

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

G.650.2

(01/2005)

SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN,
SISTEMAS Y REDES DIGITALES

Características de los medios de transmisión – Cables de
fibra óptica

**Definiciones y métodos de prueba de los
atributos conexos de las características
estadísticas y no lineales de fibras y cables
monomodo**

Recomendación UIT-T G.650.2

UIT-T



RECOMENDACIONES UIT-T DE LA SERIE G
SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES

CONEXIONES Y CIRCUITOS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES	G.100–G.199
CARACTERÍSTICAS GENERALES COMUNES A TODOS LOS SISTEMAS ANALÓGICOS DE PORTADORAS	G.200–G.299
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES DE PORTADORAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.300–G.399
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES EN RADIOENLACES O POR SATELITE E INTERCONEXIÓN CON LOS SISTEMAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.400–G.449
COORDINACIÓN DE LA RADIOTELEFONÍA Y LA TELEFONÍA EN LÍNEA	G.450–G.499
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.600–G.699
Generalidades	G.600–G.609
Cables de pares simétricos	G.610–G.619
Cables terrestres de pares coaxiales	G.620–G.629
Cables submarinos	G.630–G.649
Cables de fibra óptica	G.650–G.659
Características de los componentes y los subsistemas ópticos	G.660–G.699
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	G.700–G.799
REDES DIGITALES	G.800–G.899
SECCIONES DIGITALES Y SISTEMAS DIGITALES DE LÍNEA	G.900–G.999
CALIDAD DE SERVICIO Y DE TRANSMISIÓN – ASPECTOS GENÉRICOS Y ASPECTOS RELACIONADOS AL USUARIO	G.1000–G.1999
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.6000–G.6999
DATOS SOBRE CAPA DE TRANSPORTE – ASPECTOS GENÉRICOS	G.7000–G.7999
ASPECTOS RELATIVOS AL PROTOCOLO ETHERNET SOBRE LA CAPA DE TRANSPORTE	G.8000–G.8999
REDES DE ACCESO	G.9000–G.9999

Para más información, véase la Lista de Recomendaciones del UIT-T.

Recomendación UIT-T G.650.2

Definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables monomodo

Resumen

Esta Recomendación contiene definiciones de los parámetros estadísticos y no lineales de fibras y cables monomodo. También contiene métodos de prueba de referencia y métodos de prueba alternativos para la caracterización de dichos parámetros.

Orígenes

La Recomendación UIT-T G.650.2 fue aprobada el 13 de enero de 2005 por la Comisión de Estudio 15 (2005-2008) del UIT-T por el procedimiento de la Recomendación UIT-T A.8.

Historia

Versión		Aprobación
1.0	G.650	1993-03-12
2.0	G.650	1997-04-08
3.0	G.650	2000-10-06
4.0	G.650.2	2002-06-29
4.1	G.650.2 (2002) Enm.1	2003-03-16
5.0	G.650.2	2005-01-13

PREFACIO

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. El UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

La observancia de esta Recomendación es voluntaria. Ahora bien, la Recomendación puede contener ciertas disposiciones obligatorias (para asegurar, por ejemplo, la aplicabilidad o la interoperabilidad), por lo que la observancia se consigue con el cumplimiento exacto y puntual de todas las disposiciones obligatorias. La obligatoriedad de un elemento preceptivo o requisito se expresa mediante las frases "tener que, haber de, hay que + infinitivo" o el verbo principal en tiempo futuro simple de mandato, en modo afirmativo o negativo. El hecho de que se utilice esta formulación no entraña que la observancia se imponga a ninguna de las partes.

PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB.

© UIT 2006

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

ÍNDICE

	Página
1 Alcance	1
2 Referencias	1
2.1 Referencias normativas	1
2.2 Referencias informativas	1
3 Términos y definiciones	2
3.1 dispersión por modo de polarización (PMD)	2
3.2 Tipos de métodos de prueba	7
4 Abreviaturas, siglas o acrónimos	7
5 Métodos de prueba.....	8
5.1 Métodos de prueba de la dispersión por modo de polarización	8
5.2 Métodos de prueba para atributos no lineales	41
Apéndice I – Determinación del retardo de PMD a partir de un interferograma.....	41
I.1 Cálculo del RMS para TINTY	41
I.2 Cálculo del RMS para el análisis GINTY	43
Apéndice II – Atributos no lineales	44
II.1 Consideraciones básicas	44
II.2 Área efectiva (A_{eff}).....	44
II.3 Factor de corrección k	45
II.4 Coeficiente no lineal (n_2/A_{eff}).....	48
II.5 Dispersión de Brillouin estimulada	48
II.6 Otros efectos	52
Apéndice III – Métodos de prueba del área efectiva (A_{eff})	53
III.1 Técnica de exploración del campo lejano (FFS)	53
III.2 Técnica de apertura variable (VA, <i>variable aperture</i>)	55
III.3 Técnica de exploración del campo cercano (NFS, <i>near-field scan</i>).....	59
Apéndice IV – Información sobre estadísticas de la dispersión por modo de polarización	62
IV.1 Introducción.....	62
IV.2 Registro de datos	63
IV.3 Cálculo de PMD_Q (Monte Carlo)	63
IV.4 Cálculo para $DGD_{máx}$ (Monte Carlo).....	64

Recomendación UIT-T G.650.2

Definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables monomodo

1 Alcance

Esta Recomendación contiene definiciones y métodos de prueba adecuados principalmente para las mediciones en fábrica de los atributos estadísticos y no lineales de fibras ópticas y cables monomodo descritos en las Recs. UIT-T G.652, G.653, G.654 y G.655. En general, las definiciones y los métodos de prueba aquí descritos no son apropiados para las fibras multimodo que son objeto de la Rec. UIT-T G.651. Algunos de los métodos de prueba, cuando se indique especialmente, también se podrán utilizar para caracterizar componentes ópticos discretos, como los que se describen en la Rec. UIT-T G.671. La Rec. UIT-T G.650.1 contiene definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos.

2 Referencias

2.1 Referencias normativas

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes. En esta Recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una Recomendación.

– Ninguna.

2.2 Referencias informativas

- [1] Recomendación UIT-T G.652 (2005), *Características de los cables de fibra óptica monomodo.*
- [2] Recomendación UIT-T G.653 (2003), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada.*
- [3] Recomendación UIT-T G.654 (2004), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado.*
- [4] Recomendación UIT-T G.655 (2003), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con dispersión desplazada no nula.*
- [5] Recomendación UIT-T G.650.1 (2004), *Definiciones y métodos de prueba de los atributos lineales y determinísticos de fibras y cables monomodo.*
- [6] Recomendación UIT-T G.671 (2005), *Características de transmisión de los componentes y subsistemas ópticos.*
- [7] Recomendación UIT-T G.663 (2000), *Aspectos relacionados con la aplicación de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos.*

3 Términos y definiciones

En esta Recomendación se definen los términos siguientes.

3.1 dispersión por modo de polarización (PMD)

3.1.1 el fenómeno de la PMD: La dispersión por modo de polarización es un tiempo de retardo diferencial de grupo (DGD, *differential group delay*) entre dos modos ortogonalmente polarizados, que causa la dispersión de los impulsos en los sistemas digitales y distorsiones en los sistemas analógicos.

NOTA 1 – En las fibras simétricas circulares ideales, los dos modos de polarización se propagan con la misma velocidad. Sin embargo, las fibras reales no pueden ser perfectamente circulares y pueden sufrir esfuerzos locales; por consiguiente, la luz que se propaga se divide en dos modos de polarización locales que viajan a velocidades diferentes. Estas características de asimetría varían aleatoriamente a lo largo de la fibra y en el tiempo, lo cual produce un comportamiento estadístico de la PMD. Puede deducirse de las estadísticas un valor "máximo" del DGD.

NOTA 2 – Para una fibra determinada, instalada arbitrariamente, en un momento determinado y a una frecuencia óptica determinada, siempre existen dos estados de polarización denominados estados de polarización principales (PSP, véase 3.1.2). La dispersión de impulsos debida a la PMD desaparece si sólo es excitado un PSP. Por el contrario, la máxima dispersión de impulsos debida a la PMD se produce cuando ambos PSP son excitados por igual, y corresponde a la diferencia de los retardos de grupo asociados con los dos PSP.

3.1.2 estados de polarización principales (PSP, *principal states of polarization*): Si la fibra óptica se utiliza a una longitud de onda mayor que la longitud de onda de corte en un régimen cuasimonocromático, los PSP de salida son los dos estados de polarización de salida ortogonales para los cuales las polarizaciones de salida no varían cuando se modifica ligeramente la frecuencia óptica. Los correspondientes estados de polarización de entrada ortogonales son los PSP de entrada.

NOTA 1 – La birrefringencia local cambia a lo largo de la fibra, y el PSP depende del largo de fibra (al contrario que en las fibras de alta birrefringencia, denominadas fibras hi-bi).

NOTA 2 – Los PSP son vectores complejos aleatorios que dependen del tiempo y la frecuencia óptica. Sin embargo, según la definición, existe una pequeña gama de frecuencias, anchura de banda de PSP, en la cual pueden considerarse prácticamente constantes.

NOTA 3 – Si una señal tiene una anchura de banda mayor que la de los PSP, aparecen efectos PMD de segundo orden. Pueden implicar una despolarización del campo de salida, junto con un efecto de dispersión cromática adicional.

3.1.3 retardo de grupo diferencial ($[\delta\tau(v)]$ en ps): El retardo de grupo diferencial (DGD) es la diferencia de tiempo en los retardos de grupo de los PSP.

El DGD entre dos PSP depende de la longitud de onda y puede variar aleatoriamente en el tiempo debido al acoplamiento de modos aleatorio y a los esfuerzos aleatorizados en todo el trayecto de propagación óptica debido, entre otras causas, a las condiciones ambientales. Las fibras de transmisión normales tienen variaciones típicas del orden de un factor dos. A medida que aumenta la PMD, aumenta también la varianza de los valores de DGD y disminuye la periodicidad característica. Para la fibra acoplada en modo aleatorio normal, la distribución de DGD es ergódica, lo que significa que la distribución se mantiene igual en el tiempo y la longitud de onda, por un periodo de tiempo suficientemente largo o en una gama considerablemente amplia. Esto permite suponer que las mediciones en una gama de longitudes de onda finita son representativas de otras gamas de longitud de onda o de la misma gama en distintos instantes por un periodo de tiempo prolongado. En el caso de fibras acopladas en modo aleatorio, por lo general se emplea la distribución de Maxwell.

Los valores DGD instantáneos limitan la capacidad de transmisión de los sistemas digitales. La derivada del DGD con respecto a la longitud de onda limita la relación señal/ruido (SNR, *signal-to-noise ratio*) de los sistemas analógicos. Por consiguiente, la distribución estadística de los DGD

(versus el tiempo y/o la longitud de onda) desempeña una función importante para la predicción de la calidad de funcionamiento del sistema real.

En algunas fibras especializadas, tales como las fibras de mantenimiento de polarización (PMF, *polarization maintaining fibres*) y en algunos componentes, el acoplamiento de modos es despreciable. Para estos dispositivos la variación de DGD con la longitud de onda es muy pequeña.

3.1.4 valor de la dispersión por modo de polarización: PMD_{AVG} se define como el promedio lineal Anthe $\langle \Delta\tau \rangle$ de los valores de DGD $\Delta\tau(\nu)$ en una gama de frecuencias ópticas determinada ν_1 a ν_2 ,

$$PMD_{AVG} = \langle \Delta\tau \rangle = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \Delta\tau(\nu) d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (3-1)$$

PMD_{RMS} se define como el valor cuadrático medio (RMS) $\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$ de los valores de DGD $\Delta\tau(\nu)$ en una gama de frecuencias ópticas determinada ν_1 a ν_2 ,

$$PMD_{RMS} = \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} = \left(\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \Delta\tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{1/2} \quad (3-2)$$

NOTA 1 – Para que las ecuaciones 3-1 y 3-2 sean válidas, la gama entre ν_1 y ν_2 debe ser suficientemente ancha, por ejemplo, del orden de 100 nm en la gama de longitudes de onda correspondiente.

Si la distribución de estos valores de DGD en la gama de frecuencias ópticas determinada puede aproximarse mediante una distribución de Maxwell con suficiente confianza y fidelidad, PMD_{AVG} podrá relacionarse matemáticamente con PMD_{RMS} .

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (3-3)$$

En el caso de fibra y cable, el método de prueba de referencia (RTM, *reference test method*) de PMD arroja el promedio lineal.

NOTA 2 – Por lo general, la promediación en la gama de temperatura, de tiempo o de perturbaciones mecánicas, es una alternativa aceptable a la promediación en la gama de frecuencias. En este caso, el operador de valor previsto se mantiene en todas las condiciones. El valor previsto de un conjunto de longitudes de onda finito en un instante determinado es igual al valor previsto a largo plazo en cualquier gama de frecuencias. Ambas ecuaciones 3-1 y 3-2 se consideran como un promedio en este contexto.

NOTA 3 – La ecuación 3-3 se aplica sólo cuando la distribución de los DGD es la de Maxwell, por ejemplo cuando la fibra está acoplada en modo aleatorio. El empleo generalizado de la ecuación 3-3 se puede verificar mediante análisis estadístico. La distribución de Maxwell no será el caso, si hay fuentes puntuales de birrefringencia elevada (con referencia al resto de la fibra), tal como flexiones tensas u otros fenómenos que reducen el acoplamiento de modos, como por ejemplo, la reducción continua del radio mínimo de curvatura con la fibra en tensión. En estos casos, la distribución de los DGD comenzará a parecerse a la raíz cuadrada de una distribución Chi-cuadrada no central con tres grados de libertad. En estos casos, por lo general, el valor de la PMD_{RMS} será mayor con respecto a la PMD_{AVG} indicada en la ecuación 3-3. Los métodos de mediciones en el dominio del tiempo, como el método C y el método A, de la transformada de Fourier de coseno, basados en la PMD_{RMS} , pueden utilizar la ecuación 3 para convertir a PMD_{AVG} . Si se reduce el acoplamiento de modos, el valor de PMD resultante de estos métodos podrá rebasar el valor que puede obtenerse con las mediciones en el dominio de la frecuencia y que arrojan PMD_{AVG} , tal como el método B.

3.1.5 coeficiente de PMD: Valor de la PMD normalizado a la longitud de medición:

Hay dos fórmulas de normalización: una para el acoplamiento de modos aleatorio, asociada con las fibras de transmisión normales, y otra para el acoplamiento de modos despreciable, asociada con fibras especializadas, como las de mantenimiento de polarización.

En el caso de acoplamiento de modos aleatorio, el coeficiente de PMD es el valor PMD (PMD_{avg} o PMD_{RMS}) dividido por la raíz cuadrada de la longitud ($L^{1/2}$) que suele darse en unidades de ps/km^{1/2}.

En el caso de acoplamiento de modos despreciable, el coeficiente de PMD es el valor de PMD (PMD_{avg} o PMD_{RMS}) dividido por la longitud (L) y puede obtenerse en unidades de ps/km o fs/m.

3.1.6 Definiciones matemáticas

La PMD puede describirse en términos de los vectores Stokes o Jones. La evolución del vector Jones de salida con frecuencia óptica angular, $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$, es el origen de las degradaciones del sistema. Lo siguiente se basa en la hipótesis de pérdida dependiente de la polarización despreciable (PDL, *negligible polarization dependent loss*).

La relación entre el vector Stokes, \hat{s} , y el vector Jones asociado, \hat{j} , es:

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \text{sen } 2\theta \cos \mu \\ \text{sen } 2\theta \sin \mu \end{bmatrix} \Leftrightarrow \hat{j} = \begin{bmatrix} \cos \theta \exp(-i\mu/2) \\ \text{sen } \theta \exp(i\mu/2) \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

donde:

θ es el ángulo lineal SOP (la mitad del ángulo de rotación sobre el ecuador de la esfera de Poincaré)

μ es el ángulo de elevación a partir de la esfera de Poincaré y también la diferencia de fase entre los elementos del vector Jones

Para una frecuencia dada, ω_0 , la relación entre el vector Stokes de entrada, \hat{s}_0 , y el vector de salida puede describirse como una rotación, R, con un ángulo de rotación, γ_{ROT} , y un vector de rotación, \hat{y} .

$$\hat{s} = R\hat{s}_0 \quad \text{donde} \quad R = \hat{y}\hat{y}^T(1 - \cos \gamma_{ROT}) + I \cos \gamma_{ROT} + [\hat{y} \times] \text{sen} \gamma_{ROT} \quad (3-5)$$

$[\hat{y} \times]$ es el operador de producto cruz e I es la matriz de identidad

A esta frecuencia, la relación entre el vector Jones de salida y el vector de entrada, \hat{j}_0 , viene dada por la matriz, T, como:

$$\hat{j} = T\hat{j}_0 \quad \text{siendo} \quad T = \begin{bmatrix} \cos \gamma_T - iy_1 \text{sen } \gamma_T & -\text{sen} \gamma_T (y_3 + iy_2) \\ \text{sen} \gamma_T (y_3 - iy_2) & \cos \gamma_T + iy_1 \text{sen} \gamma_T \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$\gamma_{ROT} = 2\gamma_T$ y los valores del subíndice son los elementos del vector de rotación.

El vector de dispersión por polarización (PDV, *polarization dispersion vector*), $\hat{\Omega}$, se utiliza para describir la variación de los vectores de salida con la frecuencia. En la notación de Stokes, esto se define como:

$$\left. \frac{d\hat{s}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{dR(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} R^T(\omega_0) \hat{s}(\omega_0) = \hat{\Omega} \times \hat{s}(\omega_0) \quad (3-7a)$$

En la notación de Jones, donde los valores del subíndice son los elementos del PDV, esto se define como sigue:

$$\left. \frac{d\hat{j}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{dT(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} T \times (\omega_0) \hat{j}(\omega_0) = -\frac{i}{2} \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 - i\Omega_3 \\ \Omega_2 + i\Omega_3 & -\Omega_1 \end{bmatrix} \hat{j}(\omega_0) \quad (3-7b)$$

La ecuación 3-7b se puede utilizar como base de una expansión Taylor de primer orden para la evolución del vector Jones de salida cerca de ω_0 .

El PDV puede relacionarse con el PSP, \hat{p} , y el DGD, $\Delta\tau$, y además con el vector y el ángulo de rotación como:

$$\hat{\Omega} = 2 \frac{d\gamma_T}{d\omega} \hat{y} + \text{sen} 2\gamma_T \frac{d\hat{y}}{d\omega} + 2 \text{sen}^2 \gamma_T \left(\hat{y} \times \frac{d\hat{y}}{d\omega} \right) = \Delta\tau \hat{p} \quad (3-8)$$

La ecuación 3-7b puede escribirse como:

$$\left. \frac{d\hat{j}(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{dT(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} T \times (\omega_0) \hat{j}(\omega_0) = -\frac{i}{2} \Delta\tau V_p \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} V_p \times \hat{j}(\omega_0) \quad (3-9)$$

siendo:

$$V_p = \begin{bmatrix} \cos \theta_p \exp(-i\mu_p/2) & -\text{sen} \theta_p \exp(-i\mu_p/2) \\ \text{sen} \theta_p \exp(i\mu_p/2) & \cos \theta_p \exp(i\mu_p/2) \end{bmatrix}$$

V_p^* es la conjugada transpuesta de V_p

$$\text{y el PSP es } \hat{p} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_p \\ \text{sen} 2\theta_p \cos \mu_p \\ \text{sen} 2\theta_p \text{sen} \mu_p \end{bmatrix}$$

Suponiendo que los PSP no varían con la frecuencia (en un intervalo de frecuencia estrecho, ω_0 y $\omega_0 + \Delta\omega$), la ecuación 3-7b tiene una solución cerca de ω_0 :

$$\hat{j}(\omega) = V_p \begin{bmatrix} \exp[-i\varpi\Delta\tau/2] & 0 \\ 0 & \exp[i\varpi\Delta\tau/2] \end{bmatrix} V_p \times \hat{j}(\omega_0) = J(\varpi) \hat{j}(\omega_0) \quad (3-10)$$

siendo ϖ la desviación de ω_0

En la notación de Stokes, la ecuación 3-10 corresponde a una rotación de $\varpi\Delta\tau$ en torno al PSP en la esfera de Poincaré.

La ecuación 3-10 se escribe como una descomposición de valor singular. Los elementos diagonales de la matriz central son los valores propios (*eigenvalues*). Las columnas de la matriz, V_p , son los vectores propios (*eigenvectors*), que se presentan en forma de vectores Jones. La primera columna convierte al PSP igual que en la ecuación 3-4 y se puede denominar \hat{j}_p . Esta matriz también puede expresarse en la forma de la ecuación 3-6, sustituyendo γ_T con $\varpi\Delta\tau/2$ y los elementos del vector de rotación con los elementos del PSP.

Se puede aplicar un cambio de coordenadas a la ecuación 3-10 de manera que la matriz PSP en el nuevo sistema de coordenadas sea la matriz de identidad. Los elementos x e y del resultado pueden convolucionarse con el campo del dominio de frecuencia de una fuente monocromática, que a su vez podrá expresarse como una función de potencia en el dominio del tiempo. Por ejemplo, un pulso temporal Gaussiano con un ancho RMS igual a σ (ps) y una fibra con dispersión cromática, D (ps/nm). La función de potencia de salida resultante es un impulso dividido, P(t):

$$P(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp\left[-\frac{(t - (\tau_G - \Delta\tau/2))^2}{2S^2}\right] u + \exp\left[-\frac{(t - (\tau_G + \Delta\tau/2))^2}{2S^2}\right] (1-u) \right\} \quad (3-11)$$

donde τ_G es el retardo de grupo de $u = 0,5$

$$S^2 = \sigma^2 + \left(\frac{\tau'}{2\sigma}\right)^2 \text{ y } \tau' = -D \frac{\lambda_0}{\omega_0}$$

$$u = (\hat{j}_p \times T(\omega_0) \hat{j}_0) \times (\hat{j}_p \times T(\omega_0) \hat{j}_0) \text{ en las coordenadas originales.}$$

La diferencia entre el centro del impulso de $u = 0$ se encuentra $\Delta\tau$ alejado del centro del impulso de $u = 1$. Éste es el significado de DGD. Estos valores de u se logran cuando el vector Jones de salida está alineado con \hat{j}_p o con su contraparte ortogonal, el otro vector propio (*eigenvector*).

El ancho RMS de este impulso es:

$$RMS_p = [S^2 + \Delta\tau^2 u(1-u)]^{1/2} \quad (3-12)$$

Para las mediciones que emplean el análisis RTM JME, se calculan valores aproximados de la matriz T para ω_0 y $\omega_0 + \Delta\omega$, a una frecuencia ligeramente superior. La matriz de transferencia de frecuencia se aproxima conforme a lo siguiente:

$$J(\Delta\omega) = T(\omega_0 + \Delta\omega) T^{-1}(\omega_0) \quad (3-13)$$

De acuerdo con la ecuación 3-10 es evidente que el argumento de la relación de los valores propios (*eigenvalues*), dividido por $\Delta\omega$, es el DGD.

El término "primer orden" se asoció originalmente con la expansión Taylor de primer orden asociada con la ecuación 3-7b. También podría asociarse con el hecho de que establece una correspondencia de fase lineal continua del vector Jones de una frecuencia a la siguiente frecuencia más alta.

La PMD de segundo orden podría considerarse como una descripción de $J(\omega)$ que establece una correspondencia continua con las frecuencias superior e inferior. Esto puede efectuarse sustituyendo $\omega\Delta\tau/2$ por una expresión más general, $\gamma(\omega)$, que se describe como una expansión de Taylor:

$$\gamma(\omega) = \omega\gamma_\omega + \omega^2\gamma'_\omega / 2 \quad (3-14a)$$

Del mismo modo, los parámetros angulares del PSP pueden escribirse como:

$$\theta_p(\omega) = \theta_{p0} + \omega\theta_{p\omega} \text{ y } \mu_p(\omega) = \mu_{p0} + \omega\mu_{p\omega} \quad (3-14b)$$

El empleo de fórmulas como la ecuación 3-13 para la frecuencia inversa, la descomposición del valor singular de la ecuación 3-10, y alguna aplicación de álgebra/trigonometría, pueden producir cálculos aproximados de los parámetros de las ecuaciones 3-14a y 3-14b a partir de los datos medidos.

El PDV de segundo orden, $\bar{\Omega}_\omega$, se define como la derivada de frecuencia del PDV:

$$\bar{\Omega}_\omega = \frac{d\bar{\Omega}}{d\omega} = \frac{d\Delta\tau}{d\omega} \hat{p} + \Delta\tau \frac{d\hat{p}}{d\omega} \quad (3-15)$$

Cuando hay acoplamiento de modos aleatorio, la magnitud de este vector y de su valor previsto se relacionan con el valor de la PMD de la siguiente manera:

$$\langle \bar{\Omega}_\omega \cdot \bar{\Omega}_\omega \rangle = \left\langle \left(\frac{d\Delta\tau}{d\omega} \right)^2 \right\rangle + \left\langle \Delta\tau^2 \frac{d\hat{p}}{d\omega} \cdot \frac{d\hat{p}}{d\omega} \right\rangle = \frac{1}{3} \langle \Delta\tau^2 \rangle^2 \quad (3-16)$$

La relación del primer término, que incluye la derivada del DGD, con el segundo término, que incluye la derivada del PSP, es de 1/8. El primer término es interactivo con dispersión cromática y el segundo tiene un efecto de despolarización.

