

차세대 고속 MIL-STD-1553 버스 기술 분석

정진평^{1,†} · 이상규² · 이승훈³

^{1,2,3}항공우주연구원 위성연구본부 탑재체연구단

Analysis for Next-generation High-Speed MIL-STD-1553 Bus Technology

Jin Pyong Jung^{1,†}, Sang Gye Lee² and Seung Hoon Lee³

^{1,2,3}KARI, Satellite R&D Head Office, Satellite Payload Research Office

Abstract

The MIL-STD-1553 standard has been used for over 40 years as a data bus technology for high-reliability mobile systems. However, 1 Mbps transmission speed is absolutely insufficient to implement sensor data convergence, which is an essential requirement of modern aerospace systems. In this paper, we analyze the hierarchical structure of the MIL-STD-1553B version specification and describe several methods to increase the transmission speed without losing the advantages of the existing MIL-STD-1553 bus. In addition, we analyzed the R & D cases of the high-speed MIL-STD-1553 technology, which have been conducted in leading aerospace countries.

초 록

MIL-STD-1553 버스 표준은 40여 년 동안 고 신뢰성 이동체 시스템의 데이터버스 기술로 많이 사용되어 왔다. 하지만 현대 최신의 항공우주시스템의 필수 요구사항인 센서 데이터 융합을 구현하기 위해서는 1 Mbps 전송속도는 절대적으로 부족하다. 본 논문에서는 MIL-STD-1553B 버전 규격을 중심으로 계층구조로 분석하여 기존 MIL-STD-1553 버스의 장점을 잃지 않으며 전송속도를 높이기 위한 방안을 기술하였다. 또한 항공우주 선도국가에서 수행된 고속 MIL-STD-1553 버스 기술에 대한 연구개발 사례를 분석하였으며 이를 구현하기 위해 사용된 핵심기술을 분석하였다.

Key Words : MIL-STD-1553, STANAG 7221, DATA BUS

1. 서 론

MIL-STD-1553 규격은 1960년대부터 미국 국방성에서 항공기 탑재전자장비 간의 전기적 인터페이스를 효율적으로 구현하기 위해 개발한 1 Mbps 속도의 시리얼 통신 프로토콜이다.

1973년에 MIL-STD-1553 최초 정식 규격이 배포된

이래로 1975년 MIL-STD-1553A 버전이 배포되었고 1978년에 MIL-STD-1553B 버전이 배포되었다. 현재까지의 최신본은 1986년 배포된 MIL-STD-1553B Noticed 2 이다. 유럽에서는 NATO(North Atlantic Treaty Organization, 북대서양조약기구) 회원국을 중심으로 MIL-STD-1553 규격을 차용하여 STANAG 3838 규격으로 제정하여 사용하고 있다[1](이하 MIL-STD-1553B를 줄여서 1553B라 칭하고 특정한 버전을 지정할 필요가 없을 경우 MIL-STD-1553 버스를 1553 버스 또는 1553 기술로 칭함).

Received: Oct. 25, 2017 Revised: Dec. 07, 2017 Accepted: Dec. 12, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-42-870-3574, E-mail: jjjung@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

1553B 규격은 디지털 시리얼 공용회선 방식을 사용함으로 인터페이스가 간결해지고 장비의 추가, 삭제, 변경이 복잡하지 않다는 장점이다. Fig.1과 같이 공용회선방식, 즉 버스(Bus) 방식 연결, 이므로 컨넥터 수량과 케이블 길이를 감소시켜 장비 무게를 줄일 수 있는 효과도 있다. 또한 1553B 버스는 Dual Redundant 구조를 지원하므로 전체 시스템에 대한 신뢰성을 높여 준다. 이러한 매력적인 장점으로 1553B 버스는 현재까지 40여 년 동안 항공기뿐만 아니라 위성시스템을 비롯한 군함, 전차, 민간 산업용 등의 고 신뢰성 이동체 시스템의 데이터 버스 기술로 널리 사용되고 있다 [1][2][3][4].

