

논문 2013-50-10-1

# 고속 철도 환경을 위한 IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 개선된 센서 통신 알고리즘

( Advanced Sensor Communication Algorithm based on IEEE  
802.15.4/ZigBee for High Speed Train Environment )

문 상 미\*, 김 보 라\*, 사란쉬 말리크\*, 김 대 진\*\*, 김 철 성\*\*, 황 인 태\*\*

( Sangmi Moon, Bora Kim, Saransh Malik, Daejin Kim, Cheolsung Kim, and Intae Hwang<sup>©</sup> )

## 요 약

무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)는 철도분야에서 효율적인 관리와 유지보수라는 측면에서 적용되어 사용되고 있다. 하지만 저속 철도 환경에서 사용되고 있는 현재의 IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 센서 통신 기술을 차세대 고속 철도에서 적용하기에는 열악한 무선 채널 환경에 노출되어 있다. 본 논문에서는 고속 철도 환경에 적합한 센서 통신 알고리즘을 제안한다. 에러율 및 전송률 향상을 위해 IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 개선 알고리즘인 Equalizer, MIMO(Multiple Input Multiple Output), Flexible SF(Spreading Factor) 및 Modulation을 사용한다. 또한 IEEE 802.15.4/ZigBee 표준의 2.4GHz 대역 물리계층에서 각 알고리즘에 대한 성능을 비교 분석한다. 모의실험 결과, 제안한 알고리즘을 통해 기존 시스템보다 에러율 및 전송률이 향상된 것을 볼 수 있다.

## Abstract

Wireless Sensor Network (WSN) is used in the railway field in terms of efficient management and maintenance. Sensor communication technology based on IEEE 802.15.4/ZigBee is used in low speed train. However, it is difficult to apply in the high speed train that exposed to severe wireless channel environments. In this paper, we propose the sensor communication algorithm for high speed train environment. we improve error rate and throughput using Equalizer, Multiple Input Multiple Output (MIMO), Flexible Spreading Factor (SF) and Modulation. Also, we have analyzed the performance of the IEEE 802.15.4/ZigBee based on the standard of physical layer of 2.4GHz band in each algorithms. Simulation results show that proposed algorithms can improve error rate and throughput of conventional system.

**Keywords** : Equalizer, Flexible SF, High Speed Train, IEEE 802.15.4, MIMO, Modulation

\* 학생회원, \*\* 평생회원, 전남대학교 전자컴퓨터공학과

(School of Electronics & Computer Engineering Chonnam National University)

© Corresponding Author(E-mail: [hit@chonnam.ac.kr](mailto:hit@chonnam.ac.kr))

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0301-13-3005)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A2007779)

※ 이 논문은 2012년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

접수일자: 2013년6월10일, 수정완료일: 2013년10월7일

### I. 서 론

센서 장치들을 무선으로 연결하여 네트워크를 형성하는 무선 센서 네트워크 기술은 사람 중심의 정보 운용 형태를 확장하여 언제 어디서든 사람과 사물뿐만 아니라 사물 간의 정보 공유를 가능하게 하며, 유비쿼터스 환경으로 진화하고 있다.

무선 센서 네트워크 관련 표준기술 중 하나인 무선 근거리 개인 통신망(WPAN: Wireless Personal Area Network)의 개념을 도입한 Bluetooth는 표준화가 완료되었다. WPAN은 개인 주변의 영역을 주 동작범위로 하여 저가격, 저전력, 근거리, 소형화를 추구하는 네트워크 개념이다. 그러나 무선랜과 Bluetooth를 적용하기에 적합하지 않은 많은 응용 사례가 있음에 따라, 전송 규격을 위한 IEEE 802.15.4 표준 규격과 이를 기반으로 상위 계층 규격을 정하여 관련 산업에 적용하려는 ZigBee의 필요성이 대두되었다.

IEEE 802.15.4는 작은 패킷 사이즈를 갖는 온/습도, 미터링 데이터를 수집하기 위한 저전력의 단순 모니터링 서비스를 염두해 두어 표준화가 진행되었으며, ZigBee에서는 이러한 용도의 응용에 부합하는 네트워크 계층 규격과 여러 애플리케이션 프로파일을 정의하여 시장에 관련 제품 등을 선보이기도 했다. 하지만 IEEE 802.15.4 기술은 네트워크 트래픽의 증가에 따라 빈번하게 발생하는 재전송으로 인한 심각한 성능 저하와 timeliness를 갖는 센싱 정보 전달의 요구 품질을 만족할 수 없다는 문제점이 있어 관련 시장의 활성화에 한계를 보이고 있다.

무선 센서 네트워크는 철도분야에서도 효율적인 관리와 유지보수라는 측면에서 적용되어 사용되고 있다. 철도는 고에너지, 고효율의 교통수단으로써 현재 최고 속도 350km/h 이상까지 가능한 기술 수준을 가지고 있다. 하지만 저속 철도 환경에서 사용되고 있는 현재의 IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 센서 통신 기술을 차세대 고속 철도에서 적용하기에는 열악한 무선 채널 환경에 노출되어 있다<sup>1)~2)</sup>.

