

# 고전력 효율 Quadrature-Amplitude-Position-Modulation 변조 방식과 성능 평가

준회원 최 재 훈\*, 정회원 유 흥 균\*

## Design and Performance Analysis of Quadrature-Amplitude-Position-Modulation Method for the High Power Efficiency

Jae-Hoon Choi\* Associate Member, Heung-Gyoon Ryu\* Regular Member

### 요 약

본 논문은 저전력 통신 변조 방식으로 새로운 QAPM(Quadrature Amplitude Position Modulation) 방식을 제안 하며, 기존의 PSSK(Phase Silence Shift Keying) 변조와의 성능을 비교한다. 기존의 저전력 변조 방식의 하나인 PSSK는 PSK 변조를 기반으로 하여 PPM(Pulse Position Modulation) 변조를 결합한 방식이다. PSSK는 2개의 직 교 심볼을 전송하는 방식으로 신호 주기내의 심볼 비율을 절반으로 하여 송신전력을 낮추고, 변조 심볼간의 거 리를 늘림으로써 BER 성능에 향상을 가져왔다. 대역 효율은 기존의 PSK에 비해 2배 낮아졌으나 BER(Bit Error Rate) 성능은 6dB까지 향상 시켰다. 이러한 BER의 향상은 변조 레벨을 낮춤으로써 얻어지는 결과이다. 새로 제 안하는 QAPM 방식은 QAM 변조를 기반으로하며, PSSK와 동일한 방식으로 심볼을 배치한다. QAM의 BER 성 능은 기본적으로 PSK보다 뛰어나므로 QAPM 변조방식은 기존의 PSSK보다 더 뛰어난 BER 성능을 보여준다. 이 논문에서는 PSSK와 QAPM을 AWGN 채널에서의 BER 성능과 Throughput 성능을 비교하였다.

**Key Words** : PSSK, QAPM, Bandwidth efficiency, Power efficiency

### ABSTRACT

In this paper, we propose QAPM(Quadrature Amplitude Position Modulation) modulation scheme for improving power efficiency and we compare existing PSSK(Phase Silence Shift Keying) and QAPM. An existing PSSK Modulation is extension from PSK modulation technique. The conventional PSSK modulation technique can be regarded as an extension from PSK modulation. And this PSSK has better power efficiency than PSK modulation. The Bandwidth efficiency of PSSK is half than PSK, but improved BER(Bit Error Rate) performance. A propose QAPM scheme is build on QAM. And BER performance of QAPM is better than PSSK because BER performance of QAM is better than PSK. In this paper, we compare PSSK and QAPM regard to bit error rate and throughput.

### I. 서 론

최근 전자기기의 소형화와 유비쿼터스 환경의 구현에 대한 연구가 진행됨에 따라 WBAN과 같이 전파의

도달거리가 3m 이내인 통신 방식의 연구가 활발히 이루어지고 있다. WBAN 기술은 전파의 도달거리를 기준으로 인체의 내부 및 외부 약 3m 이내에 부착되는 장치들을 무선 네트워크로 연결하여 기기간 상호 통

※ 이 논문은 2010 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0007567)

\* 충북대학교 전자정보대학 전자공학과 (ecoma@cba.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-08-400, 접수일자 : 2010년 8월 16일, 최종논문접수일자 : 2010년 12월 27일

