

재전송 기반의 분산 원격측정 시스템 구현

임수열^{*,1)} · 황치호¹⁾ · 이환석¹⁾ · 안성복¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

Implementation of the Distributed Telemetry System Based on Retransmission

Sooyeol Im^{*,1)} · Chiho Hwang¹⁾ · Hwansuk Lee¹⁾ · Seongbok Ahn¹⁾

¹⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 28 March 2014 / Revised 29 August 2014 / Accepted 7 November 2014)

ABSTRACT

This paper considers a distributed telemetry system using retransmission algorithm with one master telemetry and two slave telemetries. The master telemetry merges data from each slave telemetry and own measured data. If there exist some errors in data from the slave telemetry, the master telemetry requests retransmission to corresponding slave telemetry. In this paper, we propose a retransmission algorithm applied to implementing the distributed telemetry system. Simulation results demonstrate that the retransmission improves the performance of the communication between the master and slave telemetries.

Key Words : Telemetry System(원격측정 시스템), Retransmission(재전송), Additive White Gaussian Noise(부가 백색 가우스 잡음), Bit Error Rate(비트 오류율), Frame Error Rate(프레임 오류율)

1. 서론

새로 개발되는 비행체는 지상시험 및 비행시험을 통해 안정성 및 설계 파라미터의 적합성을 입증하고 분석해야 한다. 개발 단계에 있는 비행체의 성능 확인을 위한 시험 과정에서 Telemetry System(원격측정 시스템)은 비행체에 부착된 센서들로부터 획득되는 다양한 계측 정보와 비행체를 구성하는 각 서브시스템의

상태 정보 등을 지상으로 송신하는 역할을 한다^[1]. 즉, 원격측정 시스템은 비행체 내에 원격측정장치가 탑재되어 비행체 내에서 얻어지는 정보들을 수집하고 실시간으로 무선 통신을 이용해서 지상에 구축되어 있는 원격측정 수신소로 송신하는 시스템이다. 이러한 원격측정 시스템은 Range Commanders Council(RCC)의 Inter Range Instrumentation Group(IRIG)을 중심으로 표준화 활동이 진행 중이다^[2].

최근 들어, 단일 비행체의 임무 수행에 있어서의 한계를 극복하고자 하는 노력의 일환으로, 다수의 비행체로 구성되어 다양한 임무 영역을 가질 수 있는 군집

* Corresponding author, E-mail: syim@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

비행체 개념이 주목을 받고 있다^{3,4)}. 이러한 군집 비행 형태에서 원격측정 시스템은 각 비행체에 원격측정장치가 탑재되어 각 비행체의 원격측정장치 및 지상의 원격측정 수신소가 네트워크를 이루는 형태가 된다. 현재, Central Test and Evaluation Investment Program (CTEIP)를 중심으로 Integrated Network Enhanced Telemetry(iNET) 프로그램에서 개념 정립, 네트워크 및 전송 프로토콜, 하드웨어 구현 이슈 등에 관한 연구 및 논의가 활발히 진행되고 있다^{5,6)}.

군집 비행체 시험 과정에서 원격측정 시스템은 각각의 비행체에 탑재된 원격측정장치마다 주파수를 할당하는 Frequency Division Multiplexing(FDM, 주파수 분할 다중화) 방식을 이용하여 지상의 원격측정 수신소에 원격측정 데이터를 송신하였다. 하지만, 이러한 원격측정 시스템은 2011년과 2013년 이동통신사들이 참여한 1.8GHz 대역 주파수 경매의 낙찰가가 1조원에 이를 정도로 가치가 높은 주파수 자원을 비행체별로 독립적으로 할당해야 하고, 지상의 원격측정 수신소에 다수의 안테나를 포함한 무선 수신 시스템이 설치되어야 한다.