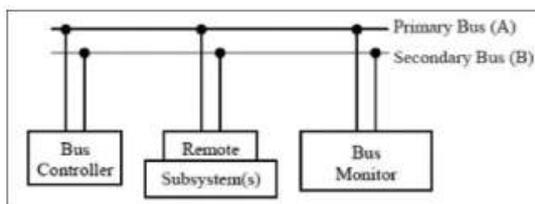


Fig. 1 Typical 1553B Bus Architecture

하지만 1553B 규격의 1 Mbps 전송속도는 현대 항공우주시스템의 요구사항인 영상데이터와 같은 대용량 센서 데이터를 융합하기에는 절대적으로 부족하다.

비교적 최근에 개발된 4세대 이상의 항공기에서는 Fig. 2와 같이 Fiber Channel 또는 Gigabit Ethernet 기술을 이용하여 센서데이터 융합을 구현하였다[5]. Fiber Channel과 Gigabit Ethernet 기술은 IT 상용시장에서 검증된 고속 전송기술이지만 1553B를 완전히 대체하기에는 비용과 시간측면에서 영향성이 매우 크다. 이런 이유로 Fig. 2와 같이 F-35 전투기에서는 영상 획득과 처리를 수행하는 시스템 간에는, 즉, 대용량 데이터 전송이 필요한 시스템 사이, ICP(Integrated Common Processor)에 Fabric Switch 기능을 두어 Star Topology로 연결하는 방식을 취하고 전통적인 통신 및 항법장치와 같은 저용량 데이터인 Command/Telemetry만 필요한 시스템 간에는 기존 1553B 버스로 연결한 형태로 설계되었다. 이는 일종의 전송속도에 따른 계층형 혼성 네트워크 구조(Hierarchical Hybrid Network Architecture)라

말할 수 있다.

본 논문에서는 기존 1553B 규격의 대표적인 특징을 기술하고 OSI(Open System Interconnection) 모델의 7 Layer 기준과 비교하여 분석했다. 관련 연구논문과 보고서를 분석하여 고속 1553 버스에 대한 연구개발 사례를 조사하였으며 그 사례에서 이용된 핵심기술 개념을 분석하였다.

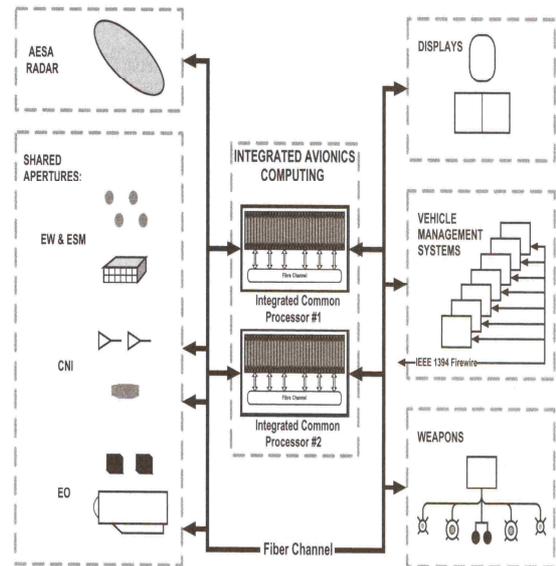


Fig. 2 F-32(JSF) Avionics Architecture

2. 본 론

2.1 1553B 규격 특성

1553B 버스는 시리얼통신, 시분할 다중전송방식의 디지털 기술을 사용한다. 하드웨어 구성은 Fig. 1과 같이 버스 컨트롤러(BC), 리모트 터미널(RT), 버스 모니터(BM) 그리고 전송매체인 케이블 버스로 구성된다 [1]. 버스 컨트롤러를 중심으로 리모트 터미널과 버스 모니터가 Multi-Drop 방식으로 연결된다. Dual Redundant를 지원해주므로 Primary Bus가 고장이라도 Hot Backup 형태로 Secondary Bus가 동작하여 지속적인 통신이 가능하다. MIL-STD-1553B 규격의 기술적 특징을 정리하면 아래의 Table 1.과 같다. 전송매체는 메인 버스와 다수의 연결 포트(Stubs)

