Verificació i monitoratge de xarxes òptiques

Josep Maria Fàbrega
Simó Graells

PID_00175698

UOC
Universitat Oberta de Catalunya

Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars del copyright.

Índex

1. Reflectometria en el domini temporal 5
1.1. Principi de funcionament de l'OTDR 5
1.1.1. Diagrama de blocs de l'OTDR 6
1.1.2. Casos d'utilització de l'OTDR 6
1.2. Mesures reflectomètriques 7
1.2.1. Paràmetres de mesura 7
1.2.2. Estudi de la traça de l'OTDR 8
1.2.3. Mesures en els esdeveniments 10
1.2.4. Anomalies en la mesura 11
1.3. Característiques tècniques de l'OTDR i la seva influència en la mesura 14
1.3.1. Especificacions de l'OTDR 14
1.3.2. Tipus d'OTDR 17
1.3.3. Millora de les mesures reflectomètriques 18

2. Monitoratge de prestacions de senyals òptics 20
2.1. Relació senyal-soroll òptica 20
2.1.1. Anàlisi d'espectre 21
2.1.2. Tècniques de polarització 22
2.1.3. Tècniques interferomètriques 25
2.1.4. Altres tècniques 26
2.2. Dispersió cromàtica 27
2.2.1. Mesura amb to radiofreqüència 27
2.2.2. Mesura del retard en dues bandes vestigials 29
2.2.3. Histograma 30
2.2.4. Monitoratge electrònic 31
2.3. Dispersió en el mode de polarització 32
2.3.1. Monitoratge amb to RF 32
2.3.2. Mesura del DOP 35
2.3.3. Monitoratge electrònic 36

Bibliografia 39

1. Reflectometria en el domini temporal

1.1. Principi de funcionament de l'OTDR

El reflectòmetre òptic en el domini temporal (OTDR) és un instrument de mesura fonamental per a l'anàlisi dels enllaços de fibra òptica.

Nota

El reflectòmetre òptic en el domini temporal se'l coneix en anglès com a *optical time domain reflectometer* (OTDR).

L'OTDR permet analitzar les propietats de l'enllaç, detectar, localitzar i mesurar els esdeveniments produïts en qualsevol punt de la fibra i localitzar possibles anomalies. La gràfica de la mesura reflectomètrica representa l'atenuació de la fibra al llarg de la seva longitud, i permet extreure algunes de les característiques dels components que formen l'enllaç.

Són casos habituals d'utilització de l'OTDR el test posterior a la instal·lació, el test de manteniment preventiu o la localització de fallades en l'enllaç de fibra òptica.

És important saber analitzar i interpretar correctament els resultats de les mesures realitzades amb l'OTDR. En alguns casos, els OTDR poden interpretar de manera errònia els esdeveniments a causa d'una configuració inadequada dels seus paràmetres. Per aquest motiu, en la validació d'enllaços de fibra és necessària la intervenció d'un expert capaç d'interpretar i analitzar les gràfiques resultants de l'OTDR. La seva funció és estudiar cadascun dels esdeveniments, identificar-los, determinar si és justificada la seva presència i comprovar que els seus valors es troben dins els marges acceptables.

El funcionament de l'OTDR es basa a detectar i representar el senyal que retorna a l'aparell després d'haver injectat un pols de llum a la fibra. En funció del temps transcorregut des de la transmissió del pols i la detecció de la llum reflectida, l'OTDR pot calcular la distància a la qual es troba la imperfecció o fenomen. Això és possible a causa de dues propietats òptiques de la fibra:

- **Dispersió de Rayleigh**. Es deu a la presència de irregularitats en la fibra que apareixen durant el procés de fabricació. La llum que incideix en les irregularitats es dispersa en totes direccions, i a conseqüència d'això el senyal òptic que travessa la fibra és atenuat. A mes, una part de la potència dispersada s'acobla al mode fonamental de la fibra, en sentit invers a la propagació del senyal, retornant cap a l'OTDR. Aquest fenomen de reflexió de llum cap a l'OTDR rep el nom de *backscattering*.
  Els fabricants de fibra òptica minimitzen l'efecte de la dispersió de Rayleigh reduint la mida de les imperfeccions. Això és possible fent un refredament més lent de la fibra en el procés de fabricació.

Nota

La dispersió de Rayleigh és un fenomen intrínsec de la fibra que ocorre de manera uniforme al llarg de tota la seva longitud, mentre que les reflexions de Fresnell són esdeveniments que ocorren en l'enllaç de fibra de manera puntual.

- **Reflexió de Fresnel**. Quan la llum que viatja per la fibra òptica es troba amb una discontinuïtat en l'índex de refracció, una petita part d'aquesta és reflectida de nou cap a l'OTDR. Aquest fenomen es coneix com a reflexió de Fresnel. En un enllaç, la quantitat de llum reflectida per aquest motiu és aproximadament d'un 4%.

1.1.1. Diagrama de blocs de l'OTDR

La figura següent mostra, de manera esquemàtica, els elements que formen part de l'OTDR:

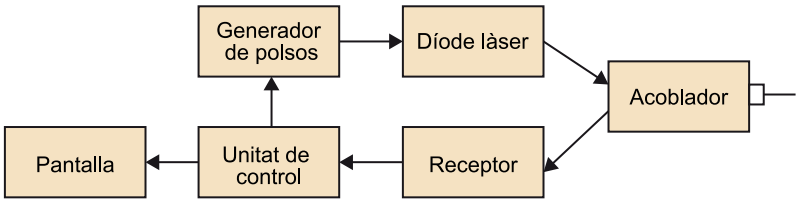

Figura 1. Diagrama de blocs d'un OTDR

El díode làser és l'encarregat de transformar el senyal elèctric a senyal òptic que serà transmès cap a la fibra. El làser està alimentat per un generador de polsos. Els polsos que genera es caracteritzen per la seva amplada (durada) i la freqüència de repetició.

L'acoblador òptic separa el senyal enviat cap a la fibra òptica del que retorna. A través de l'acoblador, el senyal procedent del díode làser serà inserit a la fibra, mentre que el senyal procedent de la fibra serà dirigit cap al fotodíode. Alguns OTDR, en lloc d'usar un acoblador òptic, utilitzen un circulador òptic amb l'objectiu d'augmentar el seu marge dinàmic.

El receptor utilitzat per l'OTDR acostuma a ser un fotodíode d'allau (APD) i la seva funció és convertir la llum procedent de la fibra òptica en energia elèctrica.

Una vegada l'OTDR, a través del fotodíode, ha rebut el senyal procedent de la fibra, aquest és mostrejat i digitalitzat. Les mostres, que inicialment es troben en el domini temporal, es passen a distàncies utilitzant l'índex de refracció de la fibra. La unitat de control processa les mostres adquirides i, finalment, el resultat obtingut es representa a la pantalla de l'OTDR.

1.1.2. Casos d'utilització de l'OTDR

Els OTDR són instruments versàtils, que permeten un ventall molt ampli de mesures:

- Mesura de la longitud de l'enllaç.
- Mesura de les pèrdues de la totalitat del sistema (d'extrem a extrem).

Referència bibliogràfica

HP 8147 Optical Time Domain Reflectometer. User's Guide (1997). Hewlett-Packard.

- Mesura de les pèrdues introduïdes per les unions, connectors, etc.
- Mesura de les reflexions en connectors, unions mecàniques...
- Localització de ruptures de la fibra òptica i defectes.
- Verificació del correcte alineament entre els dos segments d'una unió.
- Detecció de la degradació sobtada o gradual de la fibra òptica.
- Mesura de les pèrdues de retorn tant d'un sistema de fibra òptica, com de components discrets.
- Mesura de l'atenuació de la fibra (dB/km).
- Monitoratge actiu dels sistemes de fibra òptica.

1.2. Mesures reflectomètriques

En realitzar una mesura reflectomètrica cal tenir especial cura en l'elecció dels paràmetres de configuració de la mesura i en l'anàlisi de la traça obtinguda.

1.2.1. Paràmetres de mesura

1) Nivell d'injecció. El nivell d'injecció és el nivell de potència òptica que l'OTDR injecta a la fibra. Hi ha una relació directa entre aquest paràmetre, el marge dinàmic i la precisió de la mesura. Com més gran sigui el nivell de potència transmès, més gran serà el nivell de retorn del senyal i, per tant, tindrem un marge dinàmic més gran. Però cal tenir en compte que nivells alts de potència poden causar l'aparició de no-linealitats en la fibra òptica.

2) Amplada del pols. La quantitat de llum que s'injecta a la fibra és proporcional a l'amplada del pols. Polsos de durada elevada tenen una energia alta i, per tant, tenim més retorn de senyal en fer la mesura. Com més duració del pols, més gran és la distància que es pot mesurar. Però com a desavantatge augmenta la zona morta i disminueix la resolució.

3) Distància. És la distància sobre la qual l'OTDR farà la mesura. Distàncies excessivament grans disminuiran la resolució de la traça, mentre que distàncies excessivament curtes no permetran visualitzar l'enllaç complet.

4) Mitjana. Per tal de disminuir la relació senyal-soroll, cada punt d'adquisició es mostreja repetidament i es fa la mitjana dels resultats.

5) Longitud d'ona. És la longitud d'ona on es realitzarà la mesura. El comportament de la fibra i dels components òptics varia amb la longitud d'ona.

6) Paràmetres de la fibra. Per tal de calcular d'una manera acurada els resultats de distància, pèrdues, etc. cal introduir paràmetres propis de cada fibra òptica com són l'índex de refracció i el coeficient de retrodifusió.

7) Llindar dels esdeveniments. En la detecció automàtica d'esdeveniments, l'OTDR necessita un valor llindar per a decidir si es tracta d'un esdeveniment o no.

1.2.2. Estudi de la traça de l'OTDR

La traça de OTDR és la representació gràfica, en unitats logarítmiques, de la potència del senyal retornat pel *backscattering* i les reflexions de Fresnel que rep l'OTDR en funció de la distància.

Els elements que trobem més habitualment en una traça de l'OTDR són els següents:

1) Tram de fibra

La potència rebuda per l'OTDR anirà disminuint a mesura que el pols es propaga per la fibra. Això és degut al fet que la potència *backscattering* és proporcional a la potència incident, i aquesta es va atenuant a mesura que avança per la fibra. Per tant, la traça de la mesura reflectomètrica d'un tram de fibra es representa amb una recta decreixent.

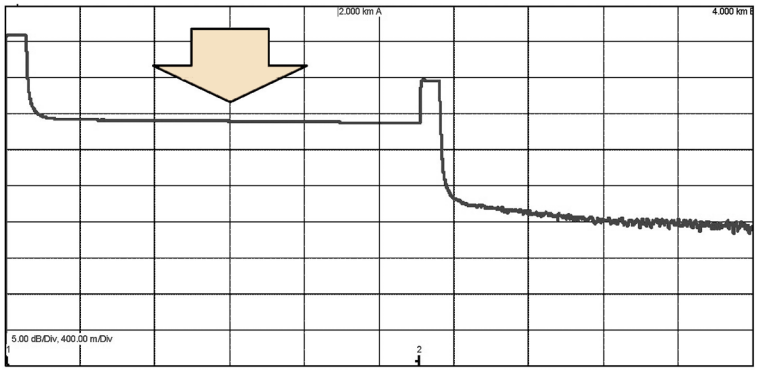

Figura 2. Representació d'un tram de fibra a la traça de l'OTDR

Nota

Cal notar que algunes de les mesures mostrades en aquest apartat empren una amplada de pols elevada, cosa que provoca la saturació del receptor i, per tant, l'augment de la zona morta. La finalitat d'això es suavitzar la traça alhora que s'exageren els esdeveniments reflexius. En una mesura acurada sobre les mateixes xarxes seria convenient reduir l'amplada del pols.

2) Esdeveniments reflexius

Les reflexions són produïdes per canvis en l'índex de refracció del medi de propagació. En els connectors i les unions mecàniques normalment apareixen esdeveniments reflexius a causa de l'existència d'un petit espai entre les fibres unides.

Una reflexió es presenta sobre la traça de l'OTDR com una forma de pic de potència rebuda, seguida d'un descens després del qual es recupera aproximadament el nivell de *backscattering* previ. L'amplada d'aquest pic està relacionada directament amb la durada temporal del pols injectat a la fibra.

