

# 高安定高周波基準信号の 光ファイバ長距離伝送のための 伝送位相補償方法

自然科学研究機構

国立天文台アルマプロジェクト

特任教授 木内 等

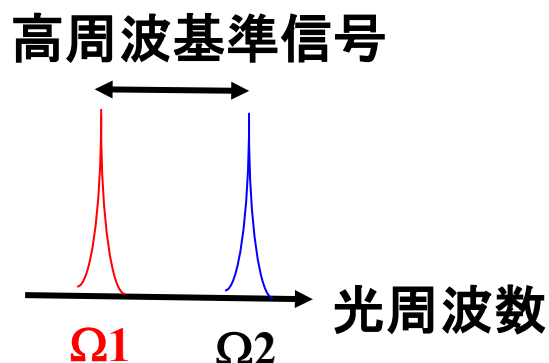
2023年2月9日

天文分野ではテラヘルツ周波数領域での観測、高速データ通信分野 (beyond 5G)では300GHz越えの周波数領域の使用が計画されるなど信号の**高周波広帯域化**そして**広域(>100km)**使用が重要な検討項目である。

これらに伴い、信号のコヒーレンス維持のため、**リモート局で周波数逡倍操作の必要の無い高周波基準信号の長距離伝送**は高周波・広域のコヒーレント系構築のために避けて通れない課題である。

Microwave-Photonics技術を用いた原子周波数標準の位相安定度を持った高周波用**Microwave-Photonics信号発生技術**と**伝送技術**を開発したので報告する。

高周波基準信号は、コヒーレントな2光波の差(ビート信号)として発生・伝送され、光・電気変換により電気信号として取り出される。



## Microwave-Photonics信号発生技術

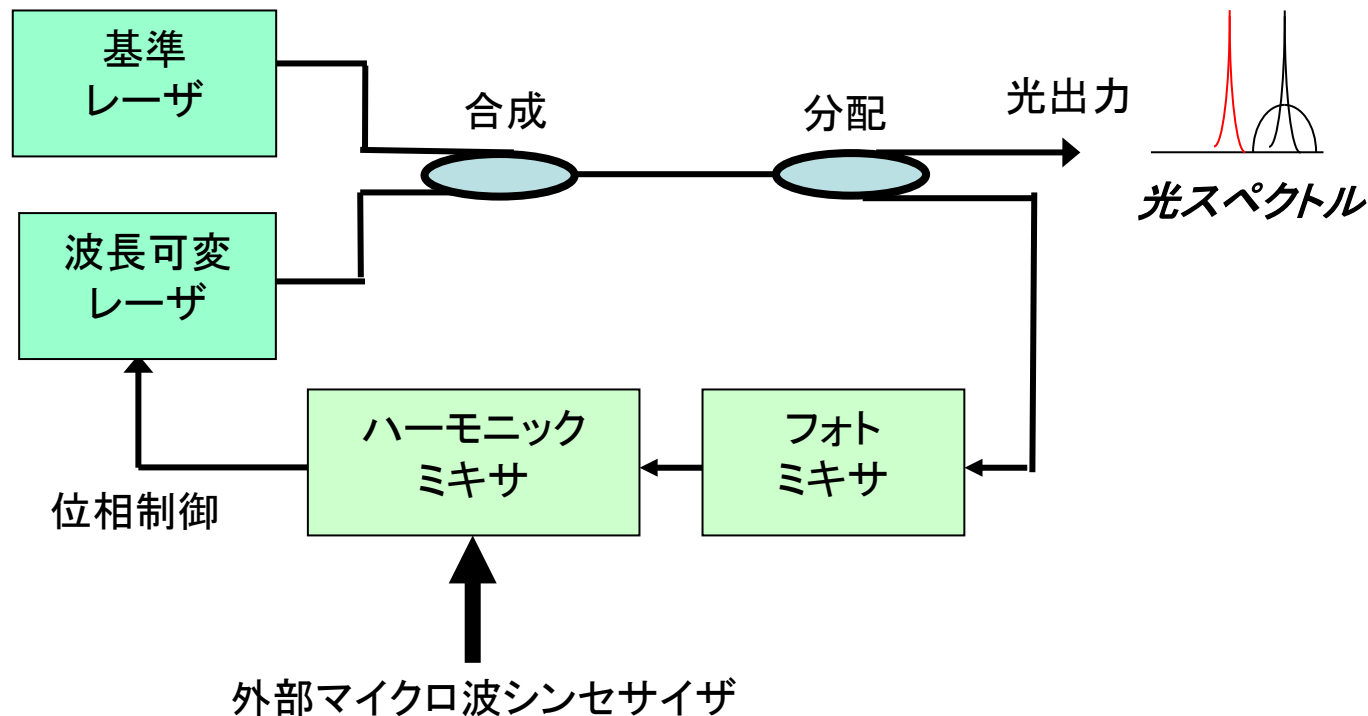
マイクロ波のシンセサイザのような信号発生器が欲しい

MHzオーダからTHz以上まで、出力周波数がシームレスで  
高い周波数分解能 (< 1Hz) を持った光シンセサイザ

**広周波数・高周波数分解能 光シンセサイザの検討**

# Microwave-Photonics信号発生／従来技術とその問題点

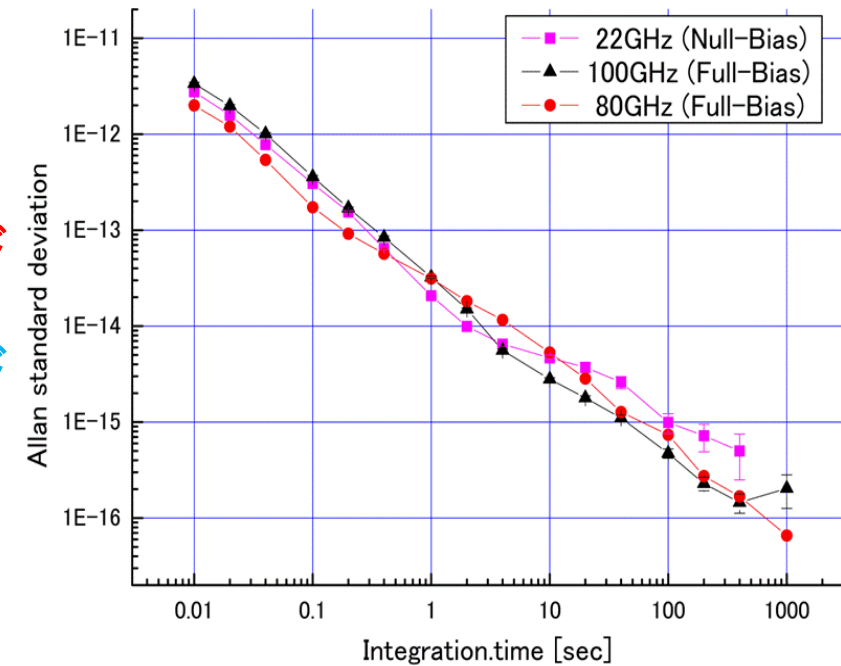
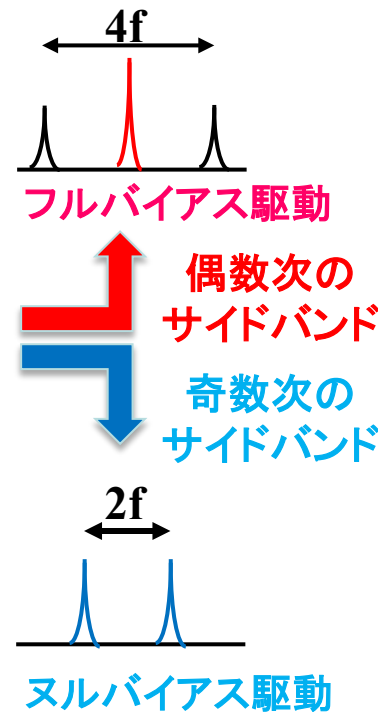
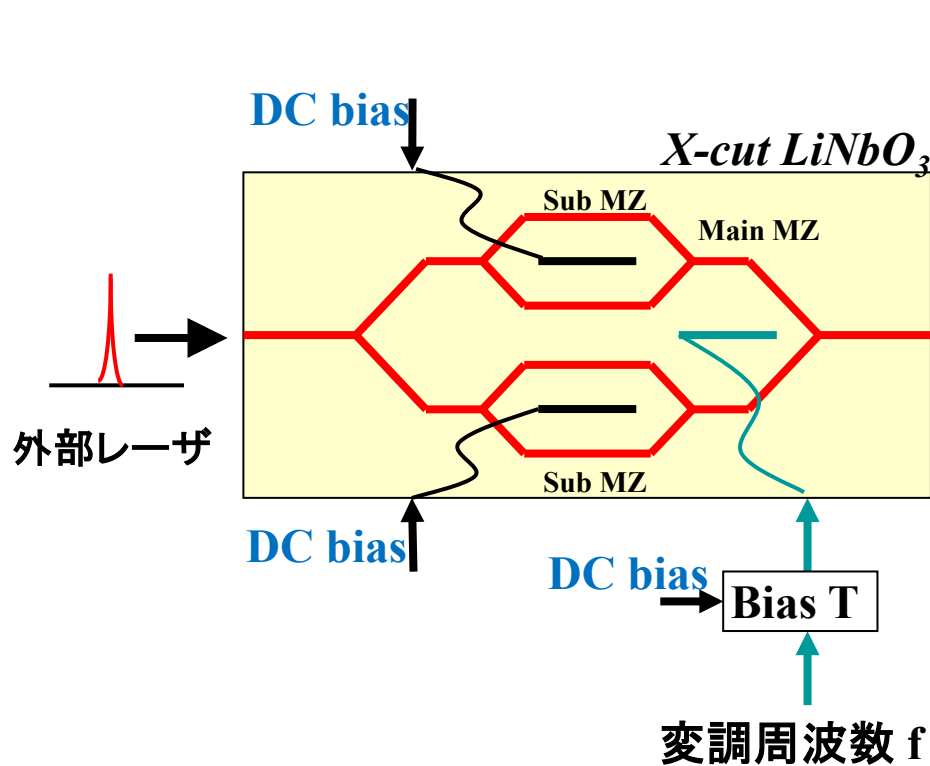
## 従来の光位相同期方式



- 位相安定度は基準レーザの安定度の影響を受ける
- 外部擾乱の影響を受け易い
- 高安定基準レーザや高速ループ制御など複雑で高価
- アクティブレーザが2つあるので光スペクトルが異なる (位相雑音で不利)
- Loop BWは、Loop一周の時間で制限
- 発生周波数に応じた高速なPhotomixerが必要

