논문96-1-1-05

벡터 양자화 신호를 위한 차등적 오류 방지 기법

구 영 모, 이 충 웅

Unequal Error Protection Method for Vector Quantized Signals

Young-Mo Gu and Choong Woong Lee

요 약

차등적 오류 방지는 전송되는 정보에 따라 채널에서 오류가 발생했을 때 미치는 영향이 다른 것을 이용하여 채널 오류에 민감한 정보를 다른 정보보다 강력하게 채널 오류로부터 보호하는 방법이다. 그러나 채널에서 오류가 없다는 가정하에 LBG 알고리듬으로 설계한 벡터 양자화 신호에 차등적 오류 방지를 그대로 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이러한 벡터 양자화 신호의 전송에서 차등적 오류 방지를 적용할 수 있도록 부호 벡터에 체계적으로 이진 인덱스를 割當하는 기법을 제안한다. 또한 제안한 기법을 벡터 양자화한 1차 Gauss-Marcov 신호의 전송에 중요한 정보의 비율을 50%로 하여 적용하였다.

Abstract

In data transmission system, some data are more sensitive to channel errors. Unequal crror protection method increases transmission reliability by protecting channel error sensitive data more than other data. However, this method cannot be directly applied to vector quantized signals which are designed by LBG algorithm that assumes no channel distortion in the design, process. Therefore, in this paper, to apply unequal error protection to vector quantized signals, we propose a method which systematically assigns binary indexes to code vectors. We applied the proposed method to the transmission of vector quantized first-order Gauss-Marcov signals assuming that the percentage of the important data is 50%

I. 서 론

벡터 양자화 기법은 정보 압축률이 매우 높은 소스(source) 부호化 기법으로서 스칼라 양자화 기법에 비해 우수한 성능을 가지며 따라서 현재까지 많은 연구가 있어 왔다. 그러나 압축률이 높은 만큼 채널 오류에 의한 성능 저하가 크다. 이러한 채널 오류에 의한 성능 저하를 막기 위해 여러 가지 방법이 사용되는데 채널 부호화 방법, 오류 은닉 방법, 채널 오류를 고려한 벡터 양자화 부호冊 설계 방법, 채널 오류에 덜 민감하도록 부호 벡터에 이진 인덱스 할당(binary index assignment)하는 방법 등이 있다.

채널 부호化 방법은 효율적인 채널 부호를 이용하여 채널 오류를 감소시키는 방법으로 더 이상의 언급이 필요없을 정도로 잘 알려진 방법이다. 채널 오류 은닉 방법은 비교적 정보의 상관성이 매우 높은 영상 정보의 전송에 사용되는 방법으로서 채널 오류가 발생한 블록을 검출한 후 그 블록을 인접 블록을 이용하여 추정하는 방법이다.[1] 채널 오류를 고려한 벡터 양자화 부호책 설계 방법은 소스 부호化와 채널 부호화 방법을 함께 고려하여 양자화 잡음과 채널 잡음을 동시에 최소화하도록 채널의 오류 확률을 고려하여 부호책을 설계하는 방법이다.[2] 채널 오류에 덜 민감하도록 부호책에 이진 인덱스 할당하는 방법은 부호책을 설계한 후에 符호 벡터 사이의 거리가 부호 벡터에 할당한 이진 인덱스의 해밍

서울대학교 전기공학부
School of Electrical Engineering, Seoul National University

거리와 비례하도록 이진 인덱스를 할당하는 방법으로서 Pseudo Gray Coding[3] 방법과 Simulated Annealing[4] 방법이 있다.