따라서 본 논문에서는 고속 철도 환경에서의 센서 네트워크 구축 시 기존 IEEE 802.15.4/ZigBee 기반의 센서 네트워크 망의 기능 및 성능을 보완하기 위한 센서 통신 알고리즘을 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 고속 철도 채널 환경에서의 채널 모델링

에 대하여 기술하였다. 제 III장에서는 고속 철도 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 성능 개선을 위한 알고리즘을 제안하고 제 IV장에서 모의실험을 통해 제안 알고리즘의 성능을 분석한다. 마지막으로 제 V장에서 결론을 맺는다.

### II. 고속 철도 환경에서의 채널 모델링

본 장에서는 [3]에서 제안한 고속 철도 채널 모델에 대하여 간략히 기술한다.

#### 1. 주파수 선택적 채널 모델

고속 철도 채널 모델의 PDP(Power Delay Profile)는 ITU Standard Multipath Channel Model의 3GPP LTE Channel Model 중 ETU(Extended Typical Urban) 모델을 사용하였다. 고속 철도 채널 모델의 PDP를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 고속 철도 채널 모델의 Power Delay Profile  
Table 1. Power Delay Profile of high speed train channel model.

Channel	Excess tap delay [ns]	Relative Power [dB]
HST	[0 50 120 200 230 500 1600 2300 5000]	[-1.0 -1.0 -1.0 0.0 0.0 0.0 -3.0 -5.0 -7.0]

#### 2. 시변 채널 모델

현재 우리나라에서 고속으로 운영되고 있는 열차인 KTX는 최고속도 350km/h로 달리며, IEEE 802.15.4 PTC(Positive Train Control)의 요구사항으로는 최고 600km/h까지 고려하고 있다. 이 경우 열차 진동으로 인한 안테나 수신 주파수 변동이 발생한다. 따라서 열차의 속도를 고려하여 진동 수준에 따른 최대 도플러 주파수를 정리 하면 표 2와 같다.

표 2. 고속 철도 채널 모델의 최대 도플러 주파수  
Table 2. Maximum doppler frequency of high speed train channel model.

Train Velocity	Maximum Doppler Frequency
350 km/h	780 Hz
600 km/h	1330 Hz

### III. IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 개선 알고리즘

고속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 통신이 이루어질 경우, 에러율 및 전송률에 대하여 성능 열화가 발생한다. 따라서 본 장에서는 통신 신뢰도 및 전송률 증가를 위해 Equalizer, MIMO(Multiple Input Multiple Output), Flexible SF(Spreading Factor), Modulation과 같은 개선 알고리즘을 제안한다.

그림 1은 주파수 대역 2.4GHz에서 개선 알고리즘이 적용된 IEEE 802.15.4/ZigBee PHY 통신 시스템의 송·수신단 구조이다.

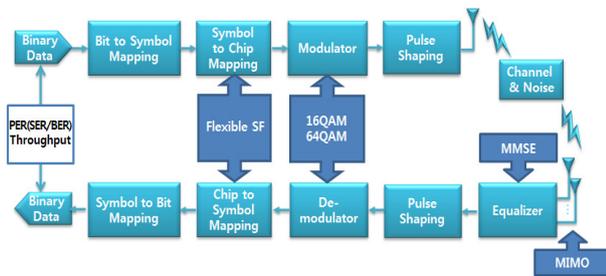


그림 1. 제안한 개선 알고리즘이 적용된 IEEE 802.15.4/ZigBee PHY 통신 시스템의 송·수신단 구조

Fig. 1. Structure of IEEE 802.15.4/ZigBee PHY communication system with proposed advanced algorithm.

각 개선 알고리즘 블록에 대하여 설명하면 다음과 같다.

#### 1. Standalone 개선 알고리즘

##### 가. Category 1: Equalizer

Equalizer 기법 중 상대적으로 낮은 복잡도를 갖는 선형 검출 방식인 ZF (Zero Forcing)와 MMSE (Minimum Mean Square Error) 기법이 있다<sup>[4]</sup>. ZF의 복호 행렬은 다음 식과 같다.

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (1)$$

MMSE 복호 행렬은 아래와 같다.

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1} H^H \quad (2)$$

여기서  $H^H$ 는  $H$ 의 Hermitian 전치 행렬이다.

MMSE의 경우 잡음에 대한 사전 정보인  $\sigma^2$ 이 사용됨을 볼 수 있다. 일반적으로 ZF에 비해 MMSE가 우월한 성능을 보이는데, 이는 채널 이득행렬의 condition number가 클 경우 가중치를 곱할 때 발생하는 잡음증폭이 MMSE의 경우가 ZF에 비해 적기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 수신단에서 MMSE를 적용하였다.

##### 나. Category 2: MIMO

MIMO 기법은 중 다중 송수신 안테나를 사용하여 정보를 주고받는 기법으로써, 송·수신단에서 다수의 안테나를 이용하여 더욱 많은 정보를 전송하고 수신단에서 다중 안테나를 통하여 신호를 재결합하게 되어 데이터 교환의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템 수신 다이버시티 기법을 적용하였다. 수신 다이버시티 기법은 수신단에서 다중 안테나를 사용하여 다이버시티 효과를 얻는 방법으로 조합 및 선택 등을 수행함으로써 수신 신호의 품질을 개선하는 것이다.

