



國立中山大學通訊工程研究所

碩士論文

分散式偵測使用二為編碼之研究

The Study of Distributed Detection Using Two-Dimensional Codes

研究生：林友邦 撰

指導教授：王藏億 博士

中華民國 九十八 年 十一 月

## 誌謝

在中山大學 SPCSN 實驗室的兩年研究生生活，一切都是美好且值得的，我的人生也從這裡開始起飛。

本論文可以順利的撰寫完成，要先感謝我的指導教授 王藏億博士的教導，老師對我的研究給予很大的啓發與幫助。此外也要感謝余兆棠博士、黃婉甄博士對於本論文的指教和建議，讓本論文可以更完整。短短兩年的時間，讓我培養獨立研究的基礎與解決問題的能力，但等著我去學習的東西還很多。當然也要感謝 SPCSN 實驗室的學長們尤其是銘峰學長對於我的研究付出相當多關懷與指導，還有一起共同奮鬥兩年的同學健郎、冠男和采澄以及活潑可愛的學弟妹們，一路上有你們的陪伴使得兩年的研究生涯充實愉快。還有其他實驗室的學長、同學們、學弟妹在研究上的建議或切磋，都令我受益良多。

最後要對我的家人獻上最真摯的感謝，有你們在我的背後默默的支持與鼓勵，給予我安心並堅持下去的動力。脫離學生生涯會是生命另一段挑戰的開始，願我能無所懼的邁進，無所懼的開創美好的人生版圖。



友邦

2009年11月

論文名稱：分散式偵測使用二維編碼之研究

校院系：國立中山大學通訊工程研究所

頁數：

畢業時間：九十八年十一月

學位別：碩士

研究生：林友邦

指導教授：王藏億 博士

## 論文摘要

本篇論文考慮無線感測網路系統的多類別分類問題，其中包含偵測環境變化的本地感測器以及一組處理最終決策結果的融合中心。本地感測器將所接收的觀測值處理成本地決策值，並將決策結果經過無線通道傳送至融合中心，其傳輸的過程可能存在錯誤或是雜訊的干擾。參考的文獻中，分散式分類偵測使用錯誤更正碼的方法已被證實能提供好的錯誤容忍能力。因此這篇論文使用二維通道的編碼去延伸錯誤容忍分散式偵測分類系統。本論文並且延伸傳統二位元編碼的錯誤容忍分類法到使用多位元編碼方式。本論文則在考慮的架構下提供一個低複雜度的編碼法則。最後，本論文根據所建議的編碼法則去設計一系列的模擬範例去檢視本論文所建議的方法效能。

關鍵詞：無線感測網路，分散式偵測，通道編碼，多位元編碼。

Title of Thesis : The Study of Distributed Detection Using Two-dimensional Codes

Name of Institute : Graduate Institute of Communication Engineering National Sun

Yat-sen University

Pages :

Graduation Time : November 2009.

Degree Conferred : Master

Student Name : Yu-Pang Lin

Advisor Name : Dr. Tsang-Yi Wang

### Abstract

In this thesis, we consider the distributed classification problem in wireless sensor networks (WSNs). Sensor nodes in WSNs detect environmental variations and make their decisions individually, after which their decisions, possibly in the presence of faults, are transmitted to a fusion center. In literature, the distributed classification fusion using error correcting codes has been shown to have good sensor fault-tolerance capability. In this thesis, we extend the fault-tolerant classification system using error correcting code by using two-dimensional channel coding. We also extend the binary coding in literature to the M-ary code. This thesis then suggests a code construction method with low computational complexity. Based on the suggest code construction method, this thesis then conducts a series experiment to investigate the performance of the suggested method.

Keywords : Wireless sensor networks, Distributed detection, Channel coding, M-ary code.

# 目錄

誌謝	i
中文摘要	ii
英文摘要	iv
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	viii
<b>第一章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 無線感測網路和分散式偵測	1
1.2 研究動機	2
1.3 研究方法	3
<b>第二章 使系統架構</b>	<b>5</b>
2.1 系統模型	5
2.1.1 錯誤容忍的分散式偵測	5
2.2 本地端決策法則	8
2.3 錯誤容忍融合法則	10
2.4 模擬退火演算法則	11
<b>第三章 二維編碼偵測技術及多位元編碼</b>	<b>13</b>

3.1	系統構造	13
3.2	最佳碼字矩陣設計	15
3.2.1	降低搜尋最佳碼字矩陣可能候選數量證明	16
3.3	碼字矩陣使用重覆碼以及漸近的效能分析	17
3.4	多位元編碼的設計	19
<b>第四章 模擬結果</b>		<b>23</b>
4.1	使用一維編碼系統	23
4.2	使用二維編碼系統	26
4.3	多位元的編碼	29
4.3.1	多位元編碼使用四個感測器	29
4.3.2	多位元編碼使用五個感測器	31
4.4	多位元編碼的最佳碼字矩陣延伸至二維編碼系統	33
4.4.1	一維編碼系統中的多位元與二位元最佳碼字矩陣效能比較	33
4.4.2	二維編碼系統中的多位元與二位元最佳碼字矩陣效能比較	36
<b>第五章 結論</b>		<b>39</b>

## 圖目錄

2.1	無線感測網路系統用於分散式偵測使用 $N$ 個感測器的架構 . . . . .	5
4.1	分散式偵測使用一維編碼之分類錯誤機率模擬 . . . . .	25
4.2	分散式偵測使用二維編碼之分類錯誤率模擬 . . . . .	27
4.3	分散式偵測使用二維編碼之分類錯誤機率模擬 . . . . .	28
4.4	四個感測器以四位元碼字矩陣之分類錯誤機率模擬 . . . . .	30
4.5	四個感測器以四位元碼字矩陣之分類錯誤機率模擬 . . . . .	32
4.6	一維編碼系統中比較二位元與四位元編碼的效能 . . . . .	34
4.7	二維編碼系統中比較二位元與四位元編碼的效能 . . . . .	36
4.8	二維編碼系統中比較二位元與四位元編碼的效能 . . . . .	37

## 表目錄

2.1	4 × 7 的二位元碼字矩陣 . . . . .	6
2.2	4 × 7 的四位元碼字矩陣 . . . . .	9
3.1	4 × 4 的四位元最佳碼字矩陣 (一) . . . . .	19
3.2	4 × 4 的四位元最佳碼字矩陣 (二) . . . . .	20
3.3	4 × 4 的四位元最佳碼字矩陣 (三) . . . . .	20
3.4	4 × 5 的四位元最佳碼字矩陣 (一) . . . . .	20
3.5	4 × 5 的四位元最佳碼字矩陣 (二) . . . . .	21
4.1	0 ~ 4 dB 的最佳碼字矩陣 . . . . .	23
4.2	5 ~ 10 dB 的最佳碼字矩陣 . . . . .	24
4.3	0 ~ 5 dB 的最佳碼字矩陣 . . . . .	26
4.4	6 ~ 8 dB 的最佳碼字矩陣 . . . . .	26
4.5	9 ~ 12 dB 的最佳碼字矩陣 . . . . .	26
4.6	4 × 4 的四位元最佳碼字矩陣 . . . . .	29
4.7	4 × 5 的四位元最佳碼字矩陣 . . . . .	31



# 第一章 序論

## 1.1 無線感測網路和分散式偵測

無線感測網路 (Wireless Sensor Networks) 是種利用分布在空間中的自動裝置所組成的一種無線電腦網路 (Wireless Network)，這些裝置使用感測器 (Sensor) 來監控空間中不同位置的物理狀態或是環境的變化情形，而無線感測器網路早已被學術界關注，且積極進行相關議題的研究與應用。

其發展的起源是來自於軍事的應用，利用不同地區分布的感測器對於飛彈及敵機的偵測與搜索。而由於無線通訊傳輸技術的蓬勃發展，加上微型元件製造技術的日益精進，以及因應人類便利的生活科技發展，無線感測網路的技術逐漸被應用在生活及環境保護的用途上，如常見的醫療監護、家庭自動化或是環境的監測、智慧型建築的設計，以及對東南亞地震帶相當具有幫助的地震偵測上，皆有相當多的應用。

典型的無線感測網路是由大量小型的、價格低廉的以及低功率的感測器所組成的，通常每個感測器皆具備收集所需的觀測值及經由無線通道 (Wireless Channel) 和其他感測器節點或中心節點溝通的能力，另外需要一個有接受並且統整所有感測器觀測值然後加以處理成有效資訊能力的融合中心 (Fusion Center)，利用不同的法則或判斷方法達到更精確的估測結果。

無線感測網路的優點是系統為非固定基礎架構的網路，感測節點間的傳輸方式使用廣播通訊，在處理資料的過程，感測器只負責接收、處理、和傳送資料至融合中心的簡單功能，不具有分析或太龐大的運算負擔，且因感測元件 (Sensor) 製造的成本低廉，體積小消耗的能量少且本身功率低，若對於傳送資料量對感測器的消耗和干擾的問題做了妥當的設計，便

可多方的運用在許多領域上。

以下列出相關的應用:

- 軍事: 對於典型的飛彈防禦系統和敵機偵測, 甚至對於陌生的戰區先採取感測器偵查環境, 對該戰區進行先行了解以減少我軍傷亡損害的方法已是相當常見的軍事用途, 尤其對於一些地雷陷阱或是生化武器的偵測, 對戰事評估有相當大的貢獻。

- 醫療: 可利用無線感測網路的監控功能, 來確認且控制病人的用藥劑量, 也可對於行動不便的患者或老年人達到更全方面的照顧。

- 環境: 對於山林區溫度溼度的控管不僅可以預防火燒山的災害也能夠達到對自然環境的監控和保育, 對於需要長期觀察狀態或週期的研究來說, 也可投入感測器進行紀錄, 一方面節省人力、時間, 若是在嚴苛的環境也可避免不必要的風險跟傷害, 仍然達到該有的調查結果。

- 建築: 最常見的就是新式建築的設計上, 對空調系統架設感測網路, 可減少不必要的能源消耗亦可獲得節能減碳的環境保護工作。也能用於火災、瓦斯外洩的人為災害的預防。

- 商業: 提供產品的品質控管, 一方面降低不良品的產生也可減少人力的浪費, 對業者來說是兩全其美。

## 1.2 研究動機

無線感測網路在很多方面已經被研究, 像是近期相當熱門的合作式通訊系統或是合作式信號處理, 而我們對於分散式的偵測問題感到興趣。其中在無線感測網路系統中, 感測器需要對目標所做的觀測 (Observations) 通常不只有單一現象 (Phenomenon) 判別有無或是兩個現象判別其一, 故需要藉由對觀測值作多個等級的分類 (Classification), 在融合中心才能完整的對觀測現象做描述。參考文獻 [1]、[2]、[3] 中已討論過利用二位元的資訊量表示觀測值與觀測值為多個等級結合融合中心做最後判決的問題。

融合中心收集了全部的本地端決策值以判定確實發生的現象。爲了降低本地感測器對融合中心的傳輸負擔，偵測結果用一個本地決策值表示，即是本地決策是由感測器處理。倘若觀測現象被分爲  $M$  個等級分類，則代表  $M$  個等級分類所需要的資訊位元個數爲  $\log_2 M$ ，考慮到感測器體積小所顧慮的使用壽命及減少能量消耗，所以將本地端感測器設定爲二位元分級並且傳輸一個二位元的決策值至融合中心，因應本地感測器只能做出二位元結果，而觀測的現象被分爲  $M$  個等級分類的時候，必須透過一組經過設計的碼字矩陣(Code Matrix)，使每個分類等級都有相對應的字碼代表，能使融合中心在判斷  $M$  個等級分類時更加有利。

爲了減少在判斷多個觀測值的分類等級錯誤的機率，且維持感測器的低複雜度，多於一個的觀測值在任一個感測器被觀測，就需要多於一個位元來表示這些觀測值判斷的結果，如此一來，便使用二維 (Two-Dimensional) 的碼字矩陣。

然而考慮到感測器的技術精進，若將本地端感測器設計成不止於二位元分級的傳輸能力，也就是多位元 (M-ary) 的分級能力時，一定能大幅精進系統效能，同樣的也需設計一組多位元的碼字矩陣，能使得融合中心得到更好的判斷能力。如此的構想可預期的，在設計多位元的最佳碼字矩陣一定會面臨相當大的複雜度以及龐大的搜尋空間，這使得設計最佳碼字矩陣困難且複雜，因此希望能在研究中找到適當的方式並歸納出一個有效率的最佳碼字矩陣設計方法。

