

# LPC 벡터 양자화를 이용한 가변률 CELP 음성코딩에 관한 연구

정 영호\*, 문 인섭, 김광호, 유 창규, 오 원록, 김 종교  
전북대학교 전자공학과

## Variable Rate CELP Coding with Phonetic Segmentaiton using LPC Vector Quantization

Young-Iho Cheong, In-Seob Moon, kwang-Ho Kim, Chang-Kyue You,  
Won-Rock oh, Chong-Kyo Kim

Dept. of Electronic Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

### Abstract

This paper presents a variable rate speech coding method with phonetic segmentation, called for PSVXC. Multiple access techniques that require efficient encoding of speech to achieve capacity improvements are currently emerging in the cellular telephone system. The variable rate speech coder have the reduced average data rate required to transmit conversational speech. Each frame of active speech is classified into one of four phonetic classes. A distinct coding configuration and bit-rate is applied to each category. And also a split vector quantization is used to accurately quantize the LPC information using LSP parameters.

### 1. 서론

디지털 이동 통신 시스템에서는 한정된 무선 자원에 대한 용량문제 해결하고 장기적으로는 경제적이고 효율적이고 휴대가 간편한 이동통신 방식을 제공하여야 하므로 전송속도가 낮은 모뎀/셀렉터가 필요하다. 최근의 디지털 이동 통신 시스템에서 CELP(Code Excited Linear Prediction) 또는 VXC(Vector Excitation Coding)형의 혼합형 음성 부호화기는 낮은 전송률에서 우수한 성능을 가질 것을 요구한다. 이러한 부호화기의 특성은 음성 전송에서 부호화기의 복잡성을 줄이면서 음질의 저하를 초래하지 않고 낮은 전송속도로 높은 수준의 음질을 전송시킬 수 있는 고도의 음성 압축 기술이 필요하다. 이 음성 압축 기술은 음성신호의 잉여 성분을 제거하여 최적의 정보량으로 수신단에 전송시켜 원신호를 복원시키는 기술로서 전송률과 음질을 고려하면서 실시간 구현에 적합하도록 채택한다.

Qualcomm에서 CDMA시스템에 적합한 전송속도를 변화시키는 가변 속도 보코더인 QCELP를 제안하였다. 이 QCELP 알고리즘은 낮은 에너지보다 높은 에너지에 많은 비트를 할당하는 방식으로 8, 4, 2, 1 kb/s 중의 하나로 20ms의 프레임률 부호화한다. QCELP 알고리즘의 성능 테스트에 의하면, 8kbps 음성 가변 속도 부호화기가 아날로그 및 TDMA시스템보다 우수한 품질을 제공하고, 용량에서는 아날로그 시스템보다 대략 평균 15배 정도의 증가를 보였다고 한다. 일반적으로 음성의 활성영역에서는 8kb/s를 보이고, 음성의 배경잡음이나 무음구간에서는 이보다 낮은 전송률로 전송된다. 그러나 한정된 용량문제를 해결하

기 위해서는 가능하다면 더 낮은 전송률에서도 합성음의 음질이 유지될 필요가 있다.

본 연구의 목적은 디지털 이동통신용 단말기에 적용 가능한 음성 분질음을 고려한 가변률 음성 부호화 알고리즘을 개발하는 것이다. 최근 음성 부호화기의 연구동향에서는 4Kbps이하의 수준에서 새로운 음성 부호화기를 개발하려 한다. 낮은 전송률에서 CELP형 부호화기는 각 프레임에 따른 음성학적인 특성을 고려함이 없이 고정된 코딩방식에 따른 고정된 비트할당으로 음성 부호화한다는 점이다. 이에 따라 각 프레임의 다양한 음성학적인 특성에 맞도록 여기 신호와 필터의 파라미터를 결정하여 부호화하는 가변률 부호화방식이 연구되고 있다. 이러한 가변률 음성코딩의 기법은 음성과 짧은 분절음(Segment)에 따른 음성학적인 특성을 고려하여 전송비트를 능동적으로 할당하여 처리한다. 즉, 특정 음성적 범주에서 지각가중에 따른 코딩 왜곡을 최소화 할이도록 기존의 코딩 기법을 가변적으로 변경시킨다.

