

# 基於渦輪碼的跳頻展頻系統在干擾通道下的 性能與通信協定的設計

張瑞淇、鄭文昌、黃一泓

## 摘要

本論文探討基於渦輪碼的跳頻展頻(Frequency Hopping Spread Spectrum)系統在干擾通道下的性能。本研究假設接收機擁有通道狀態資訊，著重在修正現有的渦輪解碼器(Turbo Decoder)使其適用於干擾通道，提出採用自動增益控制(Automatic Gain Control)技術與應用非同調的平方接收機(Square Law Receiver)的軟決策解碼度量(Soft Decision Decoding Metric)，修改渦輪解碼器計算分支(Branch)軟決策解碼度量的演算法。本研究採用電腦模擬來驗證渦輪解碼器的性能，由模擬結果可知：本研究建議的渦輪解碼器可有效抵抗干擾，與真實的通信接收機架構一致，對信號與干擾比值的估計誤差不靈敏，所以不需要精確地估計通道狀態資訊。有關於低複雜度的渦輪解碼器的比較：Log-MAP 演算法最複雜也有最佳性能；SOVA 演算法有最簡單的架構，在誤碼率  $10^{-3}$  時，約比 Log-MAP 相差 0.4dB；而 Max-Log-MAP 的性能介於 Log-MAP 與 SOVA 之間，在誤碼率  $10^{-3}$  時，約比 Log-MAP 相差不到 0.1dB。本文最後提出將渦輪碼應用於高速影像傳輸的通信協定設計方法，既可保有渦輪碼的抗干擾的特色，也可以提昇資料的傳輸效率。

**關鍵詞：**跳頻展頻、渦輪碼、自動增益控制、混合自動重傳。

# Performance of Turbo Decoders for FH/SS over Jammed Channel and Protocol Design

Jui-Chi Chang, Wen-Chang Cheng , Yi-Hung Huang

## Abstract

In this paper, turbo codes are investigated in a slow frequency-hopped binary frequency shift keying spread spectrum (FH/BFSK-SS) system with partial band jamming and full-band thermal noise. A soft decision decoding metric which includes automatic gain control (AGC) is proposed for turbo codes decoding with non-coherent square law receiver of FH/BFSK. This paper also focuses on the performance comparison of various reduced complexity turbo decoding algorithms using the above mentioned soft decision decoding metric. These low complexity turbo decoding algorithms include Log-MAP, Max-Log-MAP and SOVA. From the simulation results, the proposed soft decision decoding metric can effectively combat jamming and non-sensitive to channel state information error. For the comparison of low complexity decoders, Log-MAP has the best performance, but with highest complexity. While SOVA has the worst performance, it has the lowest complexity. Max-Log-MAP performs between Log-MAP and SOVA. The performance degradation is about 0.4dB between SOVA and Log-MAP algorithms. Finally, protocols which enhanced the throughput for high speed real time image transmission are proposed. With the proposed protocols, the high interference immunity of turbo codes is reserved without sacrificing the throughput.

**Keywords :** FH/SS, Turbo Code, AGC, HARQ.

---

Jui-Chi Chang, Instructor, Dep. of Information Networking Tech., HIT.

Wen-Chang Cheng, Associate Professor, Dep. of Computer Science and Information Engineering, CYUT.

Yi-Hung Huang, Associate Professor, Dep. of Information Networking Tech., HIT.

## 壹、跳頻展頻系統與渦輪碼

跳頻展頻(Frequency Hopping)是一個有效率的無線多重存取封包通信技術[1]，因為具有簡單的系統架構、容易實現與抗干擾的能力，已經長期被使用於軍事通信，一些最新的無線通信系統如 IEEE 802.15 藍芽(Bluetooth)通信協定[2]，也採用跳頻展頻技術在免執照的頻帶以抵抗通道上的干擾。跳頻展頻系統的性能很容易受道頻道上的干擾信號的影響，所以通道編碼(Channel Coding)或錯誤更正碼技術(Error Correction Code)常被用來克服干擾的問題[1]。目前已經有許多研究探討里德索羅門碼(Reed Solomon Code)[3]、里德索羅門碼與區塊碼(Block Code)串接(Concatenation)[4]、里德索羅門碼與旋積碼(Convolutional Code)串接等編碼技術在跳頻展頻系統下的性能。這些研究結論顯示跳頻展頻系統必須要搭配有效的錯誤更正碼技術才能發揮系統的效能，而且串接碼技術(Concatenate Code)是提升系統效能的低成本方案。

渦輪碼(Turbo Code)是令許多人感到振奮的通道編碼技術，其為首度被宣稱接近夏農極限(Shannon Limit)的錯誤校正碼，由法國 Berrou、Glavieux 與 Thitimajshima 發表於 1993 年日內瓦舉行的通訊研討會[5]，剛開始的時候通信網路界的許多專家學者都懷疑渦輪碼為何有如此優異性能，但是後來許多學者也陸續做出相同或更好的結果，所以渦輪碼就開始被應用在各種不同的系統，例如歐洲的第三

代行動電話系統(Third Generation, 3G)[18]，被稱為全球行動電話系統(Universal Mobile Telephone System, UMTS)也採用渦輪碼來提升電信網路的效能。渦輪碼採用並聯串接的技術，每個編碼器中有兩個或更多旋積碼編碼器，原始資料經過不同的交錯器(Interleaver)將其順序攪亂後，分別交給每個旋積碼編碼器來編碼產生同位元檢查碼(Parity Check)，傳送至通道的資料就由原始資料與每個編碼器產生的同位元檢查碼所組成。在渦輪碼編碼器中關鍵的元件為交錯器，它(們)可以將原始資料的順序重新排列作為其它旋積碼編碼器的輸入，交錯器可將原本第一個旋積碼編碼器產生的低漢明距離(Hamming Distance)的字碼在第二個旋積碼編碼器卻產生有很高的漢明距離的字碼。

