

---

# 4-ary 스케일링 웨이브릿 편이 변조 시스템의 성능 분석에 관한 연구

정태일\* · 유태경\* · 김종남\* · 문광석\*\* · 김현덕\*\*\*

A Study on the Performance Analysis of 4-ary Scaling Wavelet Shift Keying

Tae-Il Jeong\* · Tae-Kyung Ryu\* · Jong-Nam Kim\* · Kwang-Seok Moon\*\* · Hyun-Deok Kim\*\*\*

---

이 논문은 중소기업청 산학연공동기술개발지원사업,  
한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

---

## 요 약

기존의 웨이브릿 편이 변조 시스템은 스케일링 함수(scaling function)를 1로, 웨이브릿(wavelet)을 0으로 하는 1비트 변조방법이 있고, 스케일링 함수와 웨이브릿 그리고 이 두 신호를 반전시켜서 생성된 4개의 반송파를 사용하는 2비트 변조방법이 있다. 본 논문에서는 2비트 변조방법인 4-ary 스케일링 웨이브릿 편이변조(4-ary SWSK : 4-ary scaling wavelet shift keying) 시스템을 정의하고, QPSK 시스템으로부터 정의된 시스템의 비트 에러 확률과 부호 에러 확률을 유도한다. 제안한 4-ary SWSK 성능을 분석하기 위하여, 기존의 QPSK(quadrature phase shift keying), MFSK(M-ary frequency shift keying), 그리고 제안한 방법의 비트 에러 확률 및 부호 에러 확률을 구한다. 실험결과 제안한 방법의 비트 에러 확률과 부호 에러 확률이 좋은 성능을 보였다.

## ABSTRACT

An algorithm of the conventional wavelet shift keying is carried out that the scaling function and wavelet are encoded to 1(mark) and 0(space) for the input binary data, respectively. Two bit modulation technique which uses four carrier frequencies is existed. Four carrier frequencies are defined as scaling function, inversed scaling function, wavelet, and inversed wavelet, which are encoded to 10, 11, 00 and 01, respectively. In this paper, we defined 4-ary SWSK (4-ary scaling wavelet shift keying) which is two bit modulation, and it is derived to the probability of bit error and symbol error of the defined system from QPSK. In order to analyze to the performance of 4-ary SWSK, we are obtained in terms of the probability of bit error and symbol error for QPSK (quadrature phase shift keying), MFSK(M-ary frequency shift keying) and proposed method. As a results of simulation, we confirmed that the proposed method was superior to the performance in terms of the probability of bit error and symbol error.

## 키워드

웨이브릿 편이 변조, 비트 에러 확률, 부호 에러 확률, 4-ary 스케일링 웨이브릿 편이 변조

## Key word

Wavelet shift keying, Probability of bit error, Probability of symbol error, 4-ary SWSK

---

\* 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

\*\* 부경대학교 전자공학과 (교신저자, ksmoon@pknu.ac.kr)

\*\*\* 진주산업대학교 전자공학과

접수일자 : 2010. 01. 08

심사완료일자 : 2010. 02. 18

## I. 서 론

디지털 통신에서 비트 전송률을 향상시키고 대역폭 효율을 높이기 위하여 부호 단위로  $M$  개 중에서 1개의 신호를 전송하는 것이 가능하다. 이러한  $M$ 개의 신호를 만드는 방법에 따라 여러 형태의 변조 방법이 가능하며, 이러한 변조 방법을  $M$ -진( $M$ -ary) 변조라 한다. QPSK( quadrature phase shift keying) 방법은 서로 90도의 위상차를 갖는 4개의 반송파를 사용하는 방법이며, 4개의 반송파는 서로 직교적(orthogonal)이다. MFSK ( $M$ -ary frequency shift keying) 방법은 서로 다른 반송 주파수를 갖는 변조방법이며, 4진 FSK 구성도 가능하다.  $M$ 진 변조기는 2진 변조기와는 달리 비트 에러 확률과 부호 에러 확률을 구분한다[1,2]

이산 웨이블릿 변환은 수학적 이론의 발전과 더불어 음성 신호처리, 영상 신호처리 등 여러 분야 많이 응용되고 있다[3-7]. 연속 웨이블릿 변환이 정규 직교성을 지니지 않은 웨이블릿에 의한 연산이며, 따라서 역변환 과정이 복잡하며, 까다로운 허용 가능조건 및 경우에 따라 복원시 신호 또는 이미지의 미세한 정보손실이 불가피하다. 반면 이산 웨이블릿은 정규 직교성을 지니는 웨이블릿을 이용하여 신호의 완전한 복원이 가능하다. 연속 웨이블릿 변환이 신호 또는 이미지의 스케일 특성 분석을 위한 방법이라면, 이산 웨이블릿 변환은 정규직교 기저 함수인 스케일 함수  $\phi(t)$ 와 이로부터 구해진 웨이블릿  $\psi(t)$ 을 이용하여 이미지 압축, 디지털 통신 등의 데이터 프로세싱에 응용된다[3]. 이러한 이산 웨이블릿 변환은 통신분야에서도 많이 응용되고 있다[4].

