

目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	II
English Abstract.....	III
1. 計畫緣由與目的.....	1
2. 計畫結果與討論.....	3
子計畫一成果與討論.....	4
子計畫二成果與討論.....	8
子計畫三成果與討論.....	12
子計畫四成果與討論.....	15
3. 自我評量.....	18
參考文獻.....	19

中文摘要

隨著大容量寬頻固定式擷取網路與無線行動式擷取網路之出現，以及網際網路高頻寬需求與支援語音、視訊、數據、行動性之quad-play服務需求日漸成長，未來趨勢將朝向全光網路科技，同時光纖傳輸無線電頻訊號(radio over fiber)技術已經引起廣大的興致。為了執行下世代無線通訊系統，正交分頻多工系統(OFDM)在現有主要多工技術上，被認為是最佳技術。這項事實使得未來下一代全光網路設計與實現，OFDM在Layer-1成為future-proof之技術。本整合型研究計畫的目的即在於設計並建構原型OFDM全光都會網路，滿足下列三項重要目的。

首先，下一代全光都會網路需要全光封包交換(OPS)技術來保證有效率且細緻的頻寬分配與各類型服務品質保證(QoS)以支援Quad-play，OPS可藉由幾種方法來實現，其中混合式OFDMA/WDM存取機制被認為是最具前瞻性的OPS技術，本計畫首要目標就在設計建構原型OFDMA/WDM存取機制以滿足上述要求。第二目的在於大多數OFDM相關研究強調在遠距離傳輸之應用或者無線環境設定下之光載電頻(RoF)系統，本計畫第二目標則是設計適用於全光都會網路之高頻譜效率OFDM傳輸系統，並可擴充至光載電頻之運用。第三目的則是當上述OFDM系統即將實現時，大多數的研究者受制於光學OFDM系統高輸出計算能力而採用模擬方式來驗證，我們最後的目標即是透過硬體架構設計來實現光學OFDM傳輸系統。

本整合型研究計畫（楊啟瑞教授主持），旨在實現OFDM-based全光封包交換都會網路。子計畫一（楊啟瑞教授主持）提出新式全光都會環狀網路架構，根基於正交分頻多重存取技術，能夠無縫式整合高速寬頻資料傳輸以及多重天線存取之無線訊號，達到40 Gb/s資料傳輸率，且提出了適用於此OFDMA/WDM環網架構之多重存取控制系統來管理各節點之頻寬存取；子計畫二（馮開明教授主持）設計並實作符合下世代整合寬頻接取網路所需要之 10-Gbps光學式正交分頻多工收發機架構，可增進直接偵測OFDM架構的接收表現，亦可應用到偏極化分工正交多頻分工系統，使頻譜使用率倍增，增加對偏極化模態色散的抵抗力；子計畫三（陳智弘教授主持）發展以目前無線通信中主要的傳輸方式QAM-OFDM將其轉載於光的微波信號頻段來傳輸資訊。同時發展與驗證 60-GHz 之 radio-over-fiber系統；子計畫四（黃元豪教授主持）因應光學正交分頻多工的高傳輸頻寬，設計並實現高運算吞吐量之光學OFDM發射接收機，藉IC設計實作與其在光學系統上之實驗，來達成全光都會網路中Optical OFDM 收發機傳輸之實現。

關鍵詞：正交分頻多工(OFDM)、正交分頻多重存取(OFDMA)、分波多工(WDM)、都會網路(MAN)、全光線路交換(OCS)、全光叢集交換(OBS)、全光封包交換(OPS)、服務品質保證(QoS)、媒介存取控制(MAC)、頻寬分配、四合一整合型服務、光纖通訊、信號調變、光纖到家、微波光學。

English Abstract

With the emergence of both high capacity broadband fixed and mobile wireless access networks, and the ever-growing demand for high Internet bandwidth and support of quad-play (i.e., video, voice, data, and wireless), the future trend toward optical networking and optical transport of radio frequency signals, referred to radio over fiber, has attracted great interest. For implementing the next-generation wireless communication systems, OFDM systems have been considered the most promising technology among prevailing candidates. Such fact makes OFDM a future-proof underlying Layer-1 technology for the design and implementation of next-generation optical networks. The major goal of the integrated project is to design and prototype an OFDM-based optical metro network satisfying three following prominent objectives.

First, next-generation optical metro networks require the Optical Packet Switching (OPS) technique to ensure efficient and fine-grained bandwidth allocation and various Quality-of-Service (QoS) guarantees for supporting quad-play. Such OPS challenge can be realized via several approaches in which the hybrid OFDMA/WDM access mechanism has been considered the most promising OPS technology. Our first goal of the project is to design/prototype an OFDMA/WDM access scheme satisfying the above requirements. Second, most OFDM-related work emphasizes its applications for long-haul transmission or radio over fiber (RoF) systems particularly under the wireless setting. Our second goal of the project is to design a highly spectral-efficient OFDM transmission system with and without the augmentation of the RoF, particularly for optical metro networks. Finally, when it comes down to the realization of such OFDM-based systems, most of the work has been justified via simulation due to stringent requirements of high-throughput computation capability for optical OFDM systems. To this end, our final goal of the project is to realize the optical OFDM transmission systems through the hardware architectural design.

The main objective of this integrated project (PI: Prof. Maria Yuang) is the realization of next-generation OFDM-based optical packet switched metro networks. Sub-project 1 (PI: Prof. Maria Yuang) propose a novel optical metro ring architecture based on orthogonal frequency division multiple access (OFDMA), that enables seamless integration of high-speed broadband transport and wireless signals from multiple remote antennas, and cost-effectively achieves 40 Gb/s data rate. Then we present a multiple access control (MAC) system for governing the bandwidth access on the OFDMA/WDM network. Sub-project 2 (PI: Prof. Kai-Ming Feng) investigates the advanced applications of OFDM modulation format in ultra-high capacity and ultra-long haul optical fiber communication systems over optical fiber. It increases transmission capacity and efficiency by DD-OFDM scheme, and also applied for PolMUX-OFDM system to double the spectral efficiency and enhancing PMD tolerance; Sub-project 3 (PI: Prof. Jyehong Chen) develops the QAM-OFDM technique, which is the major scheme used in wireless communication, and modulates the signal to the microwave frequency. Also, this project designs and verifies the

60-GHz radio-over-fiber system; Sub-project 4 (PI: Prof. Yuan-Haw Huang) designs and emulates the optical OFDM transmitter and receiver to realize the high computing throughput by the IC design.

Keywords: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Metropolitan Area Network (MAN), Optical Circuit Switching (OCS), Optical Burst Switching (OBS), Optical Packet Switching (OPS), Quality-of-Service (QoS), Medium Access Control (MAC), Bandwidth Allocation, Quad-Play, Optical Fiber Communication, Modulation Format, Fiber to the Home, Microwave Photonics.

1. 計畫緣由與目的

隨著網際網路頻寬需求的快速成長，骨幹網路朝向以光纖為媒介傳送資訊。全光網路得以盛行，主要來自分波多工技術 (Wavelength Division Multiplexing; WDM) [1]之成熟，使傳輸速度與頻寬都大幅提升，以目前發展趨勢，全光網路將完全取代傳統電網路。在全球化長途骨幹網路皆採用光纖傳遞之際，都會網路也開始轉往全光網路來進行設計，而使用者端之擷取網路，目前已朝向光纖到家 (Fiber to the Home)，以及光纖結合無線網路(Radio over Fiber)來發展。網際網路服務，則開始提出以Triple-play (Data、Voice、Video)結合Wireless，成為Quad-play 四合一多媒體整合型服務。

在長途光纖網路中，由於傳遞資訊已經過路由器進行訊務匯集統合，對頻寬需求呈現較為穩定之狀態，以固定的WDM通道並使用全光線路交換(Optical Circuit Switching; OCS)的交換技術，每隔一段長時間再重新調整，即可滿足長途骨幹網路之應用服務需求。然而在都會網路部份，其身為長途骨幹網路與使用者端擷取網路之中繼站，需面對來自於擷取網路較高的動態訊務需求，其迅速變化的特性，使得全光都會網路需要全光封包交換(Optical Packet Switching; OPS) [2-4]技術進行頻寬共享，並配合網路節點之多功能媒介存取控制(Medium Access Control; MAC)機制，來提供有效率的頻寬分配與各類型等級的網路服務品質(Quality of Service; QoS)保證技術。

