

技術論文

과학기술위성3호의 X-대역 하향링크를 위한 RS(255,223) 코드 설계 및 성능 분석

서인호*, 김병준**, 이종주*, 곽성우***

The design and performance analysis of RS(255,223) code for X-band downlink of STSAT-3

In-Ho Seo*, Byung-Jun Kim**, Jong-Ju Lee* and SeongWoo Kwak***

ABSTRACT

(255,223) RS(Reed-Solomon) code which is the CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems) standard was used in the STSAT-3 to correct errors during the downlink of payload data. The RS encoder developed by VHDL was implemented in MMU(Mass Memory Unit). Moreover, the RS decoder developed by C-language was implemented in the DRS(Data Receiving System) of ground station. In this paper, we reported the design and analysis results of RS(255,223) for STSAT-3. The BER(Bit Error Rate) performance from MMU to DRS was confirmed through the downlink test at 16 Mbps. Also, the error correction performance and capability of RS(255,223) was tested by the manual attenuation of the RF(Radio Frequency) signal in the X-band transmitter resulting in putting some errors in the communication line.

초 록

과학기술위성3호에서는 탑재체 데이터를 지상으로 전송할 때 발생하는 데이터의 오류를 검출하고 정정하기 위해서 CCSDS에서 표준으로 채택하고 있는 RS(255,223) 코드를 사용하였다. RS Encoder가 VHDL로 개발되어 대용량 메모리 유닛에 적용되었으며 오류 정정을 위한 Decoder는 지상국의 데이터 수신 처리 시스템에 적용되었다. 본 연구에서는 RS(255,223) 코드의 설계와 성능 분석 결과를 나타내었다. 16 Mbps의 하향링크 시험을 통해서 BER 성능을 측정 하였으며 X-대역 송신기를 이용하여 통신 선로상에 인위적으로 에러를 인가 하였을 때의 RS(255,223) 코드의 에러 복원 결과를 나타내었다.

Key Words : RS Code, 하향링크, 대용량 메모리 유닛

1. 서 론

인공위성은 지상과 먼 거리에 위치하고 날씨 변화에 따른 감쇄와 각종 전자기 자극에 노출되기 때문에 자료 전송의 오류가 발생할 확률이 높다[1]. 따라서 통신 선로 상에서 발생하는 데이터의 오류를 검출하고 정정하기 위해서 디지털 통신에서는 데이터의 인코딩과 디코딩 기법을 사용

† 2009년 11월 26일 접수 ~ 2010년 1월 25일 심사완료

* 정회원, 한국과학기술원 인공위성연구센터
교신저자, E-mail : inho@satrec.kaist.ac.kr

대전시 유성구 구성동 373-1

** 정회원, 대구경북과학기술연구원

*** 정회원, 계명대학교 전자공학과

하며 CCSDS 101.0-B-3 BLUE BOOK에는 인공위성의 하향링크 데이터 인코딩에 대해서 Convolutional 코딩과 RS 코딩을 제안하고 있다[2]. 과학기술위성3호 에서는 이 두가지 기법 중에서 연집에러(Burst Error)에 강한 특징을 갖고 있으며 보이며 탐사선에 본격적으로 사용된 이래 성능을 향상시키면서 우주 통신과 위성 통신에 사용되고 있는 RS(255,223) 코딩 기법을[3] X-대역 하향링크에 적용하였다. 과학기술위성 3호는 근적외선(1~2um)과장 대역에서의 우주 관측 및 지구 관측을 위한 적외선영상시스템(MIRIS, Multi-purpose IR Imaging System)이 주탑재체로, 다방향 분광 영상을 이용한 지구관측용 소형위성 영상 분광기(COMIS, COMpact Imaging, Spectrometer)가 부탑재체로 탑재 된다[4]. 또한 탑재체에서 관측한 데이터를 저장하고 관리하며 지상으로 전송하는 역할을 대용량 메모리 유닛(MMU, Mass Memory Unit)이 담당하고 있다.

현재 과학기술위성3호의 검증모델을(EQM, Engineering Qualification Model) 개발을 완료한 상태이며[5] 본 논문에서는 과학기술위성 3호 대용량 메모리 유닛에서 탑재체의 데이터를 X-대역을 통해서 16 Mbps로 전송할 때 통신 선로 상에서 발생하는 오류를 복구하기 위해서 구현된 RS(255,223) Encoder의 설계 결과와 이때의 하향링크에서의 BER 성능 시험 결과를 나타내었다. 이때 RS Encoder는 대용량 메모리 유닛의 FPGA에 구현되어 있으며 오류 복구는 X-대역을 통해서 수신하는 지상국의 데이터 수신처리 컴퓨터에서 처리된다. 또한 감쇄기를 이용하여 X-대역 송신기의 출력 신호에 에러가 무작위로 발생하도록 했을 때의 RS(255,223) 코드의 성능을 확인하여 실제로 위성이 운용될 때의 상황을 모사하였다. 이때 RS Encoding이 되어 있지 않은 싱크(Sync)에 오류가 있는 데이터 Packet에 대해서도 데이터 사이즈와 내용을 확인하여 오류 Packet으로 분류하지 않도록 하였다.