신을 제공하는 근거리 무선통신 기술이다. WBAN 시스템은 in-body 와 on-body 시스템으로 구분 할 수 있다. in-body 시스템은 주로 의료용 시스템으로 응용이 가능하며, 인체의 기관에 이식되어 있는 장치(implant device)와 생체전극을 이용하여 인체 부착 장치(wearable device)가 있다. on-body 시스템은 인체 주변의 데이터 전달, 게임 응용 등 다양한 엔터테인먼트 분야에 활용이 가능하다<sup>[1]</sup>. 이러한 WBAN 기술은 인체 내부와 외부에서 생체 신호를 측정하여 네트워크 전송을 가능하게 한다. 이는 기존의 헬스케어 서비스에 비해 폭넓은 개념의 서비스로 진정한 헬스케어 서비스를 제공할 수 있는 기술이다. 이식장치와 부착장치를 이용하기 때문에 WBAN 시스템은 소형화가 필수이다. 장치의 소형화는 곧 소모전력에 제한을 가져오게 되며, 낮은 전력 소모를 요구하게 된다. 이러한 이유로 WBAN의 in-body 시스템에는 FSK 계열의 변조 방식이 제안되었으나, 너무 낮은 대역효율로 인하여 대역소모가 크다는 단점이 존재 했다<sup>[2-4]</sup>. 이러한 단점을 개선하기 위하여 PSSK 계열의 변조 방식이 제안되었다<sup>[5]</sup>. PSSK 방식은 기존의 PSK와 비교하여 전력효율을 개선 시킨 방식으로 대역효율은 2배 낮아 지지만 전력 효율은 6dB까지 증가 시킨 방식이다. 이 변조 방식은 PSK보다 높은 전력 효율을, FSK보다 높은 대역효율을 목적으로 제안된 방식이다. 이 같은 특성을 갖는 PSSK는 저전력을 요구하는 in-body 시스템 중에서 높은 전송량이 요구되는 capsule-endoscope 등에 사용하기 적합한 방식이다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 새로운 QAPM 변조 방식을 제안한다. 새로운 QAPM 변조 방식은 기존의 PSSK가 PSK 신호를 이용한 것과는 달리 QAM 신호를 이용하여 변조하는 방식이다. PSSK와 동일한 방식으로 신호 정보의 첫 번째 비트정보를 이용하여 신호주기를 나누어 QAM 심볼을 배치 하는 방식을 사용했다. 그 결과, SNR 성능이 기존의 PSSK보다 향상 되었으며, 대역효율은 동일하게 유지 되었다. 본 논문에서는 AWGN 채널에서의 시뮬레이션 결과를 통해 이를 증명하였으며, SNR의 변화에 따른 throughput 성능 또한 비교하였다.

## II. QAPM 변조 방식

QAPM변조는 QAM 변조를 기반으로 하며, 신호 주기내의 심볼을 PSSK와 동일한 방식으로 배치한다. 신호 주기에서 1/2은 심볼 구간으로, 1/2는 silence 주기로 나누어 송신 신호전력을 감소 시킨다. 따라서 대

역효율은 1/2로 감소 하지만 SNR 성능은 항상 시킬 수 있다. 또한 QAM의 SNR 성능은 변조 레벨이 올라갈 수록 PSK보다 뛰어나기 때문에 더 좋은 SNR 성능을 기대 할 수 있다.

### 2.1 QAPM의 성상도와 심볼 구간

QAPM변조 방식은 QAM 신호를 서로 직교하는 2개의 심볼로 전송하는 방식이다. PSSK와 마찬가지로 기존의 QAM 신호를 신호주기에 맵핑 하는 방식을 사용하여 변조 한다. 그림 1은 16QAPM의 성상도를 나타낸 것이다. 16QAPM은 4비트의 정보를 3비트로 이루어진 2개의 8QAM 신호로 전송한다. 첫 번째 비트 정보를 이용하여 신호 주기내의 심볼 위치를 결정하며 전송되는 심볼은 비트의 QAM 신호이다. 그림 2는 QAPM의 심볼 주기를 나타낸 것이다. 의 심볼 주기를 로 나누고 1개의 비트 정보를 이용하여 신호 주기 내의 심볼 위치를 결정한다. 심볼 주기가 줄어든 만큼 대역폭은 증가하나, 신호 주기에서 0을 전송하는 시간이 존재하므로 그만큼의 전송 전력을 줄일 수 있다.

