

PON システム監視用高分解能カード OTDR の開発

Development of High-resolution Card OTDR for monitoring of PON system

村上太一 Taichi Murakami, 福嶋大輝 Taiki Fukushima, 上野真樹 Maki Ueno

[要 旨] スマートフォンの普及もありアクセスネットワークの通信量が急増し、PON (Passive Optical Network) システムによる FTTH (Fiber to the Home) の導入が世界的に始まっている。我々は PON システムの光ファイバ監視に最適な MW9087B カード OTDR を開発した。MW9087B はイベントデッドゾーン 50 cm, ダイナミックレンジ 41 dB の性能を備え、PON システム監視に必須である ONU からのフレネル反射高分解能測定に対応し、さらにスプリッタの損失測定、およびスプリッタ以降の後方散乱光測定を可能とした。

[Summary] Since the demand for communication is increasing, the deployment of FTTH (Fiber to the Home) structured with PON (Passive Optical Network) system is expanding in the world. We have developed MW9087B Card OTDR which is optimized for monitoring PON system. MW9087B has the performance of 50 cm event deadzone and 41 dB dynamic range. Therefore, it enables high resolution measurement of Fresnel reflection from ONU that is an essential for PON monitoring, as well as splitter loss and backscatter after splitter.

1 はじめに

近年のインターネットを利用したサービスはデータ通信だけでなく音声、映像など幅広く提供されるようになり、さらにスマートフォンの普及も相まって、アクセスネットワークの通信量が急増している。そしてその通信量を経済的、かつ効率的に収容できる FTTH (Fiber to the Home) の導入が世界的に始まっている。FTTH を実現する一つの方式に PON (Passive Optical Network) がある。PON システムは局舎側の光終端装置 (OLT: Optical Line Terminal) と加入者側の光ネットワークユニット (ONU: Optical Network Unit) 間に光スプリッタを挿入し 1 台の OLT に対し複数の ONU を接続することを特徴としている。そのため、低コストかつ高い通信速度が要求される FTTH においては最も効果的とされ、現在主流となっている。

一方、PON システムの保守運用管理面からは光ファイバ回線の維持管理が重要となる。そこで、光ファイバの障害点検出を迅速に行うために OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) を組み込んだ光ファイバ監視装置を局舎側に設置して光ファイバを監視する検討が進められている。

我々は今後、この PON システム監視需要が拡大することを鑑み、PON システム光ファイバ監視装置用途に最適化した短イベントデッドゾーンおよび広ダイナミックレンジ性能を備え、ONU からのフレネル反射高分解能測定に対応し、さらにスプリッタの損失測定およびスプリッタ以降の後方散乱光測定を可能とした MW9087B カード OTDR を開発したので報告する。

2 OTDR を用いた PON システム監視

2.1 監視方法

PON システムの光ファイバ監視は、局舎側からの OTDR 測定が基本となる。しかし、PON システムは、局舎と加入者間にスプリッタが配置され最大 128 分岐の光ファイバ構成である。局舎側から測定を行った場合、スプリッタ後の OTDR 波形は各々の分岐光ファイバで発生する後方散乱光が重なり合う。そのため、どの分岐先で障害が発生しているのかを判別することが困難となる^[1]。これが PON システム監視の最大の課題である。国際規格 ITU-T L.53 ではこの課題に対応するため、ONU に光フィルタを搭載し、光フィルタからの反射光を測定する方法を提案している^[2]。この方法では、図 1 に示すように、各分岐光ファイバに接続されている ONU からのフレネル反射レベルを、あらかじめ保存していた正常時のデータと比較し、一定以上レベルが低下したことを検出することにより、障害が発生した分岐光ファイバを特定する。しかし、この方法でもスプリッタから各 ONU までの距離がほぼ等しい場合には、各 ONU からのフレネル反射が近接し重なり、どの分岐光ファイバで障害が発生したのかを特定することが難しくなる。そのため近接したフレネル反射をいかに高分解能に分離測定できる性能、すなわち高いイベントデッドゾーン性能が OTDR には要求される。

さらに、分岐光ファイバ上の障害点位置を特定する場合は、分岐光ファイバの後方散乱光測定が必要となるが、スプリッタによる分岐損失が大きいため、広いダイナミックレンジ性能が要求される。