# Microwave-Photonics信号発生／要素技術1

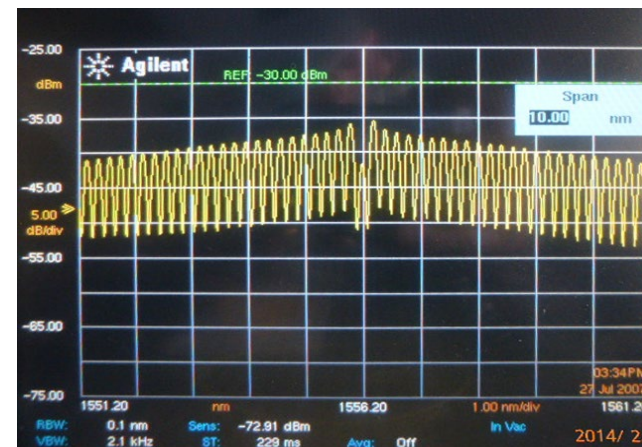
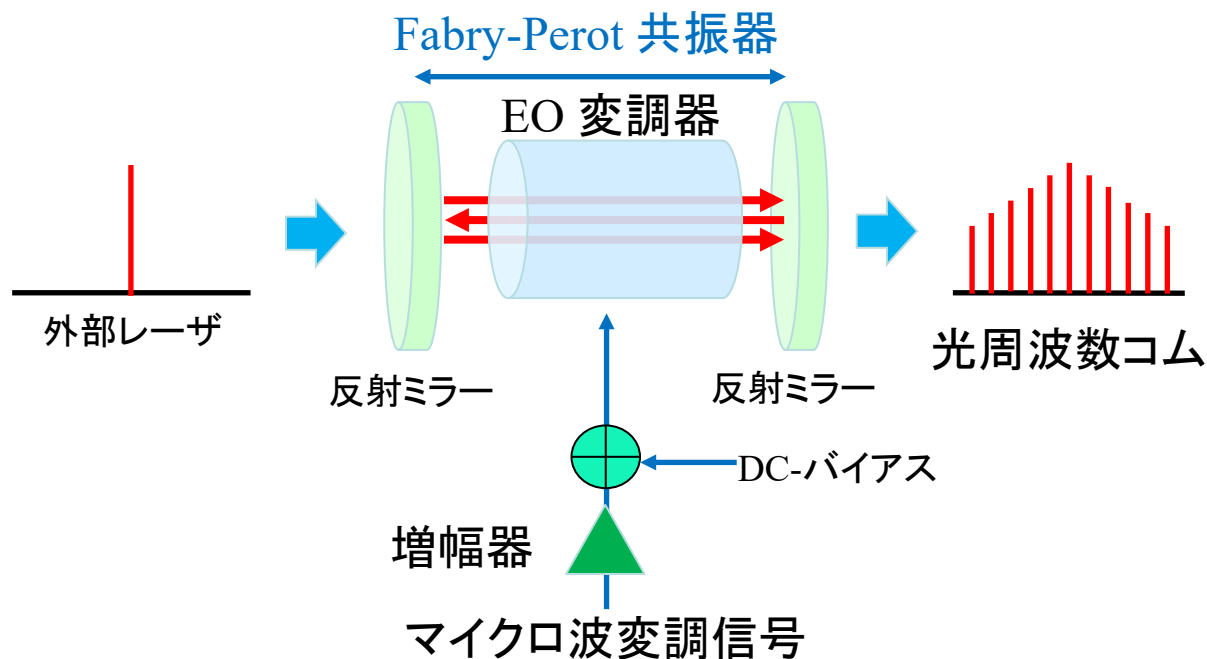
## 高周波数分解能Mach-Zehnder optical modulator



