

利用升頻相位調變的 CATV 傳輸系統

Fiber Optical CATV Transport Systems Based on Upconversion Technique and Phase Modulation Scheme

吳柏逸、呂海涵、應誠霖、溫建穎、胡富智

Po-Yi Wu, Hai-Han Lu, Cheng-Ling Ying, Jian-Ying Wen, Fu-Chih Hu

在 CATV 傳輸系統中，採用升頻技術和相位調變方式來減少系統引起的雜訊和失真已經被提出並證實了。相對於使用常見的強度調變方式的 CATV 傳輸系統，在我們提出的系統中同樣傳輸 100 公里的單模光纖，擁有更好的載波雜訊比、二次拍差比與三次拍差比。這驗證了擬議系統的可行性，並揭示一個優異的傳輸性能。

A fiber optical CATV transport system that employed an upconverted technique and a phase modulation scheme to reduce noise and distortion induced by system is proposed and experimentally demonstrated. In contrast to a fiber optical CATV transport system that used a conventional intensity modulation scheme, excellent performances of carrier-to-noise ratio, composite second order, and composite triple beat are obtained in our proposed systems over a 100 km single-mode fiber transmission. It verifies the feasibility of the proposed systems and reveals an outstanding one with excellent transmission performances.

一、引言

光纖微波系統 (radio over fiber, RoF)，如圖 1 所示，透過低傳輸損耗的光纖來傳送微波訊號，可以將微波訊號傳送到更遠的地方。在光纖微波系統架設之後，大範圍、高傳輸量的無線通訊便能夠在用戶端的室內建築或房間中實現。圖 2 為光纖微波系統架構示意圖，在中控台內，將要傳送的無線射頻 (radio frequency, RF) 訊號藉由電／光轉換器 (electric to optic converter) 調變光載波，並透過

光纖當作傳輸媒介做長距離的傳輸。當光訊號傳達到基地台時，經過光／電轉換器 (optic to electric converter) 將訊號轉換成無線射頻訊號後，藉由天線 (antenna) 輻射至大氣中。透過使用光纖微波系統，可以大幅延長傳輸距離，簡化了基地台建置的數量，達到了降低成本以及延長傳輸距離的目的。

藉由結合無線通訊和光纖通訊技術上的優勢，可以直接在光領域上處理高頻訊號，以較低頻的射頻訊號源來產生高頻的射頻訊號，克服了在傳統電訊號上有限的取樣速度。藉由光纖微波系統，使

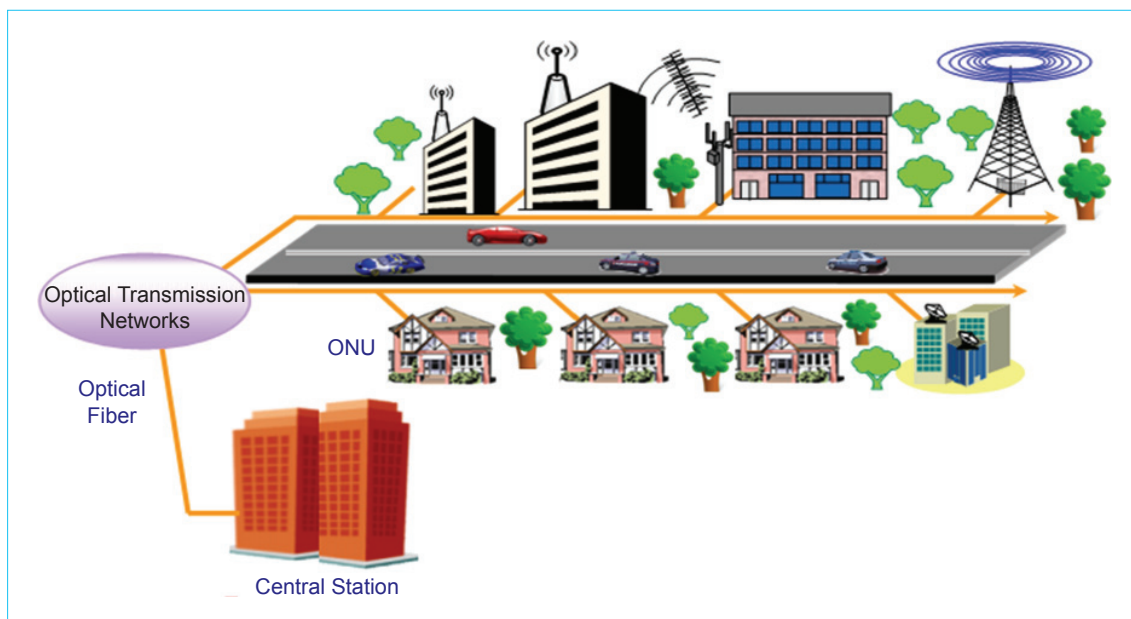


圖 1.
光纖微波系
統示意圖。

微波信號處理簡單且經濟化，並讓使用者能夠享受充足的頻寬與漫遊的便利性。在光纖微波傳輸系統上從直接調變 (direct modulation) 雷射開始傳送訊號，如圖 3 所示，利用改變雷射的電流得到輸出光功率的變化，藉此來傳送資料。而直接調變輸出光所能達到的頻率則受限於雷射本身的頻率響應，依照一般價錢規格的雷射，其上限頂多能到 5 GHz 左右，這時候光纖微波技術就受到了瓶頸必須尋求突破，因此就又發展出了外部調變 (external modulation) 的方式，如圖 4 所示。由於外部調變所使用的馬赫詹德調變器 (Mach-Zehnder modulator) 可以將更高頻率的載波 (目前一般實驗用約 40 GHz) 調變在光上面進行傳輸，以上為直調以及外調傳輸形式說明。