본 논문에서는 1개의 송신 안테나를 가진 ZigBee Slave 1개와 2개의 수신 안테나를 가진 ZigBee Master 1개 사이의 통신이 이루어진다고 가정한다. 이때, 각각의 수신 안테나에 독립적인 가중치를 적용하는 MRC(Maximum Ratio Combining) 기법을 적용하였다. 이를 통해, Diversity Gain 및 Array Gain을 획득하여 에러율 성능 향상을 얻을 수 있다.

##### 다. Category 3: Flexible SF

Spreading 기법은 신호가 정보를 보내기 위해 확산 코드(PN Sequence)를 곱하여, 필요한 최소 대역폭보다 훨씬 넓은 대역폭을 사용한다.

IEEE802.15.4/ZigBee의 2.4GHz 대역에서 Chip Rate

표 3. SF에 따른 Data Rate  
Table 3. Data Rate according to SF.

Data Rate (kbps)	SF	Chip Rate (Mcps)
2000	1	2
1000	2	2
500	4	2
250	8	2
125	16	2
62.5	32	2

는 2 Mcps이다. 따라서, SF가 변화함에 따라 표 3과 같이 Data Rate가 달라진다.

또한, 칩 코드를 이용해 신호를 전 대역폭으로 확산 전송하므로 대역폭 이용 효율(또는 Data Rate)은 떨어지나, 주파수대역을 넓게 사용하여 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 따라서 SF가 증가하게 되면 에러율이 감소한다<sup>[5]</sup>.

따라서, 낮은 SNR에서는 높은 SF를 사용하여 에러율에 대한 보상을 받고, 높은 SNR에서는 에러율에 대한 성능을 확보하였기 때문에 낮은 SF를 사용하여 전송률을 증가시킬 수 있다.

라. Category 4: Modulation

IEEE 802.15.4/ZigBee의 Chip Modulation에서 OQPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying)를 대신하여 여러 종류의 Modulation을 사용할 수 있다. 그중 본 논문에서는 직교진폭변조(QAM: Quadrature Amplitude Modulation)를 적용하고자 한다.

그림 2의 (a)와 (b)는 각각 Modulation 차수가 M = 4, M = 6인 16QAM, 64QAM의 신호 성상도이다.

이와 같은 신호 성상도를 갖는 M진 QAM 신호를 정합 필터 수신기로 복조하는 경우, 비트오류 확률은 근사적으로 식 3과 같다<sup>[6]</sup>.

$$2 \frac{M-1}{M} Q\left(\sqrt{\frac{6\beta}{M^2-1}} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (3)$$

여기서  $\beta$ 는 동위상 또는 직교 차원에 대한 심벌당 비트 수이고,  $\frac{E_b}{N_0}$ 는 정보 비트당 변조된 에너지 대 단축 잡음 스펙트럼 밀도이다.

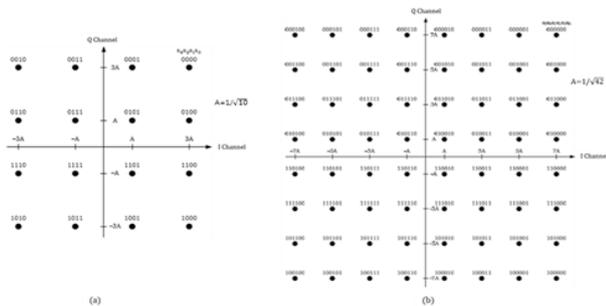


그림 2. 신호의 성상도: (a) 16QAM, (b) 64QAM  
Fig. 2. Constellation of the signal:  
(a) 16QAM, (b) 64QAM.

따라서 16QAM 및 64QAM의 경우 에러율 측면에서 OQPSK 보다 성능이 열화 되는 것을 알 수 있다. 하지만 Symbol 당 Bit 수가 증가하여 전송률이 증가하는 장점을 가지고 있다. OQPSK에서 Symbol 당 Bit 수는 2bits/symbol이며 16QAM, 64QAM에서 각각 4bits/symbol, 6bits/symbol을 갖는다.

따라서 에러율이 보장된다면, IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템에서 OQPSK를 사용하였을 때의 Data Rate인 250kbps보다 16QAM, 64QAM을 사용하였을 때 Data Rate가 각각 2배, 3배 증가하여 최대 500kbps, 750kbps를 얻을 수 있다.

2. Integrated 개선 알고리즘

3.1 절에서는 각각의 알고리즘에 대한 설명이 이루어졌다. 본 절에서는 여러 Category 중 Equalizer(MMSE), MIMO(Rx Diversity 1x2), Flexible SF(SF = 16) 및 Modulation(64QAM)을 결합한 Scenario에 대하여 살펴 보도록 한다.

가. Scenario 1: Equalizer(MMSE)

+ MIMO(Rx Diversity 1x2)

시나리오 1은 Equalizer(MMSE)와 MIMO(Rx Diversity 1x2)를 결합함으로써 에러율의 성능 개선을 얻고자 한다. Equalizer에서 MMSE를 사용하여 수신 SNR이 최대가 되도록 함으로써 신호 왜곡을 보상할 수 있다. 또한, 여러 개의 수신 안테나를 사용함으로써 서로 같은 데이터를 수신하여 Diversity Gain 뿐만 아니라 Array Gain이 증가한다. 최종적으로 시나리오 1를 통해 최적화된 에러율을 확보할 뿐만 아니라 더 나아가 최대 전송률을 증가시킬 수 있다.