在原始的渦輪碼論文中採用兩個最大事後機率(Maximum a Posteriori, MAP)演算法解碼器[5]，MAP 演算法通常有很高的複雜度，不適合用硬體來實現，後來許多學者提出簡化的演算法，如 Log-MAP, Max-Log-MAP, 與 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) [12]，但是這些演算法在性能上都是次佳(Sub-Optimal)的演算法，會有一些性能上的損失，但卻提供了用硬體來實現的可能與可降低實現的成本。目前大部份的文獻在探討渦輪碼時，絕大部份均假設系統採用線性調變與同調接收[5]-[7]。有關於採用渦輪碼的跳頻展頻系統的研究文獻，[8]-[9]採用同調(Coherent)或非同調(Non-Coherent)接收機，並使用

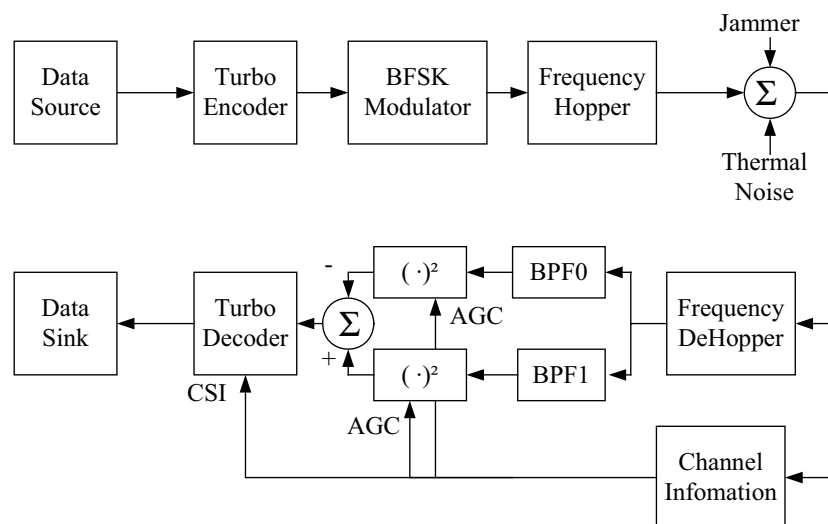
MAP 演算法，[10]研究採用渦輪碼的跳頻展頻系統的在行動通信通道上的性能。本論文將著重於跳頻展頻系統實務上可實現的強健(Robust)與簡化複雜度(Reduced Complexity)的渦輪碼解碼器演算法，最後並提出結合影像編碼與通道編碼的通信協定架構。

此論文分成下列部份：第二部份介紹採用渦輪碼的非同調跳頻展頻系統的模式與渦輪碼 Log-MAP 演算法；第三部份推導採用適用非同調跳頻展頻系統的渦輪碼解碼器的近似(Approximate)Log-MAP 演算法，也包含其它更簡化的演算法，包括 Max-Log-MAP 與 SOVA；第四部份為電腦模擬結果與討論；第五部份介紹結合影像編碼與通道編碼的通信協定架構；第六部份為本篇論文的結論。

## 貳、系統模型與 Log-MAP 演算法

### 一、系統模型：

採用渦輪碼的跳頻展頻(Frequency Hopping Spread Spectrum)系統在部份頻道干擾通道下的系統模型如圖一所示。在發送端的編碼器包括兩個並列串接(Parallel Concatenated)的遞迴系統旋積碼編碼器(Recursive Systematic Convolutional Code)作為渦輪碼的組成碼(Component Code)，兩個旋積碼編碼器用一個交錯器(Interleaver)隔開。輸入至編碼器為長度為  $K$  的資訊序列  $u_k \in \{0,1\}$ ，經過編碼器後產生三組序列：原始資料序列  $u_k$ ，第一個旋積碼編碼器產生的檢查碼  $p_{1,k}$ ， $u_k$  經過交錯器後，第二個旋積碼編碼器產生的檢查碼  $p_{2,k}$ 。將此三組序列並行串接後的數據即為渦輪碼編碼後的數據。



圖一：基於渦輪碼的跳頻展頻(Frequency Hopping Spread Spectrum)系統在部份頻道干擾通道下的系統模型

爲了能延用既有的渦輪碼解碼器演算法，我們採用傳統的資訊對應至信號的方式，即位元 0 對應至-1、位元 1 對應至+1。假設在時間  $k$  編碼後的資訊爲

$$\mathbf{v}_k = [v_k^0 \ v_k^1 \ v_k^2] \quad (1)$$

上式中  $v_k^n \in \{+1, -1\}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, K$ , 且  $u_k$  對應至  $v_k^0$ 、 $p_{1,k}$  對應至  $v_k^1$ 、 $p_{2,k}$  對應至  $v_k^2$ 。此渦輪碼編碼器的編碼率(Code Rate)爲  $1/3$ 。編碼後的串流經過二元頻率偏移(Binary Frequency Shift Keying, BFSK)調變器的調變後，再經過隨機(Random)的慢速跳頻(Slow Frequency Hopping)系統改變其載波頻率後傳送至通道。假設此通道爲部份頻道干擾通道(Partial Band Jammed Channel)，干擾源會平均地將雜訊散佈在整個使用頻帶的  $\mu$  部份( $0 < \mu \leq 1$ )，定義  $\mu$  爲部份干擾係數(Fraction of Interference)。所以在整個使用頻帶內除了有頻譜密度爲  $N_0/2$  的熱雜訊外，也在  $\mu$  部份的頻帶中有頻譜密度爲  $N_j/2\mu$  的干擾。

