

## 가변 데이터 전송 가능한 텔레메트리(Telemetry) 송신기

# The Telemetry Transmitter with Variable Data rate Transmission

김 장 희 · 홍 승 현 · 박 병 관 · 김 복 기 · 김 효 종\*  
단암시스템즈

Jang-Hee Kim · Seung-Hyun Hong · Byong-Kwan Park · Bok-ki Kim · Hyo-Jong Kim\*  
Danam Systems, Gyeonggi, 13930, Korea,

### [요 약]

본 논문에서는 가변 데이터 전송 가능한 텔레메트리 송신기의 구조에 대해 연구하였다. 가변 데이터 전송을 위하여 가변 컷오프 특성을 가지는 VPMF (variable pre-modulation filter)와 가변입력 샘플레이트 변환기 (variable input sample rate converter)가 결합된 구조를 제안한다. VPMF는 일반적인 PMF (pre-modulation filter)와 동일하게 변조 전 신호의 고주파 성분을 억제하여 RF (radio frequency)신호의 대역을 제한하는 특성을 지니며, 추가적으로 입력 데이터율에 따라 가변 컷오프 특성을 갖는다. 가변입력 샘플레이트 변환기는 입력 데이터율 변경 시 추가적인 구조변경 없이 입력 데이터율과 무관하게 출력을 일정한 샘플링 속도로 변환하는 기능을 갖는다. 추가적으로 실시간 변화하는 데이터양에 대응하기 위해 VPMF와 가변입력 샘플레이트 변환기를 능동적으로 제어하는 소프트웨어 프로그램 기법을 제안한다. 제안 방법을 적용하여 시뮬레이션과 실제 제작을 통하여 입력 데이터율 390 kbps~25 Mbps 범위에서 IRIG (inter-range instrumentation group) 표준의 99% 전력 대역폭, null-to-null 대역폭, 1st IMD (inter modulation distortion) 비교 결과 규격을 만족하는 데이터 전송이 가능함을 확인하였다.

### [Abstract]

In this paper, We have studied the structure of a Telemetry Transmitter capable of transmitting variable data rates. This paper proposed a structure combining variable pre-modulation filter with cutoff characteristic with variable input sample rate converter. Variable pre-modulation filter has the same characteristics as pre-modulation filter and is converted to a constant sampling rate without structural changes according to the variable input data rate. We propose a software program that actively controls variable pre-modulation filter and variable input sample rate converter to respond to real-time changing data.

**Key words** : Telemetry, Transmitter, Pre-modulation filter, Sample rate conversion, Variable data rate transmission.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.1.53>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 11 February 2020; Revised 12 February 2020  
Accepted (Publication) 25 February 2020 (28 February 2020)

\*Corresponding Author : Hyo-Jong Kim

Tel: +82-31-538-6000

E-mail: hjkim@danam.co.kr

## I. 서론

텔레메트리 시스템은 직접 모니터링 할 수 없는 환경에서 원격 측정 데이터를 무선으로 받아 볼 수 있도록 정확한 정보를 전송하는데 목적이 있다. 원격 측정 데이터는 그림 1에서 보는 바와 같이 전기, 기계, 열과 같은 저용량의 성능 데이터부터 음향 및 영상과 같은 고용량의 운용 환경 데이터까지 다양한 형태가 될 수 있다. 개발자는 측정 데이터를 이용하여 제품의 성능을 개선하거나 운용 환경 데이터를 이용하여 효율적인 시스템 운용을 할 수 있으므로 신호 전송 시 품질이 유지되도록 하는 것이 중요하다 [1].

일반적으로 텔레메트리 시스템은 PCM (pulse code modulation) 부호화 신호를 주파수 변조 (FM; frequency modulation)하여 송신하는 구조로 설계된다. 또한, PCM 부호화 신호는 주파수 변조 전에 위상의 급격한 변화 성분을 억제하여 스펙트럼 효율을 높이기 위해 저역통과 필터링 되는데, 이 때 사용되는 저역통과 필터를 PMF라고 한다.

IRIG표준에 의하면 PMF는 PCM 신호 속도의 0.7배의 -3 dB 대역폭을 갖는 선형위상 특성의 필터를 권고한다 [2]. 통상적으로 PMF는 원격 측정 데이터의 종류 및 사용 목적에 따라 개발 초기 단계에서 사양을 결정하여 설계되고, 설계된 PMF를 적용하여 텔레메트리 송신기가 제작된다. 텔레메트리 송신기와 같은 하나의 장치를 개발하는 과정은 성능시험, 환경시험, 인증시험 같은 연속적인 개발 시퀀스를 수행하며 오랜 시간과 많은 비용이 필요하다. 만약 이러한 개발 과정 중 개발 장치의 운용 목적 또는 환경이 달라지면 원격 측정 데이터의 양이 변해야하는 상황이 발생되고 이런 경우 첫 단계부터 다시 개발해야하는 어려움이 있다 [3].