### 1.3 研究方法

一些感測器可能有未被確認出的錯誤即使在嚴謹的條件之下，在論文 [4] 中提出的分散式分類等級的融合法則使用錯誤更正碼(Distributed Classification Fusion using Error-Correcting Codes 即 DCFECC) 結合分散偵測理論達到錯誤容忍能力是在通訊系統裡採用錯誤更正碼的概念。 $N$  個感測器中任一個對於一個現象偵測出一個樣本。設計了對於任一現象由  $N$  個符號組成一個向量，也就是一個一維的碼字向量 (codeword)( $1 \times N$ ) 對應一個現象。而  $M$  個現象就是  $M \times N$  的碼字矩陣。任一個符號是一個位元被分配到任一的感測器，本地端決策即是偵測的結果且代表被指定的符號。本地感測器產生二位元的決策，可能

存在著錯誤，而被傳送到融合中心決定最終的決策結果。

當從設計出的碼字矩陣選出了除彼此之外的任一碼字傳送至融合中心做處理，它能對本地端決策做最終的決策結果時產生錯誤容忍的能力。而在多於  $L - 1$  個觀測值在任一感測器被處理，然後需要  $L$  個位元來表示  $L$  個觀測值（一個位元對應一個觀測值）。這樣每一個現象就能用一個二維 (2-D) 的碼字 ( $L \times N$ )，如此就產生一個  $M \times L \times N$  的碼字矩陣。論文 [5] 中利用這些概念，發展出一個二維的編碼分類等級方法，這方法擁有較低的複雜度和相較於以前做法而較低的分類錯誤率，並在使用設計最佳碼字矩陣時，使用較好且較省時的整體搜索方式。

簡而言之，二維的最佳碼字矩陣的設計，是假設在原本的分散式偵測系統使用錯誤更正碼的模型下，利用時間區隔產生的空間做碼字二維的延伸。若感測器觀測任一個被區分為  $M$  個分類的現象，任一個感測器皆會接收到一個觀測值(Observation) 結果，並將之處理為二位元的本地端決策值，而我們可以改變感測器的觀測與傳送時間，配合融合中心接收本地端決策值後處理成最終整體的決策值的時間，設計感測器先收集  $L$  次的觀測值之後再交由融合中心判斷最終決策。如此所需的碼字矩陣就該配合  $L$  次觀測後的本地端決策結果設計成  $L \times M \times N$  的矩陣。若是傳統 DCFECC，則  $L = 1$ ，這邊我們先將假設  $L = 2$ ，並找出各訊雜比 (SNR) 下最佳的二維碼字矩陣。

而本篇論文我們將最佳的碼字矩陣之設計，由二位元拓展至多位元，同樣建立在原本的分散式偵測系統使用錯誤更正碼的系統。也就是在分散式多等級分類偵測問題中，利用多位元編碼來設計最佳碼字矩陣去取代原先的二位元編碼的錯誤更正碼。為降低計算量，先假設此碼字矩陣為四位元 (4-ary) 的分類能力；也就是原先的單位碼字 0、1，改成 0、1、2、3 四個位元；以數位的方法表示，即是 00、01、10、11。以類似於設計最佳的二位元最佳碼字矩陣的方式，將單一碼字的候選由二位元增加為四位元，並在各訊雜比情況下設計最佳的四位元通道編碼矩陣，預期達到更好的系統效能。

## 第二章 系統架構

### 2.1 系統模型

#### 2.1.1 錯誤容忍的分散式偵測

圖 2.1 描述一個無線感測網路運用在分散式偵測系統使用  $N$  個感測器，觀測的目標現象為  $M$  種可能的分類， $N$  個感測器散佈開為了收集環境變化的資料數據，以及由融合中心產生一個最終的偵測決策結果。當  $1 \sim M$  個可能現象之一  $H_i$  發生， $i = 1, 2, \dots, M$ ，所有的感測器觀測同一個現象。而觀測值通常為一由無限數量的位元來表示的實數。感測器裡用無線網路傳輸實數至融合中心將會消耗過多的功率，就如前面提到的，也同時會降低感測器的使用壽命。所以本地端的決策  $u_j$  並不使用實數表現。

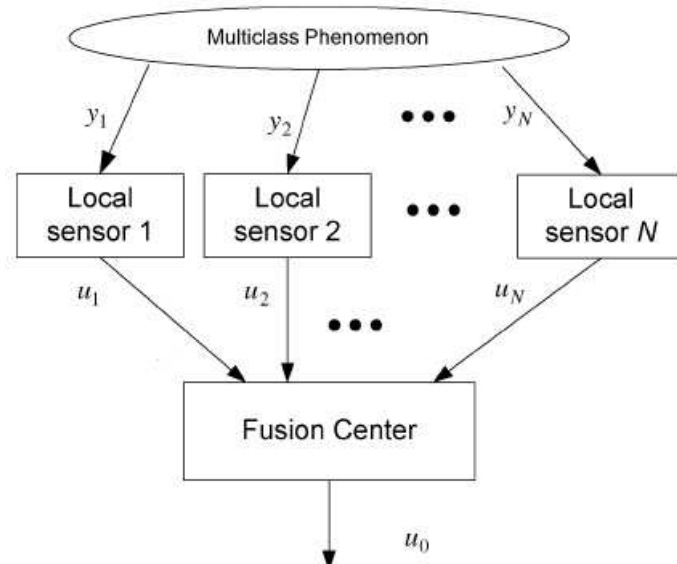


圖 2.1: 無線感測網路系統用於分散式偵測使用  $N$  個感測器的架構

$H_0$	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	1	1	1	1	1
$H_2$	1	1	0	1	1	1	1
$H_3$	0	1	0	0	1	0	1

表 2.1:  $4 \times 7$  的二位元碼字矩陣

假設只有  $L$  個位元被允許用來傳送本地端決策至融合中心，也就是這  $L$  個位元被用來表示決策結果。融合中心收集了所有的本地端決策然後根據這些資料產生一個整體的決策結果。

在 DCFECC 方法中，設定  $L = 1$ ，並使用模擬退火 (Simulated Annealing) [6] 的演算法來設計一組  $M \times N$  的碼字矩陣  $\mathbf{T}$ ，並從錯誤更正碼方法中推導且應用這組碼字矩陣，如此採用這組碼字矩陣不僅能更正傳輸中發生的錯誤，也能夠抵抗感測器發生錯誤或是故障，其中出錯的感測器導致產生不正確的本地端決策亦視為傳輸錯誤。表格 2.1 即是一個碼字矩陣  $\mathbf{T}$  的範例，矩陣中的第  $i$  列為一個相當於的假說(Hypothesis)  $H_i$  的碼字  $\mathbf{c}_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N})$ ，而任一個  $c_{i,j}$  為一個位元的符號，相對應於第  $j$  個感測器。

任兩個碼字向量  $\mathbf{c}_i$  和  $\mathbf{c}_k$  之間的漢明距離 (Hamming Distance)，表示成  $d(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_k)$  定義為任兩個碼字向量之間相對應符號不同的數量和，而一個碼字矩陣的最小漢明距離為矩陣中任兩個不同的碼字向量之間最小的漢明距離 [7]。假設  $v_j$  是融合中心接受到的本地端決策值，而  $v_j \in \{0, 1\}$ ，而  $v_j$  組成的接受碼字向量為  $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 。

花費函數(Cost Function) 定義如下：假設  $\mathbf{c}_i$  為分類錯誤的碼字向量，我們將花費定義為 1，即  $C_{\mathbf{v}}^i = 1$ ，反之為 0；若  $\mathbf{c}_i$  為  $\mathbf{v}$  和任一碼字  $\mathbf{c}_k$  的最小漢明距離中的  $q$  個解之中其一，那我們即定義為  $C_{\mathbf{v}}^i = 1 - \frac{1}{q}$ ，然而貝式風險函數 (Bayes Risk Function) [8] 即可表示為分類錯誤的機率

$$P_e = \sum_{\mathbf{v}, i} \int_{\mathbf{y}} p(\mathbf{v}, \mathbf{y}, H_i) C_{\mathbf{v}}^i \quad (2.1)$$

其中  $\mathbf{y}$  表示感測器的所有觀測值。  $p(\mathbf{v}, \mathbf{y}, H_i)$  是根據判斷現象  $H_i$ ，觀測向量  $\mathbf{y}$ ，融合中心收到決策向量  $\mathbf{v}$  的機率。

設定  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_N)$  表示所有本地端感測器的決策結果，於是做了以下的假設：

- 假設一：所有感測器的觀測值都是有條件的獨立 (Conditionally independent)，即

$$p(\mathbf{y}|H_i) = p(y_1, y_2, \dots, y_N|H_i) = \prod_{j=1}^N p(y_j|H_i)。$$

這個假設是由於所有的感測器觀測相同的現象，以及假設它們彼此間的位置距離夠遠。

- 假設二：第  $j$  個本地端決策值  $u_j$  只跟第  $j$  個觀測值  $y_j$  有關。

這個假設是由於所有感測器處理各自擁有的本地端決策值而彼此並沒有通訊聯絡。

- 假設三：融合中心接收的第  $j$  個決策值結果  $v_j$  只跟第  $j$  個本地端決策值  $u_j$  有關。

這個假設是由於融合中心接收到感測器傳送的本地端決策值，是藉由一個對一個的方式傳送，實際上滿足了分時多工 (TDMA) 的傳輸規則。

## 2.2 本地端決策法則

本地端決策法則的設計需要藉由前面被提出的多等級離散分類，並根據多等級離散分類的最小誤判機率來設計本地端決策法則。

首先定義花費  $C_{v_1, v_2, \dots, v_N}^i$ ， $v_1, v_2, \dots, v_N \in \{0, 1, \dots, D-1\}$ ，當融合中心接受到的向量  $\mathbf{v}$  等於  $(v_1, v_2, \dots, v_N)$  而真實傳送的假說為  $H_i$ 。這些花費  $C_{v_1, v_2, \dots, v_N}^i$  可以由碼字的決策範圍 (Decision Region) 來計算。假設這些花費是基於 D-ary 的決策，為了要由二位元的碼字中計算出這些花費，距離的計算公式  $d(\mathbf{v}, \mathbf{T}_i)$  如之前定義的一樣為碼字矩陣中的漢明距離，且根據設計好的碼字矩陣，碼字  $\mathbf{T} \in \mathbf{T}_w$  的決策範圍  $\Psi$  公式如下

$$\Psi(t) = \{\mathbf{v} | d(\mathbf{v}, \mathbf{t}) \leq d(\mathbf{v}, \mathbf{t}')\}$$

其中所有的  $\mathbf{t}' \in \mathbf{T}_w$  且  $\mathbf{T}_w = \{\mathbf{t}_i | i = 0, 1, \dots, M-1\}$  為所有碼字中的其中一組，及碼字矩陣中的所有列的可能。

為了要最小化分類錯誤的機率，當  $t_i$  是假說  $H_i$  在碼字矩陣  $\mathbf{T}$  中相對應列的列，且接收碼字向量  $v_1, v_2, \dots, v_N$  在  $t_i$  的決策範圍內，那我們設定花費  $C_{v_1, v_2, \dots, v_N}^i = 0$ ；若是在決策範圍外則設定花費  $C_{v_1, v_2, \dots, v_N}^i = 0$ 。無論所有接收到的向量  $(v_1, v_2, \dots, v_N)$  同時屬於  $t_{k_0}, t_{k_1}, \dots, t_{k_{q-1}}$ ，且  $q > 1$ ，所有的  $i = 0, 1, \dots, q-1$ ，則設定花費  $C_{v_1, v_2, \dots, v_N}^i = 1 - \frac{1}{q}$ ，即我們假設融合中心接收到的決策值中有同時落在決策範圍內的情況，融合中心會隨機在這些與決策值向量  $\mathbf{u}$  之中擁有相同漢明距離的碼字中選取一個，而落在決策範圍外的情況也將花費設定為 1。

