

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.1.63

달 탐사선의 데이터 고속 전송을 위한 DSP 프로토타입 설계 및 성능 분석

장연수*, 김상구*, 조경국*, 윤동원*

Design and Performance Analysis of DSP Prototype for High Data Rate Transmission of Lunar Orbiter

Yeonsoo Jang*, Sanggoo Kim*, Kyongkuk Cho* and Dongweon Yoon*

ABSTRACT

Many countries all over the world have been doing lunar exploration projects. Korea has also been doing basic research on lunar exploration. The development of communication systems for lunar exploration projects is one of the most important aspects of performing a successful lunar mission. In this paper, we design a DSP (Digital Signal Processor) prototype based on the requirement analysis of a communication link for lunar exploration and implement its core module considering the international standards for deep space communications to perform a basic research on baseband processor development. It is verified by comparing the bit error rate of the DSP prototype with that of a computer simulation.

초 록

세계 각국은 달 탐사에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있으며 우리나라에서도 달 탐사 임무를 수행하기 위한 기초연구가 이루어지고 있다. 성공적인 달 탐사 임무 수행을 위한 통신 시스템의 개발은 달 탐사 프로젝트에 있어서 중요한 부분이다. 본 논문에서는 기저대역 프로세서 개발을 위한 기본 연구로써 달 탐사 통신 링크에 대한 요구조건 분석을 바탕으로 DSP 프로토타입 시스템을 설계하고 심우주 통신을 위한 국제 표준을 고려하여 각 핵심 모듈을 구현한다. DSP 프로토타입의 비트 오류 확률 값을 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 검증한다.

Key Words : Lunar exploration(달 탐사), Digital signal processor(디지털 신호 처리기), Deep space communications(심우주 통신), Bit error rate(비트 오류 확률)

1. 서 론

세계 각국은 국제 달 네트워크 (INL: International Lunar Network) 프로젝트를 통해 달 탐사에 대한 체계적인 연구를 진행하고 있으며 국내에서도 달 탐사 임무를 수행하기 위한 기

† 2010년 7월 2일 접수 ~ 2010년 12월 24일 심사완료

* 정회원, 한양대학교 융합전자공학부

교신저자, E-mail : dwyoon@hanyang.ac.kr

서울시 성동구 행당동 한양대학교 융합전자공학부

초연구가 추진되고 있다[1]. 달 탐사 프로젝트는 여러 분야의 연구가 유기적으로 결합되어 이루어지며, 이 중 제어신호 및 탐사 정보의 효율적인 전송을 위한 안정적인 심우주 통신 시스템 개발은 중요한 연구 분야 중 하나이다. 이제까지 국내에서 지구 궤도 위성에 대한 통신 시스템 개발은 활발하게 이루어지고 있으나 달 탐사 및 심우주 통신 시스템 개발은 아직 미비한 수준이다. 달 탐사 통신 시스템 개발을 위해서는 목표 통신 링크에 대한 분석이 선행되어야 한다. 최근 국내

에서도 지구 궤도 위성에 대한 통신링크뿐만 아니라 지상국과 달 탐사선 사이의 통신링크에 대한 분석이 이루어지기 시작했다[2]. 지상국과 달 탐사선 사이의 통신링크 분석 결과를 바탕으로 시스템 요구조건을 분석하고 국제 표준을 고려하여 통신 시스템의 기저대역 프로토타입이 설계되어야 한다.

본 논문에서는 지상국과 달 탐사선 사이의 통신 환경 요소에 따른 요구조건을 분석하고 CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems)에서 고려하고 있는 채널 부호화 및 변조 기법을 적용하여 달 탐사 통신 시스템의 기저대역 프로토타입을 설계한다. 설계의 유연성과 심우주 통신 플랫폼에 따른 시스템의 가변 운영을 고려하여 DSP 기반의 프로토타입으로 구현한다. 프로토타입 구현을 위해 여러 분야에서 검증된 성능과 효율적인 소프트웨어 설계 환경을 제공하는 TI C6416 DSP를 사용한다[3]. 달까지의 물리적 거리로 인해 발생하는 신호 감쇠로 인한 성능 저하를 보상하기 위해 낮은 부호율의 터보 부호를 적용하며, 고속 전송을 위한 변조 기법으로는 OQPSK, 8PSK, 4+12 APSK를 적용한다. 구현된 DSP 프로토타입의 비트 오류 확률을 도출하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교 분석한다.