먼저 입력 음성이 배경잡음이 아닌 음성의 활성 영역에 속하는 지를 VAD(Voice Activity Detection)에 의해서 조사한다. 이 VAD 알고리즘은 가변률 음성 부호화에서 평균 전송률을 줄일 수 있는 중요한 조건이 되는 것이다. 본 논문에서는 VAD를 입력 음성의 에너지로만 결정하도록 한다. 일단 한 프레임의 입력 음성이 살아왔을 경우 유무성음 검출 알고리즘에 의해서 무성음, 유성음, 무성과열음(Voice Onset)인지를 조사하고 각 코딩 패턴에 따라 가변적으로 코딩한다.

### 2. 유·무성음의 구분

유·무성음과 무성과열음의 구분절차는 Fisher의 방법을 따르는 LPC-10E에서 사용하는 기법을 이용한다. Fisher의 방법은 음성신호에 잡음이 가중된 경우에도 SNR비에 따라 같은 레벨을 성해중으로써 동적학적인 방법으로 비교적 정확하게 유·무성음을 분류한다. 사용되는 파라미터는 8개의 파라미터로서 ZCR, low-band 음성 에너지, 일차 반사계수, 프리엔퍼사스된 에너지, 이차 반사계수, 순방향과 역방향 피치지연 이득, 그리고 무성과열음 검출을 위해 입력 음성신호에 2차 미분치를 취하는 방법을 이용한다. 또한 정확한 유·무성음을 검출하기 위해서 3점 메디안 필터링을 수행한다. 다음 그림은 유·무성음의 전체 구조를 보인다.

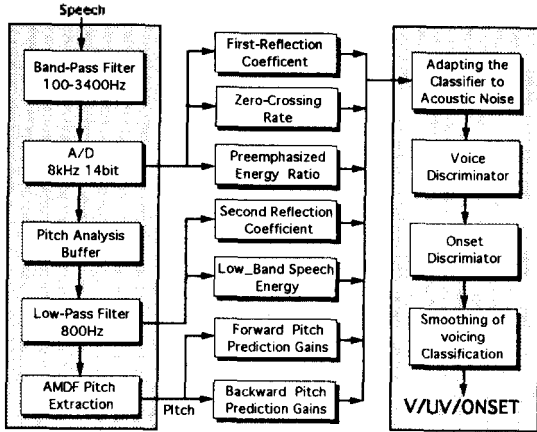


그림 1. 유·무성음 검출 알고리즘

3. 음성의 세그멘테이션과 부호화

1) 음성의 활성영역 세그멘테이션

전송률을 4.8Kbps 이하로 줄이려는 노력은 기존의 합성에 의한 분석 방식에서 사용되고 있는 부호화방식의 과감한 구조적 변형을 요구하게 되었고, 효율적인 음성 코딩을 위해서 음성의 특징에 따른 부호화기의 구조변경을 고려하기 시작했다. 최근의 Wang과 Gersho는 음성학적인 분석을 이용한 부호화기(PS-VXC)의 구조를 고려하여 음성특성과 이에 해당하는 코딩 전략을 세우고 코딩 지연과 복잡성을 줄이면서 합성음의 음질을 대략 3.4Kbps에서 또는 그 이하의 전송률에서 보다 향상된 음질을 얻으려는 연구를 진행하고 있다. 이러한 연구에서 먼저 고려해야 할 것은 각 프레임단위의 짧은 음성신호를 음성학적인 특성을 고려하여 분절(Segment)하여야 한다.

