

## CBTC시스템과 WPAN시스템의 상호간섭영향 및 간섭신호 억제방안에 대한 성능분석

### Performance Analysis on the Impact of Mutual Interference and the Interference Suppression Method for CBTC System in the Presence of WPAN System

김성철\*

Seong Cheol Kim

**Abstract** The CBTC(Communication based Train Control) and WPAN(Wireless Personal Area Network) systems employed on 2.4GHz ISM band wireless networks provide complementary service within the same environment. Coexistence between the networks will be impaired if the mutual packets are uncertainty associated the timing or gaussian distance. This paper analyzes the impact of the mutual interference and proposed method to minimize the effect of the WPAN system signals on CBTC system. The performance analysis is illustrated by examining the symbol error rate versus signal to noise interference ratio in terms of carrier frequency offset. The method contributes to reduce the symbol error rate drastically. However it can't be a fundamental solution for the impact on the interference problem. It may be needed for railway only frequency after checking the problems of the current railway frequency.

**Keywords** : CBTC, ISM, Carrier frequency offset, FHSS, DSSS, Transversal filter

**초 록** 2.4GHz ISM 대역 무선통신망을 통해 서비스되는 CBTC와 WPAN 시스템은 서로 동일한 환경하에서 상호 보완적인 운영을 한다. 이러한 두 시스템의 상호 신호가 시간과 가우시안 거리의 불확실성에 존재할 경우 시스템간에 충돌이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 상호간섭의 영향을 분석하고 WPAN시스템의 신호가 CBTC시스템에 미치는 영향을 최소화하기 위한 제안된 방법에 대한 성능을 분석한다. 성능 분석은 반송파 주파수 오프셋에 따른 신호대 간섭 잡음신호에 의한 심볼오차확률의 분석을 통해 설명된다. 제안된 방법은 심볼오차 확률을 개선하는 효과가 있다. 그러나 이는 주파수 도약 방식의 WPAN시스템에서 발생하는 도약 패턴에 대한 사전예측 방법에 대한 더 많은 원신호만을 복원시키는 필터를 개발하여야 하는 문제가 있다. 따라서 근본적인 방법이라 할 수는 없다. 현재 철도주파수의 문제점을 검토하여 철도 전용주파수를 확보하는 것이 필요할 것이다.

**주요어** : CBTC, ISM, 반송주파수 오프셋, FHSS, DSSS, 트랜스버설 필터

## 1. 서 론

철도시스템에서는 신속하고 안전한 승객운반을 위한 열차 운행의 안전도 및 신뢰도 확보가 점차 중요한 문제로 대두되고 있으며, 이에 따라 고도화된 열차제어시스템을 요구하고 있다. 이를 뒷받침 하는 무선통신 기술을 이용한 이동통신은 매우 급속하게 발전되고 있으며, 통신을 이용한 열차제어 시스템은 신뢰성 높은 차상 및 현장설비가 사용되고 지상의 중앙제어센터에 설치된 컴퓨터가 각 열차의 위치와 속도를 주기적으로 수집하여 선행열차 위치와 속도제한 지점까지의 거리를 열차로 전송하고, 차상의 컴퓨터가 열차 성능에 맞는 최적의 속도제어를 하는 것으로 지상과 차상간의 데이터 전송에 무선을 사용하는 것이다. 세계 각국에서는 무선이동통신기술을 이용한 안전하고 신뢰성 있는 통신기반열

차제어시스템(CBTC)을 연구하고 있으며, 여러 국가에서는 벌써 실용화 중이다. 무선 통신 기술이 급속하게 발전하면서 무선 통신 방식의 CBTC가 주목을 받게 되었고, 그 첫 시범사업으로 NYCT가 수행한 Canarsie 라인이 현대적 RF-CBTC의 효시라고 할 수 있다. 현재 CBTC시스템은 신호제어 기술 중에서 가장 앞선 기술이고, 지상과 차상에 설치되어 상호간의 지속적인 통신을 통하여 열차운행의 안전성을 확보 할 수 있으며, 운전 시격을 단축하게 함으로써 수송용량의 증대를 가져오고 중앙제어시스템 간의 원활한 데이터 통신은 열차 운행효율을 높이고 안전성과 편의성까지 최적화 할 수 있다[1,2].