信號經過通道到達接收機時，首先被解跳頻(De-hopped)，經過兩個解調解收機(Demodulation Receiver)後，再經過兩個非同調平方接收機(Non-Coherent Square Law Receiver)處理。假設可量測通道狀態資訊(Channel State Information)，如雜訊與干擾信號強度、信號雜訊比等。自動增益控制的功能可以用平方接收機的輸出被除以

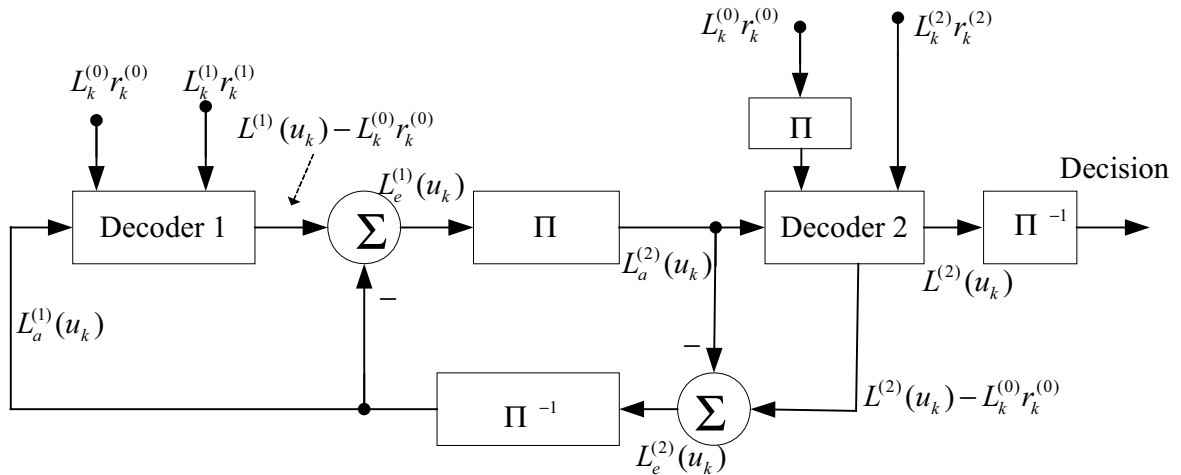
(Normalize)雜訊與干擾的功率的方式來近似。最後爲了能夠沿用目前文獻上的渦輪碼編碼器演算法，以下的章節將會提出適用於非同調跳頻展頻系統的軟決策解碼統計(Soft Decision Decoding Statistics)或量測值(Metric)。

## 二、 Log-MAP 演算法：

渦輪碼解碼器是一種採用 MAP 或其簡化演算法(如 Log-MAP)的迭代(Iteration)解碼演算法。目前已經有許多文獻介紹渦輪碼解碼器的推演過程[5] [12] [15]。傳統的 MAP 演算法均假設採用信號採用線性調變與通道爲白高斯通道(AWGN)，所以 MAP 演算法可以簡化爲 Log-MAP 演算法。旋積碼解碼器採用 Log-MAP 演算法時，對數可能性比值(Log Likelihood Ratio, LLR)被作爲軟進軟出 (Soft-in Soft-out, SISO)的資訊。在渦輪碼解碼器中，每個旋積碼解碼器會產生原始資訊的外部資訊(Extrinsic Information)，並將此外部資訊作爲另一個解碼器在解碼時的先驗資訊(a priori Information)，這個程序會被一直重複執行，假如信號雜訊比大於某個臨界值，解碼的錯誤率就會降至很低。

在部份頻帶干擾通道下的渦輪碼解碼演算法架構如圖二所示，其中包括兩個 Log-MAP 演算法，在此採用與[12]類似的符號，唯一不同之處在於渦輪碼解碼演算法中的通道可靠因數，其原因爲部份頻道干擾通道是一個時變(Time Varying)通道，

所以渦輪碼解碼演算法中的通道可靠因數 (Channel Reliability Factor) 是時變的參數。



圖二：在部份頻帶干擾通道下的渦輪碼解碼演算法架構

為了使報告更完整，在此重述 Log-MAP 演算法。假設  $s'$  是旋積碼在時間  $k$  時的狀態， $s$  是旋積碼在時間  $k+1$  時的狀態， $\mathbf{v}_k = [v_k^0 \ v_k^1]$  在時間  $k$  因輸入  $u_k$  所編碼產生的字碼， $\mathbf{r}_k = [r_k^0 \ r_k^1]$  是軟決策統計(Soft Decision Statistics)，可以是接收後解調的信號或將其經適當處理後所得資訊， $L_a(u_k)$  是  $u_k$  的先驗 LLR， $L_e(u_k)$  是  $u_k$  的外部資訊 LLR，則 Log-MAP 演算法可簡述如下：

(S1) 初始化前向與後向量測值(Forward and backward metrics)  $\alpha_0(s)$  與  $\beta_K(s)$ ：

$$\alpha_0(s) = \begin{cases} 0, & s = 0, \\ -\infty, & s \neq 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\beta_K(s) = \begin{cases} 0, & s = 0, \\ -\infty, & s \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