본 논문에서는 다수의 원격측정장치들이 네트워크로 연결된 분산 원격측정 시스템의 개념을 정립하고 구현 방법을 제시한다. 분산 원격측정 시스템은 하나의 마스터 원격측정장치와 다수의 슬레이브 원격측정장치들로 구성된다. 각각의 슬레이브 원격측정장치는 서로 다른 비행체 내에 탑재되어 자신의 원격측정 데이터를 마스터 원격측정장치에 송신한다. 슬레이브 원격측정장치들은 하나의 주파수 대역을 공유하여 Time Division Multiplexing(TDM, 시분할 다중화) 방식을 이용해서 순차적으로 마스터 원격측정장치에 송신하고, 마스터 원격측정장치는 슬레이브 원격측정장치들로부터 수신한 데이터 및 자신의 원격측정 데이터를 통합하여 지상의 원격측정 수신소로 송신하는 구조이다. 여기서, 마스터 원격측정장치와 슬레이브 원격측정장치간의 양방향 네트워크를 통해 재전송이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 분산 원격측정 시스템을 구현하는데 적용되는 재전송 알고리즘을 제시하고, 모의실험을 통해 마스터 원격측정장치와 슬레이브 원격측정장치 사이의 재전송 메커니즘의 정상 동작 여부를 검증하고 효과를 확인하기 위해 Bit Error Rate(BER, 비트 오류율) 및 Frame Error Rate(FER, 프레임 오류율) 성능을 평가하였다.

이어지는 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에

서는 본 논문에서 고려하는 분산 원격측정 시스템을 설명한다. 제 3장에서는 분산 원격측정 시스템에서 마스터 원격측정장치 및 슬레이브 원격측정장치의 구성 및 하드웨어적인 구현 방법에 대해서 설명하고, 제 4장에서는 본 논문에서 슬레이브 원격측정장치의 데이터 재전송을 위해 사용된 재전송 알고리즘을 설명한다. 제 5장에서는 모의실험을 통해 재전송 기반의 분산 원격측정 시스템의 성능을 평가하고, 마지막으로 제 6장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 원격측정 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같이 하나의 마스터 원격측정장치와 두 개의 슬레이브 원격측정장치로 이루어진다. 각각의 슬레이브 원격측정장치가 자신의 원격측정 데이터를 마스터 원격측정장치에 송신하고, 마스터 원격측정장치는 슬레이브 원격측정장치들로부터 수신한 원격측정 데이터 및 자신의 원격측정 데이터를 통합하여 지상의 원격측정 수신소로 송신하는 구조이다.

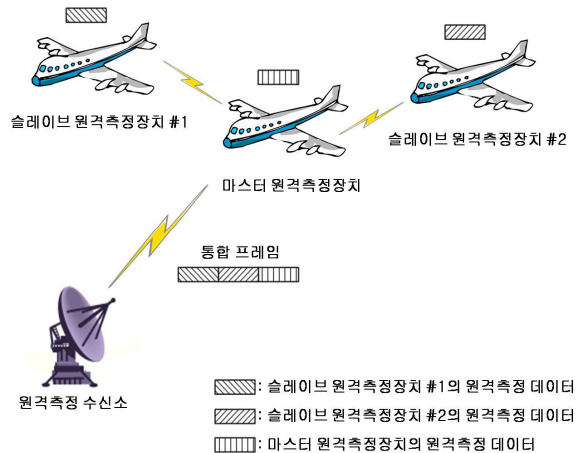


Fig. 1. Distributed telemetry system

마스터 원격측정장치와 두 개의 슬레이브 원격측정장치는 시분할 다중화 방식을 이용해서 순차적으로 데이터를 송신/수신한다. Fig. 2는 이러한 데이터 송신/수신의 한 주기를 나타내었다. 먼저, 마스터 원격측정장치는 매 주기마다 브로드캐스팅 방식으로 전송명령을 송신한다. 마스터 원격측정장치로부터 전송명령을

수신한 각각의 슬레이브 원격측정장치는 일정한 시간 간격으로 계속한 원격측정 데이터를 기 할당된 시간에 맞추어 차례대로 마스터 원격측정장치에 송신한다. 이러한 주기적인 데이터 전송 구조를 통해, 마스터 원격측정장치는 각각의 슬레이브 원격측정장치에서 동일한 시점에 계속된 데이터를 수신 받아서 하나의 무선 링크를 통해서 지상으로 전송할 수 있다. 이전 주기에서 마스터 원격측정장치가 수신한 데이터가 채널 환경으로 인해 오류가 발생했을 경우, 마스터 원격측정장치는 전송명령에 재전송 요청을 포함한다. 각각의 슬레이브 원격측정장치는 수신한 전송명령에 재전송 요청이 포함되어 있을 경우, 해당 프레임을 마스터 원격측정장치에 재전송하게 된다. 데이터 송신/수신 한 주기 내에서 재전송 횟수는 무선 통신 대역폭 및 슬레이브 원격측정장치의 계속 데이터의 양에 따라 정의될 수 있고, 본 논문에서는 한 주기 내의 재전송 횟수를 한번으로 가정한다. 전송명령에 포함되는 재전송 요청 정보는 제 4장에서 자세히 알아보기로 한다.