CBTC의 통신기술은 IEEE 802.11.x 표준을 사용하고 있으며 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum) 또는 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 방식 중 하나를 사용하고 있으며, 주파수는 ISM밴드 대역중 하나인 2.4GHz를 사용하게 된다[3]. 2.4GHz 주파수 대역은 전 세계적으로 그 수요가 팽창하고 있으며, 무선 통신 서비스가 출현하여 그 적용대상도 광범위하게 확장되어 가고 있다. 이중에서도 음

\*Corresponding author.

Tel.: +82-42-630-9393, E-mail : kmin@wsu.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.5.454

성, 텍스트, 영상 등을 고속으로 교환 할 수 있는 와이브로, WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access)등 무선 기술의 사용범위가 점차 늘어나고 있으며, 2.4GHz 주파수 대역의 특징인 비 허가 무선통신기기가 사용 할 수 있는 개방형 대역으로, 무선 LAN을 포함한 수많은 산업, 과학, 의료용 무선통신장비가 혼용되어 사용되고 있어 열악한 주파수 환경을 가지고 있기 때문에 다른 무선 통신기기들의 영향으로 인한 통신 지연, 통신 왜곡 및 정보 손실 등이 발생할 수 있다. 이와 같이 ISM(Industrial Scientific and Medical) 대역은 Zigbee, 블루투스 등의 서비스가 확대되면서 간섭, 혼신 및 잡음이 증가하는 추세이다.

향후 철도는 무인운전시스템으로 바뀌게 될 것이며, 완전 자동화를 통한 중앙 집중 제어 방식으로 컨트롤을 하게 될 것이다. 철도무선통신시스템은 장애, 사고, 지연 등이 일어나지 않게 대비해야 하며, ISM 대역에서의 간섭 및 혼신 등이 일어나지 않게 2.4GHz 대역의원 신호 보호 및 고장에 의한 연속적 제어를 할 수 있도록 시스템의 이중화 작업을 해야 하며 충돌과 탈선을 방지하기 위한 일반적인 통신기술의 주파수 안전성 확보가 필요하다.

이러한 상호간섭을 억제하기 위한 방법 중 수용 가능한 채널을 효과적으로 사용하여 패킷 손실을 줄이기 위한 적응적으로 주파수 도약을 하는 방법이 제시되었다[3]. 또한 WAPN 시스템은 다양한 형태의 패킷을 사용하기 때문에 수신되는 도약주파수의 상태에 따라 최적의 패킷을 선택하는 적응적 패킷선택 및 스케줄링 방법 또한 제안되었다[4]. 또한 상호 시스템간의 간섭을 줄이기 위해 송신전력을 조절하는 방법 또한 제시되었다[4]. 제안된 방법들은 실제 MAC계층과 그 상위계층간의 상호 연계된 트래픽 상황에서 이루어지기 때문에 구현이 상당히 복잡하며 새로운 프로토콜을 적용하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 물리계층에서 수신되는 주파수 도약 패턴을 분석하여 간섭신호에 대한 도약 주파수를 적응적으로 제거하는 하드웨어를 수정하여 간섭신호제거를 위한 구조를 제안한다. 이를 위해 본 논문에서는 CBTC시스템과 Zigbee, 블루투스 등(IEEE.802.15x:WPAN) 서비스간의 반송파 주파수 오프셋에 따른 간섭 전력영향 등으로 인한 채널간의 간섭 영향에 대한 성능 분석을 하고, 두 서비스간의 공존을 위한 WPAN시스템에 의한 CBTC시스템의 간섭을 최소화하기 위한 방법을 제안하고 제안된 방법에 대한 성능을 심볼 오차 확률에 대해 성능 분석을 하고자 한다. 나아가서는 철도 전용주파수의 필요성과 그에 따른 요구사항 대해 연구하려 한다. 2장에서는 WPAN시스템과 WLAN 시스템의 프로토콜에 대한 개요를 알아본다. 또한 3장에서는 분석하고자 하는 시스템의 모델에 대해 설명하고 4장에서는 근접한 두 시스템간 주파수오프셋에 따른 상호간섭의 영향과 제안된 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며 마지막 5장에서는 결론을 맺었다.