- 位相安定度は外部レーザの影響を受けない
- 外部擾乱の影響を受けにくい
- 高位相安定度を持ち、高周波数分解能

# Microwave-Photonics信号発生／要素技術2

## 広帯域光コム発生器

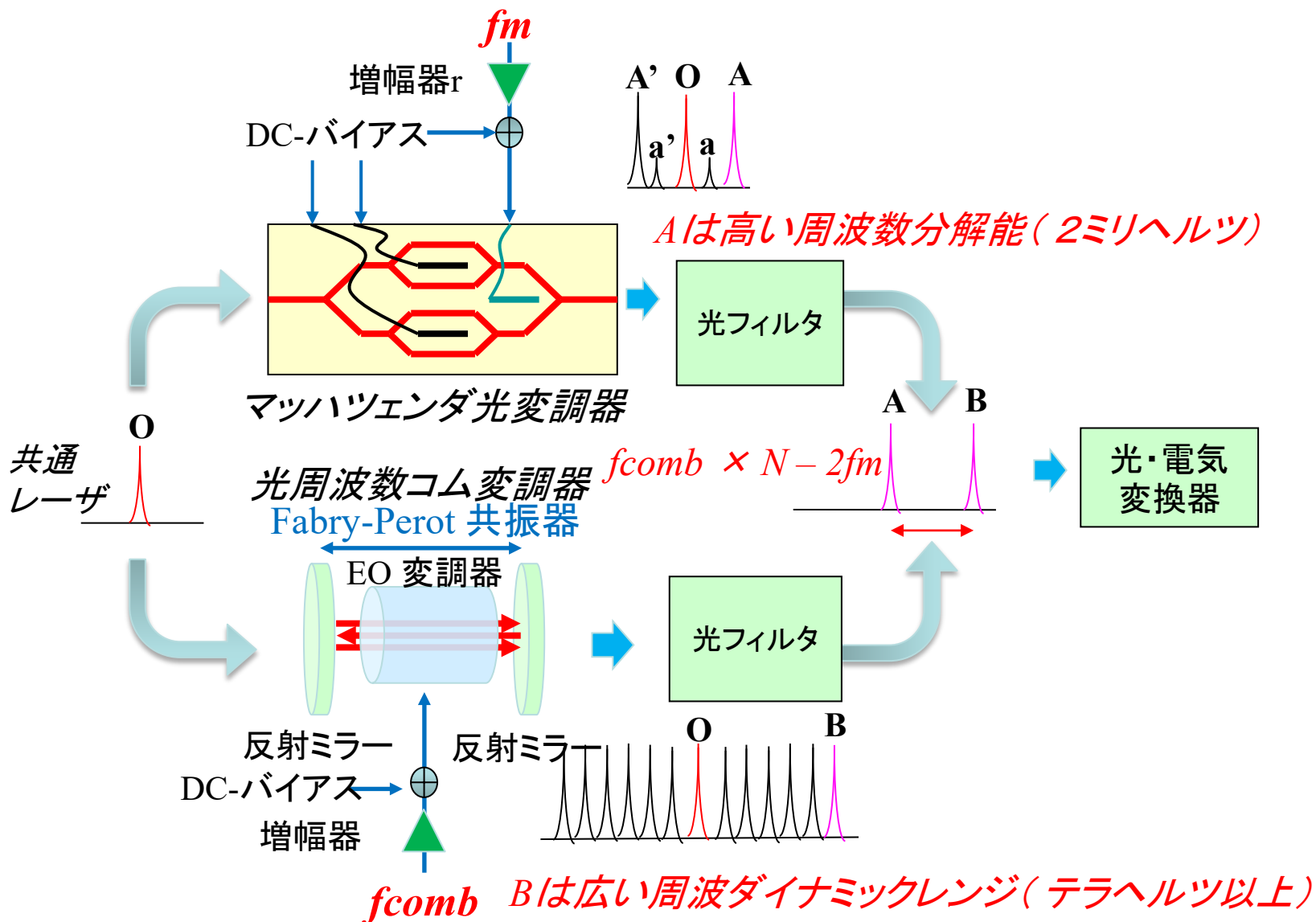


測定された光コム  
周波数間隔 25 GHz

周波数ダイナミックレンジは広いが周波数分解能は非常に荒い。

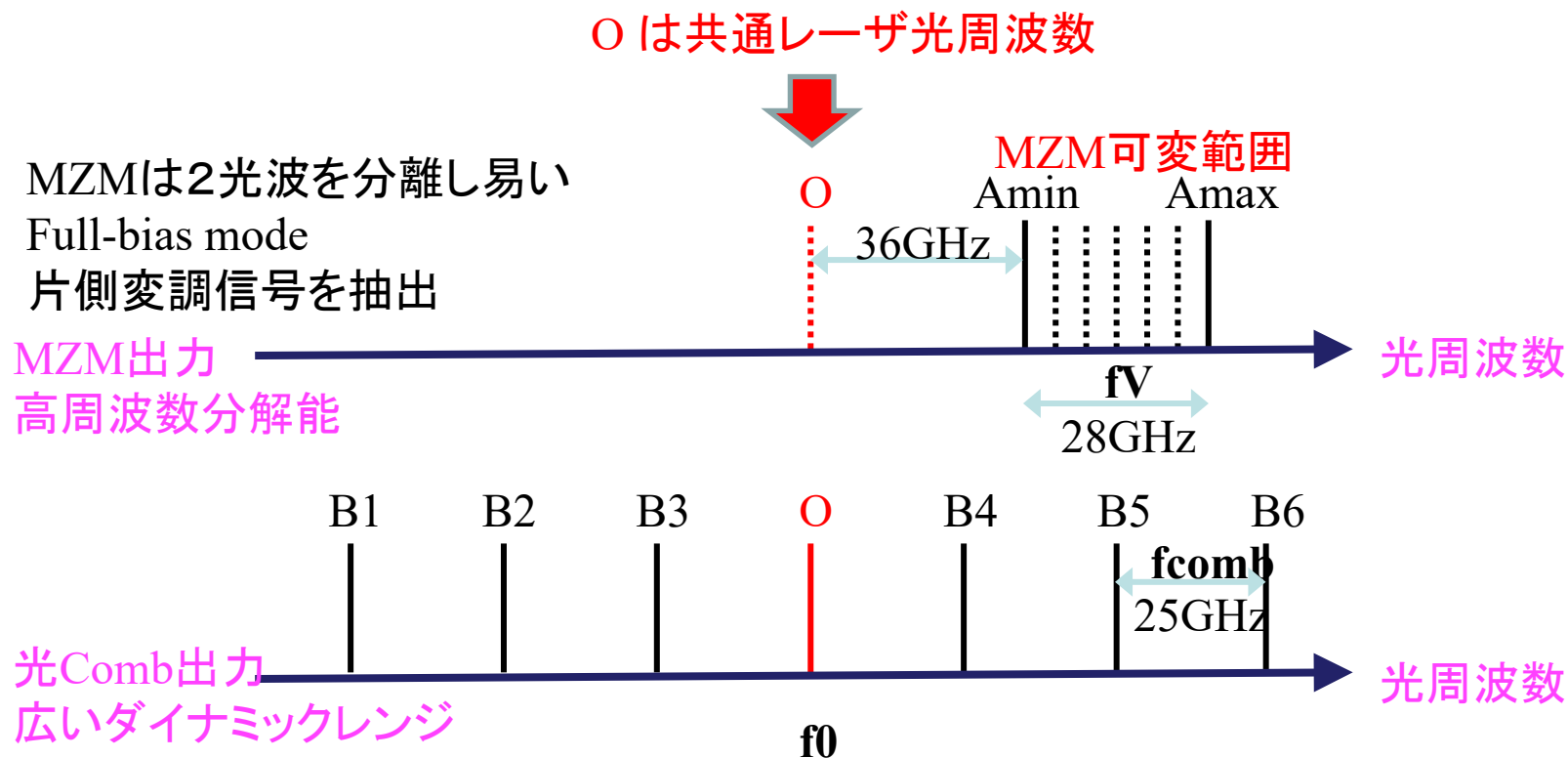
# Microwave-Photonics信号発生／新技術

広周波数・高周波数分解能 光シンセサイザ技術



# Microwave-Photonics信号発生 / 新技術 周波数関係

## 広周波数・高周波数分解能 光シンセサイザ



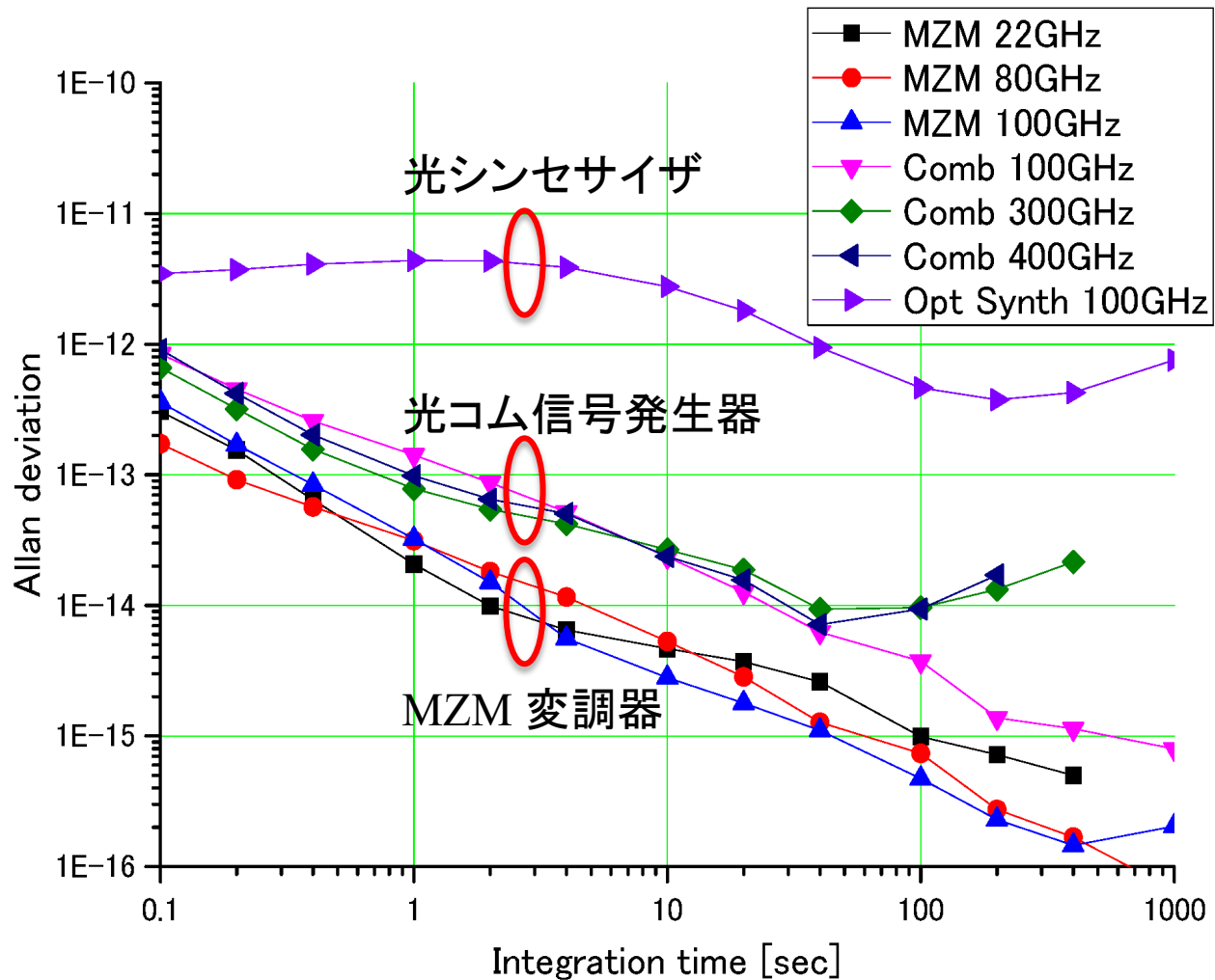
$$f_{comb} \times N - 2f_m$$

MZMの光信号Aと光コム信号Bのどれか1波を抽出



# Microwave-Photonics信号発生／新技術 位相安定度

## 広周波数・高周波数分解能 光シンセサイザ位相安定度

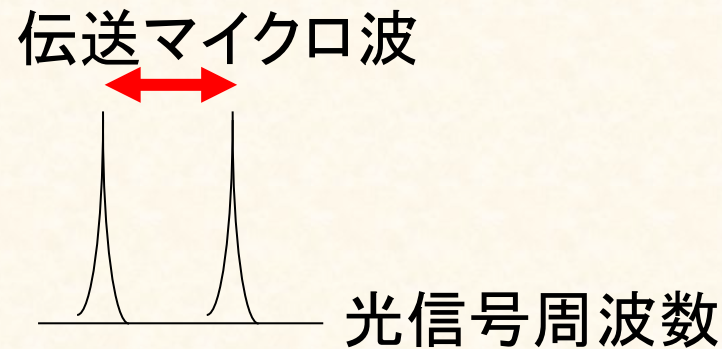


## Microwave-Photonics信号発生／新技術 特徴

- ・共通レーザ光を光源とし、基準信号に位相同期した周波数可変高周波数分解能マイクロ波信号で駆動されるMZM光変調器と基準信号に位相同期した周波数固定マイクロ波信号で駆動される光コム発生器のそれぞれの光信号の1波を抽出し合成する構造
  - ・低周波からテラヘルツ領域までの広い周波数領域をシームレスにカバーし、任意周波数信号を高い周波数分解能で発生可能なシンセサイザ。
  - ・高周波数分解能をMZM光変調器で実現、周波数ダイナミックレンジを光コム発生器で実現する構造を持つ
  - ・位相同期ループを用いないので位相同期外れがない。
  - ・低周波からテラヘルツまでの広範囲にわたり2mHz程度の周波数分解能が得られる（1mHz分解能シンセサイザ使用時）
  - ・電気信号のような逡倍技術を用いないのでスプリアスが少ない
- などである。

