

## 오류 정정 부호가 결합된 채널 최적 양자화기를 이용한 DCT 영상 전송 방식의 설계

正會員 金 鐘 洛\* 正會員 朴 峻 成\*\* 正會員 金 泰 正\*\*\*

### On the Design of a DCT Transmission Method using Channel Optimized Quantizer Combined with Error Correcting Codes

Jong Lak Kim\*, Jun Seong Park\*\*, Tae Jeong Kim\*\*\* *Regular Members*

#### 요 약

이 논문에서는 채널 오류에 강한 영상 전송 시스템을 설계하기 위하여 정보원 부호와 오류 정정 부호(error correcting code : ECC)를 결합시키는 부호화 기법을 제안한다. 정보원과 채널을 동시에 고려하는 부호화기법중의 하나는 채널 최적 양자화기(channel optimized quantizer : COQ)인데 이것은 양자화에 의한 잡음과 채널 비트 오류에 의한 잡음을 동시에 최소화시킨다. 이 논문은 COQ와 ECC를 결합하여 개선된 전송 시스템을 설계하는 문제를 다룬다. 특히  $n$ 비트의 COQ와  $(n-1)/n$ 의 길쌈 부호가 결합된  $n-1$  비트의 COQ의 성능을 계산하여, 이 결과로부터 할당 비트수와 채널 비트 오류율에 따라 ECC를 선택할 것인지 아닌지를 결정한다. 그리고, 이 결과를 DCT를 이용한 영상 전송 시스템에 적용하고 그 성능을 계산한다.

#### Abstract

In this paper we propose a coding scheme which combines source codes and error correcting codes in order to be robust to channel noise. One of the coding schemes that take into account both the source and the channel is the channel optimized quantizer (COQ) which simultaneously minimizes quantization noise and the noise due to channel errors. This paper deals with the problem of combining channel optimized quantizers with ECC to build an improved system. To be specific, we computed the performance of an  $n$  bit COQ and that of an  $n-1$  bit COQ followed by an  $(n-1)/n$  punctured convolutional code. From this result whether or not the ECC are selected is determined by the number of allocated bits and the channel bit error rate. These results are applied to the image transmission method using DCT, and the system performances are evaluated.

\*大宇電子 영상통신연구소

\*\*韓國通信 研究開發團

\*\*\*서울대학교 電子工學科

論文番號 : 93-164

## I. 서 론

영상 신호는 화소간에 큰 상관 관계를 갖고 있기 때문에 송신단에서 중복성을 충분히 제거하여 고압축률의 부호화를 할 수가 있다. 그러나 채널에 잡음이 있어 전송 신호에 오류가 생길 경우, 중복성이 제거되었기 때문에 그 신호에 해당되는 화소뿐만 아니라 주위 화소에도 오류가 전파되어 나타나므로 복원 화질이 크게 나빠지게 된다. 따라서 송신단에서는 데이터 압축을 위한 정보원 부호화와 채널 오류에 대한 보호를 위한 채널 부호화를 함께 해주어야 한다.

Shannon의 이론에 따르면 정보원 부호화와 채널 부호화를 분리하여 생각함으로써 최적의 성능을 갖는 전송시스템을 설계할 수 있다[1]. 그러나 정보원 부호화와 채널 부호화를 분리해서 시스템을 설계하면, 원하는 데이터 압축과 오류 정정 성능을 얻기 위해서는 부호기와 복호기를 경우에 따라 대단히 복잡하게 만들어야 한다. 실제의 경우 시스템을 지나치게 복잡하게 만들 수는 없으므로 정보원 부호화와 채널 부호화를 분리해서 설계하는 것은 이론적으로만 가능한 경우가 많다. 따라서 부호기와 복호기의 복잡도를 실현 가능한 정도로 유지하며 통신 시스템의 성능을 높일 수 있는 방안이 연구되었는데, 이는 정보원 부호화와 채널 부호화를 결합하여 설계하는 방법이다.

정보원-채널 결합 부호화 방법은 몇가지로 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 전체 전송 비트율을 정보원 부호화와 채널 부호화에 할당할 때 정보원 부호화의 정밀도와 채널 부호화에 의한 비트 보호 능력의 적절한 절충을 구하여 최적 할당량을 결정하는 것이다. Modestino와 Daut는 DPCM을 이용한 영상 전송에서 채널 신호 대 잡음비에 따라 주어진 전송 비트율을 정보원 부호화와 채널 부호화에 적당히 할당함으로써 채널 잡음에 강한 전송 방식을 제안하였으며[2], Vickers와 함께 이를 구획 DCT를 이용하는 영상 전송 방식에도 적용하였다[3]. 비트 할당에 의한 정보원-채널 결합 부호화 방법에 대한 연구는 최근에도 많이 진행되고 있는데, Tanabe와 Farvardin은 대역 분할 부호화를 이용한 영상 전송 시스템에서의 정보원-채널 결합 부호화를 연구하였고[4], Perkins와 Offer는 나무구조 벡터 양자화기를 이용한 영상 전송 시스템에 대한 연구를 하였다[5]. 또 하나의 정보원-채널 결합 부호화 방법은 정보원 부호화시 사용되는 양자화기 등 부호기를 구성하는 요소들을 설계할 때 채널 오류의 영향을 고려하여 가장 이에 둔감하도록