## 2. ISM대역 전송 시스템

본 절에서는 WLAN 시스템의 물리계층과 MAC 계층 프로토콜을 살펴 보고자 한다. IEEE 802.11 표준에서는 FHSS

(Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum), IrDa의 세 가지 서로 다른 물리계층의 전송방법을 규정하고 있다. 시스템의 전송전력은 최대치 1Watt로 정의되고, 수신감도는 -80dBm으로 규정되어있다. 안테나 이득은 최대치 6dBm으로 제한된다[5].

FHSS 시스템에서 각각의 신호는 한 반송파 주파수에서 미리 규정된 의사랜덤시퀀스에 의해 다른 주파수로 도약한다. 송수신국은 서로 동기화 되어 동일한 주파수열로 도약하게 된다. 채널 간격이 1MHz로써 2.4~2.4835GHz의 주파수 대역을 사용함으로써 79개의 채널을 갖게 되며 각 도약주파수가 유지되는 시간은 각 국가의 규정에 따라 정해진다. 변조는 GFSK(Gaussian filtered Frequency Shift Keying)이며  $h_f = 0.32$ 와  $BT = 0.5$ 로 규정되어있다.  $B$ 는 가우시안 저역 통과필터의 3dB 대역폭이며  $T$ 는 비트 주기이다.

DSSS 시스템에서의 송신기는 데이터 열을 심볼 열로 변환시키는데, 이때 각각의 심볼은 22MHz의 광대역으로 확산된 신호이다. 기본적인 데이터 전송 속도와 그에 따른 변조형식을 Table 1에 기술하였다.

Table 1 Modulation type for each data rate

Data rate	Modulation type
1Mbps	DBPSK
2Mbps	DQPSK
5.5Mbps	CCK
11Mbps	CCK

5.5Mbps와 11Mbps의 고속의 전송속도는 CCK 변조방법인 PPM(Pulse-Position Modulation)과 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)을 결합한 형태로 가능하게 된다. 모든 물리계층 전송방법과 전송속도에 공통으로 적용되는 MAC 계층의 규격은 국(Station)간의 통신을 조정하며 망에 접속하고자 하는 사용자들의 행동을 제어하는 프로토콜을 규정한다[6]. 기본 MAC 프로토콜 운용을 묘사하는 DCF(Distributed Coordination Function)는 캐리어센스 다중접속 충돌회피(CSMA/CA) 시스템을 기반으로 한다. MAC 계층과 물리계층 충돌회피 절차를 이행하기위해서 서로 협력한다. 물리계층은 매체 전송 데이터를 통해 수신된 에너지를 샘플링하여 채널이 클리어 되어있는지 판정하기 위해 CCA(Clear Channel Assessment) 알고리즘을 사용한다. 이것은 안테나에서의 RF신호의 전력을 측정하여 RSSI(Received Signal Strength Indicator)로 널리 알려져 있는 수신신호강도 측정기로 수신 신호량을 판정함으로써 이루어질 수가 있다. 또한 캐리어 센스는 채널이 이용가능한지 판정기 위해 사용되어 질 수 있다. 이러한 기술은 전송 신호가 802.11송신기와 동일한 반송파 형식임을 확인 시켜주기 때문에 매우 선택적이다.