二、實驗目的

CATV 接取網絡在全球已經歷了巨大的變化。CATV 傳輸系統的高畫質要求已經普及整個有線電視行業。然而 CATV 系統傳輸性能能否被接受則是受限於載波雜訊比 (CNR)、二次拍差比 (CSO) 與三次拍差比 (CTB) 等參數⁽¹⁻⁴⁾。

由於 CATV 信號傳輸光功率通常需要大於 10 dBm，但如此高的光功率將引起各種非線性而導致系統損害，因此減少在 CATV 傳輸系統的功率損失，已成為系統設計人員面臨的挑戰。至今已經提出幾種方法改善 CATV 傳輸系統的整體表現，儘管如此，還是需要複雜的邊帶濾波、外部光注入鎖定和差分檢測等技術⁽⁵⁻⁷⁾。此外，當所有頻道都載入時，很難

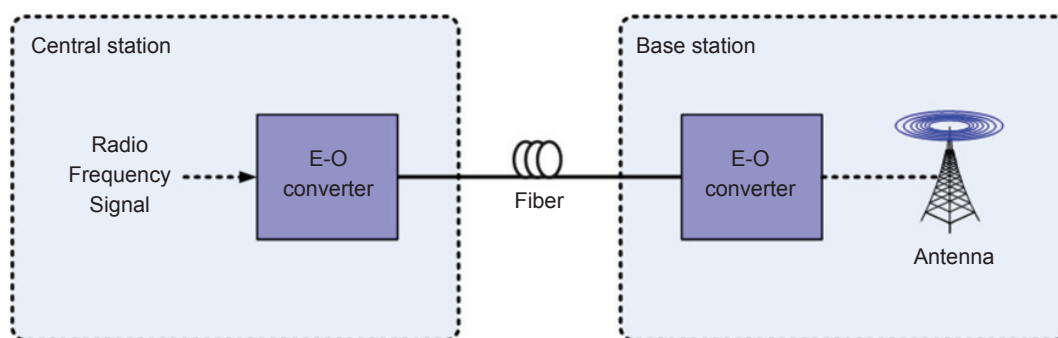


圖 2.
光纖微波系統架構
示意圖。

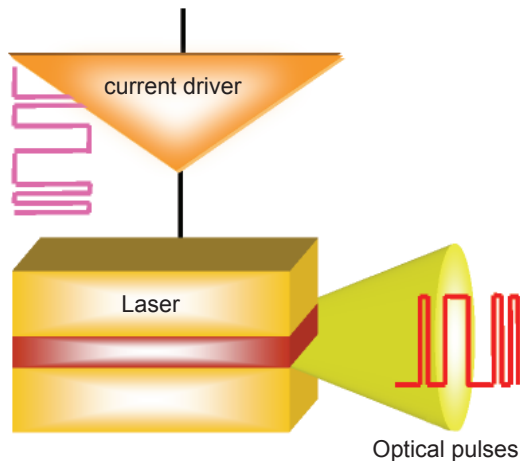


圖 3. 直接調變雷射示意圖。

獲得良好的 CNR、CSO 與 CTB 性能，因此系統的性能可以由使用相位調變 (PM) 方式改善。

三、有線電視參數量測定義

實驗中進行幾項有線電視訊號參數量測。(1) CNR 參數：為檢測端偵測到訊號會連雜訊也一同接收到。此雜訊強度大小隨時間而不斷改變，是一個隨機的變數。而 CNR 值就是信號最大強度與隨機雜訊強度的比值。要傳遞影像的最低需求，CNR 值至少需 43 dB，或可看見「雪花」現象。在以光纖為架構的 CATV 系統中，CNR 值會隨著光強度的增加而能有更好的表現。而為了得到較高的光強度而提升雷射的輸出功率，伴隨而來的是雷射溫度的上升，雖然雷射都會配備溫控，但是只要溫度改變就會有溫度範圍的擾動。而這溫度的擾動，使得熱載子與晶格碰撞產生熱雜訊，其與導體的電阻與溫度成正比。(2) CSO 參數：為載波合成二次拍差，恰好落在被干擾頻道內視頻載波 (visual carrier, f_c) 相關位置 $f_c \pm 0.75$ MHz，或是 $f_c \pm$

1.25 MHz 處，即認定形成干擾。如果 CSO 小於 53 dB，將會造成電視畫面的對角線水波紋，干擾收視品質。(3) CTB 參數之定義：載波合成三次拍差恰好落在被干擾頻道內視頻載波所在位置，即認定形成干擾。如果 CTB 小於 53 dB，將會造成電視畫面的水平水條紋，干擾收視品質。

四、相位調變系統之工作原理

極化光源的相位是可以藉由光電材料加以控制的，例如說鋰酸鋰 (LiNbO_3)。如圖 5 所示，這是以鋰酸鋰材料為基底材料所製成的相位調變器，從相位調變器的剖面圖可以得知其結構包含電極片 (electrode) 和波導 (waveguide)，波導中的折射率可以藉由外加適當的電壓大小從電極片輸入至波導加以控制，當極化光從單模光纖 (single-mode fiber) 進入波導後，因為折射率的改變，也因而改變極化光的相位態。

五、光纖傳輸中影響系統效能的現象

非線性效應最大的特色就是，光纖中的材料特性參數與入射光功率大小彼此相關。反之，材料特性參數與入射光功率大小無關，則稱為線性效應。光纖中常見的非線性效應可分為受激散射效應 (stimulated scattering effects) 與非線性折射率效應 (nonlinear refractive index effects) 兩大類。