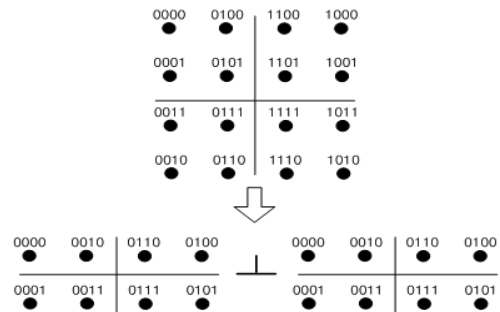


그림 1. QAPM 성상도

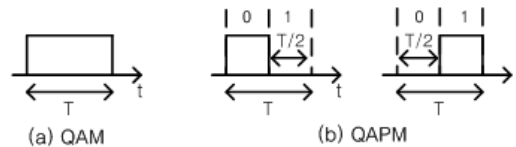


그림 2. QAPM 심볼 구간

### 2.2 QAPM의 이론적 분석

M-ary QAPM 신호는 다음과 같이 정의 된다.

$$s_m(t) = (A_I + A_Q)A_m + (A_I - A_Q)B_m [\alpha(t)(\cos 2\pi f_c t - \sin 2\pi f_c t) + \beta(t)(\cos 2\pi f_c t + \sin 2\pi f_c t)] \quad (0 \leq t < T) \quad (1)$$

식에서는 반송파의 주파수를 나타내고 는 In-Phase 성분의 크기이며, 는 Quadrature 성분의 크기를 나타낸다.

$$A_m = \begin{cases} 1, & 0 \leq m \leq \frac{M}{2}-1 \\ 0, & 0 \leq m \leq M-1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha(t) = u(t) - u(t - 0.5T), \beta(t) = \alpha(t - 0.5T) \quad (3)$$

$A_m$ 과  $B_m$ 은 신호 주기내의 심볼 위치를, 는 스텝 함수로 반송파를 심볼 위치에 맞춰주는 역할을 하게 된다.

식(1)-(3)를 정리 하면 다음과 같이 송신 신호를 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} s_m(t) &= s_m^T f_X \\ &= (A_m A_I) \alpha(t) \cos 2\pi f_c t - (A_m A_J) \alpha(t) \sin 2\pi f_c t \\ &\quad + (B_m A_I) \beta(t) \cos 2\pi f_c t - (B_m A_J) \beta(t) \sin 2\pi f_c t \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 전송되는 신호  $s_m(t)$ 는 식(4)와 같이 정의되며,  $A_m$ 과  $B_m$ 의 값에 의하여 신호 주기에 QAM 신호가 배치된다. QAPM의 송신 신호는  $A_m$ 과  $B_m$ 에 의하여 직교특성을 가지게 되며 신호 주기에서 심볼 구간은 1/2가 된다.

그림 3은 QAPM의 송신기와 수신기의 구조를 나타낸다. QAPM 신호로의 변조는 먼저 데이터를 S/P 변환기를 이용하여  $\log_2 M$ 의 열로 정렬 시킨 후 첫 번째 비트를 이용하여 심볼의 위치를 결정한다. 첫 번째 비트가 0이면  $A_m = 1, B_m = 0$  이 되며, 첫 번째 비트가 1이면  $A_m = 0, B_m = 1$  이 된다. 송신신호  $s_m(t)$ 는

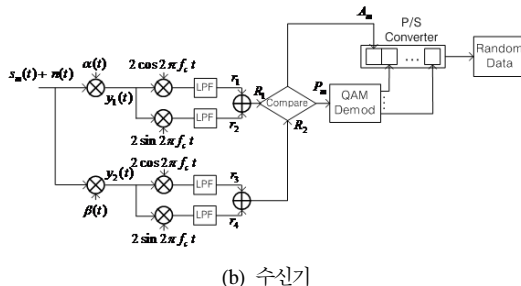
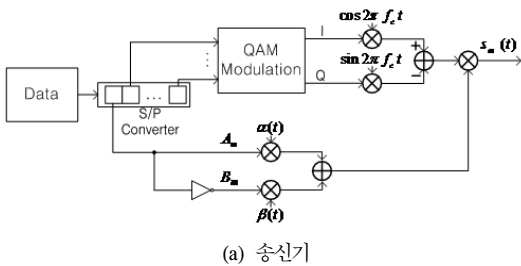


그림 3. QAPM 송신기와 수신기의 구조  
Fig.3. QAPM Transmitter and Receiver

PSK 변조된 신호와 심볼의 위치 정보를 가지고 있는 신호의 곱으로써 전송되게 되며 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 송신되는 신호의 대역효율은  $M \geq 4$ 에서  $0.25 \log_2 M$  이 된다. QAPM의 대역효율은 PSK와 QAM의 1/2이며, PSSK와 동일 하다. 이것은 심볼의 주기가  $T/2$ 로 감소하여 소모 대역폭이 2배로 증가했기 때문이다.

