

適用於 ITU-T G.723.1 語音編碼器之 適應性碼簿快速搜尋演算法

陳郁昌

南台科技大學資工系研究生
m94g0206@webmail.stut.edu.tw

林榮三

南台科技大學資工系副教授
rslin@mail.stut.edu.tw

陳福坤

南台科技大學資工系助理教授
fkchen@mail.stut.edu.tw

摘要*

在這篇論文中，我們提出了一個快速搜尋演算法以減少 G.723.1 編碼器搜尋適應性增益碼簿的計算複雜度。我們利用事先預估 G.723.1 編碼器搜尋五階閉迴路適應性碼簿基週的增益之範圍，來達到減少搜尋適應性增益碼簿所需的計算量。進行五階閉迴路基週搜尋之前先執行一個二階的閉迴路基週預估器。由實驗的結果可知語音品質 SNR 值平均下降 0.34dB，且在人類耳朵主觀上的聽覺絲毫感覺不出語音品質下降。然而我們所提出的方法在 G.723.1 編碼器搜尋適應性增益碼簿大約可以減少 35% 以上的計算量。

關鍵詞：G.723.1，五階閉迴路適應性增益碼簿，快速搜尋。

Abstract

We propose a fast search algorithm to reduce the computational complexity of searching adaptive gain codebook for G.723.1 codec. We adopt to predict the pitch gain of the five-tap closed loop adaptive codebook in the G.723.1 standard codec, and restrict the search range to save the computation required in the five-tap adaptive gain codebook search. The prediction is performed with a two-tap predictor before the five-tap closed loop pitch search. The simulation results show that the proposed method can reduce the computation complexity over 35% for the adaptive gain codebook search with perceptually intangible degradation in speech quality. The SNR degrades by only around 0.34dB.

Keywords: G.723.1, five-tap closed loop adaptive gain codebook, fast search algorithm.

1. 前言

由於多媒体處理技術的進步及電腦與網路之成功結合，使得多媒体傳輸系統成本大幅下降，以及應用層面擴大，數位視訊及數位音訊的相關產品，如數位行動電話等等，將可取代傳統資訊、音訊及視訊產品，並提供全新之娛樂、文化、科技等服務，亦將大大改變大眾現有生活模式，其中音訊系統的聲音部分，除了可獨立用於數位電話系統，以及各種音訊產品；如語音導覽撥放器、有聲書、數位錄音筆等等。現在很熱門的網路電話 Skype 或是 yahoo 及時通，其語音壓縮位元率是 32 kbit/s 或低率的 16 kbit/s，但還是不夠低，也就是說其通訊傳輸也需佔很大的頻寬，尤其在有限的頻寬資源情況下，Skype 或是 yahoo 及時通都可能產生斷訊，造成通話不連續、語音品質差等情況。為了達成語音通話需滿足“連續性”的基本需求必須即時處理，所以必須將語音訊號進一步的高壓縮率編碼以產生低位元率的資料串流，如此才能在擁塞的網路環境下維持連續通話，但採用低位元率編碼器必需要兼顧到語音品質及編碼器計算複雜度，也要能達到 real-time。然而，多媒體通訊之需求日益增加，語音數據要透過網路的傳送，因此要對數位語音資料進行壓縮(compression)。從早期 32 kbit/s 的 ADPCM 資料量到後來的 CELP 技術把壓縮率大大的提高。如 4.8 kbit/s 的 CELP 編碼器 (FS1016) [1]、13 kbit/s 的歐洲數位巢狀無線電標準 (Pan-European digital cellular radio standard) GSM 編碼器 [2] 和 G.723.1 的 6.3 kbit/s、5.3 kbit/s 編碼器 [3] ……等語音壓縮 (speech compression) 技術可把語音更進一步壓縮。