1. 受激散射效應 (Stimulated Scattering Effects)

(1) 受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS)

當入射光子的光功率大於一個值 (拉曼起始功

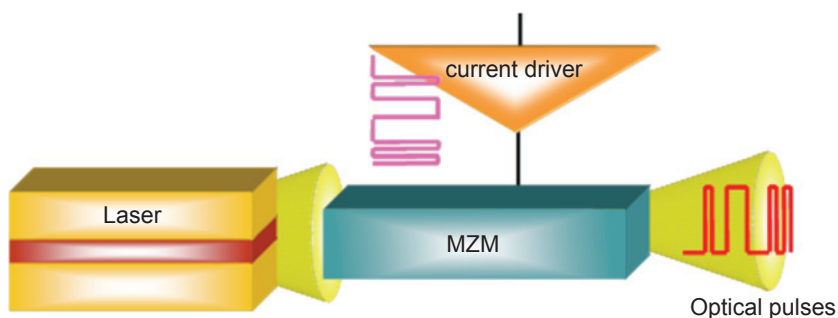


圖 4. 外部調變雷射示意圖。

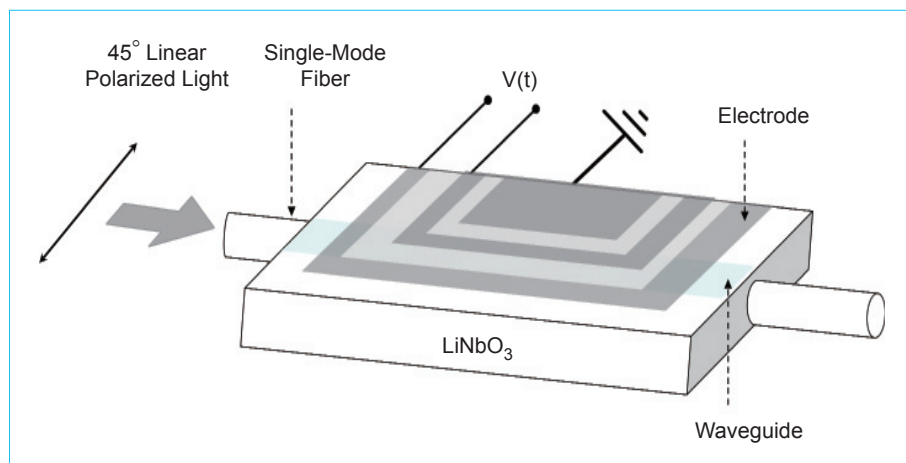


圖 5.
相位調變器的結構與原理。

率) 時，光子具有的能量有部分會被晶格吸收，晶格攜帶的能量稱為光波聲子 (optical phonon)。形狀與晶格的大小會影響入射光子能量轉換的程度。此程度的差異是根據散射光子的頻率不同進行分析，以拉曼飄移稱之。以光纖 (SiO₂) 為例，拉曼飄移約為 13 THz。

(2) 受激布理淵散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS)

當入射光子的光功率大於布理淵起始功率 P_{th} 時，光子部分能量會被晶格所吸收，晶格所吸收的能量以音波聲子 (acoustic phonon) 稱之。由於布理淵起始功率與晶格能帶皆比拉曼散射的數值來得小，因而有較短的飄移，布理淵尖峰飄移約 10 GHz。

2. 非線性折射率效應 (Nonlinear refractive Index Effects)

當入射光強度夠強時，使得光纖折射率隨入射光強度而改變，這些因折射率改變所產生非線性效應，以下幾類是較典型的例子。

(1) 自相位調變 (Self Phase Modulation, SPM)

當入射光脈衝強度夠強，光纖折射率就會產生改變，進而影響光脈衝的相位，這種脈衝相位改變是因脈衝自身強度因素造成的，故稱為自相位調變。由於脈衝中包含許多波長，而相位變化量會因不同波長，有不同的變化量，故會造成脈衝色散 (dispersion)，使脈波寬度變寬，影響通訊頻寬。

(2) 交互相位調變 (Cross Phase Modulation, XPM)

當有兩個或多個波長各自攜帶不同訊息在光纖中傳遞時，非線性相位移量不僅會由本身波長引起，鄰近波長亦會交互影響，故稱為交互相位調變。

(3) 四波混合調變 (Four Wave Mixing, FWM)

假設有三個波長其載波頻率分別以 f_1 、 f_2 及 f_3 在光纖中傳遞時，根據非線性理論會產生第四個頻率 f_4 滿足 $f_4 = f_1 \pm f_2 \pm f_3$ 之關係式，故稱為四波混合調變。上式正負組合皆為可能產生的頻率，事實上，大部分組合頻率皆無法產生，必須滿足相位匹配 (phase-matching) 的條件。

在 CATV 傳輸系統中利用 PM 有定功率的特性下操作，預計將有良好的表現⁽⁸⁾。不同於傳統的強度調變 (IM) 方式，PM 系統利用光學相移來載送信號，有較強抗雜訊和抗失真能力。在文獻中，PM 系統只集中在數位通訊系統⁽⁹⁻¹⁰⁾。然而，在本文中我們提出並實驗證明的升頻 CATV 傳輸系統，採用了 PM 的方式來減少由系統引起的雜訊和失真。相對於一個 CATV 傳輸系統採用了傳統的 IM 的方式，我們提出的系統同樣在 100 公里的單模光纖 (SMF) 傳輸下，CNR、CSO 和 CTB 有更優異的性能。因此引入升頻技術和 PM 的方式到 CATV 傳輸系統得到了明顯的改進。