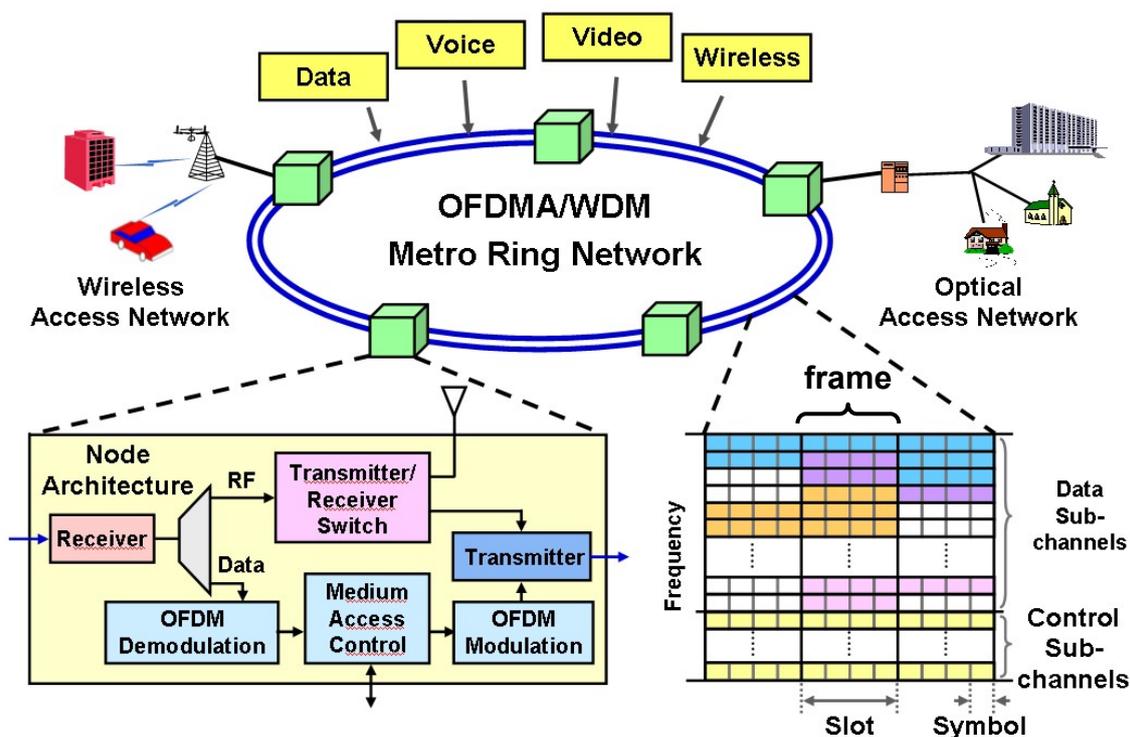
有關OPS的架構與相關的優缺點，在[5]有完整的比較與分析。而我們在過去幾年發展OPS技術上，採用了WDM結合分時多工(Time Division Multiplexing; TDM)的方式，將封包載入波長內之不同時段，以達到頻寬共享。隨著頻寬需求提高到10Gbps之時，我們亦針對TDM/WDM架構進行效能提升。然而，TDM技術由於面對來自不同來源之資料，訊號強度強弱有別，對接收端而言需採用Burst Mode Receiver (BMR)才能進行接收動作，而以目前最先進之技術，10Gbps BMR之穩定性仍受到環境限制，使得封包之間須存在夠大之guard time與preamble signal，而這導致效能受到極大影響。

在此同時，我們開始研究其他方案來解決此問題。而在無線網路上已採用多年的正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing; OFDM)技術則開始探討應用於光網路之可能性[6-8]。OFDM技術將傳輸信號分割成了多個子載波進行傳輸，利用傅立葉轉換(FFT)技術，將訊號由時帶轉換至頻帶，至接收端再轉換回時帶並整合子載波為原訊號。然而其需進行大量計算，使得早期實際應用受到限制。而在近年來IC製程密度大幅提升，以及數位訊號處理器新架構提出，OFDM可即時計算結果，因此在通訊上的應用變為可行。OFDM主要的優勢在於，其具備高頻帶使用率，同時能有效抗拒多重路徑導致的訊號干擾現象，當運用於光纖訊號傳輸時，不僅可應付高頻寬需求，可以解決光色散所帶來的影響，同時可以採用便宜且技術成熟之Continuous-mode receiver。而當無線網路與光纖網路進行結合時，由於無線電頻訊號已轉為OFDM訊號，因此不須經過解調過程，直接在光纖上傳輸無線電頻RF訊號已成為未來趨勢，也因此採用OFDM傳輸將能大幅提升使用彈性，便於達到Quad-play多媒體整合型服務。

本整合型研究計畫（楊啟瑞教授主持），旨在實現OFDM-based全光封包交換都會網路，以提供各種多媒體整合性之服務。子計畫一（楊啟瑞教授主持）之目的為設計OFDMA/WDM之全光都會網路所需之技術。我們首先提出新式全光都會環狀網路架構，根基於正交分頻多重存取技術，能夠無縫式整合高速寬頻資料傳輸以及多重天線存取之無線訊號。接著我們改進此OFDM光網路架構以支援更高頻寬傳輸與無線電頻訊號，其可以有效節省成本達到40 Gb/s資料傳輸率。最後，我們提出了適用於此OFDMA/WDM環網架構之多重存取控制系統來管理各節點之頻寬存取。此系統藉由自我建構類神經推論網路來實現，可以動態性與公平性的即時性進行頻寬分配。網路模擬程式結果展示了其具有高網路輸出與公平分配頻寬之性能。子計畫二（馮開明教授主持）在既有之研究基礎上，進一步從理論上與實作上進行符合下世代整合寬頻接收網路所需要之10-Gbps光學式正交分頻多工收發機架構的研究。針對正交多頻分工直接偵測系統的架構下，發展了許多相關技術來增進直接偵測OFDM架構的接收表現。我們發展的技術，亦可應用到偏極化分工正交多頻分工系統，可以使頻譜使用效率可以倍增，同時增加對偏極化模態色散的抵抗力。子計畫三（陳智弘教授主持）發展以目前無線通信中主要的傳輸方式QAM-OFDM將其轉載於光的微波信號頻段來傳輸。同時發展與驗證60-GHz之radio-over-fiber系統。子計畫四（黃元豪教授主持）因應光學正交分頻多工的高傳輸頻寬，設計並實現高運算吞吐量之光學OFDM發射接收機，藉IC設計實作與其在光學系統上之實驗，來達成全光都會網路中Optical OFDM收發機傳輸之實現。研究方法從系統模擬到IC架構設計皆涵蓋，包含光纖通訊OFDM傳輸之數值模擬分析，與Optical OFDM系統之高吞吐量快速傅立葉轉換器(FFT)的IP架構設計與驗證，之後再進行系統整合與FPGA Verilog RTL架構的設計。

2. 計畫結果與討論

此計畫主要目的為設計OFDMA/WDM都會環狀網路，以支援Quad-play整合型服務，如圖一。都會環狀網路各節點可連通全光接取網路(如被動式光網路)以及無線接取網路(如WiMAX網路)。在光纖線上，利用WDM切分成數個波長通道進行傳輸，而每個波長通道則採用OFDM技術切分成數百個速率較低之子通道。數據、語音、視訊等資料以及無線RF訊號，則在子通道上進行傳送。在環網上的節點，可以連接全光接取網路、無線接取網路、或是長途骨幹網路。在傳輸數據、語音、視訊等資料時，會與網路上游解調後的資料，一起進行調變，再傳送至下游節點。由於無線網路目前主流已採用OFDM進行調變，因此在傳遞無線RF訊號時，不再重新解調，直接載入預先配置之子通道。在節點架構內，來自環網上游節點之OFDM通道傳至此節點時，經由接收器轉成電訊號，透過解多工器將RF訊號與數據、影音、視訊等資料訊號分離，資料訊號藉由OFDM解調之後得到原始封包資料，利用控制標頭先判斷封包目的地，若為此節點，則將其接收下來，並清空其所佔據之OFDMA位置。此節點若有封包需傳遞至下游節點，則觀察通道閒置區塊，並藉由媒介存取控制技術，決定其傳送時間，接著與上游節點其餘之封包一同進行OFDM調變，最後與無線RF訊號組合後一同傳送。RF訊號藉由獨立子通道傳輸，不需經過解調。在傳送接收交換器裡，配置給此天線之RF訊號子通道會藉由天線直接往外傳送，而天線接收之RF訊號，也會與其它子通道之RF訊號一同傳至下游節點。