## Microwave-Photonics信号伝送技術

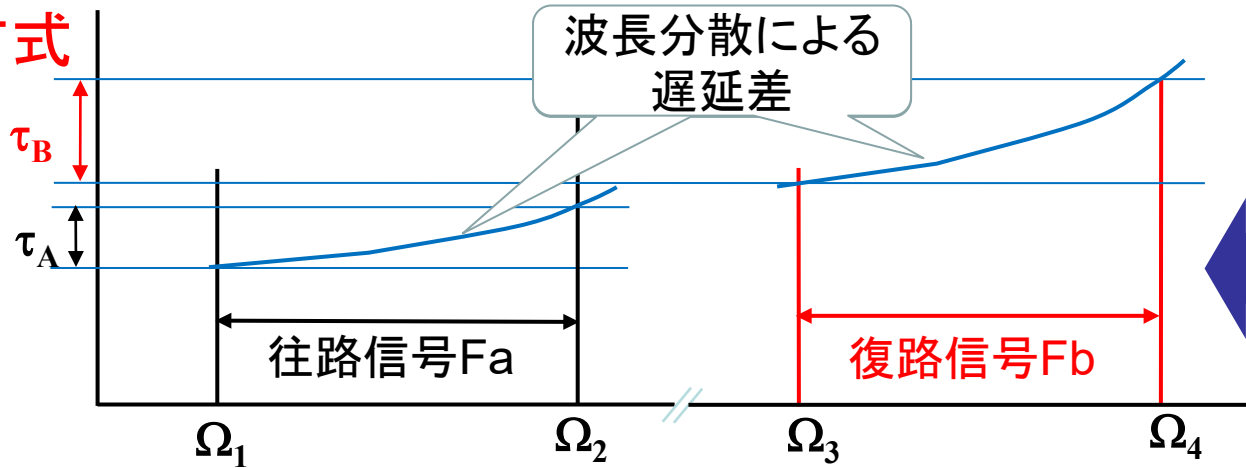
### フォトニックマイクロ波信号の 長距離伝送における位相補償



マイクロ波信号は、2光波の差として伝送される  
低周波から高周波(~THz)の長距離伝送を可能とするシステム

# Microwave-Photonics信号伝送／従来技術との比較

従来方式



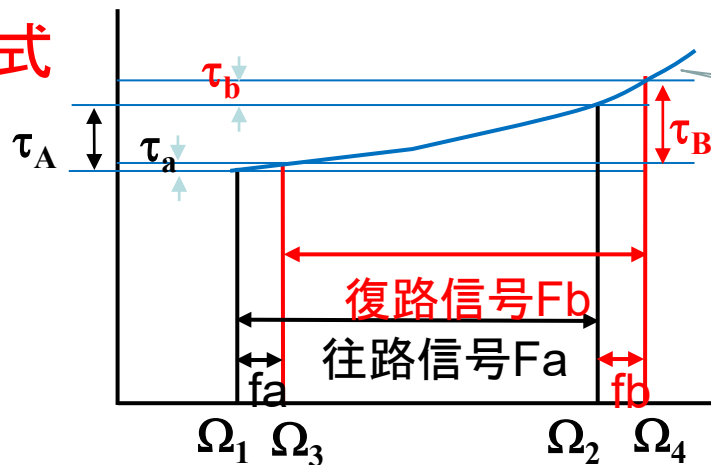
往路と復路の光周波数を変えている

往路と復路信号、  
後方散乱波の分離が容易

波長分散の影響を除けない。  
100 GHz, 400-km 伝送で  
波長分散  $\leq 5760$  ps。



新方式

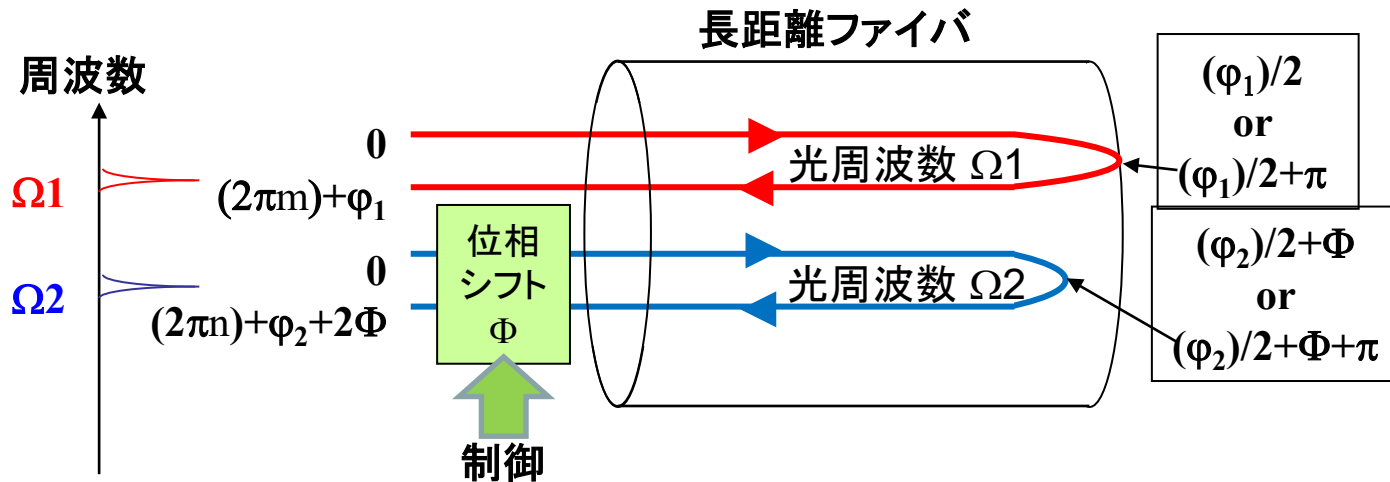


往路と復路の光周波数は一致

$$(\Omega_4 - \Omega_3) - (\Omega_2 - \Omega_1) = (\Omega_4 - \Omega_2) - (\Omega_3 - \Omega_1)$$

$$Fb - Fa = fb - fa$$

# Microwave-Photonics 信号伝送技術 / 新技術



波長分散の影響で波長により見かけのケーブル長が変わる。  
ラウンドトリップにより伝送信号位相を補償。

伝送先:  $\Omega_1$ :  $(\phi_1/2)$ :  $m$  が偶数の場合 or  $[(\phi_1/2) + \pi]$ :  $m$  が奇数の場合,  
 $\Omega_2$ :  $[(\phi_2/2) + \Phi]$ :  $n$  が偶数の場合 or  $[(\phi_2/2) + \pi + \Phi]$ :  $n$  が奇数の場合.

Photo-mixer 出力:  $(\phi_1/2) - [(\phi_2/2) + \Phi]$  or  $(\phi_1/2) - [(\phi_2/2) + \Phi] + \pi$

ラウンドトリップ信号位相を同じになるように送信点で制御すると;

$$\phi_1 = \phi_2 + 2\Phi$$

これは可変位相器  $\Phi$  を制御することで行える。

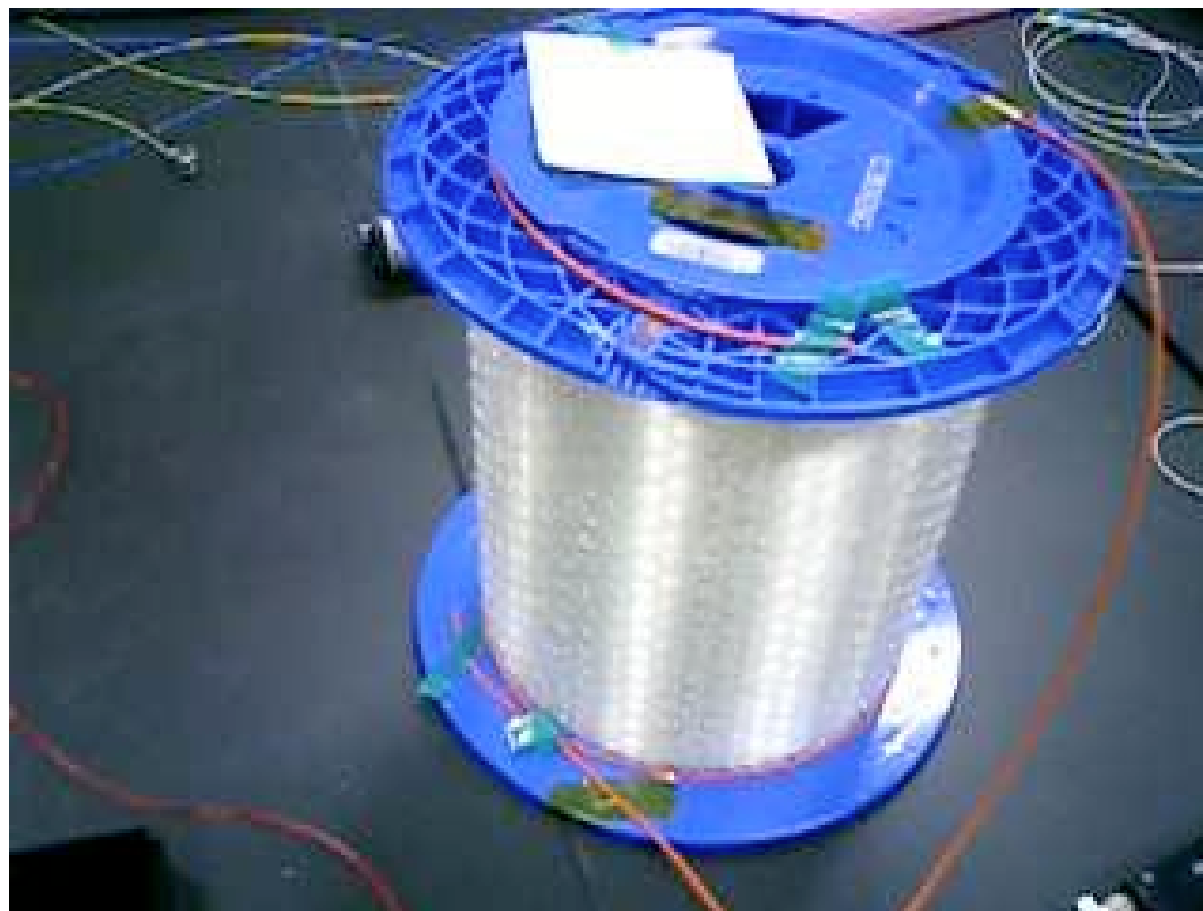
この時 Photo-mixer 出力は  $0$  or  $\pi$ .