六、實驗架構

圖 6 為串聯三個摻鉕光纖放大器的 CATV 傳輸系統。圖 6(a) 中的系統 I 為使用強度調變器的傳統 CATV 光纖傳輸系統；圖 6(b) 中的系統 II 為使用相位調變方式的升頻 CATV 傳輸系統的實驗架構。其中系統 I 和系統 II 皆使用分布反饋式雷射 (DFB LD) 波長為 1550.5 nm。當輸入功率為 0 dBm 下，每個系統的 EDFA 輸出功率和雜訊係數分別為約 17 dBm 和 4.5 dB。在系統 I，RF 載波從一個

77 頻道 (CH 2-78) 的 NTSC 矩陣 SX-16 訊號產生器發出，並以每通道調變深度 (OMI) 大約 3.6% 進入馬赫-曾德爾調變器 (MZM)。圖 7 為系統 I 之 MZM 輸出光譜圖。受激布里淵散射 (SBS) 在系統上的影響可經由實驗結果表現出來，當進入光纖功率超過 17 dBm 時，CNR 值快速下降，因此在每個光連結前引入的可調式光衰減器 (VOA)，不僅能使 CSO 失真下降，還能調整光功率。光功率藉由三階段的 EDFA 放大，經過 100 公里 SMF 傳

