

ISI와 ACI를 고려한 진폭 가중된 QPSK 변조방식의 성능에 대한 연구

진 익 수*

A Study on Performance of Amplitude-Weighted QPSK Considering ISI and ACI Effects

Ik Soo Jin*

요 약

최근 무선통신 시스템에서 스펙트럼 공간이 매우 혼잡해짐에 따라 송신 신호의 주파수 효율을 최적화하는 것이 매우 중요하게 되었다. AWQPSK는 주파수 효율이 우수한 변조방식으로 알려졌으나, 성능분석에 대한 연구는 매우 미미하였다. 본 논문에서는 AWQPSK 변조방식에 대하여 심볼간 간섭(ISI) 신호와 인접채널 간섭(ACI) 신호에 의해 나타나는 신호 대 잡음비(SNR)에 대한 수식을 유도하였다. 성능 평가를 위해 정규화된 3dB 대역폭과 SNR의 열화값 등을 성능 파라미터로 사용하였다. 같은 조건하에서 ISI와 ACI 효과를 고려한 AWQPSK의 성능을 MSK와 16-QAM의 성능과 비교하였다. 성능 분석결과 AWQPSK 변조방식은 정규화된 중심주파수 이격 $f_s = 1, 2$ 에 대하여 MSK나 16-QAM보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

Abstract

In wireless communication system, it is very important to optimize spectral efficiency of transmitted signals as spectrum space becomes more crowded. Amplitude-Weighted Quadrature Phase Shift Keying(AWQPSK) is known as a modulation method with excellent frequency efficiency. However, research on the performance analysis has been very rare. In this paper, a expression for the degradation in Signal to Noise Ratio(SNR) caused by Intersymbol Interference(ISI) and Adjacent Channel Interference(ACI) in AWQPSK system is derived. Optimal normalized 3dB bandwidth and degradation in SNR are used for the performance parameters. The performance of AWQPSK considering ISI and ACI effects was compared with that of Minimum Shift Keying(MSK) and 16-Quadrature Amplitude Modulation(QAM) under the same conditions. From the results of performance analysis, it was confirmed that the AWQPSK modulation performed better than MSK or 16-QAM for the normalized center frequency spacing $f_s = 1$ and 2.

Keywords

AWQPSK, ISI, ACI, MSK, 16-QAM

* 경남대학교 인공지능학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1010-190X>

• Received: Nov. 15, 2024, Revised: Dec. 13, 2024, Accepted: Dec. 16, 2024
• Corresponding Author: Ik Soo Jin
Dept. of Artificial Intelligence, Kyungnam University, Korea
Tel.: +82-55-249-2215, Email: isjin@kyungnam.ac.kr

1. 서 론

디지털 통신시스템에서 필터의 대역폭이 입력 신호의 대역폭에 비해 작은 경우 출력신호 펄스가 퍼지는 현상이 발생한다. 이 현상은 필터의 대역폭이 작으면 작을수록 심하게 되는데 펄스가 이웃한 펄스에 일으키는 간섭을 심볼간 간섭(ISI, Inter-Symbol Interference) 이라고 한다. 또한 다른 주파수 채널의 신호가 원하는 신호의 채널로 누설되어 일으키는 간섭도 존재하게 되는데 이를 인접채널 간섭(ACI, Adjacent Channel Interference) 이라고 한다. ISI나 ACI는 디지털 통신시스템에 심각한 오류를 발생시키는 요인이라고 할 수 있다. 따라서 디지털 통신시스템에서는 ISI와 ACI가 존재하는 채널 상황에서 이들의 영향을 분석하는 것이 중요하게 된다.

I. Korn[1]은 MSK(Minimum Shift Keying) 변조 방식에 대하여 ISI와 ACI를 고려하여 채널을 모델링하고, 송신단과 수신단에 가우시안 필터를 적용하여 대역 제한을 하였을 때 ISI와 ACI로 인한 성능 열화를 수식으로 유도하고 성능평가를 수행하였다. 또한 ISI와 ACI로 인한 열화를 최소한으로 하는 정규화된 최적의 3-dB 대역폭을 도출하였다.

