

특집논문-08-13-5-06

# IEEE 802.15.4 표준에 적용을 위한 음성부호화 기술

진진홍<sup>a)</sup>, 강석근<sup>a)‡</sup>

## A Voice Coding Technique for Application to the IEEE 802.15.4 Standard

Zhenxing Chen<sup>a)</sup> and Seog Geun Kang<sup>a)‡</sup>

### 요 약

이용 가능한 데이터 영역과 전송전력 등 다양한 제한 요소들로 인하여 지그비 통신의 기술규격에는 음성통신에 대한 기준 사양이 포함되지 않았다. 본 논문에서는 지그비의 기반인 IEEE 802.15.4 표준에 적용하기 위한 음성부호화 기법이 제시된다. 여기서는 높은 압축율과 파형 복구능력이 우수한 파형부호기의 실현이 필수적이다. 이를 위하여 제시된 방법에서는 다단 이산 웨이블릿변환과 두 가지 펄스부호변조로 구성된 이진부호기가 사용된다. 이론적인 분석과 실내 무선 환경에서의 모의실험 결과 2단 웨이블릿변환을 적용한 경우가 압축율과 음성신호 복구능력 면에서 가장 적합한 것으로 판단된다. 직선전파경로 성분이 지배적인 경우 제시된 방법은 중간 정도의 신호 대 잡음비에서도 만족스러운 복구능력을 가진다. 따라서 제시된 음성부호화 방법은 향후 지그비를 이용한 음성통신의 표준 선정에 참고 가능한 기술이 될 수 있을 것으로 사료된다.

### Abstract

Due to the various constraints such as feasible size of data payload and low transmission power, no technical specifications on the voice communication are included in the Zigbee standard. In this paper, a voice coding technique for application to the IEEE 802.15.4 standard, which is the basis of Zigbee communication, is presented. Here, both high compression and good waveform recovery are essential. To meet those requirements, a multi-stage discrete wavelet transform (DWT) block and a binary coding block consisting of two different pulse-code modulations are exploited. Theoretical analysis and simulation results in an indoor wireless channel show that the voice coder with 2-stage DWT is most appropriate from the viewpoint of compression and waveform recovery. When the line-of-sight component is dominant, the voice coding scheme has good recovery capability even in the moderate signal-to-noise power ratios. Hence, it is considered that the presented scheme will be a technical reference for the future recommendation of voice communication exploiting Zigbee.

Keyword : Wireless personal area network (WPAN), IEEE 802.15.4 Standard, Zigbee, Voice coding, Discrete wavelet transform

## 1. 서 론

IEEE 표준화위원회는 2.4 GHz 산업·과학·의료용 주

파수 대역(industrial, scientific, medical frequency band, ISM band)을 이용한 무선 개인통신망(wireless personal area network, WPAN)의 구현을 위하여 IEEE 802.15.x 표준<sup>[1-3]</sup>들을 권고한 바 있다. 이들 가운데 IEEE 802.15.1 표준<sup>[1]</sup>에 기반한 블루투스(Bluetooth)와 IEEE 802.15.4<sup>[3]</sup>를 근거로 하는 지그비(Zigbee)는 피코셀(pico cell) 기반 무선 통신시스템에의 적용에 있어서 무선 근거리통신망(wire-

a) 경상대학교 전기전자공학부

School of Electrical and Electronic Engineering Gyeongsang National Univ.

‡ 교신저자 : 강석근(sgkang@gnu.ac.kr)

※ 본 논문은 한국전자통신연구원(IT R&D 프로그램(MKE/TTA2008-P1-03-08K53 WPAN/WBAN 표준 개발))의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

less local area network, WLAN)<sup>[4]</sup>과 공존하거나 이를 대체할 수 있는 가장 유망한 기술로 인식되고 있다.

블루투스 기술은 오디오 신호를 최대 1 Mbps의 속도로 전송할 수 있는 규격을 갖추고 있다. 특히, 일반적 오디오/비디오 분배기술서(generic audio/video distribution profile, GAVDP)<sup>[5]</sup>는 블루투스를 위한 물리계층(physical layer, PHY) 및 매체접속제어계층(media access control layer, MAC)과 이들 간의 인터페이스에 대한 자세한 기술규격을 제시하고 있다. 이에 따라 현재 시장에서는 스테레오 헤드셋, 무선 스피커 등 블루투스 통신을 이용한 오디오 전송 관련 기기들이 다수 소개되어 있다. 이에 비하여 지그비 통신은 주로 센서노드가 획득한 정보나 이에 대응하는 제어 신호의 전송이 요구되는 산업용 제어시스템, 빌딩 자동화, 홈 네트워크 등의 분야에 적용할 목적으로 개발되었다. 따라서 실제 전송되는 데이터의 양이 많지 않으므로 IEEE 802.15.4 표준<sup>[3]</sup>에서 데이터 전송영역의 길이는 매우 짧다. 이로 인하여 지그비 기술규격에는 음성통신을 위한 기술기준이 전혀 포함되지 않았다.

컨퍼런스, 응급 구조 활동, 노약자나 장애인을 위한 홈 네트워크에서의 자동 음성인식 등과 같은 새로운 응용분야에서 지그비 통신을 이용한 음성 서비스에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 최근에는 지그비 기술규격을 이용하여 음성통신 서비스를 제공할 목적으로 매체접속제어계층과 상위계층을 위한 프로토콜 개발에 대한 연구들이 진행되고 있다<sup>[6],[7]</sup>. 하지만 제한된 데이터 영역의 길이, 저 전력 전송, 짧은 전송거리 등의 제약들로 인하여 음성통신 서비스를 위한 물리계층 구조와 기술사양에 대한 연구결과는 거의 없는 것으로 분석된다.