QAPM의 대역효율을 위상 비동기식 FSK와 비교를 해보면, 위상 비동기식 FSK의 경우 대역효율이  $\log_2 M / 2M$  으로 QAPM 방식은 PSSK와 마찬가지로 FSK 방식보다 대역효율이  $M/2$  더 좋다.

QAPM의 수신기는 그림 3과 같이 동기방식을 사용한다. 수신되는 신호는 식(4)의  $s_m(t)$ 와 AWGN 채널 노이즈의 합으로 나타나며 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$s_r(t) = s_m(t) + n(t) \quad (5)$$

QAPM의 복조는 기존의 PSSK의 복조와 동일한 방식을 이용한다. 먼저 신호주기에서 심볼의 위치를 찾기 위해 심볼의 위치를 찾아야 하므로 수신 신호에  $\alpha(t)$ 와  $\beta(t)$ 를 곱한다. 스텝함수  $\alpha(t)$ 와  $\beta(t)$ 는 서로 직교하는 성질을 가진다. 이러한 직교성을 이용하여, 하나의 신호 주기를 2개의 심볼 주기로 구분 할 수 있게 된다. 따라서 아래와 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} y_1(t) &= (s_m(t) + n(t)) \times \alpha(t) \\ &= A_m (A_I \cos 2\pi f_c t - A_J \sin 2\pi f_c t) + n(t) \alpha(t) \\ y_2(t) &= (s_m(t) + n(t)) \times \beta(t) \\ &= A_m (A_I \cos 2\pi f_c t - A_J \sin 2\pi f_c t) + n(t) \beta(t) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에 반송파를 곱하여 기저대역으로 내리게 되면,

$$\begin{aligned} r_1 &= A_m A_I + n(t) \alpha(t), \quad r_2 = A_m A_J + n(t) \alpha(t) \\ r_3 &= B_m A_I + n(t) \beta(t), \quad r_4 = B_m A_J + n(t) \beta(t) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 신호 정보를 얻을 수 있다. QAPM 신호의 복조를 위해서는 신호 주기내의 심볼의 위치를 파악 해야 한다. 먼저 I와 Q로 나뉜 신호를 합하게 되면, 식 (14)와 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_1 &= A_m (A_I + A_J) + n(t) \alpha(t) \\ R_2 &= B_m (A_I + A_J) + n(t) \beta(t) \end{aligned} \quad (8)$$

식(7)의  $R_1$ 과  $R_2$ 의 신호 전력을 비교하게 되면

$$\max(|R_n|^2) = \begin{cases} R_1 \Rightarrow A_m = 0, P_m = r_1 + j \cdot r_2 \\ R_1 \Rightarrow A_m = 1, P_m = r_3 + j \cdot r_4 \end{cases} \quad (9)$$

이렇게 알아낸  $A_m$ 의 정보를 첫 번째 비트로 PSK 복조 정보에 덧붙이면 QAPM 신호를 복조 할 수 있다. M-Ary QAPM은 심볼의 위치를 결정하는 1비트와  $\log_2 M - 1$ 비트의 QAM으로 변조된다. QAM의 경우 QAPM과 심볼간의 해밍 거리가 동일 하다. 이는 QAM이 동일한 해밍 거리를 유지하기 위해 신호 전력을 올리기 때문으로 PSK와 가장 큰 차이점이다. 또한, PSK의 경우 변조 레벨의 변화에 따른 송신 신호 전력이 차이를 보이지 않지만 QAM의 경우 변조 레벨이 변화함에 따라 신호전력은 크게 변화한다. QAPM 방식은 QAM 심볼을 펌핑하여 전송하는 방식으로, 수신 신호 에러 확률은 QAM의 수신 에러 확률로부터 유도할 수 있다<sup>4,5)</sup>.