로 구성하는 Twisted shield pair wire로 정의되어 있다. 연결방법은 Fig. 3과 같이 직접연결과 트랜스포머(Transformer)를 통한 연결방법이 있다. 트랜스포머를 통한 연결방법이 상호 간섭에 대한 신호분리와 케이블 길이 측면에 장점이 커 많이 사용된다. 전송 중 오류를 방지하기 위해 각 워드 앞부분에 3 비트의 SYNC Field와 채널코딩 용도의 패리티 비트가 가장 끝 비트에 위치한다[1].

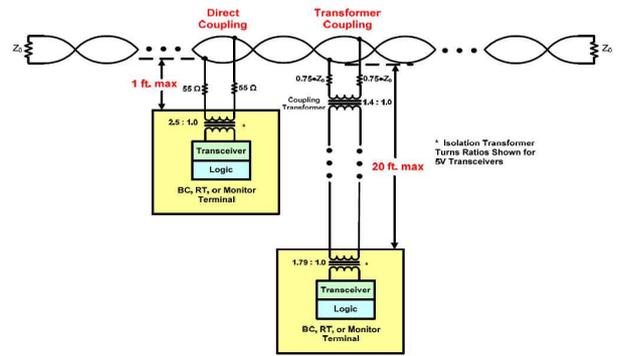


Fig. 3 1553B Coupling Methods

Table 1 MIL-STD-1553B Characteristics

Data Rate	1 MHz
Word Length	20 bits
Data Bits/Word	16 bits
Message Length	Maximum of 32 data words
Transmission Technique	Half-duplex
Operation	Asynchronous
Encoding	Manchester II bi-phase
Protocol	Command/response
Bus Control	Single or Multiple
Fault Tolerance	Typically Dual Redundant, second bus in “Hot Backup” status
Message Formats	Controller to terminal, Terminal to controller, Terminal to terminal, Broadcast, System control
Number of Remote Terminals	Maximum of 31
Terminal Types	Remote terminal, Bus controller, Bus monitor
Transmission Media	Twisted shielded pair
Coupling	Transformer and direct

최대 연결 가능한 RT 노드 수량은 31개이고 운영방식은 비동기 방식이다. 네트워크 전송기법은 반이중 방식이다.

전송 워드길이는 20 bits이며 워드 당 데이터 비트는 16 bits이다.

Word Types은 목적에 따라 아래와 같이 3가지로 정의되어 있다.

- Command words
- Data words
- Status words

각각의 워드는 Fig. 4와 같은 포맷을 가지고 있다.

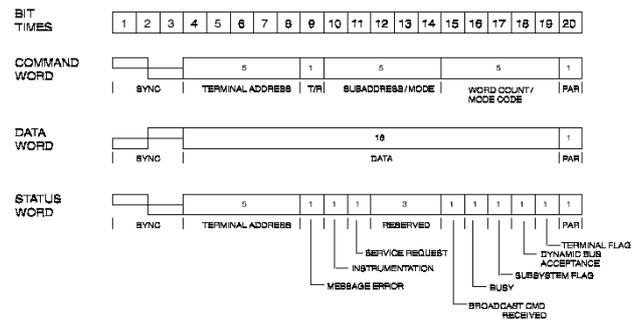


Fig. 4 Word Formats

1553B 규격에서 전송 변조방식은 단순한 ‘Serial Digital Pulse Code Modulation’을 사용하며 데이터 엔코딩은 Fig. 5와 같은 ‘Manchester II bi-phase level’를 사용한다[1]. 이 방식은 bi-phase level에서 신호가 0(zero)에서의 변이는 각 bit time의 중간 값에서 발생한다. 이 점이 NRZ(Non Return Zero) 방식과 다른 점으로 트랜스포머와 커플링하는 방식으로 데이터를 전송할 때 유리한 점이 많다.