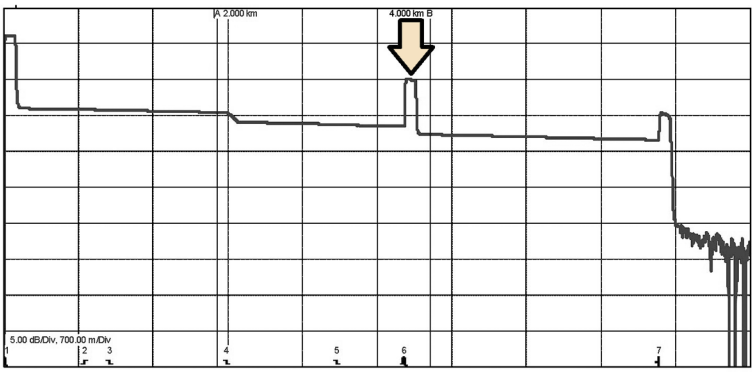

Figura 3. Representació d'un esdeveniment reflexiu a la traça de l'OTDR

3) Esdeveniments no reflexius

Un esdeveniment no reflexiu es tracta d'una caiguda brusca del nivell de senyal de *backscattering* i es presenta a la traça de l'OTDR com una discontinuïtat en forma de graó descendent. Aquest tipus d'esdeveniments no presenten reflexió, però sí pèrdues puntuals. Els elements que poden provocar aquests esdeveniments són connexions de fusió i les curvatures en la fibra.

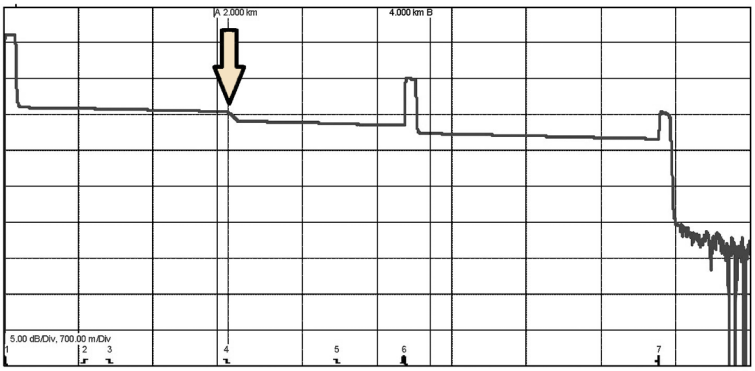

Figura 4. Representació d'un esdeveniment no reflexiu a la traça de l'OTDR

4) Final de fibra

El final de fibra es caracteritza per un descens ràpid del nivell de retrodifusió fins a assolir el nivell de soroll de l'OTDR.

En funció de si es produeix o no reflexió just abans del descens de senyal podem conèixer l'estat de l'extrem final de la fibra. Si apareix una reflexió indica un final de fibra amb un tall de fibra controlat o amb un connector. En canvi, si no apareix una reflexió, pot ser que tinguem una ruptura.

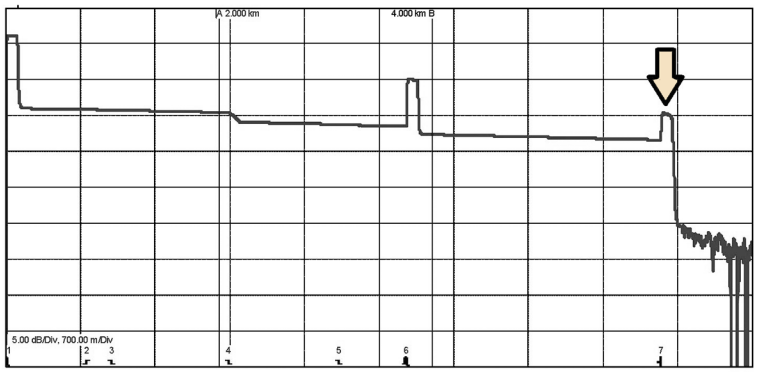

Figura 5. Representació del final de fibra a la traça de l'OTDR

1.2.3. Mesures en els esdeveniments

A través de l'estudi de la traça per a cada esdeveniment es pot obtenir informació de les pèrdues d'inserció, la reflectància i la seva localització. En fer l'estudi per a un tram de fibra podem obtenir informació sobre la longitud del tram, les pèrdues en el tram de fibra o el coeficient d'atenuació de la fibra (dB/km).

Referència bibliogràfica

Optical Time Domain Reflectometers. Pocket Guide (2001). Agilent Technologies Deuschland.

Ara veurem com es realitzen algunes d'aquestes mesures.

1) Pèrdues en un tram de fibra

La diferència en dB entre la potència mesurada en dos punts qualsevol de la fibra ens proporciona l'atenuació del tram entre els dos punts.

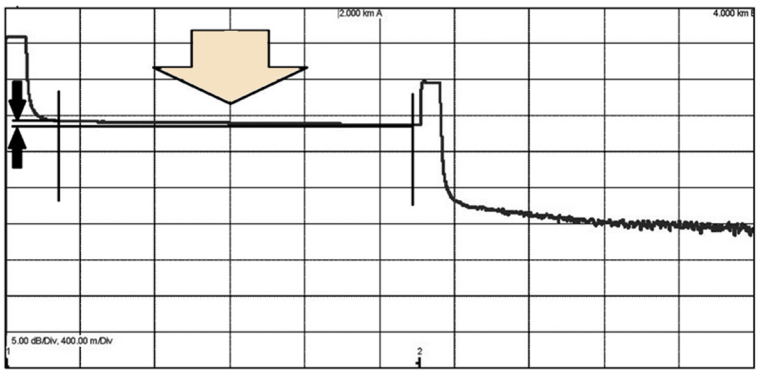

Figura 6. Mesura de les pèrdues en un tram de fibra

Dividint la pèrdua d'un tram amb només fibra per la distància entre els dos punts, podem trobar el coeficient d'atenuació de la fibra, que habitualment s'expressa en dB/km.

2) Pèrdues d'inserció

Per a calcular les pèrdues d'inserció podem diferenciar dos mètodes:

- **Mètode dels dos punts**. En aquest mètode es calcula la pèrdua d'inserció a partir de la diferència dels nivells de potència anterior i posterior a l'esdeveniment.

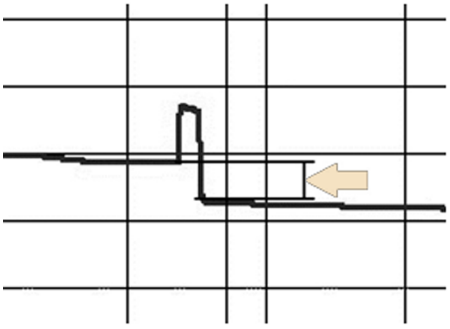

Figura 7. Mesura de les pèrdues d'inserció mitjançant el mètode dels dos punts

S'ha de tenir en compte que el resultat de la mesura, a més de la pèrdua real de l'esdeveniment, inclou els efectes de les pèrdues de la fibra entre els dos punts (la distància entre aquests no és zero).

- **Mètode per mínims quadrats**. Aquest mètode és més precís que el mètode dels dos punts. Primerament es calcula el pendent del senyal de retrodifusió en els trams de fibra anterior i posterior a l'esdeveniment utilitzant el mètode d'aproximació per mínims quadrats (LSA), el qual determina la línia d'atenuació que més s'aproxima a un conjunt de punts adquirits.
  A continuació s'allarguen les dues rectes fins al punt on es localitza el començament de l'esdeveniment. La pèrdua d'inserció es calcularà com la diferència entre els dos nivells de *backscattering* en aquest punt.

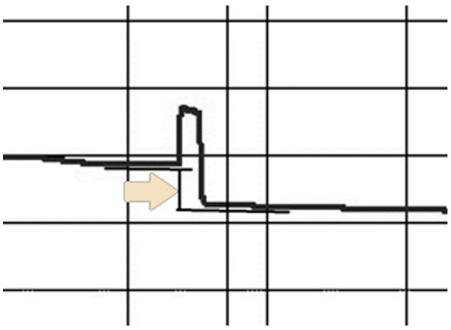

Figura 8. Mesura de les pèrdues d'inserció mitjançant el mètode per mínims quadrats

1.2.4. Anomalies en la mesura

A més dels esdeveniments que habitualment es presenten en les mesures i que, per tant, són previsibles, també poden succeir esdeveniments imprevisibles. Aquest tipus d'esdeveniments poden ser ecos, esdeveniments fantasma, de guany, ocults. També es coneixen com a esdeveniments que constitueixen una anomalia en la mesura, i és important identificar-los i eliminar-los.

1) Ecos

Els ecos són esdeveniments que apareixen a la traça, però que no es corresponen a esdeveniments reals. Els ecos són deguts a les múltiples reflexions d'un esdeveniment reflexiu. Si no s'identifiquen correctament els ecos, es cometen errors importants en la interpretació de la mesura.

Les característiques que ajuden a la identificació dels ecos són el fet que no tenen pèrdua associada i que la seva localització es pot relacionar amb la dels altres elements reflexius de la traça.

Els ecos poden aparèixer enmig del traçat de la fibra o després del final, a la zona de soroll.

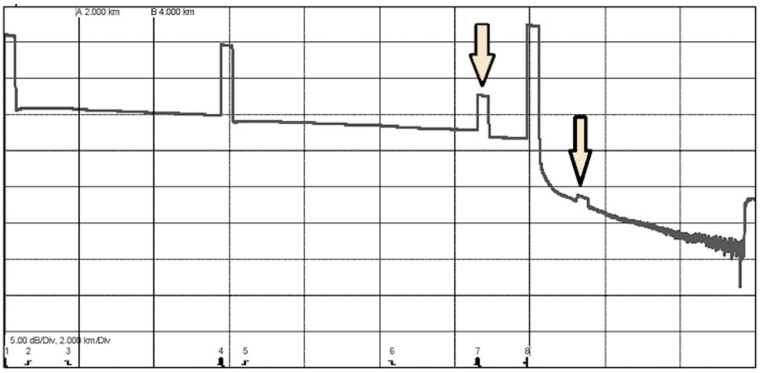

Figura 9. Representació d'ecos a la traça de l'OTDR

2) Esdeveniments fantasma

Els esdeveniments fantasma són molt similars als ecos però la seva causa és diferent. Aquests es deuen a una selecció incorrecta dels paràmetres de mesura, concretament, per a emprar una freqüència de repetició del pols massa elevada.

Es pot donar el cas que la reflexió que indica el final de fibra no hagi arribat al receptor quan es transmet el pols següent. En aquest moment s'inicia una nova adquisició de dades i la reflexió del final de fibra del primer pols es representa com un esdeveniment reflexiu.

La identificació dels esdeveniments fantasma es pot realitzar modificant els paràmetres de mesura. Si, en fer això, l'esdeveniment es desplaça de posició o desapareix, es tractarà d'un esdeveniment fantasma.

Per tal d'evitar els esdeveniments fantasma, hem de baixar la taxa de repetició del pols o augmentar el marge de la distància de l'OTDR.

3) Esdeveniments de guany

Aquesta anomalia es representa com una amplificació o increment de llum fictícia en la traça de l'OTDR.

Un esdeveniment de guany es dóna en una unió de dos trams de fibra i pot ser degut al següent:

- Un mal aparellament de les dues fibres amb diferents obertures numèriques.
- El segon tram de fibra presenta un coeficient de *backscattering* més gran.
- Les dues fibres presenten diferents diàmetres del nucli.
- Les dues fibres presenten diferents diàmetres efectius.

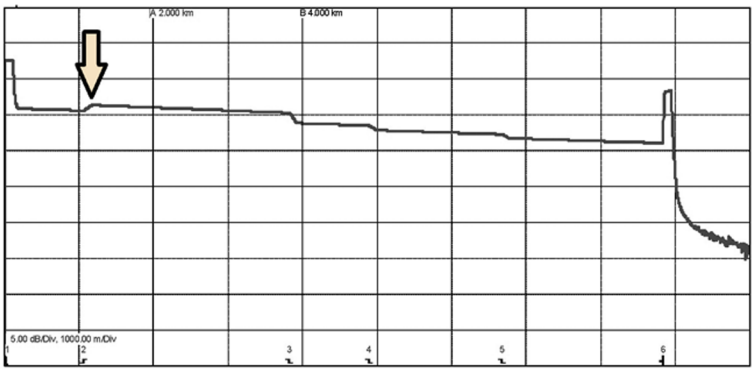

Figura 10. Representació d'un esdeveniment de guany a la traça de l'OTDR

Si repetim la mesura reflectomètrica des de l'extrem contrari (des del final de fibra), el resultat en la unió serà una pèrdua en lloc d'un guany.