La convolución de la representación ampliada de la matriz de transferencia de frecuencia con el impulso de entrada queda fuera del alcance de esta cláusula, aunque queda claro que no será fácil representar los resultados y que dependerá de los detalles de los parámetros a la frecuencia de la fuente. Si, sin embargo, se desean conocer los valores previstos, la ecuación 3-16 aclara que éstos pueden ser calculados a partir del valor PMD_{RMS} y que no se necesitan mediciones explícitas.

3.2 Tipos de métodos de prueba

3.2.1 método de prueba de referencia (RTM, *reference test method*): Método con el que se mide una característica de una clase específica de fibra óptica o de cable de fibra óptica, de una manera que se ajusta estrictamente a la definición de esta característica, y que permite obtener resultados precisos, reproducibles y asimilables a la utilización práctica.

3.2.2 método de prueba alternativo (ATM, *alternative test method*): Método con el que se mide una característica de una clase específica de fibra óptica o de cable de fibra óptica, de una manera que se ajusta a la definición de esta característica, y que permite obtener resultados reproducibles y asimilables al método de prueba de referencia y a la utilización práctica.

4 Abreviaturas, siglas o acrónimos

En esta Recomendación se utilizan las siguientes abreviaturas, siglas o acrónimos.

ATM	Método de prueba alternativo (<i>alternative test method</i>)
DGD	Retardo diferencial de grupo (<i>differential group delay</i>)
DWDM	Multiplexación por división en longitud de onda densa (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)
ECL	Láser de cavidad externa (<i>external cavity laser</i>)
FWHM	Anchura entre semimáximos (<i>full width at half maximum</i>)
LD	Diodo láser (<i>laser diode</i>)
LED	Diodo fotoemisor (<i>light emitting diode</i>)
MFD	Diámetro del campo modal (<i>mode field diameter</i>)
NFP	Diagrama de campo próximo (<i>near-field pattern</i>)
OTDR	Reflectómetro óptico en el ámbito temporal (<i>optical time domain reflectometer</i>)
PMD	Dispersión por modo de polarización (<i>polarization mode dispersion</i>)
PS	Esfera de Poincaré (<i>Poincaré sphere</i>)

PSP	Estado de polarización principal (<i>principal state of polarization</i>)
RTM	Método de prueba de referencia (<i>reference test method</i>)
SOP	Estado de polarización (<i>state of polarization</i>)
TBD	Por determinar (<i>to be determined</i>)
WDM	Multiplexación por división en longitud de onda (<i>wavelength division multiplexing</i>)

5 Métodos de prueba

En esta parte se indican en general, para cada parámetro, tanto el método de prueba de referencia (RTM, *reference test method*) como uno o varios métodos de prueba alternativos (ATM, *alternative test methods*), entendiéndose que tanto el RTM como los ATM pueden resultar adecuados para los fines normales de aceptación de productos. Sin embargo, si al emplear un ATM surgiese cualquier discrepancia, se recomienda emplear el RTM para obtener los resultados de medición definitivos.

NOTA – El aparato y el procedimiento indicados abarcan solamente las características básicas esenciales de los métodos de prueba. Se supone que la instrumentación detallada incorporará todas las medidas necesarias para garantizar la estabilidad, la eliminación del ruido, la relación señal/ruido, etc.

5.1 Métodos de prueba de la dispersión por modo de polarización

Todos los métodos de prueba arrojan el valor de la PMD. La conversión al coeficiente PMD se efectuará de acuerdo con la definición de 3.1.5.

5.1.1 Método de prueba de referencia: Técnica de evaluación de parámetros de Stokes

5.1.1.1 Generalidades

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la dispersión por modo de polarización (PMD, *polarization mode dispersion*) de las fibras ópticas monomodo. Se determina el cambio de estado de polarización (SOP, *state of polarization*) de salida con la longitud de onda. Este cambio puede caracterizarse mediante el eigenanálisis de la matriz de Jones (JME, *Jones matrix eigenanalysis*) o la rotación del vector SOP en la esférica de Poincaré (PS, *poincaré sphere*). Puede aplicarse tanto a secciones de fibra cortas o largas, independientemente del nivel de acoplamiento del modo de polarización. En algunas circunstancias, pueden necesitarse mediciones repetidas para obtener una precisión satisfactoria. Este método se limita a longitudes de onda mayores o iguales que aquella en la que la fibra es efectivamente monomodo.

Cuando se miden fibras en movimiento (por ejemplo, fibras en OPGW), tal vez sea más apropiado utilizar el método interferométrico que la función de resolución de discrepancias del método de prueba de referencia (RTM).

5.1.1.2 Aparato de prueba

Véase en la figura 1 un diagrama esquemático de los principales componentes del sistema de medición típico.

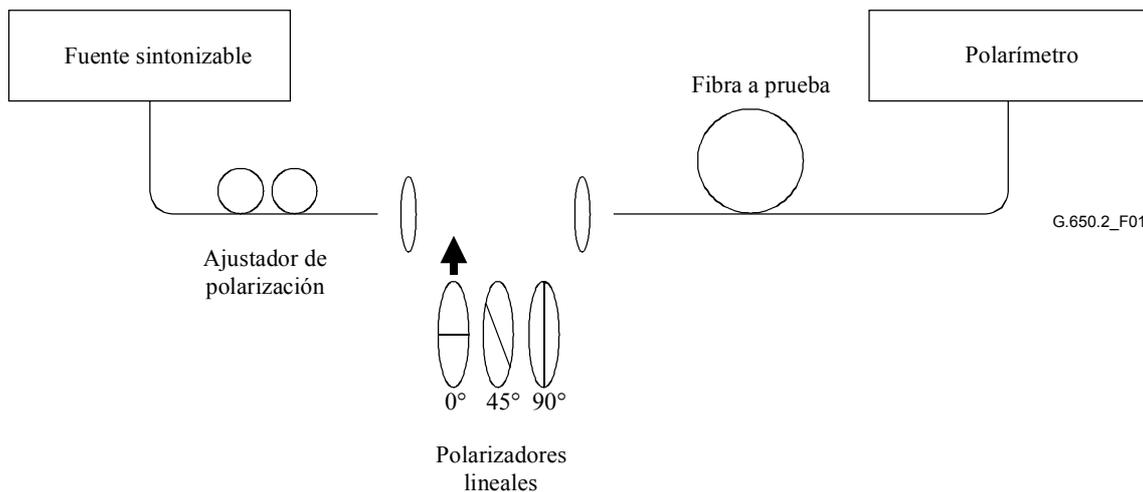


Figura 1/G.650.2 – Diagrama esquemático del equipo (típico)

5.1.1.2.1 Fuente luminosa

Se utiliza un láser unilínea o una fuente de banda estrecha que sea sintonizable en toda la gama de longitudes de onda de medición deseada. La distribución espectral será suficientemente estrecha para que la luz que emerge de la fibra a prueba permanezca polarizada bajo todas las condiciones de la medición. Se prefiere un grado de polarización (DOP, *degree of polarization*) del 90% o mayor, aunque pueden efectuarse mediciones menos precisas con valores de sólo el 25%. Para un determinado valor del retardo de grupo diferencial $\Delta\tau$, el menor grado de polarización que puede resultar viene dado por:

$$DOP = 100e^{-\frac{1}{4 \ln 2} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda_{FWHM}}{\lambda_0^2} \right)^2} \quad (5-1)$$

suponiendo un espectro gaussiano de anchura $\Delta\lambda_{FWHM}$ centrada en λ_0 . DOP se expresa como porcentaje.

5.1.1.2.2 Ajustador de polarización

Sigue al láser un ajustador de polarización, que se fija para proporcionar a los polarizadores luz con polarización aproximadamente circular, de manera que los polarizadores nunca crucen la polarización con su luz de entrada. La polarización se ajusta como sigue. Se fija la longitud de onda del láser sintonizable al centro de la gama a medir. Se inserta cada uno de los tres polarizadores en el haz y se efectúan tres mediciones de potencia correspondientes a la salida de los polarizadores. Se ajusta la polarización de la fuente mediante el ajustador de polarización de manera que las tres potencias queden aproximadamente en una gama de 3 dB entre sí. En una versión de haz abierto de la configuración, una placa de ondas puede efectuar el ajuste de polarización.

5.1.1.2.3 Polarizadores

Se disponen tres polarizadores lineales en ángulos relativos de aproximadamente 45 grados, que serán insertados sucesivamente en el haz luminoso. Se conocerán los ángulos relativos reales.

5.1.1.2.4 Dispositivo óptico de entrada

Puede emplearse un sistema de lente óptica o un raballo de fibra monomodo para excitar la fibra a prueba.

5.1.1.2.5 Rabillo de fibra

Si se utilizan rabillos de fibra, deben evitarse los efectos de interferencia debidos a las reflexiones, lo cual puede exigir materiales de adaptación de índice o cortes angulados. Los rabillos serán monomodo.

5.1.1.2.6 Sistema de lente óptica

Si se utiliza un sistema de lente óptica, se utilizarán medios adecuados, tales como mordazas de vacío, se utilizarán para sujetar establemente el extremo de entrada de la fibra.

5.1.1.2.7 Supresor de modos de revestimiento

Se suprime cualquier potencia de modos de revestimiento de la fibra a prueba. La funda de la fibra la suprime casi siempre; en otro caso, se emplea un dispositivo que elimine la potencia de modos de revestimiento.

5.1.1.2.8 Dispositivo óptico de salida

Se acopla toda la potencia emitida por la fibra de prueba al polarímetro. Un sistema de lente óptica, un empalme a tope a un rabillo de fibra monomodo, o un acoplamiento de adaptación de índice efectuado directamente al sistema detector son ejemplos de medios que pueden utilizarse.

5.1.1.2.9 Polarímetro

Se usa un polarímetro para medir los tres estados de polarización de salida correspondientes a la inserción de cada uno de los tres polarizadores. La gama de longitudes de onda del polarímetro incluirá las longitudes de onda producidas por la fuente luminosa.

5.1.1.3 Procedimiento de medición

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra óptica monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y de los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante durante toda la medición. La estabilidad de temperatura del dispositivo de prueba puede observarse siguiendo el estado de polarización de salida de la fibra de prueba en una esfera de Poincaré. En un periodo de tiempo correspondiente a un par adyacente de mediciones de la matriz de Jones, la variación de la polarización de salida debe ser pequeña con relación a la variación producida por un incremento de longitud de onda.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba también puede efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente de PMD no es pertinente.

Cuando se miden fibras no cableadas, a fin de soportar los requisitos primarios de PMD_Q de la fibra cableada, es importante minimizar el acoplamiento de modos inducido debido al despliegue. En este caso, la fibra será soportada de alguna manera (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm), con una tensión de la fibra prácticamente nula (ordinariamente menor que 5 g), y sin cruces sometidos a tensión. Estos requisitos de despliegue limitan la longitud que puede medirse, en función del diámetro de la bobina, y pueden provocar que la medición resulte negativa. Hay casos de arrollamientos en multicapas, pero su aplicación deberá calificarse comparándola con los resultados obtenidos con una sola capa y con longitudes más pequeñas.

No se recomienda la medición de fibra no cableada que se despliega en bobinas de transporte. Los resultados de PMD obtenidos de esta forma de despliegue han demostrado ser considerablemente menores que los que se obtendrían en forma de cable para fibra con alta PMD y considerablemente mayores que los correspondientes a fibra con baja PMD.

Se acopla la fuente luminosa a los polarizadores mediante el ajustador de polarización.

Se acopla la salida de los polarizadores a la entrada de la fibra a prueba.

Se acopla la salida de la fibra a prueba a la entrada del polarímetro.

Se selecciona el intervalo de longitudes de onda $\Delta\lambda$ en el cual han de efectuarse las mediciones de la matriz de Jones. El máximo valor admisible de $\Delta\lambda$ (alrededor de λ_0) es fijado por el requisito:

$$\Delta\tau_{\text{máx}}\Delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (5-2)$$

donde $\Delta\tau_{\text{máx}}$ es el máximo retardo diferencial de grupo (DGD) esperado dentro de la gama de longitudes de onda de medición. Por ejemplo, el producto del máximo DGD y del intervalo de longitud de onda debe ser inferior a 4 ps.nm a 1550 nm y también inferior a 2,8 ps.nm a 1300 nm. Este requisito asegura que de una longitud de onda de prueba a la siguiente, el estado de polarización de salida gira menos de 180 grados en torno al eje de estados principales de la pantalla esférica de Poincaré. Si no puede efectuarse una estimación aproximada de $\Delta\tau_{\text{máx}}$, efectuar una serie de mediciones de muestra en la gama de longitudes de onda, en la que cada medición utilice un par poco espaciado de longitudes de onda apropiado a la anchura espectral y un paso de sintonización mínimo de la fuente óptica. Se multiplica el máximo DGD medido de este modo por un factor de seguridad de tres, sustituir $\Delta\tau_{\text{máx}}$ por este valor en la expresión anterior y calcular el valor de $\Delta\lambda$ a utilizar en la medición real. Si se cree que el intervalo de longitudes de onda utilizado para una medición era excesivamente largo, la medición puede repetirse con un intervalo de longitudes de onda menor. Si la forma de la curva de DGD en función de la longitud de onda y el DGD medio son prácticamente invariables, el intervalo de longitudes de onda original era satisfactorio.

Se reúnen los datos de medición. Se inserta cada uno de los polarizadores a las longitudes de ondas seleccionadas y se registran los parámetros de Stokes correspondientes procedentes del polarímetro.

5.1.1.4 Cálculos o interpretación del resultado

Hay dos métodos (JME y PSA) para analizar los parámetros de Stokes medidos según se indica en 5.1.1.3. Ambos métodos permiten deducir la rotación de los vectores Stokes de salida de una frecuencia óptica a la siguiente frecuencia. El DGD es proporcional al ángulo de rotación e inversamente proporcional a la diferencia de frecuencia. Los dos métodos son matemáticamente equivalentes para la PMD de primer orden con PDL despreciable.

Los parámetros Stokes para una determinada longitud de onda son los vectores de Stokes de salida normalizados representados como \hat{H} , \hat{Q} y \hat{V} para ángulos SOP lineales relativos de entrada de 0° , 45° y 90° respectivamente.

En la cláusula 5.1.3, se utilizó la longitud de onda para describir la medición. La frecuencia óptica angular, $\omega = 2\pi c / \lambda$ (ps^{-1}) es el criterio de medición más útil para los cálculos. Los cálculos que se presentan más adelante están referidos a un solo par de frecuencias adyacentes designadas como ω_0 y $\omega_0 + \Delta\omega$. Este par produce un valor de DGD. Los valores de DGD se calculan para cada par ascendente de frecuencias en una gama de frecuencias empleando los mismos cálculos.

El promedio de todos los valores de DGD se presenta como el valor PMD.

5.1.1.4.1 Eigenanálisis de la matriz de Jones

Para una determinada frecuencia, se debe utilizar la ecuación 3-4 para convertir los vectores Stokes de salida unitarios medidos a vectores Jones suponiendo que $0 \leq \theta \leq \pi$. Los elementos complejos x e y de estos vectores se designan como : h_x , h_y , q_x , q_y , v_x y v_y . Usando estos vectores se calculan las siguientes relaciones:

$$k_1 = h_x / h_y \quad k_2 = v_x / v_y \quad k_3 = q_x / q_y \quad k_4 = \frac{k_3 - k_2}{k_1 - k_3} \quad (5-3)$$

La hipótesis de que $0 \leq \theta \leq \pi$ no es pertinente debido a los cálculos de las relaciones.

Para la frecuencia, la matriz de transferencia de Jones, T, se calcula de la siguiente manera:

$$T = \begin{bmatrix} k_1 k_4 & k_2 \\ k_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

La matriz de transferencia real es la matriz de la ecuación 5-4 multiplicada por una constante compleja desconocida que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del determinante de la matriz calculada. No obstante, esta constante ya no es necesaria para el resto de los cálculos.

Para un par de frecuencias, la matriz de transferencia de frecuencia de Jones, J, se calcula de la siguiente manera:

$$J(\omega_0) = T(\omega_0 + \Delta\omega)T^{-1}(\omega_0) \quad (5-5)$$

Se calculan los dos valores propios (*eigenvalues*), $\rho_1(\omega_0)$ y $\rho_2(\omega_0)$ de $J(\omega_0)$. El DGD, $\Delta\tau(\omega_0)$ está dado por:

$$\Delta\tau(\omega_0) = \frac{|\arg(\rho_1(\omega_0)/\rho_2(\omega_0))|}{\Delta\omega} \quad (5-6)$$

siendo $\arg(me^{i\theta}) = \theta$ con m y θ reales, y $|\theta| < \pi$.

Los datos pueden visualizarse en función de la longitud de onda como se ilustra en la figura 2 o como un histograma según la figura 3.

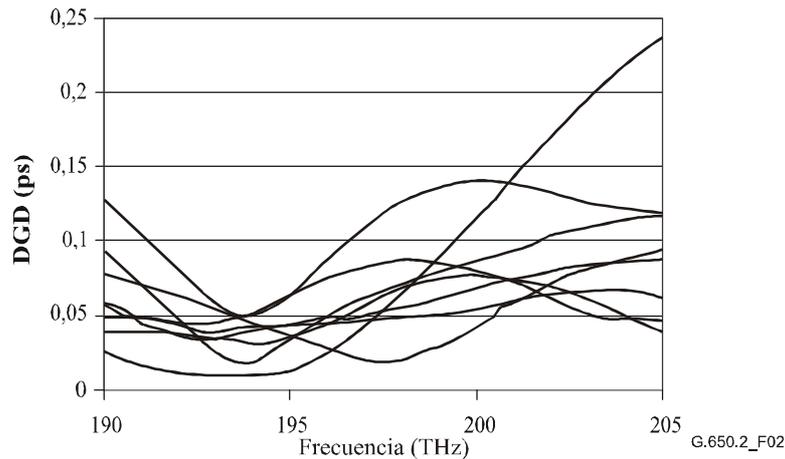


Figura 2/G.650.2 – Datos del DGD en función de la longitud de onda

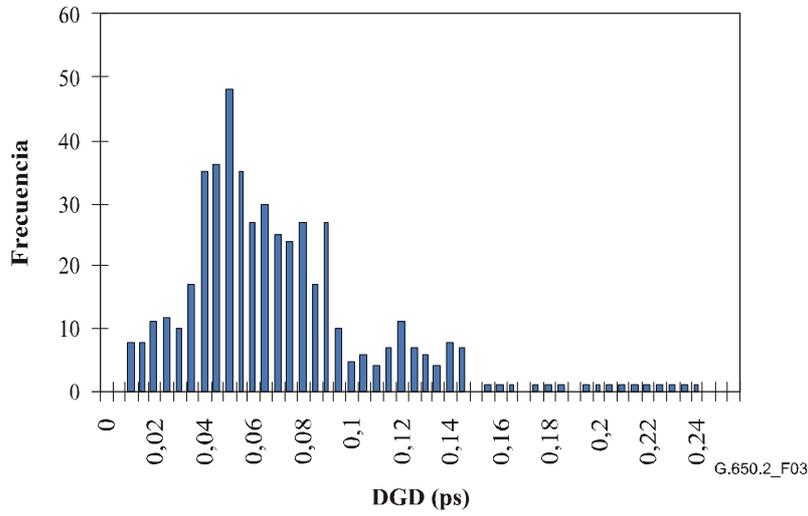


Figura 3/G.650.2 – Datos del DGD como un histograma

5.1.1.4.2 Análisis de la esfera de Poincaré (PSA, *Poincaré sphere analysis*)

El análisis se fundamenta en una función arcoseno para determinar la rotación de los vectores Stokes normalizados sobre la esfera de Poincaré.

A partir de dichos vectores \hat{H} , \hat{V} , \hat{Q} , podrá calcularse:

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{q} \times \hat{V}}{|\hat{q} \times \hat{V}|} \times \hat{q} \quad (5-7)$$

Esto hace que el análisis sea independiente de los SOP y en consecuencia no es necesario conocerlos.

A partir de los vectores Stokes \hat{h} , \hat{v} y \hat{q} , podrán formarse los productos vectores $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ y $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ de cada longitud de onda. Para cada incremento de frecuencia se pueden calcular las diferencias finitas,

$$\begin{aligned} \Delta \hat{h} &= \hat{h}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega_0) & \Delta \hat{q} &= \hat{q}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega_0) & \Delta \hat{v} &= \hat{v}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega_0) \\ \Delta \hat{c} &= \hat{c}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega_0) & \Delta \hat{c}' &= \hat{c}'(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega_0) \end{aligned} \quad (5-8)$$

A continuación se halla el DGD, $\Delta\tau$, de un incremento de frecuencia particular a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsen\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta \hat{h}^2 + \Delta \hat{q}^2 + \Delta \hat{c}^2)}\right) + \arcsen\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta \hat{q}^2 + \Delta \hat{v}^2 + \Delta \hat{c}'^2)}\right) \right] \quad (5-9)$$

NOTA – $\Delta \hat{h}^2 = \Delta \hat{h} \cdot \Delta \hat{h}$.

5.1.1.5 Presentación de los resultados

- Identificación de la muestra medida.
- Longitud de prueba.
- Gama de longitudes de onda en las cuales se realizaron las mediciones, tamaño del paso de longitud de onda y número de puntos de muestra.
- Configuración física de la muestra de fibra o de cable.
- Tipo de acoplamiento modal (nulo, semialeatorio, o aleatorio).

- f) Método de análisis (JME o PS).
- g) PMD en ps. Si se conoce el ángulo del acoplamiento modal, el coeficiente PMD puede darse en ps/km (acoplamiento modal nulo), o en ps/km^{1/2} (acoplamiento modal aleatorio).
- h) Si el PMD medio fue determinado a partir de mediciones repetidas de la muestra, se registra el número de mediciones realizadas.

5.1.2 Primer método de prueba alternativo: Método del estado de polarización (SOP)

5.1.2.1 Generalidades

Este método permite medir la trayectoria del vector Stokes de salida en función de la frecuencia, a partir de un solo SOP de entrada. El análisis da una estimación del ángulo de rotación entre cada frecuencia y la siguiente. Una deficiencia de este método es que si el vector Stokes de salida se alinea con el PSP, el DGD estimado podrá ser significativamente menor que el valor real.

La base del método es que en caso de variación de la frecuencia óptica de la luz inyectada, el estado de polarización a la salida de la fibra, representado en la esfera de Poincaré en el espacio de los parámetros de Stokes gira en torno al eje coincidiendo con el sentido de los PSP a una velocidad que depende del retardo de PMD: a mayor retardo, más rápida es la rotación. Por tanto, midiendo el ángulo de rotación $\Delta\theta$ del punto representativo de la pantalla esférica de Poincaré correspondiente a la variación de la frecuencia angular $\Delta\omega$, el retardo PMD, $\Delta\tau$, se puede determinar así:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| \quad (5-10)$$

Debe señalarse que cuando se excita uno de los PSP de entrada, el correspondiente estado de polarización (SOP) a la salida de la fibra permanece invariable por definición y no se detecta ninguna rotación en la esfera de Poincaré.

La técnica proporciona directamente los retardos diferenciales de grupo (DGD) entre los estados de polarización principales de la fibra probada en función de la longitud de onda o del tiempo. La PMD se obtiene mediante promediación adecuada en el tiempo o en la longitud de onda, o en ambos. El método es exacto para dar información completa sobre las estadísticas de los DGD.

5.1.2.2 Aparatos de prueba

En la figura 4 se muestra un diagrama esquemático del aparato de prueba. La técnica consiste en medir el estado de polarización de salida de la fibra probada a cierto número de longitudes de onda a lo largo de una determinada gama espectral por inyección en la fibra probada de luz con un estado de polarización fijo.

5.1.2.2.1 Fuente óptica

Se requiere un láser unilínea estable, sintonizable en la gama de longitudes de onda de medición. La anchura espectral del láser debe ser suficientemente pequeña para garantizar que no habrá despolarización de la señal debido a la PMD de la fibra probada.



G.650.2_F04

Figura 4/G.650.2 – Esquema del aparato para la medición de la PMD por análisis del estado de polarización

5.1.2.2.2 Controlador de polarización

Se colocará un controlador de polarización entre la fuente óptica y la fibra probada.

5.1.2.2.3 Polarímetro

Se utilizará un polarímetro para medir los parámetros de Stokes en función de la longitud de onda a la salida de la fibra probada.

5.1.2.2.4 Muestras

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante durante toda la medición. Se emplearán condiciones ambiente normalizadas. En el caso de fibras y cables instalados, pueden utilizarse las condiciones de instalación existentes.

Cuando se miden fibras no cableadas, a fin de soportar los requisitos primarios de PMD_Q de la fibra cableada, es importante minimizar el acoplamiento de modos inducido por el despliegue. En este caso, la fibra será soportada de alguna manera (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm), con una tensión de la fibra prácticamente nula (ordinariamente menor que 5 g), y sin cruces sometidos a tensión. Estos requisitos de despliegue limitan la longitud que puede medirse, en función del diámetro de la bobina, y pueden hacer que la medición resulte negativa. Hay casos de arrollamientos en multicapas, pero su aplicación deberá calificarse comparándolos con los resultados obtenidos con una sola capa y con longitudes más pequeñas.

No se recomienda la medición de fibra no cableada que se despliega en bobinas de transporte. Los resultados de PMD obtenidos de esta forma de despliegue han demostrado ser considerablemente menores que los que se obtendrían en forma de cable para fibra con alta PMD y considerablemente mayores que los correspondientes a fibra con baja PMD.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba también puede efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente PMD no es pertinente.