II. 본 론

2.1 달 통신 링크의 요구조건 분석

지상국과 달 탐사선간의 통신링크를 분석하기 위해서는 우주 통신 환경 요소를 먼저 고려해야 한다. 이를 위하여 CCSDS의 관련 국제 권고사항을 검토하여야 하며, 이를 통해 도출된 세부 요구사항을 바탕으로 지상국, 달 탐사선간의 하향 링크 설계에 영향을 주는 요소들을 고려하여 달 탐사선, 채널, 지상국 모델을 각각 설정한다.

달 탐사선에서의 데이터 전송 시 송신 주파수는 X, Ku, Ka 대역의 사용을 고려하며 송신 안테나 크기 및 송신전력은 탑재체 설계의 제약으로 인해 작은 수치로 제한된다. 달 탐사선의 기준 모델을 표 1에 나타내었다[4]-[6].

지상국과 달 탐사선 사이의 다양한 환경 요소에 의해 지상국에서 수신되는 신호의 감쇠가 발생한다. 지구와 달 사이의 물리적인 거리로 인한 자유공간손실이 가장 큰 부분을 차지하며 그 외에도 대기 감쇠, 전리층 손실, 강우 감쇠, 달 전속밀도 손실이 고려된다[4]-[6]. 지상국과 달 탐사선 링크 환경 모델을 표 2에 나타내었다.

지상국 모델은 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 DSN(Deep Space Network) 해외 운용 사례를 참고하여 설정하였으며, 지상국의 기준 모델을 표 3에 나타내었다[4]-[6].

표 1. 달 탐사선 기준 모델

구 분	단위	X 대역	Ku 대역	Ka 대역
전송 주파수	MHz	8420	12200	32000
송신전력	W	1		
송신안테나직경	m	0.5		
송신안테나효율		0.7		
송신안테나이득	dBi	31.3	34.6	42.9
송신안테나손실	dB	0.4	0.3	0.25
송신 지향 손실	dB	4.4×10^{-5}	9.3×10^{-5}	6.4×10^{-4}

표 2. 지상국-달 탐사선 링크 환경 모델

구 분	단위	X 대역	Ku 대역	Ka 대역
거 리	km	384403		
자유공간손실	dB	222.6	225.9	234.2
대기 감쇠	dB	0.039	0.1	0.154
전리층 손실	dB	0.2	0.2	0.2
강우 감쇠	dB	1.0	4.67	19.2
달전속밀도손실	dB	5.4	5.0	3.96

표 3. 지상국 기준 모델

구 분	단위	X 대역	Ku 대역	Ka 대역
수신안테나직경	m	34		
수신안테나효율		0.7		
수신안테나이득	dBi	65.7	68.9	77.3
수신안테나손실	dB	0.4	0.3	0.25
수신 지향 손실	dB	0.044	0.15	0.639
잡음 온도	K	31.9	38.0	44.9

위에서 살펴본 달 탐사선, 채널, 지상국 모델을 고려했을 때 전송속도에 따른 대역 별 수신 E_b/N_0 를 그림 1에 나타내었다.

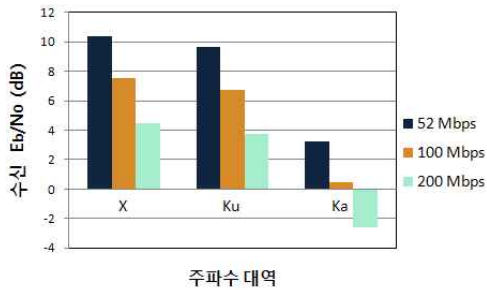


그림 1. 전송속도에 따른 수신 E_b/N_0

NASA 심우주 네트워크의 고속 전송 속도 기준인 52Mbps에서부터 100, 200Mbps로 전송 속도를 증가시킬 경우 수신 E_b/N_0 를 계산하였다. 고속 전송을 위해 OQPSK 변조 기법을 고려할 경우 비트 오류 확률 10^{-5} 을 만족하기 위해 9.6 dB의 E_b/N_0 가 요구된다. 그에 따른 링크 계산 결과는 표 4와 같다.