한편 위의 방법들 외에 차등적 오류 방지 기법을 고려할 수 있다. 차등적 오류 방지 기법은 전송되는 정보에 따라 채널에서 오류가 발생했을 때 미치는 영향이 다른 것을 이용하여 채널 오류에 민감한 정보를 다른 정보보다 강력하게 채널 오류로부터 보호하는 것이다. 이 경우 소스 부호기에서 정보를 중요도에 따라 구분하는 작업이 선행되어야 하는데 구조적으로 각 부호語(codeword)에 할당한 이진 인덱스에서 채널 오류가 발생한 비트의 위치에 따른 성능 저하의 영향이 뚜렷한 PCM(Pulse Coded Modulation)과 같은 스칼라 양자화 부호에는 차등적 오류 방지 기법을 쉽게 적용할 수 있다.[5] 그러나 벡터 양자화의 경우에는 각 부호 벡터가 스칼라 양자화의 경우와는 달리 다차원(multidimension)이고 또한 구조적으로도 전송 도중에 부호어에 채널 오류가 발생한 비트의 위치에 따른 성능 저하의 영향이 스칼라 양자화 부호와 같이 균일하지 않다. 부호책을 설계할 때 Splitting Algorithm[6]으로 초기화를 하면 부호어에 할당한 이진 인덱스의 비트위치에 따라 중요도가 달라져 차등적 오류 방지 기법을 적용할 수 있지만[4], 이것은 신호간의 相關 관계가 클 때 유용하다.

본 논문에서는 채널 오류가 없다는 가정 하에 LBG 알고리듬[6]으로 설계한 최적의 벡터 양자화 부호 벡터에 정보를 중요도에 따라 두 가지로 분류하는 차등적 오류 방지에 적합하도록 체계적으로 이진 인덱스를 할당하는 방법을 제시한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 차등적 오류 방지에 적합하도록 부호 벡터에 이진 인덱스를 할당하는 방법을 제시하고, 3장에서는 이를 벡터 양자화한 1차 Gauss-Marcov 신호에 적용한 결과를 보이고, 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 차등적 오류 방지

1. 채널에 의한 왜곡

벡터 양자화 신호의 전송 시스템에서 수신기에서 신호를 복원할 때 채널 오류의 영향을 살펴보면 아래와 같다. 벡터 양자화 하기 전의 신호를 X, 이에 해당하는 신호 벡터 c_i의 이진인덱스를 i라 하고, 수신된 이진 인덱스를 j라고 할 때 전체 평균 왜곡 D_0은 다음과 같다.

$$D_0 = E[d(X, c_j)] \tag{1}$$

平均 제곱 오류(mean squared error)를 가정하면, 위의 全體 平均 歪曲은 벡터 양자화器의 歪曲 D_q와 채널 오류에의 의한 歪曲, D_C의 합, 즉 $D_0 = D_q + D_C$가 되고, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E\| X-c_j\|^2 = E\| X-c_i\|^2 + E\| c_i - c_j\|^2 \tag{2}$$

위 식의 우항 중에서 첫 번째 항은 양자화器에만 의존하는 값이고, 두 번째 항은 채널 특성과 부호 벡터에 대한 이진 인덱스 할당에만 의존한다. 본 논문에서는 부호책이 LBG 알고리듬을 이용한 최적의 양자화기에 의해 설계되었다고 가정하고 차등적 오류방지를 적용하였을 때, 두번째 항을 최소화하는 것을 목표로 한다. 따라서 채널의 오류를 고려한 벡터 양자화[2]와는 달리 채널의 오류가 없을 때는 최고의 성능을 나타낸다.

부호책의 크기가 N일 때 채널 오류에 의한 왜곡, D_C는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_C = \sum_{i=0}^{N-1} P(i) \sum_{j=0}^{N-1} P(j/i) \| c_i - c_j \|^2 \tag{3}$$

이때 $P(i)$는 인덱스 i가 전송될 확률이고, $P(j \mid i)$는 인덱스 i를 전송했을 때 채널 비트 오류에 의해 인덱스 j로 수신될 확률이다. 편의상 N을 2^b이라고 가정하면 이진 인덱스는 각각 b개의 이진 비트로 구성된다. 각각 이진 인덱스 $q \in \{0, 1\}^b$와 $0 \le m \le b$인 m에 대해 이진 인덱스 q로부터 해밍 거리가 m인 이진 인덱스들의 집합 $N^m(q)$를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N^m(q) \doteq \{r \in 0, 1\}^b : H(q, r) = m\} \tag{4}$$

이 때 $H(\cdot, \cdot)$는 해밍 거리 함수이다. $N^m(q)$는 또한 이진 인덱스 q를 전송했을 때 채널에서 m 비트의 오류가 발생했을 때 수신된 이진 인덱스의 집합이다. 예를 들어 $b=4$일 때 이진 인덱스 "0000"에 대한 $N^m(q)$를 구하면 $N^0(0000) = \{0000\}$, $N^1(0000) = \{0001, 0010, 0100, 1000\}$, $N^2(0000) = \{0011, 0101, 1001, 0110, 1010, 1100\}$, $N^3(0000) = \{0111, 1011, 1101, 1110\}$, $N^4(0000) = \{1111\}$이다.