본 논문에서는 음성신호처리 분야에서 널리 연구된 바 있는 이산 웨이블릿변환(discrete wavelet transform, DWT) 기반 파형부호화(waveform coding) 기술을 IEEE 802.15.4 표준의 물리계층 및 매체접속제어계층 규격에 맞도록 변형하여 적용함으로써 음성통신 서비스를 제공할 수 있는 음성부호화 기술이 제시된다. 그리고 피코셀 단위의 실내 무선채널 환경에서 제시된 부호화방법이 가질 수 있는 성능을 이론적으로 분석하고 실험을 통하여 확인한다. 이와 같은 시도는 지그비 기술규격의 제정과 갱신을 위한 학습그

룹(Study Group)과 관련 산업체의 요구사항<sup>[8]</sup>에 따른다. 그러므로 본 논문의 결과는 향후 지그비 기술규격의 데이터 프레임 구성, 음성통신 프로토콜 개발 등 매체접속제어계층과 음성부호화 기술 관련 물리계층 표준안의 갱신이나 응용 서비스의 개발을 위한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

## II. IEEE 802.15.4 표준 기술의 개요

센서네트워크의 구현을 위한 매우 유망한 무선 통신기술 가운데 하나로 인식되고 있는 지그비의 프로토콜 스택은 그림 1에 나타난 바와 같이 저속 무선 개인통신망을 위한 IEEE 802.15.4 표준<sup>[3]</sup>의 물리계층과 매체접속제어계층에 기반을 두고 있다. IEEE 802.15.4는 868/915 MHz와 2.4 GHz 대역을 27개의 부채널로 나누어 데이터 전송에 사용하도록 제시하고 있다. 이 가운데 16개의 부채널이 전 세계적으로 활용 가능한 2.4 GHz 비인가 ISM 대역에 할당되어 최대 250 kbps의 데이터 전송속도를 지원한다.

매체접속제어계층은 물리적인 무선채널에의 접속을 제어하고 네트워크계층을 위한 서비스를 제공하며 네트워크 비컨(network beacon)의 생성과 동기관리, 개인통신망에의 접속 및 해제, 충돌회피 메커니즘 지원, 매체접속제어계층 개체 간 신뢰성 있는 링크 제공 등의 기능을 수행한다. 이를 위한 매체접속제어 하부계층(MAC sublayer)은 그림 1에 나타난 바와 같이 최대 127 바이트 길이를 가지며, 데이터 프레임, acknowledgment(ACK)프레임, 명령프레임(MAC command), 비컨프레임 등 4가지 기본적인 프레임 포맷을 제공한다.

데이터 프레임에서 정보 전송을 위한 데이터 페이로드의 길이는 최대 122 바이트까지 확장될 수 있다. 하지만 주소 필드(addressing fields)에 정보원과 목적지의 개인통신망 ID 등이 저장되므로 실제 전송 가능한 데이터의 길이는 122 바이트보다 훨씬 작아질 수 있다. 이러한 이유로 저속 무선 개인통신망 표준이 처음 제안될 당시에는 음성이나 비디오와 같은 멀티미디어 통신을 위한 구체적인 기술규격

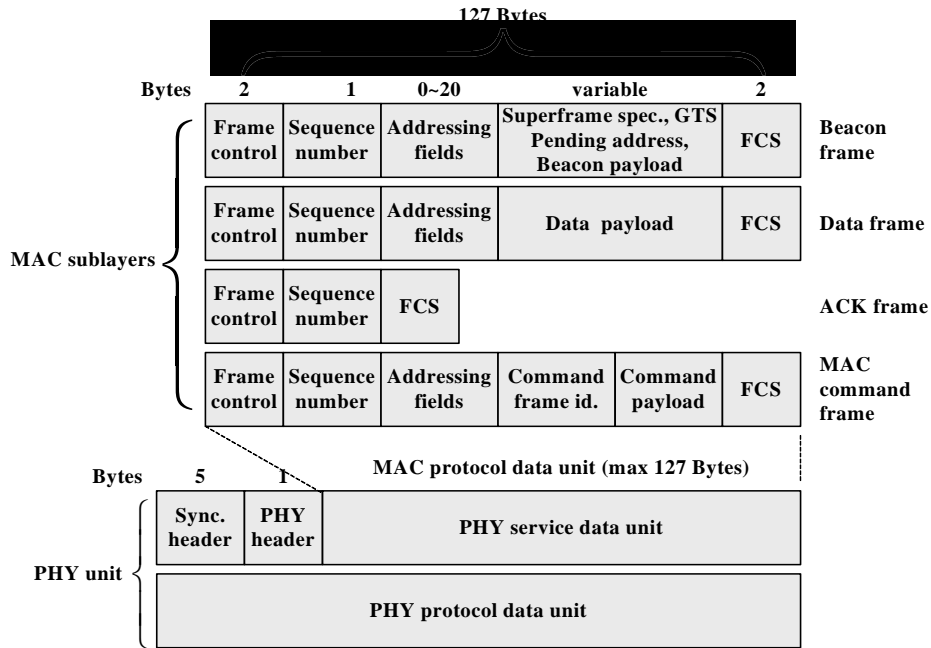


그림 1. IEEE 802.15.4 표준의 매체접속제어 및 물리계층 프레임 구조  
 Fig. 1. The MAC and PHY frame structures of IEEE 802.15.4 standard

은 전혀 고려되지 않았다. 따라서 새로운 응용분야에서 지그비 통신을 이용한 음성 서비스에 대한 요구가 증대되고 있음에도 불구하고 음성부호화 방법, 데이터 압축방식, 프레임 포맷 등 이를 지원할 수 있는 기술사양이 전무한 상태이다.

