

波長掃引光源

基本動作原理と OFDR 計測について

目次

1	はじめに	3
2	波長掃引光源の動作原理	4
3	OFDR 測定について	6
3.1.	OFDR 測定概説.....	6
3.2.	波長掃引の非線形性の補正	9
3.2.1.	ソフトウェア リサンプリング.....	11
3.2.2.	波長分散の補正	13
3.2.3.	ハードウェア リサンプリング.....	18
3.2.4.	遅延補正	18

1 はじめに

近年、レーザ光の可干渉性を利用した光計測法のひとつである OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) がさまざまな分野で応用され始めています。キーデバイスである波長掃引光源の改良が進み、測定対象点の位置を高速かつ高精度に測定できるようになってきたことが主要因です。高精度形状測定、薄膜の膜厚測定、微細構造形状計測などの分野で実用化が進んでおり、特に眼科診断領域での進展は著しいと言えます。

OFDR で用いる波長掃引光源は測定の対象によって適切なものを選ぶ必要があります。高い位置分解能を得るためには、波長掃引範囲が広い光源を必要とし、高速な運動をする対象物のリアルタイム性の高い計測が求められる場合には、波長掃引周波数の高い光源が必要になります。また測定可能な距離範囲を広げるためにはコヒーレンス長の長い光源を選択する必要があります。加えて、コヒーレンス長の長い光源を用いることで、OFDR の干渉信号を高い SNR (signal to noiseratio) で測定でき、位置分解能や確度を向上させることができます。

我々は MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) スキャニングミラーを用いて、kHz オーダの高速波長掃引が可能で、波長掃引幅が広く、高コヒーレンスな波長掃引光源を開発し、実用化してきました。ここでは当社製波長掃引光源の概要と、波長掃引光源を用いた OFDR 測定の基本構成および、測定で注意すべき点等について述べます。



図1-1 波長掃引光源の外観

2 波長掃引光源の動作原理

波長掃引光源の概略図を図 2-1 に示します。

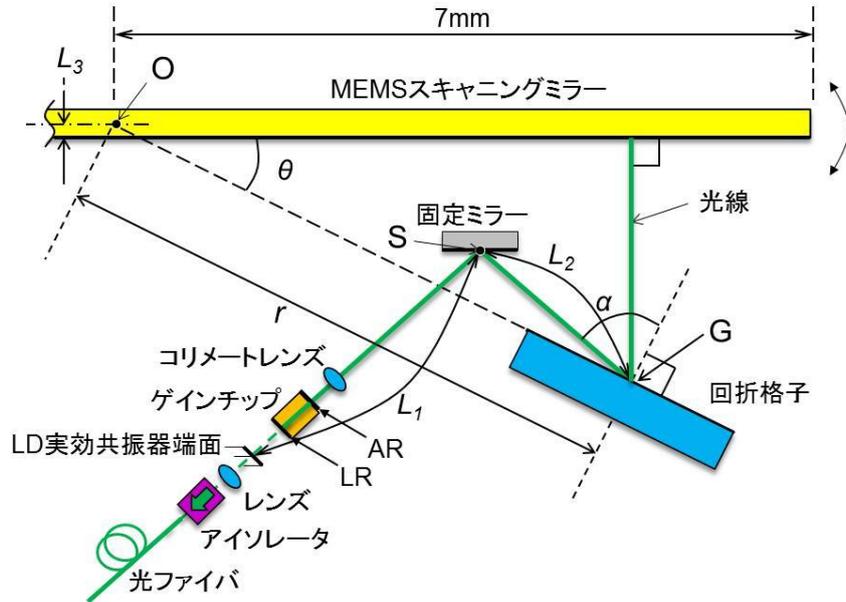


図2-1 波長掃引光源の概略図

MEMS スキャニングミラーを用いたリットマン配置を構成することで、高速な波長掃引を実現しています。この光学系では LD の実効共振器端面から MEMS スキャニングミラーの反射面の間に外部共振器が形成されます。この共振器長で決まる複数の縦モードのうち、回折格子の波長選択性により 1 つのモードだけが選択され、発振するように構成されています。さらに本光源では、図 2-1 に示すように MEMS スキャニングミラーの回転中心 O を回折格子表面の延長線上におき、次式 (1) を満足するように光学部品が配置されています。

$$L1 + L2 + L3 = r \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

ここで、 $L1$ はゲインチップの屈折率を考慮した実効共振器端面から固定ミラー上の反射点 S までの実効光路長、 $L2$ は点 S から回折格子上の入射点 G までの光路長、 $L3$ は回転中心 O と同ミラーの反射面までの距離、 r は点 G から点 O までの距離、 α は固定ミラーから回折格子への光線の入射角を表します。このとき、図 2-1 に示すように回折格子表面に対する MEMS スキャニングミラーの回転角を θ とすると、外部共振器長で決まる縦モードの波長 λ_{mode} の変化率 $d\lambda_{mode}/d\theta$ と、光線の入射角 α と回転角 θ で決まる回折格子の波長選択性のピーク波長 λ_{filter} の変化率 $d\lambda_{filter}/d\theta$ は一致します。このため図 2-2 に示すように、MEMS スキャニングミラーを回転させるだけで、単一の狭線幅の縦モードを波長連続かつモードホップと呼ばれる波長のシフトを起こすことなく変化させることができます。

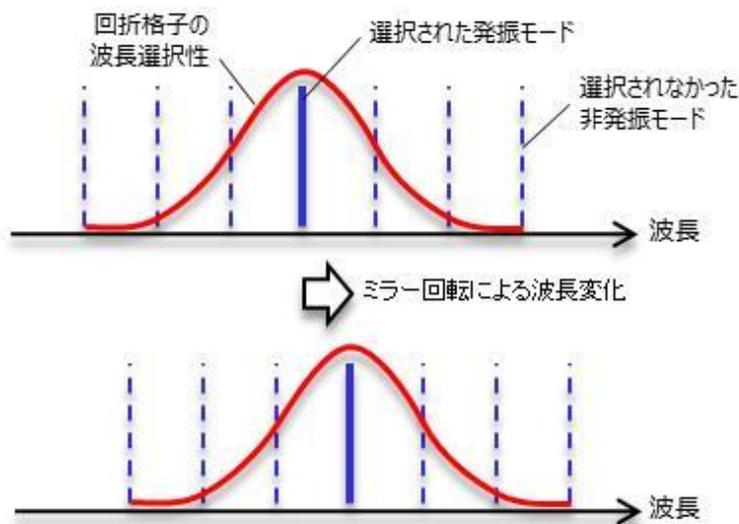


図2-2 ミラー回転に伴う回折格子の波長選択性と選択された発振モードの変化の様子

モードホップを抑制したまま波長掃引を行うには、波長を変化させるための回転機構の回転中心位置をサブマイクロオーダーで安定させる必要があります。本光源では中心位置を安定させたまま高速な波長掃引を実現するために MEMS スキャニングミラーを用いています。この MEMS ミラーは、ミラー部分とそれを支える直線状に並んだ 1 対の梁が一体構造となっています。梁を軸とした捩じれ変形によりミラー部分を回転運動させる単純かつ軽量の構造であり、軸ぶれのない高速な回転運動を可能としています。また、MEMS スキャニングミラーを共振点で回転運動させることにより、大きな回転角すなわち広い波長掃引範囲も実現しています。MEMS スキャニングミラーの静止時の回転角を θ_0 、共振周波数を f_{res} 、回転角の範囲を $\Delta\theta \times 2$ とした場合、その回転角は図 2-3 に示すように正弦波状に変化します。本光源で用いる回転角範囲では回転角に対する発振モード波長はほぼ線形に変化するため、光源からの出力波長も正弦波状に掃引されます。このため、波長掃引速度が最大となるのは、回転角の変化速度が最大となる回転角 θ_0 付近であり、その速度は回転角の範囲、つまり波長掃引範囲に比例して大きくなります。