これで伝送位相を固定することができ、伝送信号位相補償を行える。

## Microwave-Photonics信号伝送技術

10km ファイバを用いた100GHz 信号伝送実験

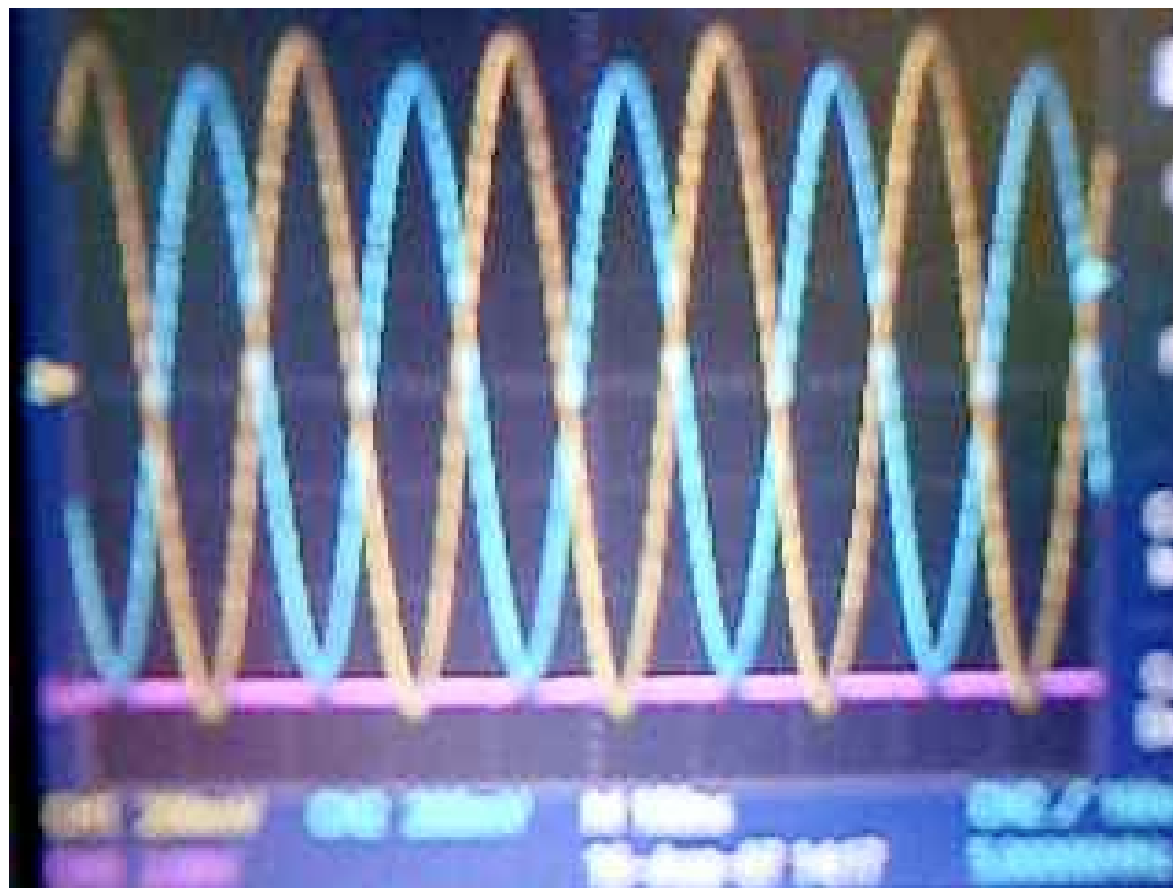
圧力を加える



指でファイバに圧力を掛け、外乱による  
波長分散効果を発生させる。

## Microwave-Photonics 信号伝送技術

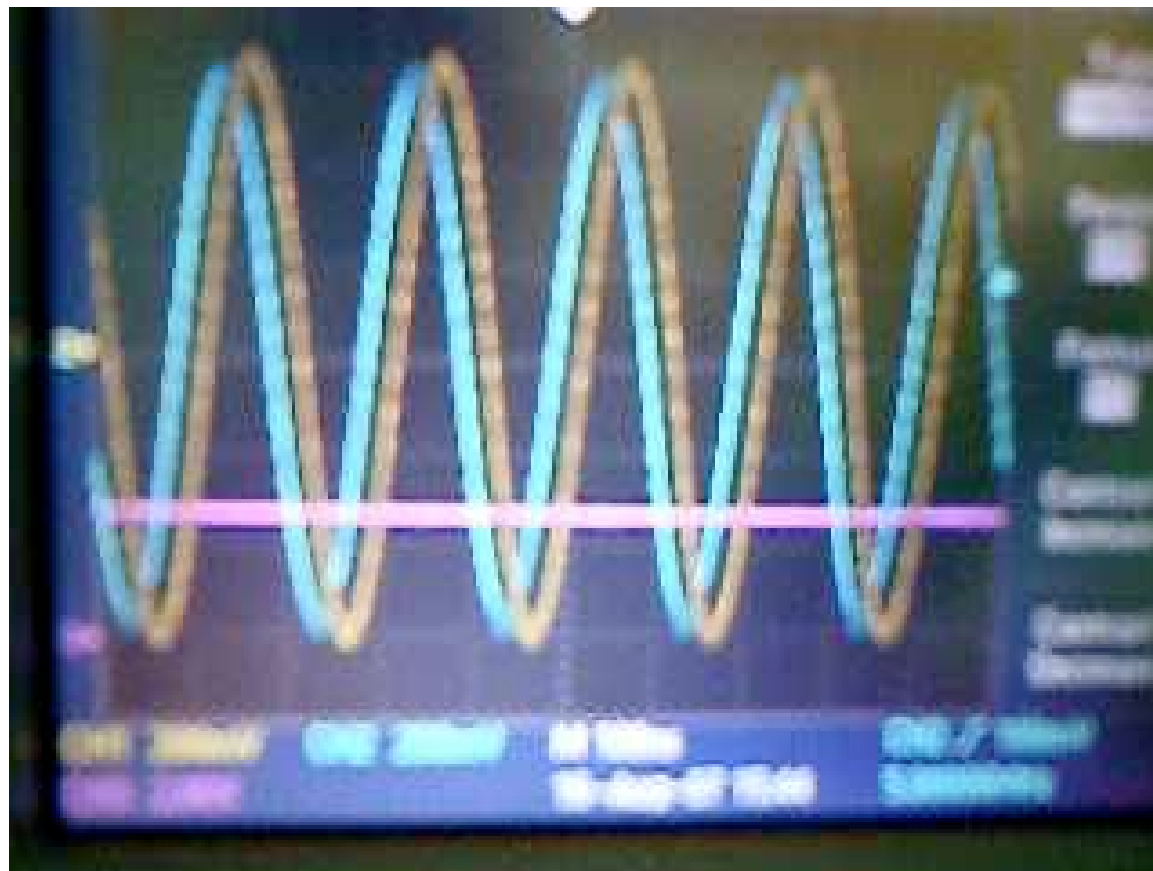
10km ファイバを用いた100GHz 信号伝送  
位相補償無し



青: 伝送前の信号,  
黄: 10km 伝送後の信号  
ピンク: 位相シフタ制御電圧

## Microwave-Photonics信号伝送技術

10km ファイバを用いた100GHz 信号伝送  
位相補償有り

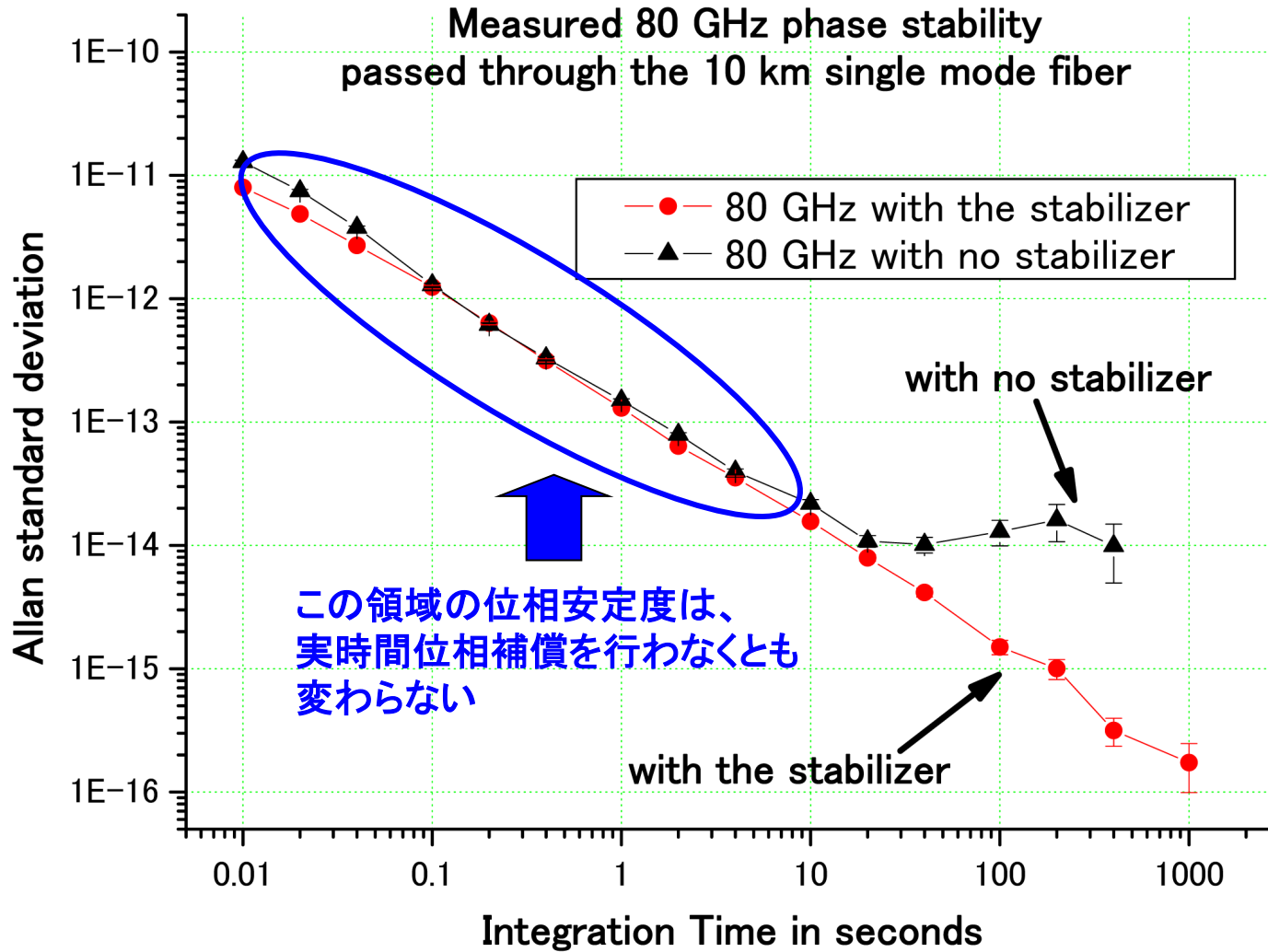


青: 伝送前の信号,  
黄: 10km 伝送後の信号  
ピンク: 位相シフタ制御電圧