Voice over IP 是最近熱門話題之一，它整合網路和語音壓縮技術。ITU-T 提出 G.723.1 已廣泛被應用在網路上，其能完成高語音品質

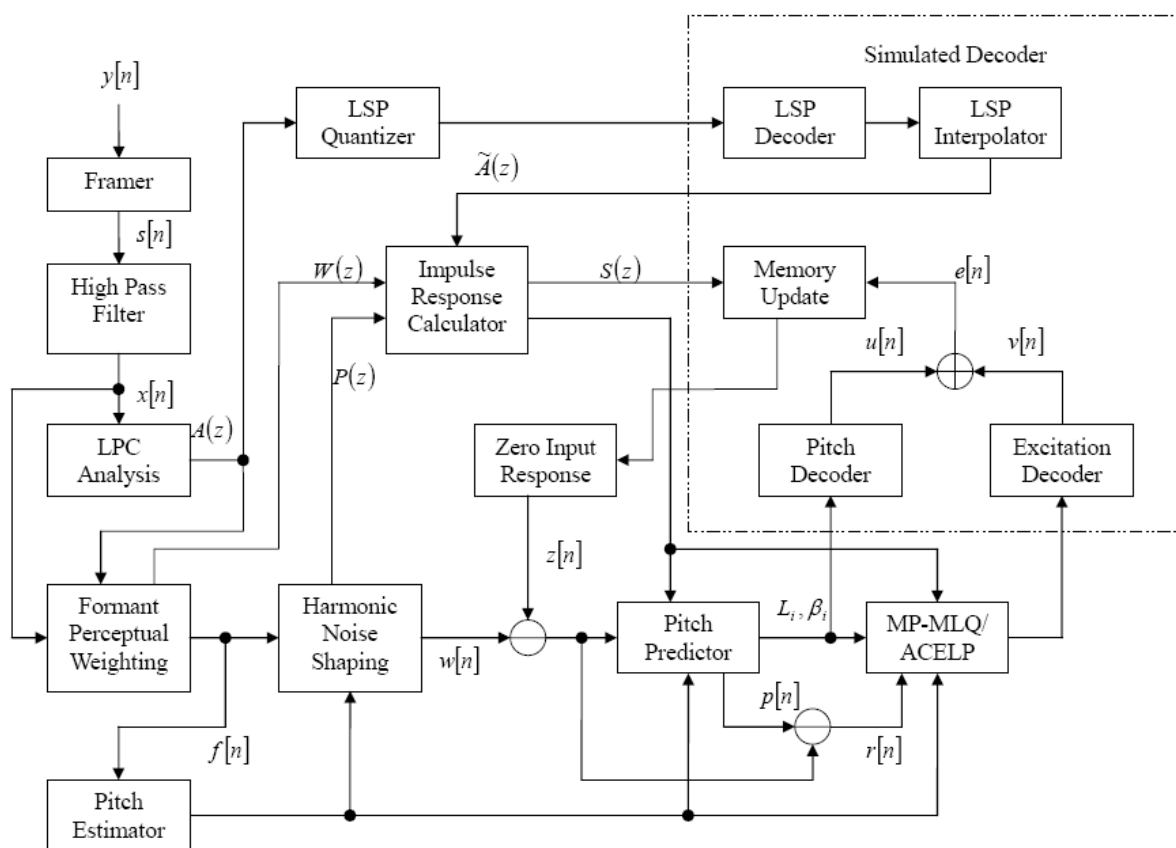
* This research was supported by National Science Council # NSC 94-2213-E-218-022, Taiwan R.O. C.

低位元率的編碼架構，此架構是現在網際網路 H.323 語音電話的主要標準，也是微軟 (Microsoft) 的視窗作業系統 (Windows Operation System) 內建的應用軟體視訊會議 "NetMeeting" 之語音壓縮標準，更是未來一般公眾電話 (PSTN) 使用數位影像電話 H.324 系統的主要語音規範。ITU-T 所制訂的語音壓縮標準 G.723.1 有 6.3、5.3 kbit/s 的位元率，其架構就週期激發源部分是採用計算量較高較精確的五階濾波器預估閉迴路基週，對於非週期性的激發脈衝之編碼在 6.3 kbit/s 位元率用 Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization (MP-MLQ) Excitation，在低位元率 5.3 kbit/s 則用 Algebraic Codebook Excitation (ACELP) 編碼。

目前語音編碼的技術有很多，其中又以合成做分析 (analysis-by-synthesis 簡稱 AbS) [5] [6] 的預估編碼技術為主流，這種技術可以得到很高的語音品質及很低的位元率，相對的其計算量的要求也非常高。為了達成語音通話需滿足“連續性”的基本需求，必須將語音訊號進一步的高壓縮率編碼以產生低位元率的資料串流，如此才能在擁塞的網路環境下維持連續通話的基本需求，但採用低位元率編碼器其相對的編碼演算法計算複雜度都需要很高的計