舉例說明，若我們的碼字矩陣  $\mathbf{T}$  為表格 2.1，當  $\mathbf{v} = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$  時，我們便可計算出  $C_{1,0,0,0,0,0,0}^0 = 0$ ， $C_{1,0,0,0,0,0,0}^1 = 1$ ， $C_{1,0,0,0,0,0,0}^2 = 1$ ， $C_{1,0,0,0,0,0,0}^3 = 1$ ，因為碼字  $\mathbf{t}_0$  與接收向量  $\mathbf{v}$  的漢明距離最小；另外若是  $\mathbf{v} = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$  時，我們便可計算出  $C_{1,0,1,0,1,0,1}^0 = 1$ ， $C_{1,0,1,0,1,0,1}^1 = \frac{1}{2}$ ， $C_{1,0,1,0,1,0,1}^2 = 1$ ， $C_{1,0,1,0,1,0,1}^3 = \frac{1}{2}$ ，因為碼字向量  $\mathbf{t}_1$  和  $\mathbf{t}_3$  與接收向量  $\mathbf{v}$  的漢明距離同時為最小。



$H_0$	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	1	1	1	1	1
$H_2$	1	1	2	2	2	1	1
$H_3$	0	1	1	2	2	3	3

表 2.2:  $4 \times 7$  的四位元碼字矩陣

相同的概念運用到多位元的例子，若我們的碼字矩陣  $\mathbf{T}$  為表格 2.2，當  $\mathbf{v} = (1, 0, 1, 2, 1, 2, 3)$  時，我們便可計算出  $C_{1,0,1,2,1,2,3}^0 = 1$ ， $C_{1,0,1,2,1,2,3}^1 = \frac{1}{2}$ ， $C_{1,0,1,2,1,2,3}^2 = 1$ ， $C_{1,0,1,2,1,2,3}^3 = \frac{1}{2}$ ，因為碼字向量  $\mathbf{t}_1$  和  $\mathbf{t}_3$  與接收向量  $\mathbf{v}$  的漢明距離同時為最小。

基於上面對於花費函數的指定，我們可以把分類錯誤的機率寫成以下式子

$$P_e = \sum_{v_1, v_2, \dots, v_N, i} \int_{y_1, y_2, \dots, y_N} P_i P(u_1 = v_1 | y_1) \times \dots \times P(u_N = v_N | y_N) P(y_1, y_2, \dots, y_N | H_i) C_{v_1, v_2, \dots, v_N}^i \quad (2.2)$$

我們遵照在 [8] 中對 person-by-person optimization (PBPO) 的步驟描述，當我們設定第  $k$  個感測器為以下式子，分類錯誤機率  $P_e$  可以達到最小，

$$P(u_k = v_k | y_k) = 1, \quad \text{if } V_k^*(v_k) \leq V_k^*(m), v_k \neq m, \text{ and } v_k, m = 0, \dots, D-1; \\ 0, \quad \text{otherwise.} \quad (2.3)$$

其中， $V_k^*(v_k) = \sum_i P(y_k | H_i) \sum_{v_1, \dots, v_{k-1}, v_{k+1}, \dots, v_N} P_i$

$$P(u_1 = v_1 | H_i) \times \dots \times P(u_{k-1} = v_{k-1} | H_i) \times \\ P(u_{k+1} = v_{k+1} | H_i) \times \dots \times P(u_N = v_N | H_i) \\ \times C_{v_1, \dots, v_k, \dots, v_N}^i \quad (2.4)$$

本地端判決需要在錯誤容忍融合法則為已知的前提下才能執行，所以只要碼字矩陣有所改變，對應的本地端判決法則也會跟著修改。由於碼字矩陣關係到整個系統效能的好壞，所以要找一組能使分類錯誤機率夠低甚至是最底的碼字矩陣是很重要的，系統效能也會最好，因此本論文中我們先找到最佳的二位元通道編碼矩陣之後，要進一步找到最佳的多位元通道編碼矩陣來達到更佳系統效能。

## 2.3 錯誤容忍融合法則

根據論文 [4] 中提到，錯誤容忍法則又稱為最小漢明距離解碼法則 (Minimum Hamming Distance Decoding Rules)，當多分類等級的最後決策結果  $\mathbf{v}_o \in \Omega$  為  $H_\omega$ ，其中  $\omega = \arg \min_{0 \leq \ell \leq M-1} d_H(\mathbf{v}, \mathbf{t}_\ell)$ ，而  $d_H(\mathbf{v}, \mathbf{t}_\ell)$  表示為  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{t}_\ell$  兩個碼字間的漢明距離， $\mathbf{t}_\ell = (\mathbf{t}_{\ell 1}, \mathbf{t}_{\ell 2}, \dots, \mathbf{t}_{\ell N})$  則是代表相對應到假說  $H_\ell$  的碼字矩陣  $\mathbf{T}$  的第  $\ell$  列。若是  $\omega$  得到幾個相同的最小漢明距離，則會利用平局決勝制 (Tie-break Rule) 來隨機選擇其中一個碼字向量。藉由碼字矩陣來影響本地端的決策，這樣即使本地端只做出 0 與 1 的決策，對於  $M$  種分類假說的試驗一樣不會有資訊遺失的問題。

爲了要讓碼字矩陣有較佳的錯誤容忍能力，選擇一組有較大最小漢明距離的碼字矩陣是很合理的。 $d_{\min}$  為碼字矩陣  $\mathbf{T}$  的最小漢明距離，如果是二位元假說的狀況，則在碼字矩陣  $\mathbf{T}$  中只會有兩組碼字向量，所以全零與全一的碼字向量擁有最大的漢明距離，同時可預期產生出最佳的錯誤容忍效果，也因此設計多位元碼字矩陣的時候，我們可先預期最佳碼字矩陣可能會出現在擁有最大的漢明距離的例子中。

然而在這裡討論的錯誤容忍融合法則是等效於多數法則。當  $M > 2$  且碼字距陣為  $N$ ，也就是系統中感測器數量設定為  $N$  個的時候，根據 Gilbert-Varshamov bound [7]，存在一個碼字矩陣至少提供的最小漢明距離  $d_{\min}$  為

$$\sum_{i=0}^{d_{\min}-1} \binom{N-1}{i} < 2^{N-\lceil \log_2 M \rceil}.$$

此外，在給定  $N$  值且要求最小漢明距離  $d_{\min} > \frac{N}{2}$  的情況時，根據 Plotkin bound [7] 可得到與其他不同的假說  $M$  之個數被邊界限制為

$$M \leq 2 \left\lfloor \frac{d_{\min}}{2d_{\min} - N} \right\rfloor \quad \text{for } d_{\min} > \frac{N}{2}.$$

當  $M$  和  $N$  被給定的時候，以上兩個邊界可以給予最大  $d_{\min}$  的可能範圍。假設  $M = 4$  且  $N = 10$  的時候，則碼字矩陣的最大  $d_{\min}$  會在 3 到 6 之間。

## 2.4 模擬退火演算法則

模擬退火演算法最初應用在編碼方面是在 [6] 這篇論文於西元 1987 年所提出。這篇論文中，作者應用模擬退火演算法改善原有的編碼方式，建構出較好的原始碼(Source Code)，錯誤更正碼和球面碼 (Spherical Code)。利用此演算法在這裡要找出最佳的碼字矩陣，分類錯誤的機率 2.2 式代表的就是在演算法裡的能量函數 (Energy Function)，最小漢明距離的設定則是依照前面所提錯誤容忍融合法則的規範。在 [4] 裡面提到的演算法， $\mathbf{T}$  和  $\mathbf{T}'$  是從眾多可能成為最佳的碼字矩陣中取出的兩組，將這兩組可能的碼字矩陣作能量上的比較  $\Delta E = P_e(\mathbf{T}') - P_e(\mathbf{T})$ ，接著設定初始值  $T$  並且給定控制參數  $\alpha = 0.9$ ， $T$  值會隨著控制參數下降  $T \leftarrow \alpha T$ ，參數的大小決定了整個找尋碼字過程的快慢。整個過程如下：

- 步驟一

制定出最小漢明距離的規範，開始演算法並隨機產生一組碼字矩陣  $\mathbf{T}$ ，同時  $\mathbf{T}$  滿足最小漢明距離的規範。根據這組  $\mathbf{T}$  與 2.3 式和 2.4 式制訂最佳化的本地端決策，設定初始值  $T = 1$ ，並且根據 2.2 式計算出能量  $P_e(\mathbf{T})$ 。

- 步驟二

隨機產生另一組碼字矩陣  $\mathbf{T}'$ ，同樣的  $\mathbf{T}'$  也滿足最小漢明距離的規範。根據  $\mathbf{T}'$  並利用 2.3 式與 2.4 式來設計一組本地端決策法則。接著計算  $\Delta E = P_e(\mathbf{T}') - P_e(\mathbf{T})$ ，當  $\Delta E < 0$  時， $\mathbf{T}'$  會取代  $\mathbf{T}$ ；否則  $\mathbf{T}'$  會有  $e^{-\Delta E/T}$  的機率取代  $\mathbf{T}$ 。

- 步驟三

重複步驟二直到能量降到指定的結果或是重複太多次就停止，接著用  $\alpha T$  取代原始值  $T$  後，重回到步驟二。

- 步驟四

當找出一組穩定的碼字矩陣或是尋找的執行時間超過預期時，則中止執行演算法。

## 第三章 二維編碼偵測技術及多位元編碼

根據前面分散式偵測對於多分類等級假說的問題，使用錯誤更正碼為一維的碼字矩陣，而接著利用設計的二維碼字矩陣來達到較佳的效能。本篇論文參考使用二維編碼的系統模式，且利用徹底搜尋(Exhaustive Search)的方法找出最佳的二維編碼矩陣來得到二位元編碼矩陣情況下最佳的分類錯誤機率。

參考文獻 [4]、[5]、[9]中採用二位元的調變方式是因為計算比較簡單，然而二位元的編碼矩陣在因應不同的感測器數量的例子時，有時會在不同訊雜比情況下對應到多組的最佳碼字矩陣達到最好的系統效能，且不同碼字矩陣在低訊雜比以及高訊雜比的效能會有一些落差，也就是高訊雜比的最佳碼字矩陣在低訊雜比時效能反而不盡良好。為了達到最佳的系統效能，我們必須在不同的訊雜比選擇相對應的碼字矩陣將對系統甚至硬體實現上帶來多餘負擔，於是考慮多位元的調變方式，試圖在複雜度與更佳的系統效能之間取得平衡。

欲改善二維編碼技術的缺陷以及增進系統效能，經過實際操作後採用模擬退火演算法來設計最佳的多位元編碼矩陣，並將之運用到二維編碼偵測技術上，試圖在模擬中得到預期的結果跟效能。

### 3.1 系統構造

在完成任一個感測器一個觀測值之後，比  $L - 1$  個還多的觀測值被要求一對一傳到融合中心是為了增加最後融合結果的可靠度(Reliability)。向量  $\mathbf{y}_j = (y_{1,j}, y_{2,j}, \dots, y_{L,j})^T$ ，其中  $y_{\ell,j}$  是第  $\ell$  個觀測值並且為一個實數，這個向量是表示第  $j$  個感測器收到的觀測值。向量  $\mathbf{u}_j = (u_{1,j}, u_{2,j}, \dots, u_{L,j})^T$ ，其中  $u_{\ell,j} \in \{0, 1\}$ ，這個向量代表著第  $j$  個感測器的本地

端決策值。所有的本地端決策值可以形成一個矩陣為  $\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N)$ 。

融合中心接收到的矩陣可以表示成  $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N)$  假設感測器到融合中心之間為無干擾 (Error Free) 通道，其中  $\mathbf{V}$  為二位元信號組成的矩陣，我們在融合中心使用硬性決策解碼 (Hard-Decision Decoding)，即比較碼字之間的漢明距離。可看見二維碼很小的傳輸位元能量仍可增加整體的效能。

首先我們要接著前面第 2.1.1 節的三個假設延續下一個假設：

- 假設四：一個感測器所接收到的所有觀測值彼此間是獨立的，即  $p(y_{1,j}, y_{2,j}, \dots, y_{L,j} | H_i) = \prod_{\ell=1}^L p(y_{\ell,j} | H_i)$ ，對所有的  $i, j$  而言。