II. 본 론

2.1 FPGA용 RS(255,223) Encoder 설계

RS(255,223) 코드는 심볼(Symbol) 단위가 최소 8비트 이상이 요구되며 16개의 심볼에 대해서 연집에러를 복구할 수 있다[3]. 따라서 일반적으로 8비트 심볼을 사용하므로 패리티를 포함한 2040 비트의 데이터에 대해서 128비트의 에러를 복구할 수 있는 강력한 코딩 기법이다.

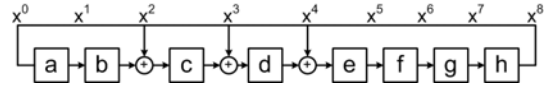


그림 1. GF(256)을 위한 원시 다항식

심볼의 크기가 8비트 이므로 유한필드(Galois Field)는 GF(2⁸)이다. 이때 유한필드를 생성하기 위한 원시다항식(Primitive Polynomial)은 식(1)로 정하였으며 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

$$P(X) = 1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^8 \tag{1}$$

따라서 a⁰="00000001"부터 시작해서 한번 쉬프트하면 a¹="00000010"이 된다. 이것을 반복 쉬프트해서 만들어지는 값을 각각의 원소로 하는 집합이 GF(256)이며 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

또한 오류 검출 및 정정을 위한 패리티 심볼이 32개 이므로 생성다항식(Generation Polynomial)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(X) = (X-a)(X-a^2)...(X-a^{31})(X-a^{32}) = X^{32} - a^{116}X^{31} - a^{10}X^{30}...a^{116}X^2 - a^{212}X - a^{102} \tag{2}$$

따라서 식(2)를 바탕으로 RS(255,223) 코드의 패리티 심볼을 생성하기 위한 LFSR(Linear Feedback Shift Register)은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 1. GF(256) 원소의 벡터 테이블

	h	g	f	e	d	c	b	a
a ⁰	0	0	0	0	0	0	0	1
a ¹	0	0	0	0	0	0	1	0
a ²	0	0	0	0	0	1	0	0
⋮								
a ²⁵³	0	1	0	0	0	1	1	1
a ²⁵⁴	1	0	0	0	1	1	1	0
a ²⁵⁵	0	0	0	0	0	0	0	0

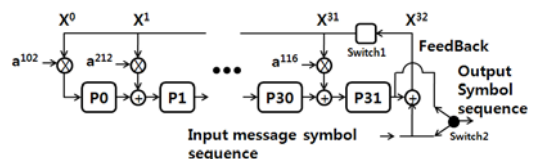


그림 2. RS(255,223)을 위한 LFSR Encoder

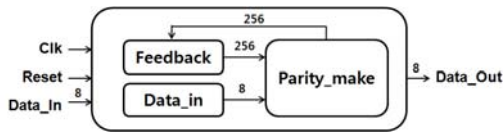


그림 3. 설계된 RS(255,223) Encoder

따라서 연속적으로 입력되는 223바이트의 데이터에 대해서 순차적으로 LFSR을 거치게 되면 최종적으로 32바이트의 패리티를 생성하게 된다.

LFSR을 바탕으로 설계된 RS(255,223) Encoder를 그림 3에 나타내었으며 VHDL로 개발되어 과학기술위성3호 대용량 메모리 유닛의 X-대역 하향링크에 적용 하였다. 따라서 RS(255,223) Encoder를 개발하기 위해서는 표 1에 대략적으로 나타낸 GF(256)의 모든 원소의 값을 미리 계산해 두어야 한다.

2.2 FPGA용 RS(255,223) Decoder 설계

서론에서 설명한 바와 같이 오류 복구는 X-대역을 통해서 데이터를 수신하는 지상국의 데이터 수신처리 컴퓨터에서 수행한다. 복호화 과정은 그림 3의 Encoder에서 생성된 부호어가 생성 다항식으로 나누면 나누어지는 것을 이용하여 오류의 위치와 크기를 찾아내는 과정이다[3].

$$r(X) = c(X) + e(X) \quad (3)$$

따라서 지상국에서 수신한 데이터는(r(X)) Encoder에서 생성한 부호어와(c(X))와 통신 선로상의 오류를 포함하여 데이터를 수신하는 과정에서의 에러(e(X))를 포함한 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 오류의 유무는 식 (4)의 수신 심볼 다항식에 표 1에 나타낸 생성다항식의 근을 대입하는 신드롬 계산으로 알 수 있다. 신드롬의 계산 결과가 모두 0이면 r(X)에 에러가 없으며 그렇지 않은 경우에는 r(X)가 에러를 포함하고 있으므로 에러의 위치와 크기를 찾아야 한다.