### III. 지그비 기술규격을 위한 음성부호화

일반적으로 데이터 전송자원이 매우 제한적인 경우 효과

적인 서비스 제공을 위하여 중요도가 낮거나 상관성이 큰 신호 성분을 제거함으로써 높은 압축율을 제공하면서도 우수한 복구능력을 가지는 과형부호화 기술이 필수적이다. 또한 표준 기술사양으로 적용되기 위해서는 완전히 새로운 설계개념 보다는 충분히 검증이 이루어진 기술을 목적에 맞게 변형하여 활용하는 것이 유리할 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 지그비 기술규격에의 적용을 위하여 그림 2에 나타낸 다단 이산 웨이블릿변환을 이용하는 음성부호화 기법을 제시한다. 여기서  $G$ 와  $H$ 는 각각 저주파 통과필터 (low-pass filter)와 고주파 통과필터(high-pass filter)를 나

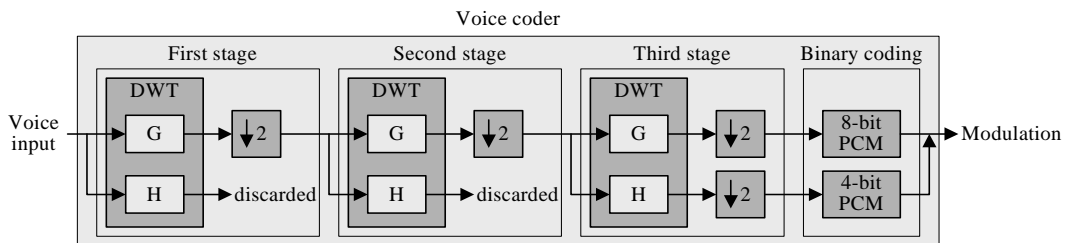


그림 2. 다단 이산 웨이블릿변환 기반 음성부호화기의 블록도  
 Fig. 2. Block diagram of a voice coder based on multi-stage DWT

타낸다. 그리고 ↓2는 2배수 내림표본화(downsampling) 블럭이다.

제시된 부호기는 다단 웨이블릿변환 블럭과 이진부호화 블럭으로 구성된다. 웨이블릿변환 블럭은 표본화된 음성신호파형  $x(n)$ 을 다음과 같이 변환영역(transform domain) 신호로 변환한다<sup>9)</sup>.

$$X(z) = X_G(z) + X_H(z), \quad (1)$$

여기서  $z = e^{-j\omega}$ 는  $z$ -변환을 나타낸다.  $X_G(z) = G(z)X(z)$ 와  $X_H(z) = H(z)X(z)$ 는  $X(z)$ 의 저주파 통과 성분과 고주파 통과 성분을 각각 나타낸다. 푸리에변환(Fourier transform)과는 달리 웨이블릿변환에서는 주파수 영역에 따라 주파수 해상도(frequency resolution)가 달라지므로<sup>10)</sup> 푸리에변환이나 역변환(cosine transform)에 비하여  $X(z)$ 의 성분은 저주파 영역에 더욱 세밀하게 밀집되는 경향이 있다. 마지막 웨이블릿변환을 제외한 앞 단의 고주파 통과 성분은 압축율을 높이기 위하여 전송되지 않는다. 그러므로 두 번째 변환 단의 입력은 이전 단의 저주파 영역 신호만으로 다음과 같이 구성된다.

$$X_1(z) = \frac{1}{2} [X_G(z^{1/2}) + X_G(-z^{1/2})]. \quad (2)$$

이 경우 데이터의 손실이 발생되므로 제시된 음성부호화 기법에서는 데이터 압축율과 신호파형 복구능력 간의 절충이 요구된다.

이진부호화 블럭은 마지막 변환 단의 저주파 통과 성분과 고주파 통과 성분을 각각 표본당 8 비트와 4 비트로 펄스부호변조(pulse-code modulation, PCM)한다. 2단 웨이블릿변환이 사용되는 경우를 예로 들면, 신호  $X_1(z)$ 의 저주파 성분은 표본당 8 비트로 그리고 고주파 성분은 4 비트로 펄스부호변조된다. 제시된 음성부호화 기술의 변환 및 부호화 과정은 그림 3에 나타난 흐름도에 따라 구현될 수 있다.

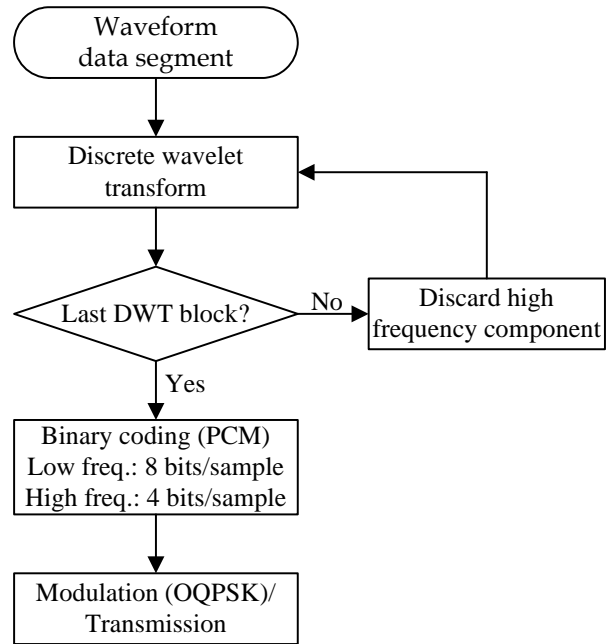


그림 3. 제시된 기법에서 음성부호화 과정 흐름도  
Fig. 3. The flowchart of voice coding in the presented scheme

#### IV. 성능 분석

지그비를 이용한 음성통신에 대한 이전 연구결과가 전무하므로 본 논문에서는 무선 개인통신망의 다른 표준인 IEEE 802.15.1 블루투스 방식과 비교가 가능하도록 모의실험 파라미터를 적용하였다. 성능평가를 위한 척도로는 데이터 압축율, 평균자승오차, 데이터 파형 비교, 다수 청취자에 의한 주관적 음질평가(mean opinion score, MOS) 등이 사용된다.