채널은 이진 대칭 채널(binary symmetric channel ; BSC)이고, 비트 오류 확률을 ε라고 가정하면 m비트 오류가 발생할 확률 q_m은 다음과 같다.

$$q_m = \varepsilon^m (1-\varepsilon)^{b-m} \tag{5}$$

채널에서 비트 오류가 발생하는 것을 이진 인덱스 i에 이진 잡음 벡터 η가 exclusive-OR($\oplus$)되는 것으로 볼 수 있으므로 식 (3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$D_c = \sum_{i=0}^{N-1} p(i) \sum_{m=0}^{b} q_m \sum_{\eta \in N^m(0)} \| c_i - c_{i+\eta} \|^2 \tag{6}$$

위 식에서 이진 인덱스 i의 m 비트 왜곡 $C^{(m)}(i)$를 다음과 같이 정의하면,

$$C^{(m)}(i) \doteq p(i) \sum_{\eta \in N^m(0)} \| c_i - c_{i+\eta} \|^2 \tag{7}$$

이진 인덱스 i의 전체 왜곡 $C(i)$는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C(i) = p(i) \sum_{m=1}^{b} q_m C^{(m)}(i) \tag{8}$$

위 식에서 $C^{(0)}$의 값은 0이므로 제외되었다. 식 (8)을 이용하여 채널 왜곡 D_C를 다음과 같이 쓸수 있다.

$$D_C = \sum_{i=0}^{N-1} C(i) \tag{9}$$

채널에서 2 비트 이상 오류가 발생할 확률이 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하면 식 (8)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있고

$$C(i) \approx \varepsilon (1-\varepsilon)^{b-1} C^{(1)}(i) \tag{10}$$

식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_C \approx \varepsilon(1-\varepsilon)^{b-1}\sum_{i=0}^{N-1} C^{(1)}(i) \tag{11}$$

2. 차등적 오류 방지를 위한 이진 인덱스 할당

벡터 양자화한 신호에 차등적 오류 방지를 적용하기 위해서는 부호 벡터에 할당된 이진 인덱스에서 채널 오류가 발생하는 비트의 위치에 따라 성능 저하의 영향이 달라야 한다. 즉 중요한 정보로서 채널 오류로부터 많이 보호되는 비트간의 해밍 거리와 덜 중요한 정보로서 채널 오류로부터 적게 보호되는 비트간의 해밍 거리를 고려할 때 부호 벡터 사이의 유클리드 거리는 전자에 더 크게 비례하도록 이진 인덱스 할당이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 정보를 중요한 정보와 덜 중요한 정보의 두 가지로 나누는 차등적 오류 방지만을 다루기로 한다. 차등적 오류 방지를 적용하여 상위 p 비트를 중요한 정보, 하위 $b-p$ 비트를 덜 중요한 정보를 분류하여 각각의 비트 오류 확류를 다르게 하면 $N^{(m)}(q)$를 $N^{(m)}_1(q)$와 $N^{(m)}_2(q)$의 두 가지로 분리하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$N^{(m)}_1(q) \doteq \{r\in\{0,1\}^p : H_1(q,r)=m,\},\ 0\le m\le p,$$
$$N^{(m)}_2(q) \doteq \{r\in\{0,1\}^b : : H_2(q,r)=m,\},\ 0\le m\le b-p, \tag{12}$$

이 때 $H_1(\cdot,\ \cdot)$는 상위 p 비트에서의 해밍 거리 함수이고, $H_2(\cdot\ ,\ \cdot)$는 하위 $b-p$ 비트에서의 해밍 거리 함수이다. 예를 들어 $b=4$이고 $p=2$일 때 이진 인덱스 "0000"에 대한 $N^1_1(q)$를 구하면 $N^1_1(0000)=\{0100,\ 1000\}$이고, $N^1_2(q)$를 구하면 $N^1_2(0000)=\{0001,\ 0010\}$이다. 이를 이용하면 차등적 오류 방지를 적용하였을 경우의 채널 왜곡 D^{UEP}_C는 식(11)을 고쳐 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D^{UEP}_C \approx \varepsilon_1(1-\varepsilon_1)^{p-1}(1-\varepsilon_2)^{b-p}\sum_{i=0}^{N-1} C^{(1)}_1(i)$$
$$+(1-\varepsilon_1)^p\varepsilon_2(1-\varepsilon_2)^{b-p-1}\sum_{i=0}^{N-1} C^{(1)}_2(i) \tag{13}$$

이 때 ε_1은 중요한 정보의 채널 비트 오류 확률이고, ε_2는 덜 중요한 정보의 채널 비트 오류 확률이다. 또한 $C^{(1)}_1(i)$과 $C^{(1)}_2(i)$는 각각 다음과 같다.

$$C^{(1)}_1(i) \doteq p(i)\sum_{\eta\in N_{1(0)}} \| c_i - c_{i\oplus\eta}\|^2 \tag{14}$$

$$C^{(1)}_2(i) \doteq p(i)\sum_{\eta\in N_{2(0)}} \| c_i - c_{i\oplus\eta}\|^2$$

식 (13)에서 $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$라고 가정하면 식 (13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D^{UEP}_C \approx \varepsilon_2(1-\varepsilon_2)^{b-p-1}\sum_{i=0}^{N-1} C^{(1)}_2(i) \tag{15}$$

식 (11)은 차등적 오류 방지를 하지 않은 경우의 채널 왜곡 함수이고, 위 식(15)는 차등적 오류 방지를 적용한 경우의 채널 왜곡 함수이다. 특히 서론에서 언급했듯이 벡터 양자화할 때 초기화를 위해 사용하는 Splitting Algorithm으로 이진 인덱스 할당을 하면 차등적 오류 방지를 적용했을 때 채널 왜곡을 크게 감소시킬 수 있다. 그러나 이것은 최소화된 채널 왜곡 함수가 아니다. 따라서 본 논문에서는 식 (15)의 D^{UEP}_C를 최소화하기 위하여 부호 벡터에 새롭게 이진 인덱스 할당을 하는데 식 (15)에서 $\varepsilon_2(1-\varepsilon_2)^{b-p-1}$는 이진 인덱스 할당과는 무관하므로 다음의 식을 최소화하는 것만으로도 충분하다.

$$D^{UEP}_C \doteq \sum_{i=0}^{N-1} C^{(1)}_2(i) \tag{16}$$

위 식을 최소화할 때는 채널 비트 오류 ε_2에 의존하지 않으므로 최소화한 결과는 임의의 BSC에 적용할 수 있다.

식 (16)의 D^{UEP}_C를 최소화하기 위한 이진 인덱스 할당 방법으로 본 논문에서는 Pseudo Gray Coding[4]에서 사용된 Binary Switching Algorithm(BSA)를 사용한다. BSA를 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 모든 i에 대해 $C^{(1)}_2(i)$를 구한 후 그 값이 최대가 되는 i를 선택한다. 그 다음 결정된 i를 나머지 이진 인덱스 $j(\neq i)$와 교환하였을 때 D^{UEP}_C가 가장 크게 감소하는 j를 선택하여 i와 j를 교환한다. 위의 과정을 더 이상 D^{UEP}_C가 감소하지 않을 때까지 반복한다. BSA는 국부적인 최소값(local minimum)으로 수렴하는 것으로 알려져 있다.[4]

다음 장에서는 제안한 차등적 오류 방지 기법을 벡터 양자화한 1차 Gauss－Marcov 신호에 적용한다.

Ⅲ. 실험 결과

본 논문에서는 벡터 양자화한 1차 Gauss－Marcov 신호에 제안한 차등적 오류 방지 기법을 적용하여 실험을 하였다. 벡터 양자화 부호책 설계에는 LBG 알고리듬을 이용하였는데 초기화에는 Splitting Algorithm을 이용하였다. 실험에 사용한 1차 Gauss－Marcov 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x_n = \rho x_{n-1} + w_n \tag{17}$$

이때 w_n은 평균이 0이고 분산이 1인 백색 가우스 잡음 신호(white Gaussian noise process)이고, ρ는 상관계수이다. 1차 Gauss－Marcov 신호 x_n의 분산 σ_x^2은 다음과 같다.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{1-\rho^2} \tag{18}$$

실험은 중요한 정보의 비율을 50%로 하여 상위 50%의 비트에는 채널 비트 오류가 없다고 가정한 후 상관계수의 영향, 신호 벡터의 차원(vector dimension)의 영향, 부호책의 크기의 영향을 알아보기 위하여 행해졌다. 채널은 BSC를 가정하였다. 실험 결과

는 채널의 비트 오류 확률(10^{5}~10^{1})에 대한 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio ; SNR)로 나타내었고 실험 결과는 그림 1에 나타내었다. 신호대잡음비는 다음의 식으로 계산하였다.

$$\mathrm{SNR(dB)} = 10\log_{10}\frac{\sigma_x^2}{D_0} \tag{19}$$

이때 D_0는 양자화 왜곡과 채널 왜곡을 합한 전체 왜곡이다. 그림 1(a)는 상관계수=0, 벡터의 차원=4, 부호책 크기=64

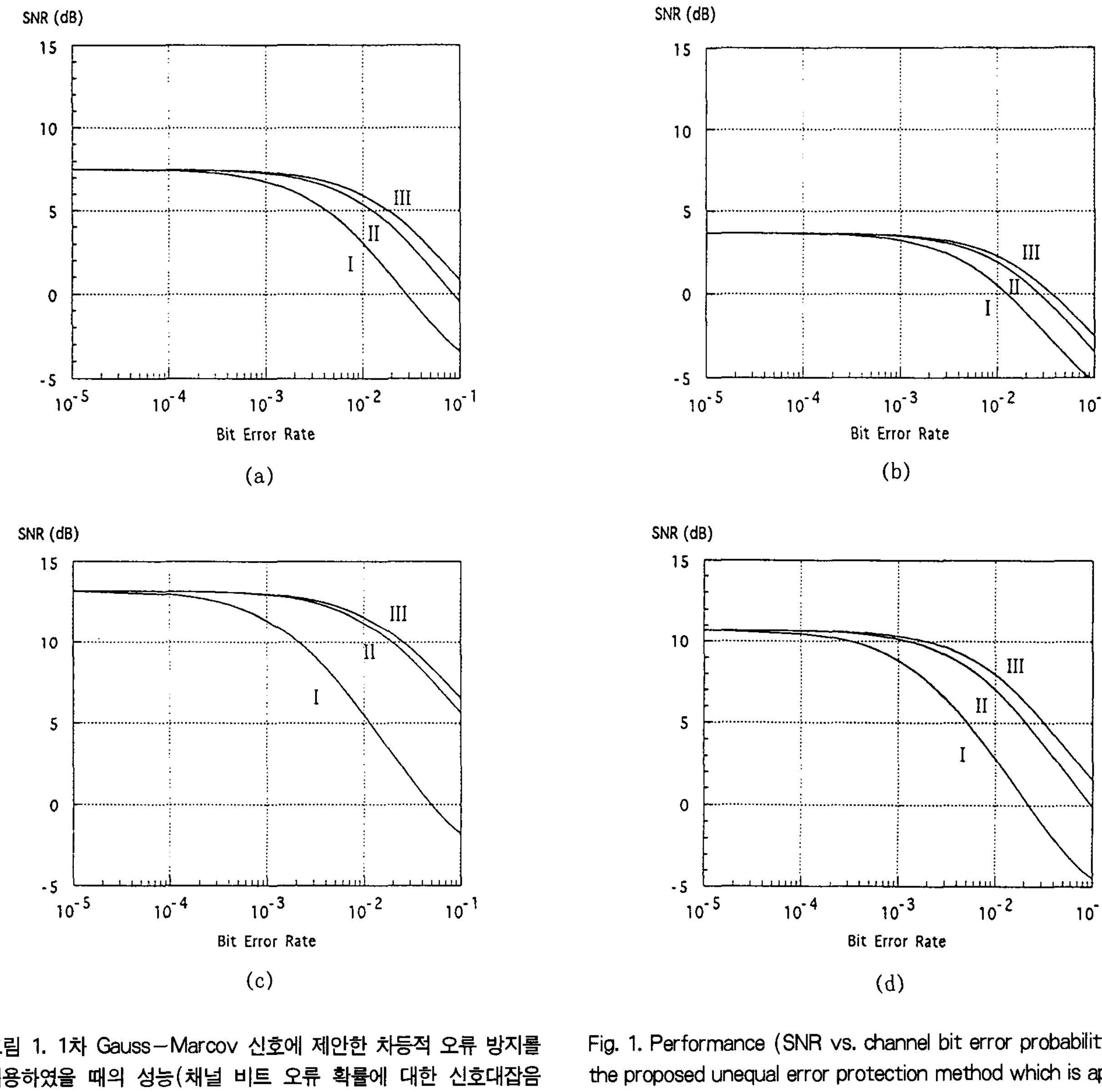

그림 1. 1차 Gauss-Marcov 신호에 제안한 차등적 오류 방지를 적용하였을 때의 성능(채널 비트 오류 확률에 대한 신호대잡음비). I-차등적 오류 방지를 적용하지 않은 경우, II-Splitting Algorithm으로 이진 인덱스 할당한 경우, III-제안한 차등적 오류 방지 기법을 적용한 경우, (a) 부등책 크기=64, 벡터 차원=4, 상관계수=0, (b) 부호책 크기=64, 벡터 차원=4, 상관계수=0.9, (c) 부호책 크기=64, 벡터 차원=8, 상관계수=0. (d) 부호책 크기=256, 벡터 차원=4, 상관계수=0.

Fig. 1. Performance (SNR vs. channel bit error probability) of the proposed unequal error protection method which is applied to vector quantized first-order Gauss-Marcov signals. I-without unequal error protection, II-unequal error protection with binary index assignment by Splitting Algorithm, III-unequal error protection with binary index assignment by the proposed method. (a) codebook size=64, vector dimension=4, ρ=0.9, codebook size=64, vector dimension=8, ρ=0 (d) codebook size=256, vector dimension=4, ρ=0.

