

전력 효율을 개선하는 새로운 PSPM 변조 방식

준회원 최재훈*, 정회원 손종원**, 유흥균*

A New PSPM Modulation Scheme for Improving the Power Efficiency

Jae-Hun Choe* Associate Member, Jong-Won Son*, Heung-Gyoon Ryu* Regular Members

요약

WBAN의 In-body 통신 시스템은 기본적으로 낮은 소모전력이 매우 필수적이다. 기존의 PSSK (Phase-Silence-Shift-keying) 변조는 PSK 방식에서 확장된 것으로, PSK 방식보다 전력효율이 높고, FSK 방식보다 대역효율을 높인 방식이다. PSSK는 2개의 직교 심볼을 전송하는 방식으로 신호 주기내의 심볼 비율을 절반으로 하여 송신전력을 낮추고, 변조 심볼간의 거리를 늘림으로써 BER 성능에 향상을 가져왔다. 또한, FSK 방식보다 뛰어난 대역효율을 보여줌으로써 저전력특성을 유지하며 전송률을 높일 수 있었다. 본 논문에서는 이러한 PSSK의 성능을 분석하고, 새롭게 제안하는 PSPM(Phase-Shift-Position-Modulation) 방식의 BER 성능과 대역효율을 분석한다. PSPM 변조 방식은 PSK 심볼과 심볼의 위치정보를 이용하여 전력효율을 크게 향상시키는 방식이다. 이러한 PSPM 방식은 WBAN의 In-body 통신과 같이, 전력 효율이 매우 중요한 근거리 통신 시스템에 적합하여, 많은 응용이 예상된다.

Key Words : WBAN, PSPM, PSSK, In-Body Communication, power efficiency

ABSTRACT

The low power consumption is the most important design factor for the In-Body communication system of WBAN. The conventional PSSK (Phase-Silence-Shift-keying) modulation technique can be regarded as an extension from PSK modulation. And this PSSK has better power efficiency than PSK modulation, and higher spectral efficiency than FSK modulation. PSSK modulation is to transmit two orthogonal symbols. The transmission power can be lowered because the symbol rate in signal period becomes half. BER performance is improved because transmission power is lower and the modulation symbol distance is widened. In addition, PSSK preserve the low-power and increase the data rate than FSK. In this paper, we analyzed existing PSSK and like to propose a new PSPM (Phase-Shift-Position-Modulation) modulation scheme. This PSPM is evaluated in terms of considered bandwidth efficiency and BER performance, compared with the PSSK. This PSPM modulation method transmits the information data by both PSK symbol data and symbol position data, so that we can significantly improve the power efficiency. New proposed PSPM method could be very useful for the In-body communication that requires the most power efficient system.

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

* 충북대학교 전자정보대학 전자공학과(ecoma@cba.ac.kr), (Department of Electronic Engineering, College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University)

** 한국폴리텍VII대학 메카트로닉스과 (Department of Mechatronics Engineering, Korea Polytec VII University)

논문번호 : KICS2010-04-185, 접수일자 : 2010년 4월 25일, 최종논문접수일자 : 2010년 7월 22일

I. 서 론

최근 IT-BT 융합 기술의 발달로 무선을 이용한 사람의 체내 혹은 인체 주변의 근거리 통신 기술인 WBAN 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. WBAN 기술은 전파의 도달거리를 기준으로 인체의 내부 및 외부 약 3m 이내에 부착되는 장치들을 무선 네트워크로 연결하여 기기간 상호 통신을 제공하는 근거리 무선통신 기술로 in-body 와 on-body 시스템으로 구분할 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^[1]. 이러한 WBAN 기술은 인체 내부와 외부에서 생체 신호를 측정하여 네트워크 전송을 가능하게 하며, 기존의 헬스케어 서비스에 비해 폭넓은 개념의 서비스로 진정한 헬스케어 서비스를 제공할 수 있는 기술이다.

WBAN의 표준화 그룹 (IEEE 802.15.TG6)에서는 WBAN 시스템의 기술적 요구사항으로 몇 가지를 정하고 있다^[2]. 첫 번째는 정보 전송률의 확장성이다. WBAN의 응용서비스들은 다양한 정보 전송률이 요구된다(120kbps ~ 10Mbps). 따라서 WBAN 시스템의 전송률은 이에 맞게 확장이 가능해야 한다. 두 번째는 시스템의 전송거리에 대한 것으로 최소 3m는 지원되어야 한다. 세 번째는 WBAN 시스템의 네트워크 구성에 대한 것으로, 최소 10개의 장치가 네트워크로 구성될 수 있어야 한다. 네 번째는 소모전력과 시스템 복잡도이다. WBAN 시스템은 인체 내부, 혹은 인체 외부에 부착되기 때문에 소형화가 필수적이다. 이러한 기술적 요구사항 중 in-body 시스템에서 중요한 것은 전송률의 확장성과 시스템의 소형화에 관한 사항이다. In-body 통신 시스템의 경우 일반적으로 낮은 전송률을 필요로 하지만 capsule endoscope나 bionic eye 같이 HD 이미지의 전송이 필요한 경우에는 20Mbps의 높은 전송률이 필요하다. 또한, 체내에 이식되는 이식 장치의 전지의 교체가 어렵기 때문에 오랜 시간 사용이 가능하도록 소모전력을 최소화해야 한다.

