

효율적인 가변차원 하모닉 크기 양자화기법

Efficient Variable Dimension Quantization of Harmonic Magnitude

신 경 진*, 이 인 성*
(Kyung-jin Shin*, In-sung Lee*)

* 충북대학교 전자공학과

(접수일자: 2001년 5월 10일; 채택일자: 2001년 8월 28일)

본 논문은 스펙트럴 크기 파라미터들에 대한 효율적인 가변 차원 양자화 기법을 제안한다. 특히, 하모닉 부호화기에서의 스펙트럴 크기값 계수들은 가변차원이기 때문에 가변 차원의 양자화를 필요로 한다. 따라서, 본 논문에서는 스펙트럴 크기값 계수들에 대해 가변 이산 코사인 변환(DCT: Discrete Cosine Transform) 및 가변 차원에 적합한 훈련구조를 가지는 비정방형 변환 벡터 양자화(NSTVQ: Nonsquare Transform Vector Quantization)를 홀수/짝수 구조 및 분할(Split) 구조 그리고 다단계(Multi-stage) 구조 등과 결합시킨 효율적인 양자화 기법을 제안한다. 제안된 양자화 기법의 성능평가는 스펙트럴의 크기값에 대한 주파수 왜곡(SD: Spectral Distortion) 값을 사용하였으며, 다단계 비정방형 변환 벡터 양자화(MSNSTVQ: Multi-Stage Nonsquare Transform Vector Quantization)가 가장 좋은 성능을 나타내었다.

핵심용어: 가변차원, 양자화기, 하모닉 크기, 이산 코사인 변환

투고분야: 음성처리 분야 (2.2, 2.3)

In this paper, we present a variable dimension vector quantization for spectral magnitudes. Especially, spectral magnitudes of the Harmonic coder, need variable dimension quantizer because those are not fixed dimension. So, this paper present efficient quantization methods. These methods use variable Discrete Cosine Transform (DCT) for spectral magnitude parameters and NSTVQ which is combined odd/even, split and multi-stage structure, proposed quantization methods use Spectral Distortion (SD) for performance measure. Consequently, Multi-Stage Nonsquare Transform Vector Quantization (MSNSTVQ) is the best in performance measure.

Keywords: Variable dimension, Quantizer, Harmonic magnitude, DCT

ASK subject classification: Speech signal processing (2.2, 2.3)

I. 서론

오늘날 이동 통신 시스템에서 가장 문제시되는 것은 통신 시스템의 수용 능력과 서비스 품질(음질)이다. 특히, 음질에 직접적인 영향을 미치는 음성 부호화기에 대한 연구는 전송률을 낮춤과 동시에 음질 향상을 목표로 끊임없이 이루어지고 있으며, 최근 저 전송률 부호화기로 부각되고 있는 하모닉 음성 부호화기는 정현파 모델을 바탕으로, 그 모델 파라미터의 분석 및 양자화 기법에

대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 특히 파라미터의 차원이 가변인 스펙트럴 크기값들에 대한 효율적인 가변 차원 양자화기 설계에 대한 필요성이 요구된다[2]. 이러한 가변 차원 양자화기에 대한 연구는 비트할당을 달리 하는 간단한 방법[3]과 오버 샘플링을 사용하여 고정 차원으로 변환하는 방법[4] 등이 소개되고 있으나, 이러한 방법은 고정 차원으로 만드는 과정에서 왜곡이 발생할 뿐 아니라 효율적이지도 못하다. 따라서 좀 더 효율적인 양자화 방법에 대한 필요성에 의해 본 논문에서는 가변 차원의 양자화 구조 및 훈련 방법을 제안한다.

이 방법은 가변 이산 코사인 변환을 이용한 비정방형 변환 벡터 양자화 방식과 짝수/홀수 구조 및 분할 구조,

책임저자: 신경진 (dusdls@hotmail.com)
361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48
충북대학교 공과대학 전자공학과
(전화: 043-261-3223; 팩스: 043-271-4647)

그리고 다단계 구조를 결합한 혼합 방식을 제안하며 이러한 양자화기들에 대한 구조 및 그 과정을 설명한다. 비정방형 변환 벡터 양자화 방식은 가변 이산 코사인 변환을 사용함으로써 스펙트럴 파라미터들의 에너지 집중도를 높이고 가변 차원에 대해 적합한 코드북 훈련 방법을 제공함으로써 비트효율을 증가시킨다. 이러한 기본 양자화 모델은 실제 하모닉 스펙트럴 파라미터의 저 전송률에 적합한 비트 할당 구조를 필요로 하며, 프레임내의 특성 및 계산량을 고려한 여러 가지 구조를 모색한다.

