

藉由母音諧波頻譜特性調適過度刪減因子改善增強

語音之研究

雷忠霖

亞洲大學 資訊傳播學系研究生

Email : bligs1cl@gmail.com

陸清達

亞洲大學 資訊傳播學系 教授

Email : lucas1@ms26.hinet.net

摘要

在頻譜刪減法中，藉由過度刪減因子可以提高背景雜訊的移除能力；若該因子太大會造成嚴重的語音失真，相對的，若該因子太小則會產生過多的殘留雜訊，讓增強語音聽起來比較吵雜。本文利用諧波特性的偵測母音，依據諧波特性的調適 sigmoid(S) 函式的斜率及轉移中心點，透過訊雜比對應 S 函數的數值決定過度刪減因子的大小。在有母音的區段，S 函數變化平緩，保留微弱母音成份，降低語音失真；在子音的區段，S 函數變化增大，在訊雜比值較低的區段可以有效刪減雜訊，而在訊雜比值較高的區段則保留子音部分；在低訊雜比且無語音區段則幾乎完整消除音訊。實驗結果證明：本文提出的方法，可以透過提高雜訊刪減量以及母音成份的保留，大幅提升頻譜刪減演算法的效能。

關鍵字：語音增強、雜訊抑制、頻譜刪減、諧波頻譜調適、過度刪減因子。

Abstract

Spectral subtraction-based algorithms are simple and important techniques for speech enhancement. In order to improve the performance of noise removal, an over-subtraction factor is introduced. If the value of the factor is large enough, background noise can be efficiently removed; meanwhile enhanced speech suffering from serious speech distortion. On the contrary, plenty of residual noise exists when the value of over-subtraction factor is small, yielding enhanced speech sounding annoying to the human ear. How to defining the value of this factor is critical to the quality of

enhanced speech. This study attempts to employ the harmonic properties of a vowel to define the value of over-subtraction factor by using the sigmoid function. This function maps the relation between the value of over-subtraction factor and the input SNRs. The transition slope of sigmoid function is small for a vowel region, enabling a weak vowel to be reserved. Conversely, the transition slope for consonant and noise-dominant regions is larger than that of a vowel region. Only the spectrum with high SNR can be reserved, so background noise can be efficiently removed. Experimental results show that the proposed method can significantly improve the performance of a spectral subtraction method by more reduction on background noise and more reservation on weak vowels.

Keywords: speech enhancement, noise reduction, spectral subtraction, harmonic adaptation, over-subtraction factor.

1. 前言

在日常生活中，語音增強的使用是隨處可見的，無論是錄音機、助聽器、麥克風擴音，甚至生活常見的個人手機，都需要語音增強的功能。而語音增強並非是將講者語音的訊號放大，而是透過降低背景雜訊，來突顯講者的語音。而語音增強系統中，估測雜訊與語音增強演算法是兩項極為重要的核心功能。本文的研究著重在語音增強演算法的部分，該演算法主要是進行刪除雜訊的處理，雜訊刪除量必須透過嚴謹的判斷來決定；若出現雜訊過度刪減的情形，會影響到講者語音的區段遭到刪除，導致語音失真，降低語音的可理解度；相對的，若雜訊刪除量太少，語音增強後的殘留雜訊太多，也會使整體語音的品質下降。

為了提升增強語音的品質，有許多研究提

出先進的語音增強演算法[1]-[8]，Saadoun 等人提出在知覺子空間中使用重建誤差的變異數調適技術 [1]來從事語音增強，該方法是以知覺 Karhunen-Loeve 轉換的方法為基礎進行改良，主要的改良方法就是透過重建誤差的變異數來選擇最佳主要元素，做為重建語音的依據，移除背景雜訊所對應的子空間，達到移除雜訊與改善子空間域語音增強系統效能的目的。Li 等人[2]提出使用非負矩陣分解法 (nonnegative matrix factorization) 與 Kullback-Leibler 距離為測度，將矩陣分解為稀疏與低秩(low-rank)空間的矩陣，將受干擾語音信號的聲譜信號分類為語音(sparse, 稀疏矩陣)空間及雜訊(low-rank, 低秩矩陣)，該方法不需要任何的語音及雜訊的預先(priori)資訊便可以將語音聲譜解析，達到語音增強的效果。Yu 等人[3]提出使用矩形濾波矩陣在時域中實現語音增強，透過增強語音與濾波信號的 Pearson 相關係數平方值最大化，可以得到縮小秩(reduced rank)的溫納濾波器矩陣，並直接將該矩陣與受干擾語音信號相乘，便可以得到增強語音。Lu[4]提出了使用梳型濾波器重建諧波頻譜，並利用中值濾波器消除音樂型殘留雜訊。另外在語音增強系統中，很多研究使用訊雜比來改良語音增強演算法的效能[9]，不過也有些演算法使用聽覺遮蔽閾值曲線來增加語音增強系統的效能[5]。

