

光自由空間周波数比較に向けた Liner Optical Sampling ～ 光の相互相関によるタイミング計測 ～

関戸 衛, 蜂須英和, 上月雄人

NICT 時空標準研究室

1 はじめに

周波数標準器の開発の分野においては、2005 年ころより光の放射を使った周波数標準が Cs 原子のマイクロ波放射の不確かさを凌駕し (図 1 左)、SI 単位系の '1 秒' の定義を現在の Cs のマイクロ波放射から、光の周波数標準器へ移行することが検討されている。これには、光コムと言われる安定な短パルスレーザの開発 (2005 年ノーベル賞) と、光の周波数とマイクロ波の周波数をコヒーレントにつなぐ技術の進展が大きく貢献している。

マイクロ波 (10^{10} Hz オーダ) を使った周波数比較では、 10^{-18} 台以下の不確かさの周波数を現実的な測定時間で比較することは困難であると考えられる。SI 単位系の '1 秒' の定義が不確かさの小さな光周波数標準に移行した場合、国際的な周波数比較も光を使った周波数比較技術が必要となる。この場合、光ファイバーで接続された欧州など大陸内を除くと、自由空間の光送受信による周波数伝送技術が必須となると考えられる。米国 NIST をはじめ海外の計量標準機関では光信号を使った遠隔周波数比較の研究が進められており、NIST では 28km の距離において 100 秒で 10^{-18} 台の周波数伝送を実現し [2]、中国では 113km の距離で 10^{-17} @100s, 10^{-19} @10,000s の周波数伝送を発表している [3]。海に囲まれた日本では、衛星経由の光周波数リンクがなければ光周波数標準の技術を海外と接続することができなくなる。そこで、NICT でも自由空間光リンクの研究開発を開始している。

2 Linear Optical Sampling: 線形光学サンプリング

光コムの技術を使って、高速な周期現象を時間分解能を上げて測定する技術に Linear Optical Sam-

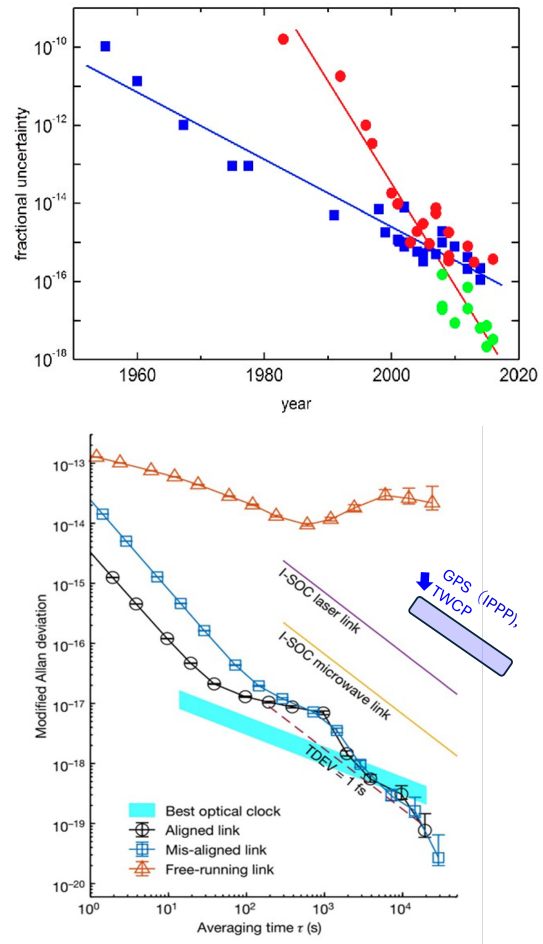


図 1 (上図) 周波数標準器の周波数不確かさの変遷 [1]。(下図)Shen らによる 113km 離れた双方自由空間光リンクの時間安定度 [3]。

pling (LOS) がある [4]。これは、光コムの信号を使って周期的な光の信号に対して周波数変換 + サンプリングを行うものである。この原理を図 2 に示している。測定対象の光信号の電界を $d(t)$ 、サンプリング光の電界を $s(t)$ とし、 j を虚数単位として以下