このように PON システムを監視するための OTDR には高いイベントデッドゾーン性能と広いダイナミックレンジ性能を合わせ持つことが必要である。

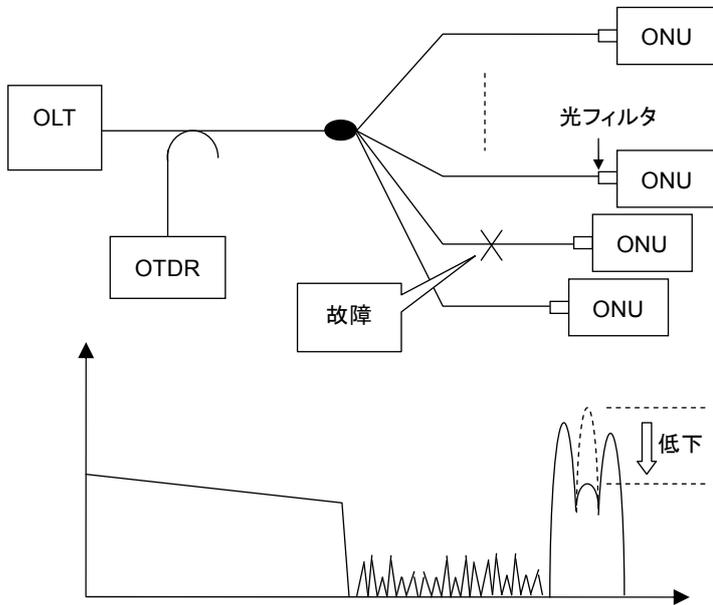


図1 OTDRによるPON監視例
An example of PON monitoring by OTDR

2.2 イン・サービス監視

PON システムの光ファイバ監視は、通信光が存在するイン・サービス状態での OTDR 測定が基本となる。イン・サービス監視では、OTDR から発する試験光の通信への影響回避、および通信光が OTDR 測定に与える影響回避のための波長選択が重要である。監視用波長帯域の標準化は以前より進められており^[3]、ITU-T L.41 では保守用波長として U-band 帯(1625 nm~1675 nm)の割り当てを勧告している^[4]。一方、PON システムにおいては 1600 nm 帯が通信帯の拡張用として確保されているため、新しい規格 ITU-T L.66 では 1650 nm を PON システムのイン・サービス監視用波長としている^[5]。

中心波長以外にも、OTDR に用いる光源のスペクトラム帯域幅についても考慮しなければならない。OTDR の試験光を ONU に搭載された光フィルタで反射させるため、OTDR のスペクトラム帯域幅は光フィルタの反射波長帯域より十分狭くする必要があり、前述の L.66 において 1650 nm ± 5 nm の範囲であることが要求されている。

3 開発方針

PON システム監視における要求に対応するため、MW9087B カード OTDR の開発では以下に述べる開発方針を立てた。

(1) 短イベントデッドゾーン化

先に述べたように PON システムの分岐光ファイバに接続された各 ONU からのフレネル反射は 1 m 程度まで近接する場合があります。このような反射を確実に分離して測定する必要があります。しかし現行の OTDR ではイベントデッドゾーンは高性能のものでも 80 cm が限界であり^[6]、ONU からのフレネル反射を分離するには不十分である。そこで MW9087B ではイベントデッドゾーン性能をさらに向上し、50 cm 以下を実現する。

(2) 高密度サンプリング

従来の OTDR のサンプリング分解能は距離レンジに依存し、距離レンジが長くなるとサンプリング分解能が悪くなる。PON システムの最長 20 km を測定する場合、距離レンジ 20 km を設定して測定すると 1 m 以下のサンプリング分解能では測定できない。そのため ONU からのフレネル反射が 1 m 程度まで近接している場合には反射位置の分離を十分に行うことができない。この問題を解決するため、指定された範囲内を高密度にサンプリングする機能を開発し、距離レンジによらずサンプリング分解能 5 cm を実現する。短イベントデッドゾーン性能と合わせて、ONU からのフレネル反射の高分解能測定に対応し、近接したフレネル反射を確実に分離測定できるようにする。