在眾多語音增強的演算法中，頻譜刪減演算法具有簡單與高彈性的優點，其做法是將雜訊頻譜從受干擾的語音頻譜中刪除；而具彈性的特點是可以透過各種參數的介入，因應各種不同的情形去調整過度刪減因子，讓經過頻譜刪減演算法處理後的增強語音能夠有較少的語音失真，以及更佳的雜訊移除效果。近年來，對於頻譜刪減演算法也有許多人提出改善[6][7]，許多方法是改善雜訊過度刪減因子的決定機制，Sukanya 與 Ananthakrishna[8]使用訊雜比值調適的過度刪減因子，移除背景雜訊，並且在靜音區段偵測殘留雜訊，調整其頻譜強度，防止音樂型殘留雜訊產生。也有研究嘗試在受干擾語音部分加入增強因子[10]來控制原始語音的強弱。

而許多使用過度刪減因子的語音增強演算法，幾乎沒考慮到語音變化的特性，本文提出的語音增強演算法則是考慮到語音的特性做參數調適。首先估測每個音框中的基頻諧波，以此來判斷母音是否存在，並用以調適 sigmoid 函數的變化；而過度刪減因子的決定

機制，將會以訊雜比值對應 sigmoid 函數的數值來決定，在有母音存在的區段中，使 sigmoid 函數變化平緩，即使在低訊雜比的區段一樣能有效的保留母音；而在子音可能存在的區段中，sigmoid 函數變化會稍微增大，以此來嚴格刪除低訊雜比的雜訊，並且保留高訊雜比中可能存在的子音；另外在低訊雜比且無語音的區段中，則大幅刪除音訊，使得本文方法能有效的移除背景雜訊，提升增強語音的品質。

本文的其它章節安排如下：第二節介紹說明頻譜刪減演算法與藉由母音諧波頻譜調適 sigmoid 函數，以及決定過度刪減因子的方法，第三節為實驗結果，第四節為本文的結論。

2. 藉由母音諧波頻譜特性調適過度刪減因子改善增強語音

使用過度刪減因子為基礎的語音增強演算法，雖然有良好的雜訊移除效能，但是很少考慮語音變化的特性，容易產生刪減過度，造成語音失真的情況，所以本文使用母音諧波頻譜的特性，調適過度刪減因子，達到提高頻譜刪減法的語音增強效能。

使用過度刪減因子的頻譜刪減演算法如式(1)，典型的頻譜刪減演算法，其過度刪減因子為固定值，亦即式(1)的 $\alpha(m, \omega) = \alpha$ 為固定值，且頻譜保留因子為零 ($\beta = 0$)，造成在語音區段有語音失真的情形；而雜訊區段則因為過度刪減時會使增強信號出現時而有音訊、時而沒有音訊的現象，亦即音樂型殘留雜訊，聽起來很吵雜。大多數改良型的頻譜刪減演算法，主要透過訊雜比值決定過度刪減因子，使其在有語音與無語音區段有明顯的變化，避免過度刪減的情況發生，讓整體音訊品質上升。而頻譜保留因子的部分也會給予適當的權重，雖然會有些微弱的背景雜訊存在，卻可以有效預防音樂型殘留的現象發生。

2.1 透過諧波特性調適過度刪減因子

本文利用諧波頻譜來判斷每個音框中是否有母音存在，並以此來調適 sigmoid 函數，

而式(1)之過度刪減因子 $\alpha(m, \omega)$ 則透過訊雜比值對應 sigmoid 函數的數值來決定，改善頻譜刪減法的效能， $\alpha(m, \omega)$ 可以透過式(2)計算求得：

$$\alpha(m, \omega) = k / (1 + e^{-\lambda(m) \cdot [\xi(m, \omega) - c(m)]}) \quad (2)$$