음성의 변별적 특징(Distinctive feature)에 따른 음성의 분류는 각 음소의 음운학적인 특성과 음성학적인 특성을 고려하면 다양한 형태가 존재하지만, 크게 무성 파열음(Voice Onset)과 유성음, 그리고 무성음으로 구분한다. 무성파열음(어두 파열음)은 폐쇄음에서 나타나는 현상으로 구강통로가 일시적으로 폐쇄됨으로써 폐에서 흘러나온 공기가 폐쇄된 통로 뒤쪽에 집약되었다가 갑자기 개방될 때 파열이 발생된다. 유성음과 무성음에 대 무성 파열음을 고려되는 것은 무성파열시간(VOT)이 음소의 특징을 대변할 수 있는 것으로서 폐쇄음의 평음, 격음, 경음을 구분할 수 있는 조건이 되기 때문이다.

2) 각 세그멘테이션에 따른 분석

각 음성의 특징에 따른 세그멘테이션을 하기 위해서는 미리 정해진 임계치를 설정하여 음성 에너지, ZCR, 1차 반사계수, 프리엔시스된 에너지의 비등 프레임당 8개의 파라미터를 사용하여 분류한다. 매디안 필터링을 수행하여 처리된 세그멘테이션 결정에 정확한 분류를 수행한다. 이렇게 결정된 결과에 현재 프레임과 이전 프레임의 패턴을 고려하여 현재의 패턴을 결정한다. 그리하여 각 프레임의 음성학적인 분류는 다음과 같이 4가지로 분류하기로 한다. 표 1. 프레임의 음성학적인 분류

CLASS(분류)	부프레임			
	1	2	3	4
무성음(U)	무성음	무성음	무성음	무성음
무성음-무성파열음(UO)	무성음	무성음	어두파열음	어두파열음
무성파열음+유성음(OV)	어두파열음	어두파열음	유성음	유성음
유성음(V)	유성음	유성음	유성음	유성음

부호화기는 20ms의 프레임 크기와 5ms의 부프레임 크기이고, 무성 파열음은 두 개의 부프레임에 할당하여 무성음에서 유성음으로 변하는 초기 피크 펄스의 포착을 용이하게 한다. 16가지의 다양한 음성학적인 패턴이 나타날 수 있으나 4가지의 패턴으로만 처리하여 부호화기의 전체적인 복잡성을 줄인다. 이렇게 간략화된 분류는 합성음의 음질을 유지하면서 부호화기에 필요한 코딩 구조와 정보량을 줄일 수 있다.

3) PS-VXC 음성 부호화기 구조

전송률을 4kb/s 이하로 낮추었을 때, 합성음의 급격한 음질의 저하는 음성의 짧은 세그먼트에서 나타나는 중요한 음성학적인 정보를 무시하는 이유에 기인한다. 그리하여 음성 세그먼트를 음성학적으로 의미있는 중요 단위에 더 많은 비트를 할당하도록 하고, 각각의 설정된 음성학적인 범주에 따라 비트의 수를 적절하게 선택하도록 부호화기의 구조를 설계하여 전송률과 음질간의 관계를 효율적으로 한다. 그리하여 결정된 부호화기의 전송률은 배경잡음에 1kb/s, 무성음에 2.35kb/s, 무성음과 무성파열음에 4.35kb/s, 무성파열음과 유성음에 6.65kb/s, 그리고 유성음에 5.75kb/s를 할당한다.

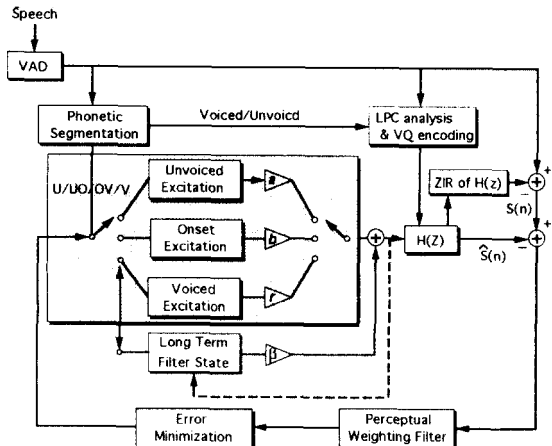


그림 2. 음성분절음을 이용한 가변률 음성부호화기의 구조

4. 코더의 비트 할당

표 2. 제안된 부호화기의 비트 할당

분류	배경 잡음	코딩 분류			
		N	U	UO	OV
선형예측계수	11	11	11	24	24
피비정수형 오프셋 아득 비트수	계수포			7	7
	2*1			4*1	
	6			12	
	2*3			4*3	
코드북 색인	4	4*6=24	2*6+2*20=52	2*20+2*10=60	4*10=40
코드북 어득	5	4*3=12	2*3+2*9=24	2*9+2*4=26	4*4=16
전체 비트수	20	47	83	133	115
전송률(kb/s)	1.0	2.35	4.15	6.65	5.75

