

具混合式調變技術與多波長帶通光檢測器之煙霧感測系統

*李大輝、廖奕凱、林良諺

南臺科技大學電子工程系

dhlee@stust.edu.tw

摘要

近年來，煙霧警報器已是室內安全不可或缺的重要裝置，法律已明文規定其為各類場所的配置標準，然而市面上許多煙霧警報器並不適用於水氣較高的場所，例如廚房與浴室等，因烹飪的蒸氣或水霧可能引起煙霧警報器的誤報，倘若使用者因誤報率高而關閉警報器，恐提高重大災害的發生率。另外，因室內光源會干擾一般的煙霧警報器，導致感測器光訊號之訊號雜訊比（SNR）較低。因此，本論文提出基於混合式調變光通訊與特定光波長元件實現之水霧與煙霧判別感測系統，此系統在元件與電路層面實現了抗室內光源干擾，並利用特別選用的帶通型光檢測器結合光通訊混合調變演算法，進一步增加訊號雜訊比。此外，根據煙霧的光學特性，透過特定多波長帶通型光感測陣列來準確判斷煙霧和水霧，從而降低系統的誤報率。

關鍵詞：煙霧感測、光散射、混合調變、訊號雜訊比、帶通光檢測器

A Smoke Sensing System Based on Hybrid Modulation Technique and Multi-wavelength Band-pass Optical Detector

Da-Huei Lee, Yi-Kai Liao, Liang-Yan Lin

Department of Electronic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

In recent years, smoke detectors have become indispensable indoor devices, with regulations mandating their installation in various premises. However, many smoke detectors available on the market are not suitable for environments with high humidity, such as kitchens and bathrooms. Steam or smoke generated during cooking can trigger false alarms in smoke detectors, and frequent deactivation of alarms due to high false alarm rates may increase the risk of major disasters. Additionally, conventional smoke detectors are susceptible to interference from indoor lighting sources, resulting in a lower signal-to-noise ratio (SNR) of optical signals. To address these challenges, this study proposes a discrimination and sensing system for water mist and smoke based on an optical communication with hybrid modulation technique using specific wavelength components. This system implements resistance to the light interference of indoor sources at both the component and circuit levels. It further enhances the SNR with a selected bandpass optical detector combined with a hybrid modulation algorithm for optical communication. Furthermore, leveraging the optical characteristics of smoke, a specific multiwavelength bandpass optical sensing array is employed to accurately distinguish between water mist and smoke, thereby reducing the rate of false alarm for the proposed system.

Keywords: Smoke sensing, Light scattering, Hybrid modulation, Signal-to-noise ratio, Band-pass optical detector

Received: Mar. 6, 2025; first revised: Mar. 24, 2025; accepted: Apr. 2025.

Corresponding author: D.-H. Lee, Department of Electronic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 710301, Taiwan.

壹、前言

在日常生活中，火災是一顆不定時的炸彈，它可能在任何時刻發生，給我們的家庭和財產帶來無法彌補的損失，根據中華民國內政部消防署歷年臺灣火災統計[1]（如圖1），近年台灣發生火災的次數仍居高不下，而大多都是因火災發生當下未能及早發現，或沒有適當的應急措施和防火系統，導致無法在火災初期將小火撲滅，進而讓災情擴大與惡化。因此，若能在火災發生的第一時間即時通報，火災感測系統將成為最佳的選擇。常見的火災警報器分為煙霧感測器及偵熱型感測器兩類，現今煙霧感測器在使用上受限於諸多因素，通常廚房會使用偵熱型感測器，當偵測到溫度高於50°C時將執行通報，火災發生到通報的過程反應時間較長；而現行煙霧感測器有三類型（如表1所示），主要用於客廳或臥室，優點是反應時間較短，但過多的水霧會造成煙霧感測器的誤報，導致使用者停用警報器，進而導致嚴重災害發生的可能性增加。煙霧感測器主要有5大全球標準[2]：美國和加拿大的UL 268與UL 217；歐洲的EN 14604與BS EN 54；國際的ISO 7240。UL 268和UL 217涵蓋美國和加拿大的相關法規，要求透過技術和演算法有效區分聚氨酯泡沫墊燃燒產生的指定煙霧濃度和漢堡包燃燒產生的指定煙霧濃度。表1對現行煙霧感測器進行了功能性的比較，為了準確區別煙霧的種類，具有多種波長光源之散射式感測技術將成為最佳選擇。



圖1 2017~2023年中華民國內政部消防署歷年火災統計

表1 現行煙霧感測器比較表

煙霧感測器類型	影像辨識型	傳統光電型	多波長散射型
外觀			
感測機制	視覺辨識	光線遮斷	光線散射
成本	最高(需要架設攝影機與影像辨識伺服器)	最低	稍高(需要多波長光源與散射遮罩)
能否符合最新標準	僅能辨別煙霧顏色	無法辨別煙霧種類	可以區分煙霧與水霧