이에 본 논문에서는 운용 목적 및 환경의 변화에 따라 발생하는 원격 측정 데이터 양의 변화 요구 조건에 부합되는 가변 컷오프 특성을 갖는 VPMF와 하드웨어 구조 변경 없이 가변되는 입력 샘플링 속도를 고정으로 변환하여 출력하는 가변입력 샘플레이트 변환기를 제안한다. 추가적으로 실시간 변화하는 원격 측정 데이터양에 대응하기 위해 VPMF와 가변입력 샘플레이트 변환기를 능동적으로 제어하는 소프트웨어 프로그램 기법을 제안한다.

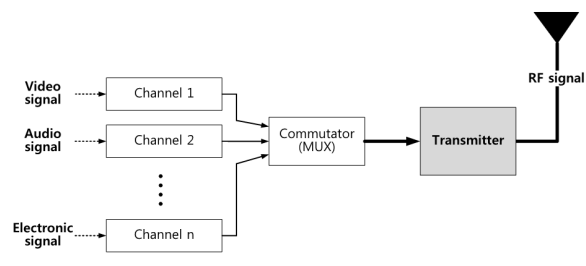


그림 1. 텔레메트리 시스템 구성도  
Fig. 1. Telemetry system configuration diagram.

본 논문의 2.1절에서는 가변 데이터율 전송을 위해 VPMF와 가변입력 샘플레이트 변환기를 갖는 원격측정 송신기의 구조와 동작에 대하여 기술한다. 2.2절에서는 원격측정 송신기의 주요 블록인 PMF의 설계 방법에 대해 기술하고, 2.3절에서는 가변입력 샘플레이트 변환기의 설계 방법에 대해 기술한다. 3장에서는 시뮬레이션, 제작 및 측정 결과를 제시한다.

## II. 가변 데이터 전송 기법

### 2-1 가변 데이터 전송 구조

텔레메트리 시스템의 운용 목적 및 환경의 변화에 따른 데이터 양의 변화에 대응하기 위해 가변 데이터율 전송이 가능한 구조가 요구된다. 이에 본 논문에서는 VPMF와 가변입력 샘플레이트 변환기를 함께 사용하여 추가 구조변경 없이 가변 데이터율 전송이 가능한 효율적인 시스템 구현 기법을 제안한다.

레벨변환기(level converter), VPMF, 가변입력 샘플레이트 변환기, FM 변조기(fm modulator)로 구성된다. 입력된 텔레메트리 PCM 데이터는 레벨변환기를 통해 NRZ-L (non-return-to-zero level) 데이터로 변환되고, 변환된 NRZ-L 데이터는 가변 데이터율 전송이 가능하기 위해서 능동적으로 제어하는 소프트웨어를 통해 가변된 데이터율 값을 입력받고 입력된 값을 기준으로 NCO (numerical complex oscillator)를 통해 만들어진 가변된 데이터율과 동기된 클럭으로 동작되는 VPMF에 데이터율의 8배로 오버샘플링되어 입력된다. 입력된 데이터는 VPMF에 의해 데이터율의 0.7배의 대역폭으로 대역 제한되어 출력되고, 대역 제한된 신호는 추가적인 하드웨어 변경없이 가변 데이터율 전송이 가능하도록 입력 데이터율에 무관하게 가변입력 샘플레이트 변환기를 통해 100 Msps의 일정한 샘플링 속도로 변환 후 FM 변조기로 입력된다. FM 변조된 데이터는 DAC(digital analog converter)로 전달된다. 이러한 동작으로 VPMF와 가변입력 샘플레이트 변환기를 사용한 구조의 송신기는 추가적인 하드웨어 변경 없이 가변 데이터율 전송이 가능하게 한다.

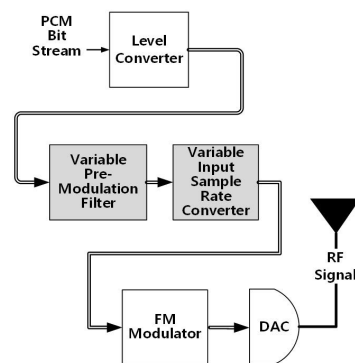


그림 2. 송신기 신호처리 구성도  
Fig. 2. Block diagram of signal processing at transmitter.