4) Esdeveniments ocults

Aquesta anomalia està relacionada amb la zona morta de l'OTDR i la distància entre els esdeveniments. Quan arriba al receptor de l'OTDR una forta reflexió, aquest se satura durant un cert període de temps i impossibilita una mesura precisa. Aquest període de temps és el que es coneix com a zona morta.

Si la distància entre dos esdeveniments és menor que la zona morta, el segon esdeveniment no es podrà diferenciar, ja que quedarà ocult dins del primer.

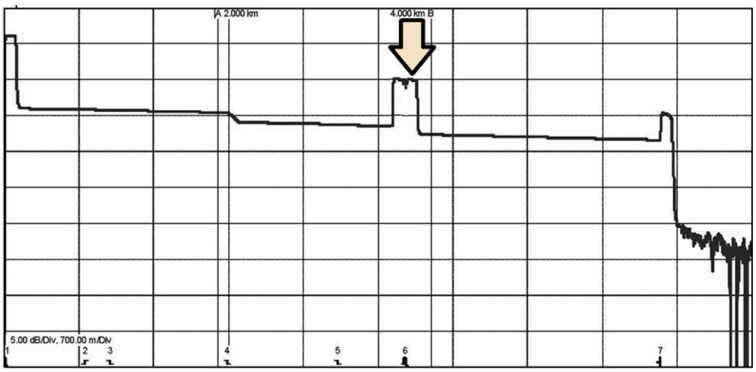

Figura 11. Representació d'un esdeveniment ocult a la traça de l'OTDR

5) Error d'òfset

Els OTDR utilitzen convertidors analògics digitals per a convertir el senyal analògic del receptor òptic en senyal digital, per a així poder processar-lo i mostrar-lo.

Els convertidors tenen un òfset que provoca que la traça variï quan el senyal retrodispersat s'apropa al nivell del soroll. L'efecte provocat es coneix com a *roll-off*, provoca errors en les mesures que es fan prop del final de la fibra.

Figura 12. Representació de l'error d'òfset a la traça de l'OTDR

1.3. Característiques tècniques de l'OTDR i la seva influència en la mesura

1.3.1. Especificacions de l'OTDR

1) Marge dinàmic de reflexió

El marge dinàmic de reflexió es defineix com la relació entre la potència reflectida en una reflexió del connector del panell frontal de l'OTDR i la potència de soroll. Aquest paràmetre s'expressa en dBs.

Alguns OTDR presenten problemes de saturació quan els arriba un excés de senyal procedent d'esdeveniments molt reflexius. El marge dinàmic de reflexió indica quins són els límits de mesura de l'OTDR en les reflexions.

Per tal de realitzar aquesta mesura cal desconnectar la fibra de l'OTDR i començar el procés d'adquisició. Una vegada finalitzada la mesura cal col·locar un cursor en la part superior de la reflexió adquirida i l'altre cursor en el nivell de soroll de l'OTDR. Finalment es mesura la diferència de nivell entre els dos cursors.

2) Marge dinàmic de *scattering*

El marge dinàmic de *scattering* (o simplement marge dinàmic) és la relació entre la potència del senyal de *backscattering* després del connector del panell frontal i la potència del nivell de soroll de l'OTDR. Per tant, el marge dinàmic de *scattering* indica la pèrdua òptica total que l'aparell pot analitzar, que es relaciona amb la màxima longitud de fibra que l'aparell ens permet mesurar.

El marge dinàmic depèn de l'amplada del pols, el temps d'adquisició i l'amplada de banda de l'OTDR. Com més amplada de pols, més energia del pols tindrem i més gran serà el marge dinàmic. Com més temps d'adquisició, s'amitjanaran més punts de mostreig, el nivell de soroll disminuirà i augmentarà el marge dinàmic. Com menys amplada de banda de l'OTDR, més baix serà el nivell de soroll i, per tant, tindrem més marge dinàmic.

Per a mesurar el marge dinàmic cal connectar una fibra a l'OTDR. La distància d'anàlisi de l'OTDR hauria de ser més gran que la fibra emprada. Seleccionem l'amplada del pols i el temps d'adquisició desitjat per a mesurar el marge dinàmic. Després d'adquirir la forma d'ona, col·loquem un cursor justament després de la reflexió del connector del panell frontal de l'OTDR i l'altre cursor en el nivell de soroll. Finalment, trobem el marge dinàmic *scattering* mesurant diferència de nivell entre els dos cursors.

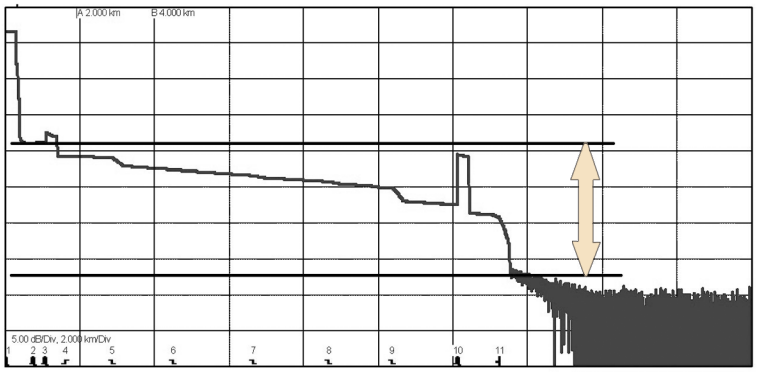

Figura 13. Mesura del marge dinàmic de *scattering*

3) Zona morta

La zona morta és aquella distància en què no es poden conèixer les característiques de la fibra perquè l'OTDR ha rebut un esdeveniment altament reflexiu i el seu circuit de detecció s'ha saturat.

Depèn de l'amplada del pols transmès, de la reflectància de l'esdeveniment reflectiu i del mateix OTDR. Com més gran sigui l'amplada del pols, més potència reflectida retornarà de l'esdeveniment i més gran serà la zona morta. A més, esdeveniments amb altes reflectàncies produeixen zones mortes més grans.

Es defineix zona morta de l'esdeveniment com la distància entre la vora anterior de la reflexió i el punt en la vora de caiguda, on el nivell del senyal cau 3 dB per sota del màxim de la reflexió.

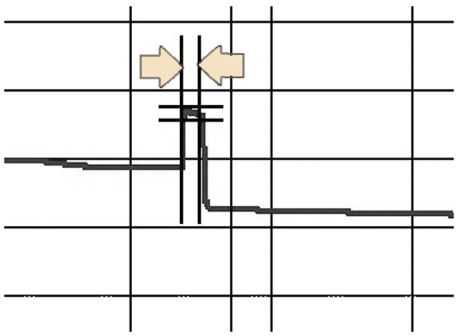

Figura 14. Mesura de la zona morta d'un esdeveniment reflexiu

La zona morta de l'esdeveniment ens aporta informació sobre la possibilitat de patir emmascaraments o esdeveniments ocults, ja que aquesta ens indica la distància a partir de la qual es poden diferenciar dos esdeveniments propers.

Es defineix la zona morta de mesura de les pèrdues (LMZD) com la distància des de la reflexió al punt on la traça de l'OTDR arriba a 0,1 dB del nivell de *backscattering*.

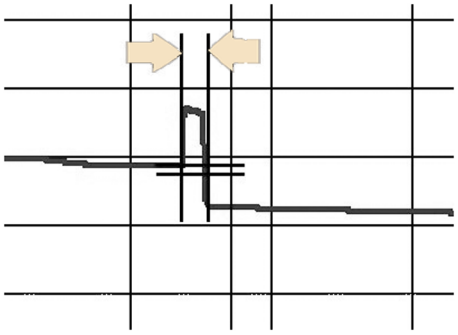

Figura 15. Zona morta de mesura de les pèrdues (LMZD)

4) Resolució de pèrdua

La resolució de pèrdua indica la mínima diferència de pèrdua que es pot mesurar entre dos nivells de potència òptica rebuda. Aquesta està definida per la resolució del circuit d'adquisició.

5) Resolució de mostreig

La resolució de mostreig es defineix com la mínima distància entre dos punts d'adquisició. Per a augmentar la resolució només cal que augmentem el nombre de punts adquirits i així reduïm la distància entre punts. La capacitat de l'OTDR per a localitzar un esdeveniment va en funció de la seva resolució de mostreig.

6) Precisió en l'atenuació (linealitat)

La linealitat del circuit d'adquisició determina la similitud entre el nivell òptic i el nivell elèctric de la mostra. La linealitat o la precisió de l'atenuació s'expressa en dB/dB.

7) Precisió en la distància

La precisió en la distància fa referència a la capacitat de determinar la distància exacta de qualsevol punt o esdeveniment al llarg de la fibra. Aquest paràmetre depèn dels factors següents:

- l'índex de refracció,
- la precisió de la base de temps,
- l'ajust d'òfset,
- l'interval de mostreig, i
- el factor d'hèlix.

És important que l'índex de refracció introduït a l'OTDR sigui el de la fibra òptica que estem mesurant, ja que l'aparell calcula la distància d'un determinat punt a partir del temps que triga a rebre el senyal reflectit. La relació entre el temps que ha trigat i la distància és la velocitat dins la fibra òptica i aquesta es calcula a partir de la velocitat de la llum en el buit i de l'índex de refracció. Per a distàncies llargues, un petit error de l'índex de refracció pot arribar a provocar errors significatius en la distància calculada. Alguns OTDR permeten definir diferents índexs de refracció en funció de la distància, això és útil si unim trams de fibra amb índexs diferents.

La precisió de la base de temps és important per a determinar el temps que es triga a rebre un pols reflectit.

L'ajust d'òfset es fa especificant que la reflexió produïda en el connector del panell frontal de l'OTDR correspongui a la distància de zero metres.

L'interval de mostreig fa referència a l'espai mínim entre mostres. En el cas en què l'inici d'un esdeveniment es trobi entre dues mostres, no es podrà determinar la seva distància de manera exacta. Si reduïm l'interval de mostreig, disminuïm l'error.

El factor d'hèlix és la relació entre la longitud de la fibra mesurada per l'OTDR i la longitud del cable. El factor d'hèlix depèn del tipus de cable, del disseny del cable i del fabricant.

1.3.2. Tipus d'OTDR

En general, hi ha dos tipus d'OTDR:

- L'OTDR de curt abast (*shorthaul*). El receptor d'aquest OTDR té una amplada de banda elevada, cosa que es tradueix en temps de transició molt

ràpids i zones mortes molt petites. Aquest tipus d'OTDR té un nivell de soroll més gran, ja que el soroll en el receptor és proporcional a la seva amplada de banda. En tenir més soroll, també tenim menys marge dinàmic. Els OTDR de curt abast utilitzen, en general, polsos més estrets per a obtenir zones mortes més petites.

- L'OTDR de llarg abast (*longhaul*). En aquest cas, l'amplada de banda del receptor està limitat, per a reduir el nivell de soroll i així augmentar el marge dinàmic. Per contra, això eleva els temps de transició del receptor i augmenta les distàncies de les zones mortes. Aquests OTDR utilitzen amplades de polsos grans per a incrementar el nivell de *backscattering*, la qual cosa augmenta el marge dinàmic, però provoca que les zones mortes siguin més grans.

1.3.3. Millora de les mesures reflectomètriques

1) Compromís dels paràmetres d'adquisició amb el marge dinàmic

En el procés de configuració de la mesura amb l'OTDR, ens trobem amb diversos compromisos que poden determinar la tria del valor d'alguns dels paràmetres d'adquisició.

En el cas de voler augmentar el marge dinàmic de l'OTDR podem augmentar el nivell del senyal de *backscattering* i/o disminuir el nivell de soroll.

- **Compromís entre el marge dinàmic i l'amplada del pols**. Augmentant l'amplada (durada) del pols, incrementarem l'energia del pols i, per tant, obtindrem un nivell de *backscattering* més gran. Per contra, un pols ample fa que la zona morta sigui elevada.
  Així, ens trobem amb un compromís entre zona morta i marge dinàmic: els polsos curts redueixen la zona morta, però provoquen un marge dinàmic petit. Els polsos llargs augmenten la zona morta, però proporcionen un marge dinàmic més gran.

- **Compromís entre el marge dinàmic i la potència del làser**. Per a augmentar el nivell del senyal de *backscattering* i així millorar el marge dinàmic, podem incrementar la potència del pols. En tenir una potència més gran, augmentem l'energia del pols de llum, sense haver de fer el pols més ample.
  Augmentar la potència del làser de l'OTDR no limita el seu funcionament, però l'augment està limitat a les especificacions de seguretat del làser i als efectes no lineals de la fibra òptica.