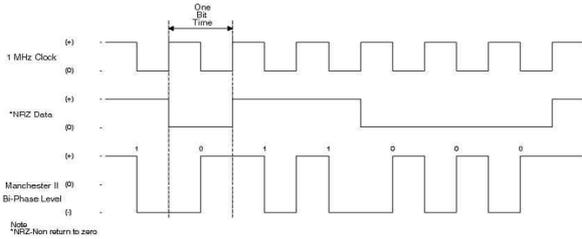


Fig. 5 Manchester II bi-phase level coding

2.2 1553B 규격 분석

2.2.1 1553B 규격 계층 구조

ISO(International Standard Organization)에서 제정한 네트워크 기본 모델인 OSI 7 Layer와 1553B 규격을 비교하면 Fig. 6과 같다[1]. OSI 7 Layer는 네트워크 통신에서 생기는 충돌 문제를 완화하기 위하여 상호접속에 필요한 통신절차를 정의하고 이 가운데 비슷한 기능을 제공하는 모듈을 동일계층으로 할당하여 모두 7 계층으로 분할한 것이다. 1553B 규격은 Fig. 6과 같이 하위 계층인 Physical Layer와 Data Link Layer 부분만 정의하고 있다.

OSI 7 Layer		MIL-STD-1553B Standard	
Layer 7	Application Layer		
Layer 6	Presentation Layer		
Layer 5	Session Layer		
Layer 4	Transport Layer		
Layer 3	Network Layer		
Layer 2	Data Link Layer	Data Link Layer Flow control on physical link Error handling & recovery H/W Addressing	
Layer 1	Physical Layer	Physical Layer H/W interface(Cable & Connection) Electrical signaling Transmission of raw bit stream	

Fig. 6 Comparison OSI 7 Layer and 1553B Std.

고속 1553 버스를 구현하기 위해서 기존 1553B 규격 중 Physical Layer에 정의된 하드웨어 연결방법인 케이블과 트랜스포머 연결방법은 유지하는 것이 호환성 측면에서 경제적인 것이다. Data Link Layer에는 흐름제어를 위한 통신 프로토콜 정의되어 있으므로 수정 없이도 고속 1553 버스 구현이 가능할 것이다. 하지만, 고속 1553 버스를 구현하기 위해서는 Physical Layer의 Signaling과 Bit Stream에 변경이 필요할 것

이다. 고속 전송을 위한 특별한 Encoding와 Modulation 기법이 필요하다.

2.2.2 Physical Layer 분석

< 케이블 및 연결방법 규격 특성 >

1553B Physical 계층에서는 네트워크 노드의 하드웨어에 대한 연결방법과 케이블을 정의하고 있다. 케이블은 Twisted shield cable을 규정하고 있다. 연결방법은 트랜스포머를 이용한 연결방법이 널리 사용된다. Fig. 7은 1553B 노드 연결에서 사용 주파수에 따른 감쇄 특성을 보여주고 있다. 10개 Studs 사용한 케이블 버스에서는 사용주파수가 1 MHz인 경우 5 dB 정도의 감쇄가 발생하지만 10 MHz에서 상대적으로 큰 20 dB 이상의 감쇄가 발생함을 보여주고 있다 [6][7].