(S2) 計算分支量測值(branch metrics)  $\gamma_k(s', s)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

$$\gamma_k(s', s) = u_k \frac{L_a(u_k)}{2} + \frac{[L_k^0 r_k^0 \ L_k^1 r_k^1] \cdot \mathbf{v}_k}{2} \quad (4)$$

(S3) 計算前向量測值(forward metrics)  $\alpha_{k+1}(s)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

$$\alpha_{k+1}(s) = \ln \sum_{s' \in \mathcal{S}_k} \exp[\gamma_k(s, s') + \alpha_k(s')] \quad (5)$$

上式中  $\xi_k$  為時間  $k$  所有可能的狀態。

(S4) 計算後退量測值 (backward metrics)  $\beta_k(s')$ ,  $k = K, K-1, \dots, 1$ .

$$\beta_k(s') = \ln \sum_{s \in \xi_{k+1}} \exp[\gamma_k(s, s') + \beta_{k+1}(s)] \quad (6)$$

上式中  $\xi_{k+1}$  為時間  $k+1$  所有可能的狀態。

(S5) 計算  $u_k$  的事後機機率 (APP) 的  $L$  值  $L(u_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

$$L(u_k) = \ln \left\{ \sum_{(s', s) \in \Omega_k^+} \exp[\alpha_k(s') + \gamma_k(s', s) + \beta_{k+1}(s)] \right\} - \ln \left\{ \sum_{(s', s) \in \Omega_k^-} \exp[\alpha_k(s') + \gamma_k(s', s) + \beta_{k+1}(s)] \right\} \quad (7)$$

上式中  $\Omega_k^+$  與  $\Omega_k^-$  為時間  $k$  時，對應至輸入分別為  $v_k^0 = +1$  與  $v_k^0 = -1$ ，狀態為  $s_k = s'$  與  $s_{k+1} = s$  的集合。

(S6) 計算  $u_k$  的外部資訊 (extrinsic information)： $L_e(u_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

$$L_e(u_k) = L(u_k) - L_k^0 r_k^0 - L_a(u_k). \quad (8)$$

在式(4)與(8)中，資料位元的通道可靠因數  $L_k^0$  與檢查位元的通道可靠因數  $L_k^1$  是時變的參數。但在[12]中通道可靠因數是常數，其原因為[12]中所考慮的通道為 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 通道，其通道的信號雜訊比是固定不變。通道可靠因數代表收到信息的可靠度，當信號雜訊比愈高時， $L_k^0$  與  $L_k^1$  的值也愈大；反

之，信號雜訊比愈低時， $L_k^0$  與  $L_k^1$  的值也愈小。在[16]文獻中顯示，通道可靠因數如果沒有正確估計，會影響渦輪碼解碼演算法的性能，但在 AWGN 通道中影響並不明顯。

## 參、適用於跳頻展頻系統的渦輪碼演算法

在文獻[11]中已經有建議在非同調的跳頻展頻系統中旋積碼解碼器所採用的軟決策統計，因渦輪碼採用數個二進制的旋積碼作並聯串接，為了發揮渦輪碼的功效，所以在本章中將提出適用於跳頻展頻系統的渦輪碼演算法。

### 一、採用 AGC 功能的接收信號的模型

為了分析跳頻展頻系統的信號特性，假設傳送的資訊為全部是 0 的資訊（即  $u_k = 0$  或  $v_k^0 = -1$ ）；在時間  $k$  時，兩個 AGC 接收機之後的信號分別為  $y_k^0$  與  $y_k^1$ ，可用數學式表示如下：

$$y_k^0 = \frac{(\sqrt{E_c} \cos \phi + n_{0c})^2 + (\sqrt{E_c} \sin \phi + n_{0s})^2}{\sigma_k^2}$$

$$y_k^1 = \frac{(n_{1c})^2 + (n_{1s})^2}{\sigma_k^2}, \quad (9)$$

上式中  $\phi$  為發射機至接收機的未知相位差。 $n_{0c}, n_{0s}, n_{1c}, n_{1s}$  為同相位與正交相位的雜訊。 $\sigma_k^2$  為包括熱雜訊與干擾雜訊的變異數， $E_c$  是編碼後每位元的能量。 $y_k^0$  與  $y_k^1$

為具有兩個自由度的 Central 與 non-central 卡方分佈(Chi- Square Distribution)的隨機變數，其機率密度函數為

$$p_{y_k^0}(y) = e^{-(y+s^2)} I_0(\sqrt{ys}),$$

$$p_{y_k^1}(y) = e^{-y} \quad (10)$$

上式中  $I_0()$  為零階的修正貝索函數 (Modified Bessel function of zero order)，Non-central 參數  $s^2$  的定義為

$$s^2 = \frac{E_c}{2\sigma_k^2} \quad (11)$$

$y_k^0$  與  $y_k^1$  的期望值與變異數分別為

$$E[y_k^0] = 1 + s^2, \quad Var[y_k^0] = 1,$$

$$E[y_k^1] = 1, \quad Var[y_k^1] = 1. \quad (12)$$

## 二、近似 MAP 解碼演算法

定義非同調的跳頻展頻系統的軟決策統計(Soft Decision Statistics)  $r_k$  如下

$$r_k = y_k^1 - y_k^0 \quad (13)$$

上式中  $r_k$  的上標被省略來簡化符號。 $r_k$  的機率分佈函數為

$$p_{r_k}(y) = p_{y_k^1}(y) * p_{y_k^0}(-y)$$

上式中\*代表迴旋積分(Convolution)，所以  $r_k$  並不是高斯分佈的隨機變數，且包含有指數與 Bessel 函數，無法直接應用 Log-MAP 演算法。為了克服此問題，將

