

# 國立交通大學

光電工程學系碩士班

碩士論文

LED 照明系統應用在室內無線光通訊之研究

Studies of the Implementation of the LED Lighting for  
Indoor Optical Wireless Communications

1896  
研究生：賴致維

指導教授：賴暎杰 教授

中華民國一〇一年六月

# LED 照明系統應用在室內無線光通訊之研究

學生：賴致維

指導教授：賴映杰

國立交通大學光電工程學系碩士班

## 摘要

本篇論文中，我們提出了利用 Bias Tee 結合高頻訊號以及低頻的 AC 電源訊號，並將結合後的訊號供給 LED 作可見光通訊傳輸，將 AC 電源與可見光通訊系統做結合，並且達到 60Kbps 的 Data rate，以及  $10^{-9}$  的 Bit error rate。除此之外也將 TDD 的技術應用在雙向傳輸的可見光通訊系統上，讓 Cross Talk 的現象可以完全被消除，並且達到 1.4Mbps 的 Data Rate 以及  $10^{-6}$  的 Bit error rate。在本論文中，第一章會介紹可見光通訊的起源以及背後相關的元件及技術，然後提出與可見光通訊相關的應用，為可見光通訊此主題做一個概略的介紹。第二章則是會介紹可見光通訊光源，LED，的原理以及與可見光通訊之間的關聯，並且針對可見光通訊系統常會遇到的問題及其原理作詳細的描述。第三章的部分會針對我們希望解決的問題作相關文獻的回顧以及提出我們的實驗設計及模擬。而實驗結果與討論將會在第四章中完整的呈現並作探討。最後在第五章會為本論文作出一個總結論並且提出未來需要努力的研究目標及方向。

# Studies of the Implementation of the LED Lighting for Indoor Optical Wireless Communications

Student : Chih-Wei Lai

Advisor : Prof. Yin-Chieh Lai

Institute of Electro-Optical Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

In this paper, we used Bias Tee circuit to combine the high frequency signal and AC power signal and provided the resultant output to LED for visible light communication. The data rate reached 60Kbps and the bit error rate is about  $10^{-9}$ . Besides, we used TDD to eliminate Cross Talk effect. The data rate reached about 1.4Mbps in both directions and the bit error rate less than  $10^{-6}$ . In chapter one, we introduced the history and the applications of visible light communication. In chapter two, we introduced the principle of the light source, light emitting diode, used in visible light communication. And we discussed the detail of the problems we met when improving the VLC systems. . In chapter three, we reviewed some related paper and proposed our experiment design. The experiment result will be shown and discussed in chapter four. At last, a brief conclusion of this paper and future work is given in chapter five.

# 致謝

致謝對我來說毫無疑問的會是這篇論文中完美也是最動人心弦的句點，它象徵著在我研究的路上曾經幫助過我度過難關的大家，每當我想到研究所的這日子總是有那麼一群人在背後支持我、幫助我，著實令人感動，常常會讓我不自覺的紅了眼眶，久久不能自己。能夠完成這篇論文，首先我要感謝我的父母，他們無條件、辛苦工作培養我進入研究所就讀，如果沒有他們的支持，我想我的人生就不會這麼順遂了。再來我要感謝我的指導老師：賴暎杰老師、鄒志偉老師，這兩位老師在我研究涯中最不如意的時候接納了我，讓我的研究可以有一個嶄新的開始，也重新燃起我對於研究的熱忱，他們嚴謹卻又不受限的教學態度讓我能夠盡情的發揮我的實力及創意，充分的將研究融入於興趣之中，積極的完成每件該做的事。同時我也要感謝工研院葉建宏博士，在每次的 meeting 上給予大家許多寶貴的意見。還有我們這組的同儕，昱峯和博彥，如果沒有你們的指導與討論，我是沒有辦法在短時間內完成我的論文的，也謝謝你們陪我度過每個寫論文寂寞空虛的夜晚，我永遠不會忘記你們在我人生中的地位，沒有你們，就像鋼筆沒了墨水，再怎麼努力，都是寫不出經典的。最後，我也要謝謝實驗室的每位同學：凌岡、邵晟、彥希、峻宇、尹辰。感謝你們得陪伴，讓我的碩士生涯豐富許多，雖然如今就要別離，但是我會時時刻刻想著與你們同樂的時光。除了以上提及的各位，還有許多在我碩士生涯中幫助過我的人，族繁不及備載，但是請相信我，我是由衷的感謝你們，我實在很難用適當的詞彙來表達我感謝的心情，只能說，千言萬語，總歸一句謝謝，謝謝你們!!

# 目錄

|   |           |
|---|-----------|
| 摘要.....                                 | I         |
| ABSTRACT .....                          | II        |
| 致謝 .....                                | III       |
| 目錄 .....                                | IV        |
| 圖目錄.....                                | VI        |
| <b>第一章 緒論.....</b>                      | <b>1</b>  |
| 1.1 Visible Light Communication 簡介..... | 1         |
| 1.2 研究動機 .....                          | 7         |
| 1.3 論文架構 .....                          | 9         |
| <b>第二章.....</b>                         | <b>10</b> |
| 2.1 發光二極體介紹 .....                       | 10        |
| 2.1.1 發光二極體發光原理 .....                   | 10        |
| 2.1.2 LED 如何產生白光.....                   | 11        |
| 2.1.3 LED 的頻率響應.....                    | 14        |
| 2.1.4 LED 應用在 VLC.....                  | 18        |
| 2.2 通訊調變原理.....                         | 19        |
| 2.3 ACLED 原理.....                       | 25        |
| 2.4 Cross Talk 簡介.....                  | 30        |
| <b>第三章.....</b>                         | <b>32</b> |
| 3.1 AC-LED based VLC 系統.....            | 32        |
| 3.1.1 AC-LED based VLC 系統研究回顧.....      | 32        |
| 3.1.2 Bias Tee 原理.....                  | 39        |
| 3.1.3 AC-LED based VLC 系統實驗設計.....      | 41        |
| 3.1.4 AC-LED based VLC 系統實驗模擬.....      | 42        |
| 3.1.5 模擬結果.....                         | 46        |
| 3.2 室內雙向傳輸之 Cross Talk .....            | 52        |
| 3.2.1 文獻回顧.....                         | 53        |
| 3.2.2 TDD 簡介.....                       | 57        |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 3.2.3 雙向傳輸系統實驗設計 .....             | 58        |
| <b>第四章實驗結果與討論 .....</b>            | <b>61</b> |
| 4.1 AC-Power Based VLC System..... | 61        |
| 4.1.1 理論分析 .....                   | 61        |
| 4.1.2 Clock Recovery.....          | 63        |
| 4.1.3 接收到的 VLC 訊號.....             | 64        |
| 4.1.4 訊號分析 .....                   | 66        |
| 4.1.5 眼圖 .....                     | 67        |
| 4.2 TDD 機制應用在雙向 VLC 系統.....        | 69        |
| 4.2.1 上傳端訊號處理 .....                | 69        |
| 4.2.2 下載端訊號處理 .....                | 71        |
| 4.2.3 有無 TDD 機制的比較 .....           | 73        |
| <b>第五章總結與未來展望 .....</b>            | <b>75</b> |
| <b>參考文獻.....</b>                   | <b>78</b> |
| <b>著作列表.....</b>                   | <b>80</b> |



# 圖目錄

## 第一章

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 圖 1 - 1 古代烽火臺[1] .....             | 4 |
| 圖 1 - 2 醫院手術室[5] .....             | 5 |
| 圖 1 - 3 飛機機艙內的可見光通訊示意圖[6].....     | 5 |
| 圖 1 - 4 交通號誌與車輛之間的可見光通訊示意圖[7]..... | 6 |
| 圖 1 - 5 室內可見光通訊示意圖[7].....         | 6 |

## 第二章

|  |    |
|--|----|
| 圖 2 - 1 LED 發光原理示意圖，(A)未通電 (B)通電後 [13].....    | 11 |
| 圖 2 - 2 三色混光 LED 工作原理及發光頻譜示意圖 [14].....        | 12 |
| 圖 2 - 3 藍光晶粒激發螢光粉白光 LED 工作原理及發光頻譜示意圖 [14]..... | 13 |
| 圖 2 - 4 紫外光晶粒激發螢光粉白光 LED 工作原理及發光頻譜示意圖 [14].... | 13 |
| 圖 2 - 5 LED 數位調變示意圖 [15] .....                 | 15 |
| 圖 2 - 6 LED 類比調變示意圖 [15] .....                 | 15 |
| 圖 2 - 7 LED 頻率與輸出功率曲線 [16].....                | 17 |
| 圖 2 - 8 白光 LED 中來光與白光頻率響應比較圖 [8].....          | 19 |
| 圖 2 - 9 通訊系統架構圖.....                           | 20 |
| 圖 2 - 10 三種類比調變格式示意圖 [16].....                 | 21 |
| 圖 2 - 11 脈波調變示意圖 [16].....                     | 22 |
| 圖 2 - 12 三種數位調變格式示意圖 [16].....                 | 24 |
| 圖 2 - 13 LED 串列設計圖 [17] .....                  | 26 |
| 圖 2 - 14 LED 串列設計圖 2 [17].....                 | 27 |
| 圖 2 - 15 AC LED 串列設計圖 [17].....                | 27 |
| 圖 2 - 16 橋式 AC-LED 設計示意圖 [18].....             | 28 |
| 圖 2 - 17 商業化 AC-LED 設計示意圖 [19].....            | 29 |
| 圖 2 - 18 工研院設計生產之 AC-LED .....                 | 29 |

## 第三章

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 圖 3 - 1 AC-LED 智慧照明系統架構示意圖 [21]..... | 33 |
|--------------------------------------|----|

|   |    |
|---|----|
| 圖 3 - 2 A 和 B 兩個字母在 TRUE FORMAT 下傳輸的波形 [21].....                                      | 34 |
| 圖 3 - 3 放大後 A 字母在 TRUE FORMAT 下傳輸的波形 [21].....  | 35 |
| 圖 3 - 4 W 和 O 兩個字母在 TRUE FORMAT 下與 AC 訊號結合後的波形 [21].....                              | 35 |
| 圖 3 - 5 W 和 O 兩個字母在 TRUE FORMAT 下傳輸的波形 [21].....                                      | 36 |
| 圖 3 - 6 TDM 機制數據傳輸示意圖 [22].....   | 37 |
| 圖 3 - 7 傳輸之原始訊號與已和 AC 訊號結合之傳輸訊號 [22].....   | 38 |
| 圖 3 - 8 經解調過後解出之原始傳輸訊號 [22].....  | 38 |
| 圖 3 - 9 BIAS TEE 結構示意圖 .....  | 40 |
| 圖 3 - 10 AC-LED BASED VLC 系統實驗架構圖.....  | 41 |
| 圖 3 - 11 經過調變的高頻隨機訊號 .....  | 46 |
| 圖 3 - 12 放大後經過調變的高頻隨機訊號 .....   | 47 |
| 圖 3 - 13 60Hz 的 AC 交流電源訊號 .....   | 47 |
| 圖 3 - 14 嵌有高頻隨機訊號的 AC 交流電源訊號 .....  | 48 |
| 圖 3 - 15 放大後嵌有高頻隨機訊號的 AC 交流電源訊號 .....   | 49 |
| 圖 3 - 16 嵌有高頻隨機訊號與未嵌有高頻隨機訊號之 AC 電源訊號比較圖 ..  | 49 |
| 圖 3 - 17 LED 實際發出的訊號圖.....  | 50 |
| 圖 3 - 18 大後的 LED 實際發出的訊號圖 .....   | 50 |
| 圖 3 - 19 解調後的光訊號 .....  | 51 |
| 圖 3 - 20 放大後之解調後的光訊號 .....  | 51 |
| 圖 3 - 21 解調後之光訊號的眼圖 .....   | 52 |
| 圖 3 - 22 LED 室內無線通訊系統實驗架構示意圖.....   | 54 |
| 圖 3 - 23 LED 室內無線通訊系統電路架構示意圖.....   | 54 |
| 圖 3 - 24 LED 雙向傳輸電路架構示意圖.....   | 55 |
| 圖 3 - 25 CROSS TALK 現象。(A)加裝反光鏡時產生 CROSS TALK 的現象 (B)未裝反光<br>鏡時無 CROSS TALK 的現象 ..... | 56 |
| 圖 3 - 26 (A) TRANSCEIVER 之燈具設計 (B)使用黑色膠帶阻隔 LED 之反射光進入光<br>感測器.....                    | 56 |
| 圖 3 - 27 輸向傳輸 TDD-VLC 系統實驗架構示意圖 .....   | 58 |
| 第四章   |    |
| 圖 4 - 1 BIAS TEE 輸出端的訊號頻譜 .....   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 4 - 2 CLOCK RECOVERY 機制示意圖 .....                               | 64 |
| 圖 4 - 3 嵌有高頻訊號的 AC 訊號圖 (A)BURST CYCLE = 1 (B) BURST CYCLE = 2 .. | 65 |
| 圖 4 - 4 訊號分析階段圖 .....  | 67 |
| 圖 4 - 5 AC-LED BASED VLC 系統訊號眼圖.....                             | 68 |
| 圖 4 - 6 未加反射鏡時，R2 位置光感測器接收到之訊號.....                              | 70 |
| 圖 4 - 7 加反射鏡時，R2 位置光感測器接收到之訊號.....                               | 71 |
| 圖 4 - 8 未加反射鏡時，R1 位置光感測器接收到之訊號.....                              | 72 |
| 圖 4 - 9 加反射鏡時，R1 位置光感測器接收到之訊號.....                               | 73 |
| 圖 4 - 10 有無 TDD 機制眼圖比較圖 (A)有使用 TDD 機制 (B)沒有使用 TDD 機制<br>.....    | 74 |



# 第一章 緒論

## 1.1 Visible Light Communication 簡介

現今為世人熟知的 LED 全名為 Light Emitting Diode，中文名稱為發光二極體，是一種由半導體材料製成的固態發光元件。LED 的起源可回溯至西元 1907 年，H. J. Round 在電子世界期刊中提到他發現了 SiC 的微晶結構能夠在 10V 的偏壓下，在陰極部位產生微弱的橘色光及綠色光，這是人類科技史上第一個有關固態發光材料的文章被提出，從此以後便開啟了 LED 產業的蓬勃發展，許多相關的研究不停的被提出。

到了 1962 年 Holonyak 和 Bevacqua 提出了第一顆商業用的 LED，是一個由 GaAsP 製成的 LED，可以在通電的情況下發出紅色的可見光。該 LED 不但製成簡單，且成本不高，因此大家很快的注意到也許 LED 可以使用在照明或信號上。然而，當時的 LED 因為材料晶格不匹配造成的種種缺陷，導致發光效率不高，大約只有 0.11m/W，一直到 1969 年，Nuese 才提出利用緩衝層的概念提昇其發光效率。而 LED 的發光原理一直要到 1970 年代才被清楚的解釋，往後我們也會針對 LED 的發光原理作詳盡的探討。

LED 除了可以產生可見光，也可以產生不可見光，如紫外光、紅外光……等，在不可見光的應用上主要有兩種：短波長紅外光的應用以及長波長紅外光的應用。短波長的紅外光 LED 已經廣泛的應用在遙控器、感測器以及無線通訊(IrDA 模

組)……等上面；而長波長紅外光 LED 則是可以應用在短距離的光纖通訊中，作為光源使用。不過 LED 目前較主流及前瞻的應用還是集中在可見光 LED 的應用。而講到可見光就必須提到光的三原色：R(紅色)、G(綠色)、B(藍色)。紅光 LED 最早就是由先前提到的 Holonyak 發明的，也是人類史上第一顆的 LED，因此 Holonyak 又被世人稱為 LED 之父。之後以 AlInGaP 為材料的綠光 LED 也相繼被提出，不過藍光 LED 則是要到 1992 年才被日本 Nichia 公司(日本日亞化學公司)的 Shuji Nakamura 提出，由於藍光 LED 的發明，使的白光 LED 可以被製造出來，這也才讓 LED 應用在照明系統上有了重大的突破。因為在早期藍光 LED 尚未問世之前，只有紅光及綠光 LED 的話，LED 僅能提供特定顏色的照明，所以一般只用在信號燈或是指示燈上，對於正常白光的照明並沒有太多的貢獻，到了藍光 LED 被發明後，LED 才真正能夠提供完整的照明應用，照明的顏色也含蓋了三原色，因此可以提供完整的色彩供使用者選擇。

LED 現今被認為是下一代、第四代的照明產業，因為 LED 是以半導體作為發光材料的發光元件，發光原理為半導體內的電子電洞對互相複合激發出光子，因此並不像是早期的鎢絲燈一樣，需要通電使鎢絲發光發熱，因此不會有發熱、易燃……等缺點，也不會像是日光燈管一樣需要灌入汞蒸汽，所以污染較小，而因為體積小，所以可以輕鬆排列出任何想要的形狀，在光源的設計上更具彈性。總結看來，以 LED 為材料的第四代固態照明有以下優點：熱度低、較省電、壽命較長、體積小而較容易做光源設計、響應快、抗震動性高與較環保。因此，LED 已經被廣泛的應用在室內照明、背光光源、各種指示燈、汽車頭燈與尾燈……等應用上。

而因為 LED 除了可以提供一般的照明應用外，與傳統的鎢絲燈或日光燈相比，還具備了較快的響應速度，從未通電的暗態到通電後達一定亮度的亮態大約只需要  $0.27 \mu\text{s}$  (以 Bandwidth 為 1.28Mb 計算)，因此很快的就有人想到：是否 LED 可以同時應用在照明與通訊上呢？於是 LED 為光源的可見光訊號傳輸系統 (Visible Light Communication, VLC) 的相關研究就此展開。

其實 VLC 的歷史可以回溯到好幾千年以前，中國古代即在戰略要道上建造烽火台，如圖(1-1)所示，一旦發現敵人來襲，即將烽火台點火，燒出顯目的狼煙，告知在後方的友軍請求支援。因為後方的軍隊是看到狼煙升起，才接收到敵軍來襲的訊號，因此古代的烽火其實就算是 VLC 的一種，不但有效的提醒後方軍隊敵軍的訊息，也衍生出許多歷史典故如周幽王之烽火戲諸侯……等。除此之外，古代在戰鬥時，因人數眾多、場面混亂，所以戰場上也常會使用 VLC 來對部隊下達指令。一般白天作戰時多用旌旗，以各式不同圖案的大面旗幟來告訴遠方部隊需採取何種行動，到了夜晚，則常用火光，用不同的火舞發號司令。在孫子兵法軍政篇即提到：夜戰多火鼓、晝戰多旌旗。可見早在孫子時代，VLC 就已經廣泛使用在戰場上。到了近代摩斯電碼發明後，許多交通工具間的通訊，例如船隻、飛機……等，當沒有無線通訊設備時，也會使用可以瞬間開關的信號燈打出一連串的摩斯密碼來跟遠處的對方溝通。由以上例子我們可以充分體會到 VLC 從遠古時期就已經在人類生活上佔有很重要的一席之地了。但是若是使用 LED 來當做 VLC 的光源，不但可以傳輸訊號，也可以同時達到照明的效果，這在人類科技使上是前所未見的，因此近幾年 VLC 相關的研究大行其道，不但美國開始資助智慧照明的計畫，希望將無線通訊的技術內嵌在照明系統中，許多研究團隊也紛紛提出有關於 VLC 的研究。[2][3][4]



圖 1 - 1 古代烽火臺[1]

至於將無線通訊系統與照明系統結合有什麼優點呢？因為 VLC 是藉由可見光來做傳輸，並非像傳統無線電靠電磁波來傳輸，因此對其他電子儀器不會造成干擾，也不會對人體產生危害，所以 VLC 可以安全的被使用在像是醫院手術室、飛機機艙……等禁止電磁波干擾的場所，如圖(1-2)及(1-3)所示。而因為 VLC 的訊號源不是電磁波，所以只有在可見光照射到的範圍內才能放置接收器接收到訊號，不像電磁波通訊會很容易的被他人竊取電磁波訊號。因此 VLC 在安全及隱私的方面有較佳的表現。除此之外，VLC 可以取代人眼判別的能力而應用在汽車之間的通訊系統上，如圖(1-4)所示，如果紅綠燈與車燈都是由 LED 構成的且內建 VLC 系統的話，紅綠燈亮起紅燈時可發出訊號，讓接收到 VLC 訊號的車子自動煞車，而煞車時亮起的車尾燈也可以透過 VLC 將停止訊號傳給跟在後方的車輛，使一定距離內跟在後方的車輛也會自動煞車，這是一項自動且快速的 Auto breaking 裝置，可以有效降低車禍發生的機率。不但交通工具之間可以互相利用 VLC 做訊號傳輸，未來，在室內空間也可以在照明的同時提供訊號傳輸，如圖(1-5)，這不僅是一種新的無線傳輸技術，也可以為人類生活帶來許多便利性及安全性的提升。



圖 1 - 2 醫院手術室[5]



圖 1 - 3 飛機機艙內的可見光通訊示意圖[6]

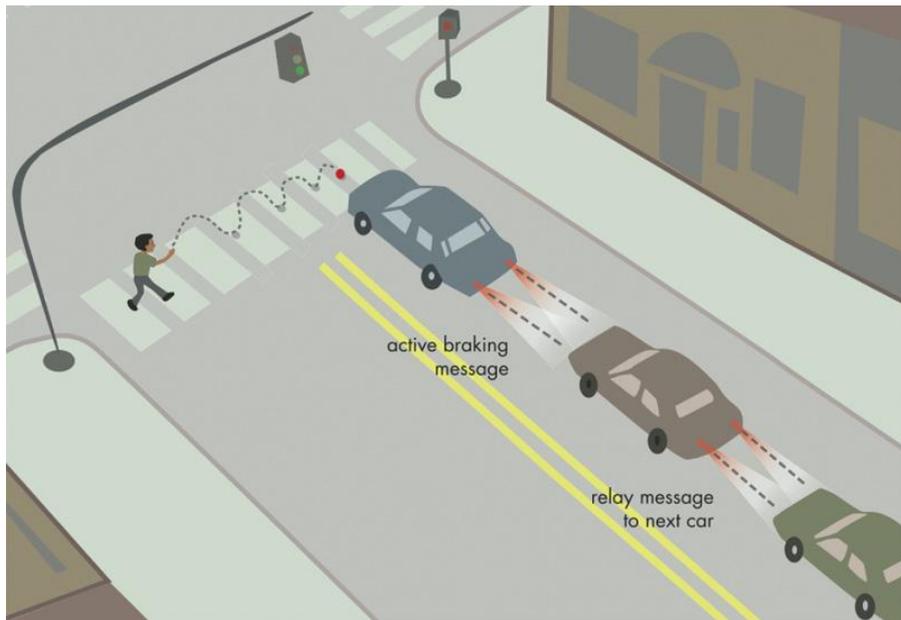


圖 1 - 4 交通號誌與車輛之間的可見光通訊示意圖[7]