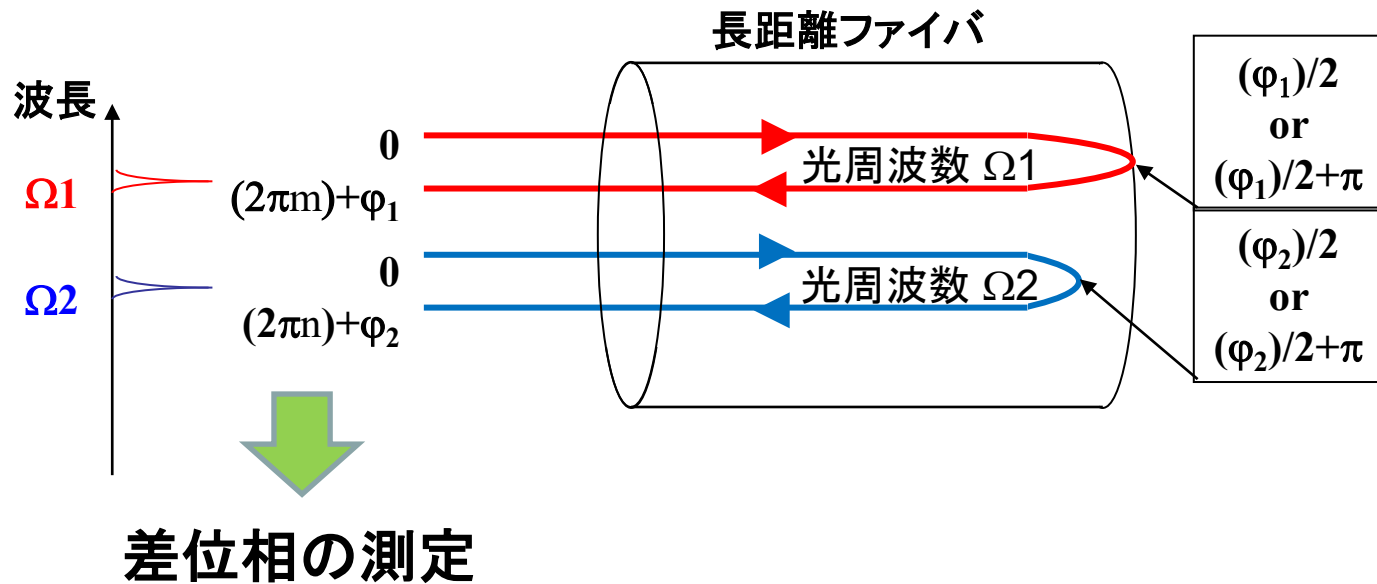
# Microwave-Photonics 信号伝送技術

## オフライン位相相補償の可能性



# Microwave-Photonics 信号伝送技術

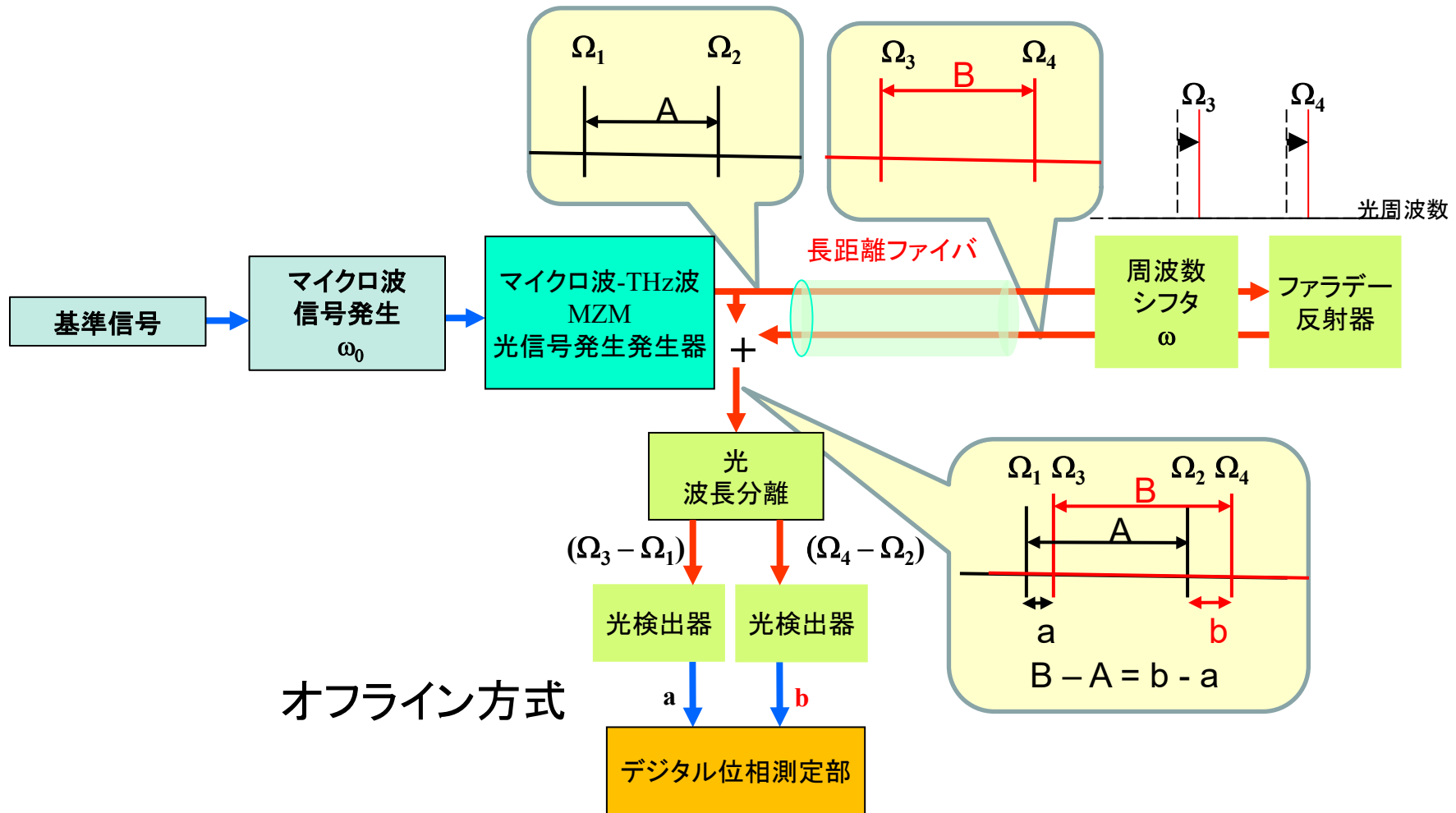
## オフライン伝送位相補償法



位相補償ダイナミックレンジ、対応可能周波数範囲に制限は無い。

周波数が高くなると $\Omega_1$ と $\Omega_2$ の間隔が広がるが、Round-trip測定は $\Omega_1$ と $\Omega_2$ で独立に行われるので同一装置で対応可能。  
使用可能な上限周波数の制限は理論上は無い。

# Microwave-Photonics 信号伝送技術



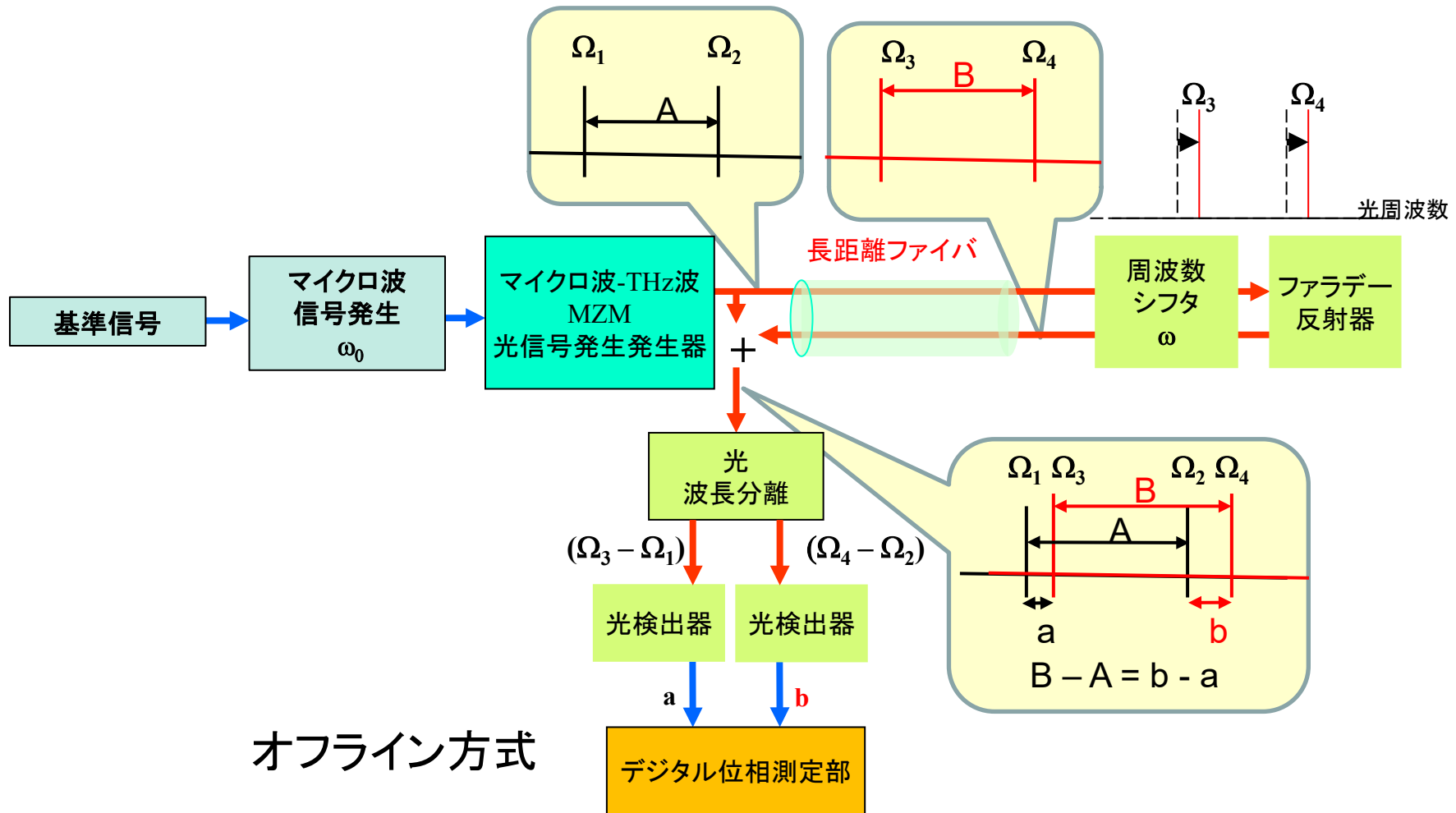
$A$  and  $B$ : 伝送周波数に依存

$a$  and  $b$ : 伝送周波数に依存しない (周波数シフタの2倍の周波数)