這個假設是由於融合中心從每一個感測器得到偵測結果的每一回合使得在相同的感測器完成兩次成功偵測的間格之內的時間可以被假設成長度足夠滿足上面所定的假設。

最後根據這四個假設，

$$p(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N | H_i) = \prod_{j=1}^N p(\mathbf{y}_j | H_i) = \prod_{\ell=1}^L \prod_{j=1}^N p(y_{\ell,j} | H_i) \quad (3.1)$$

原先的  $M \times N$  碼字矩陣就必須以  $M \times L \times N$  的碼字矩陣取代。接著一個  $L \times N$  的碼字向量分配給  $M$  個假說其中任一個。

於是二維編碼  $L \times N$  的碼字向量， $\mathbf{C}_i = [c_{i,\ell,j}]_{1 \leq \ell \leq L, 1 \leq j \leq N}$ ，相對應於第  $i$  個假說  $H_i$ ，其中  $c_{i,\ell,j} \in \{0, 1\}$  是一個一位元的符號，若考慮硬性決策解碼，融合中心接收到的決策值為  $v_{\ell,j}$ ，則分類錯誤的機率為

$$P_e = \sum_{\mathbf{V}, i} \int_{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N} p(\mathbf{V}, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N, H_i) C_{\mathbf{V}}^i d_{\mathbf{y}_1} d_{\mathbf{y}_2} \dots d_{\mathbf{y}_N} \quad (3.2)$$

公式 3.2 中  $C_{\mathbf{V}}^i$  的定義同等於之前第 2.1.1 節的  $C_{\mathbf{V}}^i$ ，而  $\mathbf{V} = [v_{\ell,j}]_{1 \leq \ell \leq L, 1 \leq j \leq N}$ 。從公式 3.1、公式 3.2 可以被視為公式 2.1 使用一個  $M \times LN$  的碼字矩陣的結果。因此第  $j$  個感測器的本地端決策法則可以被推導出除了碼字矩陣  $\mathbf{T}$  是  $M \times LN$  的大小。

解碼方面使用硬性決策解碼，也就是在融合中心接收向量被解碼並判斷成第  $i$  個假說，若是  $d(\mathbf{V}, \mathbf{C}_i) < d(\mathbf{V}, \mathbf{C}_k)$ ，其中若  $d(\mathbf{V}, \mathbf{C}_i) = d(\mathbf{V}, \mathbf{C}_k)$  則採用平局決勝制隨機選擇一個假說作為判斷結果。論文 [5] 中的推導結果發現，二維編碼的使用可視為分散式偵測使用錯誤更正碼的方法使用  $LN$  個感測器且結果是一位元的符號表示。如此可輕易的從公式中的下標符號以  $(\ell, j)$  以  $j$  取代以及  $\sum_{\ell=1}^L \sum_{j=1}^N$  以  $\sum_{j=1}^{LN}$  取代之後可以證實。於是，當碼字矩陣的大小變成  $M \times LN$  之後，所有可能的碼字矩陣候選數量便是  $2^{MLN}$ ，若假說的分類數量  $M$  或是感測器數量  $N$  很大，那碼字矩陣的候選數量將會龐大地難以使用徹底搜尋的方法查證。

另外，搜尋最佳的多位元碼字矩陣也遇到碼字矩陣候選數量過於龐大的問題，以徹底搜尋方法嘗試後選擇使用模擬退火法則來設計，並先減少感測器數量  $N$ ，以免去因龐大且複雜的計算量所需的時間。

## 3.2 最佳碼字矩陣設計

由於碼字矩陣的大小由  $M \times N$  變成  $M \times LN$  之後，二位元編碼所有可能的矩陣候選數量也由  $2^{MN}$  變成  $2^{MLN}$ ，若是使用模擬退火演算法 [4] 設計最佳碼字矩陣可能會花費過多時間，若能使用徹底搜尋的方式，想必是最好且精確的結果。

在可能的候選碼字矩陣中，若是出現幾個符合相同的分類錯誤機率的矩陣，則只需要查看其中一個矩陣即可，其他便可以排除在最佳碼字矩陣的可能之外。這樣根據以下的原理，候選的碼字矩陣數量可以有效的被減少。

- 根據第 2.1.1 節的幾項假設，並假定傳送通道是對稱的(Symmetric)，如果一個碼字矩陣中的其中兩行互換，或者碼字矩陣中任意一行的行向量改為原向量取 1 的補數形成新的碼字矩陣，這樣新矩陣和原來矩陣擁有相同的分類錯誤機率。

在設計最佳的多位元碼字矩陣中，以相同的概念去有效減少候選碼字矩陣的數量，雖也得到有效的減少，但候選數量仍然龐大的無法使用徹底搜尋，若是考慮四位元編碼，則候選數量就是  $4^{MN} (2^{2MN})$ ，也就是二位元編碼候選數量的二次方倍，若使用二維的編碼，數量

更增加為  $2^{2MLN}$ ，可猜測徹底搜尋來設計最佳的碼字矩陣可能不佳因耗時太久，因此也將模擬退火演算法規劃在實驗的方法中。

### 3.2.1 降低搜尋最佳碼字矩陣可能候選數量證明

從論文 [5] 中，以二位元為例，根據前面章節對於花費函數的定義，以及分類錯誤機率公式 2.1，如果碼字矩陣的其中兩行互換，分類錯誤機率  $P_e$  和花費函數的結果皆不會因而變動。

接著，推估一個碼字矩陣  $\mathbf{T} = (\mathbf{c}_1^T, \mathbf{c}_2^T, \dots, \mathbf{c}_M^T)^T$  中的第  $k$  行為取 1 的補數，而獲得新的碼字矩陣寫成  $\bar{\mathbf{T}} = (\bar{\mathbf{c}}_1^T, \bar{\mathbf{c}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{c}}_M^T)^T$ ，其中  $\mathbf{c}_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N})$ ， $\bar{\mathbf{c}}_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, \bar{c}_{i,k}, \dots, c_{i,N})$ ，且  $\bar{c}_{i,k}$  表示  $c_{i,k}$  取 1 的補數，根據花費函數的定義，我們得到

- (i)  $C_{\mathbf{v}_{k=0}, \bar{\mathbf{c}}_i} = C_{\mathbf{v}_{k=1}, \mathbf{c}_i}$  以及  $C_{\mathbf{v}_{k=1}, \bar{\mathbf{c}}_i} = C_{\mathbf{v}_{k=0}, \mathbf{c}_i}$ 。

使用碼字矩陣  $\mathbf{T}$  的最小分類錯誤機率表示成

$P_{e,\min}(\mathbf{T}) = P_e(\mathbf{T}, D_1^{opt}(\mathbf{T}), D_2^{opt}(\mathbf{T}), \dots, D_k^{opt}(\mathbf{T}), \dots, D_N^{opt}(\mathbf{T}))$ ，其中  $D_j^{opt}(\mathbf{T})$  表示第  $j$  個感測器的最佳本地端決策。接著使用同樣的本地端決策法則，但是改使用碼字矩陣  $\bar{\mathbf{T}}$  成為  $D_k(\bar{\mathbf{T}})$ 。因為傳輸通道我們假定成對稱的，因此得到

- (ii)  $p(v_k = 0|u_k = 0) = p(v_k = 1|u_k = 1)$  以及  $p(v_k = 0|u_k = 1) = p(v_k = 1|u_k = 0)$  的結果。即是傳輸機率  $p_{00}^k = p_{11}^k$ ， $p_{01}^k = p_{10}^k$ 。

因此  $D_k(\bar{\mathbf{T}}) = -D_k^{opt}(\bar{\mathbf{T}})$ ，並且

- (iii)  $p(u_k = 1|y)(p(u_k = 0|y))$  使用決策  $D_k(\bar{\mathbf{T}})(D_k(\bar{\mathbf{T}}))$  的結果，同等於  $p(u_k = 0|y)(p(u_k = 1|y))$  使用決策  $D_k^{opt}(\mathbf{T})(D_k^{opt}(\mathbf{T}))$ 。

從 (i)、(ii)、(iii)， $P_e(\mathbf{T}, D_1^{opt}(\mathbf{T}), D_2^{opt}(\mathbf{T}), \dots, D_k(\mathbf{T}), \dots, D_N^{opt}(\mathbf{T})) = P_{e,\min}(\mathbf{T})$ 。

若其他的本地端決策法則對於碼字矩陣  $\mathbf{T}$  為最佳而不是  $\bar{\mathbf{T}}$ ，

$P_{e,\min}(\mathbf{T}) = P_e(\mathbf{T}, D_1^{opt}(\mathbf{T}), D_2^{opt}(\mathbf{T}), \dots, D_k(\mathbf{T}), \dots, D_N^{opt}(\mathbf{T})) \geq P_{e,\min}(\bar{\mathbf{T}})$ 。同理可得，

$P_{e,\min}(\mathbf{T}) \geq P_{e,\min}(\bar{\mathbf{T}})$ ，因而  $P_{e,\min}(\mathbf{T}) = P_{e,\min}(\bar{\mathbf{T}})$ 。



一個碼字矩陣的每一行都有  $2^M$  種組合，根據上面的原理，任何的組合當取了當個行向量 1 的補數之後的新碼字矩陣皆有相同的特性。此外，碼字矩陣內的元素若全部都是 "0" 或都是 "1" 的組合皆無法從所有可能的假說中判斷出正確的。因此， $2^M$  種可能就只剩下  $(2^M - 2)/2 = 2^{M-1} - 1$  種擁有不同特性而有用的組合。

接著，當一個碼字矩陣的行與行互換結果並不更改其分類錯誤率  $P_e$ ，我們需要查證的可能後補碼字矩陣數量可寫成  $B = \frac{(LN+2^{M-1}-2)!}{(LN)!(2^{M-1}-2)!}$ ，如此，查證的數量  $B$  就會遠小於  $2^{MLN}$ 。舉例來說，若假說數量  $M = 4$ ，感測器數量  $N = 7$ ，二維編碼的參數  $L = 2$ ，我們可以把需查證的碼字矩陣數量由  $2^{4 \times 2 \times 7} = 7.21 \times 10^{16}$  個降低至 38760 個，這個方法大大的提高徹底搜尋方法的可行性並降低搜尋的時間來找到一組分類錯誤機率最佳的碼字矩陣。

若用在搜尋多位元的碼字矩陣上，以四位元為例，其候選的數量為二位元矩陣的兩次方倍，在實際程式模擬後發現確實耗時太久，因此使用模擬退火法則來搜尋最佳碼字矩陣。

### 3.3 碼字矩陣使用重覆碼以及漸近的效能分析

當任一感測器的  $L$  個本地端決策需要  $L$  套門檻(Threshold)，當  $L$  變大，二維碼的方法在感測器的複雜度就會提高，於是在論文 [5] 中提出一種假設讓二維碼方法所用的碼字矩陣之組成碼使用複製的碼字來取代所搜尋到的最佳碼字矩陣。每一個碼位元  $c_{i,j,k}$  在  $1 \leq j \leq L$  的形況在二維碼字  $C_i$  裡，當  $1 \leq i \leq M$  以及  $1 \leq k \leq N$ 。因此，每個感測器在二維編碼方式的  $L$  次觀測下，僅需擁有一套的門檻。感測器運用同一套門檻去做任何一次的本地端決策。然而，碼字矩陣和本地端決策法則可以在  $L = 1$  下設計成相同的，也就是說，一維的碼字當作原始的碼字，然後其他的部份就是複製  $L$  次的碼字。結果整體的碼字  $C_i$  可以藉由  $c_i$  重複複製  $L$  次得到結果。

這個使用複製碼的方法比起搜尋最佳碼字矩陣來說是較有適應性(Flexible)，且較不費時間。在提出的方法使用最佳碼字矩陣中，最大的偵測數量和每次偵測所需的門檻組合都必須被感測器分散開前就被決定好，當偵測環境可能非常非常的廣大，偵測結果伴隨著事先就定義好的參數就能夠達到預期所需的分類錯誤機率。相反的，融合中心可以向本地端感測器