PSSK 변조 방식은 낮은 전력 소모를 유지하며 높은 전송률을 유지하기 위하여 제안되었다^[3]. 이 변조 방식은 반주기에는 정보를 전송하고 반주기는 0을 전송함으로써 소모전력을 낮추지만 전송에 필요한 대역폭이 PSK 변조 계열보다 2배 많은 단점이 있으나, SER 성능이 PSK 변조 방식보다 최대 6dB 까지 향상

되는 것을 확인 할 수 있다. In-body 통신 시스템의 경우 수십 kbps의 전송속도와 매우 낮은 소모전력을 요구하기 때문에 FSK 변조 방식과 GPPM 방식이 제안되고 있으나 수십 Mbps의 전송속도를 만족 시키기 위해서는 너무 많은 대역이 소모 된다^[4,5]. 결국, in-body 시스템에서 요구되는 낮은 전력소모를 만족 시키며 대역효율을 높이기 위하여 in-body 시스템에 PSSK을 적용한 방식이 제안되었다^[6].

따라서, 이 논문에서는 저전력 특성이 요구되는 in-body 통신시스템에 적합한 기존의 PSSK 변조 방식에 대해 기술하며, PSSK 방식보다 소모전력을 더욱 낮춘 새로운 방식을 제안한다. 새로운 방식은 기존의 PSSK 방식보다 2배의 대역을 더 사용하는 방식으로 PSK 변조와 PPM 변조를 혼합한 방식이다. 기존의 PSSK 방식은 1비트의 정보를 이용하여 주기내의 심볼 위치를 결정하고 $(\log_2 M) - 1$ 비트를 PSK 변조 하여 전송하는 방식을 택했다. 반면, 새로 제안하는 방식은 2비트를 이용하여 주기내의 심볼 위치를 결정하고 $(\log_2 M) - 2$ 비트를 PSK 변조 하여 전송하는 방식을 이용했다. 이러한 방식은 기존의 PSSK에 비해 2배의 대역을 더 소모하지만, 소모 전력과 BER 성능은 향상 되었다. 본 논문에서는 AWGN 채널에서의 BER 시뮬레이션 결과를 통하여 이를 증명하였으며, 대역효율을 비교하였다.

II. PSSK 변조 방식

PSSK(Phase Silence Shift Keying) 변조 방식은 PSK 변조의 한 종류로 볼 수 있으며, PSK의 대역효율적 측면과 PPM, FSK, OOK 변조의 전력효율적인 면을 모두 고려한 방식이다. PSSK는 PSK 신호의 주기를 심볼 주기와 silence 주기로 나누어 신호의 전력을 감소 시켜 전력효율을 높인다. 또한, PSK의 신호 주기를 나누는 만큼 변조 레벨을 낮출 수 있기 때문에 PSK에 비하여 SNR 성능을 향상 시킬 수 있다.

2.1 PSSK의 성상도와 심볼 구간

PSSK 변조방식은 PSK 신호를 2개의 직교심볼로 전송하는 방식이다. 그림 1은 16PSSK의 Constellation을 나타낸 것이다. 16 PSK는 4진 정보를 하나의 심볼에 위상을 이용하여 전송하지만 16PSSK는 2개의 8PSK를 직교하여 전송하는 방식을 이용한다. 이처럼 PSSK는 첫 번째 비트 정보를 이용하여 반주기 신호 2개로 나누며 $(\log_2 M) - 1$ 비트의 PSK 신호를 전송한다. 그림 2는 PSSK의 심볼 주기를 나타낸 것이다.

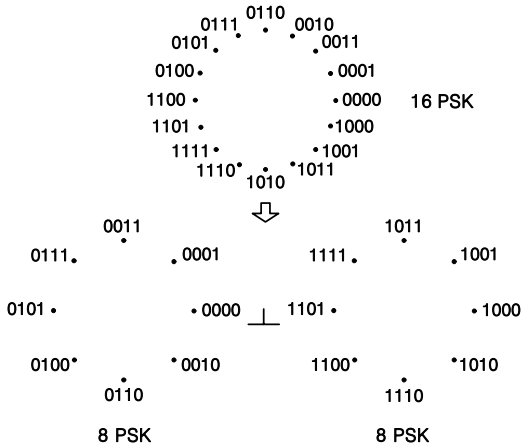


그림 1. 16PSSK 성상도
Fig. 1. 16PSSK Constellation

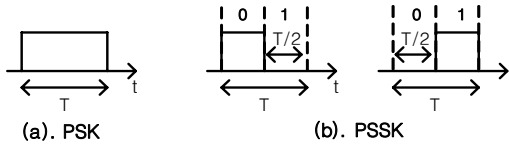


그림 2. 16PSSK 심볼 구간
Fig. 2. 16PSSK Symbol Duration

T의 심볼 주기를 1/2로 나누고 첫 번째 비트 정보를 이용하여 심볼의 위치를 결정한다. 심볼의 주기가 절반으로 줄어들었기 때문에 대역폭이 2배로 증가하지만, M-ary PSK를 M/2 -ary PSK 2개로 나누기 때문에 심볼간의 해밍 거리가 확보된다.