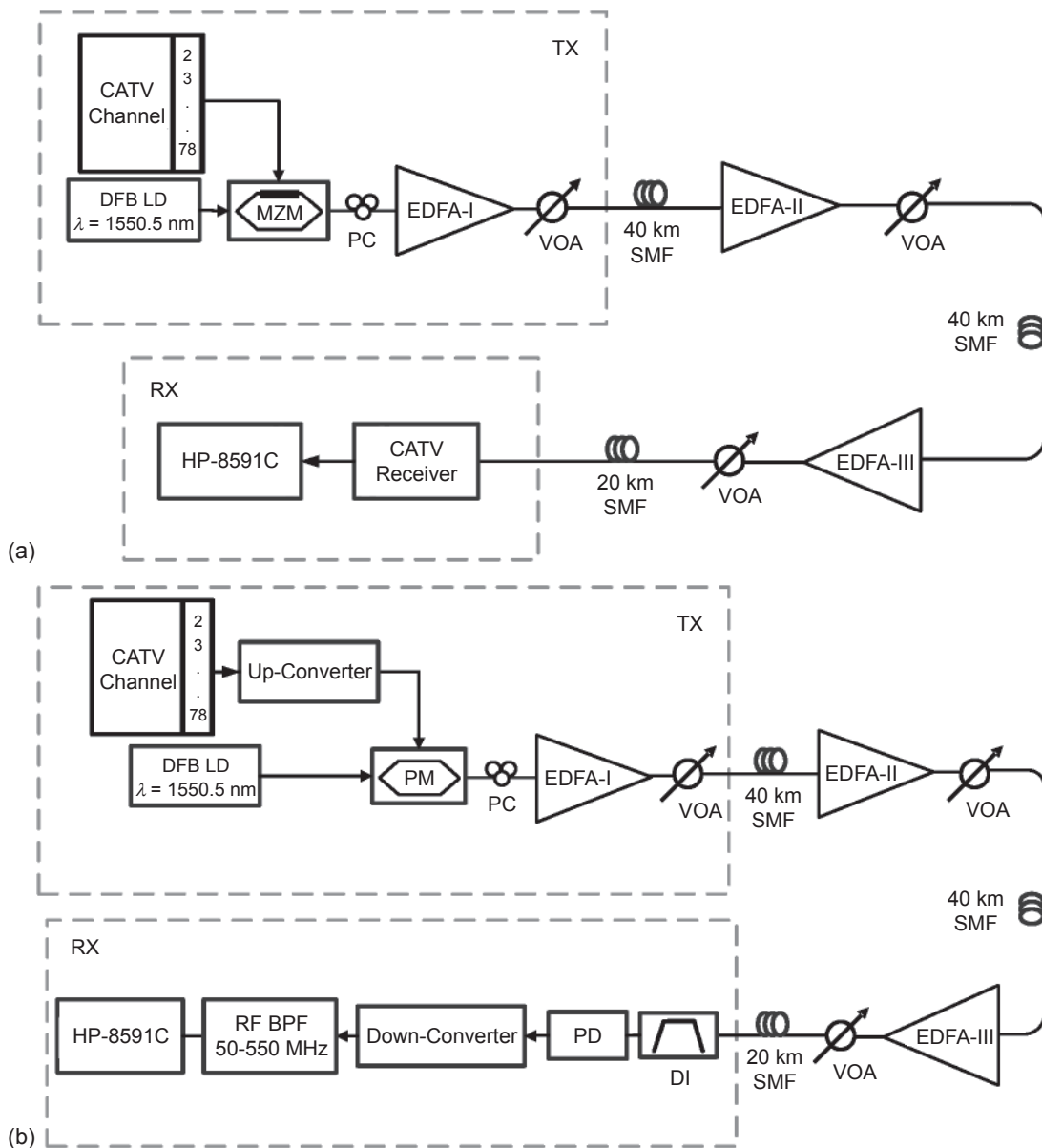


圖 6. (a) 系統 I：使用傳統 IM 架構的 CATV 光纖傳輸系統。(b) 系統 II：使用 PM 架構之升頻 CATV 光纖傳輸系統。

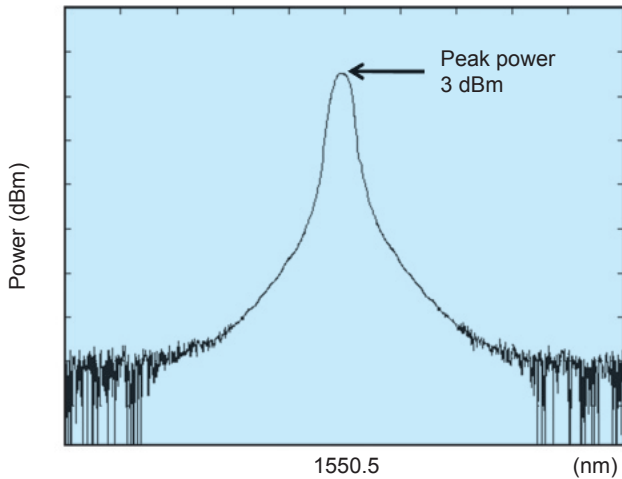


圖 7. 系統 I：MZM 輸出光譜圖。

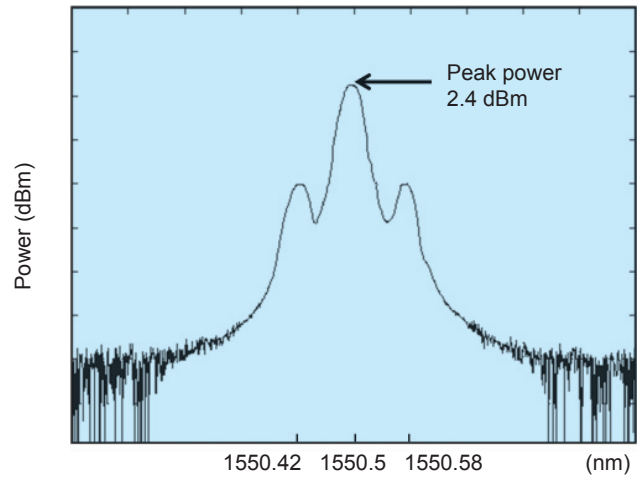


圖 8. 系統 II：PM 輸出光譜圖。

輸後，光訊號由一個 CATV 接收器接收，且所有 CATV RF 參數由 HP-8591C CATV 分析器測量。在系統 II 中，DFB LD 提供一光載波給 PM 來傳輸調變訊號強度到相位調變端，將 CATV 訊號原始頻寬 (55.25 – 547.25 MHz) 升頻到微波頻段 (9.508 – 10 GHz) 後，進入 PM 進行傳輸，然其會有多少邊帶的產生，將視在 PM 上的驅動微波訊號振幅而定。

本實驗使用小振幅微波訊號來驅動 PM，其中光調變指數 (optical modulation index, OMI) 只有 3.4%，因為微波訊號振幅很小，調變後二階邊帶也很小，圖 8 為只有第一階邊帶產生。假如我

們用大 OMI 值來驅動 PM，調變後的第二階和第三階邊帶也很大，經過 100 km SMF 傳輸後，因為光訊號多樣性邊帶而產生的光纖色散效應，會造成系統性能下降。因此實驗中理想的 OMI 值佔 PM 3.4%，傳輸 100 km SMF 後光訊號先經過一 10 GHz 自由光譜範圍的延遲干涉儀 (DI) 來傳輸相位調變訊號到強度調變端，DI 之後光訊號被 10 GHz 頻寬的光檢測器 (PD) 偵測到，從微波頻寬降頻至 CATV 頻寬，然後由 RF 帶通濾波器 (BPF) (50 – 550 MHz) 濾掉不需要的部分，最後 CNR、CSO 與 CTB 值皆用 HP-8591C 分析器測量。圖 9 為模擬升頻 CATV 傳輸系統的實驗架構，兩台微波訊號產