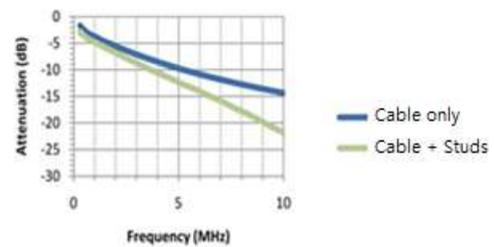


Fig. 7 Frequency Response of 1553B Cable Bus

현재의 1553B 케이블 버스에서 1 MHz보다 상당히 높은 광대역주파수를 사용하면 신호의 양적 감쇄뿐만 아니라 Fig. 8과 같이 임피던스의 부정합으로 인한 반사와 기생 캐패시턴스 증가로 인한 신호왜곡이 커져 신호의 질적 감쇄도 증가한다[6][7].

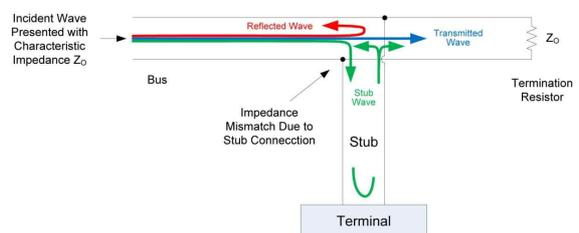


Fig. 8 Reflection Caused by Impedance Mismatch

< Data Coding 규격 특성 >

1553B에서 정의한 데이터 Encoding 방법인 Manchester II bi-phase 방식으로 1 Mbps Baseband 전송을 하면 주파수축에서 Fig. 9와 같은 Harmonic 주파수가 발생한다[6][7]. 1553B 전송 주파수인 1 MHz의 3rd Order Harmonic 주파수인 8 MHz에서 -20 dB 임을 보여준다.

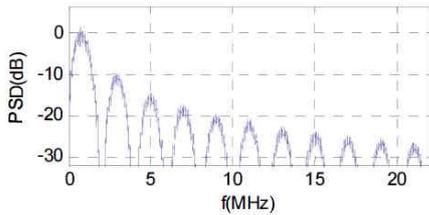


Fig. 9 1553B Data Encoding at Frequency Domain

2.2.3 Data Link Layer 분석

Data Link Layer에서는 흐름제어를 위한 통신 프로토콜에 해당하는 워드 형식, 메시지 포맷, 운용 절차 등을 정의하고 있다. 기존 1553B 버스와 호환성을 가지기 위해서, 특히 운용 소프트웨어 측면에서, Data Link Layer는 변경하지 않고 유지하는 것 적절하다.

2.2.4 전송 용량 분석

기존 1553B 케이블 버스에서 수용 가능한 최대 전송속도에 대한 해답은 Eq. 1과 같이 샤논의 전송용량 이론(Shannon's Capacity Theorem)를 이용하여 예측할 수 있다.

$$C = BW \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Eq. 1 Shannon's Capacity Theorem

여기서 BW는 전송채널의 대역폭, N은 수신기에서 획득되는 잡음수준, S는 수신기에서 획득되는 신호수준을 의미한다. 통칭하여 S/N는 신호대 잡음비 또는 SNR(Signal to Noise Ratio)라 한다.

Fig. 9와 참고문헌[6]에 의하면 1553B 규격에서 정의한 케이블과 연결방법으로 이론적 수용 가능한 채널 대역폭(BW)은 20 ~ 40 MHz 정도이다.

잡음수준(N)은 1553B 규격과 유사한 케이블 형태인 Unshielded twisted pair 케이블을 사용하는 VDSL(Very-high-speed Digital Subscriber Loop) 통신의 잡음모델을 이용했다. VDSL은 상용 고속 모뎀(Modem) 규격으로 흔히 전화선을 사용한 고속 인터넷 통신방식으로 알려져 있다. VDSL 잡음모델의 Spectral power density는 -140 dBm 정도이다[8].