- **Compromís entre el marge dinàmic i l'amplada de banda del receptor**. Per a disminuir el nivell de soroll i així augmentar el marge dinàmic de l'OTDR, una possibilitat és emprar un OTDR amb una amplada de banda

del receptor petita. El principal problema és que en aquest cas l'OTDR és més lent en respondre als canvis del senyal.

- **Compromís entre el marge dinàmic i el nombre de mitjanes**. Per a disminuir el nivell de soroll i així augmentar el marge dinàmic de l'OTDR, una altra possibilitat és augmentar el nombre de mitjanes. En augmentar aquest paràmetre amitjanem el soroll i, per tant, es redueix. Per contra, augmentar el nombre de mitjanes implica augmentar el temps d'anàlisi.

2) Millora en els procediments i la configuració de mesura

- **Ús de bobines de llançament**. En una traça d'OTDR, on s'ha connectat la fibra de l'enllaç al connector del panell frontal, no podem extreure les característiques del primer connector, ja que no tenim referència prèvia al connector.
  Una bobina de llançament consisteix en un tram de fibra òptica de longitud coneguda, que es connecta entre l'OTDR i la fibra a analitzar. La utilització de la bobina ens proporciona el nivell de *backscattering* de referència necessari per a poder mesurar les pèrdues del primer connector.
  La mateixa problemàtica ocorre amb el final de fibra. Hi ha unes bobines anomenades *bobines de recepció* amb la mateixa funcionalitat que les bobines de llançament però que s'empren per a analitzar el darrer connector.

- **Mesura en els dos extrems**. Una tècnica que assegura una correcta adquisició dels esdeveniments i una fàcil identificació de les anomalies és la mesura en els dos extrems. Consisteix a realitzar una adquisició des de cadascun dels extrems i posteriorment fer una anàlisi conjunta de les dues traces.

- **OTDR amb emmascarament òptic**. Per tal de minimitzar els esdeveniments ocults es pot augmentar l'amplada de banda. Amb una amplada de banda gran obtenim una resposta més ràpida de l'OTDR, però s'incrementa la quantitat de soroll i, per tant, es redueix el marge dinàmic. Els fabricants d'OTDR incorporen una característica anomenada *emmascarament òptic*. L'emmascarament òptic minimitza els efectes negatius de les reflexions, reduint la zona morta entre dues reflexions molt properes. L'element principal de l'emmascarament òptic és la substitució de l'acoblador per un commutador òptic. En detectar-se una reflexió amb un nivell de potència elevada, el commutador desconnecta la fibra del receptor i així en prevé la saturació.

2. Monitoratge de prestacions de senyals òptics

En les xarxes òptiques de transport i alta capacitat, és molt comú que un mateix senyal òptic viatgi per diversos nodes òptics i travessi distàncies relativament llargues (entre 100 km i 1.000 km) abans d'arribar a la seva destinació. Per aquest motiu, les companyies operadores d'aquestes xarxes solen dotar-les amb una capa d'intel·ligència que implementa algoritmes capaços de gestionar de manera automàtica els múltiples camins que pot travessar un mateix senyal i, a la vegada, detectar i fer front a possibles fallades de diversos subsistemes: amplificadors òptics, filtres, mòduls d'agregació i separació de senyals, acumulació de dispersió quan el senyal viatja per diferents camins, etc. Per això es fa necessari poder monitorar la xarxa de manera més o menys continuada i detectar distorsions, degradacions, sorolls i altres anomalies.

Nota

El monitoratge de prestacions també es coneix en anglès com a *optical performance monitoring*.

En aquest apartat parlarem de les tècniques bàsiques de monitoratge dels paràmetres més comuns que defineixen la qualitat del senyal: la relació senyal-soroll òptica, l'acumulació de dispersió cromàtica i l'acumulació de dispersió en el mode de polarització.

2.1. Relació senyal-soroll òptica

La relació senyal-soroll òptica (OSNR) és un dels paràmetres més útils per a estimar la qualitat d'un senyal directament en el domini òptic. Això és perquè la podem relacionar molt fàcilment amb la probabilitat d'error de bit del senyal transmès a través d'un enllaç amplificat òpticament. A més, com que l'OSNR és transparent a la velocitat de bit i al format de modulació del senyal òptic, és un paràmetre ideal per a monitorar les prestacions dels enllaços en xarxes reconfigurables dinàmicament.

Nota

Ens referirem a la relació senyal-soroll òptica també com a OSNR, que prové de l'anglès *optical signal to noise ratio*.

De fet, podem utilitzar l'OSNR en aquest tipus de xarxes per a configurar i optimitzar-ne els enllaços, determinar les causes dels possibles problemes del sistema, configurar alarmes per degradació del senyal, activació de mecanismes de resiliència, etc. Per tant, per a poder gestionar i mantenir aquesta mena de xarxes de manera eficient, és desitjable tenir la capacitat de monitorar l'OSNR de cadascun dels canals òptics (multiplexats per divisió en longitud d'ona).

Nota

El soroll d'emissió espontània amplificada és el soroll típic associat als amplificadors òptics. El terme ASE prové de la forma anglesa *amplified spontaneous emission*.

Tradicionalment, l'OSNR es mesura fent una interpolació lineal, on mesurem la potència del soroll de l'emissió espontània amplificada (ASE) en les longituds d'ona entre canals WDM i després s'interpola a longitud d'ona del senyal. Aquesta tècnica podria estimar de manera acurada l'OSNR en un enllaç convencional punt a punt (on l'espectre de soroll és més o menys uniforme). Però en xarxes modernes reconfigurables dinàmicament, els senyals WDM s'agreguen i es desagreguen directament en la capa òptica.

Nota

WDM és el terme utilitzat per a referir-nos a la multiplexació per divisió de longitud d'ona, que és la multiplexació més comuna dins les xarxes òptiques. Concretament, WDM ve de la forma anglesa *wavelength division multiplexing*.

Per tant, cada senyal pot travessar diferents camins, tot passant per un diferent nombre d'amplificadors òptics. A més, l'espectre de soroll en aquestes xarxes pot no ser uniforme a causa del filtratge òptic inherent a diversos elements de la xarxa. Com a resultat, els nivells de soroll acumulats en aquestes xarxes poden ser diferents d'un canal a l'altre.

Per tant, el soroll ASE que roman dins l'amplada de banda del senyal (i, com a conseqüència, el veritable valor de l'OSNR) no es pot mesurar fent servir la interpolació lineal. Durant la passada dècada, molts investigadors han provat a desenvolupar tècniques capaces de monitorar el veritable valor d'OSNR (és a dir, *in-band OSNR*), en un entorn de xarxes reconfigurables. Per a aquest propòsit, és necessari diferenciar i detectar les petites components del soroll que emmascara el senyal (molt més gran). Per exemple, podem aconseguir aquesta diferenciació utilitzant les diferents característiques òptiques del senyal i el soroll. Per exemple, el soroll ASE és incoherent i no polaritzat, mentre que el senyal òptic és coherent i polaritzat. Aquí revisarem diferents tècniques de monitoratge, també les basades en aquests principis.

2.1.1. Anàlisi d'espectre

En aquesta tècnica, l'espectre del soroll ASE s'assumeix que és gairebé uniforme. Per tant, mentre no fem servir cap component que es comporti com un filtre de banda estreta, podem estimar els nivells de senyal òptic i soroll de fons a partir de l'espectre òptic mesurat.

La figura 16 mostra un espectre de senyal òptic afectat pel soroll ASE. Noteu que el nivell de soroll de fons es pot identificar fàcilment. Per tant, el nivell de soroll a la longitud d'ona d'operació d'un senyal el podem estimar interpolant a partir dels nivells de soroll mesurats a les longituds d'ona del voltant del canal d'interès. L'OSNR es pot determinar directament per la diferència (en dB) entre els nivells de senyal òptic i de soroll ASE. Amb un algoritme simple d'anàlisi de patrons es poden determinar de manera automàtica els pics (és a dir, el senyal útil) i les valls (és a dir, nivells de soroll) necessaris per a estimar l'OSNR.

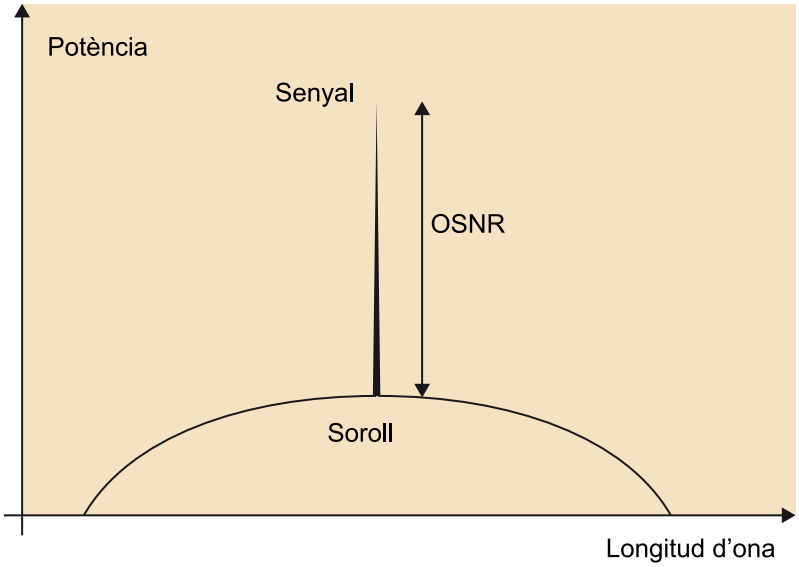

Figura 16. Espectre òptic d'un senyal afectat per soroll

2.1.2. Tècniques de polarització

Les tècniques de nul de polarització i d'anàlisi del grau de polarització es basen a assumir que els senyals útils són altament polaritzats, mentre que el soroll és completament no polaritzat. Dit d'una altra manera, els sorolls ASE tenen una distribució de potència igual per a totes les direccions possibles de polarització, mentre que el senyal òptic (útil) sol estar en un sol estat de polarització. Per tant, en les tècniques d'estimació d'OSNR basades en polarització fem ús d'aquestes propietats per a monitorar l'OSNR en la mateixa banda del senyal (evitant fer interpolació lineal). En aquesta secció introduirem el principi d'operació de les principals tècniques de monitoratge d'OSNR basades en polarització.

La figura 17 mostra el principi d'operació de la tècnica de monitoratge de nul de polarització. Un senyal òptic polaritzat de manera arbitrària es pot polaritzar a un estat concret mitjançant un control de polarització. Però aquest control de polarització no canvia l'estat de polarització del soroll ASE, atès que ve completament despolaritzat. Així, podem alinear l'estat de polarització del senyal útil de tal manera que surti per només una de les sortides del divisor de polarització. La potència del senyal òptic, juntament amb la part corresponent del soroll, es troba en aquesta sortida, mentre que l'altra branca ens dóna només soroll. Noteu que els sorolls ASE polaritzats tenen la meitat de la potència total de soroll.

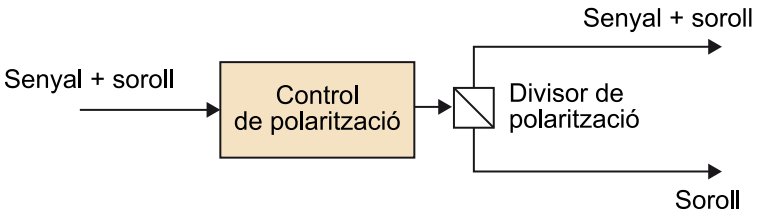

Figura 17. Esquema per a la mesura d'OSNR amb la tècnica de nul de polarització

Per tant, les potències òptiques mesurades després del divisor de polarització es poden expressar com a:

$$P_p = P_s + \frac{1}{2} P_n \qquad (1)$$

$$P_o = \frac{1}{2} P_n \qquad (2)$$

Lectura de les fórmules (1) i (2)

P_p: potència mesurada en la branca que conté senyal i soroll

P_o: potència mesurada en la branca que conté només soroll

P_s: potència del senyal

P_n: potència total del soroll

Per tant, resulta molt directe obtenir la mesura de l'OSNR:

$$OSNR = \frac{P_s}{P_n} \frac{B_n}{B_r} = \frac{P_P - P_o}{2P_o} \frac{B_n}{B_r} \qquad (3)$$

Lectura de la fórmula (3)

B_n: amplada de banda de mesura (típicament determinada pel filtre passabanda de selecció del canal a mesurar)

B_r: amplada de banda de resolució que defineix l'OSNR (típicament 0,1 nm)

Nota

DOP és l'abreviatura més comuna per a referir-nos al grau de polarització i ve de l'anglès *degree of polarization*.