→ 本方式は伝送周波数に関係なく対応できる。THz周波数にも対応可

→ 低周波・高感度の光検出器2個で実現可能

# Microwave-Photonics 信号伝送技術

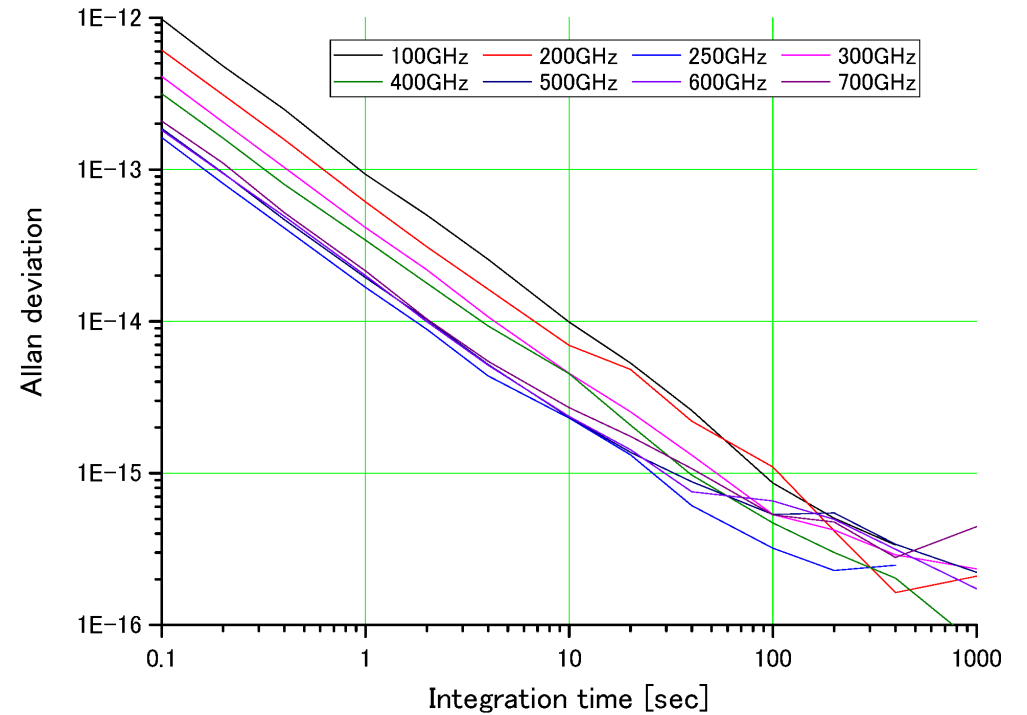
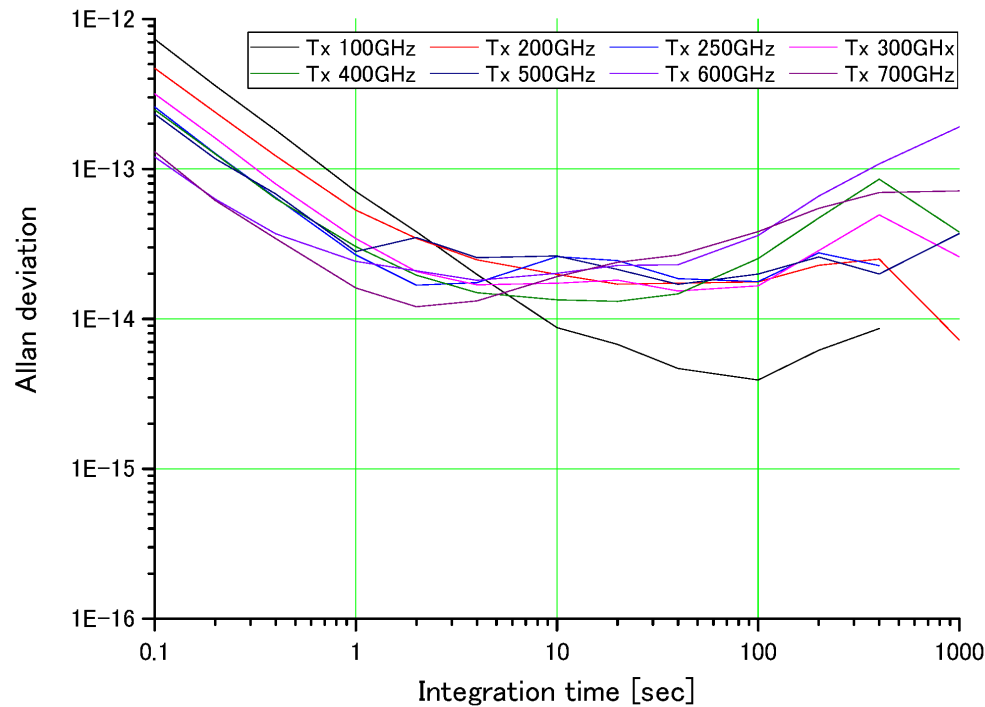


周波数シフタを基準局側に移動しても同様の効果が得られるか？

→ ファラデー反射器のみでは後方散乱波の影響を除くのが難しいため長距離ファイバには応用できないため同様の効果は得られない。

# Microwave-Photonics 信号伝送技術

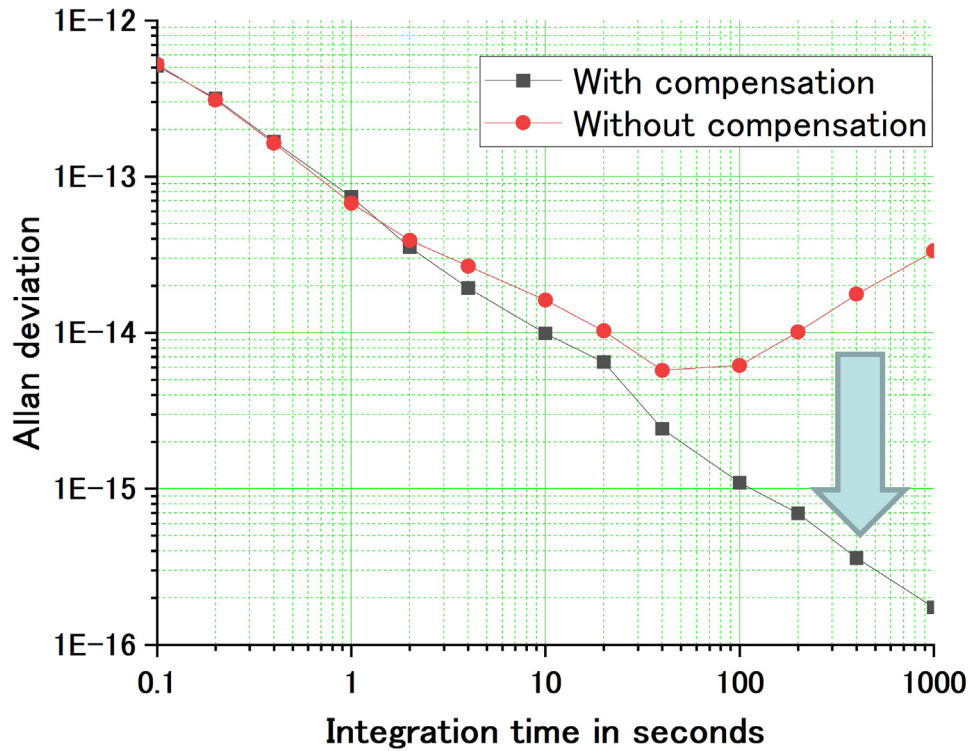
100GHz~700GHz 10km伝送 オフライン方式



Round-trip 伝送路補償前(左)後(右)