綜上所述，本論文研發一利用光電感測技術的煙霧感測系統，並運用多種光波長光源來區分水霧和煙霧所反應出的不同光學特性，從而降低室內煙霧警報器的誤報率。當氣體進入感測器腔體時，透過接收光打在粒子上所反射回來的光能量，經過前端的類比處理來區分煙霧和水霧，同時結合環境光削減技術和帶通濾波器等濾光電路，進一步減少環境光對感測器的影響。目前智慧建築發展的趨勢是將煙霧感測器與其他控制系統，如疏散和緊急照明，進行整合。因此，本論文的研究目標是開發一種功耗更低、體積更小且精度更高的煙霧檢測系統。然而，傳統的光散射式煙霧檢測器容易受到室內光源的干擾，導致感測器光信號的訊號雜訊比（SNR）較低。為了解決這個問題，本論文採用帶通光學檢測器作為主要接收器，並引入混合調變光通訊傳輸技術來增強 SNR 並減少錯誤。

煙霧感測系統在全球擁有許多標準，歐洲採用 EN 標準，北美則採用 UL 標準，而國際間則使用 ISO 標準。在 2021 年 6 月，最新版本的 UL 268（第 7 版）和 UL 217（第 8 版）已經發佈，這些版本中新增了一項名為「漢堡煙霧干擾報警測試」的測試項目。在這項測試中，煙霧警報器必須能夠區分漢堡肉餅和易燃聚氯酯兩者所產生的不同煙霧濃度，這項測試有助於降低來自廚房的誤報率。隨著新標準的公布，預計會有更多的系統大廠投入進行感測元件與系統的開發工作。這些標準對於檢測不同煙霧的特性至關重要，必須滿足相關法規、減少誤報並提供精準的感測能力，以確保人們的居住安全。本論文針對室內環境光源干擾、限制感測靈敏度以及烹調蒸氣造成誤報之光電型煙霧感測應用進行考量，提出了一種基於混合式調變光通訊與具多波長帶通型光學檢測器陣列的煙霧感測系統。此系統具有低成本、低功耗和小體積的特點，提供煙霧感測應用高性價比且微型化的選擇。本論文的重要性，摘要如下：1. 利用不同光波長光源對煙霧粒子的散射特性，並結合多波長帶通型光檢測器，精準區別火災煙霧和烹調煙霧，從而有效降低系統的誤報率。2. 實現一個多層次削減室內環境光源干擾技術，並使用特別選用的帶通型光學檢測器，結合光通訊混合調變演算法，進一步提高訊號雜訊比。3. 實現微型煙霧感測系統，將元件製作微小化，並整合於置頂式煙霧感測器中。

貳、研究方法

本研究計畫的主要目標是開發一種基於混合式調變光通訊與多波長帶通型光學檢測器陣列實現之水霧與煙霧判別感測系統。其中，多波長帶通型光學檢測器是該系統中最主要的元件，為了應對室內光源強烈干擾和區分不同煙霧種類的挑戰，本論文提出了兩項核心技術。首先，我們提出了電路及元件層面的削減環境光源干擾技術，透過多波長帶通型光檢測器，過濾掉 470nm 與 940nm 波長以外的室內光雜訊，同時獲取 360nm 與 850nm 波長的室內光資訊，進一步消除 470nm 與 940nm 波長範圍內的室內光雜訊。其次，為了增加感測器的靈敏度，我們將使用特別選用的多波長帶通型光檢測器，並通過光通訊混合調變演算法技術進一步過濾剩餘的室內光雜訊，以增加訊號雜訊比並降低系統錯誤率。這些核心技術的引入將有效提升煙霧感測系統的性能。透過抗室內光雜訊的技術，我們能夠消除干擾，確保煙霧感測器的正常運作。而透過光通訊混合調變演算法的應用，我們將能夠提高感測器的靈敏度，使其能更準確地辨別不同煙霧種類，進而提高系統的整體效能。

一、感測原理

感測型煙霧警報系統中主要採用兩種煙霧感測技術，分別是離子式煙霧感測器（ionization smoke detector）與光電式煙霧感測器（photoelectric smoke detector）。在離子式煙霧感測器中，內部加入少量放射性材料，在兩個導電板之間進行離子化，使得電流流動，當煙霧進入腔室時，煙霧會減少電流流動，進而觸發警報。然而，由於電離式感測器無法保證精確偵測到火災的萌發初期，因此有些歐美國家禁止使用該類型感測器。光電式煙霧感測器則是使用光來檢測火災，感測器內部設置一個光感測腔室，通過光來偵測煙霧。光感測煙霧的方式可分為光遮斷式（light blocking）與光散射式（light scattering）兩種，在光遮斷式感測器中，當煙霧阻擋光的傳遞時，觸發警報，而在光散射式感測器中，煙霧會將 LED 光散射到光電感測器中，進而觸發警報。本論文改進上述兩種光感測方法，提出一反射式煙霧感測系統，原理如圖 2，此系統感測距離較短，需使用的能量相對較低，增加了煙霧感測器的使用壽命。