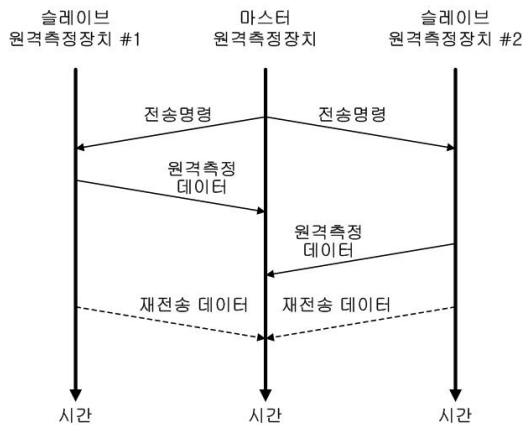


Fig. 2. Data transmission in distributed telemetry system

마스터 원격측정장치와 슬레이브 원격측정장치 간에 송신/수신하는 데이터 프레임의 구조는 Fig. 3과 같다. Fig. 2에서 마스터 원격측정장치에서 슬레이브 원격측정장치로 송신하는 전송명령의 경우, N byte로 이루어진 데이터 필드가 1 byte의 명령코드 및 1 byte의 재전송 슬레이브 원격측정장치 정보로 이루어져 있다. 슬레이브 원격측정장치에서 마스터 원격측정장치로 송신하는 원격측정 데이터의 경우, N byte로 이루어진 데이터 필드가 8 byte의 슬레이브 원격측정장치 상태 및 65 byte의 원격측정 데이터로 이루어져 있다.

Preamble	Synchronization word	Length	Destination address	Source address	Data	Cyclic redundancy check-16
← 8 byte	← 2 byte	← 1 byte	← 2 byte	← 2 byte	← N byte	← 2 byte

Fig. 3. Data frame architecture

3. 하드웨어 구현

이번 장에서는 분산 원격측정 시스템에서 마스터 원격측정장치 및 슬레이브 원격측정장치의 구성 및 하드웨어적인 구현 방법에 대해서 알아본다. 마스터 원격측정장치는 Fig. 4와 같이 Signal Conditioning Unit (SCU, 신호조정 장치), Pulse Code Modulation Encoder (PCM 엔코더), 지상 송신 장치, Micro-Controller Unit (MCU, 마이크로 컨트롤러 장치), 송수신 장치로 구성되어 있다. 신호조정 장치는 각종 센서 혹은 서브시스템의 아날로그 혹은 디스크리트 형태의 원격측정 신호를 PCM 엔코더의 입력 레벨 혹은 포맷에 맞게 전압 레벨을 조절하는 역할을 한다. PCM 엔코더는 마스터 원격측정장치에서 획득한 데이터와 슬레이브 원격측정장치들로부터 수신한 데이터를 통합하고 동기 및 parity 신호 등을 추가하여 지상으로 송신하기 위한 통합 프레임을 구성하는 역할을 한다. 지상 송신 장치는 PCM 엔코더로부터 받은 통합 프레임을 안테나를 통해 지상으로 송신하기 위한 목적으로 사용된다. 마이크로 컨트롤러 장치는 슬레이브 원격측정장치로부터 수신한 원격측정 데이터를 PCM 엔코더로 전송하고, 슬레이브 원격측정장치로 송신할 재전송 명령을 포함한 전송명령을 생성한다. Fig. 4에 나타나 있는 마이크로 컨트롤러 장치 내의 전송명령 생성 모듈은 PCM 엔코더의 프레임 전송 요청 신호에 따라 전송명령을 생성하고, 이는 재전송을 요청할 데이터에 대한 정보를 포함한다. 데이터 수신 모듈은 Cyclic Redundancy Check(CRC, 순환 중복 검사)를 이용해서 수신 데이터의 정상 여부를 판단하고 수신 상태 레지스터에 수신 상태 정보를 전송하고, 정상적으로 수신된 데이터는 수신 데이터 저장 모듈에 저장한다. 수신 상태 레지스터는 각각의 슬레이브 원격측정장치 용도로 총 두 개가 존재하며, 최근 16번 수신한 원격측정 데이터의 수신 상태를 저장할 수 있는 16비트의 쉬프트 레지스터이다. 전송명령을 송신할 때마다 1비트 쉬프트한 후, 최하위 비트는 1로 초기화 한다. 이후 슬레이브 원격측정장치로부터 데이터를 정상적으로 수신하면 최하위 비트를 0으로