Per tant, podrem estimar de manera fiable l'OSNR simplement mesurant P_p i P_o.

Una altra tècnica seria la mesura dels paràmetres de Stokes del senyal òptic. El grau de polarització (DOP), que es calcula a partir dels paràmetres de Stokes, pot servir com a indicador de la potència dels sorolls ASE i és donat per:

$$DOP = \frac{P_s}{P_s + P_n} \qquad (4)$$

Lectura de la fórmula (4)

P_s i P_n: potències del senyal útil i del soroll ASE, respectivament.

Per tant, l'OSNR es pot estimar de manera directa a partir del DOP com a:

$$OSNR = \frac{DOP}{1 - DOP} \frac{B_n}{B_r} \qquad (5)$$

Lectura de la fórmula (5)

B_n: amplada de banda de mesura

B_r: amplada de banda de resolució definit per a l'OSNR

El principi de fons d'aquesta tècnica és bàsicament idèntic al de la tècnica de nul de polarització que hem descrit anteriorment. Però els paràmetres de Stokes permeten també extreure tota la informació de l'estat de polarització del senyal, per la qual cosa també els podem fer servir per a veure els efectes de la PMD. La figura 18 mostra la correlació entre el DOP i l'OSNR fent ser-

Nota

PMD és l'abreviatura de l'anglès *polarization mode dispersion* o 'dispersió en el mode de polarització'.

vir l'equació anterior amb $B_n/B_r = 4$ (per exemple, si l'amplada de banda de mesura és d'un canal WDM de 50 GHz, mentre que l'OSNR es defineix sobre 12,5 GHz).

Referència bibliogràfica

Podeu trobar el procediment detallat per a obtenir els paràmetres de Stokes en la referència:

D. Derickson (1997). *Fiber Optic Test and Measurement*. Prentice Hall.

Cal notar que l'error de mesura de l'OSNR és molt sensible a l'error del DOP quan s'incrementa l'OSNR a mesurar. Per exemple, un DOP del 96,15 % equival a mesurar una OSNR de 20 dB i per a un DOP d'1 teòricament s'arriba a l'infinit. Això vol dir que cal una mesura de DOP d'alta resolució i baix error per tal de monitorar l'OSNR, especialment quan aquesta està per sobre dels 20 dB. Però també cal tenir en compte que, com s'ha dit abans, la mesura espectral de paràmetres de Stokes també resulta beneficiós per al monitoratge simultani d'OSNR i PMD.

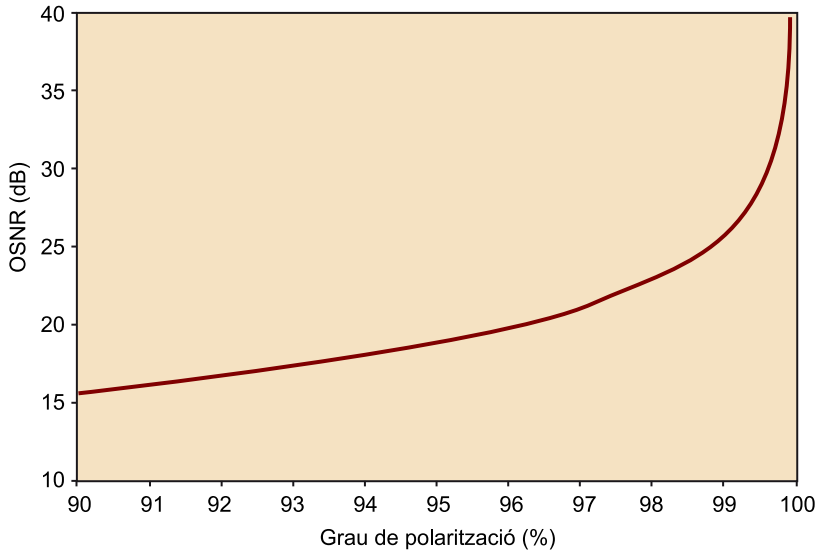

Figura 18. Variació de l'OSNR en funció del grau de polarització per a $B_n/B_r = 1/4$

A la pràctica, però, les hipòtesis en què es basen aquestes tècniques no s'han de complir necessàriament, sobretot a causa dels efectes sobre l'estat de polarització que es tenen en els enllaços de transmissió. Per exemple, el senyal útil pot ser despolaritzat per la PMD i altres fenòmens de birefringència, mentre que els sorolls poden quedar parcialment polaritzats a causa de pèrdues del medi de transmissió que poden dependre de la polarització. A més, en cas de fer-se servir en enllaços aeris (fibra penjada entre posts i no soterrada), aquestes tècniques haurien de ser capaces d'adquirir i seguir les ràpides fluctuacions de polarització causades pel vent i els corrents elèctrics de les línies d'alta tensió (suposades adjacents a la fibra). De fet, hi ha diverses tècniques per a evitar aquests problemes. Per exemple, podem fer servir la tècnica d'anàlisi del grau de polarització per a estimar i separar les contribucions de PMD i soroll ASE, per tal de fer una bona estimació del senyal útil i millorar la resolució de l'OSNR.

2.1.3. Tècniques interferomètriques

Les tècniques basades en interferometria exploten el fet que el soroll ASE és incoherent, mentre que el senyal útil és coherent. Per tant, aquesta tècnica mesura la potència de soroll després d'eliminar la component del senyal útil provocant una interferència destructiva. Però aquesta tècnica no pot monitorar de manera acurada l'OSNR dins la banda d'interès, perquè el soroll ASE també es pot veure seriosament afectat per la interferència destructiva (especialment quan necessitem monitorar l'OSNR de senyals WDM de molt alta eficiència espectral). Una possibilitat per a evitar aquest efecte és forçar una interferència entre dues components d'estats de polarització ortogonals entre si, combinant-les després en el mateix estat de polarització. En aquest cas, el soroll ASE pot ser separat del senyal òptic sense cap canvi, malgrat la interferència destructiva del senyal.

Aquestes tècniques es basen en l'assumpció que el senyal òptic és altament coherent (correlat), mentre que els sorolls ASE són incoherents. De manera conceptual, consten d'un filtre sintonitzable per a seleccionar el canal a monitorar, un interferòmetre de Mach-Zehnder i un mesurador de potència. Això ho podeu veure en la figura 19. L'interferòmetre de Mach-Zehnder és un dispositiu que consisteix en dos acobladors de 3 dB que divideixen el senyal d'entrada en dos camins diferents, on un d'aquests camins conté un mòdul de retard i ajust de fase. L'ajust de fase varia la fase del senyal en una de les dues branques, de tal manera que quan es combinen a la sortida, es pot produir una interferència destructiva o constructiva a voluntat.

Per la seva banda, el retard el fem servir per a controlar l'FSR de l'interferòmetre, és a dir, l'espaiat freqüencial entre dos pics de transmissió adjacents. La potència total (senyal + soroll) la podem mesurar amb la interferència constructiva, tal com es pot veure en la figura 20. D'altra banda, el soroll el podem mesurar eliminant el senyal òptic amb la interferència destructiva, tal com es mostra en la figura 21. Així, l'OSNR del senyal la podem estimar a partir del soroll i de la potència òptica total. Noteu que, pel principi bàsic de cercar la periodicitat del senyal, aquesta tècnica és insensible a la dispersió cromàtica o als efectes de polarització.

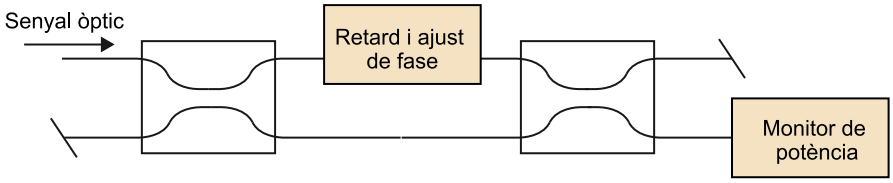

Figura 19. Esquema de mesura d'OSNR basat en un interferòmetre de Mach-Zehnder

Nota

FSR ve de l'anglès *free spectral range* i fa referència al marge espectral lliure de l'interferòmetre. És a dir, la seva periodicitat.

Nota

L'interferòmetre de Mach-Zehnder s'anomena així en honor als físics Ludwig Mach (fill del cèlebre Ernst Mach) i Ludwig Zehnder, els seus inventors. La versatilitat d'aquesta estructura ha permès que sigui emprada en un ampli espectre d'aplicacions, des de recerca en temes de mecànica quàntica fins a òptica i telecomunicacions.

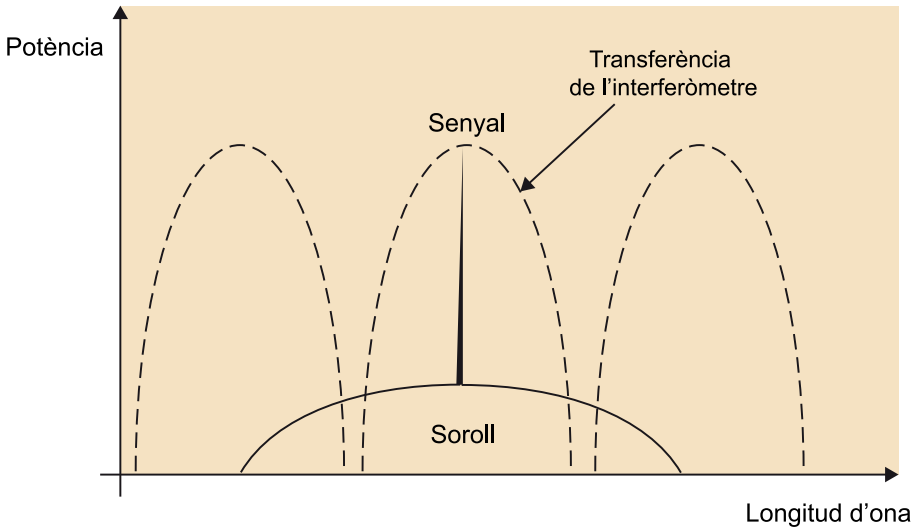

Figura 20. Filtratge òptic quan s'obté interferència constructiva per a l'esquema de mesura basat en interferometria

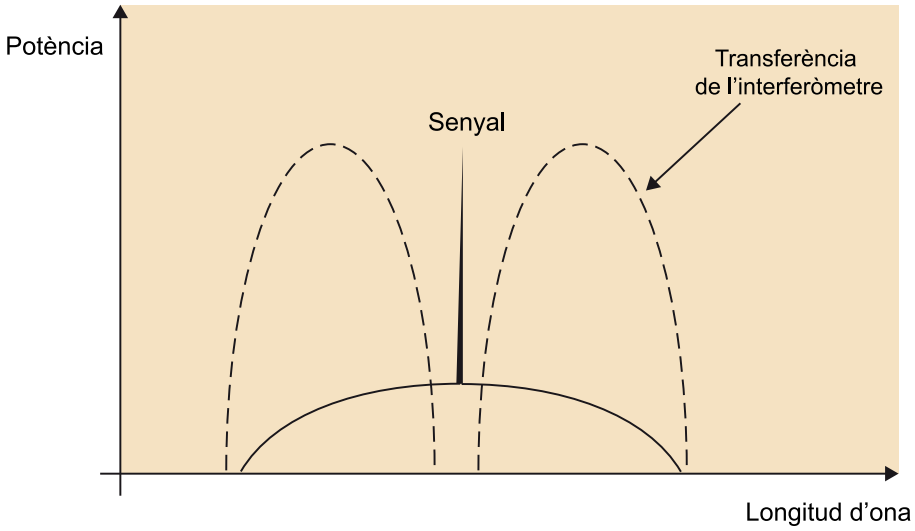

Figura 21. Filtratge òptic quan s'obté interferència destructiva per a l'esquema de mesura basat en interferometria

Nota

PRBS prové de l'anglès *pseudo-random bit sequence* i fa referència a les seqüencies que es fan servir per a emular trànsit i l'aleatorietat d'aquestes. És a dir, com més alta és la PRBS que emula les dades, més aleatoris són els bits entre si, i ocupen més part de l'espectre freqüencial.