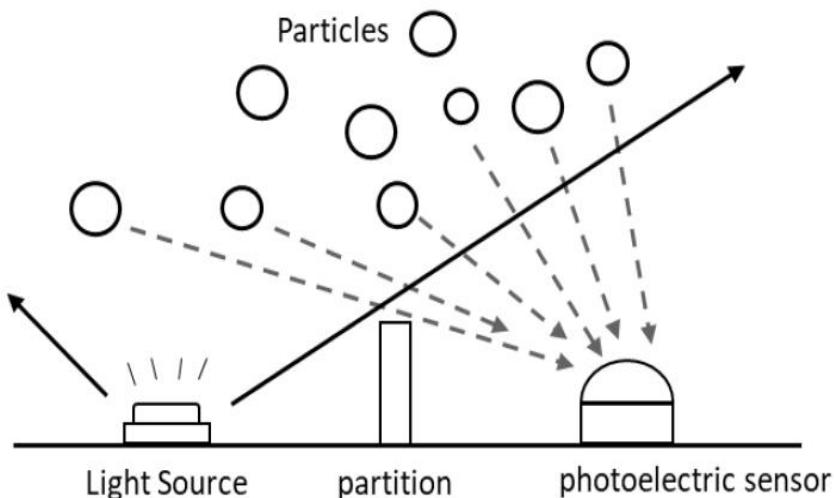


圖 2 反射式煙霧感測原理

二、電路及元件層面的削減環境光源干擾技術

本論文所選用 850nm 帶通型光檢測器之光響應頻譜如圖 3(a)所示(<https://www.hamamatsu.com/>)，其半高寬 (full width at half maximum, FWHM) 約為 100nm，相較 (如圖八(b)) 市售一般光檢測器的光響應半高寬 (約 400nm) 優異。這表示本論文選用的光檢測器對於發射光源與周圍環境光線有很高的選擇性，能夠更精準地選擇 850nm 的光，進而達到以元件層次增強訊號雜訊比的目的。

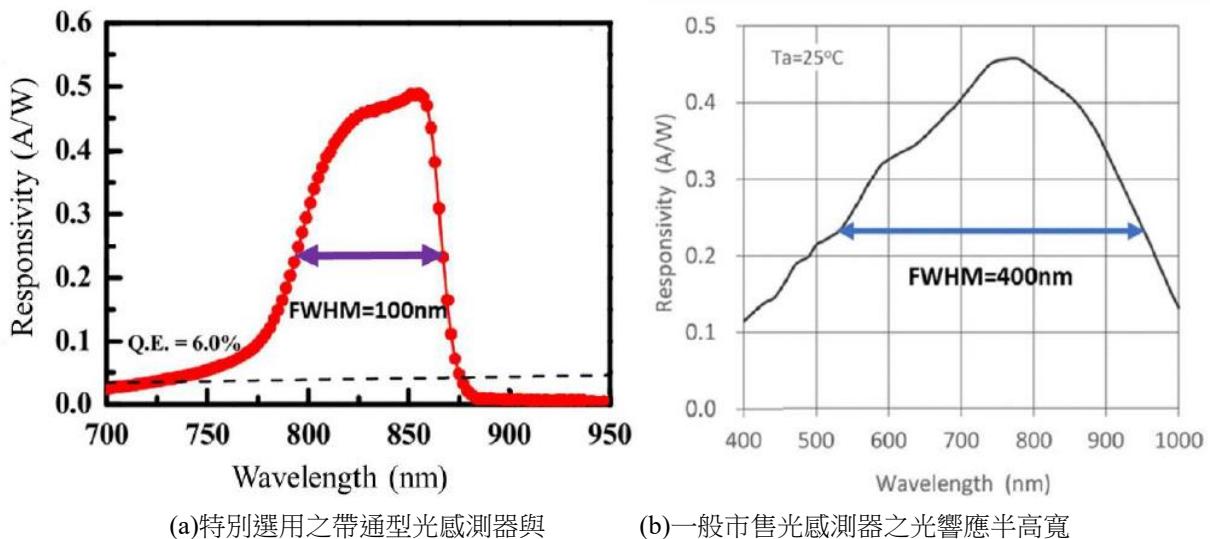


圖 3 光檢測器之光響應頻譜

本論文針對水霧進行光學輻射強度之量測實驗，測試結果如圖 4 所示。940nm 波長之光學輻射強度明顯低於其他波長，造成 940nm 波長有著與其他波長不同的散射特性，這也是多波長散射型煙霧感測器使用 940nm 波長的主要原因[3]。為了消除鄰近光波長背景的雜訊，我們搭配先前研究成果中開發的光波長為 360nm 與 850nm 的光感測元件。我們將 470nm 與 360nm 以及 940nm 與 850nm 的波長進行組合，以達到消除室內光雜訊的功能。如圖 5 所示，利用兩組類比式減法電路，我們額外取得 360nm 與 850nm 波長的室內光資訊，進一步消除 470nm 與 940nm 波長內的室內光雜訊。這樣的設計可以有效提升系統的準確性及抗干擾能力。