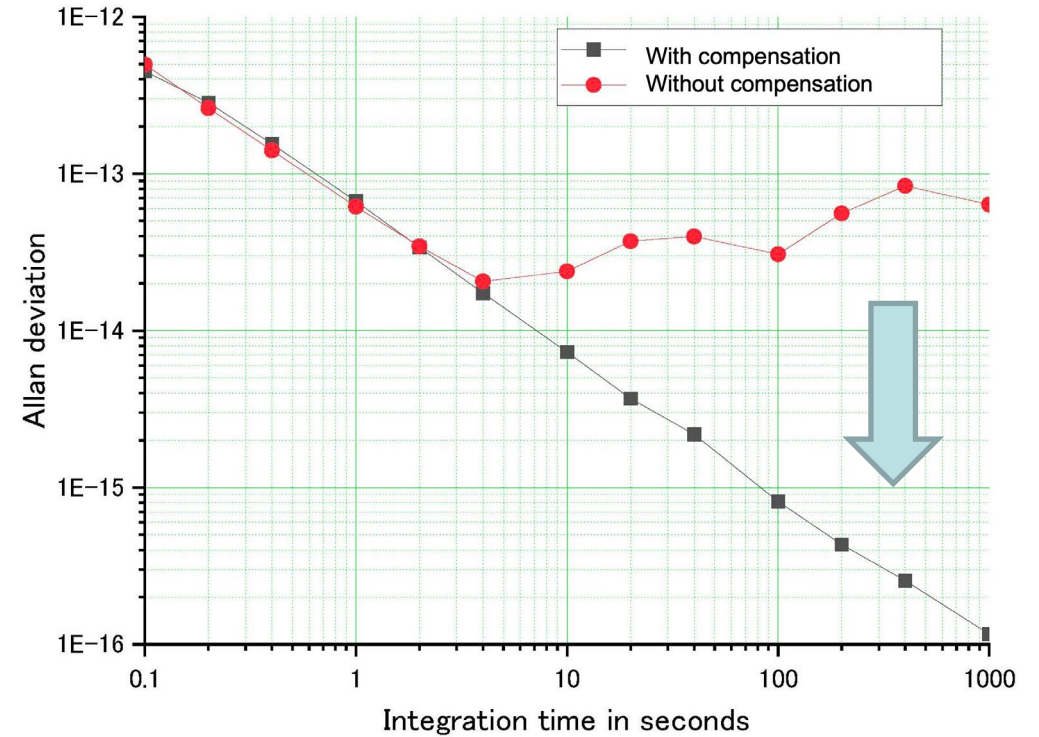
オフライン方式

# Microwave-Photonics信号伝送技術



100GHz 250km伝送 双方向EDFA使用

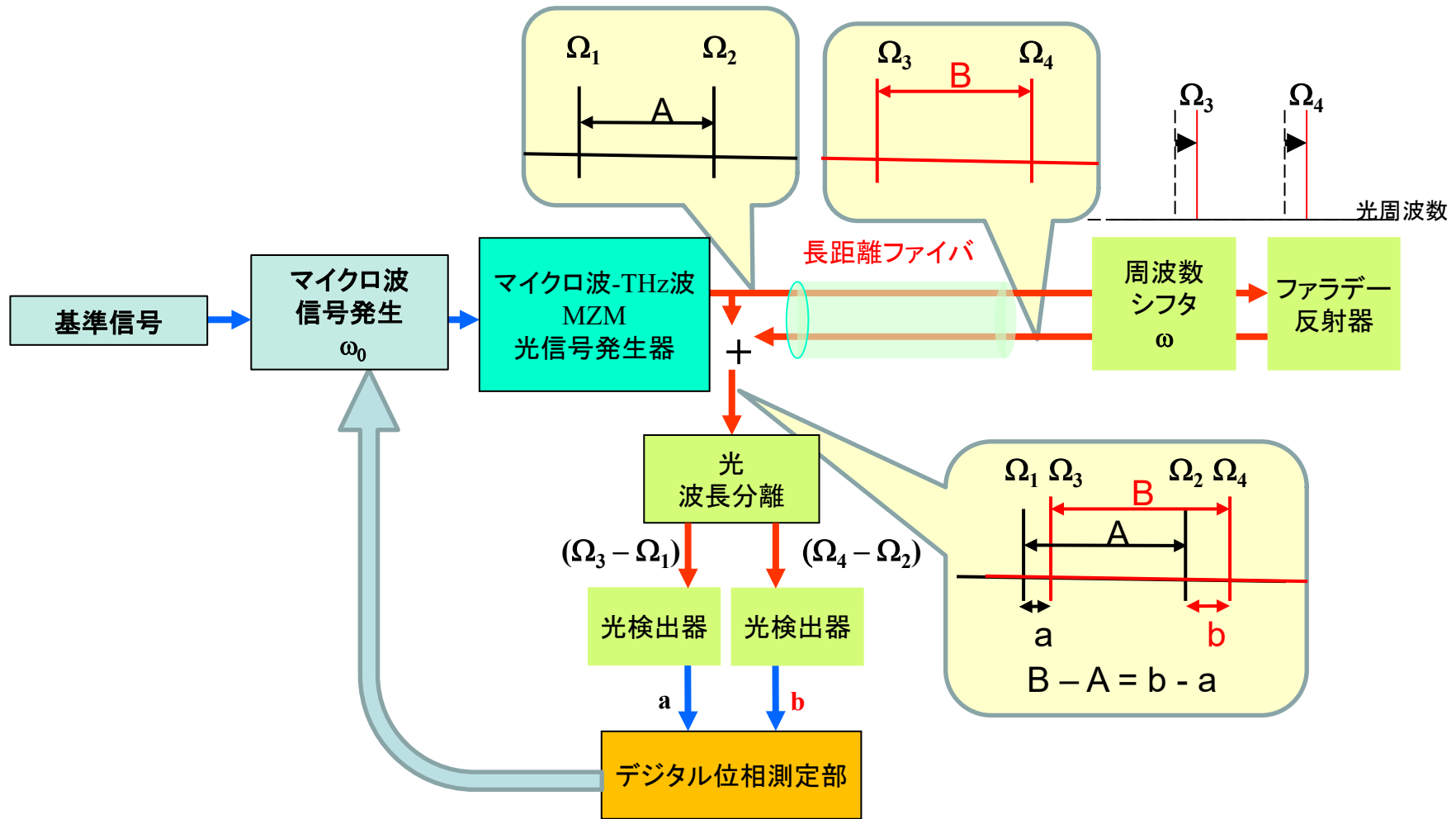
オフライン方式



100GHz 100km伝送 双方向EDFA不使用

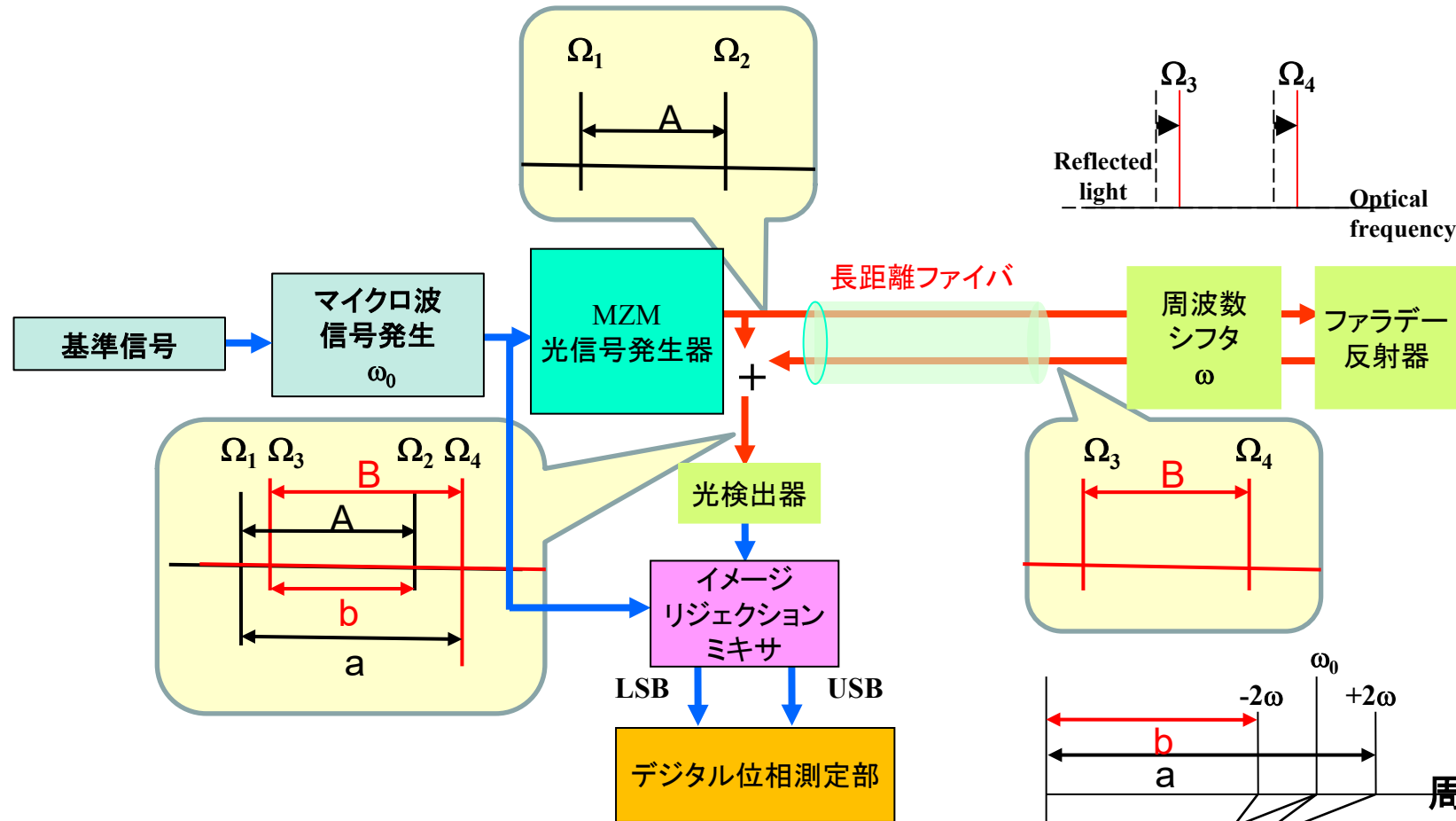
オフライン方式

# Microwave-Photonics信号伝送技術／リアルタイム制御

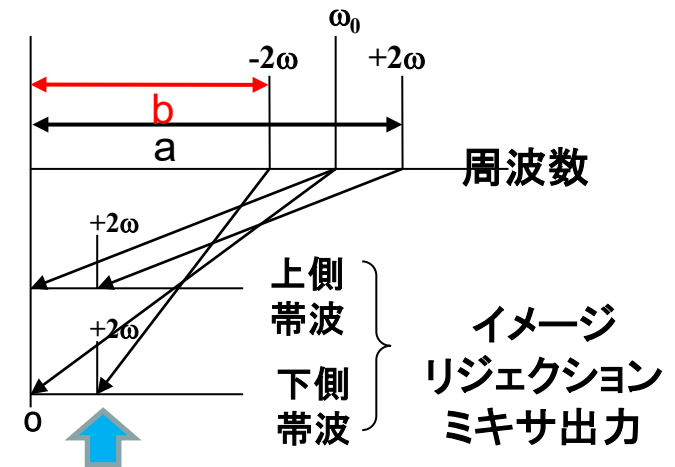


リアルタイム制御方式

# Microwave-Photonics 信号伝送技術 / 低周波用 (補足)



上側帯波 =  $2\omega t + \phi_4$   
 下側帯波 =  $-(-2\omega t - \phi_3)$





## 想定される用途

### Microwave-Photonics信号発生技術／光シンセサイザ

- 測定器への応用

MHz ~ THz 以上の周波数帯域をシームレスにカバー

### Microwave-Photonics信号伝送技術

- 次世代大型・高周波電波干渉計
- 次世代高速通信 (Beyond 5G) の基地局同期
- 広域コヒーレント系が必要な高精度測定システム

## 企業への期待

- 測定器応用をお考えの企業との共同研究を希望
- 光集積化の技術を持つ企業との共同研究を希望
- 次世代高速通信 (Beyond 5G)分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

## 本技術に関する参考文献

- [1] H.Kiuchi, “Wide-frequency-range phase-locked Photonic-Microwave oscillator operated in a fiber-coupled remote station,” *J. of Lightwave Technol.*, Vol.37, No.10, pp.2172-2177, 2019.
- [2] H.Kiuchi, “Phase comparison method for wide-frequency-range microwave photonic signals,” *J. of Lightwave Technol.*, Vol.35, No.17, pp.3643-3649, 2017.
- [3] H.Kiuchi, “Postprocessing phase stabilizer for wide frequency range photonic-microwave signal distribution,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. and Technol.*, Vol.7, No.2, pp.177-183, 2017.
- [4] H.Kiuchi, T.Kawanishi, A.Kanno, “A wide frequency range optical synthesizer with high-frequency resolution,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 29, No. 1, pp.78-81. 2017.
- [5] H.Kiuchi, “Optical transmission signal phase compensation method using an image rejection mixer,” *IEEE Photonics Journal*, Vol.3, No.1, pp.89-99, 2011.
- [6] H.Kiuchi, “Highly stable millimeter-wave signal distribution with an optical round-trip phase stabilizer”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.56, No.6, pp.1493-1500, 2008.
- [7] H.Kiuchi, T.Kawanishi, M.Yamada, T.Sakamoto, M.Tsuchiya, J.Amagai, M.Izutsu, “High extinction ratio Mach-Zehnder modulator applied to a highly stable optical signal generator”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.55, No.9, pp.1964-1972, 2007.

## 本技術に関する知的財産権

- ・ H.Kiuchi, “Optical synthesizer,” US-PAT : US9935717
  - ・ 木内等、光伝送システム及び光伝送方法 特許第5291143号
  - ・ H.Kiuchi, “Optical transmission system and Optical transmission method,” , US-PAT : US8582977
  - ・ 木内等、光信号の周波数差を比較する方法ならびに光信号の位相を同期させる方法および装置 特許第6130527号
  - ・ 木内等、低周波信号光伝送システム及び低周波信号光伝送方法 特許第4801194号
  - ・ H.Kiuchi, “Low-frequency signal optical transmission system and low-frequency signal optical transmission method,” US-PAT : US8145065
  - ・ 木内等、高周波信号光伝送システム及び高周波信号光伝送方法 特許第4849683号
  - ・ H.Kiuchi, “High-frequency signal optical transmission system and high-frequency signal optical transmission method,” US-PAT : US7974541
- 
- 出願人: 自然科学研究機構 (National Institutes of Natural Sciences )
  - 発明者: 木内 等 (Hitoshi Kiuchi)

# お問い合わせ先

**自然科学研究機構事務局研究協力課**

**TEL 03-5425-1316**

**FAX 03-5425-2049**

**e-mail [nins-sangaku@nins.jp](mailto:nins-sangaku@nins.jp)**