블루투스 기술규격에서 음성신호는 256개의 표본화된 파형으로 구성된 세그먼트 단위로 처리되며, 각각의 표본은 8 비트 대수적 펄스부호변조(logarithmic PCM)나 연속적 가변기울기 델타변조(continuous variable slope delta modulation, CVSD)를 이용하여 이진 부호열로 변환된다<sup>11),12)</sup>. 데이터 압축율은 블루투스 통신에서 세그먼트당 전송되는 비트 수에 대한 제시된 방법에서 전송되는 비트 수의 상보비율로서 다음과 같이 정의된다.

$$R_c = \left(1 - \frac{N_Z}{N_B}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

여기서  $N_Z$ 와  $N_B$ 는 각각 지그비와 블루투스 방식의 세그먼트당 전송비트 수를 나타낸다. 그리고 원 신호파형과 복구된 신호파형 간의 절대적인 차이를 나타내는 평균자승오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} MSE &= \frac{1}{M} \sum_m MSE_{segment} \\ &= \frac{1}{M} \sum_m \left[ \frac{1}{256} \sum_{k=0}^{255} \{y(k) - x(k)\}^2 \right], \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $x(k)$ 와  $y(k)$ 는  $m$  번째 정보원 데이터와 복구된 데이터 세그먼트에서  $k$  번째 표본을 각각 나타내며,  $M$ 은 세그먼트의 수이다. 모의실험에 사용된 정보원 음성신호파형은 일상적으로 접할 수 있는 방송뉴스의 일부를 사용하였으며 그림 4에 나타내었다. 여기서는 지그비 통신의 여러 가지 제약조건들을 고려하여 실시간 처리가 가능하도록 표본화 주파수(sampling frequency)를 8 kHz로 정하였다.

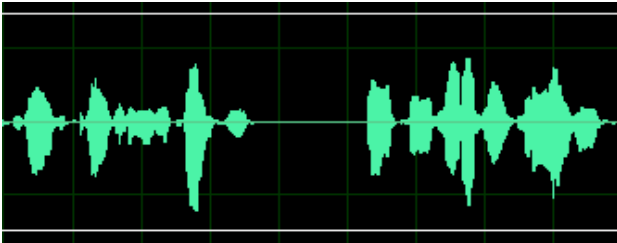


그림 4. 모의실험을 위한 정보원 음성신호의 파형  
Fig. 4. Waveform of the source voice signals for simulation

### 1. 모의실험을 위한 전송환경

저속 무선 개인통신망은 피코셀에 산재한 센서노드나 단말기 간의 무선통신에 주로 이용되므로 전송채널은 가산성 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise, WGN)과 함께 직선전파경로(line-of-sight, LOS) 성분과 다수의 반사파로 구성된 비직선전파경로를 가지는 라이시안 페이딩 채널(Rician fading channel)로 모델링될 수 있다. 라이시안 페이

딩 채널의 확률밀도함수(probability density function, PDF)는 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$p(y) = \begin{cases} \frac{y}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(y^2 + \alpha^2)\right] I_0\left(\frac{\alpha y}{\sigma^2}\right), & y \geq 0, \\ 0, & y < 0, \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $y(t)$ 는 다수의 전파경로 성분으로 구성되는 광의의 정적 랜덤프로세스(wide-sense stationary random process)이다.  $\alpha$ 는 직선전파경로 성분의 침투 진폭이고  $I_0(\cdot)$ 는 제1종 0차 변형 베셀함수(the zeroth-order modified Bessel function of the first kind)이다. 그리고  $\sigma^2$ 은 비직선전파경로 성분의 전력을 나타낸다. 라이시안 채널에서 (6)과 같이 정의되는 직선전파경로 성분과 비직선전파경로 성분의 전력비는 시스템의 성능에 크게 영향을 미치는 파라미터이다.

$$K(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \right). \quad (6)$$

직선전파경로 성분의 전력이 작아지면 라이시안  $K$ 요소는 0으로 수렴하고 (5)는 레일리(Rayleigh) 확률밀도함수와 유사한 형태가 된다. 반면 비직선전파경로 성분이 무시될 수 있을 정도로  $\alpha^2$ 이 크면 전송되는 신호는 진폭 감쇄(amplitude attenuation)와 백색 가우시안 잡음에 의하여 왜곡되는 것으로 가정할 수 있다. 일반적으로 진폭 감쇄 왜곡은 수신기에서 채널추정기법(channel estimation)을 사용하여 보상된다. 전송채널의 영향을 보정하는 기술은 본 논문의 주요 관심 영역을 벗어난 것으로 판단되므로 여기서는 진폭 감쇄 왜곡은 발생되지 않는 것으로 가정한다.