2-2 가변 컷오프 특성 PMF

PMF의 목적은 FM 변조 전 PCM 데이터의 상승 및 하강 엣지에 존재하는 고주파 성분을 억제함으로써 FM 변조 후 RF 신호의 Side-lobe를 줄이는 대역 제한을 유도하는 것에 있다. RF 신호의 대역을 제한함으로써 인접 채널과의 주파수 간섭을 줄여 주파수 효율을 높일 수 있다. 그림 3은 PMF에 입력되는 PCM 데이터와 PMF의 출력을 시간 영역에서 나타내었다. 그림 4는 PMF를 사용하지 않은 경우와 사용한 경우의 RF 신호의 대역 제한을 나타내었다. 그림 4와 같이 PMF가 없을 경우 Side-lobe가 많이 발생함을 확인하였다. IRIG 표준에 의하면 PMF의 -3 dB 대역폭이 데이터율 0.7배 이상일 경우 BER (bit error rate) 성능의 저하가 없어 권고하고 있으며, 데이터율의 0.5배의 대역폭을 갖는 필터를 사용하는 경우 약 1 dB 성능 저하가 발생하게 된다 [4]. 따라서 본 논문에서는 -3 dB 대역폭이 데이터율 0.7배 이상인 VPMF를 설계하여 사용한다[2].

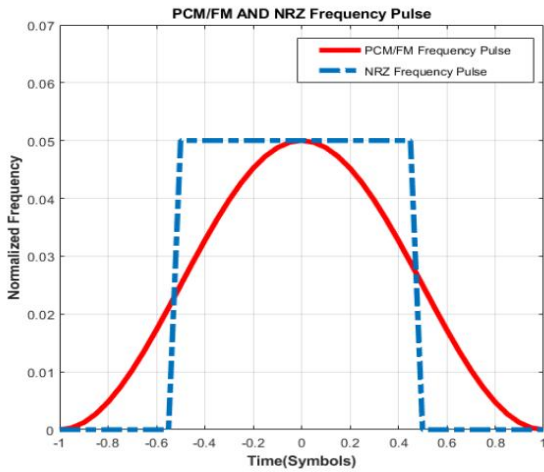


그림 3. PMF의 입출력 파형  
Fig. 3. In/Out waveform of PMF.

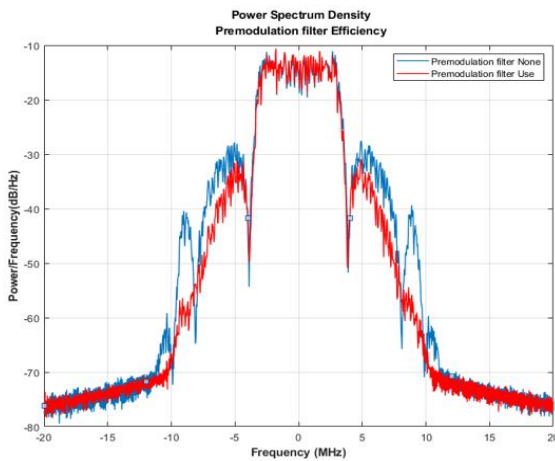


그림 4. PMF의 효과  
Fig. 4. Effect of PMF.

표 1. VPMF의 설계 사양

Table 1. Specification of variable pre-modulation filter.

Item	Specification
Modulation	PCM/FM
Signal Expression	NRZ-L
Data rate ( $f_b$ ) Range	390 kbps ~ 25 Mbps
Stop-band Attenuation	60 dBc
Phase Characteristic	Linear phase
-3dB Bandwidth	$0.7 \times f_b$

PMF 설계는 일반적인 디지털 필터 설계 과정과 같이 시스템이 갖추어야 할 성질에 관한 사양의 결정, 인과적 이산 시스템을 사용한 사양의 근사화 그리고 시스템의 실제 구현으로 이루어지는 세 단계를 거쳐 설계된다 [5].

본 논문에서는 표 1과 같이 VPMF의 사양을 IRIG 표준에 따라 전송 가능한 데이터율 범위는 390 kbps ~ 25 Mbps, -3 dB 대역폭은 데이터율의 0.7배 그리고 차단 주파수의 감쇄 특성은 60 dBc로 정한다[5].