의 경우이다. Ⅰ은 차등적 오류 방지를 하지 않은 경우이고, Ⅱ는 차등적 오류 방지를 적용하였지만 Splitting Algorithm으로 이진 인덱스 할당을 한 경우이고, Ⅲ은 제안한 차등적 오류 방지 기법을 적용한 것으로서 식 (16)을 최소화하도록 부호책에 이진 인덱스의 할당을 한 경우이다. Ⅱ, Ⅲ의 차등적 오류 방지를 적용한 경우는 중요한 정보로 분류한 이진 인덱스의 상위 3비트에는 채널 오류가 없다고 가정했으므로 당연히 차등적 오류 방지를 하지 않은 경우보다 SNR이 크지만, Ⅱ와 Ⅲ을 비교하면 제안한 차등적 오류 방지 기법을 적용함으로써 Splitting Algorithm으로 이진 인덱스 할당한 것보다 추가적인 SNR의 이득을 얻었다. 그림 1(b)는 상관계수=0.9로 그림 1(a)와는 상관계수만 다르고 나머지 조건은 같다. 그림 1(a)의 결과와 비교하면 상관계수가 클수록 차등적 오류 방지를 함으로써 얻는 SNR의 이득은 커지지만, Ⅱ와 Ⅲ을 비교하면 제안한 차등적 오류 방지 기법을 적용함으로써 얻는 추가적인 SNR의 이득은 상대적으로 감소한다. 예를 들면 채널 비트 오류 확률이 10^{-1} 이상일때 상관계수가 0일 때의 추가적인 SNR의 이득은 1.4dB이지만, 상관계수가 0.9일 때는 0.9dB이다. 이것은 서론에서도 언급했듯이 상관계수 크면 Splitting Algorithm으로 이진 인덱스 할당을 해도 어느 정도는 차등적 오류 방지에 적합하게 인덱스 할당이 되기 때문이다. 그림 1(c)은 그림 1(a)에서 벡터 차원만 8로 커진 것이고 그림 1(d)는 그림 1(a)에서 부호책의 크기만 256으로 커진것인데, 벡터 양자화에서 벡터의 차원이 클수록, 부호책의 크기가 클수록 채널 왜곡의 영향은 차등적 오류 방지를 하거나 하지 않거나 증가하며 제안한 차등적 오류 방지를 함으로써 얻는 추가적인 이득은 그림 1(a)의 경우와 비슷하다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 벡터 양자화 신호를 위한 차등적 오류 방지 기법을 제안하였다. 채널의 비트오류 확률을 고려하지 않은 상태에서 LBG 알고리듬으로 최적화 설계된 벡터 양자화한 신호의 전송에서, 정보를 중요도에 따라 두 가지로 분류하여 차등적 오류 방지를 하는 경우 채널 비트 오류에 의한 채널 왜곡 함수를 새롭게 정의하였고, 이 채널 왜곡 함수를 최소화하도록 부호 벡터에 이진 인덱스를 할당하는 데는 BSA를 이용하였다. 중요한 정보의 비율을 50%로 하고 제안한 기법을 벡터 양자화한 1차 Gauss-Marcov 신호의 전송에 적용한 결과 상관계수가 0일 때 채널 비트 오류 확률이 10^{-1} 이상에서 단순히 벡터 양자화의 초기화에 이용되는 Splitting Algorithm으로 이진 인덱스 할당한 것보다 1.4dB의 추가적인 SNR 이득을얻었다. 추가적인 SNR 이득은 상관계수가 클 때보다 작을 경우에 더욱 크다.

본 논문에서는 제안한 기법을 벡터 양자화한 1차원 Gauss-Marcov 신호에만 적용하였으나 제안한 기법은 임의의 벡터 양자화 신호에 적용할 수 있다. 또한 채널 왜곡 함수를 최소화하도록 부호 벡터에 이진 인덱스를 할당하는 것은 채널 비트 오류 확률과 무관하므로 채널 비트 오류 확률이 변하여도 새롭게 이진 인덱스 할당을 할 필요가 없는 장점이 있다.

참 고 문 헌

[1] Y. Wang and Q. Zhu, "Signal loss recovery in DCT-based image and video codecs", *SPIE Proc. Visual Communications,* Boston, Massachusetts, Nov. 1991.

[2] N. Farvardin and V. Vaishampayan, "On the performance and complexity of Channel-optimized vector quantizers," *IEEE Trans. Infornm. Theory,* vol. IT-37, no. 1, pp.155-160, Jan. 1991.

[3] N. Farvardin, "A study of vector quantization for noisy channels," *IEEE Trans. Inform. Theory,* vol. IT-36, no. 4, pp. 799-809, July 1990.

[4] K. zeger and A. Gersho, "Pseudo-gray coding," *IEEE Trans. Commun,* vol. COM-38, no. 12, 2147-2158, Dec. 1990.

[5] A. Shiozaki, "Unequal error protection of PCM signals by self-orthogonal convolutional codes," *IEEE Trans. Commun.,* vol. COM-37, no. 3, pp. 289-290, March 1989.

[6] Y. Linde, A. Buzo, and R. M. Gray, "An algorithm for vector quantizer dsign," *IEEE Trans. Commun.,* vol. COM-28, pp.84-95, Jan. 1980.

저 자 소 개

李 忠 雄
1935년 5월 3일생.
1958년 3월 서울대학교 전자공학과 졸
1960년 9월 서울대학교 대학원 전자공학과 졸(석사)
1972년 7월 동경대학 대학원 공학박사 취득
1988년 1월 ~ 1988년 12월 대한 의용생체공학회 회장
1989년 1월 ~ 현재 IEEE Fellow
1991년 6월 ~ 현재, 서울대학교 뉴미디어통신공동연구소 소장
1995년 7월 ~ 현재 한국과학기술 한림원 종신회원
1996년 10월 ~현재 서울대학교 공과대학 교수