要求在這個方法使用複製碼的情況中，爲了達到所要求的分類錯誤機率而需要的偵測數量。也就不需要額外的門檻組合了。

在 DEFEC 中，當感測器數  $N \rightarrow \infty$  時分類錯誤機率可以接近 0 如果  $M \times N$  碼字矩陣的  $d_{\min}^{(N)}$  滿足

$$\delta_N \equiv \frac{1}{N} \left\lfloor \frac{(d_{\min}^{(N)} - 1)}{2} \right\rfloor > \max_{1 \leq i \leq M} \epsilon_i \quad (3.3)$$

其中  $d_{\min}^{(N)}$  表示  $M \times N$  碼字矩陣的最小漢明距離， $\epsilon_i$  表示對任一個感測器給定一個假說  $H_i$  而發生錯誤決策的機率。下面用同樣的論證方法，分類錯誤機率接近 0 當  $N \rightarrow \infty$  或  $L \rightarrow \infty$ ，如果  $M \times LN$  碼字矩陣的  $d_{\min}^{(LN)}$  滿足

$$\delta_{LN} \equiv \frac{1}{LN} \left\lfloor \frac{(d_{\min}^{(LN)} - 1)}{2} \right\rfloor > \max_{1 \leq i \leq M} \epsilon_i \quad (3.4)$$

根據式子 3.3， $\delta_N$  可以合理地被用作是一個“像是 DEFEC”方法的效能表現。且可以根據以下，當  $L \geq 1$  且  $\delta_{LN} \geq \delta_N$ ， $\delta_{LN} \equiv \frac{1}{LN} \left\lfloor \frac{(d_{\min}^{(LN)} - 1)}{2} \right\rfloor \geq \frac{1}{LN} \left\lfloor \frac{Ld_{\min}^{(N)} - 1}{2} \right\rfloor > \frac{1}{N} \left\lfloor \frac{(d_{\min}^{(N)} - 1)}{2} \right\rfloor$  可以得到使用複製碼當成組成碼可以產生比普通 DEFEC 還要好的效能表現。同樣也表現在系統中有感測器發生錯誤。

然而使用重覆編碼的方式可在二維編碼架構獲得一定的效能對多位元編碼也提供相當多可行的空間，由於在尋找多位元最佳碼字矩陣已經相當複雜，若進一步設法運用在二維編碼上想必會有更高的複雜度，若是使用重覆碼，我們將減去很多在尋找最佳碼字矩陣的時間和複雜度。

$H_0$	1	2	3	3
$H_1$	0	0	2	0
$H_2$	2	3	1	1
$H_3$	3	1	0	2

表 3.1:  $4 \times 4$  的四位元最佳碼字矩陣 (一)

### 3.4 多位元編碼的設計

在完成二位元編碼中設計最佳碼字矩陣，以及延伸至二維的架構的最佳碼字矩陣後，將同樣的概念以及架構，不同的是將二位元編碼擴展成多位元編碼。如同前面章節提過的，編碼矩陣上使用多位元編碼是可行的，在系統效能的表現上能達到更好的分類錯誤機率也是可以預期的，期望在使用多位元編碼方式之下可以解決二位元編碼在最佳碼字矩陣的結果上必須抉擇的問題，然而龐大的運算量跟銷耗的時間以及複雜度也在預期發生的問題中。

使用同樣的架構，先假設為四位元的編碼，也就是 4-ary，以及根據第 3.2 節中的方法來有效減少在搜尋最佳碼字矩陣的候選數量，然而在實際操作後發現龐大的候選數量仍然超出原先的預期，即使是花費時間來做徹底搜尋的動作可行，其消耗的時間成本仍是不合理的。於是在設計最佳碼字矩陣上考慮使用模擬退火演算法，並且先將感測器數量設定為四個，經過多次實驗我們得到最佳碼字矩陣如表格 3.1、3.2、3.3 所示。

此實驗結果發現一些現象。在多次實驗中，使用模擬退火法則做最佳碼字矩陣的搜尋，在任一訊雜比情況下找到的最佳碼字矩陣並不是單一個結果。也就是任一個訊雜比情況下會對應到多組的最佳碼字矩陣，然而根據分類錯誤機率的公式做計算，確實計算出相同的分類錯誤機率，所以是個一對多的狀況，而這個情形在所有訊雜比的搜尋皆產生相同的一對多結果。

在這些最佳碼字矩陣中，可以發現一些共同的特性。一個  $M \times N$  的碼字矩陣中，每一行的碼字向量及代表了每個感測器對  $M$  個現象所做的編碼結果，而任一個  $M \times 1$  的碼字向量中的任一碼字，均為不同的編碼結果。若為一個  $M = 4$  個等級分類的四位元最佳碼字矩

$H_0$	3	0	3	2
$H_1$	0	2	2	0
$H_2$	2	3	0	3
$H_3$	1	1	1	1

表 3.2:  $4 \times 4$  的四位元最佳碼字矩陣 (二)

$H_0$	0	3	3	1
$H_1$	1	0	2	3
$H_2$	3	2	1	0
$H_3$	2	1	0	2

表 3.3:  $4 \times 4$  的四位元最佳碼字矩陣 (三)

陣，則在任一個  $4 \times 1$  的碼字向量中，每個碼字皆為不同的編碼，也就是行向量為 0、1、2、3 四個位元的隨機排列組合，而每個感測器之間的編碼結果並不會互相影響，而這樣形成的四位元碼字矩陣皆能達到最佳的分類錯誤機率效能。

進而增加為五個感測器做實驗來找尋驗證，發現也有相同的結果產生，實驗中可以在不同的訊雜比情況下得到多組碼字矩陣符合上面敘述中的現象組合，如表格 3.4、3.5 所示。

假設這個現象在四位元的最佳碼字矩陣的設計方法是合理的，也就是對四個現象  $H_0$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ ，分別設計為 0、1、2、3，這個編碼方式有可能在任何的感測器數量的例子中皆為四位元的最佳碼字矩陣。但在實際以模擬退火法則尋找四位元最佳碼字矩陣時，在感測器數量多時，仍遇需耗費過多時間搜尋最佳碼字矩陣候選數量的問題。所以以這個編碼方法直接運用到七個感測器的實驗上，希望能與二位元最佳碼字矩陣所作的錯誤更正

$H_0$	0	2	2	2	0
$H_1$	3	1	0	1	2
$H_2$	2	3	1	0	1
$H_3$	1	0	3	3	3

表 3.4:  $4 \times 5$  的四位元最佳碼字矩陣 (一)

$H_0$	3	1	2	0	1
$H_1$	1	3	3	2	3
$H_2$	2	2	0	1	2
$H_3$	0	0	1	3	0

表 3.5:  $4 \times 5$  的四位元最佳碼字矩陣 (二)

碼之結果比較後，印證提出的編碼方式所設計出的四位元最佳碼字矩陣會如感測器少的例子一般，產生相同的結果。經過蒙地卡羅的模擬發現確實如預期的效能表現，分類錯誤機率模擬結果也符合設定較少數量感測器例子的趨勢，進而希望能運用在二維編碼的系統架構中。

在二維的四位元最佳碼字矩陣設計中，不僅可以參考少量感測器例子所歸納出的編碼方式，更可參考在論文 [5] 中，也就是第 3.3 節中提到的使用重複碼的效能，相互支持這個假設的編碼邏輯，並藉此設計二維編碼的四位元最佳碼字矩陣，並使用蒙地卡羅模擬分類錯誤機率。結果我們發現，模擬的結果確實有著顯著的效能展現，在此也推估藉由所提出的方法設計多位元最佳碼字矩陣可能為最佳的。

此結論符合原先預期，使用更多的位元對同樣數量  $M$  個分類現象做編碼，等於對未知的現象做判斷時給予更多的差異性，如同對一個現象作更多的量化，因此不同的現象之間發生錯誤判斷的機會就會較二位元判斷少，以  $M = 4$  個現象，二或四個位元編碼為例，四位元編碼對每個編碼最好的結果就是沒有重複的碼字位元，而二位元編碼就至少有一個碼字位元必須重複使用，因此相較之下在融合中心做判斷的過程發生錯誤的機會就相對比四位元編碼來的高。

所以在分散式多等級分類問題的系統裡，若需加入錯誤更正碼，則在最佳碼字矩陣的編碼上，對於每個分類給予最大差異性的編碼方式，也就是讓編碼的位元數等同於分類現象的數量，若在分類現象數量  $M = 4$  的情況下，則使用  $M = 4$  個位元做通道編碼，如此，在尋找最佳碼字矩陣即可使用上述提到的方法，不僅在搜尋最佳碼字矩陣上減少相當多的運算時間，也可免去二位元編碼在不同訊雜比下，會產生整體不同分類錯誤機率效能的最佳碼字矩陣。

另外系統效能上也可如同下節中提供的蒙地卡羅模擬結果中發現可達到較好的分類錯誤機率。若感測器的設計和硬體負擔以及運算複雜度允許的情況下，且系統符合我們實驗的系統架構下，使用本節提供的多位元最佳碼字矩陣設計方法，不僅可以減少搜尋時間，也能在分類錯誤機率中達到理想的系統效能。

## 第四章 模擬結果

本章將對以上所提出的方法做出效能表現的分析，包含理論值的計算及蒙地卡羅模擬。假設觀測的目標有四個現象分類  $H_0$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ ，被  $N$  個感測器節點偵測，並有一個融合中心。這些現象被高斯雜訊(Gaussian Noise) 影響，所以擁有高斯分佈的機率密度函數並有相同的標準差  $\sigma^2$ ，且四個平均值 (mean) 分別為 0、1、2、3，對於任意一個感測器節點的觀測值訊雜比 (Observation SNR) 定義成  $10 \times \log_{10} \sigma^2$  並設定通道訊雜比 (Channel SNR) 為 0 dB。

### 4.1 使用一維編碼系統

二位元的通道編碼，使用徹底搜尋的方式設計最佳的碼字矩陣，利用之前第 2.2 節的方法將可能的候選數量由  $2^{4 \times 7} \approx 2.7 \times 10^8$  降低至 1716。在 OSNR 0 ~ 4 dB 以及 5 ~ 10 dB 之下分別找到最佳的碼字矩陣 4.1 和 4.2。

$H_0$	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	1	1	1	1	1
$H_2$	0	1	1	1	1	1	1
$H_3$	1	1	1	0	0	0	0

表 4.1: 0 ~ 4 dB 的最佳碼字矩陣

$H_0$	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	1	1	1	1	1
$H_2$	1	1	1	1	1	1	0
$H_3$	1	0	0	0	0	0	0

表 4.2: 5 ~ 10 dB 的最佳碼字矩陣



- 分散式偵測使用一維編碼之分類錯誤機率模擬:

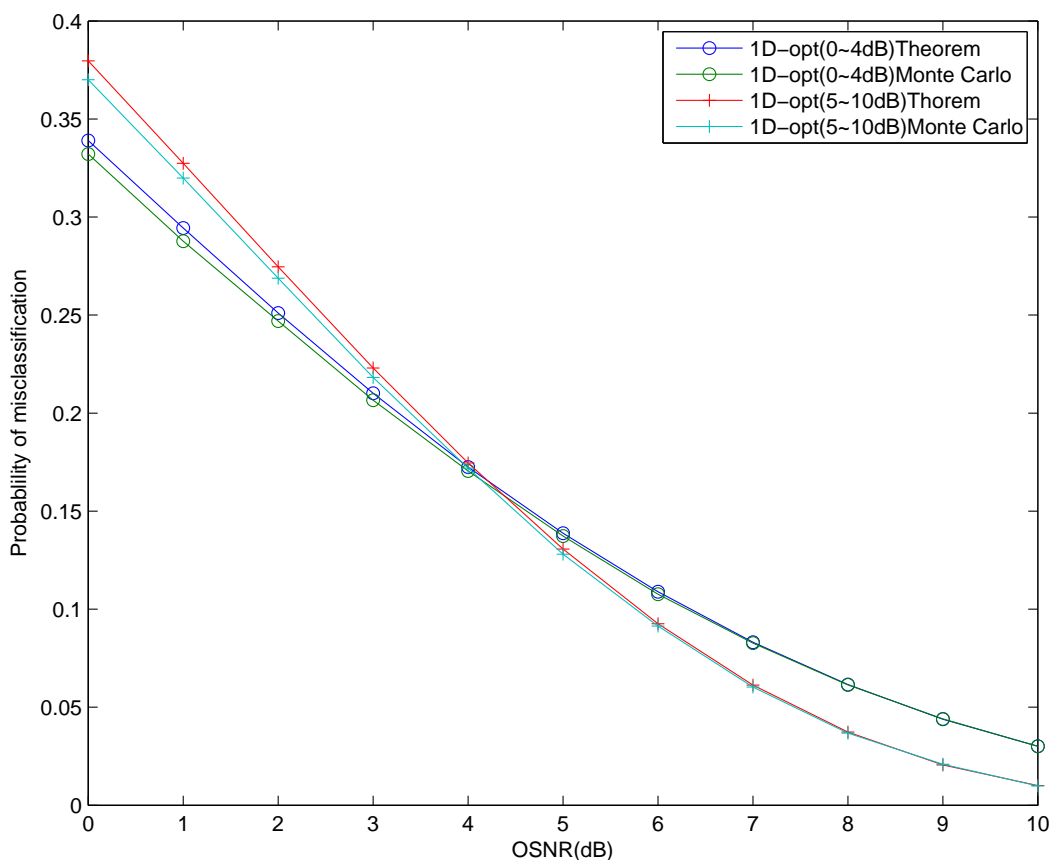


圖 4.1: 分散式偵測使用一維編碼之分類錯誤機率模擬

圖 4.1 顯示分散式偵測系統使用二位元的一維編碼在不同 OSNR 下的分類錯誤機率，其中假設感測器數量為  $N = 7$  個， $\sigma = 1$ ，做十萬次的蒙地卡羅模擬，並附上經由理論數值推算出的結果做比較。圖中可看到在訊雜比 0 ~ 4 dB 以及 5 ~ 10 dB 的情況下，利用徹底搜尋的方式分別設計不同的最佳碼字矩陣可得到最好的分類錯誤機率。在訊雜比 0 ~ 4 dB 時使用表 4.1 碼字矩陣做錯誤更正碼可得到最佳分類錯誤機率，而在 5 ~ 10 dB 時使用表 4.2 碼字矩陣可得到最佳分類錯誤機率。

由於最佳碼字矩陣的設計是在每個不同的 OSNR 下個別搜尋，根據獲得的結果選定為最佳的碼字矩陣，因此圖中可觀察出在 0 ~ 4 dB 時設計的最佳碼字矩陣在 5 ~ 10 dB 下

並不會獲得最好的分類錯誤機率。相對的在 5 ~ 10 dB 下設計得到的最佳碼字矩陣，若在 0 ~ 4 dB 下使用，錯誤更正的表現會較差也就是分類錯誤機率會相對較高。

## 4.2 使用二維編碼系統

將系統延伸至二維編碼系統，並在不同訊雜比情況下設計最佳碼字矩陣再加以模擬分析。以下表 4.3、4.4、4.5 為二位元編碼在二維編碼系統中的最佳碼字矩陣：

$H_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$H_2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$H_3$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.3: 0 ~ 5 dB 的最佳碼字矩陣

$H_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
$H_2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$H_3$	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

表 4.4: 6 ~ 8 dB 的最佳碼字矩陣

$H_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$H_1$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$H_2$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
$H_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

表 4.5: 9 ~ 12 dB 的最佳碼字矩陣

- 分散式偵測使用二維編碼之分類錯誤機率模擬:

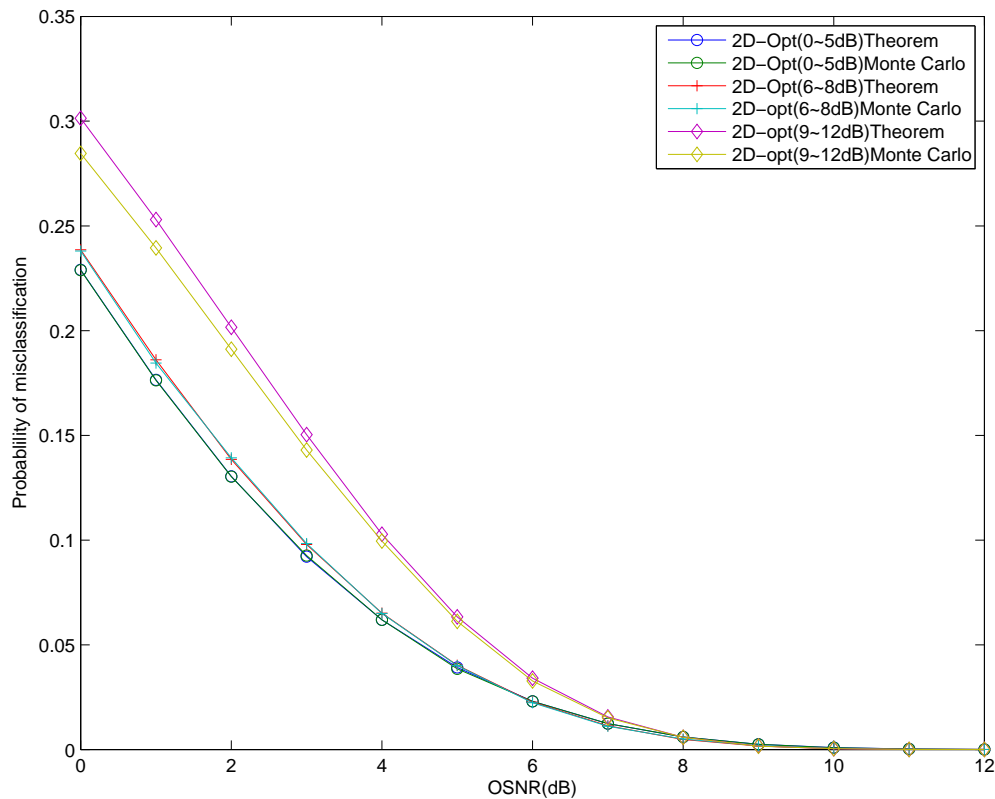


圖 4.2: 分散式偵測使用二維編碼之分類錯誤率模擬

圖 4.2 顯示分散式偵測系統使用二位元的二維編碼在不同 OSNR 下的分類錯誤機率，其中假設感測器數量為  $N = 7$  個， $\sigma = 1$ ，且二維編碼參數  $L = 2$ ，並附上經由理論數值推算出的結果做比較。圖中可看到在訊雜比 0 ~ 5 dB、6 ~ 8 dB 以及 9 ~ 12 dB 的情況下，利用徹底搜尋的方式分別設計不同的最佳碼字矩陣可得到最好的分類錯誤機率。在訊雜比範圍 0 ~ 5 dB 時使用表 4.3 碼字矩陣做錯誤更正碼可得到最佳分類錯誤機率，在 6 ~ 8 dB 時使用表 4.4 碼字矩陣可得到最佳分類錯誤機率，而在 9 ~ 12 dB 時使用表 4.5 碼字矩陣可得到最佳分類錯誤機率。

- 分散式偵測使用二維編碼之分類錯誤機率模擬:

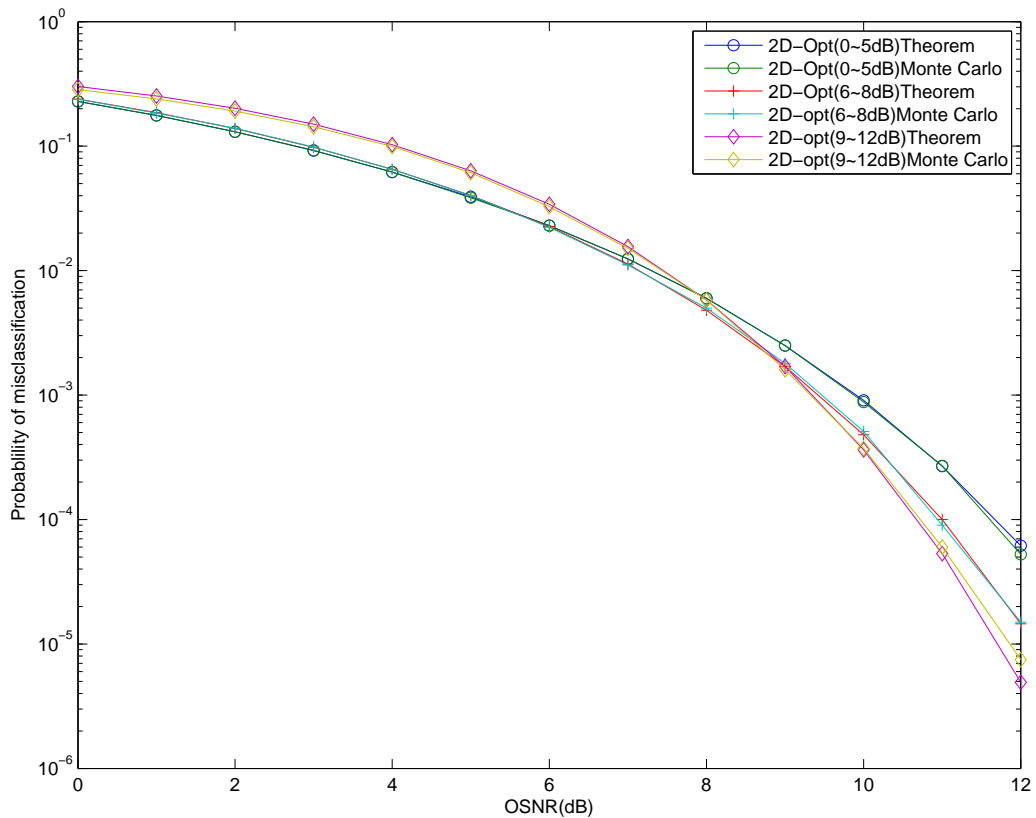


圖 4.3: 分散式偵測使用二維編碼之分類錯誤機率模擬

線性圖形在高訊雜比時較難觀察出差異，可從此頁的對數圖 4.3 看出在以上列出的不同訊雜比情況下使用不同組得最佳碼字矩陣可得到的分類錯誤機率情況。

同圖 4.1 的說明，由於最佳碼字矩陣的設計是在每個不同的 OSNR 下個別搜尋，根據獲得的結果選定為最佳的碼字矩陣，因此圖中可觀察出在 0 ~ 5 dB 時設計的最佳碼字矩陣在 6 ~ 12 dB 下並不會獲得最好的分類錯誤機率。同樣的在 6 ~ 8 dB 以及 9 ~ 12 dB 下設計得到的最佳碼字矩陣，若在其他 OSNR 情況下使用，錯誤更正的表現也會較差也就是分類錯誤機率會相對較高。

$H_0$	0	0	0	0
$H_1$	1	1	1	1
$H_2$	2	2	2	2
$H_3$	3	3	3	3

表 4.6:  $4 \times 4$  的四位元最佳碼字矩陣

## 4.3 多位元的編碼

### 4.3.1 多位元編碼使用四個感測器

系統使用四個感測器，利用多位元的編碼方式來設計最佳碼字矩陣。假設為四位元的編碼，並使用模擬退火法則設計的四位元編碼最佳碼字矩陣為第 3.4 節的表 3.1、3.2、3.3，或者可以根據前面章節提出的設計方法，設計四位元編碼的最佳碼字矩陣為表 4.6，仍有相同的效能分析結果。

- 四個感測器以四位元碼字矩陣之分類錯誤機率模擬:

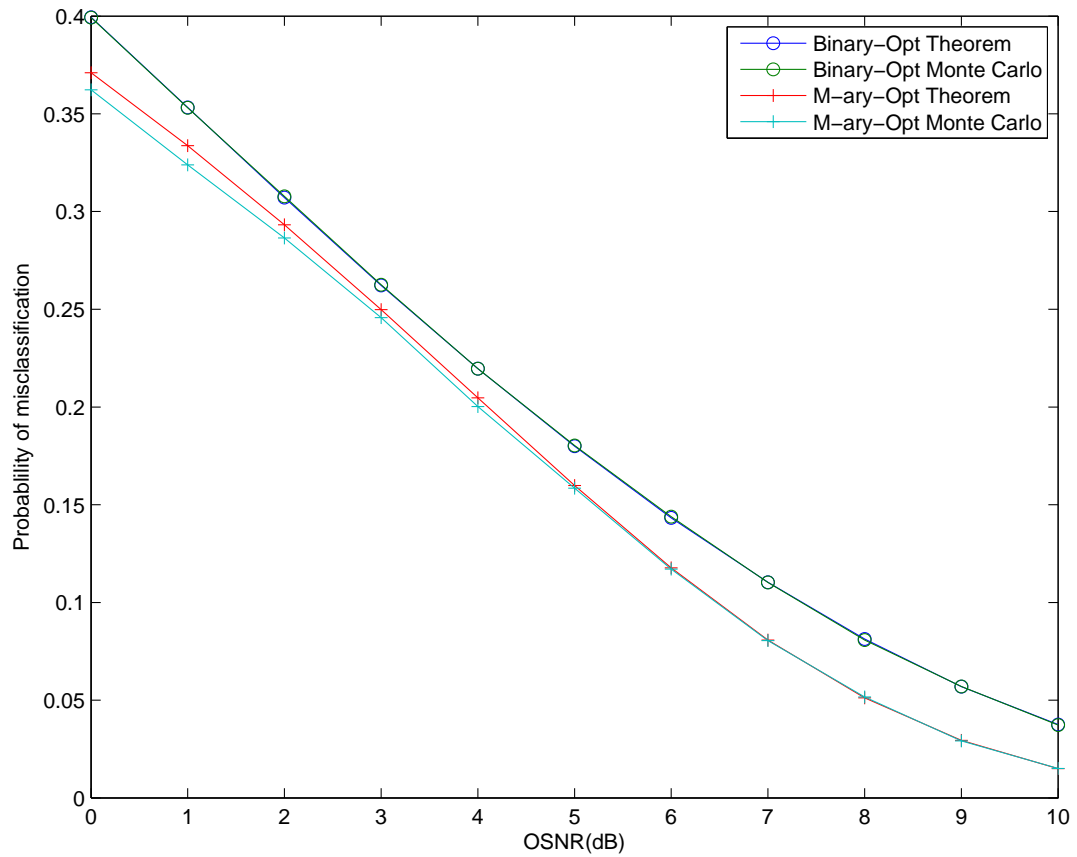


圖 4.4: 四個感測器以四位元碼字矩陣之分類錯誤機率模擬

圖 4.4 顯示分散式偵測系統使用四位元的一維編碼在不同 OSNR 下的分類錯誤機率，其中假設感測器數量為  $N = 4$  個， $\sigma = 1$ ，十萬次的蒙地卡羅模擬，並附上相同系統下，使用二位元編碼的最佳碼字矩陣所得到的分類錯誤機率模擬值和理論值做比較。圖中可看到錯誤更正碼使用四位元編碼最佳碼字矩陣的系統可獲得較使用二位元編碼碼字矩陣更好的分類錯誤機率。

$H_0$	0	0	0	0	0
$H_1$	1	1	1	1	1
$H_2$	2	2	2	2	2
$H_3$	3	3	3	3	3

表 4.7:  $4 \times 5$  的四位元最佳碼字矩陣

### 4.3.2 多位元編碼使用五個感測器

系統使用五個感測器，利用多位元的編碼方式來設計最佳碼字矩陣。假設為四位元的編碼，並使用模擬退火法則設計的四位元編碼最佳碼字矩陣為第 3.4 節的表 3.4、3.5，或者可以根據前面章節提出的編碼邏輯，設計四位元編碼的最佳碼字矩陣為表 4.7，仍有相同的效能分析結果。

- 五個感測器以四位元碼字矩陣之分類錯誤機率模擬:

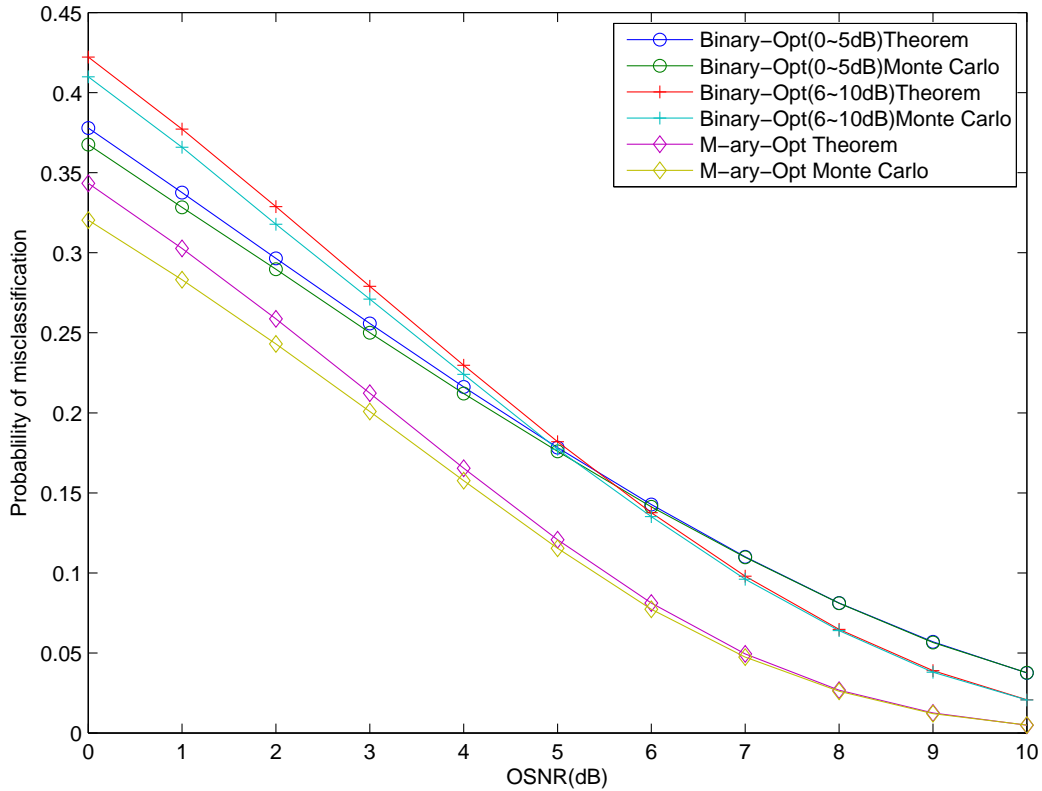


圖 4.5: 四個感測器以四位元碼字矩陣之分類錯誤機率模擬

圖 4.5 顯示分散式偵測系統使用四位元的一維編碼在不同 OSNR 下的分類錯誤機率，其中假設感測器數量為  $N = 5$  個， $\sigma = 1$ ，十萬次的蒙地卡羅模擬，並附上相同系統下，使用二位元編碼的最佳碼字矩陣所得到的分類錯誤機率模擬值和理論值做比較。在二位元編碼系統，相同地可從圖中觀察出在訊雜比範圍  $0 \sim 5$  dB 以及  $6 \sim 10$  dB 的情況下，利用徹底搜尋的方式分別設計不同的最佳碼字矩陣可得到最好的分類錯誤機率。如同四個感測器的例子，錯誤更正碼使用四位元編碼最佳碼字矩陣的系統可獲得較使用任何二位元編碼最佳碼字矩陣更好的分類錯誤機率。

由於最佳碼字矩陣的設計是在每個不同的 OSNR 下個別搜尋，根據獲得的結果選定為最佳的碼字矩陣，因此圖中可觀察出在二位元編碼的例子中， $0 \sim 5$  dB 時設計的最佳碼字矩陣在  $6 \sim 10$  dB 下並不會獲得最好的分類錯誤機率。同樣的在  $6 \sim 10$  dB 下設計得到的



最佳碼字矩陣，若在 0 ~ 5 dB 情況下使用，類錯誤機率會相對較高。而同時可以觀察到，在多位元編碼的例子中，最佳碼字矩陣的設計沒有產生不同結果的情形，因此在任一 OSNR 狀況下皆使用同一組最佳碼字矩陣即可獲得最佳的分類錯誤機率。

## 4.4 多位元編碼的最佳碼字矩陣延伸至二維編碼系統

我們將多位元編碼方式設計的最佳碼字矩陣延伸應用至二維編碼系統的錯誤更正碼中，並與二位元編碼的最佳碼字矩陣比較分類錯誤機率以證明原先對多位元編碼預期的效能表現。

### 4.4.1 一維編碼系統中的多位元與二位元最佳碼字矩陣效能比較

首先系統架構使用  $N = 7$  個感測器， $\sigma = 1$ ，使用一維編碼系統，並根據之前章節的方法設計二位元的最佳碼字矩陣以及四位元的最佳碼字矩陣，並各自應用到系統的錯誤更正碼中計算分類錯誤機率。在設計二位元編碼的最佳碼字矩陣中，不同的訊雜比範圍 0 ~ 4 dB 以及 5 ~ 10 dB 可搜尋出不同組的最佳碼字矩陣。而四位元的最佳碼字矩陣設計方面，以本論文中提出的最佳碼字矩陣設計邏輯設計出四位元最佳碼字矩陣，作為錯誤更正碼的應用二位元及四位元的例子皆執行十萬次蒙地卡羅模擬來比較分類錯誤機率。

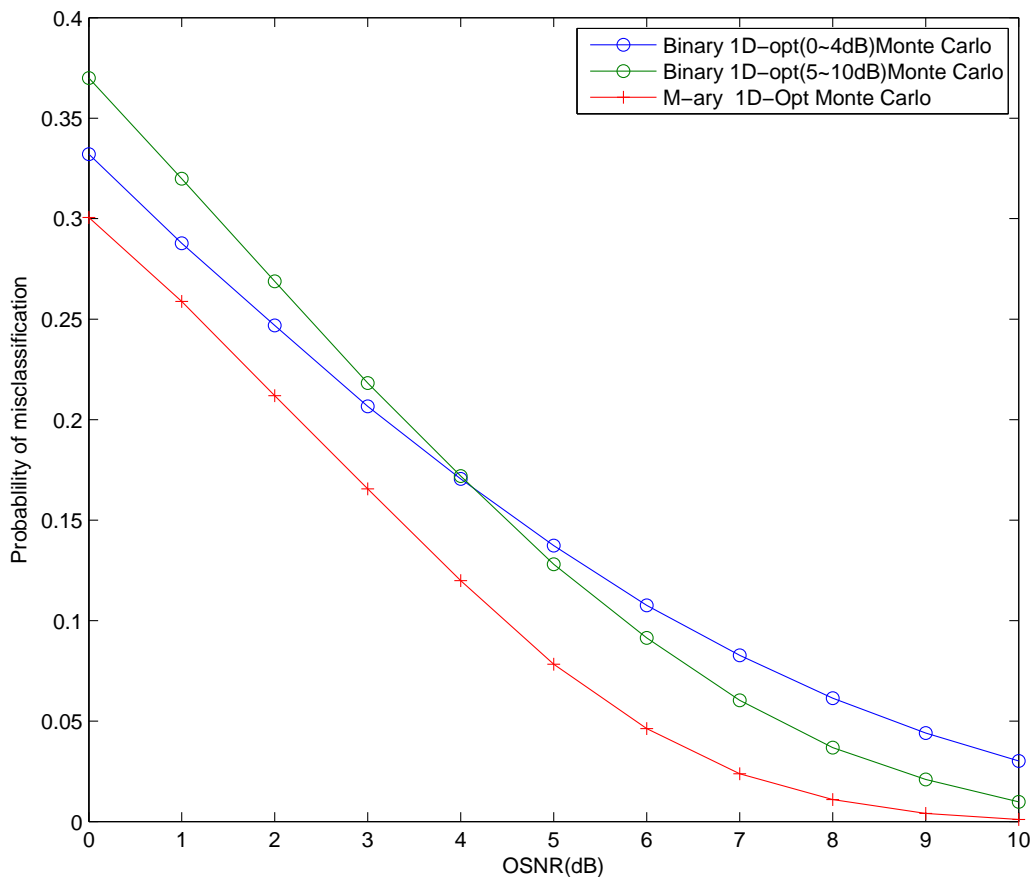


圖 4.6: 一維編碼系統中比較二位元與四位元編碼的效能

圖 4.6 顯示分散式偵測系統使用二位元及四位元的一維編碼系統在不同 OSNR 下的分類錯誤機率比較。在二位元編碼系統，相同地可從圖中觀察出在訊雜比範圍 0 ~ 4 dB 以及 5 ~ 10 dB 的情況下，利用徹底搜尋的方式分別設計不同的最佳碼字矩陣可得到最好的分類錯誤機率。且可明顯發現，使用四位元編碼的最佳碼字矩陣的系統可獲得較使用任何一組最佳二位元編碼的碼字矩陣更好的分類錯誤機率。