신호수준(S)은 1553B 규격 전송채널인 Fig. 7, 8과 같이 케이블 버스의 신호 손실(Signal Loss)에 영향을 받는다. 당연히 전송 출력을 높이면 손실을 보상할 수 있으나 타 시스템에 간섭을 방지하기 위한 EMI(Electric Magnetic Interference) Radiated Emission(RE) 규격을 만족시키는 범위 안에서만 출력을 증가시킬 수 있다. 항공우주시스템에 필수적으로 적용되는 MIL-STD-461 규격의 RE 제한 값을 전력으로 환산하여 적용한다.

최종적으로, 샤논의 전송용량 이론을 사용하여 Worst case 조건으로 계산하면 Table. 2와 같다 [6][7].

Table 2 Theoretical Capacity Estimates

Bandwidth	Average Rx SNR	Shannon Capacity
20 MHz	50 dB	appr. 300 Mbps
40 MHz	44 dB	appr. 500 Mbps

사용 대역폭(BW)은 전송 채널 또는 전송 매체의 특성에 따라 고정되지만 신호대 잡음비(SNR)은 변조방식에 따라 스펙트럼 효율이 달라지므로 적절한 변조방식을 선택하여 SNR를 높일 수 있다.

2.3 고속 1553 버스 구현 기술

2.3.1 고속 1553 기술 연구개발 사례

2004년 미 공군에서 기존 1553B 기술을 개선하기 위한 핵심적인 요구사항을 문서로 배포하였다. 그 내용은 아래와 같다.

- 기존 1553B 버스에서 1 Mbps와 병행사용 가능

한 상태에서 200 Mbps 이상의 전송속도 만족

- BER(Bit Error Rate)은 10^{-12} 이하

위와 같은 요구사항을 만족시키기 위해 항공분야 업체를 중심으로 Table. 3와 같이 다양한 연구가 수행되었다[8][9][10][11][12].

Table 3 Summary of Solution for High-speed 1553

Solution	Provider/ Release year	Data rate [Mbps]	Feature
EBR-1553	Actel/ 2006	10	Using RS-485 Signaling
Turbo-1553	DDC**/ 2010	5	Concurrent with 1553B Signaling
Hyper-1553	DDC/ 2010	100	Concurrent with 1553B Cabling
STANAG 7221	Edgeware /2016	100	Concurrent with 1553B BUS

* DoD : Department of Defence

** DDC : Data Device Corporation

ERB-1553(Enhanced Bit Rate 1553)은 대표적으로 Actel社에서 나온 FPGA Core 기술로 RS-485 트랜시버를 사용하여 스타형 토폴로지로 노드를 연결한다. 10 Mbps까지 가능하나 실제적 적용된 사례는 거의 없다.

Turbo-1553은 1553B 부품업체로 유명한 DDC社에서 기존 1553에 대한 확장 가능성과 범위를 확인하기 위한 연구로 데이터 속도만 5 Mbps까지 높이고 Modulation, Data coding, 연결방식은 1553B 규격을 유지한 개념이다. 이 연구로 기존 1553B 신호와 케이블을 변경하지 않고 200 Mbps까지 Upgrade할 수 있음을 확인하였다.

HyPer-1553(High Performance 1553)은 Modulation, Data coding은 고속 전송을 위해 변경하고 케이블 및 연결방식은 기존 1553B 방식을 유지하

여 전송속도를 200 Mbps까지 높이기 위해 시도되었다. 이 기술은 이미 2005년 DDC社가 미공군 F-15 항공기를 HyPer-1553기술을 사용한 버스로 개조하여 성공적으로 실증하였다. 당초 계획은 미공군에서 이 기술을 대상으로 MIL-STD-1553C로 표준화할 계획이었으나 이라크 전쟁으로 인한 개발비 축소로 무산된 것으로 알려져 있다[11].