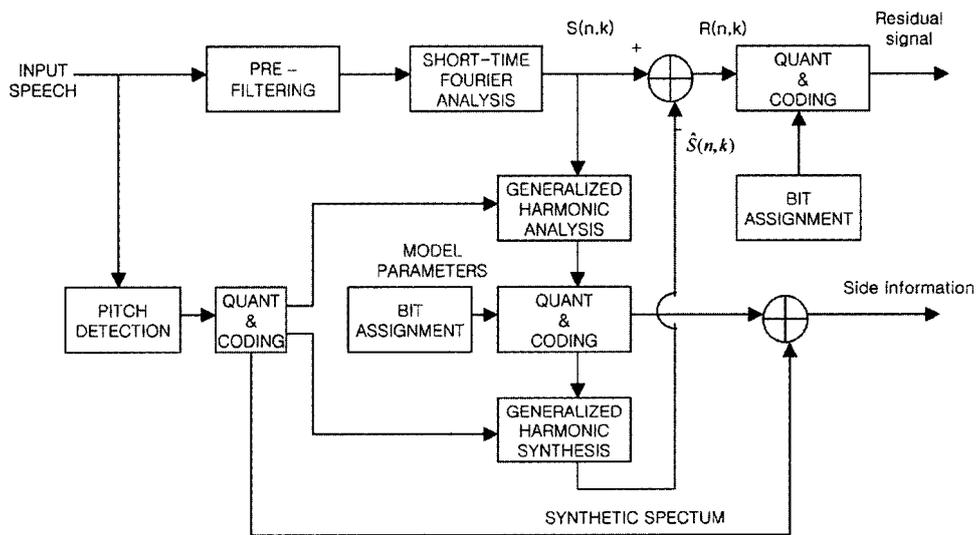
본 논문의 II 장에서는 하모닉 코더의 기본 구조, III 장에서는 양자화 효율을 높이고자 사용한 방법들에 대한 설명, IV 장에서는 각각의 방법들에 대한 성능 분석, 마지막으로 V 장에서는 결론을 맺음으로써 논문을 끝맺고자 한다.

II. 하모닉 코더의 기본구조

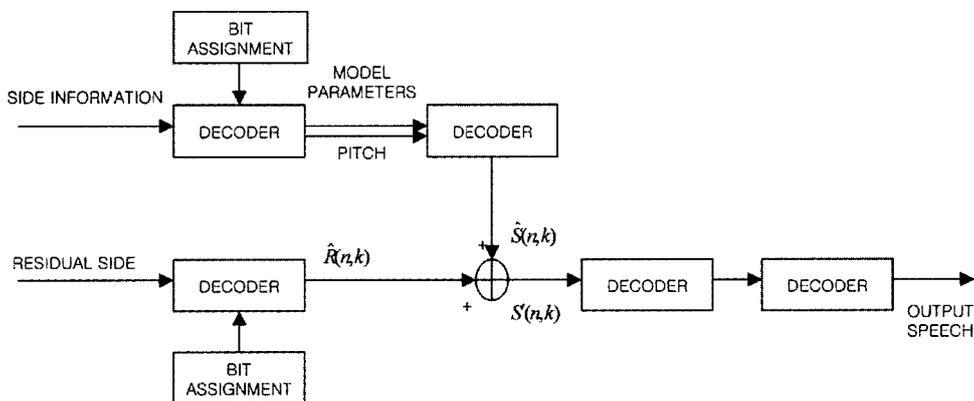
하모닉 부호화기는 음성을 정현파의 합으로 표현하는 정현파 모델을 사용하며, 그 표현 수식은 다음과 같다[5].

$$s(n) = \sum_{i=1}^L A_i \cos(w_i n + \psi_i) \quad (1)$$

여기서 A_i 과 ψ_i 은 주파수가 w_i 인 정현파 성분에 대한 크기와 위상을 나타내며, L 은 정현파형의 갯수를 나타낸다. 유성음 구간에서의 여기신호는 하모닉만으로도 대부분의 음성 신호를 표현할 수 있으므로, 적당한 스펙트럴 기본 모델을 이용하여 근사화시킬 수 있다. 따라서 다음과 같이 선형 위상 합성을 가지는 근사모델을 사용할 수 있다[5].



(a) 부호화기
(a) Encoder



(b) 복호기
(b) Decoder

그림 1. 하모닉 코더의 일반적인 구조
Fig. 1. Structure of Harmonic coder.

$$s^k(n) = \sum_{l=1}^{L_k} A_l^k \cos(\omega_0^k n + \psi^k(l, \omega_0^k, n) + \phi_l^k) \quad (2)$$

여기서 k 와 L_k 는 프레임 번호와 각 프레임당 하모닉 갯수를 나타내며, ω_0^k 는 피치 각주파수를, ϕ_l^k 는 k 번째 프레임, l 번째 하모닉의 이산위상을 나타낸다. 위와는 달리 선형위상인 $\psi^k(l, \omega_0^k, n)$ 는 복호기에서 합성되는 정보로써, 다음과 같이 선형위상을 합성할 수 있다[5,6].

$$\psi^k(l, \omega_0, n) = \psi^{k-1}(l, \omega_0^{k-1}, n) + \frac{(\omega_0^{k-1} + \omega_0^k)}{2} n \quad (3)$$

위의 식에서 알 수 있듯이, 선형위상은 이전 프레임과 현 프레임의 시간에 따른 피치 각주파수를 선형 보간 하여 얻어진다. 인간의 청각 시스템이 위상 연속성이 보존되는 동안 선형 위상에 대해 감각적이지 못하며, 부정확하거나 혹은 완전히 판이한 이산 위상을 허용할 수 있다는 지각적 특성은 저 전송률 코딩에 있어 하모닉 모델의 연속성에 대한 중요한 조건이 된다. 이에 따라, 합성 위상은 측정된 위상을 대체할 수 있게 된다[6].