$p_{r_k}(y)$  用高斯分佈來近似，因為  $r_k$  的期望值與變異數分別為

$$\begin{cases} E[r_k] = -s^2, & \text{if } v_k = -1, \\ E[r_k] = +s^2, & \text{if } v_k = +1, \end{cases} \quad (14)$$

$$Var[r_k] = 2. \quad (15)$$

所以通道轉移機率(Channel Transition Probability)分佈函數  $p(r_k | v_k)$  可近似為

$$p(r_k | v_k) \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}2} \exp\left[-\frac{1}{2 \times 2} (r_k - v_k s^2)^2\right] \quad (16)$$

利用式(16)和依據參考文獻[12]的演繹步驟，若使用軟決策統計  $r_k$ ，依然可以近似的方式採用 Log-MAP 演算法作為渦輪碼解碼演算法。且此時的通道可靠因數  $L_k$  可被證明為

$$L_k = \frac{2\|E[r_k]\|}{Var[r_k]} = \frac{E_c}{2\sigma_k^2} \quad (17)$$

上式中  $L_k$  的上標再度被省略以簡化符號。所以第二部份所介紹的 Log-MAP 演算法仍可被採用，只是步驟(S4)與(S6)中通道可靠因數  $L_k^0$  與  $L_k^1$  改用式(17)的定義。注意：如果採用式(17)的  $L_k$  定義可能不會得最佳的效能，其原因為式(17)為採用了近似高斯的方法所得的結果。

## 三、其它低複雜度的渦輪碼解碼演算法

上一節以近似高斯的方法推演出適用



於跳頻展頻系統之渦輪碼的 Log-MAP 演算法。這節將把上一節的結果推廣至其它更簡化的演算法。雖然 Log-MAP 演算法比 MAP 演算法複雜度還低，但是在步驟 (S3)、(S4)與(S5)仍需要大量的對數與指數運算。爲了降低運算複雜度採用下列的近似方法，以最大值運算  $\max\{\cdot\}$  來取代上述對數與指數運算[12]

$$\begin{aligned}\max(x, y) &\approx \ln(e^x + e^y) \\ \max(x, y, z) &\approx \ln(e^x + e^y + e^z)\end{aligned}\quad (18)$$

採用上述近似運算的 Log-MAP 演算法被稱爲 Max-Log-MAP 演算法。

另一個常用的低複雜度的渦輪碼解碼演算法被稱爲 SOVA (Soft-Output Viterbi Algorithm) [17]，此演算法與傳統的 Viterbi Algorithm 類似，不同之處在解碼的過程產生信息的可靠度資訊 (Reliability Information)，並將此可靠度資訊傳遞給另一個解碼器，作爲此解碼器在解碼時的先驗資訊 (*a priori* Information)。SOVA 演算法的複雜度與傳統 Viterbi 演算法近似，但是需要較多的記憶空間來儲存與計算信息的可靠度資訊。與 Log-MAP 或 Max-Log-MAP 比較，SOVA 演算法有最低的複雜度與最低的成本，但通常也有較多的效能損失。

## 肆、模擬結果與討論

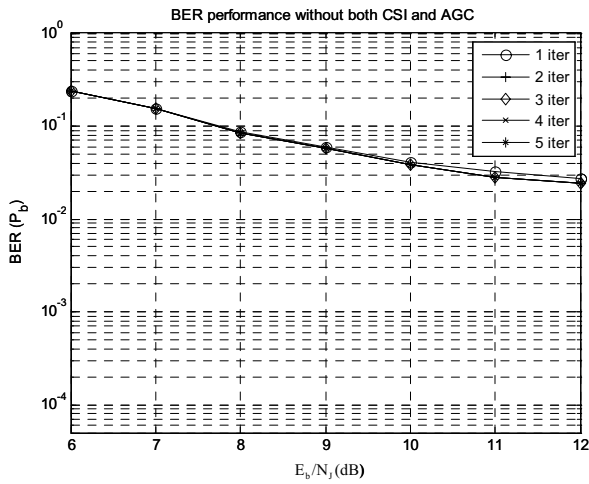
此研究以電腦模擬來分析採用渦輪碼的跳頻展頻 (Frequency Hopping Spread Spectrum) 系統在部份頻帶干擾通道下的性能。此論文所用的模擬均採用編碼率爲 1/2 的旋積碼作爲渦輪碼的組成碼 (Component Code)，此旋積碼的記憶長度爲 2，因採用「打孔」 (Puncture) 技術，部份的冗餘 (Redundant) 的同位元檢查 (Parity Check) 碼沒有被傳送，渦輪碼的有效編碼率爲 1/2。信號與雜訊的比值  $E_b / N_0$  爲 10dB，所有的模擬情況是考慮在最差的干擾情況下，即部份干擾係數  $\mu$  被選定爲[13]

$$\mu = \begin{cases} 2 / \rho_c, & \text{if } \rho_c \geq 2 \\ 1, & \text{if } \rho_c < 2 \end{cases}\quad (19)$$