5. 피치 지연 탐색

무성음과 무성과열음에서는 피치 탐색이 필요없으며, 유성음에 35비트를 할당한다. 피치 탐색 방식은 정수형 지연 외삽 해상도 1/2인 비정수형 지연을 사용한다. 피치 탐색 속도를 증가시키기 위해 먼저 개루프(Open loop) 방식을 이용하여 얻어진 7비트의 피치 지연을 중심으로 각 서브프레임에서는 이 결정된 피치 지연을 중심으로 비정수형 지연을 포함하여 오프셋 범위가 -4 ~ 3.5인 4비트의 범위에서 최적의 피치를 탐색하는 폐루프(Close loop)방식을 사용한다. 위와 같은 방법으로 피치 검색에 따른 계산량을 최소화 할 수 있다.

개루프에서 선정된 피치 후보는 4개의 모든 서브프레임에 영향을 미치므로 정확한 피치의 선정에 주의하여야 한다. 개루프에서 정확한 피치를 선정하도록 하기 위해서 양방향성 함수를 이용한 피치 탐색을 수행한다. 먼저 개루프에서 순방향과 역방향의 주기성을 동시에 관찰한 다음 피치탐색 대상을 순방향 함수와 역방향 함수의 에너지의 비를 이용하여 선정된 후 피치 후단 처리에서 관측된 피치 지연이 최적의 피치 지연인지 최종 결정한다. 이 때 배주기 및 삼배주기 에리 정정은 전단 프레임의 피치범위에서 결정된다.

순방향 함수는 다음과 같다.

$$R_f(P) = \left[ \sum_{n=0}^{N-1} S(n)S(N+P) \right]^2 / \left[ \sum_{n=0}^{N-1} S^2(n+P) \right] \quad (5.1)$$

역방향 함수는 다음과 같다.

$$R_b(P) = \left[ \sum_{n=0}^{N-1} S(n)S(n-P) \right]^2 / \left[ \sum_{n=0}^{N-1} S^2(n-P) \right] \quad (5.2)$$

위 방식은 유성음에서 무성음으로 또는 무성음에서 유성음으로 전이되는 구간에서 피치 탐색의 정확도를 높여주며 반배주기를 피치 피치로 인식하는 오류를 거의 제거할 수 있는 장점이 있다. 피치 후처리 과정은 현재 얻어진 피치 후보의 반배주기를 0.85P/k에서 1.15P/k (K = 2, 3, 4)까지 조사하여 위에서 결정된 함수와의 에너지를 비교하여 개루프에서의 피치 지연(안정) 지를 조사한다.

또한 폐루프에서 피치의 탐색은 개루프에서 결정된 피치주기의 정수배로 탐색하여야 하는데 다음과 같이 아래의 식이 만족된다면, 전단 프레임들의 피치값을 이용해서 폐루프에서의 피치 탐색 범위를 압축한다.

$$\text{만약 } k_p(-1) + \delta > k_p(0) \quad (4.1)$$

이고, 그리고

$$D \sum_{t=1}^T |k_p(-t) - k_p(-t-1)| < \delta \quad (4.2)$$

여기서  $k_p(0)$ 는 현재 프레임의 피치 지연이고,  $T$ 는 고려될 과거 프레임의 개수로 4이고,  $\delta$ 는 20이며,  $\delta$ 는 8이 사용되었다.