5.1.2.3 Procedimiento de medición

5.1.2.3.1 Medición

- a) La luz que sale de la fuente óptica se pasa a través del controlador de polarización y se acopla a la fibra probada. Si fuera necesario, se ajustará el controlador de polarización para optimizar las condiciones para la determinación del ángulo de rotación en la esfera de Poincaré. En el caso de trayectos en fibra, las fibras deben mantenerse estacionarias durante las siguientes mediciones.
- b) La salida de la fibra probada se acopla a la entrada del polarímetro.
- c) Se selecciona la gama de longitudes de onda en la cual ha de efectuarse la medición.
- d) Se selecciona el paso de longitud de onda $\Delta\lambda$ (en nm) al que han de medirse los parámetros de Stokes. Para evitar que el estado de polarización de salida (PSP) gire más de 180° en torno al eje de los PSP en la esfera de Poincaré, entre dos longitudes de onda de prueba, debe cumplirse el requisito $\Delta\tau_{\text{máx}}\Delta\lambda \leq 4 \text{ ps.nm}$, donde $\Delta\tau_{\text{máx}}$ (en ps) es el máximo DGD esperado en la fibra probada.
- e) Los valores medidos de los parámetros de Stokes a los valores de longitud de onda seleccionados se registran de manera adecuada para el análisis descrito en las cláusulas siguientes.

5.1.2.3.2 Cálculo o interpretación de resultados

La fluctuación de polarización medida mediante el analizador de Stokes (o el analizador por rotación) puede transformarse en la curva de SOP en función de la longitud de onda (frecuencia);

El SOP se expresa como:

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (5-11)$$

donde:

$$\eta = \tan \left[0,5 \tan^{-1} \left\{ S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right\} \right] \quad (5-12)$$

Aquí, η es la elipticidad de la polarización, S_1 , S_2 y S_3 son los parámetros de Stokes.

En la figura 5, la distancia de cresta a cresta (o extremo) de las curvas SOP es equivalente a la diferencia de fase de π .

La $\delta\tau$ de DGD o PMD viene dada por:

$$\Delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta\lambda} \quad (5-13)$$

donde N representa los números de extremo a extremo de las curvas de SOP.

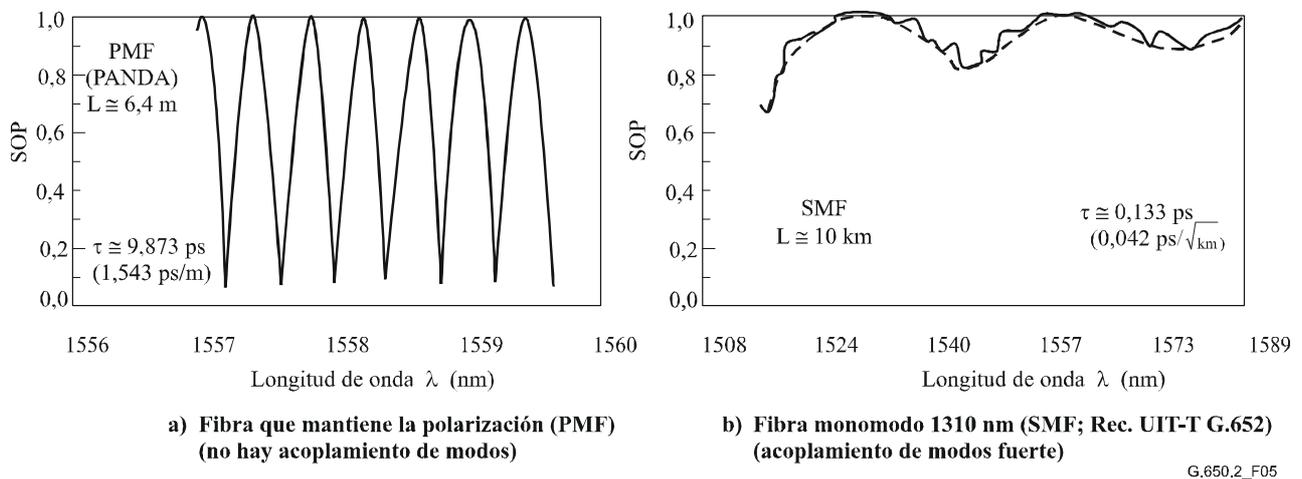


Figura 5/G.650.2 – Representación con el método del estado de polarización (SOP) de dos ejemplos de mediciones de la PMD

5.1.2.4 Presentación de los resultados

- a) Configuración de prueba, algoritmos de procesamiento.
- b) Gama de longitudes de onda, paso de longitud de onda, número de puntos muestreados.
- c) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Condiciones de instalación de la fibra.
- f) Indicación de exactitud y la repetibilidad.
- g) Representación de exactitud y repetibilidad.
- h) Histograma de los DGD medidos en función de la longitud de onda (si es necesario).
- i) DGD medio.
- j) Coeficiente de PMD.

5.1.3 Segundo método de prueba alternativo: Técnica interferométrica

5.1.3.1 Generalidades

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la PMD de las fibras y cables ópticos monomodo.

El valor medido representa la PMD_{RMS} en una amplia gama de longitudes de onda de medición de fuentes de banda ancha típicas, tales como el LED, combinación de varios super LED o fuentes de emisión espontánea amplificada (ASE, *amplified spontaneous emission*) en la ventana de 1310 nm o de 1550 nm o en cualquier otra ventana de interés, según las necesidades del usuario.

La PMD es determinada a partir de un interferograma que contiene las funciones de autocorrelación y transcorrelación del campo electromagnético emergente en un extremo de la fibra sometida a prueba (FUT, *fibre under test*), cuando es iluminada por una fuente polarizada de banda ancha en el otro extremo.

La ventaja principal de este método es que el tiempo de medición es muy rápido y que el equipo puede ser utilizado fácilmente en el servicio. La conocida técnica espectroscópica de la transformada de Fourier garantiza la dinámica y la estabilidad.

Debe tratarse de una fibra monomodo en la gama de longitudes de onda medida.

El método interferométrico (INTY) emplea dos análisis que suponen mediciones ligeramente distintas:

- el análisis tradicional (TINTY, *traditional analysis*) que aprovecha un conjunto de condiciones de funcionamiento específicas para sus aplicaciones satisfactorias y una configuración básica; y
- un análisis general (GINTY, *general analysis*) que no emplea condiciones de funcionamiento limitadoras sino una configuración modificada en comparación con TINTY.

5.1.3.2 Aparatos de prueba

En la figura 6 se muestra una configuración genérica que es la base de la aplicación experimental de INTY. Existen variantes de esta configuración que se presentan más adelante. El interferómetro puede ser del tipo trayecto aéreo o del tipo fibra, puede ser del tipo Michelson o Mach-Zehnder y puede estar situado en la fuente o en el extremo detector. Se dan ejemplos en las figuras 7, 8 y 9.

NOTA – Cuando se usa un interferómetro de tipo fibra se deberá tener precaución con la dispersión cromática de la fibra que puede introducir incertidumbre en los resultados de las mediciones.

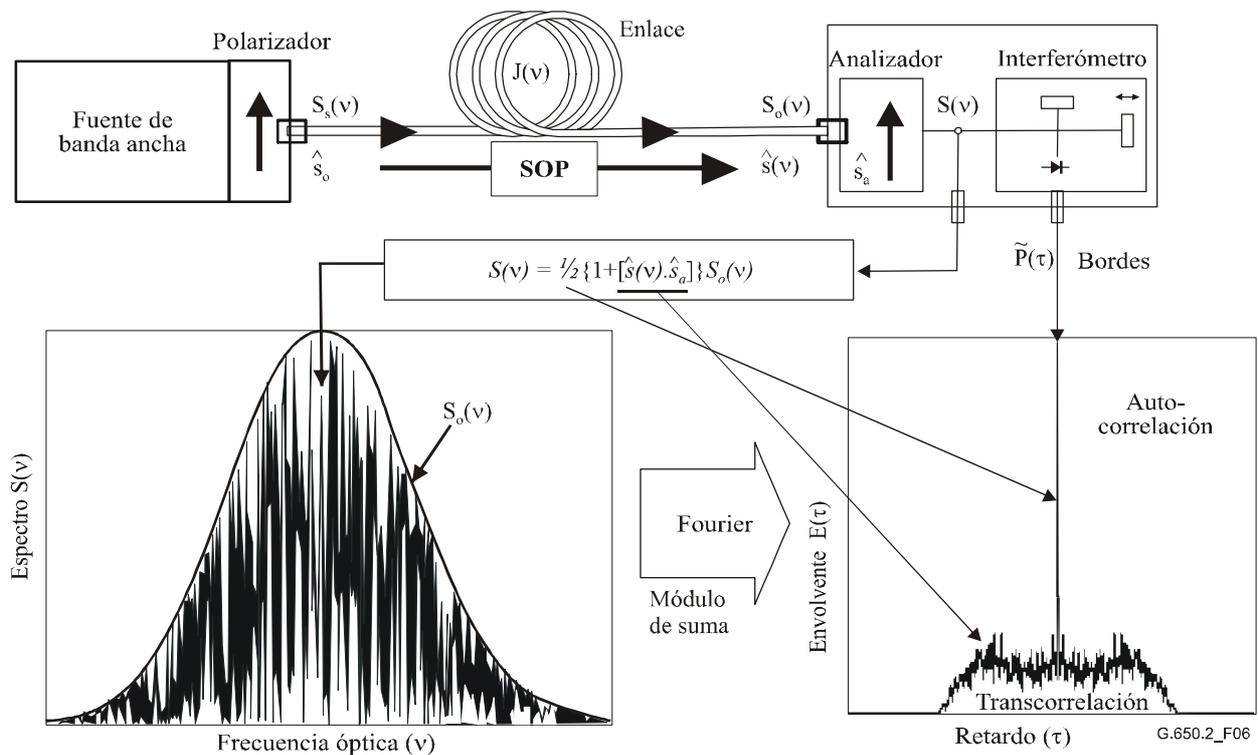


Figura 6/G.650.2 – Configuración genérica para la técnica basada en interferómetro

Parámetros utilizados en la figura 6 y en el resto de esta Recomendación:

- ν frecuencia óptica ($\lambda\nu = c$);
- τ diferencia del retardo de ida y vuelta entre los dos lados del interferómetro;
- $S_s(\nu)$ espectro óptico, en la entrada de la FUT \equiv densidad spectral de $\vec{E}_s(\nu)$ espectro del campo eléctrico de la fuente;
- $S_o(\nu)$ espectro óptico, en la salida de la FUT (entrada del analizador);
- $S(\nu)$ espectro óptico en la salida del analizador (entrada del interferómetro);
- \hat{s}_0 entrada al SOP (en la entrada de la FUT; vector de Stokes unitario);
- $\hat{s}(\nu)$ salida del SOP (en la salida de la FUT);
- \hat{s}_a eje de transmisión del analizador;
- $\hat{s}(\nu) \cdot \hat{s}_a$ parámetro de Stokes que da la proyección de $\hat{s}(\nu)$ en el eje de transmisión del analizador. Es el parámetro que contiene la información de la PMD;
- $P(\tau)$ potencia óptica en la salida del interferómetro, en función del retardo τ ;
- $\tilde{P}(\tau)$ parte de $P(\tau)$ que depende de τ (parte de "c.a.");
- P_0 parte constante de $P(\tau)$ (parte de "c.c.");
- $E(\tau)$ envolvente de bordes;
- $E_x(\tau)$ envolvente de transcorrelación;
- $E_0(\tau)$ envolvente de autocorrelación.

La potencia óptica en la salida del interferómetro, $P(\tau)$, es igual a la suma de las partes "c.a." y "c.c.". Ambas partes son iguales a $\tau = 0$ de modo que se puede calcular la parte "c.a.". En un interferómetro ideal, la parte de "c.a." es una función par, cuya mitad derecha es igual a la

transformada de Fourier de coseno del espectro óptico, $S(\nu)$, emitida por el analizador. En el caso de interferómetros no ideales, se tendrán que aplicar algunas correcciones, en función de los detalles de la configuración.

Para TINTY, la envolvente del interferograma, $E(\tau)$, es el valor absoluto de la parte "c.a.". En el caso de GINTY, en 5.1.3.4.2 se describen los cálculos adicionales necesarios para obtener las envolventes de transcorrelación y de autocorrelación. Estos cálculos incluyen dos interferogramas medidos que resultan del ajuste del analizador en dos SOP ortogonales.

A continuación se muestran otras configuraciones.

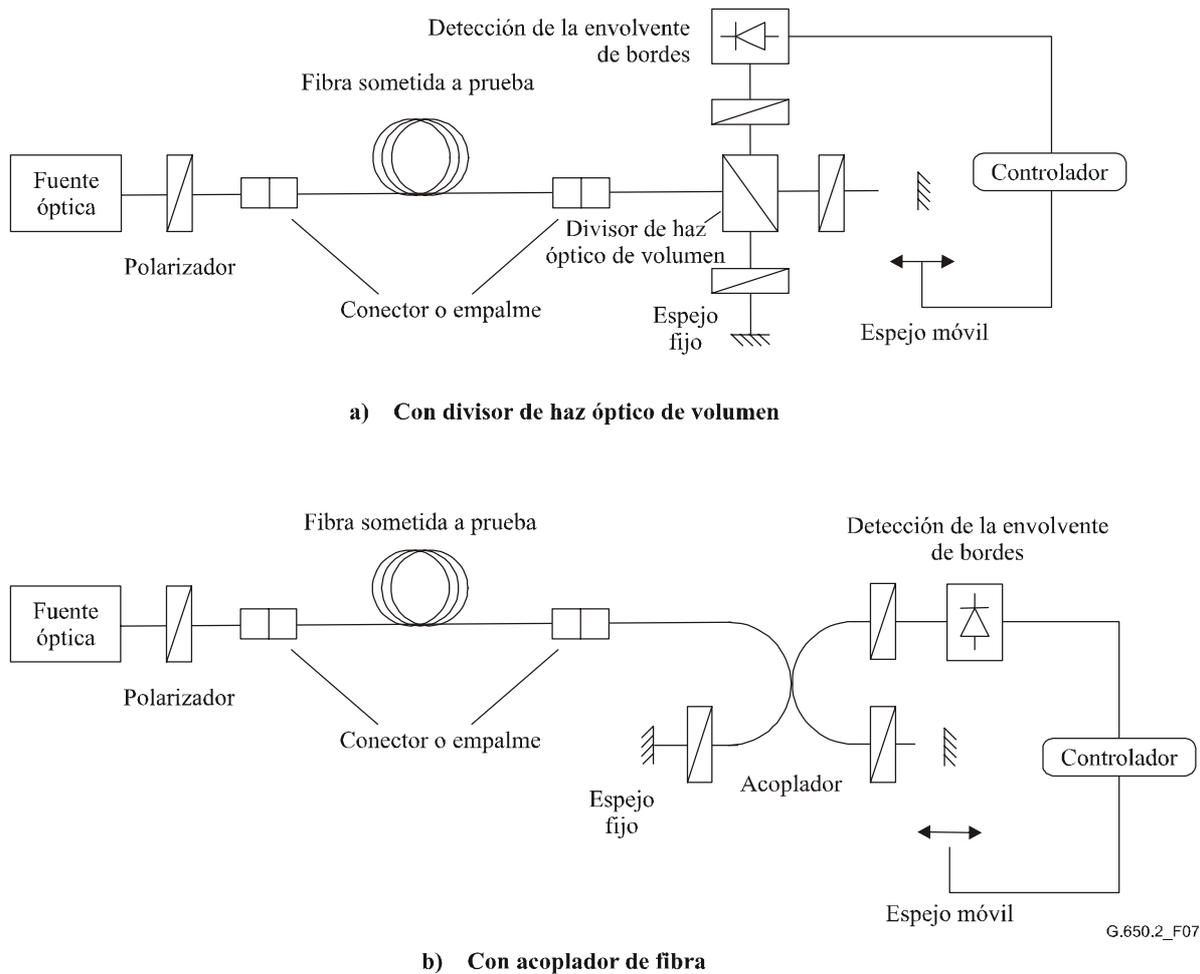


Figura 7/G.650.2 – Método interferométrico que utiliza el interferómetro de Michelson

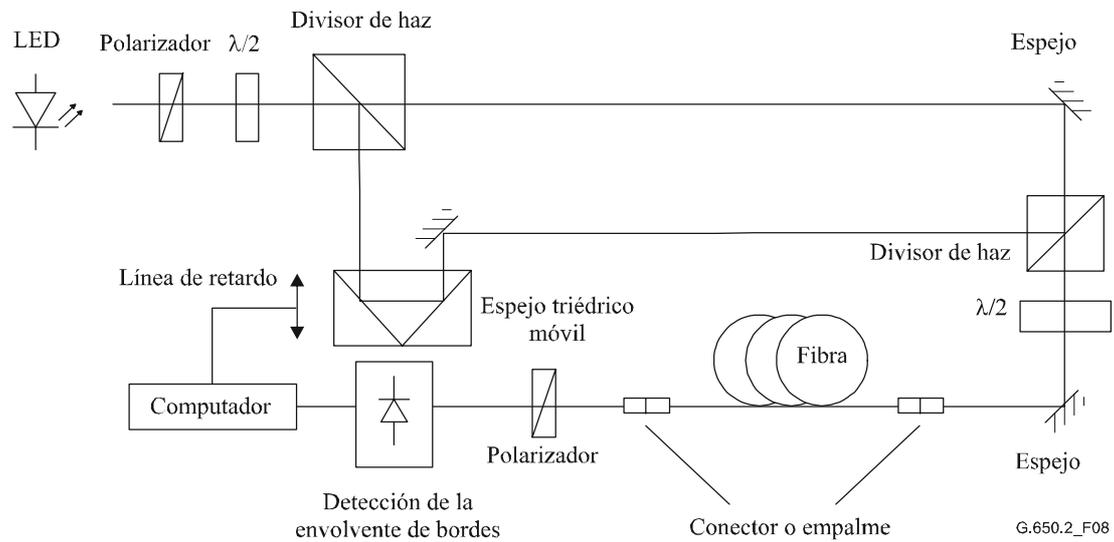


Figura 8/G.650.2 – Método interferométrico que utiliza un interferómetro tipo Mach-Zehnder con un trayecto aéreo

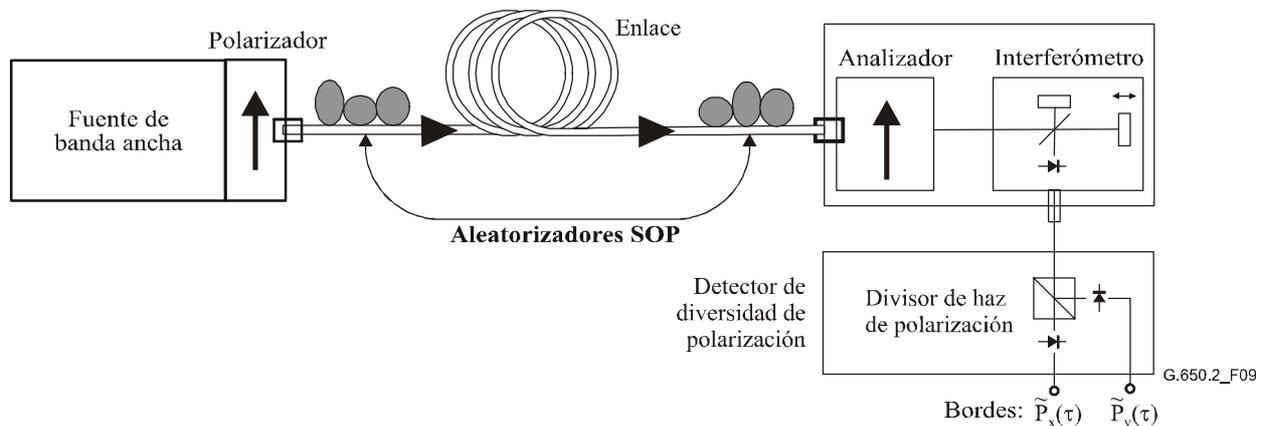


Figura 9/G.650.2 – Método interferométrico (GINTY) usando aleatorización I/O-SOP y un detector de diversidad de polarización

5.1.3.2.1 Fuente óptica

Se utilizará una fuente de espectro amplio polarizado, tal como un LED, conjunto de super LED o fuente de ASE seguida por un polarizador. La longitud de onda central de la fuente luminosa estará en la banda O y/o en la banda C, o dentro de cualquier banda de interés. Un valor típico de la anchura espectral entre semimáximos de la fuente (FWHM) es alrededor de 60 nm o mayor. El análisis tradicional TINTY exige que la forma espectral de la fuente sea aproximadamente Gaussiana, sin ondulaciones que puedan afectar a la función de autocorrelación de la luz emergente. El análisis GINTY no impone ningún requisito de ese tipo. La anchura espectral entre semimáximos de la fuente (denominada también anchura espectral en el campo del LED), $\Delta\lambda$, debe ser conocida para poder calcular el tiempo de coherencia, t_c , que se determina mediante la fórmula:

$$t_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda c} \quad (5-14)$$

donde:

λ_0 es la longitud de onda central de la fuente;

$\Delta\lambda$ es la anchura espectral entre semimáximos de la fuente;

c es la velocidad de la luz en el vacío.

5.1.3.2.2 Analizador

El analizador polarizará la luz en toda la gama de longitudes de onda de la fuente. Para GINTY, el analizador debe tener la capacidad de girar de una posición ortogonal a la posición inicial.

5.1.3.2.3 Aleatorizadores de polarización (facultativos)

Como puede observarse en la figura 9, el aleatorizador de polarización permite la selección de cualquier SOP en la entrada y salida de la FUT. El divisor de haz de polarización facilita la detección simultánea de lo que se detectaría mediante dos posiciones ortogonales del analizador. La funcionalidad del aleatorizador de polarización para seleccionar varios SOP en la entrada y varias posiciones del analizador en la salida, puede lograrse por otros medios.

5.1.3.2.4 Divisor de haz del interferómetro

El divisor de haz del interferómetro se usa para dividir la luz polarizada incidente en dos componentes que se propagan en los brazos del interferómetro. El divisor puede ser un acoplador de fibra como se muestra en la figura 7-b o un divisor de haz óptico de volumen conforme a la figura 7-a.

5.1.3.2.5 Detector

La luz entregada por la FUT se acopla a un fotodetector cuya relación señal/ruido es apropiada para la medición. El sistema de detección puede incluir detección síncrona mediante un troceador/amplificador sincronizado o técnicas comparables.

5.1.3.2.6 Computador

Para el análisis del diagrama de interferencia se utilizará un computador con un soporte lógico adecuado.

5.1.3.3 Muestras

La muestra de fibra probada será una determinada longitud de fibra monomodo que puede o no estar cableada. Se fijará la posición de la muestra y los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante en toda la medición. Se aplicarán condiciones ambientales normalizadas. En el caso de fibras y cables instalados, pueden aplicarse las condiciones de instalación existentes.

Cuando se miden fibras no cableadas, a fin de soportar los requisitos primarios de PMD_Q de la fibra cableada, es importante minimizar el acoplamiento de modos inducido por el despliegue. En este caso, la fibra será soportada de alguna manera (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm), con una tensión de la fibra prácticamente nula (ordinariamente menor que 5 g), y sin cruces sometidos a tensión. Estos requisitos limitan la longitud que puede medirse, en función del diámetro de la bobina, y pueden hacer que la medición resulte negativa. Hay casos de arrollamientos en multicapas, pero su aplicación deberá calificarse comparando con los resultados obtenidos con una sola capa y con longitudes más pequeñas.

No se recomienda la medición de fibra no cableada en bobinas de transporte. Los resultados de PMD obtenidos con esta forma han demostrado ser considerablemente menores que los que se obtendrían en forma de cable para fibra con alta PMD y considerablemente mayores que los correspondientes a fibra con baja PMD.

NOTA – Aunque por lo general la muestra de prueba es una fibra, la prueba también puede realizarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente PMD no es pertinente. Sin embargo, en el caso de

TINTY, la resolución de la PMD siempre estará limitada por la anchura de la cresta de autocorrelación (normalmente en la gama de 100-fs). El análisis GINTY no es afectado por esas limitaciones y las resoluciones de PMD sólo se ven limitadas por las incertidumbres de realización del instrumento (normalmente en la gama de 10-fs o menor).

5.1.3.4 Procedimiento

Un extremo de la fibra probada se acopla con la salida polarizada de la fuente de luz polarizada, mientras que el otro se acopla con la óptica de salida. Esto puede hacerse con conectores de fibra normalizados, empalmes o con un sistema de alineación de fibra. Si se emplea este último, habrá que usar algún aceite de adaptación de índice para evitar las reflexiones.

La potencia de salida óptica de la fuente luminosa se ajusta a un valor de referencia característico del sistema de detección utilizado. Para obtener un contraste de bordes suficiente, la potencia óptica en ambos brazos debe ser casi idéntica.

5.1.3.4.1 Procedimiento TINTY

Se debe efectuar una primera medición moviendo el espejo del brazo del interferómetro y registrando la intensidad de la luz, y se resta el valor hallado para $\tau = 0$ del interferograma para obtener $\tilde{P}(\tau)$. El valor absoluto de $\tilde{P}(\tau)$ es la envolvente de bordes, $E(\tau)$.

El retardo de la PMD se puede calcular a partir del diagrama de bordes obtenido para un estado de polarización seleccionado, como se describe más adelante. En la figura 10 se muestra un ejemplo típico de un diagrama de bordes para un acoplamiento de modos de baja y alta polarización.

En caso de un acoplamiento de modos insuficiente o de una PMD baja, se recomienda repetir la medición con distintos SOP o modular el SOP durante la medición a fin de obtener un resultado que sea un promedio de todos los SOP.