### 2. 이론적인 분석

제시된 음성부호화 기법에서 웨이블릿변환 단의 수에 따른 압축율을 (3)을 이용하여 구하면 표 1과 같다. 단일 웨이블릿변환과 이진부호화 블록으로 구성된 부호기의 경우 변환 후 내림표본화된 데이터 세그먼트의 저주파 신호와 고주파 신호는 128개의 표본을 가지며, 이들은 각각 8 비트와 4 비트 부호열로 변환되므로 192 바이트 길이의 이진 데이

터열이 발생된다. 따라서 세그먼트당 256 바이트의 데이터 열이 발생하는 블루투스 방식과 비교하면 부호화에 의한 압축 효과는 25 %이다. 이에 비하여 2단과 3단 변환을 이용할 경우 전송되는 데이터열은 각각 96 바이트와 48 바이트로서 블루투스 방식의 37.5 %와 18.75 %가 된다.

표 1. 이산 웨이블릿변환 단의 수에 따른 압축율  
Table. 1. Compression rate w.r.t. the number of DWT stages

|       | 1-stage | 2-stage | 3-stage |
|-------|---------|---------|---------|
| $R_c$ | 25 %    | 62.5 %  | 81.25 % |

w.r.t.: with respect to

펄스부호변조에서는 균등 양자화기(uniform quantizer)가 사용되며, 이에 따른 양자화 오차(quantization error)는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_q^2 = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{4|x_{\max}|^2}{12L_q^2}, \quad (7)$$

여기서  $|x_{\max}|$ 는 양자화기 입력 신호의 최대 진폭이고  $L_q$ 는 양자화 레벨의 수이며  $\Delta$ 는 양자화 스텝크기를 나타낸다. 제시된 부호기의 이진부호화 블록은 8 비트와 4 비트 양자화기로 구성되므로 이론적인 최소 평균자승오차(minimum MSE, MMSE)는 다음과 같이 근사적으로 계산된다.

$$\sigma_{q,\min}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{q,256}^2 + \sigma_{q,16}^2), \quad (8)$$

여기서  $\sigma_{q,256}^2$ 과  $\sigma_{q,16}^2$ 은 8 비트 양자화기와 4 비트 양자화기의 양자화 오차를 각각 나타낸다. 제시된 음성부호기에서

표 2. 변환 단의 수에 따른 최소 평균자승오차  
Table 2. The MMSE w.r.t. the number of DWT stages

|         | $x_{\max}$       |                  | $\sigma_{q,\min}^2$<br>(in log scale) |
|---------|------------------|------------------|---------------------------------------|
|         | Low pass signals | High pass signal |                                       |
| 1-stage | 1.1297           | 0.1295           | -4.8488                               |
| 2-stage | 1.5838           | 0.2587           | -4.3015                               |
| 3-stage | 2.2179           | 0.5025           | -3.7523                               |

변환 단의 수에 따른 변환영역 신호의 최대 진폭과 이론적인 최소 평균자승오차를 표 2에 나타내었다.

데이터 압축율의 결과에서도 예측되는 바와 같이 이론적인 평균자승오차의 최소값은 단의 수에 따라 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 제시된 음성부호화 방법이 손실부호화(lossy coding) 방식이므로 압축율이 증가됨에 따라 데이터의 손실량도 증가됨을 의미한다. 따라서 표 2는 부호화 과정에서 발생하는 데이터 손실에 따른 오차의 절대적인 수치로서 단의 수에 따라 제시된 부호기가 가질 수 있는 성능 한계(performance limit)가 된다.

### 3. 모의실험 결과

무선 개인통신망의 전송환경은 다중 전파경로를 가지는 실내 무선채널이지만 가산성 백색 가우시안 잡음채널에서의 실험 결과는 실제 전송환경에 대한 성능기준을 제시할 수 있다. 따라서 우선 잡음채널에서 제시된 음성부호화 방법의 평균자승오차를 구하여 적절한 웨이블릿변환 단의 수를 정하였다. 백색 가우시안 잡음채널에서 변환 단의 수에 따른 평균자승오차를 그림 5에 나타내었다.

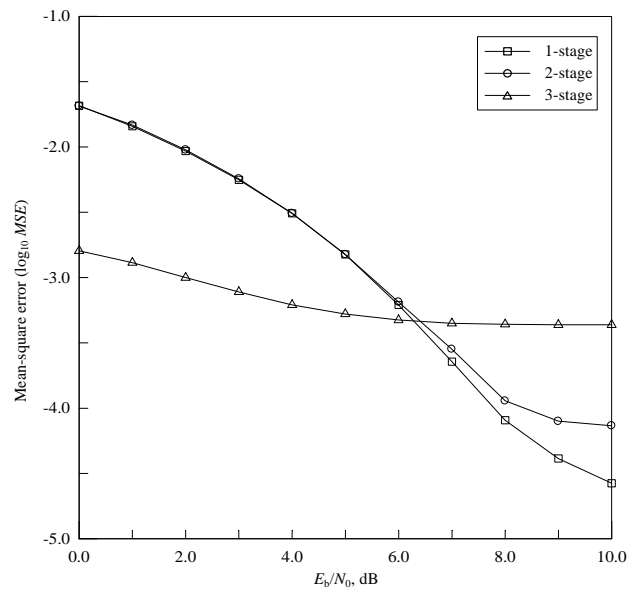


그림 5. 백색 가우시안 잡음채널에서 제시된 음성부호기의 평균자승오차  
Fig. 5. MSE of the presented voice coder in AWGN channel