나. Scenario 2: Scenario 1 + Modulation(64QAM) + Spreading Factor(16)

시나리오 2는 시나리오 1에 Modulation 64QAM 및 SF = 16을 결합한 것이다. M = 6인 큰 Modulation 차수를 사용하였을 때 시나리오 1로 신호의 왜곡을 보상할 수 없다. 따라서, 추가적으로 신호의 왜곡을 보상하기 위해 높은 SF = 16을 사용한다.

전송률은 SF와 Modulation 두 가지 측면에서 성능 분석이 이루어진다. SF의 경우, SF = 16을 사용함으로써 Reference (SF = 8)보다 Data Rate (250kbps)이 1/2

배로 감소한다. 하지만 Modulation의 경우, 64QAM을 사용함으로써 Reference (OQPSK)보다 Data Rate (250kbps)이 3배로 증가한다. 따라서 최종적으로 Data Rate가 1.5배 증가하여 최대 375kbps 전송률을 확보할 수 있다.

#### IV. IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 개선 알고리즘 성능 분석

본 장에서는 기존 및 제안한 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 성능 분석이 이루어졌다. 모의실험은 IEEE 802.15.4의 2.4GHz 표준에 따라 링크 레벨 모의실험으로 이루어졌다.

또한, II장에서 기술한 고속 철도 채널 환경에서 페이로드( $P_l$ : Payload) 26 및 133Byte를 기준으로 PER (Packet Error Rate), SER (Symbol Error Rate) 및 BER (Bit Error Rate)의 에러율과 전송률에 대한 성능 분석을 한다. 여기서, 페이로드 26Byte는 PER이 1% 미만인 되기 위한 IEEE802.15.4/ZigBee RF 요구사항의 기준이고, 133Byte는 페이로드의 최대 길이이다<sup>[7]</sup>. 이에 대한 주요 파라미터 값들은 표 4와 같다.

표 4. 모의실험 파라미터  
Table 4. Simulation Parameters.

Parameter	Value	
	Reference	Advanced
Frequency bands	2.4 GHz	
Channel Environment	HST	
Payload	26, 133 Byte	
Maximum Doppler Frequency	0, 780, 1330 Hz	
Data Rate	250 kbps	
Chip Rate	2 Mcps	
Data Modulation	16-ary Orthogonal	
Chip Modulation	OQPSK	16QAM, 64QAM
Spreading Factor	SF = 8	SF = 4, 16
Antenna Configuration	1x1	1x2
Equalizer	ZF	MMSE

##### 1. Standalone 개선 알고리즘 성능 분석

###### 가. Category 1: Equalizer

그림 3과 4는 각각 MMSE 기법이 적용된 에러율

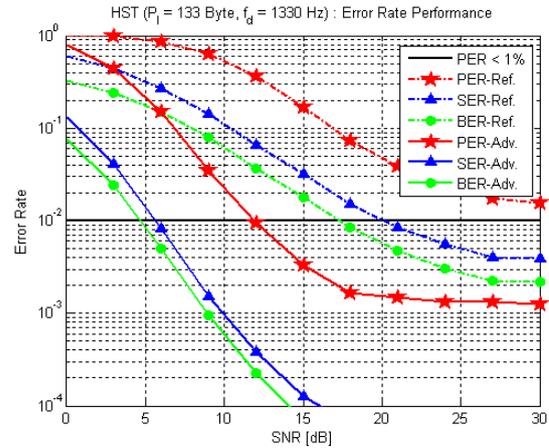


그림 3. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 Equalizer(MMSE)의 에러율  
Fig. 3. Error rate of Equalizer(MMSE) in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

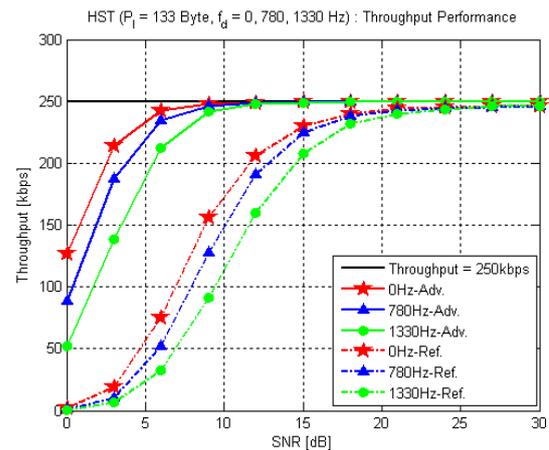


그림 4. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ )에서 Equalizer(MMSE)의 전송률  
Fig. 4. Throughput of Equalizer(MMSE) in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ ).

및 전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 3과 같이 페이로드( $P_l$ )가 133Byte, 최대 도플러 주파수( $f_d$ )가 1330Hz인 시변 주파수 선택적 채널까지 Overflow 문제를 해결하여 패키지 에러율 1% 미만을 만족시키며, 이에 대한 요구 SNR(Signal to Noise Ratio)은 12dB이다.

