

傳送多頻道(>100 ch.) 視訊信號之長途(>200 km)次載波光纖通訊系統設計 (總計畫)  
Design of a long-distance (>200km) subcarrier-multiplexed lightwave system transporting  
multi-channel (>100 ch.) video signals

計畫編號 : NSC87-2215-E009-002

執行期限 : 86/08/01 - 88/07/31

主持人 : 尉應時 國立交通大學電信系 教授

共同主持人 :

一、中文摘要 (關鍵詞 : 次載波系統、摻鉍光纖放大器、非線性光纖系統、光纖色散、色散補償。

本計畫是研究如何能將大量的數位及類比視訊信號以次載波(SCM)系統傳至數百公里外的一個或多個接收點。這個傳輸系統將能證明有了摻鉍光纖放大器(EDFA)及1550nm外調式調變器的助力,次載波的系統將不再侷限於20至30公里的短距離,而卻能延伸至數百公里。這樣的傳輸系統不但能以極低價格的優勢取代點對點(point-to-point)的SONET/SDH數位傳輸系統,更能為以super-headend為中心的有線電視幹線網路提供一極佳的解決之道。我們的研究重點為:在非線性光纖系統中自我相位調變(self-phase modulation, SPM)、外加相位調變(external-phase modulation, EPM)、光纖色散(fiber dispersion)及串接EDFA所造成的雜訊累加對SCM系統的影響及傳輸距離的限制。本團隊所採取的研究方法包括實驗、分析與電腦模擬。

英文摘要 (keyword : SCM system, EDFA, nonlinear fiber optical system, fiber dispersion, dispersion compensation)

The goal of this project is to transport a large number of subcarrier-multiplexed (SCM) analog (AM-VSB) and digital (M-QAM) video signals over a >200km long distance conventional single-mode fiber. We plan to use a high-power erbium-doped fiber amplifier (EDFA) together with two in-line EDFAs whose

output power can be adjusted between 15-20 dBm. We will focus our studies on the effect of self-phase modulation (SPM), external phase modulation (EPM), fiber dispersion and ASE noise accumulation due to cascade EDFAs in optically nonlinear systems (nonlinear mainly due to the high power EDFAs). Our approaches include experimental and theoretical studies, and building computer simulation models.

二、計畫背景及目的

由於EDFA及1.55 um外調式發射機率(external modulator, 簡稱EXT-MOD)的發展已臻成熟,高速數位長途光纖傳輸系統(如2.5Gb/s links)已可輕易達到數千公里以上的傳輸距離。經過幾年來全世界專家學者的研究,在高速數位系統中光纖的非線性及色散的影響已經是well-understood。反觀SCM系統,目前只有極少數的文獻有討論到[1-6]。由已發表的幾篇論文的實驗及理論結果[7-9],我們知道自我相位調變加上光纖色散所造成的二階拍差(CSO)是限制1.55um repeaterless次載波外調式光纖傳輸系統所能達到的最遠距離的一個重要因素。之前論文[7-9]中的理論公式解有很多的化簡並且與先前幾篇論文中的實驗結果[8,11]都有一些誤差。於是我們決定自己做實驗確認,並透過電腦做更精確的數值模擬分析,再藉由這些結果預測AM-VSB及64-QAM在光纖中傳輸的最遠距離。我們預期,由於64-QAM要求的訊噪比(CNR)比AM-VSB要低20-30dB,所以數

十乃至百個頻道以上的 64QAM 視訊信號應可被傳送達數百公里以上。以上所提及的系統研究，不但極有實用價值，且若依循高速數位長途光纖系統的研發過程來看，我們預期在長途 SCM 系統中亦有很多有趣的現象。

### 三、研究方法及成果

研究方法:

#### 1. 理論分析

從已發表的幾篇論文中[7-9]，我們知道自我相位調變(SPM)加上光纖色散(dispersion)所造成的二階拍差(CSO)會限制 1.55um repeaterless 次載波外調式光纖傳輸系統所能達到的最遠距離。其公式如下:

$$CSO_{SPM}(\Omega) = N_{CSO} \times \left[ \frac{1}{2} m \cdot \frac{\lambda^2}{2\pi c} D \cdot k \cdot n_2 \cdot \frac{P_0}{A_{eff}} \cdot \Omega^2 \cdot \overline{F^2}(L) \right]^2$$