이와 같은 기본구조를 갖는 하모닉 코더의 블록다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 본 논문에서는 아래 블록다이어그램의 인코더부분 중 푸리에 해석을 거친 $S(n, k)$ 로 하모닉 해석한 계수들을 가지고 양자화를 실시하였다[1].

III. 다양한 구조의 가변 차원 양자화기

가변차원으로 추출되는 스펙트럴 계수값들을 양자화 하기 위하여 이산 코사인 변환 및 비정방형 변환 벡터 양자화 방법이 사용되었다. 또한 양자화 오차를 줄이기 위하여 이산 코사인 변환의 특성을 이용한 짝수/홀수 양자화 방법, 계산상의 복잡도를 줄이기 위한 분할 양자화 방법, 양자화 효율을 최적화시키기 위한 다단계 방법의 양자화 구조들을 사용하여 실험하였다. 각각의 방법에 대한 설명이 아래와 같다. 이때 사용된 계수들은 가변차원으로 추출된 스펙트럴 계수값들에 이산 코사인 변환을 취하고, 양자화시 비정방형 변환 벡터 양자화 방법을 사용하여 양자화한다.

3.1. 비정방형 변환 벡터 양자화기

가변 차원인 하모닉 크기를 양자화함에 있어 계수들에 대한 비트 효율을 높이고자 비정방형 변환 벡터 양자화기를 사용하여 계수들을 양자화한다. 비정방형 변환 벡터

양자화 방법은 다음과 같이 수식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{z}_{opt} = A_p^T \cdot \hat{y} \quad (4)$$

$$A_p = \begin{cases} (\hat{a}_1 \hat{a}_2 \hat{a}_3 \dots \hat{a}_M) & \text{if } N \geq M \\ (\hat{a}_1 \hat{a}_2 \hat{a}_3 \dots \hat{a}_N | 0) & \text{if } N < M \end{cases} \quad (5)$$

여기서 N 은 가변 차원 계수의 갯수를, M 은 비정방형 변환 벡터 양자화에 사용될 제한된 계수의 갯수를, \hat{z}_{opt} 는 트레이닝을 위한 데이터를, \hat{y} 는 스펙트럴 크기 값들을, A_p 는 가변 차원인 \hat{y} 의 에너지 집중률을 높이기 위한 변환 행렬을 뜻하며, 각 원소들은 직교 특성의 기본 함수 값을 나타낸다. 위 식에서 볼 수 있듯이 A_p 는 M 개의 고정 차원의 행렬이며, 기본 변환 함수 계수값의 차원 N 이 M 보다 작을 경우 나머지 부분에 0을 채워주는 행렬이다. 여기서 N 은 스펙트럴 크기 값의 차원을 뜻하며, M 은 훈련시킬 데이터의 차원을 뜻한다. 우리가 사용한 스펙트럴 크기 값들은 각 프레임에서의 피치 주기의 1/2만큼 추출하여 양자화 하였다. 이때 계수들의 최대값은 60으로 제한한다.

여기서 행렬 A_p 를 통해 파라미터들의 변환이 이루어 지는데, 이때 이산 코사인 변환 기본 행렬을 사용한다. 이산 코사인 변환은 파라미터의 에너지 집중효율을 높임으로써 파라미터 특성을 잘 표현하게 해준다. A_p 의 사용을 통해 스펙트럴 크기값들을 이산 코사인 변환하는데 사용된 식은 다음과 같다[7].

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \lambda(k) \cos\left[\frac{(2n+1)\pi k}{2N}\right] \quad (6)$$