오 등[8]은 웨이블릿은 0(space)으로, 스케일링 함수는 1(mark)로 변조하는 1비트 스케일링 웨이블릿 편이 변조(SWSK : scaling wavelet shift keying) 방법을 제안하였다. 그리고 정 등[9]은 웨이블릿 편이 변조 시스템에서 비트 전송률 향상기법을 제안하였다. 이 방법은 2비트를 사용하는 웨이블릿 편이 변조방법으로서 웨이블릿 신호를 00으로 변조하고, 반전된 웨이블릿 신호를 01, 스케일링 함수를 10, 반전된 스케일링 신호를 11로 웨이블릿 편이 변조하여, 원래의 2진 신호를 복원하는 것이 가능하였다.

본 논문에서는 참고문헌 [9]에서처럼 스케일링 함수와 웨이블릿 그리고 이 두 신호를 반전시킨 신호 4개의

반송파를 사용하여 변조한다. 즉, 웨이블릿은 00, 반전된 웨이블릿은 01, 스케일링 함수를 10, 반전된 스케일링 함수를 11로 변조한다. 이러한 시스템을 4진 스케일링 웨이블릿 편이 변조(4-ary SWSK : 4-ary scaling wavelet shift keying) 시스템이라 정의한다. 그리고 기존의 QPSK 방법으로부터 제안한 방법의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률을 유도하고, 제안한 시스템에 대하여 비트 에러 확률 및 부호 에러 확률로서 그 성능을 분석하고자 한다. 또 잡음전력을 분석하여 제안한 방법이 타당함을 확인하였다.

## II. 관련이론

### 2.1 이산 웨이블릿 변환

#### (Discrete Wavelet Transform)

웨이블릿 변환은 프랑스 수학자 Meyer에 의해 정규 직교 웨이블릿(orthogonal wavelet)을 이용한 이산 웨이블릿이 발표되었다. 그리고 1987년 S. Mallat에 의해 기존의 신호처리 이론인 필터 뱅크 이론과 동일한 연산 체계를 형성한 다해상도 분석방법(Multi-Resolution analysis)이라 불리는 이산 웨이블릿 변환 방법이 제안되었고, I. Daubechies가 유한길이를 지닌 정규직교 웨이블릿(orthogonal support compact)을 발표하면서 웨이블릿 변환은 신호처리의 다양한 분야에 응용되어 왔다. 웨이블릿 변환은 정규 직교 기저를 이용한 이산 웨이블릿 변환과 연속 웨이블릿 변환의 두 분야로 나뉘어져 발전되었다. 웨이블릿의 정규 직교성에 따라 이산 웨이블릿 변환과 연속 웨이블릿 변환으로 나뉘어지며 각각 다른 응용분야를 형성하고 있다. 이산 웨이블릿의 경우, 저주파 계수(low frequency coefficients)는 수식 (1a), (1b)와 같다.

$$\sum_n g_0(n) = \sqrt{2} \tag{1a}$$

$$\sum_n g_0^2(n) = 1 \tag{1b}$$

그리고 고주파 계수(high frequency coefficients)는 수식 (2a), (2b)와 같다.

$$\sum_n g_1(n) = 0 \quad (2a)$$

$$\sum_n g_1^2(n) = 1 \quad (2b)$$

## 2.2 MFSK(M-ary Frequency Shift Key- ing)의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률

2진 디지털 부호로서 반송파를 직접 주파수 편이 변조한 FSK 시스템은 두 개의 반송파가 필요하다. 이를 확장하여 2진 디지털 부호를 M진(M-ary) 디지털 부호로 변환한 다음 반송파를 주파수 편이 변조 시키고자 하면 주파수가 서로 다른 M개의 반송파가 필요하며 이를 M 진 FSK(MFSK)라 한다.

