

高階模態色散補償技術改善高密度分波多工 系統性能

Higher Order Mode Dispersion Compensation Technology to Improve DWDM System Performance

林修聖 Hsiu Sheng Lin

國立台北科技大學電腦與通訊研究所博士生
E-mail: lss121@yahoo.com.tw

張育誠 Jhang Yu Cheng

國立台北科技大學電腦與通訊研究所碩士生
E-mail: rick72.tw@yahoo.com.tw

賴柏洲 Po Chou Lai

國立台北科技大學電子工程系系主任
E-mail: pclai@en.ntut.edu.tw

陳芳逸 Chen Fang Yi

國立台北科技大學電腦與通訊研究所碩士生
E-mail: kawaii_dog@hotmail.com

摘要

在高密度分波多工的光纖通訊傳輸系統中，在經由長波長的長距離傳輸時，都會造成色散問題的發生。而色散的現象產生，將會造成脈波變形，而影響到傳輸速率、頻寬及容量的大小，因此限制系統的傳輸距離[1]。而為了要使系統具有較好的效能，並且能傳輸更遠的距離，因此色散的問題必須被克服。

而在本論文中，我們提出了使用高階模態色散補償的技術，應用在 10Gbps，通道間距為 0.8nm，波長為 1550nm 的高密度分波多工系統[2]，利用色散斜率的現象進行模擬，發現到利用高階模態色散補償的技術，可在長距離傳輸時，能傳送更多容量，可使用在全頻帶(C band)中進行傳輸，而傳輸速率也可以達到 10Gbits/sec 以上。

關鍵詞: 高密度分波多工、高階模態、通道間距

transmission by long wavelength will produce a problem about dispersion. The phenomenon of the dispersion will change the shape of pulse, and it also affect the transmission speed、bandwidth and capacity. Therefore the transmission distance of the system will be limited. If we want to get good performance to the system and transmit far away, we must overcome the problem of dispersion.

In this paper, we used the Higher Order Mode dispersion compensation technology, applied to 10Gbps, channel spacing 0.8nm, wavelength 1550nm DWDM system, and using dispersion slope to simulation, we find using the Higher Order Mode dispersion compensation technology can increase transmission capacity in long distance, and be used in C band for transmission, the transmission rate can be obtained over 10Gbits/sec.

Keywords : Dense Wavelength Division Multiplexing, Higher Order Mode, Channel Spacing

ABSTRACT

In Dense Wavelength Division Multiplexing optical fiber communication transmission system, the long distance

1.前言

由於摻鉍光纖放大器的發明，色散現象已經成為光纖網路傳輸量與傳輸距離的主要限制，若要應付長距離光纖網路中的需求，則必須增加系統的通道數目，以及每個頻道中的傳輸速率[3]。本篇論文中，主要研究高密度分波多工系統可以容納 40 個通道，每個通道間距為 0.8nm，可以容納摻鉍光纖放大器傳輸頻帶中的整個 C band (1530~1560nm)，同時每個頻道的傳輸速率可達到 10 Gbits/sec。

在每個通道中以及整個頻帶裡的色散現象都必須加以補償，這是必要的，尤其希望傳輸速率能夠達到 10 Gbits/sec 以上時更是如此。而現階段的色散補償技術並無法改善整個頻寬中的色散傾斜現象，只能校正位於頻帶中央部分波長的色散，因此在整個 C band 中，位於頭尾兩端的波長往往會被過度校正或校正不足。

因此需要的是能有一種解決方法，可以改善整個頻帶範圍中所產生的色散現象，並將高密度分波多工系統由 2.5Gbits/sec 提升到 10Gbits/sec 以上。因此，此篇論文研究動機在於使用高階模態色散補償技術所做的補償效果[4]，利用色散斜率的現象進行模擬，因此在長距離系統可以利用到整個頻帶進行傳輸，如此一來整個傳輸容量可以增加，並且傳輸速率也可以達到 10Gbits/sec 以上。

2.色散現象基本概念

在光纖通訊系統中色散簡單的說就是不同頻率的光在相同傳輸介質中有不同的群速度。將單模光纖(Single Mode Fiber；SMF)中模態的相位係數 $\beta(\omega)$ 在中心頻率 ω_0 附近展開成泰勒級數[5]，表示為：

$$\begin{aligned}\beta(\omega) &= n(\omega) \frac{\omega}{c} \\ &= \beta_0 + \beta'(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta''(\omega - \omega_0)^2 \\ &\quad + \dots + \frac{1}{m!} \frac{d^m \beta}{d\omega^m} (\omega - \omega_0)^m + \dots\end{aligned}\quad (1)$$