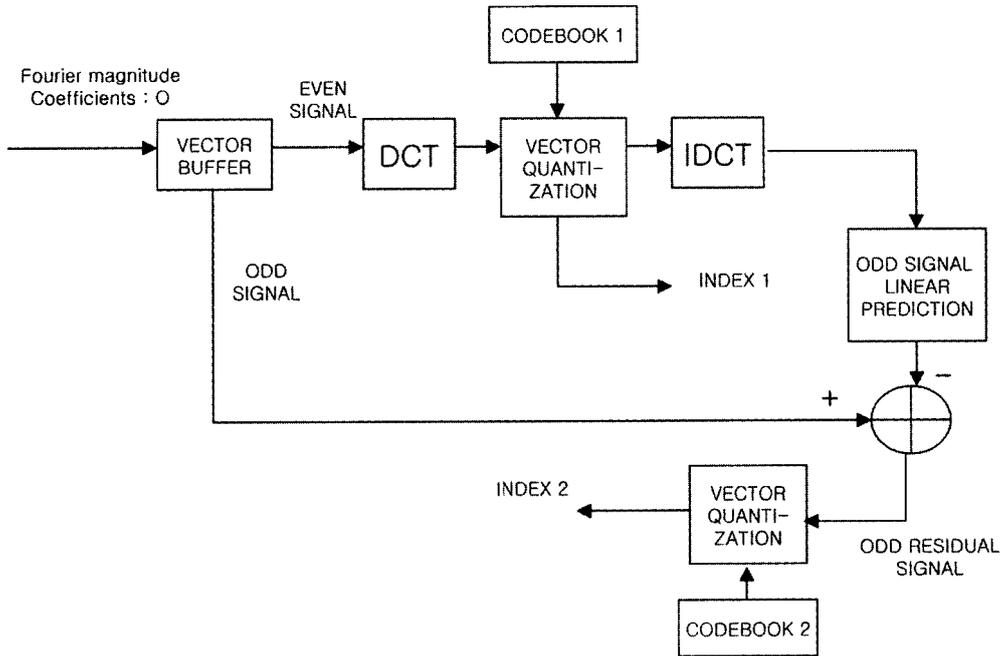
$$\lambda(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & ; k=0 \\ & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $s(n)$ 은 입력 신호를, $S(k)$ 는 이산 코사인 변환 계수를 나타낸다. 비정방형 변환 벡터 양자화 방법에서는 가변차원 계수 값들의 훈련에 사용되는 k 차 코드북의 중심 값인 \hat{c}_k 를 계산하는데 있어 다음과 같은 식을 사용한다.

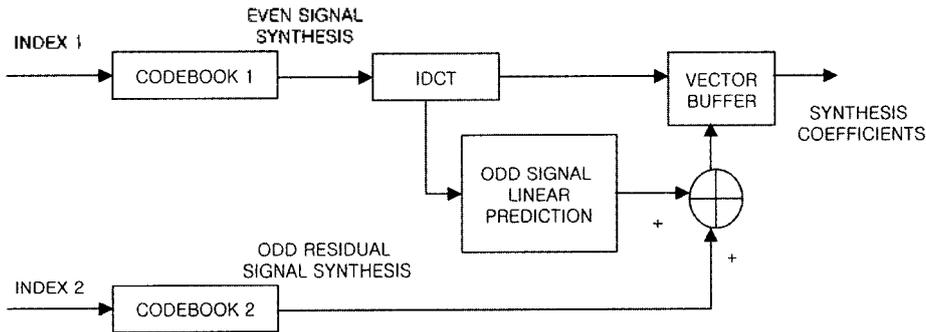
$$\hat{c}_k[n] = \frac{\sum_{i \in S} \frac{1}{N_i} z_i[n] p_i[n]}{\sum_{i \in S} \frac{1}{N_i} p_i[n]} \quad (8)$$

여기서 n 은 1에서 M 의 값을 갖고, $z_i[n]$ 은 1차 훈련 벡터의 n 차 요소이며, $p_i[n]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$p_i[n] = \begin{cases} 1 & \text{if } n \leq \min(N, M) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$



(a) 부호화기
(a) Encoder



(b) 복호기
(b) Decoder

그림 2. 이산 코사인 변환 짝수/홀수 양자화 기법을 이용한 블록도
Fig. 2. Block diagram of the DCT even/odd quantizer.

3.2. 이산 코사인 변환 짝수/홀수 양자화

우선, 변환 후 에너지 집중률이 높고, 가장자리 효과를 줄일 수 있는 이산 코사인 변환의 특성을 잘 표현하면서, 계산의 복잡도를 줄이기 위해 짝수/홀수 방법을 사용하였다[8]. 본 논문에 의한 짝수/홀수 방법은 스펙트럴 크기값 계수들을 그 순서에 의해 짝수/홀수로 나누어 짝수는 이산 코사인 변환을 취하여 양자화하고, 홀수는 선형 예측 오차값을 양자화하는 방법으로 프레임내의 상관성을 이용하였다. 이 방법의 블록도를 그림 2에 나타내었다.