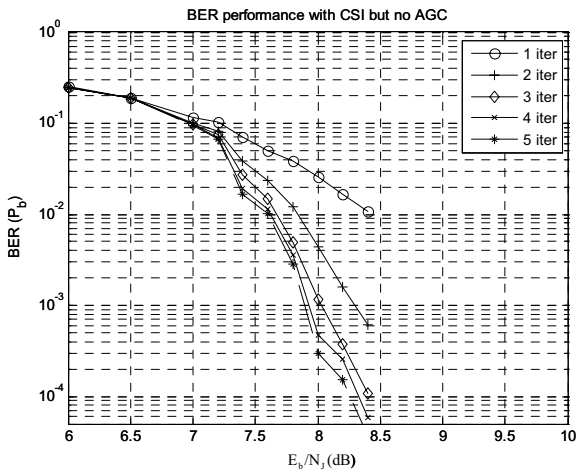
上式中  $\rho_c$  爲編碼後的位元能量與干擾功率密度的比值，即  $\rho_c = E_c / N_J$ 。

圖三至六爲採用 Log-MAP 解碼演算法的系統誤碼率 (Bit Error Rate)。圖三爲同時沒有 AGC 與估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ ) 下的系統誤碼率。圖四爲沒有 AGC 但是有精確估計通道可靠因數  $L_k$  下的系統誤碼率，誤碼率約在迭代 (Iteration) 五次後出現飽和。由圖三可知沒有精確估計通道可靠因數  $L_k$ ，就不能可靠的更正通道上的錯誤率。此結果與[16]的結論不一致，其原因爲干擾通道爲時變系統，必須精確估計通道可靠因數  $L_k$ 。圖五爲有使採

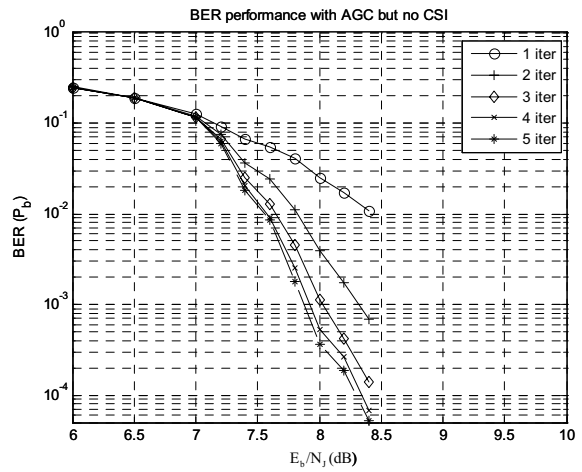
用 AGC 功能,但是沒有估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ )下的系統誤碼率,圖六為同時有使採用 AGC 功能與精確估計通道可靠因數  $L_k$  下的系統誤碼率。



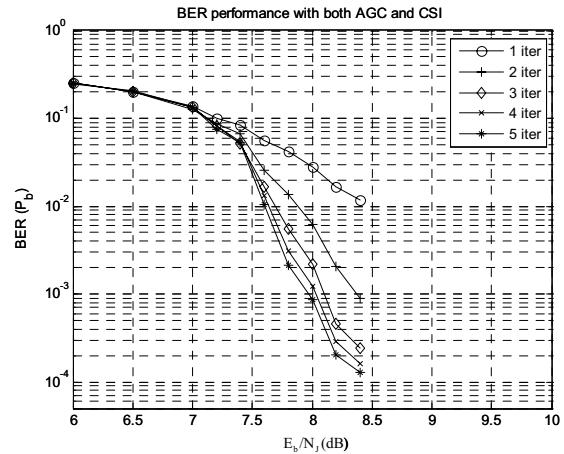
圖三：採用 Log-MAP 演算法,同時沒有 AGC 與估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ )下的系統誤碼率



圖四：採用 Log-MAP 演算法,沒有 AGC 但是有精確估計可靠因數  $L_k$  下的系統誤碼率



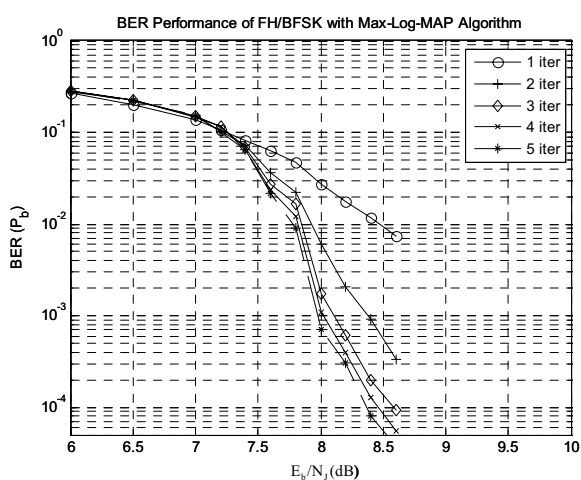
圖五：採用 Log-MAP 演算法,有 AGC 但沒有估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ )下的系統誤碼率



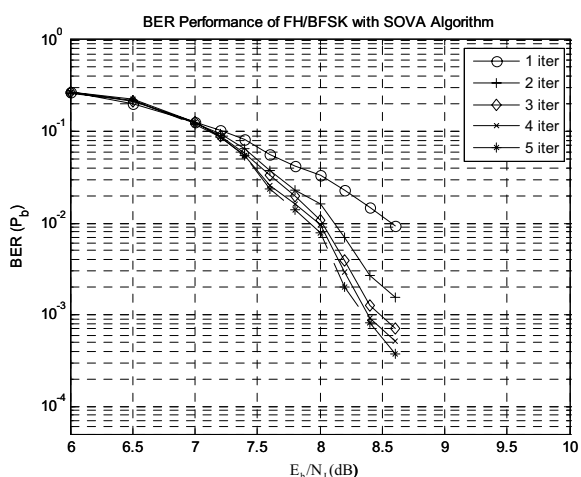
圖六：採用 Log-MAP 演算法,同時有 AGC 與有估計通道可靠因數下的系統誤碼率