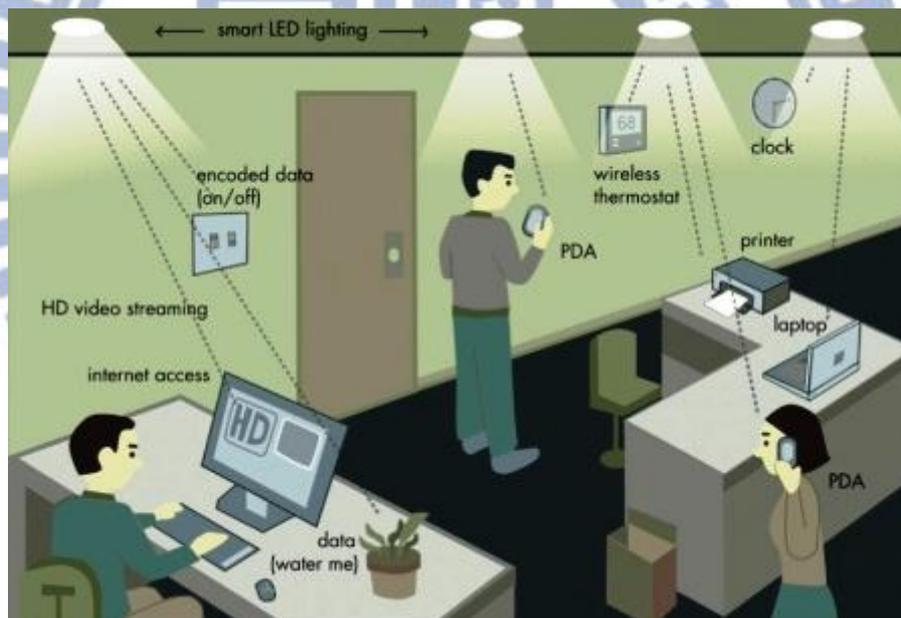


圖 1 - 5 室內可見光通訊示意圖[7]

## 1.2 研究動機

儘管 VLC 相較於其他的訊號傳輸方式有許多的優點，但是目前還尚未能夠商品化，因為實際使用起來仍然存在著許多問題需要被解決，例如：傳輸距離不夠長、傳輸速度受到限制、LED 本身發光條件的限制、與照明結合時產生的一些相關問題……等，都是急需被解決的議題。而國內外的許多研究團隊也根據這些問題提出了一些解決的方式：像是針對藍光光譜使用 equalization 技術讓白光 VLC 傳輸速度加快至 80Mbps[8]、利用 Predistorted OFDM 的方式來改善 LED 本身的非線性問題，用以降低 VLC 傳輸訊號的 Bit Error Rate (BER)[9]、藉由改變室內照明用 LED 擺放的位置減低在室內不同位置因為照明強度不同所產生的訊號強度不均勻性[10]、以及本實驗室提出的使用 Pre-distorted signal 和 RC-equalization 的方式將 VLC 的傳輸速度增快至 10Mb/s 及使用 Pre-compensation 的機制去提升 VLC 的傳輸速度[11][12]……等研究成果，讓以 LED 為光源的 VLC 在傳輸的效率與實用性可以大幅的提升。

而除了上述提到的一些 VLC 有待改良的點外，VLC 在室內與照明結合的應用上一直沒有辦法普及化的主要原因還有包含以下兩個：

### a. VLC 驅動電流的形式

因為 VLC 所使用的光源為 LED，而 LED 一般是屬於使用直流電方能驅動的電子發光材料，需提供特定方向的直流偏壓 LED 才能發亮，然而一般家用的 110V 或是 220V 的插座所提供的電源皆是交流電，因此若希望使用 LED 來照明，勢必需要先將插座提供的交流電轉為直流電方可供給 LED 使用，也才能進而使用 VLC

系統傳輸訊號，否則只能使用一半的能量。而將交流電轉為直流電時需使用 AC to DC Converter 來進行轉換，在轉換的過程中會浪費許多能量，因此如何將近年來才發展出來的 AC-LED 放入 VLC 的機構中，達成直接可以使用一般交流電源來驅動 AC-LED 使 VLC 系統成功傳輸訊號而不需經過 AC to DC converter 就成為了一項重要的課題。

#### b. 雙向傳輸時 Cross Talk 的問題

一般商業或是家用的訊號傳輸系統，通常是雙向的，因為使用者不但會下載訊號，也常會將自己的資料上傳，因此整個通訊系統必須是雙向的。然後在一個雙向系統中，某個接收器除了會接收到對方端點發射器傳來的訊號，也有可能因為牆壁或其他物體的反射，而接收到自己端點發射器所發出的訊號，如此一來本來應該接收到的訊號就會被其他的訊號干擾，產生 Cross Talk 的效應，導致訊號品質降低，BER 提高。因此如何在雙向傳輸的通訊系統中解決或降低 Cross Talk 的效應也是一個值得研究的問題。

而本論文在往後的章節，將會針對這兩個問題提出解決的方式，並且設計一系列的實驗來證實我們提出的設計是可以有效的改善或解決這兩個問題帶來的負面影響。

### 1.3 論文架構

在本論文中，我們會提出一個新的電路設計架構，將 AC 交流電源與訊號結合，提供給 LED 使用，達到直接利用 AC 交流電源來做 VLC 訊號的傳輸，並且針對訊號傳輸的方式做設計，達到在雙向傳輸時 cross talk 的影響可以降低。而本篇論文有以下章節，大綱分別敘述如下：

第一章：介紹 LED 的歷史及演進，敘述其優點及應用，同時帶出 LED 應用在 VLC 上的相關細節並分析其優缺點，詳述本論文中實驗的研究動機。

第二章：針對 LED 的運作原理及 AC-LED 的設計及製成做詳細的介紹，同時介紹 VLC 訊號傳輸相關的理論如：訊號調變、電路設計、Cross Talk... 等。

第三章：在此章節中會針對之前其他團隊所做的 AC-LED 的 VLC 系統及與 cross talk 相關的研究做一個回顧，並且點出之前研究所欠缺的東西，同時提出我們實驗的設計，將所有實驗的設備、實驗架構、實驗的操作程序以及相關的電路設計與運作做一個完整的介紹，並將我們的實驗設計做電腦模擬，分析模擬的結果。

第四章：將所有的實驗結果呈現並作分析，對於實驗結果做討論。

第五章：給出整篇論文的總結與未來展望。

## 第二章

### 2.1 發光二極體介紹

發光二極體是藉由電子、電洞對的結合激發出光子而發光的，因此相較於鎢絲燈及日光燈來說，整體發光的過程非常快速，一般來說可以在通電後  $0.27\mu\text{s}$  內發出光線，比傳統的鎢絲燈或日光燈都要來的快速許多，因此可以瞬間開關的功能就被應用在可見光訊號傳輸系統上，藉由 LED 產生亮度的差異傳輸出數位訊號。在本節中將會針對發光二極體的一些基本原理及相關應用作探討，讓大家理解 LED 在 VLC 系統中扮演什麼樣的角色，以及它會對整個系統產生哪些影響。

#### 2.1.1 發光二極體發光原理

發光二極體基本上是由一對 pn 接面的二極體所構成的，如圖(2-1. a)所示，以一個 pn+接面的發光二極體為例，電子電洞一開始在沒有外加電壓情況下是分別分佈在 n 側和 p 側，中間有一個空乏區是沒有電子和電洞的，而 n 側的  $E_c$  和 p 側的  $E_c$  的能量差就是該二極體的能障  $eV_0$ ，其中  $V_0$  是內建電壓。當我們外加一個順向偏壓  $V$  時，如圖(2-1. b)所示，會使得能障降低為  $V_0 - V$ ，如果偏壓高達一定的臨界電壓時，電子與電洞就可以克服能障，進入空乏區，互相結合然後發出與該二極體能隙大小相當的光子，其光子能量為  $h\nu = E_g$ 。簡言之，只要給定一個高於臨界電壓的順向偏壓於該發光二極體，其中的電子與電洞將會因能障降低而互相結合並激發出光子發光。

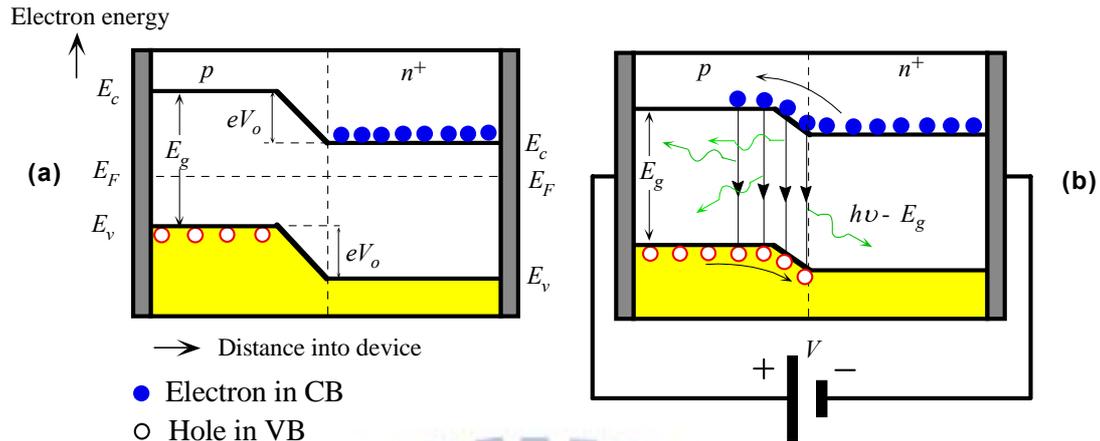


圖 2 - 1 LED 發光原理示意圖，(a)未通電 (b)通電後 [13]

如果使用不同的材料來製作發光二極體，將可以改變發出光線的波長，除了可以發出波長介於 400-780nm 的可見光以外，例如 470nm 的藍光、530nm 的綠光、570nm 的黃光及 630nm 的紅光……等，也可以發出紫外光或紅外光等不可見光。而其中又以藍光 LED 與綠光 LED 的價格較為偏高，因為藍光 LED 與綠光 LED 在磊晶時需將特殊金屬長在藍寶石的基板上，因此在生產時成本會較高。

### 2.1.2 LED 如何產生白光

為了提供照明使用，LED 需要產生白光，而讓 LED 產生白光的方式主要有三種，分別為三色混光 LED (Mixed-Color LED)、藍光晶粒激發螢光粉、紫外光晶粒激發螢光粉，分別詳細敘述如下：

#### a. 三色混光 LED

三色混光 LED 主要是將紅光 LED、綠光 LED 及藍光 LED，三種不同顏色的 LED 只做在一起，利用光學設計的方式，使的三種 LED 打出來的光可以打在同樣的範圍上，混合在一起產生白光，如圖(2-2)所示，此種白光 LED 的顏色飽和度最高，

並且可以透過驅動方式改變裡面每顆 LED 的亮度，進而產生出各式不同的顏色，可變性較佳。但是因為三種不同顏色的 LED 需要個別驅動，並且需要將三種不同顏色的 LED 亮度都維持相同才能產生穩定的白光，所以在驅動與控制端的電路設計會較為複雜，且成本較高，而且因為同時使用三顆 LED，所以體積較大。不過目前也已經開發出將三顆 LED 的晶粒封裝在一起的多晶粒 LED(Multi-chip LED)來縮小體積。

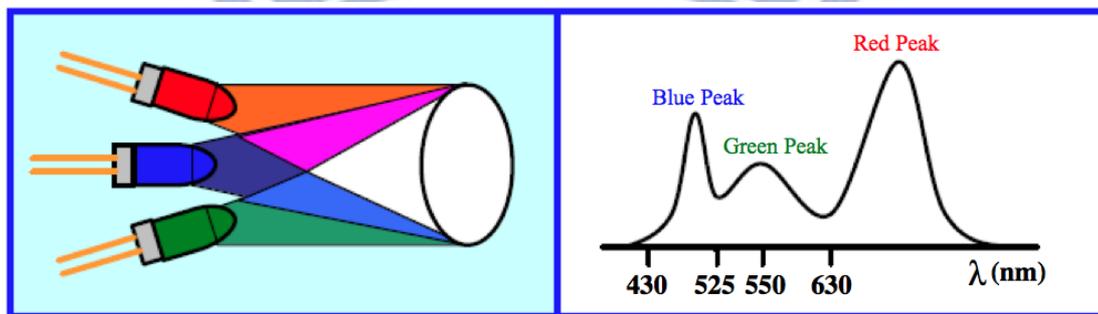


圖 2 - 2 三色混光 LED 工作原理及發光頻譜示意圖 [14]

#### b. 藍光晶粒激發螢光粉

用藍光晶粒激發螢光粉產生白光的方式，是目前商用白光 LED 的主流方式，主要的原理是利用藍光 LED 發出藍光去激發燈具上的黃光螢光粉產生黃光後，經由光學設計跟原本的藍光混合在一起後產生白光，如圖(2-3)所示。此種產生白光的方式因為只需要使用一顆 LED，驅動電路設計較簡單，所以成本較低，這也是成為商業使用主流的主要原因。不過因為是由黃光跟藍光組合成白光，因此光譜主要是分佈在黃光或藍光的波段，因此色彩表現較差，常常會出現偏藍或偏黃的色偏。

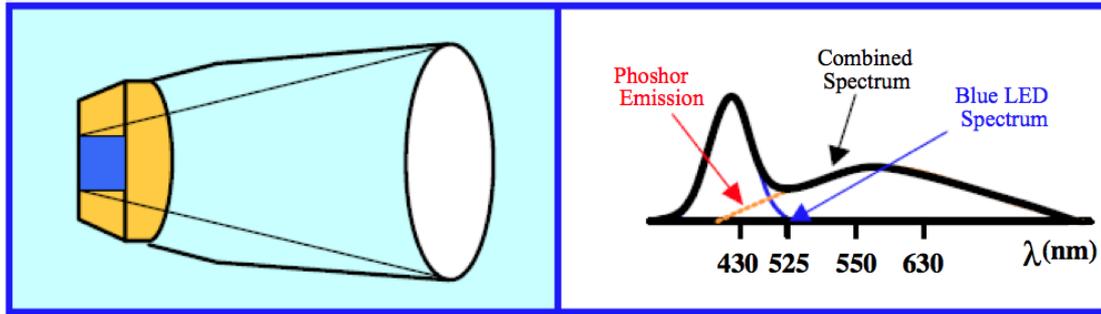


圖 2 - 3 藍光晶粒激發螢光粉白光 LED 工作原理及發光頻譜示意圖 [14]

c. 紫外光晶粒激發螢光粉

紫外光晶粒激發螢光粉是由單一顆紫外光 LED 晶粒發出紫外光激發燈具上的三原色螢光粉後產生三原色混合成白光，如圖(2-4)所示。因為該種方式產生的白光是由三原色構成的，因此顏色正確、飽和度佳，而且只需要驅動單一顆 LED，所以驅動電源的設計簡單，成本也很低。只是因為使用的是紫外光的 LED 晶粒，長久使用下來，紫外光會造成 LED 的封裝材料—環氧樹脂產生劣化影響光輸出。而且因為三原色螢光粉中每種顏色的光衰減特性不同，因此長期使用後可能會出現不同顏色的輸出亮度有差異造成色偏。

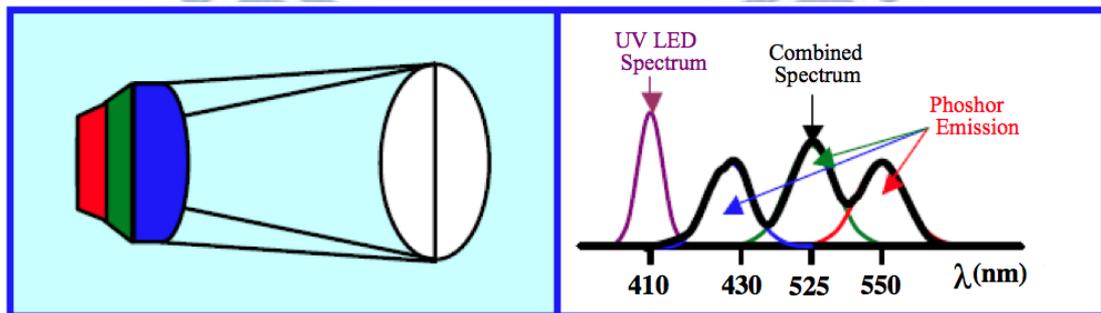


圖 2 - 4 紫外光晶粒激發螢光粉白光 LED 工作原理及發光頻譜示意圖 [14]

### 2.1.3 LED 的頻率響應

LED 應用在光纖通訊或是 VLC 系統中，通常傳輸距離不長，主要是應用在短距離的網路系統(Local Area - Network)之中，長度大約是數公尺到 5 公里之內，如果是在室內用 VLC 系統的話距離可能更短。因此 LED 的亮度並不會是主要的考量，反而是傳輸的速率才是主要的考量，一般短距離通訊傳輸速率可由數十 Mbps 致數百 Mbps 不等。而以 LED 作為光源的傳輸系統其傳輸的速率跟 LED 的調變有很大的關係。LED 的調變主要可以分成兩種：數位調變及類比調變。

數位調變的過程如圖(2-5)所示，他是由一個單一的電源去驅動 LED，該單一電源只會控制 LED 的明暗，輸入的訊號只有開和關兩種，於是 LED 的相對響應也只有發光和不發光兩種，分別代表 1 和 0 兩種不同的數位訊號。而類比調變的過程如圖(2-)所示，電路圖中會有兩個電源，一個是固定的直流順向偏壓，將 LED 一直維持在發光的階段，然後另一個電源主要是做調變用的，隨著時間一直更改電壓大小，讓 LED 可以有不同的發光程度，從亮度的變化的偵測得到一連串連續的訊號變化。如果我們沒有提供一個固定的直流順向偏壓的話，當訊號電壓為負的時候，LED 就會熄滅，因此在負半邊的資訊就沒辦法表現出來。

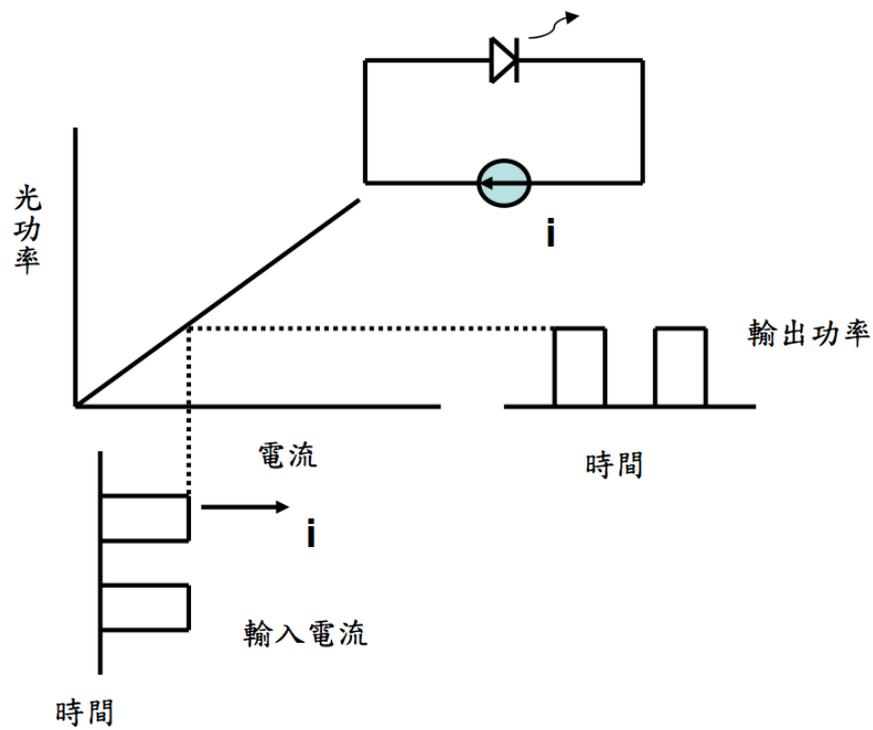


圖 2 - 5 LED 數位調變示意圖 [15]

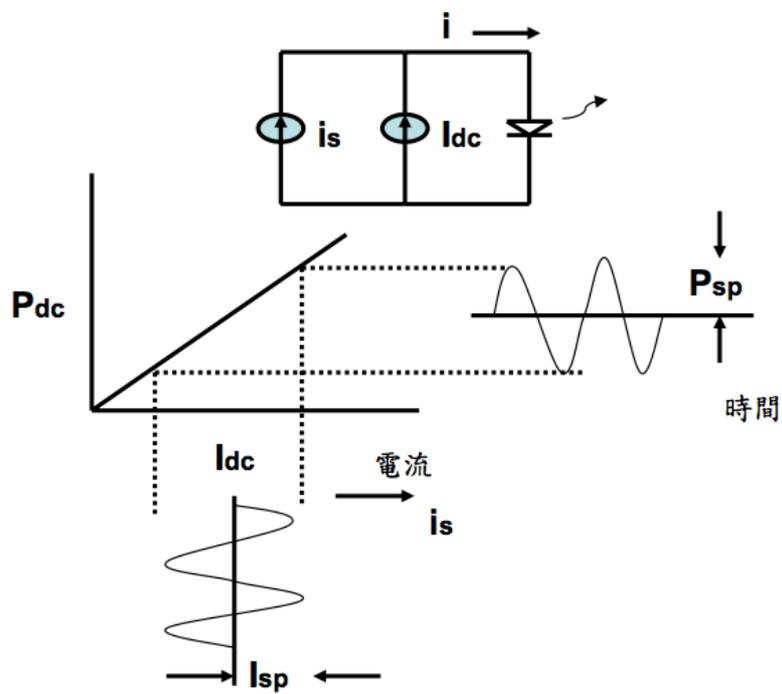


圖 2 - 6 LED 類比調變示意圖 [15]

在類比調變示意圖中，二極體的總電流公式為：

$$i = I_{dc} + I_{sp} \sin \omega t$$

而二極體的相對光輸出功率公式為：

$$P = P_{dc} + P_{sp} \sin \omega t$$

其中  $P_{sp}$  是信號功率的峰值，我們稱其為交流功率。在低頻調變時

$$P_{sp} = \alpha I_{sp}, \text{ 其中}$$

$$\alpha = \Delta P / \Delta i$$

而在高頻的時候，接面及寄生的電容會將急速改變的電流短路，降低交流功率的大小。因此，一個LED系統要在高頻下調變主要的限制在於載子的生命週期、即注入電荷重結合之平均時間，這裡我們用  $\tau$  作為代表。而因為有這樣的限制，因此我們在調變電流的時候，調變的速度需低於  $\tau$  才能正確的調變。

而LED的載子生命週期限制，對發射頻率為  $\omega$  的信號之響應可寫為：

$$P_{sp} = \alpha I_{sp} / \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}$$

將該公式作圖可以得到如圖(2-7)所示之曲線圖，由圖可見：當頻率  $\omega = 1/\tau$  時交流功率會下降為 0.707 倍，而在接收端光感測器接收到光訊號後，會將光訊號轉換成電流，而其轉換出的電流強度會和接收到的光強度成正比，因此當光強度功率減為 0.707 倍時，所產生的電流大小也會下降為 0.707 倍，至於整體的能量則是和電流的平方成正比，因此在接收端的電流能量則是變為原來的  $0.707^2 = 0.5$  倍，也就是一半的能量。

如果將 0.5 帶入增益的公式：

$$dB = 10 \times \log_{10}(P_2/P_1)$$

$P_2$  代 0.5， $P_1$  代 1，則算出來的 dB 數會等於 3，因此我們可以說在該頻率下，整體接收到的功率會下降一半，換言之下降了 3 個 dB。我們定義從 0dB 到 -3dB

的這個區間，就是該 LED 的頻寬。以 Hz 為單位，其 3dB 點的公式為：

$$3\text{-dB} = 1/2\pi\tau$$

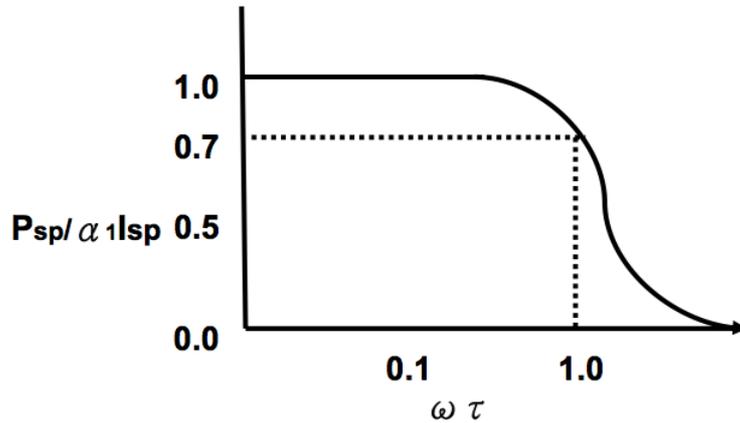


圖 2 - 7 LED 頻率與輸出功率曲線 [16]

