

論文内容の要旨

論文題目 光波コヒーレンス関数の合成法による リフレクトメトリの広範囲化に関する研究

氏名 柏木 正浩

半導体レーザや低損失光ファイバの開発により光ファイバセンサは光ファイバ通信と共に発展してきた。中でも光ファイバの損失特性や反射特性を測定することができる光ファイバリフレクトメトリは非常に重要である。光ファイバリフレクトメトリの代表的な技術としては Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) がある。OTDR は対象に光パルスを入射し、散乱・反射光が戻ってくるまでの時間と強度により反射率分布を取得する。100 km を超える測定範囲を持ち既に実用化されている。しかしその空間分解能は 1 m 程度である。もうひとつの代表的な技術としては Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) がある。OFDR では光源の光周波数を鋸波的に変調することで、信号光と参照光の周波数差と干渉強度により反射率分布を取得する。数 10 km の測定範囲が可能であるが空間分解能は測定範囲と共に劣化する。cm オーダの空間分解能であるのは測定範囲が 1 km 程度までになる。

これに対して保立研究室では光源の干渉特性を制御する光波コヒーレンス関数の合成法を応用したリフレクトメトリ、Optical Coherence Domain Reflectometry (OCDR) と、phase-modulating Optical Coherence Domain Reflectometry (p-OCDR) を提案している。この手法ではデルタ関数形状のピークを持つ干渉特性を合成し、そのピークの位置と干渉の強度により反射率分布を取得する。測定が高速であるという特徴から遠方監視にも応用され 5 km 遠方において 6 cm という空間分解能を実現しているが、測定範囲は数 10 m 程度である。

これまでに研究されているリフレクトメトリでは数 km から数 10 km の測定範囲と cm オーダの空間分解能という広い測定範囲と高い空間分解能を両立する手法はまだ提案されていない。このような性能を持つリフレクトメトリは光加入者系を診断する技術や広範囲の歪センサ、温度センサなどにも応用することができ非常に重要である。そこで本論文では光波コヒーレンス関数の合成法によるリフレクトメトリの測定範囲を拡大する手法を示した。

まず光ファイバ遅延ループを用いた光波コヒーレンス関数の合成法による遠方監視用リフレクトメトリについて説明した(図 1)。p-OCDR のシステムに光スイッチと光ファイバ遅延ループを加えることで遠方監視と測定範囲の拡大を可能にした。p-OCDR では周期的なデルタ関数形状のピークを持つ光波コヒーレンス関数を用いることから、そのまま遠方監視に用いることは不可能である。そこで光スイッチにより光パルスにすることで光パルス窓を作り、ただひとつのピークを取り出し遠方監視を可能とする。ただし、測定範囲が光パルス窓により限定される。そこで参照光路に光ファイバ遅延ループを設置することで対象上に複数の光パルス窓が連続的に並べ測定範囲を拡大した。この時に光ファイバ遅延ループに光周波数シフトを設置することで各光パルス窓のビート周波数が光周波数シフトのシフト周波数分だけ異なり、それぞれのビート周波数成分を観測することで別々に光パルス窓の反射情報を取得することができる。

基礎実験では測定範囲が 1 km、空間分解能 11 cm のシステムを構築して反射率分布を測定した。まず 5 km 遠方の 100 %ミラーを対象として空間分解能の評価を行い 11 cm であることを確認した。次に 5 km 遠方で約 500 m の光ファイバ 2 本をコネクタで接続して、測定範囲が 1 km、空間分解能 11 cm でその反射率分布を測定した(図 2)。得られた反射率分布では 2 つのコネクタの反射と終端における端面反射が観測できた。