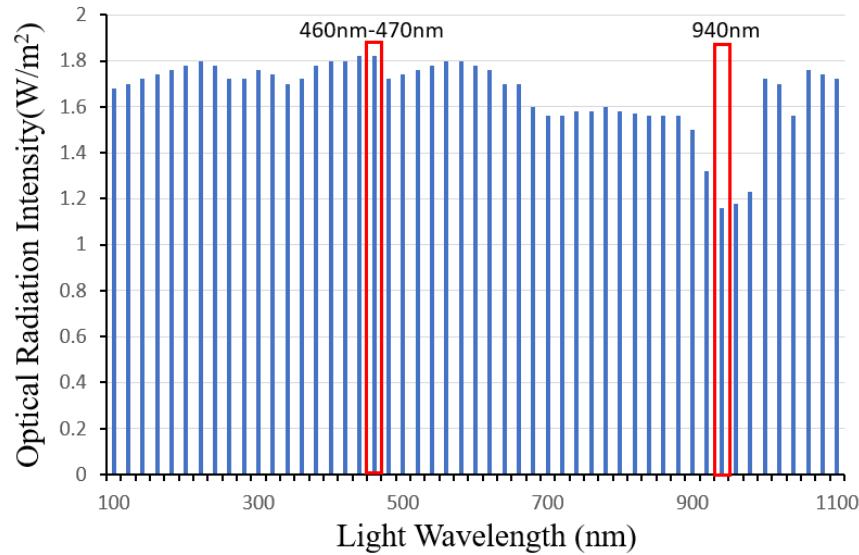


圖 4 不同光波長對水霧之光學輻射強度量測圖

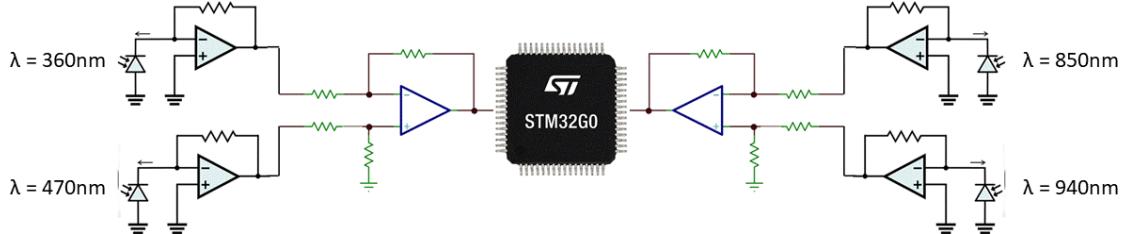


圖 5 類比式光雜訊削減電路圖

為了實現削減鄰近光波長雜訊之目標，我們必須考慮鄰近光波長之類比式減法電路的路徑不匹配問題，因為這會影響其消除室內環境光雜訊的能力。電路不匹配可以分為三個部分進行探討：偏移誤差（offset error）、增益誤差（gain error）和時滯誤差（skew error）[4–7]。假設待消除訊號為弦波訊號，以便進行訊號雜訊比的分析。

$$y_{470nm}(t) = G_1 \times \cos(2\pi f_0 t + \phi_1) + V_{os1} \quad (1)$$

$$y_{360nm}(t) = G_2 \times \cos(2\pi f_0 t + \phi_2) + V_{os2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{out}(t) &= y_{470nm}(t) - y_{360nm}(t) \\ &= [G_1 \times \cos(2\pi f_0 t + \phi_1) - G_2 \times \cos(2\pi f_0 t + \phi_2)] + (V_{os1} - V_{os2}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $V_{out}(t)$ 為類比式減法電路的輸出電壓， G 為電路路徑增益， Φ 為路徑相位差， V_{os} 為路徑偏移電壓。將 $V_{out}(t)$ 進行 DFT 運算後，可以分離出偏移誤差、增益誤差與時滯誤差能量，分別為 $E_{offset}[i]$ 、 $E_{gain}[i]$ 以及 $E_{skew}[i]$ 。

$$E_{offset}[i] = \sum_{k=1}^M a_k e^{-j(2\pi/M)i(k-1)}, i=0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

$$E_{gain}[i] = \sum_{k=1}^M g_k \cos(2\pi f_0 T_k[n] + \phi) e^{-j(2\pi/M)i(k-1)}, i=0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

$$E_{skew}[i] = \sum_{k=1}^M \phi_k e^{j\phi} e^{-j(2\pi/M)i(k-1)}, i=0, 1, \dots, M-1 \quad (6)$$

即可得到訊號雜訊比為

$$SNR = \frac{E_{signal}}{E_{offset} + E_{gain} + E_{skew}} \quad (7)$$

為了進一步增加系統之訊號雜訊比，本論文採用前景式校正技術（foreground calibration），在系統進行煙霧感測動作之前，會先針對 LED 沒有發送感測訊號時，透過可調式的電路路徑設計，將 V_{out} 誤差值降至最低，便可得到較高之訊號雜訊比。

三、混合調變演算法

為了提高頻譜使用效率和對抗光通訊在無線通道多路徑影響，正交分頻多工混合式調變技術在光通訊領域已被廣泛應用[8–12]。此混合式調變技術的核心在於使用不同形式的調變來處理奇數和偶數子載波，然後將它們的時域訊號相加傳送。目前已經有五種混合式調變形式，包括 HACOOFDM[8]、EHACO-OFDM[9]、ADO-OFDM[10]、LACO-OFDM[11]和 AAO-OFDM[12]。本論文使用 HACO-OFDM 系統作為光通訊調變技術，HACO-OFDM 將頻域訊號分成奇數子載波和偶數子載波兩個部分進行調變，奇數子載波訊號使用對稱剪裁直流偏壓正交分頻多工調變（ACO-OFDM），而偶數子載波則採用脈波振幅調變（PAM）技術。這兩路頻域訊號經過埃爾米特對稱編碼後，再使用 IFFT 轉換得到時域訊號。然後分別將時域訊號中振幅小於 0 的部分剪裁後相加起來進行傳送，HACO-OFDM 的傳送架構和接收架構分別如圖 6 和圖 7 所示。HACO-OFDM 接收機將奇數子載波上的 ACOOFDM 訊號解調完畢後再轉換到時域進行重建，接著將重建後的 ACO-OFDM 訊號與接收訊號扣除。接下來，我們將通過數學證明 HACO-OFDM 能夠提高訊號雜訊比並降低系統錯誤率。圖 6 顯示了經過埃爾米特對稱編碼後的複數調變訊號會分成奇數子載波 XACO 和偶數子載波 YPAM，其中奇數子載波和偶數子載波的第 k 個元素分別表示為：

$$X_{ACO}[k] = \begin{cases} X[k], & k = 1, 3, \dots, N/2 - 1 \\ X^*[N-k], & k = N/2 + 1, \dots, N - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$Y_{PAM}[k] = \begin{cases} Y[k], & k = 0, 2, \dots, N/2 - 2 \\ Y^*[N-k], & k = N/2 + 2, \dots, N - 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