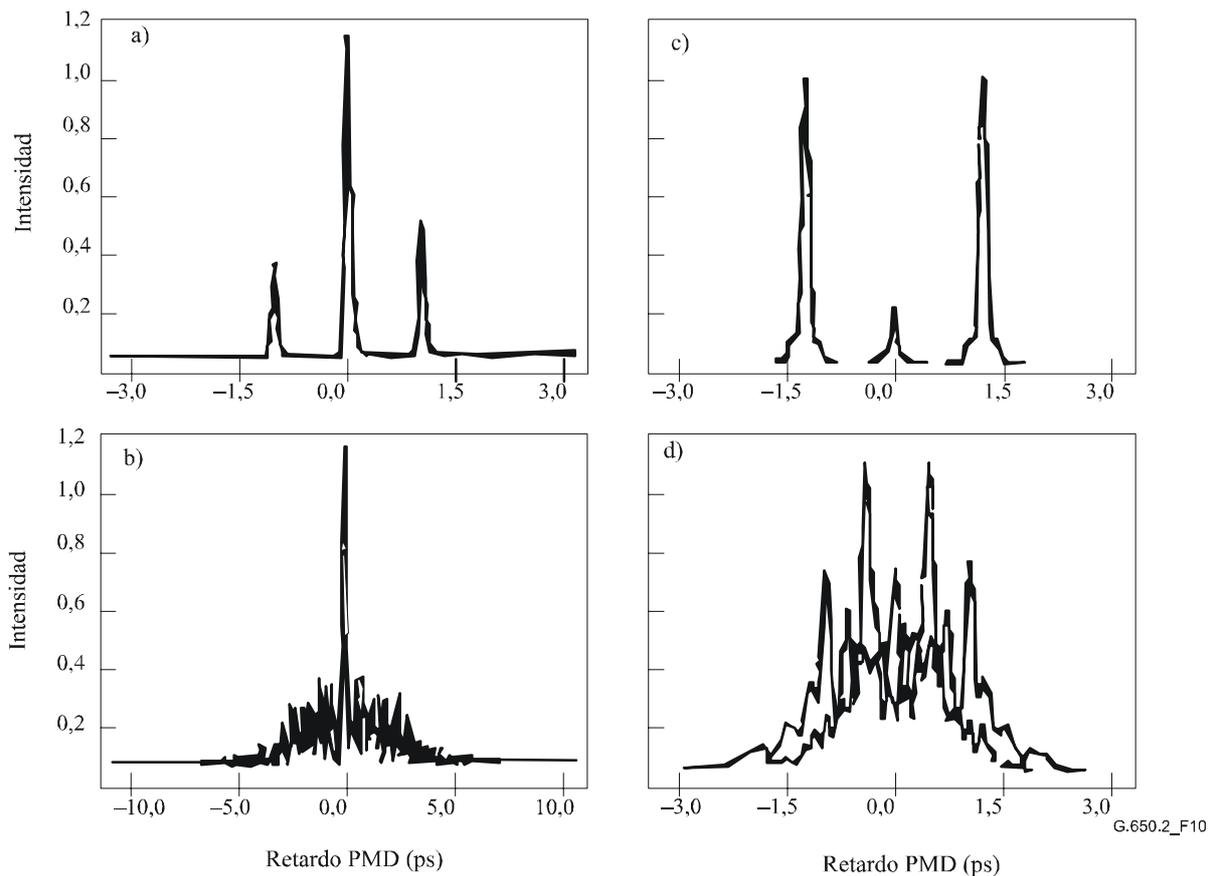


Figura 10/G.650.2 – Ejemplo de diagramas de bordes obtenidos con un instrumento de tipo autocorrelación (a, b) y con el instrumento de tipo transcorrelación (c, d) para acoplamiento de modos de polarización despreciable (arriba) y aleatorio (abajo)

Las envolventes de bordes obtenidas a partir del análisis TINTY son una combinación de las funciones de autocorrelación y transcorrelación. Se tiene que emplear un algoritmo para tratar de separar la parte que corresponde a la función de transcorrelación.

5.1.3.4.2 Procedimiento GINTY

La combinación de una posición particular del polarizador de entrada y un par de posiciones ortogonales del analizador se denomina un SOP I/O. Se debe completar después el barrido(s) de los dos interferogramas y restar la parte de "c.c." de cada uno para obtener $\tilde{P}_x(\tau)$ y $\tilde{P}_y(\tau)$, los bordes generados ortogonalmente.

Las envolventes de bordes de transcorrelación y de autocorrelación, $E_x(\tau)$ y $E_0(\tau)$ se calculan de la siguiente manera:

$$E_x(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) - \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad E_0(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) + \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (5-15)$$

Estas funciones son cuadráticas para fines de cálculo y visualización posterior. A continuación se muestran algunos ejemplos de resultados de transcorrelación cuadrática. Obsérvese que no está presente la cresta de autocorrelación encontrada con TINTY.

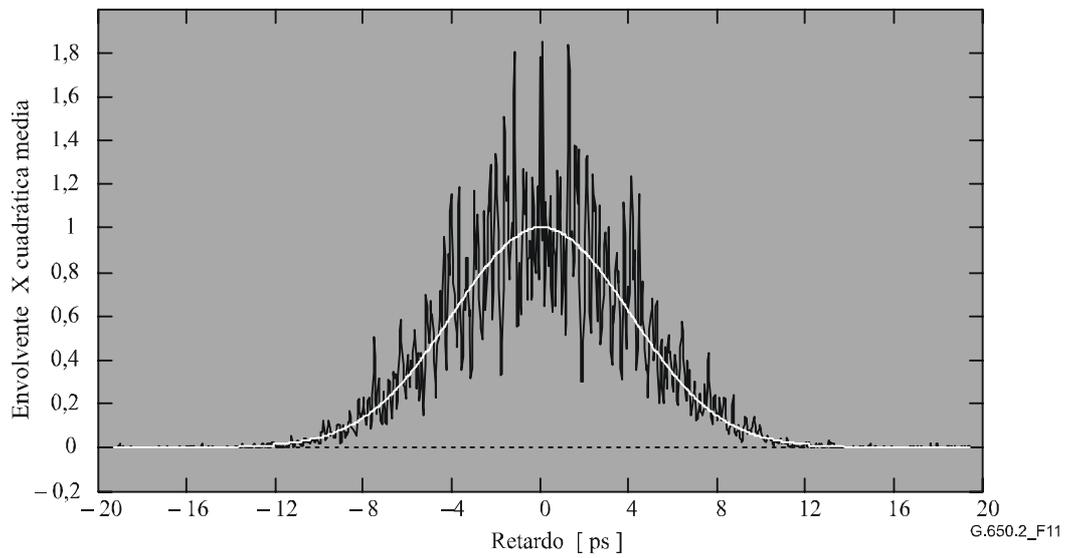


Figura 11/G.650.2 – Ejemplo de un diagrama de bordes obtenido con GINTY y aleatorización SOP I/O para acoplamiento de modos aleatorio

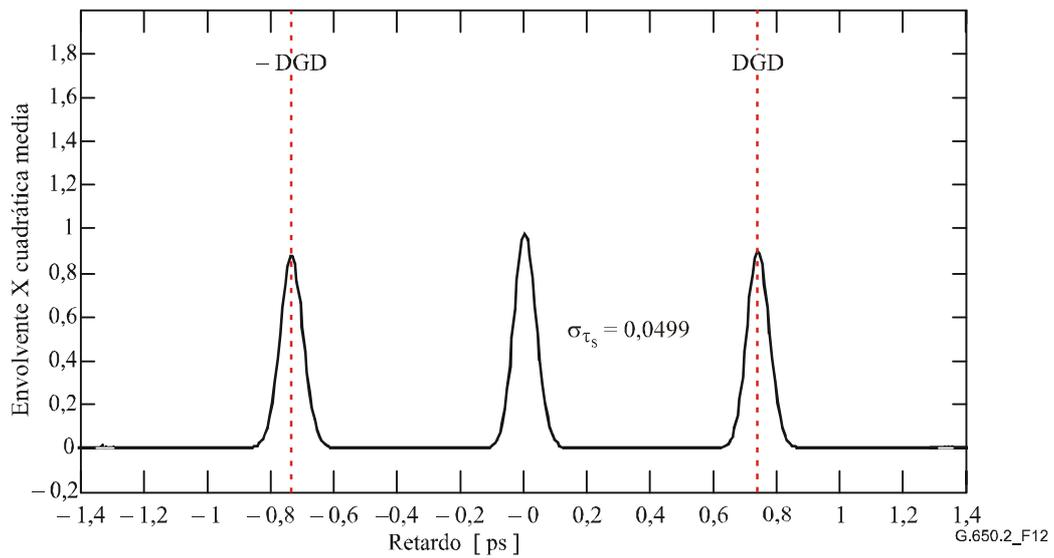


Figura 12/G.650.2 – Ejemplo de un diagrama de bordes obtenido con GINTY y aleatorización SOP I/O para acoplamiento de modos nulo

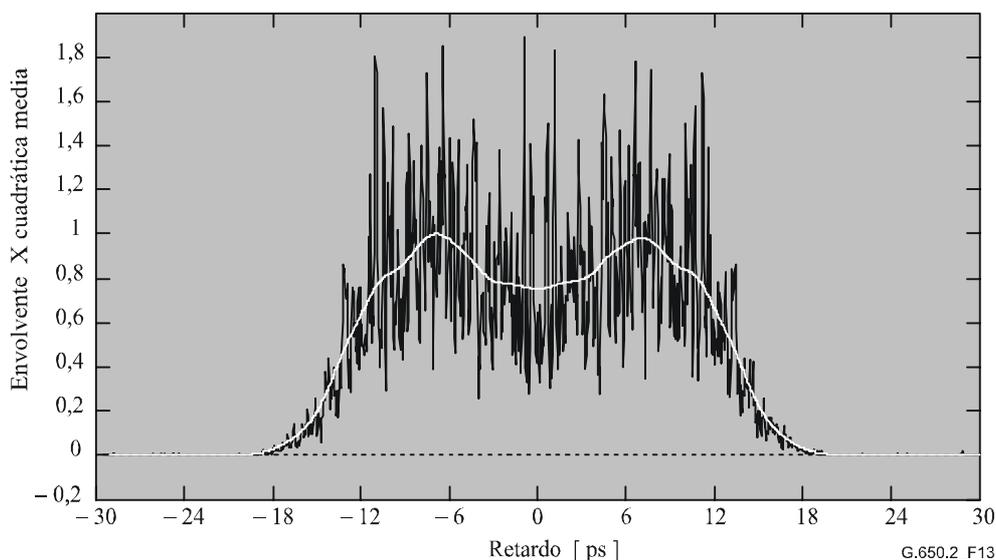


Figura 13/G.650.2 – Ejemplo de un diagrama de bordes obtenido con GINTY y aleatorización SOP I/O para acoplamiento de modos mixto

Se presentan las siguientes opciones para la aleatorización de la polarización. Cuando se miden múltiples SOP I/O, se deben indexar con *i* para cálculos posteriores.

5.1.3.4.2.1 El conjunto de 9 estados Mueller

La suma de nueve envolventes cuadráticas observadas con nueve SOP I/O determinados es rigurosamente igual a la envolvente cuadrática media aleatorizada uniformemente. Los nueve SOP I/O son: tres ejes de analizador que forman un triedro de ángulos rectos, por cada tres SOP de entrada que también forman un triedro de ángulos rectos.

5.1.3.4.2.2 Aleatorización aleatoria

- Aleatorización entre exploraciones: posición automática/manual de los aleatorizadores durante cada exploración.
- Aleatorización continua: cuando se suman las envolventes cuadráticas, la aleatorización puede efectuarse durante la exploración. Los aleatorizadores automatizados se configuran de modo que cubran la esfera continuamente como una función de tiempo.
- Aleatorización de una sola exploración, rápida: si los aleatorizadores son bastante rápidos, las envolventes cuadráticas bien aleatorizadas podrán observarse con una sola exploración. No obstante, esto exige disposiciones especiales para evitar la diafonía entre la parte de c.a. y la parte de c.c. anterior del interferograma.

5.1.3.5 Cálculos

Ambos cálculos dan PMD_{RMS} . En el caso de acoplamiento de modos aleatorio ideal, cuando el interferograma tiene la forma Gaussiana ideal, ésta podrá convertirse a PMD_{AVG} utilizando la ecuación 3-3.

5.1.3.5.1 Cálculos de TINTY

En el caso de acoplamiento de modos despreciable, la separación de las crestas bien definidas del centro representan el valor de DGD, que también es el valor de la PMD.

Los siguientes cálculos son apropiados para el régimen de acoplamiento de modos aleatorio asociado con enlaces o fibras/cables largos. Se caracteriza la dispersión en la envolvente de bordes descontando la cresta central.

El valor PMD_{RMS} se determina a partir del segundo momento (anchura RMS) de la función de transcorrelación de la señal detectada (envolvente de bordes).

$$PMD_{RMS} = \left(\sqrt{\frac{3}{4}} \right) \sigma_{\epsilon} \quad (5-16)$$

donde:

σ_{ϵ} es el ancho RMS de la envolvente de transcorrelación.

En el apéndice I.1 se describe un algoritmo detallado que es útil para el cálculo de σ_{ϵ} a partir de la envolvente de borde.

Para ciertas hipótesis indicadas más adelante, la ecuación 5-14 puede relacionarse con la ecuación 3-2 de la siguiente manera:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \frac{3}{4} \langle \sigma_{\epsilon}^2 \rangle \quad (5-17)$$

La ecuación 5-12 se obtiene a partir de la teoría si se cumplen las siguientes hipótesis:

- Acoplamiento de modos aleatorio ideal.
 NOTA 1 – El acoplamiento aleatorio ideal significa $L/h \rightarrow \infty$, y un eje de birrefringencia distribuido uniformemente. L es la longitud del dispositivo y h es la longitud del acoplamiento de polarización. Para un dispositivo que consta de N segmentos birrefringentes concatenados de longitud h , esto corresponde a $N \rightarrow \infty$ con ejes distribuidos uniformemente.
 NOTA 2 – Existe la posibilidad de análisis de acoplamiento de modos despreciable y no despreciable.
- Fuente puramente Gaussiana, sin ondulaciones.
- $PMD \gg \sigma_0$

donde:

σ_0 es la anchura RMS de la envolvente de transcorrelación.

- Condiciones ergódicas.
 NOTA 3 – Dado que la fuente es gaussiana, el resultado debe ser alguna forma de promedio ponderado de los valores de DGD. Esta ponderación no es específica de TINTY, pero lo es de GINTY. Por este motivo, se prevé que este método arrojará un resultado distinto para una determinada gama de longitudes de onda y de tiempo que uno de los métodos que emplean una ponderación rectangular (como por ejemplo, el RTM). La hipótesis de condiciones ergódicas da por resultado la validez de la relación de valores esperada. En la práctica, las gamas de longitudes de onda muestreadas mediante distintas aplicaciones de los otros métodos también variarán, lo que implica que se obtendrán igualmente distintos resultados entre ellas.

5.1.3.5.2 Cálculos de GINTY

El análisis GINTY permite que se supriman algunas de las hipótesis requeridas para la ecuación 5-16 con TINTY. Particularmente:

- No es necesaria la hipótesis de acoplamiento de modos aleatorio ideal
- No es necesaria la hipótesis de una fuente gaussiana.
- No es necesaria la hipótesis de que la PMD es grande en comparación con la anchura de la función de autocorrelación.

Se forman las envolventes de transcorrelación y de correlación cuadráticas medias, $\bar{E}_x^2(\tau)$ y $\bar{E}_0^2(\tau)$ de la siguiente manera:

$$\bar{E}_x^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2(\tau) \quad \bar{E}_0^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2(\tau) \quad (5-18)$$

siendo N el número de SOP I/O.

Se calcula la anchura RMS de las dos envolventes cuadráticas medias muestreadas, σ_0 y σ_x , respectivamente. En el apéndice I.2 se propone un algoritmo de muestreo para este cálculo. Las definiciones matemáticas de estas anchuras son:

$$\sigma_x^2 = \frac{\int_{\tau} \tau^2 \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau}{\int_{\tau} \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau} \quad \sigma_0^2 = \frac{\int_{\tau} \tau^2 \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau}{\int_{\tau} \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (5-19)$$

El valor esperado en las ecuaciones anteriores se entiende con respecto a un muestreo uniforme y aleatorio de los SOP I/O.

El valor PMD_{RMS} que se obtiene es:

$$PMD_{RMS} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]^{1/2} \quad (5-20)$$

La ecuación 5-20 se relaciona con la ecuación 3-2 de la siguiente manera:

$$\frac{\int \Delta\tau^2(v) S_0^2(v) dv}{\int S_0^2(v) dv} = \frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \quad (5-21)$$

Utilizando las definiciones ideales de los términos de anchura RMS de las ecuaciones 5-19, la ecuación 5-21 resulta exacta para cualquier curva de DGD presente en el momento de la medición y para cualesquiera características espectrales de la fuente. El lado izquierdo de la ecuación 5-21 es un cálculo RMS ponderado espectralmente (mediante una potencia cuadrática).

Empleando la hipótesis de condiciones ergódicas:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \left\langle \frac{\int \Delta\tau^2(v) S_0^2(v) dv}{\int S_0^2(v) dv} \right\rangle \quad (5-22)$$

5.1.3.6 Presentación de los resultados

- a) Fecha.
- b) Identificación de la fibra.
- c) Tipo de fibra.
- d) Longitud de la fibra.
- e) Disposición de la configuración de prueba, incluyendo el tipo de fuente, longitud de onda, anchura entre semimáximos (FWHM).
- f) Técnica de inyección.
- g) Tipo de técnica de detección de borde.
- h) Gráfico de la gama explorada con el diagrama de bordes (sólo si el tipo de acoplamiento de modos no es aleatorio).
- i) Instalación de la fibra y condiciones ambientales (radio, esfuerzo, temperatura, etc.).

- j) Tipo de acoplamiento de modos (aleatorio, mixto o despreciable).
- k) Método de análisis (TINTY o GINTY)
- l) PMD_{RMS} (ps) o PMD_{AVG} (especifíquese cuál) (ps), y coeficiente de PMD. Si se conoce el grado de acoplamiento de modos, el coeficiente podrá darse en ps/km o ps/\sqrt{km} .

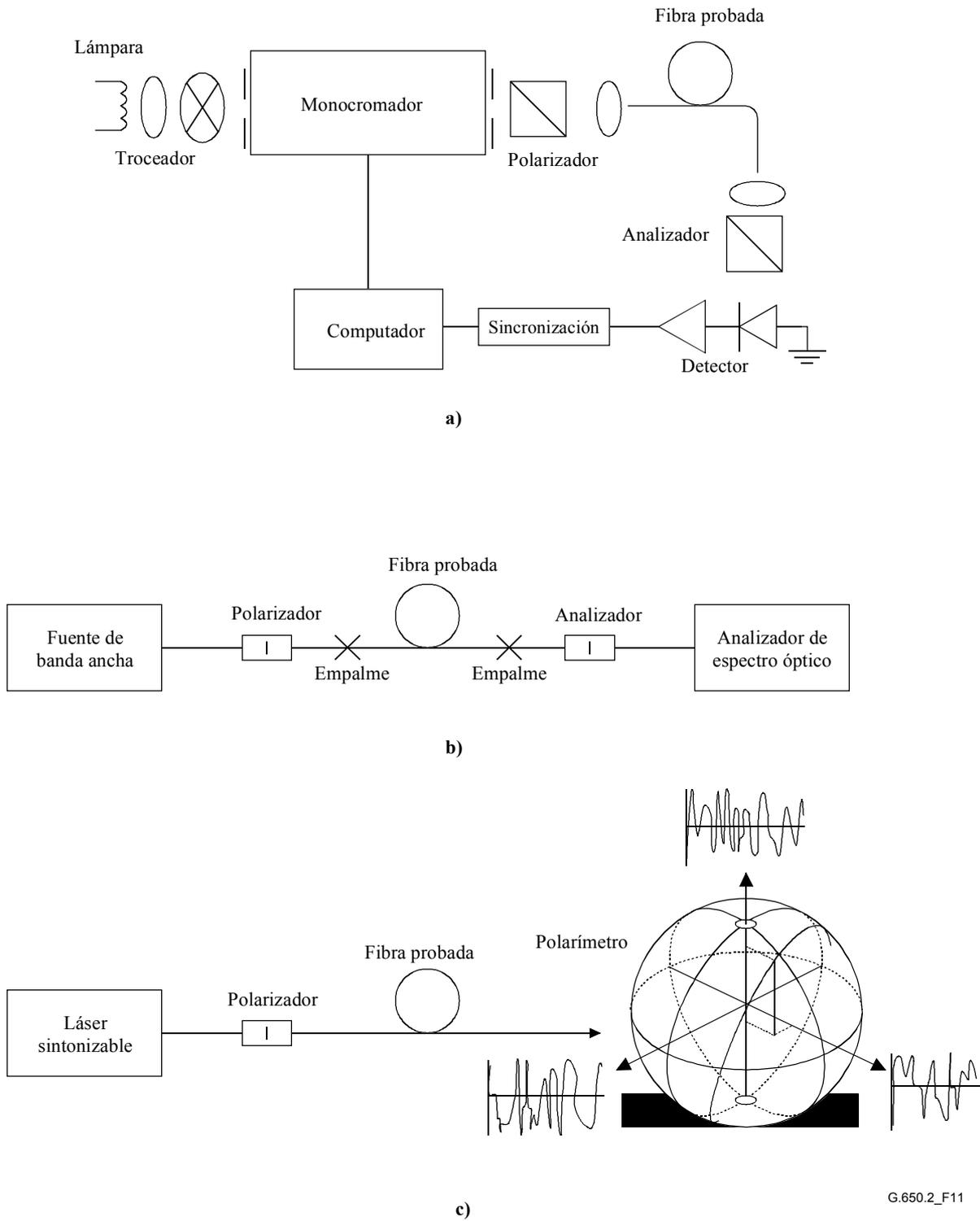
5.1.4 Técnica de analizador fijo

5.1.4.1 Generalidades

Este método de prueba describe un procedimiento para medir la dispersión por modo de polarización (PMD) de las fibras ópticas monomodo. Produce un solo valor de medición que representa la PMD en la gama de longitudes de onda de medición, que suele ser de unos pocos centenares de nanómetros. El método puede aplicarse a fibras cortas y largas en los límites de acoplamiento de modos de polarización nulo y fuerte. En algunos casos será necesario hacer mediciones repetidas para obtener una precisión satisfactoria con este método. El procedimiento se limita a longitudes de onda iguales o superiores al valor en el que la fibra es efectivamente monomodo.

5.1.4.2 Aparato de prueba

Véase en la figura 14 un diagrama esquemático de los principales componentes de un sistema de medición típico.



G.650.2_F11

Figura 14/G.650.2 – Diagrama esquemático del equipo (típico)

5.1.4.2.1 Fuente luminosa

Se utiliza una fuente luminosa que emita radiación en las longitudes de onda de medición deseadas, tal como una lámpara de banda ancha, uno o más diodos fotoemisores, o uno o más láseres sintonizables. Debe garantizarse la estabilidad de intensidad y distribución espectral de la fuente en un periodo de tiempo suficientemente largo para permitir la medición.

5.1.4.2.2 Monocromador

Se obtiene una determinada serie de longitudes de onda de prueba filtrando la fuente luminosa con un monocromador, como en la figura 14-a, o utilizando un analizador de espectro óptico como detector, como en la figura 14-b. Este filtrado no es necesario cuando la fuente es un láser sintonizable (véase la figura 14-c). La distribución espectral debe ser suficientemente estrecha para evitar una gran despolarización de la señal bajo la influencia de la PMD de la fibra a prueba (véanse 5.1.4.4.1.4 y 5.1.4.4.2.8).

5.1.4.2.3 Dispositivo óptico de entrada

Puede emplearse un sistema de lente óptica o un rabillo de fibra monomodo para excitar la fibra a prueba. La potencia acoplada a la fibra será estable mientras dure la prueba. Si se utilizan rabillos de fibra, deben evitarse efectos de interferencia debidos a reflexiones, lo cual puede exigir materiales de adaptación de índice o cortes angulados. Los rabillos de fibra serán monomodo.

Si se utiliza un sistema de lente óptica, se utilizarán algunos medios adecuados, tales como mordazas de vacío, para soportar establemente el extremo de entrada de la fibra.

5.1.4.2.4 Supresor de modos de revestimiento

Se suprime cualquier potencia de modos de revestimiento de la fibra en prueba. La funda de la fibra la suprime casi siempre; en otro caso, se empleará un dispositivo que elimine la potencia de modos de revestimiento.

5.1.4.2.5 Dispositivo óptico de salida

Toda la potencia emitida por la fibra a prueba debe acoplarse a la zona activa del sistema de detección (véase la figura 14). Ejemplos de medios que pueden utilizarse son un sistema de lente óptica, un empalme a tope a un rabillo de fibra monomodo, o un acoplamiento fibra a fibra con adaptación de índice.

5.1.4.2.6 Detección de señales

Para la detección de señales, se ha de utilizar un detector óptico que sea lineal y estable en la gama de intensidades y de tiempos de medición que se encuentran al efectuar la medición. Un sistema típico podría incluir detección síncrona mediante un troceador/amplificador sincronizado, un medidor de potencia óptica, un analizador de espectro óptico, o un polarímetro. Para utilizar toda la gama espectral de la fuente, el sistema de detección debe tener una gama de longitudes de onda que incluya las longitudes de onda producidas por la fuente luminosa.