표 4에 나타난 결과에 의하면 X, Ku 대역에서는 전송속도 52Mbps일 경우 목표 성능을 만족하지만 전송속도가 증가하게 되면 2~6 dB 가량의 이득이 요구되며 Ka 대역에서는 6.4 dB 이상의 이득 요소가 추가되어야 목표 성능을 만족할 수 있다. 목표 성능을 만족하기 위한 방안으로 채널 부호화 기법의 적용을 고려할 수 있으며 높은 부호화 이득을 얻기 위해 터보 부호기를 DSP 프로토타입 설계에 적용한다. 부호율 1/2인 터보 부호화를 고려했을 때의 링크 계산 결과는 표 5와 같다.

표 4. 전송속도에 따른 링크 마진

	X	Ku	Ka
52 Mbps	0.7 dB	0 dB	-6.4 dB
100 Mbps	-2.1 dB	-2.9 dB	-9.2 dB
200 Mbps	-5.1 dB	-5.9 dB	-12.2 dB

표 5. 부호화 이득을 고려한 링크 마진

	X	Ku	Ka
52 Mbps	8.5 dB	7.8 dB	1.4 dB
100 Mbps	5.7 dB	4.9 dB	-1.4 dB
200 Mbps	2.7 dB	1.9 dB	-4.4 dB

터보 부호화를 적용함으로써 대부분의 경우에 목표 성능을 만족하는 것을 확인할 수 있다. OQPSK 이상의 다양한 고차 변조 기법을 적용할 경우 목표 성능을 만족시키기 위한 수신 E_b/N_0 는 더 높아지게 된다. 비트 오류 확률 10^{-5} 을 만족하기 위해 변조 기법 별로 요구되는 수신 E_b/N_0 를 표 6에 나타내었다[7],[8].

표 6. 비트 오류 확률 10^{-5} 을 만족하는 수신 E_b/N_0

변조 기법	요구 E_b/N_0
OQPSK	9.6 dB
8PSK	13.18 dB
4+12 APSK	13.9 dB

표 6에서 확인할 수 있듯이 다양한 변조 기법을 적용할 경우 통신 환경 및 플랫폼에 따라 요구되어지는 부호화 이득이 다르기 때문에 터보 부호기 설계 시 다양한 부호율을 고려하여 적용한다.

2.2 DSP 프로토타입 구조 설계

DSP 프로토타입의 전체 상위 구조를 설계하고 각 상위 블록의 기능을 수행하는 세부모듈을 구현한다. 상위 블록에서부터 하위 블록까지의 계층 구조 설계를 통해 전체 프로토타입 시스템의 통일성을 유지하고 각 모듈을 효율적으로 연동시킨다.

전체 시스템은 상위 블록으로 크게 송신단, 채널, 수신단으로 구성된다. 각 세부 모듈에서 구현되는 신호 처리 기법은 링크 상황과 플랫폼의 종류에 따라 적용되며 세부 파라미터는 채널 환경에 따라 소프트웨어적으로 변경된다. DSP 프로토타입 구조를 그림 2에 나타내었다.

송신단은 데이터 생성 모듈, CRC (Cyclic Redundancy Check) 부호화 모듈, 터보 부호화 모듈, 변조 모듈로 구성된다. 데이터 생성 모듈은 임의의 데이터 비트를 생성하고, CRC 부호화 모듈은 데이터 오류를 확인하는 CRC 비트를 계산하여 정보 데이터 비트에 첨부하는 기능을 수행한다. 미약 신호의 성능 보상을 위해 채널 환경에 따라 변화하는 부호율의 터보 부호가 터보 부호화 모듈에서 만들어진다. 상위 설정된 파라미터에 따른 변조 방식이 적용된 신호 심벌은 출력 단으로 전달된다.