算量，為了要能達到 real-time 編碼語音。本篇論文提出一快速搜尋演算法來減少標準 G.723.1 編碼器在編碼時所需要的計算量，以達到編碼器的優化。我們針對標準 G.723.1 語音編碼器適應性增益碼簿的搜尋，提出一個有效且快速找到較佳增益的演算法。使用之觀念是在進行五階閉迴路基週預估之前，先進行一個二階閉迴路基週預估，之後再利用所預估的二階增益來預估五階閉迴路基週搜尋增益碼簿的範圍。實驗的結果顯示出我們所提出的快速搜尋方法，語音品質 SNR 值平均下降 0.34dB，且以人類耳朵主觀上的聽覺評估絲毫感覺不出語音品質下降。然而我們所提出的方法於計算複雜度之估計大約比原 G.723.1 編碼器搜尋適應性增益碼簿可以減少 35% 以上的計算量。

本篇論主要分成五個章節，在第一節概略地敘述研究的動機與目的，也針對本篇論文做一個簡介。在第二節裡，概述標準 G.723.1 語音編碼器系統流程及其架構。在第三節中，詳細敘述我們所提出的適應性增益碼簿快速搜尋演算法。而在第四節，則針對我們所提出的演算法做了一些實驗，以及與標準的 G.723.1 編碼器比較解碼後的語音品質，並評估此演算法的效能。最後，第五節為論文的結論。



圖(一). G.723.1 編碼流程方塊圖

2. G.723.1 語音編碼器概述

語音壓縮標準 G.723.1 之系統如圖(一)所示，能完成高語音品質、低位元率編碼，其主要以五階閉迴路基週預估編碼架構，加入人類感觀加權(Perceptual Weighting)濾波器及調諧雜訊去除(Harmonic Noise Shaping)濾波器技術，此架構就聲音週期激發源部分是先作開迴路方式估計基週，再用閉迴路方式於開迴路基週前後搜尋五階濾波器參數，而無聲激發源部分在 6.3 Kbit/s 位元率用 MP-MLQ Excitation 作激發源，在 5.3 Kbit/s 位元率則用 ACELP 作激發源。

G.723.1 編解碼器在開始對語音訊號做編碼之前，會先把連續的語音訊號切割成一段一段的音框，每段音框的長度為 240 個取樣點，之後每段音框又會再細分成四個子音框，子音框的長度則為 60 個取樣點。因為語音訊號為一種時變的訊號，不容易預估，若將其分割成許多短時距的音框，每一個子音框與之前子音框之間則可視為一段線性非時變的訊號，在預估編碼的處理上就相對較容易預估。語音編碼的預估主要分成三個主要的部分，分別為短時距預估(Short-Term Predictor, 簡稱 STP)、長時距預估(Long-Term Predictor, 簡稱 LTP)及隨機碼簿激發源的搜尋(Stochastic Codebook Excitation Search)。

2.1 短時距預估(STP)

線性預估係數是使用十階的線性預估分析(Linear Predictive analysis)，先利用一個 180 個取樣點的漢明視窗將信號取出。每個由漢明視窗取出的 LpcFrame 再經過計算求出 11 個自相關係數。之後再用 Levinson-Durbin 演算法去求取線性預估的係數(Linear Predictive Coefficients, 簡稱 LPC)。這些 LPC 是被用來給感官加權濾波器(perceptual weighting filter)使用的，此濾波器主要的功能為過濾輸入的語音信號，在語音信號各頻域的分佈做加權的處理，信號太強的地方加權量就小些，信號太弱的地方加權量就大些，以符合人類的聽覺特性。對每一個子音框皆要使用 Formant perceptual weighting filter。

LPC 在量化之前必須先轉換成線頻譜對(Linear Spectrum Pair, 簡稱 LSP)之後才進行量化。STP 主要是在預估人體口腔模式特徵參數，預估出的參數解碼還原後可以用來組成描述口腔特性的合成濾波器，此濾波器被拿來作為激發訊號合成語音時的脈衝響應。

2.2 長時距預估(LTP)

激發訊號分成有週期特性訊號與無週期特性訊號，有週期特性的激發訊號如母音，無週期特性的訊號如無聲子音、氣音。週期性的激發訊號會在此處理程序中被預估編碼，而無週期性的訊號則利用隨機碼簿激發源的搜尋編碼處理。因為訊號在編碼之前會將連續的訊號切割成一段一段固定長度的短時距音框，而這些音框之間皆可視為一段線性非時變的訊號，所以可以利用之前處理過的音框激發訊號與目前正在處理的音框訊號做互相關函數，找出之前的音框訊號與目前處理的音框訊號最相似的訊號間的間隔週期，此段週期稱之為音高週期(Pitch)，由於這個程序本身只是做互相相關的搜尋預估，所以此執行程序又稱之為開迴路音高週期預估(Open Loop Pitch Estimation)。