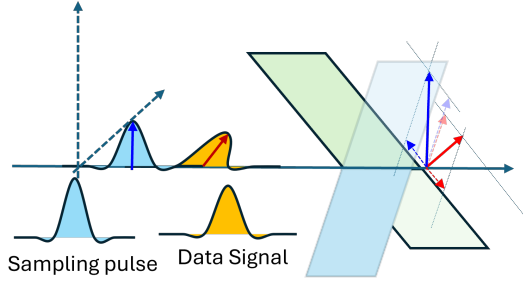


図2 LOSの測定原理。データ光、サンプリング光それぞれの光パルスを直行した偏波で入力し、45度傾いた偏波面で光検出する。2種類の光が同時に入れば、そのビート信号が光検出器の出力から出力される。もう一つの45度傾いた偏波面の検出器からは、2種類の光の電界強度の積が逆符号となる項が得られ、これら二つの光検出器の差分を出力する Balanced Photo Detector を使うと、バックグラウンド光の影響が相殺され、電界強度の積の項だけが得られる。こうして2つの光の電界の位相差と電界振幅の情報が得られる。

のようにあらわす。

$$\begin{aligned} d(t) &= E_d \exp j(\omega_d t + \theta_d) \\ s(t) &= E_s \exp j(\omega_s t + \theta_s) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、データ信号、サンプリング光それぞれの電界の角周波数を ω_d, ω_s 、初期位相を θ_d, θ_s としている。それぞれの光は直線偏光しているものとして、それぞれの偏波を直交させて重ね合わせ、45度傾いた面内の直線偏光成分を検波する。検波電力は、電界の複素共役をかけ合わせることに相当し、その出力電流は以下の式であらわされる。

$$P1^+ = B_S + B_D + 2\text{Re} \left[\int d(t) \cdot s^*(t - \tau) dt \right] \quad (2)$$

B_S, B_D はそれぞれサンプリング光、データ光の検波電流である。逆方向に45度傾いた面 (P^+ の検出面と直交した面) で検波電流は

$$P1^- = B_S + B_D - 2\text{Re} \left[\int dt \cdot s^*(t - \tau) dt \right] \quad (3)$$

となる。このような2つの検波電流の差分だけを出力する Balanced Photo Detector(BPD) の出力信号は、光の速い電界変動を以下のように積分した電

気信号として得られる。

$$\begin{aligned} P_I &= P1^+ - P1^- \\ &= 4E_d E_s \int \cos(\Delta\omega t + \omega_s \tau + \Delta\theta) dt \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\Delta\omega = \omega_d - \omega_s, \Delta\theta = \theta_d - \theta_s$ であり、の周波数差 $\Delta\omega$ は十分小さく、検出器の時定数程度の時間積分されて、2つの光の電界強度と2つの光の位相差に依存した出力となる。

もう一系統でサンプリング光の位相を $\pi/2$ 遅らせた信号を使って同様の信号処理を行うと

$$P_Q = 4E_d E_s \int \sin[\Delta\omega t + \omega_s \tau + \Delta\theta] dt \quad (5)$$

式(4)(5)により直交したIQ成分が得られ、光のヘテロダイン検波信号が低周波信号として得られる。

データパルスとサンプリングパルスの周期がわずかにずれていると、図3に示すように、二つのパルスのビート周期まで拡大されて観測される。

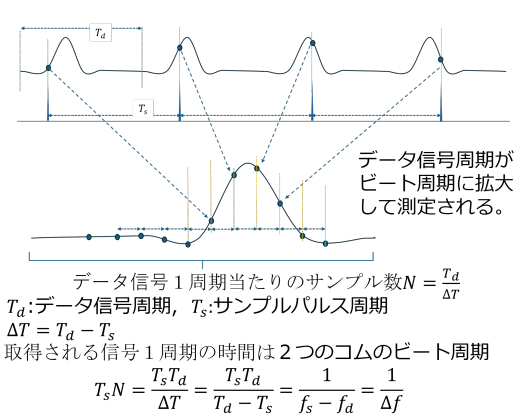


図3 LOSのサンプリングにより高速現象を時間拡大して観測できるしくみの説明。光パルスの波形は、二つの光パルスの周波数差（ビート周波数）の逆数に時間拡大されて観測される。

3 実験

実験に使用した装置の諸元を表1に示す。データ光に使用した光コムはフリーランの状態のため、100MHz から約 100Hz パルスの周波数がずれており、二つの光コムのパルスは1秒間に約100回程度重なり合う機会が生じる。