(3) 広ダイナミックレンジ化

PON システムにおける OTDR 測定はスプリッタによる損失が大きいため、スプリッタ以降の分岐光ファイバを測定するためには十分なダイナミックレンジが必要となる。例えば 64 分岐のスプリッタでは、スプリッタ損失は約 20 dB となりスプリッタより先の後方散乱光を測定するためには、これ以上のダイナミックレンジがなければ測定できない。

このように損失が大きい PON システムの分岐光ファイバの後方散乱光が測定できるようにパルス幅 500 ns でのダイナミックレンジ 20 dB 以上を実現する。

(4) イン・サービス測定対応

イン・サービス測定に対応するため、OTDR 光源として ITU-T L.66 に準拠する中心波長 1650 nm の狭スペクトル

幅 LD を開発する。また OTDR の入出力端にバンドパスフィルタを挿入して、LD の自然放出光や副次モードの接続回線への漏れ、および OTDR への通信光の入射を防ぎ、通信や OTDR 性能へ影響を及ぼさない設計にする。

4 開発の要点

4.1 基本構成

MW9087B の基本構成を図 2 に示す。

送信部の狭スペクトル幅 LD から光パルスを送測定光ファイバに射出し、送測定光ファイバからの戻り光を受光部の APD で光電変換、AMP で増幅、そして ADC で AD 変換する。Gate Array は測定および LD 発光のタイミング制御や AD 変換されたデータの加算処理などを行う。制御用外部インターフェースは 10/100Base-T 対応の Ethernet および USB を有し、それぞれ汎用の RJ45 コネクタ、USB B コネクタで接続可能である。リモート制御は ASCII コマンドに対応しており、従来機種である MW9077A とコマンド互換とした。外寸サイズは 165×50×270 mm と小型で 19 inch ラックへの組み込みも容易である。なお、電源は DC12V で動作する。

MW9087B 外観写真を次の図 3 に示す。

4.2 イベントデッドゾーン 50 cm の実現

OTDR のイベントデッドゾーンは、送信部から射出する光パルス幅の光ファイバ内での空間距離に加え、受光部のパルス応答特性などによって生じる。そのためイベントデッドゾーン短縮のためには光パルス幅を狭くし、受光部の周波数帯域幅を広げて波形応答を



図 3 MW9087B 外観写真
The overview of MW9087B

高速にすることが必要である。MW9087B ではイベントデッドゾーン 50 cm 実現のため、送信部および受光部の回路それぞれの最適化を行った。

送信部はパルス信号を生成するロジック回路、および LD から狭パルス光を出力させる駆動回路を高速化することにより、射出光パルスのピークパワーを低下させることなく 3 ns 以下の光パルス幅を実現した。受信部は波形応答シミュレーションより求めた結果を基に設計し、周波数帯域幅を従来に比べ約 3 倍に拡大した。一般的に広い周波数帯域の増幅器では、パルス応答にアンダーシュートやリングングなどが発生しやすいが、回路パターンやインピーダンスを最適化することで波形歪みを抑制した。また SN 比の悪化を防ぐため従来の増幅器ゲインを維持し性能を確保した。

イベントデッドゾーン性能を評価した実験系および結果を図 4 に示す。図の実験系において、OTDR から射出した光パルスは可変光アッテネータにより減衰し、光カップラで分岐した後、50 cm の線路差を持つファイバの先に取り付けられた 1650 nm 高反射光フィルタにより反射し OTDR へ戻される。