上述訊號經過 IFFT 得到時域 ACO-OFDM 訊號 和時域 PAM-DMT 訊號 ，其中第 n 個元素表示如下：

$$x_{ACO}[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_{ACO}[k] \exp\left[\frac{j2\pi kn}{N}\right], 0 \leq n \leq N - 1 \quad (10)$$

$$y_{PAM}[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_{PAM}[k] \exp\left[\frac{j2\pi kn}{N}\right], 0 \leq n \leq N - 1 \quad (11)$$

方程式(10)和(11)會再經過零剪裁處理得到一個非零的實數訊號，表示如下：

$$x_{ACO}^+[n] = \begin{cases} x_{ACO}[n], & x_{ACO}[n] \geq 0 \\ 0, & x_{ACO}[n] < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$y_{PAM}^+[n] = \begin{cases} y_{PAM}[n], & y_{PAM}[n] \geq 0 \\ 0, & y_{PAM}[n] < 0 \end{cases} \quad (13)$$

方程式(13)與方程式(14)經過改寫後，最後剪裁訊號 $x_{ACO}^+[n]$ 和 $y_{PAM}^+[n]$ 相加後一起輸入到 LED 進行傳送。接收端透過光電二極體收到光訊號後再轉成電壓，經過一連串的濾波放大後得到的頻域訊號可表示如下：

$$\begin{aligned} R[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} r[n] \exp\left[\frac{-j2\pi kn}{N}\right] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} (x_{ACO}^+[n] + y_{PAM}^+[n] + w[n]) \exp\left[\frac{-j2\pi kn}{N}\right] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2} x_{ACO}[n] + \frac{1}{2} |x_{ACO}[n]| + \frac{1}{2} y_{PAM}[n] + \frac{1}{2} |y_{PAM}[n]| + w[n] \right) \exp\left[\frac{-j2\pi kn}{N}\right] \\ &= \frac{1}{2} X_{ACO}[k] + \frac{1}{2} I_{ACO}[k] + \frac{1}{2} Y_{PAM}[k] + \frac{1}{2} I_{PAM}[k] + W[k], \quad 0 \leq k \leq N - 1 \end{aligned} \quad (14)$$

由方程式(14)可以很清楚地看到 ACO-OFDM 剪裁雜訊會在接收端偶數子載波上造成干擾，其所造成 PAM-DMT 分支上的位元錯誤率可以表示為[11]：

$$\begin{aligned} B_{\text{PAM}} &= B_{\text{PAM}|\text{ACO},f} \cdot B_{\text{ACO},f} + B_{\text{PAM}|\text{ACO},d}(1 - B_{\text{ACO},f}) \\ &= B_{\text{PAM}|\text{ACO},d} + B_{\text{ACO},f}(B_{\text{PAM}|\text{ACO},f} - B_{\text{PAM}|\text{ACO},d}) \end{aligned} \quad (15)$$

因此 PAM-DMT 分支上的位元錯誤率可以近似為

$$B_{\text{PAM}} \approx B_{\text{PAM}|\text{ACO},d} = \frac{4(\sqrt{M_{\text{PAM}}}-1)}{\log_2(M_{\text{PAM}}) \cdot \sqrt{M_{\text{PAM}}}} Q\left(\sqrt{\frac{3 \cdot \text{SNR}(1-\rho)}{2(M_{\text{PAM}}-1)}}\right) \quad (16)$$