在處理開迴路音高週期預估之後，再進行音高週期的細搜，此程序中將利用人類口腔模式之脈衝響應來預估基週，稱之為閉迴路基週預估(Closed Loop Pitch Predictor)，這個處理程序是使用一個五階基週預估器來預估，其公式如下：

$$u[n] = \sum_{j=0}^{j=4} \beta_{ij} e'[n+j], \quad 0 \leq n \leq 59 \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} e'[0] &= e[-L_i - 2] \\ e'[1] &= e[-L_i - 1] \\ e'[n] &= e[((n-2) \bmod L_i) - L_i], \quad 2 \leq n \leq 63 \end{aligned} \quad (2)$$

β_{ij} 為其增益值， $e[n]$ 則為激發訊號，是過去的基週序列 $u[n]$ 與過去的脈衝序列 $v[n]$ 相加而成，即

$$e[n] = u[n] + v[n], \quad 0 \leq n \leq 59 \quad (3)$$

而基週序列 $u[n]$ 再與求出的脈衝響應 $h[n]$ 做迴旋積分運算，其公式如下：

$$\hat{S}[n] = \sum_{k=0}^n h[k] u[n-k], \quad 0 \leq n \leq 59 \quad (4)$$

得出的訊號為預估的有週期性語音 $\hat{S}[n]$ ，其與輸入的目標語音訊號 $S[n]$ 求其使平方誤差為最小，此平方誤差的公式為

$$E = \sum_{n=0}^{59} (S[n] - \hat{S}[n])^2$$

$$= \sum_{n=0}^{59} \left(S[n] - \sum_{k=0}^n h[k]u[n-k] \right)^2 \quad (5)$$

將增益碼簿中的 β 增益值分別帶入(1)式中，能使(5)式得到最小 E 者，便為最佳的增益值。

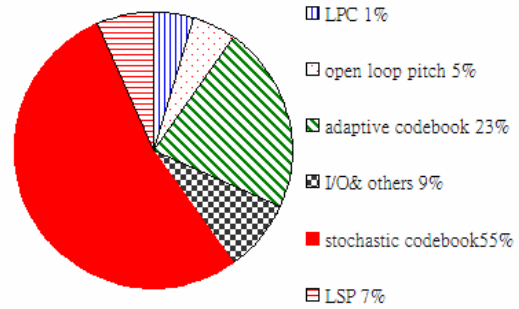
由於在前面已經做過開迴路的基週預估，此處為開迴路之基週估計。對於第零個和第二個子音框，在開迴路基週預估所搜尋到的基週附近 -1、0、+1 的指標範圍內做開迴路搜尋。由於開迴路所找到的基週並沒有編碼送出，所以此處找到的基週分別用七個位元做編碼量化。對於第一個與第三個子音框，則在第零個和第二個子音框所找到開迴路基週的 -1、0、+1、+2 的指標範圍內做搜尋。並將此一偏差值以兩個位元做編碼。此基週估計的增益值則用向量量化的方式做編碼，每一向量內有 20 個元素，其中對於低位元率(5.3 kbit/s)的編碼器，其固定使用 170 個向量之增益碼簿；而對於高位元率(6.3 kbit/s)的編碼器，則視其所求出的基週為多少而決定使用哪一個增益碼簿，若基週低於 58，則用 85 個向量之碼簿做量化，反之若基週高於 58，則用 170 個向量之碼簿做量化，而此 170 個向量之碼簿與低位元率編碼器所用之碼簿相同。

2.3 隨機碼簿激發源搜尋編碼

經過 LTP 處理之後的殘值訊號會被當作新的目標訊號再利用隨機碼簿來做搜尋編碼，此殘值訊號為 $S[n] - \hat{S}[n]$ ，因無週期特性，在基週預估程序並不會對此殘值訊號編碼，所以採用搜尋隨機碼簿激發源來找出殘值訊號的脈衝最佳位置及其增益值，進而編碼傳至解碼端。對於高位元率(6.3 kbit/s)的編碼器，使用 Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization (MP-MLQ) Excitation 演算法來做編碼，而對於低位元率(5.3 kbit/s)的編碼器，則使用 Algebraic Codebook Excitation (ACELP) 演算法來做編碼。

3. 適應性增益碼簿快速搜尋演算法

由於 G.723.1 是採用合成做分析 (analysis-by-synthesis) 的技術來編碼，其編碼後的位元率相當低(5.3 kbit/s、6.3 kbit/s)，而經由解碼端解碼出來的語音可達到相當高的語音品質。但這種技術的缺點就是編碼器需求相當



