

다중 경로 페이딩 환경에서 GNU Radio를 이용한 변조 신호별 검출 성능 비교 분석

허진웅, 남해운

한양대학교

jindol2026@hanyang.ac.kr, hnam@hanyang.ac.kr

Comparative Analysis of Detection Performance by Modulation Signal Using GNU Radio in Multipath Fading Environments

Jinwoong Hur, Haewoon Nam

Hanyang Univ.

요약

본 논문에서는 협대역 간섭과 다중경로 페이딩이 공존하는 비이상 채널 환경에서 BPSK와 16-QAM의 BER 성능을 비교 분석한다. GNU Radio 기반 시뮬레이션을 통해 관심 신호 대비 1 kHz 주파수 오프셋을 갖는 간섭 신호를 적용하고, 잡음 및 간섭 세기 변화에 따른 성능 열화 특성을 평가하였다. 특히, 동일한 채널 조건 하에서 변조 방식에 따른 간섭 민감도 차이를 중심으로 성능 변화를 관찰하였다. 시뮬레이션 결과, 16-QAM은 간섭 세기 증가에 따라 BER이 비교적 연속적으로 증가하는 경향을 보였으며, BPSK는 특정 SIR 범위까지 낮은 BER을 유지하다가 임계 구간 이후 급격한 성능 저하가 나타났다.

I. 서론

무선 통신 시스템에서 변조 방식은 스펙트럼 효율과 전송 신뢰도 사이의 중요한 설계 요소로 작용한다. 이상적인 AWGN 채널 환경에서는 변조 방식별 BER 성능이 이론적으로 잘 분석되어 있으나, 실제 무선 환경에서는 열잡음뿐만 아니라 협대역 간섭과 다중경로 페이딩이 동시에 존재하여 수신 성능에 복합적인 영향을 미친다.

특히 인접 대역 또는 근접 주파수에서 유입되는 협대역 간섭은 수신 필터 및 동기화 과정에서 완전히 제거되지 못하고 잔류 간섭으로 작용할 수 있으며, 이는 변조 방식에 따라 상이한 성능 열화를 유발한다. 기존 연구에서는 협대역 간섭이 통신 시스템에 미치는 영향을 분석하거나, 페이딩 환경에서의 BER 특성을 이론적으로 도출한 바 있으나, 실제 수신기 구조를 포함한 시뮬레이션 환경에서 변조 방식별 간섭 민감도를 비교한 연구는 상대적으로 제한적이다.

본 논문에서는 협대역 간섭과 다중경로 페이딩이 공존하는 비이상 채널 환경에서 BPSK와 16-QAM의 BER 성능을 비교 분석한다. GNU Radio 기반 시뮬레이션을 통해 주파수 오프셋을 갖는 협대역 간섭 신호를 추가하고, 잡음 및 간섭 세기 변화에 따른 성능 열화를 평가함으로써 변조 방식별 특성 차이를 정량적으로 분석한다.

II. 본론

실제 무선 통신 환경에서는 열잡음뿐만 아니라 다중경로 페이딩과 외부 간섭이 동시에 존재하며, 수신 성능은 이들 요인의 결합에 의해 결정된다. 기본적인 디지털 통신 수신 모델은

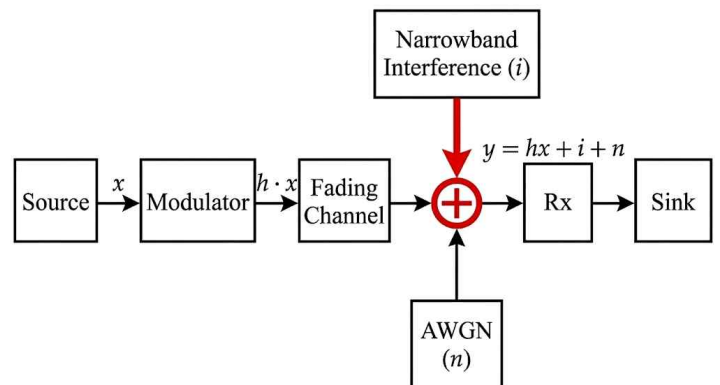
$$y[k] = h[k]x[k] + n[k]$$

로 표현되며, 여기서 $x[k]$ 는 송신 심볼, $h[k]$ 는 다중경로 페이딩을 포함

한 채널 계수, $n[k]$ 는 가산 백색 가우시안 잡음을 의미한다. 본 연구에서는 협대역 간섭 환경을 고려하기 위해 수신 신호 모델을 다음과 같이 확장하였다.

$$y[k] = h[k]x[k] + i[k] + n[k]$$

여기서 $i[k]$ 는 관심 신호와 근접한 주파수 대역에서 유입되는 협대역 간섭 신호로, 본 연구에서는 관심 신호 대비 1 kHz 주파수 오프셋을 갖는 간섭을 적용하여 성능 변화를 분석하였다.



[그림1] 협대역 간섭과 AWGN을 포함한 GNU Radio 기반 통신 시스템 블록도

본 연구의 시뮬레이션은 GNU Radio를 이용하여 구성되었으며, 전체 시스템 블록 구조는 [그림 1]에 나타내었다. 송신단에서는 무작위 비트열을 생성한 후 BPSK 또는 16-QAM 변조를 적용하고, 변조된 신호는 다중경로 페이딩 채널을 통과한다. 이후 AWGN과 협대역 간섭 신호를 추가하여 비이상 채널 환경을 모사하였으며, 수신단에서는 타이밍 및 반송파 동기화를 포함한 복조 과정을 거쳐 BER을 측정하였다. 이때 협대역 간섭은 별도의 신호 경로로 생성되어 수신 신호에 합성되었으며, DC 성분에 의한

왜곡을 방지하기 위해 간섭 신호의 DC 오프셋은 제거하고 주파수 이동을 통해 오프셋을 구현하였다.

