse형태로 출력되며 이의 크기는 입력되는 IF 신호의 크기에 비례하게 된다.

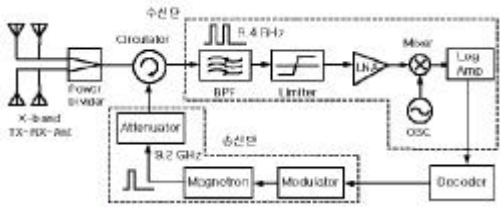


그림 3. Block diagram for the transmitting and receiving parts in transponder.

2.3 신호해독부

신호해독부는 수신단에서 변환된 DC Pulse가 미리 약속된 신호와 일치하는지를 판별하는 역할을 한다. 신호해독부는 비교기와 Decoder로 구성된다.

비교기는 수신부에서 출력되는 IF신호와 기준전압을 비교하여 입력신호가 기준 전압보다 큰 경우에 출력을 하게된다. 여기에서 기준전압은 수신단의 최소 수신전력 값이 되며 시스템의 잡음 전력보다는 높게 정해져야한다.

Decoder부는 비교기를 통과한 신호가 지상의 레이더와 미리 약속된 신호인지를 판단하고 수신된 신호가 미리 약속된 신호와 일치하는 경우에는 송신용 Pulse를 발생시킨다. 이때 과도한 PRF(Pulse Repetition Frequency) 입력신호 및 외부에서 발생한 잡음을 신호로 인식하는 경우를 대비하기 위해 약속된 신호가 인식되면 PRF에 상응하는 시간동안에 발생하는 입력신호는 무시하는 Masking부를 포함한다. 다음 그림4는 Decoder의 구성을 보여준다.

Pulse발생기는 입력신호가 감지되면 이 신호에 동기되어 짧은 Pulse를 발생시키는 역할을 하는 부분으로 One Shot Multivibrator로 구성된다. 여기에서 Pulse의 폭은 다음단에 연결된 회로를 구동하기에 충분한 Pulse폭이 되도록 하여야하며 또한 입력되는 Double Pulse를 판별할 수 있도록 적절한 범위에서 Pulse의 폭이 결정되어야 한다.

Space Masking부는 외부에서 발생하는 잡음이나 과도한 PRF에 의해 입력단에 빈번히 발생할 수 있는 신호를 무시할 수 있도록 하는 역할을 한다. 이때 Masking Pulse의 폭은 미리 약속된 Double Pulse의 Pulse Spacing을 고려하여 결정되어야한다. 이때 2번째로 발생하는 Pulse를 안정적으로 검출할 수 있도록 하기 위해서는 Masking Pulse의 폭은 Pulse Spacing의 약 90%가 되도록 결정하는 것이 적당하다.

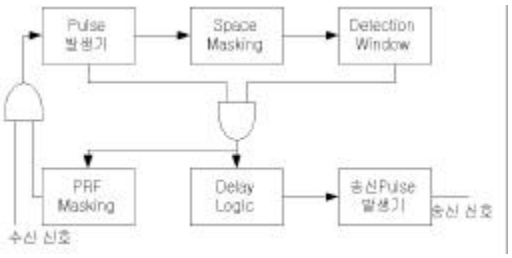


그림 4. Block diagram of decoder.

Detection Window는 수신신호의 1번째 Pulse가 발생한 후 2번째 Pulse를 검출하기 위해 사용된다. 이때 Detection Window는 Masking Pulse의 끝단에 동기되어 일정한 시간내에 발생하는 Pulse를 검출하기 위해 적절한 시간을 결정해 주어야한다. 또한 Masking Pulse가 Pulse Spacing의 90%로 결정되어 있으므로 이 시간도 함께 고려되어야 한다. 그러므로 이 회로에서는 Pulse의 폭을 Pulse Spacing의 30%로 결정하였다.

PRF Masking은 Double Pulse가 검출되면 약속된 PRF보다 더 빠른 신호는 입력될 수 없도록 하기 위해 사용된다. 이렇게 함으로서 외부의 잡음에 의한 오동작도 최소화 할 수 있다. 또한 Space Masking부와 마찬가지로 PRF Masking부도 이웃한 신호에 대하여 충실히 검출할 수 있도록 하기 위하여 약속된 PRF보다는 짧은 시간을 Masking시킨다. 여기에서는 PRF의 약 80%에 해당하는 시간을 Masking시켰다. 그리고 PRF Masking을 위하여 사용하는 소자는 Masking Pulse의 폭이 길고 이 시간 동안에 안정적으로 동작하여야 함으로 소자 선정 시 이러한 특성에 적합한 소자를 선택하여야 한다.