3.3. 전체 이산 코사인 변환 계수의 분할 양자화

다양한 실험과 이론적 고찰을 통해 이산 코사인 변환 계수를 양자화할 경우 전체 계수를 사용하는 것이 가장 양자화 성능이 좋음을 알았다. 이는 이산 코사인 변환의 특성상 에너지 집중률이 높으므로 에너지 집중률이 높은 계수들의 연관성을 살려 양자화하는 것이 효율이 더 높음을 반영하는 것이다. 따라서 전체 스펙트럴 크기값들을 이산 코사인 변환하여, 이산 코사인 변환 계수의 갯수의 1/2 만큼씩 분할 양자화하였다. 이것은 양자화하고자 하는 최대 계수의 갯수가 60차원이라는 것과 60차원에 할당되는 비트수가 10~20비트라는 것에 의해 코드북 탐색시 발생될 복잡도를 고려한 결과이다. 이 분할 양자화의 코드북

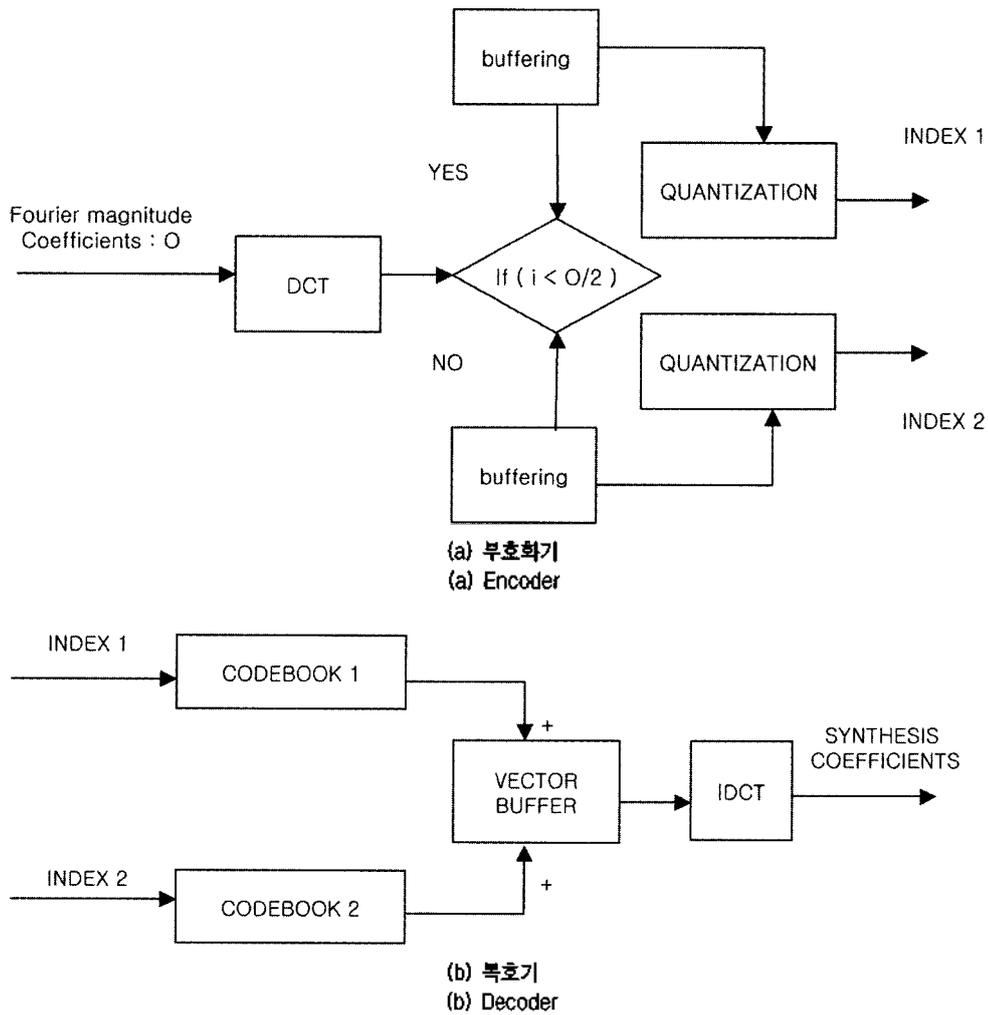


그림 3. 이산 코사인 변환 계수를 분할하여 양자화한 블록도
 Fig. 3. Block diagram of Split quantizer.

크기는 각각 960~15360 개로 $2^{\text{할당된비트}} * 30$ 이다. 그러나 가변양자화기이므로 30개까지 모두 코드북값이 들어 있는 것이 아닌 푸리에 계수의 1/2 만큼만 값이 들어 있게 되고, 나머지는 0으로 채워진다. 따라서 실제 계산량은 주어진 $2^{\text{할당된비트}} * 30$ 의 크기를 갖는 코드북을 탐색할 때 보다 더 줄어들게 된다. 이 방법의 블록도가 그림 3과 같다.

3.4. 대역 분할 이산 코사인 변환 양자화

우리는 양자화의 효율을 높이하고자, 양자화할 계수들인 스펙트럴 크기값들의 특성을 이용하여 양자화를 실시하였다. 그림 4에 스펙트럴 크기값들의 저대역과 고대역에서의 주파수 특성을 고려하여 양자화를 실시한 블록도를 나타내었다. 스펙트럴 크기값들의 특성상 저대역에서는 비슷한 분포를 가지는데 비하여 고대역일수록 노이즈 특성을 따라가므로, 스펙트럴 크기값들을 고대역과 저대역

의 주파수 대역으로 나누어 각각 이산 코사인 변환을 취하고 양자화하였다. 그러나 이 방법은 노이즈 특성을 띄는 고대역의 이산 코사인 변환 결과의 양자화 오차가 심하여 좋은 성능을 나타내지 못하였다.