설계하는 방법이다. 이 방법은 채널 부호화에 비트를 할당하지 않고도 채널 오류에 강한 전송 시스템을 만들 수 있다는 장점이 있다. 하지만 그 성능에 한계가 있고, 채널에 대한 정보가 정확하지 않을 경우 성능이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 이 방법 중 대표적인 것은 Farvardin과 Vaishampayan이 제안한 채널 최적 양자화기(channel optimized quantizer : COQ)이다[6]. Lloyd-Max 양자화기[7,8]가 주어진 정보원 분포에 대해 평균 자승 오차가 최소인 양자화기라면, COQ는 정보원 분포와 채널 오류를 함께 고려하여 설계되어 전체적인 평균 자승 오차가 최소인 양자화기이다. Vaishampayan과 Farvardin은 이들을 구획 DCT변환을 이용한 전송 방식에도 적용하는 방법도 연구하였다[9]. 한편 최근에는 채널 최적 벡터 양자화기에 대한 연구도 Farvardin, Vaishampayan에 의해 이루어졌으며[10,11], Miller와 Rose는 deterministic annealing을 이용하여 정보원-채널 결합 벡터 양자화기를 설계하는 방법[12]에 대해 연구하였다. Ayanoglu와 R.M.Gray는 trellis 부호기를 채널 최적화하였고[13], Soleymani와 Morgera는 벡터 trellis 양자화기를 채널 최적화하여 이를 영상 부호화에 이용하였다[14]. 한편 실제 전송할 때 사용되는 신호 집합도 채널 잡음을 고려하여 설계하면 보다 효율적인 전송 방식을 만들 수 있다.

이 논문에서는 위에서 설명한 두가지 부호화 방법을 함께 고려한 정보원-채널 결합 부호화 방법에 대해 제안하고자 한다. Farvardin 등은 주어진 준위(level)수의 양자화기를 설계할 때 채널 잡음 오류를 고려하여 설계함으로써, 채널 부호화를 하지 않고도 채널 오류에 강한 양자화기를 설계하였다. 이 COQ의 양자화 결과를 채널 부호화 즉 오류 정정 부호화(error correcting code : ECC)를 하게 되면 채널에서의 평균 비트 오류율이 달라지므로 COQ의 설계도 달라지게 된다. 전체 할당된 비트를 모두 COQ에 할당하는 경우와 그중 한 비트를 채널 부호화에 할당한 경우 나타나는 성능의 차이를 비교하고, 선택적으로 채널 부호화를 함으로써 전체 성능을 최적화할 수 있다. 또 이 결과를 DCT변환, 또는 대역 분할 부호화를 이용하는 실제 영상 전송 방식에 적용하면 채널 오류에 강한 전송 방식을 만들 수 있다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 COQ에 대해 간단히 소개하고, 3절에서는 이 논문에서 사용한 ECC를 설명한다. 4절에서는 ECC와 결합되어 설계되는 COQ를 다루고 5절에서는 DCT 부호화의 최

적 비트 할당과 양자화에 대해 설명한다. 6절에서는 실험 결과와 그에 대한 검토를 제시하고, 마지막으로 7절에서 결론을 맺는다.

## II. 채널 최적 양자화기(COQ)

Lloyd-Max 양자화기는 주어진 확률분포에 대해서 평균 양자화 일그러짐(distortion)을 최소로 하는 양자화기이다[7,8]. 그러나 채널 오류가 존재하는 상황에서는 전송된 이진부호가 비트 오류를 겪게되므로 양자화값이 바뀌어 일그러짐이 발생하게 된다. 이러한 환경에서는 기존의 Lloyd-Max 양자화기가 더 이상 최적의 성능을 보장할 수 없게 되고 이 문제를 해결하기 위해서 양자화기의 설계시 채널 오류를 고려하는 방법이 제안되었다[6]. 이는 기존의 Lloyd-Max의 양자화기 설계 개념을 확장한 것으로서 채널 오류가 존재하지 않는 상황에서는 Lloyd-Max 양자화기와 같은 결과를 보인다.

COQ는 양자화 일그러짐과 채널 오류에 의한 일그러짐을 함께 고려하여 전체 일그러짐을 최소화한 것이므로, 채널 오류가 존재하는 상황에서는 기존의 Lloyd-Max 양자화기보다 나은 성능을 보인다.  $R_i$ 를  $i$ 번째 양자화 대표값이라 하고,  $P(j|i)$ 를  $i$ 번째 대표값을 전송했을 때  $j$ 번째 대표값을 수신할 채널 전이 확률이라 할때, 전체 일그러짐은 식(1)로 쓸 수 있다. 여기서  $f_X(x)$ 는 신호원의 확률분포이다.

$$D = \sum_i \sum_j P(j|i) \int_{T_{i-1}}^{T_i} (x - R_j)^2 f_X(x) dx \quad (1)$$

식(1)에서 알 수 있듯이 전체 일그러짐에는 양자화에 의한 일그러짐과 채널 오류에 의한 일그러짐이 함께 포함된다. 이 식을 최소로 하는 양자화기의 대표값과 문턱값을 동시에 찾을 수 없기때문에 그 대신 주어진 대표값에 대한 최적의 문턱값을 찾고 주어진 문턱값에 대한 최적의 대표값을 찾는 반복적인 알고리즘을 수행해야 한다. COQ의 자세한 알고리즘은 참고 문헌 [6]에서 찾을 수 있다.