其中： k 控制 $\alpha(m, \omega)$ 的最大值； $\lambda(m)$ 控制 sigmoid 函數的轉移斜率； $\xi(m, \omega)$ 為次頻帶的訊雜比值； $c(m)$ 控制 sigmoid 函數的轉移中心點。

在式(2)中， $\lambda(m)$ 的數值主要控制 sigmoid 函數的斜率，亦即曲線的變化程度，當有母音存在時， $\lambda(m)$ 的數值為-0.1，此時曲線變化平緩，可以讓微弱的母音成分保留下來，不至於被刪除；而當目前區段沒有母音存在而且附近音框有母音成份時，有可能是子音區段，故 $\lambda(m)$ 的數值設定為-0.5，此時的 sigmoid 函數的變化會稍微增大，使得低訊雜比的雜訊區段可以大量消除；相對的，高訊雜比值的區域可能為子音，因此得以保留；而在無母音存在，而且附近均沒有母音成份時，該區段極為可能是雜訊的區段，將 $\lambda(m)$ 的數值設定為-10，此時無論訊雜比的值為何，都會盡可能的消除音訊。 $\lambda(m)$ 的表示式如式(3)：

$$\lambda(m) = \begin{cases} -0.1, & \text{if Harmo}(m) \geq 1 \\ -0.5, & \text{if } \sum_{t=2}^2 \text{Harmo}(m+t) \geq 1 \\ -10, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中： $\text{Harmo}(m)$ 表示第 m 個音框的強健諧波頻譜數量。

在式(2)中， $c(m)$ 的數值控制 sigmoid 函數的轉移中心點位置，一旦高於此值的訊雜比

$$|\hat{S}(m, \omega)|^2 = \begin{cases} |Y(m, \omega)|^2 - \alpha(m, \omega) \cdot |\hat{D}(m, \omega)|^2, & \text{if } |Y(m, \omega)|^2 > \alpha(m, \omega) \cdot |\hat{D}(m, \omega)|^2 \\ \beta \cdot |Y(m, \omega)|^2, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

其中： $\hat{S}(m, \omega)$ 為增強語音頻譜； $Y(m, \omega)$ 表示受干擾語音信號頻譜； $\hat{D}(m, \omega)$ 代表雜訊估測頻譜。

值信號輸入時，sigmoid 函數對應的過度刪減因子 $\alpha(m, \omega)$ 數值會開始衰減，表示如此高的訊雜比值信號代表著可能有語音存在，不需要刪除太多的雜訊訊號。

接下來介紹如何依照當前音框是否有母音存的機制來決定 $c(m)$ 的數值；若當前區段有母音存在時，則 $c(m)$ 的數值降低，以便保留更多的母音成份；反之則將 $c(m)$ 的數值增加，提高雜訊的刪除量。 $c(m)$ 的數值如式(4)：

$$c(m) = \begin{cases} 5, & \text{if Harmo}(m) \geq 1 \\ 10, & \text{if } \sum_{t=2}^2 \text{Harmo}(m+t) \geq 1 \\ 20, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

圖 1 呈現過度刪減因子 $\alpha(m, \omega)$ 與輸入訊雜比值的對應圖，由該圖可看出：在有母音存在的區段中，sigmoid 函數變化平緩，且轉移中心點的數值較低，即使是在低訊雜比的情況下，也可保留微弱母音成份；而在子音區段中，sigmoid 函數變化會稍微增大，轉移中心點

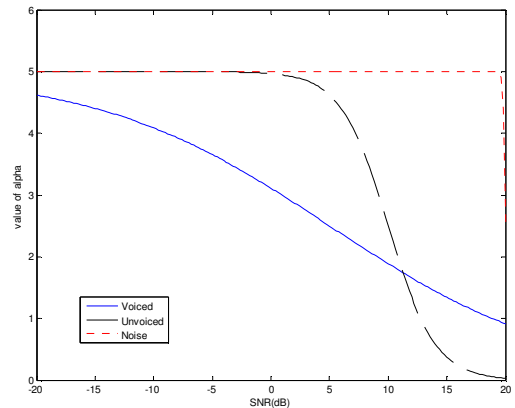


圖 1 過度刪減因子與輸入訊雜比值的對應圖。

的數值向上提升，使得在低訊雜比的區段可以有有效的刪除雜訊，而在高訊雜比的區段中則保留子音成分；另外在低訊雜比且無語音的區段中， $\alpha(m, \omega)$ 的數值很大，故可以透過式(1)大幅刪除背景雜訊。