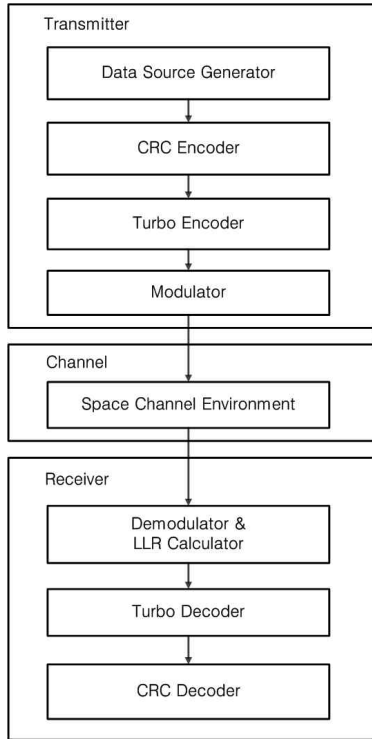


그림 2. DSP 프로토타입 구조

채널 블록에서는 우주 환경 및 링크 상황에 따라 표 2의 링크 환경 파라미터들이 적용되어 수신 신호 전력과 잡음 전력이 결정되고 그에 따른 신호를 수신단으로 전송한다. 수신단은 복조 및 LLR(Log-Likelihood Ratio) 추정 모듈, 터보 복호화 모듈, CRC 오류 확인 모듈로 이루어진다. 복조 및 LLR 추정 모듈은 수신 신호와 각 기준 심벌을 비교하여 초기 LLR값을 출력한다. 터보 복호기에서는 초기 LLR값을 입력받아 반복 복호화 과정을 거친 후 최종 LLR값을 출력한다. CRC 오류 확인 모듈은 터보 복호기에서 출력된 결과 값으로 최종 데이터 비트를 연관정하고 CRC 연산 과정을 통해 오류를 판별한다.

2.3 세부 모듈 구현

설계된 상위 구조를 바탕으로 각 세부 모듈의 동작 알고리즘을 구현한다. CRC 부호화 모듈에서 각 프레임마다 CRC 오류 검출 비트가 추가되고 수신단에서는 송신단과 동일한 CRC 생성 다항식을 이용해 전송 오류를 검출한다. CRC 비트 생성 및 오류 확인에 사용된 생성 다항식은 식 (1)과 같다[9].

$$g(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (1)$$

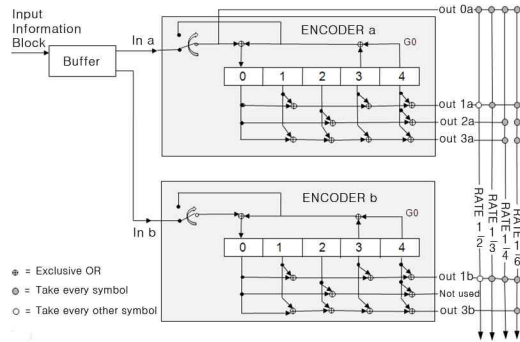


그림 3. 구속장 5인 터보 부호기

DSP 프로토타입의 채널 부호화 모듈은 CCSDS에서 심우주 통신을 위한 채널 부호화 기법으로 권고하고 있는 터보 부호화 기법을 적용한다. 터보 부호는 콘볼루션 부호기를 병렬 연결해 사용하는 부호화 기법으로 새년의 한계에 근접하는 오류 정정 능력을 갖고 있으며, 위성 통신 및 방송에도 적용되기 시작하고 있다. 그림 3에 CCSDS에서 제안된 구속장(Constraint length) 5인 터보 부호기를 나타내었다[10].

각 데이터 비트에 대한 콘볼루션 부호기들은 검사 비트를 발생 시키고 puncturing 시킴으로써 통신 환경 및 플랫폼에 따라 1/2, 1/3, 1/4, 1/6의 부호율을 갖는 터보 부호를 생성한다. 터보 부호의 복호화는 반복 복호를 사용하여 연관정을 하며, 연관정의 통계적인 측정은 LLR값을 이용한다.

데이터의 고속 전송을 위한 변조 기법으로 CCSDS에서 제안된 OQPSK, 8PSK 기법을 각각

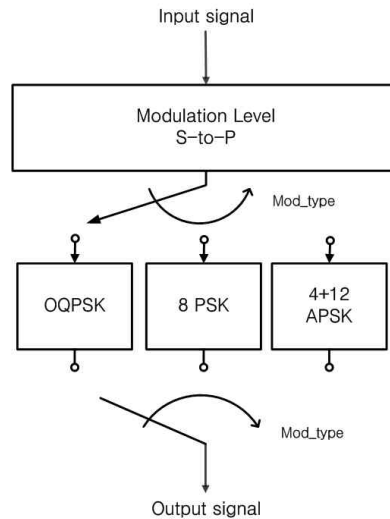


그림 4. 변조 모듈

의 세부 모듈로 구현한다. 8PSK 이상의 고차 변조 방식으로 디지털 위성방송에서 쓰이고 있으며, CCSDS Experimental Specification에서도 고려되고 있는 4+12 APSK 모듈을 추가 적용한다 [11]. 변조 모듈의 구조를 그림 4에 나타내었다.

