

運用 Reed-Solomon 編碼技術 於車用 CAN Bus 系統糾錯能力改善之研究

朱育滄 陳璽煌
樹德科技大學/資訊工程系
shchen@stu.edu.tw

摘要

CAN Bus 發展至今已接近 20 年歷史，不但解決車內線束過多的問題，還為日後的車用電子網路奠定了基礎。由於 CAN Bus 有高度可靠性和錯誤偵測能力，目前也被廣泛應用在船舶、航空電子、大眾交通、農用設備、醫療設備，工業控制之中。本論文依照 CAN Bus 之標準 ISO11898 協議下封包格式，嘗試研究將原始內部 BCH Code 之糾錯碼，更換成 Reed-Solomon Code，並比較兩種糾錯碼在不同 SNR 雜訊干擾下的抵抗錯誤發生的機率。實驗結果顯示，採用 Reed-Solomon Code 的改良版本 CAN Bus 比起原本採用 BCH Code 的標準版本，最高具有 5 倍的糾錯能力。因此，本論文提出的改良版本 CAN Bus 系統可提高標準版本的抗電磁雜訊干擾能力，並可應用在未來的電動車輛控制系統中。

關鍵詞：CAN bus, cyclic redundancy check (CRC), BCH code, Reed-Solomon (RS) code.

Abstract

Since late of 1990, CAN Bus has been developed over 20 years. CAN Bus system not only solve the problem of excessive car harness, but also provide a solution for the automotive electronic network foundation in the future. Because CAN Bus has high reliability and error detection capabilities, it is also widely used in the marine, avionics, public transportation, agricultural equipment, medical equipment, and industrial control. In this paper, under the CAN Bus in accordance with the standard ISO11898 protocol packet format, we try to research the performance of using Reed-Solomon Code to replace the original internal BCH error-correcting codes. Then we compare the resist noise interference of these two error-correcting codes under different SNRs. Compared to the original version of CAN Bus with standard BCH Code, experimental results show that the use of Reed-Solomon Code could improve about 5 times of the anti-noise error correction capability. Therefore, this paper proposes a modified version of the CAN Bus system can improve the standard version of the anti-electromagnetic noise interference, and can be used in future electric vehicle control system.

Keywords: CAN bus, cyclic redundancy check (CRC),

BCH code, Reed-Solomon (RS) code.

1. 前言

從 1983 年代制定之 CAN Bus 以及到了 1990 年 CAN Bus 的 ISO 標準化，CAN Bus 系統的研發至今已有了 20 多年的歷史，當初制定出 CAN Bus 主要是因為車用電控功能例如電子燃油噴射系統、電子自動變速系統、ABS 防鎖死煞車系統等元件的使用需求日益提高，導致內部電子控制單元設備以及信號傳遞的數量增加，導致車內線路過於複雜零亂，為了降低車內複雜的線束數量，並使車輛故障或者出錯誤時的診斷、回報、修復工作簡易化，Bosch 公司制定出的 CAN Bus 標準協議。然而 CAN Bus 在設計當初只選用糾錯能力較弱的 BCH Code，在高電磁干擾的環境下，BCH Code 無法校正所有的錯誤，導致 CAN Bus 必須重新發送封包，使得傳輸速率下降。為了解決此一問題，本論文嘗試使用糾錯效率更高的 Reed-Solomon Code 來改善標準 CAN Bus 系統在高雜訊干擾下的傳輸效率。本論文的實驗方式將使用 MATLAB 中的 SIMULINK 進行模擬實驗，依照 ISO11898 模擬出 CAN Bus 標準格式，再用 Reed-Solomon Code 改進內部原本的 BCH Code 檢錯區塊，並與原始格式進行性能的比較。

2. 糾錯碼

糾錯碼的主要功能是将訊號經通道傳輸後改正接收端所收到的錯誤部分，目前常用的糾錯方法可分成兩大類：Linear Block Code 和 Convolution Code，Linear Block Code 的編碼特性為將要傳的資料分成好多固定長度的小資料，並對每一資料編碼，使資料經編碼後的資料比沒經編碼的資料多，而我們能利用編碼後的資料特性在接收端進行解碼功能，要是接收資料不具編碼後的特性，則表接收值有錯，因此我們必須求出一筆資料的錯誤位置及錯誤值，以將接收訊號恢復成我們要的訊號。而 Linear Block Code 又分數種不同的型式，如 Cyclic code、BCH code 以及 Reed-Solomon code 等，其編碼方式都必須將資料分成固定長度的資料外加一些多餘訊號。由於本論文是採用 Reed-Solomon Code 對於 CAN Bus 原有的 BCH Code 進行改良，