一般來說 LED 的 3dB 點大約是在 14-15MHz，但是 3dB 點的大小會受到 LED 的材料、構造、供給電源……等因素所影響，導致頻率響應的程度不同，因此實際在實驗上可能會有些許的誤差。

而在照明用的 LED，通常為了使其亮度增加，因此會將 PN 接面的面積做的較大，但是當面積變大時，整體的等效電容也會跟著變大。在沒有偏壓的情況下，原本 LED 中的電容主要由空乏電容(Depletion Capacitance)主宰，當施加了一順向偏壓後，大部分的電流會從金屬電極接觸的地方注入至主動區，此時電容為擴散電容(Diffusion Capacitance)所主宰。而因為上述的兩種電容的限制，傳統大面積的 LED 在頻率響應的速度也就會受到限制，也就是被 RC 所限制了。因此，為了降低電容對於頻率響應產生的影響及限制，對於空乏電容會採用乾蝕刻臺座(Mesa Etching)來降低電容，而對於擴散電容則是採用適度的摻雜缺陷

(Impurity Defects)來降低少數載子的生命週期。雖然使用上述兩種方式可以降低 RC 對於頻率響應的影響，但是同時也會讓光的輸出功率降低，因此在實際的使用上必須針對頻率響應及光的輸出功率兩者作最佳化後方能決定該採用何種條件。而 RC 頻率響應的公式可寫成：

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

#### 2.1.4 LED 應用在 VLC

在 VLC 的系統中，不僅要提供訊號傳輸，也同時要提供照明的功能，因此 VLC 所使用的 LED 必定需要使用白光 LED。而目前主流使用在 VLC 上的白光 LED 都是使用藍光晶粒激發螢光粉產生白光的方式所製成的白光 LED，因為藍光晶粒激發螢光粉式的白光 LED 價錢較低，因此在成本考量下，目前若要應用在家用或商品化的 LED 照明主要都是使用藍光晶粒激發螢光粉式的白光 LED，在往後我們的實驗也是同樣使用藍光晶粒激發螢光粉式的白光 LED 來做為 VLC 系統的光源。但是因為該類型的白光 LED 是由藍光 LED 產生藍光去激發黃色螢光粉產生黃光後，藍光和黃光互相結合產生而成的，所以白光的產生需要經過一道激發黃色螢光粉的手續，因此在通電的那一瞬間到白光的產生，會有較長的延遲時間，造成該類型白光 LED 的頻率響應下降。如圖(2-8)所示，通電時，藍光 LED 會先亮起，過了一個 delay time 以後在產生白光，因此單純藍光的頻率響應會較白光來得高。一般來說，藍光的-3dB 點大約是 14-15MHz、白光的-3dB 點大約是 3-5MHz。所以如果以該類型的白光 LED 作為 VLC 傳輸系統的光源的話，跟以三顆三原色 LED 組合在一起的白光 LED 相比，該類型的白光 LED 頻率響應會較差。為了解決這個問題，我們可以在 VLC 系統接收端的訊號接收器前放置藍色濾光片，讓 detector

只感測藍光的變化，如此一來就可以只針對藍光 LED 發出的訊號作解調，不但頻率響應會比較好，可以傳輸的 data 的速率也可以提昇。許多 VLC 相關的研究也都使用此種方式來提高訊號傳輸速度[8]。缺點是會因為加了藍色濾光片使得光偵測器接收到的光強度降低，使雜訊升高，傳輸距離減短。因此，是否在以藍光晶粒激發螢光粉式的白光 LED 為燈源的 VLC 系統接收端的光感測器前加裝藍色濾光片也是需要經過多方面的考量的。

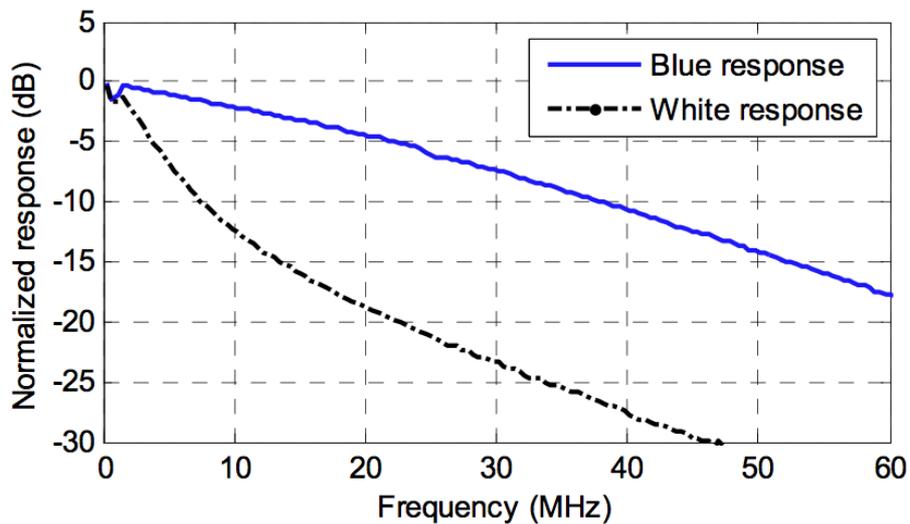


圖 2 - 8 白光 LED 中來光與白光頻率響應比較圖 [8]

## 2.2 通訊調變原理

在 1840 年，Claude E. Shannon 提出了通訊數學理論，詳細的描述了通訊系統的數學原理以後，人類通訊的發展開始有了爆炸性的成長，許多通訊儀器以及通訊的格式和協定被發展出來，對人類邁入資訊時代有非常大的影響。

而講到訊號傳輸，就必須提到調變(Modulation)，而解釋調變之前我們必須先知道，在整個通訊架構中，其實包含了幾個部分，如圖(2-9)所示，當我們產生了一個類比或是數位的訊號想要傳輸以後，我們需要將他調變，調變完後送到一個特定的通道作傳輸，當接收器從該通道接收到訊號以後，經過解調就可以得到我們原本希望傳輸的訊號了。而調變在整個通訊的過程中扮演的角色在於將我們希望傳輸的訊號轉變成為一個適合特定通道傳輸的波形。而當我們接收器收到這個從通道傳過來的訊息以後，用反向的工程將該訊息還原成原始的訊號，這樣的步驟就叫做解調(Demodulation)。



圖 2 - 9 通訊系統架構圖

調變主要分為三大種類，分別是類比調變(Analog Modulation)、脈波調變(Pulse Modulation)以及數位調變(Digital Modulation)，以下我們會針對這三種調變方式作概略性的介紹。

#### a. 類比調變 (Analog Modulation)

類比通訊是以載波的振幅、相位、頻率的變化來表示來源訊號的類比訊號。而在類比通訊統中，類比的調變又依改變的方式不同而分成三種不同的調變方式，

分別是以振幅作調變基礎的調幅調變(Amplitude Modulation)、以頻率作調變基礎的條頻調變(Frequency Modulation)以及以相位作調變基礎的調相調變(Phase Modulation)，如圖(2-10)所示。

所謂的調幅調變是先將訊號轉換為有正有負的訊號，調幅機制會再把訊號全部提升為零以上的值，再將頻率提高至載波頻率，就產生了一個調幅的訊號，而在接收端的解調變只需要將訊號通過波封檢測器或者低通濾波器，即可得出解調之後的訊號。而調頻則是將訊號的強弱轉換成頻率的變化，因此，只需要判斷訊號頻率的快慢，就可以解調收到的訊號。至於調相調變與調頻的產生方式約略相同。兩者最大的差異為前者訊號對應的是相位(Phase)，不過調相調變在實際應用上並不多見。

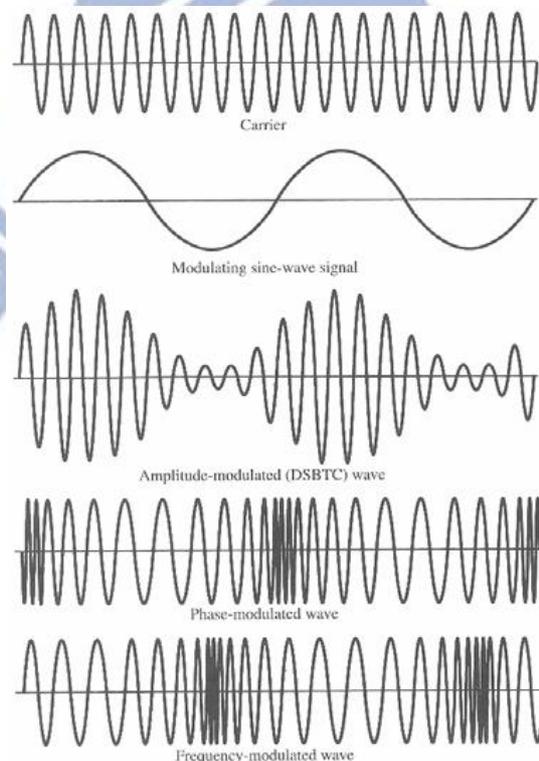


圖 2 - 10 三種類比調變格式示意圖 [16]

上述三種不同的類比調變技術中，其中又以調幅及調頻的調變技術最被廣泛使用在人類日常生活上的應用，例如廣播。調相的調變技術應用則較不廣泛。雖然類比調變系統簡單不易失真，但是其具有保密性不佳、系統容量有限以及無法傳輸數據資料.....等缺點。

## 2. 脈波調變(Pulse Modulation)

脈波調變訊號的波形是長方形的，也就是在傳輸一個脈波的時間內，振幅不隨時間改變。而脈波調變又可以分為類比式脈波調變及數位式脈波調變兩種。類比式脈波調變採用一對一的對應方式，先將輸入訊號加以取樣，訊號的振幅轉換為脈波的振幅 (Amplitude)、寬度(Width)與位置(Position)，接收端則依照接收脈波的振幅、寬度與位置解調。而數位式的脈波調變主要是以脈波符碼調變 (Pulse Code Modulation, PCM, 脈碼調變) 技術為主，該技術可以將類比的訊號用數位編碼的方式呈現，以脈波方式直接在電腦中處理資料，如圖(2-11)所示，較為簡單與方便。

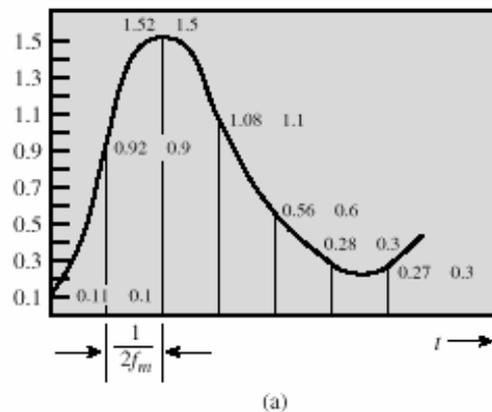


圖 2 - 11 脈波調變示意圖 [16]

### 3. 數位調變 (Digital Modulation)

數位調變是以載波內振幅、頻率、相位等非連續的變化來表示基頻內 0 與 1 的數位訊號。數位調變主要也有三種不同的調變方式：振幅移鍵 (Amplitude Shift Keying, ASK)、頻率移鍵 (Frequency Shift Keying, FSK)、相位移鍵 (Phase Shift Keying, PSK)，如圖 (2-12) 所示。當基頻上的訊號以載波的振幅變化來表示時，稱為振幅移鍵 (ASK) 方式，如式 (1) 所示，而頻率移鍵 (FSK) 是用兩個不同的頻率表示兩個二進制的數值，如式 (2) 所示，至於相位移鍵 (PSK) 是用兩個相位表示兩個二進制的數值，如式 (3) 所示。

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{二進制 1} \\ 0 & \text{二進制 0} \end{cases}$$

(式 1)

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{二進制 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{二進制 0} \end{cases}$$

(式 2)

$$\begin{aligned} s(t) &= \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{二進制 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{二進制 0} \end{cases} \\ &= \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{二進制 1} \\ -A \cos(2\pi f_c t) & \text{二進制 0} \end{cases} \end{aligned}$$

(式 3)

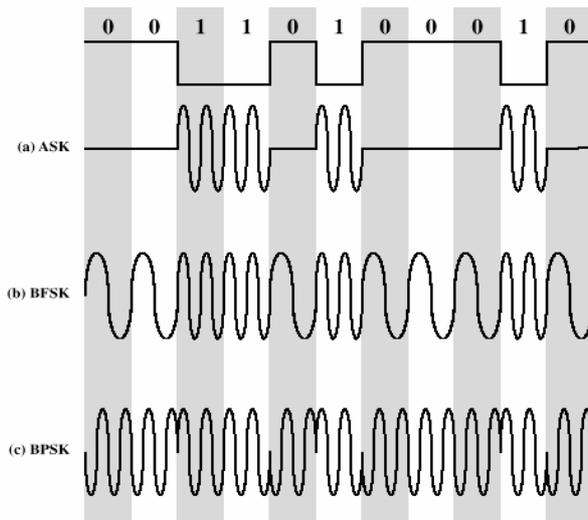


圖 2 - 12 三種數位調變格式示意圖 [16]

綜合比較起來，數位調變相較於類比調變有更多的優點，條列如下：

a. 優異的抗干擾能力

數位調變內各個訊號不是 0 就是 1，例如以 0 伏特來表示位元 0，以 5 伏特來表示位元 1，當位元強度受到外界的雜訊影響而改變強度成為 3.8 伏特時，系統在傳輸過程中能將位元強度回復到原來正常的 5 伏特。

b. 提供資料多工處理

當不同型態的資料經過數位調變後，都轉換成 0 與 1 的數位訊號，如此，資料就能多工混合後由相同的頻道傳送，另外一方接收到這些資料後，再解多工還原成原來個別型態的資料。

c. 提供傳輸安全機制

數位調變系統內的數位訊號還能運用數位訊號處理的技術，例如發射端以特

定的密碼將資料進行編碼，接收端必須具備相同的密碼，才能還原成原來的資料，避免訊號傳輸時遭其他人竊取。

除編碼外，數位調變還能進行頻道編碼(Channel Coding)，頻道編碼是在傳輸資料內，額外加入一些控制位元，當接收端收到訊號後，依照這些控制位元的數值將傳輸過程中若干發生錯誤的位元加以更正過來。

## 2.3 ACLED 原理

大部分的 VLC 系統都是使用一般的 LED 作為光源，所謂的一般的 LED 就是只能操作在 DC 直流偏壓下的 LED，要給定一特定的順向偏壓 LED 才會亮起，但是一般室內用的插座都是 AC 交流電，因此如果要將 VLC 有效的應用在室內用或是其他商業上的應用，必定要將光源從 DC-LED 改變為 AC-LED，才能直接的將插座提供的 AC 交流電作最有效的利用，也可以省去交流轉直流轉換器所損耗的能量，讓 VLC 系統更實用。因此為了要將 AC-LED 使用在我們的 VLC 系統中，我們需要對 AC-LED 有一定的認知及了解，以下就是對於 AC-LED 一些基本的介紹。

2006 年，美國的 David Allen 和 Yardley 就提出了一項專利，主要是透過 LED 在電路上排列的方式不同，讓 LED 可以直接接上家用電源作多顆 LED 同時發光的應用，而其中一個排列方式是可以讓 AC 電源的正半邊和負半邊都可以驅動到部分 LED，使其發光而不會有某個半邊的能量被浪費。因此間接的達成了 AC-LED 的概念。

該項專利的其中一個設計圖如圖(2-13)所示，他採用的電源是一般家用的 110V 的 AC 交流電源，而電源跟兩串的 LED 連在一起，這兩串 LED 是採並連的方式連接在一起，每一串 LED 串列中各有 50 顆 LED，而這兩串 LED 有兩種不同的串接的方式，如圖(2-14)所示，其中一種是兩串的 LED 串的方向都是一樣的，但是這樣的話並不算是 AC-LED，因為當兩串 LED 的方向都一樣的時候，只有在其中一個順向偏壓的情況下兩排才會一起全亮。當 AC 電源改變至另一個半邊的振幅的時候，兩串 LED 又會一起熄滅。因此要達到 AC 電源的正、負半邊的訊號都有使用到的話，兩串 LED 應該是採並連且方向反接，如圖(2-15)所示，此時當提供的 AC 交流電是在正半邊的話，其中一串 LED 就會亮起，當經過半個週期，AC 訊號改成是另一個半邊的時候，就會換另一串 LED 亮起，原本亮起的那一串就會熄滅，因為對原本的那一串來說，此時已經變成負向偏壓了，因此之前亮起的那串 LED 這時候就不會亮起。

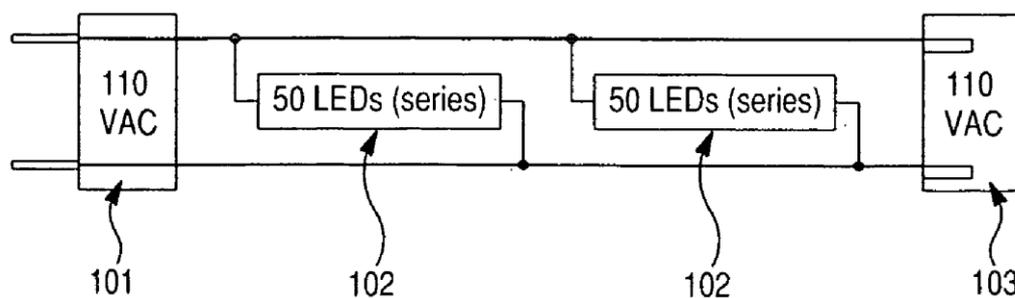


圖 2 - 13 LED 串列設計圖 [17]

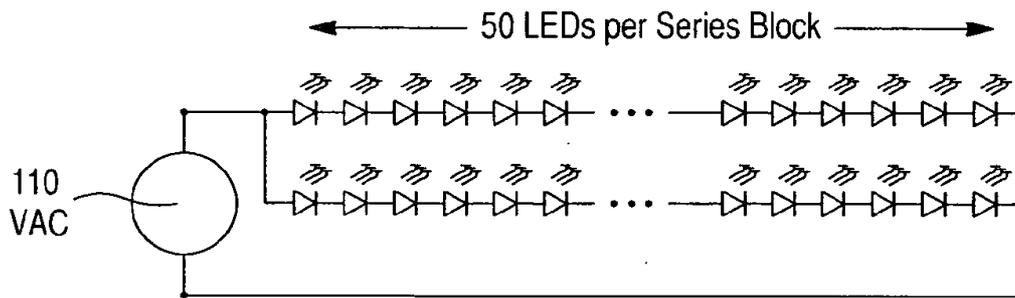


圖 2 - 14 LED 串列設計圖 2 [17]

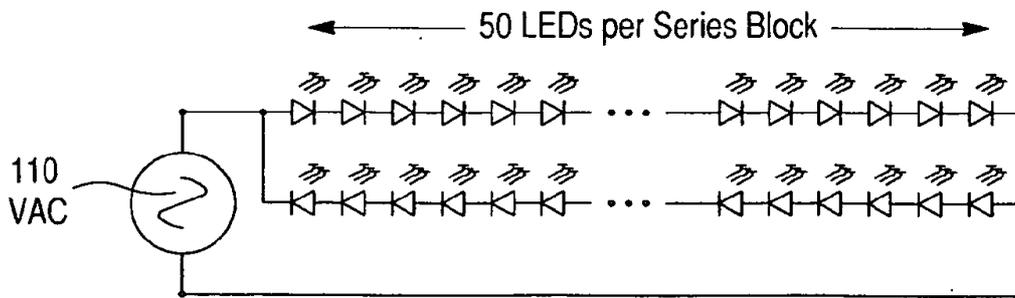


圖 2 - 15 AC LED 串列設計圖 [17]

綜合比較兩種，第一種在瞬間可以提供的亮度較高，因為他一次會亮兩串 LED 燈，第二種的排列方式在特定時間內只會亮起一排，但是第一種的排列方式會浪費許多能源，因為交流電的其中一個半邊的電源完全沒辦法供應給 LED，都會被視為負向偏壓導致 LED 無法亮起。而第二種的排列方式則是整個交流電的電源都可以做利用。因此若要實際使用在交流電的情況下，第二種排列方式是比較適合的。至於使用 50 顆 LED 的原因在於，一般 LED 驅動的電壓大約是 2-3V 之間，如果將 50 顆 LED 串接在一起的話，其整條 LED 串的驅動電壓就會接近 110V，因此該項設計雖然使用很多顆 LED 燈泡，但是卻不需要使用變壓器來調整電壓，省去了變壓器會產生的能量損耗。

之後，又有人提出以整流橋為概念的 AC-LED，其設計如圖(2-16)所示，主要是由一個交流電源以及一個橋式整流器所構成，該整流器呈現一個菱形狀，當交流電的電源為正半邊的時候，電流就會因為 LED 擺放的方式而延著 A 路徑行進，使的右上方、左下方和中間部分的 LED 發光，其他區塊的 LED 因為這時處於負向偏壓，因此不會發光；而當交流電的電源為負半邊的時候，電流會延著 B 路徑行進，此時則是換成只有左上方、右下方和中間部分的 LED 會發光。因此我們可以知道，使用這種橋式整流器的設計，可以讓 LED 系統使用到整個 AC 交流電的電源訊號，不會有某個半邊的電源被浪費了。不但如此，該橋式整流器還提供了中間那一段 LED 是恆亮的功能，不論提供的電源為 AC 交流電的正半邊或負半邊，中間那一排 LED 一定會發光。也因為這個優點，因此在許多關於 AC-LED 的研究中都是使用這種橋式電路的設計。

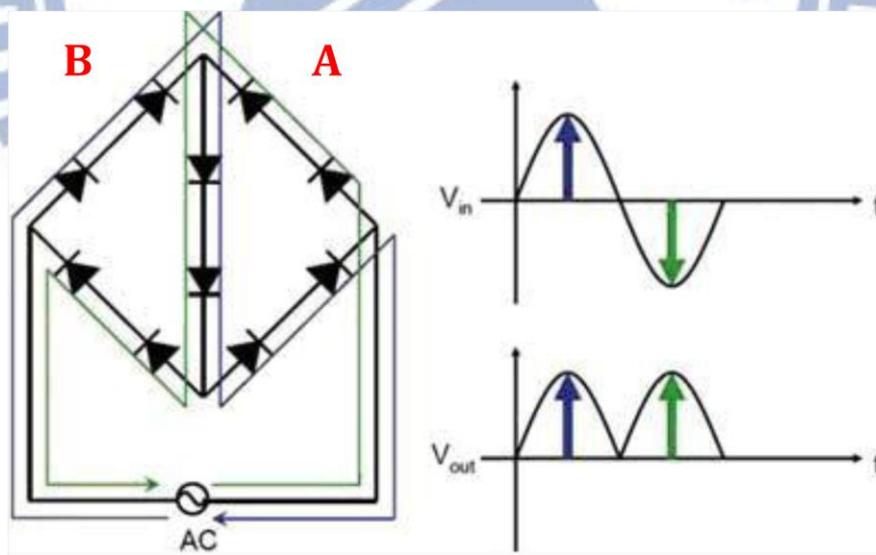


圖 2 - 16 橋式 AC-LED 設計示意圖 [18]