図4に今回使用したLOSの光学系のセットアップの写真及び、オシロスコープ(2.5Gsps, 10bit)

表 1 LOS サンプルング実験に使用した装置の諸元

データ信号	光コム (Free Run), パルス 周期: 約 100MHz
Sampling 信号	光コム (Hmaser Lock), パ ルス周期: 100MHz
差動光検出器	PDB460C, $\Lambda = 800 -$ 1700nm, 100 Hz-200 MHz
AD サンプラ	VSSP32 (8bit/4Msps or 8Msps)

で観測された I,Q 信号 (式 (4),(5) に対応する) を示す。

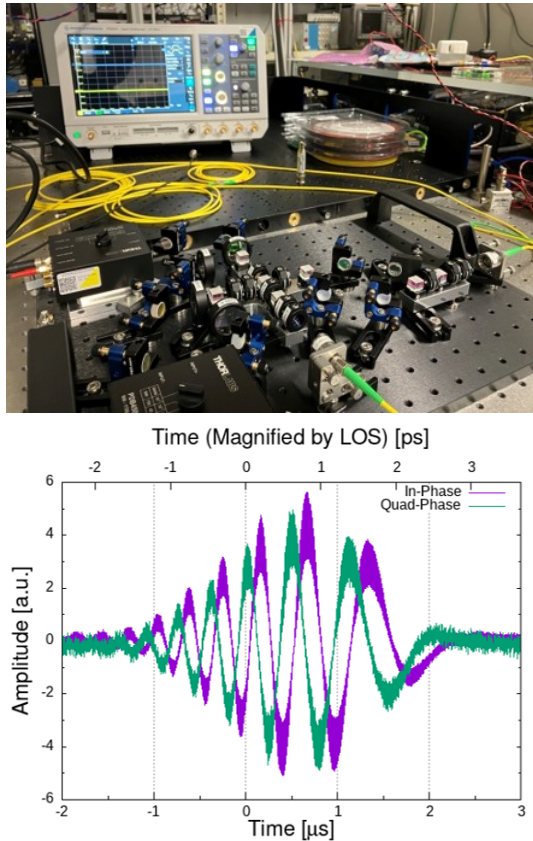


図 4 (上図) 光学定盤の上に組まれた LOS の光検出系。(下図) オシロスコープ (2.5Gsps-10bit) で測定した二つの光コムパルスを使った LOS の信号

今回データの取得には、VLBI 観測で使用してきた VSSP32 を使用し、4Msps-8bit または 8Msps-

8bit でデータを取得した。このサンブラによって得られた LOS のパルス波形の I,Q,Amplitude を図 5 に示す。高い周波数 (8Msps) でサンプルングしたほうがパルス内の位相差をより多く検出できているものの、オシロスコープの結果と比べてサンプルング周波数が不足していると見られる。本来は、レプリカを作り、信号波形との相関処理によりタイミングを決めるべきであるが、今回は、波形振幅の最大値の位置をパルスのタイミングとして記録を行った。何度か行った実験で得られたビート周波数、アラン分散を図 6 に示す。アラン分散の表示では、LOS により拡大されたファクタ (約 $120/100\text{MHz} = \text{約 } 1.2 \times 10^{-6}$) を掛けて計算している。1 秒より長いインターバルでは、フリーランの光コムの特性が表れてアラン分散が大きくなっている。アラン分散のプロットでは 8Msps, 4Msps に大きな差は見られていないのは、LOS の波形が $1\mu\text{s}$ 程度の幅を持つならかな形であるため、Amplitude の Peak 位置でパルスタイミングを取得するやり方では、精度向上に限界があり、レプリカとのテンプレートマッチングなどを考える必要がある。

今回の LOS により測定したパルス周期の短期安定度は、目標としている精度には及ばないものであり、信号検出の粗さ (サンプルング周波数、量子化ビット数) で制限されていると考えられる。また、波形をレプリカと相関をとることで、今後タイミング精度の向上を目指す。

4 まとめ

- 双方向光自由空間リンクによる精密周波数伝送の研究開発を目指し、Linear Optical Sampling による光パルスのタイミング計測実験を行った。
- 二つの光コムの信号をデータ信号、サンプルング信号に見立てて測定系を組み、LOS のアナログ信号出力までは、ほぼ期待通りの信号を得ることができた。
- A/D 変換には VSSP32 サンプラ (8bit/4Msps, or 8Msps) を使ったデータ取得を行いタイミングの測定は実施できたものの、まだ数桁の精度