因此以下的章節僅針對 BCH Code 與 Reed-Solomon Code 進行說明。

2.1 BCH Code 編碼原理

BCH 編碼產生器(Code Generator)是由多項(Polynomial)所定義，例如： $m_0, m_1, m_2, \dots, m_{k-1}$ ，將這一段訊號輸入線性段編碼器，輸出為 n 個位元的編碼字元，以 $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{n-1}$ 表示，另外 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-k-1}$ 表示 $(n-k)$ 個查核位元。對於系統架構的編碼，其編碼字元分為兩個部分其中一部分代表訊號位元，另一部分則為查核位元。

為了數學式的推導，我們定義 $1k \times k$ 訊號向量為 m ， $1 \times (n-k)$ 訊號向量為 b ， $1 \times n$ 訊號向量為 c ， p 為 $k \times (n-k)$ 的係數矩陣，這些都是列向量(row vector) [1]。

$$m = [m_0, m_1, m_2, \dots, m_{k-1}] \quad (1)$$

$$b = [b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-k-1}] \quad (2)$$

$$c = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-k-2}, c_{n-k-1}] \quad (3)$$

$$p = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & \cdots & p_{0,n-k-1} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdots & \cdots & p_{1,n-k-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p_{k-1,0} & p_{k-1,1} & \cdots & \cdots & p_{k-1,n-k-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

查核位元為訊號位元的線性整合， $b = mp$ ，訊號向量編碼字元為向量 $c = [b | m]$ ，接著將共通項次提出來成為 $c = m[p | I_k]$ ， I_k 代表 $k \times k$ 單位矩陣(identity matrix)：

$$I_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

定義 $k \times n$ 產生矩陣為 $G = [P | I_k]$ ，稱為正規的梯形矩陣(echelon canonical form)，其 k 列向量均為線性獨立，亦即 G 矩陣內的任意列向量均不能由其他列向量表示。如圖 1 產生矩陣所示，所以 $c = mc$ [1]。

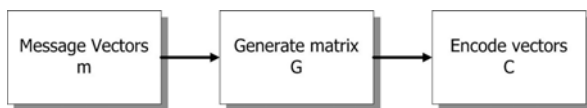


圖 1 BCH 編碼產生矩陣示意圖

另外查核位元的矩陣 H 表示 $(n-k) \times n$ 矩陣，定義如為 $H = [I_{n-k} | P^T]$ ， P^T 代表 $(n-k) \times k$ ，它為矩陣 P 的轉置矩陣(transpose matrix)，而 I_{n-k} 為 $(n-k) \times (n-k)$ 單位矩陣，因此可以寫成：

$$HG^T = [I_{n-k} \ : \ P^T] \begin{bmatrix} P^T \\ I_k \end{bmatrix} = P^T + P^T \quad (6)$$

在以 2 為底的運算裡， $P^T + P^T = 0$ ，0 代表 $(n-k)$

$\times k$ 零矩陣(所有的元素皆為零)， $HG^T = 0$ ，也可以寫成 $GH^T = mGH^T = 0$ 。如圖 2 所示[1]。

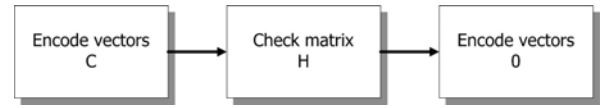


圖 2 BCH 查核矩陣示意圖

2.2 BCH Code 錯誤糾正編碼

BCH code 編碼的長度是 n 為 $n = 2^m - 1$ ， $3 \leq m \leq 9$ ，其中可以更正的錯誤數目 t 為 $t < \frac{2^m - 1}{2}$ ，而且 $n - k \leq mt$ 。因此，並非所有的 n 、 k 值皆滿足以上敘述之不等式[1]。

