

추정 비트 오류율 기반 Wi-Fi 통신 시스템의 정량적 무선 주파수 내성 평가법 설계

Design of a Radio-Frequency Immunity Evaluation Method for Wi-Fi Communication Systems Based on Estimated Bit Error Rate

김 나 은 · 송 익 환

Naeun Kim · Eakhwan Song

요 약

본 논문에서는 Wi-Fi 통신 시스템의 무선 주파수 내성을 정량적으로 평가하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 상용 Wi-Fi 통신 환경에서 물리 계층 비트 스트림에 대한 직접적인 접근이 제한됨을 고려하여 데이터 링크 계층 기반 프레임 분석을 통해 FB-BER(frame-based estimated BER)을 통신 성능 지표로 활용한다. 통신 성능이 선형적으로 열화되는 구간에서 성능 지표를 선형 모델로 단순화하고, 해당 구간의 면적으로 환산한 NSI(noise susceptibility index)를 Wi-Fi 무선 통신 시스템의 무선 주파수 내성 평가 지표로 정의한다. 제안된 방법을 통해 주입 노이즈 주파수에 따라 측정된 NSI를 평가함으로써, Wi-Fi 무선 통신 시스템의 주파수별 무선 주파수 내성 수준을 물리 계층에서 정량적으로 비교 및 평가할 수 있음을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a method for quantitatively evaluating the radio-frequency immunity of Wi-Fi communication systems is proposed. The proposed method utilizes a frame-based estimated bit error rate (FB-BER) as a communication performance metric through data-link-layer-based frame analysis, considering the limited direct access to physical layer bit streams in commercial Wi-Fi environments. The communication performance metric in the linearly degrading region is simplified using a linear model, and the resulting area of the region is defined as the noise susceptibility index (NSI), which serves as a radio-frequency immunity evaluation metric for Wi-Fi communication systems. The proposed method was experimentally validated by evaluating the NSI measured at each injected noise frequency, confirming that the radio-frequency immunity level of Wi-Fi communication systems can be quantitatively compared and evaluated at the physical layer across different frequencies.

Key words: Bit Error Rate (BER), Quantitative Evaluation, Radio-Frequency Immunity, Wi-Fi Communication

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템의 고집적화로 인해 디지털 및

RF 집적회로 간 근역장 결합에 의한 무선 주파수 간섭(RFI, radio-frequency interference) 문제가 대두되고 있으며, 이로 인한 비트 오류율(BER, bit error rate) 증가는 통

「이 논문은 2025년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업과 2026년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25485616).」

광운대학교 전자통신공학과(Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received June 23, 2026 ; Revised August 11, 2026 ; Accepted August 25, 2026. (ID No. 20260623-015S)

· Corresponding Author: Eakhwan Song (e-mail: esong@kw.ac.kr)

신 시스템의 성능 열화를 초래한다^{[1],[2]}. 기존 연구에서는 근역장 측정 기법을 통해 RFI를 저감하는 기법들이 제안되어 왔으나 실제 RFI가 통신 성능에 미치는 영향을 직접적으로 분석하는 데에는 집중하지 않았다^{[3],[4]}. 무선 통신 성능에 대한 RFI 영향을 평가하고자 한 선행 연구에서는 지연 시간 및 총 전송량과 같은 네트워크/전송 계층 기반 통신 품질 지표를 활용한 사례가 보고되었다^[5]. 그러나 이러한 상위 계층 지표들은 재전송 메커니즘 및 프로토콜 동작의 개입으로 인해 전자기 노이즈가 통신 성능에 미치는 순수한 영향도를 분리하여 분석하는 데 근본적인 한계가 있다. 따라서 전자기 노이즈와 통신 성능 간의 직접적인 인과관계를 규명하기 위해서는 물리 계층 수준의 성능 지표에 기반한 분석이 필수적이다.

본 논문에서는 추정 비트 오류율 기반 Wi-Fi 통신 시스템의 무선 주파수 내성을 정량적으로 평가하는 방법을 제안한다. 제안된 평가법은 데이터 링크 계층에서 캡처된 프레임 정보 분석을 통해 물리 계층에서의 무선 통신 성능을 간접적으로 근사하는 FB-BER(frame-based estimated BER)을 측정하고 성능 지표로 활용한다. 주입 노이즈의 크기 및 주파수에 따른 통신 성능 저하를 측정하고 각 주파수별 RFI 내성을 정량적으로 평가함으로써 제안된 방법의 유효성을 실험적으로 검증하였다.