3단 변환이 적용된 경우 신호 대 잡음비가 4 dB 이상이 되면 신호파형 복구능력이 향상되지 않으며, 평균자승오차는  $10^{-3.2}$  정도에서 거의 고정되는 것으로 나타났다. 따라서 변환 단의 수가 3개인 경우 표 1에 나타낸 압축을 면에서는 가장 우수하지만 음성통신의 품질을 보장하기에는 부적절한 파형 복구능력을 가지는 것으로 판단된다. 이에 비하여 변환 단의 수가 1개와 2개인 경우 신호 대 잡음비가 증가됨에 따라 평균자승오차가 현저히 감소되어  $E_b/N_0 = 10$  dB에서는  $10^{-4.0}$ 보다 훨씬 작아지는 것으로 나타났다. 표 2를 통하여 예상되는 바와 같이 변환 단의 수가 1개인 경우 가장 우수한 성능을 나타낸다. 하지만 이 경우 데이터 세그먼트가 192 바이트 길이의 이진 데이터열로 변환되므로 지그비 기술규격에서 요구되는 페이로드 길이를 크게 초과하는 문제점이 있다. 따라서 압축율과 신호파형 복구능력을 동시에 고려하면 2단 웨이블릿변환을 이용하는 음성부호화 방법이 지그비 기술규격을 만족하는 가장 적합한 방법인 것으로 분석된다.

직선전파경로를 포함하여 6개의 전파경로로 구성된 실내 무선 전송환경에서 라이시안  $K$ 요소에 따른 2단 웨이블릿변환 기반 음성부호화 기법의 평균자승오차를 그림 6에 나타내었다. 직선전파경로 성분의 전력이 충분히 크지 않는 경우 ( $K = 5$  dB), 신호 대 잡음비가 증가되더라도 오차는 거의 감소되지 않는 것으로 나타난다. 따라서 이 경우 복구된 신호파형에 포함된 음성정보를 이해하는 것은 매우 어려울 것으로 예상된다.  $K$ 요소가 10 dB로 증가되면  $E_b/N_0 \geq 21$  dB 영역에서 평균자승오차는  $MSE = 10^{-4.0}$  이하로 작아진다. 이 경우  $E_b/N_0 \leq 18$  dB 영역에서는 다중경로 간섭에 의하여 크게 왜곡된 신호성분이 복구된 신호에 다수 포함되지만 신호 대 잡음비가 24 dB 이상으로 증가되면 이러한 신호들이 현저히 감소될 것으로 예상된다.

직선전파경로 성분이 반사파들에 비하여 충분히 지배적이라 할 수 있는  $K = 15$  dB의 경우  $E_b/N_0 \geq 15$  dB 영역에서 평균자승오차는 백색 가우시안 잡음채널의 경우와 거의 동일한 것으로 나타났다. 이 경우 제시된 부호화 방법에 의하여 복구된 신호파형은 정보원의 신호파형과 거의 동일할 것으로 예상된다. 따라서 이 결과는 무선 센서네트워크에서 지그비를 이용한 음성통신의 만족스러운 성능 보장을

위해서는 직선전파경로 성분이 충분히 지배적이 되도록 센서노드나 릴레이 등의 위치를 정하는 것이 바람직함을 의미한다.

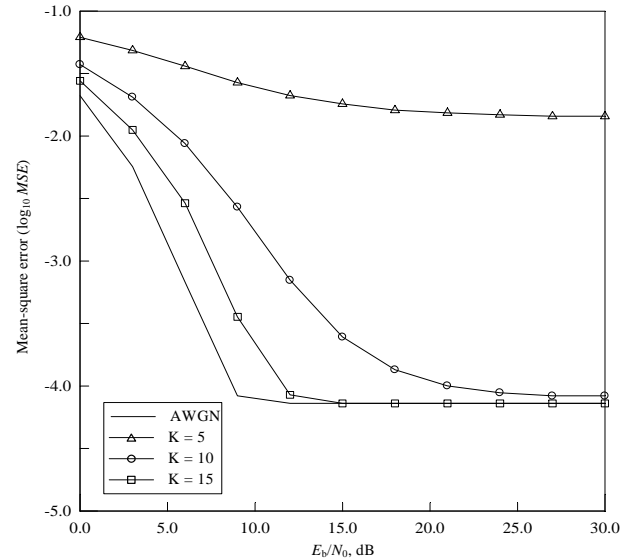


그림 6. 라이시안 채널에서 2단 웨이블릿변환 기반 음성부호화 방법의 평균자승오차  
Fig. 6. MSE of the voice coder with 2-stage DWT in Rician channel

평균자승오차는 정보원의 신호파형과 복구된 파형의 절대적인 차이를 나타내는 유용한 척도이지만 복구된 음성신호의 품질을 나타내기에는 한계가 있다. 따라서 다소 주관적인 요소가 포함될 수는 있지만 복구된 신호파형과 원 신호파형을 직접 비교하는 방법도 효과적이다. 그림 7에 신호 대 잡음비와 라이시안  $K$ 요소의 변화에 따라 복구된 음성신호파형을 비교하여 나타내었다.

제시된 음성부호화 기법의 평균자승오차를 나타내는 그림 6에서 예상된 바와 같이 라이시안  $K$ 요소가 5 dB일 때 복구된 신호파형인 그림 7(a)와 (b)는 잡음신호와 거의 같은 형태로 나타남을 알 수 있다. 이 경우에는 전송신호의 전력을 15 dB 가량 증가시키더라도 복구능력은 전혀 향상되지 않는다. 이에 비하여 직선전파경로 성분의 전력이 반사파 성분의 전력보다 비교적 큰  $K = 10$  dB인 경우  $E_b/N_0 = 15$  dB인 그림 7(c)와 30 dB인 그림 7(d)를 비교하면 신호 대 잡음비가 증가됨에 따라 성능이 현저히 개선되는 것을