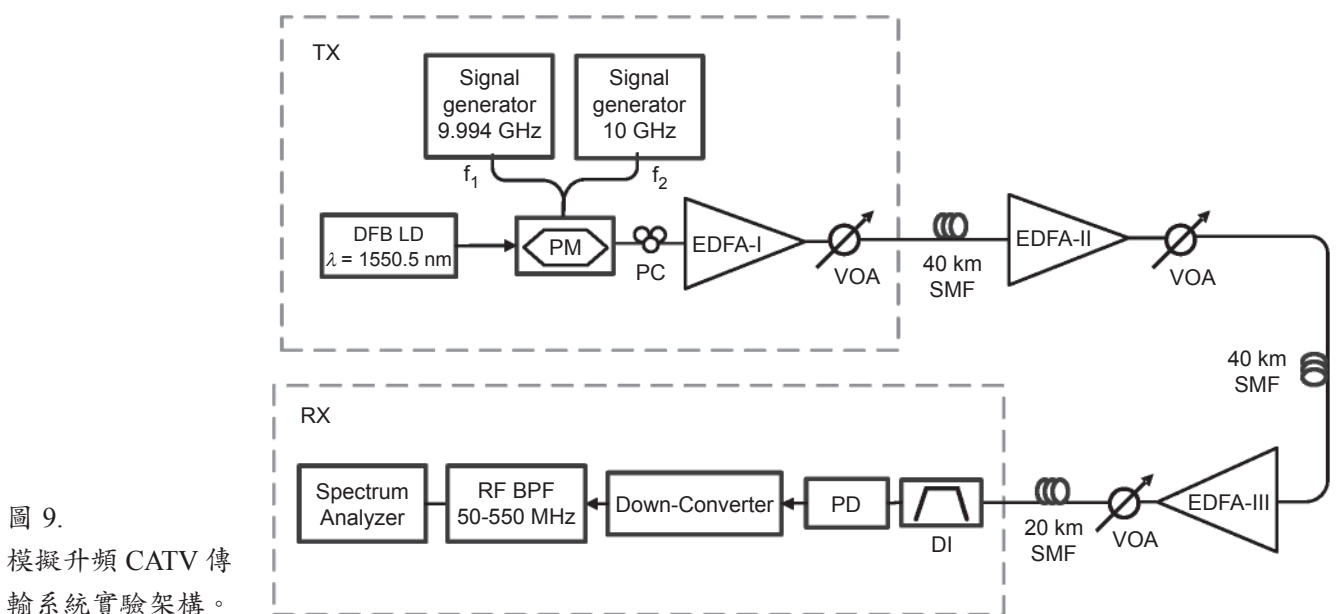


圖 9. 模擬升頻 CATV 傳輸系統實驗架構。

生器被用來模擬兩個升頻 CATV，用此方式來進行傳輸系統，頻道 ($f_1 = 9.994 \text{ GHz}, f_2 = 10 \text{ GHz}$)，傳輸 100 km SMF 後光訊號經過一個 DI 由 PD 偵測到，再將訊號從微波頻寬下降頻至 CATV 頻寬，經過 RF BPF，最後由光譜分析儀計算和測量出第三階互調失真對載波比 (IMD_3/C) 之參數。

七、實驗結果與討論

圖 10 為兩個接收載波 (CH 77 和 CH 78 從 f_1 與 f_2 降頻而得) 的電譜， IMD_3/C 明顯地已達到 -73 dBc 。透過相位調變的方式，雜訊和失真大幅地被減少了，取而代之的是大幅改善的 IMD_3/C 數值。相位調變有許多優點，對雜訊與失真有良好的抑制能力就是其中一項。雜訊與失真會影響訊號的放大，若將以上兩項肇因從訊號的放大過程裡去除，那麼傳輸系統表現將會大幅度地提升。而若改以強度調變的方法，是無法將雜訊和失真去除的，因為以強度調變的方式降低雜訊與失真時，同時也會破壞原始訊號上承載的資訊。但以相位調變的方式，雜訊與失真可以在放大過程中去除，而且移除雜訊與失真，並不會影響到原始訊號上所承載的調變資訊。