2.2 母音偵測方法

本節將介紹母音音框的偵測方法，首先將受干擾語音透過低通濾波器來取得 50~500Hz 基頻(fundamental frequency)範圍的低通信號 $\phi(n)$ ，接著使用式(5)計算該低通信號的自相關函數 $R_\phi(\tau)$ ：

$$R_\phi(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \phi(n) \cdot \phi(n+|\tau|) \quad (5)$$

其中： τ 是時間的偏移量，用以計算音高週期的位置。

由式(5)可以得知：當低通受干擾語音信號 $\phi(n)$ 作偏移相乘時，自相關函數的值會由高峰到低谷，再回到高峰處，而第二個高峰處即為擬尋找的音高週期位置。

為了精準取得音高週期，也可透過平均強度變化函數(average magnitude difference function, AMDF)求得，如式(6)所示：

$$AMDF(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|\tau|} |\phi(n) - \phi(n+|\tau|)| \quad (6)$$

由式(6)可以得知：當低通受干擾語音信號 $\phi(n)$ 作偏移相減時，平均強度變化函數的值會由谷底往高峰處變化，再回到谷底處，而第二個谷底處即為擬尋找的音高週期位置。

為了提高音高週期的鑑別度，可以將 $R_\phi(\tau)$ 與 $AMDF(\tau)$ 相除得到權重自相關函數(weighted autocorrelation function, WAF)，提升音高週期的準確性，如式(7)：

$$WAF(\tau) = \frac{R_\phi(\tau)}{AMDF(\tau) + \varepsilon} \quad (7)$$

其中： ε 是一個非常小的數值，用來防止分母為零。

在音高週期處，自相關函數出現極大值；相對的，平均強度變化函數則出現極小值，將兩個函數分別置於分子和分母(如式(7))，利用分子和分母成反比的特性，在音高週期位置會出現極大值，而非音高週期所在位置的權重自相關函數值會很小，可以提高音高週期的鑑別度。

取得音高週期之後，代入式(8)，即可得到基頻 F_0 的頻率估測值：

$$F_0 = \frac{N}{T_0} \quad (8)$$

其中： T_0 代表音高週期。

使用式(8)求得的基頻頻率與實際的基頻頻率有些微的差異，因此我們透過式(9)微調基頻頻率位置到 F_0^* ：

$$F_0^* = F_0 - F_0^{Bias} \quad (9)$$

其中： F_0^{Bias} 為 F_0 與實際頻譜峰值的頻率偏差量，可由式(10)計算取得：

$$F_0^{Bias}(l) = \frac{1}{t_e - t_i} \cdot \sum_{m=t_i}^{t_e-1} F_0(m, l) - F_0'(m, l) \quad (10)$$

其中： l 表示母音音段索引； t_i 表示一個母音音段的初始音框索引； t_e 表示該母音音段的結束音框索引。

透過式(8)-(10)，以音段為單位修正基頻頻率，可以準確的估測基頻頻率的變化軌跡，並且適當修正偏差量。雖然母音音段的高頻諧波頻譜會被背景雜訊破壞，但是低頻的諧波頻譜卻能在雜訊干擾下，依然不受影響，主要原因就是該低頻諧波頻譜的能量很大，具有極佳的強健性，也能遮蔽背景雜訊，讓較低能量的雜訊雖然存在，但人耳依然聽不到。接著可以從低頻到高频之間，尋找強健的諧波頻譜，當頻率逐漸提高時，如果相鄰的諧波頻率變化量太大，表示諧波頻譜開始不穩定，因此就可以

標示強健諧波頻譜的數量 r ，亦即在頻率在 $\omega_c(k\omega_0^*)$ 與 $\omega_c((k+1)\omega_0^*)$ 兩者之間變化劇烈時，就可以標示強健諧波頻譜的邊界，而 r 的值為 k 的最大值， $\omega_c(r\omega_0^*)$ 即為最後一個強健諧波頻譜。具有強健諧波的音框就是屬於母音音框，如式(12)：

$$F^v(m) = \begin{cases} 1, & \text{if } r(m) \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