さらにシステムの性能についての検討も行った。性能としては光加入者系での診断においても重要となる、ダイナミックレンジ、空間分解能、測定範囲、測定時間の 4 つである。ダイナミックレンジは主に光源の FM 雑音によるノイズにより制限される。信号光路上に反射が存在する場合に、光源に FM 雑音があることでその反射により測定範囲内にノイズフロアが形成されダイナミックレンジが制限されることになる。このノイズフロアが受光器後に設置したバンドパスフィルタの帯域により大きさが変化する。さらに光パルス窓や光源の可干渉度が原因で出力が減少することから、同様にダイナミックレンジは低下する。空間分解能は光波コヒーレンス関数を合成する為の光周波数変調の変調量が大きいほど向上する。矩形波的な変調を行っていることから、1 ステップの変調量が大きく、また 1 ステップの時間長が短く、そして周期が長いほど空間分解能がよくなる。1 ステップの変調量は光パルス窓の窓幅との関係により制限される。1 ステップの時間長は可干渉度とダイナミックレンジの関係で制限される。周期については環境変動による位相雑音が干渉計に影響を与えることから、高速測定が必要となり制限される。

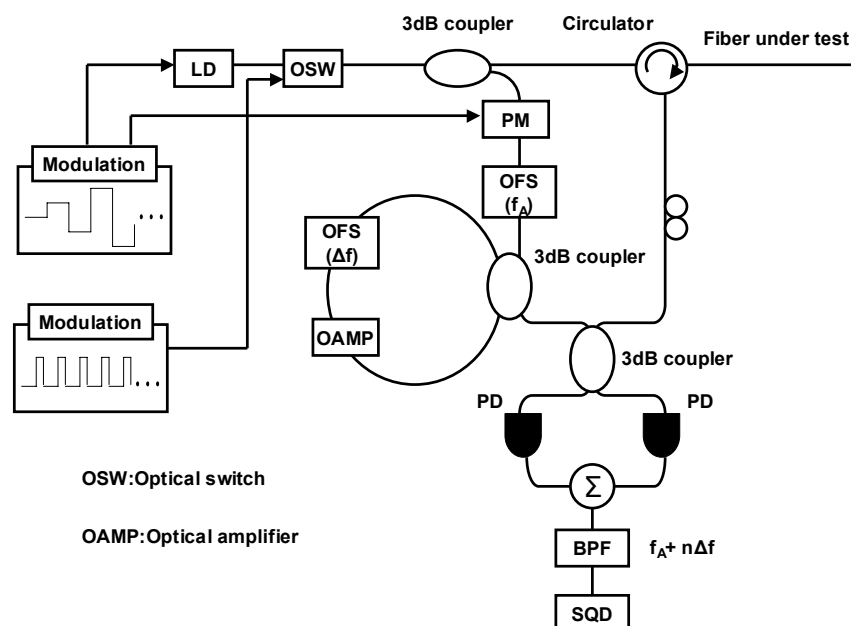


図 1: 光ファイバ遅延ループを用いた光波コヒーレンス関数の合成法による遠方監視用リフレクトメトリ

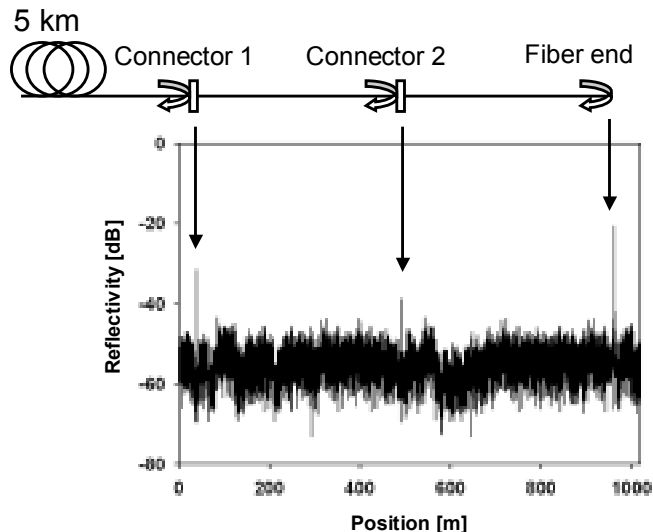


図 2: 5 km 遠方における反射率分布関数の合成法による遠方監視用リフレクトメトリ

測定範囲は光パルス窓の窓数により決まる。窓数はビート周波数の間隔と受光器の帯域により決まる。システムでは光領域で様々に変調していることから、各光パルス窓のビートスペクトラムは広がる。この広がり方の形状とスペクトラム離散的であることを利用して光周波数シフトのシフト周波数を小さく設定することが出来る。