圖 11(a) 至 (c) 為基於 (back to back, BTB) 系統的 CNR、CSO 與 CTB 測量值，其中系統 I 為傳輸

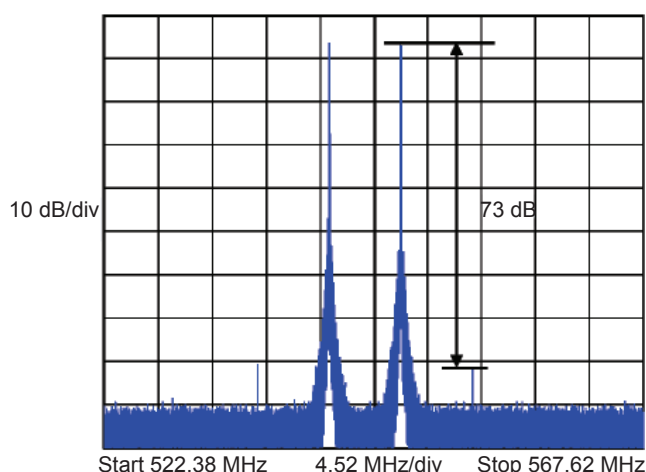


圖 10. 兩個接收載波 (CH 77 和 CH 78 從 f_1 與 f_2 降頻而得) 的電譜。

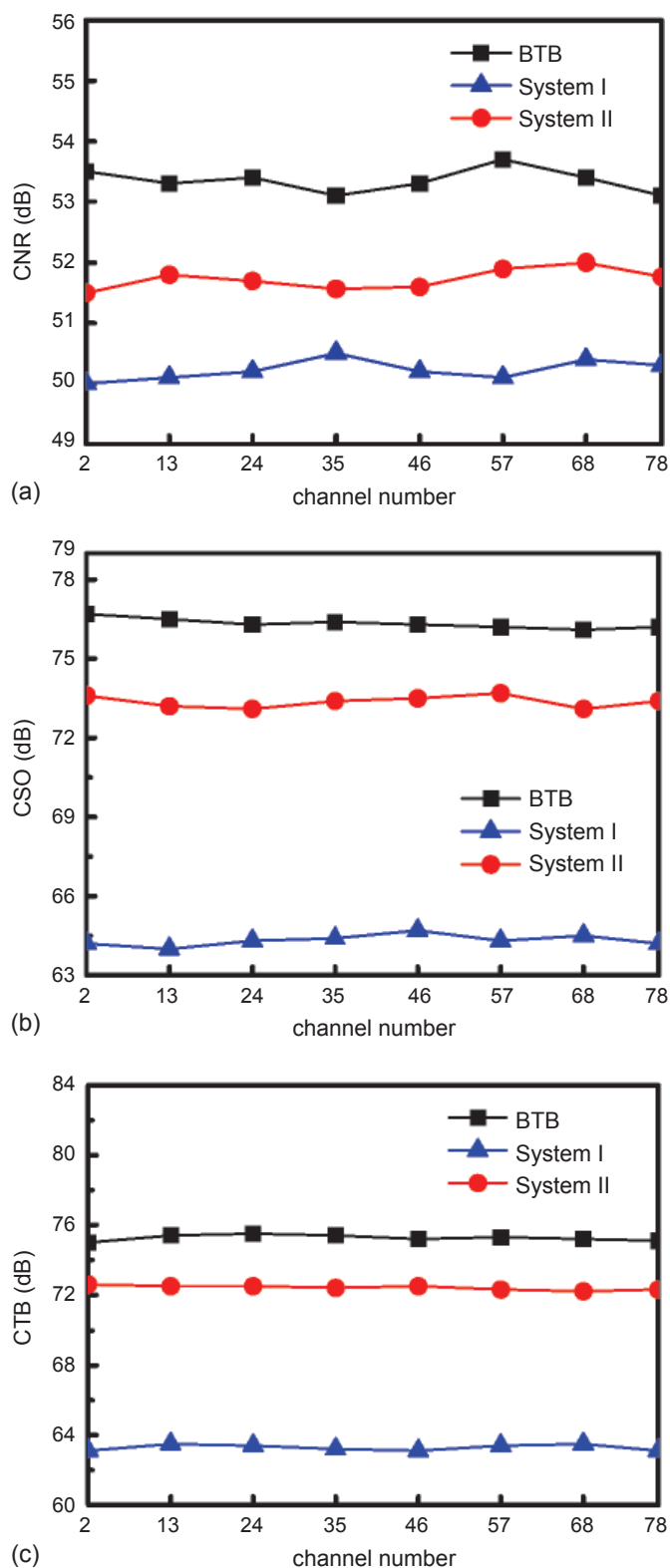


圖 11. (a) 以 BTB 測量系統 I 和系統 II 的 CNR 值；(b) 以 BTB 測量系統 I 和系統 II 的 CSO 值；(c) 以 BTB 測量系統 I 和系統 II 的 CTB 值。

100 公里強度調變系統，系統 II 為傳輸 100 公里相位調變系統。BTB 與系統 I 之間的 CNR 表現，存在著約 3 dB 較大的功率損耗，此現象是由三個串連的 EDFA 雜訊累積造成的。而相較於 BTB 的情況，系統 II 功率損耗的表現僅為 1.5 dB。系統 II 中，由於 PM 以恆定的功率運作，因此雜訊將顯著降低，進而改善 CNR 值。至於 BTB 與系統 I 的 CSO 與 CTB 值，有著功率約為 12 dB 較大的損耗。另外，相較於 BTB 情況，系統 II 功率損耗僅有 3 dB 的表現。

系統大幅地改善，是由於使用升頻技術與 PM 在恆定功率下操作的特性，因此 CSO 與 CTB 值才得以減少失真。例如，載波頻率 CH 30、CH 40 與 CH 50 分別為 307.25、319.25 與 379.25 MHz。升頻後，載波頻率 CH 30、CH 40 與 CH 50 分別升頻到 9.76、9.772 與 9.832 GHz。對於二階和三階非線性失真，我們可以有 19.532 (計算方式：9.76 + 9.772 = 19.532) 和 29.364 (計算方式：9.76 + 9.772 + 9.832 = 29.364) GHz。

在接收端，二階和三階非線性於 CH 30、CH 40 與 CH 50 引起的失真落在 10.07925 GHz (計算方式：19.532 - 9.45275 = 10.07925) 和 19.91125 GHz。在此，9.45275 GHz 來自 (9.76 GHz - 307.25 MHz)、(9.772 GHz - 319.25 MHz) 或 (9.832 GHz - 379.25 MHz)。

結果告訴我們，一部分由微波波段 (9.508 - 10 GHz) 造成 CSO 和 CTB 失真，其降頻後仍在微波波段中。通過升頻轉換技術，一部分的 CSO 和 CTB 失真可以大幅地被去除，進而改善 CSO 和 CTB 表現。根據參考文獻 (13) 的分析，一部分的 CSO 和 CTB 失真可以表示為

$$\text{CSO} = \text{HD}_2 + 10\log N_{\text{CSO}} + 6 \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$\text{CTB} = \text{IMD}_3 + 10\log N_{\text{CTB}} + 6 \text{ (dB)} \quad (2)$$

其中 HD_2 是二階諧波失真， IMD_3 是三階互調失真， N_{CSO} 與 N_{CTB} 分別是 CSO 與 CTB 的數值。使用 PM 技術時， HD_2 與 IMD_3 將因 PM 在恆定功率下操作的特性而自動降低，進而改善 CSO 和 CTB

的性能。自相位調製引起的非線性相移 (SPM) 的是由⁽¹⁴⁾ 得到的

$$\Delta_{\phi\text{SPM}} = \frac{\gamma}{3} \cdot L_{\text{eff}} \cdot P \cdot S_1^{(0)} \quad (3)$$

其中 γ 為非線性係數， L_{eff} 為光纖的有效長度， P 為可調的光功率， $S_1^{(0)} = (|A_x^{(0)}|^2 - |A_y^{(0)}|^2)/P$ 為正交化的斯托克算符 (A_x 與 A_y 為兩正交極化態的振幅)。