其中： $F^v(m)$ 為母音音框旗號； $r(m)$ 為強健諧波頻譜數量。

2.3 雜訊估測方法

本文使用的雜訊估測方法為最小控制遞回平均雜訊估測法[11]，雜訊估測頻譜可由式(13)求得。利用諧波頻譜調適當前估測雜訊的音段長度[12]，根據每個音段母音是否存在，調整雜訊的更新音段長度 L ，如式(14)：

$$L(m+1) = \begin{cases} L(m) + L_1, & \text{if } F^v(m) = 1 \\ L(m) + L_2, & \text{if } \sum_{t=2}^2 F^v(m) > 0 \\ r * L(m), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

其中： $L_1=24$ 、 $L_2=10$ 、 $r=0.8$ 。

$$r = \{k \mid |\omega_c(k\omega_0^*) - \omega_c((k-1)\omega_0^*)| \leq \delta_{\omega_0} \text{ and } |\omega_c(k+1\omega_0^*) - \omega_c(k\omega_0^*)| \geq \delta_{\omega_0}\} \quad (11)$$

其中： δ_{ω_0} ($\delta_{\omega_0}=0.5 \cdot \omega_0^*$) 為強健諧波的頻率閾值。

$$\hat{\lambda}_d(m, l) = \hat{\lambda}_d(m-1, l) \cdot p'(m, l) + [\alpha_d \cdot \hat{\lambda}_d(m-1, l) + (1-\alpha_d) \cdot |Y(m, l)|^2] \cdot [1-p'(m, l)] \quad (13)$$

其中： $\hat{\lambda}_d(m, l)$ 表示雜訊的功率頻譜； $Y(m, l)$ 為麥克風收音之頻譜； α_d ($0 < \alpha_d < 1$) 為平滑參數，其值設定為 0.95； $p'(m, l)$ 表示譜在第 m 個音框的第 k 個次頻帶中，語音存在的機率 ($p'(m, l) = 0 \sim 1$)，決定於 $Y(m, l)$ 中語音存在機率。

透過式(14)可在有母音存在的音框時增加更新雜訊音段的長度，讓估測雜訊強度維持在低位準，避免語音增強處理時，因刪減過多受干擾語音信號而造成更多的語音失真；相對的，在沒有語音的音框，會快速縮短音段長度，透過快速即時更新雜訊位準，提高雜訊頻譜的估測準確性，避免造成雜訊低估，確保語音增強時能夠有效的移除背景雜訊。

3. 實驗結果

在實驗過程中，語音受到各種類型的雜訊干擾，包括：白色雜訊、F16 戰機駕駛艙雜訊(F16-cockpit)、直升機駕駛艙雜訊(helicopter-cockpit)、工廠雜訊(factory)、雞尾酒會人聲雜訊(babble)以及汽車雜訊(car)等等，這些雜訊信號是摘錄自 Noisex-92 雜訊語料庫[13]，分別採用訊雜比值為 0、5 和 10 分貝做實驗，語音信號分別受到不同雜訊的干擾，但是用相同的雜訊估測法[12]估測受干擾語音的雜訊，並進行本文語音增強演算法與其它頻譜刪減法的效能評估與比較。

表 1 呈現在各種雜訊環境中使用不同頻譜刪減法處理後的語音訊雜比值改善度比較表，由表 1 可以發現：經本文方法處理後的訊雜比值改善度均優於功率頻譜刪減法以及 Sukanya 方法[8]，尤其在汽車、人聲、直升機座艙以及白色雜訊的干擾環境中，訊雜比改善