변경하고, 재전송일 경우에는 해당되는 비트를 0으로 변경한다. 즉, 수신 데이터가 정상일 경우 해당 비트는 0이고 비정상일 경우 해당 비트는 1이다. 재전송 요청 결정 모듈은 수신 상태 레지스터의 정보와 재전송 알고리즘을 이용해서 재전송을 요청할 데이터를 결정한다. 이러한 재전송 요청 결정 모듈의 원리는 제 4장에서 자세히 알아보도록 한다. 송수신 장치는 무선 주파수를 변환하고 시험 환경에 맞게 송신 출력 및 수신 이득을 높이는 역할을 한다. 이러한 마이크로 컨트롤러 장치 및 송수신 장치는 각각 Texas Instruments(TI)사의 MSP430F2618과 CC2400을 사용하였고, Serial Peripheral Interface(SPI, 직렬 주변장치 인터페이스)를 통해 원격측정 데이터 및 전송명령을 주고받는다. 마이크로 컨트롤러 장치는 Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART, 범용 비동기화 송수신기) 통신을 통해 PCM 엔코더와 데이터를 주고받는다.

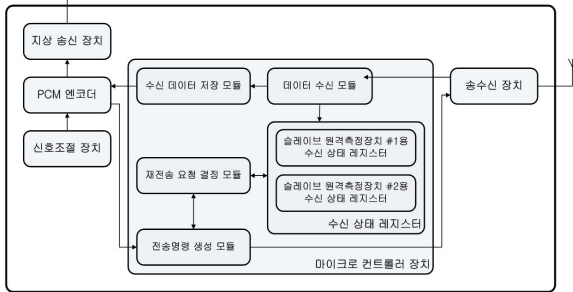


Fig. 4. Block diagram of master telemetry

Fig. 5에 나타나 있는 슬레이브 원격측정장치의 신호 조절 장치, PCM 엔코더, 송수신 장치는 마스터 원격측정장치의 그것과 같다. 마이크로 컨트롤러 장치의 전송명령 복호 모듈은 마스터 원격측정장치로부터 수신한 전송명령을 분석한다. 전송명령에 따라 원격측정 데이터 및 재전송 요청 정보에 따라 송신 데이터 저장 모듈에서 재전송할 데이터를 찾아서 데이터 송신 모듈에 전송한다.

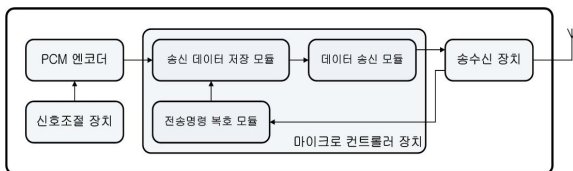


Fig. 5. Block diagram of slave telemetry

4. 재전송 알고리즘

이번 장에서는 분산 원격측정 시스템에서 슬레이브 원격측정장치의 데이터 재전송을 위한 재전송 알고리즘에 대해서 알아본다. 재전송은 Fig. 2의 데이터 송신/수신의 한 주기에서 두 개의 슬레이브 원격측정장치 중에 하나의 슬레이브 원격측정장치로부터 이루어진다. 따라서 슬레이브 원격측정장치 #1과 #2중 해당 주기에서 재전송할 하나의 슬레이브 원격측정장치를 선택하는 알고리즘이 필요하다. 이러한 재전송 알고리즘은 마스터 원격측정장치의 재전송 요청 결정 모듈에서 이루어지고, 그 결과는 각 주기의 전송명령에 포함된다.