일단 필터 사양이 결정되면, 다양한 개념과 수학을 사용하여 사양에 근사화된 필터 표현을 얻는다. 본 논문에서는 근사화 방법으로 식 (1)과 그림 5와 같이 선형 위상 FIR(finite impulse response) 구조를 이용하여 PMF의 전달함수(필터 표현)를 도출한다. 식 (1)에서  $z$  는 원점,  $M$  은 필터 길이를 나타낸다.

마지막으로 도출된 전달 함수를 실제 구현하기 위해 필터 탭 길이와 필터 계수를 창 함수 설계 기법으로 도출한다. 본 논문에서는 가능한 좁은 Main-lobe 폭과 작은 Side-lobe 감쇠를 갖도록 저지특성이 좋고, Main-lobe 대역폭 특성이 우수한 식 (2)의 Blackman 창 함수를 이용한다 [5]. 식 (2)에서  $M$  은 필터 길이를 나타낸다. 이상적인 필터의 무한 임펄스 응답에 Blackman 창 함수를 곱하고 유한 임펄스 응답으로 근사화하여 필터 계수를 도출한다. 필터 탭 길이는 64로 정한다.

$$H(z) = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{M-1} z^{-(M-1)} \quad (1)$$

$$= \sum_{n=0}^{M-1} a_n z^{-n}$$

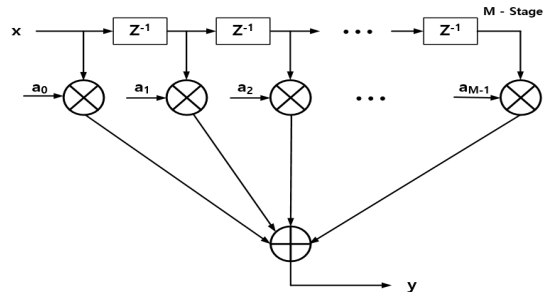


그림 5. FIR 구조 PMF  
Fig. 5. PMF of FIR structure.

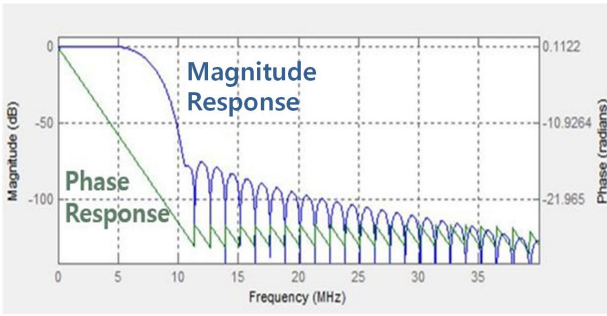


그림 6. VPMF 계수 계산  
 Fig. 6. Calculating coefficient of VPMF.

$$w[n] = \begin{cases} 0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi n}{M-1}\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

그림 6은 MATLAB R2017b FDA 툴을 이용하여 입력 데이터율 10 Mbps 기준의 필터 주파수 응답특성 화면이다. 주파수 응답특성 그래프는 10 MHz의 0.7배인 7 MHz의 컷오프 특성을 가지며, 위상특성 그래프는 주파수에 선형적으로 비례하는 선형위상특성을 나타내어 PMF 권고사항 및 설계 사양을 만족하도록 설계한다. 표 2는 이를 통해 도출된 필터 계수를 나열한 표이다.

표 2. 설계된 필터 계수  
 Table 2. Coefficient of designed filter.

n	coefficient	n	coefficient	n	coefficient	n	coefficient
1	0	17	0.003976	33	0.174995	49	0.003976
2	-8.69E-06	18	0.007657	34	0.165656	50	0.00043
3	-2.64E-05	19	0.009962	35	0.139578	51	-0.002
4	-2.06E-05	20	0.009284	36	0.10207	52	-0.00298
5	5.14E-05	21	0.004547	37	0.060419	53	-0.00274
6	0.000211	22	-0.00413	38	0.022057	54	-0.00181
7	0.000422	23	-0.01502	39	-0.00719	55	-0.00073
8	0.000578	24	-0.02482	40	-0.02428	56	9.47E-05
9	0.000518	25	-0.02927	41	-0.02927	57	0.000518
10	9.47E-05	26	-0.02428	42	-0.02482	58	0.000578
11	-0.00073	27	-0.00719	43	-0.01502	59	0.000422
12	-0.00181	28	0.022057	44	-0.00413	60	0.000211
13	-0.00274	29	0.060419	45	0.004547	61	5.14E-05
14	-0.00298	30	0.10207	46	0.009284	62	-2.06E-05
15	-0.002	31	0.139578	47	0.009962	63	-2.64E-05
16	0.00043	32	0.165656	48	0.007657	64	-8.69E-06