隨著時間的推演，現在許多跟 AC-LED 相關的商品已經被設計出來，在商業上更詳細的設計不停的被提出，如圖(2-17)，而為了縮小 AC-LED 的體積，許多

技術也一直在開發，例如將兩個不同偏壓方向的 LED 在製成的時候利用技術讓他們長晶長在一起，如此一來即可將兩顆 LED 封裝在同一個 Cell 裡面，縮小整顆 AC-LED 的體積。而世界上積極研發 AC-LED 的公司在南韓是首爾半導體公司，台灣的工業技術研究院近年來也有不錯的成果，甚至將 AC-LED 商品化，如圖( )，然後技轉給其他科技公司作生產。未來，AC-LED 將會在 LED 應用端扮演舉足輕重的地位。

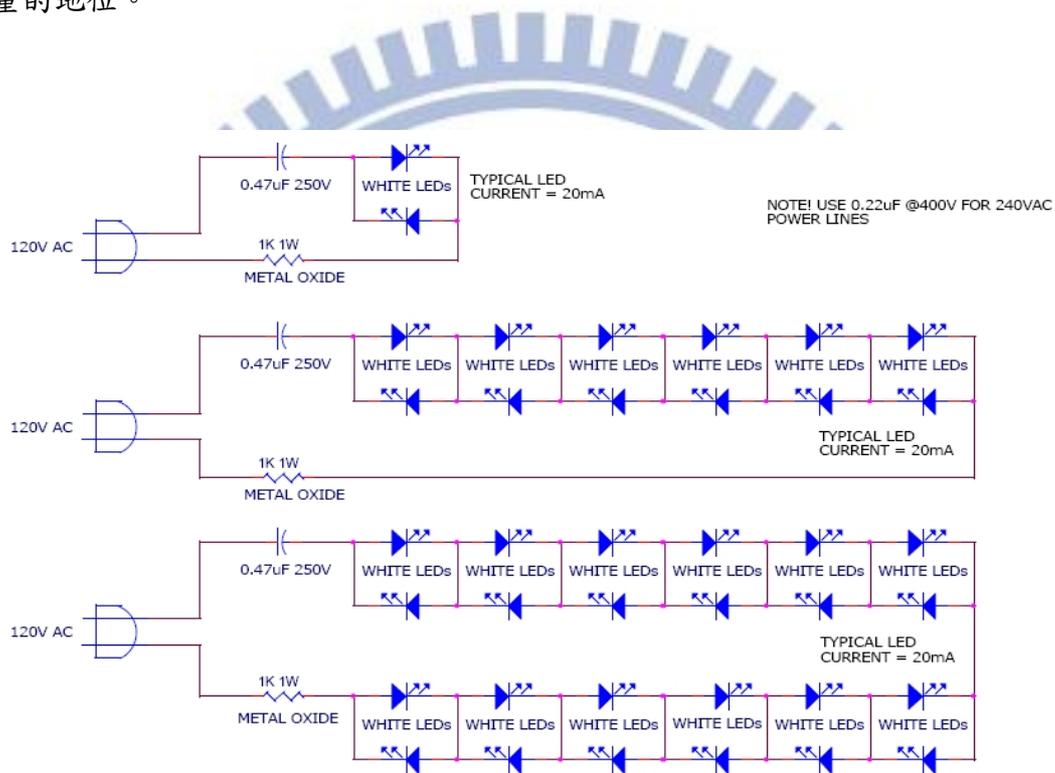


圖 2 - 17 商業化 AC-LED 設計示意圖 [19]



圖 2 - 18 工研院設計生產之 AC-LED

## 2.4 Cross Talk 簡介

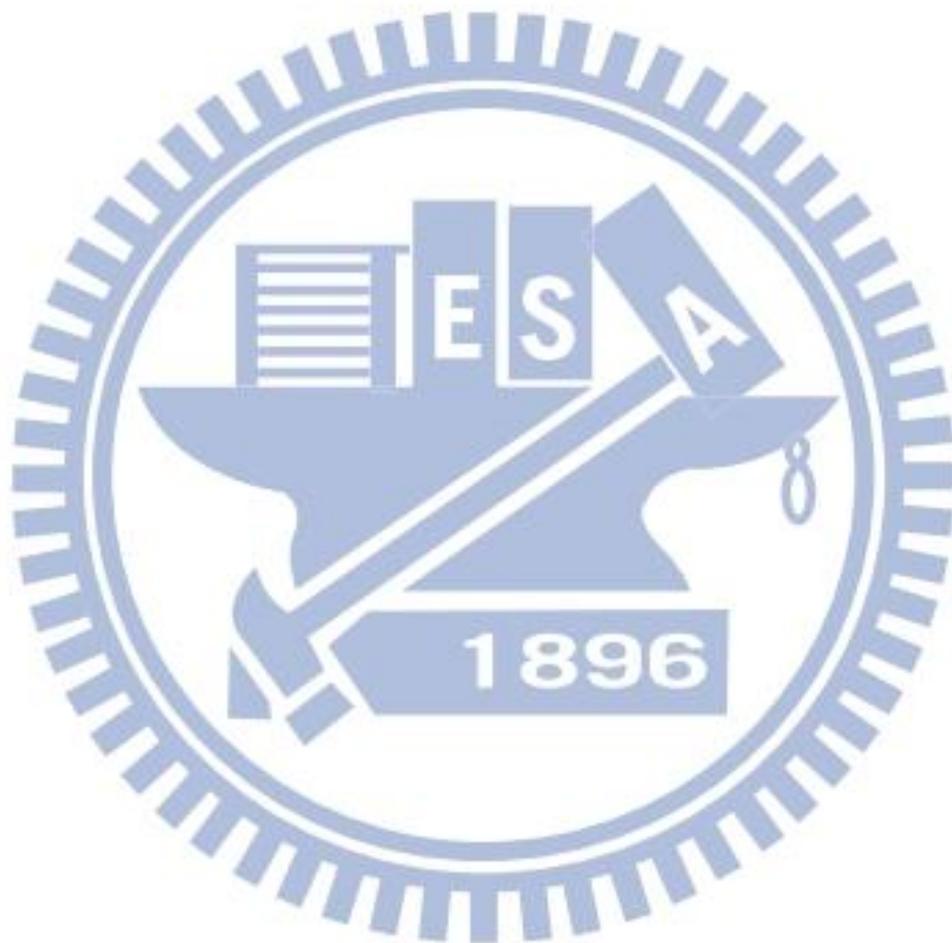
若希望將 VLC 系統與室內照明系統作結合，作有效的利用與應用的話，除了前一節所說的 AC 電源供應的問題外，還有另一個值得被關注且被解決的問題，就是雙向傳輸時訊號間的 Cross Talk。

Cross Talk 中文翻譯為串音干擾，是電子學及通訊學上常用的專業術語。在電子學上是指兩條信號線之間的耦合現象。這是因為空間距離很近的信號線之間會出現不希望的電感性和電容性耦合從而互相干擾。而電容性耦合會引發耦合電流，電感性耦合則是會引發耦合電壓，導致訊號產生一些不希望有的雜訊。因此在印刷電路板設計和積體電路等非常精密的設計中，Cross talk 一直是一個棘手的問題。

而在 VLC 系統中，Cross talk 常常會發生在雙向傳輸的情況下，因為正常的訊號網路使用情況下，使用者不僅僅會接收資訊，也會希望將資訊從自己的儀器，像是電腦、手機……等，回傳至網路上，所以在室內通訊系統中不只應該要有可以下載的路徑，也要有可以上傳的路徑。而當系統是 VLC 系統時，若要上傳資料，勢必使用者本身也要有一個光源，可以將光訊號打回至原本的訊號發射端，將資料上傳到廣播端的網路。如此一來，整個系統就會有兩個光源和兩個光接收器，如果使用者增加的話，光源與接收器的數量也會跟著增加，這時就會出現 Cross Talk 的情況。因為某個接收器除了接收到自己應該接收的訊號外，該接收器也有可能因為牆壁的反射而接收到自己那一端訊號發射器(LED)所發出的訊號，因此在收到對面傳來的訊號的同時，也可能會收到自己傳出去的訊號，兩者

疊加在一起就會產生不必要的雜訊，干擾原本要接收的訊號，導致 BER(Bit Error Rate)上升，這就是 VLC 系統中常見的 Cross Talk 問題。

而為了解決 Cross Talk 的問題，我們在往後的章節也會提出我們的實驗設計，利用傳輸時間的不同來消除 Cross Talk 的現象。



## 第三章

在本章節中，我們會針對兩個我們主要研究的方向做文獻的回顧以及實驗設計的介紹。兩個研究分別為 AC-LED VLC 系統的設計及 VLC 室內雙向傳輸 Cross Talk 的解決方式。

### 3.1 AC-LED based VLC 系統

使用 AC-LED 來做 VLC 的想法之前已經被提出過，在 2011 年時國內也有團隊做過相關的研究。在本節中，我們會針對其它團隊曾經做過的 AC-LED 的 VLC 的研究做一個回顧及探討，並且提出我們自己的 AC-LED VLC 的架構，並透過電腦程式的模擬來驗證我們的架構的可行性，將實驗的前置作業以及設計做一個完整的介紹。

#### 3.1.1 AC-LED based VLC 系統研究回顧

2010 年，遠東科技大學的研究團隊發表了一篇名為：An AC LED Smart Lighting System with White Light FSO Communication 的論文。提出一個架構，將 AC 電源與訊號結合在一起，供給 AC-LED，使 AC-LED 在發光照明的同時也可以傳輸訊號，實現以 AC-LED 作為光源的 VLC 系統。

該篇論文中的實驗架構如圖(3.1)所示。

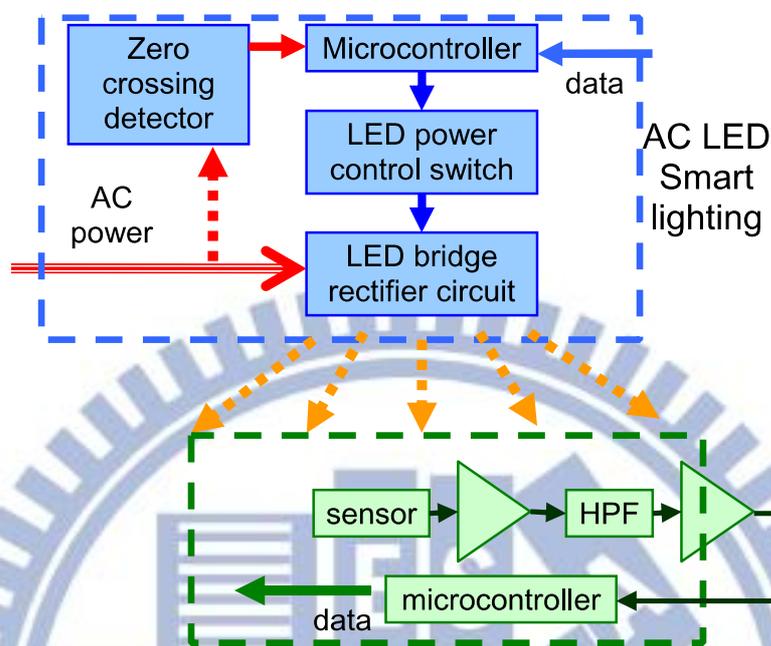


圖 3 - 1 AC-LED 智慧照明系統架構示意圖 [21]

該架構上半部分是一個 AC-LED 的 Smart Lighting System，它不但可以提供照明，也可以提供 VLC 訊號傳輸，他是藉由一個 Microcontroller 接收訊號以後去控制 LED Power Control Switch，微量調整 LED 的亮度。而供給 LED 發亮的主要偏壓是由 AC 交流電的電源提供，而這個交流電的電源會透過 Zero Crossing Detector 跟訊號做同步，因此在供給 LED 發亮的同時，可以同步的用 Switch 調整發光的亮度，作為可見光的訊號以供傳輸。而在此實驗中所使用的 LED 是由每組 18 顆 LED 串連而成的 1.2W 的 LED 組共 4 組組成的，每顆 LED 在 20mA 的電流下操作在 3.2V 的順向偏壓下。

下半部是該 Smart Lighting System 的接收端，VLC 所產生的光訊號經過 100 公分的傳輸距離後由一個光感測器接收，經過放大器和高通率波器濾掉其他低頻

的環境光源或電流雜訊以後，由一個 Microcontroller 控制光感測器接收和儲存訊號。而在接收段的光感測器上有加裝藍色(450nm)的濾光片。因為白光 LED 是由藍光 LED 激發黃色螢光粉產生白光的，所以加裝藍色濾光片後，可以直接感測藍光 LED 發出來的光線，不必等到螢光粉被激發產生白光以後才能感測，因此可以提昇光感測器感測的響應的速度。

為了證實本實驗可以用於一般的家用環境，因此實驗操作在白天的環境，且室內有正常的日光燈做照明。而傳輸時使用 ASCII 的 Code 作為訊號，分別傳送五個字母，包含：a、b、w、o 和@，其中 a 用 01100001 做代表、b 用 01100010 做代表、w 用 01101111 做代表、o 用 01110111 做代表、@ 用 01000000 做代表，分別將這些訊號與 AC 電源做結合，供給 AC-LED 傳輸 VLC 光訊號。

在傳送時使用 Boud Rate 為 50kHz 的 True Format 的格式做傳送，每  $20\mu s$  取一個 bit，bit 的 Order 是從低到高，所以資料 a 會從 0 開始接著是 1000110 的 byte，而 b 的話就是用 001000110 表示，a 和 b 的波形如圖(3-2)所示，若將 a 的波形放大來看則如圖(3-3)所示。

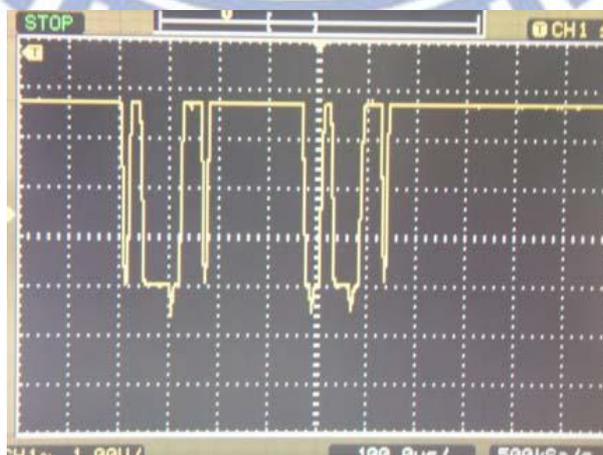


圖 3 - 2 a 和 b 兩個字母在 True Format 下傳輸的波形 [21]



圖 3 - 3 放大後 a 字母在 True Format 下傳輸的波形 [21]

而 w 和 o 的波型如圖(3-4)及圖(3-5)所示，圖(3-4)是將訊號載在 AC 電流上的圖型，由此可以看到確實可以將訊號與 AC 電源做結合。圖(3-5)是接收端接解出的訊號，w 是 011101110 而 o 是 011110110。雖然 w 和 o 的訊號非常相似，但是接收到的訊號在示波器上卻可以看出其中訊號的差異，表示這個 AC-LED 的 VLC 訊號可以成功的傳輸訊號，不會因為訊號相近就產生錯誤的解讀。

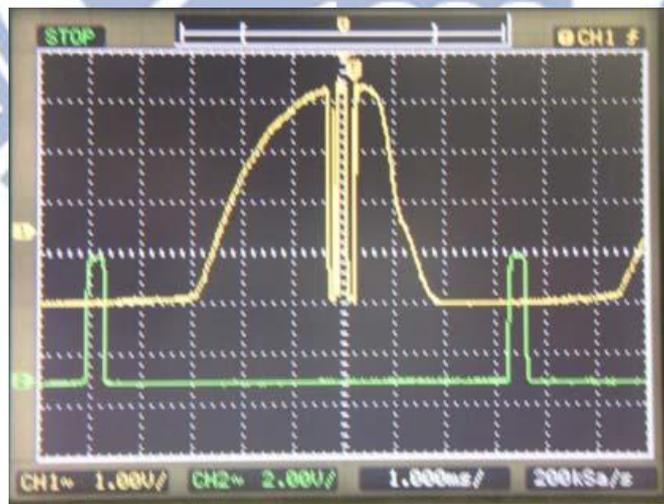


圖 3 - 4 w 和 o 兩個字母在 True Format 下與 AC 訊號結合後的波形 [21]

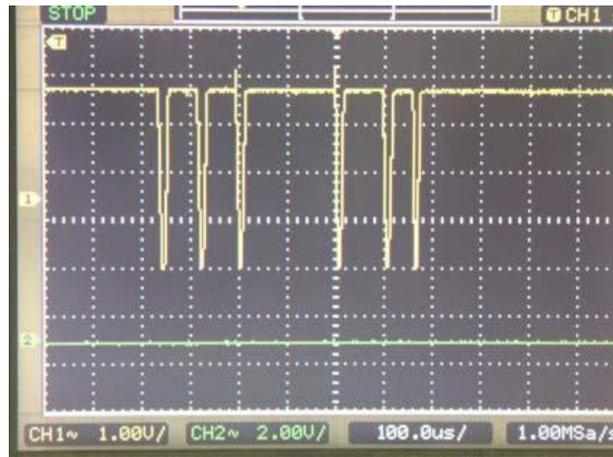


圖 3 - 5 w 和 o 兩個字母在 True Format 下傳輸的波形 [21]

由這篇論文我們可以得知，將訊號載在 AC 電流上確實可以驅動一個 AC-LED 發光並成功的傳輸訊號，而除了此篇 paper 外，同一個研究團隊也在 2011 年時發表另一篇論文：An AC LED Smart Lighting System with Visible Light Time-Division Multiplexing Free Space Optical Communication。文中敘述，在 Smart Lighting System 中可以使用了 Zero-Crossing Detector 去標定 AC 電流中波型的位置，因此可以進一步的標訂出在波形中何處的電壓強度已經高過 LED 的臨界電壓，可以使 LED 發光作用，進而在特定位置放入訊號。如此一來，我們將可以在訊號的格式上做一些變化，例如可以傳送訊號給不同 Channel，達到 TDM (Time-Division Multiplexing) 的功能，如圖(3-6)所示。

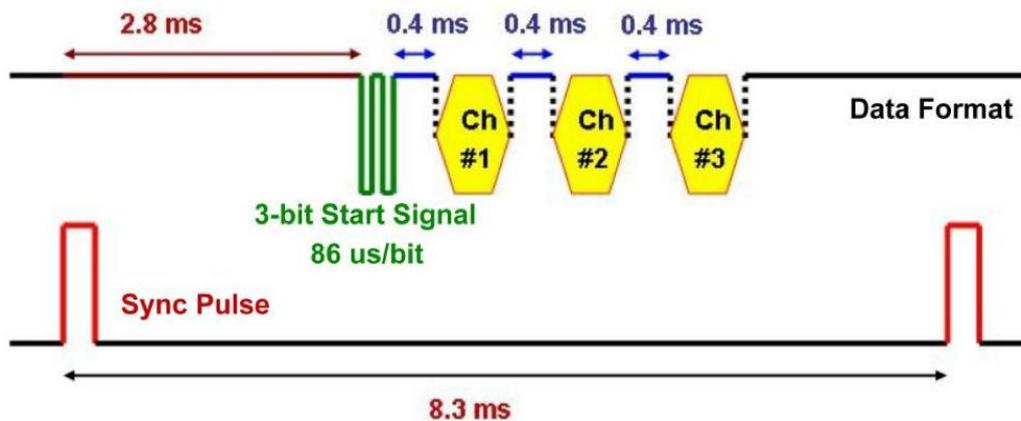


圖 3 - 6 TDM 機制數據傳輸示意圖 [22]

當 Zero-Crossing Detector 產生一個 Sync Pulse 標訂出交流電波形的起點，過了 2.8ms 後會開始傳送一個 3bits 的開始傳輸指令，然後以每隔 0.4ms 的間隔傳送不同 Channel 的訊號給不同的接收者，達到 TDM 的效果。而如果不同接收端的接收器可以跟發射端同步的話，3bits 的開始傳輸指令就可以被省略。

而實驗的結果如圖(3-7)及圖(3-8)所示，其中圖(3-7)中最上方的曲線為 AC-LED 所發出的訊號，而圖(3-8)中最上方的曲線為接收器接收到並處理過後的訊號。跟中間的原始訊號相比，可以發現原始訊號經過 Microcontroller 和 AC 電流結合在一起以後經過 100cm 的傳輸距離被接收器接收後，還是可以解出正確的訊號。

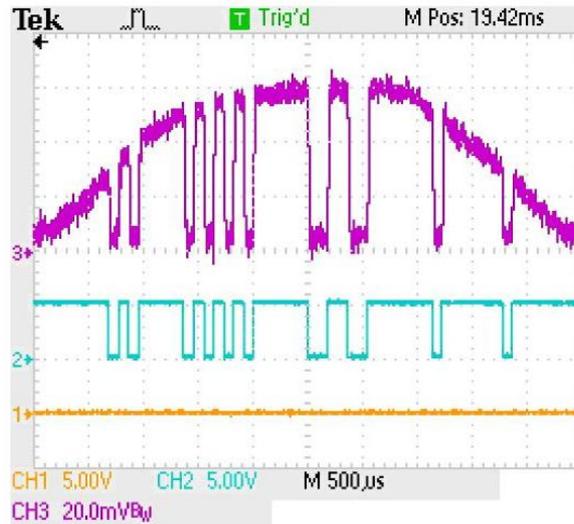


圖 3 - 7 傳輸之原始訊號與已和 AC 訊號結合之傳輸訊號 [22]



圖 3 - 8 經解調過後解出之原始傳輸訊號 [22]

由以上兩篇其他團隊提出的研究我們可以知道，將訊號載在 AC 電源上並供給 AC-LED，確實可以將訊號完整且正確的在空間中做傳輸，除了基本的訊號傳輸外，在訊號上做一些不同的調變格式如 TDM 也是可以達成的。

雖然從以上的文獻我們可以得知利用 AC-LED 來做 VLC 的訊號傳輸是可行的，但是該文獻的內容卻有很多地方是可以再深入研究的，包含訊號與 AC 電源之間結合的方式、傳輸速度的提升、BER (Bit Error Rate) 的計算、眼圖形狀……等都是文獻裡頭所沒有提及與量測的，因此我們設計了一系列的模擬與實驗，希望在 AC-LED Based VLC 系統的研究上可以更深入、突破更多東西，並且有較完整的量測數據。

### 3.1.2 Bias Tee 原理

在本篇論文中，我們希望將 VLC 應用到一般日常生活上的家用應用或是相關的商業應用，因此我們必須將 VLC 通訊系統與 AC 電源供應器結合，讓 VLC 的通訊系統直接可以用 AC 電源供應器作為電源供應。所以我們嘗試著將高頻的訊號與低頻(60Hz)的 AC 訊號作結合，為了達到結合高頻與低頻訊號，我們使用了一種叫做 Bias Tee 的元件，而 Bias Tee 的結構如圖(3-9)所示，可以看成是一個高通濾波器和一個低通濾波器的結合。在低通端的結構可以讓低頻的訊號通過，同時阻擋高頻訊號打回低頻的訊號源，提供低頻偏壓給儀器；而在高通端的結構則是會讓高頻訊號通過，同時阻擋低頻訊號打回高頻的訊號源，高頻訊號及低頻偏壓會在中央的節點藉由 Super Position 的原理作結合，最後供給儀器一個同時具有低頻偏壓以及高頻訊號的電流。而因為該元件具有三個端點，且在電路圖上看起來像一個 T 字形，因此我們稱該元件為 Bias Tee。