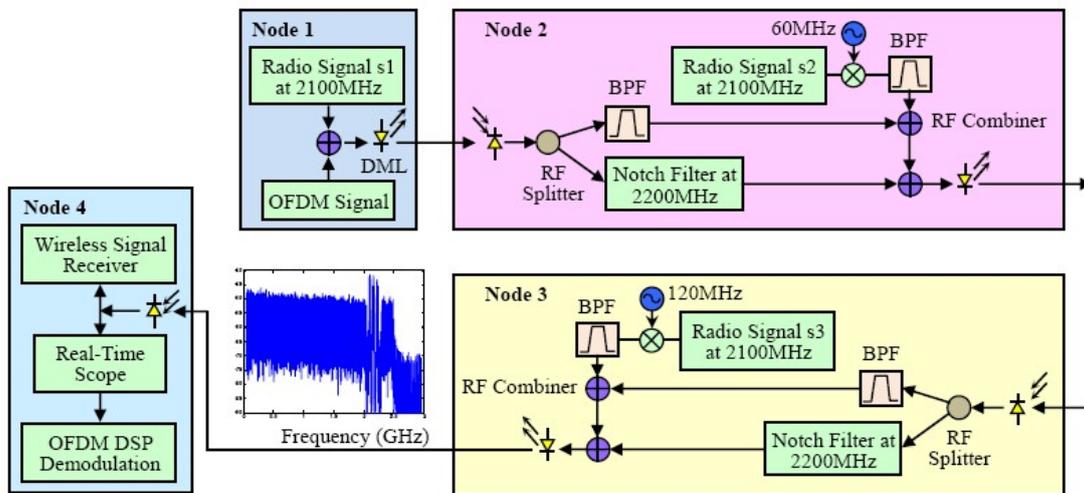
圖一、OFDMA/WDM都會環狀網路架構

● 子計畫一：全光WDM都會網路之OFDMA/WDM媒介存取控制與頻寬分配系統

為了滿足加入無線訊號資料之Quad-play服務，在子計畫一，我們著重在OFDMA/WDM都會環狀網路架構設計，包含無線RF訊號與OFDMA訊號之傳輸整合能力與多重存取控制技術。在2.1.1章節，我們提出讓無線RF訊號與OFDMA資料訊號疊合傳送之技術與40 Gb/s之OFDMA光封包交換技術。在2.1.2章節，我們針對OFDMA傳輸之特性以及此環狀網路之架構，提出新式OFDMA時槽控制架構以及類神經模糊理論為基礎之多重存取控制機制。

2.1.1、RF/OFDMA 資料訊號疊合技術與 40 Gb/s OFDMA 光封包交換技術

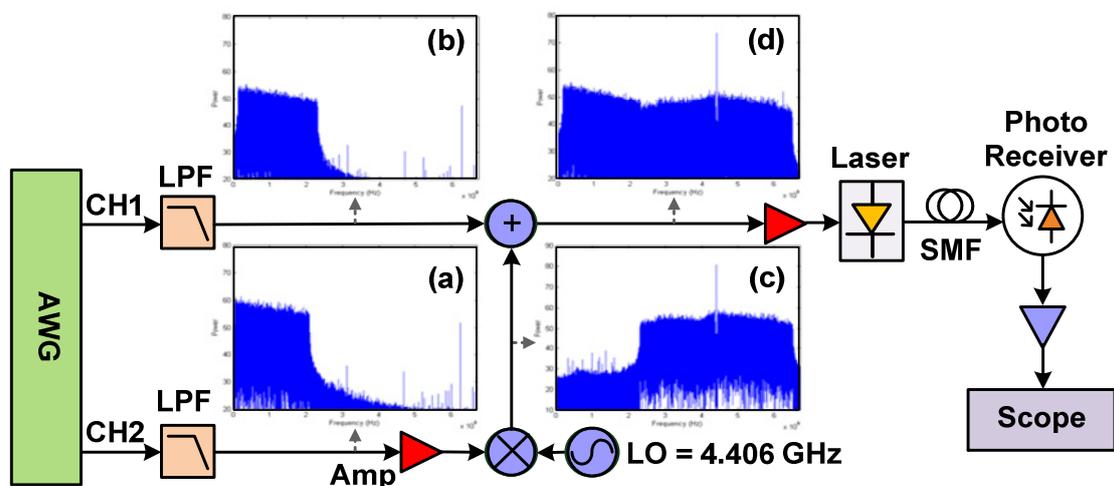
OFDMA/WDM都會環狀網路架構設計，除了傳送數據、語音、視訊之外，亦須支援多重無線訊號[9]。節點在接收無線RF訊號之後，利用混合器、震盪器以及濾波器，將無線訊號經過頻率偏移過程到預先配置的頻帶，以疊加在原有OFDMA訊號上，並直接調頻雷射送至下一個節點。當下游節點收到光波時，將接收訊號分成兩條路徑，第一條為下傳的OFDMA訊號，流程包含類比數位轉換器、OFDM解調、控制通道辨識、下載與上傳此節點之資料、產生OFDM調變訊號，並且進行數位類比轉換。在第二條路徑，系統在配置的無線波段使用通道濾波器，以移除OFDMA訊號並保留所有無線訊號。RF結合器將此節點所收到之RF訊號與上游節點之RF訊號合併。最後，系統將RF訊號與OFDMA訊號整合，並驅動雷射傳輸。我們藉由離形實驗網路進行測試，將多重RF訊號與OFDMA訊號結合，以驗證此OFDMA環狀網路與系統架構可行性。如圖二，實驗網路測試包含四個節點，其中Node 1會產生OFDM訊號，並且Nodes 1, 2, and 3會產生無線RF訊號，而Node 4則會將訊號解回來。在這個系統底下，為了達到最佳化傳輸表現與網路規模成長性，無線訊號與OFDMA訊號之能量分布成為決定性的系統參數。因為OFDMA訊號在每個節點皆先解調再重新調變，因此在節點之間的能量漏失情況顯得較為輕微，OFDMA訊號允許保持較低驅動能量，讓接收器可以正



圖二、OFDMA 環狀離形實驗網路設置

確回復資料。為了達到OFDMA訊號的高峰均功率比，隨著RF能量比例增加，且OFDMA訊號表現可接受範圍內，我們採用能量比例為1.5去最佳化RF訊號完整性，在最後節點的鏈結能量比例則設定為0.1。

為了增加資料傳輸率至40 Gb/s，高頻寬光都會環網採用Mach-Zender調變器(MZM)以避免光纖傳輸後之單邊帶[10]能量衰減。然而MZM設備相對而言較為昂貴，具有成本效益之其他方案為使用直調方式。如直調DFB雷射(DML)以及致電吸光調變技術(EAM)。若單純採用DML方式會有兩項阻礙。首先是DMLs產生雙帶寬光OFDM訊號而產生能量衰減。第二為DML正啾頻現象在傳輸超過常規最大傳輸距離時有較糟效應。因此我們展示在10-GHz DML與EAM元件下，達到40 Gb/s傳輸率。在實驗架構內，OFDM傳輸器包含序列轉平行埠轉換器、QAM調變器、快速傅利葉逆轉換器、循環字首插入器、與數位類比訊號轉換器。AWG的取樣率與數位類比訊號解析力分別為12 GS/s與8位元。驅動訊號包含一個23.4375-MSym/s 128-QAM符號之OFDM訊號，其編碼在6-98通道，頻寬為2.18 GHz。此為第一頻帶，資料傳輸率為15.2578 Gb/s。在第二頻帶由另一個OFDM訊號具備相同的符元率但是採用64-QAM格式編碼，並且向上轉換至4.406 GHz波段，其佔用99-186通道與200-287之合併資料率24.75 Gb/s。此兩OFDM頻帶合併，我們可以達到40 Gb/s資料傳輸率。圖三展示了實驗設置並內置相應位置之電子頻譜展示。兩道電子訊號之資料流分別由AWG之通道一與通道二產生。將通道二訊號放大並且移頻至4.406 GHz。經過方向耦合器，兩組訊號接著合併，並且傳送至DFB或EAM。經由標準的單模光纖傳輸後，此光訊號由光感測器接收。經過平方律檢波器，放大其波形並由數位示波器擷取，其採樣率為50 GS/s以及3 dB頻寬為16 GHz。利用離線Matlab DSP程式作OFDM訊號解碼。由星座圖，我們量測訊號雜訊比並計算位元錯誤率。由於RF訊號在光纖傳輸減弱會嚴重影響DML/EAM的之表現，我們採用了預加重演算法克服此問題。

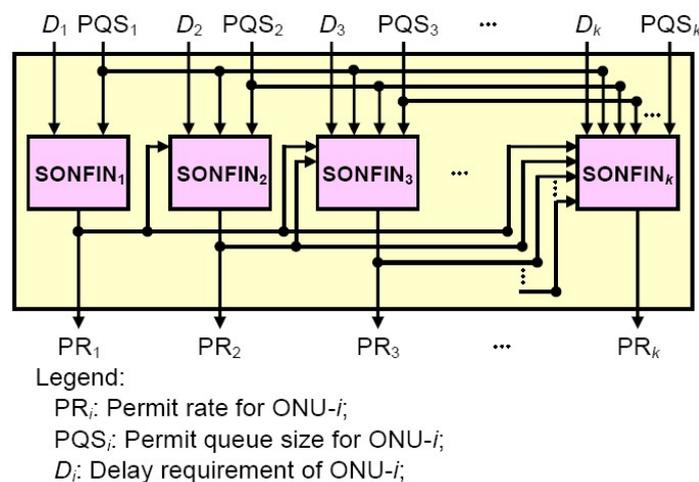


圖三、含頻譜展示之實驗設置架構圖。(a) 通道 2；(b) 通道 1；
(c) 通道 1 經過移頻轉換後；以及(d) 結合通道 1 與通道 2。

2.1.2、多重存取控制技術

由於所有節點共用同一條通道，因此上游節點若擷取所有可用頻寬，將使下游節點無法存取此通道。為了解決傳輸公平性問題，需要限制上游節點的傳輸，方能維持足夠的剩餘頻寬給下游節點使用[11]。而在存取控制技術上，又分為兩種類型，分別為預防式控制與回饋式控制。若是上游節點無法即時得知下游傳輸狀態，則必須採用預防式控制。由於全光網路頻寬過大，在暫存器數量不高情況下，上游節點反應無法即時性的讓下游節點迅速紓解本身的壅塞狀況。因此我們提出的方法為以預防式控制為主的機制。在每個節點，多重存取控制系統(MAC)藉由每個節點內部產生的permit來調節自身節點在每個frame time內的slot傳輸。這permit定期由設置給此節點之固定速率(permit rate; PR)產生，並且儲存在節點內部虛擬之permit queue。此Permit queue size (PQS)有容量限制，若是已滿，則新的permit將被扔棄。在一個frame time裡，若至少有 p permits以及 p 可用slots，則此節點可以傳送 p slots至網路。在傳送 p slots資料之後，則 p permits也會由queue內移除。我們的permit-based MAC在設定各PR與PQS值給節點時，會直接影響所有下游節點的輸出流量與延遲表現，因此這項挑戰在於所有節點的(PR, PQS)之聯合設定以達到公平與高輸出之頻寬分配。