其中的 m 是每一個頻道的光調變深度， $\lambda$ 、c、D、 $n_2$  分別是光的波長、速度、光纖色散及光纖非線性折射系數。 $P_0/A_{eff}$  是入射光場的強度， $\Omega$  是頻率， $N_{CSO}$  是 product count， $\overline{F^2}(L) = (\alpha L + e^{-\alpha L} - 1)/\alpha^2$ ，其中的 L 是光纖的長度， $\alpha$  是光纖的損耗。而對於串接 EDFA 的系統如果我們假設每一級都一樣，上述公式仍然可以套用，只須要把其中的  $\overline{F^2}(L)$  換成  $\overline{F^2}(L) + (1 - e^{-\alpha L/N}) \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \overline{F^2}((N-i) \cdot L/N)$ 。[8]

然而以上的公式解有很多的化簡並且與先前幾篇論文中的實驗結果及我們自己的實驗結果都有一些誤差，於是我們決定透過電腦做更精確的數值分析。

#### 2. 電腦數值模擬

我們的數值分析方法是採用 split-step Fourier transform method。取樣的頻率為 262.144 GHz，為的是能包含所有的光譜成份，避免數位取樣所造成的頻譜重疊。

#### 3. 傳輸系統實驗

實驗的部份，架構如圖一所示。我們的實驗分成 repeaterless 及 repleatered 二個部份。在 repeaterless 的實驗中，我們只用一個後級放大器(booster EDFA)。外調式的發射機是一個有內建相位調變器的 Mach-Zehnder interferometer (MZI) 調變器。雷射光的中心波長、線寬及輸出功率分別是 1551.7 nm, 1MHz 及 8.6 dBm。相位的調變是加三個單頻的訊號在 1.9GHz、3.8GHz 及 5.7GHz，而調變指數分別為 3.9、3.9 及 1.3。可以達到的 SBS threshold 為 17dBm。78 個次載波的訊號由 matrix generator 產生，直接加到 MZI 調變器，每個頻道的調變深度為 2.8%。

在 repleatered 傳輸系統的實驗中，我們用了四個 in-line EDFAs。發射機雷射光的中心波長、線寬及輸出功率分別是 1561.1 nm, 2MHz 及 8 dBm。每一級光纖的長度是 60 公里，光纖的輸入功率大小可以由 EDFA 後的衰減器來調整，在這裡我們是讓它剛好可以補償光纖的損耗，使得每一級所收到的光強度為 0dBm，也就是等於 12dBm。我們外加一個 1.9GHz 單頻的相位調變到內建的相位調變器中，藉由改變不同的相位調變指數( $\beta$ )我們可以研究 SPM 與 EPM 的連合效應。實驗中我們同時觀察第二頻道的二階拍差來確認測量的結果不會有 SBS 的效應進來[13]。

研究成果：

對 repeaterless 的實驗，圖二秀的是最差的第 78 頻道的二階拍差對不同的光纖輸入功率及 64、74、87 三段不同的光纖長度的關係。我們可以看到由前人論文中的公式解所得到的三條線比較集中，而由數值模擬所得到的解比較分散，而且與實驗所量到的值比較吻合。我們注意到在先前的幾篇論文[7-9]的分析中，雖然有包含 EPM，但是並沒有發現加了 EPM 會有任何影響。這可能是先前的論文所做的分析中，perturbation 只有到第二階的緣故[10]，而我們相信 SPM 與 EPM 混合所造

成的 CSO 是來自更高階的非線性效應。而且這些非線性的效應不能夠被忽略，尤其是當 (1) 傳輸距離很長；(2)  $\beta$  很高；(3) 相位調變的頻率很高。這一點也可以由圖三及圖四的結果來加以證實。圖三的結果是根據圖一的實驗架構，每一段光纖的長度及入射光的強度分別是 60 公里及 12dBm。總長度是 300 公里。我們可以看到只有當相位調變指數( $\beta$ )較小(如 $\beta=2.5$ 或 3.0)及距離較短(如小於 200 公里)時，公式一所得到的值才正確。而另一方面，不管  $\beta$  及距離遠近，數值模擬的值都可以跟實驗值吻合得相當好。我們可以注意到當  $\beta = 0$ ，由公式一所得到的值跟數值模擬所得到的值吻合得非常好。圖四是數值模擬的結果，我們令 $\beta=2.5$ ，改變調變的頻率從 1.9GHz 到 6GHz。我們可以看到當調變頻率等於 6GHz 時，即使距離只有 20 公里，模擬的結果與公式解都差異很大(約 4 dB)。對 4GHz 及 1.9GHz 而言，當距離分別大於 40 公里及 120 公里時，模擬的結果與公式解也開始有很大的差異。

雖然外加相位調變越大可以提升的 SBS threshold 越高[12]，但是由圖三與圖四的結果我們可以發現對不同的光纖長度及輸入光強度會存在一個特定的相位調變值使得 CSO 最小。這個結果似乎可以用來當作消除 SPM 所造成 CSO 的方法。然而限制整體系統的最大傳輸距離的因素包括 (1) 輸入功率必須小於 SBS threshold[13]；(2) SPM + EPM + Dispersion 造成的 CSO 失真；(3) Dispersion 所造成的次載波壓縮(subcarrier compression) [10]及 (4) 來自串接 EDFA 所造成的 ASE 雜訊累積...都是必須一起考慮的因素。