$$S_i = r(X)|_{X=a^i} = r(a^i) \quad i = 1, \dots, n - k \quad (4)$$

일반적으로 계산된 신드롬 값들을 바탕으로 에러의 위치와 크기를 찾아내는 방법은 여러 가지가 있다. RS(10,8) 코드 처럼 정정하고자 하는 에러의 수가 2개로 작은 경우에는 쉽게 계산이 가능하지만 RS(255,223) 코드 처럼 몇 개의 다항식을 풀어야하는 경우에는 LFSR을 이용하는 Berlekamp-Massey 알고리즘과 수정된 유클리드 알고리즘을 주로 사용하며 본 연구에서는 수정된 유클리드 알고리즘을 이용 하였다. 본 연구에서

개발된 RS(255,223) 코드를 정리하면 X-대역 하향링크에서의 빠른 처리 속도를 요구하는 Encoder는 VHDL로 개발되어 FPGA에서 동작하도록 하였으며 그 알고리즘이 상대적으로 복잡한 Decoder는 데이터 수신 처리 컴퓨터에서 C-언어로 검증이 쉽게 될 수 있도록 개발 하였다. 그러나 추후 상향링크에서의 사용을 위해서 Decoder도 VHDL로 개발할 필요가 있다.

2.3 X-대역 하향링크 시험

대용량 메모리에 저장된 데이터는 최종적으로 16 Mbps의 속도로 X-대역 송신기를 통해서 무선으로 지상국으로 전송된다.

그림 4에 MMU-XTU-Receiver(수신기)-DRS(Data Receiving System) 간의 X-대역 하향링크 시험 환경을 나타내었으며 오른쪽 그림은 X-대역 송신기의 최종 RF(Radio Frequency) 출력을 스펙트럼 분석기로 측정한 결과로써 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조된 신호가 캐리어에 실려서 정상적으로 출력됨을 보여주고 있다 [5]. 본 시험의 경우 32 Gb의 메모리에 대해서 10⁻⁶의 BER 요구조건을 가지고 있다. 따라서 2048초 동안 X-대역 하향링크 시험을 하였으며 에러가 발생하지 않는 것을 확인 하였다.

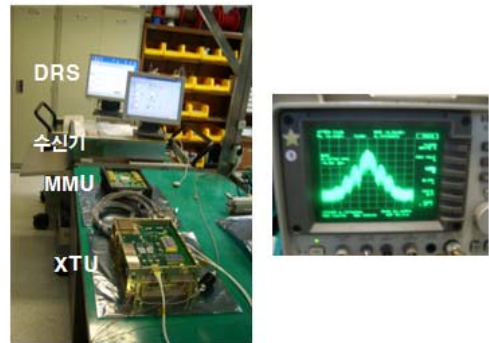


그림 4. X-대역 하향링크 시험

2.4 RS(255,223) 코드의 성능 시험

2.3에서 소개한 바와 같이 정상적인 상태에서는 X-대역 하향링크 시험에서 에러가 발생하지 않는다. 다시 말하면 식 (3)에서 e(X)가 생기지 않게 된다. 또한 RS(255,223)이 16개의 심볼을 복구할 수 있다는 것은 이미 알려진 사실이며 데이터 수신처리 컴퓨터에서 실험을 통해서 확인 하였다. 따라서 신호 감쇄를 통해서 에러가 얼마나 발생하며 이때에 RS(255,223) 코드로 얼마나 복구가 가능한지를 확인하여 실제로 위성에서 데이

터를 수신할 때 어느정도 에러 범위에서 RS(255,223) 코드가 효과적으로 발휘할 수 있는지를 예측하기 위해서 출력 30 dBm 신호에 95 dBm의 감쇄기를 넣어서 실험을 하였다.

그림 5에 수신 받은 데이터 중에서 한 패킷당 (255바이트) 에러 심볼의 개수를 나타내었으며 표 2에 시험 결과를 나타내었다. 그림 5를 보면 대부분의 에러가 3개이며 최대 9개 이므로 RS(255,223) 코드로 모든 에러가 복구될 수 있음을 알 수 있으며 표 2의 결과를 보면 모든 데이터가 정상적으로 복구 되었음을 알 수 있다. 그러나 패킷의 시작을 나타내는 싱크(4 바이트)는 Encoding되어 있지 않으므로 이 부분에 에러가 발생한 경우에는 한 패킷을 버리게 되며 현재의 전체 패킷 카운트에는 표시되지 않았다. 따라서 싱크에 에러가 있다고 하더라도 그 다음 헤더 부분을 비교하여 에러가 있는 부분이 싱크가 확실하다고 판단되면 버리지 않고 저장 하도록 코드를 수정 하였다.