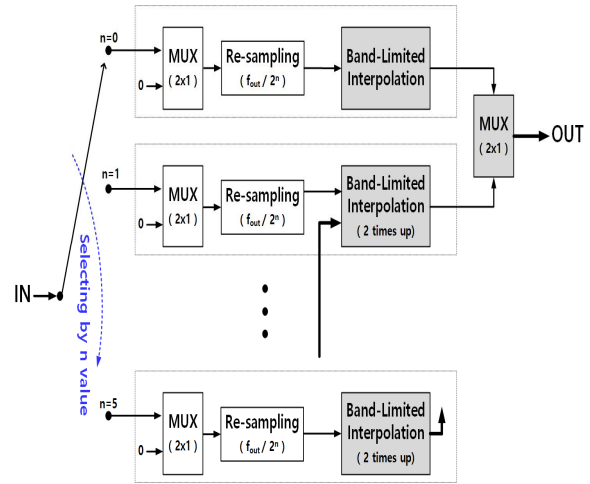


그림 7. 가변입력 샘플레이트 변환기 구성도  
 Fig. 7. Block diagram of variable input sample rate converter.

### 2-3 가변입력 샘플레이트 변환기

본 논문에서는 앞절에서 설계된 VPMF와 정해지지 않은 샘플레이트를 갖는 입력에도 능동적으로 제어하는 소프트웨어를 통해 설정된 고정 샘플레이트로 변환하여 샘플을 출력하는 가변입력 샘플레이트 변환기를 함께 사용한 송신기 구조를 사용하여 추가적인 하드웨어 구조 변경 없이 가변 데이터율 전송이 가능하게 한다.

그림 7은 가변입력 샘플레이트 변환기의 구성도이다. 가변입력 샘플레이트 변환기는 일정한 가변입력 대역을 처리하는 리샘플링(re-sampling) 및 대역제한(band-limit) 필터 여러 개를 계단식 구조로 묶어서 구성된다[6]. n 값은 입력 데이터율에 따라 소프트웨어에 의해 자동적으로 결정되는 값이며, n 값에 따라 입력된 데이터가 통과하는 대역제한 리샘플링 필터의 차수가 변경되는 구조이다. 예를 들어, 입력 데이터율에 따라 소프트웨어가 n을 1로 결정하는 경우, 입력 스위치가 1번의 MUX로 선택되고 입력된 데이터는 2개의 대역제한 리샘플링 필터를 통과하여 출력된다.

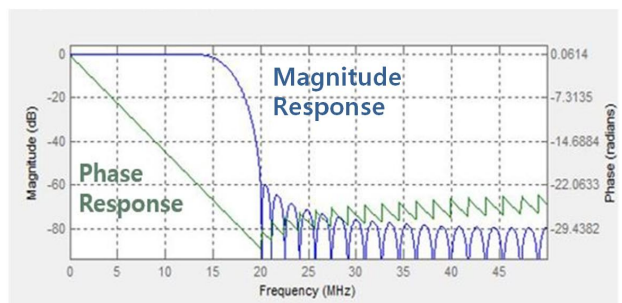


그림 8. 대역제한 리샘플링 필터 계수 계산  
 Fig. 8. Calculating coefficient of band-limited re-sampling filter.

표 3. 샘플레이트 변환 개요

Table 3. General outline of sample rate

n	data rate ( $f_b$ ) Mbps	VPMF clock ( $f_p$ ) MHz	Re-sampling frequency ( $\frac{f_{out}}{2^n}$ ) MHz
0	12.5 ~ 25	100 ~ 200	100
1	6.25 ~ 12.5	50 ~ 100	50
2	3.125 ~ 6.25	25 ~ 50	25
3	1.5625 ~ 3.125	12.5 ~ 25	12.5
4	0.78125 ~ 1.5625	6.25 ~ 12.5	6.25
5	0.390625 ~ 0.78125	3.125 ~ 6.25	3.125