式中 β' 、 β'' 分別是 $\beta(\omega)$ 對 ω 的一階和二階微分。

群速度 v_g 等於 $1/\beta'$ ，也等於 $d\omega/d\beta$ ，而

β'' 稱為群速度色散 (Group Velocity Dispersion; GVD) 係數，它是脈衝展寬的主要因素。通常也用色散係數 D 來表示光纖的色散，表示為：

$$D = \frac{d}{d\lambda} \frac{1}{v_g} = \frac{d^2 \beta}{d\lambda d\omega} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta''\quad (2)$$

式中 λ 為光波長， v_g 為群速度， β 為相位係數， ω 為角頻率， c 為自由空間中的光速。

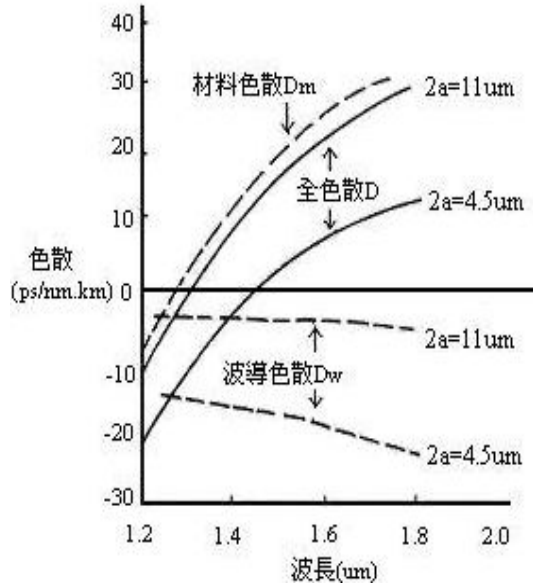
D 的單位為 ps/nm · km，對於一般常用的單模光纖來說，其零色散點位於波長為 1310 nm 處，而對於 C band 摻鉍光纖放大器的工作窗口 1550 nm 處，其色散值大約為 +17 ps/nm · km[2]。

脈波展寬 $\Delta\tau$ 通常取決於光源的線譜寬度 $\Delta\lambda$ 、傳輸距離 L 和色散值 D 三者間的關係：

$$\Delta\tau = DL\Delta\lambda\quad (3)$$

通常色散 $D = D_m + D_w$ ， D 是由兩部分所組成，一為材料色散 D_m ，另一為波導色散 D_w ，材料色散 D_m 是由於波導材料的折射率隨波長的不同而改變所產生，而波導色散 D_w 為模態本身的色散，與光纖的波導結構有關。

全色散為兩種色散的近似相加，由本文之圖一中我們可以看到，在某個特定波長下，材料色散和波導色散相抵消，全色散為零。



圖一 單模光纖中材料色散，波導色散及全色散與波長的關係圖

對普通的單模光纖，全色散為零的波長在 1310nm，這表示在這個波長傳輸的光脈衝不會發生展寬，在波長 1550nm，雖然損耗最低，但在該波長上的色散較大，如將零色散波長從 1310nm 移到 1550nm，這就是色散位移光纖 (DSF)，這種低損耗低色散的光纖，對長距離大容量光纖通信系統十分有利。

3. 光纖中的傳輸模態

在求解波動方程式的過程中，必須要滿足邊界條件：

在核心中 ($r \leq a$) 的邊界條件為：

$$k_0^2 n_1^2 - \beta^2 > 0 \quad (4)$$

在外殼中 ($r > a$) 的邊界條件為：

$$\beta^2 - k_0^2 n_2^2 > 0 \quad (5)$$

為了使波動方程式化為貝塞爾 (Bessel function) 方程式，令 $u^2 = (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) a^2$ ，

$$w^2 = (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) a^2$$

由 u 、 w 兩個參數我們可以定義出光纖的重要結構參數 V

$$V^2 = u^2 + w^2 = k_0^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (6)$$