### 6. 유성음 하모닉스간의 잡음 제거필터

전송율을 4Kb/s이하로 낮추려고 할 때 여기 코드북에 충분한 비트의 사용은 제한을 받을 수 밖에 없기 때문에 이로 인한 코드북 크기의 부족은 부호화된 음질을 상당히 떨어뜨린다. 또한 합성에 의한 분석 구조는 이러한 코드북 크기의 부족으로 인하여 피치 주기 파라미터와 화를 여기 코드북의 최적 선택이 어려워지게 되고, 이전 프레임에서 발생된 잡음 성분은 다음 프레임까지 영향을 미치게 된다.

그리하여 변화하는 피치 하모닉스 성분은 통과되도록 하고 유성음 부분의 고조파들 사이의 잡음성분을 효율적으로 제거할 수 있는 방법은 피치에 따라 적용되는 폼-제로 Comb 필터를 사용하는 것이다.

이 필터의 전달 함수는 다음과 같다.

$$H(z) = (1 - \eta z^{-1}) \frac{1 + \gamma z^{-p}}{1 + \lambda z^{-p}} \quad (6.1)$$

여기서  $P$ 는 피치 지연이며, 계수  $\gamma$ 는 0.6을 사용하였고  $\lambda$ 는 피치  $F_0$ 의 함수로서  $0.001F_0$ 로 하였다.  $(1 - \eta z^{-1})$ 에서  $\eta$ 는 0.2로 하였다.

그러나 이 필터의 사용은 정확한 유·무성음의 검출이 이루어져야 하며, 또한 적절하지 못한 피치의 선택은 합성음의 선주파수 성분을 더 흐려놓기 때문에 최적의 피치 파라미터를 얻어서 피치 파형의 부드러운 곡선을 얻어야 한다. 한편 새로운 음소의 시작을 나타내는 무성과열음의 시작에는 합성음의 자연성을 보장하기 위해서 이 필터를 사용하지 않는다.

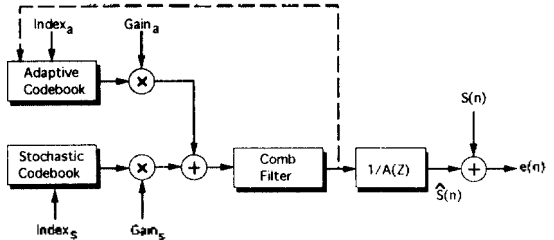


그림 3. 유성음의 잡음제거 Comb 필터

### 7.전설 모음에서의 고주파 성분 보상

일반적으로 전설모음 즉, /i/, /e/, /o/와 같은 모음은 제 2 포만트와 제 3 포만트는 일반적으로 2KHz이상의 높은 주파수 대역에서 보인다. 이 높은 고주파 성분은 음성의 가청사에 중요한 음향학적인 정보로 작용한다. 그러나 여기 파라미터 탐색 과정에 수행되는 MMSE 측정에서는 이러한 음향학적인 특성에 대해서는 고려되지 않는다. 그리하여 제 2포만트와 제 3포만트에 더 많은 가중치를 두도록 고주파 성분을 앰퍼시스시키는 것으로서 일반적인 MSE 측정방법을 변경시킨다.

$$WMSE_M = \sum_{i=0}^N |w_M(i) e(i)|^2 \quad (7.1)$$

여기서  $e(i)$ 는 입력 음성과 합성된 음성사이의 오차신호이다.  $w_M(i)$ 는 저차 가중 필터인  $W(z)$ 를 고주파 필터링시킨 것이다.

$$W_M(z) = (1 - \xi z^{-1})W(z) \quad (7.2)$$

$\xi = 0.8K_1$ 으로 조정된다 여기서  $k_1 = R(1)/R(0)$ , 즉 일차 반사계수이다.

### 8. 무성음의 부호화

무성음은 피치 탐색과 섬세한 양자화가 필요없으며, 이로 인한 합성 음질의 저하를 초래하지 않으므로 전송율을 낮출 수 있다. 여기 코드북에 6비트를 이용하고, 이득에 3비트를 쓴다.