STANAG 7221은 그 동안의 광대역 1553B 기술을 검증하고 표준화한 것이다. NATO 회원국이 국제적 컨소시엄을 구성하여 10여 대 비행기와 헬기에 실증하였다. 최종적으로 캐나다 Edgewater社의 E1553® 기술이 채택되었다. 2015년에 실증을 완료하여 STANAG 7221(Broadband, Real-Time Data BUS)으로 완성되어 배포되었다. 하지만 이 규격은 NATO 회원국 및 관련 협력국 정부기관에만 배포되도록 결정되었으므로 산업체에서는 해당 정부기관을 통해서만 배포받을 수 있다[6]. 현재 시장에 나와있는 STANAG 7221 제품은 Edgewater社의 PMC(PCI Mezzanine Card)형태가 유일한 것으로 보인다[XX]. STANAG 7221 규격과 제품에 대해 공개된 기술자료는 아주 제한적이다[9][10].

2.3.2 고속 1553 버스 구현 개념

고속 1553 버스 구현을 위한 가장 최신 기술인 STANAG 7221 규격은 엄격한 배포정책으로 확보가 불가능하다. 참조 문헌의 관련 논문을 참고하여 고속 1553 버스를 구현하기 위한 구현 개념을 분석하였다 [11][12].

고속 1553 버스용으로 고속인터넷 통신 규격인 VDSL((Very-high-speed Digital Subscriber Loop) 통신기술이 가장 매력적이다. VDSL 통신은 주파수분할 방식의 일종의 DMT(Discrete Multi-Tone) 변조방식을 사용한다. DMT 방식은 Fig. 10과 같이 이동통신에서 많이 사용하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식과 유사하다. 전체 전송대역을 다수의 협대역 직교 부채널로 분할하고, 각 서브채널 별로 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 변조하여 데이터를 동시에 전송하는 개념이다. 이렇게 함으로써 1553B 케이블 버스에 고주파 신호를 사용할 시 발생하는 Burst와 Harmonic 잡음에 강한 통신을

구현할 수 있다.

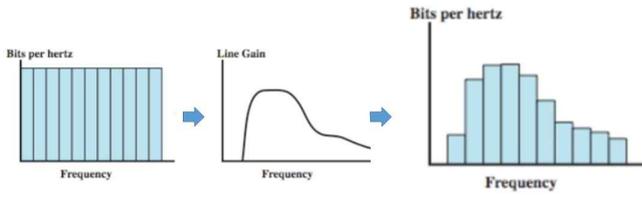


Fig. 10 Discrete Multi-Tone Concept

이론적으로는 기존 1553B 케이블 버스에 수용한 전송속도는 Table 2와 같이 약 300 Mbps 정도이지만 충분한 시스템 마진을 고려하여 100 Mbps를 목표로 가정한다.

Fig. 11와 같이 기존 1553B 전송에서 발생하는 1 MHz Harmonic Noise를 배제하기 위해 이격주파수를 20 MHz로 설정한다. Fig. 11과 같이 고속 1553 통신용 주파수 대역은 20 MHz ~ 50 MHz로 할당하였다. 송신기에서는 사용 주파수대역을 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)변환하여 여러 개의 서브 채널로 나눈 후 각 주파수 별로 각각의 데이터를 변조하게 된다. Fig. 10과 같이 각각의 서브 채널에 따른 출력 편차를 주기위해 DAC(Digital Analog Conversion) 변환을 하게 된다. 수신기에서는 그 역으로 ADC 변환 후 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 하게 된다.

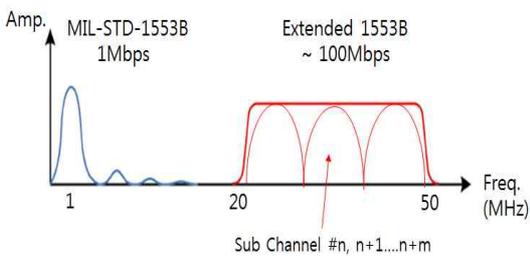


Fig. 11 Frequency Spectrum of Legacy 1553B and High-speed 1553

Fig. 12는 기존 1553B와 병행하여 사용 가능한 고속 1553 버스 구조이다[8][12]. 고속노드 트랜시버의 AFE(Analog Front-End)에는 기존 1 MHz와 고속 1553에 해당하는 2 가지의 BPF(Band Pass Filter)가 필요할 것이다. Controller 부분은 데이터 흐름제어를 위한 로직이 들어갈 것이다. 고속 데이터에 대해서는

전송 중 오류를 감지 및 정정을 위한 Parity Check 보다 성능이 뛰어난 채널 코딩방식이 필요할 것이다. RS(Reed Solomon) 코드가 좋은 예일 것이다.