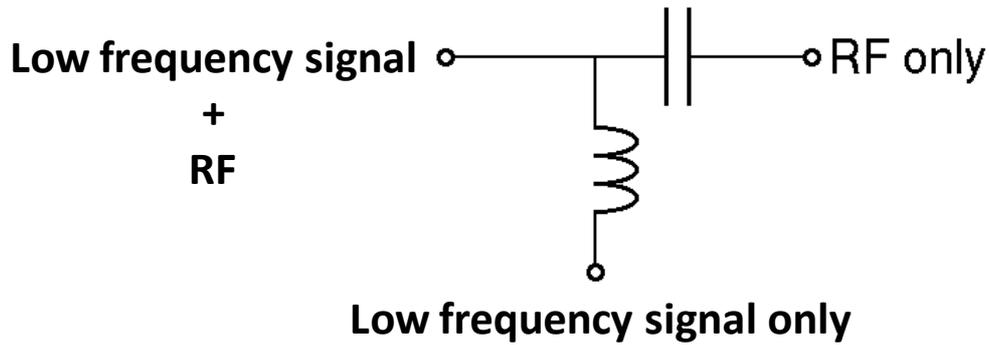


圖 3 - 9 Bias Tee 結構示意圖

Bias Tee 可以看做是一個理想的電容，可以讓高頻訊號通過且阻擋掉低頻偏壓，同時也可以看成是一個理想的電感，可以阻擋高頻訊號且讓低頻偏壓通過。因此基本上，Bias Tee 可以由簡單的電容及電感製作而成，除非整體的電路設計有許多其他的寄生元件，不然 Bias Tee 的設計可以是很簡單的。

一般來說，Bias tee 內的 Impedance  $Z_0$  會介於 50ohms 到 75ohm 之間，而電容( $X_C$ )的 Impedance 會選擇使用在遠小於  $Z_0$  的大小，而電感( $X_L$ )的 Impedance 則會選擇使用在遠大於  $Z_0$  的大小。其中， $X_C$  及  $X_L$  的公式如下：

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad , \quad X_L = j2\pi fL$$

我們可以透過設計電容及電感的大小，讓特定頻率的訊號通過，製作出一個帶通濾波器。Bias Tee 可以應用在許多電子儀器上，例如：Power Over Ethernet、Active Antennas、Low-Noise Amplifiers 以及 Down Converters..... 等。而在本論文中，如上述介紹，因為 Bias Tee 可以讓高頻訊號以及低頻的偏壓結合，同時供給儀器作使用，正好符合了我們所希望的讓低頻的 AC 訊號上嵌有高頻的資料訊號的情形，因此在本論文中我們提出了將 Bias Tee 應用在 AC-LED Based

的 VLC 系統上的研究，期待 VLC 系統可以直接使用家用的交流電源供應來傳輸訊號。

### 3.1.3 AC-LED based VLC 系統實驗設計

我們的 AC-LED based VLC 系統設計如圖(3-10)所示：

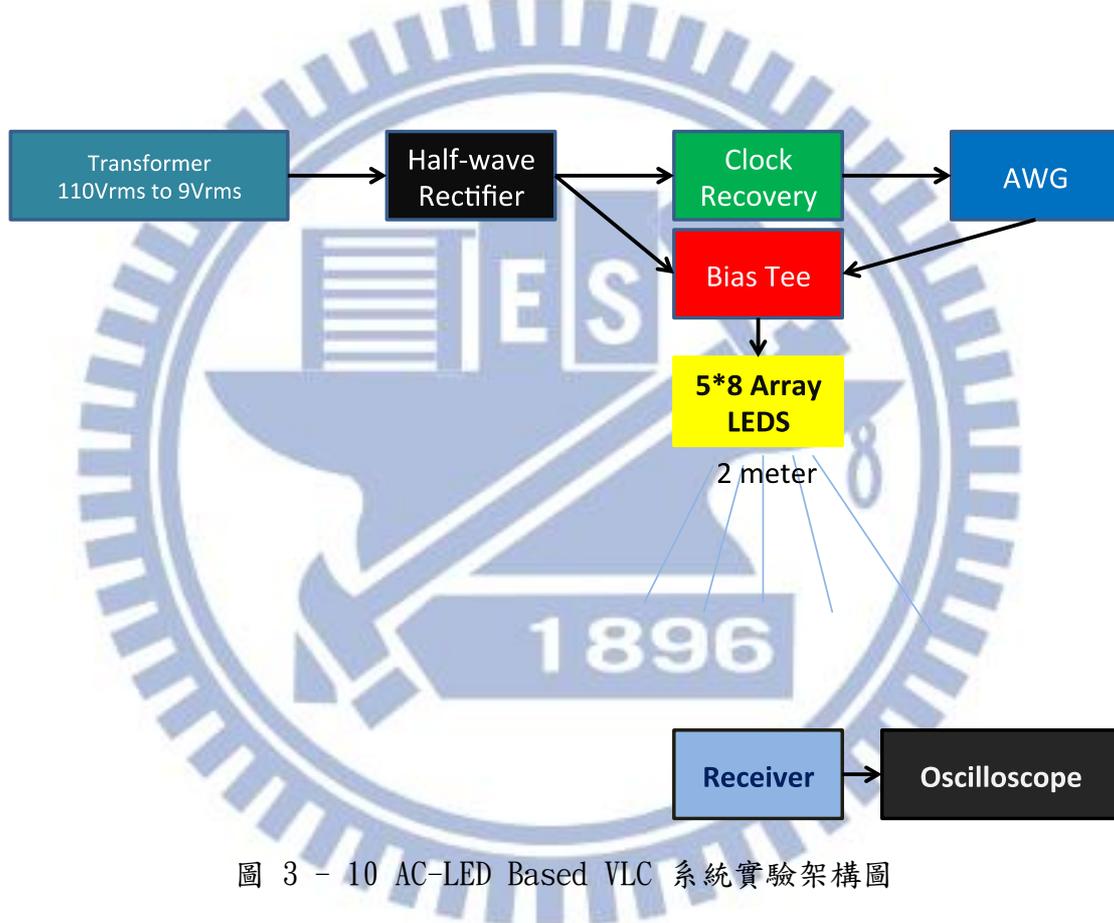


圖 3 - 10 AC-LED Based VLC 系統實驗架構圖

在本實驗中，一般室內用的 110V 的 60Hz 的 AC 電源會先經過一個變壓器，將電壓從 110V 降至 9V，然後再經過一個半波整流器，將 AC 電源的負半邊的訊號消除，轉換成 0，接著透過 Clock Recovery 產生一個 60Hz 的方波跟隨機訊號產生器(AWG)所產生的高頻訊號同步。隨機訊號產生器設定在 Burst 模式，並且由 Clock Recovery 所產生的 Clock 來觸發。該隨機訊號產生器會將一個隨機的、

速率為 200Kbps 的 OOK 訊號調變到一個 400KHz 的載波上，使用的是數位的格式，並且有 1000 個點的 Symbol Duration(5ms)。

同步以後，將低頻的 AC 訊號跟高頻 AWG 訊號一起輸入 Bias Tee 作線性疊加，產生一個供給 LED 的最終訊號，LED 將會依照此訊號來發光。在本實驗中所使用的 LED 是一個陣列，總共有 40 顆 LED 以 5X8 的形式排列，而該 LED 陣列中的 LED 都是一般消費性商品的 DC-LED，只能操作在特定方向的偏壓下且驅動電壓為 12V。而 LED 所發出的訊號光線經過了 2 公尺的 Free Space 傳輸後，用一個光感測器(PIN Receiver)接收，收下來後再經過示波器(Real-Time Oscilloscope)去分析。

而此實驗所使用的儀器及規格詳述如下：

1. 隨機訊號產生器，AWG (Agilent 33220A)
2. 光感測器，PIN Receiver (Thorlabs PDA36A)
3. 示波器，Real-Time Oscilloscope (tektronix DPO 7354C)

### 3.1.4 AC-LED based VLC 系統實驗模擬

為了確認我們實驗的設計是否可行，我們使用 Matlab 程式針對我們的設計做模擬，模擬的程式碼及詳細敘述如下：

a. 模擬電路產生訊號並解調

```
clear all

close all

clc

Fs=5e6; %取樣率， 5MHz

Ns=3400; %Sample 點數

tstep=Ns*25; %要看的範圍

t=0:1/Fs:(1/Fs)*(tstep-1); %定義時間軸

f1=60; %AC 電源的頻率

phi1=pi; %AC 電源的 phase

phi2=0; %高頻訊號的 phase

att=0.25; %振幅調變

s1=att*155.5635*real(exp(j*2*pi*f1*t+j*phi1)); %AC 電源產生的訊號

f2=4e6; %載波的頻率

m=round(rand(1, Ns));

uF=25; %Upsample Factor

B=Fs/uF; % Data Rate (Baud-rate)

m=upsample(m, uF);

m=conv(m, ones(1, uF));

m=m(1:length(m)-(uF-1)); %製作隨機訊號

s3=real(exp(j*2*pi*f2*t+phi2 ));

s2=5*m.*real(exp(j*2*pi*f2*t+phi2 )); %將訊號做 amplitude modulation

mi=1; %訊號振幅強度調變
```

```

s2=mi*s2; %產生最後希望輸出的訊號

Hd12=lp2; %定義 lowpass filter
Hdh=hp; %定義 highpass filter
y= filter(lp, s1) + filter(hp, s2); %LED 端擷取到的訊號
AWG= s2+ filter(hp, filter(lp, s1)); %訊號端擷取到的訊號
AC= s1+ filter(lp, filter(hp, s2)); %AC 電源端擷取到的訊號
T1=LEDchac((y/20), 1.2, 1); %正半邊的 LED 訊號
T2=LEDchac((y/20), 1.2, -1); %負半邊的 LED 訊號
SS=(filter(hp, T2)).*s3; %Demodulation 開始，濾掉低頻
SS=filter(lp2, SS); %濾掉兩倍頻的 image

```

b. 將電路中相關的信號作圖觀察

```
close all
```

```
clc
```

```
figure(1)
```

```
plot(t(600:length(y)), y(600:length(y))) %繪製 LED 端擷取到的訊號的圖
```

```
figure(2)
```

```
plot(t, AWG) %繪製訊號端節取到的訊號的圖
```

```

figure(3)
plot(t, AC) %繪製 AC 電源端節取到的訊號的圖

figure(4)
plot(t, T1) %繪製正半邊的 LED 訊號的圖

figure(5)
plot(t(300:length(T2)), T2(300:length(T2))) %繪製負半邊的 LED 訊號的圖

figure(6)
G=(SS(0.2e4:0.8e4))
plot(t(0.2e4:0.8e4), G) %繪製解調後的訊號圖

figure(7) %繪製眼圖
hold on
J=2*uF
fori=0:floor((length(G)/J))-1
plot((0:1/Fs:49/Fs), G(i*J +1:(i+1)*J ) )
end

```

### 3.1.5 模擬結果

我們將上述程式碼放入 Matlab 程式中執行後，可以模擬我們設計的實驗在運作中會產生的一切結果，包含訊號的形式、AC 電源的形態、LED 亮度的變化、收到訊號的強弱以及眼圖。分別詳細敘述於下：

#### a. 高頻訊號

我們用 AWG 產生的高頻訊號如圖(3-11)所示，他是一個由電腦模擬出來的偽隨機 2 進制的訊號(PRBS)，經過 Upsampling 及調變到一個弦波上後的結果。如果將該圖的部分區域放大，即可以得到圖(3-12)的圖形，更能看出我們給出的訊號示一個隨機 OOK

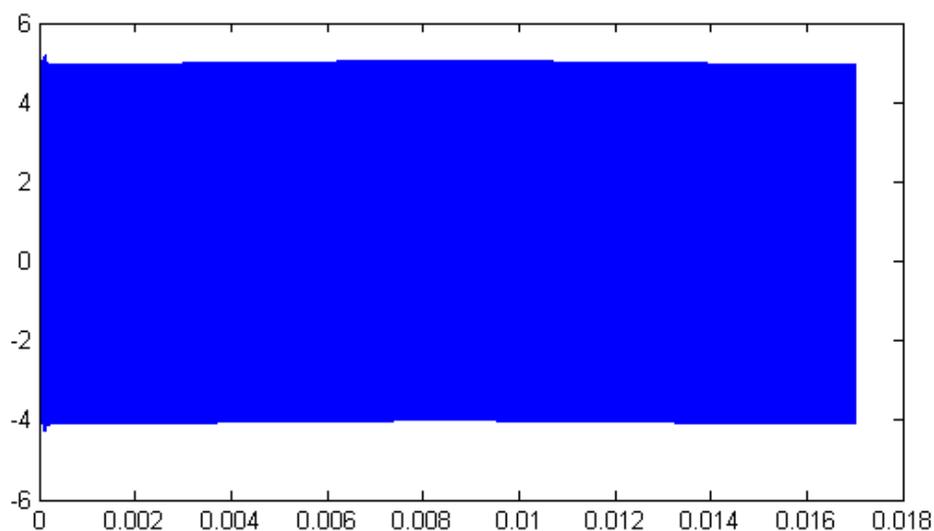


圖 3 - 11 經過調變的高頻隨機訊號

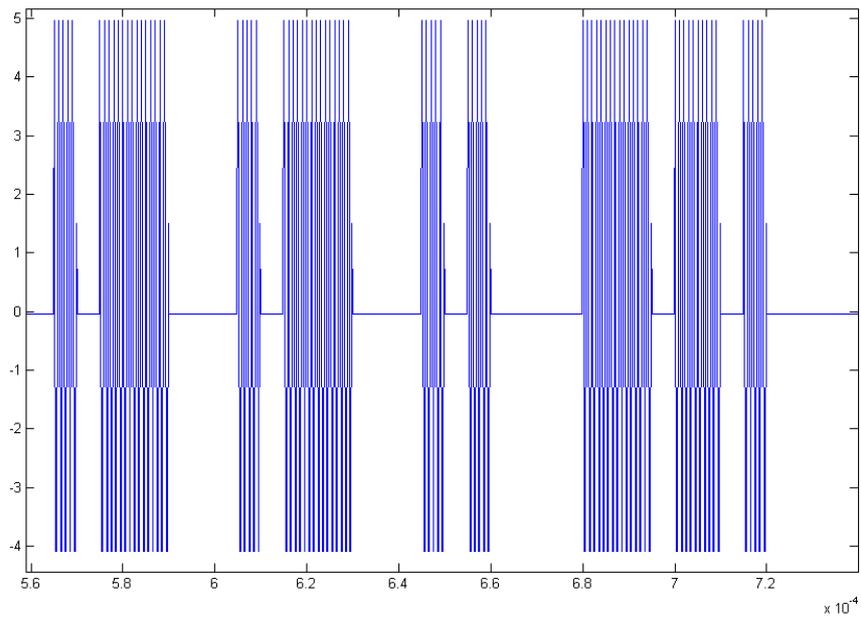


圖 3 - 12 放大後經過調變的高頻隨機訊號

b. AC 電源訊號

如圖(3-13)所示，一般室內用電源的 AC 訊號也可以由我們的模擬程式產生出來，而該 AC 訊號就是一個 60Hz 的低頻弦波訊號。

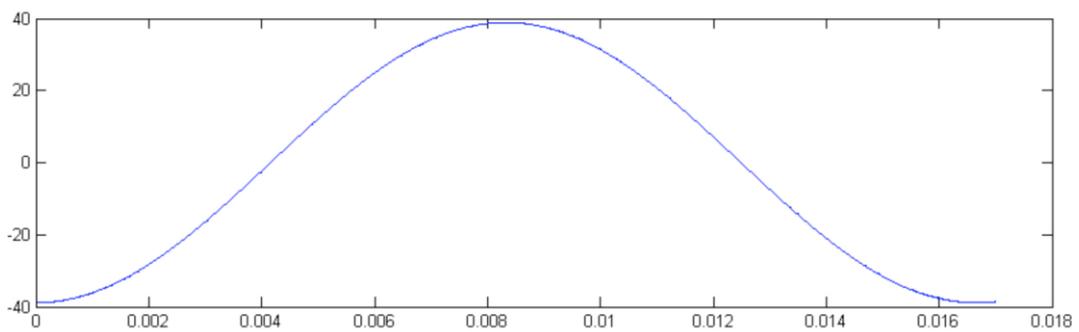


圖 3 - 13 60Hz 的 AC 交流電源訊號

### c. 供給 LED 之訊號

在我們使用 Bias Tee 的結構將低頻的 AC 電源訊號和高頻的隨機訊號疊加在一起後，就可以得到要供給 LED 的最終訊號，從圖(3-14)可以看到，該訊號的形式如同我們預期一般，是一個低頻 AC 訊號，但是該訊號上面嵌有許多的高頻隨機訊號，因此整體看來不再像是只有 AC 訊號時那樣的平滑，而是變粗了，因為上面有許多的訊號強弱分佈。如果我們將圖(3-14)局部放大後，就會看到圖(3-15)，在細部來看，該 AC 電源的弦波訊號上確實有許多隨機分布的 00K 訊號。這兩張圖即驗證了我們的實驗設計，使用 Bias Tee 確實可以透過 Super Position 的原理將低頻的 AC 訊號以及高頻的隨機訊號作結合，產生我們想要供給 VLC 系統中 AC-LED 的具有訊號的 AC 交流電。

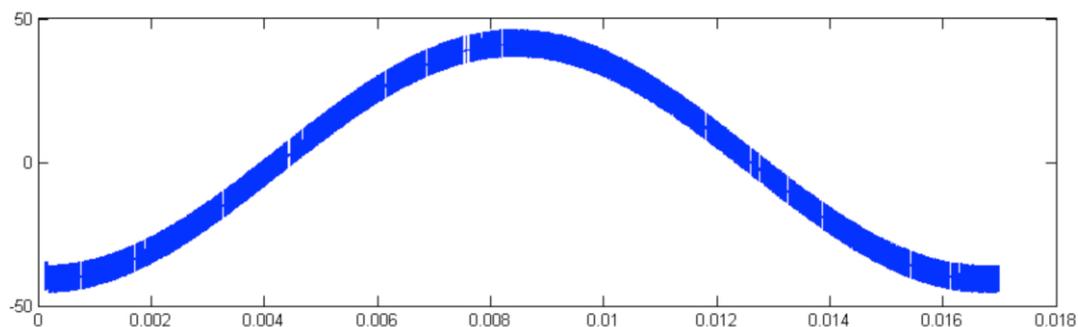


圖 3 - 14 嵌有高頻隨機訊號的 AC 交流電源訊號

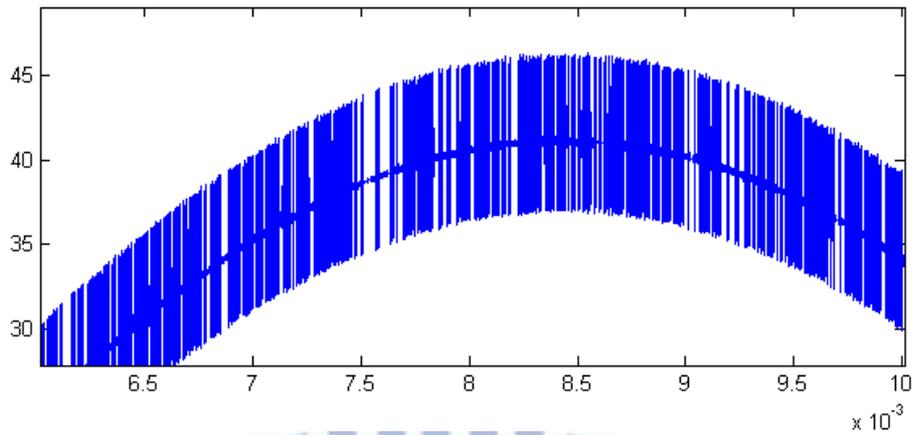


圖 3 - 15 放大後嵌有高頻隨機訊號的 AC 交流電源訊號

如果我們將 AC 電源訊號與嵌有高頻訊號的 AC 電源訊號放在一起觀察可以看到如圖(3-16)所示，兩個在時間軸上的同位子的強度是一樣的，只是一個有載訊號，一個沒有載訊號而已。

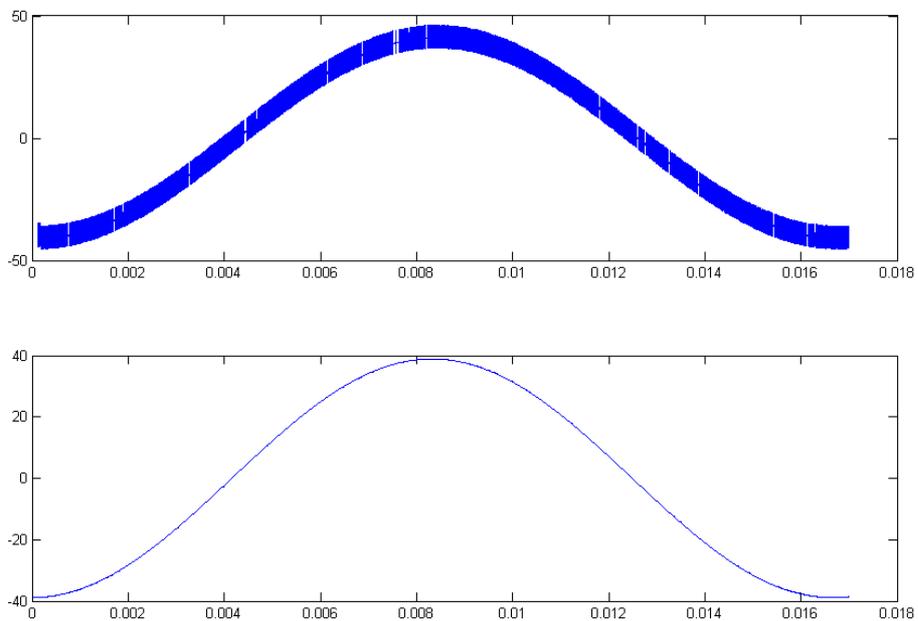


圖 3 - 16 嵌有高頻隨機訊號與未嵌有高頻隨機訊號之 AC 電源訊號比較圖

#### d. LED 實際發出之訊號

LED 接收到我們供給的含有高頻訊號的 AC 訊號後，會根據訊的強弱號發光，其發光產生的光強度與時間的關係如圖(3-17)所示。在該圖中我們可以清楚看到這是一個完整且單一週期的 AC 交流電訊號的弦波。在兩側及中央的位置 LED 的光強度會隨著 AC 訊號的震盪而改變，而在改變的同時，因為 AC 訊號上載有高頻訊號，所以同時間 LED 的光強度也是隨著高頻訊號很快的作改變。如果我們將局部的圖型放大後可以得到圖(3-18)，可以看出放大後的圖中，LED 發出的光強度確實隨著高頻訊號的改變而有所改變，其光強度的變化也是跟高頻訊號一樣是一個隨機的 OOK 訊號。

