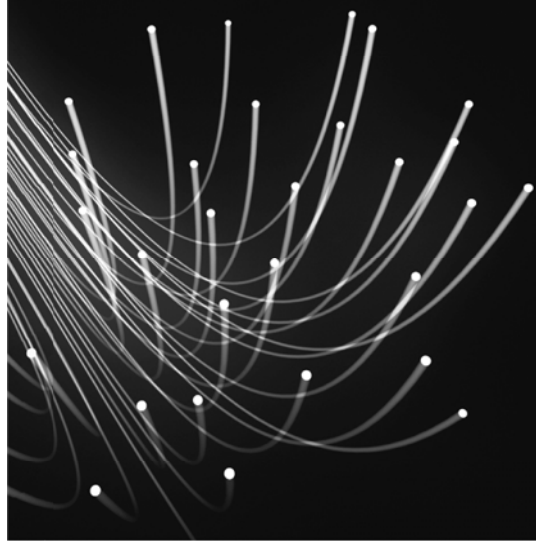


光纖通訊簡介

- 1.1 前 言
 - 1.2 光纖通訊的構成要素
 - 1.3 光纖的歷史回顧
 - 1.4 光纖通訊的優點
 - 1.5 光纖通訊的未來展望
- 習題一



FIBER-OPTIC
COMMUNICATIONS AND PRACTICE



1.1 | 前 言



自古以來，人類為了輸送物資和傳遞訊息，付出了無數的努力。為了減輕負荷，亦想出了許多辦法，即根據不同物資的需要，採用專門的技巧以達到有效的輸送。古羅馬修建有名的大規模水道，就是根據重力原理巧妙地利用水的性質，可說是今日之瓦斯管道、輸水管道以及輸油管道的起源。現在當我們利用這些管道輸送時，首先的要求就是低消耗，亦即加壓輸送時需求的能量低，以及管道輸送過程中洩漏少。

就傳輸而言，除了物資的輸送外，還有訊息的傳輸，也就是傳送有意義的訊號。當然，若採用專用的訊息傳輸通道，亦可達到保密的效果。通過傳輸線路大規模的傳輸訊息方法，則是進入十九世紀以後才出現的。在這以前，訊息傳送的辦法是靠點燃烽火、亮燈籠、舉訊號旗、打燈號密碼、擂戰鼓等，以光或聲的符號化形式在空間傳遞，然因聲或光的傳播不僅距離較短，也容易受風、霜、雨、雪、霧等天候影響，所以遠距離傳輸時需要設立許多中繼站。但是，各中繼站上出現的小誤差累積起來，就可能使訊息的傳達不正確。因此，在遠距傳輸時，能有效傳達正確訊息的傳輸管道顯得特別重要，而作為現代訊息傳輸線路所要求的特性，除了能低損耗的向遠方傳輸外，還要求能夠將大量的訊息無畸變地、高速且正確地傳輸。今日，電子技術的應用領域甚為廣泛，其基礎其實就是訊息傳輸技術。

光訊息傳輸方式與傳統傳輸方式比較，它們的基本差異是傳輸線路變成了光傳輸線路、電訊號變換為光訊號，而且還要附加一套將光訊號再變換回電訊號的轉換器。

由於人類文明愈發展，資訊愈透明流通，資訊不僅改變了人類的生活型態，也改變了人類的擁有欲，從物質面轉移到了精神面。目前的趨勢是，有能力蒐集、整理資料並靈活運用的人，就容易獲得成就。因此，資訊的快速流通、方便擷取，便成為社會大眾的普遍需求。必須有一種通訊方法，讓人們能輕易地取得文字、數據、聲音與圖像等資料，才能滿足這種趨勢與需求。光纖通訊正是應運而生的新技術。

光纖通訊(Fiber-Optic Communications)是近三十多年來才迅速發展起來的一門新技術。光纖(Fiber Optics)具有低損耗、頻帶寬、線徑細、重量輕、可撓性好、無感應(不受電磁干擾)、無串話、節省資源等特點,目前其性能亦日臻完善,價格則不斷降低,應用範圍正在擴大。在通訊方面,光纖具有良好的傳導性能,它可以傳輸巨大的訊息容量,一條光頻通路上就可以同時容納幾十億人通話。如果以光纖傳播電視節目,則能像打電話一樣構成電視網,同時傳送上千套節目,供人們選擇收看。目前,光纖通訊早已走出實驗室,開始為生產、科技研發和生活服務。

目前各種資訊產品功能日新月異,為人類生活提供許多數位用途,如線上閱讀、網路商城購物、線上遊戲、網路電視、視訊會議、雲端運算等,逐漸蔚為當前趨勢,諸如智慧型手機(如 iPhone)、平板電腦(如 iPad)等商品都主打行動上網的功能,比比現況皆顯示行動通訊時代的來臨。而行動通訊功能的不斷提升,使網路頻寬的需求大幅度增加,也促成了業者需要敷設更高容量的網路系統設備。光纖的低損耗、高頻寬、高傳輸容量等優點,自然成為業者們首要矚目的對象。因為面臨這樣的情勢,高速光纖通訊技術在全球各地都積極尋求突破之下,進而帶領了下一代通訊技術成為主流。

1.2 | 光纖通訊的構成要素



FIBER-OPTIC
Communications and Practice

定義如下：

光纖：光纖即光導纖維的簡稱，是一條玻璃或塑膠纖維，用來讓訊息從某一端點載送到另一個端點的傳輸媒介質。

光纖通訊：是以光為載頻、以光纖為媒介的一種通訊方式，可說是一種光通過很細可撓玻璃或塑膠纖維傳輸的科學技術。

光纖的功能：它可以完成銅軸電纜載送電話通話或電腦數據一樣的基本功能，但光纖這微小之圓柱線運載的是光訊號而不是電訊號。



光纖的優點：光纖提供比銅軸電纜較高的傳輸容量，卻沒有微波傳輸站費用高且僅直視線範圍傳送的限制。光纖可攜載大量資訊而不受串話(Crosstalk)或電磁噪音干擾（如雷電、附近的電動馬達及類似的來源），而且被竊聽時會產生訊號強度的明顯下降，很容易被檢測到。資料在光纖中可以數位方式傳輸（光纖藉著光脈波沿著細如髮絲的玻璃或塑膠纖維通過，而傳輸數位化的信息或資訊），是計算機數據的自然形式。光纖除可在電信上用來傳輸電話訊號、網路通訊和有線電視訊號外，還可應用在醫藥領域，例如用來拍攝身體內以其他方式無法到達的部位。檢查身體內部器官或凹處時，過程是使用玻璃或塑膠光纖將光傳送以通過一個特殊設計的管，放大並反映所觀察的內部區域表面影像。此外，還有工業、軍事、光電控制、星野(Starscape)和商業照明等領域的多種應用。總之，光纖是一項正在起步中的新技術，具有發展潛力，可望成為資訊革命與世界網路化的不可或缺之要素。

光纖通訊系統：基本的光纖通訊系統是一條連接兩個電子電路的鏈結，如下圖（圖 1.1）所示：

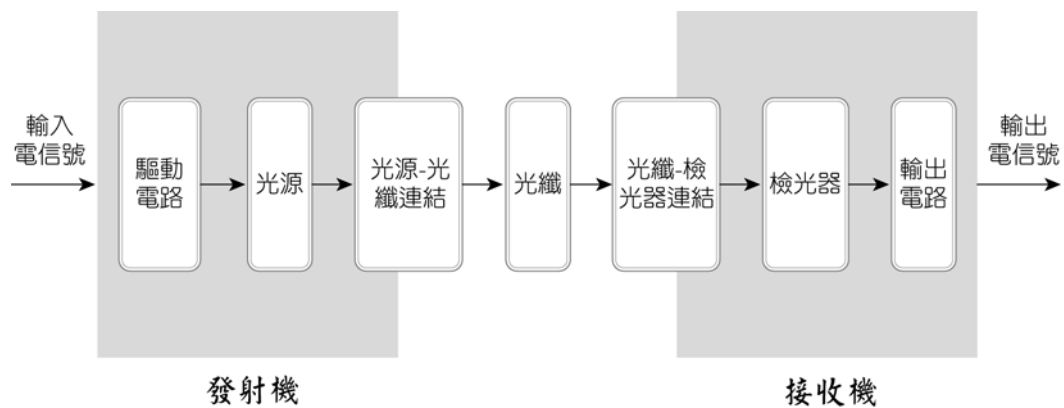


圖 1.1 基本的光纖通訊系統

其中，構成光纖通訊系統實體的四個要件為：

- (1) 發射機(Transmitter)：作用是將電訊號轉換成光訊號。發射機中的驅動電路負責將送入發射機的電訊號轉變成光源所要求的形式。光源為發射機的心臟，它是發光二極體(Light-Emitting Diodes, LEDs)或雷射二極體(Laser Diodes, LDs) (不宜用日光燈或燈泡的光，因為它們的波長與相位會混亂在一起)，主要功能是負責將實際的電訊號轉換成光訊號（此時，電訊號的 0 與 1 會轉變成光的亮與暗，訊號的強弱也會轉變成光的強弱）。當然，發光二極體和雷射二極體都需要連接電源供應(Power-supply Connections)及調變電路(Modulation Circuitry)。
- (2) 光纜(Fiber-Optic Cable)：即光纖纜線，是載送光訊號的媒介質。纜線是由光纖與防護外層組成。
- (3) 接收機(Receiver)：功用是接收光訊號後轉換回電訊號。接收機的兩個基本組件是檢光器(Detector)與輸出電路，檢光器將光訊號轉換回電訊號，輸出電路則把電訊號放大與整型。目前光纖通訊所用的檢光器是半導體光電二極管(Photodiodes, PD)。
- (4) 連結：作用是連接光源與光纖、以及光纖與檢光器。

而發射機與接收機的電路如同一般的電子系統，可以非常簡單或相當複雜。

1.3 | 光纖的歷史回顧

FIBER-OPTIC
Communications and Practice



光是頻率非常高的電磁波，光與其他電磁波比較，最大的不同點在於人用眼睛可以直接觀測可見光，因此，光學比電學發展得早，在訊息傳輸上利用光也比利用電要早些。但是，後來電獲得急速發展的機遇（例如可用銅纜線當作媒介傳輸等），而光傳輸卻由於從前未具備像電那樣低損耗的傳輸線路，因而使得它的發展遲緩。



光波其實是人們最熟悉的電磁波，其波長在微米級(10^{-6} m, μm) (光纖通訊常用長度單位，參閱表 1.1)，頻率為 10^{14} Hz 數量級。在電磁波譜中 (如圖 1.2)，紫外線、可見光、紅外線均屬於光波的範疇。目前光纖通訊使用的範圍是在近紅外線區內，即波長為 $0.8\sim 1.8 \mu\text{m}$ ，又可分為短波長波段和長波長波段，前者是指波長為 $0.85 \mu\text{m}$ ，後者是指波長為 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ ，這是目前光纖通訊所採用的三個通訊窗口。

利用光纖作為光的傳輸媒介質之光纖通訊，其發展雖僅有 30 餘年的歷史，但是亦非一蹴可幾，而是累積了許多前人的努力才能得出目前的成果：

1870 年，英國物理學家約翰 丁道爾(John Tyndall)以透過內部反射導引光線之原理，說明光在流水中前進時，會在轉角處被彎曲，觀察者可以看到，光線在流水彎曲的路徑中遵循鋸齒形狀前進。現在則已證明，光在光纖中亦有類似的鋸齒狀行徑發生。

1880 年，亞歷山大 格雷姆 貝爾(Alexander Graham Bell)發明了一種可將說話以光束傳送的非導光線(Unguided Light)的光電話。此種電話是藉一系列的透鏡與鏡子，將窄束太陽光線(Narrow Beam of Sunlight)聚焦投射在連接於話筒對嘴端的平面薄鏡上，從嘴發射的聲波，會隨聲音的強弱而成比例地振動此鏡子，因而調變反射光的強度。反射光再投射到使用硒(Selenium, Se)做為檢光器的接收機上，檢光器的電阻隨投射在其上之光的強度而變化，亦即，聲音調變的光線射在檢光器的硒上，使其電阻變化，而改變接收器的電流使聲音重現出來。遺憾的是，因為此設計的傳送距離僅可達約 100 公尺，所以並未能成為實用的商品。

1960 年，美國休斯實驗室(Hughes Laboratories)的狄奧多耳 梅曼(Theodore Maiman)等人發明了紅寶石雷射，於是就有可能產生像電波那樣相位一致的光波，從而使雷射的應用技術蓬勃發展起來，尤其是以開拓較高頻率領域為目的，而進行毫米波研究的電波技術人員，對雷射也產生了興趣，很多這方面的專家投入了雷射的研究。

在各種光傳輸的線路中，由於玻璃傳輸光的損耗大，所以光在玻璃介質中一直難以實現低損耗的傳輸。但是，1966年英籍華人高錕博士(Dr. Charles Kuen Kao¹)提出利用 SiO₂ 石英玻璃製成低損耗光纖，則可以將玻璃中的雜質去除，而使光的吸收減到非常小。基於這種設想基礎，1970年美國康寧公司(Corning, Inc.)研製出損耗僅為 20dB/km 的光纖，才使得光纖進行遠距離傳輸成為可能（其後 2009 年的高錕博士獲諾貝爾物理獎，就是肯定他在光纖領域的洞察力與貢獻）。自此以後，光纖通訊的研究在世界各地迅速發展。1976年，日本電氣通訊研究所更研製成在波長 1.2 μm（紅外線）時損耗僅為 0.47 dB/km 的超低損耗光纖，遠比同軸電纜的傳輸損耗為低（載頻通訊用的同軸電纜，在 20 兆赫(MHz)的頻率下，損耗為 10 dB/km）。自 1970 年以後的短短一、二十年中，光纖技術已從 0.85 μm 短波長多模光纖發展至 1.31 μm~1.55 μm 的長波長單模光纖，同時開發出許多新型光電器件，雷射器壽命則已達數十萬小時甚至百萬小時，一些國家也相繼建設了多條遠距光纖通訊系統。²

表 1.1 光纖通訊常用長度單位

中文名稱	意義	英文名稱及意義
毫米	千分之一公尺	millimeter, mm, 10 ⁻³ m
微米	百萬分之一公尺	micrometer, μm, 10 ⁻⁶ m
奈米	十億分之一公尺	Nanometer, nm, 10 ⁻⁹ m

¹ 1933年11月4日生於上海，1949年隨父母移居香港，1953年赴英留學，1957年進入英國標準電話與電報公司工作，1965年獲倫敦大學電機博士學位，1966年發表論文「介電波導管的光波傳送」，1970年擔任香港中文大學電子系主任，1974年到美國ITT總公司工作，1987年擔任香港中文大學校長，1996年獲得日本獎，同年從香港中大退休，成立高科橋顧問公司，2009年獲諾貝爾物理獎。

² 在1990年代後期到2000年，產業推動者與研究公司，如KMI和RHK預測由於互聯網的使用增加，以及各種帶寬密集型消費服務如視頻點播的商業化，未來全球對通訊頻帶寬的需求將會大幅提昇。通訊公司如Verizon和AT&T已經採用了光纖通訊的優勢，提供各種高資料流量和高頻帶寬的服務至消費者家中。而且自1990年以來，當光學放大系統變成商業化時，電信行業就已經發展奠定城際和越洋光纖通訊的龐大網絡。到2002年，長25萬公里、容量為2.56 Tb/s的海底通訊光纜洲際網絡完成，電信投資報告顯示自2004年以來該網絡的容量也大幅提升。

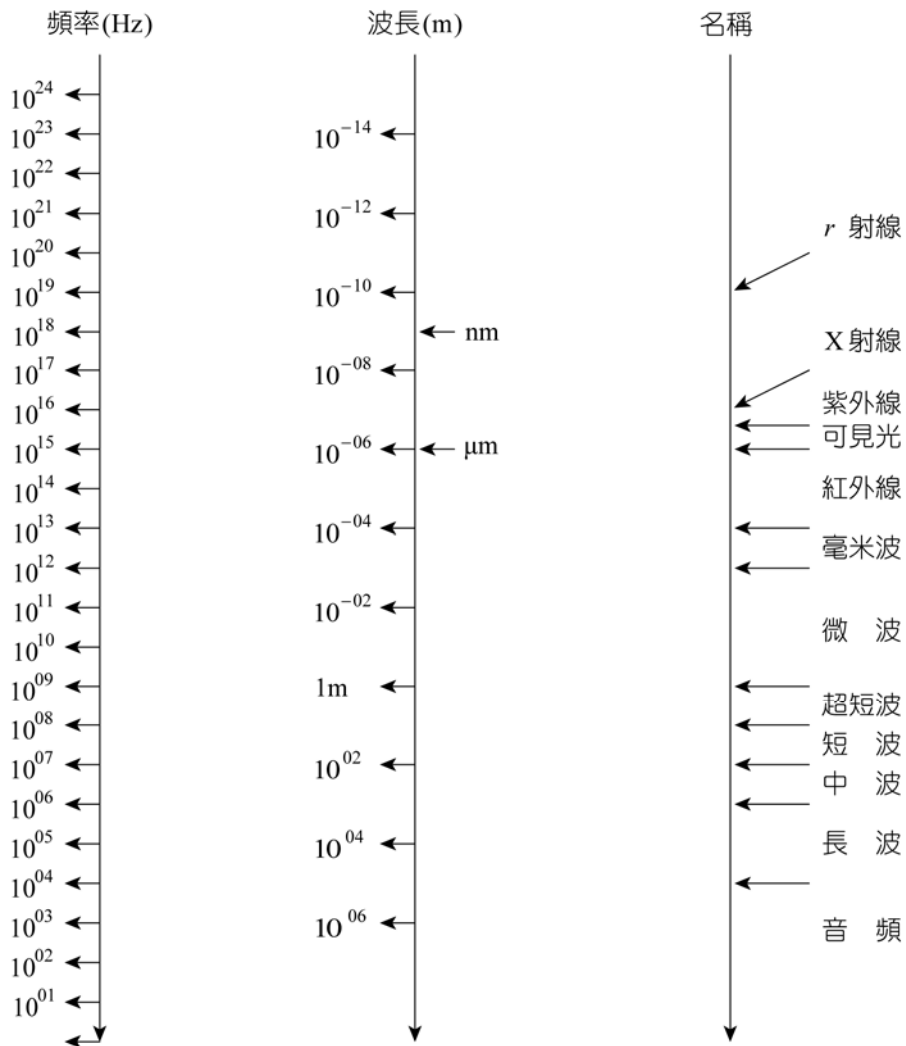


圖 1.2 電磁波譜

1.4 | 光纖通訊的優點

FIBER-OPTIC
Communications and Practice

光纖通訊的優點有低損耗、寬的頻帶寬、線徑細、重量輕、可撓性佳、電磁屏蔽、安全、隱密、節省資源等特點，茲分別說明如下：

低損耗：光纖的傳輸損耗比電話電纜、同軸電纜和雙絞線電纜等任何一種傳輸損耗都低，一般光纖在波長為 1.0~1.7 μm 範圍（波長 1.4 μm 附近除外），都可達到 1 dB/km 的低損耗值，現在的石英光纖最低損耗值則已達到約

0.4 dB/km 了。光纖的低損耗可延長中繼站的間隔距離，由於任何中繼站的建立、安裝與維護皆相當昂貴，因此，光纖需要較少的中繼站，即表示系統成本較低，且可作長距離傳輸。

寬的頻帶寬(Wide Bandwidth)：光的頻率比頂極無線電波還要高好幾個位階，光纖的頻帶寬遠超過同軸電纜的頻帶寬，而且相對於同軸電纜的技術已推展至極限，光纖的應用才剛起步，其發展潛力無限。即使僅考慮當前可行的技術水準，光纖通訊的傳輸訊息容量，仍比各種傳統的傳輸線路大（參閱表 1.2）。較高的光纖頻帶寬容許較高的位元率(Bit Rate)，因而每個光纜有更多的聲音頻道，光纖高頻的結果，是允許傳輸通道要求比聲音頻道更寬的頻帶寬，以容許訊號、聲音、資料、視訊等，經由光纖多工制同時輸送。這些服務的需求，使得光纖從以前的單純長程傳輸，到資訊時代的實際傳送至住家及商店。

表 1.2 主要傳輸線路的電話通路數目

傳輸線路	電話通路數目（估計）
平衡電纜	3,000
微波無線電	50,000
同軸電纜	100,000
毫米波導管	300,000
光 纜	2,000,000

線徑細：一根光纖通常可以取代好幾根銅線，即使光纜的粗細僅有同軸電纜的 1/10（僅約一根頭髮的粗細），容量卻遠大於它。光纖的線徑細（參考表 1.3），使它在各種載具上的應用具有吸引人的誘因，例如在飛機或潛艇內，使用每一處小空間都是吹毛求疵的，用光纖則不僅可減少浪費寶貴的空間，可使得空間更有效利用。由於光纖可以較小的空間提供較大的容量，因此，未來利用原來電纜線的城市地下管線空間，以光纖取代銅纜線是絕對可行之事。



表 1.3 光纖與金屬電纜橫截面積比較

項目與比較值	8 蕊		18 蕊		100 蕊	
	橫截面直徑 (毫米)	截面 積比	橫截面直徑 (毫米)	截面 積比	橫截面直徑 (毫米)	截面 積比
光纖 (鋁箔、聚乙烯疊層保護套)	10	1	12	1	18	1
標準同軸電纜	47	22	65	30		
長途雙股電纜 (鉛包 0.65 毫米)					36	4
長途雙股電纜 (聚氯乙烯絕緣, 鉛蕊, 0.65 毫米)					31	3
市內雙股電纜 (聚乙烯-鋁-鍍錫 鋼帶複合鎧裝, 紙, 0.65 毫米)					28.5	2.5

重量輕：一根光纖的重量遠小於銅導線，一條光纖的重量則更遠小於具有相同資訊載送容量的銅電纜。例如，一條典型的單線路光纖重量約為每一千英尺 9 磅，但是銅軸電纜則約為每一千英尺 80 磅。事實上，在各種載具的應用上，減輕重量是非常重要的。光纖比任何一種電纜都輕（參閱表 1.4），所以在敷設上非常方便。

表 1.4 光纖與金屬電纜的重量比

	8 蕊		18 蕊		100 蕊	
	重量	重量比	重量	重量比	重量	重量比
光纖 (鋁箔、聚乙烯疊層保護套)	70 克/米	1	90 克/米	1	200 克/米	1
標準同軸電纜	4.8 千克/米	70	11 千克/米	120		
長途雙股電纜 (鉛包 0.65 毫米)					2.9 千克/米	15
長途雙股電纜 (聚氯乙烯絕緣, 鉛蕊, 0.65 毫米)					1.1 千克/米	5.5
市內雙股電纜 (聚乙烯-鋁-鍍錫鋼帶複合鎧裝, 紙, 0.65 毫米)					1.2 千克/米	6