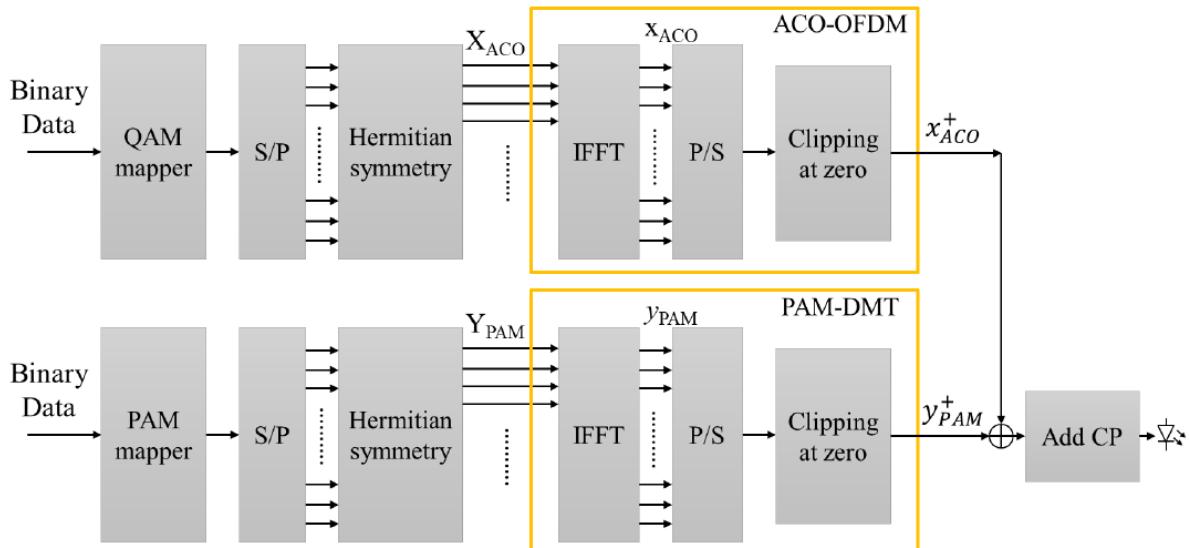


圖 6 HACO-OFDM 傳送端

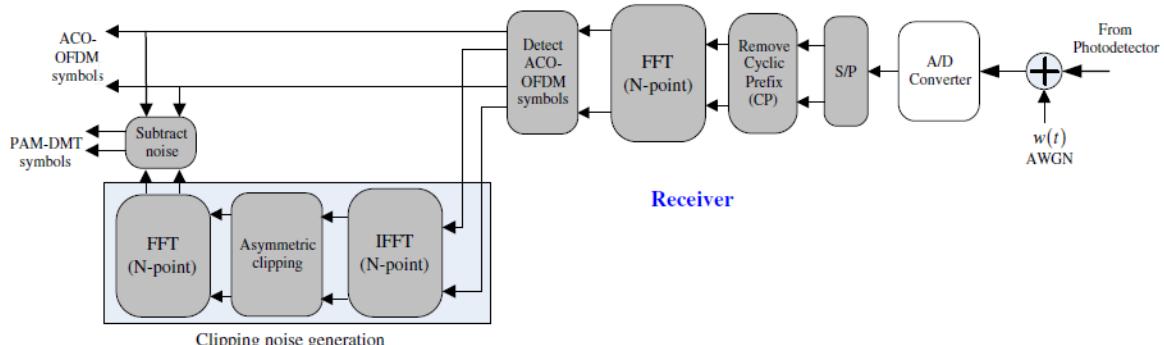


圖 7 HACO-OFDM 接收端

參、系統實作

光感測收發系統架構如圖 8 所示，包含前級放大、中級濾波，以及後級放大和整流等模塊。接收端的前級負責接收光電二極體的電流訊號，透過 TIA 將電流訊號轉換為電壓訊號，同時進行放大，以便後續濾波處理。在濾波方面，我們使用了四階巴特沃斯 (Butterworth) 帶通濾波器 (BPF)，它能夠濾除系統頻率以外的雜訊，同時保留系統所需的 10kHz 訊號。這樣的處理能有效地降低環境光對系統的影響。經過濾波後，微弱的訊號再透過後級放大器將其放大至微控制器 (MCU) 可讀取的電壓範圍內，並且經過整流電路將訊號轉換為直流訊號，方便使用 ARM 架構 STM32F030CC 內部的 12 位 ADC 進行讀取。

最後煙霧感測接收系統實作電路如下圖 9，其中尺寸為 50mm x 30mm，輸入電壓為 3.5~5.5V，工作電流 $\approx 30\text{mA}$ 。硬體完成後，在系統電路上進行量測，如圖 9 所示。測試過程在煙霧測試製具內進行（如圖 10 所示），發送端以 10kHz 的脈波訊號發送，接收端在前端類比訊號處理的第一級 Transimpedance Amplifier 中，得到了電流轉換後的脈波訊號。接著訊號經過第二級的 4th order Butterworth 濾波器，濾

除了系統設計頻率 10kHz 以外的訊號。然後，訊號通過第三級 Operational Amplifier 進一步放大至可用範圍，再經由第四級整流電路，將交流訊號轉換為穩定的直流訊號。最終以穩定的類比訊號進入 MCU，並透過 MCU 內部的 ADC 進行讀取。