## 3. 시스템 모델

### 3.1 간섭 시스템 모델

Fig. 1은 상호 간섭 영향을 분석하기 위한 수신기 시스템

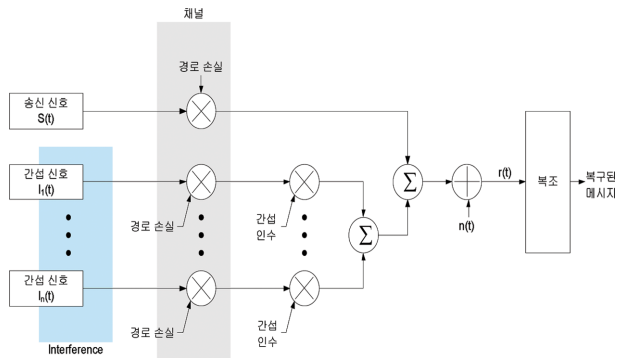


Fig. 1 system model

을 나타낸다.

잡음과 간섭신호가 더해진 수신신호  $r(t)$  는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$r(t) = \alpha s(t) + \sum_{k=1}^N \beta_k \gamma_k I_k(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서  $s(t)$ 는 원하는 송신신호를 나타내며  $\alpha$  다중경로 채널에 의한 경로 손실이며, 전파지연은 일정하다고 간주한다.  $I_k(t)$ 는 간섭신호를 나타내며,  $\beta_k$ 는 경로 손실을 의미한다. 또한  $\gamma_k$ 는 전송 표준 마스크와 원하는 신호로부터의 주파수 오프셋 효과를 결합하여 결정된 간섭신호의 감쇄 영향을 나타내는 간섭 인수를 나타낸다.  $n(t)$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다. 반송파 주파수 오프셋에 따른 간섭 신호의 억압에 대한 이론적인 모델을 위한 값은 식 (2)와 같다. 여기서  $T_c$ 는 대역확산을 위한 PN코드의 주기를 나타내며,  $f_{offset}$ 은 주파수 오프셋이며,  $\text{sinc}(t)$ 함수는 CW(Continuous Wave) 톤의 확산 결과를 의미하며  $G(f)$ 는 PN chip 펄스 정형 필터의 푸리에 변환을 의미하며, 본 논문에서는  $\alpha=0.3$ 인 상승 코사인 필터를 적용하였다[7].

$$10 \log \left( \frac{\text{sinc}(f_{offset} T_c) G(f_{offset})^2}{|G(0)|^2} \right) \quad (2)$$

### 3.2 제안된 간섭억제 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 CBTC 시스템의 성능에 영향을 미치는 간섭신호인 WPAN 시스템(IEEE802.15x)의 신호를 완화하기 위한 간섭억제를 위한 수신기의 구조는 Fig. 2와 같다. 이는 Fig. 1의 마지막 단인 복조기 부분에 해당한다. Fig. 3은 조절 가능한 트랜스버설 필터로서 필터의 최적 계수는 측정된 후 필터의 성능향상시 사용하게 된다.

제안한 방법에 대한 기본개념은 CBTC시스템에 수신되는 해당 WPAN신호 주파수에 대해 주파수 성분을 제거하기 위해 null 신호를 제공할 수 있도록 하는 것이다. 그러나 신호는 각 패킷 전송마다 새로운 주파수로 도약하기 때문에 CBTC 수신기는 WPAN전송기의 주파수 도약 패턴 및 타이밍을 파악할 필요가 있다. 이러한 정보는 CBTC 수신기의

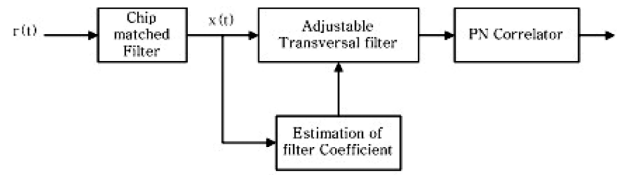


Fig. 2 CBTC Receiver for interference suppression

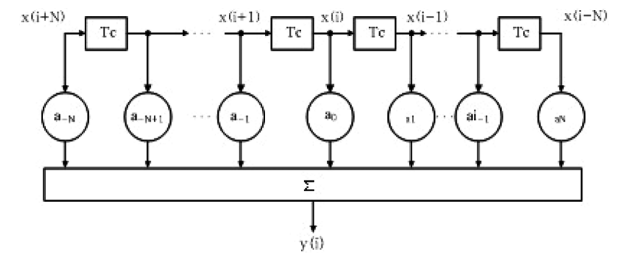


Fig. 3 Adjustable transversal filter

일부로 WPAN 수신기를 이용해 봄으로써 얻을 수 있다. 이러한 해석은 물리 계층에서의 해결점이므로 이는 MEHTA MAC계층의 해결책과 통합될 수 있다. 간섭신호가 단일 톤인 경우를 가정해 보자. 조절가능한 트랜스버설 필터에서의 중앙 탭을 고려해볼 때,  $i$ 번째 샘플링 시간에서의 샘플신호는 식 (3)과 같다.

$$x_i = d_i + V_j \cos(2\pi f_j T_c + \theta) + n_i \quad (3)$$

$T_c$ 는 대역확산을 위한 PN코드의 주기,  $d_i$ 는 신호 진폭이고,  $V_j, f_j$ 는 간섭의 진폭과 주파수이다.  $\theta$ 는 균일분포를 갖는 임의의 위상각이다. 간섭신호가 정체적인 경우 오류를 최소화할 수 있는 최적화된 가중치 탭(tap weights)을 찾기 위해 Wiener 해석법을 이용할 수 있다. 이들 최적화 탭 계수들 ( $a_{k,opt}$ )는 식 (4)의 해로부터 구할 수 있다[8].

$$\sum_{k=-N, k \neq 0}^{k=N} r(l-k) a_{k,opt} = r(l), l = -N, \dots, -1, 1, \dots, N \quad (4)$$

여기서  $r(m) = E\{x_i x_{i-m}\}$ 은 자기 상관함수이다.

PN시퀀스가 충분히 길다고 가정하면 서로 다른 탭에서의 PN신호 표본들은 서로 상관성이 없다. 이런 경우 최적의 탭가중치 값은 식 (5)와 같이 표현된다[8,9].

$$a_{k,opt} = 2A \cos(k\omega t), \omega = 2\pi f_i \quad (5)$$

이때  $A$ 는 식 (6)과 같다.

$$A = \frac{J}{2(S + \sigma_n^2) + J \left[ 2N - 1 + \frac{\sin(2N+1)\omega T}{\sin \omega T} \right]} \quad (6)$$

여기서  $S$ : 신호전력,  $J$ : 간섭전력,  $\sigma_n^2$ : 잡음전력이다.

#### 4. 시스템의 성능분석

먼저 WPAN시스템 간섭 신호 하에 CBTC시스템의 성능을 반송파 주파수 오프셋에 따른 심볼오차 확률측면에서 성능분석을 하였다. 먼저 제안된 방법을 적용하지 않은 간섭 영향에 대한 성능분석결과를 살펴보면 Fig. 4와 같다. 결과를 보면 알 수 있듯이 모든 간섭신호의 주파수 오프셋에 있어서 수용 가능한 성능을 내기 위해서는 약 -5dB의 CIR (Carrier to Interference ratio) 값이 요구됨을 알 수 있다. 결과를 보면 알 수 있듯이 WPAN 신호의 주파수 오프셋이 1MHz일 경우에는 CBTC신호의 대역 내에(In-band) 간섭 신호 성분이 존재하기 때문에 심볼 오차 확률이 현저하게 나빠짐을 알 수 있다. 그리고 만약 주파수 오프셋이 약 5MHz 이상인 경우는 약 -13dB의 CIR 값이 요구됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 간섭 신호의 전력이 클 경우에 시스템에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다. 그리고 주파수 오프셋이 5MHz에서부터는 WPAN대역폭이 CBTC시스템 대역폭을 벗어나서 가우시안 거리보다 넓기 때문에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또한 간섭신호 억제를 위한 제안된 방법에 대한 성능분석을 위해 정합여과기 입력에서의 신호, 잡음, 간섭신호 값을 이용하였고 성능을 높이고 복잡도를 줄이기 위해 필터의 탭 수(M)는 32로 하였다. 적응필터를 위한 필터 탭계수 예측치 값은 식 (5), (6)을 이용하여 모의실험을 하였다.