在 IM 傳輸系統，光相位隨時間的變化，本質上也為一種光信號。IM 傳輸系統中的功率是 SPM 頻率雜訊的肇因，該雜訊是結合光纖中的色散而產生的非線性失真。非線性失真將導致 CSO 和 CTB 失真。然而，從圖 11 可以看到 PM 以固定的功率運行時，SPM 產生的失真更小，系統也因此獲得更好的 CSO 和 CTB。此外，為了更進一步比較兩個方法改善 CSO 與 CTB 的成效，將利用升頻技術的系統 II 來測量 CSO 與 CTB 的值 (> 68/67 dB)。另外，基於相位調變技術的系統 II 已被用來量測 CSO 與 CTB 值 (> 69/68 dB)。這意味著，系統單獨使用升頻技術或相位調變技術來補償 CSO 與 CTB 的失真，是有一定的極限。

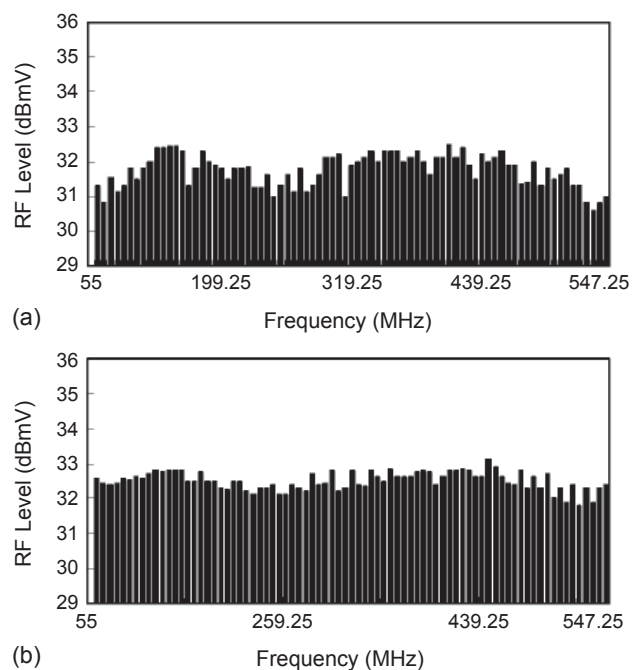


圖 12. 系統 I (a) 和系統 II (b) 其接收信號的電頻譜。

當升頻技術與相位調變技術同時使用時，能使 CSO 與 CTB 值有大幅的性能提升 (高於 73 dB 與 72 dB)。此外，系統 I 和系統 II 其接收信號的電譜，分別示於圖 12(a) 和 (b)。很明顯的，系統 II 有較好的頻譜平整性。

八、結論

升頻 CATV 傳輸系統，被提出並實驗證明採用了 PM 方式來減少系統引起的雜訊和失真。透過比較使用傳統的 IM 方式，我們所提出的系統獲得 CNR、CSO 和 CTB 更優異的性能，因此升頻技術和 PM 方式將有利於長距離 CATV 傳輸系統的佈署。

參考文獻

1. W. Y. Lin, C. H. Chang, P. C. Peng, H. H. Lu, and C. H. Huang, *Opt. Exp.*, **18**, 10301 (2010).
2. H. H. Lu, H. C. Peng, W. S. Tsai, C. C. Lin, S. J. Tzeng, and Y. Z. Lin, *Opt. Lett.*, **35**, 279 (2010).
3. H. Kim, S. B. Jun, and Y. C. Chung, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 695 (2007).
4. H. Gebretsadik, H. T. Foulk, N. C. Frateschi, W. J. Choi, S. V. Robertson, and A. E. Bond, *Electron. Lett.*, **40**, 1016 (2004).
5. S. J. Tzeng, H. H. Lu, C. Y. Li, K. H. Chang, and C. H. Lee, *Progr. Electromagn. Res. Lett.*, **6**, 107 (2009).
6. H. H. Lu, A. S. Patra, S. J. Tzeng, H. C. Peng, and W. I. Lin, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 351 (2008).
7. D. Pehler, X. Zou, C. Y. Kuo, A. Nilsson, J. Kleefeld, G. Garcia, J. D. Ralston, and A. Mathur, *Electron. Lett.*, **33**, 226 (1997).
8. T. A. Adamson, *Electronic Communications. Albany*, New York: Delmar (1992).
9. H. C. Ji, H. Kim, and Y. C. Chung, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21**, 9 (2009).
10. L. Xu and H. K. Tsang, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 833 (2008).
11. A. H. Gnauck and P. J. Winzer, *J. Lightw. Technol.*, **23**, 115 (2005).
12. H. H. Lu, Y. W. Chuang, G. L. Chen, C. W. Liao, and Y. C. Chi, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18**, 1789 (2006).
13. W. I. Way, *Broadband Hybrid Fiber/Coax Access System Technologies.*, New York: Academic, **2**, 33 (1999).
14. C. Conti, D. Beltrame, G. D. Marchis, and M. Zitelli, *Appl. Opt.*, **43**, 149 (2004).



吳柏逸先生現為國立台北科技大學光電工程研究所博士班學生。

Po-Yi Wu is currently a Ph.D. student in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.



呂海涵先生為國立中央大學光電工程博士，現為國立台北科技大學光電工程研究所特聘教授。

Hai-Han Lu received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Central University. He is currently a distinguished research professor in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.



應誠霖先生為元智大學電機博士，現任景文科技大學電子工程系副教授。

Cheng-Ling Ying received his Ph.D. in electrical engineering from Yuan Ze University. He is currently an associate professor in the Department of Electrical Engineering at Jinwen University of Science and Technology.



溫建穎先生現為國立台北科技大學光電工程研究所碩士班學生。

Jian-Ying Wen is currently a M.S. student in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.



胡富智先生現為國立台北科技大學光電工程研究所碩士班學生。

Fu-Chih Hu is currently a M.S. student in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Taipei University of Technology.