表 1 在各種不同雜訊的環境使用各種頻譜刪減法處理後的語音訊雜比值改善度比較表

Noise type	SNR (dB)	Method		
		PSS [8]	Sukanya [8]	Proposed
White	0	3.55	6.23	7.92
	5	3.26	5.21	6.08
	10	2.83	4.11	4.35
F16	0	3.64	5.43	6.71
	5	3.03	4.54	5.22
	10	2.56	3.60	3.75
Factory	0	3.72	5.26	6.42
	5	3.16	4.40	4.97
	10	2.60	3.46	3.49
Helicopter	0	3.62	5.50	6.95
	5	3.06	4.75	5.69
	10	2.54	3.77	4.07
Babble	0	1.99	3.35	3.96
	5	1.53	2.67	2.97
	10	1.26	2.10	2.15
Car	0	6.52	7.67	10.97
	5	6.15	7.45	10.29
	10	5.28	6.51	8.21

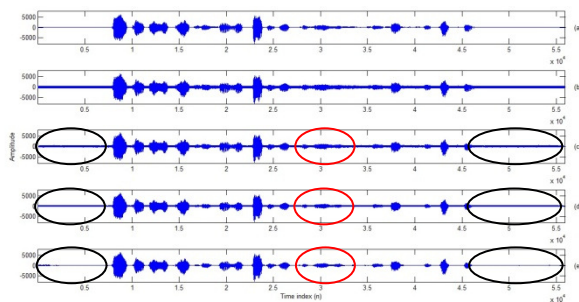


圖 2 語音波形圖；(a)乾淨語音；(b)受白色雜訊干擾的語音，訊雜比值為 0 dB；(c)使用典型頻譜刪減法增強後的語音；(d)使用 Sukanya 方法[8]增強後的語音；(e)使用本文方法增強後的語音。

度大幅提升，證明本文提出的方法可以大幅改善頻譜刪減法的效能。

圖 2、3 呈現語音信號受白色雜訊以及 F16 戰機駕駛艙雜訊干擾的語音信號(訊雜比值均為 0 dB)，比較各種不同類型的頻譜刪減法處理後的波形圖可以發現，本文的方法(如圖 2(e)、3(e))可以有效的刪除背景雜訊(黑色橢圓標示

處)；相對的，在有語音的區段中，本文方法處理後的語音訊號不會造成嚴重的語音失真(紅色橢圓標示處)，還能有效的刪除背景雜訊，提升增強語音信號的品質。

圖 4、5 呈現受干擾語音信號經過不同頻譜刪減法的聲譜圖，本文的方法透過諧波頻譜與訊雜比值調適 sigmoid 函數來取得過度刪減因子；由圖中可以看出本文方法能有效的刪除背景雜訊(黑色橢圓標示處)；相對的，在有語音的區段中，也能保留諧波的頻譜成份(紅色橢圓標示處)，即使是在高頻的微弱諧波也能保留，故本文的方法(如圖 4(e)、5(e))無論在消除背景雜訊或者諧波頻譜的保留效能表現，均優於其他類型的頻譜刪減演算法(圖 4(c)、4(d)、5(c)、5(d))。

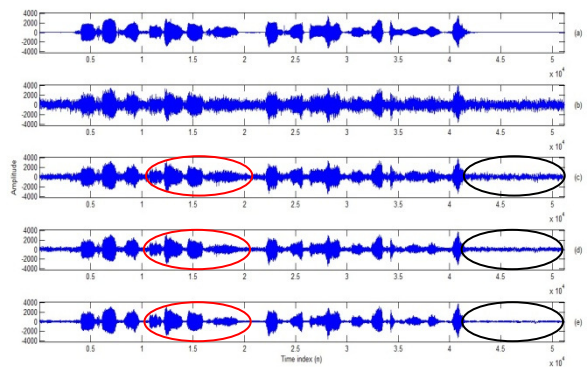


圖 3 語音波形圖；(a)乾淨語音；(b)受 F16 座艙雜訊干擾的語音，訊雜比值為 0 dB；(c)使用典型頻譜刪減法增強後的語音；(d)使用 Sukanya 方法[8]增強後的語音；(e)使用本文方法增強後的語音。

4. 結論

本文利用基頻諧波調適 sigmoid 函數，根據音框中及其附近是否有母音來調整 sigmoid 函數的斜率以及轉移中心點位置；在母音區段中，sigmoid 的函數變化較平緩，且轉移中心點數值較低，保留較多低訊雜比的微弱母音成分；而在子音區段中，sigmoid 函數變化稍微增大，轉移中心點的數值向上提升，可在低訊