Per a més informació, podeu consultar el llibre:

J. G. Proakis (1995). *Digital Communications*. John Wiley & Sons.

2.1.4. Altres tècniques

A part de les tècniques basades en interpolació d'espectre i explotació de propietats de l'estat de polarització dels senyals, hi ha altres tècniques menys populars per a estimar l'OSNR. Entre elles comptem les tècniques basades en anàlisi de soroll mesclat. Estimen l'OSNR dins la banda d'interès mitjançant l'anàlisi dels sorolls resultants de les múltiples combinacions entre senyal i soroll que es troben després d'un fotodetector, degudes al fet que aquest presenta una transferència òptic-elèctric de manera quadràtica i no lineal. Per tant, la densitat de soroll en la regió de baixes freqüències la podem monitorar fent servir un fotodetector de baixa velocitat mentre el senyal òptic no està modulat (o està modulat amb una PRBS baixa, $2^{15} - 1$ màx.). Però en casos en què el senyal òptic és modulat amb un patró llarg (o d'alta aleatorietat), aquesta tècnica no pot mesurar la densitat de soroll en la regió de baixes freqüències, a causa de la interferència deguda als productes entre senyal i soroll.

Les tècniques anomenades d'estimació d'OSNR dedueixen l'OSNR mesurant només les potències del senyal (assumint que les característiques dels amplificadors òptics són una cosa coneguda). Concretament, la tècnica de monitoratge d'OSNR basada en enllaç estima l'OSNR basant-se a estimar enllaç a enllaç, per comptes de fer-ho canal a canal com és convencional. Per tant, el soroll ASE que s'acumula en cada enllaç es mesura per separat. Després un controlador centralitzat de monitoratge de prestacions òptiques agafa la informació del soroll de cada enllaç i actualitza l'OSNR per una ruta òptica concreta (prèviament establerta). Encara que aquesta tècnica és tan sols un càlcul de l'OSNR i no pas una mesura, ofereix la possibilitat de monitorar de manera acurada l'OSNR dins la banda d'interès de senyals WDM, fins i tot en xarxes òptiques dinàmiques.

2.2. Dispersió cromàtica

La dispersió cromàtica és un fenomen de la fibra òptica no desitjat en les aplicacions de telecomunicacions. Precisament actua com un filtre que disminueix la seva amplada de banda de pas a mesura que s'incrementa la distància de fibra i així limita la velocitat de transmissió. Possiblement per això és l'efecte més impactant en telecomunicacions, per la qual cosa el control i mitigació dels seus efectes són clau per al bon funcionament de les xarxes de comunicacions òptiques. En aquesta secció veurem les tècniques més populars per tal de monitorar la dispersió cromàtica acumulada d'un senyal òptic.

2.2.1. Mesura amb to radiofreqüència

Un mètode que s'ha demostrat efectiu per a monitorar la dispersió cromàtica en temps real i que podem aplicar de manera general com a monitoratge de prestacions òptiques és el fet de detectar la conversió d'un senyal modulat en fase en un senyal modulat en amplitud a causa de la dispersió cromàtica.

Nota

Per a referir-nos a la radiofreqüència fem servir l'abreviatura d'ús comú RF. Normalment la utilitzem per a referir-nos a senyals de freqüències per sobre dels 100 MHz.

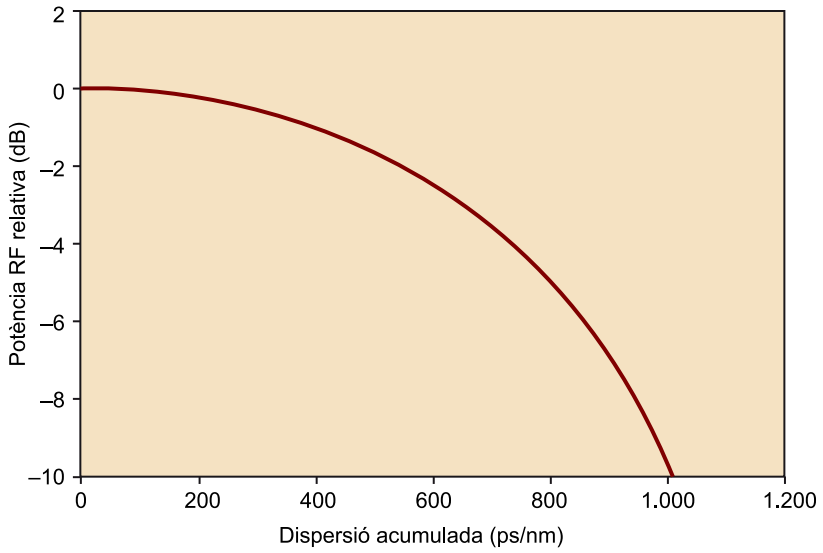

Figura 22. Potència del to d'RF a 7 GHz en funció de la dipersió acumulada

Un segon mètode consisteix a inserir subportadores elèctriques al transmissor. S'aconsegueix mesurar la dispersió tot observant el retard de les subportadores respecte a la banda base. Aquesta mesura dóna una idea de la dispersió amb una resolució mitjana-alta i sense tenir coneixement de l'historial de transport del senyal. El to no conté cap mena de dades i té una amplada espectral petita, de menys de pocs MHz. Com que el to està dins de la banda de freqüències de les dades, sofreix també la mateixa dispersió que les dades i el podem fer servir com a sensor de dispersió. Les bandes laterals de la subportadora estaran inicialment en fase a la sortida òptica del transmissor. Però a causa de la dispersió cromàtica s'acumula una diferència de fases entre ambdues bandes al llarg de la transmissió. El grau de desfasament el podem relacionar amb la quantitat de dispersió acumulada quan la subportadora es detecta de manera opticoelectrònica i la potència de la subportadora detectada cau d'acord amb el canvi de fase d'una manera que es pot predir com a:

$$I(f_{sc}) = I_0 m \cos\left(\frac{\pi f_{sc}^2 \lambda^2 DL}{c}\right) \qquad (6)$$

Lectura de la fórmula (6)

I_0: pic de corrent de fotodetecció

m: profunditat de modulació

f_{sc}: freqüència de la subportadora

λ: longitud d'ona de la portadora

DL: dispersió total acumulada

c: velocitat de la llum en el buit

La figura 22 mostra les corbes teòriques per a freqüència de subportadora de 7 GHz, en què la caiguda es produeix d'acord amb un sin^2 quan s'incrementa la dispersió.

Una característica important d'aquesta tècnica és que la sensibilitat s'incrementa per a valors grans de dispersió, atès que valors alts els trobem quan la corba de la figura 22 decreix més ràpidament i, per tant, els podem mesurar d'una manera més acurada. Per exemple, segons la figura 22 és més acurat mesurar dispersions entorn de 800 ps/nm (on hi ha més marge de potències per a poder discriminar el valor de la dispersió), que no pas entorn dels 200 ps/nm. És possible reconfigurar el marge de mesura i la sensibilitat del monitor simplement sintonitzant la freqüència del to d'RF. De fet, el marge de mesura el podem expressar com a:

$$DL = \frac{c}{2\lambda^2 f_{sc}^2} \qquad (7)$$

Per tant, emprant una freqüència de subportadora més alta, s'obté una sensibilitat més alta per a dispersions acumulades més baixes. Això es mostra en la figura 23. D'altra banda, fent servir una freqüència més baixa tindrem un marge de mesura més gran, però la sensibilitat pot no ser l'adequada. Una solució és fer servir dos tons per a millorar el marge de mesura i la sensibilitat a la vegada, sense incrementar la complexitat del sistema.

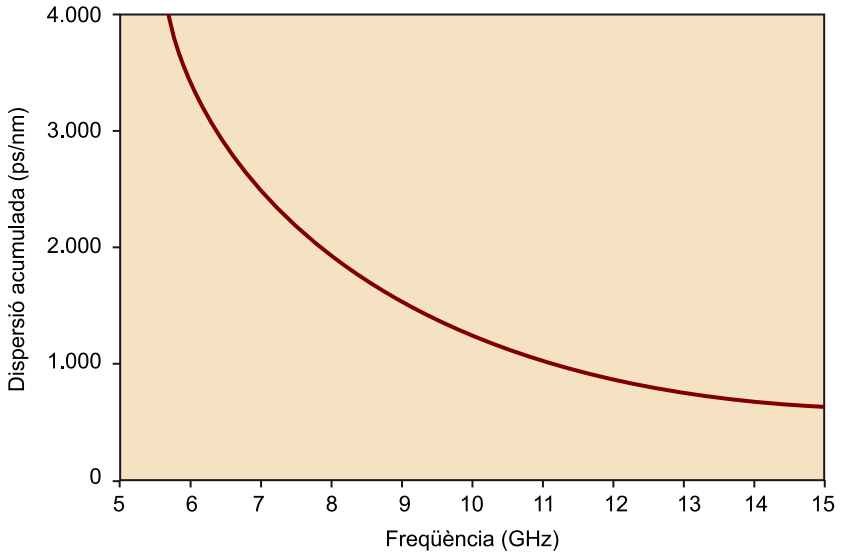

Figura 23. Marge de mesura en funció de la freqüència de la subportadora elèctrica

Un altre obstacle de les tècniques de monitoratge basades en tons AM és la dificultat de discriminar el signe (positiu o negatiu) de la dispersió acumulada. Per això, podem afegir un to modulat en freqüència per a detectar el retard de fase diferencial, i així poder determinar el signe de la dispersió.

Nota

AM és l'abreviatura per a referir-nos a senyals d'amplitud modulada. Noteu que la tècnica de monitoratge en què s'introdueixen tons de radiofreqüència en el senyal òptic, al cap i a la fi es basa en la interpretació dels tons AM detectats.

D'aquí en surt un tercer mètode, que es basa en la modulació òptica en freqüència al transmissor. Com que el retard de grup del senyal transmès varia amb la freqüència de portadora, la fase del senyal de rellotge recuperat al receptor també està modulat amb la mateixa freqüència. Per tant, la dispersió cromàtica del senyal transmès la podem obtenir a partir de la desviació de fase del senyal de rellotge.

2.2.2. Mesura del retard en dues bandes vestigials

Una tècnica potent per a monitorar la dispersió cromàtica consisteix a detectar el retard de grup relatiu entre les dues bandes laterals vestigials (VSB) de les dades transmeses: les dues bandes s'obtenen sintonitzant un filtre òptic estret lleugerament desplaçat a la dreta i a l'esquerra de la portadora òptica, tal com es mostra en la figura següent.

Nota

VSB és l'acrònim utilitzat per a referir-nos a senyals de banda lateral vestigial. Prové de l'anglès *vestigial sideband*.

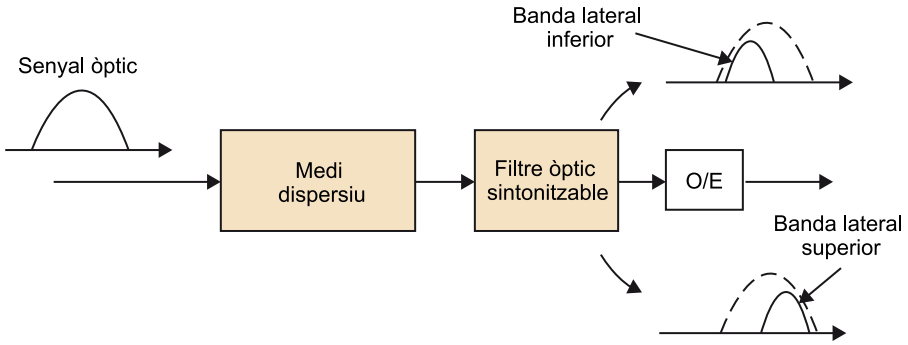

Figura 24. Mesura de la dispersió cromàtica mitjançant la mesura del retard en dues bandes vestigials

Típicament, en sistemes de transmissió òptics d'alta velocitat, el senyal òptic té dues bandes laterals que contenen la mateixa informació. Podem seleccionar cada banda lateral mitjançant un filtre òptic que tingui una amplada de banda aproximadament igual a la velocitat de les dades. En general, el filtratge de banda vestigial s'implementa sintonitzant el filtre lleugerament desplaçat del centre de l'espectre del senyal òptic. Com que les dues bandes laterals ocupen diferents marges de longitud d'ona, la dispersió cromàtica de la fibra introdueix un retard de grup relatiu entre les bandes superior i inferior. Aquest retard de grup el podem mesurar mitjançant una recuperació de rellotge i una detecció de fase. Noteu que aquesta tècnica no requereix cap mena de modificació del transmissor, és altament sensible, no està afectada per la PMD ni les no-linealitats de la fibra i es pot aplicar a totes les bandes WDM simplement resintonitzant el filtre. Noteu que en aquesta tècnica, el monitoratge es duu a terme a partir d'una detecció de fase del senyal de rellotge recuperat; per tant, el marge de dispersió cromàtica que podem monitorar està limitat pel marge de desfasament relatiu, de -180° a 180°. També hi ha un compromís entre resolució de la mesura i velocitat.