전송률 측면에서는 그림 4와 같이 Overflow 문제를 해결하여 최대 전송률 250kbps를 만족하며 이에 대한 전송률 성능 개선 정도는 약 4kbps인 것을 확인할 수 있다.

나. Category 2: MIMO

그림 5와 6은 각각 수신 다이버시티가 적용된 에러율 및 전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 5와 같이 페이로드( $P_l$ )가 133Byte, 최대 도플러 주파수( $f_d$ )가 1330Hz인 시변 주파수 선택적 채널까지 Overflow 문제를 해결하여 패킷 에러율 1% 미만을 만족시키며, 이에 대한 요구 SNR은 11.8dB이다. 전송률 측면에서는 그림 6과 같이 Overflow 문제를 해

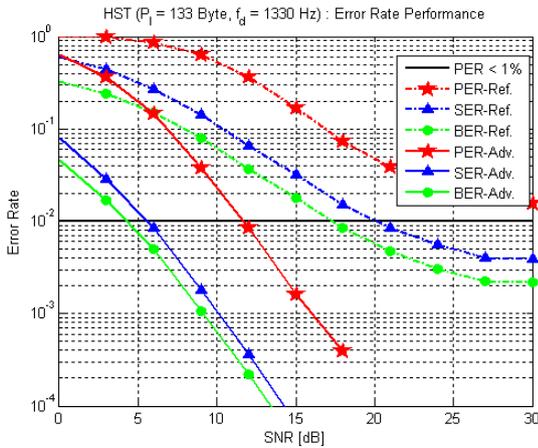


그림 5. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 MIMO(Rx Diversity 1x2)의 에러율  
Fig. 5. Error rate of MIMO(Rx Diversity 1x2) in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

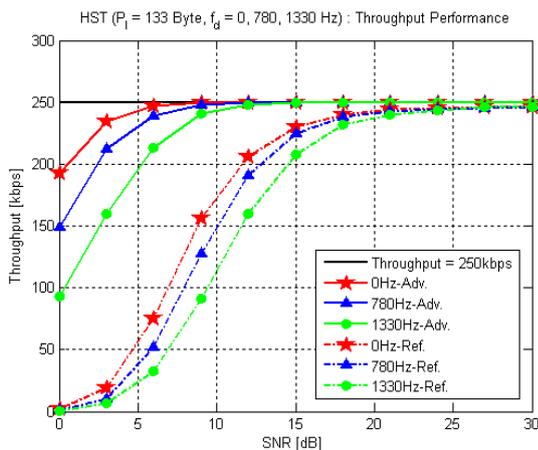


그림 6. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ )에서 MIMO(Rx Diversity 1x2)의 전송률  
Fig. 6. Throughput of MIMO(Rx Diversity 1x2) in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ ).

결하여 최대 전송률 250kbps를 만족하며 이에 대한 전송률 성능 개선 정도는 약 4kbps인 것을 확인 할 수 있다.

다. Category 3: Flexible SF

그림 7과 8은 각각 SF = 4가 적용된 에러율 및 전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 7과 같이 페이로드( $P_l$ )가 26Byte인 시불변 주파수 선택적 채널부터 Overflow가 발생하여 패킷 에러율 1% 미만을 만족시킬 수 없다. 이

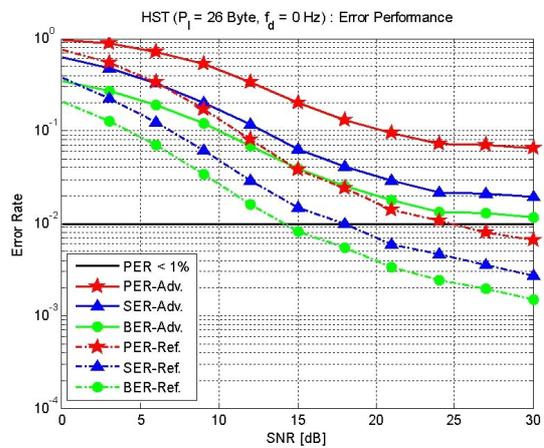


그림 7. HST 채널 환경( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0\text{Hz}$ )에서 Flexible SF(SF = 4)의 에러율  
Fig. 7. Error rate of Flexible SF(SF = 4) in HST channel environment ( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0\text{Hz}$ ).

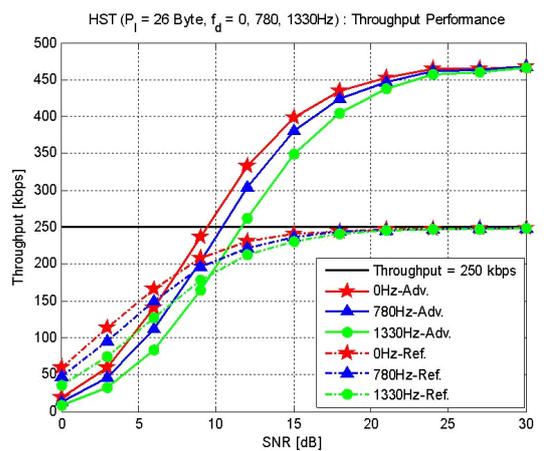


그림 8. HST 채널 환경( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ )에서 Flexible SF(SF = 4)의 전송률  
Fig. 8. Throughput of Flexible SF(SF = 4) in HST channel environment ( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ ).