## III. 오류 정정 부호화(ECC)

백색 잡음이 있는 이산 무 기억 채널(discrete memoryless channel)을 통해 신호를 전송할 때 생각할 수 있는 가장 유리한 수단중의 하나는 송신단에서 길쌈

부호(convolutional code)로 신호를 전송하고 이를 수신단에서 확률적 알고리즘인 Viterbi 알고리즘을 이용하여 복호하는 것이다. 이 전송 방식은 부호화 이득이 크고 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다. 길쌈 부호는 구획 부호에 비해 부호화율의 조정이 쉽고, 다양한 성능의 부호를 얻을 수 있다. 그리고 계산량 및 기억장소의 양도 상대적으로 적다.

길쌈 부호중 부호화율  $1/n$ 의 부호와 같이 부호화율이 낮은 것은 Viterbi 알고리즘의 적용이 쉬워 복호기의 구현이 간단하나, 부호화율이 높아지면 복호기의 구현이 어려워진다. 성능이 크게 떨어지지 않으면서도 복호기의 구현이 간단한 높은 부호화율의 길쌈 부호가 천공 길쌈 부호(punctured convolutional code)이다. 천공 길쌈 부호는 길쌈 부호 후 천공표(puncturing table)에 따라 특정한 비트를 보내지 않음으로써 다양한 부호화율을 얻을 수 있다.

길쌈 부호의 성능은 길쌈 부호로 신호 비트열을 부호화하고 전송한 후 이를 Viterbi 복호기로 복호화했을 때 나타나는 평균 비트 오류율로 나타내어진다. 이산 무 기억 채널의 경우 길쌈 부호의 복호 평균 비트 오류율에 대한 상한(upper bound)과 하한(lower bound)을 다음과 같이 얻을 수 있다. 복호 평균 비트 오류율에 대한 식의 유도는 길쌈 부호의 전달 함수를 이용하여 구할 수 있는데, 전달 함수는 어떤 한 경로와 모두 0인 경로와의 해밍 거리  $D$ 로 표시하고 그 경로에 해당하는 비트 오류의 수  $B$ 를 인수로 하여 구해진다. 이 전달 함수를  $T(D, B)$ 라 표시한다. 복호 평균 비트 오류율의 상한은 다음의 두 식으로 나타내지는 두개의 함수를 이용하여 구할 수가 있다[20].

$$T(D, B) \Big|_{B=1} = \sum_j a_j D^j \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(D, B)}{\partial B} \Big|_{B=1} = \sum_j c_j D^j \quad (3)$$

여기서  $\{a_j, c_j\}$ 를 무게 스펙트럼(weight spectrum)이라 부르는데,  $a_j$ 는 해밍 무게(Hamming weight)가  $j$ 인 잘못된 경로의 수이며,  $c_j$ 는 그 경로에서 전체 비트 오류의 수이다. 그리고  $d_{free}$ 는 부호의 자유거리(free distance)이다.

위의 무게 스펙트럼을 이용하면 부호화율  $k/n$ 의 부호에 대한 평균 오류율  $P_B$ 의 상한과 하한은

$$\frac{1}{k} c_{d_{free}} P_{d_{free}} \leq P_B \leq \frac{1}{k} \sum_j c_j P_j \quad (4)$$

와 같이 구해질 수 있다. 여기서  $P_j$ 는 변조의 방식 및 채널 신호 대 잡음비  $E_b/N_0$ 에 의해 계산되는 서로  $j$ 의 거리를 갖는 두 경로에 대한 쌍방의 오류 확률로, coherent PSK 변조와 비양자화된 가산 백색 가우시안 잡음을 생각할때 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_j = Q(\sqrt{2jkE_b/nN_0}) \quad (5)$$

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2}z^2) dz \quad (6)$$

이 논문에서는 ECC로 보호했을 때 COQ를 설계하고 전송을 한 경우와 할당된 전체 비트를 모두 COQ에 할당한 경우의 성능 비교를 목적으로 하고 있으므로, 실험에서 사용하는 ECC의 부호화율은  $(n-1)/n$ 이어야 한다. 여기서는 천공 길쌈 부호로 Larsen, Yasuda, Haccoun 등의 일련의 연구 결과[15-17]를 사용한다. Haccoun 등은 무계 스펙트럼을  $d_{free}$ 를 포함하여 10개의 스펙트럼 계수를 구하였는데  $d_{free}$ 보다 훨씬 큰 거리의 경로가 오류 확률에 미치는 영향은 매우 작아 무시해도 상관 없는 양이다. 그러나 위에서 구한 평균 오류 확률이 조합 한계(union bound)이기 때문에 채널 신호 대 잡음비  $E_b/N_0$ 가 작은 영역에서는 한계가 너무 크기때문에 상한을 평균 오류 확률의 근사값으로 사용할 수 없는 문제가 있다. 또 실제 영상 전송에서  $E_b/N_0$ 가 너무 작으면 오류 정정 후에도 남은 오류가 많아 전송 채널로 사용이 곤란하다. 따라서 이 논문에서도 이러한 영역에 해당되지 않는 두  $E_b/N_0$ 에 대해 실험한다. 부호화율 2/3에서 7/8까지의 부호는 천공 길쌈 부호를 사용하고 1/2의 부호는 위의 천공 길쌈 부호를 만들기 위해 사용한 어미부호인 Larsen의 1/2 길쌈 부호를 사용하였다.