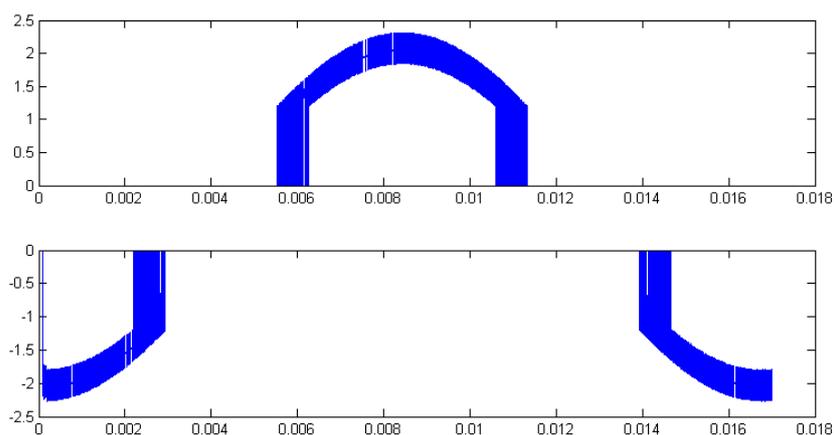


圖 3 - 17 LED 實際發出的訊號圖

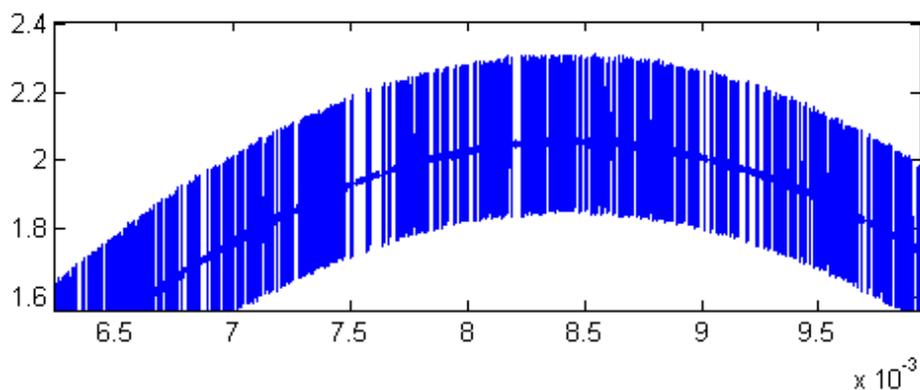


圖 3 - 18 大後的 LED 實際發出的訊號圖

e. 收到並解調出的訊號

當我用光偵測器將 LED 訊號收下來後，經過一系列的程序作解調，就會得到解調後的訊號，如圖(3-19)所示，該訊號照理說應該要和我們最一開始由 AWG 所產生的隨機 OOK 訊號要是一樣的。當我們將其局部放大後會得到圖(3-20)，可以看到他是一個稍微有點雜訊的 OOK 訊號。

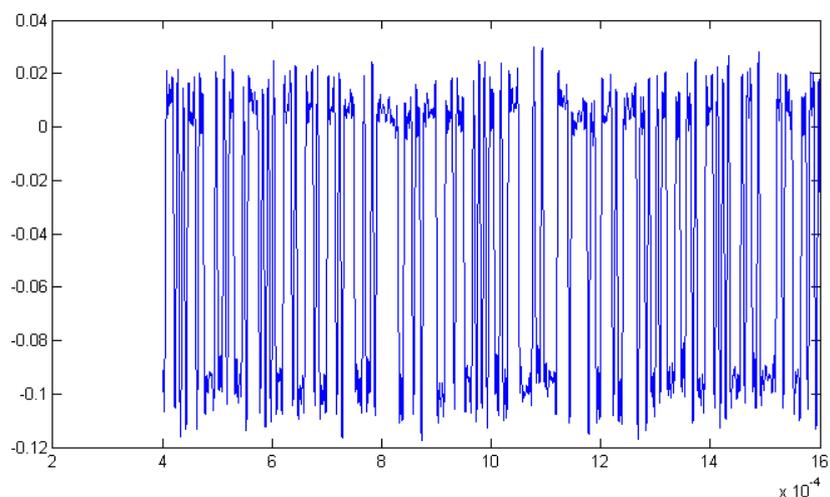


圖 3 - 19 解調後的光訊號

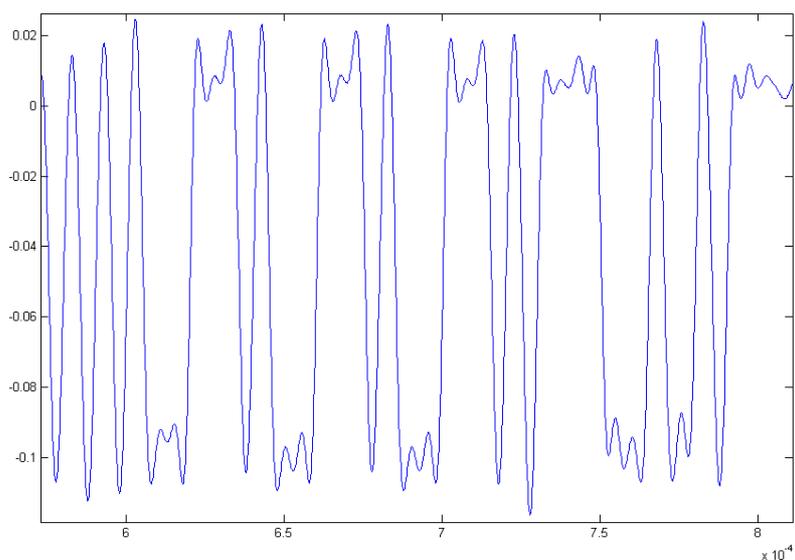


圖 3 - 20 放大後之解調後的光訊號

#### f. 眼圖

我們將解調出的訊號去做眼圖，可以得到如圖(3-21)一般的眼圖。

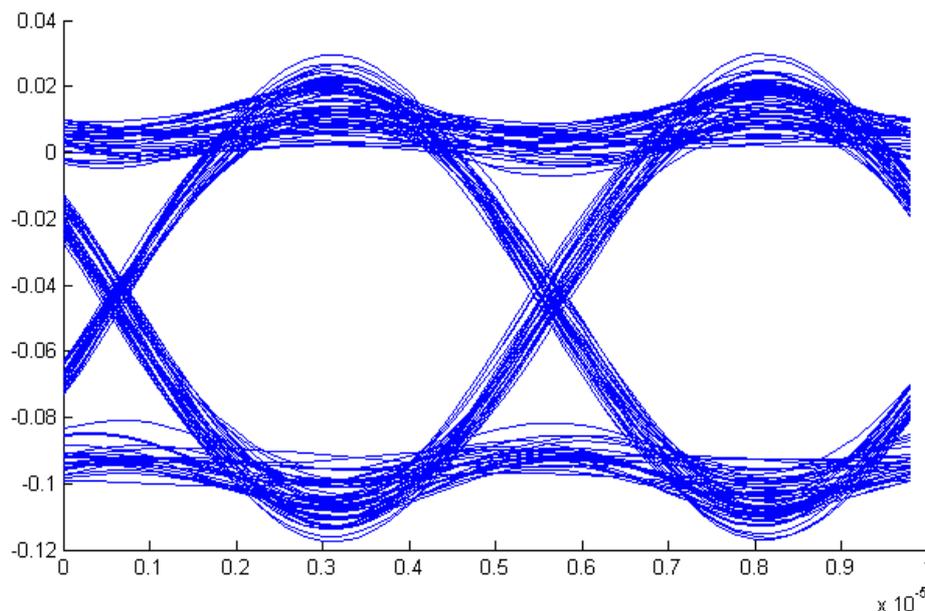


圖 3 - 21 解調後之光訊號的眼圖

由以上的模擬，我們可以知道我們的實驗架構在模擬下是可以成功的藉由 Bias Tee 的功能結合 AC 電源訊號以及高頻隨機訊號的。並且功過傳輸及解調後，可以成功的解出原始的隨機訊號，其眼圖的開眼率也很高，基本上是一個成功訊號傳輸系統。

### 3.2 室內雙向傳輸之 Cross Talk

當我們在室內需要作無線通訊的雙向傳輸(Bidirectional Transmission)時，常常會產生 Cross talk 的問題，因為一個端點除了要有發射器外，也必須內建一個接收器，這樣才能在傳輸資訊給別的端點的同時也接收來自別的端點傳

送過來的資訊，而在 VLC 系統中，因為牆壁的反射或 LED 本身發光的方向性，所以自己端點的接收器不但會接收到其他端點傳來的訊號，也有可能接收到自己端點傳送出去的訊號，造成實際希望接收到的訊號被些許的雜訊干擾。而針對這種 cross talk 的問題，以下我們回顧一篇相關的論文作為討論並嘗試改進他的系統。

### 3.2.1 文獻回顧

2008 年，T.D.C. Little、P. Dib、K. Shah、N. Barraford 及 B. Gallager 四個人發表了一篇名為 Using LED Lighting for Ubiquitous Indoor Wireless Networking 的論文。主要是針對普及的、家用的 VLC 系統作一個概略性的介紹，以及實驗的展示。而值得一題的是，該篇論文除了展示單向傳輸的 VLC 通訊系統外，同時也實際展示了雙向傳輸的 VLC 系統，並且針對可能產生的情況作分析與改進。

該實驗的架構如圖(3-22)所示，是一個非常簡單的架構，由兩台電腦分別連接兩組儀器所構成。在第一個實驗中這兩個儀器一個是發射訊號的 Transmitter，另一個是接收訊號的 Receiver。兩個都是以手電筒的外殼作包裝，在 Transmitter 端是由一系列的電路與 LED 構成的，並且與電腦連接以便控制訊號。而在 Receiver 端則是由一系列的電路與光感測器構成的，同樣的與電腦連接以便分析接收到的訊號。如圖(3-23)所示。

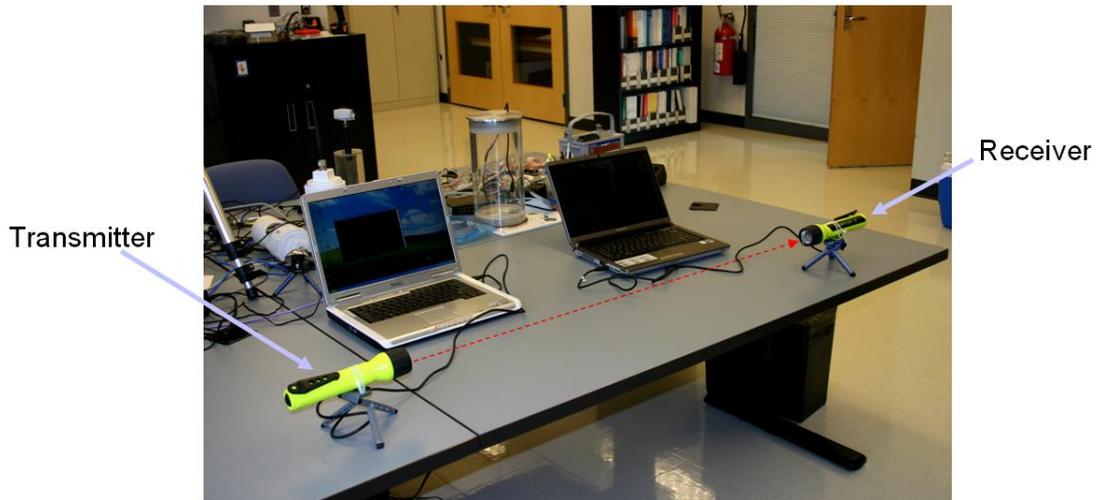


圖 3 - 22 LED 室內無線通訊系統實驗架構示意圖

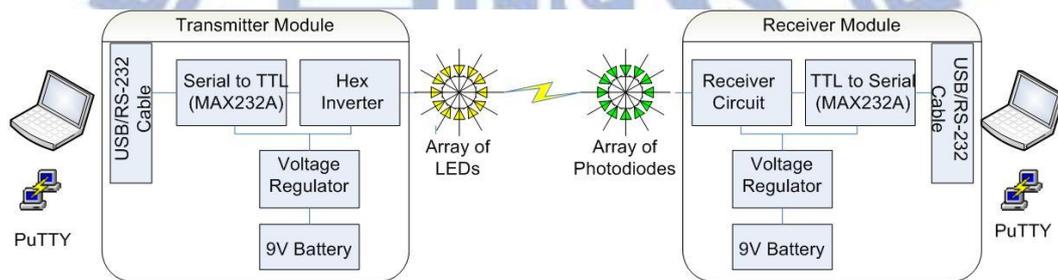


圖 3 - 23 LED 室內無線通訊系統電路架構示意圖

在第一個實驗中所展示的是單向傳輸的 VLC 系統，作者在文章中量測了 LED 與光接收器的一些特性，同也探討了 LED 數量、距離與接收位置之間的關係，算是幫室內用單向 VLC 照明系統作了一個概括的介紹。不過跟本論文正相關的部份主要是在於第二個實驗。第二個實驗所用的實驗器材與第一個實驗大同小異，基本上都是由兩台電腦連接著兩個手電筒狀的儀器，唯一不同的是，在每個手電筒中，都同時包含了七顆 LED 與三顆的光感測器。因此兩隻手電筒都可以發射訊號，同時也可以接收訊號，該種器材被稱作 Transceiver，這是一個雙向的傳輸系統。其詳細的電路設計如圖(3-24)所示。

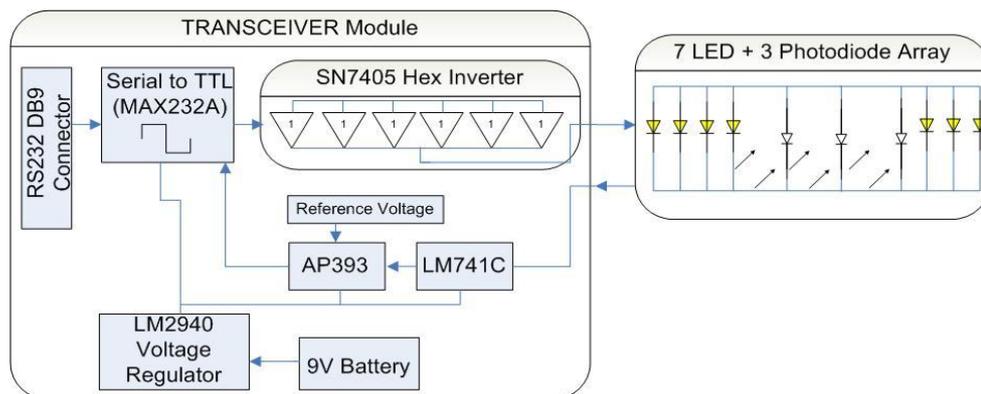
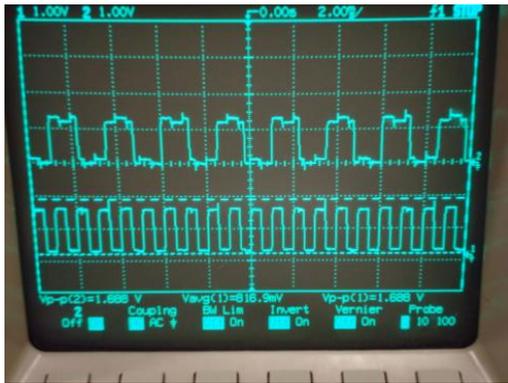
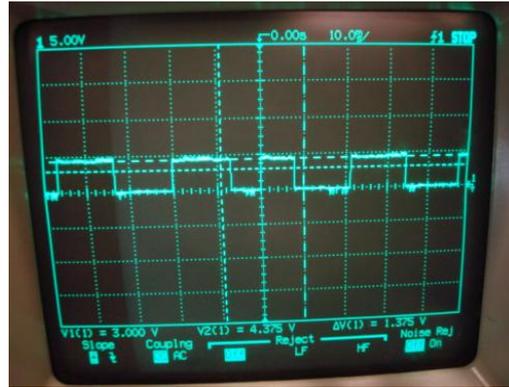


圖 3 - 24 LED 雙向傳輸電路架構示意圖

而這樣的雙向傳輸系統最大的挑戰就在於如何將手電筒內的反光鏡(用來集中光線用的)與 Transceiver 結合且不會有 Cross talk 的產生。因為光感測器需要偵測到一定強度的光線，所以我們會在 Transceiver 四周、也就是手電筒內加裝反光鏡，其目的在於在提供大範圍照明的同時，也可以讓光束中央的光線強度較高，光線較集中，讓光感測器可以收到夠強的光訊號。不過因為裝了反光鏡，所以部分自己 LED 發出的光訊號經過反射會打回自己的光感測器內，導致自己的光感測器除了接收對方傳來的訊號也會同時接收到自己端 LED 發出的訊號，進而產生 Cross talk。如圖(3-25)所示，圖(3-25. a)所表現的訊號有些許的雜訊，是因為加了反光鏡而產生了 Cross talk；圖(3-25. b)的訊號則是較為乾淨，因為圖(3-25. b)的實驗中並沒有加裝反光鏡。



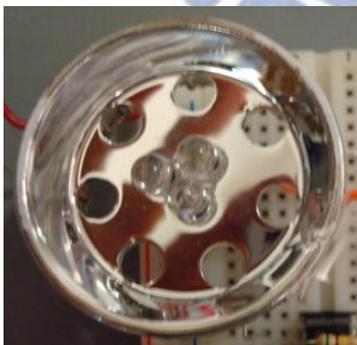
(a)



(b)

圖 3 - 25 Cross Talk 現象。(a)加裝反光鏡時產生 Cross Talk 的現象 (b)未裝反光鏡時無 Cross Talk 的現象

為了解決 Cross talk 的問題，該篇論文使用黑色電子膠帶將中央的三顆光感測器包住，圍成一個圓柱狀，希望因反射鏡反射回來的光可以被膠帶擋住，不去影響中央光感測器所收到的訊號。如圖(3-26)所示。但是該篇論文聲稱，雖然這樣的設計可以改善 Cross talk 產生的效應，但是卻沒有辦法完全消除 Cross talk。因此在該設計下，雙向傳輸的 VLC 系統仍然會受到 Cross talk 的影響導致 BER 上升。



(a)



(b)

圖 3 - 26 (a) Transceiver 之燈具設計 (b)使用黑色膠帶阻隔 LED 之反射光進入光感測器

### 3.2.2 TDD 簡介

為了解決 Cross talk 的問題，我們提出了利用時分雙工(Time Division Duplex, TDD)的方式讓光感測器不會接收到自己端點傳送出去的訊號，只接收到對方端點傳來、應該要被正確接收的訊號。

而為了設計實驗，我們首先要了解雙工的基本原理。雙工(Duplex)基本上分為兩種，半雙工(Half-Duplex)與全雙工(Full-Duplex)。所謂半雙工的系統是指該系統允許二台設備之間的雙向資料傳輸，但不能同時進行。因此同一時間只允許一設備傳送資料，若另一設備要傳送資料，需等原來傳送資料的設備傳送完成後再處理。而全雙工的系統則是允許二台設備間同時進行雙向資料傳輸。一般的電話、手機就是全雙工的系統，因為在講話時同時也可以聽到對方的聲音。而本篇論文中所使用的時分雙工(TDD)算是半雙工的一種，是利用時間分隔多工技術來分隔傳送及接收的信號。它利用一個半雙工的傳輸來模擬全雙工的傳輸過程。時分雙工在非對稱網路(上傳及下載頻寬不平衡的網路)有明顯的優點，它可以根據上傳及下載的資料量，動態的調整對應的頻寬，如果上傳資料量大時，就會提高上傳的頻寬，若資料量減少時再將頻寬降低。除了時分雙工外，還有一種是頻分雙工(Frequency Division Duplex, FDD)，是利用頻率分隔多工技術來分隔傳送及接收的信號。上傳及下載的區段之間用頻率偏移(Frequency Offset)的方式分隔。若上傳及下載的資料量相近時，頻分雙工比時分雙工更有效率。在這個情形下，時分雙工會會在切換傳送接收時，浪費一些頻寬，因此延遲時間較長，而且其線路較複雜且耗電。不過因為頻分雙工在本論文中並沒有使用在實驗上，所以在此不贅述。

因為時分雙工可以讓 LED 或是光感測器選擇要在何時傳輸訊號以及在何時接收訊號，所以當我們將時分雙工的機制應用在雙向傳輸的 VLC 系統上，一端點上的感測器不會接收到自己端點發射的訊號，因為在該端點接收對象端點發射出來的訊號的同時，自己端點的 LED 並不會發射訊號。等到自己端點的 LED 開始發射訊號的時候，該端點的光感測器將會停止接收訊號。如此一來，每個端點的光感測器都可以接收到正確的訊號，不會有自身 LED 發射的訊號的干擾，因此就可以解決 Cross talk 的問題了。

### 3.2.3 雙向傳輸系統實驗設計

為了實驗 TDD 應用在解決 Cross talk 的問題上是否有效，我們設計了一個實驗來驗證，其實驗的設計如圖(3-27)所示。

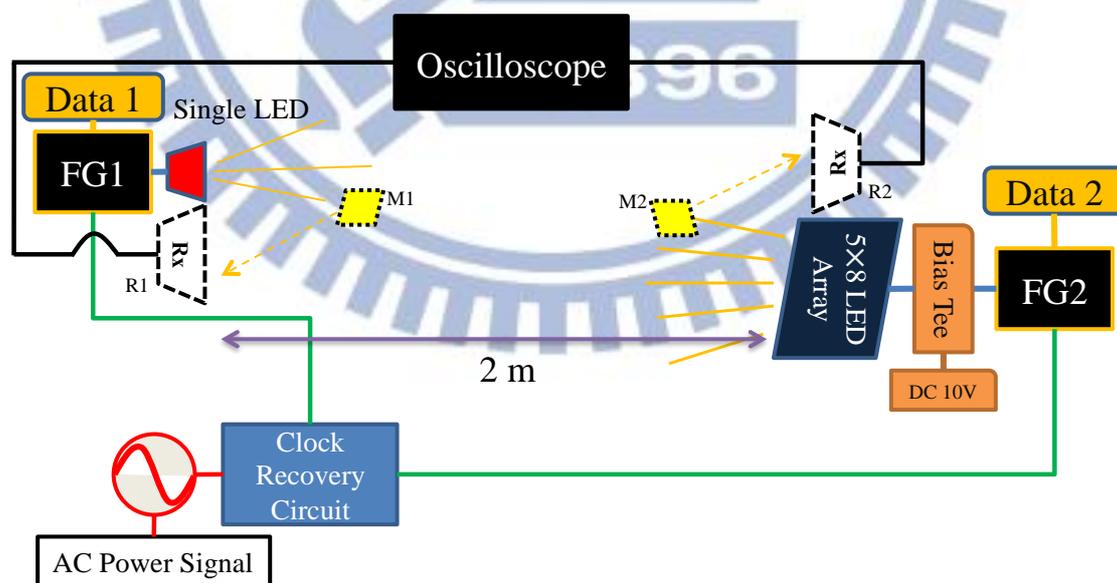


圖 3 - 27 雙向傳輸 TDD-VLC 系統實驗架構示意圖

實驗架構總共有兩個部分，分別是上傳部分和下載部分。上傳的訊號，Data1，及下載的訊號，Data2 分別由訊號產生器 1 及訊號產生器 2 所產生。而這兩台訊號產生器都是由一個 Clock Recovery 作同步，該 Clock Recovery 會根據電源的提供的 60Hz 交流電產生一個 Clock，同時同步兩個訊號產生器，用 Burst 的模式觸發他們。其中訊號產生器 1 是驅動在方波的 Falling Edge，而訊號產生器 2 則是驅動在方波的 Rising Edge。

上傳的訊號會經過調變後供給單一一顆具有聚焦透鏡的 LED 作發射，而下載的訊號則是會經過調變後供給一組以 10V 偏壓驅動且具有 40 顆(以 5X8 的方式排列)的 LED 陣列。該 LED 陣列是被設計成最大的驅動電壓是 12V。上傳端的調變格式是基頻(Baseband)的 OOK 訊號。而因為 Bias Tee 內電容的關係，下載端的調變格式是一個調變到 2.88MHz 載波上的 OOK 訊號，這是為了避免低頻的訊號被電容擋住。不過兩端的 Symbol Rate 都是 2.88MHz。