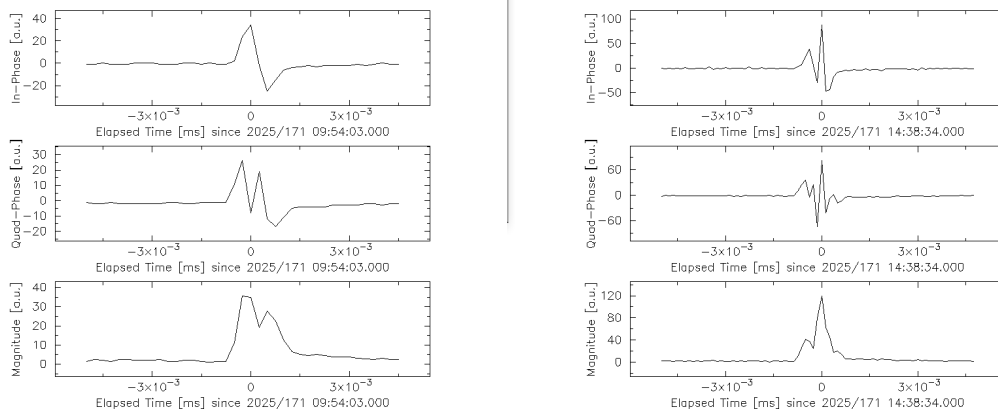


図 5 VSSP32 でサンプリングした LOS 波形 (上から I,Q,Amplitude)), 左図 (4Msps-8bit), 右図 (8Msps-8bit) を比較すると高い周波数のサンプリングのほうが信号の位相差のより詳細な振動をとらえていることが分かる。

改善が必要である。

- 今後データ取得方法等を改善して精度を上げるとともに、将来は LOS の発展型であるプログラマブルコムによるパルス検出に向けて、開発を進めていく予定である。

参考文献

- [1] F. Riehle, P. Gill, F. Arias, & L. Robertson, (2018) “The CIPM list of recommended frequency standards values: guidelines and procedures”, Metrologia, pp.188-200. doi:10.1088/1681-7575/aaa302
- [2] J. L. Ellis, et al. (2021) “Scaling up Frequency-Comb-Based Optical Time Transfer to Long Terrestrial Distances”, Phys. Rev. App. **15**034002, doi:10.1103/PhysRevApplied.15.034002
- [3] Q. Shen, et al. (2022) “Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km”, Nature, doi:10.1038/s41586-022-05228-5
- [4] Dorrer. C., et al., (2003) “Linear Optical Sampling”, IEEE Phot.Tech.Lett., 15,12,pp.1746-1748.

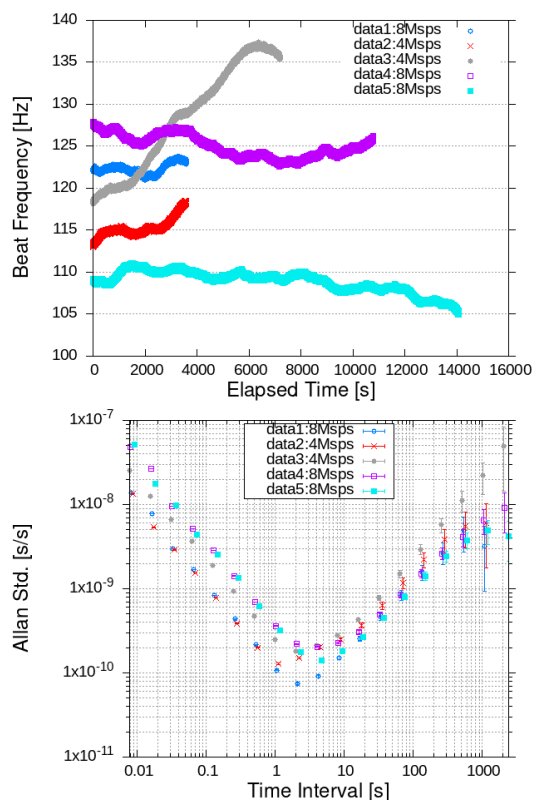


図 6 フリーランの光コムの信号を LOS で取得した実験 (4Msps,8Msps) のビート周波数の時系列プロット (上図)、及びアラン分散 (下図)