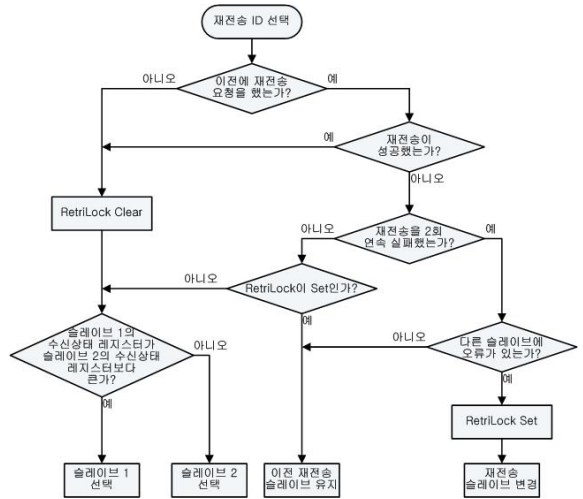


Fig. 6. Flowchart of retransmission algorithm

Fig. 6은 마스터 원격측정장치에서 이루어지는 재전송 슬레이브 원격측정장치 선택 알고리즘을 나타내는 순서도이다. 슬레이브 원격측정장치 #1과 #2의 수신 상태 레지스터를 비교해서 큰 쪽을 선택하도록 함으로써 손실 위험이 높은 오래된 프레임과 가지고 있는 슬레이브 원격측정장치를 선택하여 해당 프레임을 재전송하도록 한다. 본 논문에서 제시하는 재전송 알고리즘의 핵심은 하나의 슬레이브 원격측정장치는 2회 연속으로 재전송을 시도할 수 있다는 점과 각각의 슬레이브 원격측정장치별 가장 오래된 프레임부터 재전송한다는 점이다. RetriLock 변수를 이용해서 하나의 슬레이브 원격측정장치가 2회까지 연속으로 재전송을 시도할 수 있도록 한다. 하나의 슬레이브 원격측정장치가 2회 연속 재전송을 실패했을 경우 RetriLock 변

수를 set(0→1)하고, 다음 주기에 재전송할 슬레이브 원격측정장치를 강제로 변경한다. 변경 후에 재전송에 실패해도 2회까지는 현재의 재전송 슬레이브 원격측정장치를 유지한다. 재전송할 슬레이브 원격측정장치가 선택되면 해당 슬레이브 원격측정장치용의 수신 상태 레지스터에서 1이 들어있는 최상위 비트 위치를 전송명령에 포함시킨다.

5. 모의실험

이번 장에서는 본 논문에서 제시한 재전송 기법의 성능을 확인하기 위한 모의실험 결과들이 제공된다. 두 개의 슬레이브 원격측정장치들이 각각의 정보를 송신하고, 이러한 정보를 수신하는 하나의 마스터 원격측정장치가 존재하는 환경을 고려하였다. 각각의 슬레이브 원격측정장치는 Frequency Shift Keying(FSK, 주파수 편이 변조)를 사용하고, 마스터 원격측정장치와 슬레이브 원격측정장치 사이의 채널 환경은 무선 통신 성능 평가 시 가장 기본적으로 사용되는 채널 환경인 Additive White Gaussian Noise(AWGN, 부가 백색 가우스 잡음) 채널로 가정하였다.

이러한 환경에서 평균 Signal to Noise Ratio(SNR, 신호 대 잡음 비율) 대비 비트 오류율 및 프레임 오류율의 성능을 확인하였다. 여기서, 프레임 오류는 해당 프레임 내에 하나 이상의 비트에 오류가 발생할 경우에 발생한다. 즉, 해당 프레임 내에 하나의 비트라도 오류가 발생할 경우 오류가 발생한 비트의 개수에 관계없이 해당 프레임은 오류이다.