3.5. 다단계 구조를 이용한 양자화

훈련시킬 데이터를 추출하는 과정에서 최대 사용 가능한 계수의 차원을 60으로 제한하였으나, 시뮬레이션 결과 실제 추출 계수의 차원이 11~41의 범위를 가지며 평균 22-23의 차원으로 계수를 추출하므로 60차원을 사용하더라도 분할 양자화방법이나, 대역 분할 양자화 방법에 비하여 계산상의 복잡도가 크게 증가하지 않으므로 다단계 양자화 방법을 시도하였다. 이때 사용한 다단계의 블록도는 그림 5와 같다. 이 방법은 첫 번째 양자화를 통해 오차가 가장 적은 4개의 후보값을 저장하고 원신호

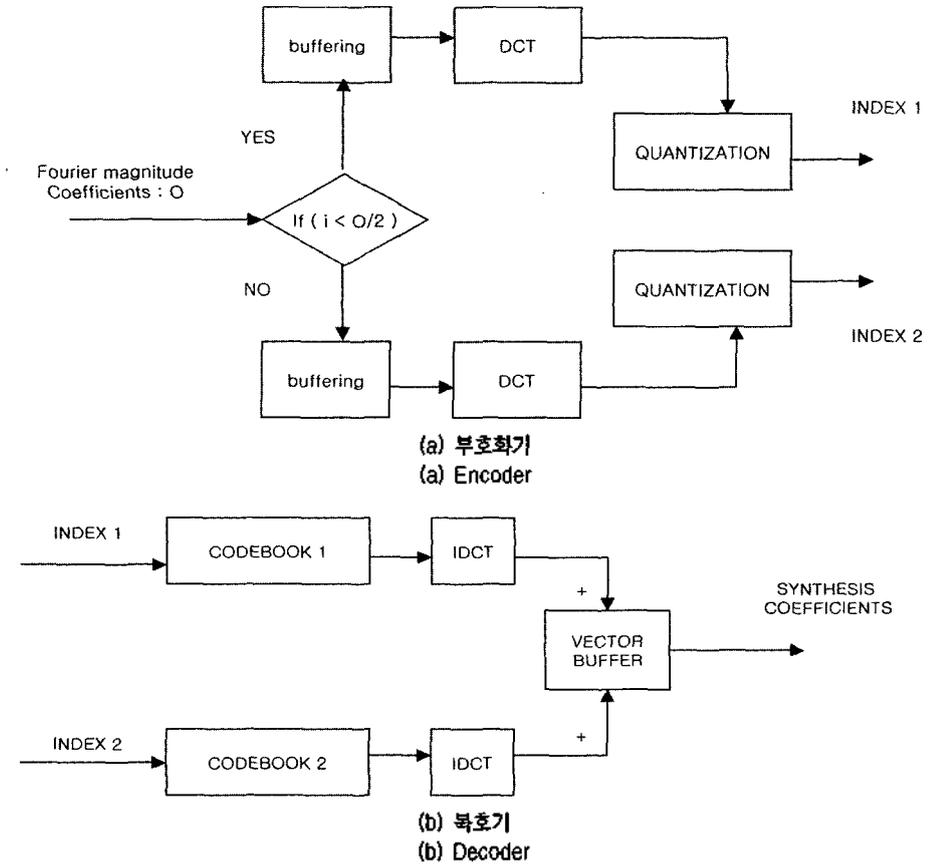


그림 4. 대역 분할 이산 코사인 변환 양자화기
Fig. 4. Block diagram of Two-Band DCT quantizer.