2.2 PSSK의 이론적 분석

M-Ary PSSK 신호는 다음과 같이 정의 된다.

$$s_m(t) = \text{Re} \{ A_m \alpha(t) + B_m \beta(t) \} \exp[j2\pi f_c t + j\theta_m] \quad (1-1)$$

식에서 f_c 는 반송파의 주파수를 나타내고, $\theta_m = 2\pi \text{mod}(m, 0.5M) / 0.5M$ 으로 변화한다. $B_m = \text{mod}(A_m, 1)$ 이며, MOD(a,b)는 a를 b로 나누었을 때의 나머지 값을 의미한다. 따라서 $\theta = 4\pi / M$ 으로 변한다.

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

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= u(t) - u(t - 0.5T), \\ \beta(t) &= \alpha(t + 0.5T) \end{aligned} \quad (1-3)$$

A_m 과 B_m 은 신호 주기내의 심볼 위치를, $\alpha(t), \beta(t)$ 는 스텝 함수로 반송파를 심볼 위치에 맞춰주는 역할을 하게 된다. ($A_m = 0 \rightarrow B_m = 1 \rightarrow A_m = 1 \rightarrow B_m = 0$)

$$\begin{aligned} s_m(t) &= (A_m \cos \theta_m) \alpha(t) \cos 2\pi f_c t \\ &\quad - (A_m \sin \theta_m) \alpha(t) \sin 2\pi f_c t \\ &\quad + (B_m \cos \theta_m) \beta(t) \cos 2\pi f_c t \\ &\quad - (B_m \sin \theta_m) \beta(t) \sin 2\pi f_c t \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 전송되는 신호 $s_m(t)$ 는 식(2)와 같이 정의되며, A_m 과 B_m 의 값에 의하여 서로 다른 2개의 심볼은 직교성을 유지하게 된다.

PSSK의 송신기 구조는 그림 3(a)에 나타나 있다. PSSK 신호로의 변환은 먼저, 랜덤 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 PSK 변조된 신호와 심볼의 위치 정보를 가지고 있는 신호의 곱으로써 전송된다. 이렇게 송신되는 신호의 대역효율은 $0.25 \log_2 M \geq 4$ 가 된다. PSSK 대역효율은 PSK의 1/2이며, 이것은 심볼의 주기를 T/2로 감소하였기 때문이다. FSK의 대역효율과 비교를 해 보면, 위상 비동기식 FSK의 경우 대역효율이 $\log_2 M / 2M$ 으로 PSSK 방식이 FSK 방식보다 대역효율이 M/2 더 좋다.

PSSK의 수신기는 그림 3(b)와 같이 동기방식을 사용한다. 수신되는 신호는 식(2)의 $s_m(t)$ 와 AWGN 채널 노이즈의 합으로 나타난다.

송신신호 $s_m(t) + n(t)$ 를 기저대역으로 내리게 되면,

$$\begin{aligned} r_1 &= A_m \cos \theta_m + n(t)\alpha(t), & r_2 &= -A_m \sin \theta_m + n(t)\alpha(t), \\ r_3 &= B_m \cos \theta_m + n(t)\beta(t), & r_4 &= -B_m \sin \theta_m + n(t)\beta(t) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 신호 정보를 얻을 수 있다. PSSK 신호의 복조를 위해서는 신호 주기내의 심볼의 위치를 파악해야 한다. 먼저 I와 Q로 나뉜 신호를 합하게 되면, 식 (4)와 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_1 &= A_m \cos \theta_m - A_m \sin \theta_m + n(t)\alpha(t) \\ &= A_m (\cos \theta_m - \sin \theta_m) + n(t)\alpha(t) \\ R_2 &= B_m \cos \theta_m - B_m \sin \theta_m + n(t)\beta(t) \\ &= B_m (\cos \theta_m - \sin \theta_m) + n(t)\beta(t) \end{aligned} \quad (4)$$

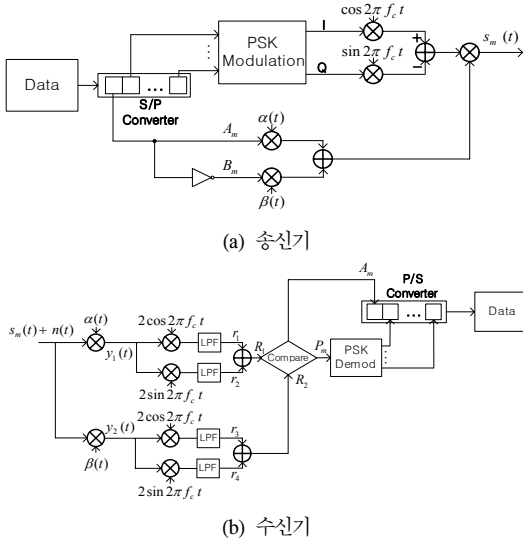


그림 3. PSSK 송신기와 수신기의 구조
Fig. 3. PSSK Transmitter and Receiver

식(4)의 R_1 과 R_2 의 신호 전력을 비교하게 되면,

$$\max(|R_n|^2) = \begin{cases} R_1 \Rightarrow A_m = 0, P_m = r_1 + j \cdot r_2 \\ R_2 \Rightarrow A_m = 1, P_m = r_3 + j \cdot r_4 \end{cases} \quad (5)$$

이렇게 알아낸 A_m 의 정보를 첫 번째 비트로 PSK 복조 정보에 덧붙이면 PSSK 신호를 복조 할 수 있다. M-ary PSSK는 심볼의 위치를 결정하는 1비트와 $\log_2 M - 1$ 비트의 PSK로 변조된다. $M=4$ 인 경우 PSK와 PSSK는 심볼간의 해밍 거리가 동일 하다. 하지만, $M > 4$ 면 PSSK는 PSK 보다 심볼간의 해밍 거리가 더 커진다. 또한, 한 주기에 심볼이 차지하는 비율이 $T/2$ 로 송신 신호전력이 감소하게 된다. s_1 을 전송 하고 제대로 수신될 확률 P_c 는 식 (6)으로 표현 할 수 있다. 따라서 에러 발생확률은 $P_e = (1 - P_c)$ 로 정의 할 수 있다.

$$P_c = P(|r_1|^2 > |r_2|^2, |r_1|^2 > |r_4|^2 \mid \theta < 2\pi/M) \\ \int_{-2\pi/M}^{2\pi/M} \int_{-r_1}^{r_1} \int_{-r_1}^{r_1} P_{r_3, r_4}(r_3, r_4) dr_3 dr_4 \cdot p\theta(\theta) d\theta. \quad (6-1)$$

$$\theta = \tan^{-1}(r_2/r_1), P_{r_3, r_4}(r_3, r_4) = (2\pi N_0)^{-1} \exp(-(r_3^2 + r_4^2)/N_0) \quad (6-2)$$

θ 는 r_1 과 r_2 사이의 각을 의미한다. P_e 를 Q 함수를 이용한 union bound P_u 로 나타내면,

$$P_u = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{j \in S_m} Q\left(\frac{d_{m,j}}{\sqrt{2N_0}}\right), \quad (7)$$

S_m 은 $S_m(t)$ 의 근접 심볼을 나타내며, $d_{m,j}$ 는 $S_m(t)$ 와 $S_j(t)$ 사이의 거리를 의미한다. PSSK는 $M \geq 8$ 의 경우 $d_{m,j} = \sqrt{2E_b} \log_2 M \sin(2\pi/M)$ 이 된다. 따라서 PSSK의 비트 오류 확률은 $P_b \approx 1/\log_2(M) P_u$ 로 근사화 된다.

III. PSPM(Phase-Shift-Position-Modulation) 변조 방식

PSSK 변조 방식은 앞에서 기술한 것과 같이 대역 효율을 낮추고 전력효율을 높이는 방식이다. 제안하는 PSSK 변조 방식은 기존의 PSSK 변조 방식에서 대역폭을 2배로 늘리고 전력효율을 더욱 낮춘 방식이다. 신호 주기를 4로 나누어 $T/4$ 의 주기에 심볼을 배치하고 $3T/4$ 의 주기에 0을 전송한다. 한 신호 주기에서 심볼이 차지하는 비율이 줄어들어 송신신호전력이 감소한다.

3.1 PSPM의 성상도와 심볼 구간

제안하는 PSPM 변조 방식은 PSK 신호를 서로 직교하는 4개의 심볼로 전송하는 방식이다. 기존의 PSK 방식에 PPM 방식을 적용시켜 심볼의 위치를 결정한다. 그림 1은 16PSPM의 Constellation을 나타낸 것이다. 16 PSSK는 4진 정보를 2개의 8PSSK를 직교하여 전송하지만, 16PSPM은 4진 정보를 4개의 QPSK를 직교하여 전송한다. 첫 2비트를 이용하여 결정된 위치에 $(\log_2 M) - 2$ 비트의 PSK 신호를 전송한다. 즉, 2비트의 PPM 신호와 $(\log_2 M) - 2$ 비트의 PSK 신호를 결합한 방식이 된다. 그림 5는 16PSPM의 Constellation을 나타낸 것이다. 16 PSK는 4진 신호를 16개의 위상을 통하여 전송하는 방식으로 심볼간의 거리는 $2\sqrt{E_s} \sin(\pi/16)$ 이 된다^[7]. 16PSPM은 직교하는 4개의 QPSK를 이용하여 전송하는 방식을 사용한다. 심볼의 주기는 신호 주기의 1/4이 되어 대역폭이 4배 증가하게 되지만, 심볼간의 거리는 $2\sqrt{E_s} \sin(\pi/4)$ 가 되며, 송신 신호 전력 또한 감소한다.

그림 5는 PSPM의 심볼 주기를 나타낸 것이다. T 의 심볼 주기를 $T/4$ 로 나누고 2개의 비트 정보를 이용하여 신호 주기 내의 심볼 위치를 결정한다. 심볼 주기가 줄어든 만큼 대역폭은 증가하게 된다.

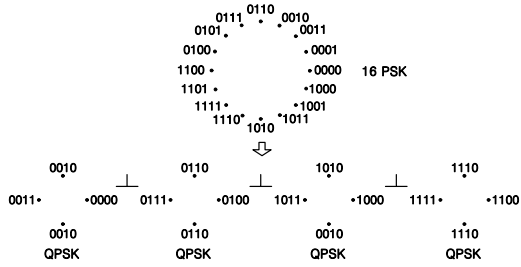


그림 4. PSPM 정상도
Fig. 4. PSPM constellation.

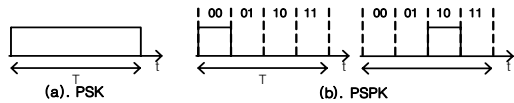


그림 5. PSPM 심볼 구간
Fig. 5. PSPM Symbol Duration

3.2 PSPM의 이론적 분석

$M \geq 8$ 인 M-Ary PSPM 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$s_m(t) = \sum_{n=0}^3 A_{m,n} \alpha(t - nT/4) \exp[j2\pi f_c t + j\theta_n] \quad (0 \leq t \leq T), \tag{8-1}$$

$$A_{m,n} = \begin{cases} 1, & n < \text{floor}(4m/M) < n+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8-2}$$

$$\alpha_n(t) = u[t - 0.25(n-1)T] - u[t - 0.25nT], \quad n=1, 2, 3, 4 \tag{8-3}$$

$\alpha_n(t)$ 는 스텝함수로, 반송파를 심볼 주기에 맞추게 된다. $\alpha_n(t)$ 의 값에 의해 반송파는 정보 신호와 동일하게 1/4 주기 동안에는 $[\cos 2\pi f_c t + \sin 2\pi f_c t]$, 3/4 주기 동안에는 0이 된다.

식(8)를 정리하면,

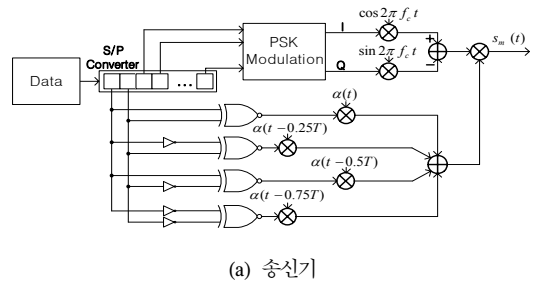
$$s_m = [A_m \cos \theta_m \quad A_m \sin \theta_m \quad B_m \cos \theta_m \quad B_m \sin \theta_m \quad C_m \cos \theta_m \quad C_m \sin \theta_m \quad D_m \cos \theta_m \quad D_m \sin \theta_m], \tag{9}$$

$s_m = [0, 1, 2, \dots, M-1]$ 의 신호 정보를 의미한다. 신호 정보는 신호 정보에 대한 위상 값과 심볼의 위치를 결정하는 $A_{m,n}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서 전송되는 신호 $s_m(t)$ 에 반송파를 곱하면 식 (10)과 같이 정의되며, $A_{m,n}$ 의 값에 의하여 각 심볼들은 직교성을 유지하게 된다.

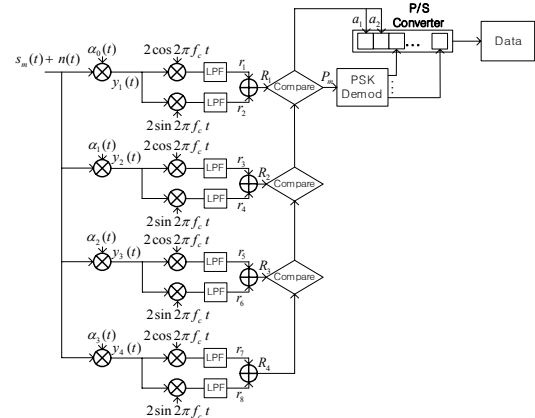
PSPM의 송신기 구조는 그림 6에 나타나 있다. PSPM 신호로의 변환은 먼저, 랜덤 데이터를 S/P 변환기를 이용하여 $\log_2 M$ 의 열로 정렬 시킨 후 2 비트를 이용하여 심볼의 위치를 결정한다.

$$s_m(t) = \sum_{n=0}^3 A_{m,n} \alpha(t - nT/4) (\cos 2\pi f_c t - \sin 2\pi f_c t) \tag{10}$$

송신신호 $s_m(t)$ 는 PSK 변조된 신호와 심볼의 위치 정보를 가지고 있는 신호의 곱으로써 전송되게 되며 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 송신되는 신호의 대역효율은 $0.125 \log_2 M$, $M \geq 8$ 이 된다. PSPM의 대역효율은 PSK의 1/4, PSSK의 1/2이다. 이것은 심볼의 주기가 $T/4$ 로 감소하였기 때문이다. FSK의 대역효율과 비교를 해 보면, 위상 비동기식 FSK의 경우 대역효율이 $\log_2 M / 2M$ 으로 PSPM 방식이 FSK 방식보다 대역효율이 $M/4$ 더 좋다. PSPM 수신기는 그림 7과 같이 동기방식을 사용한다. 수신되는 신호는 식 (10)의 $S_m(t)$ 와 AWGN 채널 노이즈의 합으로 나타나게 된다. PSPM의 복조는 기존의 PSSK의 복조와 동일한 방식을 이용한다. 먼저 신호주기에서 심볼의 위치를 찾기 위해 심볼의 위치를 찾아야 하므로 수신



(a) 송신기



(b) 수신기

그림 6. PSPM 송신기와 수신기의 구조
Fig. 6. PSPM Transmitter and Receiver

신호에 $\alpha_n(t)$ 를 곱한다. 자기 자신이 곱해지지 않는 경우는 모두 0이므로, 하나의 신호 주기를 4개의 심볼 주기로 구분 할 수 있게 된다. 따라서 아래와 같이 정리 할 수 있다.

$$y_n(t) = (s_m(t) + n(t)) \times \alpha_n(t) \\ = (A_{m,n} \cdot \cos \theta_m) \cos 2\pi f_c t \\ - (A_{m,n} \cdot \sin \theta_m) \sin 2\pi f_c t + n(t) \alpha_n(t) \quad (11) \\ (n = 1, 2, 3, 4)$$

식 (11) 에 반송파를 곱하여 기저대역으로 내리게 되면,

$$r_m = \begin{cases} A_{m,n} \cos \theta_m, & m = \text{even}. \\ A_{m,n} \sin \theta_m, & m = \text{odd}. \end{cases} \quad (12)$$

각 심볼의 위치에 대한 PSK 신호를 얻을 수 있다.

$$R_n = A_{m,n} \cos \theta_m + A_{m,n} \sin \theta_m + n(t) \\ = A_{m,n} (\cos \theta_m + \sin \theta_m) + n(t) \alpha_n(t), \quad (13) \\ (n = 1, 2, 3, 4)$$

심볼의 위치는 식(13)의 R_n 의 신호 전력을 비교하여 신호주기에서의 심볼의 위치를 파악하게 되면, 2비트 정보를 알아 낼 수 있다 .

$$\max(|R_n|^2) = \begin{cases} R_1 \Rightarrow a_1=0, a_2=0, P_m=r_1+j \cdot r_2 \\ R_2 \Rightarrow a_1=0, a_2=1, P_m=r_3+j \cdot r_4 \\ R_3 \Rightarrow a_1=1, a_2=0, P_m=r_5+j \cdot r_6 \\ R_4 \Rightarrow a_1=1, a_2=1, P_m=r_7+j \cdot r_8 \end{cases} \quad (14)$$

식(14)에서 보듯이 R_n 의 신호전력을 확인하여 알아 낸 2비트의 정보와 P_m 의 PSK 복조 정보를 합하여 M-ary PSPM 신호를 복조 한다. PSPM의 경우 4개의 PSK 신호의 조합으로 이뤄지기 때문에 $M \geq 8$ 이 되어야 한다. $M \geq 16$ 의 경우, PSPM 은 PSK와 PSSK 보다 심볼간의 해밍 거리가 더 크다. 또한, 신호주기에서 심볼이 차지하는 비율이 각각 $T/4, T/2$ 로 줄어 들었기 때문에 송신 전력을 낮출 수 있다. PSPM 방식은 PSSK 방식에서 대역을 2배로 확장하여 4개의 직교 심볼을 전송하는 방식이다. 따라서 PSPM의 수신 에러확률은 PSSK 방식과 동일하게 정리할 수 있다.

식(6)으로부터,

$$P_c = P(|r_1|^2 > |r_2|^2, |R_1|^2 > |R_2|^2, \\ |R_1|^2 > |r_3|^2, |R_1|^2 > |r_4|^2 | \theta| < 2\pi/M) \quad (15)$$

그리고 식 (7)를 통해 식 (16)으로 정리 할 수 있다.

$$P_u = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{j \in S_m} Q\left(\frac{d_{m,j}}{\sqrt{2N_0}}\right), \quad (16) \\ d_{m,j} = \sqrt{2E_b \log_2 M} \sin(\pi / M)$$

PSPM의 비트 오류 확률 PSSK와 마찬가지로 $P_b \approx 1/\log_2(M)P_u$ 로 근사화 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 분석

PSK와 PSSK의 대역폭 효율 비교는 표 1에 있다. PSK의 대역폭 효율은 $0.5 \log_2 M$ 으로 변조 레벨에 의해 0.5씩 증가하게 된다. PSSK의 대역폭 효율은 PSK 변조의 $1/2$ 가 되어 $0.25 \log_2 M$ 이 된다. 따라서, M PSK와 동일한 대역폭을 갖기 위해서는 M^2 PSSK가 필요하다. FSK와 비교하면 PSSK는 FSK보다 $M/2$ 더 높은 대역효율을 가지고 있다. 8PSSK와 8FSK의 경우, PSSK가 0.7dB의 SNR이득과 4배 높은 대역폭 효율을 가지고 있는 것을 확인 할 수 있다.

표 2에서 PSPM의 대역폭 효율은 PSK와 PSSK에 비해 낮지만, FSK에 비해서 $M/4$ 더 높은 대역 효율을 가지게 된다. 이는 $M \geq 8$ 의 경우에 대해 FSK에 비해 더 뛰어난 대역효율을 보인다.

그림 7은 PSK와 PSSK의 시뮬레이션 결과를 나타 낸 것이다. BER 10^{-6} 을 기준으로 8PSSK의 경우 SNR이 8.9dB정도인 것을 확인할 수 있다. 8PSK는 13.9 dB로 약 5dB 정도 8PSSK의 SNR이 더 낮다. 이는 심볼간의 해밍 거리를 더 확보했기 때문이다. 16PSSK의 경우 16PSK보다 6dB 정도의 SNR이득을 얻을 수 있다.

그림 8은 16PSSK와 16PSPM의 BER 시뮬레이션

표 1. PSK와 PSSK의 전력 효율과 대역폭 효율
Table 1. Power efficiency and Bandwidth efficiency for PSK and PSSK

Parameter	8PSK	8PSSK	8FSK	16PSK	16PSSK	32PSSK
bps/Hz	1.5	0.75	0.19	2	1	1.25
BER 10^{-6}	13.9	8.9	9.7	18.3	12.5	17.3

표 2. PSSK와 PSPM의 전력 효율과 대역폭 효율
Table 2. Power efficiency and Bandwidth efficiency for PSK and PSSK

Parameter	16PSK	16PSSK	16PSPM	32PSK	32PSSK	32 PSPM
bps/Hz	2	1	0.5	3	1.25	0.625
BER 10^{-6}	18.3	12.5	7.2	24.0	17.3	11.3

결과를 나타낸 것이다. 마찬가지로 BER 10^{-6} 을 기준으로 비교해보면 16PSPM은 7.2dB로 PSSK에 비해 5.3dB, PSK에 비해 11.1 dB 낮은 것을 확인할 수 있다. 그림 9의 32PSPM의 BER 성능 또한, 11.3dB로 32PSSK의 17.3 dB에 비해 6dB 가량 낮은 것을 확인할 수 있다. PSPM은 PSSK에 비해 대역을 2배로 늘려 4개의 심볼위치로 나누었기 때문에 더 낮은 변조 레벨로 전송할 수 있다. 이로 인하여 심볼간의 해밍 거리가 늘어나게 됨으로써 6dB의 이득을 얻게 된다. 표 2는 기존의 PSSK와 PSPM의 대역폭 효율과 SNR 성능을 비교한 것이다. PSSK의 대역폭 효율은 $0.5\log_2 M$ 로 PSK의 절반이며, PSPM은 $0.125\log_2 M$ 로 PSSK의 1/2, PSK의 1/4이다. 따라서 PSPM이 PSK와 동일한 대역폭을 갖기 위해서는 M^4 -ary PSPM

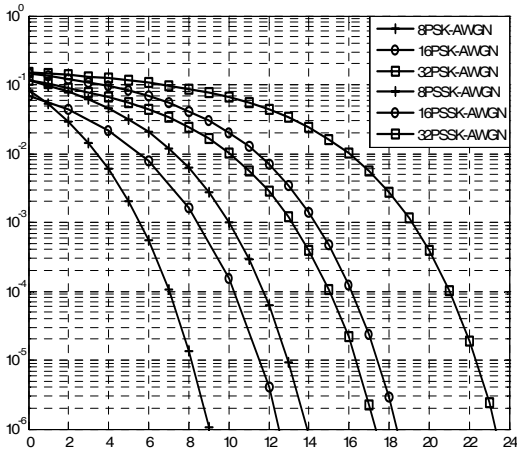


그림 7. PSK와 PSSK의 BER 성능
Fig. 7. PSK and PSSK BER Performance

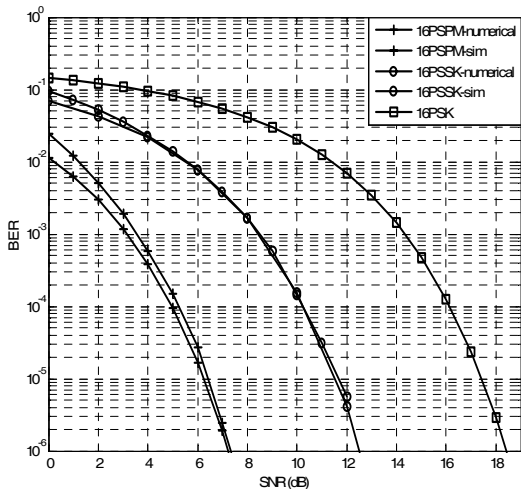


그림 8. 16PSSK와 16PSPM의 BER 성능
Fig. 8. 16PSSK and 16PSPM BER Performance

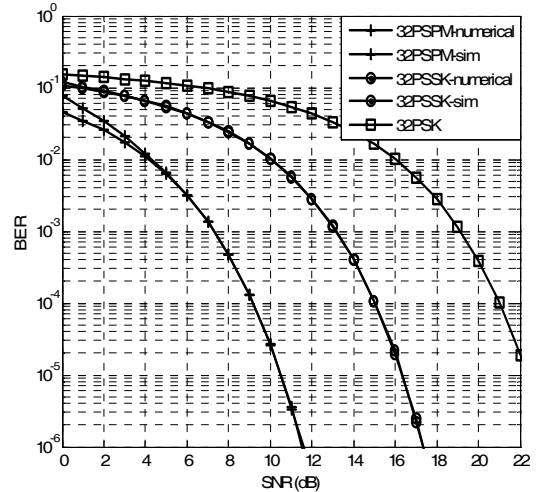


그림 9. 32PSSK와 32PSPM의 BER 성능
Fig. 9. 32PSSK and 32PSPM BER Performance

의 변조가 필요하다. 비동기식 FSK와 비교하면 PSPM은 FSK보다 $M/4$ 의 더 높은 대역효율을 가지고 있다. 16PSPM과 16FSK의 경우, PSPM이 1dB의 SNR이득과 4배 높은 대역폭 효율을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 PSSK 변조의 성능을 분석하고, 전력효율이 향상된 새로운 PSPM 변조 방식을 제안하였다. PSPM 변조는 PSK 심볼을 PPM 방식을 이용하여 신호 주기에 배치함으로써 송신전력과 변조 레벨을 낮춘 방식이다. 기존의 PSK에 비교하였을 때, 심볼 주기에서 신호가 전송되는 구간이 1/4가 됨으로써 송신기의 전력을 6dB 감소 시켰다. 변조 레벨의 감소로 인한 이득은 기존의 PSK 방식보다 12dB, PSSK방식보다 6dB가 향상 되었다. 또한, FSK 방식보다 $M/4$ 배 높은 대역효율을 가지게 된다. 16PSPM의 경우 비동기식 16FSK 보다 SNR 성능은 1 dB, 대역효율은 4배 높은 것을 확인할 수 있다. 이러한 PSPM 변조는 FSK에 비하여 높은 대역 효율특성과 PSK에 비하여 높은 전력 효율로 인하여 협대역에서 높은 전송량을 요구하는 in-body 통신에서 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] IEEE P802.15-08-0407-03-0006. 802.15.6 Call for Applications-Response Summ. Jul. 2008
- [2] IEEE 802.15, TG6 Technical Requirements

- Document, IEEE, Piscatway, 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 802.15TG6. March. 2009
 - [6] J.Y Oh, J.H Kim H.S Lee. "PSSK Modulation Scheme for High Data Rate Implantable Medical Device", IEEE. Trans. Inf Technol Biomed , Nov. 2009
 - [7] Rodger E. Ziemmer, William H. Tranter, Principles of Communications (Systems, Modulation, and Noise) 5Ed, JohnWiley & Sons, 2001

최재훈 (Jae-Hun Choe)

준회원



2010년 2월 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(공학사)
 2010년 3월부터~현재 충북대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선 통신 시스템, 인체통신 시스템

손종원 (Jong-Won Son)

정회원



1990년2월 부경대학교 전자공학과
 1994년 2월 충북대학교 전자공학과 석사
 2003년 2월 충북대학교 전자공학과 박사
 2002년~현재 한국폴리텍Ⅷ대학, 메카트로닉스과 교수

<관심분야> OFDM, 통신시스템, 자동화시스템

유흥균 (Heung-Gyoon Ryu)

정회원



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

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