

간섭부하 개념을 이용한 주파수 공동사용 기술의 성능비교 및 검증

Performance Comparison and Its Verification of Spectrum Sharing Technologies Using Interference Load Concept

이상준 · 엄중선* · 윤현구** · 장병준

Sangjoon Lee · Jungsun Um* · Hyungoo Yoon** · Byung-Jun Jang

요 약

본 논문에서는 비면허 대역 무선기기에 사용되는 주파수 공동사용 기술의 성능을 비교 분석할 수 있는 간섭부하 개념을 제안하였다. 간섭부하 개념은 다양한 주파수 공동사용 기술, 즉 주파수 호핑(FH: Frequency Hopping), 듀티 사이클(DC: Duty Cycle), 송신전 감지 기술을 사용하는 무선기기가 타 무선기기에 간섭을 주는 정도를 정량적으로 비교할 수 있다. 따라서 주파수 공동사용 기술기준이 일관되고 합리적으로 제정되었는지 평가하는데 도움을 줄 수 있다. 제안한 개념을 검증하기 위하여 다양한 2.4 GHz 대역의 무선기기의 주파수 공동사용 성능을 비교분석하였다. 또한, 실시간 테스트베드를 구축하고, FH와 DC의 경우, 기술기준에 따른 비트 오류 확률을 비교실험하였다. 실험 결과, 10개 채널을 FH하는 것과 10 % DC이 동일한 오류 확률을 가짐을 확인함으로써 본 논문에서 제안한 개념의 타당성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed a concept of interference load to analyze the performance of spectrum sharing technologies in unlicensed frequency bands. The interference load can quantitatively compare the technical properties of various spectrum sharing technologies, such as frequency hopping(FH), duty cycle(DC), listen-before-talk(LBT). Therefore, it can help to evaluate whether a local regulation about spectrum sharing is reasonably established or not. In order to verify the suggested concept, we applied it to 2.4 GHz frequency bands. Also, we demonstrated a real-time test-bed. Two bit error rate(BER) curves for FH with 10 random channels and DC of 10 %, show such good agreement that our proposed concept is expected to be widely used to assess various spectrum sharing technologies.

Key words: Spectrum Sharing, Frequency Interference, Unlicensed Band, Frequency Hopping, Duty Cycle, Listen-before-Talk

I. 서 론

최근 주파수를 필요로 하는 산업 분야와 그 수요는 지속적으로 증가하고 있지만, 주파수 자원은 유한하기 때문

에 주파수 부족 현상은 갈수록 심화되고 있다. 따라서 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하도록 유도하는 것은 미래 전파정책에 있어 매우 중요한 문제이다. 특히 여러 무선기기들이 한정된 주파수 자원을 공동으로 사용해

「이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No.B0717-16-0059, Free Band 및 비면허대역 활성화를 위한 상호공존 기술 및 분석 틀 개발)」

국민대학교 전자공학부(Department of Electronical Engineering, Kookmin University)

*한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunication Research Institute)

**명지전문대학 컴퓨터전자과(Department of Computer & Electronic Engineering, Myongji College)

· Manuscript received November 4, 2016 ; Revised December 16, 2016 ; Accepted December 19, 2016. (ID No. 20161104-115)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

야 하는 비면허 주파수 대역에서는 합리적인 주파수 공동사용 방법을 기술기준으로 제정하고, 그 기준을 준수하도록 유도하는 것이 매우 중요하다^[1].

국내 비면허 대역에 사용되고 있는 주파수 공동사용 기술은 크게 세 가지로 분류할 수 있다^[2]. 먼저 주파수 측면에서 주파수 호핑(FH: Frequency Hopping) 방식이 있다. FH 방식은 비면허 주파수대역 내에 존재하는 여러 채널을 랜덤하게 이동함으로써 특정 채널을 지속적으로 점유함으로써 발생하는 간섭을 회피하는 방식이다. 대표적인 예로 2.4 GHz 대역의 Bluetooth 기기가 있다. Bluetooth 기기는 2,402~2,480 MHz의 주파수 대역을 1 MHz 대역폭을 갖는 79개의 채널로 나눈 후 초당 1,600번 이 채널 중의 하나로 주파수 호핑을 한다. 이렇게 되면 특정채널을 사용하는 무선기기에게 간섭을 줄 확률을 1/79로 줄일 수 있다. 다음으로 시간 측면에서 듀티 사이클(DC: Duty Cycle) 방식이 있다. DC는 채널의 점유시간을 비점유시간으로 나눈 백분율로 정의되며, 이 비율만큼 간섭 확률을 줄일 수 있다. 예를 들어 매 20초 동안 0.4초 이내로 송신한다면 DC는 최대 2 %가 되는데, 2 %의 DC의 경우 98 %의 시간동안은 송신을 하지 않으므로 그 만큼 타 무선기기에 간섭을 주지 않게 된다. 마지막으로 송신전 감지(LBT: Listen-Before-Talk) 방식이 있다. LBT 방식은 송신하기 전에 채널을 타 무선기기가 사용하고 있는지 감지하여 타 무선기기가 사용하지 않을 경우에만 송신하도록 하는 방식이다. 이렇게 되면 주변 무선기기가 없으므로 신호를 송신하더라도 주변에 간섭이 없게 된다. 국내 비면허대역 중 RFID/USN 대역은 FH, DC, LBT 기술이 모두 정의되어 있으며, 2.4 GHz(2,400~2,483.5 MHz)와 5.8 GHz(5,725~5,825 MHz) ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 대역은 FH 기술만이 정의되어 있다^[3].

