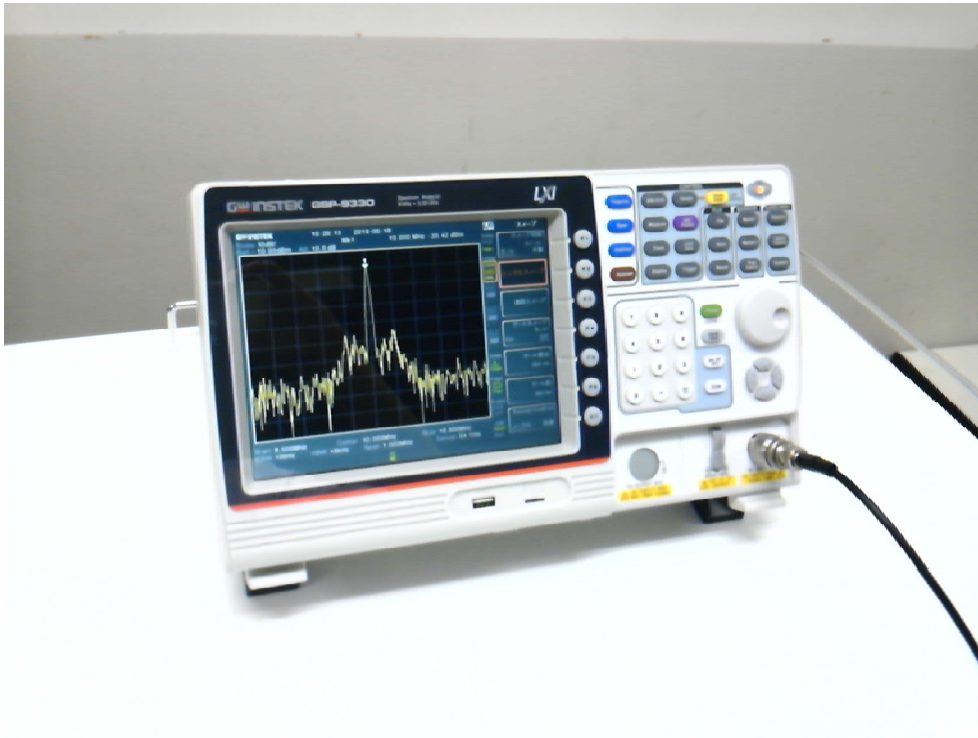


# 光電磁界計測システムの構築に必要なノウハウ

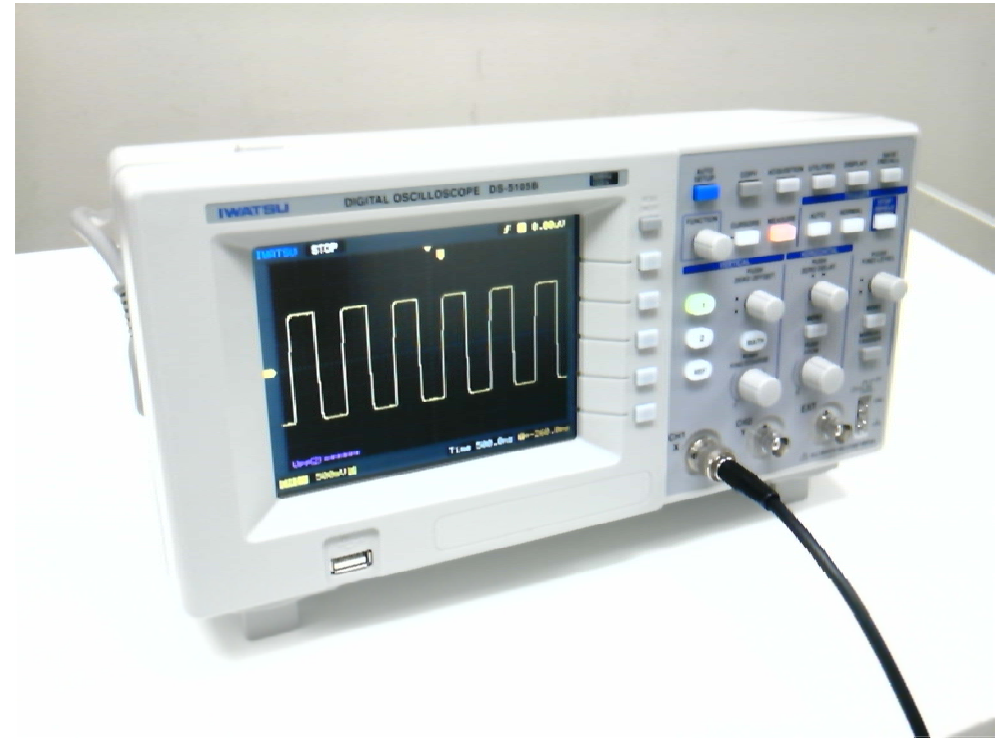
佐々木 愛一郎 (近畿大学)

# 高周波信号の観測

我々は、このようなものを使って信号を観測する



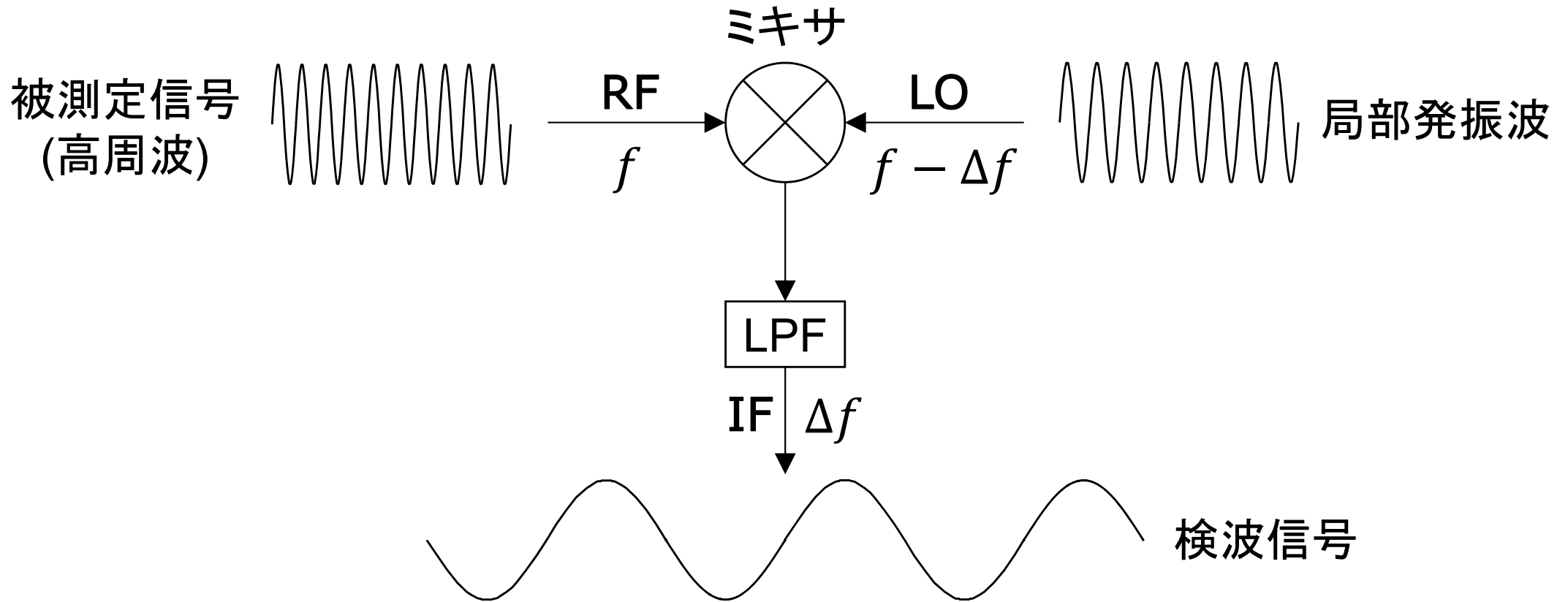
スペクトラムアナライザ



オシロスコープ

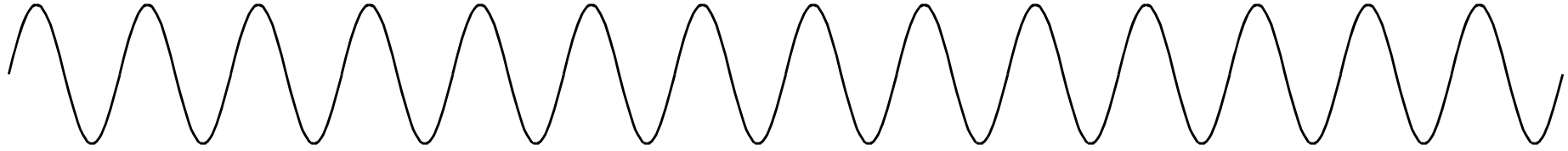
どのようなしくみで信号を観測しているのか？

# 高周波信号の検波

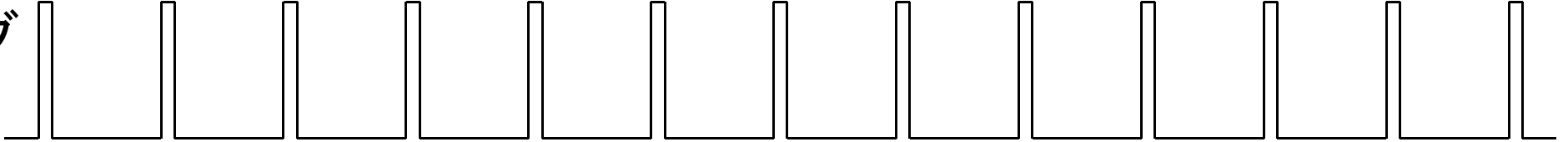


# 高周波信号の波形観測

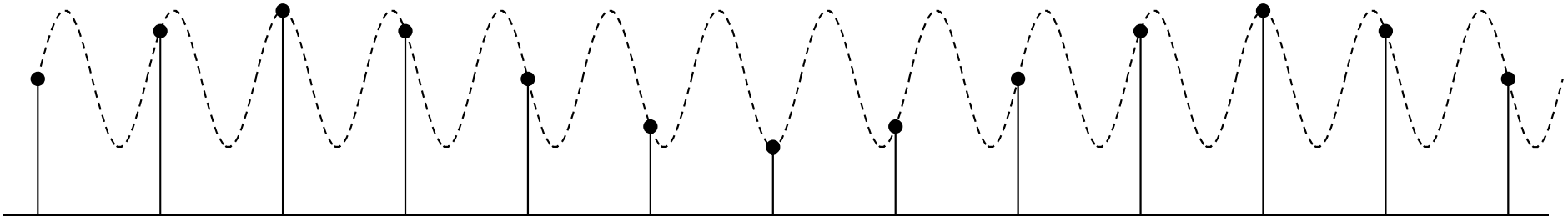
被測定信号  
(高周波)



サンプリング  
パルス



||



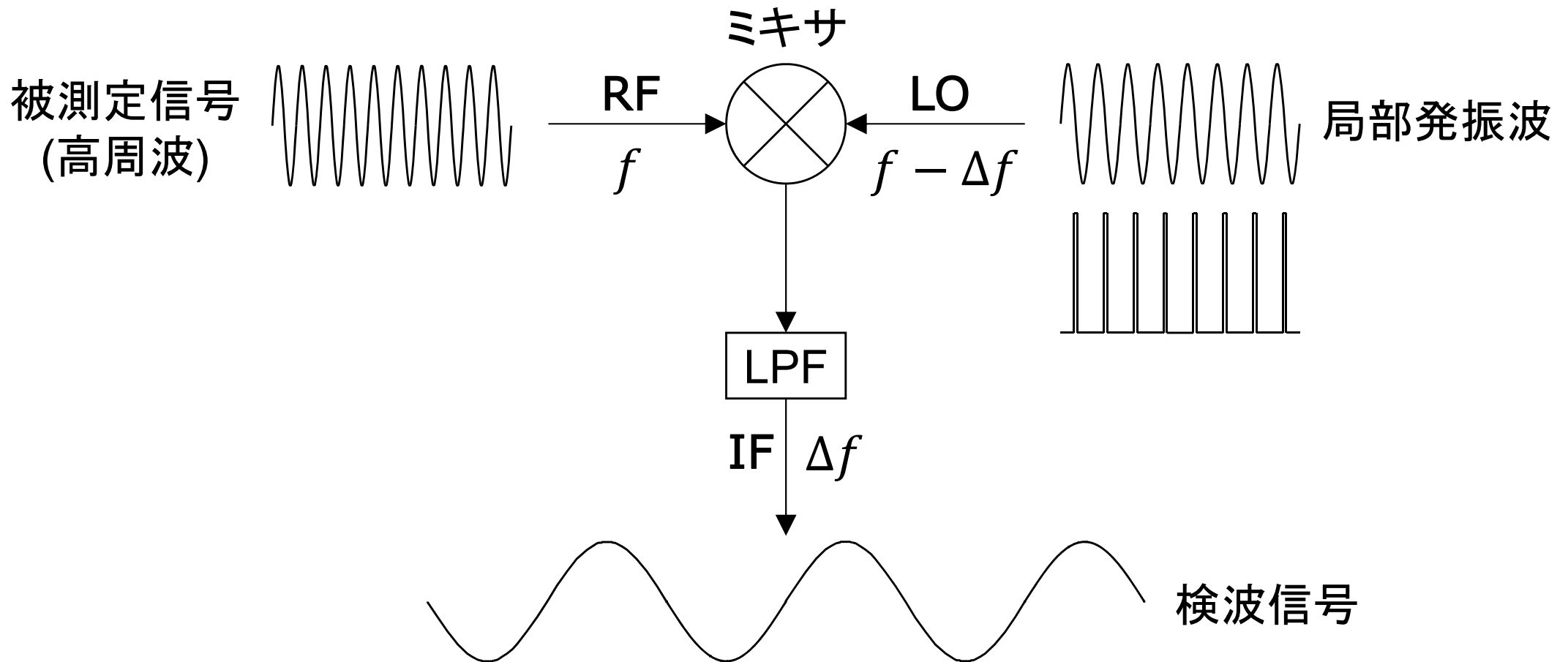
↓ LPF

観測信号

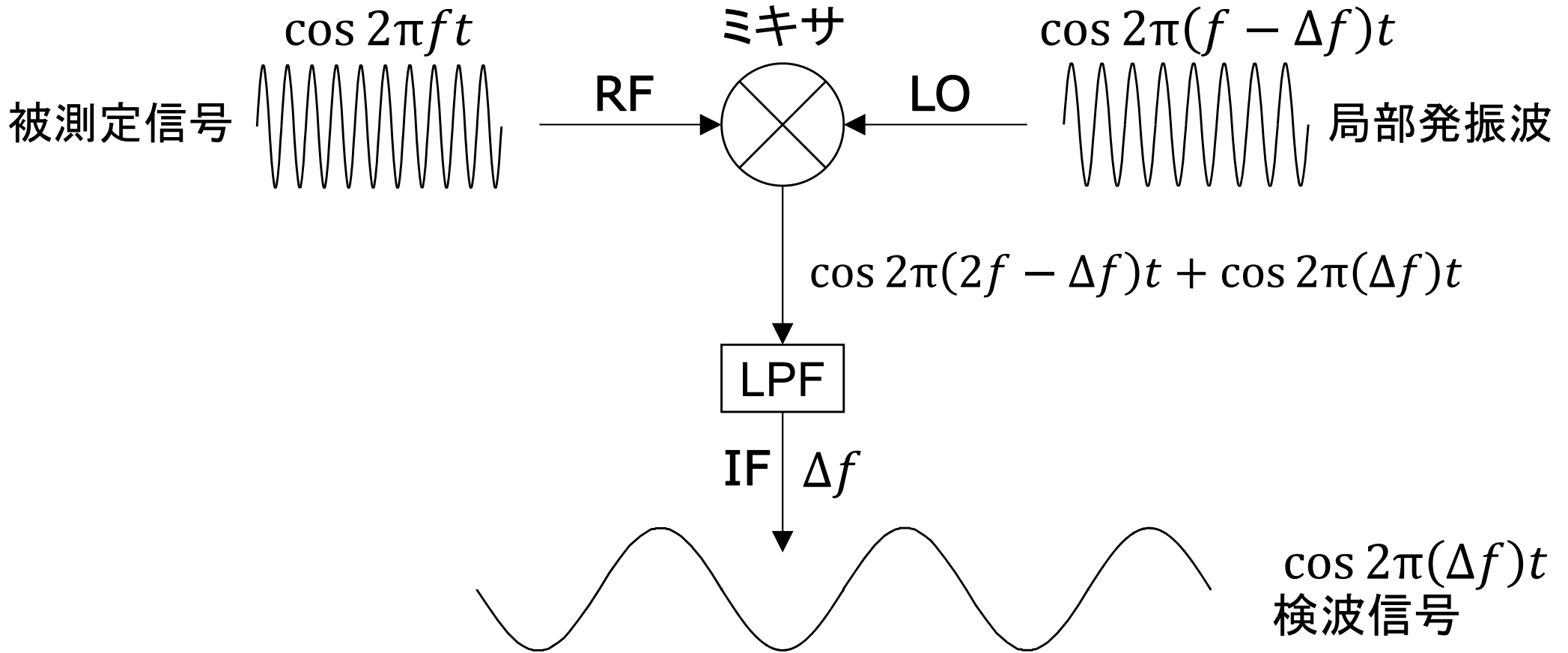


# 高周波検出のエッセンス

- ミキサ(掛算器)と、高い周波数成分を持つLOが必要
- 被測定信号を、低い周波数に変換してから検出



# 高周波検出のエッセンス



$$\frac{\cos 2\pi f t}{\text{RF 被測定信号}} \times \frac{\cos 2\pi(f - \Delta f)t}{\text{LO 局部発振波}} = \frac{1}{2} \cos 2\pi(2f - \Delta f)t + \frac{1}{2} \cos 2\pi(\Delta f)t$$

~~LPFでカット~~

IF 検波信号

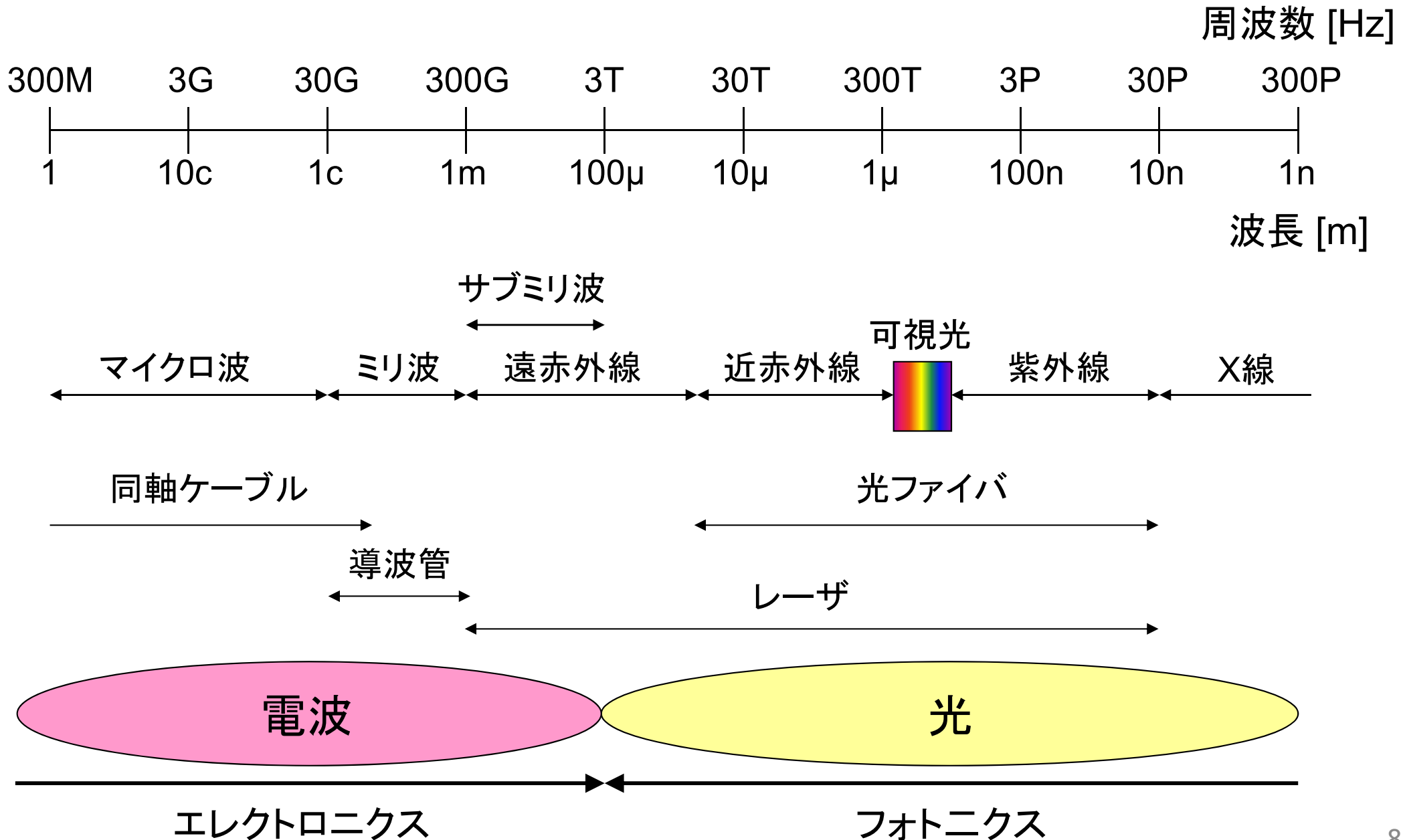
# 高周波検出に必要なもの

---

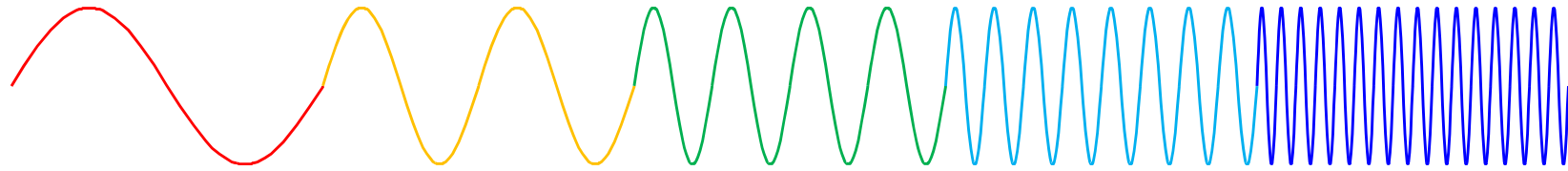
- 高い周波数成分をもつLO信号
- 高い周波数で動作するミキサ

# 電磁波スペクトラム

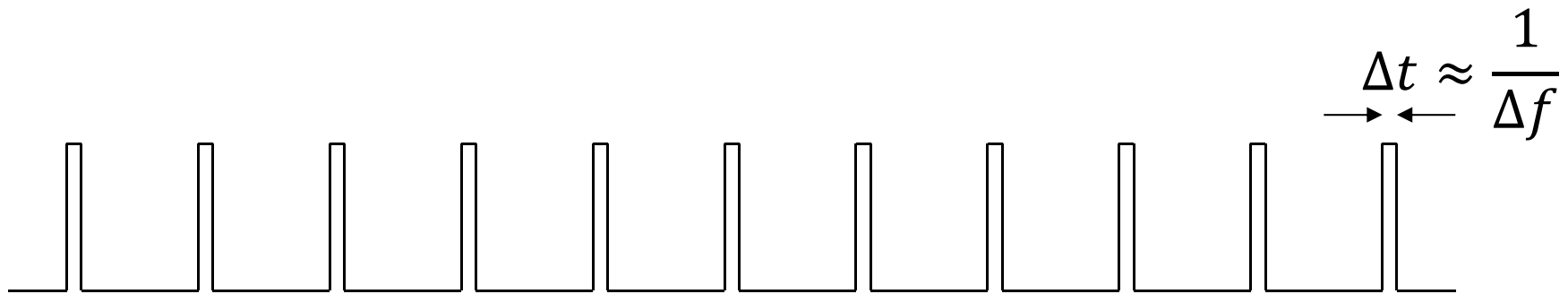
光技術がカバーする周波数レンジは、圧倒的に広い



# 光技術導入のメリット①: LO信号



周波数の高いLO信号を柔軟に生成できる(GHz~THz)



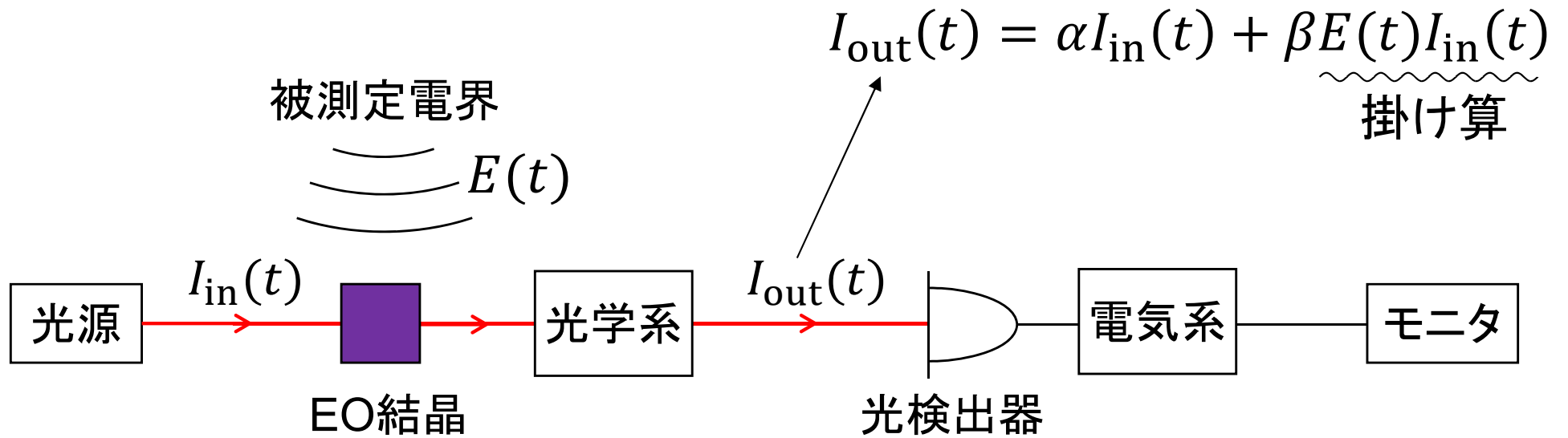
エレクトロニクスでは得られない短パルス(<1ps)をLOとして利用できる

## 光技術導入のメリット②: 高速ミキサ

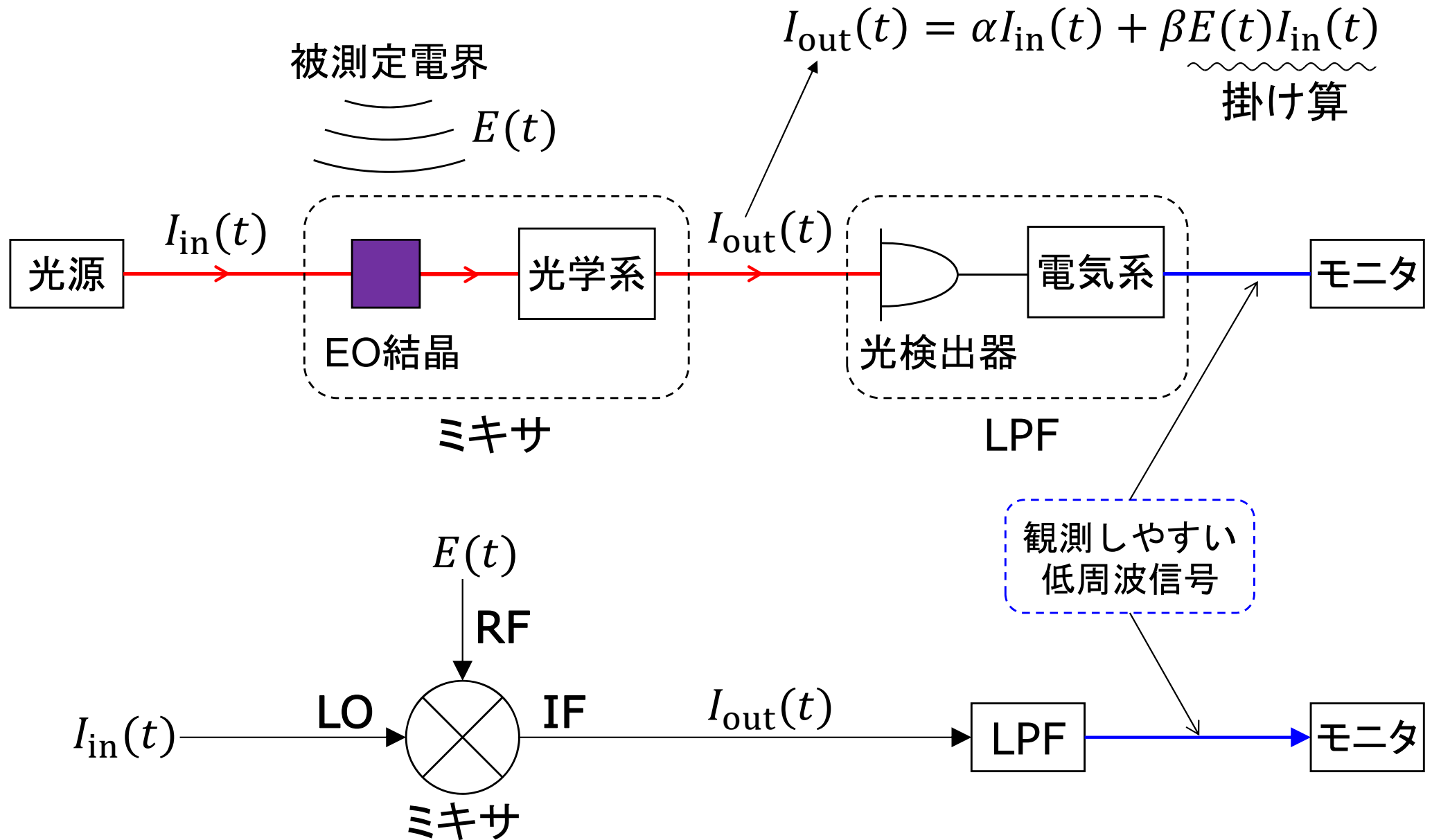
---

- 電気光学結晶 (Electro-optic crystal)
- 磁気光学結晶 (Magneto-optic crystal)
- 光伝導素子 (Photoconductive device)
- 電界吸収型変調素子 (Electro-absorption modulator)

# PEM技術の基本概念

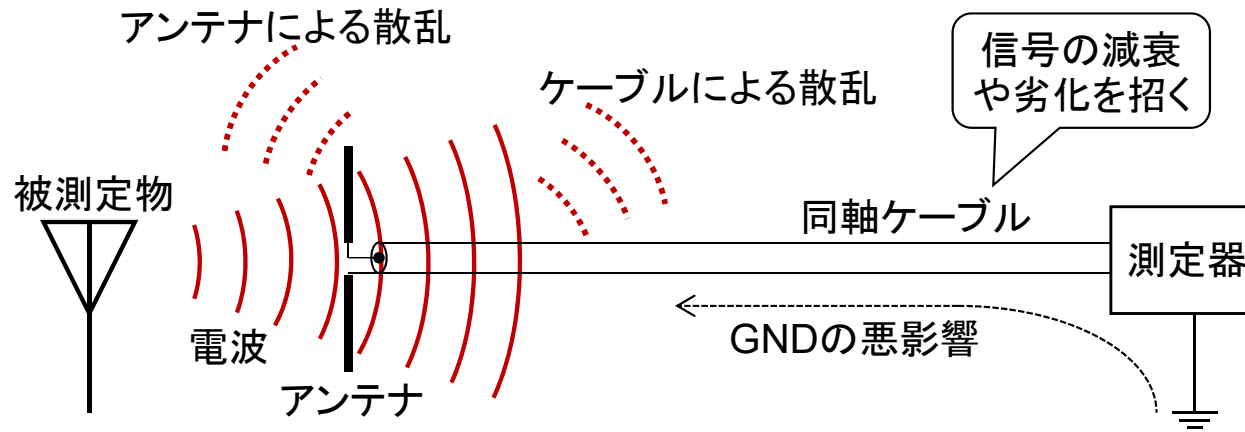


# PEMシステムはミキサである

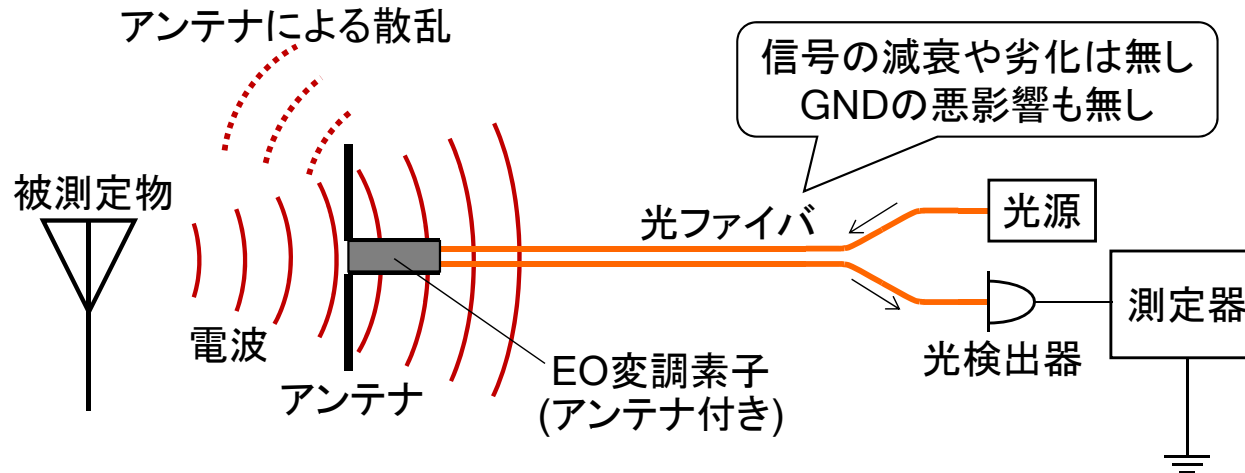


# 高周波計測以外のメリット

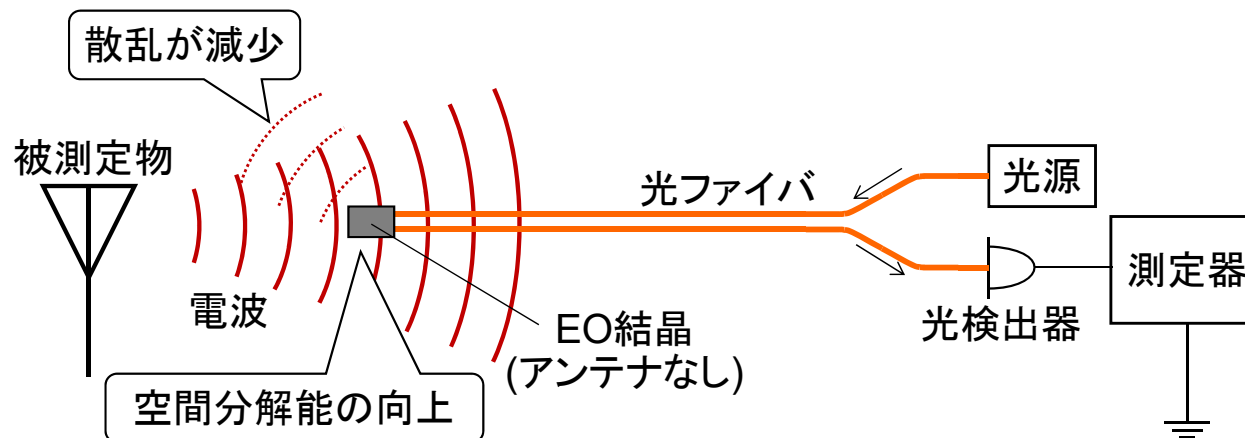
## 一般的な電磁界計測



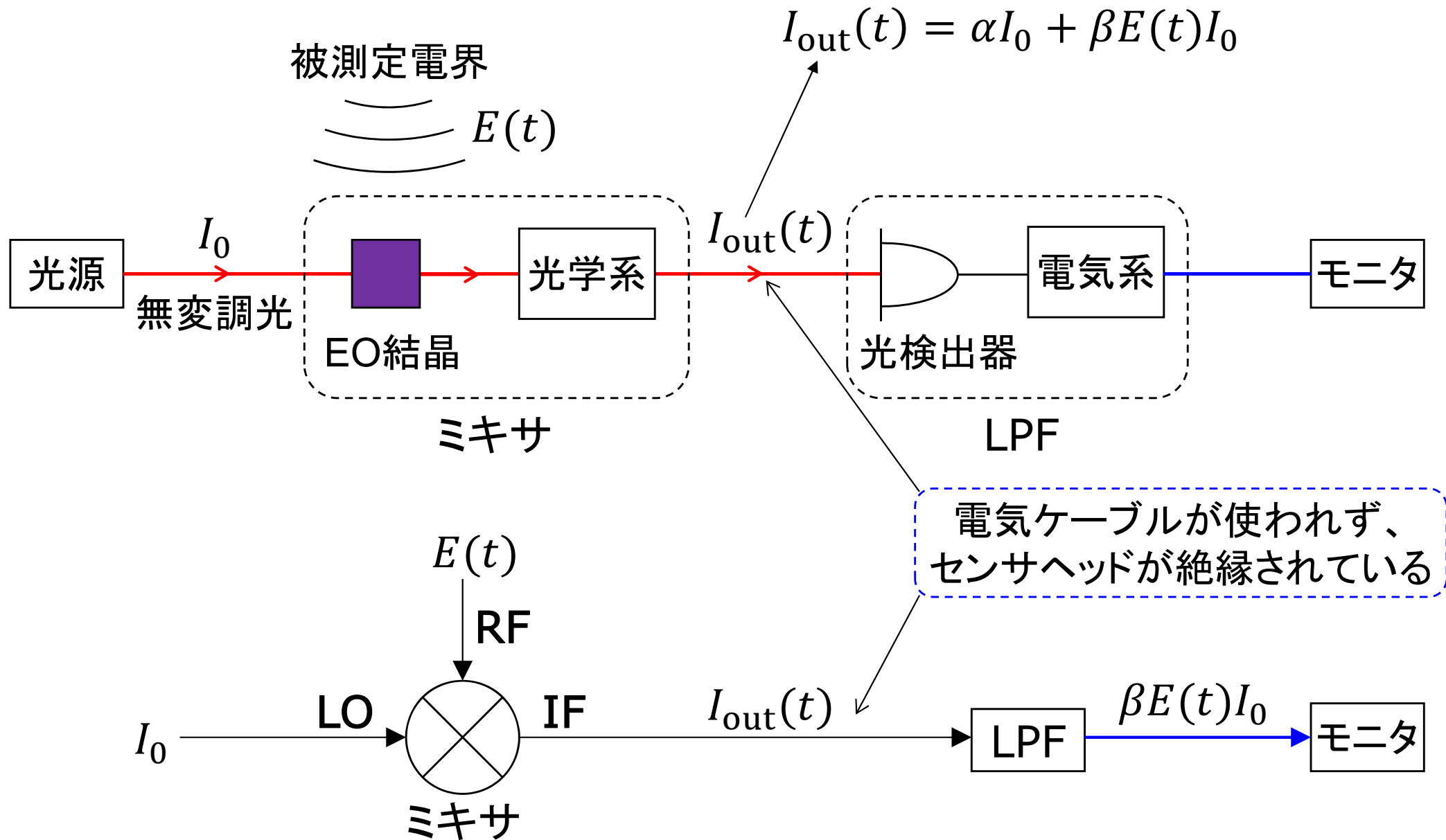
## 光応用電磁界計測 (受信アンテナあり)



## 光応用電磁界計測 (受信アンテナなし)



# 高周波計測以外のメリット



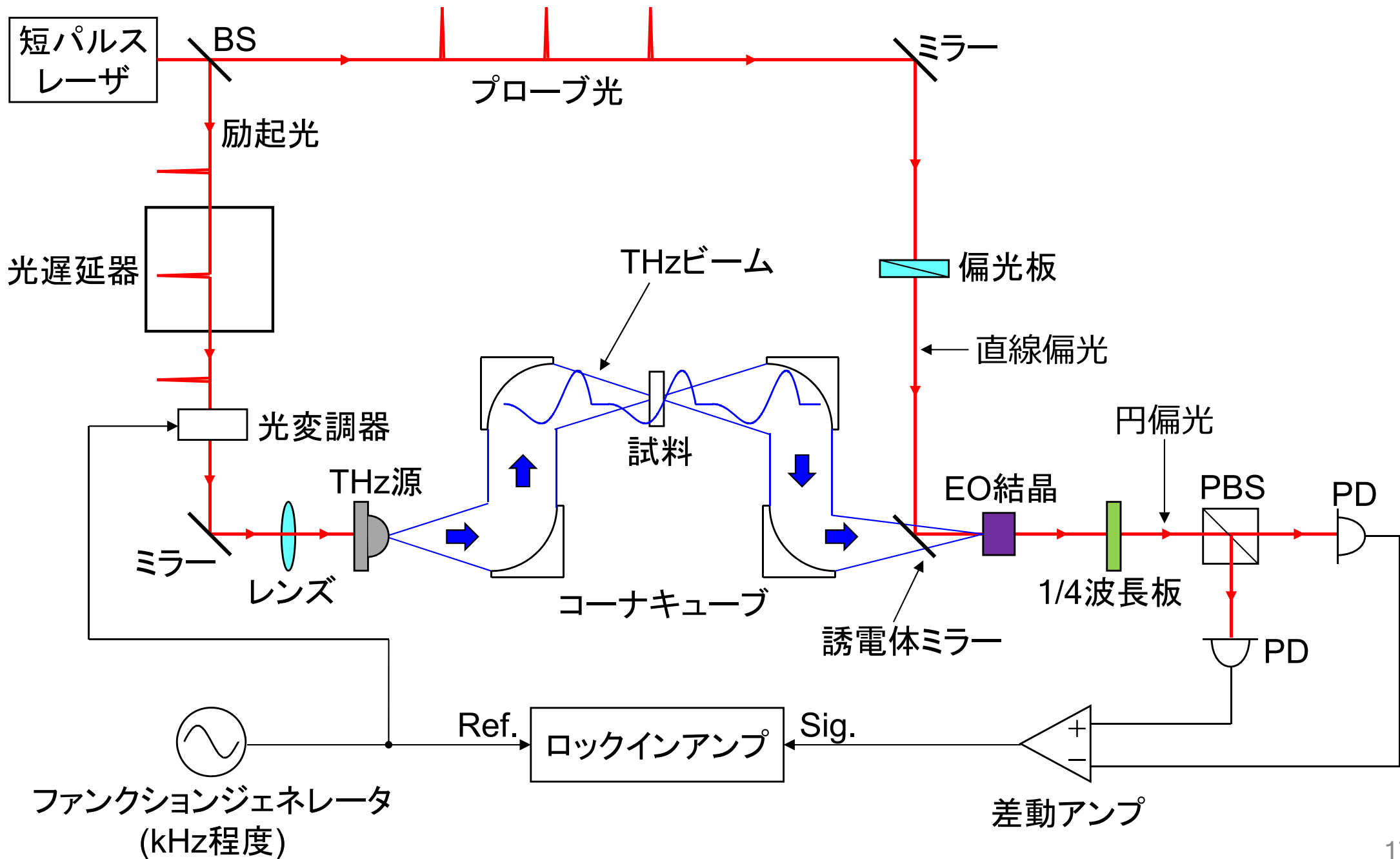
# PEMシステムの強み (高周波計測以外)

- 電気ケーブルによる電磁波散乱の抑制
- 電気ケーブルによる信号の劣化の抑制
- 測定器系のGNDに起因する信号劣化の抑制
- 受信アンテナによる電磁波散乱の低減
- 受信アンテナの周波数特性による信号劣化の低減
- 空間分解能の向上(?)

# PEM技術における2つの流派

	流派1	流派2
プローブ光	パルス光, 変調光	無変調光
EO結晶	GaAs, ZnTeなど (電極, アンテナなし)	LiNbO <sub>3</sub> (電極, アンテナ付き)
計測タイプ	サンプリング, 相互相関	リアルタイム
測定周波数帯	ミリ波, サブミリ波, THz波	主にマイクロ波帯以下
目的	超高周波計測	アンテナやEMC試験 設備などの評価

# THzパルスの発生・検出システム (P&P法)



# 主なTHz源

## □ 電気光学結晶 (Electro-Optic Crystal)

THzパルス(～数十THz)の発生に利用される。  
高い光ピークパワーが必要なので、CW-THz波の発生には不向き。

## □ 光伝導素子 (Photoconductive Device)

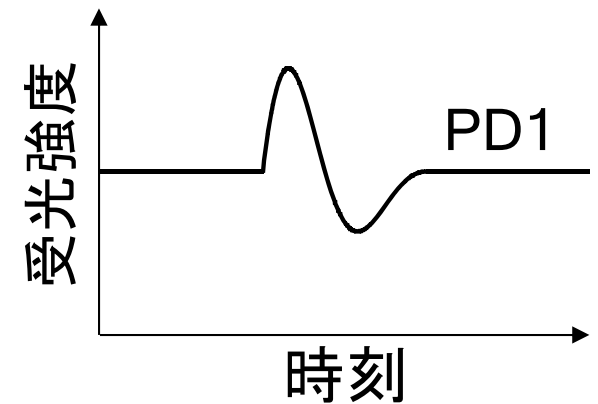
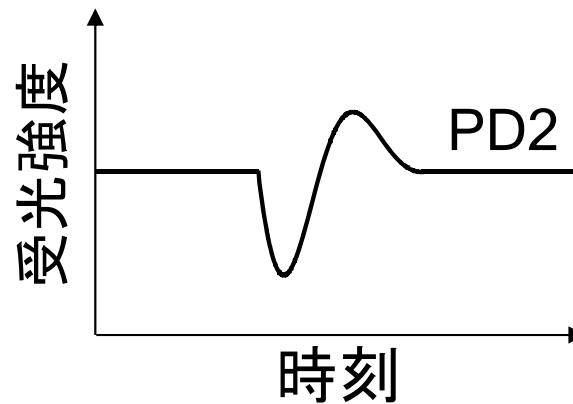
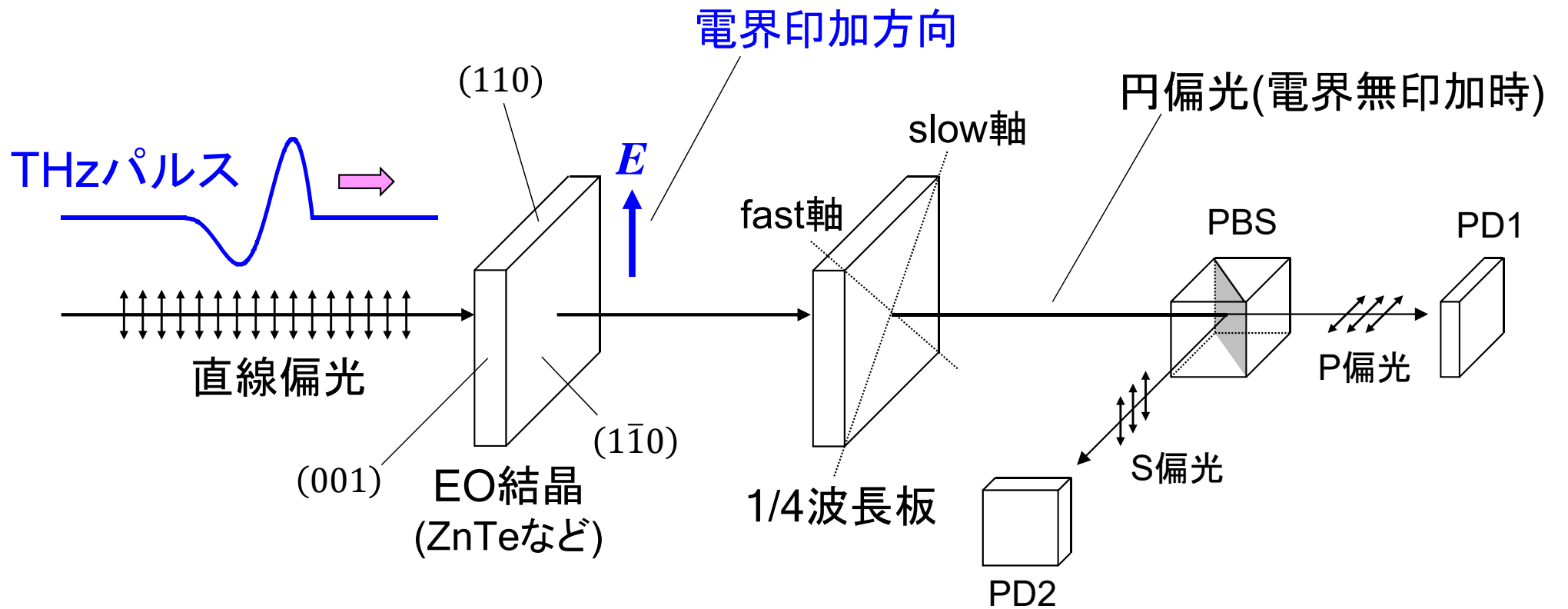
THzパルス(数THz)、CW-THz波とも双方の発生が可能。

## □ フォトダイオード (Photodiode)

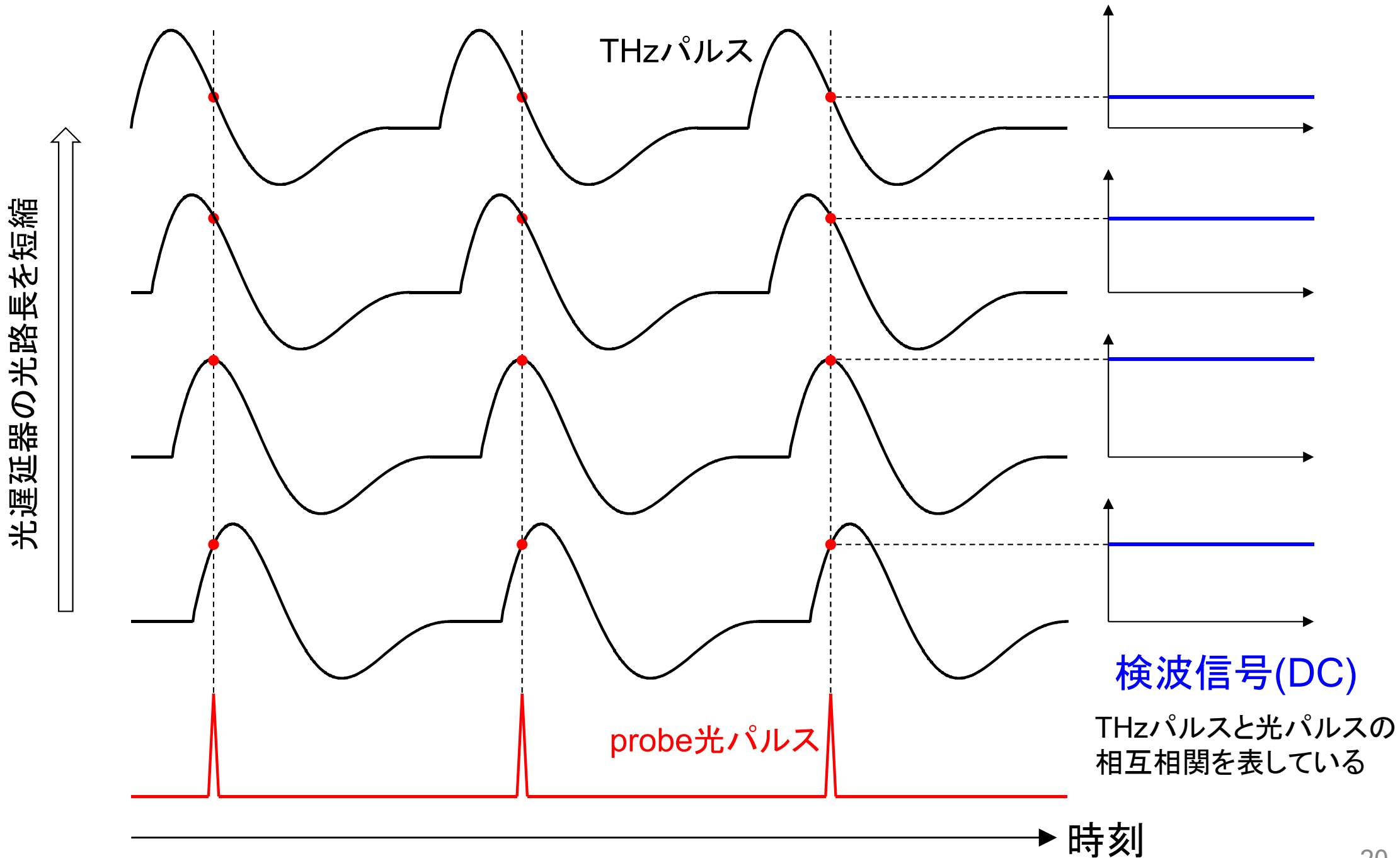
UTC-PD<sup>(\*)</sup>が有名。1THz以下のCW電波、パルス電波の発生が可能。

(\*) UTC-PD: Uni-Travelling Carrier Photodiodeと呼ばれるNEL製の高速photodiode

# 電波を検出するための光学系

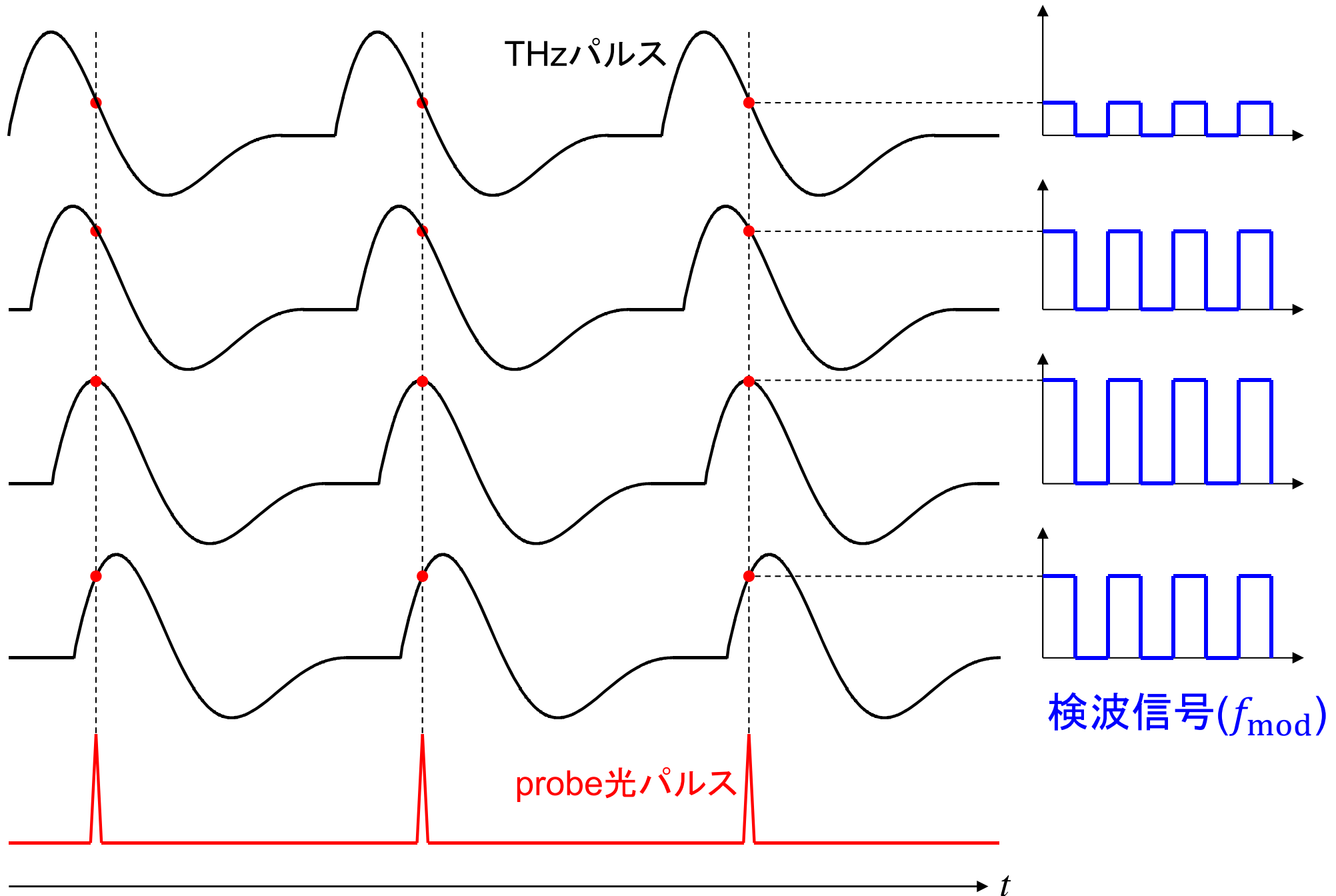


# P&P法によるTHzパルス波形取得の概念



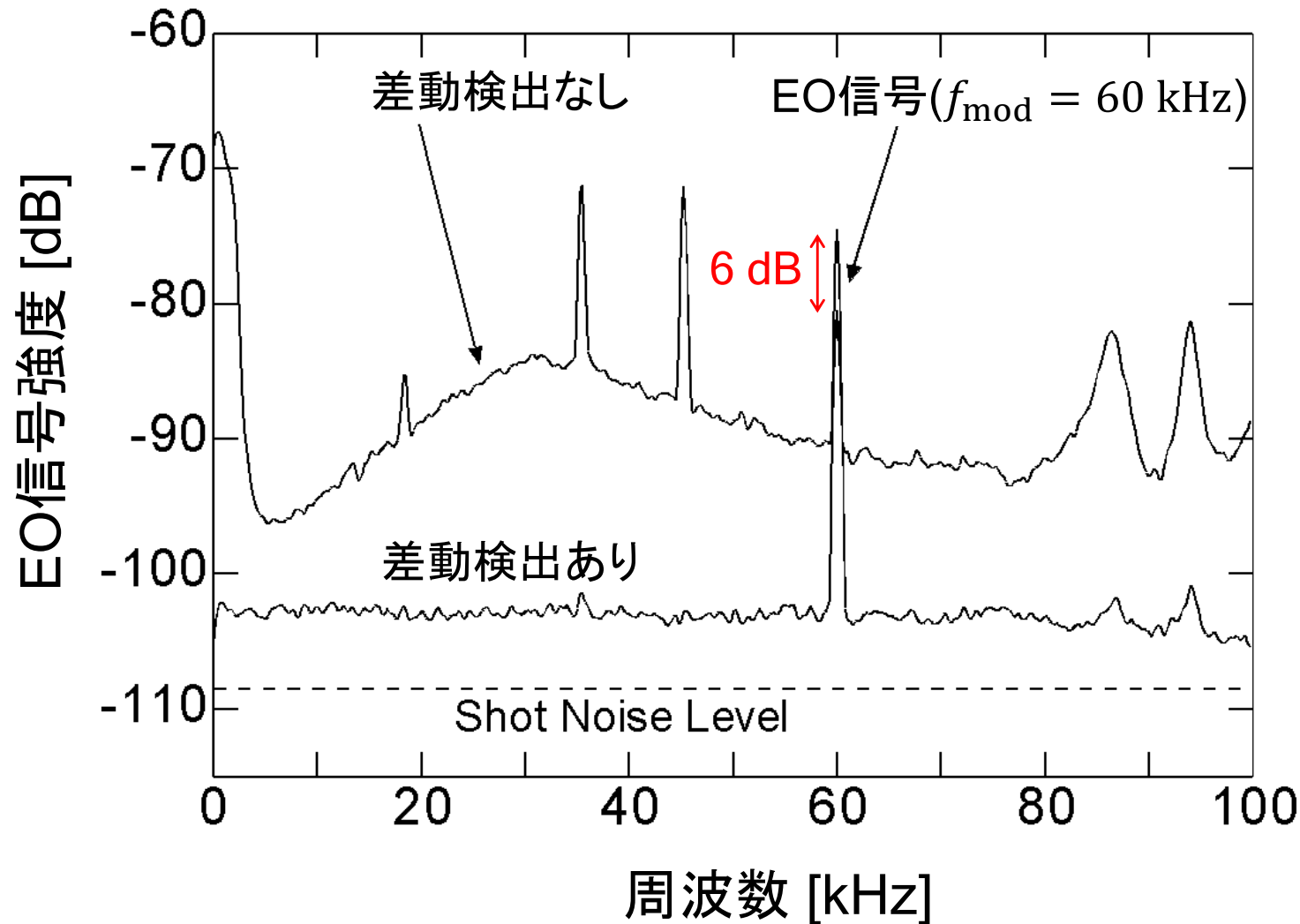
# P&P法によるTHzパルス波形取得の概念 (変調時)

光遅延器の光路長を短縮

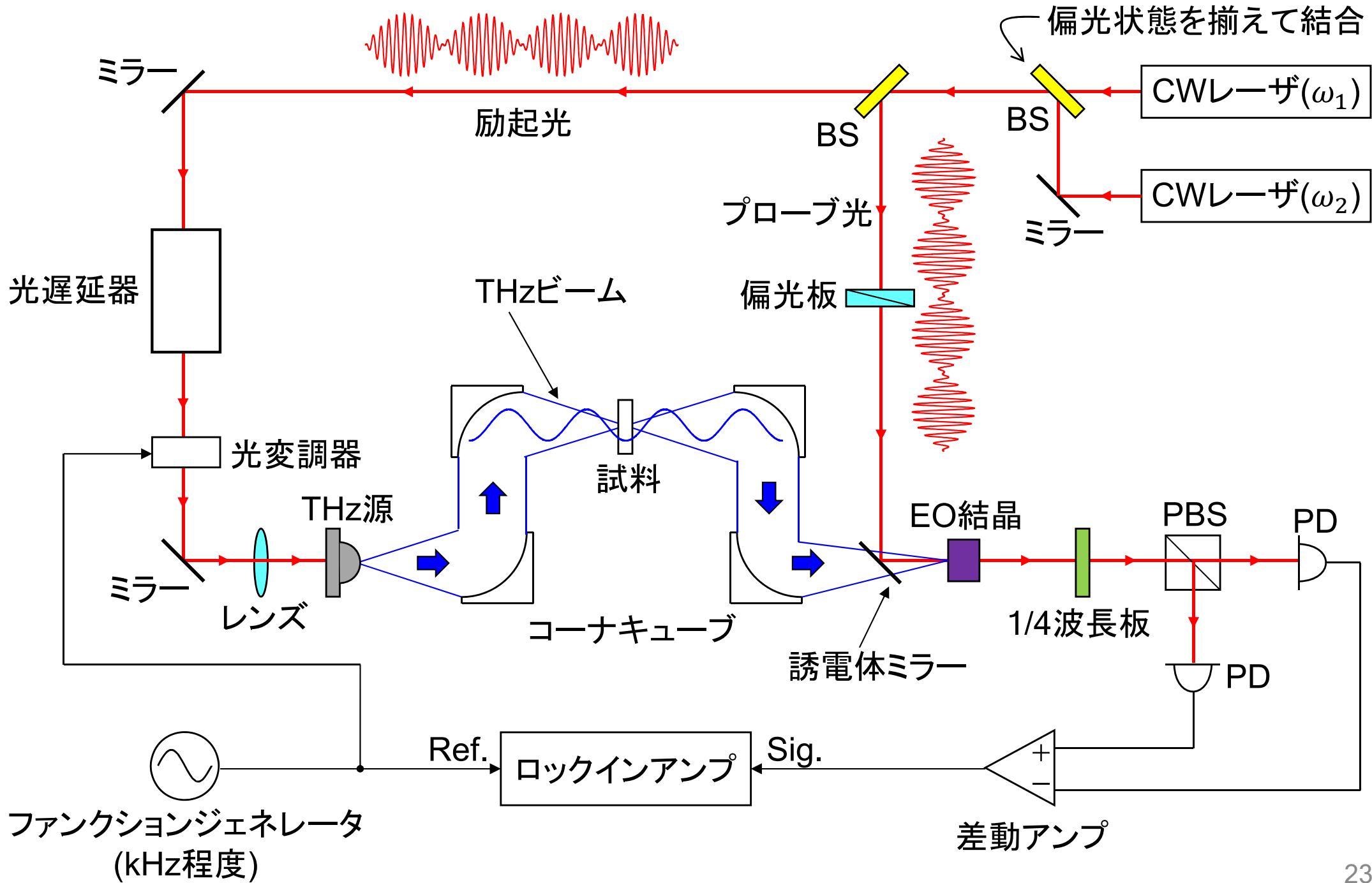


# 検出信号のスペクトル(例)

- レーザ強度雑音や受光回路の雑音が小さい周波数に $f_{\text{mod}}$ をセットする
- FFTアナライザやデジタルロックインアンプが高速・高感度検出に適する



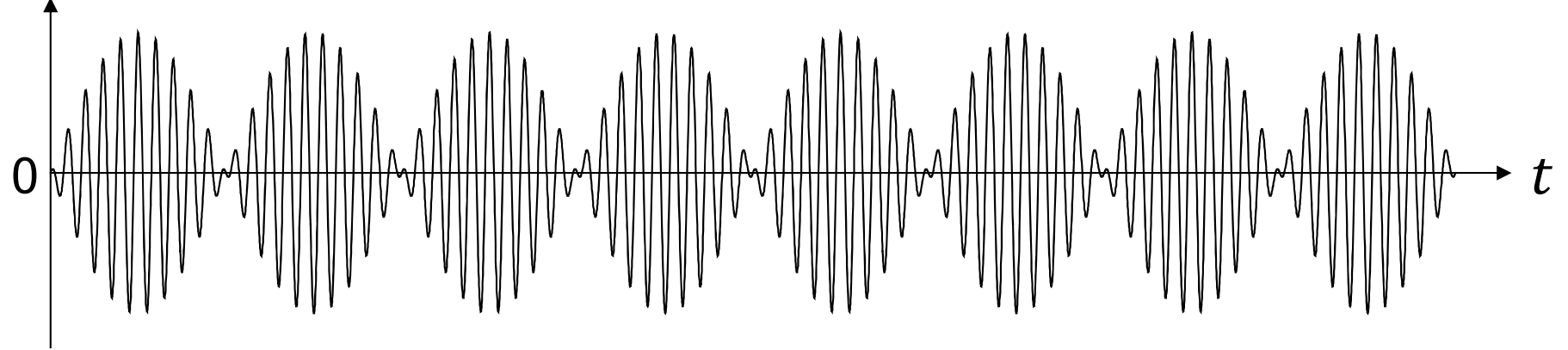
# CW-THz波の発生・検出システム



# 2波長光を利用したCW-THz波の発生

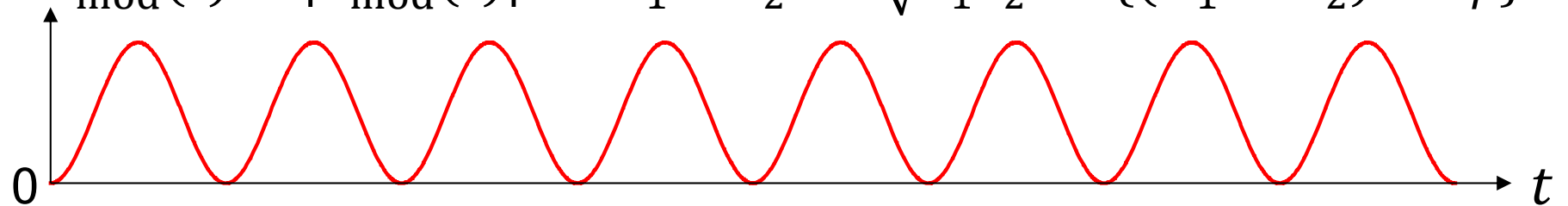
光電界

$$a_{\text{mod}}(t) = \sqrt{P_1} \exp[j\omega_1 t] + \sqrt{P_2} \exp[j(\omega_2 t + \phi)]$$



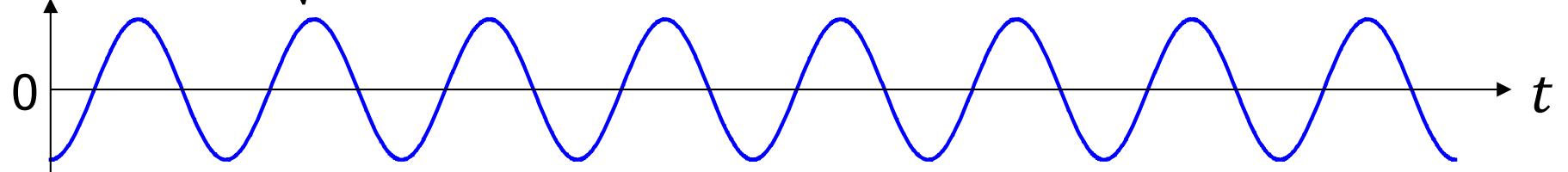
光強度

$$P_{\text{mod}}(t) = |a_{\text{mod}}(t)|^2 = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + \phi\}$$

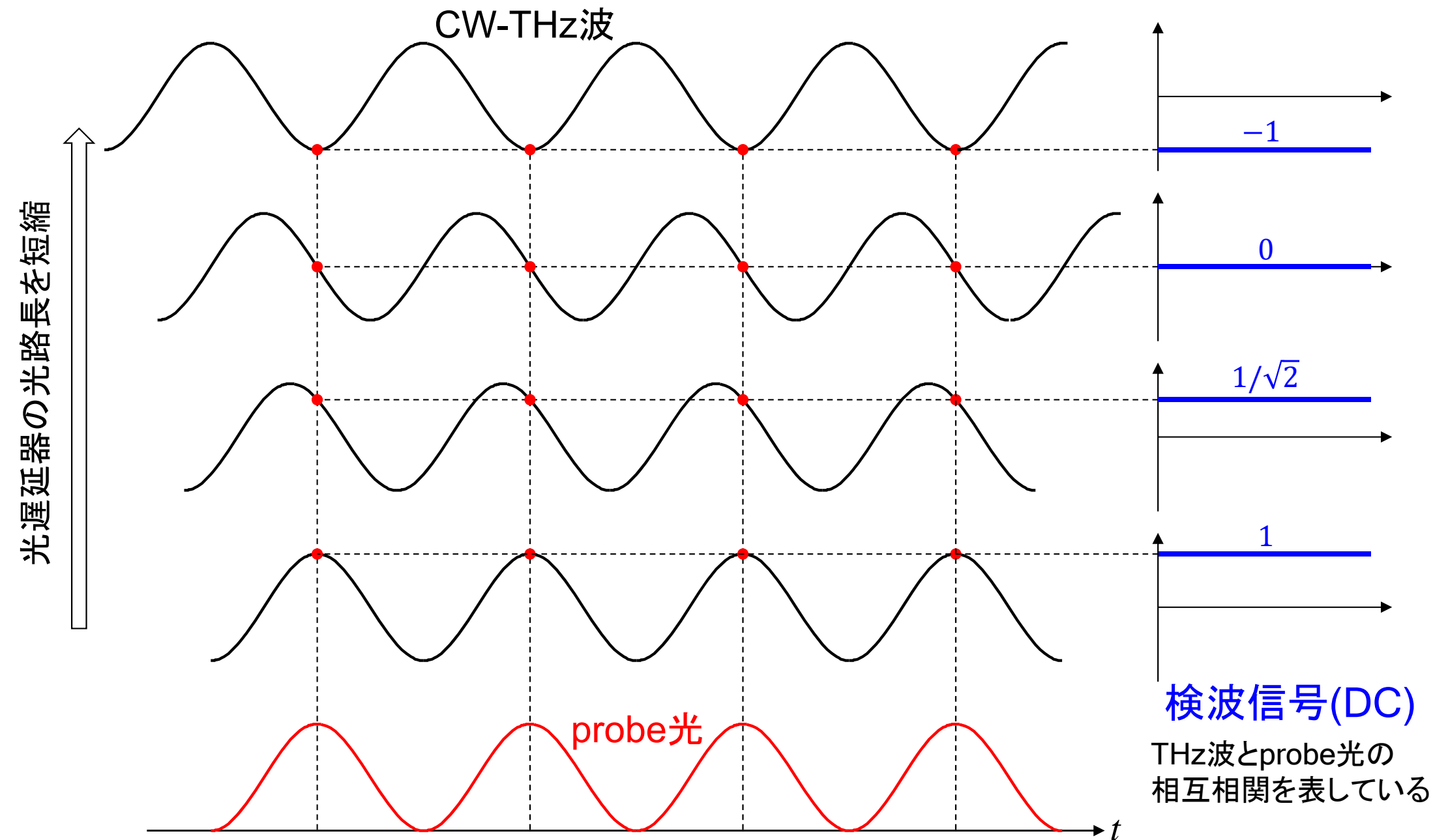


電波電界  
(THz波など)

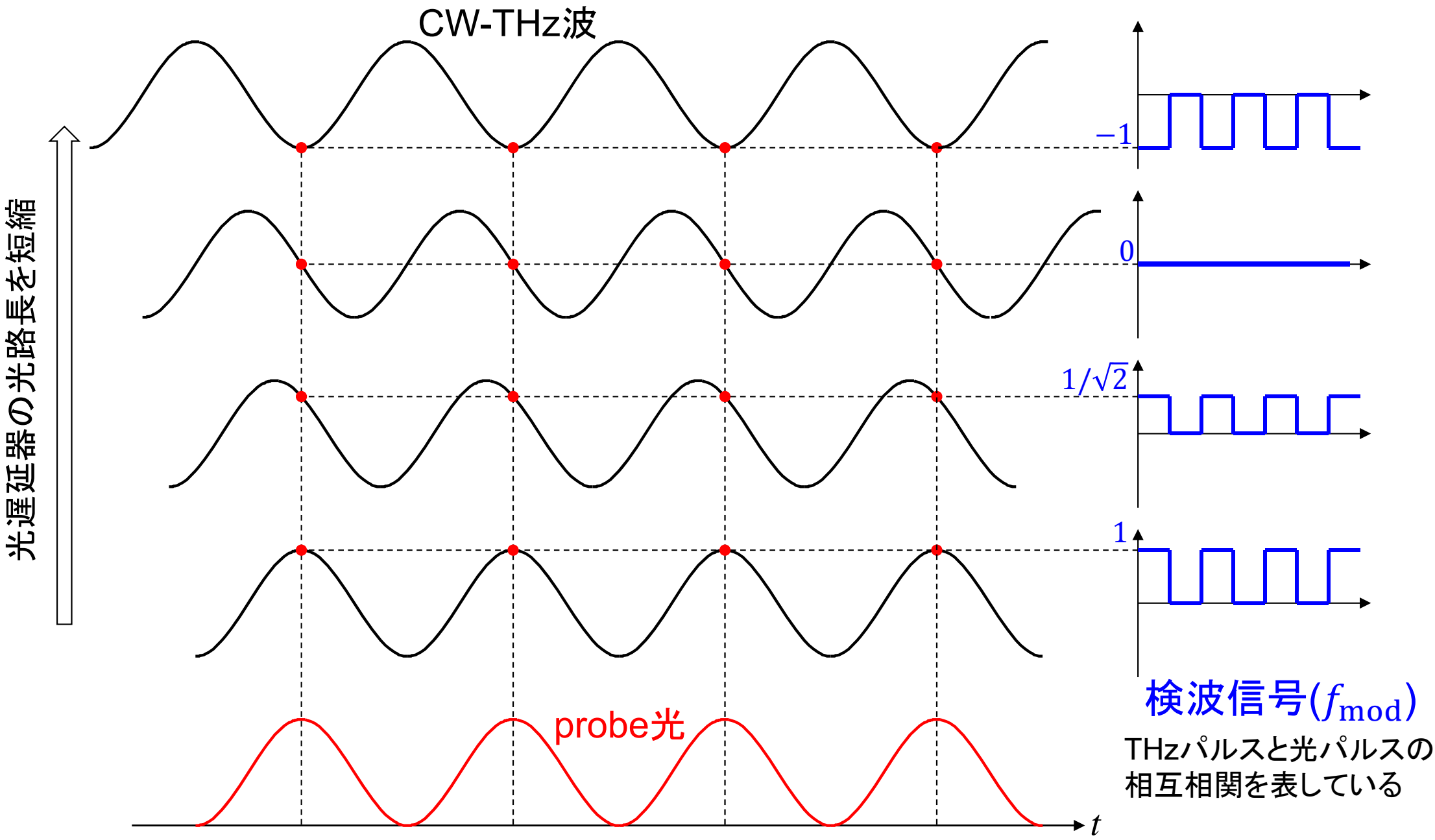
$$E_{\text{THz}}(t) = \sqrt{P_1 P_2} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + \phi\}$$



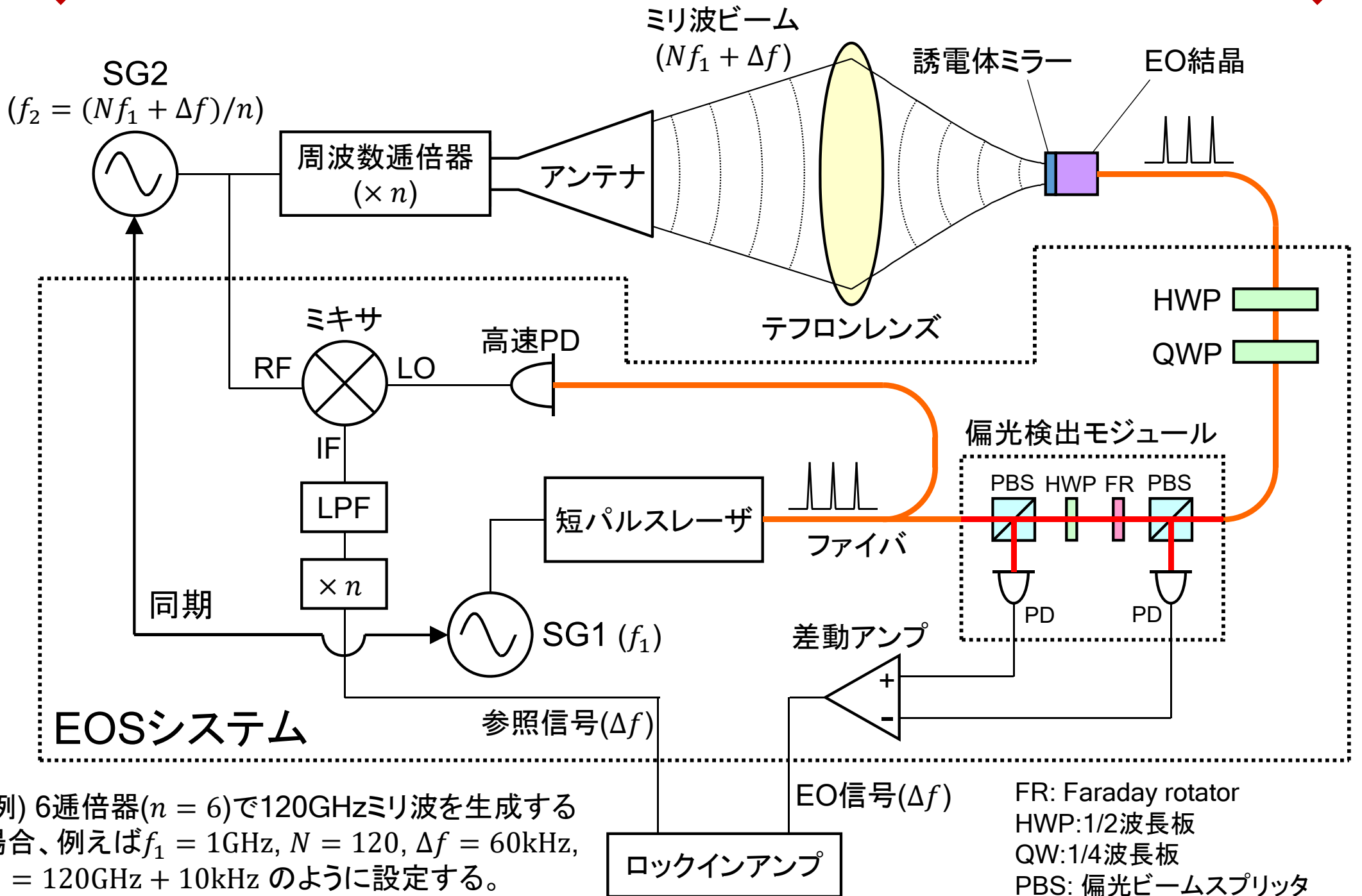
# CW-THz波形取得の概念



# CW-THz波形取得の概念 (変調時)



# ミリ波帯電波の発生・検出システム

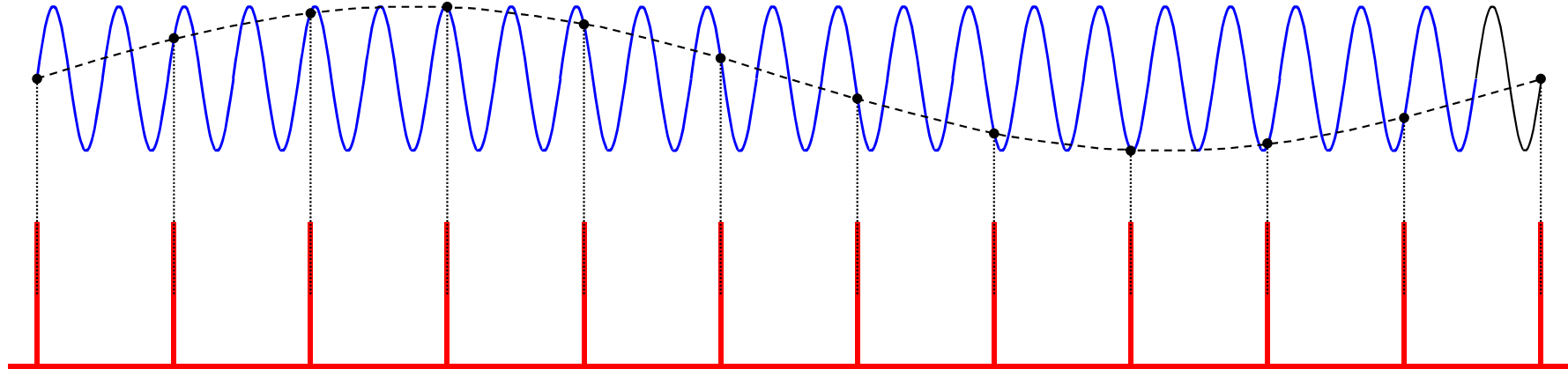


(例) 6通倍器( $n = 6$ )で120GHzミリ波を生成する場合、例えば $f_1 = 1\text{GHz}$ ,  $N = 120$ ,  $\Delta f = 60\text{kHz}$ ,  $f_2 = 120\text{GHz} + 10\text{kHz}$ のように設定する。

# 等価時間サンプリング法による波形取得の概念

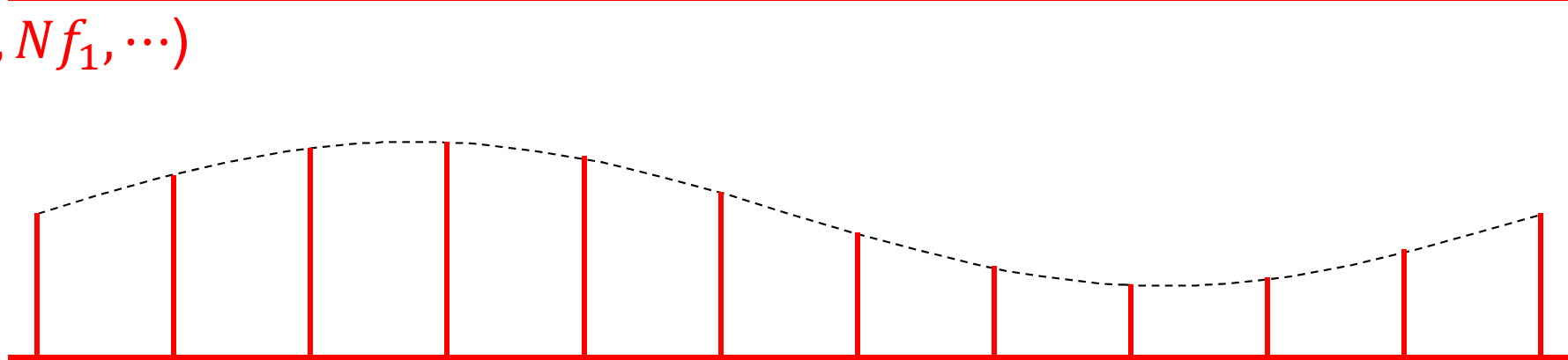
簡単のため、 $N = 2$  の場合について描画

(a) ミリ波  
( $Nf_1 + \Delta f$ )

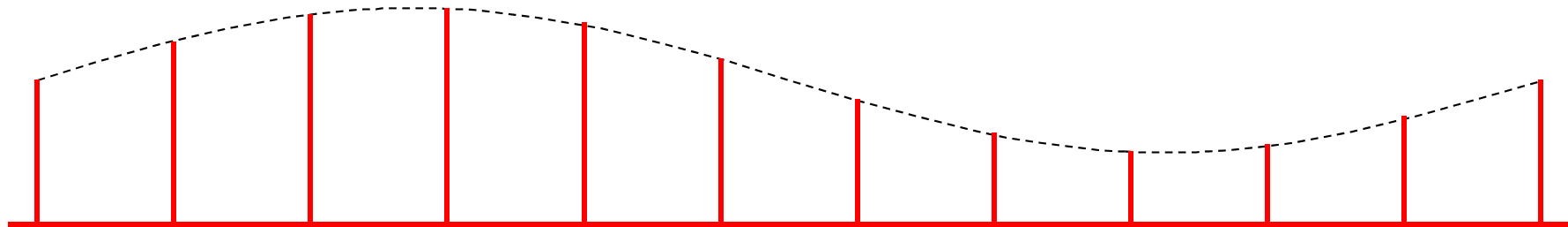


(b) 光パルス列

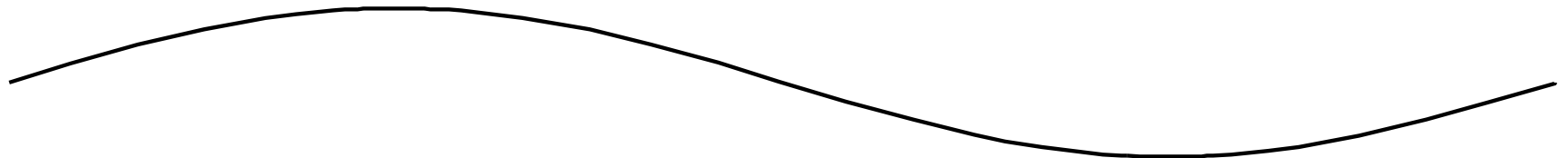
( $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots, Nf_1, \dots$ )



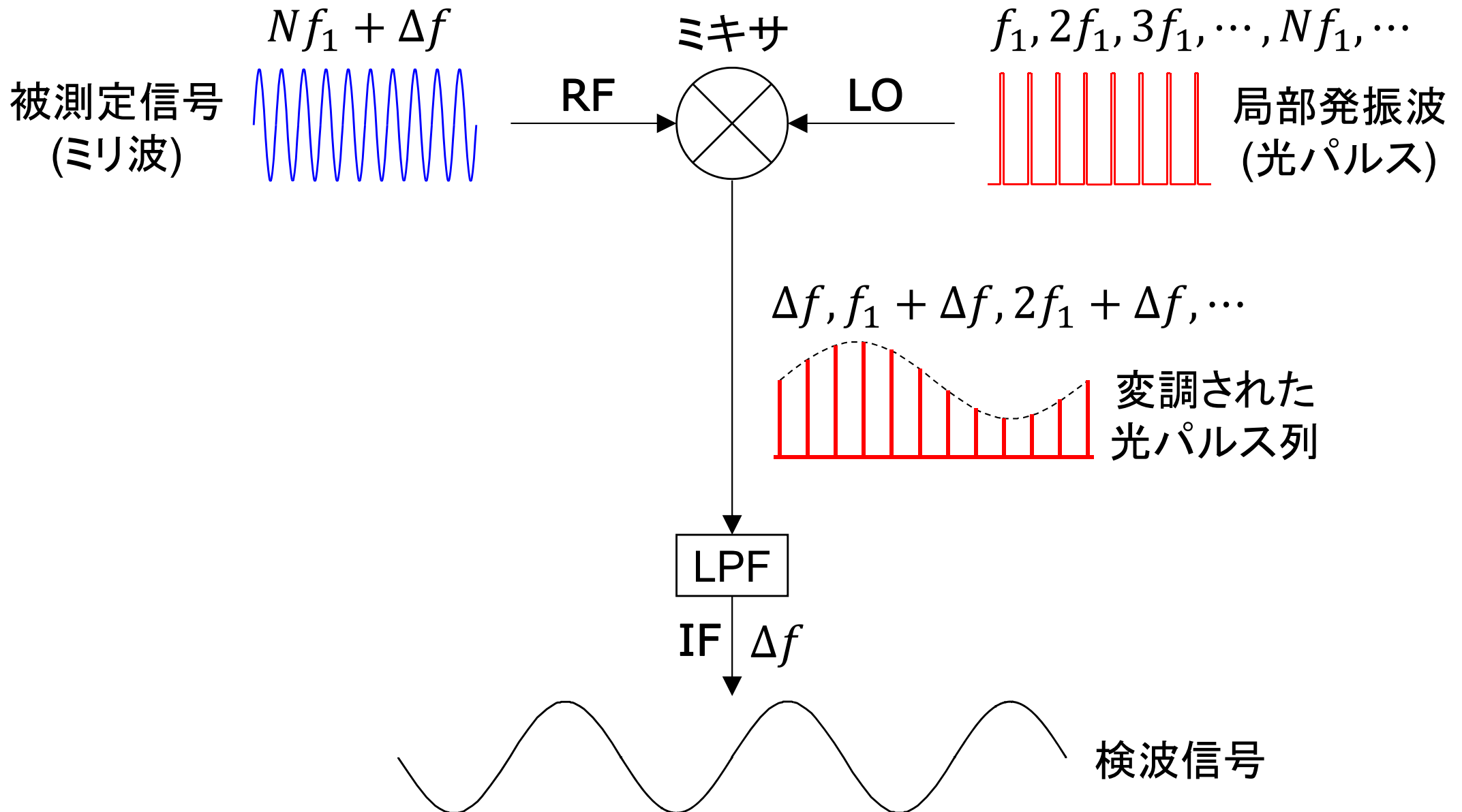
(c) 変調された  
光パルス列



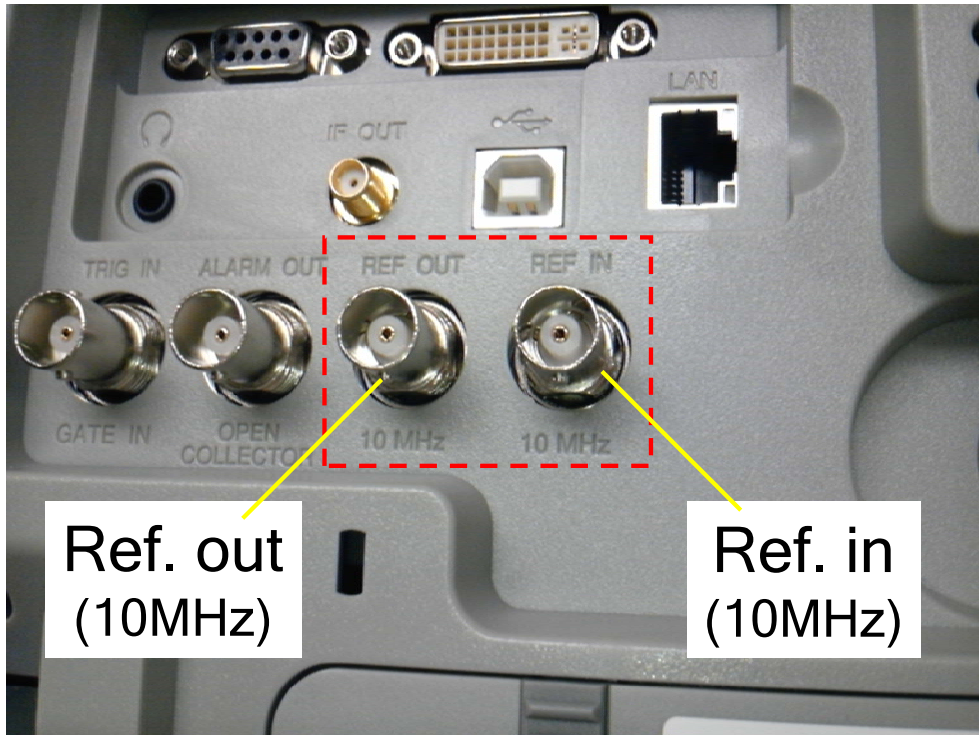
(d) 検出された  
電気信号  
( $\Delta f$ )



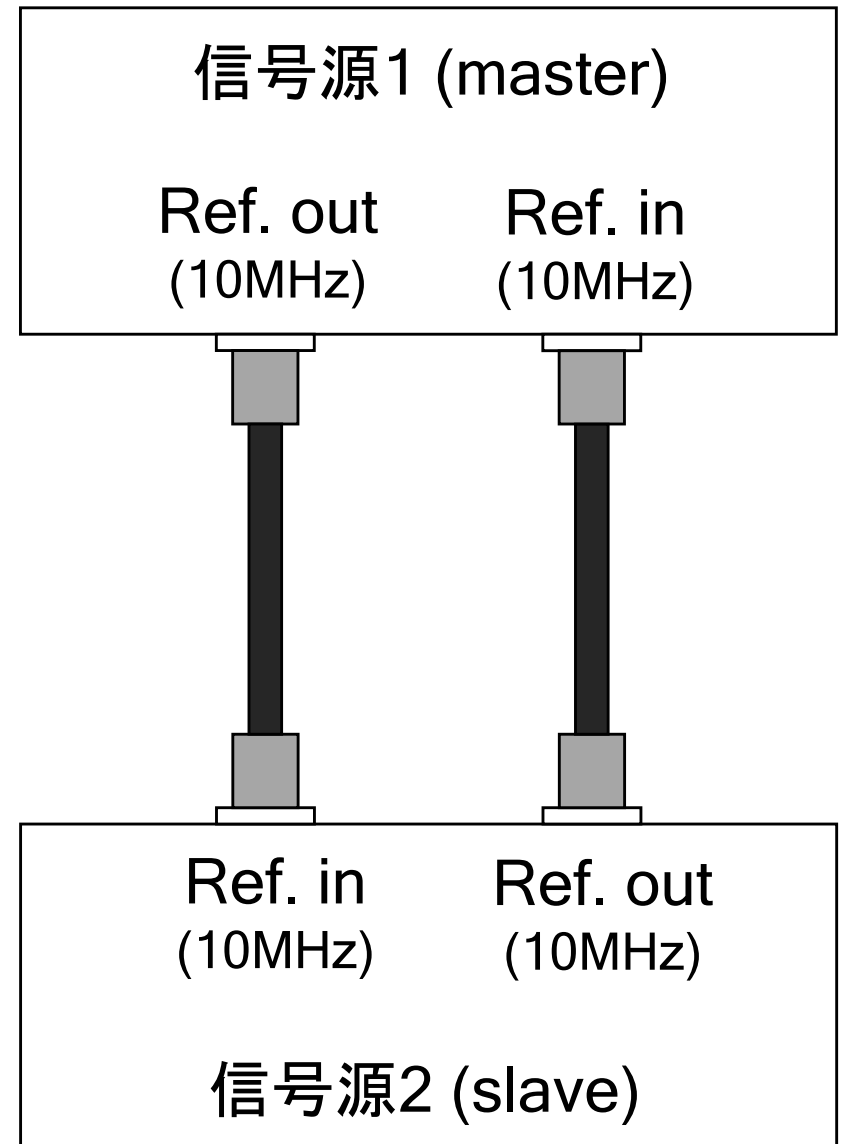
# 周波数領域における等価時間サンプリングの理解



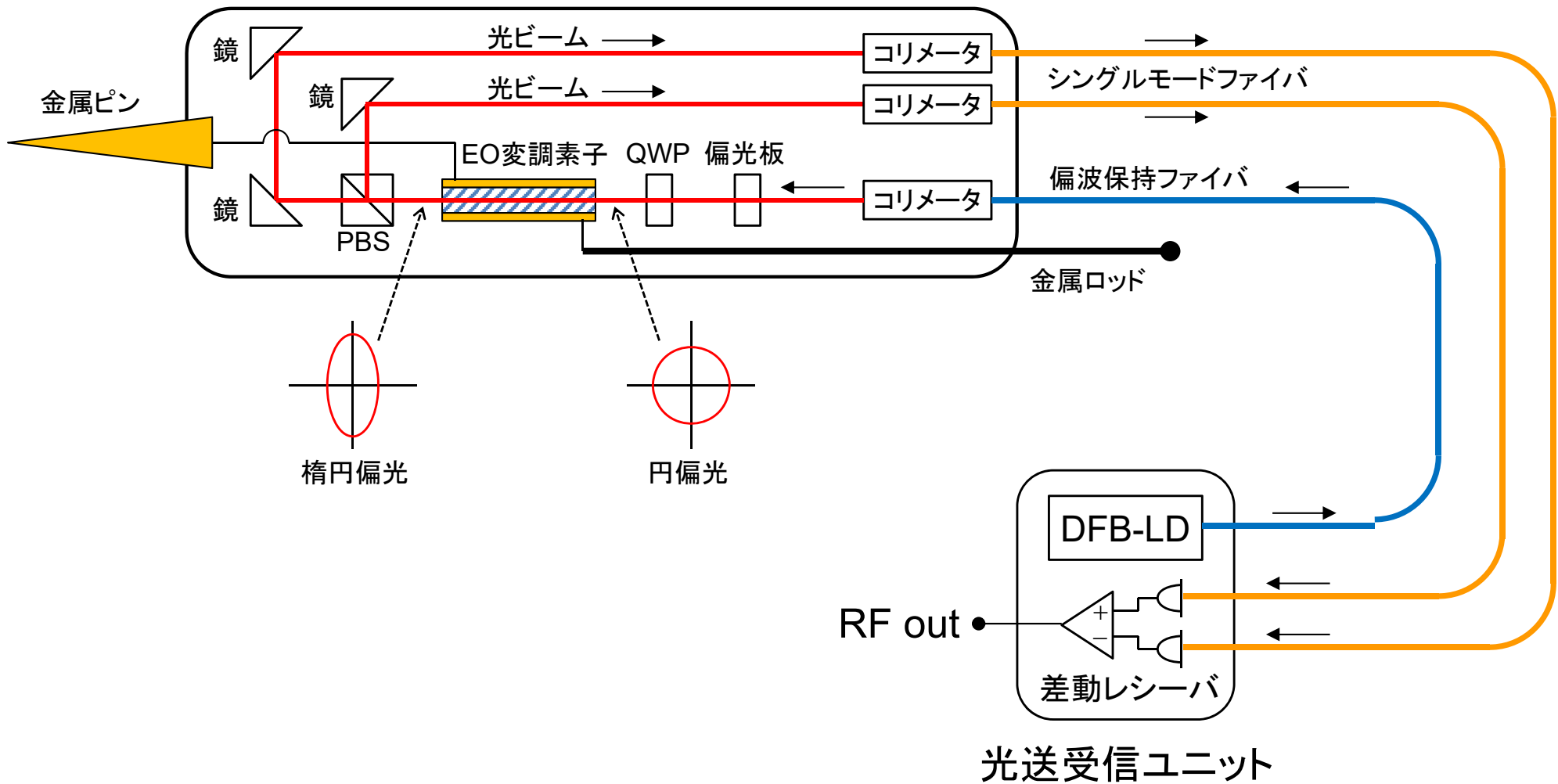
# 2台の信号源の同期



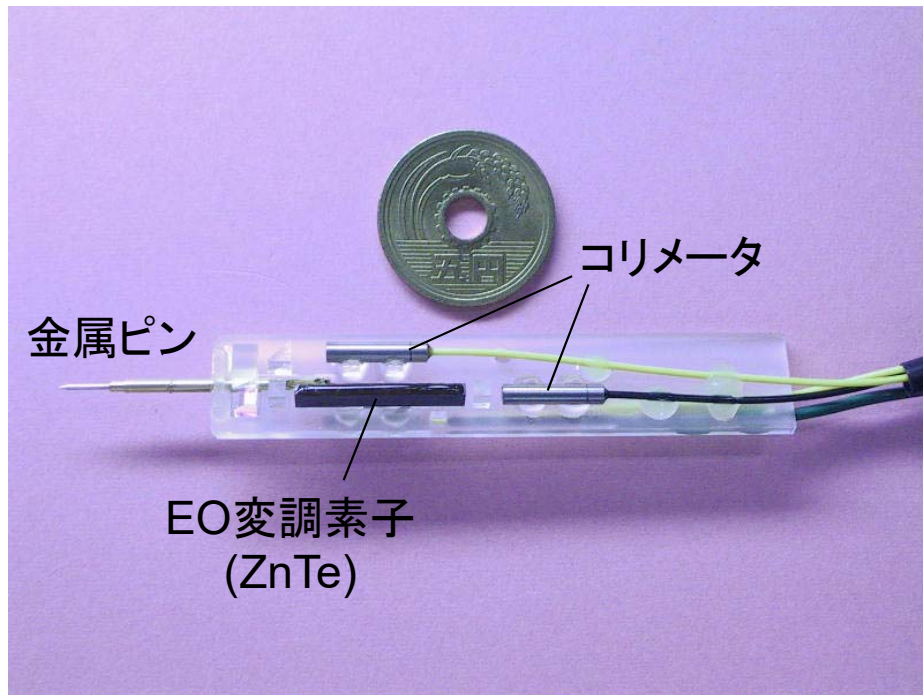
装置のリアパネル



# EOセンサの構成例



# 試作したEOセンサ



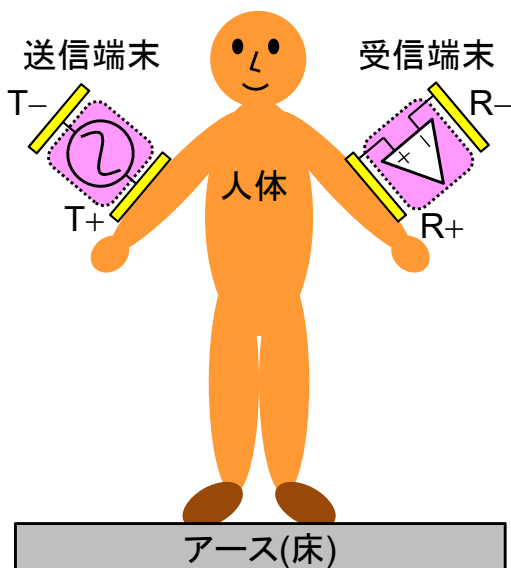
センサヘッド内部



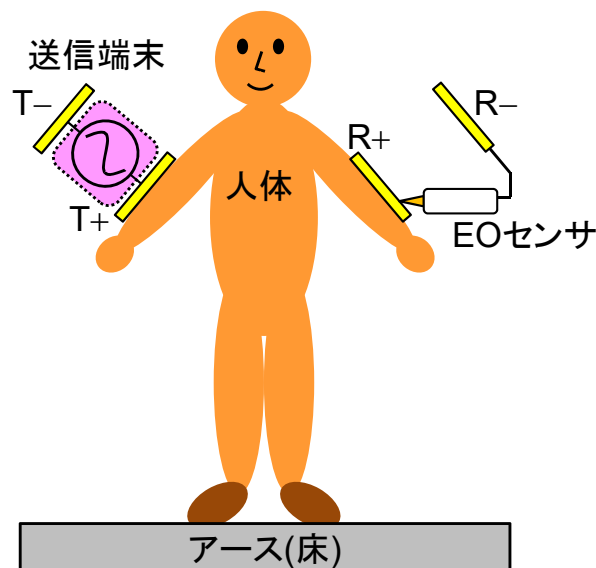
センサヘッド外観

# 携帯端末を含んだシステムの評価 (電界計測)

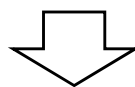
- 携帯端末は、回路GNDがfloatingの状態で作動作する
- EOセンサを使えば、floating状態を維持した計測が可能



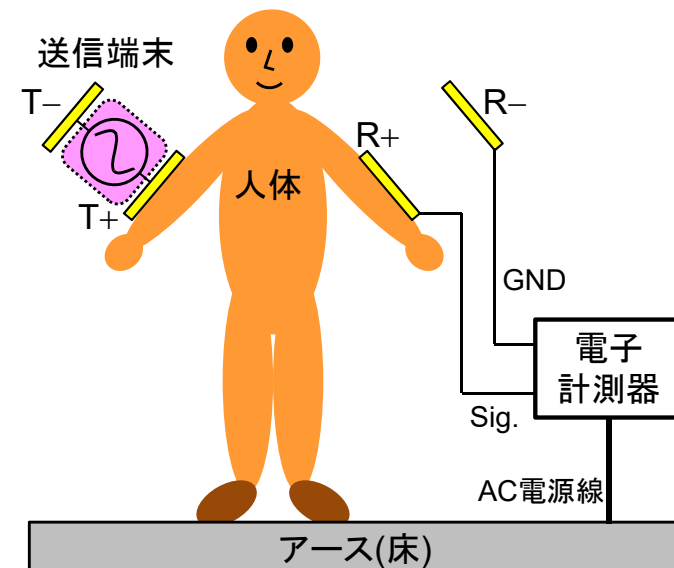
人体通信システム



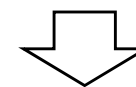
EOセンサによる計測



正しい評価が可能



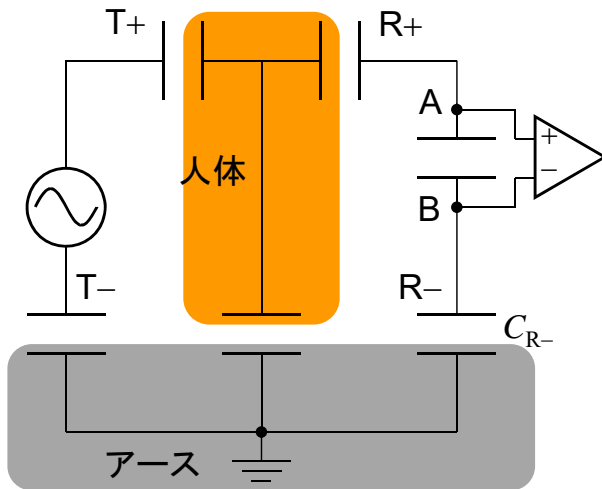
電子計測器による計測



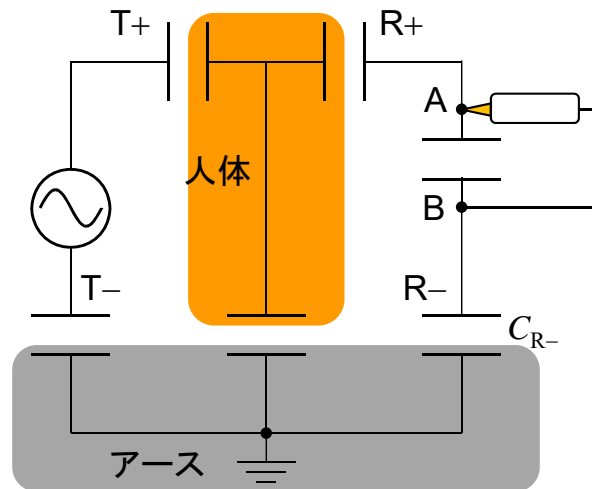
誤った結果を得る

# 等価回路を用いた理解

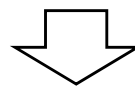
- 電子計測器でプロービングすると、被測定系が変化してしまう
- EOセンサを利用すれば、被測定系は変化しない



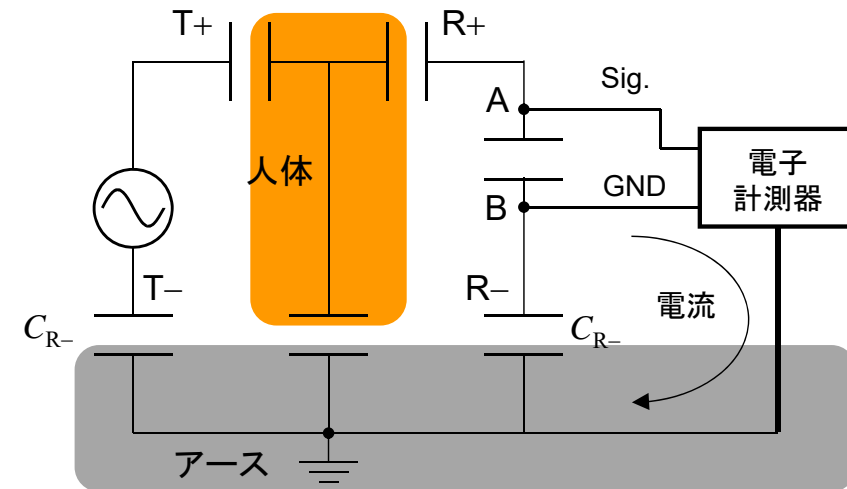
人体通信システム



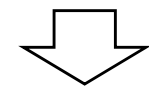
EOセンサによる計測



正しい評価が可能

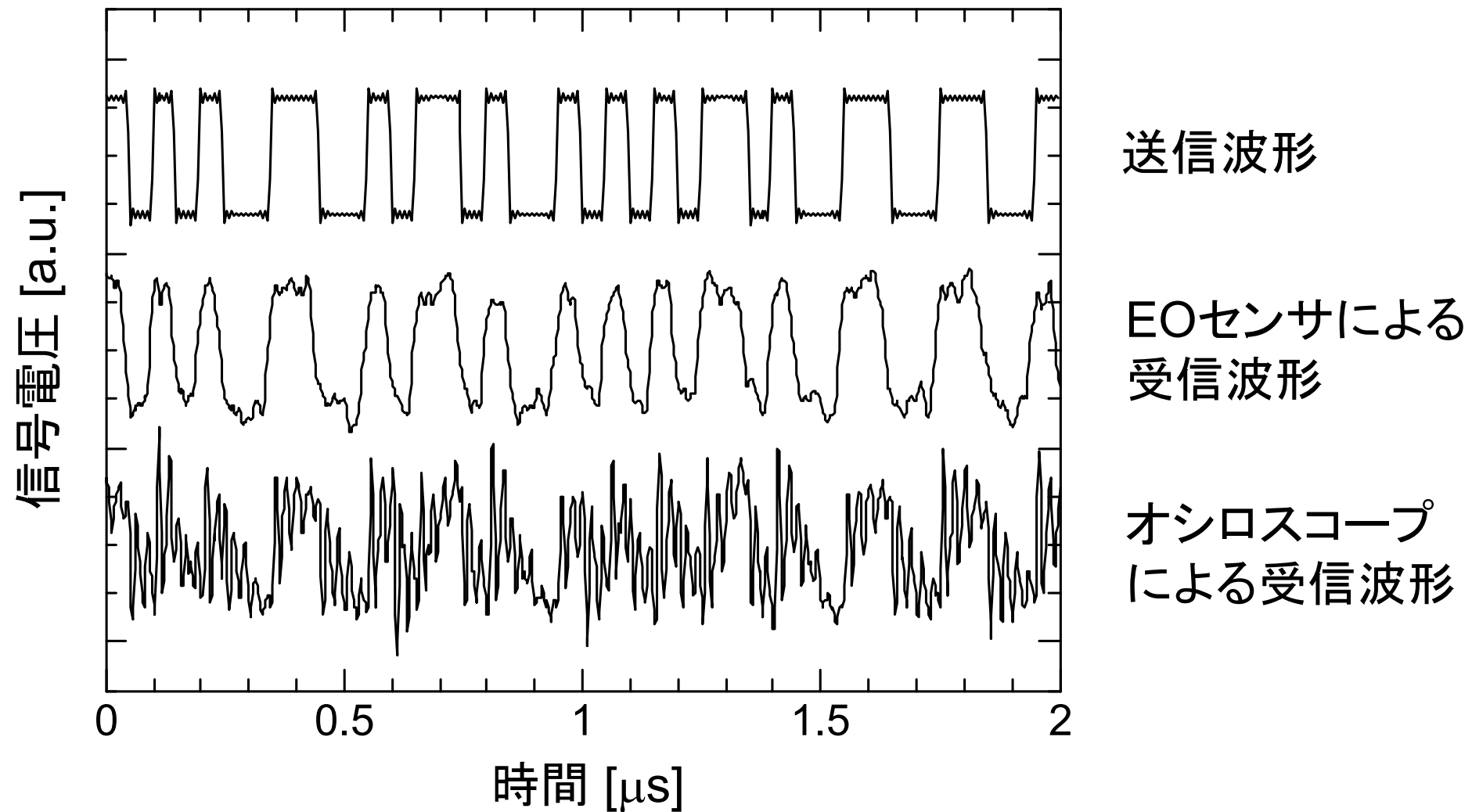


電子計測器による計測

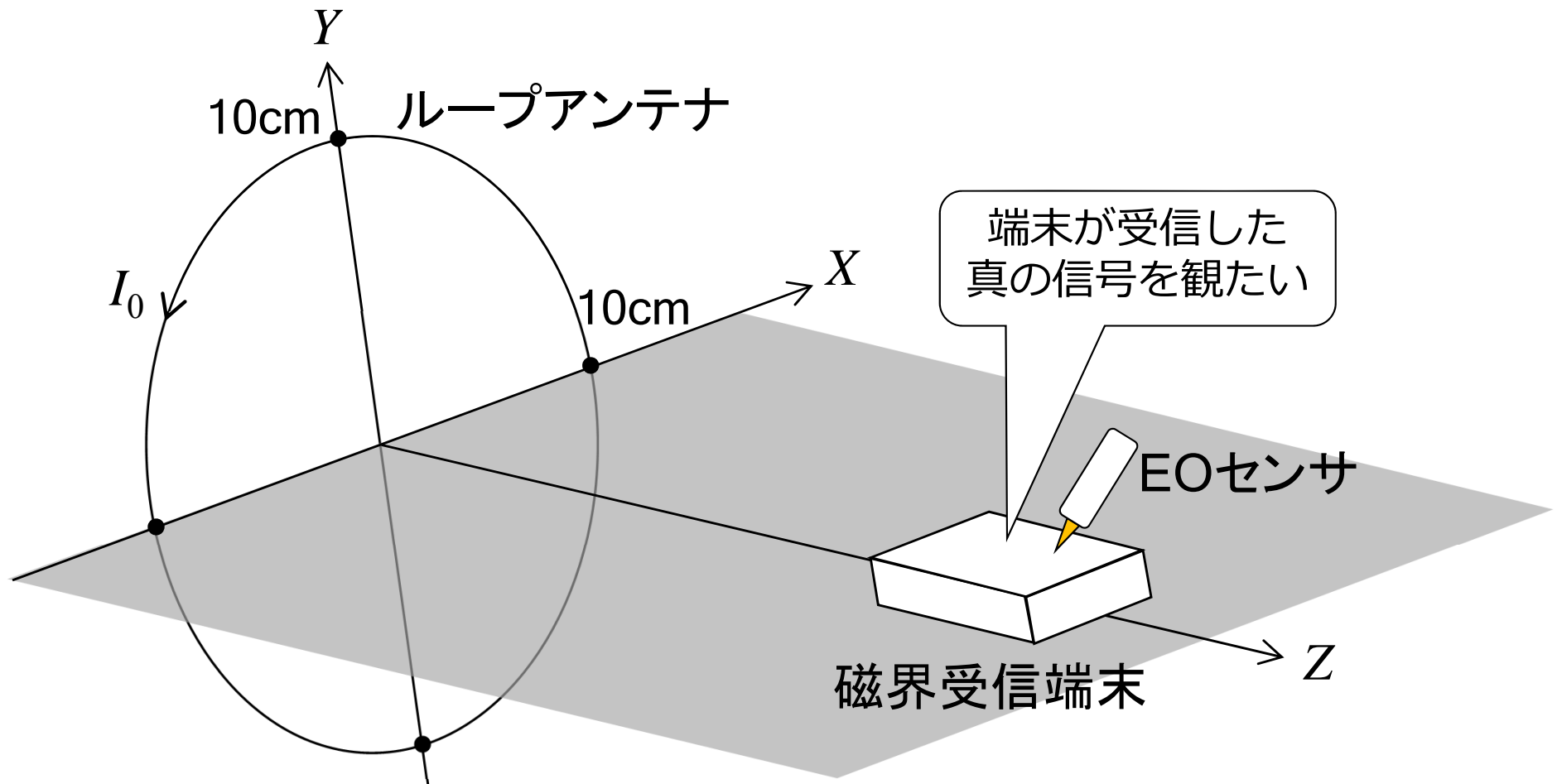


誤った結果を得る

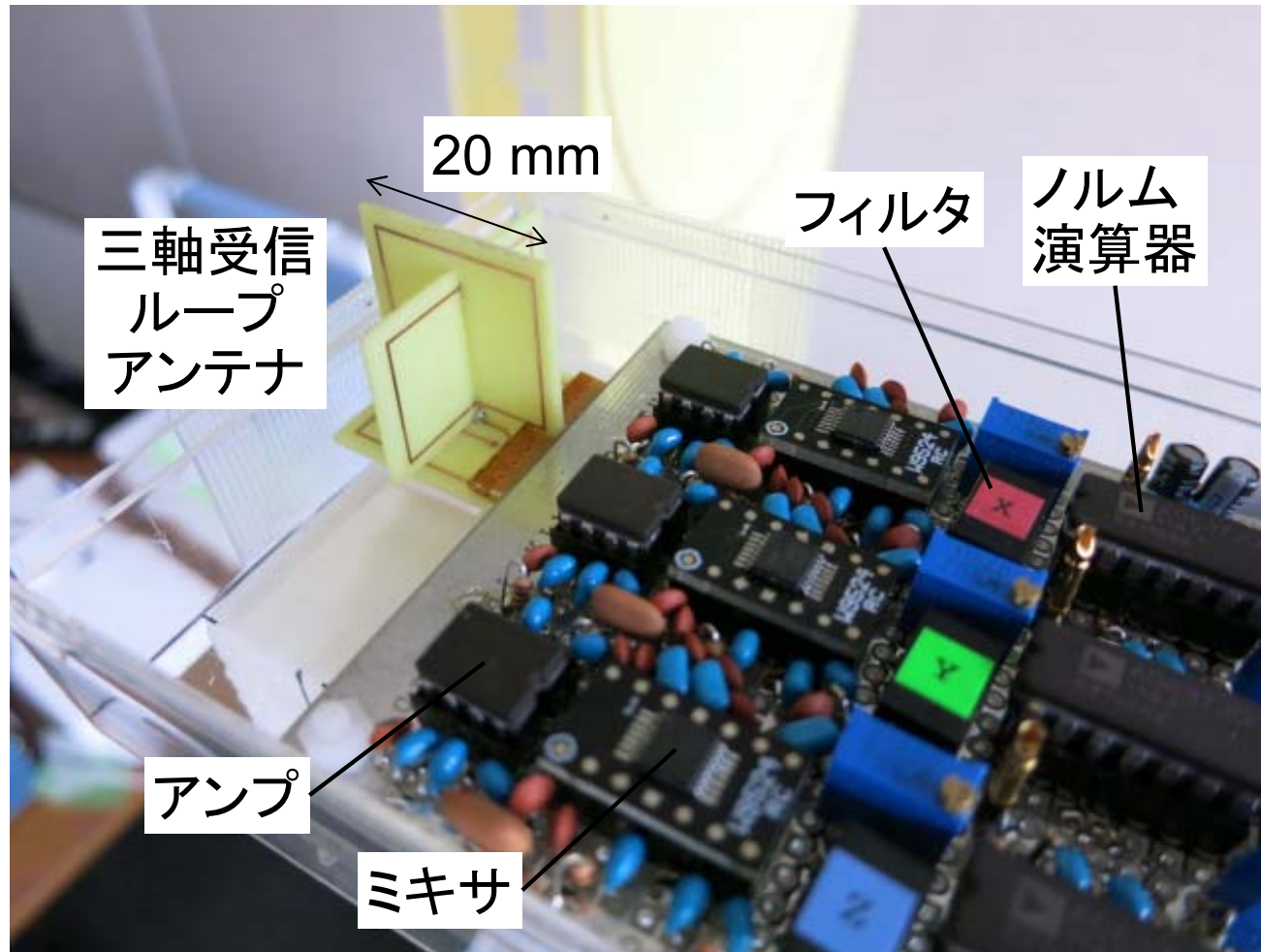
# 人体通信システムの評価結果例 (電界計測)



# 携帯端末による磁界分布計測

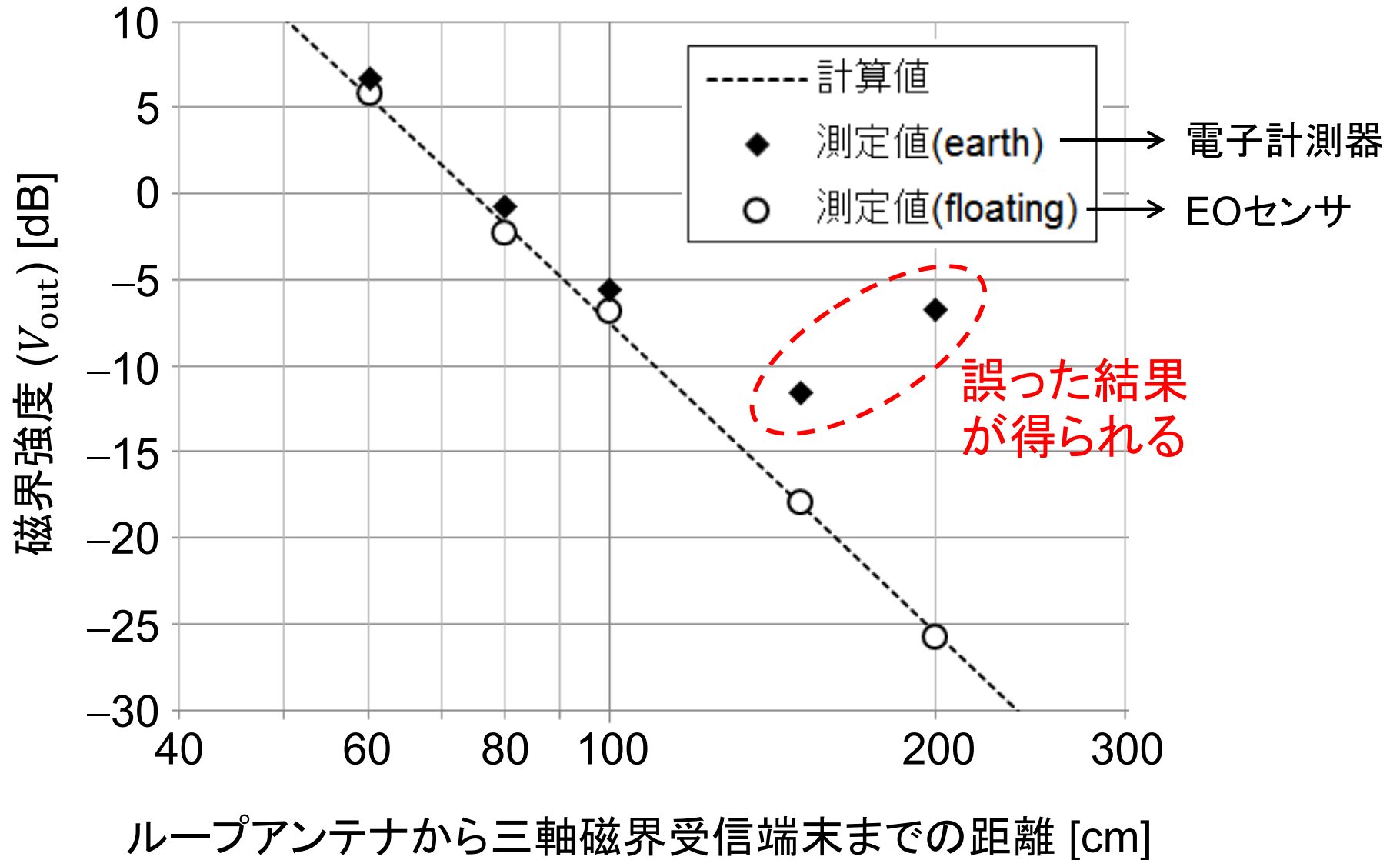


# 磁界受信端末



検出磁界の絶対値に比例する信号を出力:  $V_{\text{out}} \propto \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$

# EOセンサを利用した磁界計測結果の例



# PEM技術に関わる企業

企業名	対象製品
(株)精工技研	光電界センサ など
スタック電子(株)	光電界センサ など
アークレイ(株)	有機非線形光学結晶
(株)アルネアラボラトリ	光学測定器、特注モジュール など
(株)光学技研	結晶加工、光学素子、特注モジュール など
(株)多摩川電子	RoFモジュール など
(株)オキサイド	光学結晶 など
JX金属(株)	ZnTe結晶 など
(株)アドバンテスト	THz分光モジュール・システム

# まとめ

---

- PEM技術の本質は、超高周波で動作するミキサ(EO結晶)とLO(光)としての機能である。
- したがって、PEM技術は超高周波計測に向いている。
- センサヘッド(結晶)と電気系が光によって絶縁されている事実は、超高周波計測以外のメリットとしても生かせる。
- この絶縁性は、近傍界が主役となる低周波システムの評価にも向いている
- より詳しい情報や文献につきましては、PEM技術報告書「[光を応用した電磁界計測技術](#)」をご参照願います。