에 따라 추가 보상 알고리즘이 요구되며, III.2절의 시나리오 1과 결합하여 에러율을 개선할 수 있다.

전송률 측면에서는 그림 8과 같이 낮은 SNR의 경우 Reference (SF = 8) 보다 낮은 SF = 4를 사용하여 PER의 영향을 많이 받아 상대적으로 낮은 전송률을 갖는다. 이에 따라 추가 보상 알고리즘이 요구되며, 3.2절의 시나리오 1과 결합하여 전송률을 개선할 수 있다. 하지만 높은 SNR의 경우 PER을 획득하여, III장에서 설명하였듯이 Data Rate를 500kbps까지 획득할 수 있어 기존의 성능과 비교하여 월등한 성능 이득을 가져오

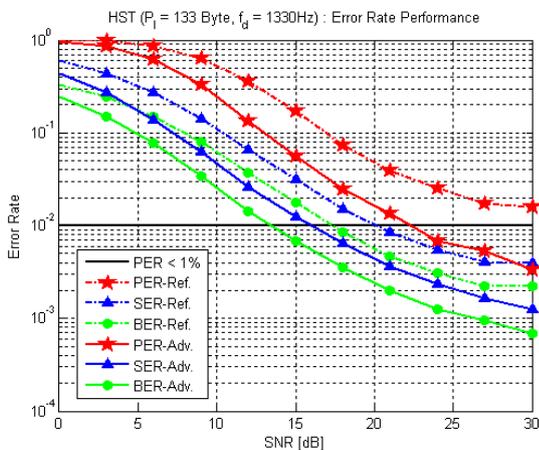


그림 9. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 Flexible SF(SF = 16)의 에러율  
Fig. 9. Error rate of Flexible SF(SF = 16) in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

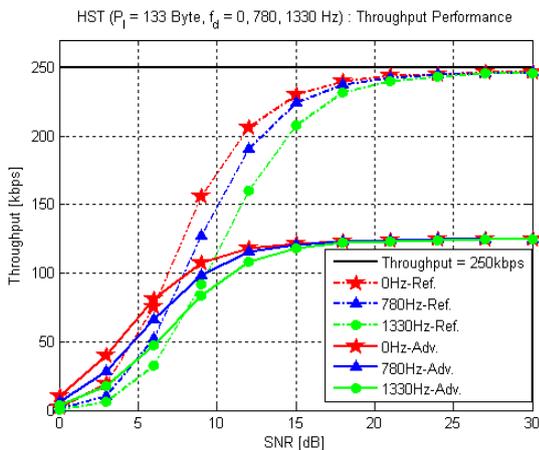


그림 10. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ )에서 Flexible SF(SF = 16)의 전송률  
Fig. 10. Throughput of Flexible SF(SF = 16) in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ ).

며, 최대 466kbps까지 도달할 수 있다.

그림 9와 10은 각각 SF = 16이 적용된 에러율 및 전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 9와 같이 페이로드( $P_l$ )가 133Byte, 최대 도플러 주파수( $f_d$ )가 1330Hz인 시변 주파수 선택적 채널까지 Overflow 문제를 해결하여 패킷 에러율 1% 미만을 만족시키며, 이에 대한 요구 SNR은 22.2dB이다.

전송률 측면에서, 그림 10과 같이 낮은 SNR의 경우 Reference (SF=8) 보다 높은 SF = 16을 사용하여 PER이 현저히 떨어져 상대적으로 높은 전송률을 갖는다. 하지만 높은 SNR의 경우 III장에서 설명하였듯이 Data Rate가 낮아져 125kbps까지 도달 가능하다. 이에 따라 추가 보상 알고리즘이 요구되며, 3.2절의 시나리오 2를 통해 전송률을 개선 할 수 있다.

#### 라. Category 4: Modulation

그림 11과 12는 각각 16QAM이 적용된 에러율 및 전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 11과 같이 페이로드( $P_l$ )가 26Byte인 시불변 주파수 선택적 채널부터 Overflow가 발생하여 패킷 에러율 1% 미만을 만족시킬 수 없다. 이에 따라 추가 보상 알고리즘이 요구되며, 3.2절의 시나리오 1과 결합하여 에러율을 개선할 수 있다.

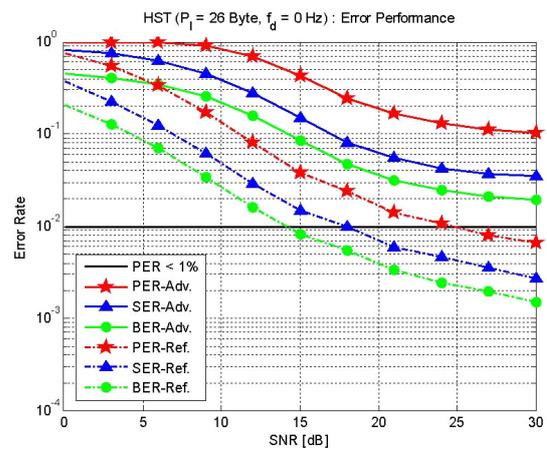


그림 11. HST 채널 환경( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0\text{Hz}$ )에서 Modulation(16QAM)의 에러율  
Fig. 11. Error rate of Modulation(16QAM) in HST channel environment ( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0\text{Hz}$ ).