II. 추정 비트 오류율 기반 Wi-Fi 통신 시스템의 성능 지표 추출

무선 통신 시스템은 OSI 7계층 참조 모델에 따라 계층적으로 구성되며, 전자기 노이즈에 의한 통신 성능 저하를 가장 직접적으로 반영하는 지표는 물리 계층에서 정의되는 비트 오류율(BER)이다^[6]. 그러나 상용 Wi-Fi 환경에서는 물리 계층 비트 스트림에 대한 직접적인 접근이 제한되므로 본 연구에서는 데이터 링크 계층에서 획득 가능한 MAC 프레임 정보를 활용하여 물리 계층 수준의 성능 열화를 간접적으로 추정하는 FB-BER(frame-based estimated BER)을 통신 성능 지표로 제안한다. FB-BER 추출을 위해 그림 1과 같이 Wi-Fi 통신 환경에서 수신 측에 USB dongle 인터페이스를 연결하고 모니터 모드로 설정한다. 모니터 모드는 특정 네트워크 연결 없이도 채널상의 모든 MAC

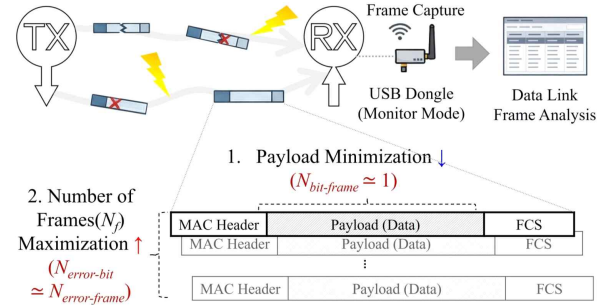


그림 1. MAC 프레임 캡처 기반 FB-BER 추출 개념도
Fig. 1. Conceptual diagram of FB-BER extraction based on MAC frame capture.

프레임을 수신할 수 있어 RFI에 의한 프레임 손실을 관측할 수 있다. 캡처된 프레임은 이후 네트워크 프로토콜 분석 프로그램인 Wireshark를 이용하여 분석한다^[7].

BER은 식 (1)과 같이 전송된 전체 비트 수 대비 오류 비트 수의 비율로 정의되며, 여기서 N_f 는 전송 프레임 수, $N_{bit-frame}$ 은 프레임당 비트 수, $N_{error-bit}$ 는 오류 비트 수를 나타낸다.

$$BER = N_{error-bit} / (N_f \times N_{bit-frame}) \quad (1)$$

데이터 링크 계층에서 관측된 MAC 프레임 정보를 기반으로 물리 계층 수준의 BER을 추정하기 위해 본 연구에서는 그림 1과 같이 프레임 구조 및 전송 조건을 제어하는 두 가지 방법을 적용하였다. 첫째, 프레임 페이로드를 최소화하여 $N_{bit-frame}$ 을 1에 근사시킴으로써 하나의 프레임 오류가 하나의 비트 오류에 대응하도록 한다. 둘째, 충분한 수의 프레임을 전송하여 오류 프레임 수 $N_{error-frame}$ 과 오류 비트 수 $N_{error-bit}$ 가 통계적으로 수렴하도록 한다. 위 조건을 만족하는 경우 식 (1)을 근사하여 식 (2)의 FB-BER을 얻을 수 있다.

$$BER \approx N_{error-frame} / N_f = FB-BER \quad (2)$$

제안된 FB-BER 성능 지표의 추출 조건을 실험적으로 검증하기 위해 그림 2와 같이 근역장 노이즈 주입 환경을 구성하였다. DUT(device under test)는 2.432 GHz(채널 5)에서 Wi-Fi 통신을 수행 중인 송신 측 Raspberry Pi 4B로 설정하였으며, 외부 RFI 영향 최소화를 위해 통신 중심 채널 주파수와 공진하지 않는 차폐 함체 내부에 배치하