Fig. 7은 부가 백색 가우스 잡음 채널 환경에서 주파수 편이 변조를 사용해서 데이터를 전송했을 경우의 결과적인 비트 오류율을 나타낸 그래프이다. 먼저, 재전송의 효과를 확인하기 위해 재전송 없이 데이터를 전송했을 경우의 결과를 나타내었다. 이는 부가 백색 가우스 잡음 채널에서 주파수 편이 변조를 사용했을 경우의 Q-함수로 표현되는 이론적인 비트 오류율인 수식 (1)을 나타내는 결과와 일치한다⁷⁾.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (1)$$

Fig. 7에서 보이는 바와 같이, 신호 대 잡음 비율이 낮은 구간에서는 재전송의 효과가 나타나지 않지만,

본 모의실험의 경우 신호 대 잡음 비율이 8dB 이상인 구간에서 재전송의 효과가 나타나기 시작하고 신호 대 잡음 비율이 높아질수록 재전송 효과가 커진다. 특히, 일반적으로 신뢰성 있는 통신이 가능하다고 여겨지는 10⁻⁵의 비트 오류율을 기준으로^{8,9)}, 재전송을 했을 경우 그렇지 않은 경우에 비해서 약 2dB의 신호 대 잡음 비율 이득이 있음을 확인할 수 있다.

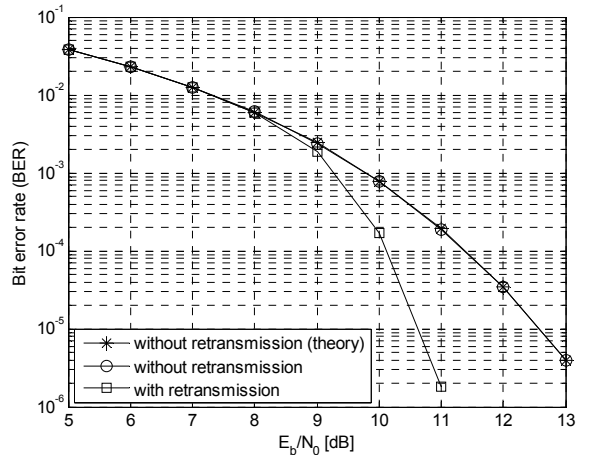


Fig. 7. Comparison of BER performance of FSK modulation with/without retransmission over AWGN channel

Fig. 8은 부가 백색 가우스 잡음 채널 환경에서 주파수 편이 변조를 사용해서 데이터를 전송했을 경우의 결과적인 프레임 오류율을 나타낸 그래프이다. 비트 오류율과 마찬가지로, 먼저 재전송의 효과를 확인하기 위해 재전송 없이 데이터를 전송했을 경우의 결과를 나타내었다. 본 논문에서 하나의 프레임은 $M = 704$ 개의 비트로 이루어지기 때문에, 수식 (1)과 같이 Q-함수로 표현되는 비트 오류율을 이용하여 앞서 정의한 프레임 오류율의 이론적인 수치를 구할 수 있고, 그 결과는 수식 (2)와 같다.

$$P_f = 1 - (1 - P_b)^M = 1 - \left(1 - Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)\right)^{704} \quad (2)$$

프레임 내에 하나의 비트라도 오류가 발생할 경우에 해당 프레임은 오류이기 때문에, 신호 대 잡음 비율이 낮음으로 인해 비트 오류율이 높은 구간에서는 프레임 오류율이 1이다. 비트 오류율과 마찬가지로,

신호 대 잡음 비율이 낮은 구간에서는 재전송의 효과가 나타나지 않지만, 신호 대 잡음 비율이 높아질수록 재전송 효과가 커지는 것을 확인할 수 있다. 결정론적(deterministic)인 측면에서 바라봤을 경우, 하나의 프레임에 오류가 없으려면 해당 프레임 내의 모든 비트에 오류가 없어야 하므로 비트 오류율이 $\frac{1}{M} = \frac{1}{704} \approx 1.42 \times 10^{-3}$ 이하인 신호 대 잡음 비율이 약 9.5dB 이상인 구간에서 오류 없는 프레임이 발생한다. 하지만 본 논문의 통계적(statistical)인 모의실험 결과, 비트 오류율이 약 6×10^{-3} 이하인 신호 대 잡음 비율이 8dB 이상인 구간부터 오류 없는 프레임이 발생하기 시작하면서 프레임 오류율에서 재전송의 효과가 발생하기 시작한다. 이는 Fig. 7의 비트 오류율에서 재전송의 효과가 나타나기 시작하는 신호 대 잡음 비율의 구간과 일치한다.