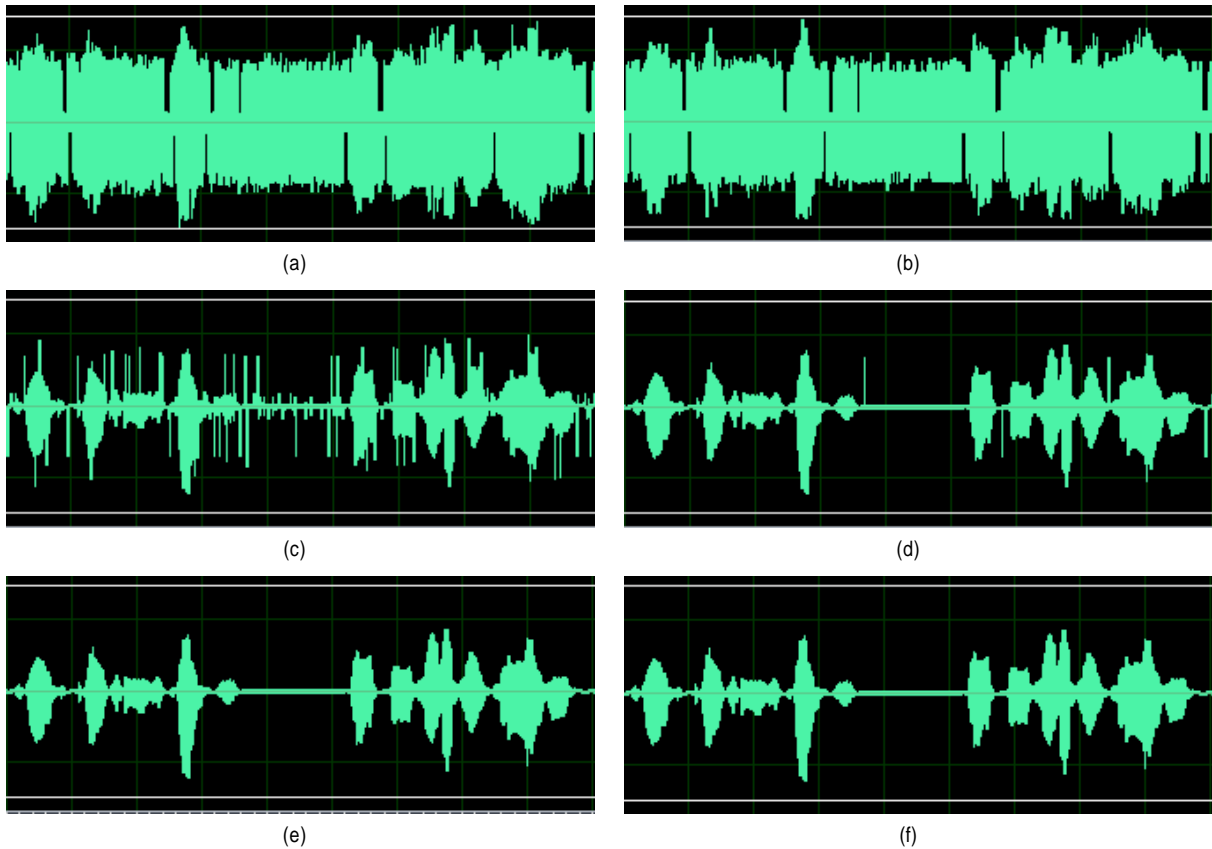


그림 7.  $E_b/N_0$ 와  $K$ 요소의 변화에 따라 복구된 음성신호파형 비교. (a)  $E_b/N_0 = 15$  dB,  $K = 5$  dB (b)  $E_b/N_0 = 30$  dB,  $K = 5$  dB (c)  $E_b/N_0 = 15$  dB,  $K = 10$  dB (d)  $E_b/N_0 = 30$  dB,  $K = 10$  dB (e)  $E_b/N_0 = 15$  dB,  $K = 15$  dB (f)  $E_b/N_0 = 30$  dB,  $K = 15$  dB

Fig. 7. Comparison of the recovered voice waveforms with different  $E_b/N_0$  and  $K$ -factor. (a)  $E_b/N_0 = 15$  dB,  $K = 5$  dB (b)  $E_b/N_0 = 30$  dB,  $K = 5$  dB (c)  $E_b/N_0 = 15$  dB,  $K = 10$  dB (d)  $E_b/N_0 = 30$  dB,  $K = 10$  dB (e)  $E_b/N_0 = 15$  dB,  $K = 15$  dB (f)  $E_b/N_0 = 30$  dB,  $K = 15$  dB

알 수 있다. 하지만 그림 7(d)의 신호파형에서 부분적으로 날카로운 잡음성분이 여전히 관측된다. 직선전과경로 성분이 지배적인 경우에 해당되는  $K = 15$  dB에서 복구된 신호파형인 그림 7(e)와 (f)는 미미한 배경 잡음을 제외하면 정보원의 원 신호파형인 그림 4와 거의 구별할 수 없을 정도로 유사하다. 이는 그림 6에서  $K = 15$  dB인 경우  $E_b/N_0 \geq 15$  dB 영역에서는 제시된 음성부호화 방법의 평균자승오

차가 백색 가우시안 잡음채널의 경우와 거의 차이가 없게 나타나는 실험결과와도 일치한다.