2.3 Reed-Solomon code 編碼原理

Reed-Solomon codes 屬於區塊碼的一種，所謂的區塊碼即訊號在傳送時是以一個資料的區塊傳送。每一個資料區塊除了原本訊號外，還有加上具保護作用的訊號，稱為 Parity Check Message。定義信息多項式為

$$M(x) = m_0 + m_1x + m_2x^2 + \dots + m_{k-1}x^{k-1} \quad (7)$$

其中： $x_i \in GF(2^m)$ ， $0 < i < n-1$

碼字多項式為

$$C(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + m_{n-1}x^{n-1} \quad (8)$$

其中： $c_i \in GF(2^m)$ ， $0 < i < n-1$

其生成多項式為：

$$G(x) = \prod_{i=d}^{i=d+2t-1} (x - a^i) \quad (9)$$

$$C(x) = M(x)G(x) = x^{n-k}M(x) + Q(x) \quad (10)$$

可以求出剩餘的多項式 $Q(x)$ ，從而確定驗證位元組。把生成一個 $GF(2^m)$ 上的 RS 碼定義為 (n, d) ，其中碼長 $n = 2^m - 1$ 個符號，訊息位 k 個符號，最小碼距 $d = n - k + 1$ [5]。

2.4 Reed-Solomon code 解碼原理

解碼就是從調解器送過來的字碼中找出最有可能的字碼即編碼的逆過程。這個最有可能的字碼和真正的發送字碼間的漢明距離最小，其解碼步驟如下[5]。

2.4.1 計算多個特徵值 S_k

設 $T(x)$ 為發送字碼， $R(x)$ 為接收字，錯誤公式可表示為

$$e(x) = R(x) - T(x) = e_0 + e_1x + \dots + e_{n-1}x^{n-1} \quad (11)$$

由傳輸引起的錯誤的 v 個錯誤公式為

$$e(x) = e_1x^1 + e_2x^2 + \dots + e_vx^v \quad (12)$$

對於 $e(x)$ ，需要知道其錯誤的位置 x^i 及錯誤值。 2_v 個特徵值元素通過把 a^i 代入接收多項式 $R(x)$ 而得到。如果 $S_k = 0$ 則接收無誤，若 $S_k \neq 0$ ，由 S_k 找出

錯誤圖樣。因為 $R(x) = e(a^t) + T(a^i) = 0$ ，則

$$\begin{cases} S_1 = R(a) = e_1x^1 + \dots + e_v(x^v) \\ S_2 = R(a^2) = e_1x^2 + \dots + e_v(x^v)^2 \\ S_1 = R(a^{2v}) = e_1(x^1)^{2v} + \dots + e_v(x^v)^{2v} \end{cases} \quad (13)$$

2.4.2 定錯誤位置多項式

通過上列式子(13)直接求解 e_i 和 x^i 非常困難，由於它是一個線性的聯立方程式，一般不直接求解，而是將其轉換為一線性方程式。要求出 v 個錯誤位置 x^i ，為根的一元 v 次方程式[5]。

$$e_i x_i^{v+j} + \delta_1 e_i x_i^{v+j-1} + \dots + \delta_v = 0, i=1,2,\dots,v \quad (14)$$

顯然，以 x_i 的任何次方與上式相乘後該式仍為零，現以 $e_i x_i^i$ 與其相乘，可寫出

$$e_i x_i^{v+j} + \delta_1 e_i x_i^{v+j-1} + \dots + \delta_v e_i x_i^j = 0, \quad (15)$$

將式(9)對 $i=1,2,\dots,v$ 相加，由式(7)可得

$$S_{v+j} + \delta_1 S_{v+j+1} + \dots + \delta_v S_i x_i^j = 0 \quad (16)$$

由式(16)定義的方程式以糾正 v 個差錯非二元 RS 為例，可計算出 2_v 個特徵值 S_1, S_2, \dots, S_{2v} 。由式(16)，令 j 由 1 取到 v ，構成 v 個線性係數聯立方程式

$$\begin{cases} S_{v+1} + \delta_1 S_v + \dots + \delta_v S_1 = 0 \\ S_{v+2} + \delta_1 S_v + \dots + \delta_v S_2 = 0 \\ S_2 + \delta_1 S_{2v-1} + \dots + \delta_v S_v = 0 \end{cases} \quad (17)$$