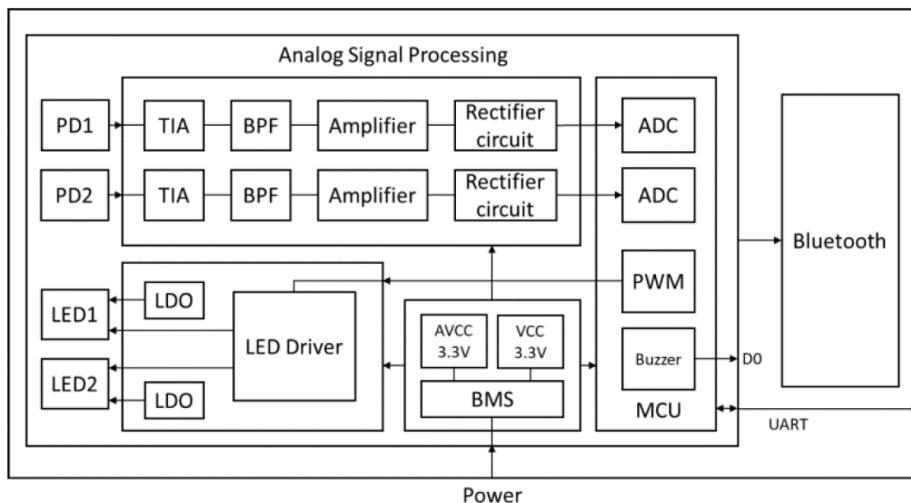


圖 8 煙霧感測系統架構圖

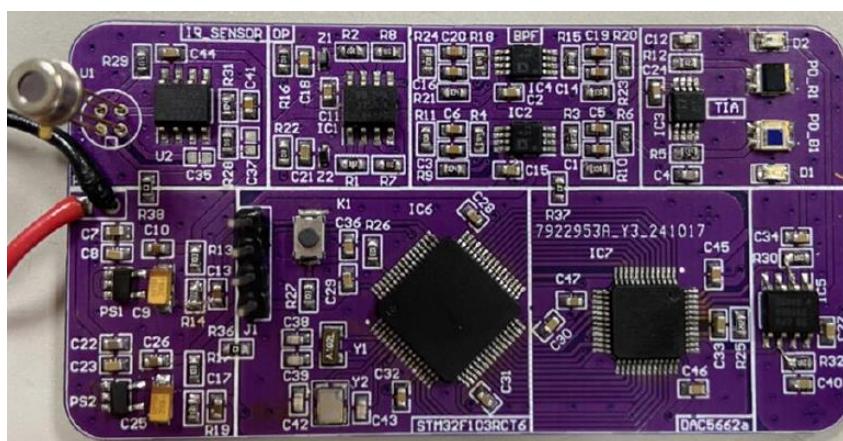


圖 9 煙霧感測器接收模組電路實現圖

測試環境如圖 10 所示，圖中紅色虛線為兩個獨立的測試環境，左邊使用加溫棒，使吸滿水分的紙巾蒸發，並產生蒸氣來模擬水霧測試環境，右邊則使用線香模擬煙霧測試環境。上方開孔則為預留將本論文所開發之 470nm 與 940nm 光波長之反射式煙霧感測器探頭伸入，以分別對煙霧及水霧進行測試。

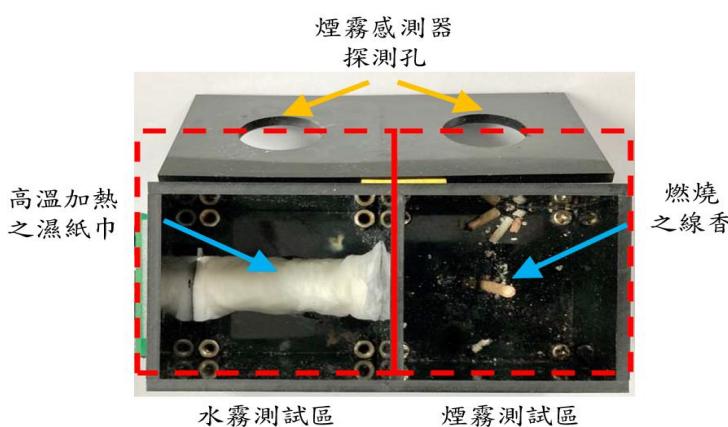


圖 10 測試環境圖

肆、量測結果

本論文使用 STM32F103RCT6 的 ADC 功能，其轉換結果會以數位形式存放於 RAM 中的指定位置，並透過 STM32CubeIDE 的 Debug 模式，使用 Variables 視窗直接監控該變數的數值，以獲得感測數據，並利用 Python 製作圖表來呈現最終感測結果。圖 11 顯示了水霧的感測結果，從圖中可觀察到，時間軸約在 95 秒時，470nm 和 940nm 兩種波長的光源均開始偵測到水霧的存在。其中，940nm 波長的散射光強度明顯高於 470nm，基於此特徵可有效判別水霧。另一方面，圖 12 顯示了煙霧的感測結果，可以看到在時間軸約 60 秒時，兩種波長的光源皆偵測到煙霧，但與水霧不同的是，470nm 波長的散射光強度高於 940nm，根據這一特徵可準確判別煙霧。