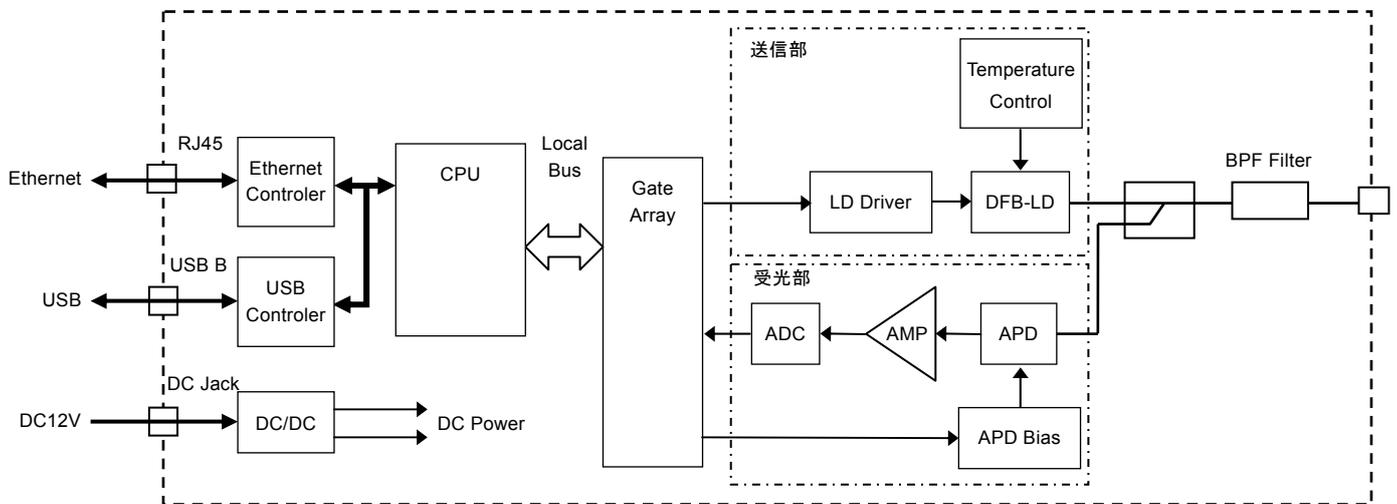


図 2 MW9087B の基本構成
The block diagram of MW9087B

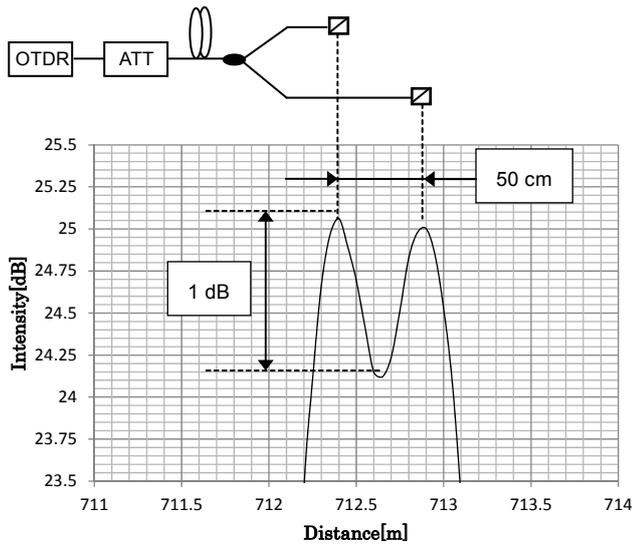


図4 イベントデッドゾーン評価結果
Evaluation result of event deadzone

測定結果は OTDR から光フィルタまでの線路損失を 25 dB, サンプルング分解能 5 cm で測定したときのものである。これより二つのフレネル反射波形の谷間が反射のピークレベルより約 1.0 dB あり, 50 cm の近接したフレネル反射点を分離して測定することが可能であることが分かる。

4.3 部分サンプリング機能の開発

長い距離レンジにおいても細かい分解能で測定するためには, サンプルングポイント数を増やす必要がある。しかしサンプルングポイント数を増やすと大容量の内部メモリが必要となりコストアップ要因となる。また OTDR から出力される波形データの容量も大きくなるため, OTDR を組み込む光ファイバ監視装置にとっても測定速度の低下やデータ保存用に大容量のドライブ等が必要になるといった問題が生じる。

上記問題を解決するため, 特定の区間のみを高密度に測定することができる部分サンプリング機能を開発した。これまでの OTDR では, 被測定ファイバの片端(口元)をサンプルング開始位置(ゼロ位置)として, 戻ってくる後方散乱光を設定された距離レンジ全範囲においてサンプルングしていた。しかし部分サンプリングでは, LD の発光とサンプルング開始のタイミングを Gate Array で制御することによりゼロ位置をシフト, サンプルング範囲を変更し, 指定された区間のみを高密度にサンプルングするようにした。

部分サンプリングを利用した測定例を図 5(a) および(b) に示す。測定は 20 km のファイバの先の 4 分岐, 16 分岐のスプリッタを測定した例である。図 5(a) は通常のサンプルングで測定した全体波形, 図 5(b) は図 5(a) の四角形で囲まれた範囲における通常サン