$$\frac{f_{out}}{2^n} \leq f_p < \frac{f_{out}}{2^{n-1}} \quad (3)$$

$$\frac{f_{out}}{2^{n+3}} \leq f_b < \frac{f_{out}}{2^{n+2}}$$

식 (3)은 가변 데이터 전송을 위한 고정 샘플레이트 변환 수식이며, 입력 데이터율에 따른 VPMF 동작 주파수, DAC에 고정 샘플레이트(100 Msps) 전달을 위한 샘플링 주파수 값의 관계를 나타낸 것이다.  $f_b$ 는 입력 데이터율,  $f_p$ 는 VPMF의 동작 주파수,  $f_{out}$ 은 DAC로 출력되는 샘플링 주파수를 나타낸다. 식 (3)을 이용하여 입력 데이터율에 따른 샘플레이트를 표 3과 같이 나타낼 수 있다. 표 3의 n 값은 해당된 입력 데이터율에 따라 자동적으로 결정되는 값이며, 입력 데이터율이 달라짐에 따라 n값을 달리하여 가변 데이터 전송이 가능하도록 한다. 예를 들어 입력 데이터율  $f_b$ 가 5 Mbps 인 경우 SW (software)는 입력되는 데이터와 클럭을 카운트하여 5 Mbps라는 데이터율 값을 산출한다. 그리고 산출된 데이터율 값을 가지고 표 3의 두번째 열과 비교하여 n값을 2로 결정한다.

n값이 결정되면  $f_p$ 는 5×8 MHz로 동작하며 2개의 대역제한 리샘플링 필터를 거친 100 Msps 출력이 FM 변조기로 입력된다.

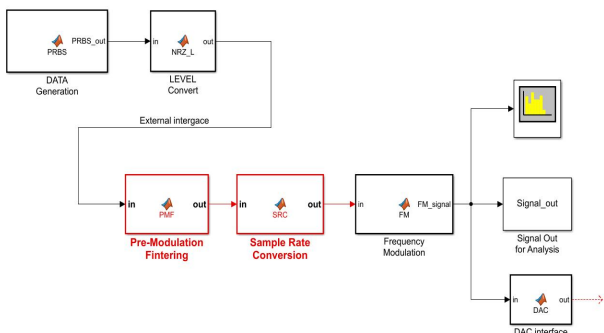
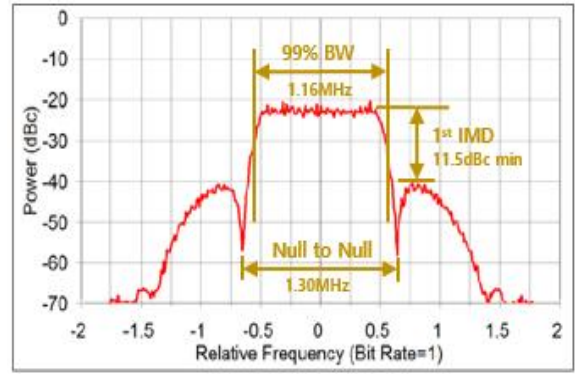
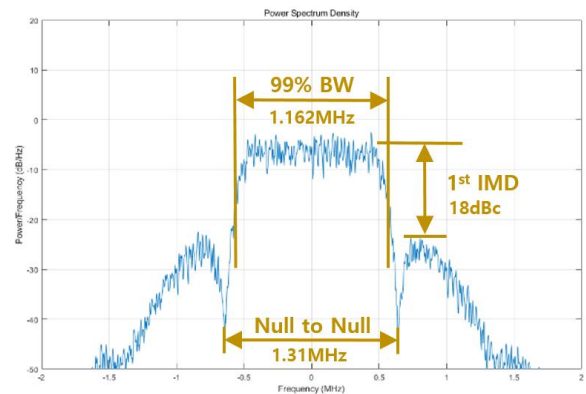


그림 9. 시뮬레이션 구성도

Fig. 9. Simulation schematic diagram.



(a) IRIG-STD



(b) Simulation result

그림 10. IRIG 표준 PCM/FM 파형과 시뮬레이션 파형

Fig. 10. Waveform PCM/FM in IRIG STD and simulation result.

### III. 설계 및 제작

#### 3-1 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 데이터율의 가변 전송 구조에 대한 검증 위하여 Mathwork사에서 제공하는 Matlab R2017b를 이용하여 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이션 구성은 그림 9와 같이 데이터 생성 블록에서 랜덤데이터 (PRBS; pseudo random binary sequence)를 생성하고, 생성된 데이터는 레벨변환기로 입력되어 NRZ-L 데이터로 변환된다. 변환된 NRZ-L 데이터는 VPMF로 입력되어 대역이 제한되고, 대역 제한된 신호는 가변입력 샘플레이트 변환기로 입력된다. 가변입력 샘플레이트 변환기에서 변환된 신호는 FM 변조기로 입력되어 FM 변조된다. 시뮬레이션 검증을 위하여 그림 10과 같이 랜덤데이터 입력에 대한 출력신호의 스펙트럼 파형을 IRIG 표준과 비교 분석한다. 1 Mbps 입력 데이터율에 대한 시뮬레이션 결과 99% 전력 대역폭은 1.162 MHz, null-to-null 대역폭 1.31 MHz, 1st IMD 18 dBc로 IRIG 표준 사양을 만족한다.