圖(二). G.723.1 編碼器各函數演算法計算量之分析

表一. 每個子音框其適應性碼簿(ACB search)計算複雜度之分析

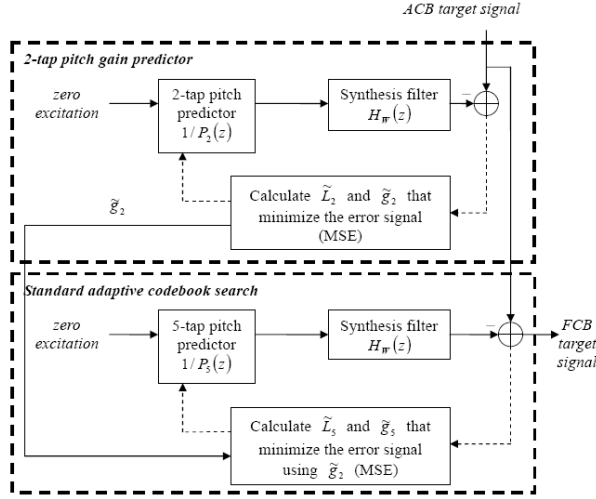
ACB search module	Complexity (No. of MAC operations)
Synthesis	$K \cdot \{N(N+1)/2 + 2N(N-1) + 20N\}$
Search	$20K \cdot P$
Update	$5N + N(N+1)/2$

MAC: multiplication/accumulation

高的計算複雜度來計算激發訊號的預估。利用 Microsoft Visual C++ Profiling 完成 G.723.1 編碼器每一函數演算法計算量之分析，如圖(二)所示，由 Profiling 分析圖可知五階閉迴路基週預估 (adaptive codebook search，簡稱 ACB search) 演算法佔整體計算量的 23%，計算量之大只僅次於隨機碼簿(stochastic codebook)的搜尋編碼，為了要能達到 real-time 編碼語音訊號故有必要減少其計算量。

分析研究每個子音框適應性增益碼簿搜尋編碼演算法的計算複雜度與 K 、 N 、 P 的值有關 [4]，如表一所示， K 值是於開迴路基週附近搜尋閉迴路基週的範圍，為一個常數值，對於奇數子音框 K 的值為 4，對於偶數子音框 K 的值則為 3，平均的 K 值則為 3.5。而 N 是子音框的長度，為一固定值，不管是奇數子音框或是偶數子音框，其值都固定為 60 個取樣點。 P 為增益值碼簿的大小，有 85 個向量及 170 個向量兩種增益碼簿。以碼簿大小為 170 個向量的增益碼簿為例，搜尋適應性碼簿的最佳閉迴路基週及最佳的增益時就要執行搜尋 3.5×170 個向量運算。若能事先預估出最佳的五階閉迴路基週增益在整個增益碼簿的哪個向量範圍內，就可以不必完全搜尋整個 170 個向量的碼簿，而只要搜尋部份的碼簿向量就能找到最佳的閉迴路基週及最佳的增益值，進而達到減少計算量。

我們提出一個快速搜尋的演算法來預估最



圖(三). 提出的快速搜尋法之流程方塊圖

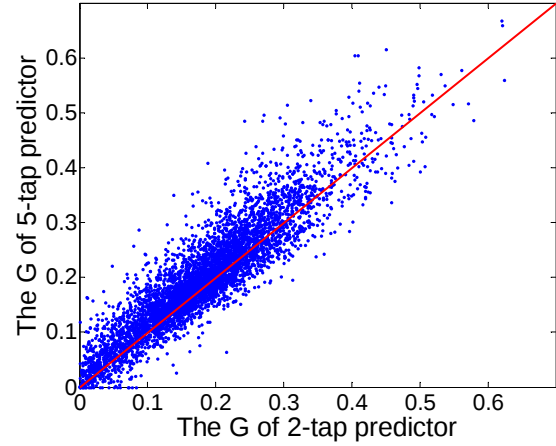
佳的五階閉迴路基週增益在整個增益碼簿的向量範圍。如圖(三)所示，在進行標準五階的閉迴路基週預估之前，先執行一個二階的閉迴路基週增益預估，此時會得到兩個參數，一為二階的閉迴路基週 $\tilde{L}_2$ ，另一為二階的增益 $\tilde{g}_2$ 。利用計算出的二階增益 $\tilde{g}_2$ 所相對應之標準五階閉迴路基週增益之碼簿向量相對偏移量範圍來搜尋五階的最佳增益 $\tilde{g}_5$ ，以達到減少編碼標準適應性碼簿搜尋五階增益時的計算量。本搜尋演算法以二階濾波器所預估的閉迴路基週 $\tilde{L}_2$ ，未提供搜尋最佳五階閉迴路基週增益在整個增益碼簿的向量範圍，所以在五階閉迴路基週的預估仍然要同時進行閉迴路基週的估算，此時所得到的閉迴路基週 $\tilde{L}_5$ 才是最佳的閉迴路基週。