測定時間はある 1 点の反射率を測定する時間、測定点の間隔、あるひとつの光パルス窓の測定範囲、そして光パルス窓数により決まるが、これらのパラメータはその他のシステム性能に依存して決まる。

システム性能に関する議論をもとに性能に関するシミュレーションを行い、1 km 以上の測定範囲、10 cm 程度の空間分解能、そして -20 dB のダイナミックレンジが実現できることを示した

次にコヒーレンス長を超えた領域における光波コヒーレンス関数の合成法によるリフレクトメトリについて説明した(図 3)。従来の OCDR ではコヒーレンス長内に関する議論のみであったことから、測定範囲がコヒーレンス長により制限されていた。そこで測定範囲を拡大する為にコヒーレンス長を超えた領域についての議論を行った。光源は正弦波的な光周波数変調を行うとして、光源の線幅を考慮した光波の式から干渉計の出力となる電流のパワースペクトラムを表現する式を導出した。そしてその式をもとに光路差によるパワースペクトラムとビート周波数成分の変化についてシミュレーションした。出力電流のパワースペクトラムは光路差によりローレンツ形状から台形状に、そして双峰形状のパワースペクトラムへと広がる。この時にビート周波数成分は光路差が増えると共に減少していき、等光路点にピークを持つような形状となった。これによりコヒーレンス長を超えた領域においても OCDR の手法を用いて反射率分布を測定することができることを示した。

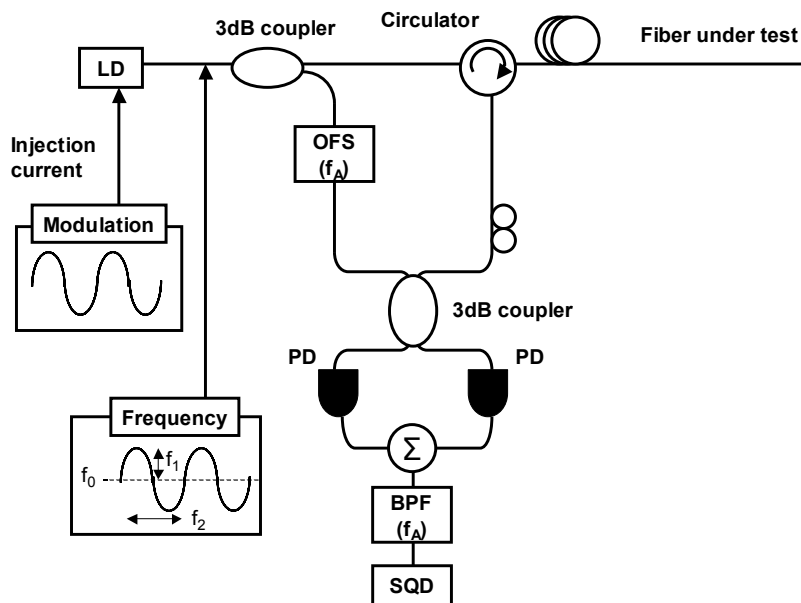


図 3: コヒーレンス長を超えた領域における光波コヒーレンス関数の合成法によるリフレクトメトリ

ただし、ビート周波数を大きくした場合には正しい反射率分布を取得することができないこともシミュレーションにより確認した。そこでビート周波数を小さくする方法、ビート周波数を 0 Hz としてその近傍の周波数を観測する手法、ビート周波数を 0 Hz としてバンドパスフィルタにより直流成分を除いた低周波数成分を測定する手法を示し、シミュレーションにより正しく反射率分布を取得することができることを確認した。基礎実験では測定範囲が 1 km、空間分解能 19 cm のシステムを構築して反射率分布を測定した。まず 5 km 遠方の 100 % ミラーを対象として反射率分布測定を行い、ビート周波数が大きい場合には正しい反射率分布が得られないことを実験的に確認した。次にビート周波数を小さくした場合において同様に測定を行い、反射点にのみ鋭いピークを持つ反射率分布が得られることを確認した。さらにシステムの空間分解能を評価する測定を行い、空間分解能が 19 cm であることを確認した。最後に 5 km 遠方で約 500 m の光ファイバと光アイソレータをコネクタで接続して、測定範囲が 1 km、空間分解能が 19 cm でその反射率分布を測定した(図 4)。得られた