이러한 주파수 공동사용 기술을 국내 기술기준, 즉 무선설비규칙으로 제정할 때는 가급적 합리적이고 동일한 기준이 적용되는 것이 바람직하다. 하지만 모든 주파수 공동사용 기술은 그 등장 시기 및 배경, 기술적인 난이도가 모두 다를 뿐만 아니라, 국가적으로도 선호되는 기술이 다르기 때문에 동일한 기준이 적용되기 쉽지 않다. 특정 기술은 엄격하게 기술기준이 제정되는 반면, 다른 기

술은 상대적으로 완화된 기술기준이 제정될 수 있다. 이런 사례로 900 MHz 대역의 RFID 기술이 있다. 2004년 900 MHz 대역의 국내 RFID 기술기준을 제정할 때 미국에서 주로 사용된 FH 기술과 유럽에서 사용되는 LBT 기술이 모두 기술기준으로 제정되었으나, 현재 국내에서 사용되는 대부분의 RFID 기기들은 FH 기술을 사용하고 있다. 이렇게 된 이유에는 다양한 기술적, 경제적 이유가 있을 수 있으나, 그 중에 LBT 기술이 FH 기술보다 기술기준이 엄격하여 상대적으로 구현이 쉬운 FH 기술 중심으로 기술개발 및 제품출시가 이루어진 데에도 그 이유가 있다^[4]. 또한, 대부분의 기술기준에서 간섭 영향 분석을 위해서 사용한 기존의 간섭전력과 같은 지표는 LBT와 같이 특정 주파수 공동사용 기술에서는 값을 특정하기 어렵기 때문이기도 하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 피간섭원 수신기에서의 간섭량을 확률적으로 정량화하는 방법도 있으나, 간섭확률을 성능분석 등에 적용하기 위한 용도로 주로 활용되고 있다. UWB(Ultra Wide Band) 등 주파수 공동사용 기술을 위한 간섭 정량화로 간섭온도(interference temperature) 개념도 소개되었다^[5]. 간섭온도는 UWB와 같이 초광대역 잡음 특성을 갖는 시스템의 간섭전력을 열잡음 형태의 백색잡음(white noise)으로 모델링하므로, 협대역 시스템이나 페이딩 채널에 의한 유색잡음(colored noise) 형태의 간섭 환경에서는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 비면허 무선기기에 적용되고 있는 주파수 공동사용 기술의 성능을 비교·분석할 수 있는 간섭부하 개념을 제안하였다. 간섭부하 개념은 다양한 주파수 공동사용 기술, 즉 FH, DC, LBT 기술을 사용하는 무선기기가 타 무선기기에 간섭을 주는 정도를 정량적으로 분석할 수 있다. 따라서 무선기기 기술기준을 정할 때 기술적인 관점에서 일관되고 합리적으로 제정되었는지 평가하는데 도움을 줄 수 있다. 또한, 본 논문에서는 이론적인 분석과 아울러 SDR(Software-Defined Radio) 보드인 USRP(Universal Software Radio Peripheral)와 LabVIEW를 이용하여 주파수 공동사용기술에 대한 간섭부하를 측정·분석할 수 있는 테스트베드를 구축하고, 이를 통한 주파수 공동사용 기술의 평가가 타당함을 실험적으로 검증한다. 이를 통해 향후 주파수 공동사용 기술기준을 제정할 때 참고자료가 될 수 있도록 한다.

II. 간섭부하 개념

두 무선기기 간에 간섭은 두 무선기기의 통신반경이 겹치고, 두 무선기기가 동일한 주파수 대역을 사용하며, 동시에 신호를 전송해야만 발생하게 된다. 즉, 공간, 주파수, 시간이 모두 겹치는 경우 간섭이 발생하며, 3가지 중 하나라도 겹치지 않으면 간섭은 발생하지 않는다. 따라서 주파수 공동사용 기술은 공간, 주파수, 시간의 3가지 영역 중 하나에서 신호가 분리되도록 하는 기술이다. 예를 들어 FH에서는 주파수 영역에서의 분리를, DC는 시간 영역에서 분리를, LBT는 공간 영역에서 분리를 하여 간섭을 피하도록 한다. 따라서 FH, DC, LBT는 각각 주파수, 시간, 공간 영역에서 독립적으로 동작하므로 기술적으로 비교가 어렵지만, 간섭 측면에서 보면 비교가 가능하다. 즉, 간섭을 주는 정도를 공통 기준으로 삼아 분석하면 비교가 가능하다. 이에 본 논문에서는 주파수 공동사용 기술, 즉 FH, DC, LBT 기술을 간섭부하(Interference load)라는 개념으로 그 성능을 비교하고자 한다. 간섭부하 개념은 참고문헌 [6]에서 처음으로 도입한 개념이나, 개념만 제시되었지 그 구체적인 내용 및 이론이 기술되어 있지 않다. 이에 본 논문에서는 간섭부하 개념을 수식으로 새롭게 정리하여 그 개념을 명확히 한다.