5.1.4.2.7 Polarizador y analizador

El polarizador a la entrada de la fibra (figura 14) sólo se necesita si el haz de inyección no está ya polarizado (normalmente es suficiente una relación de extinción de 3 dB). La orientación angular de los polarizadores no es crítica, pero debe permanecer fija durante toda la medición. Con un acoplamiento de modos débil, el ajuste de orientación del polarizador puede ayudar a maximizar la amplitud de las oscilaciones de la figura 15-a. Como otra posibilidad, esto se puede conseguir por rotación de la fibra o fibras en los empalmes o conectores.

El analizador no es necesario cuando se utiliza un polarímetro para la detección de las señales (figura 14-c).

5.1.4.3 Procedimiento de medición

La muestra de prueba será una determinada longitud de fibra óptica monomodo que puede o no estar cableada. Debe fijarse la posición de la muestra y los rabillos de fibra a una temperatura nominalmente constante durante toda la medición.

NOTA – Aunque la muestra de prueba suele ser una fibra, esta prueba también puede efectuarse en componentes discretos. En este caso, el coeficiente de PMD no es pertinente.

La estabilidad de temperatura del dispositivo de prueba puede observarse midiendo la potencia de salida de la fibra a una longitud de onda fija, con el analizador de salida en su sitio. En el periodo de tiempo correspondiente a una medición completa típica, la variación de la potencia de salida debe ser pequeña con relación a las variaciones producidas por un incremento de longitud de onda.

Cuando se miden fibras no cableadas, para sustentar los requisitos primarios de PMD_Q de la fibra cableada, es importante reducir el acoplamiento de modos inducido por el despliegue. En este caso, la fibra será soportada de alguna manera (normalmente en un carrete con un radio de arrollamiento mínimo de 150 mm), con una tensión de la fibra prácticamente nula (ordinariamente menor que 5 g), y sin cruces sometidos a tensión. Estos requisitos limitan la longitud que puede medirse, en función del diámetro de la bobina, y pueden hacer que la medición resulte negativa. Hay casos de arrollamientos en multicapas, pero su aplicación deberá calificarse comparando con los resultados obtenidos con una sola capa y con longitudes más pequeñas.

No se recomienda la medición de fibra no cableada que se despliega en bobinas de transporte. Los resultados de PMD obtenidos con esta forma de despliegue han demostrado ser considerablemente menores que los que se obtendrían en forma de cable para fibra con alta PMD y considerablemente mayores que los correspondientes a fibra con baja PMD.

Se acopla el extremo de entrada de la fibra a la fuente luminosa y se acopla la radiación de salida de la fibra a prueba al sistema de detección.

Haciendo ajustes apropiados en el monocromador, en el analizador de espectro óptico, o en el láser sintonizable, se inyecta sucesivamente cada longitud de onda de prueba designada λ en la fibra. La elección de las longitudes de onda depende de la gama de exploración de longitudes de onda designada y también del método de análisis (véanse 5.1.4.4.1 y 5.1.4.4.2).

Se registra la señal de salida correspondiente para cada longitud de onda. Este proceso se realizará sin cambiar las condiciones de inyección y del detector. Se llama $P_A(\lambda)$ a la potencia recibida, donde A denota la presencia del analizador.

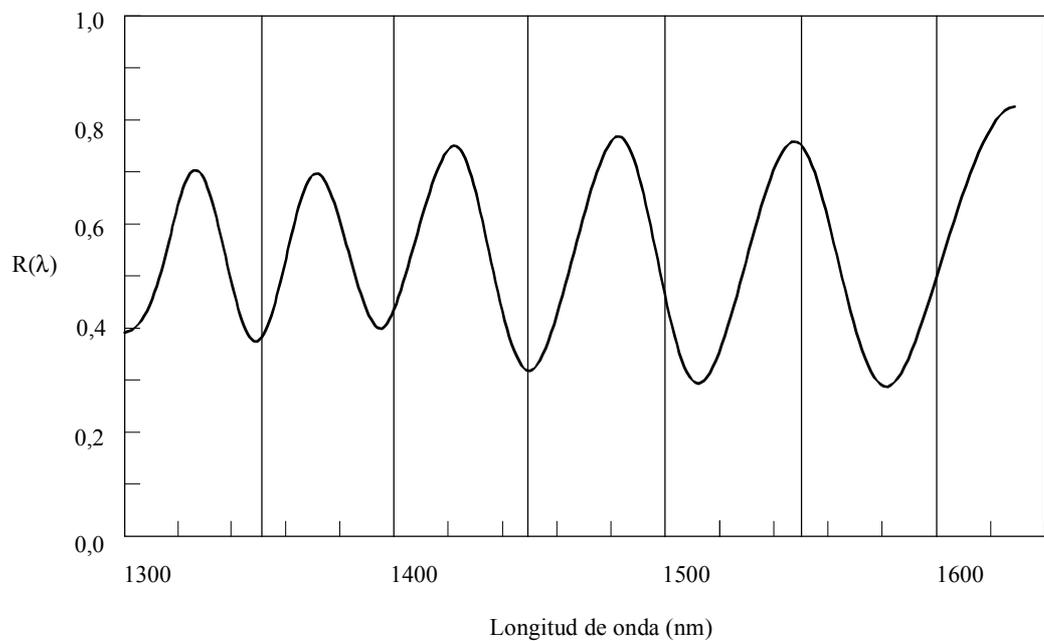
Se suprime el analizador del haz y se repite la exploración del monocromador. Llamamos $P_{TOT}(\lambda)$ a esta potencia recibida. Esta última potencia se puede utilizar para eliminar la dependencia espectral de los componentes del sistema de medición y la pérdida de la fibra a prueba. En la figura 15 se muestran representaciones típicas de la relación:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)} \quad (5-23)$$

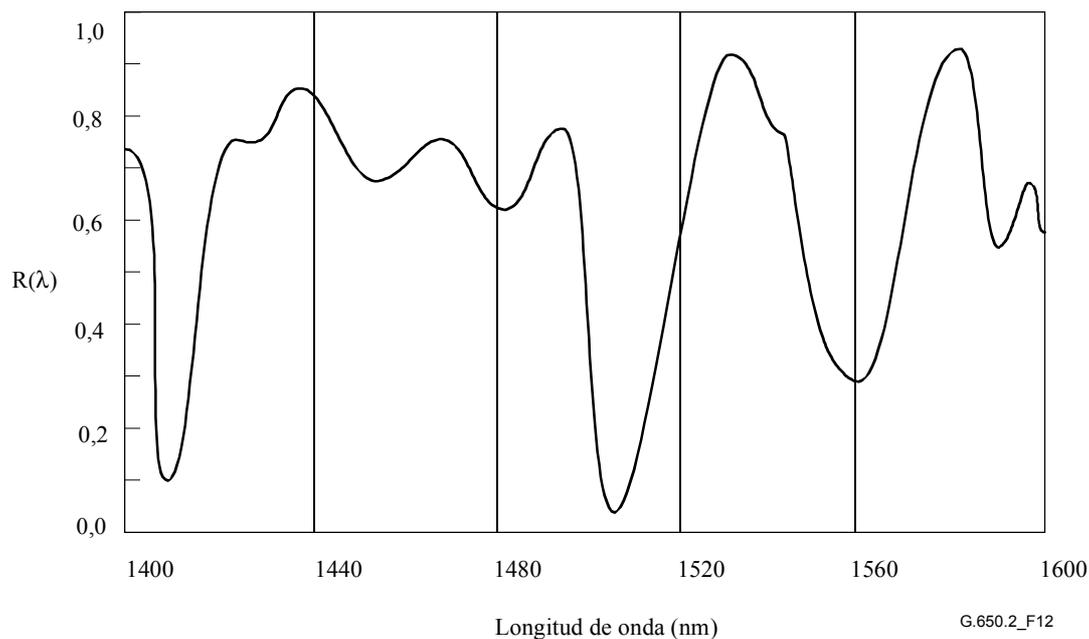
Un procedimiento alternativo es dejar en su sitio el analizador, pero girarlo 90° con respecto a la orientación utilizada más arriba. Si la potencia recibida es $P_{ROT}(\lambda)$, entonces:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{ROT}(\lambda)} \quad (5-24)$$

Si se utiliza un polarímetro como elemento de detección, se miden los parámetros de Stokes normalizados en función de la longitud de onda. Las tres funciones espectrales son independientes de la potencia recibida y son analizadas por los mismos métodos aplicados a $R(\lambda)$ (véanse 5.1.4.4.1 y 5.1.4.4.2). Cada parámetro de Stokes normalizado produce entonces un valor de $\langle \Delta\tau \rangle$.



a) Acoplamiento de modos débil



b) Acoplamiento de modos fuerte

Figura 15/G.650.2 – Datos típicos obtenidos al medir la PMD

5.1.4.4 Cálculos o interpretación de los resultados

Se utilizará uno de los dos métodos siguientes (5.1.4.4.1 y 5.1.4.4.2) para calcular la PMD a partir de los datos de medición.

5.1.4.4.1 Cómputo de extremos

5.1.4.4.1.1 PMD

$R(\lambda)$ debe obtenerse a intervalos de longitud de onda uniformemente espaciados. E es el número de extremos dentro de la ventana $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$. Otra posibilidad es elegir λ_1 y λ_2 para que coincidan con extremos, en cuyo caso E es el número de extremos (incluidos los situados en λ_1 y λ_2) menos uno.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{k E \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (5-25)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, k es un factor de acoplamiento de modos igual a 1,0 en ausencia de acoplamiento de modos (el régimen de la ecuación 3-4), y 0,82 es el límite del acoplamiento de modos fuerte (el régimen de la ecuación 3-5).

Si se utiliza un polarímetro como elemento de detección, se debe tomar como valor final de $\langle \Delta\tau \rangle$ el promedio de los valores obtenidos de las tres respuestas de parámetros de Stokes normalizados. El valor resultante debe considerarse como un promedio en la gama de longitudes de onda $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$.

5.1.4.4.1.2 Exactitud

La máxima exactitud se obtiene haciendo $(\lambda_2 - \lambda_1)$ suficientemente grande para asegurar que $E \gg 1$, lo cual es especialmente importante cuando hay un acoplamiento de modos fuerte (figura 15-b) y menos en otros casos (figura 15-a). Los valores de E entre 7 y 40 son típicos. En los valores más bajos hay un alto porcentaje de incertidumbres en E y en la PMD. En el extremo superior de la gama, el ensanchamiento instrumental puede dar lugar a que no se resuelvan algunas crestas adyacentes.

Idealmente, la ventana de exploración debe estar centrada en la longitud de onda de uso de la fibra, y suficientemente ancha para asegurar que E es superior a 10, aproximadamente, para el máximo valor de PMD de interés (donde se da la condición de aceptación/rechazo).

5.1.4.4.1.3 Identificación de crestas

La identificación de extremos en $R(\lambda)$ puede ser más difícil en presencia de ruido y/o fuerte acoplamiento de modos. Esto puede verse en el ejemplo de la figura 15-b. Un algoritmo con las siguientes características puede ayudar a identificar extremos:

- 1) Un polinomio es ajustado a varios puntos adyacentes de $R(\lambda)$ para obtener una curva suavizada.
- 2) Un extremo se define como un punto en el que la derivada con respecto a la longitud de onda de esta curva suavizada cambia de signo.

Si es necesario puede incorporarse en el algoritmo de identificación de crestas una mayor seguridad.

5.1.4.4.1.4 Resolución espectral

Para asegurar que todas las características del espectro óptico se resuelvan adecuadamente, la resolución espectral $\Delta\lambda$ debe satisfacer:

$$\Delta\lambda / \lambda < (8\nu\Delta\tau)^{-1} \quad (5-26)$$

donde ν es la frecuencia óptica. $\Delta\lambda$ es la anchura espectral instrumental, o el tamaño del paso de longitud de onda, tomándose el mayor de estos valores. Para una λ próxima a 1550 nm, la ecuación 5-26 reduce la condición de que $\Delta\lambda$ (nm) debe ser menor que el inverso de $\Delta\tau$ (ps).

5.1.4.4.2 Análisis de Fourier

5.1.4.4.2.1 Sinopsis

En este método para obtener la PMD se utiliza un análisis de Fourier de $R(\lambda)$, normalmente expresado en el dominio de la frecuencia óptica, ν . La transformada de Fourier transforma estos datos en el dominio de la frecuencia óptica al dominio del tiempo. La transformada de Fourier arroja información directa sobre la distribución de los tiempos de llegada de la luz $\delta\tau$. Estos datos son procesados posteriormente en la forma indicada más adelante para obtener la PMD esperada, $\langle\Delta\tau\rangle$, para la fibra a prueba. Este método es aplicable a fibras con acoplamiento de modos débil o fuerte (véanse 5.1.4.4.2.4 y 5.1.4.4.2.5, respectivamente).

5.1.4.4.2.2 Preprocesamiento de datos y transformación de Fourier

Para utilizar este método, la transformada de Fourier exige normalmente intervalos iguales de frecuencia óptica, de manera que los datos $R(\lambda)$ se recogen (como se indica en 5.1.4.3) a valores λ tales que formen intervalos iguales en el dominio de la frecuencia óptica. Otra posibilidad es ajustar los datos tomados en intervalos iguales de λ (por ejemplo, utilizando un ajuste de ranura cúbica) y utilizarse interpolación para generar estos puntos, o utilizarse técnicas espectrales más avanzadas. En cada caso, la relación $R(\lambda)$ a cada valor de λ utilizado se calcula mediante las ecuaciones 5-23 o 5-24, según convenga.

Puede efectuarse relleno de ceros o interpolación de datos y eliminación de niveles de corriente continua en los datos de la relación, $R(\lambda)$. También se puede utilizar la puesta en ventana de los datos como un paso de condición previa antes de la transformada de Fourier. La transformación Fourier se lleva ahora a cabo, para producir la distribución de datos de amplitud $P(\delta\tau)$ para cada valor de $\delta\tau$.

5.1.4.4.2.3 Ajuste de los datos de la transformada

Los datos de la transformada de Fourier cuando $\delta\tau$ es cero tienen poca significación, ya que, a menos que se eliminen cuidadosamente los componentes de corriente continua de $R(\lambda)$, pueden deberse parcialmente a la pérdida de inserción del analizador, por ejemplo. Cuando no se elimina el nivel de corriente continua, se evitan generalmente (no se utilizan) hasta dos puntos de datos en cualesquiera cálculos posteriores. Se define una variable, j , a fin de que la "primera anotación válida" por encima de $\delta\tau$ que se incluya en los cálculos corresponda a $j = 0$.

A fin de suprimir el ruido de medición de los cálculos posteriores, $P(\delta\tau)$ se compara con un nivel umbral T_1 , típicamente fijado al 200% del nivel de ruido cuadrático medio del sistema de detección. Ahora es necesario determinar si la fibra tiene un acoplamiento de modos débil o fuerte.

Si se ve que los primeros X puntos válidos de $P(\delta\tau)$ están todos por debajo de T_1 , esto indica que $P(\delta\tau)$ debe tener características con puntas discretas propias de las fibras con acoplamiento débil. El valor de X es igual a 3, a menos que se utilice relleno de ceros en el análisis de Fourier. En ese caso, el valor de X puede determinarse a partir de $3 \times (\text{número de puntos de datos originales}) / (\text{longitud total de la formación que sigue al relleno de ceros})$. Utilícese 5.1.4.4.2.4 para calcular PMD. Si no ocurre así, se procede a calcular PMD aplicando 5.1.4.4.2.5 ó 5.1.4.4.2.6.

5.1.4.4.2.4 Cálculo de PMD en las fibras con débil acoplamiento de modos

Para una fibra débilmente acoplada (por ejemplo, una fibra de alta birrefringencia) o para un componente birrefringente, $R(\lambda)$ se asemeja a una onda sinusoidal fluctuante (figura 15-a). La transformación de Fourier dará una salida $P(\delta\tau)$ con una punta discreta en una posición correspondiente al tiempo relativo de llegada del impulso, $\delta\tau$, cuyo centroide es el valor de PMD $\langle\Delta\tau\rangle$.

Para definir el centroide de punta $\langle \Delta\tau \rangle$, en la siguiente ecuación se utilizan los puntos en los que $P(\delta\tau)$ rebasa un segundo nivel umbral predeterminado T_2 , típicamente fijado al 200% del nivel de ruido cuadrático medio del sistema de detección:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)]} \quad (5-27)$$

donde $M' + 1$ es el número de puntos de datos de P dentro de la punta, que rebasan T_2 . $\langle \Delta\tau \rangle$ en la ecuación 5-27 suele consignarse en picosegundos. Si el dispositivo a prueba es una fibra de longitud L , el coeficiente de PMD puede calcularse utilizando la ecuación 3-4. Si no se detecta ninguna punta (es decir, $M' = 0$), PMD es cero. Pueden comunicarse otros parámetros, tales como el valor cuadrático medio de anchura de la punta y/o el valor de cresta de la punta.

Si el dispositivo a prueba contiene uno o más elementos birrefringentes, se generará más de una punta. Para un número n de fibras/dispositivos concatenados, se obtendrán $2^{(n-1)}$ puntas.

5.1.4.4.2.5 Cálculo de la PMD para fibras con fuerte acoplamiento de modos

En los casos de fuerte acoplamiento de modos, $R(\lambda)$ adopta una forma de onda compleja similar a la de la figura 15-b, cuyas características exactas se basan en las estadísticas reales del proceso de acoplamiento dentro de la fibra o del cable. Al aplicar la transformada de Fourier a los datos, éstos adoptan una distribución $P(\delta\tau)$ que representa la autocorrelación de la distribución de probabilidades de tiempos de llegada de los impulsos luminosos, $(\delta\tau)$, en la fibra.

Contando a partir de $j = 0$, determinar el primer punto de P superior a T_1 , y que va seguido al menos por X puntos de datos inferiores a T_1 . Este punto representa el último punto significativo en (es decir, el "extremo" de) la distribución $P(\delta\tau)$, para una fibra con fuerte acoplamiento de modos, que no es sustancialmente afectada por el ruido de medición. El valor $\delta\tau$ para este punto se designa $\delta\tau_{\text{last}}$ y el valor de j a $\delta\tau_{\text{last}}$ se designa M'' . Esta fibra tiene un fuerte acoplamiento de modos. La raíz cuadrada del segundo momento, σ_R , de esta distribución define la PMD $\langle \Delta\tau \rangle$ de la fibra, y viene dada por:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2} \quad (5-28)$$

El valor de $\langle \Delta\tau \rangle$ dado por la ecuación 5-28, suele consignarse en picosegundos. En la figura 16 se muestra un ejemplo de la salida de la transformada de Fourier obtenida en una fibra de 25 km con un fuerte acoplamiento de modos.

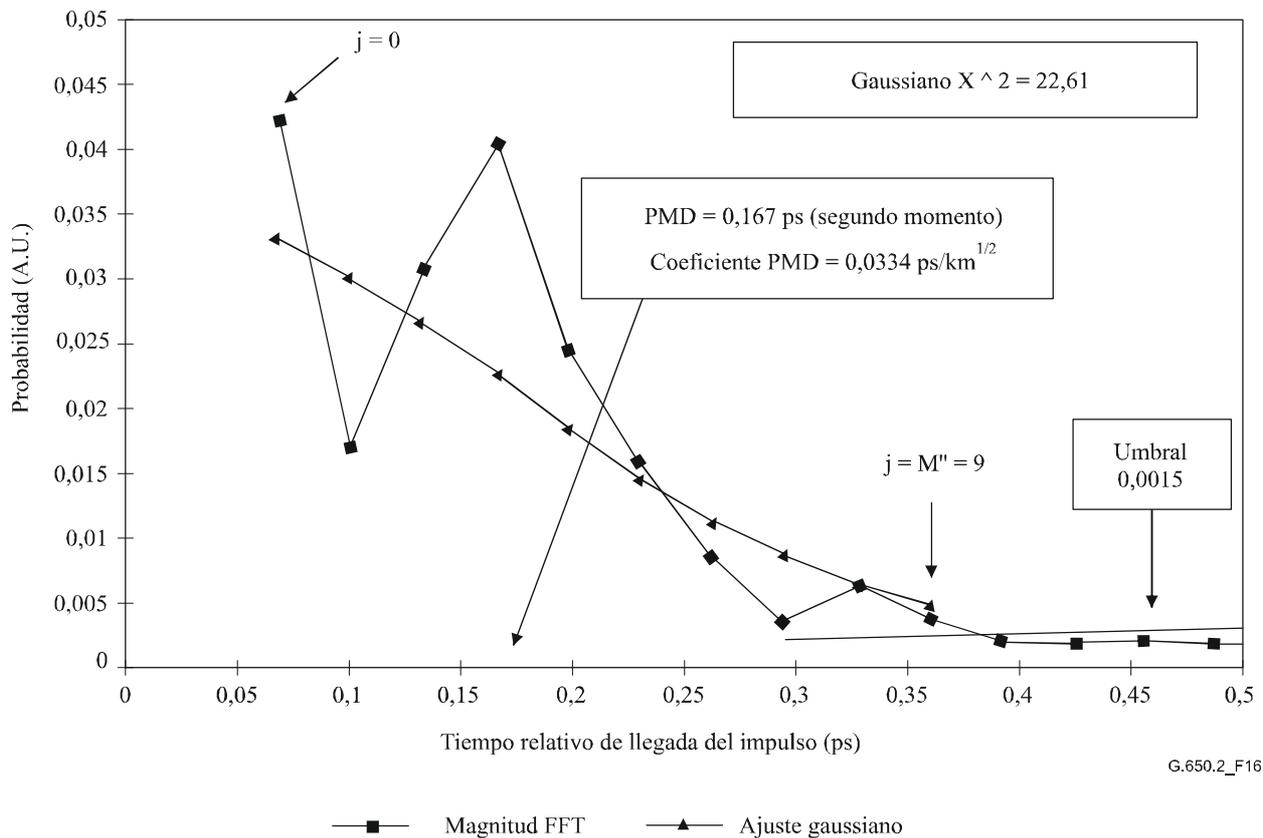


Figura 16/G.650.2 – La PMD por el análisis de Fourier

5.1.4.4.2.6 Cálculo de la PMD para sistemas de fibra con acoplamiento mixto

Puede haber casos en los que fibra/componentes con acoplamiento débil y fibras con acoplamiento fuerte estén concatenados para formar el sistema a prueba. En este caso, puede necesitarse la determinación del centroide (véase 5.1.4.4.2.4) y la obtención del segundo momento (véase 5.1.4.4.2.5). Adviértase que las puntas de $P(\delta\tau)$ sólo pueden determinarse más allá de la $\delta\tau_{\text{last}}$ calculada.

5.1.4.4.2.7 Gama espectral

Si se trata de fibras fuertemente acopladas, debe utilizarse una gama espectral suficiente para formar el conjunto espectral (promedio) con la precisión necesaria. La incertidumbre estadística se puede minimizar utilizando la máxima gama espectral posible (por ejemplo, al menos 200 nm). La precisión requerida, y por tanto la gama espectral, se deben especificar antes de la medición. La máxima gama utilizable está limitada por la longitud de onda de corte de la fibra (1270 nm o inferior) en el extremo corto (λ_1) o por la caída de respuesta del detector en el extremo alto (λ_2) (por ejemplo, 1700 nm).

Además, si los valores de $\delta\tau$ son muy bajos, los periodos en $R(\lambda)$ serán muy largos, y la gama espectral λ_1 a λ_2 , debe comprender al menos dos "ciclos" completos. La gama espectral cubierta define el menor valor de $\delta\tau$ que puede resolverse en $P(\delta\tau)$, $\delta\tau_{\text{min}}$:

$$\delta\tau_{\text{min}} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (5-29)$$

donde el factor 2 se introduce para tener en cuenta el hecho de que generalmente se ignoran dos puntos de datos de P en cero y adyacentes a cero (véase 5.1.4.4.2.3). Por ejemplo, para $\lambda_1 = 1270$ nm, $\lambda_2 = 1700$ nm, $\delta\tau_{\text{min}} = 0,033$ ps.

Si se trata de fibras de alta PMD débilmente acopladas con datos de relación $R(\lambda)$ parecidos a los de la figura 15-a, puede hacerse menos riguroso el requisito de promediación espectral arriba descrito, y reducirse la gama espectral [por ejemplo, $(\lambda_2 - \lambda_1) \sim 30$ nm] a fin de permitir examinar la variación de la PMD con la longitud de onda.

5.1.4.4.2.8 Tamaño del paso de longitud de onda y resolución espectral

Para asegurar que todas las características (frecuencias) en $R(\lambda)$ se resuelvan adecuadamente, el tamaño del paso del monocromador, expresado en el dominio de la frecuencia óptica ($\Delta\nu$) debe ser dos veces menor que la "frecuencia de oscilación" correspondiente a la máxima $\delta\tau$ medida (condición de Nyquist):

$$\delta\tau_{\text{máx}} = 1/(2 \cdot \Delta\nu) \quad (5-30)$$

Si de la transformada de Fourier se desprende que existe energía considerable cerca de $\delta\tau_{\text{máx}}$ [es decir, que parece haber "superposición" en $R(\lambda)$], será necesario reducir el tamaño del paso $\Delta\nu$ (si es posible) y repetir la medición.

La anchura espectral del monocromador (resolución) expresada en unidades de frecuencia óptica es generalmente igual o inferior al menor valor de $\Delta\nu$ a utilizar (correspondiente al mayor valor $\delta\tau$ a medir).

Por ejemplo, para $\delta\tau_{\text{máx}} = 1,34$ ps, es típica una anchura espectral del monocromador de 3 nm a 1550 nm ($\Delta\nu = 374$ GHz).