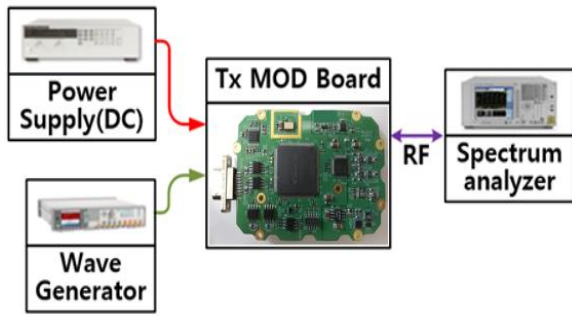


그림 11. 시험 구성도  
 Fig. 11. Measurement equipment setup.

3-2 제작 및 측정결과

본 논문에서 제안한 가변 데이터율의 전송이 가능한 텔레메트리 송신기에 대한 검증을 위해 변조보드를 제작한다. 변조보드의 하드웨어는 전원부, 변조부, 인터페이스부로 구성된다. 전원부에서는 FPGA (field-programmable gate array), DAC 등의 소자에 전원을 공급하며, 변조부에서는 VPMF(Variable Pre-Modulation Filtering) 및 FM 변조 기능을 수행한다. 인터페이스부에서는 최대 25Mbps까지 외부 장치와의 통신을 위해 RS-422 IC를 사용한다. 펌웨어는 Intel 사의 Quartus II 툴을 이용하여 로직으로 구현하고, 구현된 로직은 Intel 사의 MAX 10 시리즈 FPGA에 실장하여 성능 검증을 수행한다.

그림 11은 제작된 변조보드의 출력 성능 측정을 위한 장비 구성이다. 장비의 구성은 전원 공급을 위한 전원 공급기, 데이터 생성을 위한 파형 발생기, 변조보드의 출력 신호 분석을 위한 스펙트럼 분석기로 구성된다.

그림 12는 표 3을 참조하여 입력 데이터율을 16384 kbps, 8192 kbps, 4096 kbps, 512 kbps로 가변하며 측정된 출력 스펙트럼과 SW에서 결정되는 n값이다.

또한 표 4의 결과 값은 입력 데이터율 390 kbps ~ 25 Mbps 범위에서 본 논문에서 제안하는 구조로 제작된 변조 보드가 IRIG 규격을 만족함을 보여준다.

표 4. 비교분석결과

Table 4. Result of comparative analysis.

data rate ( $f_b$ ) kbps	n	99 % BW		null-to-null BW		1 <sup>st</sup> IMD		Pass/ Fail
		Spec (kHz)	Data (kHz)	Spec (kHz)	Data (kHz)	Spec (dBc)	Data (dBc)	
16384	0	19005	19018	21299	21286	11.5	17.4	Pass
8192	1	9502	9516	10649	10655	11.5	17.2	Pass
4096	2	4751	4842	5324	5332	11.5	17.3	Pass
2048	3	2375	2364	2662	2655	11.5	16.9	Pass
1024	4	1187	1195	1331	1320	11.5	17.2	Pass
512	5	593	584	665	671	11.5	17.0	Pass



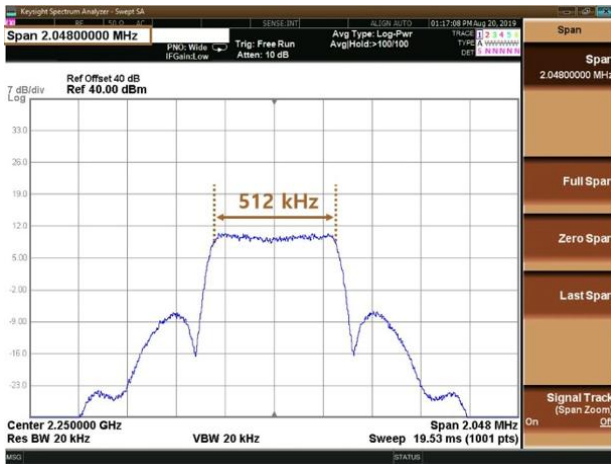
(a) data rate = 16384 kbps, n = 0



(b) data rate = 8192 kbps, n = 1



(c) data rate = 4096 kbps, n = 2



(d) data rate = 512 kbps, n = 5

그림 12. 데이터율 변화에 따라 측정된 출력 스펙트럼 파형

FIG. 12. Measured output spectrum as data rate change.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 텔레메트리 송신기의 유연한 시스템 적용을 위하여 가변 데이터율 전송이 가능한 구조에 대하여 제안하였다. 가변 데이터율 전송을 위해 가변 컷오프 특성을 갖는 VPMF와 정해지지 않은 샘플레이트를 갖는 입력에도 능동적으로 제어하는 소프트웨어를 통해 설정된 고정 샘플레이트로 변환하여 샘플을 출력하는 가변입력 샘플레이트 변환기를 제안하였다.