2.1 간섭영역 기준의 간섭부하

피간섭원은 기본적으로 간섭원의 출력에 영향을 받는

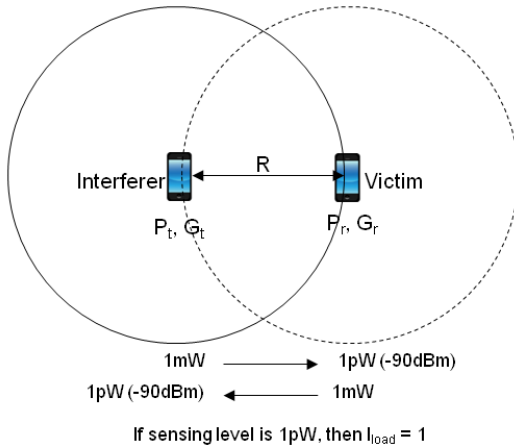


그림 1. 간섭부하를 위한 간섭 모형

Fig. 1. Geographical model for interference load.

다. 그림 1과 같이 간섭원과 R 만큼 떨어진 피간섭원이 받는 수신전력은 Friis공식을 따라 식 (1)과 같다.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^{(PLE)} \quad (1)$$

여기서 P_t 는 송신출력, G_t 와 G_r 은 각각 송신안테나와 수신안테나의 이득, λ 는 파장, PLE 는 경로손실지수(Path Loss Exponent)를 나타낸다. 자유공간에서 전파는 거리의 제곱에 반비례하여 작아지므로 PLE 는 2이지만 일반적인 무선 환경에서는 2보다 크다. 이제 식 (1)을 R 에 대해 다시 정리하면 식 (2)가 된다.

$$R = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \left(\frac{P_t G_t G_r}{P_r} \right)^{\left(\frac{1}{PLE} \right)} \quad (2)$$

식 (2)를 기반으로 간섭영역(interference area)을 2차원 평면에서의 원의 면적으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} Area &= \frac{\lambda^2}{16\pi} \left(\frac{P_t G_t G_r}{P_r} \right)^{\left(\frac{2}{PLE} \right)} \\ &= C \cdot \left(\frac{P_t}{P_r} \right)^{\frac{2}{PLE}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $C = \frac{\lambda^2}{16\pi} (G_t G_r)^{2/PLE}$ 이다. 식 (3)의 간섭영역은 간섭원의 송신출력에 비례하여 커지므로 특정출력을 갖는 간섭원의 간섭정도를 나타내는 지표로 삼을 수 있다. 간섭정도는 식 (3)과 같이 간섭원의 출력이 클수록, 피간섭원의 수신감도가 좋을수록 커지게 된다.

식 (3)에서 P_r 은 간섭원이 아닌 피간섭원 파라미터이다. 따라서 수신기가 바뀌면 간섭 영역의 값이 바뀌므로 보통 간섭원의 요구조건만을 규정하는 기술기준을 평가하는 지표로 일반화하기 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 다음과 같이 가정하여 피간섭원의 영향을 배제할 수 있다. 먼저, 그림 1에서 간섭원과 피간섭원이 같다고 가정하고, 피간섭원의 위치에서 1mW (0dBm) 출력의 신호가 송신될 경우, 간섭원의 위치에서 수신되는 수신신호 크기가 LBT에서의 센싱레벨과 같도록 상수 C 를 조절한다. 이러한 가정을 통해 간섭부하 I_{load} 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

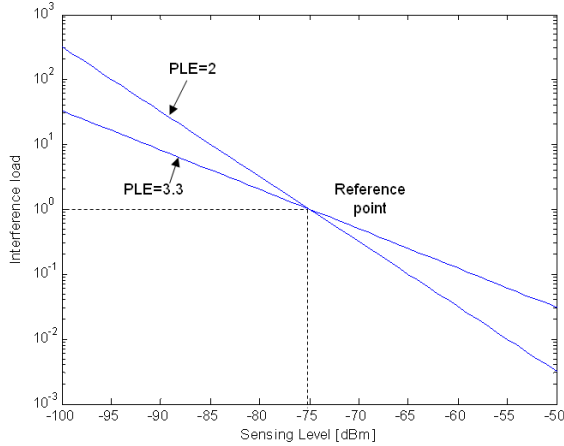


그림 2. 출력 1 mW와 센싱레벨 -75 dBm으로 정규화한 간섭부하

Fig. 2. Normalized interference load(P_T : 1 mW, P_S : -75 dBm).

$$I_{load} = \left(\frac{P_T}{P_S} \right)^{(2/PLE)} \quad (4)$$

여기서 P_T 는 1 mW로 나눈 상대적인 송신출력, P_S 는 $I_{load}=1$ 이 되도록 LBT 기술기준의 센싱 레벨로 상대화한 수신 감도가 된다.

그림 2는 출력 1 mW와 센싱 레벨 -75 dBm의 LBT 기술기준일 때 $I_{load}=1$ 이 되도록 정규화한 간섭부하를 PLE 값에 따라 계산한 결과를 보여준다. Friis 경로손실 공식이 적용되는 자유공간에서는 PLE가 2이므로 I_{load} 가 P_T 와 P_S 에 비례한다. 즉, 송신출력이 두 배가 되거나 센싱 레벨이 3 dB 낮아지면, 간섭부하는 3 dB 커지게 된다. 반면, PLE가 2보다 큰 실내환경에서는 출력이 2배가 된다고, 간섭부하값이 2배가 되지는 않는다.

한편, 같은 출력이라 하더라도 전력밀도는 신호의 점유대역폭에 반비례하므로 P_T 를 1 MHz를 기준으로 할 필요가 있다. 이렇게 하면 같은 출력의 경우라도 점유대역폭이 작을수록 대역폭이 같을 경우, 출력이 클수록 간섭부하는 커지게 된다.^[6]

2-2 DC와 FH를 포함한 간섭부하

식 (3)의 간섭 영역 내에 위치한 무선기기라 하더라도 시간과 주파수가 겹치지 않는다면 간섭은 발생하지 않는다. 따라서 시간과 주파수를 고려하여 간섭 부하 I_{load} 를

간섭원의 출력, 시간 영역에서의 겹침 정도, 주파수 영역에서의 겹침 정도를 나타내는 세 가지 변수를 이용하여 다음과 같이 확장할 수 있다^[5].

$$I_{load} = \left(\frac{P_T}{P_S} \right)^{(2/PLE)} \cdot T_{DC} \cdot M_U \quad (5)$$

여기서 T_{DC} 는 Duty Cycle 비율, M_U 는 스펙트럼 중첩율(spectrum overlapping rate)로서 FH의 효과를 나타낸다. 단, FH이 없고 주파수가 겹친다면 M_U 는 1이 되고, 주파수가 겹치지 않으면 M_U 는 0이 된다. 다음으로 M_U 는 간섭원의 FH 정도와 간섭원과 피간섭원이 대역폭의 비에 따라 달라진다. 예를 들어 전체 대역이 30 MHz인 경우, 1/30 비율로 FH을 하는 1 MHz 채널의 간섭원과 10 MHz 채널의 피간섭원을 갖는 경우 M_U 는 1/3이 된다. 반면, 1 MHz 채널의 피간섭원을 갖는 경우 M_U 는 1/30이 된다. 즉, 피간섭원의 대역폭이 간섭원보다 클 경우 FH을 하더라도 FH 효과는 그 비율만큼 감소하게 된다. 따라서 M_U 는 호핑채널 수(N)와 피간섭원의 채널 대역폭(BW_{victim})을 간섭원의 채널 대역폭($BW_{interferer}$)으로 나눈 값과의 곱이 된다. 만약 간섭원의 대역폭이 피간섭원의 대역폭보다 크다면 M_U 는 단순히 호핑채널수의 역수가 된다. 즉, M_U 는 다음과 같다.

$$M_U = \begin{cases} \frac{f_{CH}}{f_{band} \cdot N} \cdot \frac{BW_{victim}}{BW_{interferer}}, & \text{if } \frac{BW_{victim}}{BW_{interferer}} \geq 1 \\ \frac{f_{CH}}{f_{band} \cdot N}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

이제 LBT의 경우와 마찬가지로 피간섭원 파라미터의 영향을 배제하기 위하여 BW_{victim} 과 $BW_{interferer}$ 이 같다고 가정하며, 피간섭원의 영향 없이 주파수 공동사용의 영향을 비교할 수 있다. 이는 일반적으로 무선설비규칙에서 채널의 대역폭은 일정한 간격으로 정하는 것과 같다.

2-3 LBT의 간섭부하

간섭부하 개념을 직관적으로 적용하기 위해 그림 3과 같이 LBT를 이용하는 두 개의 무선기기를 가정해 보자. 그림 3(a)의 무선기기는 그림 3(b)의 무선기기에 비해 상대적으로 출력은 크고 센싱레벨 성능은 나쁘다고 가정하자. 이에 따라 간섭영역이 센싱영역보다 크게 되며, 이 비

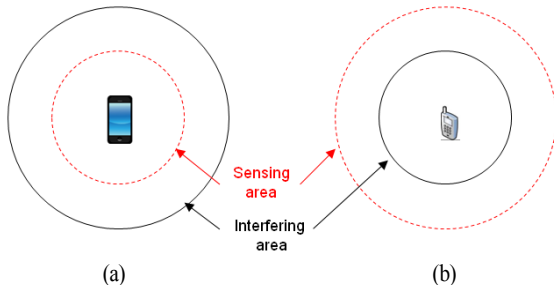


그림 3. 간섭부하가 큰 경우와 작은 경우의 비교
Fig. 3. Comparison high and low interference loads.

율이 간섭부하의 값이 된다. 즉, 간섭부하가 크다는 것은 간섭을 줄 수 있는 센싱영역과 간섭영역 사이의 면적이 크다는 의미가 된다. 반면, 그림 3(b)의 무선기기는 출력은 작고, 센싱레벨은 크므로 주변 무선기기에 간섭을 줄 확률이 낮다.

그림 4는 간섭부하가 다른 2가지 무선기기 주변에 피간섭원 수신기가 있을 때 간섭의 발생 여부를 나타낸다. 그림 4(a)의 간섭원은 간섭부하값이 크므로 피간섭원 수신기가 간섭영역 안에 있으므로 간섭이 발생하게 되는 반면, 그림 4(b)의 간섭원은 간섭부하값이 작으므로 LBT 동작에 의해 송신하지 않으므로 피간섭원 수신기에서는 간섭이 발생하지 않는다. 이와 같이 간섭부하 개념은 간섭의 영향을 2차원 평면에서 직관적으로 판단할 수 있게 해주는 장점이 있다.

III. 간섭부하의 적용 사례

본 장에서는 간섭부하 개념을 기반으로 2.4 GHz ISM 대역에서 동작하는 무선기기를 대상으로 다양한 규격 별로 간섭부하값을 비교한다. 먼저 2.4 GHz ISM 대역에서 동작하는 무선기기로 802.11b/g 규격의 Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee를 선정하였다. Bluetooth의 경우는 100 mW 출력을 내는 Class 1, 2.5 mW 출력의 Class 2, 2 MHz 대역에서 10 mW 출력을 내는 Bluetooth Low Energy(BLE) 3개를 비교하였다. 2.4 GHz에서 동작하는 대부분의 무선기기는 실내에서 동작하므로 PLE는 3.3의 값을 사용하였다. 비교를 위해 간섭부하의 최대값으로는 1 MHz 대역폭에서 100 mW의 출력을 가지면서 FH, DC, LBT 등 주파수 공동사용 기술을 사용하지 않는 무선기기를 기준으로 하였다.

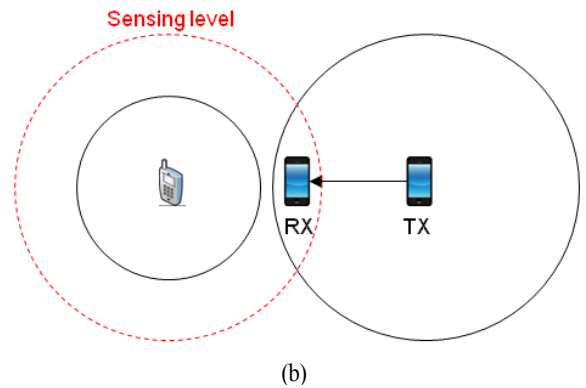
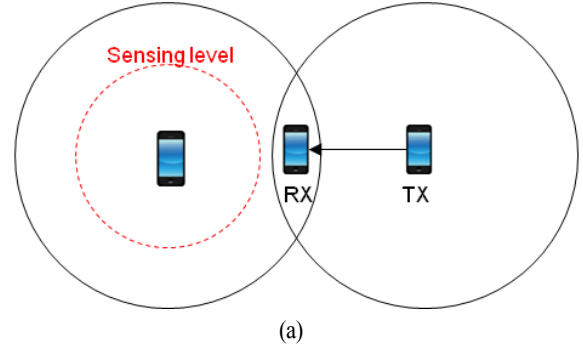


그림 4. 간섭부하에 따른 간섭 발생 시나리오
Fig. 4. Interference scenarios according to the different value of interference load.

표 1에서 다른 파라미터는 간섭부하의 최대값과 같지만, DC만 10 %인 경우와 FH만 10채널 한 경우를 먼저 비교하였다. 두 경우 모두 식 (5)에 의하여 기준값 대비 $1/10(-10 \text{ dB})$ 의 간섭부하값을 가짐을 알 수 있다. 다시 말해, 10채널을 FH하는 경우와 DC를 10 % 하는 경우는 간섭을 주는 측면에서는 동일하다고 볼 수 있다.

다음으로 Wi-Fi의 경우, 출력은 기준값과 같지만 50 %의 DC와 83.5 MHz의 전체대역폭 중 18 MHz의 채널대역폭(BW)을 사용하는 관계로 -17 dB 의 간섭저감효과가 있다. Bluetooth의 경우에는 3개 모두 FH와 DC의 효과로 규격별로 -22 dB 에서 -32 dB 정도의 간섭저감효과가 있음을 알 수 있다. Zigbee의 경우는 출력이 10 mW이고, DC가 10 %로 매우 작기 때문에, FH를 하지 않아도 -36 dB 의 간섭저감효과가 있음을 알 수 있다. 이와 같이 간섭부하 개념을 이용하면, 출력, 점유대역폭, FH, DC 등 상이한 기술기준을 갖는 무선기기들의 주파수 공동사용 성

표 1. 2.4 GHz 무선기기의 간섭부하 비교

Table 1. Comparison with interference load values of 2.4 GHz wireless devices.

| | P_t (mW) | BW (MHz) | DC | FH (CH) | I_{load} | I_{load} (dB) |
|-------------------------|---------------|-------------|------|------------|------------|--------------------|
| Reference | 100 | 1 | 1 | 1 | 100 | 0 |
| Reference w/ DC 10 % | 100 | 1 | 0.1 | 1 | 10 | -10 |
| Reference w/ DC 1 % | 100 | 1 | 0.01 | 1 | 1 | -20 |
| Reference w/ FH | 100 | 1 | 1 | 10 | 10 | -10 |
| Wi-Fi (802.11b/g) | 100 | 18 | 0.5 | 1 | 1.87 | -17.3 |
| Bluetooth class 1 | 100 | 1 | 0.5 | 79 | 0.69 | -22.2 |
| Bluetooth class 2 | 2.5 | 1 | 0.5 | 79 | 0.064 | -31.9 |
| Bluetooth low energy | 10 | 2 | 0.5 | 40 | 0.203 | -26.9 |
| Zigbee | 10 | 1.3 | 0.1 | 1 | 0.025 | -36.8 |

능을 간섭 측면에서 상호 비교할 수 있다.

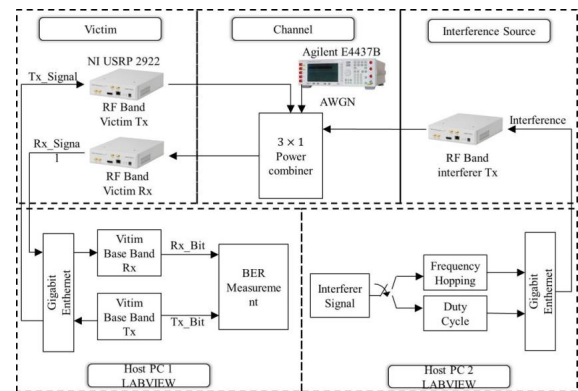
IV. 테스트베드를 통한 검증 실험

III장에서 살펴본 바와 같이, 간섭부하 개념은 다양한 무선기기가 주변기기에 어느 정도 간섭을 줄 수 있는지 정량적으로 비교 분석할 수 있는 장점이 있다. 출력이 작을수록, FH 채널이 많을수록, DC가 작을수록 간섭부하는 작아진다. 또한, 각각의 주파수 공동사용 기술의 비교도 가능하다. 예를 들어 10채널을 이용한 FH와 10 %의 DC를 갖는 두 개의 기술은 동일한 성능을 갖게 됨을 알 수 있다.

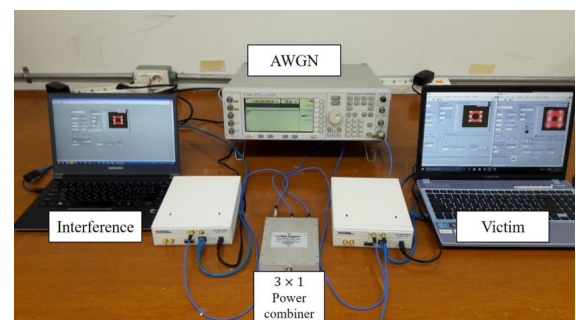
본 장에서는 간섭부하에 대한 이론의 타당성을 확인하기 위하여 SDR 보드인 USRP와 LabVIEW를 이용한 테스트베드를 구축하여 그 타당성을 실험적으로 검증한다. 이를 위하여 FH 및 DC 기능을 하는 간섭원을 구성하였다^[7].

4.1 테스트베드 구성

본 논문에서 제안한 간섭부하 개념을 검증하기 위한



(a)



(b)

그림 5. 테스트베드 실험 구성

Fig. 5. Configuration of a test-bed.

테스트베드의 구성은 그림 5(a)와 같다. 실험 구성은 피간섭원, 간섭원 및 채널의 3부분으로 구성된다. 먼저 피간섭원은 Host PC 1에서 LabVIEW 프로그램을 이용해 송신부와 수신부 모델을 구현하였다. Host PC1의 모델 출력은 기가비트 이더넷 케이블을 통해 USRP 보드로 연결되어, RF(Radio Frequency) 신호를 생성하게 된다. 수신부는 USRP 보드로 입력된 RF 신호가 기저대역 신호로 변환된 후, 이더넷 케이블을 통해 Host PC1으로 입력된다. 피간섭원의 경우, FH와 DC의 성능비교를 목표로 하기 때문에 특정 통신규격을 사용하지 않고, OQPSK 변복조방식만을 이용해 데이터를 송수신하도록 구성하였다. 통신 속도는 저속인 250 kbps로 설정하였다. 간섭원은 Host PC 2에서 LabVIEW를 이용해 FH 또는 DC 기능을 갖는 간섭신호를 발생시키고, 이를 USRP를 통해 RF 신호를 송신하도록 하였다. 간섭원의 경우도 피간섭원과 같은 변조방식을 사용

하고, 통신 파라미터는 피간섭원과 동일하게 설정하였다. 마지막으로 채널은 Agilent사의 E4437B 신호 발생기를 이용해 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 잡음신호를 발생시켰다. 이러한 실험장치를 통해 SNR 및 FH, DC의 변화에 따른 BER(Bit Error Rate)를 비교하였다. 발생된 간섭신호, 피간섭원의 송신신호, AWGN 잡음을 Mini-Circuits사의 ZB3PD-63-s+ 3×1 콤바이너로 결합하여 피간섭원의 USRP의 수신부로 받아 BER을 확인하였다. 실험의 실제 환경은 그림 5(b)와 같다. 그림 좌측에 간섭원을 이루는 PC 1대와 USRP 1대, 우측에 피간섭원을 구성하는 PC 1대와 USRP 1대 그리고 AWGN 잡음신호를 생성하는 신호발생기와 모든 신호를 결합하는 3×1 콤바이너로 이루어져 있다.

4.2 간섭부하 개념의 실험을 통한 검증

간섭원과 피간섭원의 중심주파수는 2.4 GHz ISM 대역으로 설정하였고, 간섭원의 수신전력이 피간섭원의 수신신호전력보다 항상 10 dB 작게 설정하고 실험하였다.

이론적인 간섭부하 개념의 실험적인 검증을 위한 실험 결과는 그림 6 및 그림 7과 같다. 그림 6은 간섭원의 간섭 정도에 따른 피간섭원의 성능을 확인하기 위해 간섭원을 DC 10 %와 DC 1 % 환경으로 설정하여 실험한 결과이다. DC 10 %의 경우, 20초 이내에 2초간 간섭신호를 발생시켰고, DC 1 %의 경우, 20초 이내에 0.2초간 간섭신호를

발생시켰다. DC 10 %의 간섭영향 하에서 피간섭원의 BER은 그림 6의 '×'로 표시하였고, DC 1 %의 간섭영향에 의한 피간섭원의 BER은 '◁'로 나타내었다. 이를 통해 DC 10 %일 때 BER이 DC 1 %일 때 BER보다 약 10배, 즉 10 dB 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 표 1에서 이론적으로 분석한 결과와 일치한다. 즉, 간섭원의 DC 10 %의 경우가 DC 1 %의 경우보다 간섭영향이 10배 큰 것으로 확인할 수 있다.

다음으로 간섭원이 DC와 FH 방식을 사용하는 경우에 대한 성능 비교를 위해 DC 10 %의 간섭원과 10개 채널을 호핑하는 FH 간섭원에 의한 간섭영향을 측정하였다. DC 10 % 간섭원의 경우, 20초 이내에 2초간 간섭신호를 발생시켰고, FH 간섭원의 경우, 10개 채널에 대해 0.4초에 한 번씩 호핑하도록 하였다. 실험 결과는 그림 7과 같다. DC 10 % 간섭 영향 하에서 피간섭원의 BER은 '×'로 표시하고, 10개 채널 FH 간섭 영향 하에서 피간섭원의 BER은 '○'와 같이 나타내었다. 두 경우를 비교했을 때, DC와 FH의 경우 두 간섭환경의 영향이 10 %으로 같은 경우 공존기술방식에 상관없이 동일한 BER이 나오는 것을 확인하였다. 따라서 DC와 FH 두 개의 기술은 동일한 성능을 가지는 것을 확인하였다.

마지막으로 본 논문에서 제시한 간섭부하 개념을 적용할 때 다음의 사항을 고려해야 한다. 일반적으로 주파수 공동사용 기술기준이 적용되는 비면허대역 무선기기는

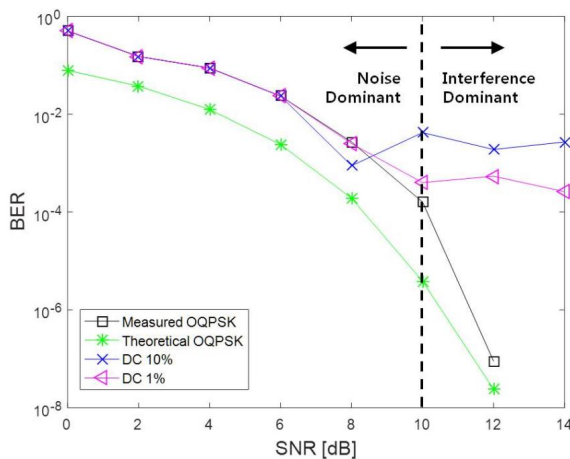


그림 6. DC 10 %와 DC 1 % 간섭 시 BER

Fig. 6. BER of DC 10 % and DC 1 % interference.

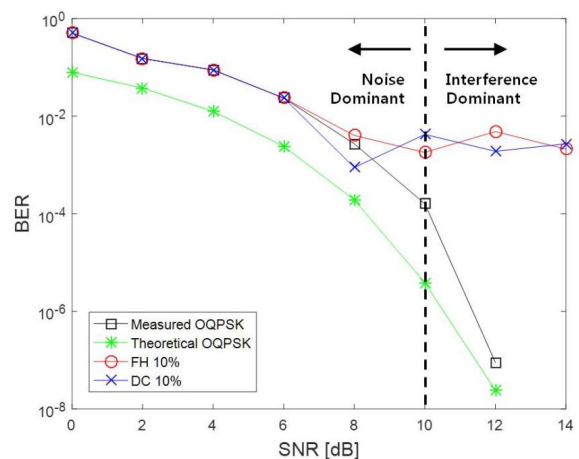


그림 7. DC 10 % FH 10 % 간섭 시 BER

Fig. 7. BER of DC 10 % and FH 10 % interference.