本快速搜尋演算法是利用二階濾波器所預估的閉迴路基週與增益 $\tilde{g}_2$ ，其所預估的合成訊號 y_2 對目標訊號 x 的投影量，及標準 G.723.1 五階濾波器所預估的閉迴路基週與增益 $\tilde{g}_5$ ，其所預估的合成訊號 y_5 對目標訊號 x 的投影量。利用投影的觀念求得二階閉迴路基週其增益 $\tilde{g}_2$ 與對應之標準五階的閉迴路基週的增益 $\tilde{g}_5$ 之相似性。投影量的計算公式如下：

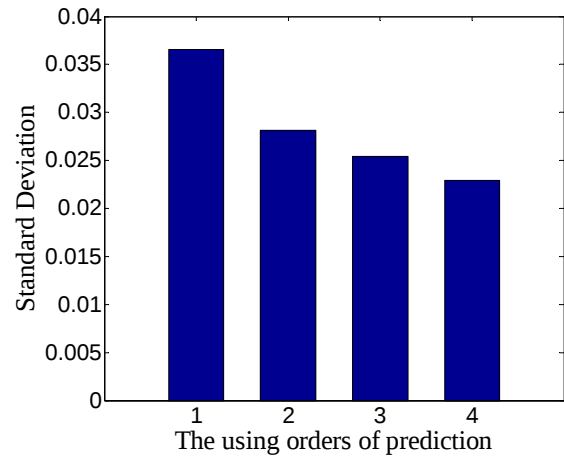
$$G_i = \frac{x \cdot y_i}{x \cdot x}, \quad i=1,2,3,4,5 \quad (6)$$

$$\frac{x \cdot y_2}{x \cdot y_5} = \frac{G_2}{G_5} \quad (7)$$

其中， x 為目標訊號， y_i 為合成訊號， G_i 為使用 i 階的濾波器做閉迴路基週預估所得到的合成訊號對目標訊號的投影量。我們使用三個男



圖(四). 二階預估訊號投影量 G_2 與五階預估訊號投影量 G_5 之關係



圖(五). 各階數預估訊號投影量 G_i 與五階預估訊號投影量 G_5 之間相關程度

生及三個女生的語音訊號(共 311880 個取樣點，5198 個子音框)進行分析：使用二階濾波器預估閉迴路基週所預估出的合成訊號對目標訊號的投影量 G_2 ，與使用標準 G.723.1 五階濾波器預估閉迴路基週所預估出的合成訊號對目標訊號的投影量 G_5 的關係圖，如圖(四)所示，投影量 G_2 與 G_5 之間呈線性關係的分布。若 G_2 完全 match 於 G_5 ，則兩者是完全相等的關係會等於 $x-y=0$ (紅線) 這條直線，我們進一步定義出這些投影量與 $x-y=0$ (紅線) 直線之間的距離之標準差(Standard Deviation，簡稱 Std)為此圖之關係程度。而後，陸續使用一階濾波器、三階濾波器、四階濾波器來評估 $G_i, i=1,2,3,4$ 與 G_5 之間的關係。分析評估的結果如圖(五)所示，Std 值越大表示與 G_5 相似性越

小，由分析圖可得知使用二階、三階、四階濾波器其 Std 值差異甚小，但計算量卻是以冪次方在遞增，因此我們選用二階基週增益預估器來預估相對應之標準五階閉迴路基週的增益 $\tilde{g}_5$ 之碼簿向量相對偏移量範圍，在此範圍內編碼搜尋出最佳五階閉迴路預估增益 $\tilde{g}_5$ 。