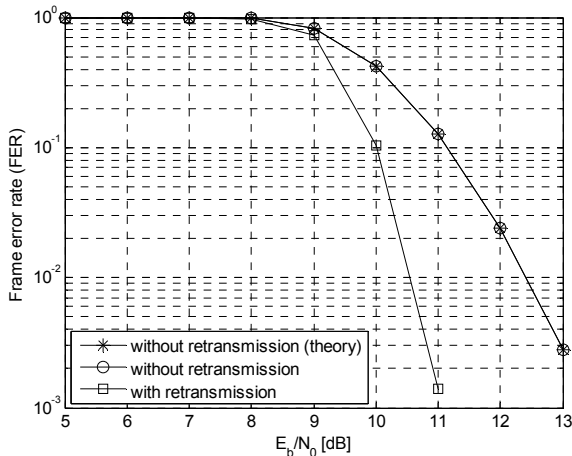


Fig. 8. Comparison of FER performance of FSK modulation with/without retransmission over AWGN channel

6. 결론

본 논문에서는 하나의 마스터 원격측정장치와 두 개의 슬레이브 원격측정장치로 이루어진 분산 원격측정 시스템을 구현하고, 마스터 원격측정장치와 슬레이브 원격측정장치 사이의 양방향 네트워크를 통해 오류가 발생한 프레임에 대해서 재전송을 가능하게 하는 재전송 알고리즘을 적용하였다. 무선 통신의 성능을 평가

하는 기본적인 환경인 부가 백색 가우스 잡음 채널 환경에서의 모의실험 결과, 재전송을 할 경우 비트 오류율 및 프레임 오류율 모두 재전송을 하지 않을 경우에 비해서 향상되는 것을 확인하였다.

향후에는, 본 논문에서 제시한 재전송 기반의 분산 원격측정 시스템에서 고려한 두 개의 슬레이브 원격측정장치일 경우를 확장하여 슬레이브 원격측정장치가 L 개일 경우의 재전송 알고리즘을 연구할 계획이다. 재전송 쌍이 2 대 1에서 L 대 1이 될 경우 고려해야 하는 사항들을 도출하여 이에 적합한 재전송 알고리즘을 연구하고, 기본적인 부가 백색 가우스 잡음 채널 모델뿐만 아니라 페이딩 효과 등이 반영된 좀 더 현실적인 채널 모델을 적용하고 해당 환경에서 그 성능을 평가하고 분석할 예정이다. 또한, 이론적인 접근을 통해 주어진 채널 모델 하에서의 비트 오류율 및 프레임 오류율 성능의 이론식을 유도하여 도출하고, 모의실험 결과와 비교할 예정이다.

References

- [1] F. Garden, R. Jedlicka, R. Henry, Telemetry Systems Engineering, Artech House, 2002.
- [2] RCC, Telemetry Standards, IRIG Standard 106-13, June 2013.
- [3] S. Kim, S. Cho, S. Cho, and C. Park, "Development of Operation Network System and Processor in the Loop Simulation for Swarm of Small UAVs," J. Inst. Contr. Robot. Syst., Vol. 18, No. 5, pp. 433-438, May 2012.
- [4] S. Kim and Y. Kim, "Behavioral Decentralized Optimum Controller Design for UAV Formation Flight," J. of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 36, No. 6, pp. 565-573, June 2008.
- [5] T. Grace, J. Kenney, M. Moodie, and B. Abbot, "Key Components of the iNET Test Article Standard," in Proc. Int. Telemetry Conf., pp. 1-10, 2009.
- [6] B. Abbot, M. Moodie, T. Newton, and T. Grace, "iNET System Design Concepts," in Proc. Int. Telemetry Conf., pp. 1-9, 2011.
- [7] S. Haykin, Digital Communications, John Wiley & Sons, 1988.

- [8] D. Costello, J. Hagenauer, H. Imai, and S. Wicker, "Applications of Error-Control Coding," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 44, No. 6, pp. 2531-2560, Oct. 1998.
- [9] J. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill, 2000.