#### IV. ECC가 결합된 COQ

COQ는 별도의 ECC를 사용하지 않으면서도 주어진 채널 비트 오류에 대해 양자화 오차와 채널 오류에 의한 오차를 최소화하는 방식이다. 그런데, 전체 비트율을 증가시키지 않았으면서 ECC를 결합하는 경우, 때에 따라서는 같은 비트율을 가지는 순수한 COQ에 비해 채널 오류 환경에서 보다 나은 결과를 보일 수 있다. 다시 말하면 정보원에 할당하는 비트수를 줄여서 양자화 오차를 조금 증가시키는 대신에 차이 비트수를 ECC로 이용함으로써 채널 비트 오류

에 의한 오차를 감소시키는 것이다. 할당된 비트당 양자화 오차 감소량이 작은 높은 비트율 영역에서는 양자화 오차보다 채널 오류에 의한 오차가 우세하므로 비트 하나를 ECC로 이용하는 것이 훨씬 효율적이다. 예를 들면, 8bps의 COQ대신 7bps를 가지는 COQ와 비트율 7/8의 ECC를 결합한다면 평균 자승 오차 측면에서 순수한 8bps의 COQ 보다 나은 성능을 얻을 수 있다.

COQ의 결과에 ECC화를 하게 되면 수신측에서의 복호 비트 오류율이 달라진다. 따라서 채널의 비트 오류율만을 고려하여 설계한 COQ는 더이상 채널 상태에 최적화된 것이 아니라 할 수 있다. 그러므로 오류 정정 부호를 고려한 전체 평균 비트 오류율을 미리 알 수 있다면 COQ의 설계시 이를 고려하여야 한다. 그러나 전체 평균 비트 오류율은 수식으로 정확하게 계산되지 않는다. 따라서 채널 모의 실험을 통해 알아 보거나, 3절에서 보인 것처럼 오류율의 상한과 하한을 구해서 알 수 있다. 이 상한과 하한의 차이가 크지 않으면 이 값을 평균 비트 오류율로 대신할 수 있다. 만일 이 차이가 심하다면 채널 모의 실험을 해야 할 것이다. 그러나, 우리가 생각하는 채널 상태는 대부분 전자에 해당하므로 이 논문에서는 채널 모의 실험을 하지 않고 평균 비트 오류율의 상한과 하한으로 실험을 하였다. COQ의 성능을 살펴 볼 때 평균 비트 오류율의 상한에 해당하는 것이 성능의 하한이 되고, 오류율의 하한에 해당하는 것이 성능의 상한이 된다.

<표 1>과 <표 2>에는 Gaussian과 Laplacian 분포를 갖는 정보원에 대해 채널 비트 오류율이 0.001과 0.005인 경우 설계된 COQ와 1bps에서 7bps의 양자화기에 각각 1비트의 ECC를 결합시켜 설계된 최적 양자화기의 성능이 주어져 있다. 표에 나타난 채널 부호율  $(n-1)/n$ 은  $(n-1)$ 비트의 정보원 부호에  $n$ 비트를 출력하는 ECC가 결합된 것을 의미하며 전체 비트율은  $n$  bps가 된다. 여기서 주목할 것은 채널 부호를 결합시킨 양자화기가 모든 비트율에 대해 순수한 COQ보다 우수한 성능을 보이는 것은 아니라는 점이다. 예를 들면, 채널 비트 오류율이 0.001, 그리고 Laplacian 분포에 대해 설계된 양자화기의 성능을 살펴보면 전체 비트율이 5bps이하인 경우는 COQ가 더 우수한 성능을 보이고 6bps보다 큰 비트율에 대해서는 채널 부호를 결합시킨 최적 양자화기가 더 우수한 성능을 보인다. 이 사실로부터 우리는 각 비트율에 대해 선택적인 양자화기를 구현하는 것이 가능하게 되고 이

러한 방식은 기존에 COQ만을 이용하거나 모든 비트율에서 ECC를 결합시킨 방식 또는 Lloyd-Max 양자화기를 이용한 방식에 비해 잡음이 존재하는 상황에서 보다 나은 성능을 보일 것임을 알 수 있다.

표 1. (0, 1) Gaussian에 대한 채널 최적 양자화기의 기능  
Table 1. COQ Performance of Gaussian distribution

SNR in dB											
BER=0.001						BER=0.005					
COQ		COQ+ECC				COQ		COQ+ECC			
bps		부호율	하한	상한	상한	bps		부호율	하한	상한	상한
1	4.43	1/1	4.43	4.43	4.43	1	4.30	1/1	4.30	4.30	4.30
2	9.26	1/2	4.46	4.46	4.46	2	8.63	1/2	4.46	4.46	4.46
3	14.12	2/3	9.43	9.43	9.43	3	12.17	2/3	9.43	9.43	9.43
4	18.16	3/4	14.79	14.79	14.79	4	14.17	3/4	14.76	14.76	14.78
5	20.67	4/5	20.37	20.37	20.37	5	15.12	4/5	19.87	20.12	20.12
6	21.81	5/6	25.99	26.00	26.00	6	19.07	5/6	23.82	25.11	25.11
7	24.69	6/7	31.55	31.58	31.58	7	21.08	6/7	24.15	26.97	26.97
8	27.81	7/8	35.89	35.99	35.99	8	23.37	7/8	26.33	30.38	30.38

표 2. (0, 1) Laplacian에 대한 채널 최적 양자화기의 성능  
Table 2. COQ Performance of Laplacian distribution

SNR in dB											
BER=0.001						BER=0.005					
COQ		COQ+ECC				COQ		COQ+ECC			
bps		부호율	하한	상한	상한	bps		부호율	하한	상한	상한
1	3.08	1/1	3.08	3.08	3.08	1	3.01	1/1	3.01	3.01	3.01
2	7.49	1/2	3.09	3.09	3.09	2	7.02	1/2	3.09	3.09	3.09
3	12.17	2/3	7.62	7.62	7.62	3	10.57	2/3	7.61	7.61	7.61
4	16.28	3/4	12.71	12.71	12.71	4	12.84	3/4	12.68	12.70	12.70
5	19.06	4/5	18.14	18.14	18.14	5	14.21	4/5	17.70	17.92	17.92
6	20.64	5/6	23.84	23.84	23.84	6	15.10	5/6	21.82	23.07	23.07
7	21.93	6/7	28.63	28.69	28.69	7	15.83	6/7	22.54	25.07	25.07
8	22.79	7/8	31.13	31.17	31.17	8	16.25	7/8	23.90	28.41	28.41

### V. DCT 부호화 시스템의 최적 비트 할당과 양자화

DCT는 정보원의 상관성 제거와 에너지 집중 효과가 뛰어나고 여러가지 고속 알고리즘이 존재하므로 정지 영상과 동영상의 국제 표준 부호화 기법을 비롯한 많은 영상 부호화 기법에 널리 이용되고 있다. 이 절에서는 DCT를 이용한 일반적인 영상 부호화 방식 [18]을 설명하고 DCT 계수의 비트 할당과 양자화에 ECC가 결합된 COQ를 선택적으로 이용하는 기법을 설명한다.

입력 정보원을 정상 확률 과정(stationary random process)  $\{X_n\}$ 에 의해 표현되는  $L$ 차원 벡터로 가정한다.

구획 변환 부호화기의 입력 벡터  $X = \{X_0, X_1, \dots, X_{L-1}\}^T$ 는  $(L \times L)$  크기의 DCT 변환 행렬에 의해 벡터  $Y = \{Y_0, Y_1, \dots, Y_{L-1}\}^T$ 로 변환된다.

이 시스템에서의 최적화 문제는 송신단의 영상 정보와 수신단에서 복원된 영상 정보간의 일그러짐을 최소화시키는 것이며 전체 평균 자승 오차는 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $L$ 은 DCT변환 구획 크기이다.

$$D = \frac{1}{L} E \left[ (X - \hat{X})^T (X - \hat{X}) \right] \quad (7)$$

여기서 주어지는 제한 조건은 표본당(여기서는 DCT 변환 계수)의 평균 비트수  $r_m$ 가 주어진 특정 비트수  $\tilde{r}$ 를 초과해서는 안되며 각 계수에 할당되는 비트수  $r_i$ 도 최대값  $r_{max}$ 을 초과해서는 안된다는 것이다. 그런데, DCT는 정규 직교 행렬 표현식을 가지므로 전체적인 평균 자승 오차는 간단하게 식 (8)과 같이 되며 이는 각 성분의 평균 자승 오차의 합인 식 (9)로 표시된다.

$$D = \frac{1}{L} E \left[ (Y - \hat{Y})^T (Y - \hat{Y}) \right] \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} E(Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (9)$$

$i$ 번째 오차 성분  $E(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ 은  $i$ 번째 계수에 할당된 비트수  $r_i$ 의 함수가 되고 이것을  $d_i(r_i)$ 라고 표시하면 주어진 비트 할당에 대해서 전체 평균 자승 오차를 최소화하는 것은 결국 이  $d_i(r_i)$ 를 최소화하는 문제가 된다. 만약,  $i$ 번째 계수에 비트수  $r_i$ 를 할당했을 때의 최소 오차를  $d_i^*(r_i)$ 라고 하면 주어진 비트 할당에 대한 전체 평균 오차는 다음과 같이 된다. 여기서,  $\underline{r}$ 은 비트 할당 벡터이다.

$$D^*(\underline{r}) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} d_i^*(r_i) \quad (10)$$

주어진 비트수  $r_i$ 에 대한 최적의 오차 수준  $d_i^*(r_i)$ 는 <표 1>과 <표 2>에서 각 비트율에 대해 COQ와 ECC가 결합된 최적 양자화기의 성능중 보다 나은 것을 선택함으로써 구할 수 있다. 즉, 순수한 COQ의 각 비트율에 대한 최소 일그러짐을  $d_c^*(r_i)$ 라 하고 ECC가 결합된 최적 양자화기의 각 비트율에 대한 최소 일그러짐을  $d_e^*(r_i)$ 라 하면 이 시스템에서 이용할 선택적 양자화기의 일그러짐은 식(11)로 주어진다.

$$d_i^*(r_i) = \min(d_c^*(r_i), d_e^*(r_i)) \quad (11)$$

이 결과를 이용하여 선택적으로 계수 보호를 하는 시스템의 비트 할당 문제를 해결할 수 있다. 비트 할당에 관해서는 많은 연구 결과가 소개되었는데 이 논문에서는 정수 비트 할당을 목적으로 하기 때문에 간단하고 성능이 우수한 Trushkin의 정수 비트 할당 알고리즘[19]을 이용했다. Trushkin의 비트 할당 알고리즘은 각 양자화기의 비트율 대 일그러짐 함수가 convexity를 만족할 때 최적의 구할 수 있으며 정수 비트 할당만을 처리한다. 이 논문에서는  $r_{max}$  와  $\tilde{r}$ 을 각각 8로 하였다.