由於 V 和 k_0 成正比，而 $k_0 = \frac{\omega}{c}$ ，所以 V 稱之為歸一化頻率， V 是決定光纖中模態數量的重要參數，即由核心的半徑、傳輸的光波長和核心外殼的折射率差，可以決定光纖中傳輸模態的數量，也稱之為截止頻率。

光纖中的傳輸模態包含了

3.1 TE_{0m} 模和 TM_{0m} 模

TE_{0m} 模和 TM_{0m} 模有相同的特徵方程式為：

$$\frac{J_0'(u)}{u J_0(u)} + \frac{K_0'(\omega)}{\omega K_0(\omega)} = 0 \quad (7)$$

當模態截止時， ω 趨近於 0 可以得到

$$\frac{J_0'(u)}{u J_0(u)} = \infty \quad (8)$$

所以當模態截止時的特徵方程式為：

$$J_0(u) = 0 \quad (9)$$

(9) 式中 u 為零階貝塞爾方程式的根，可用 u_{0m} 表示零階貝塞爾方程式的第 m 個根，所以 $u_{0m} = 2.405, 5.520, 8.653 \dots$ ，它們分別對應著 $TE_{01}(TM_{01})$ 、 $TE_{02}(TM_{02}) \dots$ 等模態的截止頻率，由此可知，若波導的歸一化頻率 V 大於 2.405，則 $TE_{01}(TM_{01})$ 模就能在光纖中存在，若 V 大於 5.502，則 $TE_{01}(TM_{01})$ 、 $TE_{02}(TM_{02})$ 等模態可以同時存在於光纖中。

3.2 EH_{vm} 模

EH_{vm} 模的特徵方程式為：

$$-\frac{J_{v+1}(u)}{u J_v(u)} = \frac{K_{v+1}(\omega)}{\omega K_v(\omega)} \quad (10)$$

當模態截止時， $\omega \rightarrow 0$ 可得到

$$-\frac{J_{v+1}(u)}{u J_v(u)} = \infty \quad (11)$$

當 $v \geq 1$ 時， $J_v(u)=0$ ，且 u 不能取零根，於是 v 階貝塞爾方程式的第 m 個根對應著 EH_{vm} 模的截止頻率，可得到 EH_{1m} 模的特徵方程式為 $J_1(u)=0$ 、 u 不能取零根，所以 EH_{1m} 的截止頻率為 3.832，7.016...， EH_{2m} 模的特徵方程式為 $J_2(u)=0$ 、 u 不能取零根，所以 EH_{2m} 的截止頻率為 5.136，8.417...。

3.3 HE_{vm} 模

HE_{vm} 模的特徵方程式為：

$$\frac{J_{v-1}(u)}{uJ_v(u)} = \frac{K_{v-1}(\omega)}{\omega K_v(\omega)} = \frac{1}{2(v-1)} \quad (12)$$

當 $v=1$ 時，模態截止時， ω 趨近於 0 可得到：

$$\frac{J_0(u)}{uJ_1(u)} = \infty \quad (13)$$

$$J_1(u)=0 \quad (14)$$

$J_1(u)=0$ 的根為 0，3.832，7.016...，於是我們得到了 HE_{11} ， HE_{12} ， HE_{13} ... 模態的截止頻率，從這裡我們發現了只有 HE_{11} 模的截止頻率為零，它可以在任何光纖中存在，因此稱之為主模或基模。

4. 高階模態色散補償的原理

各種模態的波導色散的產生是和不同波長下的傳播常數 β 有關，在這我們考慮一個斜射率光纖，其傳播係數為：

$$\beta = k_0 n_1 \left[1 + \Delta - \Delta \left(\frac{u^2}{V^2} \right) \right] \quad (15)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ 為真空中的傳播常數， } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

為斜射率光纖的相對折射率差， n_1 為核心折射率， n_2 為外殼折射率， V 為歸一化頻率[6][7]。光纖的色散值由(2)式我們可得到：

$$D = \frac{d^2 \beta}{d\lambda d\omega} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{d\beta}{c \times d \frac{2\pi}{\lambda}} \right] = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk_0} \right] \quad (16)$$

