

長途分波多工次載波光纖傳輸系統設計 (總計畫)  
Design of a long-distance WDM-SCM lightwave system

計畫編號：NSC88-2215-E009-016

執行期限：87/08/01 – 88/10/31

主持人：尉應時 國立交通大學電信系 教授

E-mail Address：wiway@cc.nctu.edu.tw

一、中文摘要 (關鍵詞：分波多工、次載波、摻鉕光纖放大器、光纖色散、色散補償、啾頻光纖光柵)。

本計畫是研究在分波多工的次載波光纖傳輸系統中是否可以利用啾頻光纖光柵來做為色散補償的裝置，在同時兼顧成本與系統效益的情形下，達到高容量、長距離的傳輸系統設計的目的。分波多工的次載波光纖系統對傳輸距離的限制會在本計畫的子計畫三中予以研究，在此我們將先針對單一波長的長途次載波多工系統進行設計。一個理想的線性色散補償裝置，在一段大範圍的操作頻寬之內，會存在著一個固定的反散率以及線性的群組延遲特性，也就是，固定的色散值，而如何達到此一目標已經成為最近光柵製作發展的主題。然而，正如之前的研究，所有的啾頻光纖光柵都可能存在著與理想的情形有所偏差的擬似週期性誤差，這就稱為漣漪(ripple)。而這些漣漪可以藉由在一個理想線性的色散補償裝置之反射與群組延遲響應方程式中，加上一個週期性函數來加以表示。而我們的研究就是以這樣的一組函數為基礎，來進行系統的分析與數值的模擬。

英文摘要 ( keyword : keyword : wavelength division multiplexer, WDM, subcarrier multiplexer, SCM, erbium doped fiber amplifier, EDFA, fiber dispersion, dispersion compensation, chirped fiber grating )

This project investigates the feasibility of a long-distance WDM-SCM fiber

transmission system using chirped fiber grating for dispersion compensation. The goal of this project is to design a high capacity and long distance fiber transmission system. The limitation of transmission distance of a WDM-SCM system will be discussed in sub-project 3, and here we will concentrate on the design of a single wavelength long-distance SCM transmission system. An ideal linear dispersion compensator would exhibit a constant reflectivity and linear time delay characteristic over a large operating bandwidth and this has been the objective of recent developments in grating fabrication. However, as previous researches it is likely that all chirped grating will exhibit pseudo-periodic deviations from ideal characteristics (ripples). These are investigated by adding periodic functions to the reflectivity and time-delay equations of an ideal linear dispersion compensator. Based on these two equations, we will theoretically analyze and numerically simulate the system performances.

二、計畫背景及目的

為了確認在 WDM-SCM 系統中使用 fiber gratings 做色散補償可行性，我們必須知道其主要的限制考量為何。Chirped fiber grating 已被使用來色散補償方法[1]。而且也對其使用在 SCM 系統的可行性做了一些模擬研究[2]，但仍不夠完整。Chirped fiber grating 是可以用來克服在長距離傳輸

路徑中，由色散所產生之限制的一種有效色散補償裝置。此種 **chirped fiber grating** 提供一種簡單而且吸引人的光纖延遲，這種光纖延遲是 **polarization-insensitive**，與光纖本質相合，相對起來容易製作，且又低損耗。但是無論如何，**fiber grating** 是一種反射及共鳴的裝置。強度均勻的 **chirped fiber grating** 在反射光譜(reflectivity)以及群組延遲(group delay)的特性中會產生旁波瓣(sidelobe)，而這些特性對於光纖通訊來說是不希望發生的。這些效應是由光柵末端的小反射之交互影響而來。幸運的是，這些效應可以經由光柵的 **apodization (or tapered)** 來有效的加以抑制。一個最佳化的 **apodization** 函數可以增進系統中之補償裝置的表現，然而，在反射以及群組延遲響應中，仍然會存有輕微的擬似週期性的漣漪(pseudo periodic ripples)。這些漣漪的週期是視光柵的長度以及頻寬而定，並且大約落在數十到數百微微米(picometer)的範圍之間。此外，不完美的製程也會導致群組延遲與反射響應上的隨機變化。在高速數位光學通訊系統上之光柵表現上，對於這些反射與群組延遲上的漣漪，已有文獻對其影響審慎的調查[3]。

### 三、研究方法及成果

研究方法:

以下我們將對於這些反射與群組延遲響應上的漣漪在類比次載波多工系統中的影響，做一有條理且系統性的分析與模擬研究。圖 1 所示的是用以解釋一個 **chirped fiber grating** 中，模擬非理想色散以及反射特性的說明圖。一個理想的線性色散補償裝置，在一段大範圍的操作頻寬之內，會存在著一個固定的反散率以及線性的群組延遲特性，也就是，固定的色散值，而如何達到此一目標已經成為最近光柵製作發展的主題。然而，正如前所述，所有的 **chirped fiber grating** 都可能存在著與理想的情形有所偏差的擬似週期性誤差，這

就稱為漣漪(ripple)。而這些漣漪可以藉由在一個理想線性的色散補償裝置之反射與群組延遲響應方程式中，加上一個週期性函數來加以表示，模擬。光柵的響應是一個複數值  $R = |R| \cdot e^{-j\theta}$ ，而若以相對角頻率

$\Delta\omega = \omega - \omega_0$  為函數，反射率與相關的群組延遲(relative group delay)則可以分別表示為

$$|R(\Delta\omega)| = 1 - \frac{r_{refl}}{2} \cdot \left[ 1 + \sin\left(\frac{\Delta\omega}{\Delta f_{refl}} + \phi_{refl}\right) \right]$$

式(1)

$$\tau(\Delta\omega) = -\beta_2 \cdot L_f \cdot \Delta\omega + \frac{r_{gd}}{2} \cdot \cos\left(\frac{\Delta\omega}{\Delta f_{gd}} + \phi_{gd}\right)$$

式(2)

其中， $\omega$  是角頻率，而  $\omega_0$  是操作光角頻率。 $r_{refl}$  以及  $r_{gd}$  則分別是反射與群組延遲特性中漣漪的振幅，而  $\Delta f_{refl}$  and  $\Delta f_{gd}$  則分別是反射與群組延遲特性中以頻率為單位所表示之漣漪的週期，且這些週期，當  $\Delta\lambda \ll \lambda_0$  的時候，與波長有著方程式

$$\Delta f = \frac{C}{\lambda_0^2} \Delta\lambda$$

的關係，其中  $C$  是光在真空中的速度，而  $\lambda_0$  是操作光波長。

$\phi_{refl}$  與  $\phi_{gd}$  分別表示反射以及群組延遲特性相對於操作光波長之漣漪的起始相位。 $\beta_2$  與色散係數  $D$  藉由方程式

$$\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi C} D$$

在圖 1 中，顯示了 **chirped fiber grating**

的反射與群組延遲的兩種特性。虛線指出理想的狀況，也就是固定的反射率以及線性群組延遲；而實線則顯示非理想的反射以及色散特性的狀況，也就是在反射與群組延遲響應中存在著漣漪，這些特性有著

以下的參數： $r_{refl} = 0.1$ ， $\Delta\lambda_{refl} = 100$  (pm)，

$\phi_{refl} = 0^\circ$ ， $r_{gd} = 50$  (ps)， $\Delta\lambda_{gd} = 100$  (pm)，

$\phi_{gd} = 0^\circ$ 。在這兩個情形中，傳輸路徑的光

纖長度都為  $L_f = 60$  (km)，而且色散常數

都假設為  $D = 17$  ps/nm/km。

### 一、理論分析結果：

若我們將式(1)及式(2)代入一個直調式的次載波光傳輸系統，我們可以分別得到由於非理想的反射率以及群組延遲上的漣漪所產生的合成二階拍差失真 (composite second order distortion - CSO)

$CSO_{refl}$ ， $CSO_{gd}$  的理論分析結果。

$$CSO_{refl} = 10 \cdot \log \left[ \left( -m \cdot \gamma \cdot \frac{r_{refl}}{\Delta f_{refl}} \cdot \frac{\cos(\phi_{refl})}{1 - \frac{r_{refl}}{2} - \frac{r_{refl}}{2} \cdot \sin(\phi_{refl})} \right)^2 \cdot N_{CSO} \right] \quad \text{式(3)}$$

$$CSO_{gd} = 10 \cdot \log \left[ \left( -\frac{1}{2} m \cdot \gamma \cdot \Omega_d \cdot \frac{r_{gd}}{\Delta f_{gd}} \cdot \sin(\phi_{gd}) \right)^2 \cdot N_{CSO} \right] \quad \text{式(4)}$$

其中， $m$  是每個 RF 頻道的調變深度， $\gamma$  是雷射的 frequency chirp 峰值， $\Omega_d$  是所考量、計算、或量測頻道的頻率， $N_{CSO}$  是該頻道的 product count。若我們分別定義