정합필터(matched filter) 검파기를 사용하는 MFSK에서 수신기에 입력된 신호가  $S_k(t) = A \cos \omega_k t + n(t)$ 이며, 부가잡음(AWGN)을 가정하면 각 정합필터 검파기의 출력  $y_i$ 는

$$y_i = \int_0^{T_s} [A \cos \omega_k t + n(t)] A \cos \omega_i t dt$$

여기서 각 정현파 버스터는  $[0, T_b]$ 에서 서로 직교적(orthogonal)이므로  $y_i$ 는 다음과 같다.

$$y_i = \begin{cases} \frac{A^2 T_s}{2} + \int_0^{T_s} A n(t) \cos \omega_i t dt, & i = k \\ \int_0^{T_s} A n(t) \cos \omega_i t dt, & i \neq k, \end{cases} \quad (3)$$

따라서  $y_i$ 는 가우스성 확률변수로서 평균은 다음과 같다.

$$E[y_i] = \begin{cases} \frac{A^2 T_s}{2}, & i = k \\ 0 & i \neq k, \end{cases}$$

MFSK의 부호 에러 확률은 다음과 같다.

$$P_{sc} \leq \frac{(M-1)}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\left( \frac{E_b}{\eta} \right) \frac{\log_2 M}{2}} \\ = \frac{(M-1)}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\left( \frac{E_s}{2\eta} \right)} \quad (4)$$

여기서  $E_s$ 는 부호의 평균 에너지를 나타내고,  $E_b$ 는 비트의 평균 에너지를 나타낸다. 부호의 평균 에너지  $E_s = E_b (\log_2 M)$  또는  $E_b = E_s / (\log_2 M)$  이고,  $E_s = A^2 T_s / 2$ 이므로 M-ary 직교적인(orthogonal) 신호의 경우, 부호 에러확률( $P_{sc}$ )과 비트 에러 확률( $P_{bc}$ )은 다음과 같다.

$$\frac{P_{bc}}{P_{sc}} = \frac{2^{L-1}}{2^L - 1} = \frac{M/2}{M-1} = \frac{M}{2(M-1)} \quad (5)$$

그래서 coherent MFSK의 비트 에러 확률은 다음과 같이 정의된다[1,2]

$$P_{bc} = \frac{M}{2(M-1)} \times P_{sc} = \frac{M}{4} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_s}{2\eta}} \\ = \frac{M}{4} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{A^2 T_s}{4\eta}} \quad (6)$$

여기서  $A=1$ ,  $M=4$ 이며,  $\operatorname{erfc}$ (complementary error function)는 보수 오차 함수를 나타내고,  $\eta$ 는 잡음전력으로서  $\eta = \text{Watt/Hz}$ 를 나타낸다.

## 2.3 MPSK(M-ary Phase Shift Keying) 부호 에러

확률과 비트 에러 확률

2진 PSK인 BPSK에서는 반송파의 위상이 두 가지이며, 이 두 위상차는  $2\pi/2 = 180^\circ$ 이다. BPSK에서 비트를 두 개씩 묶어 4진법으로 확장한 것이 QPSK(quadrature phase shift keying)이며, 반송파의 위상은 4가지로서 각 위상의 간격은  $2\pi/4 = 90^\circ$ 가 된다. 이러한 개념을 확장하여 비트를 N개씩 묶어 한 부호당 비트 시간을  $T_b$ 에서  $T_s = NT_b$ 로 연장하면  $M = 2^N$ 개의 부호를 만들 수 있다. 이러한 M개의 부호를 지속시간이  $T_s = NT_b$ 인 정현파로 표현하기 위해서는 모두 M가지의 위상이 생기며, 각 위상간의 간격은  $2\pi/M$ 이 된다. 이러한 시스템을 간단히 MPSK로 표현하며, MPSK 신호는

$$S_{MPSK}(t) = S_i(t) = A \cos(\omega_c t + \theta_i) \\ 0 \leq t \leq T_s, i = 0, 2, \dots, M-1$$

이고,  $\theta_i = (2i + 1)\frac{\pi}{M}$ 로 주어진다. MPSK 시스템에서 부호의 평균 에너지( $E_s$ )는 MFSK와 마찬가지로  $E_s = A^2 T_s / 2$ 이므로, 부호 에러 확률( $P_{se}$ )은 다음과 같다.

$$P_{se} \cong \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_s}{\eta}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right] \\ = \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{A^2 T_s}{2\eta}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right] \quad (7)$$

그리고 MPSK 시스템에서 정합필터 복조시 비트 에러 확률( $P_{be}$ )은 다음과 같다[1,2].

$$P_{be} = \frac{1}{\log_2 M} \text{erfc} \left[ \sqrt{\left(\frac{E_s}{\eta}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right]$$