由圖五可知採用 AGC 功能的接收機,即使沒有估計通道可靠因數  $L_k$  仍然有最佳的系統性能,所以採用 AGC 功能後,渦輪碼解碼演算法對通道可靠因數  $L_k$  的估計誤差就不敏感,對接收機的設計者而言這是一個很好的優點,因為不需要浪費

處理能力去精確估計通道可靠因數  $L_k$ ，就可得到很好的效能。圖六中雖然同時有 AGC 與精確估計通道可靠因數  $L_k$ ，但卻沒有得到最佳效能，其原因為本研究採用近似高斯的方法去推導出通道可靠因數  $L_k$  與近似 Log-MAP 演算法，但是並不是理論上最佳的解碼演算法。



圖七：採用 Max-Log-MAP 演算法，有 AGC 但沒有估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ ) 下的系統誤碼率



圖八：採用 SOVA 演算法，有 AGC 但沒有估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ ) 下的系統誤碼率

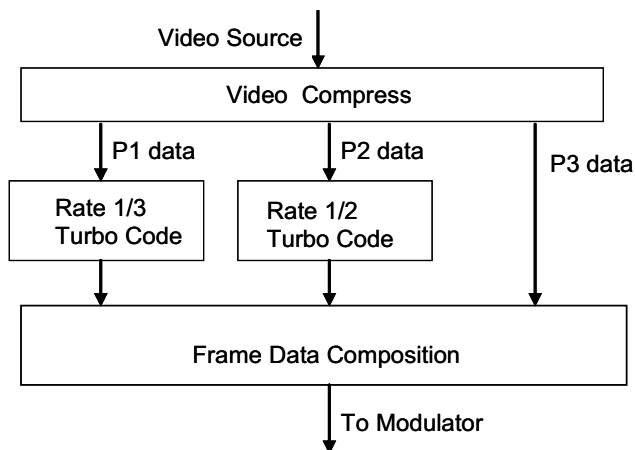
圖七與八分別顯示採用 Max-Log-MAP 與 SOVA 演算法下的系統性能，在這兩個模擬中的接收機均使用 AGC 功能，但沒有估計通道可靠因數  $L_k$  ( $L_k=1$ )，其原因為在圖五的模擬結果得知有 AGC 功能的接收機對通道可靠因數  $L_k$  不敏感。由結果可知，Max-Log-MAP 演算法與 Log-Map 演算法幾乎有相同的性能，在相同誤碼率下其需要的信號干擾比值相差約 0.1dB。但採用 SOVA 演算法的性能與 Log-Map 演算法相比約有 0.4dB 的差距，所以 SOVA 演算法雖然較容易實現，但犧牲了系統效能。至於應採用那一個演算法應視在設計整個系統時的實際鏈路預算(Link Budget)與系統成本(System Cost)而定。

## 伍、影像編碼與通道編碼的整合的通信協定設計

### 一、分級錯誤更正(Classified Error Correction)協定

傳統的通信協定都是資訊源的壓縮編碼與通道編碼獨立作業，資訊源的壓縮編碼的目的是要將傳送的資料量減少，以提高資訊傳送速度，而通道編碼，如渦輪碼，卻要在資料加上冗餘(Redundant)的同位元檢查碼，所以會增加必要的資料傳輸量。渦輪碼在實際應用時為了提高實際的資訊傳輸率，稱為編碼率(Code Rate)，會將部份同位元檢查碼捨棄不傳，此種方法稱為「打孔」(Puncture)。例如在 UMTS 系統中

[18]，採用「打孔」技術可以將資料的編碼率由 1/4 提升至 1/2，。打孔後的渦輪碼性能稍微變差，但卻可提升資料的傳輸效率。



圖九：分級錯誤更正(Classified Error Correction)協定的方塊圖

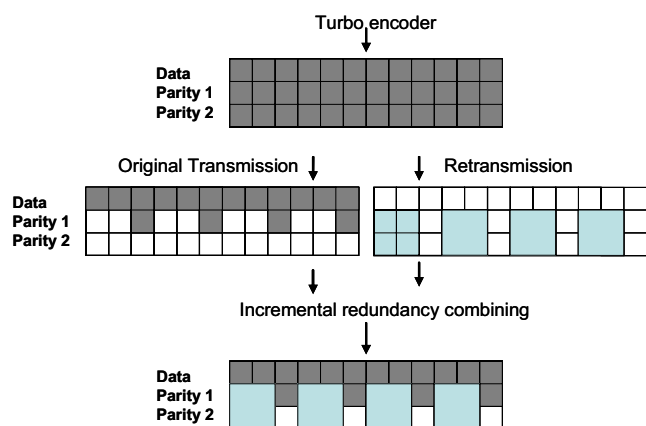
爲了提高整體資料的傳輸效率，本文將影像資訊源的壓縮編碼與通道編碼合併設計，提出下列方案，如圖九所示：