### VI. 실험 결과

실험에 이용된 영상은 512 × 512 크기를 갖는 LE-NNA와 PEPPER이며 각 화소는 256단계의 밝기를 가진다. 영상은 다음과 같이 2차원 분리형 일차 Gauss-Markov 확률 필드(random field)로 모델링했다.

$$X(i, j) = \rho_r X(i-1, j) + \rho_c X(i, j-1) - \rho_r \rho_c X(i-1, j-1) + W(i, j) \\ i, j = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

여기서,  $\rho_r$ 과  $\rho_c$ 는 각각 수직, 수평 방향의 상관 계수이며  $W(i, j)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_w^2$ 인 iid(independent and identically distributed) Gaussian 확률 변수(Random Variable)이다. 그리고, 정보원 영상의 분산  $\sigma_x^2$ 과  $\sigma_w^2$ 의 관계는 다음식으로 주어진다.

$$\sigma_w^2 = \sigma_x^2 (1 - \rho_r^2)(1 - \rho_c^2) \quad (13)$$

그리고, LENNA 영상의  $\rho_r$ 과  $\rho_c$ 는 각각 0.969와 0.984이고, PEPPER 영상의  $\rho_r$ 과  $\rho_c$ 는 각각 0.973과 0.976이다. 또, LENNA 영상의 평균과 분산은 124.0과 2290이고, PEPPER 영상의 평균과 분산은 120.2와 2903이다.

입력 영상은 ( $M \times M$ ) 크기의 구획으로 나누어지며 구획들은 2-D DCT에 의해 변환되어 양자화된 후 전송되며, 2-D 역 DCT에 복원된다. 2D-DCT는 분리 가능한 정규직교 변환이므로 앞에서 설명했던 이론을 직접적으로 2차원으로 확대 적용할 수 있으므로 평균 자승 오차는 다음과 같이 표현된다.

$$D^*(\underline{r}) = \frac{1}{M^2} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} d_{mn}^*(r_{mn}) \quad (14)$$

여기서  $\underline{r}$ 은 비트 할당 행렬이며  $d_{mn}^*(r_{mn})$ 은 ( $m, n$ )번째 변환 계수를 비트수  $r_{mn}$ 을 이용하여 전송할 때 생기는 최적의 일그러짐을 나타내는데 각 변환 계수마다 분산이 모두 다르므로 일그러짐은 식(15)와 같이 분산과 정규화된 일그러짐의 곱으로 표시할 수 있다.

$$d_{mn}^*(r_{mn}) = \sigma_{mn}^2 d_{nor}^*(r_{mn}), m, n = 0, 1, \dots, M-1 \quad (15)$$

여기서,  $d_{nor}^*(r_{mn})$ 은 단위 분산을 갖는 신호원에 대한  $r_{mn}$  비트수를 가지는 최적 양자화기의 평균 자승 오차이고  $\sigma_{mn}^2$ 은 ( $m, n$ )번째 변환 계수의 분산을 나타낸다. 영상을 2차원 Gauss Markov로 가정했으므로 ( $m, n$ )번째 변환 계수의 분산은 다음식으로 주어지는  $\sigma_c^2$ 과  $\sigma_r^2$ 의 곱으로 표시할 수 있다.

$$\sigma_c^2(m) = \frac{2\sigma_x}{M} C^2(m) \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} \rho_c^{|i-j|} \\ \cos \frac{(2i+1)m\pi}{2M} \cos \frac{(2j+1)m\pi}{2M}, m = 0, \dots, L-1 \quad (16a)$$

$$\sigma_r^2(n) = \frac{2\sigma_x}{M} C^2(n) \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \rho_r^{|i-j|} \\ \cos \frac{(2i+1)n\pi}{2M} \cos \frac{(2j+1)n\pi}{2M}, n = 0, \dots, L-1 \quad (16b)$$

여기서,  $C(m)$ 과  $C(n)$ 은  $m, n=0$ 일때  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 의 값을 가지며 기타의 경우 1의 값을 갖는다. <표 3>에서 <표 10>까지는 제안된 시스템의 성능이 채널 오류율 0.001, 0.005, 전체 비트율 0.5bpp, 1.0bpp의 4가지 조합에 대하여 나타나 있다. 여기서 성능은 신호의 분산에 대한 자승 오차의 비 SNR을 dB로 표시하였다. System A는 모든 DCT 계수에 대해  $n$ 비트 COQ만을 이용한 시스템이고 System B는 모든 DCT 계수에 대해  $n-1$ 비트 채널 최적 양자화기와  $(n-1)/n$ 의 채널 부호율을 갖는 ECC를 이용한 시스템이며 System C는 COQ와 ECC를 선택적으로 결합한 시스템이다.

실험 결과를 보면 예상했던 바와 같이 선택적인 비트 보호와 COQ를 결합하는 시스템이 가장 우수한 성능을 보인다. 전반적으로 DCT의 블록 크기가 커질수록 성능이 향상됨을 알 수 있으며 전체 비트율이 클수록 System C의 성능 향상이 두드러진다. 채널 비트 오류율이 0.001인 경우는 System B와 System C

표 3. PEPPER 영상의 실험 결과

Table 3. Numerical results of PEPPER image

(a)

BER 0.001      Bit Rate 0.5 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	16.96	16.23	16.23	17.35	17.35
16×16	19.64	18.78	18.78	20.42	20.42
32×32	20.43	20.68	20.69	21.75	21.76

(b)

BER 0.001      Bit Rate 1.0 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	22.05	21.21	21.21	23.26	23.27
16×16	23.09	24.32	24.33	25.33	25.34
32×32	23.06	25.29	25.30	26.19	26.20

(c)