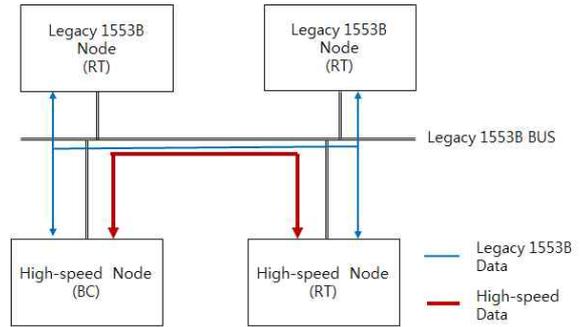


Fig. 12 System Architecture of 1553B compatible bus system

3. 결 론

MIL-STD-1553 버스 표준은 40여 년 동안 고 신뢰성 이동체 시스템의 데이터 버스 기술로 많이 채용되고 왔다. 하지만 현대 최신의 항공우주시스템의 필수 요구사항인 센서 데이터 융합을 구현하기 위해서는 전송속도를 개선할 필요가 있다. 여러 항공우주 선도 국가에서 고속 1553 버스를 구현하기 많은 연구가 있어 왔다. 본 논문에서는 기존 1553 버스의 장점을 잃지 않으며 전송속도를 높이기 위한 구현방안을 기술하였다. 앞으로 E/L(Eport License)을 통해 STANAG 7221 문서를 확보하여 상세 기술사양을 확인하고 필요하다면 STANAG 7221 개발용 키트를 구매하여 적용성을 확인할 예정이다.

References

[1] “Complete On-Line Reference MIL-STD-1553” at www.milstd1553.com
 [2] S. U. Yang, S. C. Lee, “A Study on the Trend of an Avionics System Software Development”, *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 60 - 66
 [3] Sungshin Lim, Hansang Jo, Jonmoon Kim, Chaecil

- Song, "A Study on the Aviation Software Design for Redundancy", *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 8, No. 8, 2014, pp. 21 - 26
- [4] J.P. Jung, "Analysis for Next-generation Broadband MIL-STD-1553 Bus", *SASE 2017 Fall Conference*, November 2017
- [5] J.P. Jung, "Fibre Channel Standards and Study on Application Case to Advanced Avionics Architecture", *KSAS 2008 Fall Conference*, pp. 574-577, 2008
- [6] M. G. Hegarty, "HIGH PERFORMANCE 1553 : A FEASIBILITY STUDY," *IEEE DASC 04. 23rd*, 2004
- [7] M. G. Hegarty, "MIL-STD-1553 Evolves with the Times," Data Device Corporation White Paper, June 2010
- [8] Chunping HOU, "Performance Analysis of High-Speed MIL-STD-1553 Bus System Using DMT Technology", *The 8th International Conference on Computer Science & Education*, April 2013, Colombo, Sri Lanka
- [9] K.Padmanabham, "A Review of MIL-STD-1553 Bus Trends and Future", *IJARCCCE Vol.5, Issue 8*, August 2016
- [10] "Core1553BRT-EBR Enhanced Bit Rate 1553 Remote Terminal" at www.actel.com
- [11] "MIL-STD-1553 and STANAG 7221", Intelligent Aerospace, April 2017
- [12] "STANAG 7221 Overview" and "EHS-PMC5602 Data Sheet" at www.edgewater.ca