- (1) 將影像編碼後的資料依其對影像品質的重要性分成 P1、P2 與 P3 三種等級：
  - P1: 對影片品質有絕對影響的資訊，如缺乏此資訊根本無法辨識影像。
  - P2: 對影片品質有局部影響的資訊，如缺乏此資訊仍尚可辨識影像。
  - P3: 對影片品質只有些微影響的資訊，缺乏此資訊對影像辨識幾不受影響。
- (2) 將 P1 類的資訊用編碼率爲 1/3 的渦輪碼來編碼，P2 類的資訊用編碼率爲 1/2 的渦輪碼來編碼，而 P3 類的資訊不使

用錯誤更正功能，最後將此三類資料編成適當長度的碼框傳送至調變器。

## 二、混合錯誤更正/自動重傳 (Hybrid FEC/ARQ)協定

除了採用「打孔」技術來提升資料的傳輸效率，尚可採用混合自動重傳(Hybrid Forward Error Correction/ Automatic Repeat Request)協定，又稱爲遞增冗餘技術(Incremental Redundancy)，或簡稱爲 HARQ，其原理如圖十所示，這是 UMTS 中的 HSDPA 服務所採用的錯誤更正技術 [18]。其原理爲資料仍採用渦輪碼編碼器來產生同位元檢查碼，開始時只傳資料與極少數的同位元檢查碼，即採用「打孔」技術將編碼率提升爲 3/4，如果接收端回應資料有錯誤時，再補送更多同位元檢查碼，使整體編碼率下降爲 3/8。與分級錯誤更正 (Classified Error Correction) 協定比較，此協定在低干擾時有較高的傳輸效率，但在高干擾時的封包延遲時間較不固定。



圖十：混合錯誤更正/自動重傳(Hybrid

FEC/ARQ)協定的方塊圖

## 陸、結論

此論文探討基於渦輪碼的非同調跳頻展頻系統在干擾通道下的性能，並且提出適用於此系統的近似 Log-MAP 解碼演算法，本論文建議採用自動增益控制技術，來產生解碼演算法所需的軟決策統計(Soft Decision Statistics)，可以降低對通道可靠因數  $L_k$  的估計誤差對系統性能的影響。此研究也評估其它低複雜度的渦輪碼解碼演算法的效能，包括 Max-Log-MAP 與 SOVA 演算法，除了可降低系統複雜度外，且對系統效能影響只有 0.1 至 0.4dB 左右，至於應採用那一個演算法應視實際鏈路預算與系統成本而定。

最後，此研究提出了影像編碼與通道編碼的合併設計通信協定的方法，第一種方法為分級錯誤更正協定，將影像編碼後的資料，依據其對接收品質的重要性採用不同等級的通道編碼保護。第二種方法為混合錯誤更正/自動重傳(Hybrid FEC/ARQ)協定，第一次只傳數據資料與少量的同位元檢查碼，如果接收端回應資料有錯誤時，再傳送更多的同位元檢查碼。如此可大幅提昇傳輸效率。此影像編碼與通道編碼的合併設計通信協定的性能分析與模擬，將在將來的研究中做更進一步的分析與探討。

## 柒、參考文獻

- [1]W. E. Stark, "Coding for frequency-hopping spread-spectrum communication with partial-band interference—Part I: Capacity and cutoff rate," IEEE Trans. Commun., vol. COM-33, pp. 1036–1044, Oct. 1985.
- [2] J. Bray and C. F. Sturman, *BLUETOOTH: Connect Without Cables*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [3]M. B. Pursley and W. E. Stark, "Performance of Reed-Solomon coded frequency-hop spread-spectrum communications in partial-band interference," IEEE Trans. Commun., vol. COM-33, pp. 767–774, Aug. 1985.
- [4]C. D. Frank and M. B. Pursley, "Concatenated coding for frequency hop spread-spectrum with partial-band interference," IEEE Trans. Commun., vol. 44, pp. 377–387, Mar. 1996.
- [5]C. Berrou, A. Galvieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error correcting coding and decoding," in *Proc. ICC'93*, May 1993, pp.1064-1070.
- [6]D. Divsalar and F. Pollara, "Turbo codes for PCS applications," in *Int.Conf. Communications*, Seattle, WA, June 1995, pp. 54–59.
- [7]S. Benedetto and G. Montorsi, "Unveiling

- turbo codes: Some results on parallel concatenated coding schemes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 409–429, Mar. 1996.
- [8]J. Kang and W. Stark, "Turbo codes for coherent FH-SS with partial band interference," in *Proc. MILCOM'97*, Nov 1997, pp.5-7.
- [9]J. Kang and W. Stark, "Turbo codes for noncoherent FH-SS with partial band interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, pp.1451-1456, Nov. 1998.
- [10]U. Fiebig and P. Robertson, "Soft decision decoding in fast frequency hopping systems with convolutional cods and turbo codes," in *Proc. ICC'96*, June 1996, pp.968-973.
- [11]Y. T. Su and R. C. Chang, "Performance of Fast FH/MFSK Signals in Jammed Binary Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp.2414-2422, July 1994.
- [12]S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J.,2004.
- [13]J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed., McGraw-Hill, NewYork, 2002.
- [14]A. Papoulis and S. U. Pillai,, *Probability, Random Variables, and Stochastic Process*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
- [15]L. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate, "IEEE Trans. Inform. Theory, vol.20, pp. 284-287, Mar. 1974.
- [16]T. A. Summers and S. G. Wilson, "SNR mismatch and online estimation in turbo decoding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp.421-423, April. 1998.
- [17]J. Hagenauer and P. Hoeher, "A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications," in *Proc. GLOBECOM'89*, Dallas, TX, Nov.1989, pp. 47.1.147.1.7.
- [18]H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*, Third ed., John Wiley and Sons, England, 2004.