제안 방법에 대한 설계 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였고, 가변 데이터율의 전송이 가능한 텔레메트리 송신기 검증을 위해 변조보드를 제작 및 측정을 하였다.

시뮬레이션 및 측정 결과는 입력 데이터율 390 kbps ~ 25 Mbps 범위에서 본 논문에서 제안하는 구조로 제작된 변조 보

드가 IRIG 규격을 만족하였다. 즉, 제안한 VPMF와 가변입력 샘플레이트 변환기를 사용함으로써 가변 데이터율 전송이 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 다양한 환경이나 여러 요구 규격의 텔레메트리 시스템에 적용할 수 있으며, 향후 데이터의 품질을 위해 단위 비트당 할당된 데이터율을 변경하여 전송하는 경우 적용 가능할 것으로 기대된다.

#### References

- [1] Telemetry Applications Handbook, Secretariat Range Commanders Council(RCC), U.S. Army White Sands Missile Range, doc. 119-06, ch 1. pp. 3-7, May. 2006.
- [2] Telemetry Group, Telemetry standards, Secretariat Range Commanders Council, U.S. Army White Sands Missile Range, IRIG std. 106-17, ch.2, pp. A-27-28, Jul. 2017.
- [3] S. R. Lee, Pre-modulation filter of variable cut-off frequency characteristics in PCM/FM modulation system, Master of Engineering., Chungnam National University, Chungnam, Feb. 2010
- [4] Telemetry Applications Handbook, Secretariat Range Commanders Council(RCC), U.S. Army White Sands Missile Range, doc. 119-06, ch 2. pp.13, May. 2006
- [5] V. K. Ingle and J. G. Proakis, *Essentials of Digital Signal Processing using MATLAB*, 3<sup>rd</sup> ed. Boston, MA: Cengage Learning, pp. 344-352, 2014.
- [6] J. Choi, T. Yi, J. Kwon, J. Ahn, and B. Kim, "Arbitrary sample rate conversion architecture for high output sample rate," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 44 No. 7 pp. 1248-1256, 2019.



**김 장 희 (Jang-Hee Kim)**

2012년 2월 : 호서대학교 전자공학과 (공학사)  
2015년 7월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 기술연구소  
※관심분야 : RF 회로 및 시스템, Telemetry 시스템



**홍 승 현 (Seung-Hyun Hong)**

2010년 2월 : 순천향대학교 전기전자공학과 (공학사)  
2009년 12월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 기술연구소  
※관심분야 : RF 회로 및 시스템, Telemetry 시스템



**박 병 관 (Byong-Kwan Park)**

2006년 2월 : 인하대학교 전자통신공학과 (공학사)  
2006년 1월 ~ 2011년 6월 : 피앤피네트웍(주) 기술연구소  
2011년 6월 ~ 2013년 9월 : 아이앤씨테크놀로지(주) 기술연구소  
2013년 9월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 기술연구소  
※관심분야 : 디지털신호처리, 무선통신시스템, OFDM, 압축 센싱, Telemetry 시스템, 데이터링크



**김 복 기 (Bok-Ki Kim)**

1995년 2월 : 서울대학교 수학과 (이학사)  
1997년 2월 : 서울대학교 수학과(정수론) (이학석사)  
1997년 1월 ~ 2002년 4월 : 단암전자통신(주) 연구소  
2002년 5월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 기술연구소 재직 중  
※관심분야 : 무선통신, 채널코딩, 디지털 신호처리 구조



**김 호 종 (Hyo-Jong Kim)**

1997년 2월 : 경희대학교 전파공학과 (공학사)  
1999년 2월 : 경희대학교 전파공학과 (공학석사)  
2018년 2월 : 경희대학교 전파공학과 (공학박사)  
1999년 1월 ~ 현재 : 단암시스템즈(주) 기술연구소  
※관심분야 : RF 회로 및 시스템, 주파수 합성기, SSPA, 데이터링크 시스템