2.2.3. Histograma

Mostrejant un senyal rebut podem obtenir histogrames que ens permeten avaluar la qualitat del senyal (per exemple, amb la taxa d'error de bit). Aquest mètode és sensible a la distorsió del senyal i al soroll, per la qual cosa el podem fer servir per a monitorar distorsions induïdes per la dispersió cromàtica.

De manera general, podem trobar-nos amb dos tipus de mostreig: síncron i asíncron. El diagrama d'ull és una distribució d'amplitud síncrona en un període de bit. És una eina d'ús comú per a analitzar la qualitat dels senyals i la podem fer servir també per a monitorar-ne les prestacions. Però l'inconvenient és que es requereix una recuperació de rellotge per tal de poder mostrejar de manera síncrona. Així, quan la informació de rellotge no es pot recuperar, el senyal només es pot mostrejar de manera asíncrona. En aquest cas, l'histograma de l'amplitud s'obté fent un mostreig aleatori que cobreix tot el temps de bit. Amb un nombre prou gran de mostres aleatòries, un histograma asíncron pot representar la distribució de l'amplitud en un període de bit.

En la figura 25 podeu veure una comparativa entre diagrames d'ull síncrons i asíncrons. Basant-nos en l'histograma, podem estimar el factor Q i la taxa d'error de bit (BER). La figura 25b descriu l'histograma tant del diagrama d'ull mostrejat de manera asíncrona, com del diagrama d'ull mostrejat de manera síncrona en la seva màxima obertura (part central de la figura 25a).

Nota

BER prové de la forma anglesa *bit error rate* i és l'acrònim que comunament fem servir per a referir-nos a la taxa d'error de bit. És la mesura experimental de la probabilitat d'error de bit i s'obté dividint el nombre de bits erronis entre el nombre total de bits.

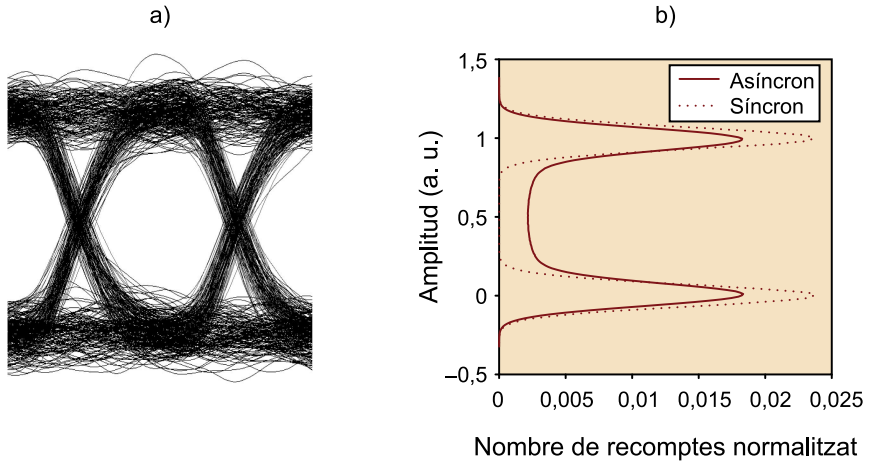

Figura 25. Mesura de la dispersió cromàtica mitjançant la mesura de l'histograma

Nota

OOK (de l'anglès, *on off keying*) és el format de modulació digital més bàsic, en què la informació es codifica en polsos.

La principal diferència entre els histogrames síncrons i asíncrons està en els creuaments de nivell entre els nivells de 0 i 1. Precisament en aquesta regió de transició, veiem com l'histograma asíncron conté un cert nombre de recomptes, mentre que el síncron, no. Els recomptes addicionals estan relacionats amb els flancs de pujada i baixada dels polsos òptics, que es poden veure afectats per la dispersió cromàtica. De fet, l'histograma asíncron pot avaluar la qualitat total del senyal, atès que també és sensible a l'OSNR i a altres degradacions a part de la dispersió cromàtica. De fet, podem monitorar el factor Q o l'OSNR en senyals OOK utilitzant aquest mètode, així com també la dispersió cromàtica i la PMD. Però, com que es tracta d'una mesura en el domini elèctric, la clau està en com mesurar el valor absolut del factor Q, o l'OSNR, dispersió cromàtica i PMD de manera simultània. És a dir, l'histograma ens serveix per a veure els efectes del conjunt de totes les degradacions que afecten el sistema de transmissió, però el problema ve quan volem discriminar-ne una respecte de les altres (per exemple, si solament volem saber el valor de la dispersió cromàtica), a causa de la seva dificultat.

2.2.4. Monitoratge electrònic

Les tècniques electròniques de monitoratge estan basades en l'anàlisi del senyal elèctric després de la conversió O/E al receptor. Per exemple, la mesura del factor Q, l'anàlisi del diagrama d'ull o el BER. La correlació de la informació d'errors provinent del bloc de FEC i els coeficients obtinguts d'un equalitzador electrònic al receptor també es poden fer servir per al monitoratge de prestacions i quantificar les distorsions sense cap altre equip de monitoratge de la xarxa. Comparant els coeficients d'un equalitzador elèctric amb els coeficients ideals computats prèviament, és possible identificar i quantificar les distorsions més comunes en l'enllaç òptic.

Nota

O/E es refereix a la conversió de senyal òptic a elèctric. FEC prové de la forma anglesa *forward error correction* i és l'abreviació per a referir-nos al bloc de correcció d'errors del receptor, que normalment s'implementa en un processament digital del senyal.

El BER és la mesura última de les prestacions del sistema i és el paràmetre preferit per a la gestió de fallades. Però una dificultat per al monitoratge del BER enmig de xarxes òptiques és que el senyal no ha de presentar necessàriament els mateixos errors que quan tenim en compte l'enllaç sencer. Per tant, pot ser que si monitoritzem el BER on tenim la fallada, tinguem un BER 0, sense

errors; mentre que mesurant l'enllaç sencer tinguem una degradació notable del BER, també a causa de l'acumulació de soroll dins la xarxa. Per tant, per tal de detectar la degradació dins la xarxa, una solució consisteix a afegir al senyal òptic una càrrega controlada de soroll, per tal de tenir una BER mesurable a cada punt de l'enllaç. Així, podem trobar el punt de fallada molt més fàcilment.

Una alternativa al BER consisteix a monitorar el factor Q. Aquest el podem definir com a:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \qquad (8)$$

Lectura de la fórmula (8)

I_1: valor mitjà dels 1

I_0: valor mitjà dels 0

σ_1: desviació estàndard del soroll dels 1

σ_0: desviació estàndard del soroll dels 0

Per tant, aquesta és una mesura altament correlada amb la relació senyal soroll i, com a conseqüència, amb el BER. Així, el factor Q es veu afectat també per les mateixes degradacions que afecten el BER i, per tant, la mesura del factor Q és altament efectiva en la gestió de fallades. Malgrat això, el seu cost és elevat si es pretén fer servir de manera sistemàtica a cada node de la xarxa, ja que caldria que cada node tingués un detector d'alta velocitat per a cada canal dedicat a monitoratge. Però sempre podem fer servir una unitat portàtil que implementi estimació del factor Q.

Finalment, i com a contrapunt, en un receptor coherent podem detectar directament tot el camp òptic (amplitud i fase) i no només la seva intensitat/potència. Això facilita enormement l'estimació de la dispersió, atès que no és res més que un retard de selectiu en freqüència. Així, podem estimar la dispersió introduint senyals i/o seqüències conegudes al transmissor i veient com es detecten.

2.3. Dispersió en el mode de polarització

La dispersió en el mode de polarització (PMD) és el tercer paràmetre més important que pot afectar la transmissió d'un senyal en una xarxa òptica. Està causat per petites imperfeccions en la fibra, que en canvien les propietats termes de l'estat de polarització. Somerament podem dir que la PMD de primer grau consisteix en un lleuger retard entre dos estats de polarització ortogonals, mentre que la PMD de segon grau consisteix en el fet que la fibra presenta una dispersió cromàtica diferent per a cadascun dels principals estats de polarització. D'entre aquests dos tipus de PMD, el que més sol afectar la transmissió dels senyals dins de xarxes òptiques és la PMD de primer ordre. Per això, a continuació repassarem els principis bàsics de tècniques de monitoratge d'aquest paràmetre.

2.3.1. Monitoratge amb to RF

Aquest tipus de tècniques fan servir com a principi bàsic l'anàlisi espectral de senyals, com poden ser els tons RF. El fet és que una determinada component freqüencial la podem descompondre en dos estats de polarització ortogonals

en el domini òptic. Cadascuna d'aquestes rèpliques viatgen a través de la fibra a velocitats lleugerament diferents a causa de la PMD de primer ordre i això provoca un desfasament entre elles. Per tant, aquest efecte redueix la component espectral corresponent de l'espectre d'RF mitjançant interferència destructiva. Així, queda que la potència rebuda és funció de la PMD i la podem fer servir per a monitorar el nivell de PMD acumulat. Considerant que la diferència de fases entre les dues bandes d'RF i els efectes de *chirp* i PMD, la potència d'RF després de fotodetectar queda com a:

$$P = P_0\left[1 - 4\gamma(1-\gamma)sin^2\left(\pi f_{RF}\Delta\tau\right)\right](1+\alpha^2)cos^2\left(\frac{\pi D_{total}\lambda^2 f_{RF}^2}{c} + arctan(\alpha)\right) \qquad (9)$$

Lectura de la fórmula (9)

P_0: potència d'RF sense efectes de dispersió cromàtica ni PMD, que depèn del guany i/o pèrdues pròpies del senyal

γ i $\Delta\tau$ són factors relatius a la PMD:

γ: relació de potències

$\Delta\tau$: retard de grup diferencial (DGD) entre els dos estats ortogonals de polarització

α: paràmetre que relaciona la variació de fase induïda per la intensitat de la llum modulada, també coneguda com a *chirp*

D_{total}: dispersió cromàtica acumulada

f_{RF}: freqüència del to RF

λ: longitud d'ona de la portadora òptica

c: velocitat de la llum en el buit

Aquesta equació indica que la disminució de potència del to RF la podem fer servir per a mesurar la PMD, però la dispersió cromàtica pot afectar considerablement, de manera que pot portar errors de monitoratge. La figura 26 mostra les variacions de potència degudes al DGD per a f_{RF} de 10 GHz, considerant la dispersió cromàtica constant a D_{total} de 1.200 ps/nm, $\alpha = 0$ i $\gamma = 1/2$.

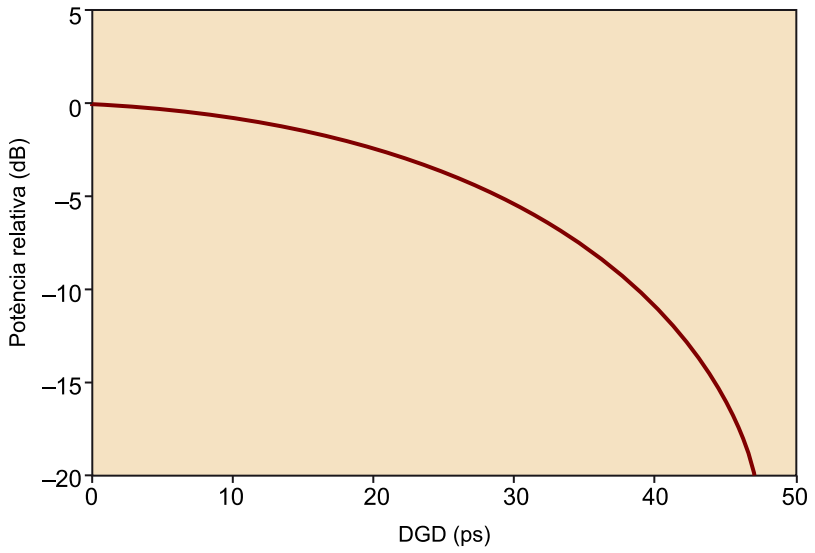

Figura 26. Variacions de potència degudes al DGD per a f_{RF} de 10 GHz, considerant la dispersió cromàtica constant a D_{total} de 1.200 ps/nm

Nota

DGD prové de la forma anglesa *differential group delay*. És l'abreviatura més comuna per a referir-nos al retard de grup diferencial, que és el paràmetre bàsic que caracteritza la PMD de primer ordre.