通過解聯立方程式可得 $\delta(x)$ 的係數 $\delta_1, \dots, \delta_v$ 。

2.4.3 尋找錯誤位置

求得一元 v 次線性方程式的值後，可以解出其根，即錯誤位置，但不直接求解，而是採用直接代入的方法，對於

$$\delta(x_i) = x_i^t + \delta_1 x_i^t + \dots + \delta_t = 0, i=1,2,\dots,t \quad (18)$$

先考慮發送的高階層 bit，以便對 a^{n-1} 定位進行根的測試，當代入 $a^i (i=n-1, n-2, \dots, 0)$ 求得 $\delta(a^i)$ 為零時，說明第 i 個碼的位置發生錯誤。

2.4.4 尋找錯誤值

將上式計算錯誤位置代入式(13)，用求 $\delta_1, \dots, \delta_v$ 的方法解聯立方程式組可得錯誤值。

2.4.5 糾正錯誤

在對應的錯誤位置上加上相應的錯誤值及可完成糾正錯誤[5]。

3. 實驗模擬之模型建立

本論文的實驗模擬使用 MATLAB 內建的 SIMULINK 模擬工具，以 CAN Bus 2.0 標準格式下的架構，輸入端為 CAN Bus Frame 取得對象為 CAN Bus 格式中開始欄位 SOF (Start of Frame)、識別碼欄位 ID (Identifier)、控制欄位 DLC (Data Length

Code) 以及資料欄位 Data Field，四個欄位總 bit 傳入 CRC15 並多項式為：

$$x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1 \quad (19)$$

3.1. 標準 CAN Bus 糾錯模擬

模擬流程先由 CRC (Cyclic Redundancy Check) 進行編碼，再通過 BCH Encoder 的編碼動作後，加入 PSK (Phase-Shift Keying) 將數據轉換成訊號，AWGN (Additive White Gaussian Noise) 為加性高斯白雜訊，使用噪音訊號比 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 為測試方式，為以上資料傳輸加封包的動作。解封包先經由 PSK (Phase-Shift Keying) 將訊號轉回數據後，BCH Decode 將編碼解回，再經過 CRC15 Detector 將編碼解回，最後輸出之數據與輸入做比較則能得知錯誤幾個 bit。如圖 3 所示：

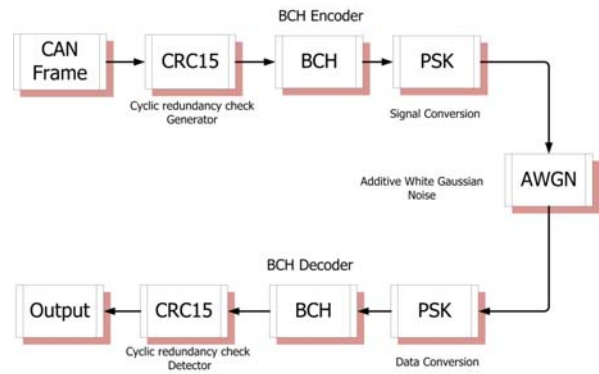


圖 3 原始 CAN Bus 糾錯模擬圖

3.2. 改良版本 CAN Bus 糾錯模擬

改良版本 CAN Bus 糾錯模擬如圖 4 所示，模擬流程先由 CRC (Cyclic Redundancy Check) 進行編碼在通過 RS Encoder 的編碼動作後，加入 PSK (Phase-Shift Keying)，將數據轉換成訊號，AWGN (Additive White Gaussian Noise) 為加性高斯白雜訊，使用噪音訊號比 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 為測試方式，以上為資料傳輸加封包的動作。解封包先經由 PSK (Phase-Shift Keying) 將訊號轉回數據後，RS Decode 將編碼解回，再經過 CRC15 Detector 將編碼解回，最後輸出之數據與輸入做比較則能得知錯誤幾個 bit。

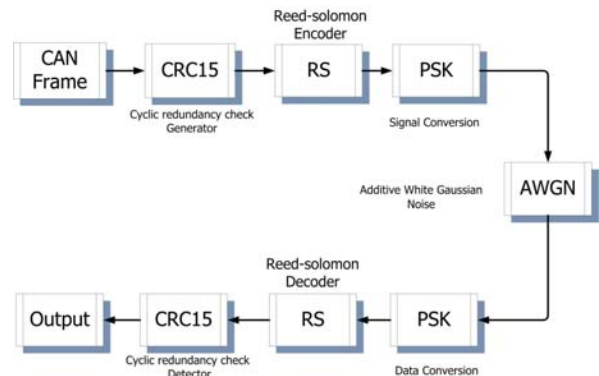


圖 4 改良版本 CAN BUS 糾錯模擬圖

4. 模擬結果

本論文使用的 CAN Bus Data Frame 的模擬測試參數分別為 0、2、4、6、8 個 Bytes，BCH 與 Reed-Solomon 編碼參數分別為 BCH(63.36)、RS (63.39)、BCH(63.51)、RS (63.55)、BCH(127.64)、RS (127.65)、BCH(127.85)、RS (127.85)、BCH(127.99)、RS (127.99)。模擬結果描述如下：