한편으로 무선통신 시스템에서는 스펙트럼 공간이 매우 혼잡해짐에 따라 송신 신호의 주파수 효율을 최적화하는 것이 매우 중요하게 된다. 최근 들어 주파수 효율이 좋은 변조방식에 대한 연구가 여러 분야에서 활발히 진행되고 있다[2]-[6]. 주파수 효율을 최적화하기 위해서는 변조 신호의 전력 대부분이 주엽에 집중되도록 제어해야 하며, 부엽으로의 전력 확산은 최소가 되도록 하여야 한다. M. A. Belkerdid 등[7]은 MSK에 비해 좀 더 부드러운 형태의 기저대역 성형함수를 사용하며 부엽으로의 전력 할당을 크게 줄이고 주엽에 전력을 집중시킨 주파수 효율이 좋은 AWQPSK(Amplitude-Weighted Quadrature Phase Shift Keying) 변조방식을 처음으로 제안하였다. 그러나 M. A. Belkerdid 등은 AWQPSK 시스템에 대한 성능평가 결과를 제시하지 않았다. 그 이후 AWQPSK에 대한 후속 연구는 거의 진행된 바가 없어 거의 잊혀진 논문이 되고 말았다.

AWQPSK 변조 방식은 주엽에 전력을 최대한 집중시켜 다른 변조 방식에 비해 전력 손실이 적기

때문에 대역폭 효율이 증가하고 ISI가 줄어들 것이라는 기대를 해볼 수 있다. 주파수가 제한된 채널에서 이는 커다란 장점이 될 수 있다. 간섭 채널에 대한 분석을 하여 성능이 입증된다면 다른 변조 방식들에 비해 제한된 대역에서 전력과 주파수를 효율적으로 사용할 수 있는 변조방식으로 사용될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 ISI와 ACI 를 고려하였을 때 AWQPSK 시스템의 성능열화 관계식을 SNR(Signal-to-Noise Ratio)에 대하여 유도한다. 이 수식을 유도하기 위하여, 2개의 ISI 심볼과 1개의 ACI 심볼이 응답에 주된 영향을 주었다는 가정을 한다. 성능평가를 위해 정규화된 3dB 대역폭과 SNR의 열화값 등을 성능 파라미터로 사용한다. 그리고 정규화된 중심주파수 이격 f_s 를 파라미터로 하여, AWQPSK의 BER(Bit Error Rate) 성능을 MSK와 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 변조방식과 비교한다. 송신기와 수신기 모두 가우시안 필터를 사용한 경우와 수신기에서만 사용한 경우로 나누어서 수치계산 결과를 제시한다.

II. 진폭 가중된 QPSK 변조방식 펄스 성형함수와 전력스펙트럼

스펙트럼 공간이 빽빽해짐에 따라 대역이 제한된 채널에서 전송하는 정보의 스펙트럼 효율을 극대화하는 것이 중요하다. 식 (1)에 정현파 함수로 가중치를 갖는 심볼 주기가 T 인 일반화된 펄스 성형함수를 $P(t)$ 로 표현하였다.

$$P(t) = \sum_{n=0}^N a_n \cos\left(\frac{n\pi}{T}t\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right) \quad (1)$$

여기서 a_n 은 푸리에 계수이며 N 은 항의 개수이다. $N=1$ 일 때가 MSK 변조에 해당한다. AWQPSK의 경우에는 N 과 a_n 의 값을 적절히 선택하여 식 (2)와 같은 펄스성형함수를 사용한다[7]. AWQPSK 성형함수 파형은 MSK의 단순한 코사인 함수의 펄스 포락선보다 훨씬 부드럽게 천이하며 이를 그림 1에 보였다. 이는 고주파 성분이 더욱 줄어들어 더 좋은 대역폭 효율을 가질 수 있음을 의미한다.

$$P(t) = 0.44 + 0.5\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + 0.07\cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right), -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (2)$$

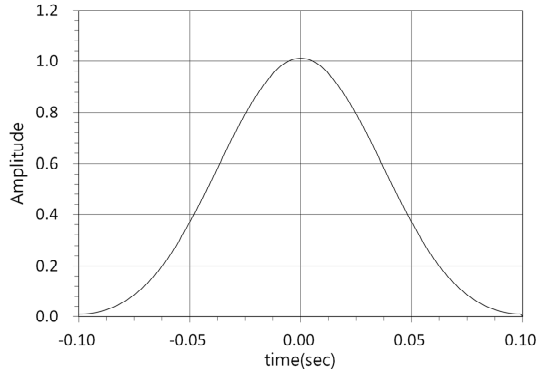


그림 1. AWQPSK의 성형 펄스
Fig. 1. Shaping pulse of AWQPSK

표 1. 각 변조 방식들의 전송 대역폭과 대역폭 효율
Table 1. Transmission bandwidth and bandwidth efficiency of each modulation scheme