$$P_{s-QAM} \cong 4 \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} Q \left( \sqrt{\frac{3}{M-1} \cdot \frac{kE_b}{N_0}} \right) - 4 \left( \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right)^2 Q^2 \left( \sqrt{\frac{3}{M-1} \cdot \frac{kE_b}{N_0}} \right) \quad (9)$$

$$P_{b-QAM} \cong \frac{4IJ-2I-2J}{M} Q \left( \sqrt{\frac{6\log_2(IJ)}{(I^2+J^2-2)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) - \frac{4}{M} (1+IJ-I-J)^2 Q^2 \left( \sqrt{\frac{6\log_2(IJ)}{(I^2+J^2-2)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (10)$$

식(9)는 M-ary Square QAM의 수신 심볼 에러 확률을 나타내며 식 (10)은 rectangular QAM의 수신 심볼 에러 확률이다. M-ary QAPM은  $\frac{M}{2}$  QAM심볼을 전송하게 된다. 따라서 QAPM의 심볼 오류 확률은 식 (11)과 같이 정리 할 수 있다.

$$P_{b-QAPM} = \frac{1}{\log_2 M} \times P_{s-QAM} \left( \frac{1}{2} M \right) \quad (11)$$

QAPM 변조 신호는 위에서 서술한 것과 같이  $\frac{M}{2}$  QAM 을 전송하게 된다. 따라서 SNR 값에 변화가 생기게 된다. 식 (12)를 살펴보면,

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} = \frac{A^2}{N_0 B_p} \quad (12)$$

A는 신호의 크기,  $B_p$ 는 전송 비트를 나타낸다.

SNR은 위의 식과 같이 신호의 전력과 전송 비트에 영향을 받게 된다. QAPM 변조 신호는 QAM의 신호에 2M-ary QAM 신호를 전송하게 되므로 식 (13)과 같이 정리 할 수 있으며, 식(9)-(13)을 이용하여 표 1과 같은 QAPM변조의 수신 비트오류 확률을 정리 할 수 있다.

$$\frac{E_b}{N_{0(QAPM)}} = \frac{\log_2 M}{\log_2 M - 1} \times \frac{E_b}{N_{0(QAM)}} \quad (13)$$

표 1. QAPM 수신 비트 오류 확률  
Table 1. BER of QAPM modulation closed form

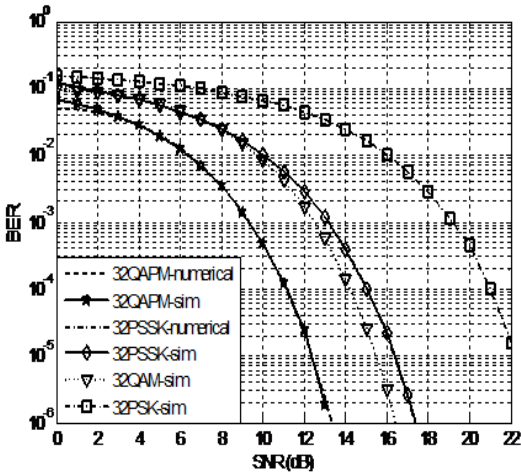
QAPM 수신 비트 오류 확률	
16QAPM	$\frac{1}{4} \left[ \frac{5}{4} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{2E_b}{3N_0}} \right) - \frac{1}{12} \operatorname{erfc}^2 \left( \sqrt{\frac{2E_b}{3N_0}} \right) \right]$
32QAPM	$\frac{1}{5} \left[ \frac{3}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{1E_b}{2N_0}} \right) - \frac{9}{4} \operatorname{erfc}^2 \left( \sqrt{\frac{1E_b}{2N_0}} \right) \right]$
64QAPM	$\frac{1}{6} \left[ \frac{13}{8} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{288E_b}{975N_0}} \right) - \frac{21}{16} \operatorname{erfc}^2 \left( \sqrt{\frac{288E_b}{975N_0}} \right) \right]$