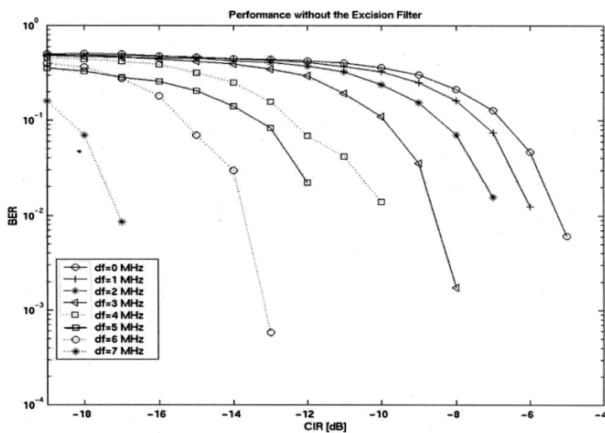


Fig. 4 CBTC system performance with WPAN signal interference

Fig. 5는 본 연구에서 제안한 방법의 수신기 구조에서의 성능결과를 나타낸다. 그림을 보면 알 수 있듯이 모든 주파수 오프셋에 있어서 성능의 개선이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 가장 최악의 상황인 주파수 오프셋이 0MHz인 경우에 개선방법이 적용되지 않은 경우에 비해 비트오차확률 성능을 만족하기 위한 성능개선이 약 10dB가 됨을 알 수 있다. 또한 오프셋이 1MHz, 3MHz인 경우에는 0MHz에 비해 약 3dB 이상의 개선 효과가 있음을 알 수 있다. 주파수 오프셋이 5MHz 이상인 경우에는 성능개선이 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이는 위에서 언급하였듯이 WPAN대역

폭이 CBTC시스템 대역폭을 벗어나서 가우시안 거리보다 넓기 때문인 것으로 생각된다.

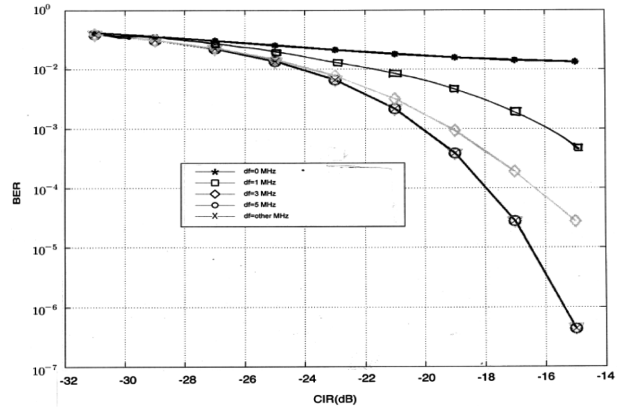


Fig. 5 CBTC system performance with WPAN signal interference with suppression filter

#### 5. 결 론

열차제어시스템에서 사용하는 기존의 ATC/ATO 및 ATP/ATO 시스템은 무선이동통신기술을 이용한 통신기반열차제어시스템(CBTC)으로 변환이 되고 있으며, 이로 인해 열차 운행속도 증가, 운행 간격 단축, 정위치 정차, 열차제어 성능 통제, 실시간 원격감시 등 무선으로의 장점을 이용할 수 있게 되어 철도산업의 발전을 이끌어 왔다. 하지만, 무선이라는 특성상 주파수 간섭의 취약점에 노출될 수밖에 없고, ISM밴드 대역이라는 누구나 사용할 수 있는 주파수 대역을 사용하고 있는 CBTC 철도무선 시스템으로써는 간섭, 왜곡, 변형 등에 노출될 수밖에 없다. 본 논문은 최근 이슈화되고 있는 CBTC시스템과 WPAN 송수신기의 패킷들이 동일한 대역 내에 존재할 때, 상호간섭영향을 심볼 오차 확률으로써 성능을 분석 하였다.