プリング波形と同じポイント数で部分サンプリング測定を行った波形の比較である。

図 5 (b)より通常サンプルングでは分解能が粗く連続したフレネル反射を分離できていないが部分サンプリング機能を用いることで, 少ないポイント数でも監視区間のフレネル反射を高分解能で分離測定することが可能であることが分かる。

4.4 広ダイナミックレンジ化と波形応答特性改善

従来の OTDR では, スプリッタより先の後方散乱光測定において, 受光器の波形応答特性により, スプリッタ損失の急激な波形変化部でアンダーシュートや波形裾引きなどが発生し, スプリッタ直後の後方散乱光を正確に測定することが困難であった。

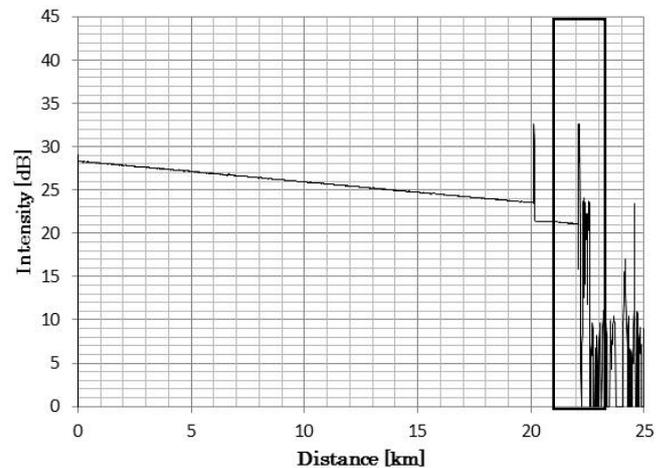


図 5(a) 通常サンプルングでの全体波形
Entire trace on normal sampling

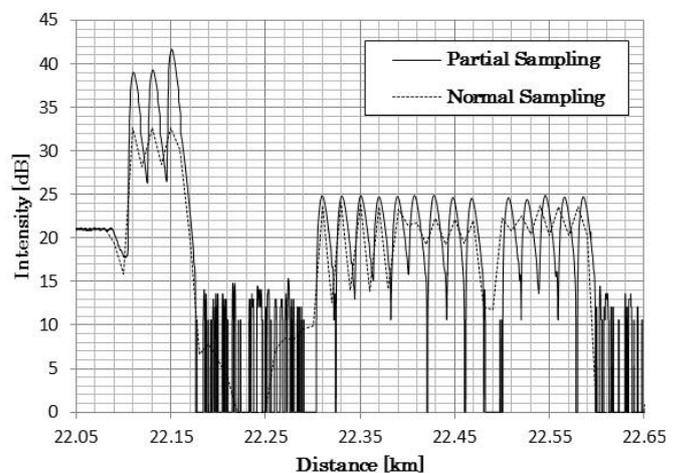


図 5(b) 通常サンプルングと部分サンプルング測定の比較
Comparison of the normalsampling and partial sampling

MW9087B では、パルス幅ごとに後方散乱光信号、ノイズのレベルダイアをシミュレーションし、受光部の増幅器ゲイン、および周波数帯域の最適値を算出した。また増幅器に低ノイズ、低歪みのデバイスを採用することにより波形応答特性を改善するとともにダイナミックレンジの向上を図った。その結果、分岐光ファイバの後方散乱光測定に最適なパルス幅 500 ns でのダイナミックレンジで 20 dB、また最大パルス幅でのダイナミックレンジでは 41 dB を実現した。

また増幅器のゲインと周波数帯域幅は反比例の関係にあるためダイナミックレンジと前項で述べたイベントデッドゾーンの性能はトレードオフとなる。そこで、MW9087B はパルス幅ごとに受光部の回路系統を分岐し、それぞれ最適な回路を適用することに広ダイナミックレンジ化と短イベントデッドゾーンを両立した。

4.5 光学部

波長 1650 nm の光源にはスペクトラム帯域幅が狭く、波長確度の高い狭スペクトル幅 LD を新たに設計した。さらに温度制御を行うことにより外部温度などの環境変化に対しても、安定した波長を維持することができる。MW9087B ではスペクトラムのピークから -20 dB の幅において 1645 nm~1655 nm の波長確度およびスペクトラム帯域幅を実現した。図 6 にパルス幅 1 μs でのスペクトラム波形例を示す。