Com a exemple, suposem que tenim un senyal RZ. Per tant tindrà una forta component de rellotge perquè a cada bit torna a 0; per la qual cosa es podria fer servir com a senyal de monitoratge. Desafortunadament, tal com es mostra en l'equació anterior, la dispersió cromàtica també afecta la potència del to d'RF, ja que també causa un retard relatiu entre les components de l'espectre òptic que cauen per sota i per sobre de la longitud d'ona de la portadora òptica. Per tant, després de la fotodetecció, el rellotge d'RF s'atenuarà quan aquestes dues components estiguin en contrafase a causa de la dispersió cromàtica. Així, podem dir que la dispersió cromàtica causa ambigüitat quan utilitzem el to RF rebut per a monitorar la PMD.

Una solució potencial per a evitar els efectes de la dispersió cromàtica consisteix a fer servir un filtre òptic molt estret centrat en una de les bandes laterals del senyal òptic. En aquest cas només detectem un sol to d'RF i els efectes de la dispersió cromàtica desapareixen. Així, la potència del to RF només depèn de la mescla de la portadora òptica i del mateix to. Com que els efectes de PMD de primer ordre depenen de la polarització, també tindrem atenuació del to rebut en aquest cas de recepció de banda lateral. Per exemple, per a un sistema RZ de 10 Gb/s, un filtre estret centrat en el to de 10 GHz per sobre de la portadora òptica permet mesurar la PMD a partir de la potència d'aquest to.

Nota

RZ, de l'anglès *return to zero*, és una codificació de la informació típica del format de modulació OOK. Consisteix en el fet que durant una part del temps de bit s'està a 0. Per exemple, en un sistema RZ al 50%, durant cada bit, la meitat de la seva durada serà el bit a transmetre codificat mentre que durant l'altra meitat del temps el senyal romandrà a zero. Per contra, en la codificació de senyal NRZ (de l'anglès *no return to zero*) no es torna mai a zero durant el temps de bit, i el senyal codificat es mapa directament amb els bits transmesos.

Però aquest és un cas molt particular, ja que els sistemes estàndard implementen el format de modulació NRZ. Per tant, el to de rellotge no apareix. Una solució per a aquests sistemes consisteix a filtrar molt estretament amb un *fiber Bragg grating* (FBG) per a generar el to de rellotge i monitorar la PMD, però el resultat encara és sensible a la dispersió cromàtica. Una altra tècnica consisteix a intentar detectar una de les bandes laterals del senyal de rellotge, per exemple afegint un filtre òptic a la sortida de l'FBG. Així, podem recuperar el to RF igual que quan filtràvem òpticament el senyal RZ; i la potència del rellotge recuperat depèn només del retard relatiu entre ambdós estats ortogonals de polarització, que està fixat per la PMD.

A banda d'aquests efectes, també es pot comprovar que la PMD provoca un filtratge *notch* de manera repetida en l'espectre elèctric després de la fotodetecció, per la qual cosa també es pot emprar per a monitorar la PMD. De l'equació anterior podem veure que si el DGD del sistema és prou gran, la freqüència d'aquests *dips* es pot mesurar de manera fàcil i acurada, facilitant el càlcul del DGD com més baixa sigui la seva freqüència. Per tal de millorar la sensibilitat, es pot introduir un element de gran DGD dins del mòdul de monitoratge i abans de la fotodetecció. Així s'incrementa el valor total del DGD i els *dips* apareixen a més baixa freqüència. La figura 27 mostra l'esquema de mòdul que monitora la PMD basat en aquest principi. El senyal a monitorar s'envia a un filtre òptic, passa per un control de polarització i després entra en un tros de fibra mantenidora de polarització, que introdueix un DGD gran. Per a monitorar la PMD, el control de polarització varia de manera aleatòria, passant per tots els possibles estats de polarització. Per tant, varia la posició dels *dips* de freqüència (de $f_{màx}$ a $f_{mín}$) i es poden mesurar amb un analitzador d'espectres de radiofreqüència. Si considerem que transmetem a través d'una fibra que introdueix un valor de DGD β_1 i que la fibra mantenidora de polarització introdueix un DGD conegut de β_2, aleshores el màxim i el mínim DGD es poden expressar com a:

$$\begin{aligned} DGD_{màx} &= \beta_1 + \beta_2 \\ DGD_{mín} &= |\beta_1 - \beta_2| \end{aligned} \qquad (10)$$

Com que $DGD_{màx}$ és proporcional a $f_{màx}$ i $DGD_{mín}$ ho és a $f_{mín}$, els valors de DGD β_1 i β_2 es poden calcular a partir de l'equació anterior.

Noteu que en aquest darrer cas el fet d'incloure un element de gran DGD ajuda a moure la posició del *dip* cap al marge de baixes freqüències, encara que el DGD de l'enllaç sigui petit. Monitorar amb components de baixa freqüència amb una sensibilitat millorada és altament desitjable, perquè no només elimina l'ús d'electrònica d'alta freqüència, sinó que també el mòdul de monitoratge es torna insensible a la PMD d'ordre superior. A més, com que es mesura la posició d'un nul a RF i no un valor de potència, aquest esquema de monitoratge és insensible també a la velocitat de transmissió del senyal. Per tant, no cal cap mena de coneixement previ sobre el nivell de potència d'RF.

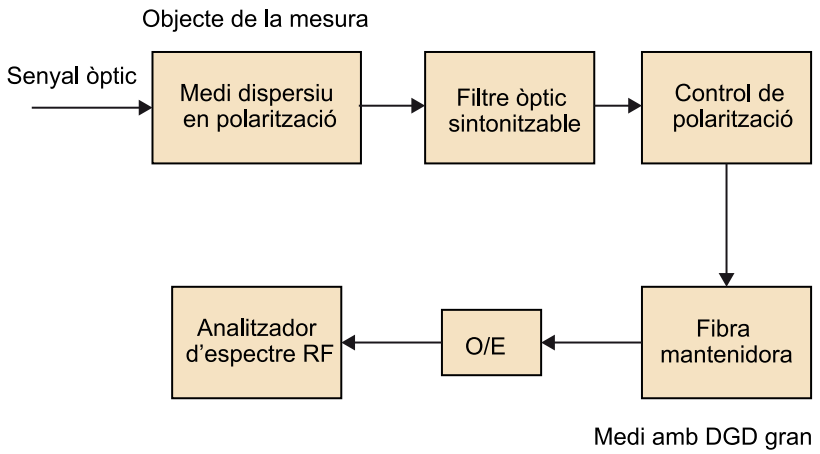

Figura 27. Esquema de mesura de PMD introduint un element de gran DGD, per exemple, fibra mantenidora de polarització

2.3.2. Mesura del DOP

El grau de polarització d'un senyal és donat per la relació entre la potència de la part polaritzada d'aquest senyal i el total de la potència. La mesura del grau de polarització d'un senyal també serveix per a avaluar senyals afectats per PMD amb una sèrie d'avantatges respecte de les altres tècniques:

- No calen dispositius d'alta velocitat.
- Té una simplicitat més gran.
- És independent de la velocitat de transmissió.
- No està afectat per altres degradacions com, per exemple, la dispersió cromàtica.

Nota

SOP és l'abreviatura més comuna per a referir-nos a l'estat de polarització d'un senyal òptic. Es correspon amb la forma anglesa *state of polarization*.

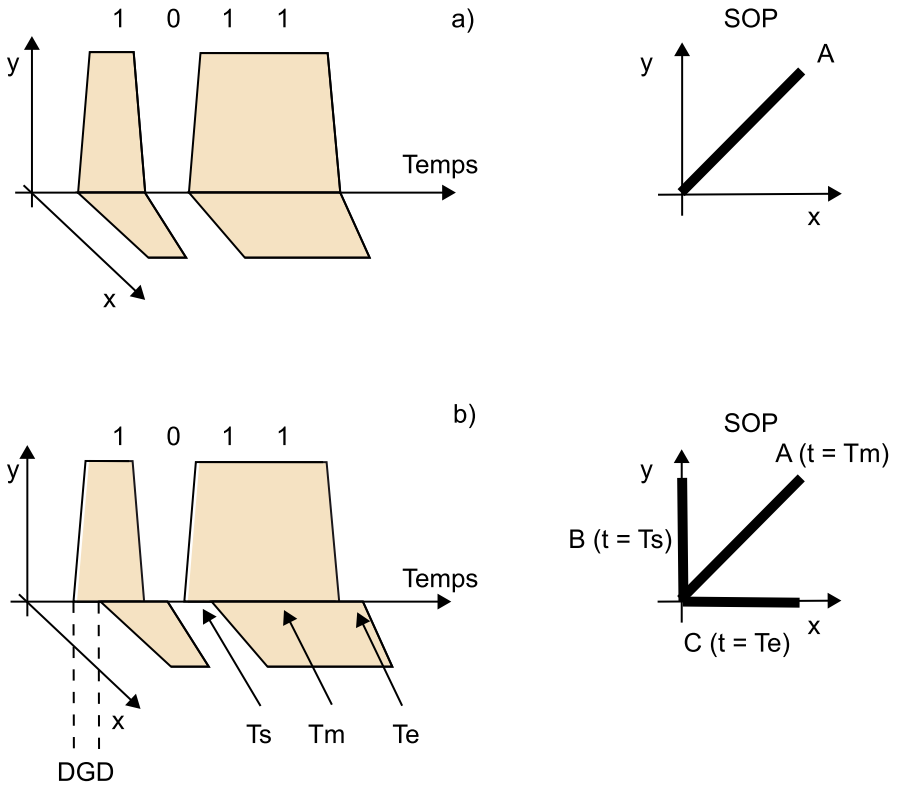

Figura 28. Degradació de l'estat de polarització d'un senyal NRZ causat per la PMD de primer ordre. a) Senyal òptic i estat de polarització sense PMD. b) Senyal òptic i estat de polarització quan tenim PMD. Els eixos *x* i *y* corresponen als dos estats ortogonals del medi de transmissió

El mecanisme de degradació de l'estat de polarització mitjançant la PMD s'il·lustra en la figura anterior. Sense PMD, el senyal òptic és llum purament polaritzada amb un sol estat de polarització, com en la figura 28a. Amb PMD, l'estat de polarització al final (SOP B i SOP C) i al punt del mig (SOP A) dels 1 d'un senyal NRZ és diferent a causa del retard relatiu entre les components de polarització del pols, com podeu veure en la figura 28b. El decreixement del grau de polarització correspon a la distorsió del senyal causada per la PMD. Per a un senyal OOK amb codificació NRZ, per les propietats intrínseques d'aquest format de modulació, el grau de polarització estarà entre 0,5 i 1, amb la qual cosa limita el marge de mesura de la PMD i només es poden mesurar DGD relativament petits.

2.3.3. Monitoratge electrònic

Com hem dit abans, les tècniques de monitoratge electrònic són aquelles que estan basades en l'anàlisi del senyal elèctric després de la conversió O/E al receptor, com per exemple, són la mesura del BER i/o del factor Q, l'anàlisi del diagrama d'ull i l'anàlisi de l'histograma.

Concretament, el diagrama d'ull és una eina molt comuna per a l'anàlisi de qualitat dels senyals i el podem fer servir també per al monitoratge de la PMD. Recordeu que essent capaços de mesurar l'obertura de l'ull, podem mesurar l'impacte del conjunt de totes les degradacions del sistema. Els principals problemes que presenta, però, són que cal una recuperació de rellotge i el fet de

no poder aïllar els efectes de les diferents degradacions. També podem veure un diagrama d'ull com una distribució de l'amplitud dins del temps de bit adquirida de manera síncrona.

Així doncs, quan el senyal de rellotge no es pot recuperar o bé és del tot absent, només podem mostrejar el senyal de manera asíncrona. Quan mostregem aleatòriament i de manera asíncrona dins del temps de bit, podem obtenir l'histograma de l'amplitud. Amb un nombre prou gran de mostres aleatòries, un histograma asíncron pot representar la distribució de l'amplitud dels polsos en un període de bit. Aquesta tècnica pot ser un mètode de baix cost i transparent a la velocitat de bit per a fer un monitoratge de prestacions d'un canal, atès que no cal recuperar el rellotge.

Com hem vist abans, podem avaluar la qualitat del senyal amb un histograma asíncron, però és sensible a l'OSNR, a la dispersió cromàtica i a la PMD. A més, com que és una mesura feta en el domini elèctric, la clau és com mesurar el valor absolut de la PMD i altres degradacions de manera separada.

Bibliografia

Chan, C. C. K. (2010). *Optical Performance Monitoring Techniques*. Elsevier.

Derickson, D. (1997). *Fiber Optic Test and Measurement*. Prentice Hall.

HP 8147 Optical Time Domain Reflectometer. User's Guide (1997). Hewlett-Packard.

Optical Time Domain Reflectometers. Pocket Guide (2001). Agilent Technologies Deuschland.