Delay Logic 및 송신 Pulse발생기는 입력되는 신호가 약속된 특성에 적합한 Double Pulse인 경우 일정한 시간의 지연을 준 후에 입력신호에 대한 응답 Pulse를 발생시킨다. 이 Pulse는 송신단을 구동하여 RF신호를 지상으로 송신하도록 한다.

2.4 송신단

송신단은 Decoder의 출력을 받아서 출력단에 위치한 Magnetron을 구동시켜 RF신호를 지상으로 송신하는 부분이다. 송신단은 Magnetron 및 회로를 구동하기 위한 전원공급부, 신호를 받아서 Magnetron을 구동할 수 있는 신호를 발생시키는 변조부 및 Magnetron으로 구성된다. 그림 3에서 수신단과 함께 송신단의 구성도가 나타나 있다.

전원공급기는 입력전압(24V 32V)을 받아서 전압 조절기를 이용하여 20V의 전원으로 변환시키고, 이 전압은 다음단의 TR 및 소자를 구동시키는 ±15V의 전압으로 변환시킨다. 또한 이 전압은 고 전압 발생기에 입력되어 Magnetron을 구동시키는 -2.6kV전압을 만들어 낸다.

Modulator는 입력되는 신호(+5V 0.5μs)에 동기되어 +15V 0.5μs의 SCR Gate를 구동시키는 Pulse를 발생시켜 고 전압이 Magnetron에 공급되고 RF신호가 출력되도록 한다. Magnetron의 출력은 Circulator를 거쳐서 low profile antenna를 통해서 지상으로 전송하게 된다.

표 1은 제작된 트랜스폰더 사양이다.

표 1. Transponder specifications.

항 목	규 격
수신주파수	9400 MHz
주파수안정도	중심주파수±5 MHz
대역폭	11±3 MHz
Dynamic range	75 dB(Max +20 dBm)
수신감도	-70±5 dBm
수신펄스특성	PRF 640 Hz, PW 0.5 μs, PS 7.0 μs
송신주파수	9200 MHz±5 MHz
변조형태	펄스변조방식
송신출력(첨두)	단자별 400 W(max)
송신펄스특성	PRF 640 Hz, PW 0.5 μs
펄스지연	3.5±0.5 μs
송신 주부엽차	10 dB 이상
펄스상승시간	100 ns max
동작온도	-20。C ~ +70。C
입력전압	28±4 Vdc
입력전류	최대 2 A

3. 제작 및 측정결과

제작된 트랜스폰더의 사진은 그림 5와 같다. 또한 제작된 트랜스폰더의 특성을 확인하기 위해서 9.4 GHz로 변조된 더블펄스를 발생시키는 점검 장비를 개발하였으며 점검장비와 연동하였을 때 트랜스폰더에서 송신하는 단일펄스의 스펙트럼은 그림 6과 같다. 측정결과 전체적으로 표 1의 스펙을 만족하였다.

그림 5. Developed transponder.

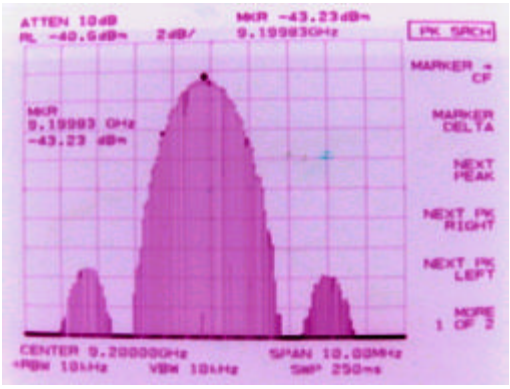


그림 6. Transmitting spectrum of the transponder.

5. 결 론

본 논문은 국산화한 트랜스폰더의 구성 및 이들간의 상호관계에 대하여 기술하였다. 트랜스폰더는 크게 RF신호를 송신 및 수신하는 부분과 미리 약속된 신호가 검출되었는지를 판별하는 Decoder로 구성되어있다. 그리고 트랜스폰더는 1개의 안테나를 이용하여 송신 및 수신을 하므로 입력 및 출력단에는 Circulator를 사용하여 역으로 RF신호가 전달되는 현상을 방지한다.

개발된 트랜스폰더는 점검장비를 이용하여 출력되는 신호의 스펙트럼 및 PRF를 검사한 결과 안정된 동작을 하는 것이 확인되었으며 EMI/EMC, 진동, 충격, 열진공 등 여러 환경 시험을 거쳐서 2002년 발사될 KSR-III에 탑재될 예정이다.

참고문헌

1. 채연석외, 3단형 과학로켓 개발사업 연구보고서(I), 한국항공우주연구원, 1998
2. 레이다 측정 기술, Agilent, 2001