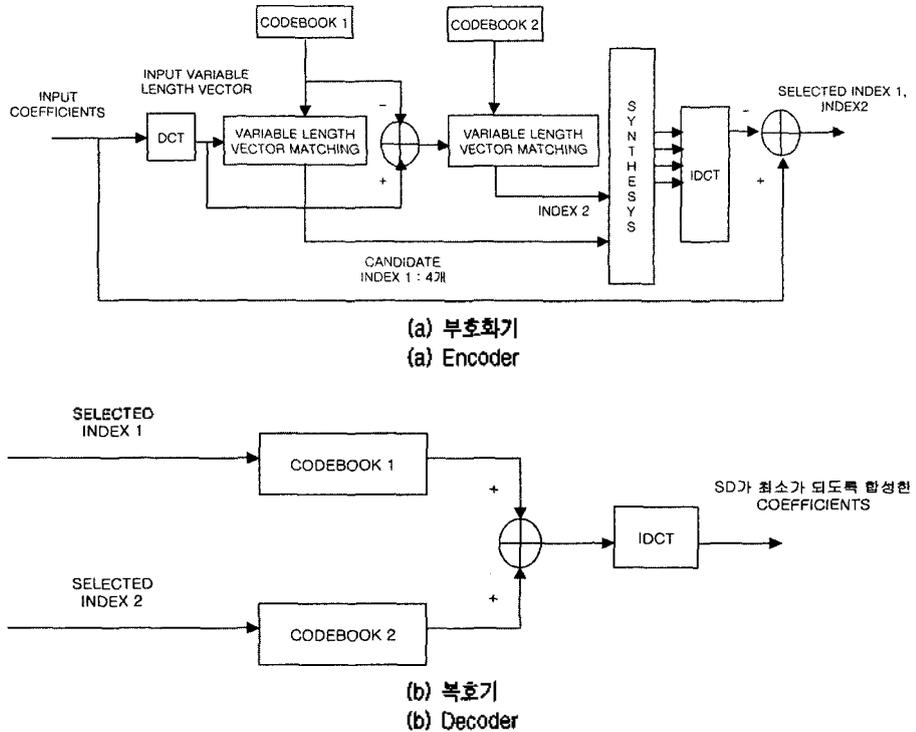


그림 5. 1차 후보값 4개를 사용한 다단계 양자화 블록도
Fig. 5. Block diagram of multi-stage quantizer.

표 1. 주파수 왜곡 시뮬레이션 결과
Table 1. Result of SD.

(단위: dB)

사용방법	비트수	10 (5/5)	12 (6/6)	14 (7/7)	16 (8/8)	18 (9/9)
Melp방법		3.687653	3.574296	3.460099	3.359016	3.262979
전체 DCT Split양자화		3.292603	3.165400	3.050397	2.960289	2.861573
Two-Band DCT 양자화		3.369173	3.234912	3.081944	2.951576	2.833607
Multi-stage 방법		3.131660	2.968705	2.830236	2.678167	2.525682

와 각각의 오차를 다시 한번 양자화함으로써 원신호와의 오차를 최소화하는 인덱스를 찾아 전송한다. 첫 번째 양자화에 사용된 163계수들은 이산 코사인 변환을 취한 스펙트럴 계수값들이며, 두 번째 양자화에 사용된 계수들은 이산 코사인 변환을 취한 스펙트럴 계수값과 양자화시킨 계수값들의 오차값이다. 이 방법은 오차값을 줄이고자 두 번의 양자화를 실시함으로써 앞서 기술된 분할, 대역 분할, 짝수/홀수 양자화 방법에 비해 원신호와의 오차를 줄일 수 있으며, 또한 4개의 후보값을 사용하여 합성 후의 오차값을 가지고 최종 인덱스를 추출하므로 제공된 코드북에서 최적화된 계수들을 추출하여 사용하게 된다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

스펙트럴 크기 양자화 기법의 성능 비교를 위해 하모닉 분석에 혼합 여기 방법을 사용한 U.S. 연방 표준 음성부호화기인 2.4 kbps 멜프 (MELP: Mixed Excited Linear Prediction)의 스펙트럴 크기 양자화 방법을 사용하였다 [5]. 미연방 표준 멜프 음성 부호화기에서는 10개의 스펙트럴 크기 값들에 8비트를 할당하고, 합성 시에는 10개의 푸리에 계수 이외의 값에 1을 채워주는 방법을 사용한다.

따라서, 비트할당의 형평성을 맞추기 위해 10개의 스펙트럴 크기값을 2-stage로 양자화하고, 첫 번째 단계에서 4개의 후보값을 저장하고, 두 번째 단계에서의 양자화를 통해 가장 작은 주파수 왜곡을 갖는 값으로 양자화하였으며, 합성 시에는 10개 이외의 값에 1을 첨가시켜 주파수 왜곡을 측정한다. 사용된 주파수 왜곡은 식 (10)과 같다[9].

$$SD = \sqrt{\frac{1}{i_2 - i_1} \sum_{n=i_1}^{i_2-1} \left[10 \log_{10} \left(\frac{|m[n]|^2}{|m_q[n]|^2} \right) \right]^2} \quad (10)$$

여기서, i_1 과 i_2 는 선택된 하모닉의 주파수 범위이며, $m[n]$ 은 원래의 계수 값을, $m_q[n]$ 은 양자화되고 난 후의 계수 값을 의미한다. 실험 데이터는 한 프레임을 160샘플로 하고, 피치 주기의 1/2만큼 추출된 스펙트럴 크기값들을 사용하였다. 주파수 왜곡 실험 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 보는 바와 같이 다단계 방법은 기존의 멜프 방법보다 약 0.5-0.7dB 이상의 성능 향상을 나타내었다. 이는 가변 이산 코사인 변환 및 훈련 방법과 다단계 양자화 방법에 의한 효과를 증명하는 것이다.