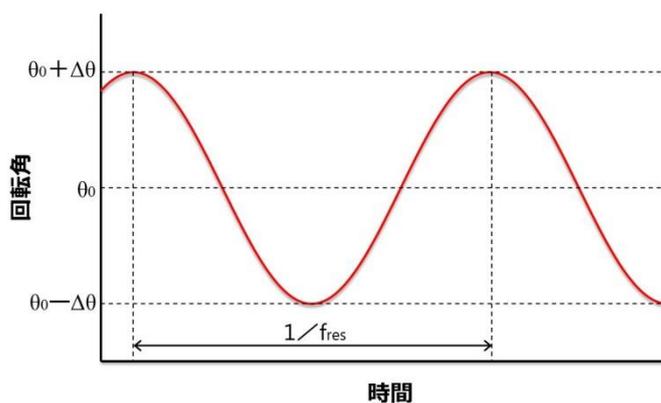


図2-3 MEMSスキャニングミラーの回転角の時間的变化

3 OFDR 測定について

ここでは、OFDR 測定についてその概要と当社製波長掃引光源を使用した際の測定方法について記載します。

3.1. OFDR 測定概説

OFDR 測定は、レーザ光の可干渉性を利用した光計測法のひとつです。測定系の一例を図 3.1-1 に示します。

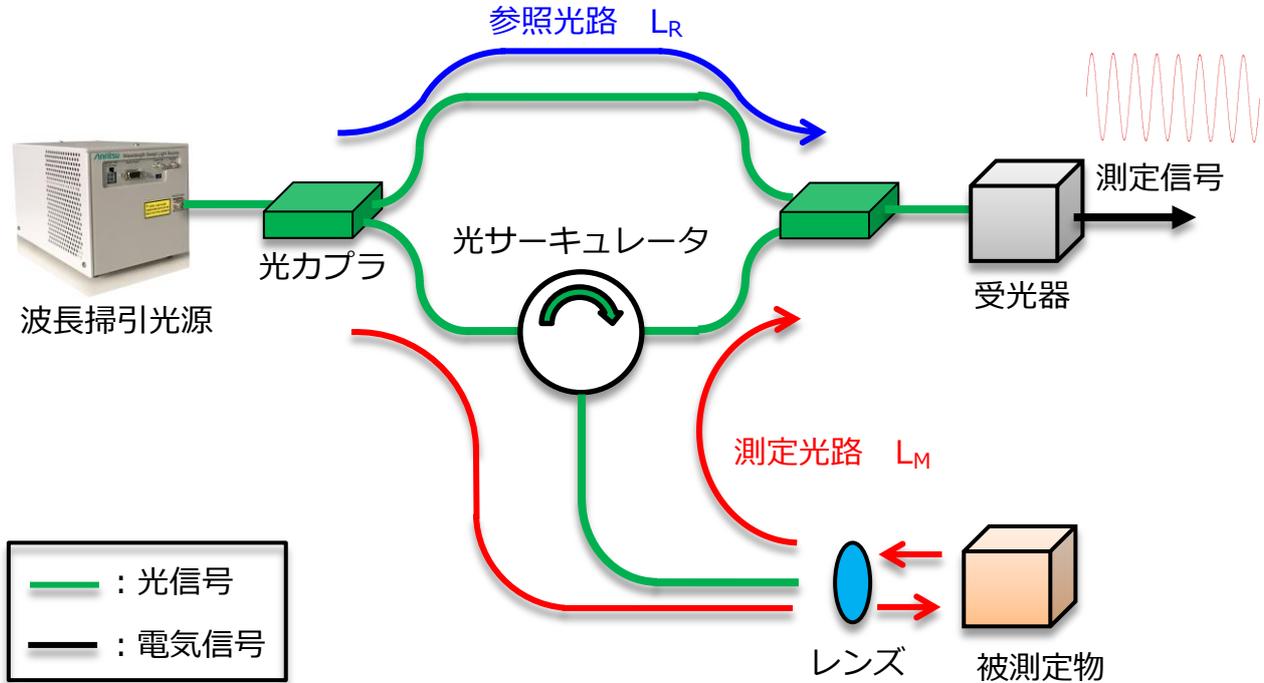


図3.1-1 OFDR測定系

波長掃引光源から出力された光は、参照光路 L_R と測定光路 L_M に光カップラで分岐されます。測定光路 L_M 側に分岐された光は、レンズ等を通して光ファイバの外に放出され、被測定物で反射されます。反射された光は再びレンズを通して光ファイバに結合されます。その後、光カップラで参照光路 L_R 側を通った光と合波され、受光器に入力されます。受光器からは、参照光路 L_R と測定光路 L_M の光路長差に応じた干渉信号が出力されます。参照光路 L_R と測定光路 L_M の距離差を z とします。

$$(L_M - L_R) = z \quad (2)$$

波長掃引光源から出力された光がそれぞれの光路を通り、受光器に到達した時、2つの光には時間的なズレが生じています。上図 3.1-1 では、参照光路 L_R より測定光路 L_M の方が長いため、測定光路 L_M を通った光は参照光路 L_R を通った光より遅れて受光器に到達することになります。その時間差 τ は式 (3) で表すことができます。

$$\tau = \frac{(L_M - L_R)}{c} = \frac{z}{c} \quad (3)$$

ここで、 c は光速を表しています。従って、掃引速度を V [Hz/s] とすると、それぞれの光の間には式 (4) の差周波数を持つ干渉信号が生じ、それが電気信号となって受光器から出力されます。

$$f_{Beat} = V\tau = \frac{Vz}{c} \quad (4)$$

光路長差が小さい場合（ z が小さい場合）、干渉信号の周波数は小さく（図 3.1-2(a) 参照）、光路長差が大きい場合（ z が大きい場合）には干渉信号の周波数は大きくなります（図 3.1-2(b) 参照）。

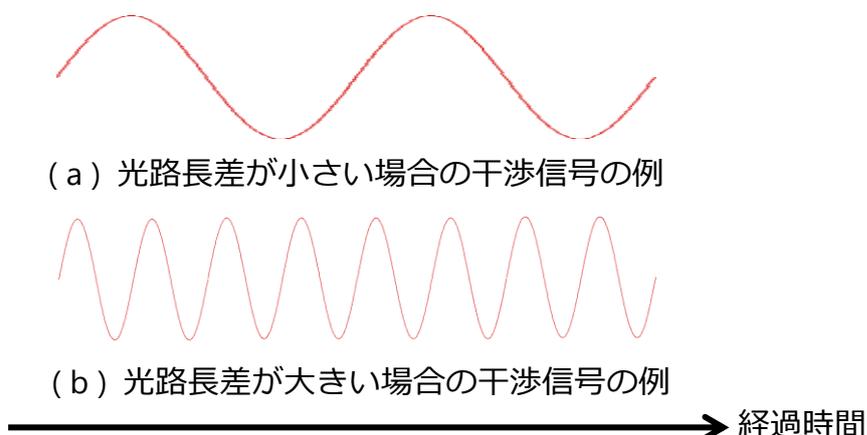


図3.1-2 受光器で観測される干渉信号の例

波長が経過時間に対して短波から長波へ直線的に掃引されている時、図 3.1-3(a) で表す t_1 から t_2 の間にサンプリングを行ったとします。これを光周波数で表示すると、同図 (b) のように経過時間に対しては逆の傾きを持つことになります。

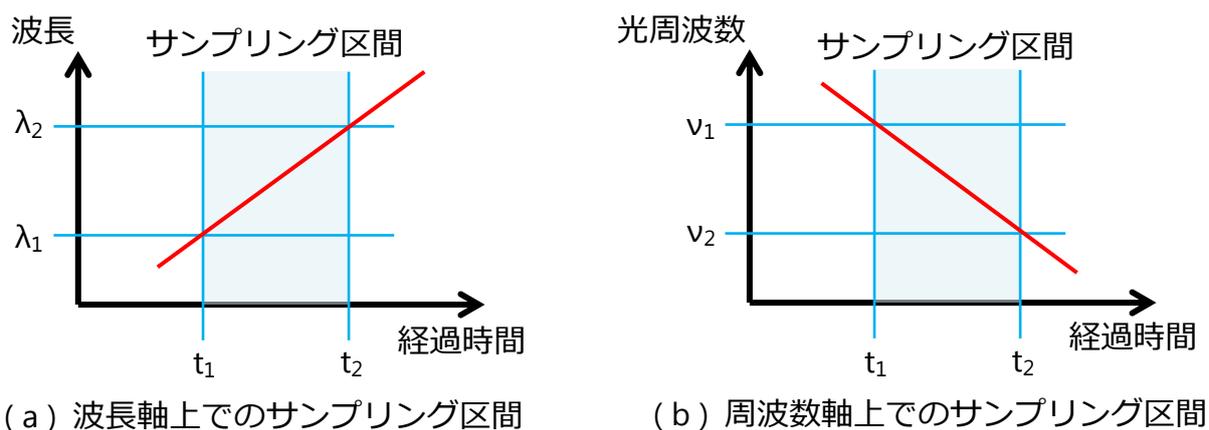


図3.1-3 サンプリング区間の説明

受光器から出力される干渉信号を時間 t_1 から t_2 までサンプリングすると、このサンプリング時間内に観測される干渉信号の波の数 M は式 (5) で表されます（図 3.1-4 参照）。

$$M = f_{Beat}(t_2 - t_1) = \frac{Vz}{c}(t_2 - t_1) \quad (5)$$

また、掃引速度 V [Hz/s] は式 (6) で表されます。

$$V = \frac{\nu_1 - \nu_2}{t_2 - t_1} = \frac{\frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2}}{t_2 - t_1} \cong \frac{c\Delta\lambda}{\lambda_c^2(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

ここで、波長掃引幅 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 、 λ_c はサンプリングの中心での波長を表します。従って、干渉信号の波の数 M は式 (7) で表すことができます。

$$M = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c^2} z \quad (7)$$

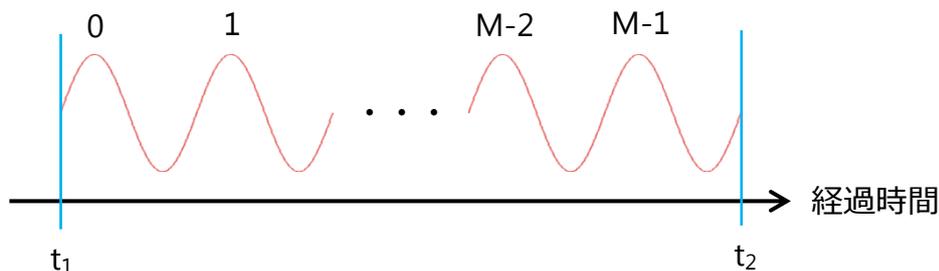
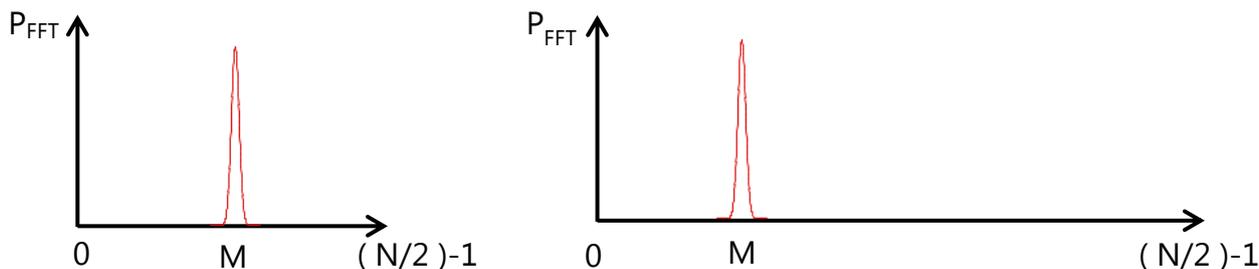