여기서  $M = 4$ 이면, 즉 QPSK에 대하여,

$$P_{be} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \sqrt{\left(\frac{E_s}{\eta}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (8)$$

$\sin(\pi/4) = \sqrt{2}/2$ 이고,  $E_s = A^2 T_s / 2$ 이므로 M-ary 직교적인(orthogonal) 신호의 경우, QPSK의 비트 에러 확률( $P_{be}$ )은 다음과 같다.

$$P_{be} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{2\eta}} \right) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2 T_s}{4\eta}} \right) \quad (9)$$

### III. 4-ary 스케일링 웨이브릿 편이변조 시스템

기존의 웨이브릿 편이 변조 시스템은 스케일링 함수 (scaling function)를 1로, 웨이브릿(wavelet)을 0으로 하는 1비트 변조방법이 있고[8], 스케일링 함수와 웨이브릿 그리고 이 두 신호를 반전시켜서 만든 2개의 반송파, 즉 4개의 반송파를 사용하는 2비트 변조방법이 있다[9]. 본 논문에서는 2비트 변조방법인 4진 스케일링 웨이브릿

편이 변조(4-ary SWSK : 4-ary scaling wavelet shift keying) 시스템을 정의하고, 정의된 시스템의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률을 유도한다. 여기서  $M=4$ 이다. 제안한 4-ary SWSK 성능을 분석하기 위하여, 기존의 QPSK, MFSK 방법과 제안한 방법의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률로서 그 성능을 분석하고자 한다.

#### 3.1 4-ary SWSK 시스템

기존의 1비트 스케일링 웨이브릿 편이변조(SWSK : scaling wavelet shift keying) 시스템에서 스케일링 함수( $\phi(t)$ )와 웨이브릿( $\psi(t)$ )으로서 0과 1을 구분하였다. 이를 수식화하면 다음과 같다[8].

$$S_{SWSK}(t) = \begin{cases} S_0(t) = \psi(t), & 0 \leq t \leq T \text{ 0인 경우} \\ S_1(t) = \phi(t), & 0 \leq t \leq T \text{ 1인 경우} \end{cases} \quad (10)$$

스케일링 함수와 이를 반전시킨 신호( $\bar{\phi}(t)$ ), 웨이브릿과 이를 반전시킨 신호( $\bar{\psi}(t)$ ), 이 4개의 반송파를 사용하여 원래의 신호를 복원하는 것이 가능하였다[9]. 스케일링 함수를 10, 이를 반전시킨 신호( $\bar{\phi}(t)$ )를 11, 웨이브릿을 00, 이를 반전시킨 신호( $\bar{\psi}(t)$ )를 01로 변조가 가능하며, 이를 4진 스케일링 웨이브릿 편이변조 (4-ary SWSK : 4-ary scaling wavelet shift keying) 시스템이라 정의하고, 그 정의식은 다음과 같다.

$$S_{4\text{-ary SWSK}}(t) = \begin{cases} S_{00} = \psi(t), & 0 \leq t \leq T \text{ 00인 경우} \\ S_{01} = \bar{\psi}(t), & 0 \leq t \leq T \text{ 01인 경우} \\ S_{10} = \phi(t), & 0 \leq t \leq T \text{ 10인 경우} \\ S_{11} = \bar{\phi}(t), & 0 \leq t \leq T \text{ 11인 경우} \end{cases} \quad (11)$$

이때 사용된 4개의 반송파는 그림 1과 같다. 여기서 웨이브릿  $\psi(t)$ ( $S_{00}$ )는 수식 (2a, 2b)를 만족하고, 스케일링 함수  $\phi(t)$ ( $S_{10}$ )는 수식 (1a, 1b)를 만족하며, 웨이브릿과 스케일링 함수는 서로 직교적인 특성을 가지고 있고, 이를 반전시킨 신호들도 서로 직교적(orthogonal)이다.

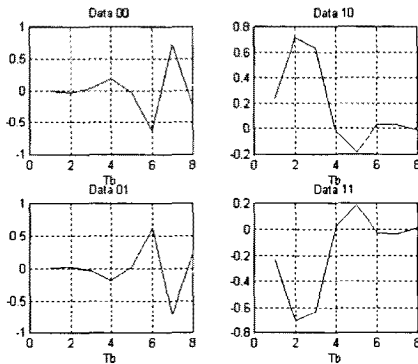


그림 1. 4개의 반송파  
Fig. 1 Four carrier frequencies

**3.2 제안한 시스템의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률**

제안한 방법은 기존의 QPSK(quadrature phase shift keying)의 4개의 반송파와 비슷하다. 즉 입력신호가 00 일 때의 반송파를  $\sin(\omega_0 t)$ , 01일 때의 반송파를  $\cos(\omega_0 t)$  이면, 이 두 신호는 서로 직교적이며 반전된 두 신호도 역시 직교적이다. 그래서 제안한 방법의 에러 확률은 기존의 QPSK의 에러 확률로부터 유도가 가능하다.