BER 0.005      Bit Rate 0.5 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	15.90	15.87	16.04	16.43	16.63
16×16	17.40	18.10	18.49	19.05	19.56
32×32	17.26	19.59	20.32	20.02	20.85

(d)

BER 0.005      Bit Rate 1.0 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	19.27	19.81	20.85	21.14	22.00
16×16	19.27	22.22	23.53	22.50	23.94
32×32	18.43	22.60	24.37	22.90	24.80

에서 하한 성능과 상한 성능이 거의 같으며 채널 비트 오류율이 0.005인 경우는 하한과 상한 성능에 다소 차이를 보인다. 이것은 채널 부호의 성능 척도가 되는 복호 비트 오류율 한계(bound)의 밀착도(tightness)를 설명해 준다. 이 논문에서는 각 시스템의 성능을 비교하는 것이 목적이므로 한계의 밀착도가 비교 분석에 큰 영향을 주지는 않는다.

또한, 채널 비트 오류율이 작은 경우는 System A와 System B가 거의 비슷한 성능을 보이는 반면 채

표 4. LENA 영상의 실험 결과

Table 4. Numerical results of LENA image

(a)

BER 0.001      Bit Rate 0.5 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	17.62	16.91	16.91	18.04	18.04
16×16	20.35	19.80	19.81	21.27	21.28
32×32	21.12	21.64	21.63	22.70	22.71

(b)

BER 0.001      Bit Rate 1.0 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	22.63	22.23	22.23	24.03	24.03
16×16	23.62	25.27	25.28	26.20	26.21
32×32	23.52	26.25	26.26	27.10	27.12

(c)

BER 0.005      Bit Rate 0.5 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	16.44	16.46	16.66	17.01	17.70
16×16	17.90	18.95	19.45	19.70	20.33
32×32	17.70	20.32	21.20	20.72	21.73

(d)

BER 0.005      Bit Rate 1.0 bpp      SNR in dB

구획크기	System A	System B		System C	
		하한	상한	하한	상한
8×8	19.68	20.30	21.78	21.72	22.71
16×16	19.61	22.81	24.36	23.05	24.72
32×32	18.72	23.12	25.13	23.36	25.53

널비트 오류율이 큰 경우는 전반적으로 System B의 성능이 우수하다. 이 결과는 채널 비트 오류율이 높은 경우 양자화에 의한 오차보다는 채널 오차가 우세함을 반영하는 것으로서 COQ를 통한 채널 오차의 보상보다는 양자화 오차를 조금 크게 하는 대신 여분의 비트를 ECC에 할당하는 것이 효과적임을 말해 준다. 그런데, 실제 채널을 고려하면 채널 비트 오류율이 0.005 정도인 것은 아주 나쁜 환경이므로, 일반적인 채널 비트 오류율에서 COQ만을 사용함으로써 오차를

보상하고자 하는 시도도 역시 의미를 가진다.

이 실험결과는 영상의 통계적 특성을 모델링한 것으로부터 얻은 것이므로 주어진 통계적 특성에서 얻을 수 있는 최적의 성능을 보여준다. 실제 영상의 경우 국부적으로는 통계적 특성에 대한 가정을 만족하지만 전체적으로는 특성을 만족하지 못하고 또한 정상과정(stationary process)이 아니므로 이론적인 성능에는 이르지 못할 것으로 보인다. 그렇지만, 작은 크기의 구획에 대해 변환 부호화를 적용하므로 계수들의 통계적 특성이 영상 모델의 특성에 근접한다. 결과적으로 실제 영상에 DCT를 적용하고 우리가 구한 양자화기를 이용해서 양자화한 다음 선택적인 ECC를 결합하여 이진 대칭 채널로 전송한다면 이론적으로 구한 제안 시스템의 성능에 필적할 것으로 기대된다.

## Ⅶ. 결 론

이 논문에서는 효율적인 영상 신호 전송의 한 방법으로 COQ와 ECC가 결합된 시스템에 대해 연구하였다. 일반적으로 신호 표본 하나를 부호화하려면 양자화와 이진 부호화를 하며 경우에 따라 오류 정정 부호를 추가로 사용한다. 여기에 필요한 전체 비트수중 일부를 ECC에 할당하는 것은 양자화에 필요한 비트수를 줄이게되어 양자화 오차를 크게하지만, ECC를 사용함으로써 채널 오류에 의한 일그러짐을 줄일 수 있다. 여기서 양자화는 이후에 삽입된 오류 확률을 감안한다면 채널 최적 양자화가 전체 일그러짐을 최소화하는데 가장 유리하다. 먼저 실험을 통하여 n비트 COQ만을 사용한 것과 n-1비트 COQ에 (n-1)/n의 ECC를 사용한 것의 성능을 비교하여 ECC를 경우에 따라 선택적으로 사용하는 것이 다른 시스템에 비해 성능이 우수함을 보였다. 그리고, 이 결과를 DCT 부호화를 사용하는 영상 전송 시스템의 각 변환 계수의 부호화에 적용하였다.

