

SDR 수신기 최적화를 통한 무선 신호의 인간과 기계의 정보 인식능력의 분석

주현, 이상현
고려대학교

juteddy03@naver.com, sanghyunlee@korea.ac.kr

Analysis of the Impact of SDR Reception Parameter Optimization on Information Recognition Performance of Humans and Machines

Hyun Ju, Sang Hyun Lee

요 약

본 논문은 소프트웨어정의라디오(Software Defined Radio, SDR) 시스템에서 수신 파라미터인 게인(Gain)과 대역폭(Bandwidth)의 변화가 무선 신호의 복원 품질 및 정보 인지능력에 미치는 영향을 분석하였다. RTL-SDR 디바이스를 이용하여 무선 신호를 수신하고, 파라미터 변화에 따른 물리적 왜곡을 I/Q 데이터 기반 스펙트럼 측정을 하였다. 이로부터 복원된 오디오를 인간의 청취와 AI 기반 STT(Speech-to-Text) 엔진으로 분석하여 정보 인식률의 차이를 정량적으로 비교했다. 실험 결과, 기계 학습 기반 엔진이 인간에 비해 신호 왜곡에 민감하게 반응함을 확인하였으며, 이는 미래 지능형 통신 시스템에서의 수신 파라미터 자동 최적화의 필요성을 시사한다.

I. 서 론

최근 무선 통신 기술은 하드웨어 중심에서 소프트웨어 정의 라디오(SDR) 기반의 유연한 구조로 패러다임이 변화하고 있다 [1]. SDR은 복조 방식 및 수신 파라미터를 소프트웨어적으로 제어할 수 있어 다양한 통신 환경에 즉각적으로 대응할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 저가형 SDR 장비(예: RTL-SDR)는 ADC 분해능의 한계로 인해 수신 게인과 대역폭 설정에 따라 신호 왜곡(Clipping) 및 인접 채널 간섭에 취약하다.

본 연구에서는 이러한 SDR의 유연한 파라미터 조절 기능을 활용하여, 수신 환경 변화가 '정보의 인지'라는 최종 목적에 미치는 영향을 분석한다. 특히 기존 연구들이 주로 물리 계층의 SNR 분석에 집중했던 것과 달리, 본 논문은 복원된 데이터를 인간과 컴퓨터(AI)가 각각 어떻게 수용하는지를 비교 분석함으로써 차세대 통신 시스템 설계의 시사점을 도출하고자 한다.

II. 실험 환경

실험 환경은 USB형 RTL-SDR(R820T2) 장치와 무선신호 수신 안테나가 분석용 PC에 연결되어 SDR# (v1.0.0.1921) 소프트웨어를 사용하여 FM 라디오 대역을 수신한다. 수집된 신호는 다음의 파라미터를 모니터링하며 주파수 영역의 스펙트럼 분석과 시간 영역의 오디오 분석을 병행한다.

- Gain(게인): ADC 입력 전 신호의 증폭도를 결정
- Bandwidth(대역폭): 신호를 통과시키는 필터의 폭

본 연구에서는 수신 파라미터 변화가 실질적인 정보 전달에 미치는 영향을 확인하기 위해, 수집된 오디오를 인간과 AI 엔진이 각각 인식하도록 하였다. 인식 정확도는 전체 단어 수 대비 오류 단어의 비율인 WER(Word Error Rate)을 통해 정량화하였으며, 수식 (1)과 같다.

$$WER = \frac{S+D+I}{N}$$

여기서 각 파라미터의 의미는 S: 대치, D: 삭제, I: 삽입, N: 전체 단어 수이다.

III. 실험 및 결과 분석

파라미터 변화에 따른 물리 계층 신호 왜곡을 분석했다. SDR#의 스펙트럼 분석 기능을 통해 각 파라미터 변화 시 I/Q 데이터의 품질을 관찰하였다.

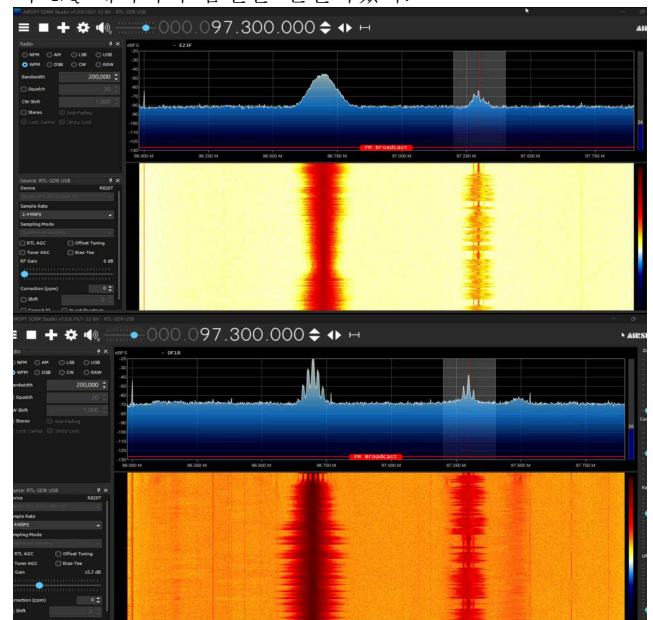


그림 1 최소 게인(a), 최적 상태(b)

그림1(a)의 RF Gain 0.0 dB 상태에서는 신호 에너지는 낮으나 왜곡 없는 선형적 스펙트럼이 관찰되었다. 이를 바탕으로 게인을 15.7 dB로 최적화했을 때(그림 1(b)), 노이즈 대비 신호의 Peak가 선명해지며 가장 안정적인 SNR을 확보하였다.