$S_{r\_CSO}$  與  $S_{gd}$  如下：

$$S_{r\_CSO} \triangleq \frac{d \{ 20 \cdot \log [ R(\omega) ] \}}{d\lambda} \Big|_{\omega=0} \quad \text{式(5)}$$

$$S_{gd} \triangleq \frac{d\tau_{sys}(\omega)}{d\lambda} \Big|_{\omega=0} \quad \text{式(6)}$$

則我們可以把式(3)與式(4)中漣漪的三個參數、振幅、週期以及起始相位合併為一個參數，得到如下兩式：

$$CSO_{refl} = 10 \cdot \log \left[ \left( m \cdot \gamma \cdot S_{r\_CSO} \cdot \frac{\lambda^2}{2\pi} \cdot \frac{\ln 10}{10} \right)^2 \cdot N_{CSO} \right] \quad \text{式(7)}$$

$$CSO_{gd} = 10 \cdot \log \left[ \left( m \cdot \gamma \cdot S_{gd} \cdot \Omega_d \cdot \frac{\lambda^2}{2\pi} \right)^2 \cdot N_{CSO} \right] \quad \text{式(8)}$$

### 二、數值模擬結果：

在系統模擬的部份，我們同樣是以式(1)與式(2)為基礎，以 C 語言程式模擬一個直調式的次載波光傳輸系統，經過一段光纖的傳輸與非理想的 chirp fiber grating (即含有模擬的弦波漣漪) 之後的系統表現 (system performance)。

當我們做完系統模擬並與理論的分析結果相較之後，可以發現就如同式(3)與式(4)所示，儘管 chirped fiber grating 可以補償傳輸過程中光纖色散所產生的 CSO，但非常不幸的是，由於不理想的 chirped fiber grating 含有漣漪，這些漣漪將會產生額外的 CSO，進而影響系統的表現：

- (1) 當雷射的 frequency chirp 峰值固定時，當反射或群組延遲的響應上，漣漪的振幅愈大時，所產的 CSO 就會愈大。
- (2) 當雷射的 frequency chirp 峰值固定時，當反射或群組延遲的響應上，漣漪的週期愈小時，所產的 CSO 就會愈大。
- (3) 當雷射的 frequency chirp 峰值愈大時，漣漪所產的 CSO 就會愈大。
- (4) 即使當雷射的 frequency chirp 峰值、漣漪的振幅與週期固定，然而相對於操作

波長之漣漪的起始相位仍然會對補償裝置(或系統)的表現有重要的影響。

我們考慮一個 80 頻道多工的直調式類比光傳輸系統，每個頻道的光調變深度為 4%。雷射 frequency chirp 峰值定義為：雷射的 chirp 參數，MHz/mA，和雷射偏壓電流與臨界電流之差的乘積。然而，為了避免 DRB(double Rayleigh backscattering)與 SBS(stimulated Brillouin scattering)的影響，雷射 frequency chirp 峰值必須選擇為至少 6GHz。入射於傳輸路徑的光功率則假設為 25mW，以避免非線性的 SBS 和 SPM(self-phase modulation)。

圖 2 所示為一個以頻道頻率為變數的模擬結果，為合成二階拍差失真與基礎載波的比值。1.55 微米的光訊號於傳統的單模光纖中傳輸 60 公里之後的理論分析結果[4]以實線表示。而其數值模擬的結果則以實心的菱形表示，而且我們可以看到，分析以及數值的結果配合的極好。

其他的點則表示了，使用具有非理想反射及色散特性的 chirped fiber grating 進行色散補償之後的 CSO 數值模擬結果。由於目前之色散補償光柵上非理想的漣漪主要是因為製程上的不完美所造成的，所以在我們討論我們的模擬結果之前，必須對目前產品化的色散補償光柵之非理想漣漪所能達到的情形有所了解：

- (1) 目前產品化的色散補償光柵之非理想反射響應上漣漪的週期大約在 30~50 微米之間或較大些。
- (2) 目前產品化的色散補償光柵之非理想群組延遲響應上漣漪的週期大約就在 30~50 微米之間。
- (3) 目前產品化的色散補償光柵之非理想反射響應上漣漪的振幅大約在 1~2dB 之間。(峰值-to-峰值)
- (4) 目前產品化的色散補償光柵之非理想群組延遲響應上漣漪的振幅大約在 40~100ps 之間。(峰值-to-峰值)