제안한 방법의 신호의 평균 에너지( $E_s$ )는

$$E_s = \frac{1}{4} \int_0^{T_s} [S_{00}^2(t) + S_{01}^2(t) + S_{10}^2(t) + S_{11}^2(t)] dt$$

고

$$E_s = \frac{1}{4} \int_0^{T_s} [0+0+1+1] dt = \frac{1}{2} T_s \quad (12)$$

가 된다.

제안한 4-ary SWSK 시스템에서 부호 에러 확률( $P_{sc}$  : probability of symbol error)은 다음과 같다.

$$P_{sc} \cong \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_s}{\eta}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right] = \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{T_s}{2\eta}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right] \quad (13)$$

그리고 4-ary SWSK 시스템에서 정합필터를 이용한 복조시 비트 에러 확률( $P_{bk}$  : probability of bit error)은 다

음과 같다.

$$P_{bk} = \frac{1}{\log_2 M} \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_s}{\eta}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right] \quad (14)$$

여기서  $M=4$ 이면,

$$P_{bk} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_s}{\eta}} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (15)$$

$\sin(\pi/4) = \sqrt{2}/2$ 이고,  $E_s = T_s/2$ 이므로 M-ary 직교적인 신호의 경우, 비트 에러 확률( $P_{bk}$ )은 다음과 같다.

$$P_{bk} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{2\eta}} \right) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{T_s}{4\eta}} \right) \quad (16)$$

여기서 수식 (9)의 QPSK 신호의 크기(A)를 1로 가정하면, 제안한 방법의 비트 에러 확률( $P_{bk}$ )은 기존의 QPSK와 같음을 알 수 있다.

**3.3 복원 알고리즘**

제안한 방법의 복조기는 그림 2와 같이 상관기(correlator) 4개를 사용하였다.

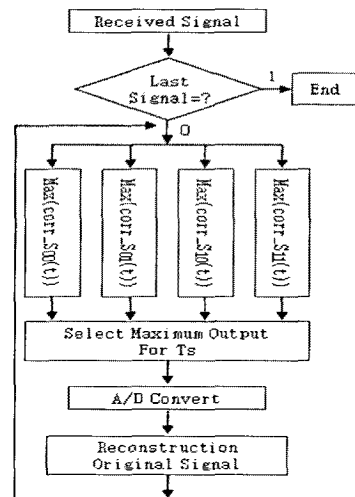


그림 2. 복원 순서도  
Fig. 2 The flowchart of reconstruction.

4-ary SWSK 신호에 백색잡음(AWGN : additive white gaussian noise)이 섞인 신호( $S(t) + n(t)$ )가 수신기의 입력에 인가되면  $S(t) + n(t)$  신호에 각각의 반송파를 곱하고 1주기( $T_s$ ) 동안 적분한다. 각 상관기의 출력 중에서 최대값을 선택하여 A/D 변환기를 통과하면 원래의 신호를 복원할 수 있다. 여기서  $Max(corr\_S_{00}(t))$ 는 신호 00에 대한 상관기 출력의 최대값을 의미한다.

#### IV. 모의실험 및 성능분석

본 논문에서 Daubechies 4-탭(8개의 계수값)웨이브렛을 사용하였고, 모의실험은 PC상에서 Matlab 프로그램을 사용하였다. AWGN을 만들기 위하여 Matlab의 `randn()` 함수를 사용하였다. 기존의 방법인 MFSK의 반송파와 QPSK의 반송파를 각각 그림 3과 4에 나타내었다.