編碼搜尋適應性增益碼簿時所需的搜尋範圍，在本論文實驗被定義如下：

```

if  $\tilde{g}_2index - SR < 0$ 
  for  $0 \leq i < \tilde{g}_2index + SR$ 
    search optimum  $i$  satisfied criterion
     $\tilde{g}_5index = i$ 
if  $UB < \tilde{g}_2index + SR$ 
  for  $\tilde{g}_2index - SR \leq i < UB$ 
    search optimum  $i$  satisfied criterion
     $\tilde{g}_5index = i$ 
else
  for  $\tilde{g}_2index - SR \leq i < \tilde{g}_2index + SR$ 
    search optimum  $i$  satisfied criterion
     $\tilde{g}_5index = i$ 

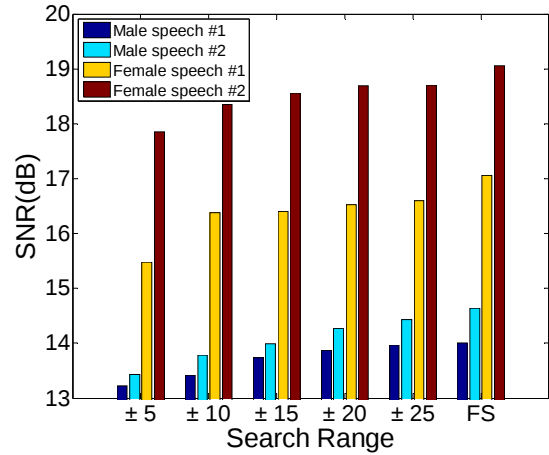
```

其中， $SR = SearchRange$ ， $UB = codebook UpperBound$ 。

4. 實驗結果及效能之評估

本文採用訊噪比(Signal-to-Ratio, 簡稱 SNR)來比較評估 G.723.1 五階的閉迴路基週適應性碼簿搜尋演算法的合成語音品質與本文所提出的快速搜尋演算法的合成語音品質。實驗由兩個男生及兩個女生的語音訊號當樣本，採用 6.3 kbit/s 位元率進行實驗，分別改變五階閉迴路基週預估編碼時搜尋適應性增益碼簿向量之範圍，依二階閉迴路基週其增益 $\tilde{g}_2$ 之相對應的五階閉迴路基週適應性增益碼簿之向量指標為中心當參考，每次改變搜尋適應性增益碼簿向量範圍 ± 5 個向量。實驗的結果如圖(六)所示，隨著搜尋範圍的增加，語音的品質會成正比的往上提高，越來越接近完整搜尋(Full Search)整個適應性增益碼簿所得到的合成語音品質。但增加到達一定程度的搜尋範圍之後，語音品質改善的增加量就趨於緩慢，因此我們歸納出搜尋範圍以與五階閉迴路基週適應性增益碼簿相對應的二階閉迴路預估之增益碼簿向量指標為中心前後 20 個向量做搜尋，可以達到編碼器之計算複雜度與語音品質之最佳調配，即是達到最佳的語音編碼效益。

位元率 6.3 kbit/s 用來做搜尋的增益碼簿有



FS: Full Search range 標準 G.723.1 之搜尋

圖(六). 所提出的演算法之不同搜尋範圍對標準 G.723.1 之搜尋的語音品質 SNR 比較

表二. 標準 G.723.1 ACB search 與所提出的演算法其語音品質 SNR 之比較

Performance evaluations		Standard ACB search	Proposed ACB search ($SearchRange = \pm 20$)
SNR(dB)	Female speech #1	17.055	16.520
	Female speech #2	19.052	18.697
	Male speech #1	14.637	14.276
	Male speech #2	14.003	13.871
	Average	16.186	15.841

表三. 標準 G.723.1 ACB search 與所提出的演算法其 MOS 語音品質之比較

	Female speech #1	Female speech #2	Male speech #1	Male speech #2
MOS degradation	-0.01	~0	-0.01	~0

~0: 意指受測者無法分辨兩段語音之間的差異

兩種大小，分別為有 85 個向量及有 170 個向量的碼簿，搜尋範圍設為 $\tilde{g}_2index \pm 20$ 向量，其實際搜尋計算只有搜尋 41 個增益向量，對整體標準 G.723.1 五階閉迴路基週適應性增益碼簿編碼計算複雜度，平均可以減少 64% 以上的搜尋計算量。而所加入的二階基週增益預估器，其計算複雜度約為五階閉迴路基週預估整體計算量的四分之一，所以本文所提出的方法對於整體編碼系統在適應性增益碼簿的搜尋上可達到減少 35% 以上的計算量。

表二、表三為本文所提出的快速搜尋演算法與標準 G.723.1 在合成語音品質之評量比較，評量的方法分成主觀與客觀的語音評量，主觀的評量採用平均意見分數(Mean Opinion Score, 簡稱 MOS)，評量時以 10 個男生及 10 個女生參與接受評量測試，最後統計出標準 G.723.1 的語音品質與採用本快速搜尋演算法