이를 위해 WLAN표준과 WPAN(802.15.x) 표준에서 정의한 송수신 마스크에 대해 살펴보았고 무선 수신기의 성능 지표인 심볼 오차 확률에 대해 살펴보았다. 간섭 신호의 주파수 오프셋이 각 시스템의 신호 대역 내에 침범할 정도로 근접해 있을 때 즉 가우시안 거리를 만족하지 않을 때 간섭 신호가 없는 수신기의 심볼 오차 확률에 비해 수신 성능 저하가 많음을 확인 하였고, 가우시안 거리를 만족 할 때의 수신기는 성능 저하가 거의 없다는 것을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 제안한 간섭억제 방법을 적용하였을 경우 주파수 오프셋이 최악상황인 경우에도 상당한 성능향상 개선이 됨을 알 수 있었다. WLAN 시스템은 직접대역확산방식으로 넓은 대역폭을 계속적으로 사용하고 있기 때문에 주파수 도약 방식의 WPAN시스템에서 발생하는 도약 패턴에 대한 사전예측 방법에 대한 더 많은 원신호만을 복원시키는 필터를 개발하여 신호 간섭을 최소화 시키기 위한 보다 효율적인 방법을 연구하여 상호 간섭을 줄일 수 있는 연구가 앞으로 더 진행되어야 할 것으로 생각된다. 이처럼 현재 ISM밴드 2.4GHz

의 같은 대역을 사용하는 주파수는 언제든지 서로 간섭을 발생시킬 수 있고, 신호 지연을 발생 시킬 수가 있다. 뿐만 아니라 차후에는 간섭의 최소화가 아닌 신규주파수로 전환하여 간섭 받지 않으며, 안전성을 확보할 수 있게 철도 전용 주파수를 확보해야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] C.H. Jung (2009) A Study on the improving plan for ISM Equipment system, *Korea Radio Promotion Association*.
- [2] J.H. Jeon et al. (2009) A Study on the guarantee plan for an exclusive railway wireless frequency, *Journal of the Korean Society for Railway Spring conference*, pp. 2030-2037.
- [3] Nada Golmie and Frederic Mouveaux (2001) Interference In the 2.4GHz ISM band: Impact on the Bluetooth Access Control performance *IEEE conference on Wireless personal communication*, pp. 2540-2545.
- [4] Jim Lansford et al. (2001) Wi-fi(802.11b) and Bluetooth : Enabling Coexistence, *IEEE Networks* Vol.19 No.5 pp. 20-27.
- [5] John W Ketchum, John G Proakis (1982) Adaptive Algorithms for estimating and Suppressing narrow band interference in PN Spread-Spectrum Systems, *IEEE Trans. ON Communications* Vol. Com.30 No.5 pp. 913-924.
- [6] IEEE Std. 802-11 (2001) IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specification
- [7] LOH-MING LI, Laurence B. Milstein (1982) Rejection of Narrow-band Interference in PN Spread-Spectrum Systems using Transversal filters, *IEEE Trans. ON Communications* Vol. Com.30 No.5, pp. 925-928.
- [8] J. Proakis (1995) Digital Communication 3ed *McGraw-Hill*
- [9] Jack, K. Homes (1982) Coherent Spread Communication, *Wiley interscience, Inc.*

접수일(2012년 3월 29일), 수정일(2012년 8월 30일),  
 게재확정일(2012년 9월 10일)

---

**Seong-cheol Kim** : kmin@wsu.ac.kr

Department of Railroad electrical system engineering, Woosong University 17-2 Jayang Dong Dong-Gu Dajeon 300-718, Korea