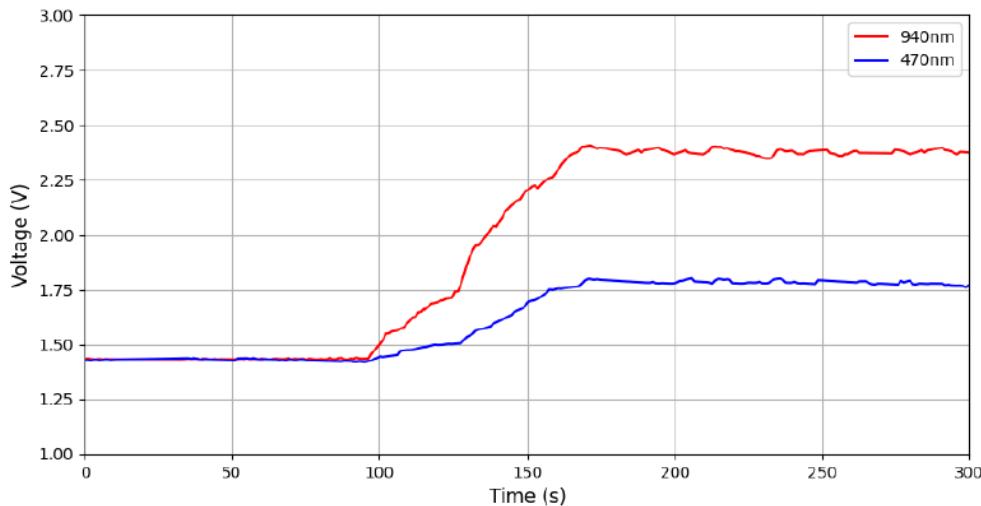


圖 11 水霧感測結果

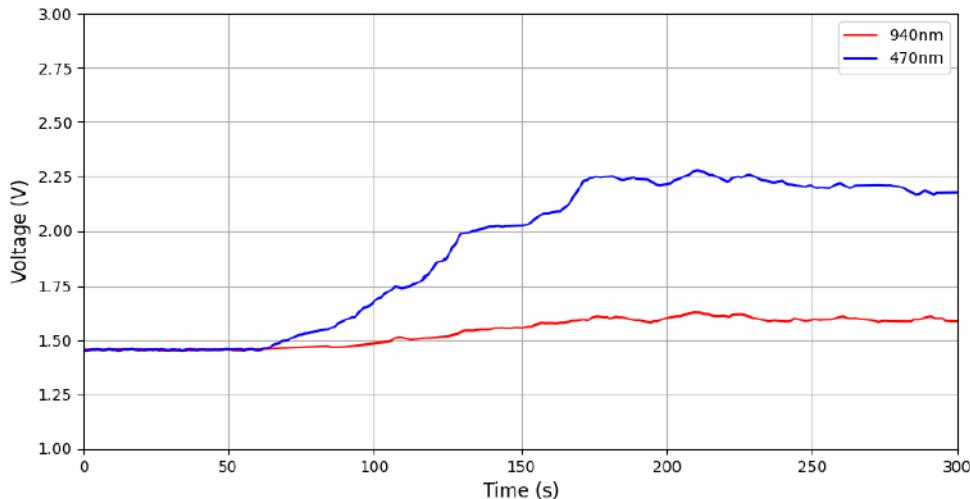


圖 12 煙霧感測結果

五、結論

反射式煙霧感測器系統目前能夠判別煙霧和水霧，透過不同光波長的光和環境光消減技術，能夠使煙霧感測更準確且不受環境光影響。本論文使用環境光消滅技術，能夠有效濾除光在特定波長下的雜訊，在前端類比電路上實現四階巴特沃斯帶通濾波器，電路佈局上使用獨立數位、類比電源設計以及去耦電容，而類比電路佈局以最短的路徑佈線，能夠將外部雜訊對系統的影響降低，發送端也設計了能應用於不同光波長的驅動，以恆壓恆流方式驅動使輸出光能量更穩定，最後在 MCU 的 ADC 讀取上加入了移動平均演算法讓訊號更加平滑，數位判斷上有更準確的結果，並以定義好的字串發送，透過 Python 人機介

面即時呈現感測的數位數值，以直觀的方式呈現。此系統降低了感測器的誤判機率，使誤判因素減少，應用於實務面也可有效地減少人員的傷亡。

參考文獻

- [1] 中華民國內政部消防署（2023）。中華民國內政部消防署全球資訊網，<https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php>
- [2] Grainne Murphy (2020/11)。建築物煙霧偵測技術：關於各種規範和認證。*COMPOTECHAsia 電子與電腦*, 55–58。https://www.compotechasia.com/uploads/technology/259/202011_adi_sensing.pdf
- [3] Jee, S.-W. (2015). Distinction of fire source from smoke using discrete probability distribution and neural networks. *Fire Technol.*, 51, 887–904.
- [4] Pereira, J.M.D., Girão, P.M.B.S., & Serra, A.M.C. (2004). An FFT-based method to evaluate and compensate gain and offset errors of interleaved ADC systems. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 53(2), 423–430.
- [5] Huang, S., & Levy, B.C. (2006). Adaptive blind calibration of timing offset and gain mismatch for two-channel timeinterleaved ADCs. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Reg. Papers*, 53(6), 1278–1288.
- [6] Schmidt, C.A., Cousseau, J.E., Figueroa, J.L., Reyes, B.T., & Hueda, M.R. (2016). Efficient estimation and correction of mismatch errors in time-interleaved ADCs. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 65(2), 243–254.
- [7] Tavares, Y.A., & Lee, M. (2021). A foreground calibration for m-channel time-interleaved analog-to-digital converters based on genetic algorithm. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Reg. Papers*, 68(4), 1444–1457.
- [8] Ranjha, B., & Kavehrad, M. (2014). Hybrid asymmetrically clipped OFDM-based IM/DD optical wireless system. *IEEE J. Opt. Commun. Netw.*, 6(4), 387–396.
- [9] Guan, R., Huang, N., Wang, H., Wang, J.Y., & Chen, M. (2016). Novel spectral efficient OFDM for optical wireless communication. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp.1–6). Kuala Lumpur, Malaysia. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7510824>
- [10] Dissanayake, S.D., & Armstrong, J. (2013). Comparison of ACO-OFDM, DCO- OFDM, and ADO-OFDM in IM/DD systems. *J. Lightw. Tech.*, 31(7), 1063–1072.
- [11] Wang, Q., Qian, C., Guo, X., Wang, Z., Cunningham, D.G., & White, I.H. (2015). Layered ACO-OFDM for intensity-modulated direct-detection optical wireless transmission. *Opti. Exp.*, 23(9), 12382–12393.
- [12] Bau, R., Wang, A., & Wang, Z. (2017). Asymmetrically clipped absolute value optical OFDM for intensity modulated direct detection systems. *J. Lightw. Technol.*, 35(17), 3680–3691.