雜比區域有效的刪除雜訊，並且在高訊雜比的區段中保留子音成分，確保增強語音的可理解度；另外在低訊雜比且無語音的區段中，過度刪減因子的數值會很大，使得頻譜刪減法能大幅刪除背景雜訊。實驗結果證明：本文提出的方法可以提升頻譜刪減法的雜訊移除能力，有效降低殘留雜訊，同時不會對語音成份過度刪減，有效提升頻譜刪減法的語音增強效能。

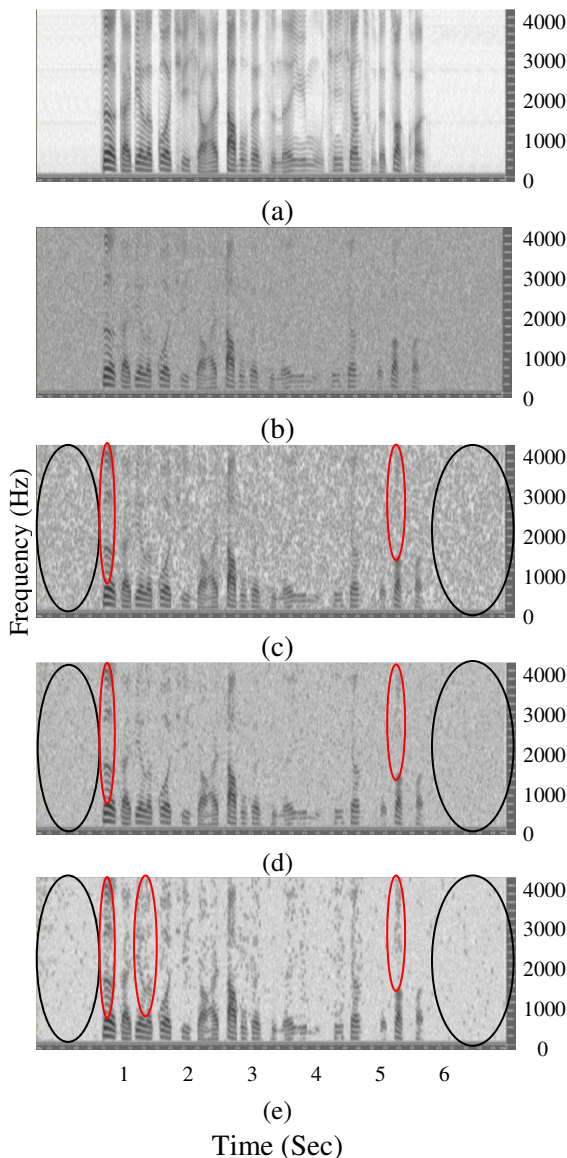


圖 4 語音聲譜圖；(a)乾淨語音；(b)受白色雜訊干擾的語音，訊雜比值為 0 dB；(c)使用典型頻譜刪減法增強後的語音；(d)使用 Sukanya 方法[8]增強後的語音；(e)使用本文方法增強後的語音。