### III. 시뮬레이션 결과 분석

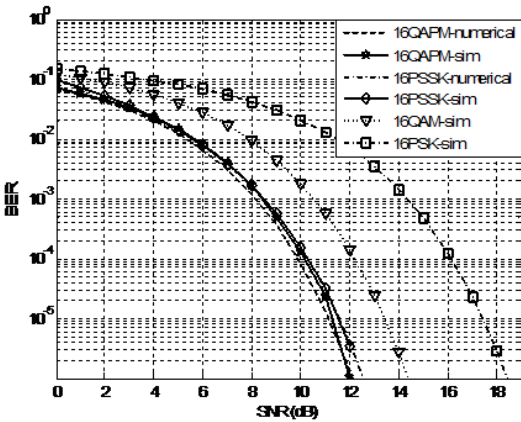
그림 4는 AWGN 채널에서 기존의 PSK, QAM과 PSSK, QAPM의 BER 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 16-ary 변조신호에 대한 AWGN 채널에서의 BER 그래프이다. BER  $10^{-6}$ 을 기준으로 16PSSK의 경우 12.5dB이며, 16QAPM의 경우 12dB 정도인 것을 확인 할 수 있다. 16QAPM은 16PSSK보다 0.5dB의 SNR 이득이 있음을 확인 할 수 있다. 이것은 기본적으로 8QAM의 SNR 성능이 8PSK보다 뛰어나기 때문이다.

그림 4(b)는 32-ary 변조신호에 대한 AWGN 채널에서의 BER 그래프이다. 마찬가지로 BER 을 기준으로 32PSSK의 경우 17.3dB이며, 32QAPM의 경우 13.2dB 로 32-ary 변조 신호의 경우 QAPM은 PSSK보다 4dB의 SNR 이득이 있음을 확인 할 수 있다. 16-ary 변조 신호의 경우보다 QAPM의 이득이 더 크게 된다.

이는 변조레벨이 올라 갈수록 QAM의 BER 성능이 PSK 보다 크게 좋아지게 되기 때문이다. 실제로 8PSK와 8QAM은 0.5dB 정도의 차이를 보이지만, 16PSK와 16QAM은 4dB 이상의 차이를 보인다. 이러한 경향은 변조레벨이 올라 갈수록 더욱 두드러지게 되며, 높은 변조 레벨에서 QAPM변조가 PSSK보다 더욱 유용해지게 되는 원인이 된다.