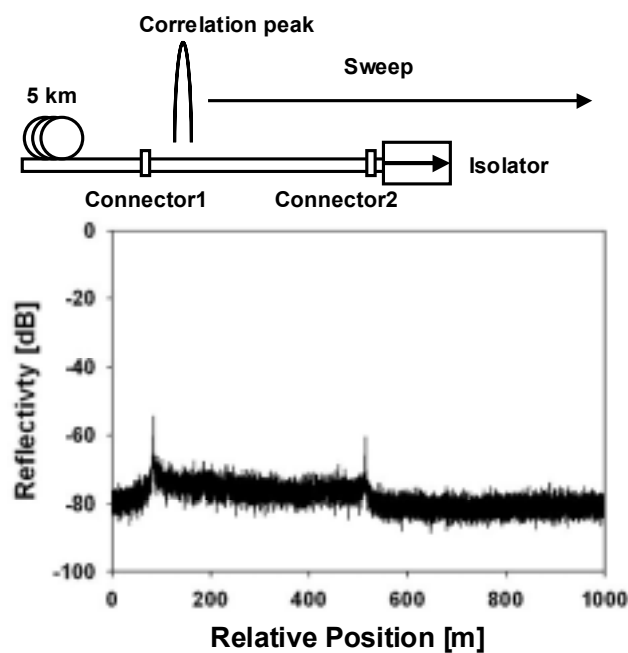


図 4: 5 km 遠方におけるコネクタを対象として取得した反射率分布

表 1: 各種リフレクトメトリの性能比較

	OTDR	OFDR	#1	#2
Spatial Resolution	✗ 1-2m ~	△ 14cm ~	⊙ 5-10cm	○ 10-20cm
Measurement Range	⊙ 100km ~	△ 1km ~	△ 2-3km ~	○ 5-10km
Dynamic Range	△ 40-50dB	⊙ 80-90dB	✗ 20-30dB	△ 35dB ~
Measurement time	○ 1min. ~	⊙ 4-5sec.	○ 5-10min.	○ 5-10min.
Cost	⊙ Very cheap	○ Cheap	✗ Expensive	○ Cheap

#1: Measurement range elongation in a high spatial resolution reflectometry for optical subscriber networks by synthesis of optical coherence function

#2: Long range and high resolution reflectometry using synthesis of optical coherence function at the region beyond the coherence length

反射率分布では 2 つのコネクタによる反射が観測できた。

さらに空間分解能とシステムパラメータの関係についても考察した。出力電流のパワースペクトラムを表現する式をもとに、光源の線幅や相関ピークを合成する為の光周波数変調の変調振幅と変調周波数、そして受光器後に設置したバンドパスフィルタの帯域の空間分解能への影響についてシミュレーションした。空間分解能が光源の線幅に比例し、変調振幅や変調周波数と反比例の関係にあることが示された。また、バンドパスフィルタの帯域を光源の線幅程度まで広げることによって感度が向上することや、それ以上に広げた場合には空間分解能が劣化することを示した。

最後には OTDR や OFDR、光ファイバ遅延ループを用いた光波コヒーレンス関数の合成法による遠方監視用リフレクトメトリ、そしてコヒーレンス長を超えた領域における光波コヒーレンス関数の合成法によるリフレクトメトリについて、測定範囲、空間分解能、ダイナミックレンジ、測定時間、コストの面で比較及び検討した(表 1)。それにより測定範囲と空間分解能の双方を両立できるコヒーレンス長を超えた領域における光波コヒーレンス関数の合成法によるリフレクトメトリが有力な技術であることを確認した。