またバンドパスフィルタは透過帯域 1645 nm~1655 nm、通信波長帯におけるアイソレーションが 50 dB 以上のフィルタを使用した。そのため -20 dBm の通信光が入射された場合でも、ダイナミックレンジが劣化することなく測定が可能である。

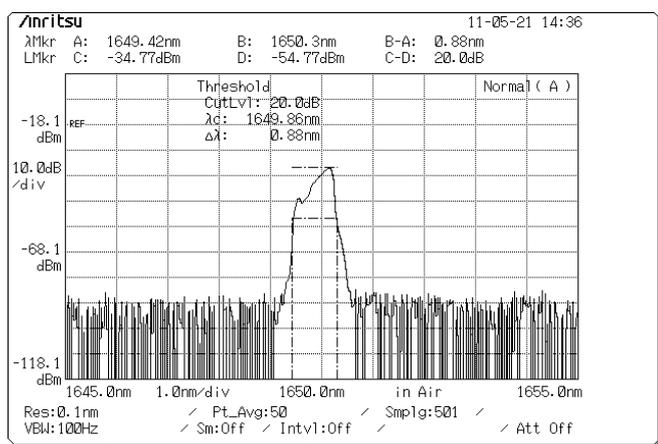


図 6 パルス幅 1 μs での OTDR スペクトラム
OTDR Spectrum with 1μs pulse width

5 MW9087 シリーズ

MW9087 シリーズとして、これまで述べてきた PON システム監視用 MW9087B とコア・メトロネットワーク監視用 MW9087D をラインナップとしている。MW9087D は波長 1550 nm のハイパワー LD を備え、50 dB の超広ダイナミックレンジ性能を持つことを特徴としている。またイベントデッドゾーンは 1.0 m 以下を実現しており、200 km を超える長距離ネットワークの監視に対応している。

図 7 に MW9087D で 220 km の光ファイバを測定した波形例、および表 1 に MW9087 シリーズの規格一覧を示す。

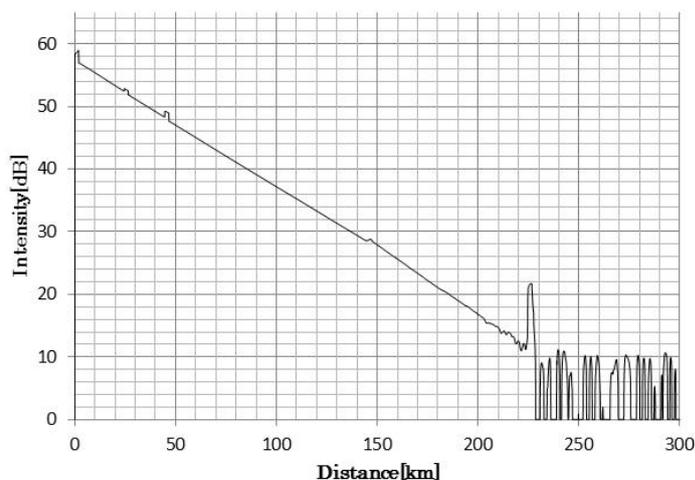


図 7 MW9087D による 220 km ファイバ測定例
An example of 220 km fiber measurement with MW9087D

6 むすび

FTTH の導入が世界的に始まり、PON システム監視需要が高まっている。我々は、PON システム光ファイバ監視装置用途に最適な MW9087B カード OTDR を開発した。イベントデッドゾーン 50 cm を実現し、部分サンプリング機能を備えることで、PON システム監視に必須である ONU からの近接するフレネル反射高分解能測定に対応した。さらにダイナミックレンジ 41 dB を実現し、スプリッタの損失測定、およびスプリッタ以降の後方散乱光測定を可能とした。これにより、PON システムにおける障害検出を高精度に行うことができる。