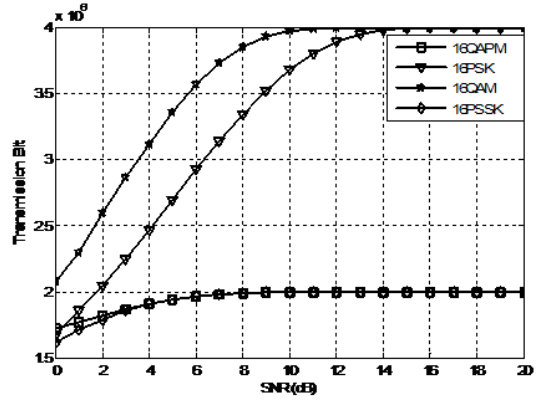
(a) 16-ary AWGN 채널 BER 성능



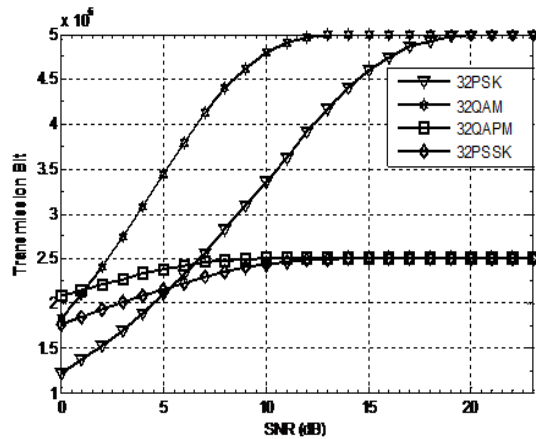
(b) 32-ary AWGN 채널 BER 성능

그림 4. AWGN 채널의 BER 성능.  
Fig. 4. BER performance in AWGN channel

그림 5는 각 변조의 Throughput 성능을 시뮬레이션 한 결과이다. 시뮬레이션 환경은 표 2와 같다. 16-ary 변조는 1심볼이 가지는 비트 수가 4, 32-ary 변조는 1심볼이 가지는 비트 수를 5로 하여 시뮬레이션 했다. SNR의 변화에 따른 Throughput을 확인하기 위하여 전송되는 심볼 중에 에러가 발생하지 않는 심볼만을 가지고 Throughput을 계산하였다. PSSK와 QAPM의 대역효율은 PSK와 QAM의 대역효율의 절반이다. 그림 5(a)에서 보듯이 심볼 에러가 더 이상 발생하지 않는 16dB 이상의 SNR에서 PSSK와 QAPM은 PSK와 QAM보다 1/2배 낮은 전송 비트를 갖는 것을 확인 할 수 있다. 32-ary에서도 마찬가지로 QAM의 경우 15dB 이상, PSK의 경우 약 20dB 이상부터는 QAPM과 PSSK에 비해 2배 높은 전송 비트를 갖는



(a) 16-ary AWGN 채널 throughput 성능



(b) 32-ary AWGN 채널 throughput 성능

그림 5. AWGN 채널의 throughput 성능.  
Fig. 5. Performance of throughput in AWGN channel

표 2. Throughput 시뮬레이션 환경  
Table 1. Throughput simulation

전송시간	전송심볼	주기	대역폭	변조방식
1 sec	$10^6$	$1 \mu s$	10MHz	PSK QAM PSSK QAPM

것을 확인 할 수 있었다. SNR이 낮은 경우 QAPM의 전송 비트는 PSSK보다 더 높으며, 32-ary 변조의 경우 확연히 차이 나는 것을 알 수 있다. 또한, 32QAPM은 0~1 dB 사이에서는 QAM보다, 0~6dB 사이에서 PSK보다 더 높은 Throughput 성능을 보여준다.

#### IV. QAPM 변조 방식

본 논문은 기존의 PSSK 방식과 새로 제안한

QAPM 방식을 제안하였다. PSSK와 QAPM 방식은 저전력 고효율의 통신을 위하여 PSK와 QAM에서 확장된 변조 방식으로, PSK와 QAM에 비해 전력 효율을 높이고 대역 효율을 낮춘 방식이다. 우리는 AWGN 채널에서의 시뮬레이션을 통하여 PSSK와 QAPM의 BER 성능이 PSK와 QAM에 비해 뛰어나다는 것을 확인했다. 또한, AWGN 채널에서의 시뮬레이션 결과를 통하여 새로 제안하는 QAPM 방식이 PSSK보다 더 뛰어난 SNR 성능을 보여준다는 것도 확인 할 수 있었다. 그리고 마지막으로 throughput의 결과를 통하여 낮은 SNR에서 QAPM 변조 방식이 PSK와 QAM에 비하여 더 좋은 throughput 특성을 갖는다는 것도 확인 할 수 있었다. 이러한 결과로부터, PSSK와 QAPM은 저전력 통신에 적합한 변조 방식이며, 제안된 QAPM 방식은 기존에 제안된 PSSK 방식보다 더 뛰어난 성능을 갖는 변조 방식임을 확인 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] IEEE P802.15-08-0407-03-0006 "802.15.6 Call for Applications-Response Summ. July, 2008
- [2] IEEE 802.15, "TG6 Technical Requirements Document, IEEE, Piscataway, N.J., Sep. 2008
- [3] D.K. Kim, H.S. Lee, "Phase-Silence-Shift-Keying for Power-Efficient Modulator". *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E92-B, No.6, June. 2009
- [4] IEEE P802.15-10-0010-01-0006 "NICT narrow band PHY proposal", Jan. 2010
- [5] IEEE P802.15-09-0137-01-006 "Group PPM method to 802.15.TG6", March. 2009
- [6] J.Y Oh, J.H Kim, H.S Lee, "PSSK Modulation Scheme for High Data Rate Implantable Medical Device", *IEEE. Trans. InfTechnol Biomed.*, Nov.2009

최 재 훈 (Jae-Hoon Choi)

준회원



2010년 2월 충북대학교 전자공학과  
2010년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 석사과정  
<관심분야> 무선 통신 시스템, WBAN, WPAN

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)

정회원



1988년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 교수  
2002년 3월~2004년 2월 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장  
1996년~현재 IEEE, IET 논문 심사 의원

2002년 한국전자과학회 학술상 수상

2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 'Best Paper Award' 수상

<관심분야> 무선 통신 시스템, 위성통신, B3G/4G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리