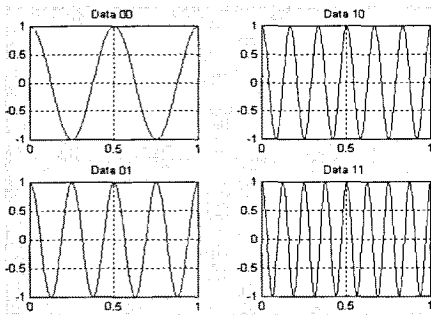


그림 3. MFSK의 반송파  
Fig. 3 Carrier frequencies of MFSK

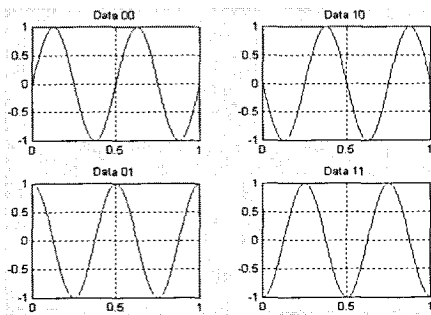


그림 4. QPSK의 반송파  
Fig. 4 Carrier frequencies of QPSK

특히 그림 4는 그림 1의 4-ary SWSK의 4개의 반송파와 비슷함을 알 수 있고, 데이터 00일 때의 반송파는  $\sin(\omega_0 t)$ , 01일 때의 반송파는  $\cos(\omega_0 t)$ 로서 이 두 신호는 서로 직교적이다. 그리고 이 두 신호를 반전시킨 신호 데이터 10과 데이터 11 역시 직교적이다. 제안한 방법의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률은 수식 (13)과 (16)을 사용하였다.

SNR의 변화에 따른 비트 에러 확률과 부호 에러 확률 비교를 그림 5와 6에 나타내었다. SNR=6[dB], 주기  $T_s = 1$ [sec]일 때, QPSK 방법의 비트 에러 확률은  $2.3 \times 10^{-2}$ 이고, 부호 에러 확률은  $4.6 \times 10^{-2}$ 이었다. MFSK 방법의 비트 에러 확률은  $4.6 \times 10^{-2}$ 이고, 부호 에러 확률은  $6.9 \times 10^{-2}$ 이었다. 제안한 방법의 비트 에러 확률은  $1.4 \times 10^{-10}$ 이고, 부호 에러 확률은  $2.8 \times 10^{-10}$ 으로서 제안한 방법의 비트 에러 확률과 부호 에러 확률이 훨씬 낮음을 알 수 있다.

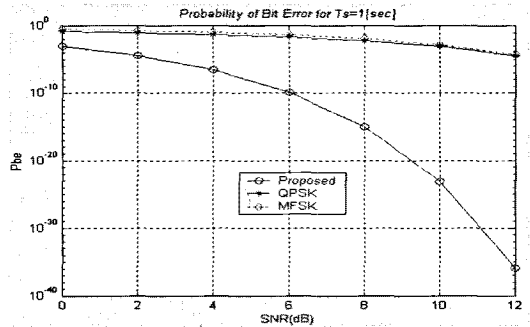


그림 5. SNR에 따른 비트 에러 확률 비교  
Fig. 5 Probability of bit error for SNR

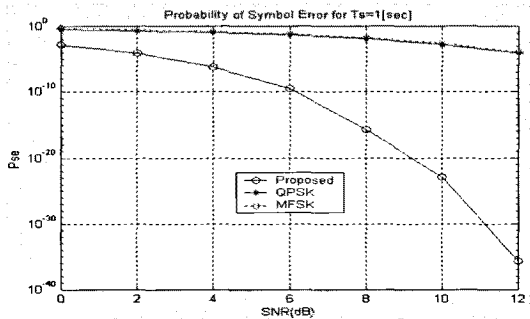


그림 6. SNR에 따른 부호 에러 확률 비교  
Fig. 6 Probability of symbol error for SNR

여기서 MFSK 방법의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률은 수식 (4)와 (6)을 사용하였고, QPSK 방법의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률은 수식 (7)과 (9)를 사용하였다.

주기 변화에 따른 비트 에러 확률과 부호 에러 확률 비교를 그림 7와 8에 나타내었다. 주기  $T_s = 0.1$ [sec]일 때, QPSK 방법의 비트 에러 확률은 0.26이고, 부호 에러 확률은 0.53이었다. MFSK 방법의 비트 에러 확률은 0.53이고, 부호 에러 확률은 0.79이었다. 제안한 방법의 비트 에러 확률은  $2.3 \times 10^{-2}$ 이고, 부호 에러 확률은  $4.6 \times 10^{-2}$ 으로서 제안한 방법의 비트 에러 확률과 부호 에러 확률이 훨씬 낮음을 알 수 있다.