페이딩 채널에서 동작되는 경우가 대부분이다. 하지만, 본 논문에서 제시한 간섭부하 이론은 페이딩 채널을 고려하지는 않았다. 다음으로 장애물 등 무선 환경에 의해 인접 무선기기에 간섭을 주지만, 센싱되지 않는 무선기기를 고려해야 한다. 보통 이런 무선기기들을 ‘히든 노드(hidden node)’라고 부른다. 히든 노드를 피하기 위해서는 센싱시간을 충분히 길게 가져가야 하지만, 이 경우 전력의 낭비 및 제 때 신호를 송신할 수 없으므로 보통 기술 기준에서는 수 msec로 매우 짧게 정하므로 히든노드 문제를 피할 수 없다. 다음으로 수신감도와 센싱감도의 차이가 큰 경우에는 적용이 어렵다. 예를 들어 RFID는 리더는 출력이 큰 반면, 태그는 출력이 매우 미약한 비가역적인 통신을 기반으로 하므로 본 개념을 적용하기 어렵다. 즉, RFID의 경우에는 무선통신용 기기라기보다는 기본적으로 레이더 원리를 사용하므로 4 W의 큰 출력을 사용하면서도 수신감도 레벨은 무선통신기기에 비해 매우 크다. 따라서 간섭영역이 크면서 센싱레벨은 작을 수밖에 없다. 이 경우에는 무선통신기기를 가정하는 간섭부하 개념을 적용하기 보다는 별도의 간섭분석 방법을 사용해야 한다^[8].

V. 결 론

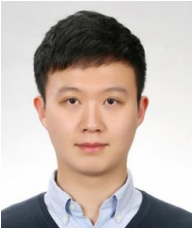
본 논문에서는 비면허 무선기기에 적용되고 있는 주파수 공동사용 기술의 성능을 비교할 수 있는 간섭부하 개념을 제안하였다. 간섭부하 개념을 이용하면 FH, DC, LBT 등의 다양한 주파수 공동사용 기술의 성능을 정량적으로 분석할 수 있어, 무선기기의 기술기준을 정할 때 기술적인 관점에서 일관되고 합리적으로 제정되었는지 평가하는데 도움을 줄 수 있다. 본 논문에서는 제안한 간섭부하 개념이 유용성을 보이기 위해 2.4 GHz 대역의 다양한 기기를 대상으로 분석을 수행하였을 뿐만 아니라, USRP와 LabVIEW를 이용한 테스트베드를 구축하였다. 구축

된 시스템으로 FH와 DC의 차이에 따른 간섭의 영향을 실험적으로 분석한 결과, 10개 채널을 FH하는 것과 10 % DC이 동일한 간섭부하 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 10 % DC와 1 % DC가 BER 측면에서 10배 차이가 남을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 간섭분석 개념을 국내 기술기준 재개정 시 활용된다면 향후 전파의 효율적인 사용에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] 김태한, "주파수 공동사용 제도 분석 및 국내 도입 방안", *Journal of Information Technology Applications & Management*, vol. 21, no. 4, pp. 449-462, 2014년.
- [2] 강상기, 황택진, "효율적인 주파수 이용을 위한 주파수 공유 방법." 한국정보통신학회논문지, 12(8), pp. 1349-1355, 2008년.
- [3] 미래부 무선설비규칙(미래부고시 제2016-52호), 2016년 6월.
- [4] 윤현구, 장병준, "국내 RFI/USN 대역에서 PHY/MAC 계층을 모두 고려한 주파수 공동사용 분석 방법", 한국전자과학회논문지, 24(1), pp. 73-81, 2013년 1월.
- [5] Jay E. Padgett, Robert A. Ziegler, "Analysis of the interference temperature concept to support spectrum sharing between licensed services and unlicensed devices", *Telcordia Technologies*, 2004.
- [6] Jan Kruys, "Spectrum sharing criteria based on interference load", *SpectrumConsult*, 2015.
- [7] 박진수, 윤현구, 장병준, "비면허기기 간 실시간 주파수간섭 분석 테스트베드 구현", 한국전자과학회논문지, 26(6), pp. 589-592, 2015년.
- [8] 윤현구, 강민수, 장병준, "908.5~914 MHz 대역에서 RFID와 USN 시스템의 주파수 공유 조건에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 19(6), pp. 647-656, 2008년.

이 상 준



2017년 2월: 국민대학교 전자공학부 (공학사)
2017년 3월~현재: 국민대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선통신시스템, 전파응용

윤 현 구



1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2002년~2004년: (주)현대시스콤 선임연구원

구원

2004년~현재: 명지전문대학 컴퓨터전자과 교수

[주 관심분야] 디지털 통신, 무선 자원 관리, MIMO 채널 모델링, RFID/USN

엄 중 선



2004년 2월: 성균관대학교 전기및전자통신공학부 (공학사)
2006년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
2017년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학부 (공학박사)
2006년 3월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

임연구원

[주 관심분야] 디지털통신, 스펙트럼 공유기술, 무선통신시스템 설계

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가 (CP)

2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수

[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, 무선통신시스템, 전파응용