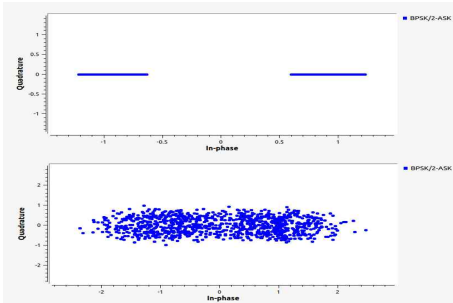
BPSK는 한 비트를 두 개의 위상 상태로 표현하는 가장 기본적인 변조 방식으로, AWGN 채널에서의 비트 오류 확률은

$$P_b^{BPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

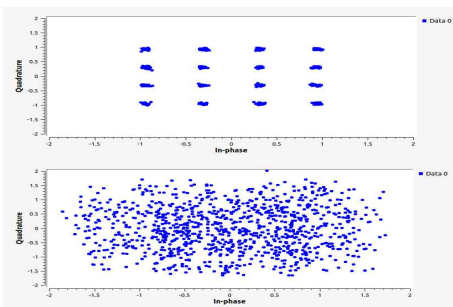
로 주어진다. 성상도 상에서 두 심볼 간 거리가 최대가 되도록 배치되어 있어 잡음 및 일부 왜곡에 대해 비교적 강인한 특성을 가진다. 반면, 16-QAM은 한 심볼에 4비트를 매핑하는 고차 변조 방식으로 스펙트럼 효율은 높지만, 성상도 상의 심볼 간 최소 거리가 감소함에 따라 잡음 및 간섭에 대한 민감도가 증가한다. AWGN 환경에서 16-QAM의 BER은 다음과 같이 근사적으로 표현된다.

$$P_b^{16-QAM} = \frac{3}{8} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{2E_b}{5N_0}}\right)$$

[그림 2]와 [그림 3]은 각각 16-QAM과 BPSK의 성상도를 나타낸다. 간섭 및 잡음이 없는 경우에는 두 변조 방식 모두 이상적인 성상 구조를 유지하나, 간섭 및 잡음이 증가함에 따라 성상 분포가 확산되는 현상이 관찰된다. 특히 16-QAM의 경우 인접 심볼 군집 간 중첩이 점진적으로 증가하며 BER이 연속적으로 악화되는 반면, BPSK는 일정 수준까지 성상 분리가 유지되다가 특정 조건 이후 급격히 붕괴되는 경향을 보인다.



[그림2] BPSK 성상도 비교



[그림3] 16-QAM 성상도 비교

잡음 및 간섭 세기를 변화시키며 측정한 BER 결과는 [표 1]에 정리하였다. 16-QAM은 간섭 세기 증가에 따라 BER이 점진적으로 증가하는 반면, BPSK는 낮은 간섭 조건에서는 BER이 거의 0에 가까운 값을 유지하다가 강한 간섭 조건에서 BER이 급격히 증가하였다. 이러한 결과는 BPSK가 일정 SIR 범위까지는 안정적인 판정이 가능하나, 임계 구간 이후에는 수신기 동기 성능 저하가 발생하며 성능 열화가 급격히 나타나는 특성을 가짐을 보여준다. 즉, BPSK에서 관찰된 절벽(cliff-like) 성능 저하는 변조

방식의 이론적 특성뿐만 아니라 실제 수신기 구조가 결합된 시스템 수준의 현상으로 해석될 수 있다.

변조방식	Noise/Interference	0.0	0.1	0.3	0.5
16-QAM	Noise 0.3	0.04	0.06	0.28	0.51
	Noise 0.4	0.10	0.15	0.39	0.58
	Noise 0.5	0.22	0.25	0.48	0.61
BPSK	Noise 0.3	0.00	0.00	0.00	0.42
	Noise 0.4	0.00	0.00	0.00	0.48
	Noise 0.5	0.00	0.00	0.02	0.53

[표1] 측정 결과

III. 결론

본 논문에서는 협대역 간섭과 다중경로 페이딩이 공존하는 비이상 채널 환경에서 BPSK와 16-QAM의 BER 성능을 비교 분석하였다. GNU Radio 기반 시뮬레이션을 통해 주파수 오프셋을 갖는 협대역 간섭 신호를 추가하고, 잡음 및 간섭 세기 변화에 따른 성능 열화를 평가하였다.

시뮬레이션 결과, 16-QAM은 간섭 세기 증가에 따라 BER이 점진적으로 악화되는 반면, BPSK는 일정 SIR 범위까지 안정적인 성능을 유지하다가 임계 구간 이후 급격한 성능 저하를 보였다. 이러한 차이는 변조 방식의 성상 구조 차이와 더불어 수신기 동기화 성능이 결합되어 나타난 결과로 해석될 수 있다.

본 연구 결과는 간섭 환경에서 변조 방식 선택이 시스템 성능에 미치는 영향을 정성적·정량적으로 보여주며, 향후 다양한 간섭 모델과 수신기 구조를 고려한 확장 연구에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022R1A2C1011862)

참 고 문 헌

- [1] J. G. Proakis and M. Salehi, Digital Communications, 5th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [2] A. Giorgetti, M. Chiani and M. Z. Win, "The effect of narrowband interference on wideband wireless communication systems," in IEEE Transactions on Communications, vol. 53, no. 12, pp. 2139-2149, Dec. 2005, doi: 10.1109/TCOMM.2005.860047.
- [3] Abdelbari, Amr, and Bülent Bilgehan. "The Derivation of The Probability of Error for BPSK, 16-QAM and 64-QAM in Rayleigh Fading Channel: A Unified Approach." arXiv preprint arXiv:2406.16548 (2024).