### 9. 무성파열음 부호화

무성파열음(Voice Onset)은 고주파 성분이 존재하는 부분으로서 급격한 파형의 존재를 보인다. 먼저 입력음성을 타겟으로 하여 10비트의 최소 코드북을 사용한다. 그리고 두번째 단계에서는 첫번째 단계에서 만들어진 합성시그널과의 차이를 타겟으로 하여 잡음과 같은 부분을 잡기 위해서 10비트의 코드북을 사용한다. 이득은 각각 5비트와 4비트로 양자화한다.

### 10. 배경 잡음

자연성을 유지하기 위해서 입력 음성으로부터 재현시킬 필요가 있다. 합성에 의한 분석구조는 불필요한 방법이고, 입력 음성에서 전형예측분석을 11비트로 행한다면 잡음신호에 양자화를 수행한다. 잔차신호에 4비트, 이득에 5비트를 할당한다.

### 11. LPC 파라미터의 분할(Split) 벡터 양자화

최근 LPC 정보의 평균 주파수 예측을 대략 1dB 이하로 하고, Outlier 프레임율 2%이하로 줄이려는 transparent한 양자화에 대한 관심으로 LSP 벡터 양자화와 30 ~ 40비트 사이의 LSP 스칼라 양자화에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 낮은 전송률에서 고품질의 음성부호화를 구현하기 위해서, 비교적 상당한 전송률을 차지하는 LPC 시퀀셜러의 transparent한 양자화 방법이 개발되어야 한다.

10차의 LPC 계수를 좋은 양자화특성과 보간특성, 그리고 안정성을 보이는 LSP계수로 양자화된다. LSP 계수의 국부적인 주파수 특성은 양자화 오차를 발생시킬 가능성이 없이 LSP 벡터를 분할할 수 있도록 해주기 때문에 이러한 성질을 이용하여 LSP 계수를 LSP1~LSP4, LSP5~LSP10까지 두 단계로 분리하여 유성 음인 경우 각각 12비트씩 24비트로 양자화하고, 그외의 경우는 각각 6비트와 5비트씩 11비트를 할당한다. 코드북의 탐색은 다음과 같은 기공지를 위한 유성리더인 디스토크스가 최소로 하는 색인을 취한다.

$$d(f, \hat{f}) = \sum_{i=1}^{10} C_i W_i (f_i - \hat{f}_i)^2 \quad (11.1)$$

$$C_i = \begin{cases} 1.0, & \text{for } 1 < i < 8 \\ 0.8, & \text{for } i = 9 \\ 0.4, & \text{for } i = 10 \end{cases} \quad (11.2)$$

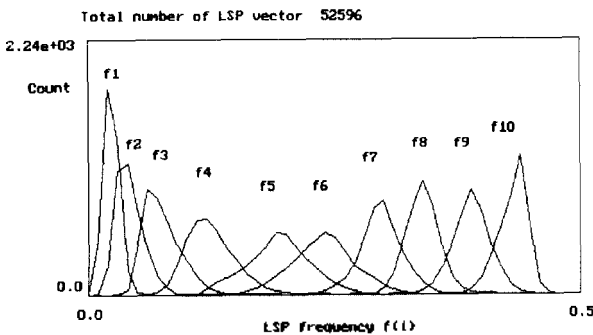


그림 4. LSP 계수의 통계학적인 분포

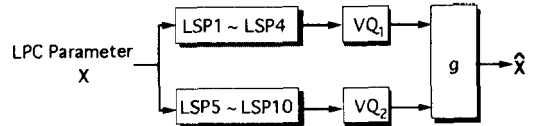


그림 5. Split VQ의 구조

### 12. 실험 및 결과

음성 분석음을 이용한 가변율 음성부호화기의 성능을 평가하기 위하여 QCELP알고리즘과 비교해 보았다. 본 논문의 PS-VXC의 평균 정보량은 음성 환경도 0.5인 경우 대략 3.8kb/s 정도이었던 반면 QCELP 알고리즘의 경우는 대략 5.7kb/s이었다. 음질은 DOB-CELP FS1016보다 좋았으며, QCELP 알고리즘과 거의 비슷한 음질을 보였다. 그러나 평균 전송률에서 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