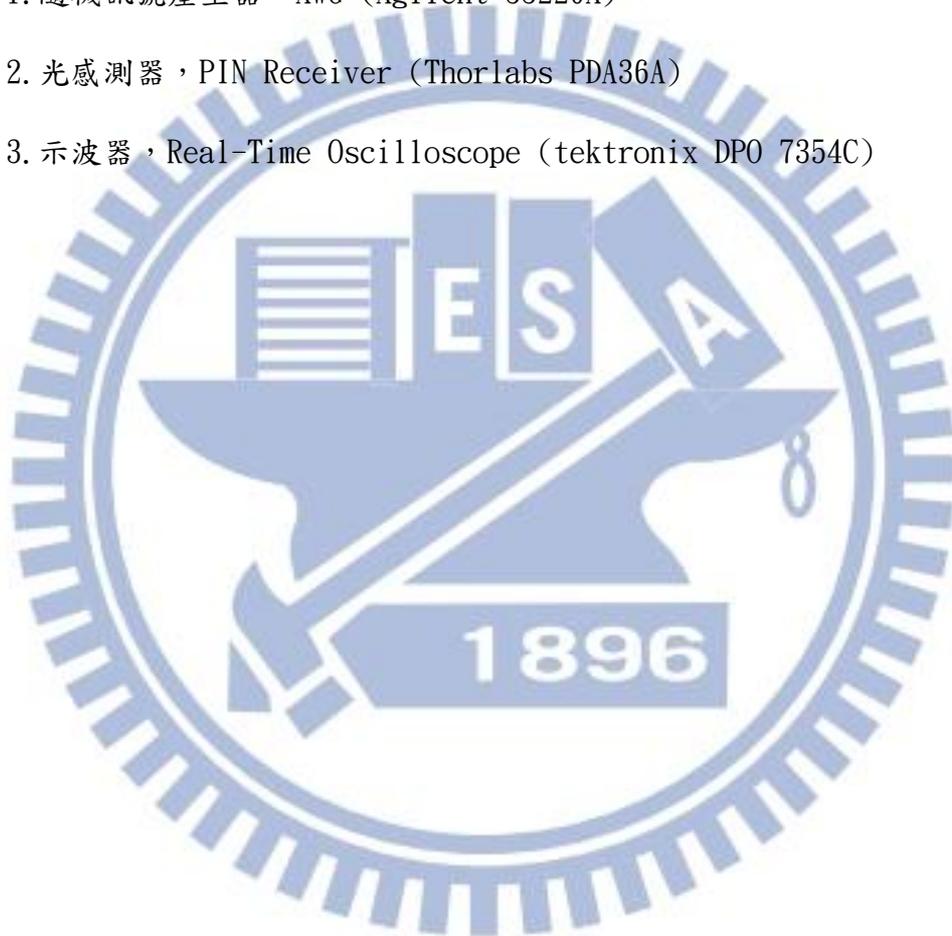
實驗中用到兩個光感測器(PIN Receiver)放置於 R1 和 R2 的位置，分別用來接收上傳端和下載端的訊號。接收到的兩組訊號都用一台示波器(Oscilloscope)分析。而為了量測因反射打回原端點接收器所產生的 Cross Talk 的效應，我們在 M1 和 M2 的位置分別放置了一個 64 平方公分的鏡子，距離光感測器大約 25 公分的距離。藉由調整鏡子的角度，我們就可以調整干擾訊號的大小。

量測用的 Clock 訊號被設定成有一個 High Level 的電壓(5V)，持續大約 8.7ms，及一個 Low Level 的電壓(0V)，持續大約 8ms。而用來傳輸的隨機訊號被 Clock 驅動在 Burst 模式，且其 Pattern 的長度為 1200 個 bit。下載訊號在

8.7ms 的時間內重複了 20 個週期，上傳的訊號則是在 8ms 的時間內重複了 19 個週期。而因為我們的時間間隔夠常，所以照理來說是可以避免 Cross talk 的產生的。

而此實驗所使用的儀器及規格詳述如下：

1. 隨機訊號產生器，AWG (Agilent 33220A)
2. 光感測器，PIN Receiver (Thorlabs PDA36A)
3. 示波器，Real-Time Oscilloscope (tektronix DPO 7354C)



## 第四章實驗結果與討論

本論文中，我們提出了兩個實驗架構，一個是利用 Bias Tee 將交流電源與高頻隨機訊號結合在一起透過 LED 作可見光通訊的傳輸，另一個是利用 TDD 技術降低 VLC 系統在雙向傳輸時的 Cross talk 現象。這兩個實驗我們都有許多的成果，將會在本章節中詳細敘述與討論。

### 4.1 AC-Power Based VLC System

以下章節中，我們詳細敘述該實驗相關的理論分析以及實驗的結果與討論。

#### 4.1.1 理論分析

對於在基頻(Base Band)我們希望傳輸的 OOK 隨機訊號我們可以以數學的形式表示如下：

$$s_1(t) = p(t) * \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) + 1$$

這是在 Time Domain 下的數學形式，而經過傅立葉轉換可以得到在 Frequency Domain 下的數學形式如下式：

$$S_1(f) = P(f) \times \text{sinc}\left(\frac{f}{F}\right) + \delta(f)$$

在式子中， $p(t)$ 代表一個 one-period discrete-time bipolar pseudo random binary sequence，其值是以 1 和 -1 做隨機的變換。在實驗中，我們的設定  $F = \text{Baud rate} = 200\text{K}$ ，然後  $T$  為  $5\mu\text{s}$ 。

如果  $P(t)$  的長度夠長(在實驗中長度為 1000 個點)，經過傅立葉轉換後，他會變成是一個涵蓋很大頻率範圍的常數。之後又與一個 sinc function 做相乘，因此最後在 PSD(Power spectrum Density) 上的圖形就會是一個有 sinc function 的 envelop 的圖形。再經過 Up-Convert 後，設定期載波為 400K，其數學形式可以表示成：

$$S_2(f) = S_1(f - 400K) + S_1(f + 400K)$$

將  $S_2$  取絕對值以後，我們可以將它的頻譜以及 AC 電源的頻譜一起畫在一張 PSD 圖形上，如圖(4-1)所示，該頻譜就是 Bias Tee 端點輸出的頻譜。在該 PSD 圖中我們可以看到經過 Up-Convert 的高頻訊號的頻譜跟低頻的 AC 訊號是很明顯被分離的，因此在解調的時候，我們可以很輕易的將低頻的 AC 訊號濾掉。換言之，因為低頻 AC 電源與高頻隨機訊號兩者頻譜重疊的非常不明顯，所以可以將高頻訊號成功的解調出來而不會受到低頻 AC 電源訊號的干擾。

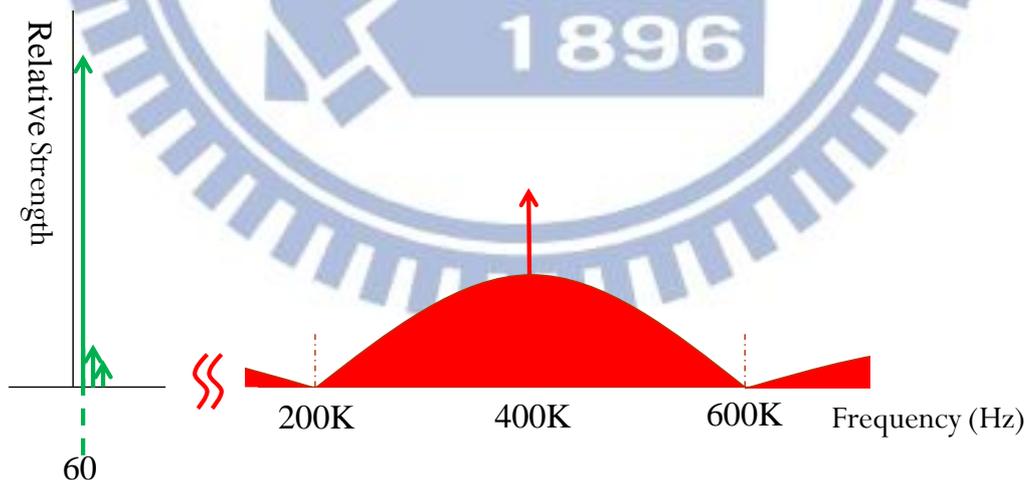


圖 4 - 1 Bias Tee 輸出端的訊號頻普

## 4.1.2 Clock Recovery

為了讓高頻訊號可以載在正確的 AC 訊號上，我們設計了一個 Clock Recovery 來同步 AC 交流電源訊號以及高頻隨機訊號，讓 AWG 所產生的高頻訊號可以放在我們希望的 AC 訊號的位置上。其 Clock recovery 的運作方式如圖(4-2)所示，基本上我們會產生一個方波來跟 AC 訊號的弦波作對應，方波上升的位置會對應弦波特定的位置，在本實驗中我們選擇是在弦波起始位置後一點點的位置。而這時 AWG 設定是在 Burst 的模式，所謂 Burst 模式是指當我們的同步方波是在上升的時候，訊號由低到高的時候，AWG 就會給出一串我們想傳輸的高頻隨機訊號。其中還有一個可以設定的是 Burst Cycle，如果 Burst Cycle 是設定在 1 Cycle 表示，當方波是上升訊號的時候，AWG 會給出一串，在本實驗中是設定 1000 個 bit 的隨機訊號。而當 Burst Cycle 是設定在 2 Cycle 的時候，當方波是上升訊號的時候，AWG 會給出兩串，也就是總共 2000 個 bit 的隨機訊號。而這些隨機的 OOK 訊號都會經過 Up-Converted 之後，跟 AC 訊號疊加在一起。疊加以後會傳送至我們的 LED，讓 LED 發光，LED 發出的光線在經過 2 公尺的距離傳輸後，由光感測器接收並由示波器分析。

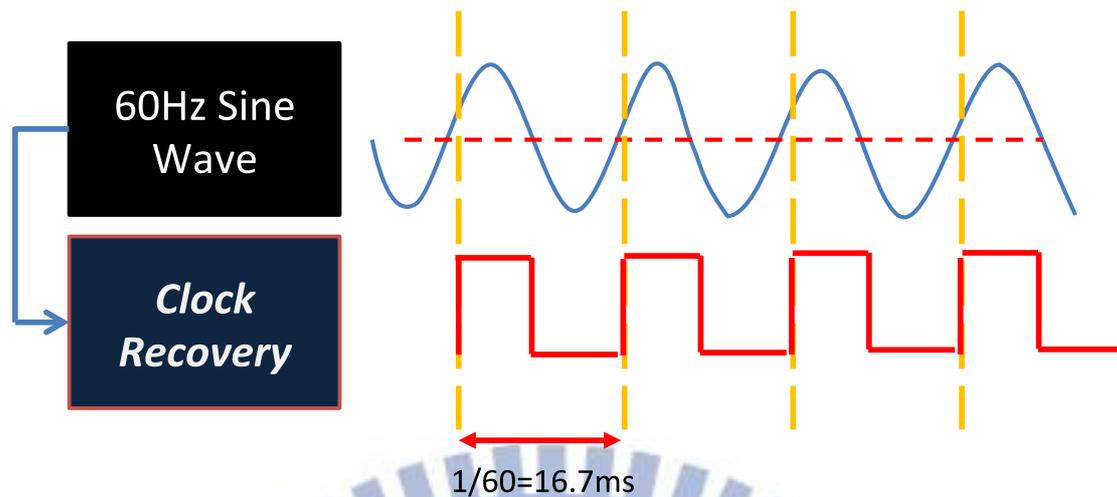


圖 4 - 2 Clock Recovery 機制示意圖

#### 4.1.3 接收到的 VLC 訊號

當我們用光感測器將 LED 發出的光訊號接收後，我們可以在示波器上面看到在 Time Domain 下的 VLC 訊號的訊號圖，如圖(4-3)所示，圖(4-3.a)表示的是 Burst 模式設定在 Burst Cycle 等於 1 Cycle 的時候收到的訊號圖，可以清楚看到在 AC 訊號的上面有許多高頻的訊號分佈，而因為我們設定 Baud Rate 是 200Kbps，所以換算下來 1000 個 bit 大約會持續 5ms，所以在示波器上，有訊號的 AC 訊號的部份也是只有 5ms 左右的範圍。而因為 AC 訊號的頻率是 60Hz，所以一個週期的 AC 訊號長度大約為 16.7ms，而經過整流以後，一個正半邊的 AC 訊號長度大約為 8.3ms，但是因為 LED 需要電壓高於一定的臨界電壓才有辦法發光傳輸訊號，因此如果給 LED 的訊號低於臨界電壓的話 LED 是不會發光的，而這段期間就算有給訊號，光感測器也是沒辦法接收到訊號，所以在是波器上看到光感測器接收的訊號會比我們實際給 LED 的訊號還要短，大約只有 5.4ms 的長度左右。

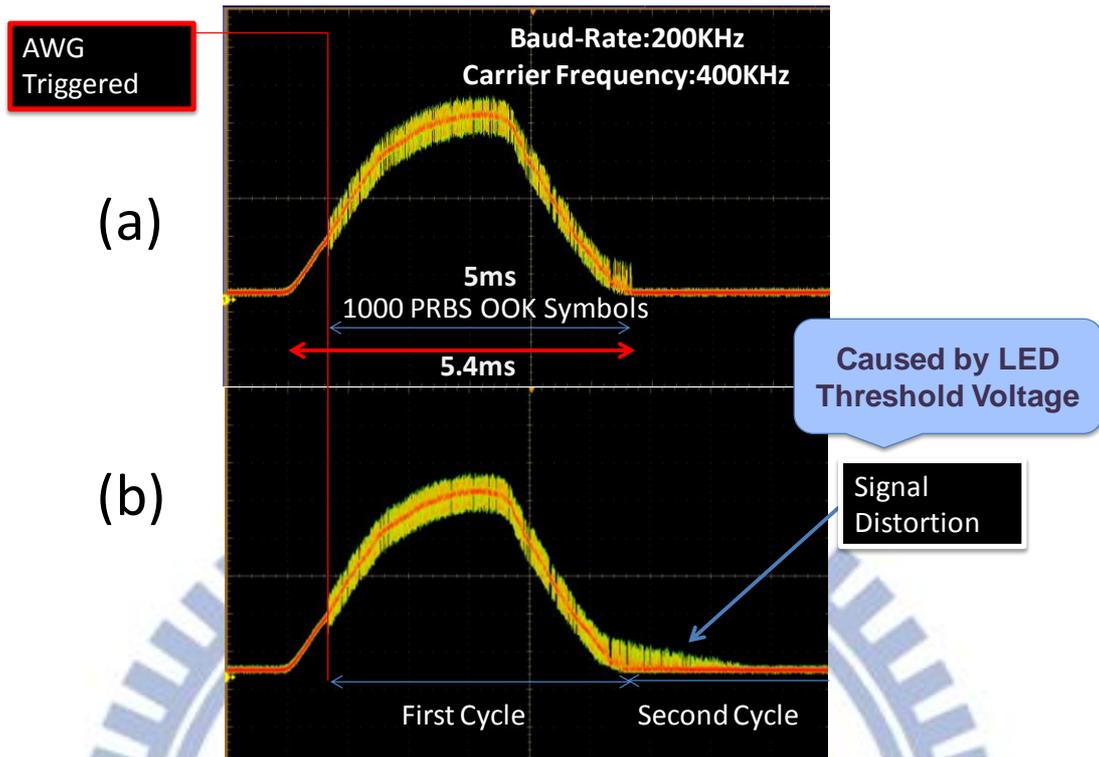


圖 4 - 3 嵌有高频訊號的 AC 訊號圖 (a)Burst Cycle = 1 (b) Burst Cycle = 2

當我們將 Burst 模式設定在 Burst Cycle 等於 2 Cycle 的時候，收到的眼圖如圖(4-3. b)所示。理論上供給 LED 的高頻 OOK 訊號應該要持續 10ms，但是因為 LED 臨界電壓的關係，所以在 5ms 以後，訊號就會受到影響而衰減，甚至沒有辦法正確的調變了。因此，在一個以 AC 交流電作為電源的 VLC 系統中，並不是整段的 AC 電源訊號都可以嵌入高频訊號，因為當 AC 電源訊號強度不夠高的話 LED 是沒有辦法發光的，因此就算在那一段 AC 訊號中嵌入高频訊號也是沒有意義的，因為訊號根本不會被 LED 傳送出來。所以整個訊號傳輸的過程必須考慮到使用 AC 交流電時同步的問題以及訊號有可能被截斷的問題。不過訊號被截斷的問題之後可以透過後端軟體的修正，將不同時間傳輸出來的訊號作串接，品質理論上不會有太大的問題，只是整體的訊號會因為時間差的關係被延遲了。

#### 4.1.4 訊號分析

整個訊號處理的第一個階段是用光感測器接收到訊號然後用示波器來表示，如圖(4-4)所示，圖(4-4. a)表示示波器上看到的在 Time Domain 的訊號圖，那是一個 AC 訊號加上高頻訊號的訊號圖。而因為這個訊號同時包含了低頻的 AC 訊號以及高頻的訊號，所以我們將它送到一個帶通濾波器(Band Pass Filter)去做濾波，而該帶通濾波器可以通過的頻率為 200KHz 至 400KHz，所以訊號經過該帶通濾波器後，可以濾掉低頻的 AC 訊號及雜訊，進而得到如圖(4-4. b)部分所示的訊號，這是一個經過 Up-Converted 的 OOK 隨機訊號。而這個經過 Up-Converted 的 OOK 隨機訊號接下來會被送到一個包含 Mixer 和低通濾波器(Low Pass Filter)的機構內做處理。先用 Mixer 將被 Up-Converted 的 OOK 隨機訊 Down-Converted 到 Baseband，然後經過 Low Pass Filter 後濾掉兩倍頻的訊號。如此一來就可以得到我們原先希望傳輸出去的隨機 OOK 訊號。而這個解調後的原始訊號，我們可以用眼圖(Eye Diagram)來分析他的好壞，進而得知整個系統在訊號傳輸上能力的強弱。

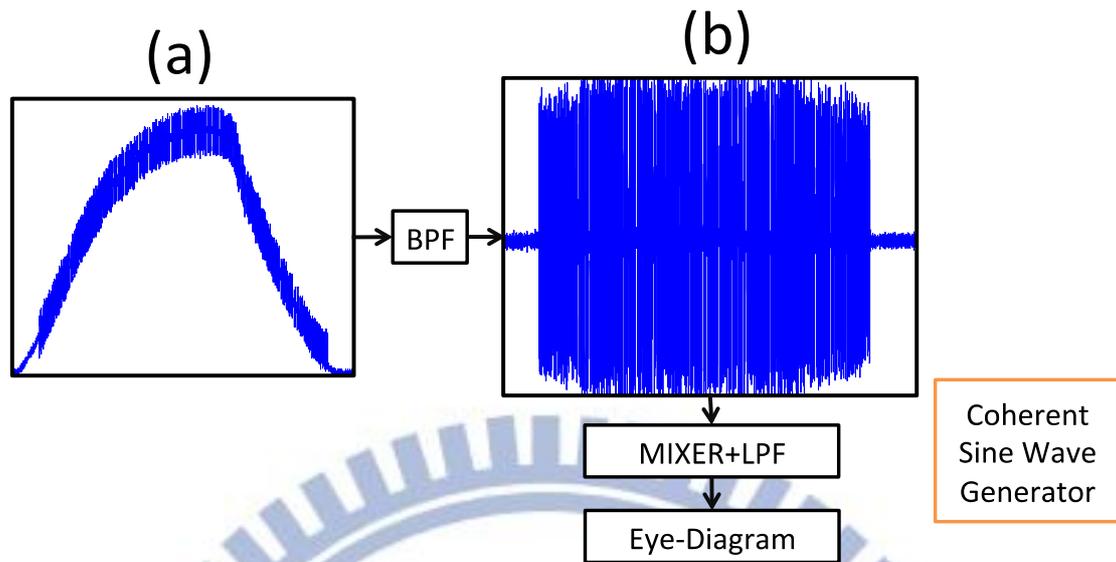


圖 4 - 4 訊號分析階段圖

#### 4.1.5 眼圖

我們將解調下來的訊號去做眼圖，可以得到如圖(4-5)所示之眼圖。經過計算我們可以得到該被解調下來的訊號的 Q 常數(Q Factor)是 5.6925，而 Bit Error Rate(BER)是  $6.2579 \times 10^{-9}$ 。從眼圖的開眼率來看我們可以發現其實這組經過解調的訊號是大部分可以被成功的解調出來的，也就是可以收到大部分正確的訊號，不會有太多的雜訊或失真。

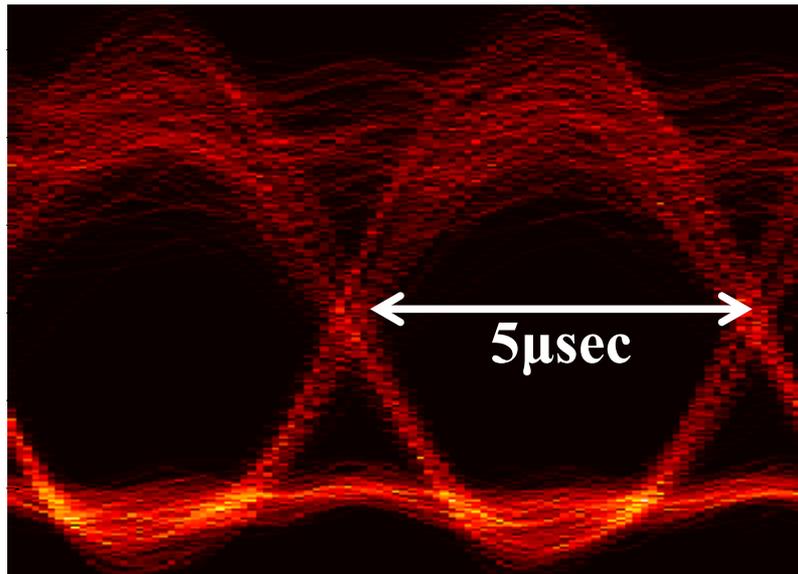


圖 4 - 5 AC-LED Based VLC 系統訊號眼圖

經過計算，我們原本是設定傳輸的速率、Baud Rate 是在 200Kbps，但是因為我們的 AC 訊號經過半波整流，所以實際存留下來的 AC 訊號只有一半，另一半的 AC 訊號都被歸 0 了。然後因為 LED 點亮的臨界電壓的關係，所以整段正半邊 AC 訊號可以載入高頻訊號的區塊也有限制，在部分時段因為 AC 訊號振幅沒有超過 LED 的臨界電壓，所以是不能載上訊號的。因此，平均算起來，我們這個 VLC 系統傳輸的訊號速率大約是 60Kbps。而因為我們實驗中所用的 LED 還是原本的 DC-LED，雖然我們證實了靠著 Bias Tee 可以將高頻訊號與低頻的 AC 訊號結合，但是本質上使用的 LED 並沒有改變。如果未來我們將 LED 從 DC-LED 改變成 AC-LED 的話，將可以讓 AC 訊號的正半邊和負半邊同時傳輸訊號，因此可以將訊號傳輸的速率提昇至 120Kbps。