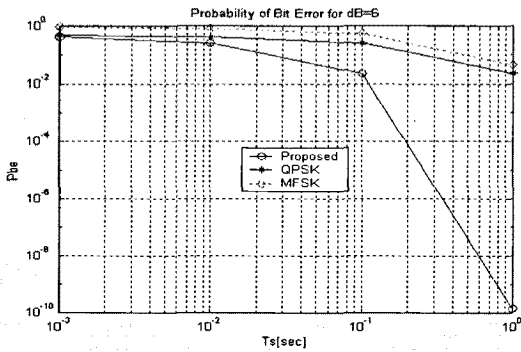


그림 7. 주기에 따른 비트 에러 확률 비교  
Fig. 7 Probability of bit error for  $T_s$ [sec]

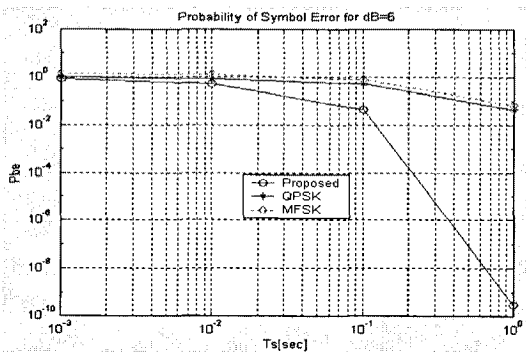


그림 8. 주기에 따른 부호 에러 확률 비교  
Fig. 8 Probability of symbol error for  $T_s$ [sec]

표 1과 표 2는 SNR의 변화에 따른 제안한 방법의 비트 에러 확률과 부호 에러 확률을 나타내었다.

SNR=6[dB]일 때, 주기( $T_s$ )가 1[sec]일 때, 비트 에러 확률은  $1.4 \times 10^{-10}$ 이고, 주기( $T_s$ )가 각각 0.1[sec], 0.01[sec]일 때, 비트 에러 확률은  $2.3 \times 10^{-2}$ 과 0.26으로서 주기가 작아질수록 비트 에러 확률은 높아짐을 알 수 있다.

디지털 수신기에서 에러 확률을 줄이는 방법은 다음과 같다. 1) 신호의 에너지( $E$ )를 증가시킨다. 2)신호의 상관도( $\rho$ )를 줄인다. 3) 잡음전력( $\eta$ )을 줄인다. 그래서 에러 확률을 줄이는 방법 중 신호의 잡음전력이 작으면 에러 확률이 낮아진다. 표 3은  $T_b=0.1$ [sec]에서 PSK 방법과 제안한 방법의 잡음전력  $\eta$ (watt/Hz)를 비교하였다. 만약 QPSK에서  $A=1$ 로 가정하면, QPSK 에러 확률 수식 (10)과 제안한 방법의 비교하였다. 만수식 (16)은 결론적으로 같은 수식이다. QPSK에서 데이터 00에 해당하는 반송파는  $\int_0^{T_b} s_{00}(t) = \int_0^{T_b} \sin(\omega_0 t) = 0$ 이고, 01에 해당하는 반송파는  $\int_0^{T_b} s_{01}(t) = \int_0^{T_b} \cos(\omega_0 t) = 0$ 이다. 그러나 제안한 방법의 데이터 00에 해당하는 반송파는  $s_{00}(t) = \psi(t) = 0$ 이고, 10에 대한 반송파는  $s_{10}(t) = \phi(t) = \sqrt{2}$ 로서 잡음에 강한 특성을 지닌다. 그래서 에러확률을 구하는 공식은 같을지라도 표 3에서처럼 잡음전력이 적어서 결론적으로 QPSK 방법보다 우수한 에러 확률을 나타내었다.

## V. 결론

기존의 웨이브릿 편이 변조 방법에서는 1비트만 변조하여 전송하기 때문에 전송효율이 떨어진다. 웨이브릿 편이 변조에서 비트 전송률 향상기법으로 웨이브릿을 00으로, 반전된 웨이브릿을 01로, 스케일링 함수를 10으로, 반전된 스케일링 함수를 11로 2비트씩 변조하여 원래 신호를 복원하는 것이 가능하였다. 그래서 본 논문에서는 2비트 변조 방법을 4진 스케일링 웨이브릿 편이 변조 시스템이라 정의하였다. 그리고 기존의 QPSK 방법으로부터 제안한 방법의 부호 에러 확률과 비트 에러 확률을 유도하였고, 기존의 방법들과 제안한 방법에 대하여 비트 에러 확률 및 부호 에러 확률로서 그 성능을 분석하였다. 또 잡음전력을 분석하여 제안한 방법이 타당함을 확인하였다.

표 1. SNR에 따른 제안한 방법의 비트 에러 확률  
Table 1. Probability of bit error of proposed method for SNR

Ts [sec] \ SNR [dB]	0	2	4	6	8	10	12
1	$7.8 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-10}$	$9.8 \times 10^{-16}$	$7.6 \times 10^{-24}$	$1.2 \times 10^{-36}$
0.1	0.16	0.1	$5.7 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-3}$	$7.8 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-5}$
0.01	0.38	0.35	0.31	0.26	0.21	0.16	0.1
0.001	0.46	0.45	0.44	0.42	0.4	0.38	0.35

표 2. SNR에 따른 제안한 방법의 부호 에러 확률  
Table 2. Probability of symbol error of proposed method for SNR

Ts [sec] \ SNR [dB]	0	2	4	6	8	10	12
1	$1.6 \times 10^{-3}$	$6.9 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-16}$	$1.5 \times 10^{-23}$	$2.4 \times 10^{-36}$
0.1	0.32	0.21	0.11	$4.6 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$6.9 \times 10^{-5}$
0.01	0.75	0.69	0.62	0.53	0.43	0.32	0.21
0.001	0.92	0.9	0.87	0.84	0.8	0.75	0.69

표 3. 잡음전력 비교  
Table 3. Comparison of noise power

Method \ SNR [dB]	0	2	4	6	8	10	12
QPSK	0.5	0.32	0.2	0.13	0.08	0.05	0.032
Proposed	0.05	0.03	0.02	0.013	0.008	0.005	0.003

참고문헌

[1] 신윤기, 매트랩과 함께하는 통신이론, 인터 비전, 2005.

[2] L.W. Couch, *Digital and Analog Communication System*, Prentice-Hall, 2001

[3] 이승훈, 윤동한, 웨이브릿 변환 이론 및 적용, 보성각, 2004.

[4] N.J Fliege, *Multirate Digital Signal Processing*, JOHN WILEY & SONS, 1994.

[5] C.Sidney, R.A.Gopinath, and H.Guo, *Introduction to Wavelet and Wavelet Transforms*, Prentice-Hall, 1998.

[6] F.C.A. Fernandes, R.L.C. Spaendonck, and C.S. Burrus, "A new Framework for Complex Wavelet Transforms," *IEEE Trans., Signal Processing*, vol. 51, pp.1825-1837, July 2003.

[7] Y. Liu and K. N. Ngan, "Weighted Adaptive Lifting-Based Wavelet Transform for Image Coding," *IEEE Trans., Image Process.*, vol. 17, pp. 500-511, April 2008.



- [8] 오형진, 정태일, 이태오, “2진 정합필터를 이용한 웨이브릿 편이변조 시스템”, *한국해양정보통신학회 논문지*, 제12권 11호, pp.1933-1938, 2008.
- [9] 정태일, 이태오, 유태경, 김종남, 문광석 “웨이브릿 편이변조 시스템에서 전송률 향상 기법,” *한국해양정보통신학회 논문지*, 제13권 11호, pp. 2304-2310, 2009

저자소개



정태일(Tae-Il Jeong)

1995년 부경대학교 전자공학과  
(공학사)  
1997년 부경대학교 전자공학과  
(공학석사)

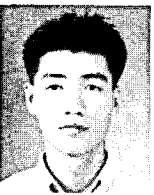
2001년 부경대학교 전자공학과(공학박사)  
2000.3~2009.2 동명대학교 정보통신대학 정보통신  
공학과 전임  
※관심분야: 신호처리, 멀티미디어 통신



유태경(Tae-Kyung Ryu)

1997년 부경대학교 전자공학과  
졸업(공학사)  
2000년 부경대학교 전자공학과  
석사(공학석사)

2008년 부경대학교 전자공학과 박사(공학박사)  
※관심분야: 영상신호처리, 멀티미디어 통신 등



김종남(Jong-Nam Kim)

1995년 국립금오공과대학  
전자공학과 졸업(공학사)  
1997년 광주과학기술원 정보통신  
공학석사(공학석사)

2001년 광주과학기술원 기전공학과 박사(공학박사)  
2001년 8월~2004년 2월 KBS기술연구소 선임연구원  
2004년 4월~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신  
공학부 교수  
2003년 3월~현재 (주)홈캐스트 사외이사  
※관심분야: 영상신호처리, 멀티미디어 보안 등



문광석(Kwang-Seok Moon)

1979년 2월 경북대학교 전자공학과  
졸업(공학사)  
1981년 경북대학교 전자공학과  
석사(공학석사)

1989년 경북대학교 전자공학과 박사(공학박사)  
1988년 1월~12월 일본 동경대학교 학부 연구원  
1997년 8월~1998년 7월 미국 Jackson State University  
객원교수  
1990년 3월~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신  
공학부 교수  
※관심분야: 영상신호처리, 적응신호처리등

김현덕(Hyun-Deok Kim)

한국해양정보통신학회 논문지  
제12권 제9호 참조