11명의 청취자로 구성된 평가단이 그림 4를 포함한 약 13초 길이의 음성파형을 청취한 후 수행한 주관적인 청취 평가의 결과를 표 3에 나타내었다. 평가점수는 ‘매우 우수(원 신호와의 구별이 어려움)’, ‘우수(구별은 가능하나 이해에 불편함 없음)’, ‘보통(원 신호와는 확연히 구별됨)’, ‘불

표 3. 주관적 청취평가 결과

Table 3. The results of MOS test

|     | AWGN 채널           | Rician 채널                         |                                   |                                   |                                   |
|-----|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|     | $E_b/N_0 = 15$ dB | $K = 10$ dB,<br>$E_b/N_0 = 15$ dB | $K = 10$ dB,<br>$E_b/N_0 = 30$ dB | $K = 15$ dB,<br>$E_b/N_0 = 15$ dB | $K = 10$ dB,<br>$E_b/N_0 = 30$ dB |
| MOS | 4.36              | 1.36                              | 1.90                              | 3.90                              | 4.18                              |



량(청취가 거슬림)', '매우 불량(청취 불가능)'의 5단계에 따라 5 ~ 1점을 부여하였다.

$K = 10$  dB인 경우 복구된 음성파형의 청취가 사실상 불가능한 것으로 조사되었다. 특히, 그림 7(d)의 경우 7(c)에 비하여 현저히 개선되었음에도 불구하고 실제 청취평가에서는 심하게 거슬리는 음질로 평가되었다. 하지만  $K = 15$  dB에서 복구된 음성신호는 상당히 우수한 음질을 가지는 것으로 조사되었다. 특히,  $E_b/N_0 = 30$  dB인 경우 복구된 신호파형에 대한 평가는 가산성 백색 가우시안 잡음채널과 거의 동일한 정도로 원 신호와 구별하기 힘들거나 청취에 전혀 불편함이 없는 것으로 나타났다. 따라서 직선전과경로 성분이 충분히 큰 경우 2단 웨이블릿변환을 이용한 음성부호화 방법은  $E_b/N_0 = 15$  dB인 중간 정도의 신호 대 잡음비에서도 만족할만한 음성통신 서비스를 제공할 수 있을 것으로 분석된다.

## V. 결론

데이터 영역의 길이와 전송전력 등 다양한 제약들로 인하여 저속 무선 개인통신망을 위한 지그비 통신 기술규격에는 음성통신에 대한 기술사양이 전무하다. 본 논문에서는 지그비 통신의 기술적 기반인 IEEE 802.15.4 표준의 물리계층 규격에 적용하여 음성통신 서비스를 제공할 수 있는 음성부호화 방법을 제시하였다. 여기서는 이산 웨이블릿변환을 다단계로 구성하고 저주파 성분과 고주파 성분을 독립적으로 펄스부호변조함으로써 지그비 기술사양에서 요구되는 프레임의 구조와 음성신호 복구능력을 갖도록 하였다.

이론적인 분석과 실내 무선 환경에서의 모의실험 결과 데이터의 압축율과 음성신호 복구능력 면에서 2단 웨이블릿변환을 이용하는 방법이 가장 적절한 것으로 판단된다. 이 경우 블루투스 통신에 비하여 37.5 %만의 데이터를 전송함에도 불구하고 중간 정도의 신호 대 잡음비에서 만족

할만한 신호파형 복구능력을 가지는 것으로 나타났다. 또한 지그비를 이용한 음성통신의 품질을 보장하기 위해서는 다중전과경로가 존재하는 실내 무선채널에서 직선전과경로 성분이 지배적인 영향을 가질 수 있도록 센서노드나 릴레이가 배치되어야 하는 것으로 분석되었다. 따라서 제시된 음성부호화 기법은 향후 저속 무선 개인통신망에서 지그비를 이용한 음성통신의 물리계층 표준을 선정함에 있어 기초적으로 참고 가능한 기술기준이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] IEEE Std. 802.15.1, IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, Piscataway, N.J., June 2002.
- [2] IEEE Std. 802.15.3, IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, Piscataway, N.J., Sep. 2003.
- [3] IEEE Std. 802.15.4, IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, Piscataway, N.J., Sep. 2006.
- [4] IEEE Std. 802.11, IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, June 2003.
- [5] Bluetooth Audio Video Working Group, Generic Audio Video Distribution Profile, Ver. 1.0, May 2003.
- [6] D. Brunelli, M. Maggiorotti, L. Benini, and F. L. Bellifemine, "Analysis of audio streaming capability of Zigbee networks," LNCS, Springer, pp. 189-204, 2008.
- [7] C. Wang, K. Sohraby, R. Jana, L. Ji, and M. Daneshmand, "Voice communications over ZigBee networks," IEEE Commun. Mag., vol. 46, no. 1, pp. 121-127, Jan. 2008.
- [8] ZigBee Alliance Homepage, <http://www.ZigBee.org>.
- [9] P. P. Vaidyanathan, Multirate Systems and Filter Banks, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1993.
- [10] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, Soc. Industrial and Applied Math., Philadelphia, P.A., 1992.
- [11] T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles & Practice, IEEE Press, Piscataway, N.J., 1996.

---

저 자 소 개

---

진 진 흥



- 2002년 8월 ~ 2006년 7월 : 중국 안산과기대학교 전자정보공학과 (공학사)
- 2006년 9월 ~ 2008년 8월 : 경상대학교 대학원 정보소자공학과 (공학석사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 경상대학교 대학원 정보소자공학과 (박사과정)
- 주관심분야 : 무선통신, 디지털 변복조, 센서네트워크

강 석 근



- 1984년 3월 ~ 1988년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
- 1991년 3월 ~ 1993년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 3월 ~ 1999년 8월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 1994년 3월 : 국방과학연구소, 연구원
- 2000년 6월 ~ 2003년 4월 : National University of Singapore, Research Fellow
- 2003년 4월 ~ 현재 : 경상대학교 공과대학 전기전자공학부, 조교수, 부교수
- 2003년 4월 ~ 현재 : 경상대학교 공학연구원, 책임연구원
- 주관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 센서네트워크, 디지털 신호처리