변조 모듈에 직렬로 입력된 신호는 적용되는 변조 기법에 따라 각각 OQPSK 2비트, 8 PSK 3 비트, 4+12 APSK 4비트로 병렬 전환되어 변조된다. DSP 프로토타입의 출력 파형은 우주 통신 채널을 거친 후 수신단에서 복조된다.

2.4 성능 결과 및 분석

DSP를 이용하여 구현된 통신 시스템의 정상 작동 여부를 확인하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 이용하여 성능을 검증하였다. 변조 기법과 터보 부호화에 따른 비트 오류 확률 그래프를 도출함으로써 구현된 통신 시스템의 핵심 모듈인 변복조, 채널 부호화 및 복호화 모듈 알고리즘의 작동을 확인한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 MATLAB을 이용해 작성된 지상국과 달 탐사선 간의 링크레벨 시뮬레이터를 통하여 도출했으며 동작 알고리즘 및 링크 채널 파라미터를 DSP 프로토타입과 동일하게 설정하였다. 비트 오류 확률 도출과정은 다음과 같다. 우선 임의의 데이터 비트를 생성한 후 부호화와 변조 기법을 적용하여 송신하고 E_b/N_0 값에 따라 잡음을 더한다. 그리고 수신기에서 복원되는 신호를 데이터 비트와 비교하여 비트 오류 확률을 계산한다. 컴퓨터 시뮬레이션과 DSP는 내부 연산 처리 과정 및 하드웨어적 요인으로 인해 비트 오류 확률에서 미세한 차이가 발생할 수 있으므로 둘의 결과가 비슷한 곡선을 그리며 동일 지점으로 수렴하는 것을 확인한다.

그림 5, 6, 7에는 컴퓨터 시뮬레이션과 구현된 시스템의 변조 방식별 비트 오류 확률을 나타내었다.