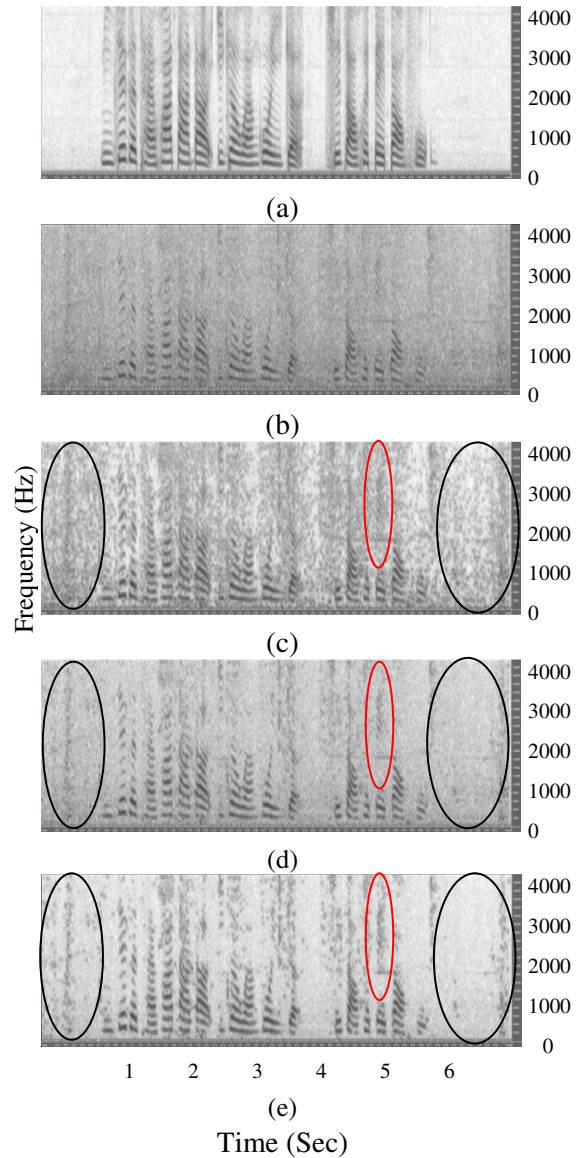


圖 5 語音聲譜圖；(a)乾淨語音；(b)受 F16 戰機駕駛艙雜訊干擾的語音，訊雜比值為 0 dB；(c)使用典型頻譜刪減法增強後的語音；(d)使用 Sukanya 方法[8]增強後的語音；(e)使用本文方法增強後的語音。

致謝

本研究由科技部專題研究計畫之經費支助，計畫編號為 MOST 104-2221-E-468-007。

參考文獻

- [1] Saadoun, A., Amrouche, A. and Selouani, S., “Perceptual Subspace Speech Enhancement Using Variance of the Reconstruction Error,” Digital Signal

- Processing, Vol. 24, pp. 187-196, 2014.
- [2] Li, M.S.Y., Gemmeke, J.H. and Zhang, X., "Speech Enhancement Under Low SNR Conditions Via Noise Estimation Using Sparse and Low-Rand NMF with Kullback-Leibler Divergence," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 23, No. 7, pp. 1233-1242, 2015.
- [3] Yu, J., Benesty, J., Huang, G. and Chen, J., "Optimal Single-Channel Noise reduction filtering matrices from the Pearson correlation coefficient perspective," in *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 201-205, 2015.
- [4] Lu, C.-T., "Improvement of Enhanced Speech Using Harmonic Boost and Block-Directional-Median Filter," *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 97-113, 2015.
- [5] Lu, C.-T. and Tseng K.-F., "A Gain Factor Adapted by Masking Property and SNR Variation for Speech Enhancement in Colored-Noise Corruptions," *Computer Speech and Language*, Vol. 24, No. 4, pp. 632-647, 2010.
- [6] Lu, C.-T., "Enhancement of Single Channel Speech Using Perceptual-Decision- Directed Approach," *Speech Communication*, Vol. 53, No. 4, pp. 495-507, 2011.
- [7] Paruav, G. and Anil, G., "Review of Spectral Subtraction Technique for Speech Enhancement," *International Journal of Electronics & Communication Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 189-194, 2011.
- [8] Sukanya, S. M. and Ananthakrishna, T., "Dynamic Spectral Subtraction on AWGN Speech," in *Proc. IEEE International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*, pp.92-97, 2015.
- [9] Hasan, M.K., Salahuddin, S. and Khan, M.R., "A Modified a Priori SNR for Speech Enhancement Using Spectral Subtraction Rules," *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 11, No. 2, pp. 450-453, 2004.
- [10] Ram, S. and Preeti, R., "Spectral Subtraction Speech Enhancement with RASTA Filtering," in *Proc. National Conference on Communications*, 2007.
- [11] Cohen, I. and Berdugo, B., "Noise Estimation by Minima Controlled Recursive Averaging for Robust Speech Enhancement," *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 9, No. 1, pp. 12-15, 2002.
- [12] Lu,C.-T., Lei, C.-L., Tseng, K.-F. and Chen, C.-T., "Estimation of Noise Magnitude Using Minima-Controlled-Recursive-Averaging Algorithm with Variable Length for Speech Enhancement," in *Proc. National Symposium on Telecommunications*, 2015.
- [13] Varga, A. and Steeneken, H. J. M., "Assessment for Automatic Speech Recognition: II. NOISEX-92: A Database and an Experiment to Study the Effect of Additive Noise on Speech Recognition Systems," *Speech Communication*, Vol. 12, No. 3, pp. 247-251, 1993.