## 4.2 TDD 機制應用在雙向 VLC 系統

本章節中，我們針對之前提出的利用 TDD 機制來解決 VLC 系統雙向傳輸時 Cross Talk 問題的實驗給出實驗結果及詳細的討論。

### 4.2.1 上傳端訊號處理

針對 R2 端的接收器接收到的訊號來看，收到的訊號與眼圖如圖(4-6)與圖(4-7)所示。圖(4-6)為未加反射鏡時收到的訊號。因為我們使用了 TDD 的技術，所以訊號會分成兩段，一段是上傳端發出的訊號，一段是下載端發出的訊號。當我們沒有放置反射鏡的時候，下載端發出的訊號不會因為反射而打入位在 R2 的光感測器。因此從圖(4-6)我們可以看到，只有在其中一個區塊有高頻的訊號，該訊號就是上傳端的發射器傳送過來的訊號。而下載端的訊號是幾乎沒有被接收到，因此 TDD 機制成功的利用時間差分離了兩個不同端點的訊號。此時針對上傳端所發出的訊號製作眼圖，可以量測出它的 BER 大約為  $4.7976 \times 10^{-6}$ 。因此該上傳端所發出的訊號是可以很清楚且正確的被接收的。不過在該圖中我們也可以看到，上傳端的訊號中心點並不是在 0 的位置，而沒有高頻訊號的部份也不是在 0 的高度，這是因為我們 AWG 上 Start Phase 設定的問題，如果未來設定上能夠在精細做調整，就可以將沒有高頻訊號的部份歸零。或是使用高通濾波器，即可將低頻的訊號濾掉變為零，也不會有斜斜的情況產生。

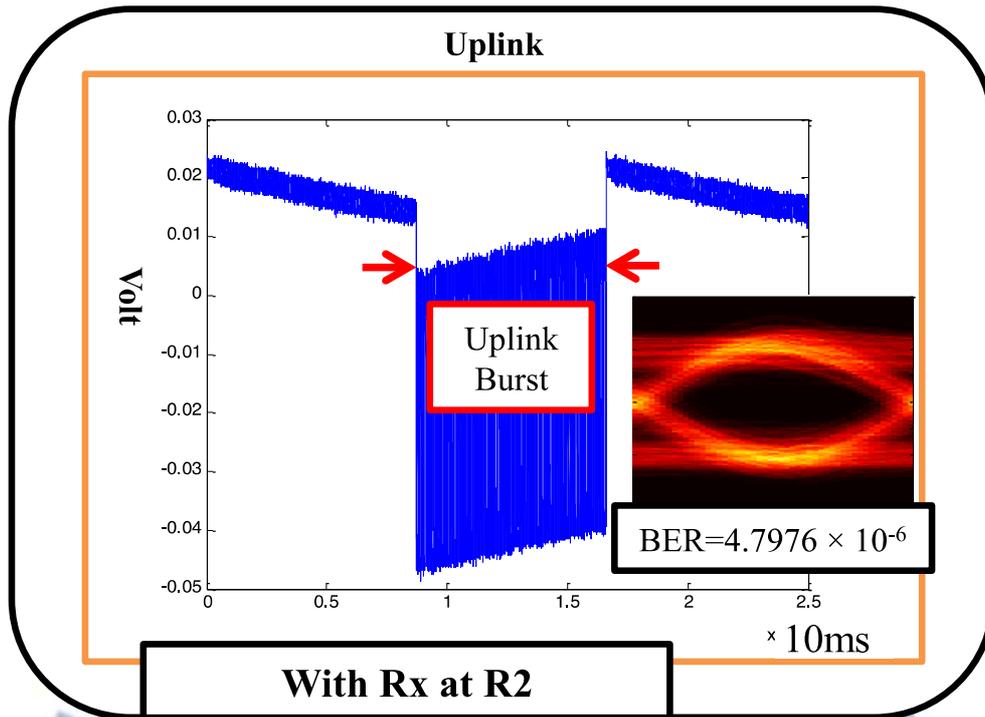


圖 4 - 6 未加反射鏡時，R2 位置光感測器接收到之訊號

若我們在 R2 位置上的光感測器前面加了一個反射鏡，用來反射下載端的訊號至光感測器裡，這時從接收到的訊號圖表，如圖(4-7)所示，我們會接收到兩個訊號，一個下載端的訊號，一個是上傳端的訊號，但是因為我們使用 TDD 的技術，因此在圖中我們可以清楚的看到兩個訊號被分離了。而且從上傳端的訊號的眼圖來分析，其 BER 大約是  $4.71 \times 10^{-6}$ ，跟未加反射鏡時的 BER 相差不多，因此就算我們加了反射鏡將下載端的訊號反射至 R2 位置的光感測器內，因為 TDD 機制的作用，所以不會影響到上傳端訊號的接收。雖然光感測器還是可以接收到下載端的訊號，但是我們可以指定接收器或是後端的訊號處理機制在特定時間內接收訊號即可，如此一來即可以指定我們想接收訊號的時間，讓不是在該接收時間內的傳送到光感測器的訊號不會被接收到。

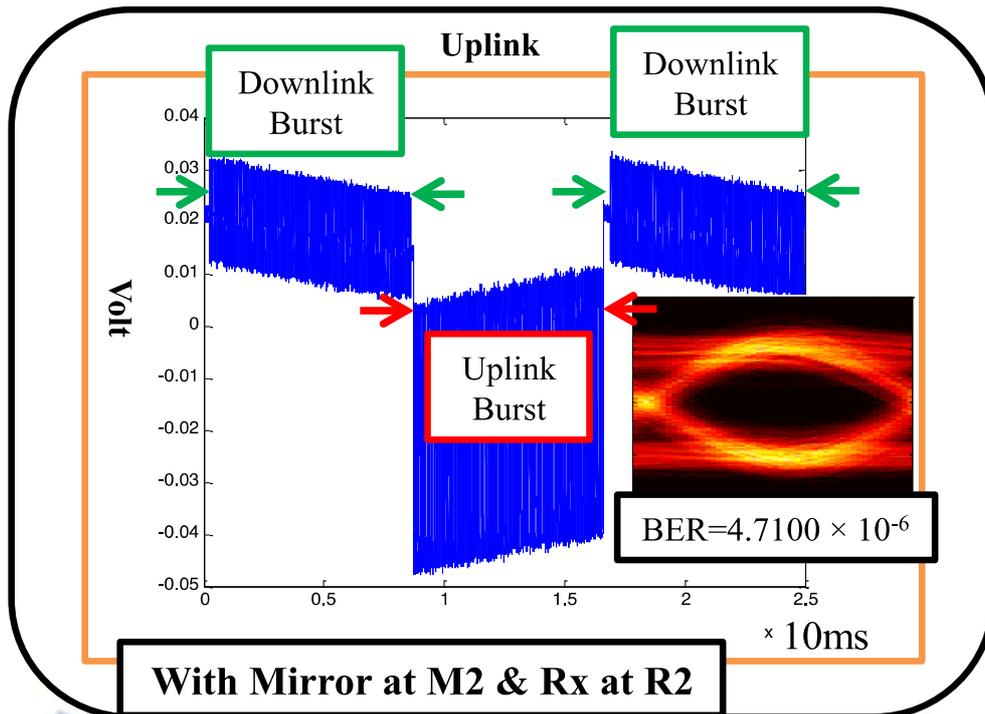


圖 4 - 7 加反射鏡時，R2 位置光感測器接收到之訊號

#### 4.2.2 下載端訊號處理

針對接收器位置位在 R1 時接收到的訊號，我們也做了以下的分析。在 R1 位置的接收器主要是用來接收下載端的訊號用的。當我們沒有放置反射鏡的時候，收到的訊號如圖(4-8)所示，只有其中一段時間間隔裡有高頻訊號，就是下載端所發射出來的訊號。將其訊號製作眼圖，可以算出他的 BER 為  $5.2568 \times 10^{-6}$ 。而這個位置的接收器所接收到的訊號中心點都是在零的位置，是因為發射端有連接一個 Bias Tee，所以相當於一個高通濾波器，因此我們接收到的訊號都會以零點為對稱點不會有圖(4-6)和圖(4-7)中兩個不同 burst 訊號會有高低差的情況產生。

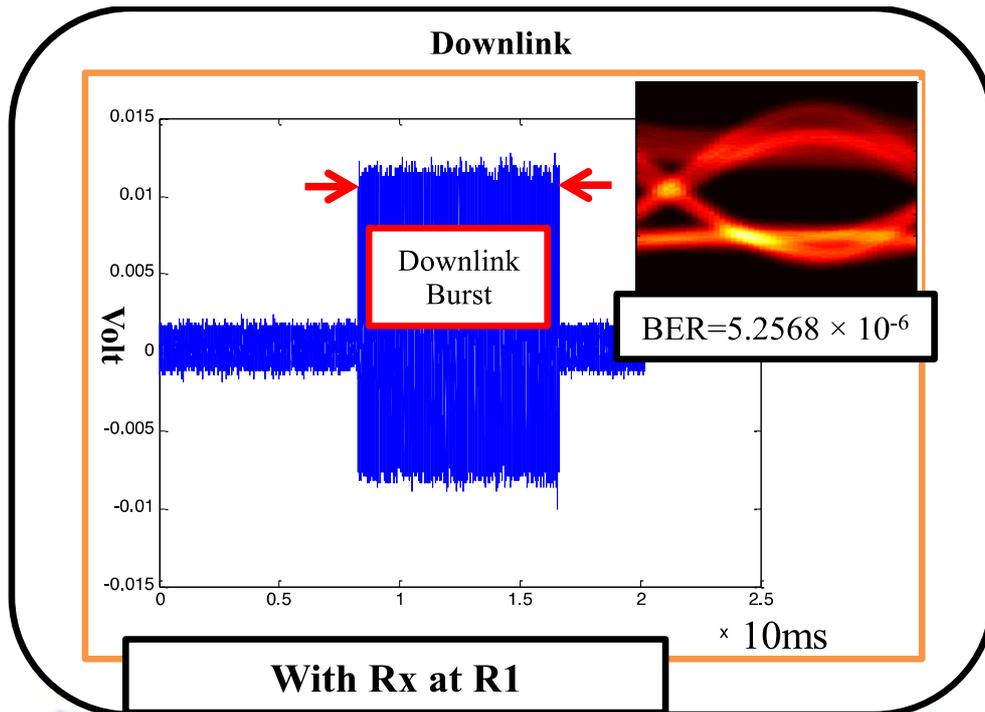


圖 4 - 8 未加反射鏡時，R1 位置光感測器接收到之訊號

當我們增加了一個反射鏡，將上傳端所發出的訊號反至光接收器內，此時接收到的訊號會如圖(4-9)所示。此時在另一個Burst區域會接收到上傳端的訊號，而因為該上傳端的訊號沒有與Bias Tee連接，所以整體訊號的高度會因為AWG設定上的不同有所改變，也因為上傳端的訊號有斜斜的高低差，所以當他跟下載端的訊號疊加在一起後，會輕微的影響到下載端的訊號的品質。因此當我們做眼圖並計算BER後，發現BER大約等於 $1.8893 \times 10^{-5}$ 稍微上升了，表示訊號的品質稍微變差了。可是從眼圖的開眼率可以發現其訊號的品質還是可以接受的，雖然BER有稍微上升，但是基本上仍然是可以正確的接收到大部分的訊號。

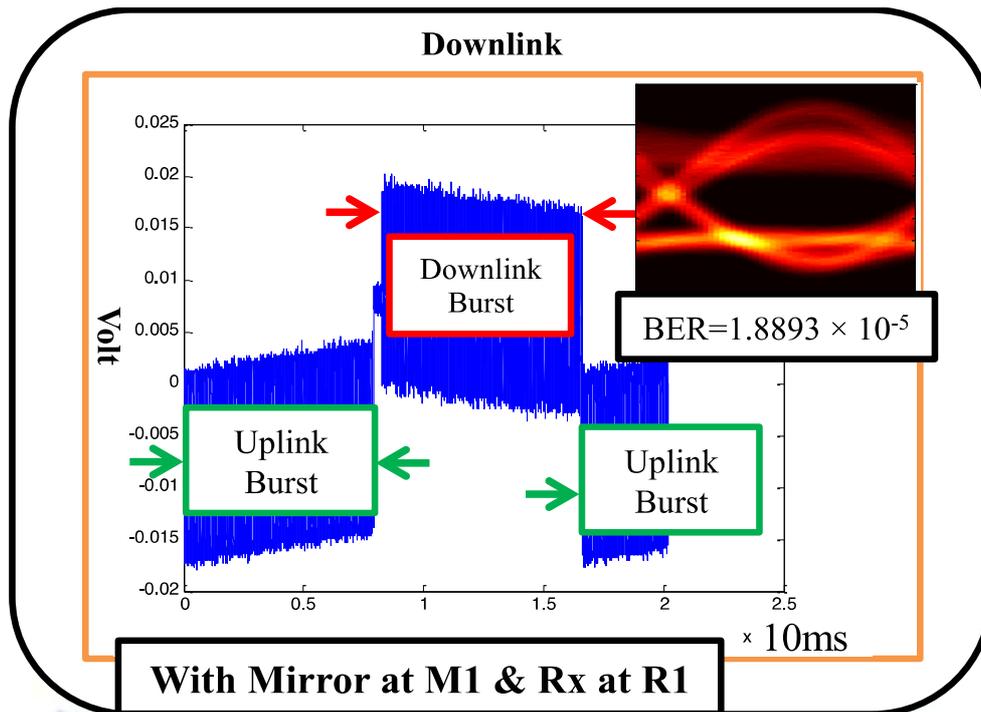


圖 4 - 9 加反射鏡時，R1 位置光感測器接收到之訊號

#### 4.2.3 有無 TDD 機制的比較

為了比較有沒有 TDD 機制的差異，我們量測了兩組數據及眼圖，如圖(4-10)所示，圖(4-10. a)為有使用 TDD 機制的眼圖，其 BER 為  $4.7976 \times 10^{-6}$ ，圖(4-10. b)為沒有使用 TDD 機制的眼圖，其 BER 經量測為  $1.6209 \times 10^{-5}$ 。因此我們可以得知，當一個雙向傳輸系統沒有使用 TDD 機制的情況下，眼圖會變得比較差一點，且 BER 也會跟著上升，Cross Talk 的效應就會出現。所以要改善 Cross Talk 的問題，我們可以使用 TDD 機制來做改善。

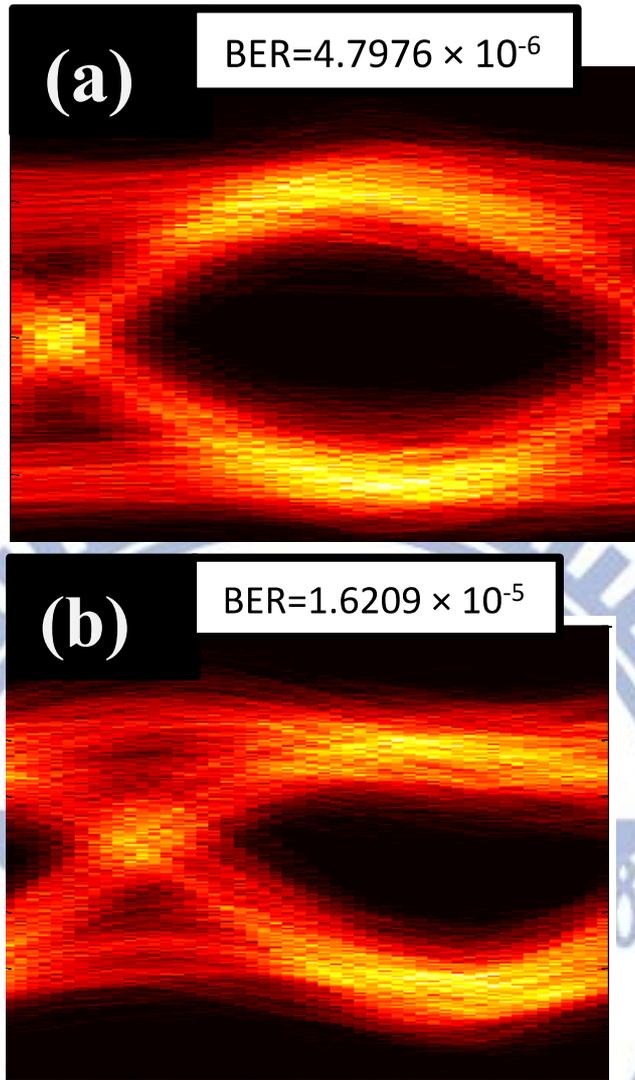


圖 4 - 10 有無 TDD 機制眼圖比較圖 (a)有使用 TDD 機制 (b)沒有使用 TDD 機制

## 第五章總結與未來展望

在這篇論文中，我們總共提出了兩個實驗來解決現今 VLC 系統與照明系統結合時常會遇到的問題。一個是利用 Bias Tee 將 VLC 系統與一般 AC 電源供應系統做整合，使 LED 可以直接利用交流電的電源來傳輸訊號，另一個是利用 TDD 的技術將一個端點傳輸訊號及接收訊號的時間錯開，用以解決 Cross Talk 的問題。

在第一個實驗中，我們證實了靠著利用 Bias Tee 這個元件，可以將低頻的 AC 訊號以及高頻需要被傳輸的訊號做結合，供給 LED 使用。而 LED 發出的光訊號經過光感測器的接收，從其訊號的眼圖我們也可以得知，其眼圖的開眼率很高，BER 大約是  $6.2579 \times 10^{-9}$ ，因此大部分的訊號都可以正確的被接收，使用在通訊系統上是沒有問題的。而在這個實驗中，我們傳輸的訊號的 Baud Rate 是 200Kbps，若是計算其平均的 Data Rate 速率也有 60Kbps。因此就速率來說，比之前其他團隊做過的研究快上一百多倍，在傳輸的速率上是有很大的進步。

不過因為在我們實驗中，我們使用的 LED 依然是 DC-LED，所以只能利用到一半的 AC 電源訊號，如果未來我們將 DC-LED 換成真正的 AC-LED，就不需要半波整流器，可以利用到整個 AC 電源訊號，因此傳輸的 Data Rate 可以再加一倍，變成 120Kbps。另外，如果未來如果我們使用的 LED 剛好是已經被設計成直接使用 110V 或 220V 的電壓的話，將可以不需要實驗中的變壓器，更可以減少能量的損耗。

總結來說，關於第一個實驗未來可以繼續進行的計畫如下：

- a. 使用 AC-LED 當做光源，將實驗架構中的半波整流器拿掉，讓 AC-LED 可以使用整段 AC 訊號，將 Data Rate 倍增
- b. 設計 LED 的製成或是排列，讓一組 LED 的驅動電壓剛好差不多是在 110V 或 220V，借此省去實驗架構中的變壓器，節省成本開銷及能量損耗。

至於第二個用來解決 Cross Talk 的實驗，我們成功的利用 TDD 的機制讓下載端與上傳端傳送訊號的時間分開，如此一來，單一一顆接收器在接收訊號的時候，自己端點的發射器就不會傳輸訊號，因此該接收器就不會接收到自己端點發射器所發射的訊號，因此也不可能會有 Cross Talk 的問題出現。在使用 TDD 機制後，我們比較了有無反射鏡時收到訊號的差異，發現差異不大，眼圖的開眼率都差不多，BER 也沒有明顯的上升，表示 TDD 確實能讓反射造成的 Cross Talk 效應消失。

而在比較有無 TDD 機制下收到的眼圖也可以發現，有 TDD 時的訊號的眼圖，與沒有使用 TDD 時訊號的眼圖相比，沒有使用 TDD 的眼圖較差，眼較小，因此更能確定 TDD 確實可以降低 Cross Talk 帶來的效應。

雖然在我們的實驗中證實使用 TDD 機制可以消除 Cross Talk 的效應，但是因為 TDD 將時間分割了，所以可以傳訊號的時間被縮減為一半，因此整體的傳輸速率會降為一半，這將會是未來需要改善的部份。

而縱觀本篇論文，我們一開始詳細介紹了 VLC 系統的歷史與基本架構，之後針對該系統目前存在的問題與其相關的基礎理論作詳細的討論，進而引導出本論文所做的實驗的動機，然後再回顧以往其他團隊所作的相關研究的結果，提出一個我們原創、且可以改進先前研究的結果的實驗。該實驗在模擬結果的支持下，實際實驗得到的結果也如我們預期，確實可以解決我們希望解決的兩個主要的問題：“AC 交流電源與高頻訊號的結合”以及“雙向傳輸時 Cross Talk 的現象”。我們相信，有了這些結果，LED Based VLC 系統在室內無線傳輸的應用會更加可行，距離商品化的實現也是指日可待了。

LED Based VLC 系統的設計並非是要用來取代現有的 Radio Frequency 的通訊技術，而是希望能針對他特有附加價值，例如安全性、隱私性……等做應用，讓無線通訊的技術更完整，使人們可以在不同的環境中選用最適合的通訊技術。在未來，若能成功與照明系統做整合，且相關的元件的生產成本可以再降低的話，VLC 系統的應用一定可以更加廣泛，普及率也會大幅的提升，為人類未來的生活帶來更多的便利。

## 參考文獻

- [1] <http://www.redchina.tv/China/> 烽火臺。
- [2] D. C. O'Brien, L. Zeng, L. M. Hoa, G. Faulkner, J. W. Walewski and S. Randel, "Visible Light Communications: challenges and possibilities", Proc. of PIMRC, 2008.
- [3] J. Grubor, S. C. J. Lee, K.D. Langer, T. Koonen and J. W. Walewski, "Wireless High-Speed Data Transmission with Phosphorescent White-Light LEDs", Proc. Of ECOC, 2007.
- [4] H. L. Minh, D. O'brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung and Y. Oh, "High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization", Photonics Technology Letters, IEEE, vol.20, pp.1243, 2008
- [5] <http://www.pohai.org.tw/> 手術室財團法人羅東博愛醫院。
- [6] <http://www.mikroelektronik.fraunhofer.de/> 機艙內 VLC 通訊系統。
- [7] <http://www.ledinside.com.tw/> LED 產業網。
- [8] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung and Y. Oh, "80Mbit/s Visible Light Communication Using Pre-Equalized White LED", ECOC, vol. 5, pp.223, 2008.
- [9] D. Lee, K Choi, Ki-Doo Kim and Y. Park, "Visible light wireless communications based on predistorted OFDM", Optics Communications, vol. 285, pp.1767, 2012.
- [10] Z. Wang, C. Yu, Wen-De Zhong, J. Chen and Wei Chen, "Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light

- communication systems”, Optics Express, vol. 20, pp.4564, 2012.
- [11] Y. F. Liu, Y. C. Chang, C. W. Chow and C. H. Yeh, “Equalization and Pre-distorted Schemes for Increasing Data Rate in In-door Visible Light Communication System” Proc. of OFC, 2011.
- [12] Y. F. Liu, Y. C. Chang, C. W. Chow, C. H. Yeh and H. C. Kuo, “In-Building LED Lighting System with Communication using Pre-compensation Scheme for Increasing the Modulation Data Rate”, Proc. of MOC, 2010.
- [13] S. O. Kasap, “Optoelectronics and Photonics Principle and Practices”, Pearson Press.
- [14] 廖啟男, “三原色發光二極體操作特性研究”, 國立中山大學電機工程學系碩士論文, 民國 97 年七月。
- [15] 黃漢毅, “高速氮化鎵發光二極體”, 國立中央大學電機工程學系碩士論文, 民國 95 年 6 月。
- [16] <http://web.cyut.edu.tw/bin/home.php>
- [17] US Patent, No.20060007679
- [18] <http://www.eeworld.com.cn/LED>
- [19] <http://www.eenote.com/hardware/ac-powered-led/>
- [20] <http://college.itri.org.tw/>
- [21] F. L. Jenq, Y. C. Pu and W. C. Du, “An AC LED Smart Lighting System with White Light FSO Communication”, IEEE, vol. 2, pp.488, 2010.
- [22] F. L. Jenq, T. J. Liu and F. Y. Leu, “An AC LED Smart Lighting System with Visible Light Time-Division Multiplexing Free Space Optical Communication”, IEEE, pp.589, 2011.

## 著作列表

研討會

Y. F. Liu, **C. W. Lai**, C. W. Chow and C. H. Yeh, “AC-Power-Signal-Biased LED Modulation Method for Ubiquitous Visible Light Communication”, Proc. of WOCC, 2012.