觀察圖 2，我們首先分別模擬僅存在有反射響應上的漣漪或僅存在有群組延遲

響應上的漣漪的情形，之後再模擬同時存在有反射和群組延遲響應上的漣漪的最壞情形和最佳情形。當僅模擬反射響應上的漣漪時，我們假設群組延遲響應是理想的，而反射響應上漣漪的參數則使用

$$r_{refl} = 2.276\% \quad (0.2\text{dB}) \quad , \quad \Delta\lambda_{refl} = 1000$$

(pm)， $\phi_{refl} = 0^\circ$ 。由圖我們注意到即使是這麼嚴格的參數，由中空方形所表示的 CSO 結果，小於 -50dBc，並不符合類比 CATV 系統之 -63dBc 的要求，而且我們可以發現，此反射響應上漣漪所產生之 CSO 的頻率相關性(frequency-dependent)是較低(弱)的。在另一方面，假如只考慮群組響應上的漣漪時，我們假設反射響應是理想的，而群組響應上漣漪的參數則使用

$$r_{gd} = 20 \quad (\text{ps}) \quad , \quad \Delta\lambda_{gd} = 1000 \quad (\text{pm}) \quad ,$$

$\phi_{gd} = 90^\circ$ 。同樣地，由圖我們注意到即使是這麼嚴格的參數，由中空圓圈所表示的 CSO 結果，小於 -50dBc，同樣不符合類比 CATV 系統的要求。可是值得注意的是，此群組響應上漣漪所產生之 CSO，是有頻率相關性的，從最低頻道 55.25MHz 的 -70dBc，一直到最高頻道 559.25MHz 的 -50dBc。

模擬同時存在有反射和群組延遲響應上的漣漪的最壞情形是以實心的向上三角形所表示。我們可以看到所有頻道的 CSO 均約略為 -50dBc。若我們將反射以及群組延遲之漣漪的起始相位， $\phi_{refl}$  和  $\phi_{gd}$ ，

分別改變為  $90^\circ$  和  $0^\circ$  的時候，就能得到最佳情形，並在圖 2 中以實心的向下三角形表示。我們可以看到，由起始相位所造成的差異可以相差到將近 20dB。

由我們的理論分析與模擬結果，對於直調式類比次載波多工系統而言，可以得到以下結論：

- (1) 為了避免 DRB(double Rayleigh backscattering) 與 SBS(stimulated Brillouin scattering) 的影響，雷射 frequency chirp 峰值必須選擇為至少 6GHz。
- (2) 對於 6GHz 的雷射 frequency chirp 峰值而言，我們必須要求反射響應上漣漪的振幅必須小於 0.2dB，週期必須大於 1000pm(或是  $S_{r\_CSO}$  必須小於 ~0.85dB/nm)。而群組延遲響應漣漪的振幅必須小於 20ps，同樣週期必須大於 1000pm(或是  $S_{gd}$  必須小於 ~80ps/nm)。如此，在最壞情形下，我們才僅可以達到-50dBc 的 CSO。
- (3) 儘管雖然在最佳的情形下，如此嚴格的要求是可以達到類比 CATV 的 CSO 的要求，但當我們放鬆要求至目前色散補償光柵製程所能達到的最好情形時(反射響應上漣漪的振幅~1dB，週期~50pm; 群組延遲響應漣漪的振幅~40ps，週期~50pm)，即使是在最佳的情形下，仍然無法達到 CSO 小於-63dBc 的要求。
- (4) 我們還必須注意的是，對於反射響應上的漣漪而言，達到 CSO 最好的情形時，卻是 CTB 的最壞情形。
- (5) 對於目前的色散補償光柵之製程結果而言，這樣的要求是太過於嚴格的。

#### 參考文獻

- [1] Optical Fiber Communication Conference'94, postdeadline paper-2, PD2-1 to PD2-4.
- [2] J. Marti, D. Pastor, M. Tortola, J. Capmany, A. Montero, "On the Use of Tapered Linearly Chirped Gratings as Dispersion-Induced Distortion Equalizers in SCM systems," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no.2, pp. 179-187, Feb. 1997.
- [3] K. Ennser, M. Ibsen, M. Durkin, M. N. Zervas, R. I. Laming, "Influence of Nonideal Chirped Fiber Grating Characteristics on Dispersion Cancellation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 10, pp. 1476-1478, Oct. 1998.
- [4] M. R. Phillips, T. E. Darcie, D. Marcuse, G. E. Bodeep, and N. J. Frigo, "Nonlinear Distortion Generated by Dispersive Transmission of Chirped Intensity-Modulated Signals," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 5, pp. 481-483, May 1991.