同圖 4.1 的說明，由於最佳碼字矩陣的設計是在每個不同的 OSNR 下個別搜尋，根據獲得的結果選定為最佳的碼字矩陣，因此圖中可觀察出在二位元編碼的例子中，0 ~ 4 dB 時設計的最佳碼字矩陣在 5 ~ 10 dB 下並不會獲得最好的分類錯誤機率。相對的在 5 ~ 10 dB 下設計得到的最佳碼字矩陣，若在 0 ~ 4 dB 下使用，錯誤更正的表現會較差也就是分

類錯誤機率會相對較高。同圖 4.5 的說明，多位元編碼的例子中，最佳碼字矩陣的設計沒有產生不同結果的情形，因此在任一 OSNR 狀況下皆使用同一組最佳碼字矩陣即可獲得最佳的分類錯誤機率。

#### 4.4.2 二維編碼系統中的多位元與二位元最佳碼字矩陣效能比較

接著延伸至二維編碼系統中。同樣使用  $N = 7$  個感測器， $\sigma = 1$ ，二維編碼的參數  $L = 2$ ，使用上節中設計好的二位元及四位元最佳碼字矩陣作為錯誤更正碼的應用。二位元及四位元的例子皆執行十萬次蒙地卡羅模擬來比較分類錯誤機率。

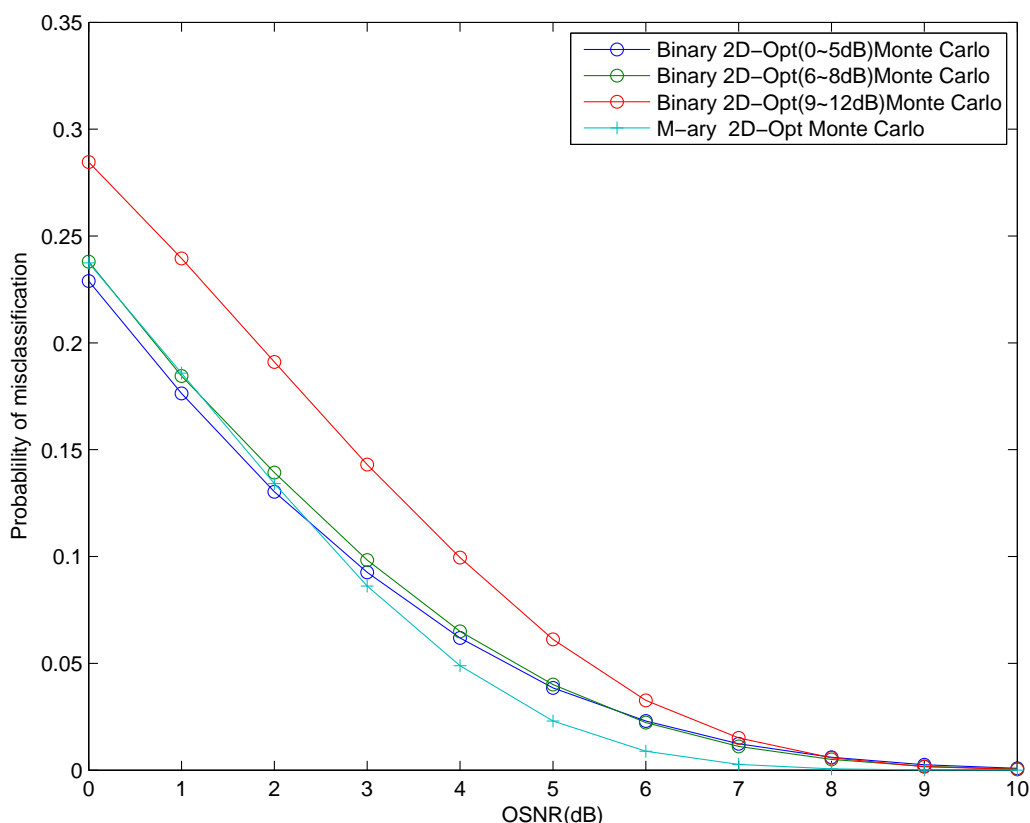


圖 4.7: 二維編碼系統中比較二位元與四位元編碼的效能

圖 4.7 顯示分散式偵測系統使用二位元及四位元的二維編碼系統在不同 OSNR 下的分類錯誤機率比較。在二位元編碼系統，相同地可從圖中觀察出在訊雜比範圍 0 ~ 5 dB、6 ~ 8 dB 以及 9 ~ 12 dB 的情況下，利用徹底搜尋的方式分別設計不同的最佳碼字矩陣可得到最好的分類錯誤機率。而在使用本篇提出的最佳碼字矩陣設計方法的四位元最佳碼字矩陣結果發現，在不同的訊雜比情況下仍獲得較二位元編碼的碼字矩陣更好的分類錯誤機率。

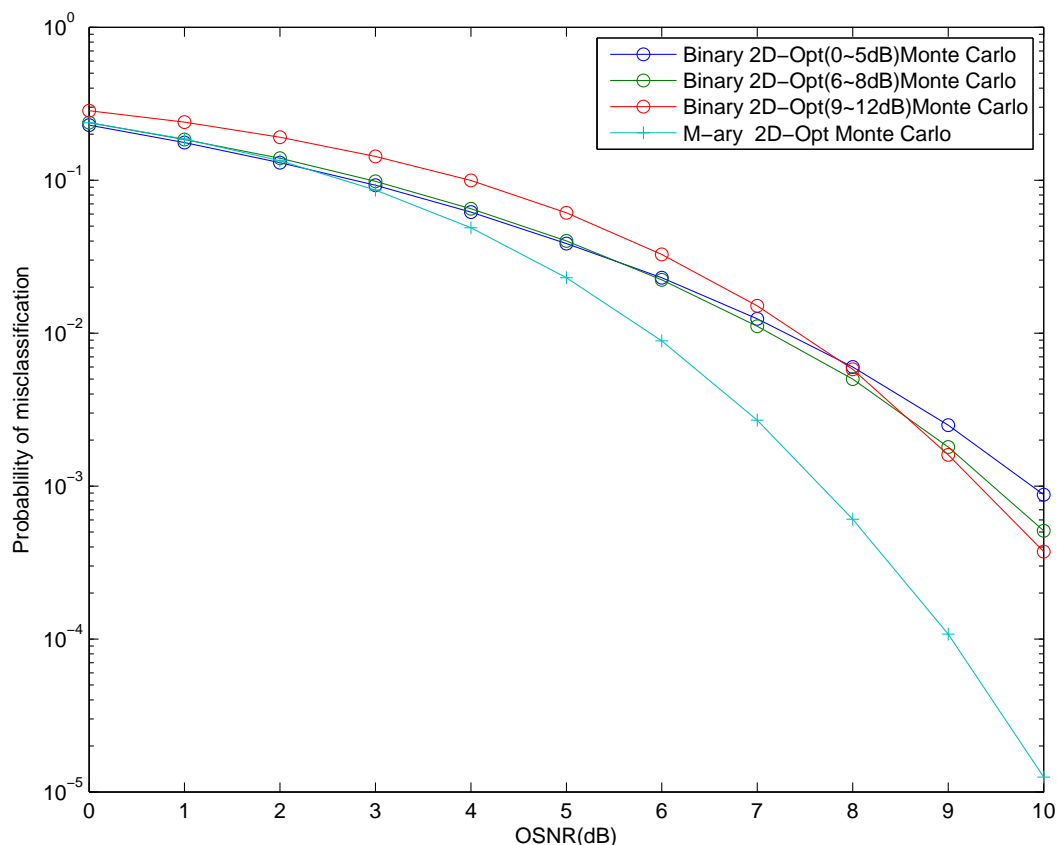


圖 4.8: 二維編碼系統中比較二位元與四位元編碼的效能

從對數圖 4.8 中可觀察到在高訊雜比情況下較使用二位元編碼最佳碼字矩陣的系統獲得更好的分類錯誤機率，這也進一步印證本篇論文的假設以及多位元最佳碼字矩陣設計的方法，即使本篇提出的設計方法設計出的多位元碼字矩陣並非最佳的結果，仍可經由蒙地卡羅模擬結果得知獲得較使用二位元編碼最佳碼字矩陣更好的分類錯誤機率，如此亦可降低設計多位元最佳碼字矩陣的時間及複雜度。

同圖 4.3 的說明，由於最佳碼字矩陣的設計是在每個不同的 OSNR 下個別搜尋，根據獲得的結果選定為最佳的碼字矩陣，因此圖中可觀察出在二位元編碼的例子中，0 ~ 5 dB 時設計的最佳碼字矩陣在 6 ~ 12 dB 下並不會獲得最好的分類錯誤機率。同樣的在 6 ~ 12 dB 下設計得到的最佳碼字矩陣，若在其他 OSNR 下使用，錯誤更正的表現會較差也就是分類錯誤機率會相對較高。而多位元編碼的例子中，最佳碼字矩陣的設計同樣沒有產生不同結

果的情形，因此在任一 OSNR 狀況下皆使用同一組最佳碼字矩陣即可獲得最佳的分類錯誤機率。

## 第五章 結論

分析蒙地卡羅模擬的結果，可見得根據第 3.4 節提出的方法設計多位元的最佳碼字矩陣設計，使用在錯誤更正碼，在分類錯誤機率上有著顯著的效能表現，這足以印證本篇論文所提出的編碼方式對照符合的系統架構即為多位元的最佳碼字矩陣的可能。然而即使在多數感測器的例子中，本論文提出的設計方法可能並不是整體最佳的多位元碼字矩陣，但經過分類錯誤機率模擬仍有顯著的效能，此設計方法也降低了許多設計多位元最佳碼字矩陣的時間及複雜度。

更進一步在較佳的二維編碼系統中，相較於二位元錯誤更正碼的二維編碼系統，多位元的作物更正碼也可從模擬分析中得到更好的效能表現，這表示在符合設計的系統架構下，二維編碼系統也可使用多位元編碼的概念設計錯誤更正碼最佳碼字矩陣來增進二位元編碼系統的效能。原先期待無線感測器若克服硬體上複雜度或功率消耗等問題，未來設計成四位元甚至是更多位元的傳輸，必定能在分散式多等級分類偵測的問題有更好的系統效能。

## 參考文獻

- [1] B. Dasarathy, “Operationally efficient architectures for fusion of binary-decision sensors in multidecision environments,” *Opt. Eng.*, vol. 36, no. 3, pp. 632–641, Mar. 1997.
- [2] X. Zhu, M. Kam and C. Rorres, “M-ary hypothesis testing with binary local decisions,” in *Proc. Conf. Inf. Sci. Syst.*, Mar. 1998, pp. 107–112.
- [3] Q. Zhang and P. K. Varshney, “Decentralized M-ary detection via hierarchical binary decision fusion,” *Inf. Fusion*, vol. 2, pp. 3–16, 2001.
- [4] T.-Y. Wang, Y. S. Han, P. K. Varshney, and P.-N. Chen, “Distributed Fault-Tolerant Classification in Wireless Sensor Networks,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 23, no. 4, pp. 724–734, Apr. 2005.
- [5] H.-T. Pai, Y. S. Han, and J.-T. Sung, “Two-Dimensional Coded Classification Schemes in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Trans. on wireless Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 1450–1455, May. 2008.
- [6] A. E. Gamal, L. A. Hemachandra, I. Shperling, and V. K. Wei, “Using simulated annealing to design good codes,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-33, no. 1, pp. 116–123, Jan. 1987.
- [7] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, *The Theory of Error-Correcting Codes*, New York: Elsevier, 1977.



- [8] P. K. Varshney, *Distributed Detection and Data Fusion*, New York: Springer, 1997.
- [9] T.-Y. Wang, Y. S. Han, B. Chen, and P. K. Varshney, "A Combined Detection Fusion and Channel Coding Scheme for Distributed Fault-Tolerant Classification in Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. on wireless Commun.*, vol. 5, no. 7, pp. 1695–1705, Jul. 2006.