Modulation	Transmission bandwidth [Hz]	Bandwidth efficiency [bits/sec/Hz]
BPSK	20/Tb	0.05
QPSK	10/Tb	0.1
MSK	2.75/Tb	0.364
AWQPSK	1.15/Tb	0.869

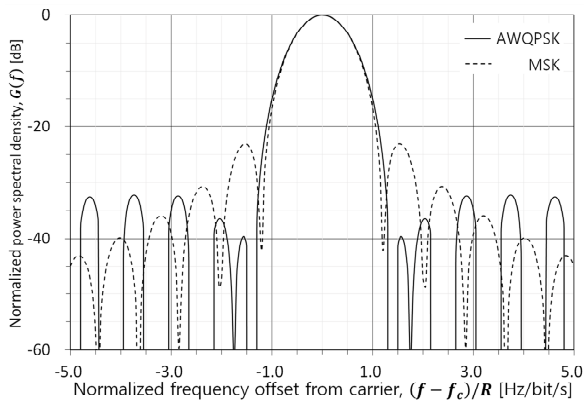


그림 2. 전력 스펙트럼 비교
Fig. 2. Comparisons of power spectral density

표 1에 각 변조 방식에 대한 전송 대역폭과 대역폭 효율을 나타내었다. 여기서 T_b 는 비트구간이고 대역폭 효율은 bits/sec/Hz 로 표시된다. 전송 대

역폭은 전체 전력의 99.99%를 포함하는 대역폭으로 정의한다.

전력 스펙트럼 밀도 또한 성능을 나타내기 위한 중요한 지표이며 이를 전체 주파수 대역에 대해 적분하면 1Ω당 전체 평균 전력을 구할 수 있다. 그림 2에서 AWQPSK의 경우 MSK보다 주엽이 넓고 부엽의 크기가 작으므로 전력 효율이 더 좋다고 판단할 수 있다.

III. 시스템 모델

3.1 시스템 모델

실제 통신 환경에서 다수의 채널이 각각 제한된 대역폭을 가지는 경우, 각 채널의 신호는 특정한 대역폭으로 제한되고 별도의 반송파 주파수를 가진다. 이 때 수신기의 대역 제한 필터는 전송 대역 이외의 잡음 및 인접 채널 간섭을 줄이며 송신기의 필터는 전송 대역을 제한한다.

그림 3은 시스템 모델이다. 여기서 주 채널은 반송파 주파수 f_0 를 가지며 두 인접 채널의 반송파 주파수는 $f_{\pm 1} = f_0 \pm f_s$ 를 가지는데 f_s 는 각 채널을 구분하기 위한 채널 간격이다. $\hat{h}_R(t)$ 는 3-dB 대역폭을 가진다고 가정한다.

I. Korn[1]은 최적의 대역폭을 가정했을 때 ISI와 ACI가 MSK 시스템의 성능에 미치는 영향을 포함하는 수식을 도출하였다. 본 논문에서는 송신단과 수신단에서 사용하는 대역제한 필터를 가우시안 필터로 가정하였다. 가우시안 필터의 주파수 응답은 식 (3)과 같다 [8].

$$H(f) = \exp(-(\alpha T_b f)^2) \quad (3)$$

여기서 α 는 정규화된 3-dB 대역폭 B 와 관련이 있는 계수로 식 (4)와 같다.

$$\alpha = \sqrt{2\ln 2}/B \quad (4)$$

$$T_b = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df = \sqrt{0.5} \pi / \alpha$$