為了提升 SBS threshold，EPM 似乎是不可或缺，而且越大越好。而另一方面，EPM 與 SPM、Dispersion 合在一起可能使 CSO 變好或變差，全看輸入光功率、傳輸距離、相位調變頻率與指數四都之間的關係來決定，目前雖然還沒有簡單

的公式可以準確地描述它們之間的關係，但是我們的數值模擬可以很準確地預測 CSO 的變化。對長距離的光纖通信系統而言，加 EPM 相當於使得雷射光的等效頻寬變寬，受到光纖色散的影響也就更大。這影響主要就是次載波壓縮的問題。對 AM-VSB 而言，距離不長所以問題不嚴重；然而對 QAM 而言，可傳的距離較長，所以問題會較嚴重。所以對長距離的 QAM 傳輸而言最好是可以不加 EPM。除非系統中有使用其他色散補償的方式。

綜合考慮以上的因素，我們可以算出對外調式的光纖傳輸系統而言，若不加任何的色散及非線性補償，80 頻道 AM-VSB，每一頻道的調變深度 3%時，最長距離約 70 至 100 公里。同樣條件下，對 QAM 而言，若假設沒有 EPM 所造成的次載波壓縮效應最長可達的距離約為 1000 至 1200 公里，這是對每一級光纖長度 30 至 80 公里而言。

#### 四、結論

在這篇研究報告中，我們發現在長距離外調式光纖通信系統中，若有 EPM 來壓抑 SBS，則前人推導出來的關於 SPM 所造成的 CSO 的公式會不適用，尤其是距離長或 $\beta$ 大的時候。並且我們發展了一個數值分析的電腦模型可以用來準確地預測 SPM + EPM + dispersion 所造成的非線性失真。再者，雖然 EPM 可以有效地提高 SBS threshold，而且  $\beta$  越大越好，但是它的負面效應是 Dispersion 所造成的次載波壓縮。綜合以上種種因素的考量，我們預測 80 頻道 AM-VSB 最長距離約 70 至 100 公里；對 QAM 而言，最長可達的距離約為 1000 至 1200 公里。

[1] W. I. Way, et al, "Simultaneous distortion of multichannel analog and digital video channels to multiple terminals using high-density WDM and a broadband inline erbium-doped

- fiber amplifier," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.2, pp.665-668 Sep. 1990.
- [2] E. Yoneda, et al, "Erbium-doped fiber amplifier for video distribution networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol.8 pp.1249-1256, Sep. 1990.
- [3] A. M. Hill, et al, Electron. Lett., vol.26, pp.1882, 1990.
- [4] C. Y. Kuo, "High-performance optically amplified 1550 nm lightwave AM-VSB CATV transport system," Tech. Digest, paper WN2, OFC'96.
- [5] H. Dai, S. Ovadia, and C. Lin, "Hybrid AM-VSB/M-QAM multichannel video transmission over 120 km of single mode fiber with cascaded erbium-doped fiber amplifiers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.8, pp.1713-1715, Dec. 1996.
- [6] K. Kikushima, et al, "Signal crosstalk due to fiber nonlinearity in wavelength multiplexed SCM-AM-TV transmission systems," Post-deadline Digest, paper PD24, OFC'95.
- [7] M.R. Phillips, et al., IEEE Photonics Technology Letters, Vol.3, No.5, May 1991.
- [8] C. Desem., Electron. Lett. vol 30, no 24, pp. 2055-6, Nov. 1994.
- [9] Dogan A. Atlas, 1996 NCTA Technical Papers, pp.289-293.
- [10] M.R. Phillips, D.W. Anthon and K.L. Sweeney, OFC'96 post deadline paper PD17.
- [11] F. W. Willems, W. Muys and J. C. van der Plaats, OFC'96 Technical Digest, pp.281-282.
- [12] F. W. Willems, J. C. van der Plaats and W. Muys, Electronics letters, Vol.30, No.4, pp.343-345, Feb. 1994.
- [13] M. R. Phillips, OFC'97 post deadline paper PD23.