設定 CAN Bus 格式 Date Frame 為 0 byte 時，BCH(63.36)、RS (63.39)、Reed-Solomon Code 當 SNR 到達 -1dB 時能完全糾正錯誤。

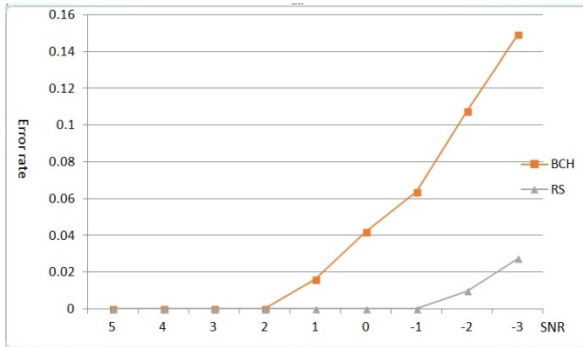


圖 5 BCH(63.36)、RS (63.39)錯誤率比較圖

設定 CAN Bus 格式 Date Frame 為 2 bytes 時，BCH(63.51)、RS (63.55)、Reed-Solomon Code 當 SNR 到達 2dB 時能完全糾正錯誤。

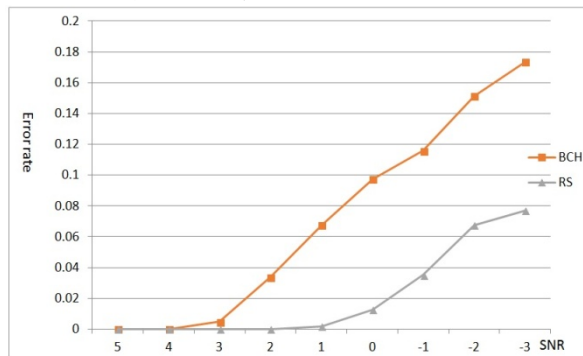


圖 6 BCH(63.51)、RS (63.55)錯誤率比較圖

設定 CAN Bus 格式 Date Frame 為 4 bytes 時，BCH(127.64)、RS (127.65)、Reed-Solomon Code 當 SNR 到達 -2dB 時能完全糾正錯誤。

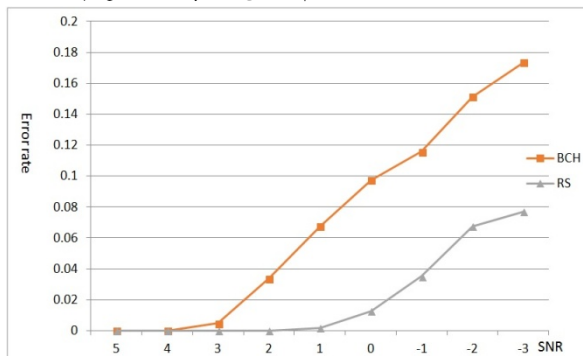


圖 7 BCH(127.64)、RS (127.65)錯誤率比較圖

設定 CAN Bus 格式 Date Frame 為 6 bytes 時，

BCH(127.85)、RS (127.85)、Reed-Solomon Code 當 SNR 到達 -1dB 時能完全糾正錯誤。

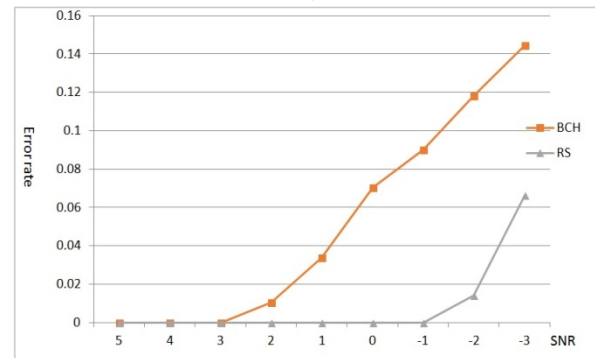


圖 8 BCH(127.85)、RS (127.85)錯誤率比較圖

設定 CAN Bus 格式 Date Frame 為 8 bytes 時，BCH(127.99)、RS (127.99)、Reed-Solomon Code 當 SNR 到達 0dB 時能完全糾正錯誤。

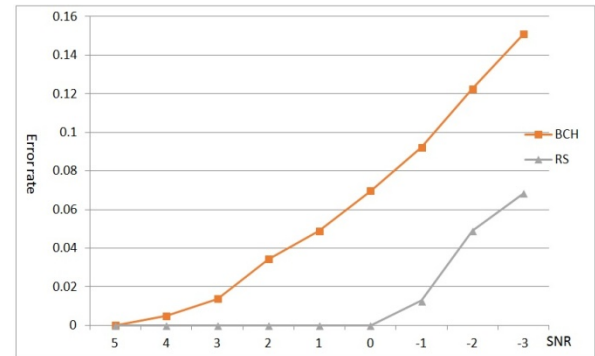


圖 9 BCH(127.99)、RS (127.99)錯誤率比較圖

5. 結論

由實驗可以得知，使用 Reed-Solomon Code 改善過後的 CAN Bus 比起原始版本最高能有五倍的抗雜訊干擾能力。而在 CAN Bus 資料欄位分別為 0byte、2byte、4byte、6byte、8byte 情況下 BCH 碼能最有效抵抗雜訊的是(63.36)，而改善過後的 CAN Bus 最能有效抵抗雜訊的 Reed-Solomon Code 是 (127.65)，當雜訊到達 -2db 的狀態下都能完全糾正錯誤的資料。

參考文獻

- [1] 余適印，應用小波轉換和 BCH 編碼在語音浮水印之研究，樹德科技大學，碩士論文，2008。
- [2] 劉武剛，楊建波，周瑞，基於 Simulink 中的聯合戰術信息分發系統仿真，空軍航空大學，訊息與電子工程，第 8 卷，第 1 期，2010。
- [3] 徐誌宏，里德所羅門解碼器之設計與 FPGA 實現，國立雲林科技大學，碩士論文，2007。
- [4] 呂岩，李勁，通用 PSK 和 QAM 解調接收機，內蒙古工業大學，河北大學學報，第 33 卷，第 2 期，2013。
- [5] 施意，徐濤，孫雅琴，基於 Simulink 中的戰術數據鏈糾錯編碼仿真，海軍潛艇學院，四川兵工學報，第 32 卷，第 10 期，2010。
- [6] 林杰龍，現代通訊基頻技術概論，中華民國電子零件認證委員會取自 <http://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-48-7.pdf>。
- [7] 林智仁，紅外線數據封包編碼、發射、接收與解碼系統之設計，國立台北科技大學，碩士論文，2005。
- [8] 許芳蓁，車載 CAN Bus 系統比較研究，碩士論文國立虎尾科技大學，2007。

- [9] 孫成啟, CAN Bus 網路之鋼板熱軋溫度監控系統, 元智大學, 碩士論文, 2003.
- [10] 徐誌宏, 里德所羅門解碼器之設計與 FPGA 實現, 國立雲林科技大學, 碩士論文, 2007.
- [11] 謝偉霖, Reed-Solomon Decoder Hardware Implementation for Digital Video Broadcasting Standard for Terrestrial Transmission(DVB-T) Channel Coding, National Central University, 碩士論文, 2005.
- [12] 余適印, A study of speech watermarking based on wavelet transform and BCH coding, Shu-Te University, 碩士論文, 2007.
- [13] Akihito Iwanaga, Makoto Sugihara, TDMA scheduling method for fault tolerant communication based on reliability requirements, Kyushu University, IPSJSIG, 2012.
- [14] Krishna Chaitanya Emani, Keong Kam, Maciej Zawodniok, Yahong Rosa Zheng, Improvement Of Can Bus Performance By Using Error-Correction Codes, University of Missouri-Rolla, 205-210, IEEE, 2007
- [15] Renesas Electronics Corporation, CAN-BUS primer, 2006.
- [16] International Organization for Standardization, ISO11898, 2009.