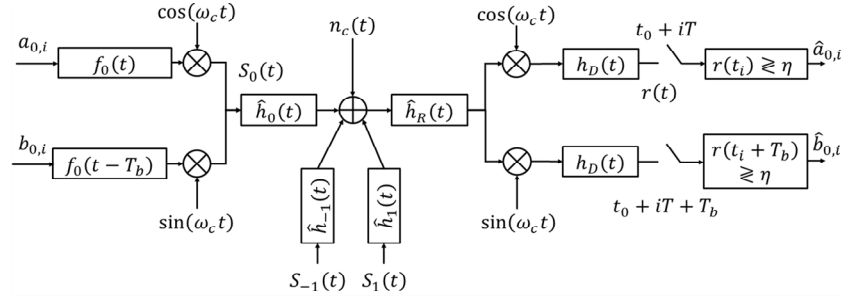


그림 3. 시스템 모델
Fig. 3. System model

3.2 ISI와 ACI를 고려한 SNR 열화 수식 유도

그림 3에서의 수신단의 출력신호는 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$r(t) = x(t) + n(t) \tag{5}$$

$$x(t) = x_0(t) + x_1(t) + x_{-1}(t)$$

$$x_m(t) = Re [v_m(t) * h_T(t) * h_R(t)]$$

여기서 $x_0(t)$ 는 주 채널, $x_1(t)$ 와 $x_{-1}(t)$ 는 인접 채널의 간섭신호(ACI), $n(t)$ 는 평균이 0인 가우시안 잡음, * 는 컨볼루션을 의미한다. $h_T(t)$, $h_R(t)$ 는 각각 송신단과 수신단에서의 대역 제한 필터를 의미한다. MSK의 복소 포락선은 $\cos(\pi t/T)$ 이므로 $x_0(t)$ 와 그 위상 $\psi_0(t)$ 는 식 (6)과 같다.

$$x_0(t) = A \cos(\pi t/T) * h_T(t) * h_R(t) \tag{6}$$

$$= A |H_T(f_d)H_R(f_d)| \cos \psi_0(t)$$

$$\psi_0(t) = 2\pi f_d t + \arg H_T(f_d) + \arg H_R(f_d)$$

또한 $m = \pm 1$ 일 때도 $x_m(t)$, $\psi_m(t)$ 를 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$x_m(t) = A \rho_m |H_T(f_d)H_R(c_{m,0}f_d + mf_s)| \cos \psi_m(t)$$

$$\begin{aligned} \psi_m(t) = & 2\pi(c_{m,0}f_d + mf_s)t + \alpha_m \\ & + \arg H_T(f_d) + \arg H_R(c_{m,0}f_d + mf_s) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 A 는 주 채널에서의 신호 진폭, ρ_m 은 간섭

신호의 상대적인 진폭, α_m 은 간섭 채널의 위상 반송과 떨림, $f_d = 1/(2T)$, 그리고 $\{c_{m,i}\}$ 는 독립적인 2진 랜덤 심볼 시퀀스를 의미한다.

식 (6)과 식 (7)를 식 (5)에 대입하고 $x(t)$ 가 최댓값을 갖도록 하는 샘플링 시간 t_0 를 선택하면, $\psi_0(t_0) = 0$ 가 되고 $\psi_1(t_0) = \psi_{-1}(t_0) = \pi$ 가 된다. $H_T(f) = H_R(f) = H(f)$ 이고 송신단과 수신단에 모두 필터를 적용했을 경우와 수신단에만 필터를 적용했을 경우의 MSK의 신호 대 잡음 비 μ 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다[1].

$$\mu = \sqrt{2/\pi} \alpha e^{-\alpha^2/4} [1 - 2\rho e^{-\alpha^2 f_s T_b (f_s T_b - 0.5)}]^2 \tag{8}$$

$$\mu = \sqrt{2/\pi} \alpha e^{-\alpha^2/8} [1 - 2\rho e^{-\alpha^2 f_s T_b (f_s T_b - 0.5)}]^2$$

여기서 ρ 는 ACI 간섭신호의 상대적인 진폭값을 나타내는 파라미터이다. $\rho=0$ 이면 ACI가 없는 경우이다. 송·수신단에 모두 필터를 적용한 경우와 수신단에만 필터를 적용했을 경우의 AWQPSK의 신호 대 잡음 비 μ 는 식 (9)와 같다.