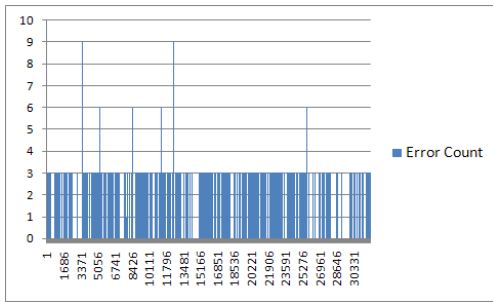


그림 5. 패킷당 에러 심볼

표 2. 데이터 수신 결과

전체 패킷 카운트	101168
에러 패킷 카운트	1063
에러 없는 패킷 카운트	100105
복구된 패킷 카운트	1063
복구하지 못한 패킷 카운트	0
에러율	1.05%
복구율	100.00%

표 3. 싱크를 처리한 데이터 수신 결과

전체 패킷 카운트	101179
에러 패킷 카운트	1071
에러 없는 패킷 카운트	100108
복구된 패킷 카운트	1071
복구하지 못한 패킷 카운트	0
에러율	1.06%
복구율	100.00%

표 2와 똑같은 시험 데이터에 대해서 싱크를 고려하여 시험한 결과를 표 3에 나타내었다. 표 2와 마찬가지로 모든 에러에 대해서 복구를 하였으며 전체 패킷의 개수가 101179로 11개 증가 하였다. 다시 말하면 이전 시험에서는 11개의 패킷에서 싱크에 에러가 있어서 패킷을 저장하지 않았지만 표 3에서는 헤더를 비교하여 정상적인 데이터로 인식하고 저장을 하였다.

그러나 만약을 위해서 실제로 과학기술위성 3호를 운용할 때에는 싱크에 에러가 있을 때의 데이터 운용에 대해서는 상위 프로그램에 사용과 비사용의 기능을 두어서 추가적인 시험을 할 예정이다.

III. 결 론

본 논문에서는 과학기술위성 3호 대용량 메모리 유닛에서 탑재체의 데이터를 X-대역을 통해서 16 Mbps로 전송할 때 통신 선로 상에서 발생하는 오류를 복구하기 위해서 구현된 RS(255,223) Encoder의 설계 결과와 이때의 하향링크에서의 BER 성능 시험 결과를 나타내었다. 32 Gb의 메모리를 16 Mbps로 하향링크(2048초)할 때 10^{-6} 의 BER 요구조건을 만족해야하며 이때 에러가 발생하지 않는 것을 확인 하였다. 또한 X-대역 송신기에서 출력 30dBm 신호에 95dBm의 감쇄기를 넣어서 에러가 무작위로 발생 하도록 했을 때의 RS(255,223) 코드의 성능을 확인하여 실제로 위성이 운용될 때의 상황을 모사 하였다. 대부분의 에러 심볼이 3개 였으며 모두 정상적으로 복원되는 것을 확인 하였으며 패킷의 시작을 나타내는 싱크에 에러가 있는 경우에 대해서도 그다음 헤더를 비교하여 정상적인 데이터가 맞으면 버리지 않고 저장할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 개발된 RS(255,223) 코드를 정리하면 빠른 처리 속도를 요구하는 Encoder는 VHDL로 개발되어 FPGA에서 동작 하도록 하였으며 그 알고리즘이 상대적으로 복잡한 Decoder는 데이터 수신 처리 컴퓨터에서 C-언어로 검증이 쉽게 될 수 있도록 개발 하였다. 그러나 추후 상향링크에서의 사용을 위해서 Decoder도 VHDL로 개발할 필요가 있다.

후 기

본 연구논문은 교육과학기술부 과학기술위성 3호 개발사업의 예산지원을 받아 작성되었습니다.

참고문헌

1) 이육, 구진철, 김대영, 이문호, 이상설, “인공위성을 위한 RS(255,223) 에러정정코드 설계 및 테스트방법”, 2001년도 한국항공우주학회 추계학술발표회, 논문집, pp. 184 ~ 187.

2) 신연식, 이상철, 김태경, “위성통신용 CCSDS 상향/하향 링크 Data Encoder 설계”, 1999년도 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 논문집, pp. 633 ~ 636.

3) http://www.informit.com/content/images/art_sklar7_reed-solomon/elementLinks/art_sklar7_reed-solomon.pdf

4) “과학기술위성3호 시스템 요구사항 검토회의” 자료집, 한국항공우주연구원, 2008. 8.

5) 서인호, 오대수, “과학기술위성 3호 대용량 메모리 유닛의 인증모델 설계 및 구현”, 한국항공우주학회지, 제37권 제12호, pp. 1257-1263, 2009.