5.1.4.4.3 Análisis de Fourier de coseno

Este análisis se basa en la observación de que la transformada de Fourier de coseno del espectro emitido por el analizador es el diagrama de bordes del interferograma. La diferencia entre los diagramas de bordes generados por el analizador configurado en dos posiciones ortogonales es la función de transcorrelación. En el caso de un analizador con espectro infinito, la función de autocorrelación tendría una anchura cero. En la práctica, el espectro finito de una fuente en el dominio de frecuencia óptica (anchura finita entre semimáximos) actúa como una función de ventana que produce una anchura de función de autocorrelación distinta de cero en el dominio del tiempo.

El análisis de las funciones de transcorrelación y autocorrelación cuadráticas halladas en el análisis GINTY de 5.1.3 demuestra que la diferencia de las anchuras RMS cuadráticas de estas funciones es proporcional al cuadrado del valor RMS ponderado espectralmente (por potencia cuadrática) de los valores de DGD. (Véase la ecuación 5-22.)

El resultado es independiente de la forma espectral, lo que significa que los detalles de la función de ventana se toman en cuenta plenamente. Éste también es independiente del grado de acoplamiento de modos, lo que significa que no se necesitan modificaciones del algoritmo para tratar los distintos regímenes.

El resultado está limitado por el incremento de anchura espectral y de frecuencia óptica que se mide. Según aumenta la PMD, debe disminuir el incremento de frecuencia. En algún momento (límite) sería más práctico utilizar el método interferométrico (GINTY).

El análisis arroja los criterios de medición de la PMD_{RMS} . Si se encuentra acoplamiento de modos aleatorio, el resultado podrá convertirse a PMD_{AVG} mediante la ecuación 3-3.

5.1.4.4.3.1 Visión general

Es necesario medir las potencias emitidas por el analizador configurado para dos posiciones ortogonales. La relación, R , asociada con la ecuación 5-24 se modifica a:

$$R(\nu) = \frac{P_A(\nu) - P_B(\nu)}{P_A(\nu) + P_B(\nu)} \quad (5-31)$$

siendo $\nu = c/\lambda$ la frecuencia óptica (THz).

Si se emplea un polarímetro, los tres elementos vectores de Stokes de salida normalizados son equivalentes a las tres relaciones normalizadas independientes que a su vez equivalen a lo representado por la ecuación 5-31. Cada elemento vector de Stokes representa la diferencia de potencia entre las posiciones del analizador ortogonal. Los tres elementos difieren en que las posiciones básicas también son ortogonales.

Los datos son multiplicados por una función de ventana, $W(\nu)$, que tiende a cero suavemente en los bordes. Tanto $R(\nu)W(\nu)$ como $W(\nu)$ se colocan en conjuntos rellenos con ceros a las frecuencias más bajas no medidas. Se aplican transformadas de Fourier de coseno rápidas (FCFT, *fast cosine fourier transforms*) a cada conjunto para obtener las envolventes de bordes en el dominio del tiempo, $r(t)w(t)$ y $w(t)$. Éstas son cuadráticas para obtener las envolventes de transcorrelación y de autocorrelación cuadráticas, E_x^2 y E_0^2 , respectivamente. Cuando se dispone de múltiples funciones de relación (N) de distintas combinaciones de posición del polarizador de entrada y de posiciones del analizador básico (o distintos elementos vectores de salida de Stokes), utilizando por ejemplo aleatorización SOP de entrada/salida, se puede dar forma a las envolventes cuadráticas medias de la siguiente manera:

$$\bar{E}_x^2 = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2 \quad \bar{E}_0^2 = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2 \quad (5-32)$$

Empleando el cálculo de RMS del apéndice I.2, pueden calcularse las anchuras RMS, σ_x y σ_0 de estas dos funciones. El valor PMD_{RMS} se calcula como sigue:

$$PMD_{RMS} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]^{1/2} \quad (5-33)$$

El resultado está relacionado con el valor RMS ponderado espectralmente (mediante un valor de ventana cuadrático) de los DGD como:

$$\langle PMD_{RMS} \rangle = \frac{\int \Delta\tau^2(\nu) W^2(\nu) d\nu}{\int W^2(\nu) d\nu} \quad (5-34)$$

El operador de valor esperado es con respecto a los SOP de entrada/salida aleatorios.

5.1.4.4.3.2 Detalles

En esta cláusula se explican algunos detalles con relación a la ventana de la frecuencia medida, el incremento de frecuencia, $\Delta\nu$, el desplazamiento de frecuencia, y el resultado de la FCFT. En la referencia *Numerical Recipes in C*, por W. Press, W. Vetterling, S. Teukolsky y B. Flannery, Cambridge University Press, figura un ejemplo de un algoritmo FCFT.

Los datos deben estar disponibles en incrementos de frecuencia uniformes. El número de puntos de datos, incluidos valores rellenos con ceros, debe ser $1+2^k$, siendo k un entero.

Si los n_m datos de los puntos de datos medidos no se toman en incrementos de frecuencia uniformes, podrán ajustarse a un polinomio tal como una ranura para interpolación. Una ranura cúbica con $n_m - 3$ segmentos uniformes se ajustará perfectamente a todos los datos y permitirá la interpolación.

Dado que los datos medidos están limitados por $v_{\min M}$ y $v_{\max M}$ y el hecho de que la frecuencia óptica mínima está muy por encima de cero, se puede aplicar la desviación de frecuencia para reducir el tamaño de los conjuntos que se procesan. Los límites de las frecuencias que se emplean en el conjunto de cálculo podrán ser seleccionados para cualquier valor de n de manera que:

$$v_{\max} \frac{n-1}{n} = v_{\min} \leq v_{\min M}, v_{\max} = v_{\max M}, \text{ y } n \text{ es un entero positivo.} \quad (5-35)$$

Los valores de frecuencia menores que la frecuencia medida se rellenan con ceros.

Siguiendo la FCFT, el conjunto contendrá el diagrama de bordes del dominio del tiempo del instante 0 a $t_{\max} = \Delta t 2^k$, donde el incremento de tiempo, Δt , se da como sigue:

$$\Delta t = \frac{n}{2v_{\max}} = \frac{1}{2(v_{\max} - v_{\min})} \quad (5-36)$$

El diagrama de bordes que se obtendría de la interferometría se extiende a valores de tiempo tanto negativos como positivos. El valor en un instante negativo determinado es igual al valor en el instante positivo. La función es par y simétrica con respecto a cero. Esto puede conducir a la simplificación del cálculo de RMS ya que se conoce el instante cero.

El desplazamiento de frecuencia se debe seleccionar teniendo en cuenta que el cálculo de la anchura RMS necesita algunos valores en el dominio del tiempo que sean menores que la PMD_{RMS} que es mensurable.

El incremento de frecuencia, Δv , también está relacionado con el número de puntos muestreados, el desplazamiento de frecuencia, y la máxima PMD_{RMS} que habrá de medirse y se obtiene de la siguiente manera, junto con la restricción:

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2^k} \leq \frac{1}{24PMD_{RMS-\max}} \quad (5-37)$$

La restricción en la ecuación 5-37 concuerda con la ecuación 5-26. La anchura espectral de la fuente filtrada debe ser la mitad de este valor. Cuando se realiza la exploración real en incrementos de igual longitud de onda, el incremento correspondiente al extremo inferior de la gama debe concordar con la limitación de la ecuación 5-37.

Técnicamente, la función de ventana, $W(v)$, puede ser cualquier función, incluida una función cuadrática. La función que se elija debe ser la que permita minimizar el valor de σ_0 . Las funciones que lo hacen tienden continuamente a cero en los bordes y deben permitir que la primera derivada tienda a su vez a cero en los bordes. Ello ayudará a disminuir la llamada que puede aumentar σ_0 .

5.1.4.4.3 Ejemplos

En el cuadro 1 se muestra un ejemplo de una hoja de cálculo, en la que se introduce la longitud de onda extrema y k , y se calcula el resto de los parámetros de cada uno de los posibles valores de desplazamiento de frecuencia, n . PMD_{\min} se calcula como $3\Delta t$. En el cuadro también se presenta el desplazamiento efectivo en términos de $\Delta\lambda$ en el límite inferior de longitud de onda. Por supuesto existen compromisos, en función de la gama de valores PMD_{RMS} que habrán de medirse. En general, se obtendrán mejores resultados mientras más amplia sea la gama de longitudes de onda y más pequeño el incremento de frecuencia.

Cuadro 1/G.650.2 – Cálculos de la transformada de coseno

c	299792,5	nm/ps				
k	11					
npt	2048					
longitudes de onda (nm)		frecuencias (THz)				
máx	1700	230,6096				
mín	1300	176,3485				
Desplazamiento de frecuencia						
n	Cálculo de la frecuencia mínima (THz)	Retardo de tiempo (ps)	Retardo de frec. (THz)	PMDmín (ps)	PMDmáx (ps)	Increm. de long. de onda (nm)
1	0	0,002168	0,112602	0,006504	0,370034	0,635076
2	115,3048077	0,004336	0,225205	0,013009	0,185017	1,270772
3	153,7397436	0,006504	0,337807	0,019513	0,123345	1,90709
4	172,9572115	0,008673	0,450409	0,026018	0,092508	2,544031
5	184,4876923	0,010841	0,563012	0,032522	0,074007	3,181596
6	192,1746795	0,013009	0,675614	0,039027	0,061672	3,819785
7	197,6653846	0,015177	0,788216	0,045531	0,052862	4,458599
8	201,7834135	0,017345	0,900819	0,052036	0,046254	5,098039

A continuación se ilustran los resultados que podrían obtenerse de una fibra con $PMD_{RMS} = 0,2$ ps. En la figura 17 se muestran las envolventes de transcorrelación y de autocorrelación medias de una sola exploración empleando una función de ventana Gaussiana con una desviación típica de 23 nm. El resultado proviene de la simulación de una fibra con acoplamiento de modos aleatorio ideal. El resultado medido de esta simulación fue de 0,185 ps.

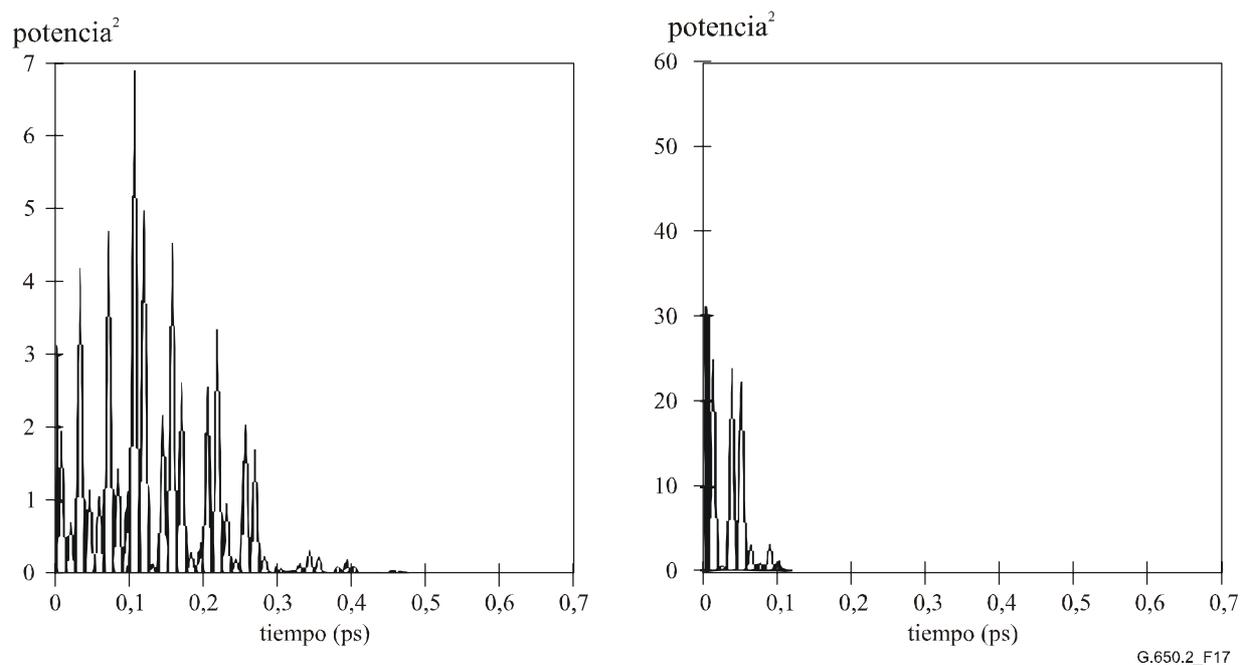


Figura 17/G.650.2 – Funciones de transcorrelación y autocorrección

5.1.4.5 Presentación de los resultados

- a) Identificación de la fibra y/o el cable medido.
- b) Longitud de prueba.
- c) Dispersión por modo de polarización (normalmente picosegundos). Si el grado de acoplamiento de modos es conocido, el coeficiente de PMD puede darse en ps/km (acoplamiento de modos despreciable) o ps/km^{1/2} (acoplamiento de modos fuerte).
- d) La gama de longitudes de onda en la que se efectuó la medición, y el tamaño del paso de longitud de onda o de frecuencia.
- e) La configuración física de la muestra de fibra o de cable.
- f) Tipo de acoplamiento de modos, por ejemplo, determinístico, semialeatorio o aleatorio.
- g) Cuando se ha obtenido una PMD media a partir de mediciones repetidas de la muestra, se ha de registrar el número de mediciones efectuadas.

5.2 Métodos de prueba para atributos no lineales

(En estudio.)

Apéndice I

Determinación del retardo de PMD a partir de un interferograma

En este apéndice se presentan dos métodos para determinar la anchura RMS de las envolventes de bordes, que se emplean principalmente para medir la PMD por el método interferométrico. La cláusula I.1 corresponde a una envolvente con una cresta de autocorrelación que es apropiada para el análisis TINTY, mientras que la cláusula I.2 corresponde a las envolventes sin dicha cresta y es adecuada para el análisis GINTY.

I.1 Cálculo del RMS para TINTY

La figura I.1 muestra una envolvente de bordes con una cresta de autocorrelación en el centro.

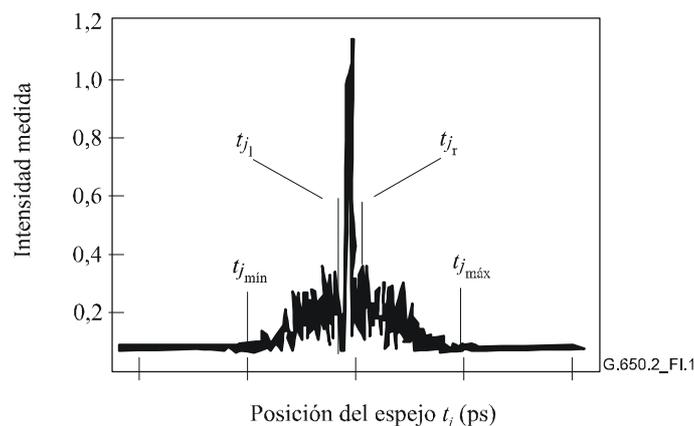


Figura I.1/G.650.2 – Parámetros para el análisis mediante interferograma

Consideremos que \tilde{I}_j denota la intensidad medida de la envolvente de bordes en las posiciones incrementales $t_j, j = 1 \dots N$, con $[t_j] = \text{ps}$.

Paso 1 – Cálculo de la intensidad cero \tilde{I}_0 y de la amplitud de ruido Na Definición: $N_5 = (5 N/100)$ redondeada

$$\tilde{I}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N-j})}{2N_5} \quad (\text{I-1})$$

$$X_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N-j}^2)}{2N_5} \quad (\text{I-2})$$

$$Na = \sqrt{X_2 - I_0^2} \quad (\text{I-3})$$

Paso 2 – Definición de la intensidad desplazada I_j

$$I_j := \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \quad \text{si } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 > 4Na \quad (\text{I-4})$$

$$I_j := 0 \quad \text{si } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \leq 4Na \quad (\text{I-5})$$

Paso 3 – Cálculo del centro C del interferograma

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N t_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (\text{I-6})$$

Paso 4 – Supresión de la cresta de autocorrelación centralDefinición: $j_l :=$ el mayor índice j de modo que $C - t_j > \tau_c$ (I-7) $j_r :=$ el menor índice j de modo que $t_j - C > \tau_c$ (I-8)siendo τ_c el tiempo de coherencia de la fuente.

NOTA 1 – Para interferogramas de transcorrelación, se aplicará la siguiente definición:

$$j_r := j_l + 1 \quad (\text{I-9})$$

Paso 5 – Cálculo del segundo momento S del interferograma

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=1}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^N (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^N I_j}} \right\} \quad (\text{I-10})$$

Paso 6 – Truncamiento del interferogramaFíjese j_{\min} al mayor índice j de modo que $C - t_j > 2S$ (I-11)Fíjese j_{\max} al menor índice j de modo que $t_j - C > 2S$ (I-12)

Paso 7 – Cálculo del segundo momento σ_ε del interferograma truncado

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} I_j}} \right\} \quad (I-13)$$

Paso 8 – Cálculo del σ de la función gaussiana $e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}}$ de modo que:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} \right\} \quad (I-14)$$

Paso 9 – Determinación de $PMD_{RMS} <\Delta\tau^2>^{1/2}$

$$PMD_{RMS} = <\Delta\tau^2>^{1/2} = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (I-15)$$

NOTA 2 – Para los interferogramas medidos correctamente, puede demostrarse que $\frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma} \approx \sqrt{\frac{3}{4}}$.

1.2 Cálculo del RMS para el análisis GINTY

El siguiente algoritmo da por resultado una anchura RMS robusta para las envolventes de transcorrelación o de autocorrelación cuadráticas compuestas empleando el método D (GINTY).

El algoritmo es interactivo. Para una determinada iteración, todo el conjunto de datos se divide en dos: la parte central, M, que incluye la señal y las colas, T, que contienen ruido. Cada iteración da por resultado distintas definiciones para estos conjuntos. El resultado converge cuando deja de variar la anchura RMS calculada o cuando se estabilizan las definiciones del conjunto. Para una iteración, el número de puntos de datos en cada conjunto se indican como N_M y N_T .

Consideremos que \tilde{I}_j denota la intensidad medida en las posiciones incrementales t_j (ps), $(ps), j = 1 \dots N$.

La definición inicial del conjunto T es el primero y último 5% de todo el conjunto.

Paso 1 – Cálculo de la intensidad cero \tilde{I}_0

$$\tilde{I}_0 = \sum_{j \in T} \tilde{I}_j / N_T \quad (I-16)$$

Paso 2 – Definición de la intensidad desplazada I_j

$$I_j = \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \text{ todos } N \quad (I-17)$$

Paso 3 – Cálculo del centro C del interferograma

$$C = \frac{\sum_{j \in M} t_j I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (\text{I-18})$$

Paso 4 – Cálculo de la anchura RMS σ de la envolvente cuadrática

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j \in M} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (\text{I-19})$$

Paso 5 – Redefinición de los conjuntos

Se define M como el conjunto de puntos para los cuales $C - 4\sigma \leq t_j \leq C + 4\sigma$

Se define T como el resto de los puntos.

Paso 6 – Repetición de los pasos 1 a 5 hasta que los resultados converjan

$$\frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma} \approx \sqrt{\frac{3}{4}}$$

Apéndice II

Atributos no lineales

II.1 Consideraciones básicas

Las interacciones no lineales entre la señal y el medio de transmisión de fibra de sílice empiezan a aparecer a medida que las potencias de la señal óptica aumentan para obtener largos de tramo más grandes a altas velocidades binarias. Por consiguiente, el comportamiento no lineal de la fibra ha surgido como una consideración importante en los sistemas de alta capacidad y en las rutas largas sin regeneración. Estas no linealidades pueden clasificarse generalmente como efectos de dispersión (dispersión Brillouin estimulada y dispersión Raman estimulada) o efectos relacionados con el efecto Kerr, es decir, la dependencia del índice de refracción con respecto a la intensidad (automodulación de fase, transmodulación de fase, inestabilidad de la modulación, formación de solitones y mezclado de cuatro ondas). En la gravedad de estos efectos no lineales influyen una variedad de parámetros, entre ellos las características de dispersión de la fibra, el área efectiva de la fibra, el número y la separación de los canales en los sistemas multicanal, la longitud total del sistema sin regeneración, el grado de uniformidad longitudinal de las características de la fibra, así como la intensidad de la señal y la anchura espectral de la fuente.

II.2 Área efectiva (A_{eff})

El área efectiva es un parámetro estrechamente relacionado con las no linealidades de la fibra óptica que afectarán a la calidad de transmisión de los sistemas de fibra óptica, especialmente en los sistemas de larga distancia con amplificación óptica.

El área efectiva A_{eff} se define como sigue:

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left[\int_0^{\infty} I(r) r dr \right]}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (\text{II-1})$$

donde $I(r)$ es la distribución de intensidad de campo del modo fundamental de la fibra para el radio r . La integración de la ecuación II-1 se efectúa en toda la superficie transversal de la fibra. Por ejemplo, si hacemos una aproximación gaussiana tal que:

$$I(r) = \exp\left(-2r^2 / W^2\right) \quad (\text{II-2})$$

donde $2w$ es el diámetro del campo modal (MFD), la ecuación II-1 puede integrarse analíticamente dando:

$$A_{eff} = \pi w^2 \quad (\text{II-3})$$

La aproximación gaussiana es exacta para fibras de índice en escalón G.652 [1] y G.654 [3] cerca del corte LP₁₁, pero para fibras G.652 y G.654 a longitudes de onda mucho mayores, y en el caso de fibras con dispersión desplazada G.653 [2], A_{eff} no puede estimarse con exactitud a partir de la ecuación II-3.

Una relación más general, pero empírica, entre A_{eff} y w es¹:

$$A_{eff} = k\pi w^2 \quad (\text{II-4})$$

donde k es un factor de corrección.

II.3 Factor de corrección k

En el experimento, el diámetro del campo modal (MFD, *mode field diameter*) se midió por el método de prueba de apertura variable. A partir del diagrama de campo lejano (FFP, *far-field pattern*) de la potencia óptica de salida $P(r)$, fue posible calcular el diagrama de campo próximo (NFP, *near-field pattern*) utilizando una transformación de Hankel inversa. A_{eff} se obtiene entonces del NFP utilizando la ecuación II-1.

El factor de corrección k de la ecuación II-4 depende de la longitud de onda y de los parámetros de la fibra tales como perfiles de índice de refracción, MFD y longitud de onda de dispersión nula.

En la figura II.1 se muestran algunos ejemplos de relación entre la longitud de onda medida, el MFD y A_{eff} para fibras G.652 y G.653 en las regiones de longitud de onda 1200-1600 nm. Los ejemplos de la figura II.2 muestran la relación de la longitud de onda medida y calculada, MFD, A_{eff} y el factor de corrección k para fibras G.652, G.653 y G.654 en la misma región de longitud de onda.

En el cuadro II.1 se resumen las posibles gamas de valores del factor de corrección k para estos ejemplos.

Para otros diseños de fibra destinados a aplicaciones de fibras ópticas submarinas y de multiplexación por división en longitud de onda (WDM), la relación de A_{eff} con w puede variar, y debe determinarse mediante la ecuación II-1.

¹ NAMIHIRA (Y.): Relationship between non-linear effective area and mode field diameter for dispersion shifted fibres, *Electron. Lett.*, Vol. 30, N.º 3 págs. 262-263, 1994.

La figura II.3 muestra la relación entre la longitud de onda y A_{eff} para fibras G.653 (DSF) y G.655 (NZ-DSF) en la región de longitud de onda de 1520-1580 nm para aplicaciones WDM.

Se determinó que el valor medio y la desviación típica de k eran aproximadamente $0,953 \pm 0,005$ para fibras G.653 y $1,09 \pm 0,070$ para fibras G.655.

Cuadro II.1/G.650.2 – Resumen del factor de corrección k de A_{eff} y MFD (= 2W) de fibras G.652, G.653 y G.654 en base a los ejemplos de la figura II.2

Tipos de fibra	~ 1310 nm	~ 1550 nm
Rec. UIT-T G.652	0,970 ~ 0,980 (nota)	0,960 ~ 0,970
Rec. UIT-T G.654	...	0,975 ~ 0,985 (nota)
Rec. UIT-T G.653	0,940 ~ 0,950	0,950 ~ 0,960 (nota)

NOTA – Región de longitud de onda óptima.