$$\mu = \sqrt{2/\pi} \alpha [A_1 + A_2 e^{-\alpha^2/2} (1 - 2\rho e^{-\alpha^2 z_1}) \tag{9}$$

$$+ A_3 e^{-2\alpha^2} (1 - 2\rho e^{-\alpha^2 z_2})]^2$$

$$\mu = \sqrt{2/\pi} \alpha [A_1 + A_2 e^{-\alpha^2/4} (1 - 2\rho e^{-\alpha^2 z_1})$$

$$+ A_3 e^{-\alpha^2} (1 - 2\rho e^{-\alpha^2 z_2})]^2$$

여기서 $A_1 \approx 0.42659$, $A_2 \approx 0.49656$, $A_3 \approx 0.07685$ 로 푸리에 계수와 관련된 상수이며, $z_1 = T_b f_s (T_b f_s - 1)$, $z_2 = T_b f_s (T_b f_s - 2)$ 이다.

IV. 성능 분석

AWQPSK의 간섭으로 인한 열화 수준과 3-dB 대역폭을 측정하기 위해 ρ 를 0, 1, 2, 5, 10으로 두고 측정하였으며 전력 열화 D에 대한 수식은 식 (10)과 같다.

$$D = -10\log \mu (dB) \quad (10)$$

AWQPSK의 경우 필터를 송·수신단 모두 적용하면 약 1.8 이상의 f_s/R_b 를 가질 때 1.41dB의 열화로 수렴하며 수신단에만 필터를 적용하면 약 1.65 이상의 f_s/R_b 를 가질 때 -0.11dB의 열화로 수렴하였다. AWQPSK의 경우에는 ρ 값이 크더라도 충분한 f_s/R_b 가 주어질 경우에는 가장 낮은 열화 수준을 보여준다. 여기서 f_s 는 정규화된 중심주파수 이격이고, R_b 는 비트율이다. 그림 4에 AWQPSK의 간섭에 따른 전력 열화 그래프를 제시하였다.

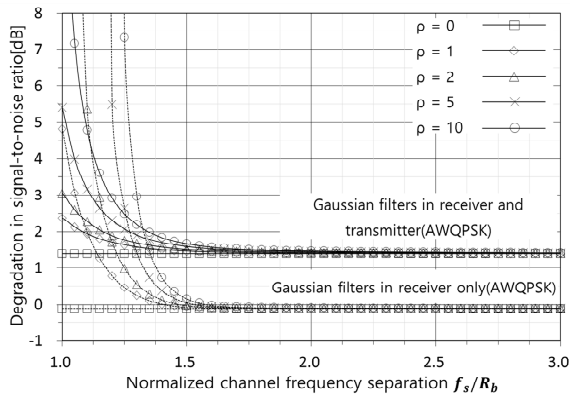


그림 4. AWQPSK의 전력 열화 그래프
Fig. 4. Power degradation graph of AWQPSK

AWQPSK의 3-dB 대역폭은 필터를 송·수신단 모두 적용하면 약 3.1 이상의 f_s/R_b 를 가진다면 0.91Hz로 수렴하며 수신단에만 필터를 적용하면 약 2.4 이상의 f_s/R_b 를 가질 때 0.64Hz로 수렴하는 모습을 보였다. 이를 그림 5에 보였다.

ISI 및 ACI에 대한 오류 확률은 신호 대 잡음 비의 열화를 이용하여 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$P(e|1) = Q(\sqrt{2\gamma\mu}) \quad (11)$$

여기서 $P(e|1)$ 은 최악의 경우를 고려한 오류 확률의 의미하며, $Q(x)$ 는 Q-함수를, γ 은 E_b/N_0 를 의미한다.

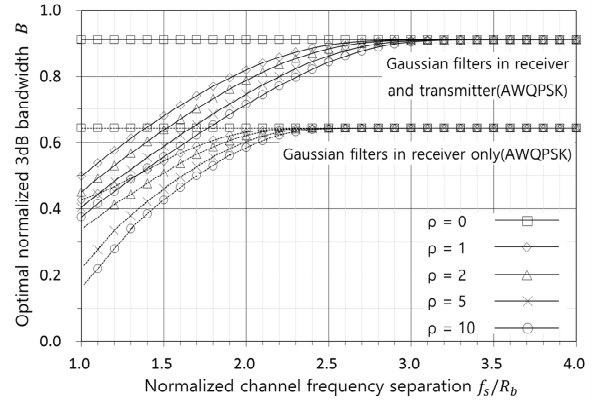
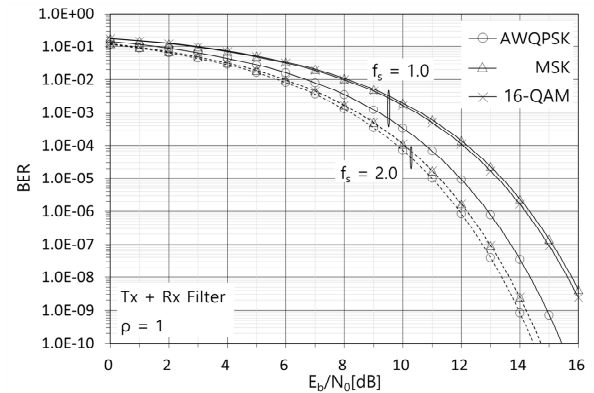
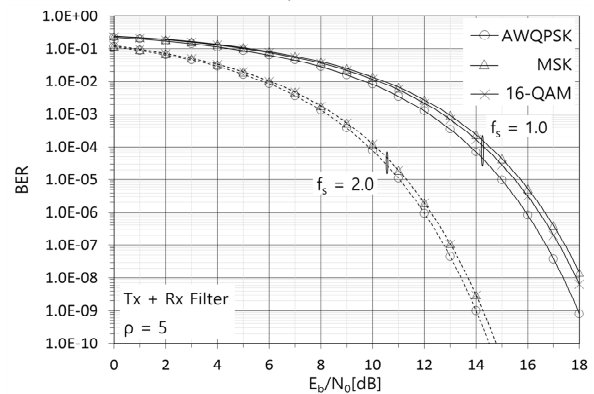


그림 5. AWQPSK의 3-dB 대역폭 그래프
Fig. 5. 3-dB bandwidth of AWQPSK

그림 6은 수신단 모두 필터를 적용한 경우, 그림 9는 신 단에만 필터를 적용한 경우에 대해 각 변조 방식의 오류 확률을 비교한 그래프이다. ρ 값이 1, 5인 경우에 대해 결과를 비교하였다.



(a) $\rho = 1$



(b) $\rho = 5$

그림 6. 송·수신단에 필터를 적용하였을 때의 오류 확률 비교

Fig. 6. Error probability comparison when a filter is applied to the transmitter and receiver

송수신단에 모두 필터를 적용한 경우는 f_s/R_b 값에 상관없이 성능이 AWQPSK가 가장 좋은 성능을 보였으나 수신단에만 필터를 적용할 때에는 f_s/R_b 가 1.5이상이어야 AWQQPSK가 가장 좋은 성능을 보였다. 이는 그림 7에서 수신단에만 필터를 적용하였을 경우 f_s/R_b 가 1.5 이하일 때는 높은 수준의 신호 대 잡음비 열화를 보이기에 이러한 오류확률을 보이는 것이라고 해석할 수 있다.

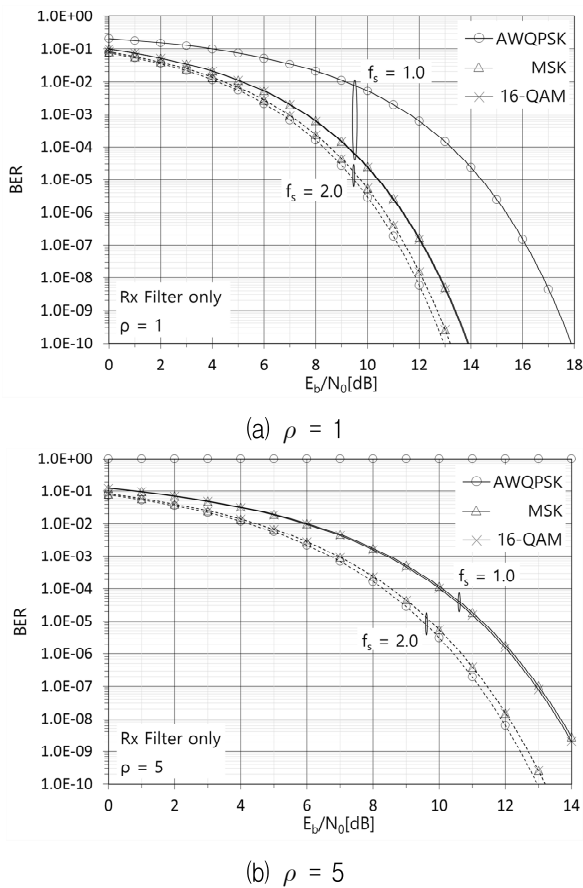


그림 7. 수신단에만 필터를 적용하였을 때 오류 확률 비교
Fig. 7. Error probability comparison when a filter is applied to the receiver only

V. 결 론

본 논문에서는 AWQPSK 변조 방식을 ISI와 ACI를 가지고 있는 채널에 대해 SNR 성능열화 수식을 유도하고 간섭의 정도를 나타내는 파라미터 ρ 값에 대한 열화 수준과 정규화된 채널 분리 주파수 f_s 에 따라 적절한 3-dB 대역폭이 얼마인지를 제시하였으며 적절한 f_s 값을 가진다면 다른 직교 변조 방식에

비하여 더 낮은 BER을 가지고 더 높은 최적의 3-dB 대역폭으로 대역폭 효율을 높일 수 있다는 것을 보였다.

하지만 AWQPSK 변조 신호는 진폭에 가중치를 주었기 때문에 포락선이 비선형 특성을 가지므로 비싼 선형증폭기를 사용해야 하는 단점이 있다. 또한 낮은 f_s 값을 가질 때의 성능 열화를 보완할 방안이 필요하기에 이를 개선할 수 있는 연구를 본 논문의 추후 과제로 남기기로 한다.

References

- [1] I. Korn, "Simple Expression for Interchannel and Intersymbol Interference Degradation in MSK Systems with Application to Systems with Gaussian Filters", *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 30, No. 8, pp. 1968-1972, Aug. 1982. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1982.1095668>.
- [2] X. Dou, T. Lyu, T. Han, and D. Liang, "A Time-Delay Overlapping Modulation-Based High Spectral Efficiency Multi-User Differential Chaos Shift Keying for Maritime Internet of Vessels", *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 13, No. 1, pp. 3227-3231, Nov 2024. <https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3460590>.
- [3] G. Noh, W. Shin, K. Kim, and H. Wang, "Spectral Efficiency Enhancement of FM-OFDM Waveform Using Offset Modulation Techniques", *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 13, No. 5, pp. 1335-1338, May 2024. <https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3369390>.
- [4] V. Sannikov and V. Volchkov, "Increase the Spectral Efficiency of a Multi-Frequency Modem due to Non-Orthogonal Compaction of Optimal Narrowband QAM Signals", *2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Pskov, Russian Federation, pp. 28-30, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178648>.

- [5] T. V. Vinh, P. T. Hiep, and N. T. Phuong, "Combined Variable Active Antenna Spatial Modulation and NOMA to Enhance Spectral Efficiency for Multiple Users MIMO Systems", 2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Ha Noi, Vietnam, pp. 20-22, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1109/ATC55345.2022.9943045>.
- [6] B. Seo, "Blind Channel Estimation for Downlink STBC MC-CDMA Systems", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 2, pp. 53-59, Feb. 2016. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.2.53>.
- [7] M. A. Belkerdid and D. C. Malocha, "Amplitude-Weighted Quadrature Phase Shift Keying Using SAW Technology", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. 32, No. 5, pp. 791-798, May 1985. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1985.31663>.
- [8] M. Ishizuka and K. Hirade, "Optimum Gaussian Filter and Deviated-Frequency-Locking Scheme for Coherent Detection of MSK", IEEE Transactions on Communications, Vol. 28, No. 6, pp. 850-857, Jun. 1980. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1980.1094734>.

저자소개

진 익 수 (Ik Soo Jin)



1987년 2월 : 연세대학교

전기공학과(공학사)

1989년 2월 : 연세대학교

전기공학과(공학석사)

1995년 8월 : 연세대학교

전기공학과(공학박사)

1995년 11월 ~ 2000년 2월 :

한국전자통신연구원 IMT-2000 개발본부 선임연구원
2000년 3월 ~ 2001년 8월 : 위덕대학교 정보통신공학과
전임강사

2001년 9월 ~ 현재 : 경남대학교 인공지능학과 교수
관심분야 : 차세대이동통신, 변복조, 채널코딩, MIMO