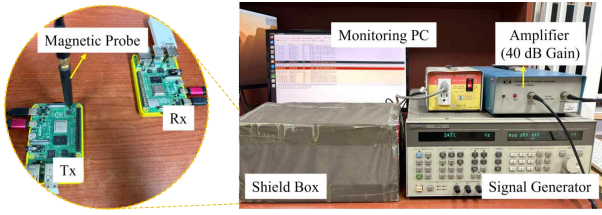


그림 2. Wi-Fi 통신 시스템의 무선 주파수 내성 평가 셋업
Fig. 2. Setup for RF immunity evaluation of the Wi-Fi communication system.

였다. 노이즈 주입 위치는 선행 연구 참고문헌 [5]에서 전자기파의 호혜성 이론에 기반하여 수행한 근역장 방사 측정 결과를 토대로 통신 중심 채널 주파수 2.432 GHz에서 RF 칩셋 부근 높은 방사 강도가 집중적으로 관측된 영역을 노이즈 주입 위치로 선정하였다. 주입 노이즈 주파수는 동일 선행 연구에서 통신 채널 인접 주파수 대역의 RFI 취약도가 가장 크게 나타난 결과를 기반으로 2.437 GHz로 선정하였다. 신호 발생기에서 생성된 신호를 40 dB의 이득으로 증폭한 후, 자기장 프로브를 이용하여 DUT 표면으로부터 1 mm 위에서 근역장 노이즈를 주입하였다. 노이즈 주입 크기는 신호 발생기 출력 전력 기준 0부터 15 dBm까지 3 dBm 간격으로 점진적으로 증가시키며 FB-BER을 측정하였다. 프레임 페이로드를 1 byte로 최소화하고, 전송 프레임 수를 10^4 , 10^5 , 10^6 개로 변화시키며 3회 반복 측정을 수행한 결과, 그림 3과 같이 10^6 개 미만 조건에서 반복 측정 간 FB-BER 편차가 크게 나타난 반면, 10^6 개 조건에서는 안정적인 재현성이 확보됨을 확인하였다. 이에 따라 이후 모든 실험에서 프레임 페이로드를 1 byte, 전송 프레임 수를 10^6 개로 설정하여 FB-BER을 측정한다.

III. 제안된 추정 비트 오류율 기반 Wi-Fi 통신 시스템의 정량적 무선 주파수 내성 평가법 및 검증

본 장에서는 II장에서 정의한 FB-BER 성능 지표를 기반으로 Wi-Fi 통신 시스템의 무선 주파수 내성을 정량적으로 평가하는 방법을 제안한다. 선행 연구에서 노이즈 주입 크기에 따른 통신 성능 지표는 특정 크기 이상의 노이즈가 인가될 때부터 선형적으로 증가하는 경향이 나타

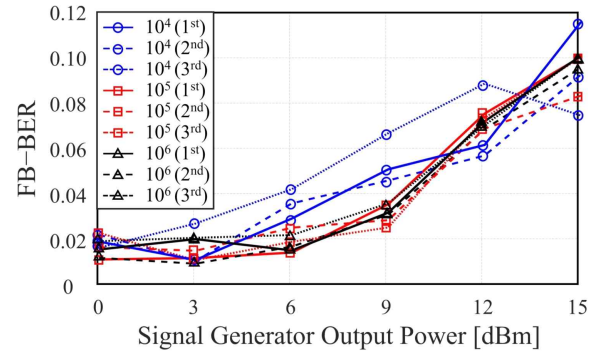


그림 3. 2.437 GHz 노이즈 주입 시 전송 프레임 수에 따른 주입 노이즈 크기별 FB-BER 재현성 검증 결과
Fig. 3. Repeatability test results of FB-BER as a function of injected noise amplitude for different numbers of transmitted frames under 2.437 GHz noise injection.

남이 보고되었으며, II장의 측정 결과에서 FB-BER 또한 동일한 경향이 관측되었다^[5]. 이러한 선형 증가 특성에 기반하여 각 성능 지표 측정값에 대해 최소자승법을 이용한 1차 선형 근사를 적용하고, 이때 도출되는 기울기 $S(A)$ 를 노이즈 주입 크기에 따른 성능 열화 민감도를 나타내는 정량적 지표로 정의한다. 여기서 설계자가 허용 가능한 성능 범위의 기준으로 설정한 $FB-BER_{ref}$ 를 측정된 FB-BER이 최초로 초과하는 시점의 주입 노이즈 크기를 A_{ref} 로 정의한다. 그림 4와 같이 A_{ref} 부터 A_{max} 까지의 구간과 $S(A)$ 로 형성되는 삼각형 면적을 노이즈 주입 주파수별 통신 성능 취약도의 대표 평가 지표로서 NSI(noise susceptibility index)로 정의하며, 이는 식 (3)과 같다. 제안된

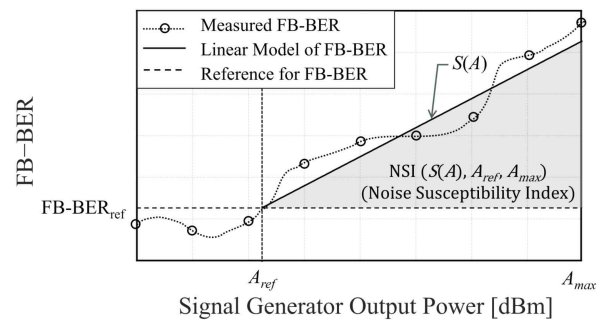


그림 4. 제안된 FB-BER 지표의 선형 모델링 기반 무선 주파수 내성 평가법
Fig. 4. Proposed radio-frequency immunity evaluation method based on linear modeling of FB-BER.

NSI 평가 지표는 외부 노이즈에 대한 성능 지표의 열화 민감도와 최초 성능 열화가 발생하는 외부 노이즈 크기를 함께 반영하여 통신 성능의 취약도를 주파수별 단일 값으로 정량화할 수 있다.

$$NSI_{FB-BER} = \frac{1}{2} |S(A)| (A_{\max} - A_{ref})^2 \quad (3)$$

제안된 방법을 검증하기 위해 II장과 동일한 셋업 조건에서 Wi-Fi 통신 중심 주파수 기준 ± 10 MHz 범위 내 5 MHz 간격의 총 5개 주파수에 대해 신호 발생기 출력 전력 기준 0~16 dBm 범위의 근역장 노이즈를 2 dBm 간격으로 주입하며 FB-BER을 측정하였다. 그림 5는 5개 주파수에서의 FB-BER 측정 결과를 나타내며 모든 주파수에서 노이즈 주입 크기 증가에 따라 FB-BER이 선형적으로 증가하는 경향이 관측되었다. 본 연구에서 $FB-BER_{ref}$ 는 노이즈 비주입 상태에서의 평균 FB-BER에 마진을 부여하여 0.03으로 설정하였다. 그림 6은 제안된 평가법을 적용하여 산출한 주파수별 NSI 결과를 나타낸다. 통신 중심 채널 주파수인 2.432 GHz에서 가장 낮은 NSI로 우수한 RFI 내성을 보인 반면 인접 주파수인 2.427 GHz와 2.437 GHz에서 높은 NSI 값이 나타나 RFI 내성이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 Wi-Fi 통신 채널의 22 MHz 데이터 대역폭 내에 실제 데이터 정보가 변조되어 존재하므로, 데이터 정보가 없는 중심 채널 주파수보다

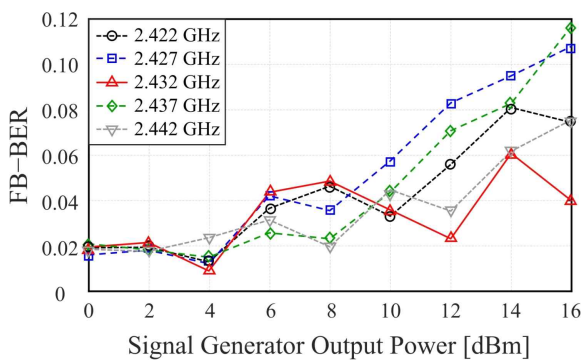


그림 5. 근역장 노이즈 주입 크기에 따른 주파수별 FB-BER 측정 결과

Fig. 5. FB-BER measurement results depending on the injected near-field noise amplitude at various injected noise frequencies.

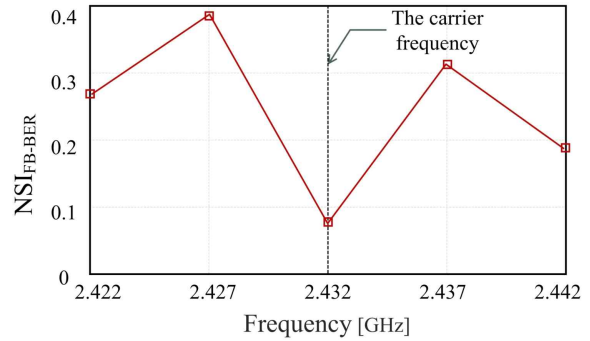


그림 6. 주파수별 NSI(noise susceptibility index) 도출 결과
Fig. 6. Noise susceptibility index (NSI) results for each injected noise frequency.

데이터 대역에 해당하는 인접 주파수의 노이즈가 통신 성능 열화에 더 크게 영향을 미치기 때문으로 예상된다. 또한 본 결과는 선행 연구 참고문헌 [5]의 지연 시간 및 총 전송량 기반 측정 경향과 동일한 양상을 나타내어 제안된 평가법의 타당성을 뒷받침한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Wi-Fi 통신 시스템의 RFI 내성을 물리 계층 수준에서 정량적으로 평가하는 방법을 제안하였다. 기존 상위 계층 기반 지표의 한계를 극복하기 위해 데이터 링크 계층의 MAC 프레임 정보를 활용한 FB-BER을 통신 성능 지표로 제안하고, 물리 계층 수준의 통신 성능 열화를 정량적으로 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 또한 FB-BER의 선형 증가 특성에 기반하여 주파수별 RFI 내성을 정량화하는 NSI를 정의하고 이를 무선 주파수 내성의 평가 지표로 제안하였다. 제안된 평가법은 기존의 단순한 동작 여부 판단을 넘어 물리 계층 수준에서 주파수별 RFI 내성을 정량적으로 분석할 수 있으며, 다양한 무선 통신 표준 및 시스템으로 확장 적용되어 실용적인 무선 주파수 내성 평가에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] S. Grivet-Talocia, M. Bandinu, F. Canavero, I. Kelandar, and P. Kotiranta, "Fast assessment of antenna-PCB coupling

- in mobile devices: A macromodeling approach," in *Proceedings of the 2009 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Jan. 2009, pp. 193-196.
- [2] M. Ramdani, E. Sicard, A. Boyer, S. B. Dhia, J. J. Whalen, and T. H. Hubing, "The electromagnetic compatibility of integrated circuits: Past, present, and future," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 1, pp. 78-100, Feb. 2009.
- [3] E. Song, H. H. Park, "A component-level radio-frequency interference evaluation method for mobile devices," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 6, pp. 1358-1361, Dec. 2013.
- [4] J. Pan, H. Wang, X. Gao, C. Hwang, E. Song, H. B. Park, and J. Fan, "Radio-frequency interference estimation using equivalent dipole-moment models and decomposition method based on reciprocity," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 1, pp. 75 - 84, Feb. 2016.
- [5] N. Kim, E. Song, "Design of a radio frequency immunity evaluation method and communication performance analysis for wireless devices under electromagnetic noise interference," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 11, pp. 1055-1062, Nov. 2025.
- [6] *Information technology—Open Systems Interconnection—Basic Reference Model: The Basic Model*, ISO/IEC 7498-1, Dec. 1994.
- [7] Wireshark Foundation, "Wireshark user's guide," 2026. Available: https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/

김 나 은 [광운대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0002-6320-0918>



2026년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 학사과정 (공학사)

2026년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] Near-Field Measurement Techniques, System-Level EMI/EMC

송 익 환 [광운대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4176-6179>



2004년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학사)

2006년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)

2010년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)

2011년~2013년: 삼성전자 글로벌기술센터

책임연구원

2014년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수

[주 관심분야] System-Level EMC/EMI, High-Speed Signal Integrity/Power Integrity, Electromagnetic Measurements Technologies