本器が、PON システムの監視、ネットワーク保守においてより高い信頼性を提供し、さらなる光ネットワークの拡大に貢献することを期待する。

参考文献

- 1) M. M. Rad, K. Fouli, H.A. Fathallah, L.A. Rusch, and M.Maier, "Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements," IEEE Communication Magazine, Vol.49, Issue2, pp. s45-s52, Feb. 2011
- 2) ITU-T Recommendation L.53(2003), "Optical fibre maintenance criteria for access networks,"
- 3) N. Nakao, H. Izumita, T. Inoue, Y. Enomoto, N. Araki, and N. Tomita, "Maintenance Method Using 1650- nm Wavelength Band for Optical Fiber Cable Networks," Journal of Lightwave Technology, Vol.19, No.10, pp.1513-1520, Oct.2001
- 4) ITU-T Recommendation L.41(2000), "Maintenance wavelength on fibres carrying signals,"
- 5) ITU-T Recommendation L.66(2007), "Optical fibre cable maintenance criteria for in-service fibre testing in access networks,"
- 6) 今津善文, 清水雅哉, 加藤敬太, 堀重雄, 岩崎王亮, "FTTH 保守用オールインワン測定器アクセスマスタ MT9080 シリーズの開発", アンリツテクニカル 82 号, pp.30-37, (2006.3)

執筆者



村上 太一
計測事業グループ
R&D 統轄本部
第 1 商品開発部



福嶋 大輝
計測事業グループ
R&D 統轄本部
第 1 商品開発部



上野 真樹
計測事業グループ
R&D 統轄本部
第 1 商品開発部

表 1 MW9087 シリーズ性能規格
Specification of MW9087 series

Model No.	MW9087B	MW9087D
Wavelength	1645 to 1655 nm	1550 ± 25 nm
Pulse peak power	<=+15dBm	-
Measurement fiber	10/125um SM fiber (ITU-T G.652)	
Dynamic range(typical)	41 dB	50 dB
Dead zone (Fresnel)	<=0.5m	<=1.0m
Dead zone (Back scatter)	<=6.5m	<=4.3m
LD type	DFB-LD	FP-LD
In-service cut filter	Mounted	Not mounted
Pulse width	3, 10, 20, 50, 100, 200, 500ns, 1, 2, 4, 10, 20μs	
Distance range	1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 300 km (IOR=1.500000)	
Sampling resolution	0.05-60m (IOR=1.500000)	
Distance Measurement Accuracy	±1m ±3x Meas. distance x10 ⁻⁵ ±Sampling Resolution (Uncertainty with fiber's index of refraction is excluded.)	
Loss minimum unit	0.001dB	
Linearity (Loss measurement accuracy)	±0.05dB/dB or ±0.1dB (Whichever is greater)	
Sampling points	Coarse: 5,001 Medium: 20,001 or 25,001 Fine: 100,001, 125,001 or 150,001	
IOR setting	1.000000 - 1.999999 (0.000001 step)	
Averaging time (Averaging count)	1 to 9999 times or 1 to 9999 seconds (settable range)	
Auto measurement	<p>Measurement item: Total loss, Distance of each event, Splice loss, Return loss, or Reflectance</p> <p>Threshold: Splice loss 0.01 to 9.99dB (0.01dB step), Reflectance -60 to -20dB (0.1dB step), Far end 1 to 99dB (1dB step)</p> <p>Number of detected events: Up to 99 events</p> <p>Automatic setting: Distance range, pulse width, and averaging count (period)</p>	
Manual measurement	<p>Measurement item: 2-point loss, 2-point LSA, dB/ km loss, splice loss, return loss or level difference</p>	
Other function	Partial sampling function, Remote control function, High dynamic range mode added (pulse width 50ns to 2us)	
Interface	<p>Ethernet: RJ45 Ethernet 10Base-T/100Base-Tx Auto negotiation supported Ethernet Full Duplex/Half Duplex supported</p> <p>USB 1.1: Type Bx1</p>	
Power	12Vdc± 10%	
Power consumption	<=20W	
Dimensions	165(H) x 50(W) x 270(D)mm (not including projection portion)	
Weight	<=1.5kg	
Temperature / Humidity	<p>Operating temperature and humidity: 0 to 50°C, <=95% (no condensation)</p> <p>Storage temperature and humidity: -20 to 60°C, <=95%</p>	
Laser safety	IEC 60825-1: 2007 Class 1 (MW9087B) IEC 60825-1: 2007 Class 1M (MW9087D)	

公知