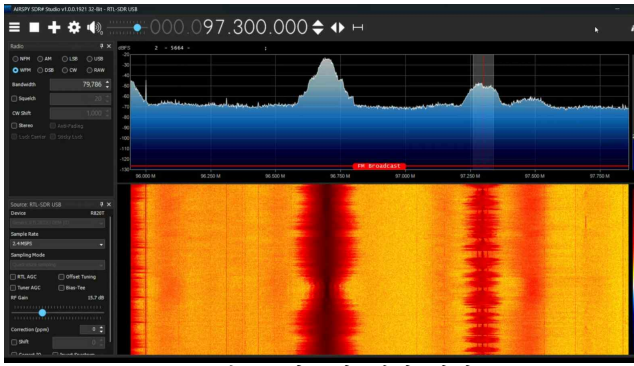


그림 2. 과도한 게인 설정

그림2는 신호가 클리핑(Cliping)되어 노이즈 레벨이 상승하는 '바이너리 데이터 왜곡' 관찰되었다. 폭포수(Waterfall) 영역의 밝은 노랑 및 주황색 분포는 신호 에너지가 하드웨어의 처리 범위를 초과하여 포화(Saturation)되었음을 나타낸다. 이러한 신호 포화로 인한 비선형 왜곡 구간에서는 신호의 진폭 정보가 손실되어 기계 인식의 WER을 급격히 상승시키는 주원인이 된다.

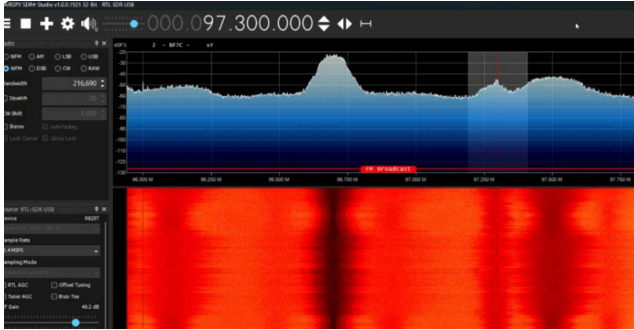


그림 3. 협대역 상태

그림3은 대역폭을 79.7 kHz로 제한할 경우를 나타내며 FM 복조에 필요한 측대파 정보 일부가 필터에 의해 강제로 차단되는 정보 손실이 관찰하였다. 협대역 상태에서는 FM 복조에 필수적인 측대파(Sideband) 정보가 필터에 의해 강제로 차단된다. 이로 인해 고주파 성분이 상실되어 마찰음 및 파찰음의 구분이 어려워지며, 이는 인간보다 기계 엔진에서 더 빈번한 오인식으로 나타났다. 수신된 오디오를 인간이 받아적은 것과 STT 엔진이 변환한 결과의 일치도(WER)를 측정하여는 방식으로 정보 인식을 비교 분석하였다.

표1. 정보 인식을 비교

수신 조건	Gain설정	Bandwidth	기계인식률(%)	인간인식률(%)
조건 1 (최소게인)	0.0 dB	213.3 kHz	92%	95%
조건 2 (최적)	15.7dB	213.3 kHz	96%	98%
조건 3 (과게인)	40.2 dB	213.3 kHz	62%	85%
조건 4 (협대역)	15.7 dB	79.7 kHz	74%	90%

실험 결과, 기계(AI)는 게인 과도로 인한 클리핑(Cliping) 왜곡에 가장 민감하게 반응하여 인식률이 34%가 하락하였다. 반면 인간은 신호가 왜곡되더라도 문맥과 억양을 통해 정보를 유추하는 능력이 있어 상대적으로 높은 85%의 인식률을 유지하였다. 협대역 환경에서도 기계는 특정 발음의

고주파 손실 시 단어 인식 오류를 빈번하게 일으켰으나, 인간은 정보 유실에 대한 강건성이 더 높은 것으로 나타났다. 표 2는 물리적 신호 왜곡이 기계 인식에 미치는 구체적인 오류 양상의 사례를 보여준다.

표 2. 기계 인식 왜곡 사례

구분	실제 음성	기계 인식 결과(AI)	왜곡 원인 분석
과게인(Gain)	"금리 차"	"관리차"	클리핑으로 인한 비선형 왜곡
협대역(BW)	"부동산"	"불도산"	측대파 차단에 따른 고주파 손실

IV. 결론

본 논문은 SDR 시스템의 수신 파라미터가 정보 전달 효율에 미치는 영향을 분석하였다.

실험 결과, 수신 시스템의 성능은 단순한 신호 세기(Gain)의 증폭보다 선형성 유지와 적정 대역폭 확보에 의해 결정됨을 확인하였다. 특히 기계 학습 기반의 STT 알고리즘은 인간과 달리 Clipping 왜곡에 매우 취약하므로, 향후 무인 통신 시스템 및 AI 음성 제어 환경에서는 SDR의 유연한 파라미터 제어를 통한 자동 게인 최적화(Auto-Gain Optimization) 기술이 필수적으로 요구된다. 본 연구 결과는 차세대 지능형 수신기 설계 시 인간과 기계의 인지 특성 차이를 고려해야 함을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 고려대학교 차세대통신학과 진리장학 프로그램의 지원을 받아 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Mitola, "The software radio architecture," IEEE Communications Magazine, vol. 33, no. 5, pp. 26-38, May 1995.
- [2] T. J. Roupheal, Digital Radio Systems on a Chip: A Systems Approach, Springer, 2021.
- [3] B. Bloom, et al., "Practical Signal Processing for Software Defined Radio," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020.
- [4] 한국통신학회, "무선 통신 시스템의 디지털 신호 처리 기술 동향," 정보와 통신, 제41권 제5호, 2024.
- [5] A. Radford, et al., "Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision (Whisper)," Technical Report, OpenAI, 2022.