將(15)式、(6)式代入(16)式，可得到波導色散為：

$$D = \sqrt{\frac{\Delta}{8}} \frac{1}{\pi ac} \psi(V) \quad (17)$$

其中

$$\psi(V) = V^2 \frac{d^2}{dV^2} \left(\frac{U^2}{V} \right) \quad (18)$$

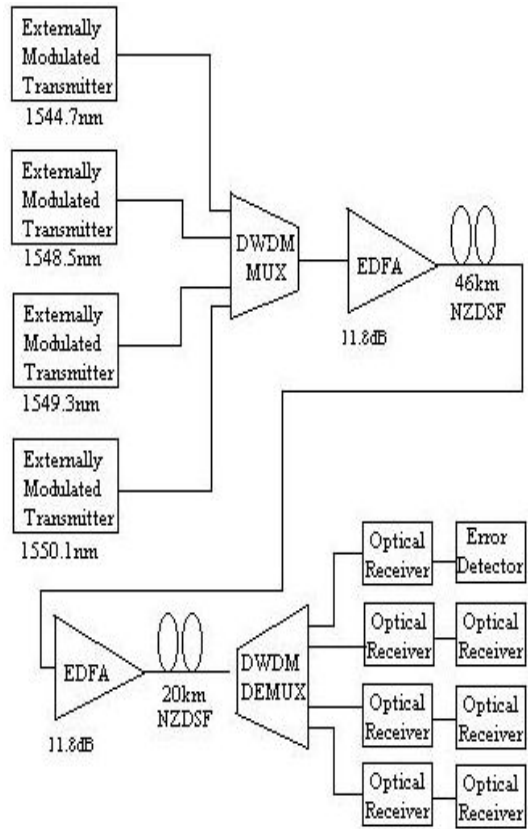
在此我們得到了歸一化頻率 V 的函式 $\psi(V)$ ，藉由此函式，可以得到在不同模態下，截止頻率和色散大小之間的關係。

5. 系統架構與實驗模擬

由前面對色散的基本概念描述中我們可以發現到，色散的現象限制了系統的傳輸距離，而為了要使系統具有較好的效能並且能傳輸更遠的距離，色散的問題必須被克服，要克服色散的問題，可以使用色散值較小的光纖，例如使用非零色散位移光纖(NZDSF)[8][9]，但是在超長距離的傳輸，如海纜或長途骨幹網路，必須使用放大器來加以改善，但信號會因為長距離傳輸而造成的衰減，因此我們使用了兩種色散補償裝置，一為色散補償光纖(DCF)，另一為高階模態色散補償技術(HOM)，並且系統架構都使用非零色散位移光纖[10][11]，我們將使用此兩種色散補償裝置來補償色散現象，並且就這兩種不同裝置的系統作詳細比較。

5.1 使用色散補償光纖(DCF)

在第一個實驗中，我們利用色散補償光纖 (DCF)來做色散補償技術，其架構圖如圖二所示。



圖二 色散補償光纖系統架構圖

而在實驗中，利用色散補償光纖 (DCF)來做色散補償技術，並將傳輸距離模擬在 240km、320km、400km、480km 中做傳輸，並將誤碼率(Bit Error Ratio;BER)和品質因素 (Quality Factor;Q) 之結果記錄在表一至表四。

表一 以 DCF 作為色散補償傳輸
240km 的誤碼率和品質因素

Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	1.349×10^{-9}	1.074×10^{-12}	4.845×10^{-14}	8.119×10^{-11}
Q	5.9489	7.0245	7.445	6.3933

表二 以 DCF 作為色散補償傳輸
320km 的誤碼率和品質因素

Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	1.039×10^{-7}	2.222×10^{-12}	1.908×10^{-14}	7.623×10^{-10}
Q	5.1922	6.9223	7.5671	6.0417

表三 以 DCF 作為色散補償傳輸
400km 的誤碼率和品質因素

Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	5.850×10^{-6}	3.741×10^{-12}	5.398×10^{-15}	7.440×10^{-9}
Q	4.3831	6.8481	7.7295	5.6629

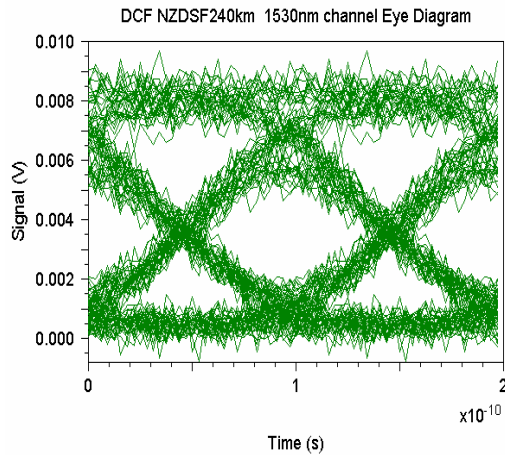
表四 以 DCF 作為色散補償傳輸
480km 的誤碼率和品質因素

Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	2.426×10^{-4}	6.257×10^{-12}	2.823×10^{-15}	1.269×10^{-7}
Q	3.4888	6.7741	7.8116	5.1549

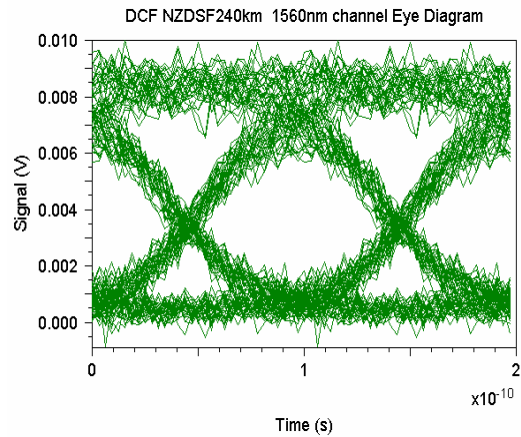
當此系統誤碼率 BER 為 10^{-9} 時，品質因素 Q 為 6，由表一至表四結果我們可以發現系統傳輸超過 240km 時，1530nm 附近通道的 Q 值開始低於 6，這代表著這些通道所傳輸的訊號品質已經降低，不能被接受，當傳輸超過 400km 時，頻帶最右側 1560nm 附近的訊號品質也降低。

隨著傳輸距離的增加整個頻帶中可用的頻道數會越來越少，這是由於 DCF 的色散斜率很小，在整個 C Band 中每個通道所補償的負色散值幾乎相同，造成了頭尾兩端色散的過度補償與補償不足，隨著傳輸距離的增加，過度補償與補償不足的情形會越來越嚴重。

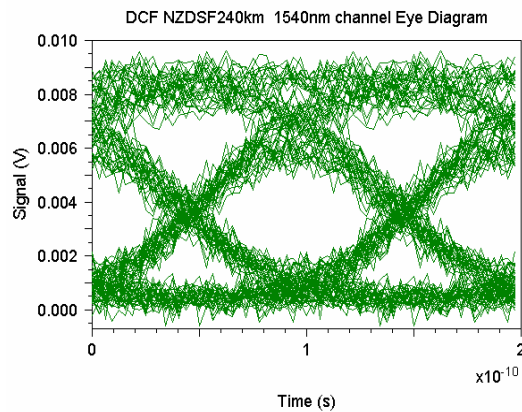
圖三至圖六為利用 DCF 為色散補償模組，在不同波長情況下，光纖傳輸 240km 後所量測到的眼圖。



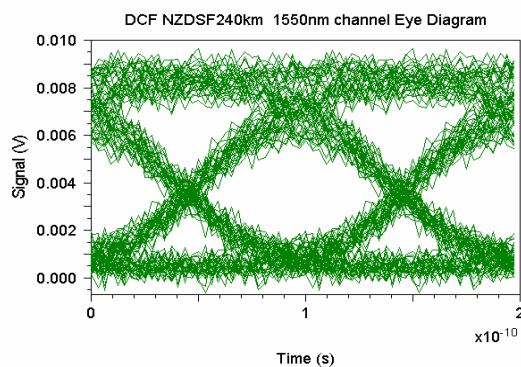
圖三 1530nm 量測之眼圖



圖六 1560nm 量測之眼圖



四 1540nm 量測之眼圖

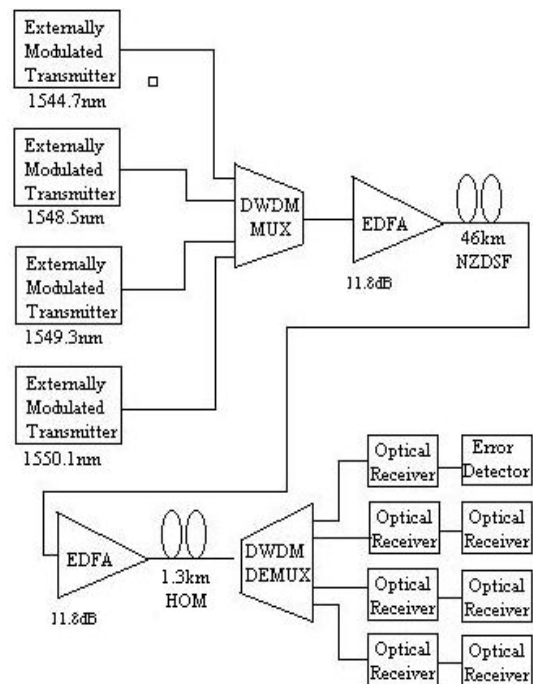


圖五 1550nm 量測之眼圖

從量測到的眼圖結果得知，在使用 NZDSF 光纖傳輸時，以 DCF 作為色散補償模組，將 1550nm 波段的色散補償值，補償為零的系統架構下，使用整個 C-Band 做全頻帶傳輸時，最遠只能傳送 240 公里。

5.2 使用高階模態色散補償技術(HOM)

在第二個實驗中，我們利用高階模態色散補償技術(HOM)來做色散補償技術，其架構圖如圖七所示。



圖七 高階模態色散補償架構圖

在第二個實驗中，利用高階模態架構來做色散補償技術，並將傳輸距離模擬在 320km、400km、480km、560km 中做傳輸，並將誤碼率(Bit Error Ratio;BER)和品質因素(Quality Factor;Q)之結果記錄在表五至表八中。

**表五 以 HOM 作為色散補償傳輸
320km 的誤碼率和品質因素**

Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	6.24×10^{-12}	1.045×10^{-12}	1.05×10^{-13}	1.349×10^{-11}
Q	6.7744	7.0283	7.3422	6.6621

**表六 以 HOM 作為色散補償傳輸
400km 的誤碼率和品質因素**

Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	2.926×10^{-11}	1.800×10^{-12}	1.677×10^{-13}	2.960×10^{-11}
Q	6.5474	6.9520	7.2794	6.5457

**表七 以 HOM 作為色散補償傳輸
480km 的誤碼率和品質因素**

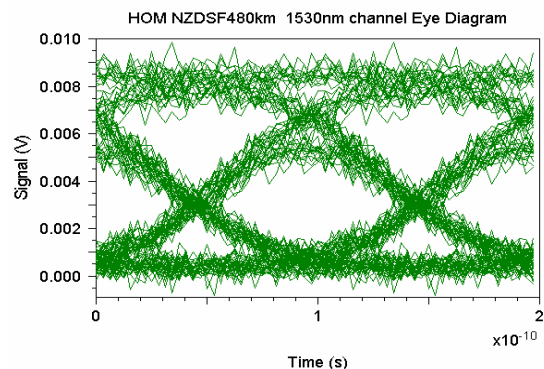
Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	2.577×10^{-10}	4.062×10^{-12}	2.460×10^{-13}	1.159×10^{-10}
Q	6.2143	6.8363	7.2274	6.3385

**表八 以 HOM 作為色散補償模組傳輸
560km 後的誤碼率和品質因素**

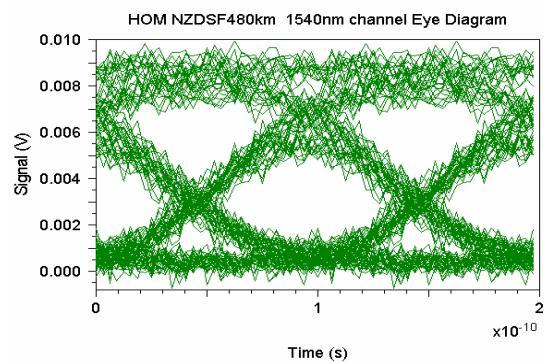
Wavelength	1530nm	1540nm	1550nm	1560nm
BER	2.219×10^{-9}	9.259×10^{-12}	4.295×10^{-13}	3.100×10^{-10}
Q	5.8669	6.7172	7.1514	6.1853

由表五至表八中，我們可以發現系統傳輸超過 480km 時，1530nm 附近通道的 Q 值開始低於 6，這代表著這些通道所傳輸的訊號品質已經降低。由於 HOM 的色散斜率較大，可以對 NZDSF 的色散斜率進行校正，因此可以減緩頭尾兩端的色散累積，使得使用 HOM 作為色散補償模組的系統在做全頻帶傳輸時，可以傳送較遠的距離。

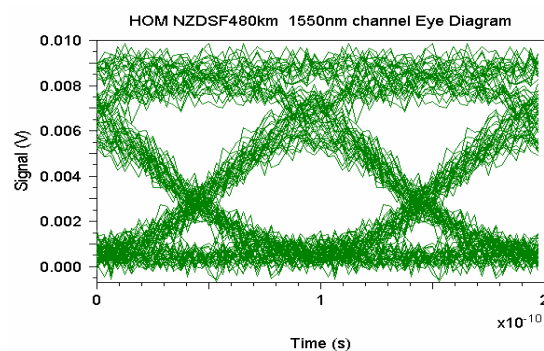
圖八至圖十一是利用高階模態架構為色散補償方式，在不同波長情況下，光纖傳輸 480km 後所量測到的眼圖。



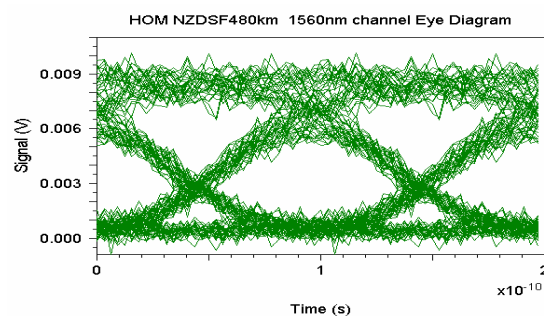
圖八 1530nm 量測之眼圖



圖九 1540nm 量測之眼圖



圖十 1550nm 量測之眼圖

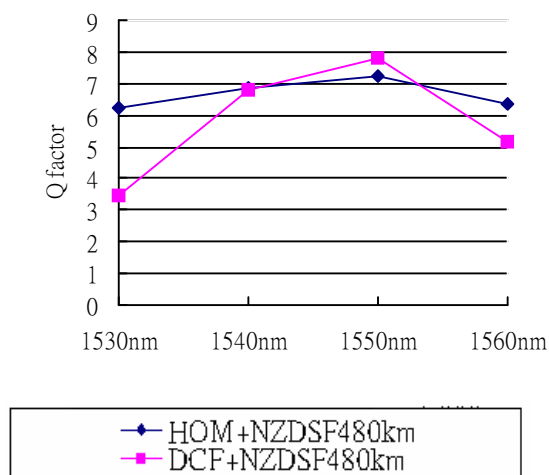


圖十一 1560nm 量測之眼圖

由所量測到的眼圖結果得知，在使用 NZDSF 光纖傳輸時，以高階模態(HOM)作為色散補償方式，在對 1550nm 波段的色散值補償為零的系統架構下，使用整個 C-Band 做全頻帶傳輸時，傳輸最遠距離可到達 480 公里。

6. 實驗結果

由圖十二實驗結果得知，以非零色散位移光纖傳送 480km 的距離，使用高階模態(HOM)色散補償系統，其每個通道的 Q 值都可維持在 6 以上，表示可以利用到整個 C-Band 來做傳輸，當使用的通道間距為 0.8nm 時，整個 C-Band 可以分割出 40 個通道，這代表著單一光纖的傳輸容量可擴增為 40 倍。



圖十二 HOM 和 DCF 色散補償效能比較圖

而使用 DCF 色散補償模組的系統其頻帶頭尾兩端的 Q 值都在 6 以下，可用的頻帶範圍大約為 20nm，只能分割出約 25 個通道，由此可知使用 HOM 色散補償模組，可以改善使用 DCF 色散補償模組系統的性能，使得傳輸速率為 10Gbps、1550nm 色散值補償為零的系統，其全頻帶傳送的距離可以增加一倍。

7. 結論

我們使用高階模態色散補償技術應用在 10Gbps 通道間距為 0.8nm、波長為 1550nm 的色散值補償為零的系統中，和使用傳統色散補償光纖(DCF)的方式做比較[12][13]，研究出不僅具有較佳的補償效率而且具有鋪設容易的優點，重點是高階模態色散補償方式，可以利用在長距離全頻帶(C-band)中傳輸，並應用在高密度分波多工系統中[14]-[15]。