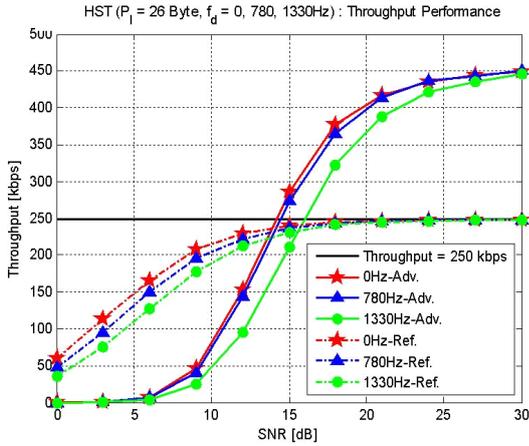


그림 12. HST 채널 환경( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ )에서 Modulation(16QAM)의 전송률  
Fig. 12. Throughput of Modulation(16QAM) in HST channel environment ( $P_l = 26\text{Byte}$ ,  $f_d = 0, 780, 1330\text{Hz}$ ).

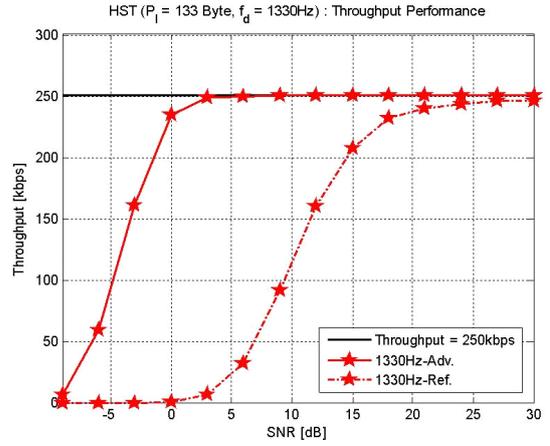


그림 14. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 Scenario 1의 전송률  
Fig. 14. Throughput of Scenario 1 in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

2. Integrated Advanced Algorithm 성능 분석

가. Scenario 1: Equalizer(MMSE) + MIMO(Rx Diversity 1x2)

그림 13과 14는 각각 Scenario 1이 적용된 에러율 및 전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 13과 같이 페이로드( $P_l$ )가 133Byte, 최대 도플러 주파수( $f_d$ )가 1330Hz인 시변 주파수 선택적 채널까지 Overflow 문제를 해결하여 패킷

에러율 1% 미만을 만족시키며, 이에 대한 요구 SNR은 2.3dB이다.

전송률 측면에서는 그림 14와 같이 Overflow 문제를 해결하여 최대 전송률 250kbps를 만족하며 이에 대한 전송률 성능 개선 정도는 약 4kbps인 것을 확인할 수 있다.

나. Scenario 2: Scenario 1 + Modulation(16QAM) + Spreading Factor (16)

그림 15와 16은 각각 Scenario 2가 적용된 에러율 및

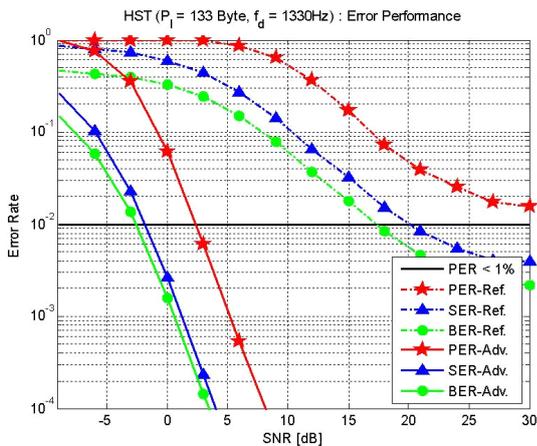


그림 13. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 Scenario 1의 에러율  
Fig. 13. Error rate of Scenario 1 in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

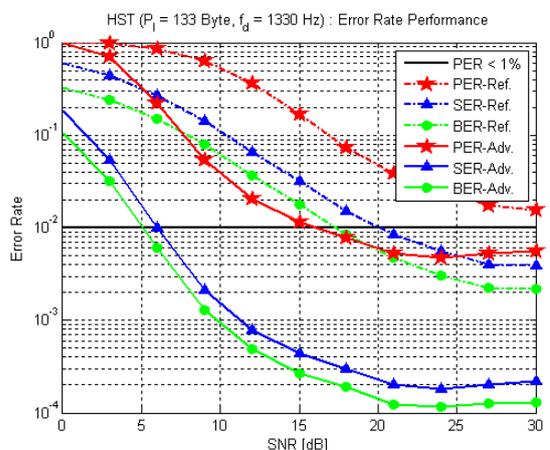


그림 15. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 Scenario 2의 에러율  
Fig. 15. Error Rate of Scenario 1 in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

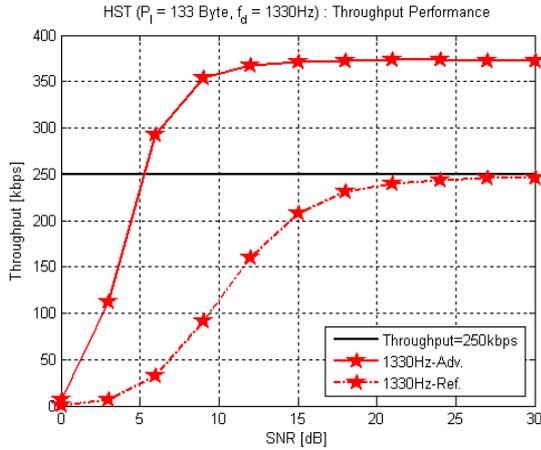


그림 16. HST 채널 환경( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ )에서 Scenario 2의 전송률

Fig. 16. Throughput of Scenario 2 in HST channel environment ( $P_l = 133\text{Byte}$ ,  $f_d = 1330\text{Hz}$ ).