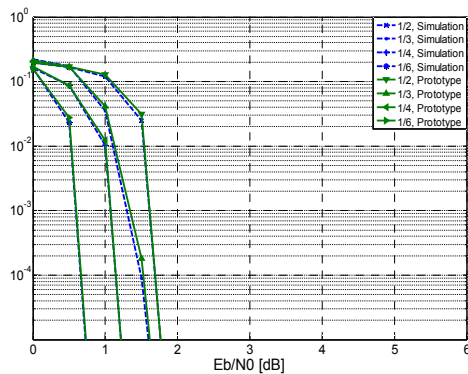


그림 5. 터보 부호화된 OQPSK의 BER

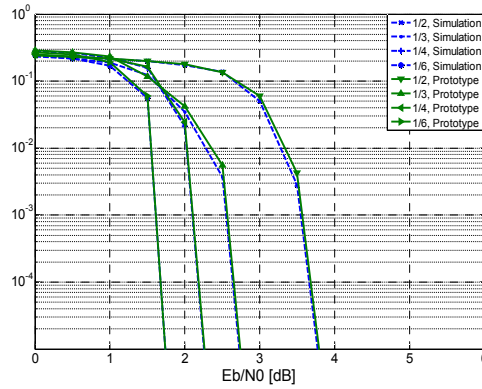


그림 6. 터보 부호화된 8PSK의 BER

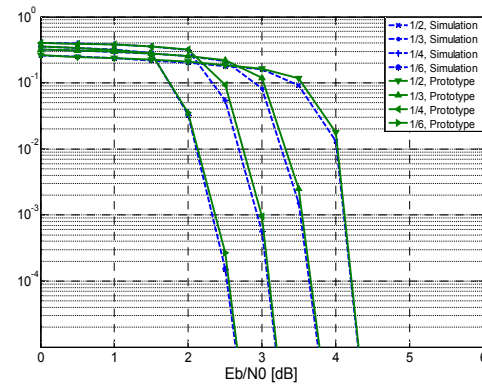


그림 7. 터보 부호화된 4+12 APSK의 BER

컴퓨터 시뮬레이션과 DSP 프로토타입의 비트 오류 확률을 비교한 그래프에서 결과가 거의 동일함을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안된 DSP 프로토타입에서는 1Mbyte의 내장 메모리와 16Mbyte의 SDRAM 메모리를 사용하며 1GHz의 클럭을 갖는 고정 소수점 프로세서를 이용하여 신호처리가 이루어진다. 전체적인 성능을 살펴보면 DSP와 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서 미세한 성능 차이가 나타난다. 이는 고정 소수점 방식을 사용하는 DSP 프로토타입에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 비해 상대적으로 제한된 비트수를 이용하여 송수신 과정을 모델링하기 때문이며 DSP 프로토타입에서 사용된 랜덤 발생기, 가우시안 잡음 발생기 함수 등에서 차이가 발생할 수 있다.

앞 절에서 지상국과 달 탐사선간의 고속 전송을 위해 요구되는 E_b/N_0 값을 나타내었다. 본 절에서 도출된 결과에 의하면 비트 오류 확률 10^{-5} 을 만족시키기 위한 E_b/N_0 값은 터보 부호화를 적용하였을 경우 OQPSK 0.7~1.8 dB, 8PSK 1.8~3.8 dB, 4+12 APSK 2.6~4.3 dB인 것을 알

수 있고 이는 고속 전송을 위한 요구조건을 만족하는 결과임을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 지상국, 채널, 달 탐사선의 기준 모델을 통하여 달 탐사 통신 시스템의 요구조건을 분석하고 DSP 프로토타입의 상위 구조를 설계하였으며 심우주 통신을 위한 국제 표준을 고려하여 각 핵심 모듈의 알고리즘을 구현하였다. 지상국과 달 사이의 거리차로 인한 미약 신호의 오류 확인 및 정정을 위하여 CRC 부호와 터보 부호를 적용하였으며 고속 전송을 위한 변조 기법으로 OQPSK, 8PSK, 4+12 APSK 기법을 세부 모듈로 구현하였다. 그리고 DSP 프로토타입의 비트 오류 확률을 도출하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 구현된 프로토타입의 정상 작동 여부 확인 및 성능 검증을 수행하였다.

지상국과 달 탐사선 간의 데이터 전송을 위한 DSP 기반 프로토타입 구현은 달 탐사 통신 시스템 개발의 기초 단계가 될 뿐만 아니라 더 나아가 심우주 통신 네트워크를 위한 기저대역 프로세서 개발의 바탕이 될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2010-0015083).

참고문헌

1) 이상률, "우리나라 달 탐사의 기술 개발 방향", KSAS 매거진 3권 1호, 한국항공우주학회, pp. 51-57, 2009년.

2) 이우주, 현광민, 조경국, 윤동원, "Design and Performance Analysis of Downlink in Space Communications System for Lunar Exploration", 한국우주과학회지 27권 1호, pp. 51-57, 2010년.

3) R. Chassaing, "Digital Signal Processing and Applications with the TMS320C6713 and TMS3206416 DSK", Wiley-Interscience, 2008.

4) S. D. Slobin, "34-m BWG Stations Telecommunications Interfaces", Document no. 810-100, Rev. E, Jet Propulsion Laboratory, NASA, Sep. 2008.

5) D. Roddy, "Satellite Communications", McGraw Hill, pp. 351-380, Jul. 2006.

6) W. S. Tai, "Deep Space Network Services Catalog", Document no. 820-100, Rev. E, Jet Propulsion Laboratory, NASA, Jul. 2007.

7) B. Sklar, "Digital Communications", Prentice-Hall International, pp. 219-224, Sep. 2002.

8) R. D. Gaudenzi, "Turbo-coded APSK modulations design for satellite broadband communications", International Journal of Satellite Communications and Networking, pp. 261-281, 2006.

9) Thomas Schmidt, "CRC Generating and Checking", Microchip Technology, 2000.

10) "Report Concerning Space Data System Standards: TM Synchronization and Channel Coding-Summary of Concept and Rationale", Green Book CCSDS 130.1-G-1, Issue 1, Jun. 2006.

11) "Research and Development for Space Data System Standards: Flexible Serially Concatenated Convolutional Turbo Codes With Near-Shannon Bound Performance For Telemetry Applications", Orange book CCSDS 131.2-O-1, Sep. 2007.