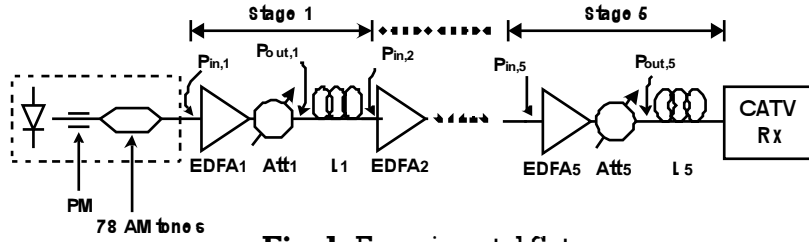


Fig. 1. Experimental Setup

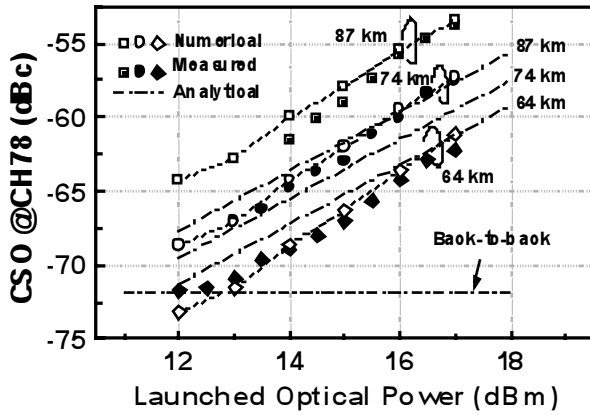


Fig. 2. CSO @ channel 78 as a function of launched optical power into a repeaterless AM-CATV system with three different transmission distances: 64, 74, and 87 km. Numerical results are for CSOs caused by both SPM and EPM effects, while analytical results are based Eq.(1). Key parameters include: OMI/ch = 2.8%, number of AM channels = 78,  $\lambda_0 = 1551.7$  nm,  $D = 17$  ps/km/km,  $n_2 = 2 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>/W, fiber loss = 0.2 dB/km, and  $A_{\text{eff}} = 90$   $\mu\text{m}^2$ .  $\beta_3$  for the three tones at 1.9, 3.8, 5.7 GHz are 3.9, 3.9, and 1.3, respectively.

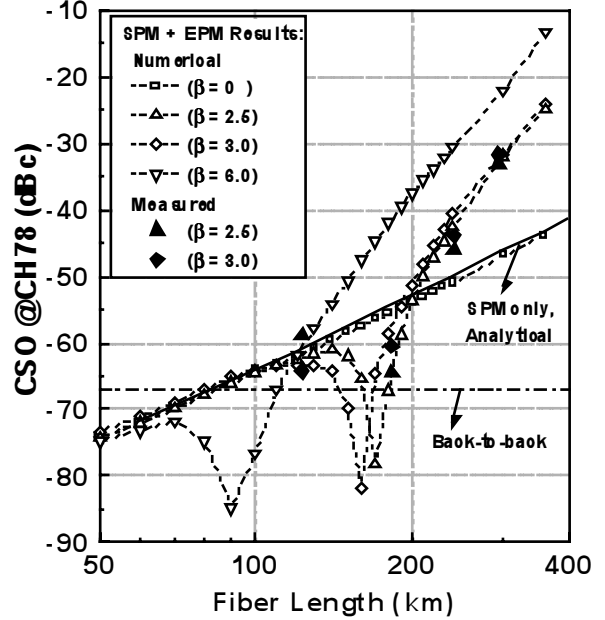


Fig. 3. Measured, numerically calculated, and analytical CSOs @ channel 78 as a function of the total fiber length in an equal-span, multi-stage-repeaterless AM-CATV system. Inter-stage fiber span is 60km. (OMI/ch = 3%,  $\lambda_0 = 1561.1$  nm. Single tone phase modulation at 1.9GHz. Other parameters are the same as those given in Fig. 2).

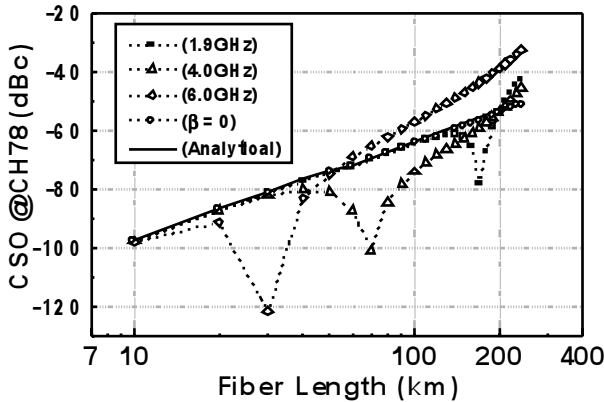


Fig. 4. Numerically calculated and analytical CSOs @ channel 78 as a function of the total fiber length in an equal-span, multi-stage repeaterless AM-CATV system. ( $\beta = 2.5$  for all PM modulating tone frequencies. Other parameters are the same as those given in Fig. 3)