図3.1-4 サンプルングした干渉信号の例

サンプルング周波数を f_s とすると, t_1 から t_2 の時間にサンプルングした数 N は式 (8) で表せます。

$$N = f_s(t_2 - t_1) = f_s \frac{c\Delta\lambda}{v\lambda_c^2} \quad (8)$$

サンプルングしたデータに対して FFT 解析を施すと, M の位置にピークが観測されます。なお, f_s を大きくしてサンプルング数を大きくしても, M の値に影響はありません。 f_s が大きくなると測定帯域が広がるため, より大きな距離差を測定することができます (図 3.1-5 参照)。



(a) N が小さい (f_s が小さい) 場合

(b) N が大きい (f_s が大きい) 場合

図3.1-5 f_s の大きさによる FFT 後の計算結果の例

図 3.1-1 で被測定物の位置を dz 移動させた場合, 干渉信号の周波数 M' は式 (9) で表されます。

$$M' = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c^2} (z + 2dz) \quad (9)$$

この場合, 光ファイバからの被測定物への入射距離と, 被測定物から光ファイバへ結合されるまでの反射距離が加算されることになるので, 上式 (9) では 2 倍の dz が加算されることになります。

FFT の横軸分解能を 1 とすると, dz の距離を式 (10) で算出することができます。

$$\begin{aligned} M' - M &= \frac{2\Delta\lambda}{\lambda_c^2} dz = 1 \\ dz &= \frac{\lambda_c^2}{2\Delta\lambda} = \frac{c}{2\Delta\nu} \end{aligned} \quad (10)$$

つまり, 測定分解能はサンプルング時間内に掃引される波長掃引幅 $\Delta\lambda$ に反比例します。

3.2. 波長掃引の非線形性の補正

時間に対する波長変化率が線形である場合、光干渉計から出力される干渉信号の周波数は一定であり、FFT 後のピークもその周波数に一致したピークが得られます。しかし一般的に掃引光源から出力される光の波長変化率は非線形であるため、干渉信号の周波数は時間により変化し、結果的に FFT 後のピークは幅広く観測されます（図 3.2-1 参照）。そのため、ピーク位置の判別が困難となります。そこで被測定物を含んだ測定経路の他に、基準となる基準干渉計を用いる事で、その非線形性を補正することができます。ここでは基準干渉計を用いた非線形性の補正方法について記載します。

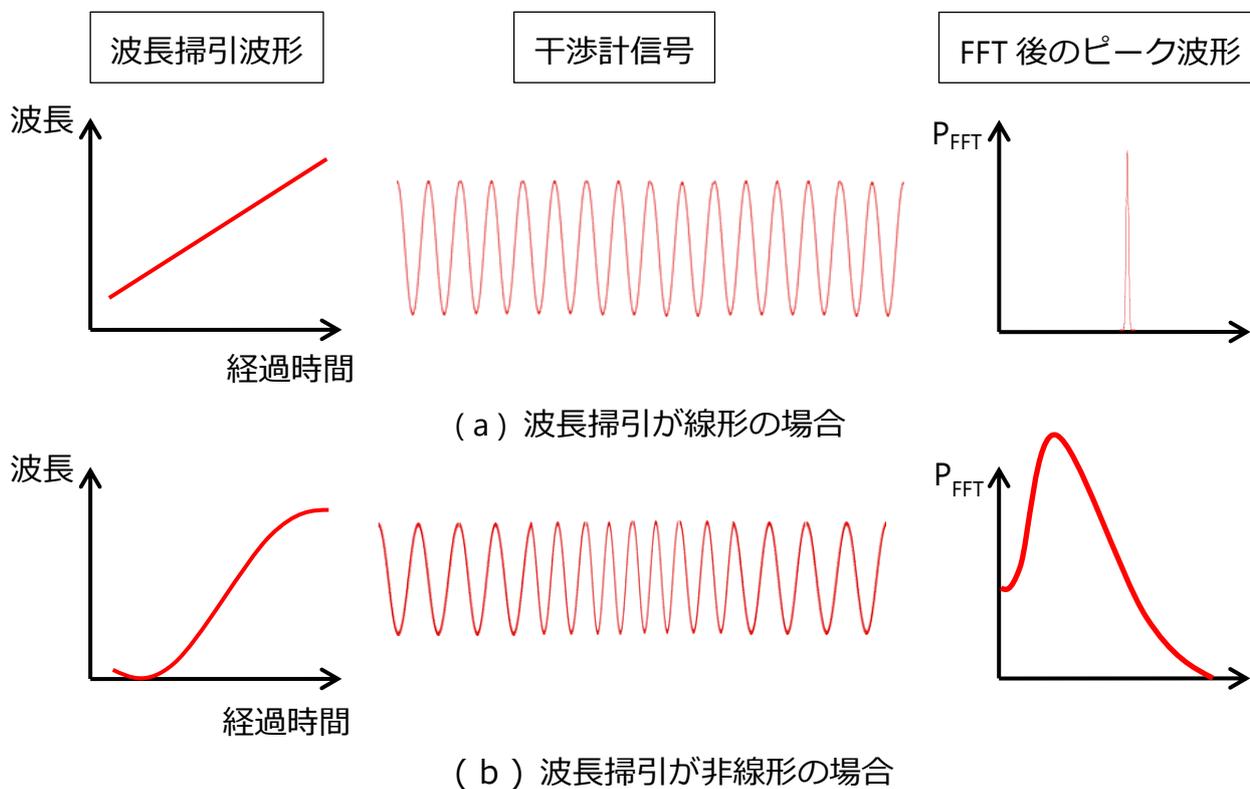


図3.2-1 波長掃引の線形性に対する FFT 解析の結果の一例

基準干渉計を用いた測定系の一例を図 3.2-2 に示します。

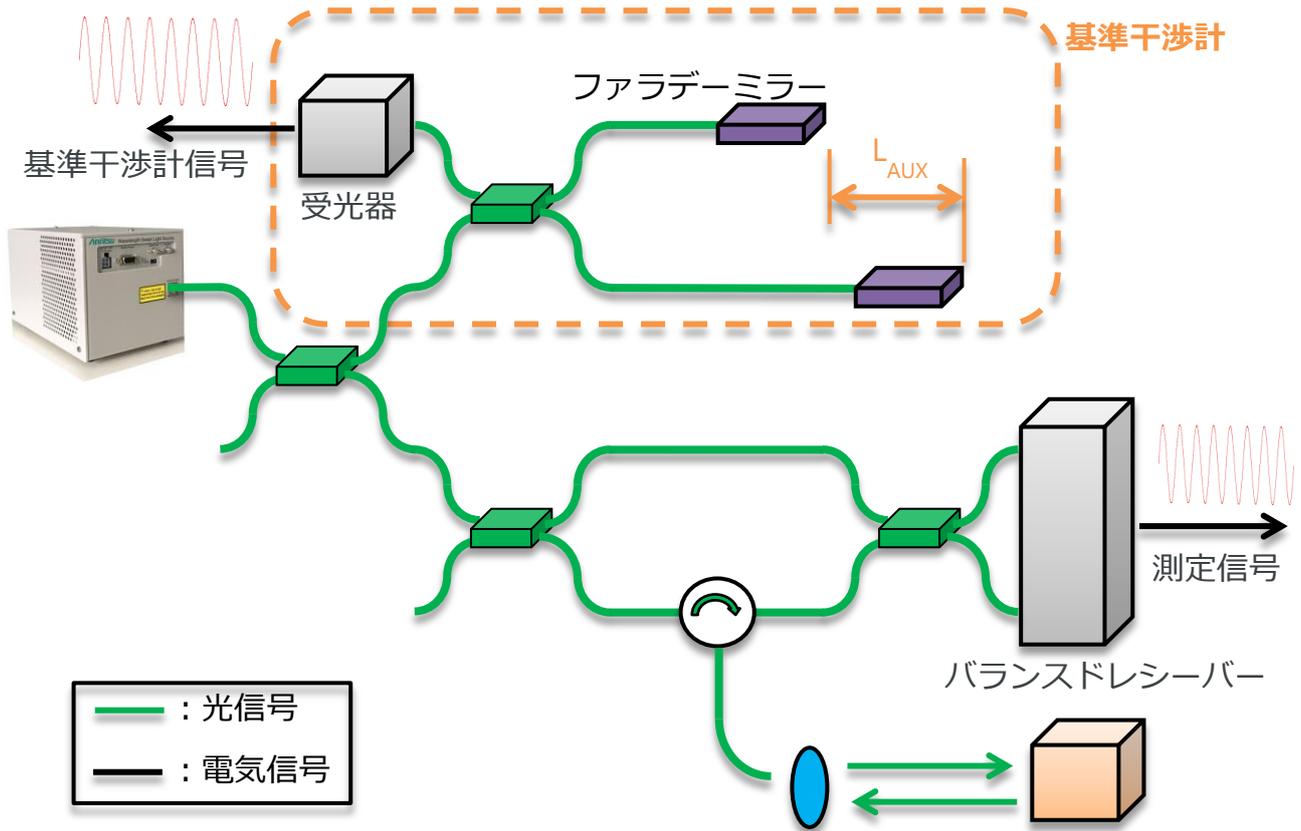


図3.2-2 基準干渉計を用いた OFDR 測定系の一例

波長掃引光源から出力された光は、光カプラで測定系と基準干渉計に分岐されます。基準干渉計からは光路長 L_{AUX} に応じた干渉信号が出力されます。例えば、この基準干渉信号の 0 クロス点で測定信号を抽出することで、波長掃引の非線形性を補正することができます。図 3.2-3 に概念図を記載します。

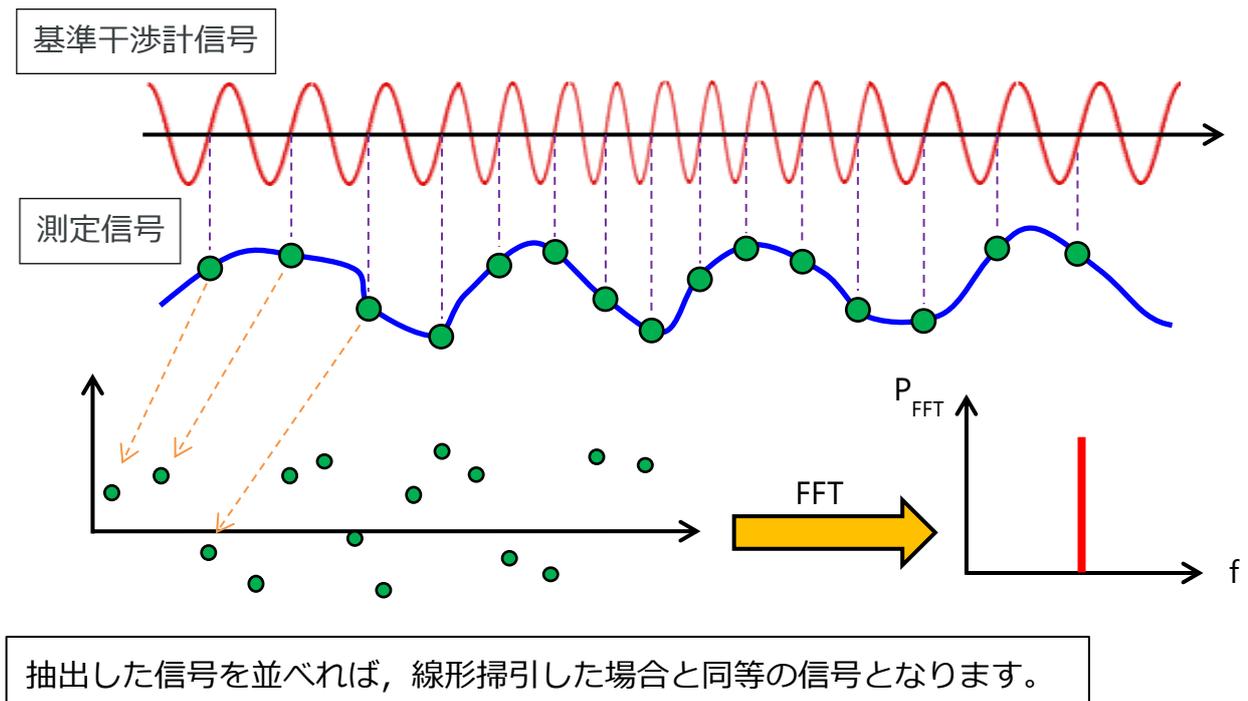


図3.2-3 リサンプリングの概念図

このリサンプリングを行う方法には、ソフトウェア リサンプリングとハードウェア リサンプリングがあります。

◆**ソフトウェア リサンプリング** : A/D で基準干渉信号と測定信号をサンプリングした後、基準干渉信号を基に測定信号をリサンプリングする方法です。ハードウェアリサンプリングと比較して、光ファイバで生じる波長分散の影響を演算によって補正することができる利点がありますが、一方でPCの負荷が大きいという欠点があります。

◆**ハードウェア リサンプリング** : A/D のサンプリングクロックに基準干渉信号を入力し、基準干渉信号に同期して測定信号をサンプリングする方法です。ソフトウェアリサンプリングと比較して、広帯域でPC負荷が軽減されるという利点がありますが、光ファイバで生じる波長分散の影響が補正できないという欠点があります。

次に上記 2 つのリサンプリング手法について説明します。

3.2.1. ソフトウェア リサンプリング

ソフトウェア リサンプリングは、A/D で基準干渉信号と測定信号をサンプリングした後、基準干渉信号を基に測定信号をリサンプリングする方法です。リサンプリングの方法を記載します。

基準干渉信号に対してヒルベルト変換を行い、位相を計算します。この時、ヒルベルト変換後の位相信号が $+\pi$ から $-\pi$ へ飛ぶ位置で 2π を加算 (アンラップ処理) することで連続的位相 P_R が算出されます (図 3.2.1-1 参照)。

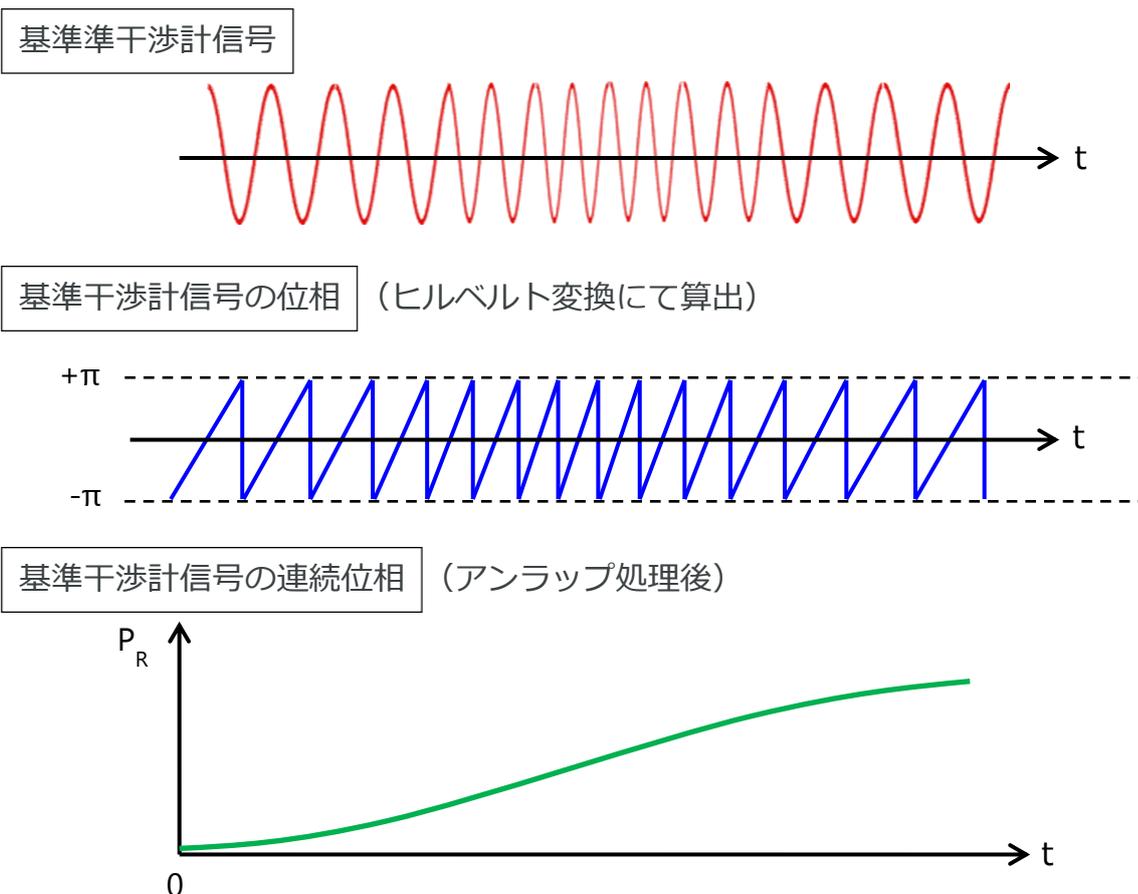


図3.2.1-1 基準干渉信号の位相

上記で得られた基準干渉信号の連続位相を等間隔に分割し、分割時刻での測定信号を抽出すれば、リサンプリングとなります。リサンプリングしたデータに対して FFT 解析を施すことにより、 $z (= L_M - L_R)$ に比例した周波数にピークが観測されます (図 3.2.1-2 参照)。

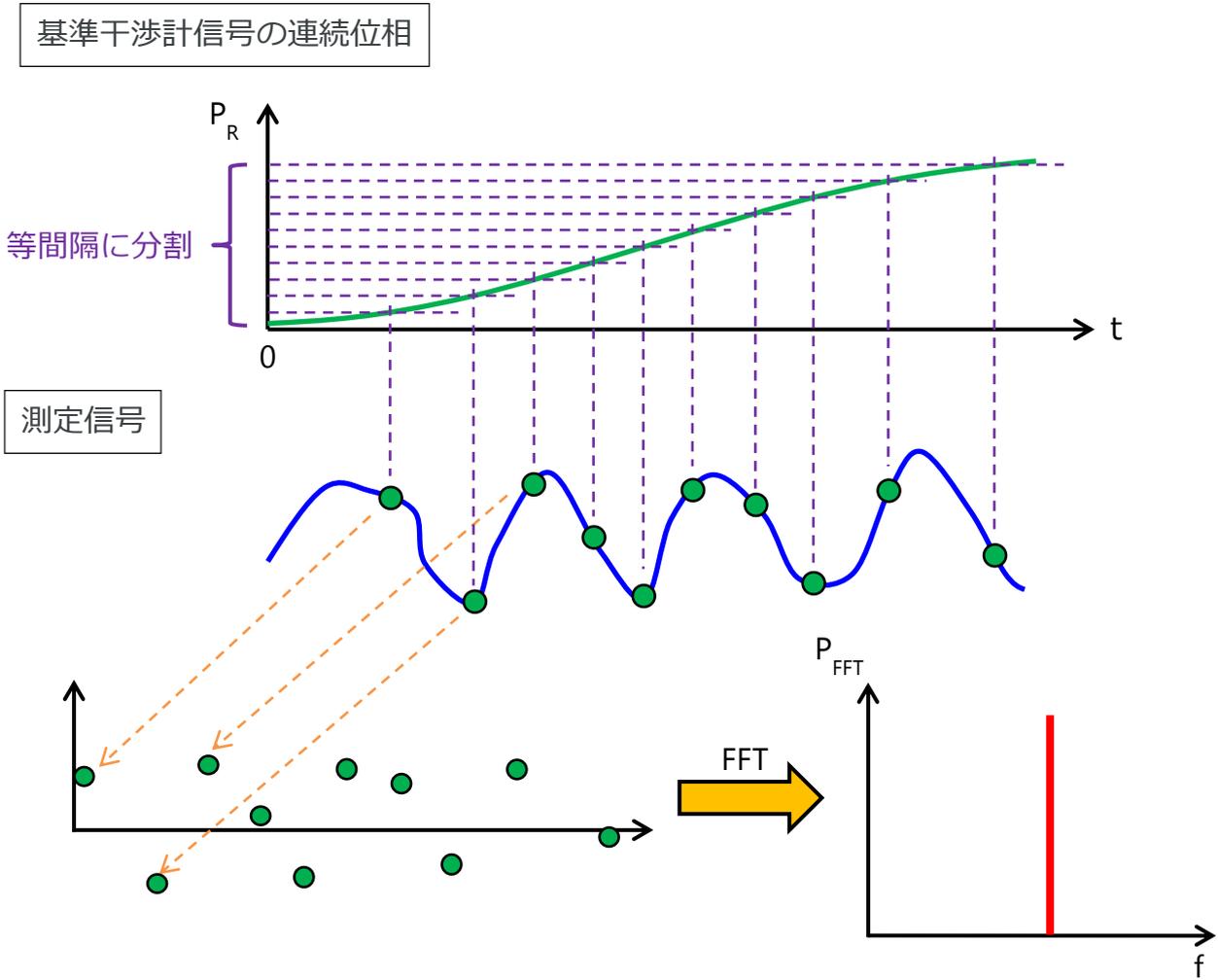


図3.2.1-2 ソフトウェア リサンプリングの概念図

3.2.2. 波長分散の補正

一般に、光ファイバで構成した干渉計は波長分散を持ち、この波長分散の影響が精度劣化を引き起こす原因となります。例えば、長波長ほど屈折率が大きくなる光ファイバを用いて基準干渉計を構成した場合、上述した連続位相 P_R を等間隔に分割すると、長波長側ほど光周波数の間隔が狭くなります。そのため、FFT 後のピークの幅が実際より広く観測されます(図 3.2.2-1 参照)。また、サンプリングする領域によって、FFT のピーク周波数もずれてしまいます(図 3.2.2-2 参照)。

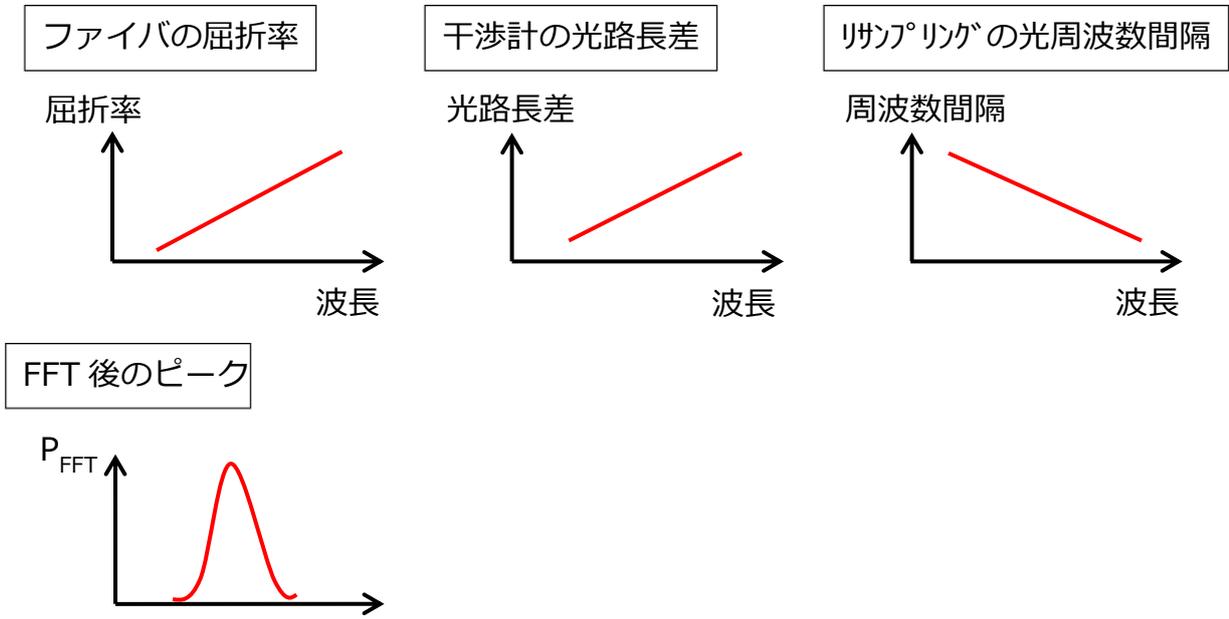


図3.2.2-1 波長分散による影響

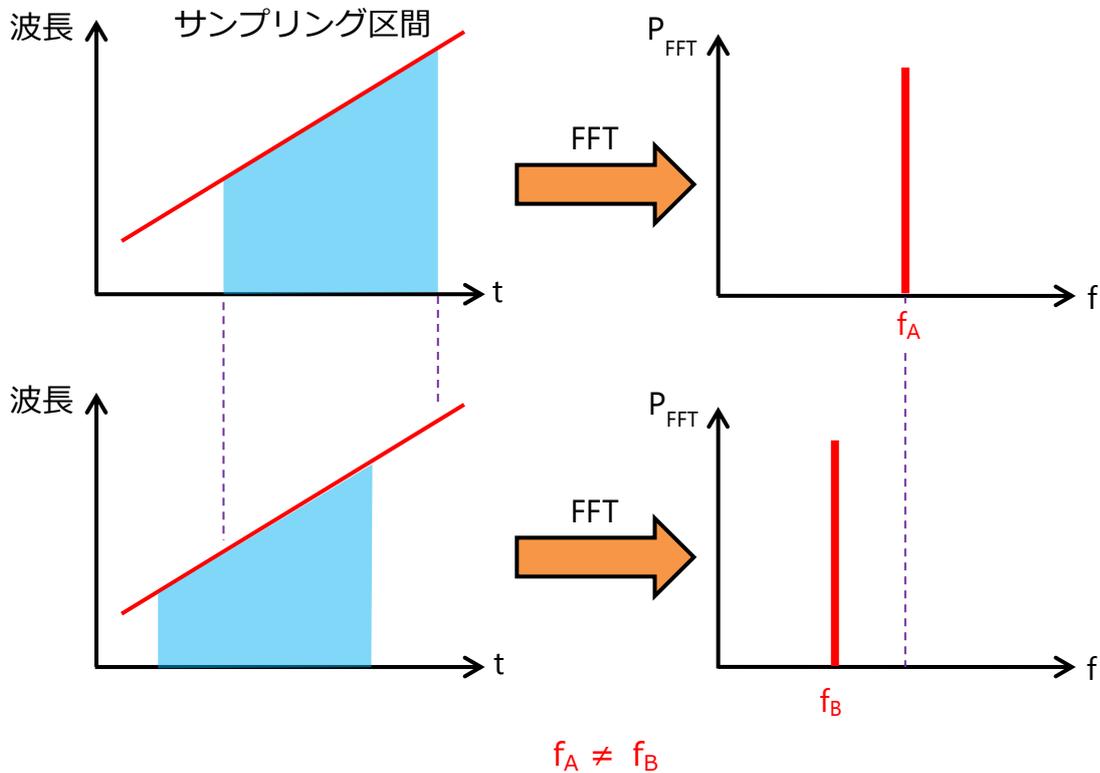


図3.2.2-2 サンプリング区間の違いによる FFT ピークの違い

波長分散の影響を除去するために、波長基準による補正が必要となります。波長基準で補正する方法として、ガスセルからの透過スペクトラムを利用する方法と、エタロンからの透過スペクトラムを利用する方法があります。一般的にガスセルは、透過光に対して決まった吸収スペクトラムを持ちます。ガスセルからの透過光を受光器で受光し電気信号に変換することで、波長基準として利用することができます。同様にエタロンの透過スペクトラムも波長基準として利用できます。この透過スペクトラムを同様に受光器で受光し、電気信号に変換することで、波長基準として利用することができます。当社製波長掃引光源には、モジュール内部にエタロンが内蔵されており、電気信号に変換されたスペクトラムが、正面パネルから出力されております。ここでは、エタロンスペクトラムを使用した補正の方法を中心に記載します。

測定系は図 3.2-2 に記載した構成と同様ですが、ここでは、本器から出力されるエタロン信号を使用します。図 3.2.2-3 に補正の手順を記載します。エタロン信号のピーク周波数 f_e で基準干渉計の位相 P_R をサンプリングした後で並び替え、 P_R のフィッティング関数を求めます。ここでは 4 次のフィッティング関数を使用します。

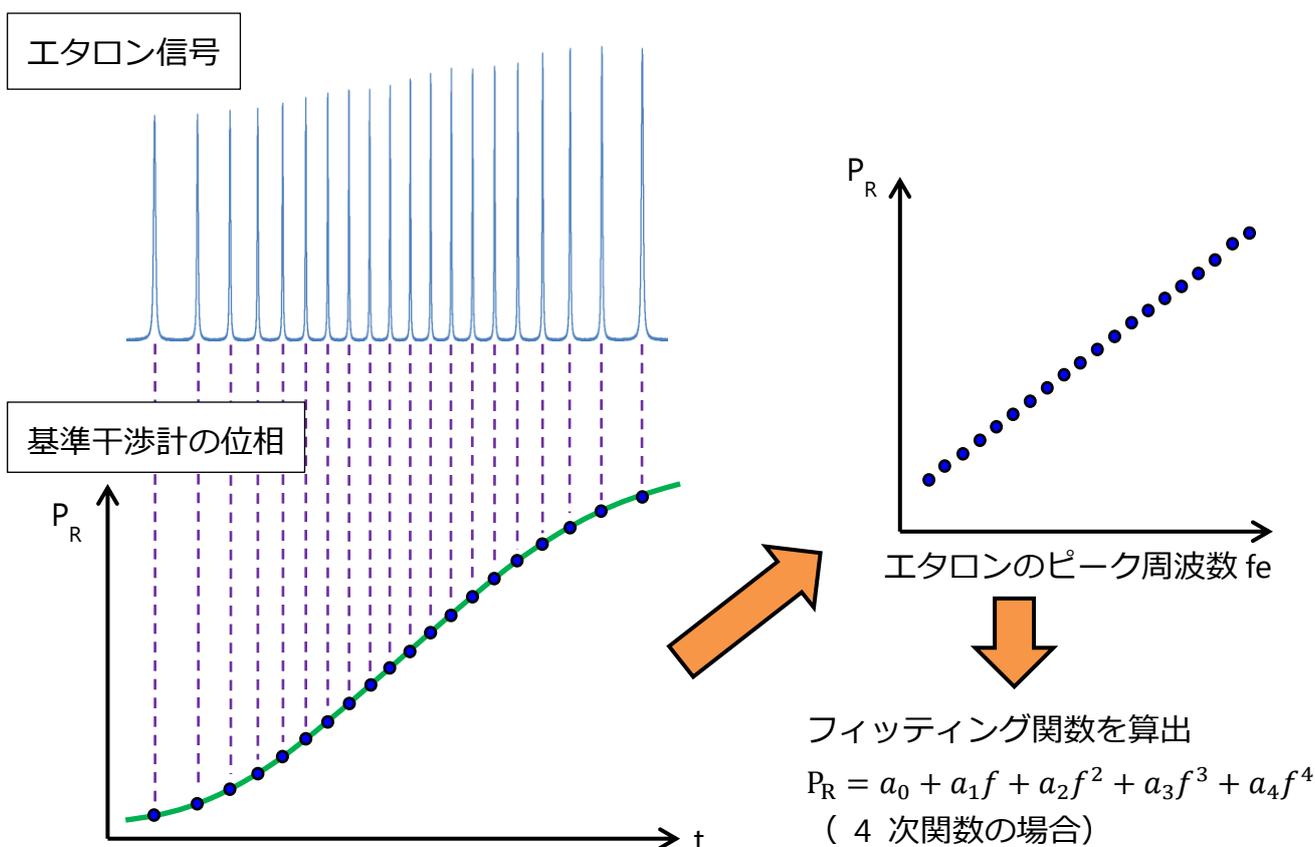


図3.2.2-3 エタロン信号を用いた補正の方法

次に、エタロンのピーク周波数 f_e を横軸に並び替えた基準干渉計信号の位相 P_R に対し、光周波数を等間隔に区分し、それぞれの光周波数での P_R をフィッティング関数から算出します。例えば、波長掃引範囲 30 nm (約3,750 GHz) の範囲をサンプリングし、 $65,536 (=2^{16})$ 個に分割した場合、0.0572 GHz 間隔で P_R を計算します。算出された P_R の時刻に測定された測定信号を抽出し、FFT 解析を施すことで、波長分散の影響を補正した結果を算出することができます (図 3.2.2-4 参照)。

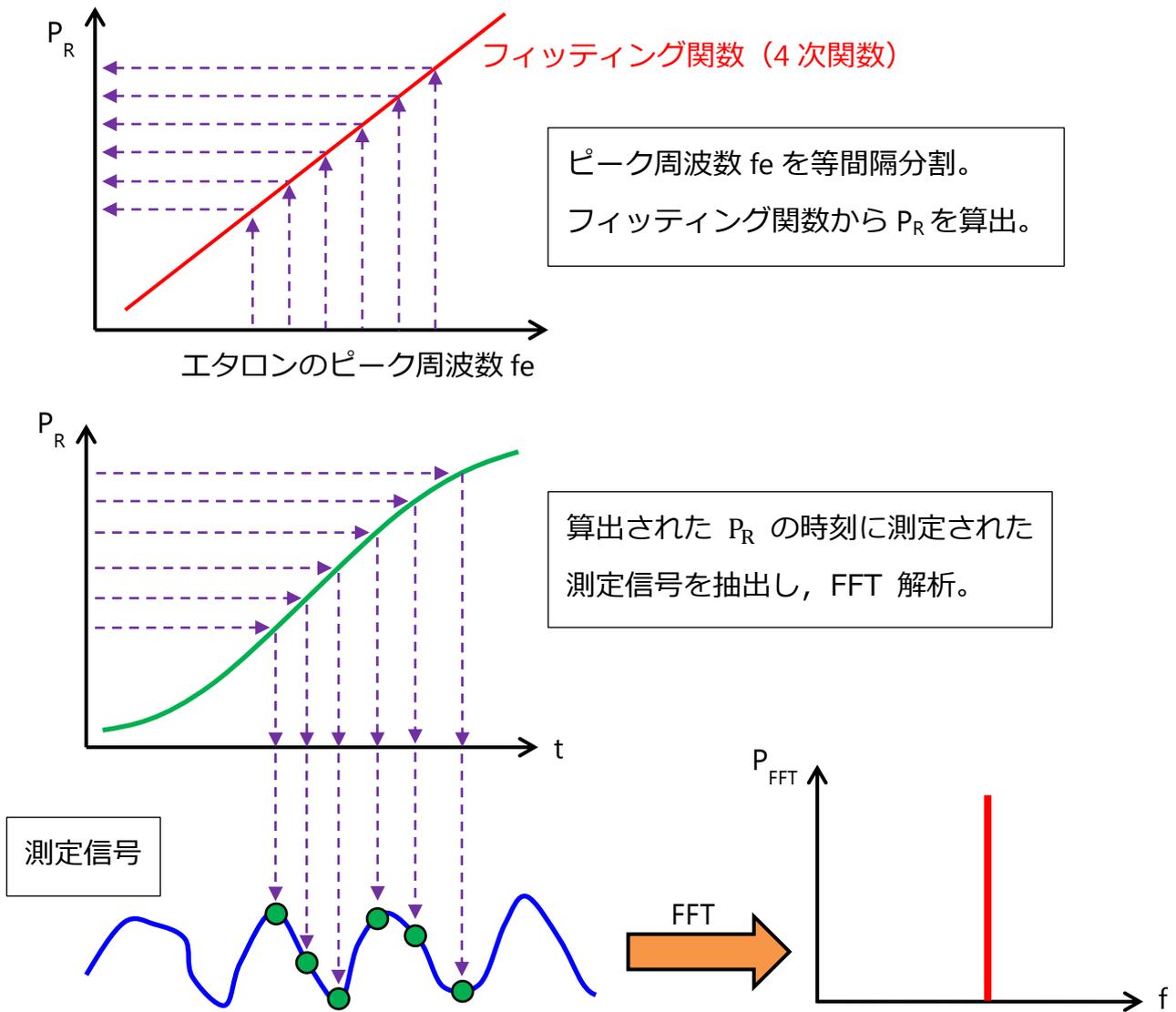


図3.2.2-4 フィッティング関数から基準干渉計信号の位相値の算出

光周波数が $\Delta\nu$ 変化する間に P_R は ΔP_R 変化しているので (図 3.2.2-5 参照), 基準共振器長の FSR は式 (11) で表せます。

$$FSR = \frac{\Delta\nu}{\Delta P_R / (2\pi)} \quad (11)$$

また共振器長 L_{AUX} は式 (12) で表現できます。ここで, c は光速を表しています。

$$L_{AUX} = \frac{c}{2FSR} \quad (12)$$

$\Delta P_R / (2\pi)$ は位相が回転した回数となるので, 分解能を Δz とすると, 式 (13) のように導くことができます。

$$\Delta z = \frac{L_{AUX}}{\Delta P_R / (2\pi)} = \frac{c}{2\Delta\nu} = \frac{\lambda_c^2}{2\Delta\lambda} \quad (13)$$

等分割した数を N として, FFT 解析をすれば最長測定長 z_{max} は式 (14) で表せます。

$$z_{max} = \Delta z \cdot N/2 \quad (14)$$

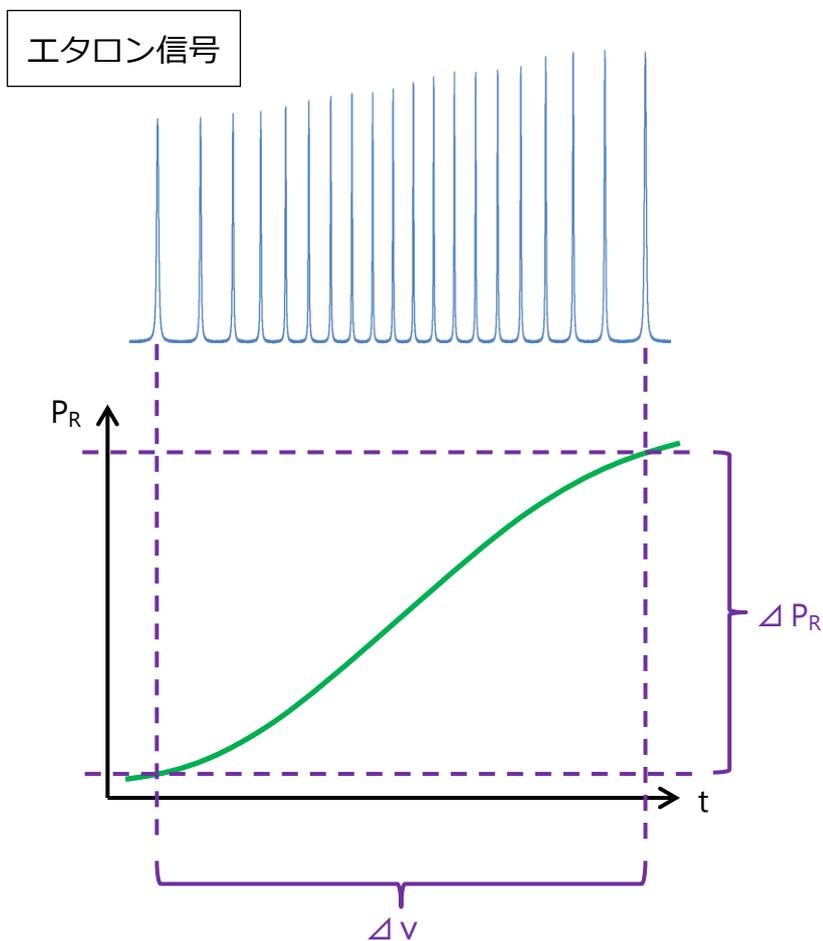


図3.2.2-5 距離換算と分解能

これまでエタロンスペクトラムを用いた波長分散の補正方法について記載してきましたが、参考までにガスセルを用いた測定系を図 3.2.2-6 に記載します。

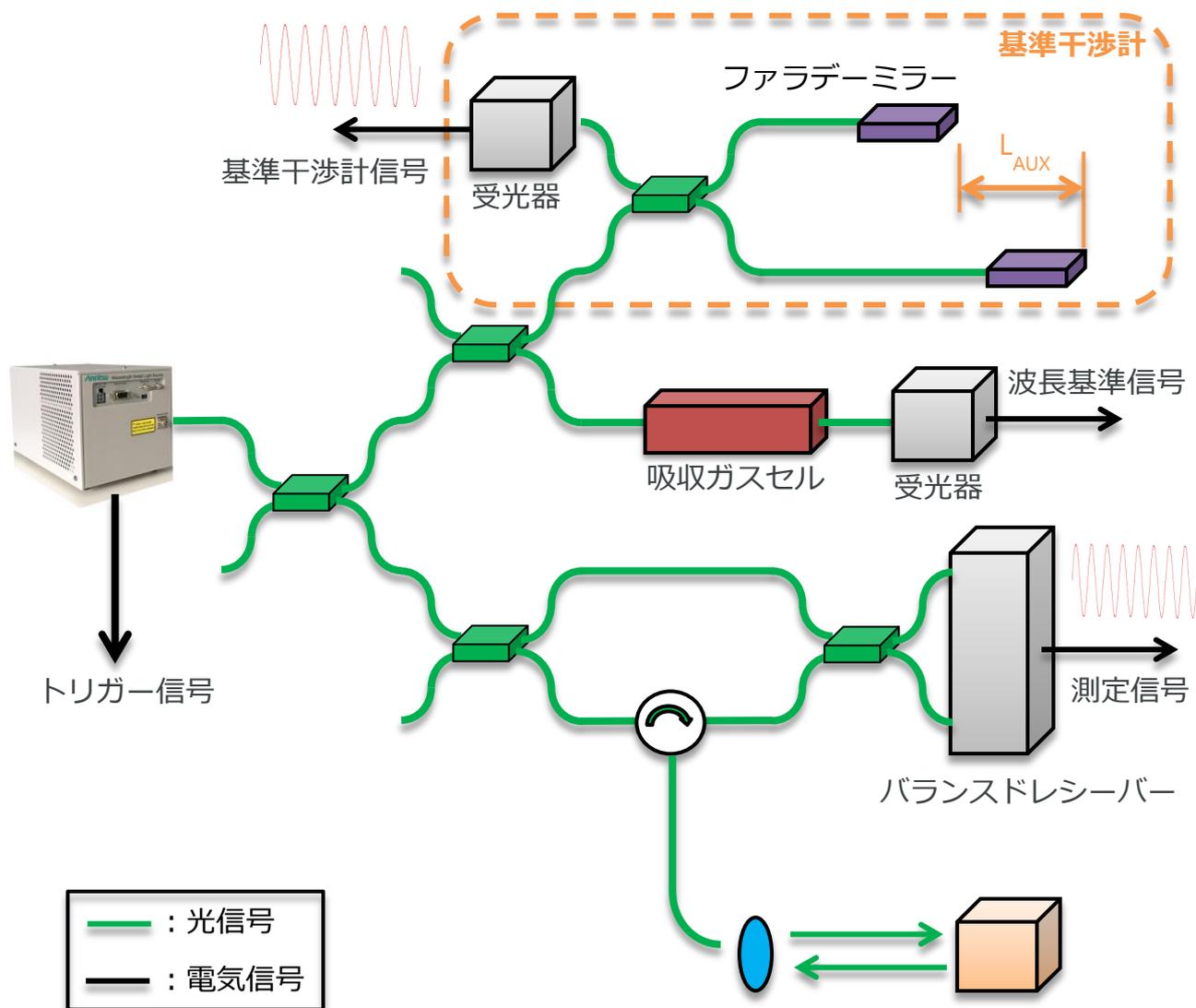


図3.2.2-6 ガスセルを用いたOFDR測定系の一例

3.2.3. ハードウェア リサンプリング

次にハードウェア リサンプリングについて記載します。ハードウェア リサンプリングは、A/D のサンプリングクロックに基準干渉信号を入力し、基準干渉信号に同期して測定信号をサンプリングする方法です（図 3.2.3-1 参照）。

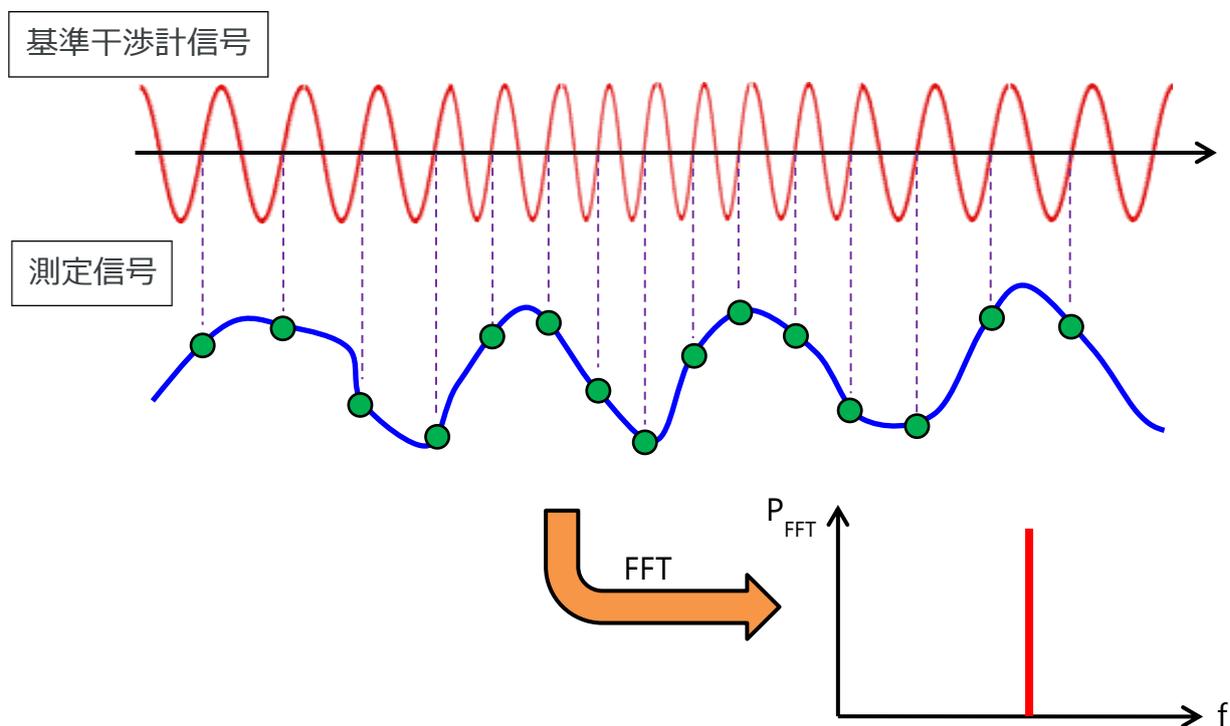


図3.2.3-1 ハードウェア リサンプリングの概念図

3.2.4. 遅延補正

実際の測定では、光源から出力される光の位相に変調成分が乗じています。そのため、基準干渉計側の伝搬時間と被測定物側の干渉計の伝搬時間に時間差が生じていると、位相変調のリップルがリサンプリング後のデータに残り、位相変調の周波数だけ離れた位置に側帯波が現れます。両干渉経路の伝搬時間が一致している場合、光源の光が位相変調されていても、リサンプリングで補償することができます（図 3.2.4-1 参照）。よって、波長掃引光源から基準干渉計を通して A/D に入力されるまでの伝搬時間（図 3.2.4-2 の経路 1）と、波長掃引光源から被測定物の干渉計を通して A/D に入力されるまでの伝搬時間（図 3.2.4-2 の経路 2）は一致させる必要があります。厳密には、一度の処理でリサンプリングが正確に達成できるのは、時間差が一致した一点のみとなります。

干渉計の連続位

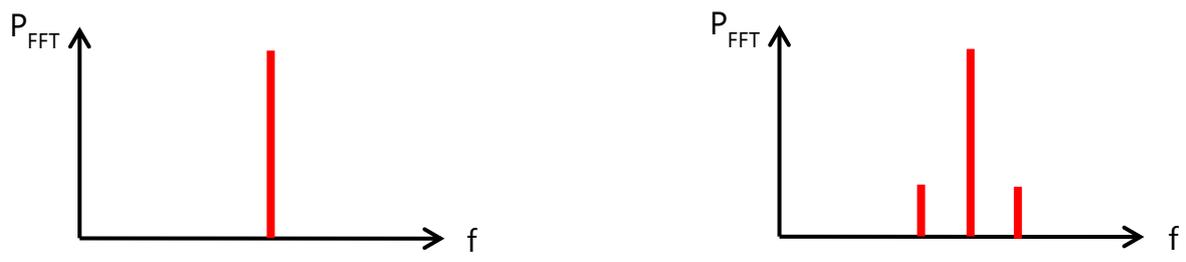
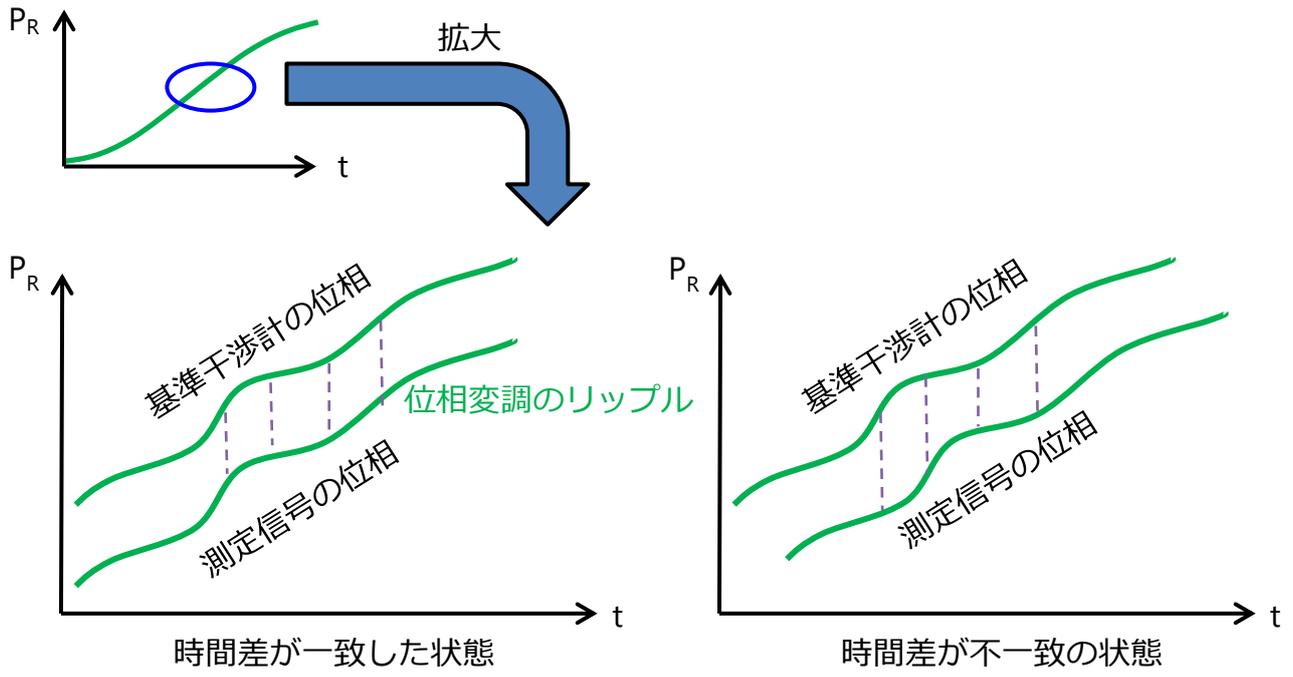


図3.2.4-1 位相変調の影響

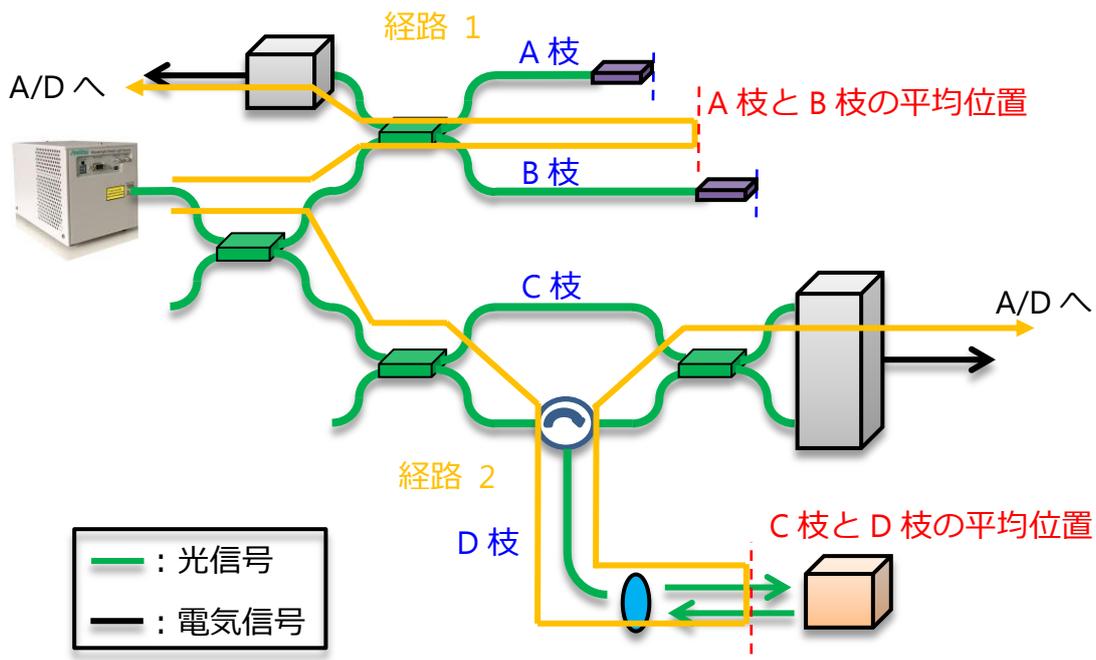


図3.2.4-2 ハードウェア リサプリングの構成

お見積り、ご注文、取扱い、修理などは、下記までお問い合わせください。

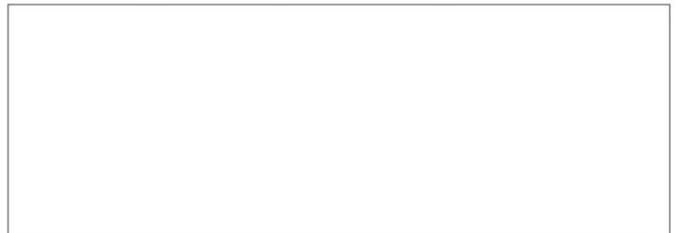
アンリツ株式会社 デバイス営業部

アンリツデバイス株式会社 マーケティング部

〒243-0016 神奈川県厚木市田村町 8-5
TEL : 046-296-1228 FAX : 046-296-1254
<http://www.anritsu.com/anritsu-devices>

● ご使用前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

1506



■ 本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

■ このカタログの記載内容は2018年 9月26日現在のものです。

No. DD-M0018AZ005 (1.00)