실험 결과를 보면, 구획의 크기가 크거나 전체 부호화율이 높을수록 ECC를 추가하여 얻는 성능 개선이 크게됨을 알 수 있다. 이는 구획의 크기가 크거나 비트수가 많은 경우 ECC의 사용으로 인한 정보원 부호화의 정밀도 손실이 상대적으로 작아지기 때문이다. ECC를 사용한 경우, 부호의 평균 비트 오류율의 상한과 하한을 구해 각각에 해당하는 시스템의 성능을 다른 시스템과 비교하였다. 따라서 정확한 성능을 구하지는 못하였지만 상한과 하한의 성능 차이가 별

로 없으므로, 이들 값으로부터 본 논문에서 제시한 시스템의 성능을 알 수 있다. 이 결과 COQ에 ECC를 선택적으로 적용한 경우는 COQ만 사용한 경우에 비해 최대 5~6dB 정도의 SNR개선을 얻었고 모든 계수에 COQ와 ECC를 예외없이 적용한 경우에 비해서는 최대 2dB 정도의 개선을 얻을 수 있었다. 한편, 채널 부호화를 하면 복호 평균 비트 오류율이 매우 낮아지므로 COQ는 Lloyd-Max 양자화기와 큰 성능 차이를 보이지는 않는다. 따라서 ECC를 사용해야 하는 경우에는 COQ를 사용하는 대신 Lloyd-Max 양자화기를 사용하여도 성능이 크게 떨어지지는 않으며, 채널 오정합(mismatch)등을 고려할 경우 오히려 Lloyd-Max 양자화기를 사용하는 것이 더 유리할 수도 있다.

## 참 고 문 헌

1. C.E.Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell System Tech.J.*, vol.27, pp. 379-423 and 623-656, 1948.
2. J. W. Modestino and D. G. Daut, "Combined source-channel coding of images," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-27, pp.1644-1659, Nov. 1979.
3. J. W. Modestino, D. G. Daut, and A. L. Vickers, "Combined source-channel coding of images using the block cosine transform," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-29, pp.1261-1274, Sep. 1981.
4. N. Tanabe and N. Farvardin, "Subband image coding using entropy-coded quantization over noisy channels," *Proc. ICASSP*, pp.2105-2108, Apr. 1990.
5. M. G. Perkins and E. Offer, "Combined source-channel image coding using tree-structured vector quantization and sequential decoding," *Proc. ICC*, pp.241-245, Jun. 1991.
6. N. Farvardin and V. A. Vaishampayan, "Optimal quantizer design for noisy channels : An approach to combined source-channel coding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-33, pp.827-838, Nov.1987.
7. J. Max, "Quantization for minimum distortion," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-6, pp.7-12, Mar. 1960.
8. S. P. Lloyd, "Least squares quantization in



- PCM," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-28, pp.129-137, Mar. 1982.
9. V. A. Vaishampayan and N. Farvardin, "Optimal block transform image coding for noisy channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-38, pp.327-336, Mar. 1990.
  10. N. Farvardin, "A study of vector quantization for noisy channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-36, pp.799-809, Jul. 1990.
  11. N. Farvardin and V. A. Vaishampayan, "On the performance and complexity of channel-optimized vector quantizers," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-37, pp.155-160, Jan. 1991.
  12. D. Miller and K. Rose, "Joint source-channel vector quantization using deterministic annealing," *Proc. ICASSP*, pp. III.377-III.380, Mar. 1992.
  13. E. Ayanoglu and R. M. Gray, "The design of joint source and channel trellis waveform coders," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-33, pp.855-865, Nov. 1987.
  14. M. R. Soleymani, S. D. Morgera, and R. Quesnel, "Image coding for noisy channels," *Proc. ICASSP*, pp.2785-2788, May 1991.
  15. K. J. Larsen, "Short convolutional codes with maximal free distance for rates 1/2, 1/3, and 1/4," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-19, pp.371-372, May 1973.
  16. Y. Yasuda, K. Kashiki, and Y. Hitara, "High-rate punctured convolutional codes for soft decision viterbi decoding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, pp.315-319, Mar. 1984.
  17. D. Haccoun and G. Begin, "High-rate punctured convolutional codes for Viterbi and sequential decoding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-37, pp.1113-1125, Nov. 1989.
  18. K. R. Rao and P. Yip, *Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages and Applications*, Academic Press Inc., 1990.
  19. A. V. Trushkin, "Optimal bit allocation algorithm for quantizing a random vector," *Prob. Inform. Transmission*, pp.156-161, Jan. 1982.
  20. A. J. Viterbi and J. K. Omura, "Principles of Digital Communication and Coding," McGraw Hill, 1979.

金 鐘 洛(Jonglak Kim)

정회원

1964년 3월 29일생

1988년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사.  
 1990년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사.  
 1992년 8월 : 서울대학교 전자공학과 박사과정 수료.  
 1993년 2월 ~ 현재 : 대우전자 영상통신연구소.  
 ※주관심분야 : 영상 신호 처리, 전송 및 채널 코우딩.

朴 峻 成(Jun-Seong Park)

정회원

1968년 8월 4일생

1991년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사.  
 1993년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사.  
 1993년 3월 ~ 현재 : 한국통신 연구개발단 전임 연구원.  
 ※주관심분야 : 영상 신호 압축 및 전송, 정보이론.

金 泰 正(Taejeong Kim)

정회원

1953년 12월 9일생

1976년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사.  
 1978년 2월 : 한국 과학 기술원 전기 및 전자공학과 석사.  
 1978년 3월 ~ 1981년 2월 : 한국전자통신 연구소 전임 연구원.  
 1986년 8월 : University of Michigan 전기공학과 박사.  
 1986년 9월 ~ 1988년 7월 : 미국 AT&T Bell 연구소 연구원.  
 1988년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 전자공학과 재직. 현재 부 교수.

※주관심분야 : 영상통신, 신호처리, 정보이론.