為了達到此目的，此MAC機制採用類神經模糊系統來實現。類神經模糊演算法已經被廣泛用來解決應用於複雜實際系統之非線性反函數問題[12]，這些問題無法藉由精確的數學理論模型來完成。這方法兼具類神經網路學習與模糊系統推論之優勢，藉由線上或離線訓練，此類神經模糊法透過調整內部模糊規則結構與參數，獲取系統輸入輸出參數之關係。在數種類神經模糊提案中，自我建構類神經推論網路(SONFIN)[12]展現了高度能力去改變系統狀態，因此在我們的設計裡採用了SONFIN架構。如同先前所描述的，一個節點的平均延遲(D)僅與其PR, PQS設定以及所有在前的節點之PRs, PQSs有關。因此若先固定單一PQS值給所有節點，決定其PR值去符合延遲要求就成為一個非線性之反函數問題。假設網路



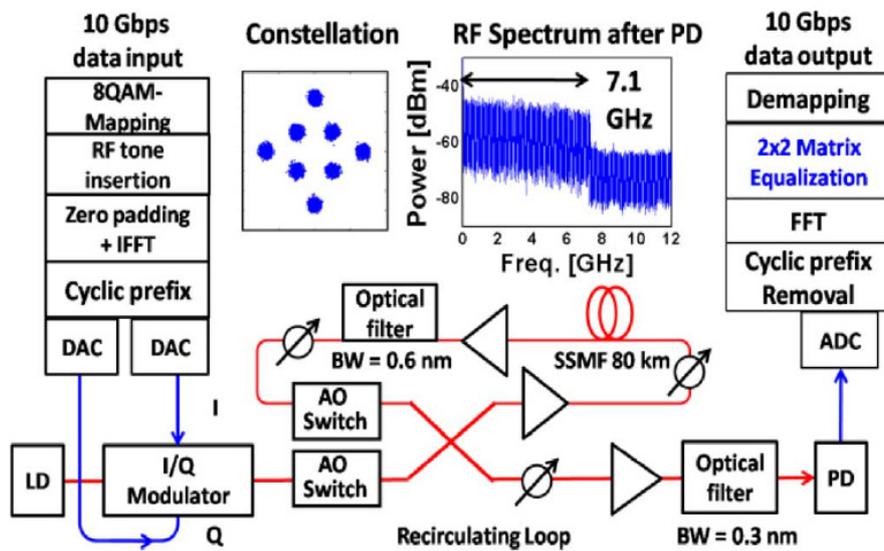
圖四、節點 k 之類神經模糊 MAC 系統。

共有 N 節點，依據上下游之順序編號為 1 到 N ，則節點 k 之 MAC 系統如同圖四所示，由 k 個 SONFINs 串連建構，分別對應到前 $k-1$ 節點以及節點 k 。在離線訓練程序，我們藉由網路模擬程式蒐集具代表性的訓練資料。而線上操作上，在每一次的系統起始時，給一組目標延遲值， D ，對 i 由 1 到 k ，設定 $D_i = D$ ，以及各節點相同的 PR，SONFIN 可以得到 PQS_k 值給節點 k 使用。同理，我們亦可以將目標延遲值 D 與固定 PQS 值，經由 SONFIN 得到 PR_k 值給節點 k 使用。

根據類神經模糊多重存取控制系統架構，我們藉由模擬程式來完成節點平均延遲以及延遲公平性表現。我們觀察到延遲公平性在較小的 PQS 設定 (=100) 之下可以達到優越的表現，但會導致偏高的延遲。我們檢查了平均延遲為 PQS 的函數，平均延遲會隨著 PQS 值的增加而大大的遞減，而訊務凸波愈高情況下，對於延遲的改善愈明顯。然而，提高 PQS 設定值到 3000 可以有效的減輕延遲，代價卻是延遲表現上的不公平現象。越是處在下游節點，其傳送延遲會越糟。這問題在訊務凸波愈高之情況下，會更凸顯。也因此若要在所有節點共用相同 PQS 與 PR 設定情況下，平均延遲與延遲公平性表現將會是一個有得有失的問題。因此我們試圖分配不同的 PQS 與 PR 值給所有節點來達到延遲公平性。我們首先固定 PR 值並且利用類神經模糊 MAC 系統可獲得相異 PQS 值給不同節點。延遲公平性在較寬鬆的延遲要求下 (20, 30, 40 frame times) 可以找到適當的 PQS 設定滿足要求。然而在延遲要求較為拘謹情況下，則下游節點增加 PQS 值已不能改善其延遲狀況，因此無法得到適當參數值。歸究其原因為上游節點之 PQS 過高，使得其優先佔用頻寬狀況下，較容易長期佔用資源，下游節點則無法及時獲得頻寬資源。因此，我們採用較低的共用 PQS 設定限制上游節點佔用頻寬之情形，但是採取不同 PR 值設定給不同節點，愈下游節點則配置愈高的 PR 值。在固定 PQS 設定情況下，藉由類神經模糊 MAC 系統獲得不同的 PR 設定給不同節點，我們可以找到適當的參數設定滿足延遲要求 10，達到更優越的延遲公平性表現。

● 子計畫二：應用於都會網路之可重新置換、高頻譜效率光學正交分頻多工傳輸系統

在光學正交分頻多工(optical OFDM)之中，直接接收(direct-detection optical OFDM, DDO-OFDM)的系統之系統複雜度較低，非常具有實用化的潛力。然而，在傳輸端進行電光調變的時候，會因為實際調變器製成的不完美，而使得訊號出現多種干擾。我們實驗驗證的架構如圖五所示。我們利用Recirculating loop進行800 km長距離傳輸實驗。為補償前述的干擾，我們在接收端的數位訊號處理(digital signal processing, DSP)部分，加入一2x2矩陣等等化器，減少上述的劣化因素。藉由補償傳送端調變過程中，調變器的不平衡，以及調變偏壓點誤差的問題，可以更精確的提升系統品質。如此一來，將有機會免去傳送端監控訊號品質的機制。



圖五、實驗架構。(接收端 DSP 部分加入補償調變不平衡與偏壓點誤差的等化器。)

目前評量OFDM訊號品質的方式大都使用offline DSP的方式進行解調信號，再使用error counting的方式計算BER。受限於記憶體容量，這樣的方式測量BER只能測量到約 10^{-5} 。我們透過計算訊號與干擾的功率頻譜密度(power spectral density, PSD)來獲得更為泛用且精確的BER結果。將濾波器的影響納入BER評估的考量，並且加入偏振態的維度，重新獲得BER的評估結果。對應次載波k的BER可以由式(1)得知：

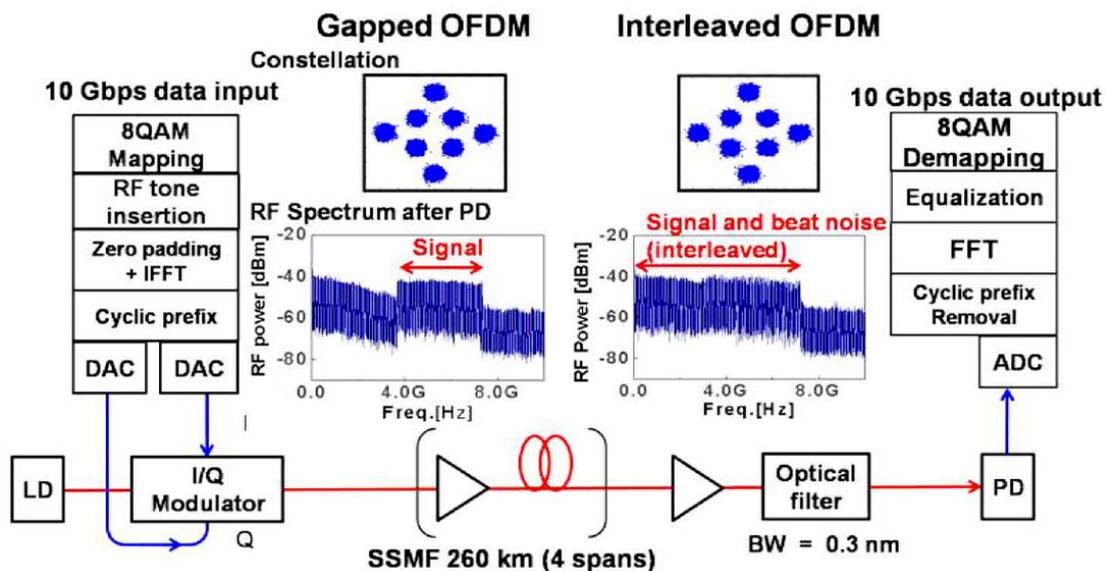
$$BER = \left(1 - \frac{1}{L}\right) \frac{\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3ESNR(k)\log_2 L}{(L^2 - 1)\log_2 M}}\right)}{\log_2 L} \quad (1)$$