또한 LPC 계수를 24비트로 양자화된 코드북을 작성하기 위하여 단지 16명까 여자 14명이 발성한 여자 음성적인 특성이 기록된 분량 300개와 음소 단형단어 445개를 이용하여 코드북에 필요한 음성 시료를 수집하였다. 전체 25분, 52000개의 LPC 벡터 데이터를 LBG 알고리즘으로 수행하였다. 4개의 테스트 분량으로 스펙트럼 차이를 측정할 것과 24비트에서 평균 차라(SD) 1.09를 얻었으며, 디스토크스가 2~4 dB인 Outlier는 2%이내이었다. 또한 4dB이상되는 Outlier는 0.05%정도였다. 그러나 24비트 Split VQ는 상당한 메모리를 차지하고, 실제 계산상에 있어서 대안할 시간이 소요된다는 단점이 있다.

음성 분석음을 이용한 가변율 음성부호화는 유무성음 구별에 Fisher의 알고리즘을 사용하는 비교적 유성성을 판별오차가 적은 LPC-10E알고리즘을 사용하였으나, 정확한 검출이 어려웠으며, VOT 검출에는 에너지와 2차 미분자를 취하는 방법을 이용하였다. 전체적으로 9% 정도의 오차가 발생했다.

### 13. 결론

차세대 이동 통신용 음성부호화기는 스펙트럼의 효율을 높이기 위해서 가능한 한 저전송속도로 고품질이 가능하며 이동통신 채널의 환경에 강인하고 구현시 복잡도가 낮은 부호화기를 개발하는 것이 주요 목표이다.

본 연구에서 제안하는 알고리즘은 음성 분석음을 이용한 가변율 음성 부호화방식으로서 마땅치 이러한 목표에서 제안되어지나 은 무선통신을 위한 음성부호화기이다.

음성통신을 이용한 가변율 음성부호화 방법은 낮은 전송률에서 높은 음질의 수준을 제공할 수 있으므로 가변 전송률로 대역의 충속성이 가능한 CDMA 시스템에 적합하다 할 수 있다. 그러나 음성이 있는 상황에서 음성 환경도 영역(VAD)의 정확한 알고리즘, 코더에서 발생하는 딜레이 문제와 정확한 유성성 검출 알고리즘, LSP 양자화에 소요되는 계산량과 메모리 문제에 대한 해결책과 복잡성 감소에 대한 방안이 필요하다고 하겠다.

## 참 고 문 헌

- [1] QUALCOMM Inc., *An Overview of the Application of CDMA to Digital Cellular Systems and Personal Cellular Networks*. Submitted to the TIA TR45.5 Subcommittee, March 28, 1992.
- [2] E. Paksoy, Srinivasan, K., and A. Gersho, "Phonetically-based vector excitation coding of speech at 3.6Kb/s," *Proc. IEEE Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, Minneapolis, April 1989.
- [3] Wang, S. and Gersho, A., "Improved excitation for phonetically-segmented VXC speech coding below 4kb/s," *Conf. Record IEEE Global Communications Conference*, San Diego, December 1990
- [4] Wang, S. and Gersho, A., "Improved phonetically-segmented vector excitation coding at 3.4kbit/s," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, pp. 49-52, San Fransisco, March, 1992.
- [5] R. Di Francesco, C. Lamblin, A. Leguyader, and D. Massaloux, "Variable rate speech coding with online segmentation and fast algebraic codes," *Proc. IEEE Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, pp. 233 - 236, Albuquerque, New Mexico, April 1990.
- [6] Davidson, G. and Gersho, A., "Multiple-stage vector excitation coding of speech waveforms," *Proc. IEEE Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, pp. 163 - 166, New York, April 1988.
- [7] K. K. Paliwal and B. S. Atal, "Efficient Vector Quantization of LPC Parameter at 24 Bits/Frame," *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, vol. 1, January 1993.
- [8] J. P. Campbell, Jr. and T.E.Tremain, "Voiced/Unvoiced Classification of Speech with Applications to the U.S. Government LPC-10E Algorithm," *Proc IEEE Conf. on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, vol. 1, pp. 437 - 476, Tokyo, April 1986.