전송률의 모의실험 결과를 보이고 있다.

에러율 측면에서는 그림 15와 같이 페이로드( $P_l$ )가 133Byte, 최대 도플러 주파수( $f_d$ )가 1330Hz인 시변 주파수 선택적 채널까지 Overflow 문제를 해결하여 패킷 에러율 1% 미만을 만족시키며, 이에 대한 요구 SNR은 2.3dB이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고속 철도 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 성능 개선을 위한 알고리즘을 제안하고 모의실험을 통해 성능을 분석하였다.

모의실험 결과, 에러율 측면에서는 Equalizer (MMSE), MIMO (Rx Diversity 1x2) 및 Flexible SF (SF = 16)를 통해 에러율을 만족함으로써 성능 이득을 확인하였다. 또한 전송률 측면에서는 Flexible SF (SF = 4) 및 Modulation (16QAM, 64QAM)을 통해 전송률을 향상함으로써 성능 이득을 확인하였다.

이를 통해, 현재 IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 센서 통신 네트워크의 기술적 한계를 극복할 수 있으며, IEEE 802.15.4/ZigBee 기반 고속 철도 센서 네트워크 기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

- [1] 강세일, “홈네트워크 해외 표준화 기관 추진 현황”, Tech & Market 홈네트워크 서비스 및 기술 동향, HN Focus, Vol 16, 2007, 6.
- [2] 이승열, 김동순, 김현식, 정덕진, “유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 2.4GHz 베이스 밴드 설계 및 검증”, 전자공학회지, 제 43권, TC편, 제 1호, 49~56쪽, 2006년 1월
- [3] 문상미, 김보라, 사란쉬말리크, 김영일, 여건민, 김대진, 황인태, “다양한 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 성능 분석”, 전자공학회지, 제 50권, 제 6호, 2013년 6월
- [4] 조용수, 김재권, 양원영, “MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB”, Hongreung Science Publishing, 2008.
- [5] Gleissner, Stanislav Hanus, “The BER Evaluation of UMTS under Static Propagation Conditions”, Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on System Science and Simulation in Engineering, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 16-18, 2006.
- [6] Bernard Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications (2nd Edition)
- [7] IEEE Standard for Information technology, “IEEE 802.15.4 Specific requirements part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN)”, IEEE standard, Oct. 2003.

저 자 소 개



문 상 미(학생회원)  
 2012년 2월 전남대학교  
 전자컴퓨터공학부 학사  
 2012년 3월~현재 전남대학교  
 전자컴퓨터공학과 석사과정  
 <주관심분야 : 이동통신, ICIM>



김 철 성(평생회원)  
 1987년 Univ. of Arizona (박사)  
 1987년~1989년 한국전자통신 연구원  
 1989년~현재 전남대학교  
 전자컴퓨터공학부 교수

<주관심분야 : 이동통신, 디지털통신, MIMO, OFDM, RFID>



김 보 라(학생회원)  
 2012년 2월 전남대학교  
 전자컴퓨터공학부 학사  
 2012년 3월~현재 전남대학교  
 전자컴퓨터공학과  
 석사과정  
 <주관심분야 : 이동통신, CoMP>



황 인 태(평생회원)  
 1990년 2월 전남대학교  
 전자공학과 학사  
 1992년 8월 연세대학교  
 전자공학과 석사  
 1999년 9월~2004년 2월  
 연세대학교  
 전기전자공학과 박사

1992년 8월~2006년 2월 LG전자 책임 연구원  
 2006년 3월~현재 전남대학교 전자컴퓨터공학부  
 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 무선통신시스템, 차세대이동통신, MIMO, OFDM, MIMO-OFDM, Relay, ICIM, CoMP, MTC>



사란쉬 말리크(학생회원)  
 2010년 라지프 간디 공과대학  
 IT학과 학사  
 2013년 2월 전남대학교 전자  
 컴퓨터공학과 석사  
 2012년 3월~현재 전남대학교 전  
 자컴퓨터공학과  
 박사과정

<주관심분야 : MIMO, OFDM, Relay>



김 대 진(평생회원)  
 1984년 서울대학교  
 전자공학과 학사  
 1986년 한국과학기술원  
 전기 및 전자공학과 석사  
 1991년 한국과학기술원  
 전기 및 전자공학과 박사

1991년 7월 1996년 12월 LG전자 멀티미디어연구  
 소 책임연구원

1997년~현재 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수  
 <주관심분야 : 디지털 통신, 디지털 방송>