而整體訊號的BER則為式(2)：

$$BER = \frac{1}{N_d} \sum_{k=0}^{N_d-1} BER(k) \quad (2)$$

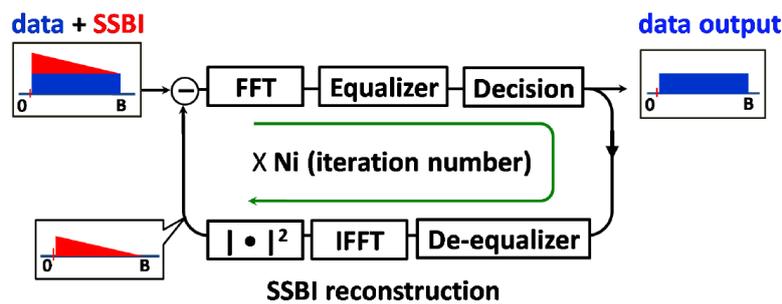
由於將光學濾波器的效果與偏振態色散的問題納入考量，我們所提出的BER評估方式可以更為精確的估算接收訊號的表現，而不需要再透過大量擷取訊號來獲得BER。並且可以正確獲得更高密度調變訊號的結果，提高評估演算法的泛用性。另一方面，在應用該演算法於直接接收(DDO-OFDM)技術中，可以發現，雖然gapped RF-tone assisted技術較受到濾波器的影響較小，但是interleaved RF-tone assisted技術能忍受的偏振態色散較大，在技術的採用上必須有所取捨。

在光學正交分頻多工技術的分野當中，直接接收(direct-detection)系統由於免除了同調接收系統中所需的在地振盪器雷射光源，大幅減低了接收端的成本與架構複雜度。為了增加頻譜效益，近來有文獻提出single-sideband (SSB)的optical OFDM系統。然而在其中，卻必須在接收端靈敏度與對色調色散的強度之間進行取捨。為能同步改善兩者，必須提出替代的解決方案。我們以加入RF-tone的方式，使其成為調變之後的光載波。如此一來，便可將調變的偏壓點設置在調變線性度最好的null point，如此可改善調變深度以獲得更好的訊號品質。實驗所採用的架構、接收訊號的頻譜及星座圖如圖六所示。我們利用RF-tone作為調變之後的光載波之optical OFDM技術，改善了先前SSB-OFDM技術所遇到的問題。兩項OFDM訊號配置的技術，gapped OFDM與interleaved OFDM，成功的使訊號免於SSBI的影響，且其接收訊號在經過260公里的傳輸之後，表現依舊相仿。實驗結果亦證實，相較於SSB-OFDM技術，RF-tone技術的接收靈敏度擁有5 dB的改善。



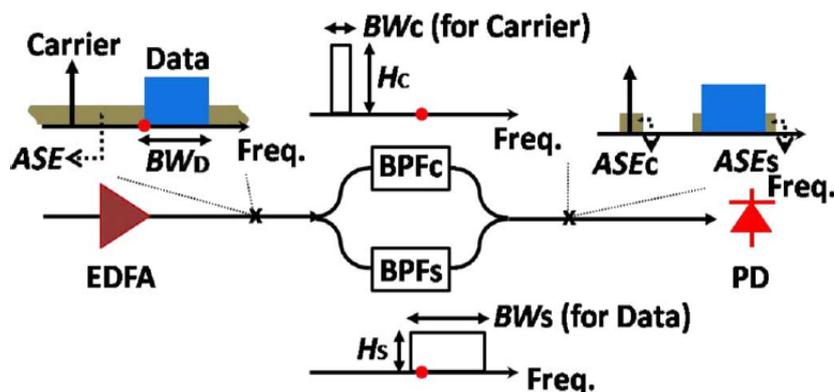
圖六、RF-tone OFDM 技術架構與兩項 OFDM 訊號配置的接收訊號示意圖。

在光學正交分頻多工，同調接收的系統擁有較好的接收靈敏度與頻譜效益，但是在接收端的複雜度越遠高於直接接收系統。我們利用 RF-tone 所產生的 VSS-OFDM 訊號，以做為線性的調變，以及最佳化的 CSPR 設置，來克服先前 SSB-OFDM 技術所遭遇的問題。為維持高度的頻譜效益，過去為了避開 SSBI 雜訊干擾所預留的保護頻帶被取消，取而代之的是在接收端執行遞迴運算，以減去訊號底下的 SSBI 雜訊。實驗結果顯示，遞迴演算(如圖七)的次數可以在 4 次之後，訊號的改善獲得飽和。最佳化的 CSPR，4 dB，也進一步的提高接收靈敏度。VSSB-PFDM 不僅將 DDO-OFDM 的頻譜效益提升，與 CO-OFDM 為同樣等級，亦解決了先前 SSB-OFDM 所遭遇的問題，為 DDO-OFDM 的運用帶來更大的潛力。



圖七、在接收端遞迴運算以去除 SSBI 雜訊干擾的示意圖。

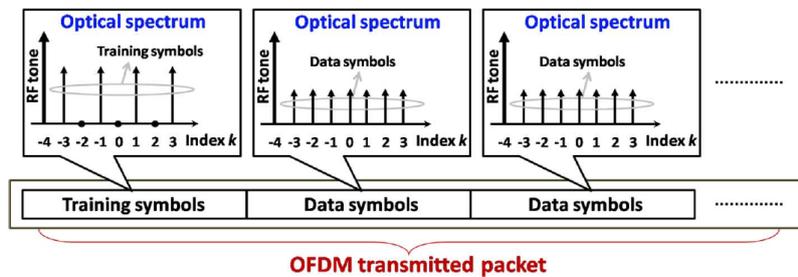
在 DDO-OFDM 因為本身需要一光載波與訊號一起傳輸，其接收靈敏度比起 CO-OFDM 在理論上即有 3 dB 的劣勢。再加上 DDO-OFDM 因為必須用較大的濾波器留下光載波與 OFDM 訊號的部分，也因而增加了許多 ASE-noise，造成接收靈敏度更加的不足。我們提出 spectrally matched optical filter (SMOF) 機制(如圖八)，可以充分抑制多餘的 ASE noise，大幅改善 DDO-OFDM 的接收靈敏度。其中通過光載波與 OFDM 訊號的兩組濾波器，其頻寬與響應大小將會影響接收訊號的表現。



圖八、Spectrally matched optical filter 的架構示意圖。

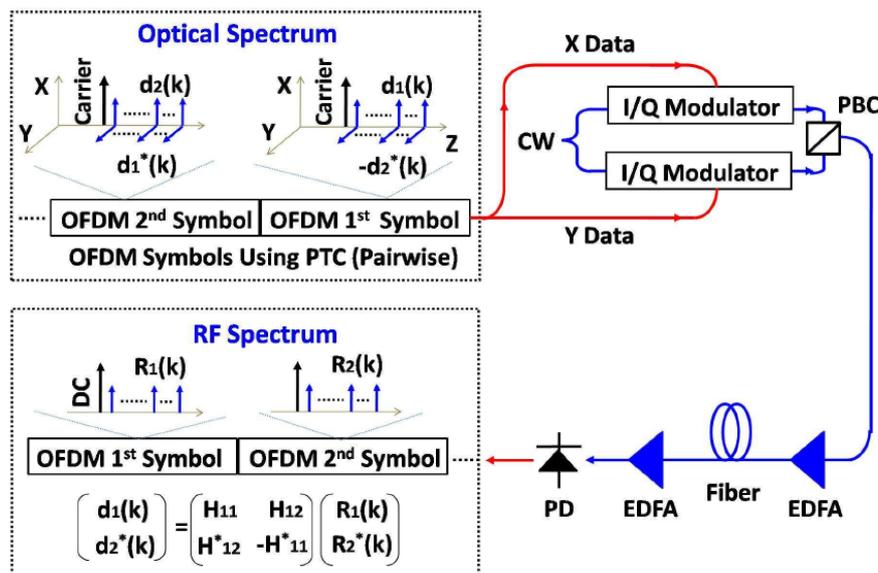
利用 RF-tone 作為光載波，VSSB-OFDM 訊號可以利用線性度最高的調變區域，大幅改善之前 SSB-OFDM 技術的不足。透過最佳化 CSPR，大約為 4 dB，可

獲得最好的接收靈敏度。為去除SSBI雜訊的干擾，利用遞迴運算的方式，可以在接收端訊號處理的時候，將SSBI從接收訊號中移除，大約在遞迴四次之後，訊號表現就趨於穩定。為了更進一步改善訊號，在光載波與OFDM訊號之間加入保護頻帶，可以使OFDM訊號較為遠離SSBI雜訊的干擾，在保護頻帶為訊號頻寬的0.35倍時，不僅傳輸距離大幅提升，接收端執行遞迴運算的次數也可以降低為2次。大幅將低了系統的複雜度，也充分提高系統的品質。



圖九、為避免 training symbol 因受到 SSBI 干擾而誤判通道響應，在 VSSB-OFDM 系統中，training symbol 會採用 interleaved OFDM 的訊號。

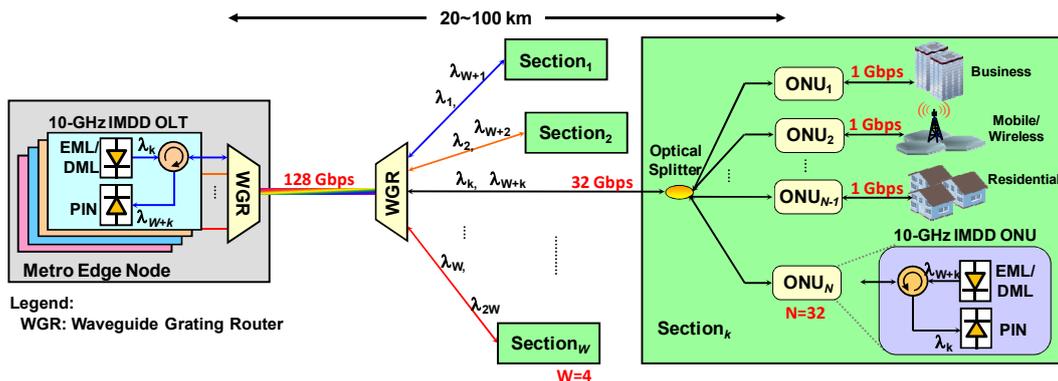
我們接著提出 polarization-time coding (PTC) 的方式，來增加 OFDM 訊號對通道中 PMD 的容忍度。如圖十所示，PTC 的訊號配置為相鄰的兩個 OFDM symbol 為一組(pairwise)，在第一個 symbol 之中，兩偏振態所承載的訊號分別為 $d_1(k)$ 與 $d_2(k)$ ，第二 symbol 必須配合第一 symbol，在兩偏振態上的訊號分別為 $-d_2^*(k)$ 與 $d_1^*(k)$ 。在接收端訊號處理的部分，便擁有一組訊號可以評估通道中受到偏振態色散影響的程度，將其響應的反運算套用到接收訊號之上，便能獲得原本傳送端的訊號。PTC 的技術將可以大幅提升 OFDM 訊號對於通道的偏振態色散與色調色散的容忍力。利用 polarization-time coding (PTC) 的技術，可以將傳輸過程中偏振態色散的影響大幅降低。雖然會造成 3 dB 的接收靈敏度劣化，但是 PTC 使得訊號即使經過長距離傳輸，其結果依然與傳輸前相仿。



圖十、Polarization-time coding (PTC) 的訊號配置與接收端訊號處理的示意圖。

● 子計畫三：光學正交分頻多工微波光電擷取系統支援Quad-play的服務

隨著寬頻影音技術不斷的突破，如Super Hi-Vision影像節目、Real-time HD Video Conference、HD IPTV、以及3DTV等等，促使網路頻寬不斷突破。同時行動影音服務快速興起，因此需要快速升級以提供大量頻寬。光纖網路具有低損耗、不受電磁波干擾等優點，最適合用來支援高畫質影音服務的傳輸以及無線網路Backhauling。因此，如圖十一，目前國際標準組織FSAN開始制訂新一代PON網路標準NGPON 2，並訂定了兩個重要目標：第一個是將PON網路傳輸速率由10 Gbps提升至40 Gbps，以滿足未來寬頻影音服務以及大量興起無線網路Backhauling的需求。第二個是將PON網路的涵蓋範圍由20公里提升至60~100公里，使得PON網路佈建可支援更多的用戶以及更大的服務範圍，藉此以降低光纖網路佈建成本。因為涵蓋範圍變大，PON網路局端可以直接與光都會網路Edge Node整合，使得網路階層數減少，達到網路扁平化。同時也降低光訊號在光網路節點中光電轉換的次數，減少光電轉換產生的延遲，進而提升網路傳輸效率。



圖十一、NGPON 系統架構圖。

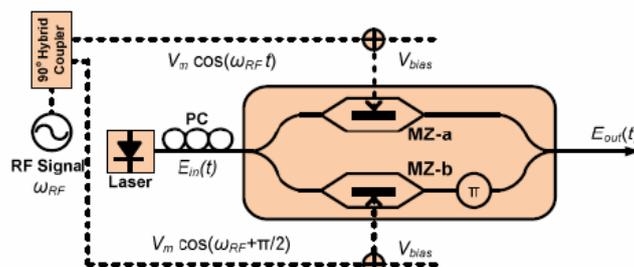
表一、傳輸結果

SMF (km)	Band 1		Band2			Total	
	Subcarrier No	Data Rate (Gbps)	Subcarrier No.	Data Rate (Gbps)	LO freq.	Subcarrier No.	Data rate (Gbps)
100	210	22.01	215	18.16	396 th	425	40.17
80	225	23.5	216	18.55	420 th	441	42.05
60	236	25.45	188	15.90	436 th	424	41.35
40	180	23.18	152	17.03	260 th	332	40.21
20	204	26.11	240	22.38	326 th	444	48.49

目前的光纖接取網路的解決方案GPON/XGPON都採用OOK調變與分時多工的技術來傳送光網路訊號，一旦頻寬需求提升至40 Gbps，光收發器模組的頻寬也必需提升至將近40 GHz。一般的光收發模組與相關電路難以維持成本效益並支援如此高的頻率，將會形成光纖接取網路升級的瓶頸。同時，相較於10 GHz光訊號，40 GHz光訊號抗色散能力會降低約16倍，導致40 Gbps光訊號可傳輸光纖距離不到5公里，嚴重限制NGPON 2光纖網路可涵蓋的範圍。有鑑於此，國際標準組織FSAN開始積極考慮不同於分時多工與OOK的新式光傳輸多工技術。

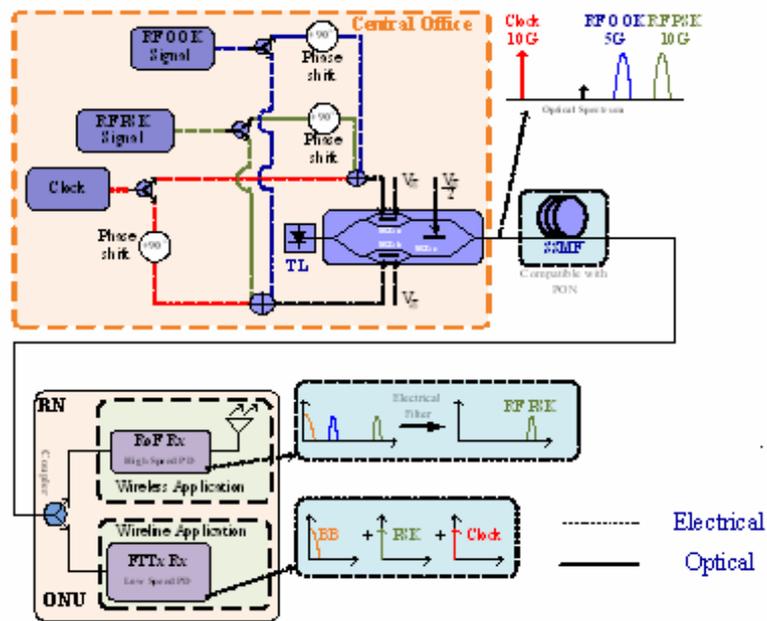
多重載波的OFDM技術因為可以將40 Gbps的高速串列資料轉為並列的低速多通道資料，分散給多個彼此正交的Subcarriers來載送，再搭配16-QAM、64-QAM等調變技術，將資料載在 $\leq 10\text{GHz}$ 的頻寬之內，因此可以大幅降低光收發模組的頻寬要求，使得目前已廣泛使用且具成本效益的10 Gbps光收發器可以繼續被使用來傳輸40 Gbps光訊號，並使得成本可以大幅降低五倍以上。同時，也因為所佔頻寬降低（ $\leq 10\text{ GHz}$ ），因此抗色散能力也大幅提升，使得光纖涵蓋範圍大幅增加。Optical OFDM傳輸多工技術在FSAN標準會議中正被積極討論，並更進一步被納入白皮書，成為重要的傳輸技術項目。在這個計畫中，我們成功的達成並且超越我們當初所訂下的目標，在表一的結果所顯示，我們所展現的結果是全世界最直調傳輸距離最遠且最具經濟效益的實驗室。

我們亦發展在60-GHz頻段的戶內超高傳輸量($>4\text{ Gb/s}$)網路以達成在用戶家庭內的高速HDTV的信號傳輸。60-GHz所能使用的頻帶寬高達7-GHz，直接影響到的資料傳輸率也提升許多。除了具有高資料傳輸率外，信號傳輸在60-GHz頻帶還有許多獨特的特性和益處，如高抗擾力，資料高安全度，和頻率的重複使用。60-GHz的信號在大氣中傳送時絕大部分的能量在傳送1公里後就被氧分子吸收掉，所以60-GHz的頻帶訊號在短距離傳送時具有高度安全性。因此在區域內可相容許多同頻段的無線訊號傳遞。以接收觀點來看，由於衍射效應的結果，高頻電磁波比低頻電磁波指向性佳，且60-GHz接收端的天線設計較低頻的天線來得小。然而60-GHz的產生在目前仍然非常的昂貴，因此，在這次的設計中，我們開發與驗證已在理論上完成的4倍頻光電調變技術來實現60-GHz之radio-over-fiber系統。如圖十二所示，此系統只須以低價的元件來產生60-GHz的毫米波信號。最終在上面承載4-Gb/s QAM-OFDM的信號，並完成傳輸的驗證。

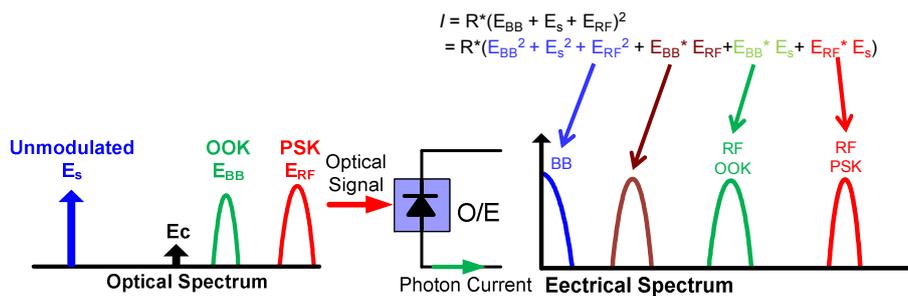


圖十二、四倍頻光電調變系統設計

緊接著我們提出一個新的架構。如圖十三，我們使用optical I/Q MZM，產生單旁帶(optical single-sideband)的訊號。光纖到府的訊號調變格式為開關鍵控(On-Off-Keying)。光載無線訊號的調變格式則為相位鍵移訊號(Phase-Shift-Keying PSK)。如圖十四所示，經過MZM之調變，產生了一載有OOK與載有PSK之上旁帶(Upper Sideband)訊號與載有optical carrier之下旁帶(Lower Sideband)訊號之光譜訊號。在經過光偵測器接收之後，在基頻部分可觀察到光載子電場(E_c)、PSK旁帶電場(E_{RF})與OOK旁帶電場(E_{BB})的平方項，由於光載子電場與PSK旁帶電場強度皆為不變之定值，經過光偵測器接收之後，只會於基頻上造成直流(DC)訊號，且可以輕易使用直流阻絕器將之濾除。因此，在遠端節點，不需使用光濾波器分開FTTx與RoF各別的訊號。由於SSB的調變方式，此系統沒有傳統雙旁波調變方式有射頻衰退(RF fading)的問題。此外，此系統在遠端節點只需使用光耦合器，將光訊號分給不同應用使用，而不需使用窄頻光濾波器，因此使得系統變得較為簡單且符合現存WDM PON的系統。在實際實驗模擬中，在遠端對FTTH BB的應用，OOK BB訊號可以直接用1.25-Gb/s之接收器來偵測，對ROF的應用，BPSK RF訊號可以用14.375-GHz的弦波訊號降頻後再用高速PD來接收。實際傳輸結果顯示不論是OOK或是8PSK都沒有明顯的power penalty。



圖十三、系統架構圖。



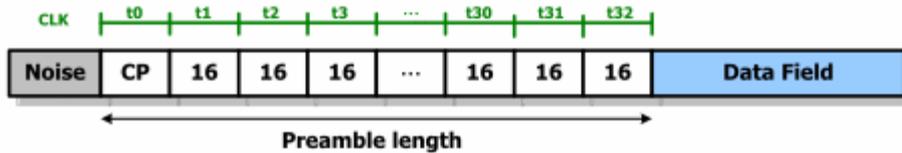
圖十四、產生之信號頻譜示意圖。

● 子計畫四：OFDM基頻處理器架構設計

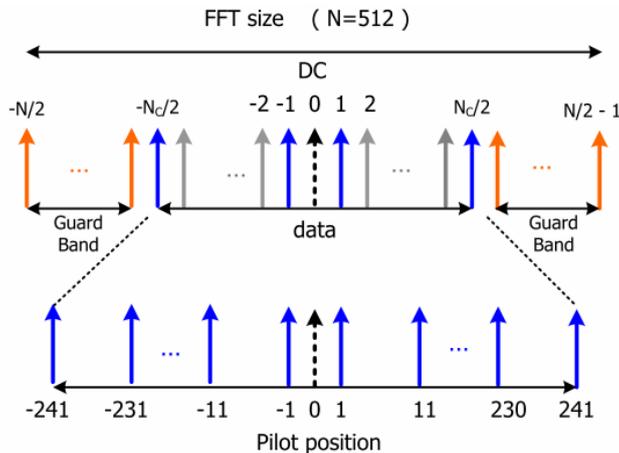
在子計畫四，我們因應光學正交分頻多工的高傳輸頻寬，設計並實現高運算吞吐量之光學OFDM發射接收機，藉IC設計實作與其在光學系統上之實驗，來達成全光都會網路中Optical OFDM 收發機傳輸之實現。研究方法從系統模擬到IC架構設計皆涵蓋，一方面進行光纖通訊OFDM傳輸之數值模擬分析，包含Transceiver與Optical Channel模擬，另一方面已完成在Optical OFDM系統之高吞吐量快速傅立葉轉換器(FFT)的IP架構設計與驗證，之後再進行系統整合與FPGA Verilog RTL架構的設計。經由 FPGA系統驗證過後，再根據 FPGA速度上的限制進一步進行 IC晶片的設計。最後將所設計的optical OFDM FFT receiver使用 UMC 90nm CMOS Technology進行設計，所設計之晶片至國家系統晶片中心(CIC)下線製作並將晶片進行量測與驗證。

我們進行optical OFDM receiver chip前必須為optical OFDM System設計傳輸OFDM的框架結構(frame structure)，如圖十五。其中有32個preamble可提供optical OFDM基頻處理器進行框架同步的功用；此外為了提供在頻率上做通道估測與等化的功能，我們也根據optical OFDM channel做分析模擬，設計出Pilot在頻域subcarrier上的分佈圖如圖十六。

我們使用了交大陳智弘教授實驗室所提供的optical Channel(見圖十七)做系統模擬與驗證，其規格如表二所列。我們所提出的基頻處理器架構如圖十八所示，包含了Packet Boundary detection、Carrier Frequency estimation and recovery



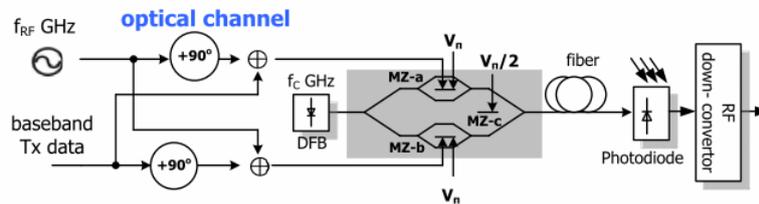
圖十五、Frame Structure。



圖十六、Pilot Patten for OFDM subcarriers

loop、FFT Processor與Frequency-domain Channel equalizer。為了要支援光通訊系統中高吞吐量的OFDM解碼運算，我們設計了多路徑回授電路架構(Multiple-Delay Feedback Architecture)來設計快速傅立葉轉換處理器(FFT Processor)，如圖十九所示。其中我們充分利用Butterfly硬體中redundant時段來重複使用硬體，可讓其使用效率達百分之百的使用，以達到最高運算之吞吐量。

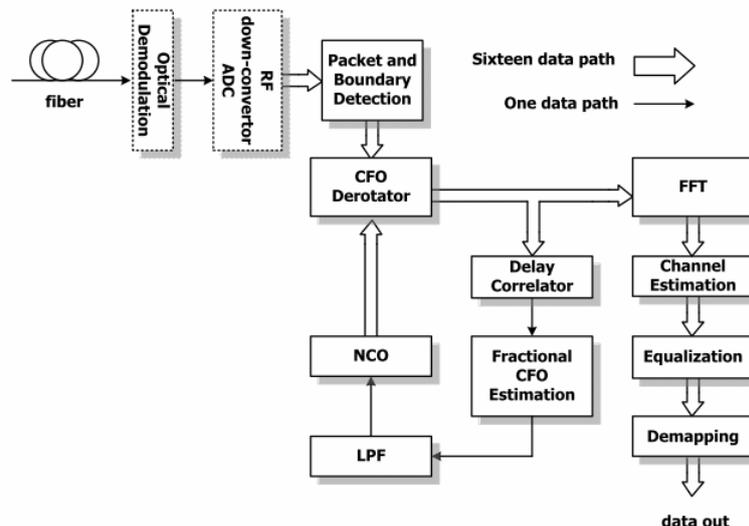
我們根據此設計的架構進行晶片硬體的設計，撰寫Verilog RTL進行電路的布局驗證。我們透過國家實驗研究院系統晶片設計中心用UMC 90nm CMOS的製程下線製作品片(見圖廿一)，然後使用Agilent 93000 SOC測試機台量測晶片效能，如表三所示。我們也利用optical OFDM 的訊號計算其optical OFDM的錯誤率如圖廿。我們設計研發之optical OFDM FFT receiver可以達到2.67GSamples/sec的取樣運算速度，相對於64QAM的OFDM傳輸模式來說，可以達到約10Gbps的



圖十七、Optical Channel。

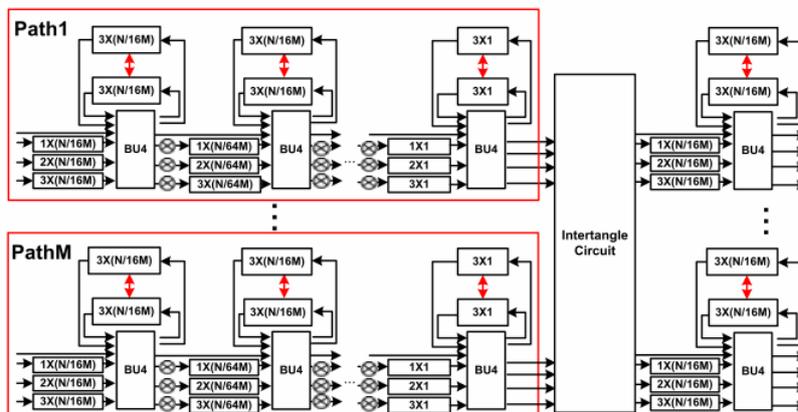
表二、Baseband processor specifications

Parameters	Value	Unit
Data rate	4	GHz
Chip duration	0.25	ns
FFT size	512	points
Data/Pilot/Guard/DC	432/50/29/1	sub-carriers
CP length	16	samples
Sub-carrier spacing	7.8125	MHz
Utilized data BW	3.375	GHz
RF central frequency	9.5	GHz
Optical central frequency	193.1	THz
CFO (fc=9.5GHz)	$\pm 1/\pm 5/\pm 10/\pm 20$	ppm
SCO (fs=4.0Ghz)	$\pm 1/\pm 5/\pm 10/\pm 20$	ppm

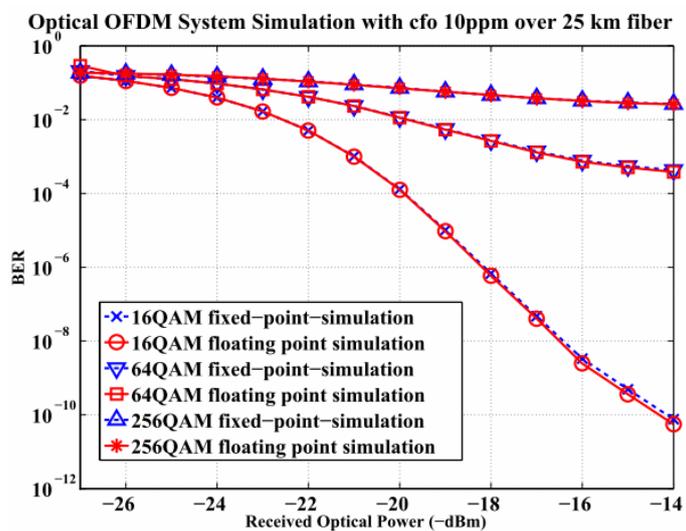


圖十八、Baseband processor architecture。

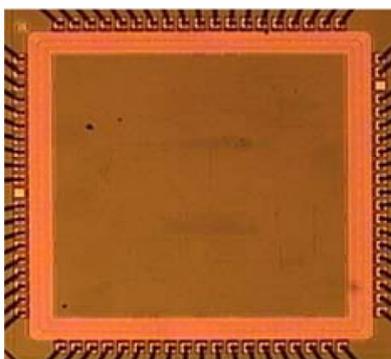
傳輸容量。



圖十九、FFT processor architecture



圖廿、BER performance of the optical OFDM FFT receiver.



圖廿一、Photography of the optical OFDM FFT processor chip.

表三、OFDM FFT processor chip specification

Process	UMC90
Voltage (core/PAD)	1.0 / 3.3 V
Clock speed	100/166.67 Mhz
Chip Power consumption	103 mW
Core Area	1.948 mm ²
Chip Area	4.358 mm ²
Gate count	522000
PAD number	82 pin
Transistor Utilization Density	91.81%
Sampling Rate	2.67G Samples/sec
Throughput	10Gbps

3. 自我評量

- 子計畫一：全光WDM都會網路之OFDMA/WDM媒介存取控制與頻寬分配系統

本計畫執行三年期間已經發表3篇Journal Papers (1篇IEEE/OSA JLT, 1篇Optics Express, 1篇IEEE PTL), 1篇Conference papers (IEEE ICC)。

- 子計畫二：應用於都會網路之可重新置換、高頻譜效率光學正交分頻多工傳輸系統

本計畫執行三年期間已經發表7篇Journal Papers (3篇IEEE/OSA JLT, 2篇Optics Express, 2篇IEEE PTL), 10篇Conference papers。

- 子計畫三：光學正交分頻多工微波光電擷取系統支援Quad-play的服務

本計畫執行三年期間已經發表3篇Journal Papers (2篇Optics Express, 1篇IEEE PTL), 2篇Conference papers。

- 子計畫四：OFDM基頻處理器架構設計

本研究完成了optical OFDM FFT receiver的晶片設計與實作驗證，效能可以達到2.67Gsamples/sec與10Gbps/sec的Throughput，並且已經將此研究成果發表在2011 IEEE VLSI-DAT會議上，就晶片效能來說已經超出原先預計的目標。

此外，總計畫主持人於2010年度亦擔任lead Guest Editor for *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)* special issue on “Next-Generation Broadband Optical Access Network Technologies,” 在此特刊內，OFDMA技術是其中一項焦點議題，對於未來全球通訊之發展具有極高之影響力。

參考文獻

- [1] B. Mukherjee, "WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 10, Oct. 2000, pp. 1810-1824.
- [2] S. Yao, S. Yoo, B. Mukherjee, and S. Dixit, "All-Optical Packet Switching for Metropolitan Area Networks: Opportunities and Challenges," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 39, no. 3, Mar. 2001, pp. 142-148.
- [3] L. Xu, H. Perros, and G. Rouskas, "Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 39, no. 1, Jan. 2001, pp. 136-142.
- [4] M. Yuang, S. Lee, P. Tien, Y. Lin, J. Shih, F. Tsai, and A. Chen, "Optical Coarse Packet-Switched IP-over-WDM Network (OPSINET): Technologies and Experiments," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, Aug. 2006, pp. 117-127.
- [5] C. Develder, J. Cheyns, E. Van Breusegem, E. Baert, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "Architectures for optical packet and burst switches," (INVITED) *Proc. of ECOC*, vol. 1, Rimini, Italy, Sept. 21-25, 2003, pp.100-103.
- [6] Y. M. Lin, "Demonstration and design of high spectral efficiency 4Gb/s OFDM system in Passive Optical Networks," *Proc. of OFC*, 2007.
- [7] D. Qian, J. Hu, P. Ji, T. Wang, and M. Cvijetic, "10-Gb/s OFDMA-PON for Delivery of Heterogeneous Services," *OFC*, 2008.
- [8] M. Bakaul, A. Nirmalathas, C. Lim, D. Novak, and R. Waterhouse, "Hybrid Multiplexing of Multiband Optical Access Technologies Towards an Integrated DWDM Network," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 21, Nov. 2006, pp. 2311-2313.
- [9] M. Crisp, S. Li, A. Watts, R. Penty, and I. White, "Uplink and Downlink Coverage Improvements of 802.11g Signals Using a Distributed Antenna Network," *IEEE J. of Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 11, Nov. 2007, pp. 3388-3395.
- [10] J. L. Wei, X. Q. Jin, and J. M. Tang, "The Influence of Directly Modulated DFB Lasers on the Transmission Performance of Carrier-Suppressed Single-Sideband Optical OFDM Signals over IMDD SMF Systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no.13, July 2009, pp. 2412-2419.
- [11] N. Bouabdallah, A. Beylot, E. Dotaro, and G. Pujolle, "Resolving the Fairness Issues in Bus-Based Optical Access Networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 8, Aug. 2005, pp. 1444-1457.
- [12] C. Juang and C. Lin, "An On-Line Self-Constructing Neural Fuzzy Inference Network and Its Applications," *IEEE T. Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 1, Feb. 1998,

pp. 12-32.