아래 그림 6는 III장에서 설명한 각각의 방법에 대한 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 III장에서 시도된 모든 방법이 기존 멜프 음성 부호화기에 적용된 스펙트럴 크기값을 2-stage로 10개를 사용한 것보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

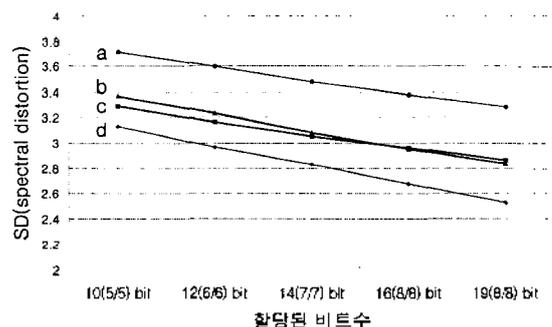


그림 6. 각 방법을 사용하여 얻은 주파수 왜곡 측정값

- a. 멜포 방법
- b. 대역분할 이산 코사인 변환 양자화
- c. 이산 코사인 변환 분할 양자화
- d. 다단계 이산 코사인 변환 양자화

Fig. 6. Result of SD.

- a. MELP quantizer
- b. Two-Band DCT quantizer
- c. Total DCT split quantizer
- d. Multi-Stage DCT quantizer

V. 결론

본 논문에서는 하모닉 코더를 위한 효율적인 스펙트럴 크기 양자화 방법을 제안하였다. 효율적인 양자화를 위해 가변 스펙트럴 크기값을 이산 코사인 변환하여, 비정방형 변환 벡터 방법으로 양자화하였다. 또한 비정방형 변환 벡터 양자화 방법을 각각 짝수/홀수, 분할, 다단계 방법 등과 결합시켜 양자화를 실시하였으며, 실시된 각각의 방법 모두가 기존의 방법보다 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다. 이는 스펙트럴 크기값 양자화시 전체 계수의 연속성을 유지시키는 것이 효율적인 양자화에 있어 중요하다는 것을 나타내는 것이다. 또한 가변차원 계수를 양자화하는 경우 고정된 차원의 양자화기를 사용하기 보다는 가변차원 양자화기를 사용하는 것이 양자화 오차를 줄일 수 있을 뿐 아니라 제한된 비트로 효율적으로 계수를 표현할 수 있도록 하며, 양자화시 발생하는 양자화 오차를 줄이는 것 역시 효율적인 양자화에 있어 중요함을 나타낸다. 결론적으로, 양자화시 양자화 오차를 최소화하고자, 추출된 이산 코사인 변환 계수들을 모두 사용하여 다단계 양자화한 결과가 기존의 방법보다 약 0.5-0.7 dB 이상의 성능 향상을 나타내었으며, 이는 다른 방법에 비하여 가장 좋은 성능 향상을 나타내었다. 따라서, 본 논문에서는 제시된 여러 양자화 방법들 중 다단계 양자화 방법이 실제 음성부호화에 적용될 경우 더 나은 음질향상에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 2000년 대학기초연구지원사업 (과제번호: 1000-0165)의 지원으로 수행된 것임.

참고 문헌

1. E. Shlomot, V. Cuperman and A. Gersho, "Combined harmonic and waveform coding of speech at low bit rates," *ICASSP '98*, pp. 585-588, 1998.
2. Digital Voice Systems, Inmarsat-M Voice Codec, Version 2, Inmarsat, Feb. 1991.
3. A. V. McCree, K. Trung, E. B. George, T. P. Banwell and V. Viswanathan, "A 2.4kbit/s MELP coder candidate for the new U.S. federal standard," *Proc IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 1, pp. 200-203, May 1996.
4. W. B. Kleijn, and K. K. Paliwelli, *Speech Coding and Synthesis* Elsevier, New York, Chap. 4, pp. 121-174, 1995.
5. N. Ahmed, T. Natarajan and K. R. Rao, "Discrete cosine transform," *IEEE Trans. on Computers*, pp. 90-93, January 1974.
6. S. Yeldener, "A 4KB/S toll quality harmonic excitation linear predictive speech coder," *IEEE Int. Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 1, pp. 481-484, 1999.
7. P. Lupini and V. Cuperman, "Nonsquare transform vector quantization," *IEEE Signal Processing letters*, vol. 3, No. 1, pp. 1-3, January 1996.

저자 약력

● 신 경 진 (Kyung-jin Shin)



2000년 2월: 충북대학교 전파공학과 학사
 2000년 3월~현재: 충북대학교 전파공학과 석사과정
 * 주관심분야: 음성신호의 부호화, 음성 신호의 저장 및 전송

● 이 인 성 (In-sung Lee)



1983년 2월: 연세대학교 전자공학과 학사
 1985년 2월: 연세대학교 전자공학과 석사
 1992년 12월: Texas A&M University 전기공학과 박사
 1986년 5월~1987년 7월: 한국 통신 연구 개발단 전임 연구원
 1993년 2월~1995년 9월: 한국 전자통신 연구원 이동통신 기술 연구단 선임 연구원
 1995년~현재: 충북대 전기전자컴퓨터공학부 부교수
 * 주관심분야: 음성 및 영상 신호 압축, 이동통신, 적응필터