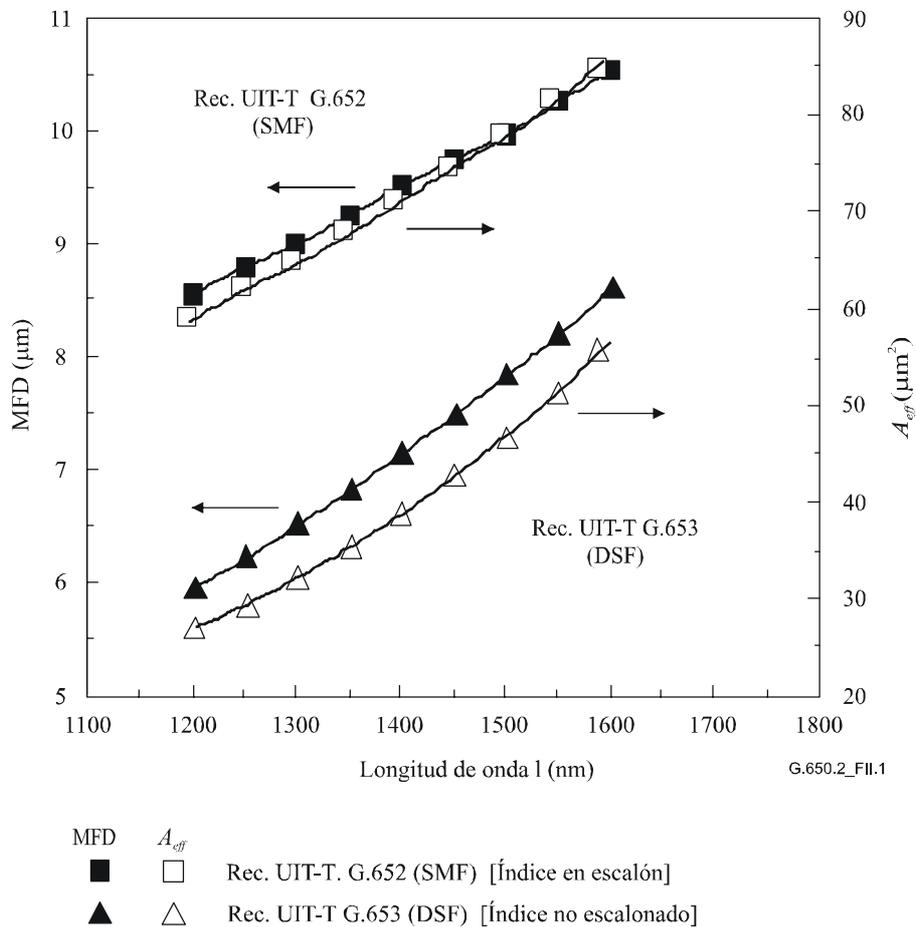


Figura II.1/G.650.2 – Ejemplo de dependencia entre la longitud de onda medida, A_{eff} y MFD (= 2W) para fibras G.652 y G.653

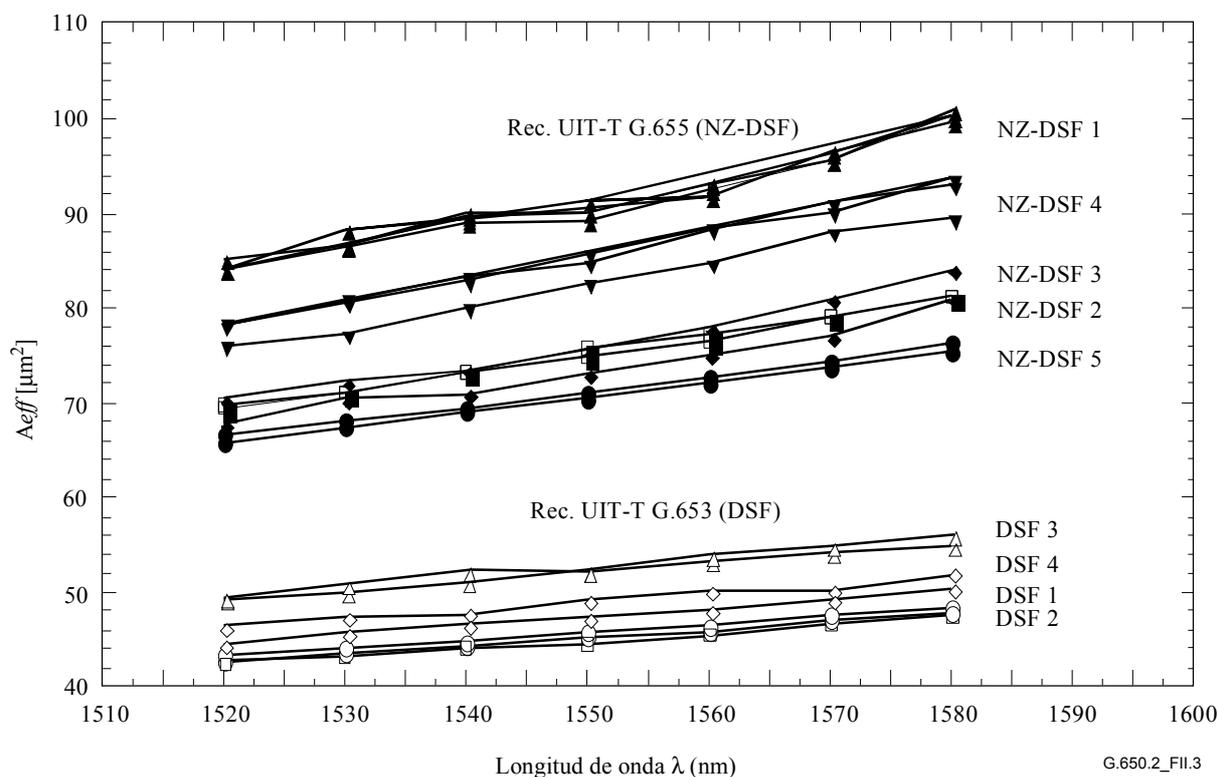


Figura II.3/G.650.2 – Ejemplo de dependencia entre la λ medida y A_{eff} para fibras G.653 y G.655

II.4 Coeficiente no lineal (n_2/A_{eff})

Con campos particularmente intensos, el índice de refracción de las fibras ópticas depende de la intensidad óptica dentro de las fibras, y puede expresarse como:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (\text{II-5})$$

donde n es el índice de refracción, n_0 la parte lineal del índice de refracción, n_2 el índice de refracción no lineal, e I la intensidad óptica dentro de las fibras.

El coeficiente no lineal se define como n_2/A_{eff} . Este coeficiente desempeña un papel importante al evaluar la degradación de la calidad de funcionamiento del sistema debido a las no linealidades cuando se utilizan sistemas de alta densidad de potencia.

Se estudian métodos para medir el coeficiente no lineal.

II.5 Dispersión de Brillouin estimulada

El umbral de SBS que se define en esta cláusula ha sido puesto en duda para algunas aplicaciones de transmisión. Se ha iniciado el estudio de las definiciones de las alternativas pero aún no se ha completado. Se prevé un corrigendum con modificaciones de la siguiente cláusula.

II.5.1 Descripción del efecto

En un sistema con modulación de intensidad y basado en una fuente de anchura espectral reducida, se transfiere una potencia óptica considerable de la señal de propagación progresiva a una señal de propagación regresiva cuando se sobrepasa el umbral de dispersión de Brillouin estimulada (SBS, *stimulated Brillouin scattering*). En la SBS, la luz con propagación progresiva se dispersa debido a los fonones acústicos. La adaptación de fase (o conservación de la cantidad de movimiento) dicta que la luz dispersada viaja preferentemente en sentido regresivo. La luz

dispersada sufre desplazamiento descendente o desplazamiento de Brillouin en aproximadamente 11 GHz a 1550 nm.

II.5.2 Estimación del umbral de SBS en las fibras monomodo

II.5.2.1 Umbral de SBS

En general, el umbral de SBS se expresa como:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B} \quad (\text{II-6})$$

donde se supone que se utiliza una bomba de Lorentz y una anchura espectral de Brillouin, y g designa el coeficiente de ganancia de Brillouin (unidades de longitud/potencia), y A_{eff} es el área efectiva. K es una constante ($1 \leq K \leq 2$) determinada por el grado de libertad del estado de polarización. $\Delta\nu_B$ y $\Delta\nu_p$ representan la anchura de banda de Brillouin y la anchura espectral de la luz de bombeo (MHz) respectivamente. L_{eff} designa la longitud efectiva definida como:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (\text{II-7})$$

donde α es el coeficiente de atenuación y L es la longitud de la fibra.

El umbral de SBS, P_{th} , depende de la anchura espectral, $\Delta\nu_p$, de la luz de bombeo. Cuando $\frac{\Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \ll 1$, P_{th} alcanza su valor mínimo, que define la máxima potencia de entrada en régimen permanente, P_m , en ausencia de una anchura espectral de bombeo más grande u otros esquemas de modulación. La potencia de entrada máxima se puede determinar así:

$$P_m = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \quad (\text{II-8})$$

NOTA 1 – La potencia de entrada máxima real de un sistema de transmisión puede ser aumentada por diversos esquemas de modulación de los que se informa en la documentación disponible.

NOTA 2 – P_{th} y P_m requieren ambos una estimación del coeficiente de ganancia, g , que debe determinarse experimentalmente y, opcionalmente, caracterizarse como una función del diámetro del campo modal para un determinado diseño de fibra.

II.5.2.2 Configuración experimental para medir el umbral de SBS

En la figura II.4 se muestra una configuración para medir el umbral de SBS. La bomba de 1,32 μm es un láser unifrecuencia de Nd:YAG bombeado por diodo láser con una anchura espectral de unos 5 kHz. La bomba de 1,55 μm es un diodo láser con realimentación distribuida monomodo (DFB LD, *distributed feedback laser diode*) con una anchura espectral de 200 kHz. La luz de onda continua (CW, *continuous wave*) procedente de la fuente DFB se amplificó con un amplificador de fibra dopada con erbio. Las anchuras espectrales de las luces de bombeo se consideran despreciables comparadas con $\Delta\nu_B$ (20 a 100 MHz). La luz de bombeo CW es inyectada en la fibra de prueba mediante un acoplador de fibra con una relación de derivación de 1,9. Las potencias luminosas transmitidas y retrodispersadas de entrada son supervisadas por medidores de potencia.

En la figura II.5 se muestra un ejemplo de la potencia transmitida y retrodispersada a 1,32 μm en función de la potencia de entrada en una fibra G.654 [3]. La potencia transmitida deja de crecer y la potencia retrodispersada aumenta rápidamente a medida que la potencia de entrada alcanza un cierto nivel de potencia. El umbral de SBS se define como la potencia de bombeo de entrada que produce una potencia de Stokes retrodispersada igual a la potencia de bombeo transmitida (véase la figura II.5). En el cuadro II.2 se resumen los parámetros de la fibra y los umbrales de SBS para diversos tipos de fibra.

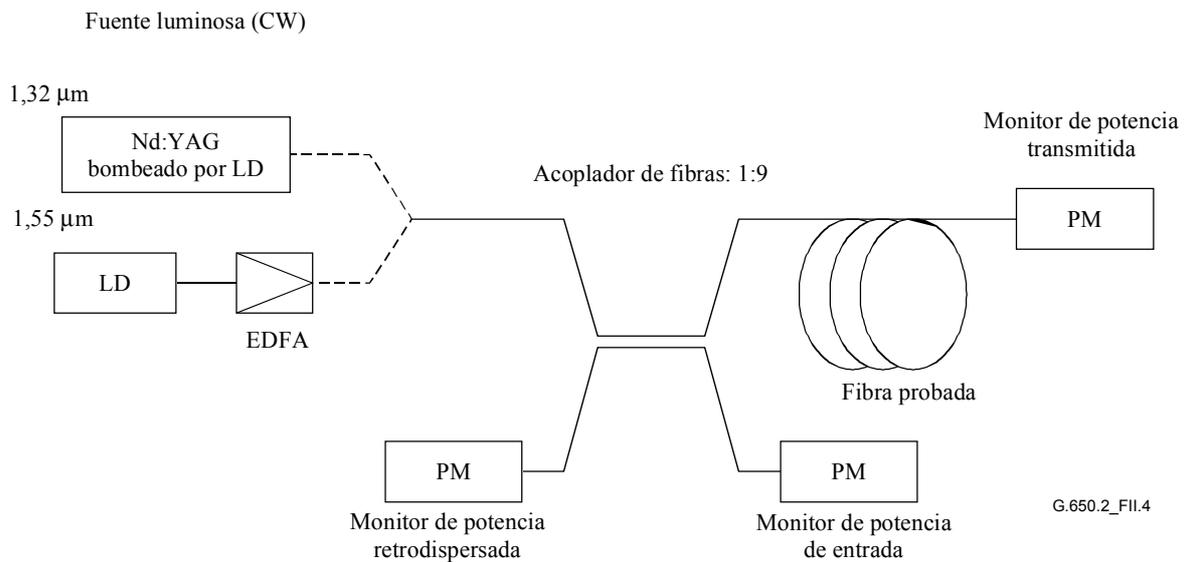


Figura II.4/G.650.2 – Configuración experimental

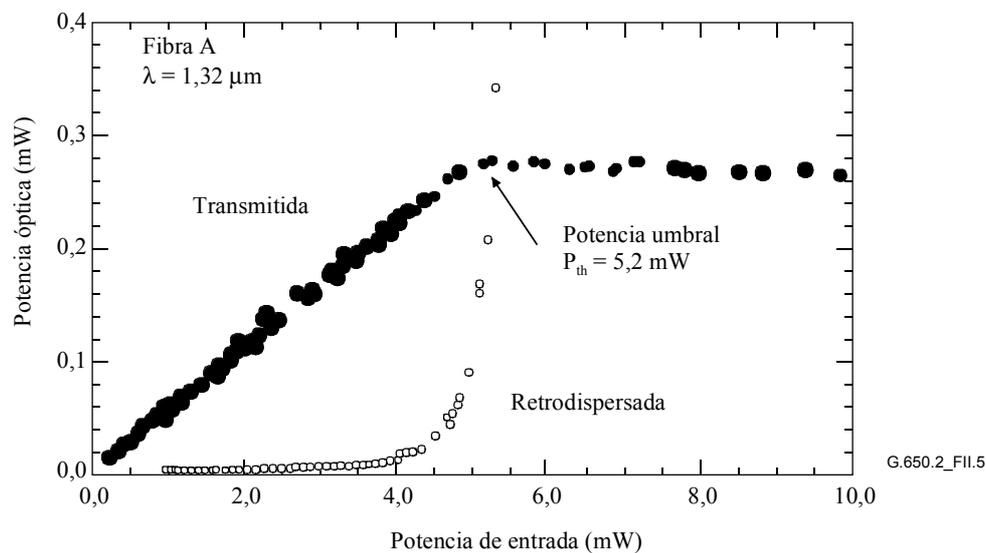


Figura II.5/G.650.2 – Potencia transmitida y retrodispersada en función de la potencia de entrada

Las potencias umbral en el cuadro II.2 sólo son válidas para las fibras sometidas a prueba en las condiciones de prueba descritas. En la utilización normal de los sistemas de transmisión se pueden aplicar valores considerablemente más elevados.

Cuadro II.2/G.650.2 – Parámetros de la fibra a prueba

Fibra		A	B	C	D	E	F	G
Tipo de fibra		Rec. UIT-T G.654	Rec. UIT-T G.652	Rec. UIT-T G.653				
Longitud L (km)		41,3	32,0	20,2	25,2	24,1	21,6	30,0
Pérdida (dB/km)	1320 nm	0,302	0,322	0,360	0,360	0,360	0,362	0,364
	1550 nm	0,172	0,194	0,200	0,200	0,200	0,200	0,209
MFD (μm)	1320 nm	9,1	9,8	6,3	6,5	6,3	6,7	6,2
	1550 nm	10,1	10,9	7,8	8,1	7,8	8,3	7,6
Cambio de desplazamiento de frecuencia de Brillouin (MHz)		1	1,5	1,5	–	–	–	6,0
Potencia umbral (mW)	1320 nm	5,2	6,4	3,3	3,4	2,9	3,6	4,1
	1550 nm	4,2	5,3	3,9	3,7	3,3	4,4	4,0

II.5.2.3 Estimación del umbral de SBS

En la figura II.6 se muestra la relación entre el umbral de SBS y A_{eff}/L_{eff} de las fibras a prueba. Se observa que hay una relación lineal entre el umbral de SBS y A_{eff}/L_{eff} . El umbral de SBS puede estimarse por la siguiente ecuación:

$$P_{th} = 0,11 \left[\frac{A_{eff}}{L_{eff}} \right] \quad (II-9)$$

donde A_{eff} se expresa en μm^2 , L_{eff} en km, y P_{th} en mW.

La ecuación II-9 se puede expresar de otra forma utilizando una longitud de fibra L , un diámetro del campo modal $2W$ y un coeficiente de atenuación α , como sigue:

$$P_{th} = 0,11 \left[k\pi \left(\frac{2W}{2} \right)^2 \frac{\alpha}{1 - \exp(-\alpha L)} \right] \quad (II-10)$$

En este caso, k es un factor de corrección que relaciona el diámetro del campo modal con A_{eff} para un determinado diseño de fibra y longitud de onda.

NOTA – Si el desplazamiento de frecuencia de Brillouin cambia en más de varios MHz a lo largo de la fibra, P_{th} será mayor que el valor indicado por la ecuación II-9.

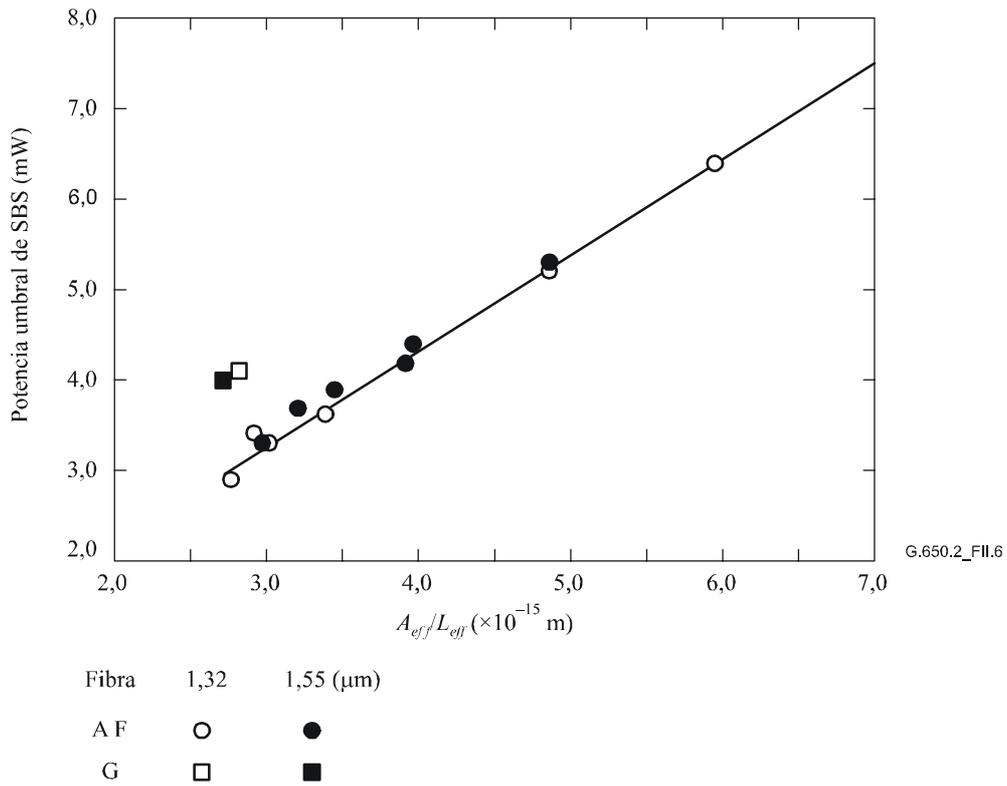


Figura II.6/G.650.2 – Relación entre el umbral de SBS y $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$

II.6 Otros efectos

Para una descripción de otros efectos ópticos no lineales (mezclado de cuatro ondas, inestabilidad de modulación, automodulación de fase, transmodulación de fase, solitones, y dispersión de Raman estimulada), véase el apéndice II/G.663.

Apéndice III

Métodos de prueba del área efectiva (A_{eff})

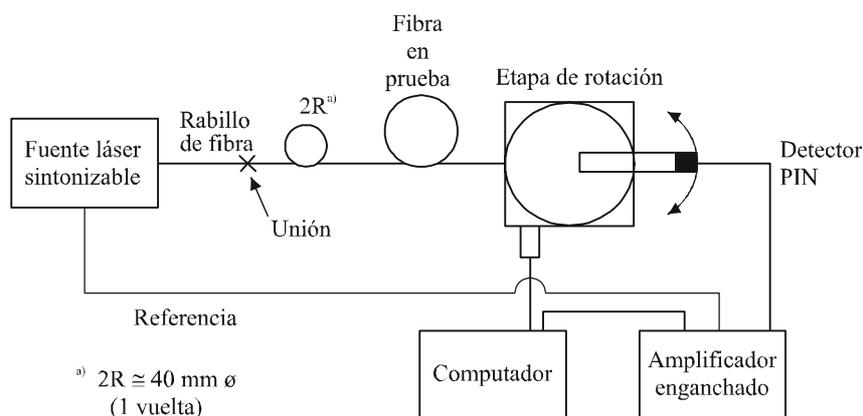
III.1 Técnica de exploración del campo lejano (FFS)

III.1.1 Generalidades

El área efectiva (A_{eff}) de las fibras ópticas monomodo se determina mediante la técnica de exploración del campo lejano (FFS).

III.1.2 Aparato de prueba

En la figura III.1 se muestra un diagrama esquemático de la configuración de la prueba para la exploración de campo lejano (FFS, *far-field scan*).



G.650.2_FIII.1

Figura III.1/G.650.2 – Configuración típica de la exploración de campo lejano (FFS)

III.1.2.1 Fuente de luz (como en 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.1.2.2 Modulación (como en 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.1.2.3 Condiciones de inyección (como en 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.1.2.4 Supresor de modos de revestimiento (como en 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.1.2.5 Espécimen (como en 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.1.2.6 Aparato de exploración (como en 5.1.1.2.6/G.650.1)

III.1.2.7 Detector (como en 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.1.2.8 Amplificador (como en 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.1.2.9 Adquisición de datos (como en 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.1.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra debe alinearse con el haz inyector, y el extremo de salida de la fibra debe alinearse con el correspondiente dispositivo de salida.

El área efectiva (A_{eff}) se calcula mediante la ecuación III-1.

III.1.3.1 Calibración del equipo

Para conseguir la calibración, se mide el grado de amplificación de los dispositivos ópticos de amplificación explorando la longitud de una fibra espécimen cuyas dimensiones se conocen de antemano con la precisión necesaria. Se registra este grado de amplificación.

III.1.3.2 Cálculos

III.1.3.2.1 Ecuaciones y figuras para el cálculo del área efectiva (A_{eff})

1) *Se superponen los datos de la potencia de radiación de campo lejano*

Sea $P(\theta_i)$ la potencia medida en función de la posición angular θ_i (radianes) indexada en función de i . La curva de potencia resultante, $P_f(\theta_i)$, para $0 \leq \theta_i \leq \theta_{m\acute{a}x}$ es la siguiente :

$$P_f(\theta_i) = \frac{P(\theta_i) + P(-\theta_{-i})}{2} \quad (III-1)$$

2) *Se calcula el diagrama de intensidad de campo cercano*

Se utiliza un método numérico de integración adecuado para el cálculo de las partes componentes de la ecuación III-1. La ecuación III-2 es un ejemplo. Cualquier otro método de integración deberá tener al menos la misma precisión.

Se calculan los valores de campo cercano para una gama de valores de los radios, r_j que van desde cero hasta un valor suficientemente grande (la intensidad calculada para el caso de radio máximo debe ser inferior a 0,01% de la intensidad máxima).

$$I(r_j) = \left[\sum_0^n P_f^{1/2}(\theta_1) J_0 \left(\frac{2\pi r_j \text{sen}(\theta_i)}{\lambda} \right) \text{sen}(2\theta_i) \Delta\theta \right]^2 \quad (III-2)$$

donde $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$.

3) *Se calculan las integrales de la ecuación III-2*

Se utilizará un método de integración numérico adecuado para calcular las integrales de la ecuación III-2. La ecuación III-3 es un ejemplo. Cualquier otro método de integración deberá tener al menos la misma exactitud.

$$T = \left[\sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (III-3)$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (III-4)$$

donde $\Delta r = r_1 - r_0$, y m es el número de posiciones medidas.

4) *Se termina el cálculo*

$$A_{eff} = \frac{2\pi T}{B} \quad (III-5)$$

En la figura III.2 se muestra un ejemplo de datos de potencia de campo lejano medido.

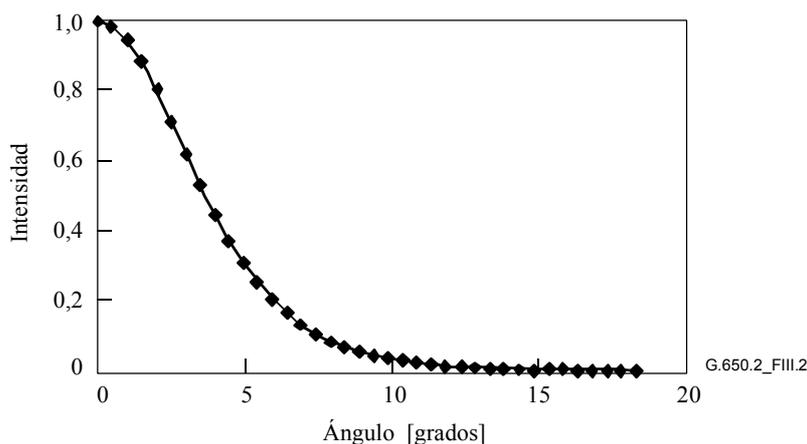


Figura III.2/G.650.2 – Ejemplo de datos de potencia de campo lejano medido

III.1.4 Presentación de resultados

Se presenta la siguiente información detallada:

- Configuración de la prueba, margen dinámico del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y una descripción de la disposición de apertura empleada (incluida la apertura numérica, NA).
- Condiciones de la inyección.
- Longitud de onda y anchura espectral FWHM de la fuente.
- Identificación y longitud de la fibra.
- Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- Tipo y dimensiones del detector.
- Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando sea necesario).
- Indicación de la precisión y repetibilidad.
- Área efectiva (A_{eff}).
- Representación gráfica de $A_{eff}(\lambda)$ (si se requiere).

III.2 Técnica de apertura variable (VA, *variable aperture*)

III.2.1 Generalidades

El área efectiva (A_{eff}) de las fibras monomodo se determina mediante la técnica de medición por apertura variable (VA) en el campo lejano.

III.2.2 Aparato de prueba

En la figura III.3 se muestra un diagrama esquemático de configuración de prueba en la que se aplica la técnica de apertura variable.