之語音品質之間 MOS 平均差；客觀的語音品質評量方法為計算語音品質的 SNR 值。評量的結果顯示本文所提出的快速搜尋演算法，在客觀的語音品質評量，SNR 值平均大約只下降了 0.34dB 左右，而對於人類耳朵主觀的聽覺來說，絲毫感覺不出聲音品質的下降。

5. 結論

在本篇論文中，針對標準 G.723.1 編碼器適應性增益碼簿的搜尋提出了一個快速搜尋的演算法來減少其編碼計算複雜度。本文利用二階濾波器所預估的閉迴路基週增益，提供搜尋最佳五階閉迴路基週增益在整個增益碼簿的向量範圍，如此可以達到減少搜尋增益碼簿的向量。實驗的結果顯示出我們所提出的快速搜尋方法，語音品質 SNR 值平均下降 0.34dB，且以人類耳朵主觀上的聽覺評估絲毫感覺不出語音品質下降。然而我們所提出的方法於計算複雜度之估計大約比原 G.723.1 編碼器搜尋適應性增益碼簿可以減少 35%以上的計算量。

參考文獻

- [1] J. P. Campbell, Jr. T. E. Tremain and V. C. Welch, "The DOD 4.8 KBPS Standard (Proposed Federal Standard 1016)", in *Advances in Speech Coding*, Kluwer Academic Publishers Press, 1991.
- [2] P. Vary, K. Hellwig, R. Hofmann, R.J. Sluyter, C. Galand, and M. Rosso, "Speech codec for the European mobile radio system", *IEEE Conference*, pp.227-230, 1988.
- [3] ITU-T Recommendation G.723.1, Dual Rate Speech Coder for Multimedia Communications Transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s, March 1996.
- [4] Sung-Kyo Jung, Kyung-Tae Kim, Young-Cheol Park, and Hong-Goo Kang, "A fast adaptive-codebook search algorithm for G.723.1 speech coder", *IEEE Signal processing letters*, VOL. 12, NO.1, pp. 75-78, January 2005.
- [5] S. Singhal, B. S. Atal, "Amplitude optimization and pitch prediction in multipulse coders", *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 37 Issue 3, pp. 317 -327, March 1989.
- [6] W. B. Kleijn, R. P. Ramachandran and P. Kroon, "Interpolation of the pitch-predictor parameters in analysis-by-synthesis speech coders", *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, vol. 2 Issue 1 part 2, pp. 42-54, Jan. 1994.
- [7] P. Kroon and B. S. Atal, "Pitch predictors with high temporal resolution", *IEEE Proc.*, pp. 661-664, 1990.
- [8] I. Lee, J. D. Gibson, "Robust backward adaptive pitch prediction for speech coder", *Electronics Letters*, Vol. 31, Issue 7, pp. 536 -538, March 1995.
- [9] DA SILVA, L. M., ALCAIM, A.: "A modified CELP model computationally efficient adaptive codebook search," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 44-45, March 1995.
- [10] ITU-T Recommendation G.729 - Annex D: 6.4 kbit/s CS-ACELP speech coding algorithm, September 1998.
- [11] J. F. Yang, R. S. Lin and S. Hu, "Time-Variied Pitch Gain Predictor for Low Bit Rate Speech Coders", *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E85-D, NO.4, pp.751-758, April, 2002.
- [12] J. F. Yang, R. S. Lin and C. R. Hu, "Transform-Based CELP Vocoders with Low-Delay Low-Complexity and Variable-Rate Features", *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E85-D, NO.6, pp.1003-1014, June, 2002.
- [13] J. F. Yang, R. S. Lin, and J. D. Hu, "Time-Variied Pitch Gain Predictor for Tracing amplitude-varied periodicity speech", *ICCE. International Conference*, pp 134-135, 1999.
- [14] F. K. Chen and J. F. Yang, "Candidate scheme for fast MP-MLQ search in G.723.1", *IEEE Third Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC '01)*, pp. 368-371, Mar. 2001.
- [15] LINDE, Y., BUZO, A., and GRAY, R., "An algorithm for vector quantizer design", *IEEE Trans.*, COM-28, pp.84-95, 1980.
- [16] Fu-Kun CHEN, Jar-Ferr YANG, and Yu-Pin LIN, "Complexity Scalability for ACELP and MP-MLQ Speech Coders", *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, VOL. E85-D, NO.1, pp.255-263, January 2002.
- [17] 王小川, *語音訊號處理*, 全華科技圖書股份有限公司, 2005.