由實驗結果我們發現，對於在 10Gbps 通道間距為 0.8nm、波長為 1550nm 的色散值補償為零的系統中，比起利用傳統的色散補償光纖(DCF)，使用高階模態(HOM)色散補償技術可以將全頻帶的傳輸距離增加一倍以上，大大的提昇了系統的效能，因而改善了系統的傳輸品質[16]，這也是此篇論文的最重要的發現。

參考文獻

- [1] A. H. Gnauck, L. D. Garrett, Y. Danziger, U. Levy and M. Tur, "Dispersion and dispersion-slop compensation of NZDSF over the entire C band using higher-order-mode fiber," *Electronics Letters*, Vol.36, No.23, 9th November 2000.
- [2] S. Ramachandran, G. Raybon, B. Mikkelsen, M. Yan, L. Cowsar and R.J. Essiambre, "1700-km transmission at 40Gb/s with 100km amplifier-spacing enabled by higher-order-mode dispersion-compensation," *Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Comm.*, pp282-283, 2001.
- [3] C. H. Kim, and Y. C. Chung, "2.5 Gb/s × 16-channel Bidirectional WDM Transmission System Using Bidirectional Erbium-doped Fiber Amplifier Based on Spectrally Interleaved Synchronized Etalon

- Filters,” *IEEE Photon Technol Lett.* 11, pp. 745-747, 1999.
- [4] C. D. Poole, J. M. Wiesenfeld, D. J. Digiovanni, A. M. Vengsarkar, “Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol.12, No.10, October 1994.
- [5] B. Konrad, A. Hodzic, K. Petermann, “Dispersion compensation schemes for 160Gb/s TDM-transmission over SSMF and NZDSF,” *Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Comm.*, pp188-189, 2001.
- [6] L. E. Nelson, L. D. Garrett, A. R. Chraplyvy, and R. W. Tkach, “NZ-DSF dispersion maps in 2000km 8 x 10 GB/s WDM transmission,” *ECOC’98*, pp315-316, September 1998.
- [7] S. Ramachandran, B. Mikkelsen, L. C. Cowsar, M. F. Yan, G. Raybon, L. Boivin, M. Fishteyn, W. A. Reed, P. Wisk, D. Brownlow, R. G. Huff, and L. Grunner-Nielsen, “All-fiber grating-based higher order mode dispersion compensator for broad-band compensation and 1000km-km transmission at 40Gb/s,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13, No. 6, June 2001.
- [8] A. H. Gnauck, J. M. Wiesenfeld, L. D. Garrett, M. Eiselt, F. Forghieri, L. Arcangeli, V. Gusmeroli, and D. Scarano, “16 x 20 Gb/s, 400-km WDM transmission over NZDSF using a slope-compensating fiber-grating module,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, No. 4, April 2000.
- [9] I. Kaminow, T. Koch, “Optical fiber telecommunications,” 1997.
- [10] D. Garthe, G. Milner and Y. Cai, “System performance of broadband dispersion compensating gratings,” *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 6, March 1998.
- [11] A. Goel, and R. K. Shevgaonkar, “Wide-band dispersion compensating optical fiber,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, No. 12, December 1996.
- [12] S. P. Survaiya and R. K. Shevgaonkar, “Mode converter for broadband dispersion compensation,” *Pacific Rim, ThB3*, pp595-596.1999.
- [13] H. H. Lu, W. J. Wang, H. S. Su, and C. T. Wang, “Reduction of semiconductor optical amplifier induced distortion and crosstalk in a 1.3m WDM transport system,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp.775-777, May 2003.
- [14] R.S. Luis, A.V.T. Cartaxo, “Analytical characterization of SPM impact on XPM-induced degradation in dispersion-compensated WDM systems,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol.23, pp.1503-1513, March 2005.
- [15] L.E. Nelson, C.G. Jorgensen, M.Du, T. Loadholt, and D. Peckham, “Terminal-only compensation of a 6 /spl times/ 80 km 10-gb/s WDM metro link using Raman-pumped dispersion-compensating fiber amplifiers,” *IEEE Photon. Technology Lett.* Vol. 18, pp. 139-141, 2006.
- [16] L. Gruner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C.Jorgensen, L.V. Jorgensen, B. Edvold, B. Palsdottir, and D. Jakobsen, “Dispersion-compensating fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol.23, pp.3566-3579, Nov. 2005.