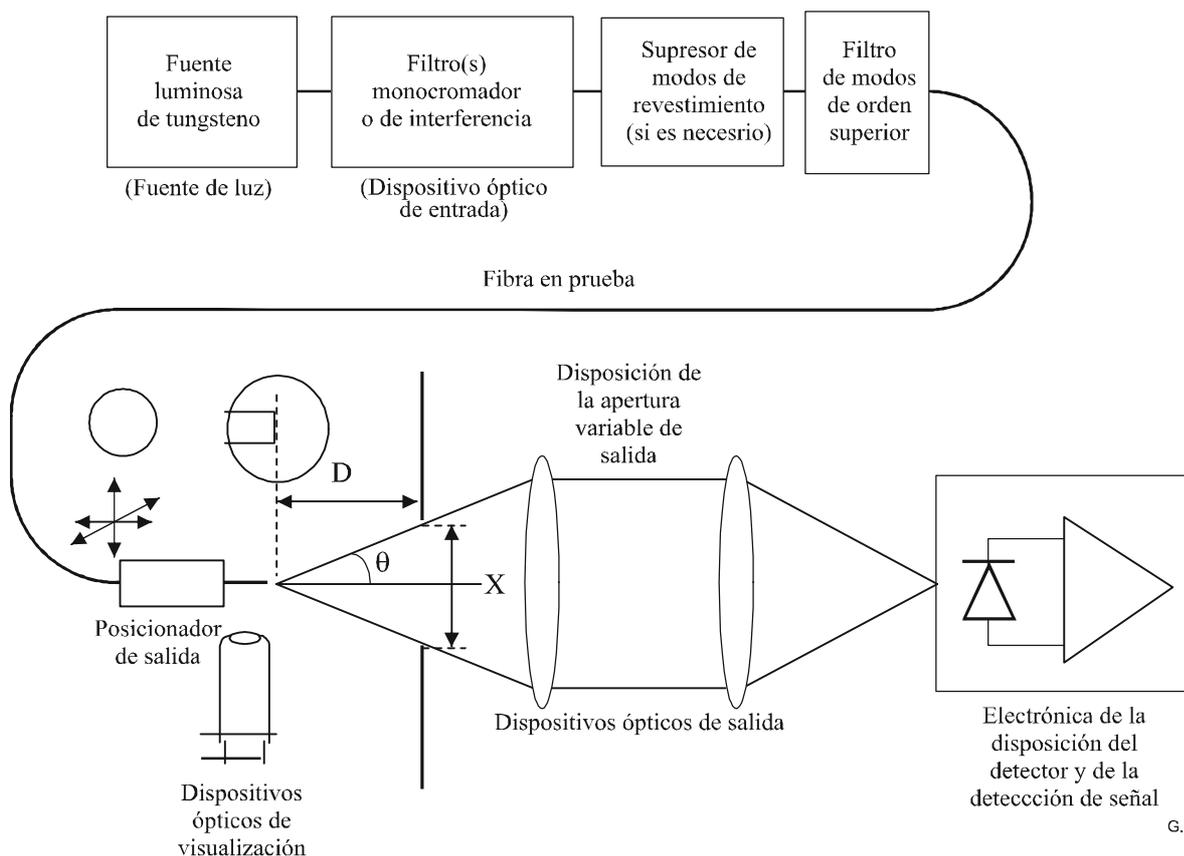


Figura III.3/G.650.2 – Configuración típica aplicada a la técnica de apertura variable

III.2.2.1 Fuente de luz (como en 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.2.2.2 Modulación (como en 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.2.2.3 Condiciones de inyección (como en 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.2.2.4 Supresor de modos de revestimiento (como en 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.2.2.5 Espécimen (como en 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.2.2.6 Aparato de apertura

Se debe utilizar un mecanismo con un mínimo de doce aparatos que abarquen la gama de ángulos mitad de las aperturas numéricas comprendidas entre 0,02 y 0,25 (0,4 para fibras del tipo Rec. UIT-T G.653). La luz transmitida por la apertura se recoge y se enfoca sobre el detector.

NOTA – La apertura numérica (NA) del dispositivo óptico colector debe ser suficientemente grande como para no afectar al resultado de las medidas.

III.2.2.7 Disposición de la apertura variable de salida

A una distancia D al menos $100 w^2/\lambda$ del extremo de la fibra se coloca un dispositivo de aperturas de transmisión redondas de varios tamaños (como una rueda de apertura), que se utiliza para variar la potencia obtenida del diagrama de radiación a la salida de la fibra. Normalmente se utilizan de 12 a 20 aperturas y se sitúan aproximadamente a 20-50 mm del extremo de la fibra. La máxima apertura numérica de la prueba debe ser 0,40. Las aperturas se centran en relación con el diagrama de salida de la fibra a fin de reducir la sensibilidad angular en el extremo de la fibra.

Como parte de la configuración (tal como se muestra en la figura III.4), se mide y se registra la distancia longitudinal D entre la posición del extremo de salida de la fibra y el plano de apertura, así como los diámetros X_i de cada apertura. Se determina el ángulo mitad subtendido de cada apertura

de la rueda y se registran dichos valores θ_i , ($i = 1$ a n en orden de aperturas de tamaño creciente) para ser utilizados en cálculos ulteriores. Dichos valores son independientes de la longitud de onda de prueba.

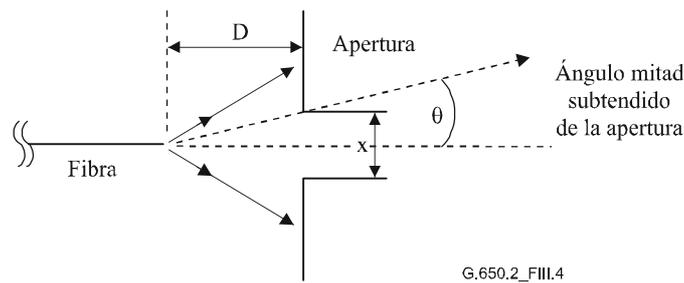


Figura III.4/G.650.2 – Configuración del aparato de apertura

III.2.2.8 Detector (como en 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.2.2.9 Amplificador (como en 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.2.2.10 Adquisición de datos (como en 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.2.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra debe coincidir con el haz inyector, y el extremo de salida de la fibra debe coincidir con el correspondiente dispositivo de salida.

El área efectiva (A_{eff}) se calcula mediante las ecuaciones III-6 a III-10.

III.2.3.1 Calibración del equipo

Para conseguir la calibración del equipo, se mide el grado de amplificación del dispositivo óptico de amplificación explorando la longitud de una fibra espécimen cuyas dimensiones son conocidas de antemano con la precisión necesaria. Se registra el grado de amplificación.

III.2.3.2 Cálculos

III.2.3.2.1 Ecuaciones y figuras para el cálculo del área efectiva (A_{eff})

La técnica de apertura variable (VA) permite medir la potencia total normalizada $f(\theta)$ que pasa a través de una determinada apertura, tal como se muestra en la figura III.3, que subtendiendo un ángulo de campo lejano θ en la fibra. Estos valores de potencia son equivalentes a una integración de la distribución de potencia del campo lejano $F^2(\theta)$. Ello se representa mediante la ecuación III-6.

$$f(\theta) = \int_0^{\theta} F^2(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (\text{III-6})$$

En la figura III.5 se representa gráficamente la potencia normalizada transmitida a través de las aperturas en función del ángulo θ .

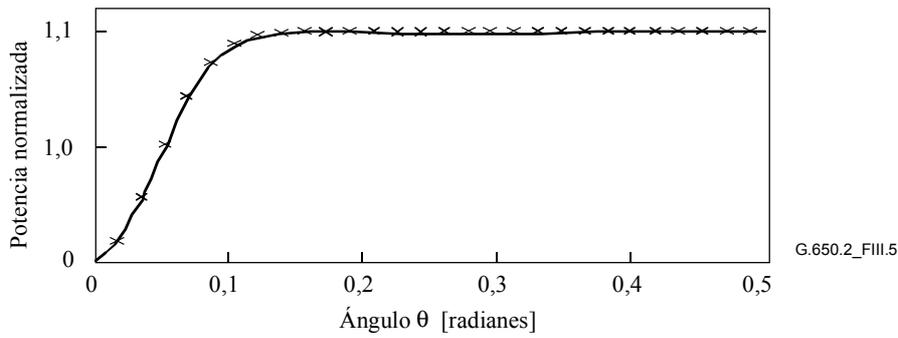


Figura III.5/G.650.2 – Representación de la apertura variable medida

Una función de cuarto grado se ajusta bien a los datos de apertura de campo lejano;

$$f(\theta) = A\theta^4 + B\theta^3 + C\theta^2 + D\theta^1 + E \quad (\text{III-7})$$

El área efectiva, A_{eff} , se calcula a partir de la distribución de potencia de campo cercano $I(r)$ expresada en función del radio r . Para calcularla se deben diferenciar los datos de potencia integrada, $f(\theta)$, para obtener la distribución de potencia de campo lejano $F^2(\theta)$.

$$F^2(\theta) = \frac{df(\theta)}{d(\theta)} \cdot \frac{1}{\text{sen}\theta} \quad (\text{III-8})$$

En la figura III.6 se representa la distribución de potencia de campo lejano calculada.

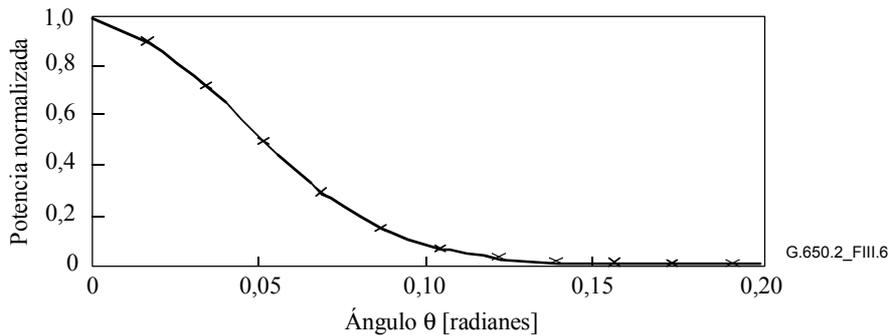


Figura III.6/G.650.2 – Representación de la distribución de la potencia de campo lejano

A partir de la distribución de la potencia de campo lejano $F^2(\theta)$ es posible calcular la distribución de potencia de campo cercano $I(r)$ expresada en función del radio r , utilizando la transformada de Hankel inversa:

$$I(r) = \left[\int_0^{\infty} \sqrt{F^2(\theta)} \cdot J_0\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \text{sen}2\theta d\theta \right]^2 \quad (\text{III-9})$$

En la figura III.7 se representa la distribución de campo cercano, $I(r)$ en función del radio r .

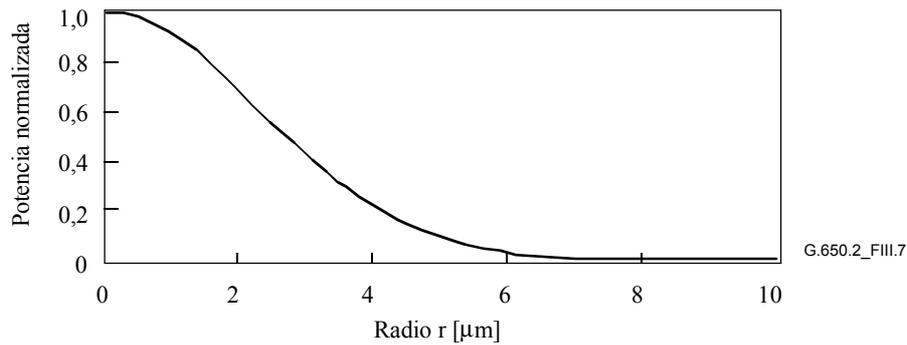


Figura III.7/G.650.2 – Representación de la distribución de potencia de campo cercano

El área efectiva (A_{eff}) se calcula a partir de la distribución de campo cercano $I(r)$ mediante la ecuación III-10.

$$A_{eff} = 2\pi \cdot \frac{\left[\int_0^{\infty} I(r) \cdot r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 \cdot r dr} \quad \text{(III-10)}$$

III.2.4 Presentación de resultados

Se debe presentar la siguiente información:

- a) Configuración de la prueba, margen dinámico del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y una descripción del montaje empleado para la apertura (incluida la apertura numérica).
- b) Condiciones de inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral FWHM de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- f) Tipo y dimensiones del detector.
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando ello sea necesario).
- h) Indicación de la precisión y repetibilidad.
- i) Área efectiva (A_{eff}).
- j) Gráfico de $A_{eff}(\lambda)$ (si se requiere).

III.3 Técnica de exploración del campo cercano (NFS, *near-field scan*)

III.3.1 Generalidades

El área efectiva (A_{eff}) de las fibras monomodo se calcula mediante la técnica de medida de exploración del campo cercano (NFS).

III.3.2 Aparato de pruebas

III.3.2.1 Fuente de luz (como en 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.3.2.2 Modulación (como en 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.3.2.3 Condiciones de inyección (como en 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.3.2.4 Supresor de modos de revestimiento (como en 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.3.2.5 Espécimen (como en 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.3.2.6 Aparato de exploración (como en 5.1.3.2.6/G.650.1)

III.3.2.7 Detector (como en 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.3.2.8 Amplificador (como en 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.3.2.9 Registro de datos (como en 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.3.3 Procedimiento de medición

El extremo de inyección de la fibra debe coincidir con el haz inyector, y el extremo de salida de la fibra debe coincidir con el correspondiente dispositivo de salida.

El área efectiva (A_{eff}) se calcula mediante las ecuaciones III-11 a III-15.

III.3.3.1 Calibración del equipo

Para conseguir la calibración del equipo, se mide el grado de amplificación del dispositivo óptico de amplificación explorando la longitud de una fibra espécimen cuyas dimensiones son conocidas de antemano con la precisión necesaria. Se registra el grado de amplificación.

III.3.3.2 Cálculos

III.3.3.2.1 Ecuaciones y figuras para el cálculo del área efectiva (A_{eff})

1) Se calcula el centroide

Para una determinada sección del diagrama de campo cercano (NFC) de dimensiones máximas, cuyos valores de posición vienen dados por r y los valores de intensidad por $I(r_i)$, la posición del centroide r_c , viene dada por:

$$r_c = \frac{\sum r_i I(r_j)}{\sum I(r_i)} \quad (\text{III-11})$$

2) Se calcula el perfil de intensidad por superposición

Se vuelven a indexar los datos de posición y de intensidad alrededor de la posición r_c de tal forma que las posiciones por encima tengan valores de índice mayores de cero y las posiciones por debajo tengan valores de índice menores de cero. El índice máximo viene dado por n . El perfil de intensidad por superposición es:

$$I_f(r_i) = \{I(r_i) + I(r_{-i})\} / 2 \quad (\text{III-12})$$

3) Se calculan las integrales de la ecuación III-12

Se utilizará un método de integración numérica adecuado para calcular las integrales de la ecuación III-12. A continuación se presenta un ejemplo. Cualquier otro método de integración debe ser al menos tan preciso como éste.

$$T = \left[\sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{III-13})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{III-14})$$

donde $\Delta r = r_1 - r_0$

4) *Se termina el cálculo*

$$A_{eff} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{III-15})$$

En la figura III.7 se presenta un ejemplo de diagrama de campo cercano calculado.

III.3.4 Presentación de los resultados

Se debe presentar la información siguiente:

- a) Configuración de la prueba, margen dinámico del sistema de medición, algoritmos de procesamiento y una descripción del montaje empleado para la apertura (incluida la apertura numérica).
- b) Condiciones de inyección.
- c) Longitud de onda y anchura espectral FWHM de la fuente.
- d) Identificación y longitud de la fibra.
- e) Tipo de supresor de modos de revestimiento.
- f) Tipo y dimensiones del detector.
- g) Temperatura de la muestra y condiciones ambientales (cuando sea necesario).
- h) Indicación de la precisión y repetibilidad.
- i) Área efectiva (A_{eff}).
- j) Gráfico de $A_{eff}(\lambda)$ (si se requiere).

Apéndice IV

Información sobre estadísticas de la dispersión por modo de polarización

Este apéndice tiene por objeto resumir algunos de los cálculos estadísticos de la dispersión por modo de polarización (PMD). En CEI 61282-3 se documentan con mayor detalle los cálculos y la teoría aplicada. Este apéndice se estructura como sigue:

- Introducción.
- Registro de datos.
- Cálculo de PMD_Q (Monte Carlo).
- Cálculo de $DGD_{m\acute{a}x}$ (Monte Carlo).

NOTA – En CEI 61282-3 se definen y utilizan otros métodos de cálculo. En este apéndice se aplica el método de Monte Carlo por ser el de más fácil descripción.

IV.1 Introducción

La dispersión por modo de polarización (PMD) es un atributo estadístico que se define, para una fibra determinada, como el promedio de los valores del retardo diferencial de grupo (DGD, *differential group delay*) para una gama de longitudes de onda. Dado que los valores de DGD son aleatorios en el tiempo y la longitud de onda, es más bajo el límite teórico de reproducibilidad que puede conseguirse para el valor de $PMD \pm 15\%$ aproximadamente. Por eso no es adecuado seleccionar determinadas fibras o cables según una especificación que es más estricta que la propia capacidad del proceso. Esta forma de selección puede ser apropiada para atributos determinísticos, como la atenuación, pero no lo es en general para la PMD. Ello significa que es más razonable disponer de una especificación de la distribución global del proceso.

Una segunda consideración relativa a la funcionalidad de la PMD es que las degradaciones del sistema para un instante y una longitud de onda dados están controladas por el valor de DGD, que varía estadísticamente alrededor del valor de PMD. Si para una fibra cableada en particular se dispone del valor de PMD, puede calcularse la probabilidad de que DGD exceda de un valor dado. No obstante, es patente que la aplicación de estas fórmulas a un valor máximo especificado produce una visión muy inexacta del comportamiento real del sistema. Sin embargo, con una especificación estadística basada en la PMD se puede obtener un límite estadístico de los valores de DGD para todo el sistema. Este límite, definido en términos de probabilidad, conduce a un valor que se utiliza en el diseño del sistema y que es aproximadamente un 20% inferior al valor de DGD y dos órdenes de magnitud inferior a los valores que se obtendrían sin utilizar una especificación estadística.

Debido a la primera consideración, es conveniente definir una sola métrica estadística para la distribución de los valores de PMD medidos en cables de fibra óptica. Por tanto, la métrica debe incorporar ambos aspectos, a saber, la media y la variabilidad del proceso. La métrica es precisamente el límite de confianza superior para un nivel de probabilidad.

Es bien conocido que el coeficiente de PMD de un conjunto de cables concatenados puede ser estimado mediante el cálculo del valor cuadrático medio de los coeficientes de PMD de cada cable. Para que la medida del límite de confianza superior tenga un significado más preciso para la aplicación, se calcula el límite superior de un enlace concatenado formado por 20 cables. Este número de secciones de cable es inferior al utilizado en la mayoría de los enlaces, pero es suficientemente grande para permitir la estimación de distribuciones de DGD en enlaces concatenados. También se ha normalizado un valor de probabilidad del 0,01%, parcialmente sobre la base de obtener la equivalencia con la probabilidad de que el DGD rebese un límite que debe ser muy bajo. El límite de confianza superior se denomina PMD_Q , o valor de diseño del enlace, y este tipo de especificación se denomina método 1.

El límite de probabilidad para DGD se fija en $6,5 \cdot 10^{-8}$ en función de varias consideraciones del sistema, incluida la presencia en los enlaces de otros componentes que generan PMD. En CEI 61282-3 se describe un método para determinar un máximo (definido en términos de probabilidad), de tal forma que si una distribución cumple los requisitos del método 1, el DGD a lo largo de enlaces formados exclusivamente por cables de fibra óptica será superior al valor máximo de DGD con una probabilidad inferior a $6,5 \cdot 10^{-8}$. El valor $DGD_{\text{máx}}$ se establece para una amplia gama de formas de la distribución. Este método para la especificación de la distribución de la PMD de cables de fibra óptica basado en el $DGD_{\text{máx}}$, se conoce como método 2. En CEI 61282-3 se presentan algunos métodos para combinar los parámetros del método 2 con los de otros componentes ópticos.

El método 1 está basado en lo que se mide, por lo que es un poco más directo para ser utilizado como requisito normativo en transacciones y en el comercio en general. El método 2 es un medio de extrapolar las implicaciones para el diseño del sistema y, por tanto, se incluye como información para el diseño del mismo.

IV.2 Registro de datos

Los cálculos se realizan con valores de PMD que son representativos de una determinada construcción de cable y de un periodo de fabricación. Normalmente, se requieren 100 valores y la muestra se toma de distintos cables en producción y en distintas ubicaciones de fibras en los cables.

La distribución del cable se puede ampliar mediante mediciones de fibras no cableadas, siempre que exista una relación estable entre la fibra no cableada y los valores de cable para un tipo de construcción dado. Un medio de ampliación es obtener varios valores posibles para el cable a partir del valor de cada fibra no cableada. Estos diferentes valores deben ser seleccionados de forma aleatoria para representar la relación habitual y la variabilidad derivada, por ejemplo, de la reproducibilidad de las mediciones. Dado que la gama de variaciones incluye un error de reproducibilidad, este método de estimar la distribución de los valores de PMD del cable puede dar una sobreestimación del valor de PMD_Q .

La longitud de las muestras medidas podría influir en los resultados del método 2. Tras estudiar este asunto, se ha llegado a la conclusión siguiente. Las implicaciones del método 2 son válidas para cualquier enlace de menos de 400 km siempre que:

- las secciones de cable instaladas sean menores de 10 km; o
- las longitudes medidas sean menores de 10 km.

IV.3 Cálculo de PMD_Q (Monte Carlo)

En CEI 61282-3 se presentan otros métodos de cálculo. A continuación se describe el método de Monte Carlo porque es el más sencillo y emplea el menor número de hipótesis.

Los valores medidos de los coeficientes de PMD se representan por x_i , siendo i de 1 a N , el número de mediciones realizadas. Estos valores se utilizan para generar 100 000 valores de coeficientes de PMD de enlaces concatenados, calculado cada uno con el valor cuadrático medio de los 20 valores de cable individuales seleccionados aleatoriamente de la población muestral.

NOTA – Si $N = 100$, existen $5,3 \cdot 10^{20}$ posibles valores de enlaces.

Se seleccionan 20 números aleatorios comprendidos entre 1 y N , para cada cálculo de valor de enlace, y se asigna a cada uno un índice k . El coeficiente de PMD del enlace, y , se calcula de esta forma:

$$y = \left(\frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} x_k^2 \right)^{1/2} \quad (\text{IV-1})$$

Se registran los 100 000 valores de y en un histograma de alta densidad según se van calculando. Una vez completado dicho cálculo, se calcula la función de probabilidad acumulada del histograma para determinar el valor de PMD asociado con un nivel del 99,99%. Este valor se denomina PMD_Q . Si el valor calculado de PMD_Q es menor que el valor especificado (0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$), se considera que la distribución pasa la prueba según el método 1.

IV.4 Cálculo para $DGD_{\text{máx}}$ (Monte Carlo)

Este cálculo se basa a su vez en el cálculo de PMD_Q . Se predefine un valor de $DGD_{\text{máx}}$ (a 25 ps) y se calcula la probabilidad, P_F , de que se rebase dicho valor. Si la probabilidad calculada es inferior al valor especificado ($6,5 \cdot 10^{-8}$), la distribución pasa la prueba según el método 2.

Antes de iniciar el procedimiento de Monte Carlo, se calcula el límite del coeficiente de PMD, $P_{\text{máx}}$, como sigue:

$$P_{\text{máx}} = \frac{DGD_{\text{máx}}}{\sqrt{L_{\text{ref}}}} = \frac{25}{20} = 1,25$$

Para los siguientes pares de valores de concatenación, y_j e y_{j+1} , correspondientes a enlaces de 20 cables, se genera un valor de concatenación, z_j correspondiente a enlaces de 40 cables:

$$z_j = \left(\frac{y_j^2 + y_{j+1}^2}{2} \right)^{1/2} \quad (\text{IV-2})$$

NOTA – Con ello se generan 50 000 valores de z_j , que constituye un número adecuado.

Se calcula la probabilidad de que se rebase $DGD_{\text{máx}}$ en la concatenación j -ésima de enlaces de 40 cables, p_j , como sigue:

$$p_j = 1 - \int_0^{P_{\text{máx}}/z_j} 2 \left(\frac{4}{\pi} \right)^{3/2} \frac{t^2}{\Gamma(3/2)} \exp \left[-\frac{4}{\pi} t^2 \right] dt \quad (\text{IV-3})$$

En la hoja de cálculo Excell™ existe una función que puede calcular p_j , la función GAMMADIST(X, ALFA, BETA, Acum). La llamada a esta función se hace de la forma siguiente:

$$PJ = 1 - \text{GAMMADIST}(4 * P_{\text{MAX}} * P_{\text{MAX}} / (\text{PI}() * ZI * ZI), 1,5, 1, \text{TRUE}) \quad (\text{IV-4})$$

La probabilidad de que se rebase $DGD_{\text{máx}}$, P_F , es:

$$P_F = \frac{1}{50000} \sum_j p_j \quad (\text{IV-5})$$

Si P_F es menor que el valor especificado, la distribución pasa la prueba según el método 2.

SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedia
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedia
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	Gestión de las telecomunicaciones, incluida la RGT y el mantenimiento de redes
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos, comunicaciones de sistemas abiertos y seguridad
Serie Y	Infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo Internet y Redes de la próxima generación
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación