

2-4 超高安定冷却サファイア発振器とその周波数コンバータ

2-4 *Ultra-Stable Cryogenically Cooled Sapphire-Dielectric Resonator Oscillator and Associated Synthesis Chain for Frequency Dissemination*

Clayton R. Locke 熊谷基弘 伊東宏之 長野重夫 John G. Hartnett
Giorgio Santarelli 細川瑞彦

Clayton R. Locke, KUMAGAI Motohiro, ITO Hiroyuki, NAGANO Shigeo,
John G. Hartnett, Giorgio Santarelli, and HOSOKAWA Mizuhiko

要旨

2007年からNICTでは冷却サファイア発振器(CSO)を維持運用している。このCSOは西オーストラリア大学で開発されたものである。超高安定な周波数標準器の構造と性能について述べたあと、その周波数安定度を損なわずに周波数を変化できる周波数コンバータの構造と性能を詳解する。

A cryogenic sapphire oscillator (CSO) first constructed at the University of Western Australia has been in operation at NICT since 2007. We firstly describe the construction techniques and development of this high performance secondary frequency standard. Secondly, we describe the synthesis chains that change the 11.2 GHz output of the CSO to the wanted frequencies (1 GHz and 9.2 GHz) without drastic degradation of the frequency stability.

[キーワード]

冷却サファイア発振器, 二次周波数標準器, 周波数コンバータ, 周波数分配
Cryogenic sapphire oscillator, Secondary frequency standard, Frequency converter,
Frequency dissemination

1 はじめに

近年、周波数標準器の性能は日々向上しており、周波数標準器の局部発振器(Local Oscillator)として使う水素レーザーや水晶発振器などの性能が周波数標準器自身の性能を制限してしまっている事がしばしば起きている。現に、NICTのセシウム一次周波数標準器 NICT-CsF1 の周波数安定度は水素レーザーによって制限されており[1]、光周波数コムとの繰り返し周波数を水素レーザーで安定化した時、その測定精度は水素レーザーの性能によって制限されている[2]。この問題を解決するために、NICTでは水素レーザーよりも100倍短期安定度が良い冷却サファイア発振器(Cryogenic Sapphire Oscillator: CSO)を導入し

た。このCSOは西オーストラリア大学(University of Western Australia: UWA)で開発された。CSOの開発はモスクワ州立大学のBraginskyらの初期の実験をベースにしており[3]、その後西オーストラリア大学によって他の標準器をはるかに凌ぐ短期安定度を持つCSOが開発された[4]。初代のCSOの安定度は平均化時間10-300秒で 10^{14} 程度であった[5]。90年代中頃になるとCSOに影響を及ぼすノイズに関して深い洞察が進み、安定度を一桁近く向上させることに成功した[6]。CSOの周波数安定度は、HEMEX法によって作られた高純度サファイア結晶[7]、低雑音マイクロ波コンポーネント、極低温で使用可能な部品、など周辺を支える技術の発展と共に向上したといっても過言ではない。これら最新の技術を

取り入れたCSOは世界で初めて平均化時間10-100秒で 10^{-15} 乗以下の周波数安定度を実現した。

2000年UWAのCSOはパリ天文台のレーザー冷却原子泉型周波数標準器に源振に用いられ、原子泉型標準器におけるquantum projection noiseの観測に貢献した[8]。また2003年には、UWAとパリ天文台が共同でCSOの周波数と水素レーザーの周波数を比較し、ローレンツ不変性の検証が行われた[9]。また別のCSOは欧州宇宙機関CNESにも導入され、宇宙時計プロジェクト“PHARAO”の地上検証モデルにも使用されている[10]。その他にも2005年UWAでは2台のCSOを用いてマイケルソンモーレー干渉計を構築し、ローレンツ不変性の検証が行われた。2004年から2006年の間に、更に4台のCSOが開発され、周波数安定度は平均化時間20秒で 5×10^{-16} 、キャリア周波数10GHzの位相ノイズはフーリエ周波数1Hzで -85 dBc/Hzを実現している。長期的にも安定に動作する事が確認されている[11]。

過去15年間において、CSOのランニングコストを下げるため、動作温度を液体窒素まで上げる試みが何度か行われた[12]-[16]。サファイア結晶に含まれる不純物の割合を増やすことで、共振周波数の温度依存性が鈍感になる温度を液体窒素温度レベルまで上げる事はできるが、逆にサファイア共振器に閉じ込める電磁波に対しては損失を増やす結果となり、結局液体ヘリウム温度のCSO共振器の性能に肩を並べる事はなかった。最近の研究では、超低膨張共振器に安定化されたレーザーと周波数コムを組み合わせ発生させたマイクロ波の安定度はCSOの安定度と肩を並べ始めている[17]。オールファイバベースで11.5GHzの信号を発生させた際の光-マイクロ波の変換安定度は平均化時間1秒で 2.3×10^{-16} であり、2つの独立した光源から発生させたマイクロ波の周波数安定度は平均化時間1秒で 3×10^{-15} にまで達している[18]。超低ノイズのマイクロ波を発生させる研究も報告されている。超高安定レーザーとファイバ周波数コムを組み合わせCSOと同レベルのマイクロ波を発生させている[18]。

本稿では、超高安定な発振器CSOの構造と仕組み、その性能について述べる。この高安定な信

号源を様々な実験で利用するには、安定度を落とさず周波数を変える周波数コンバータが必要である[19][20]。信号分配のための1GHzダウンコンバータ[21][22]と、原子泉型一次周波数標準器NICT-CsF1用の9.2GHzアップコンバータについても詳解する。

2 冷却サファイア共振器の構造

CSOは円筒形のサファイア結晶がベースとなっている。結晶軸方向は円筒の対称軸と一致している。一般的にこのような円筒共振器の固有モードはハイブリッドであり、たくさんの電磁場モードが存在する。しかし、その中の準TMモードと準TEモードの2つのモードだけが高いQ値を実現する。その2つのモードはWhispering Gallery(WG)型のモードであり、Rayleighによって観測された音響モードと似ている[23]。WGモードでは、円筒共振器の縦方向に1つのモード、動形方向に1つのモード、共振器の円周に沿う形に10~12個のモードが存在している。WGモードには共振器の円周に沿って時計回りに進むモードと半時計回りに進むモードがあり、室温ではその2つのモード周波数は同じである。しかし、温度が低くなると対向する2つのモードの周波数に差が生じ始める。これは、円柱軸と結晶軸があってない、円筒形が完全な対称系でない、プローブによる対称性のくずれ、などが原因である。2つのモードの周波数差は数kHzであり、冷却されたサファイア共振器の共振線幅はこれより十分小さいため、この周波数分裂は簡単に観測可能である。通常の運用では、この2つのモードのうちロスが少ない方のモードが使用される。また、一旦片方のモードで発振を始めたなら、もう一方のモードに移るモードホップが起こることはない。

サファイア結晶は銅製共振器で囲まれ外部からの影響、特に表面が汚染される事を防いでいる。銅製共振器内にサファイア結晶をいれることで、サファイア結晶自身のサイズを小さくする事ができコストを下げる事ができる。結晶を内部に実装するタイプの共振器の欠点の1つは、共振器の大きさに依存して多くの共振モードがたち、サファイア結晶自身の共振モードと相互作用をしてしまう事である[24][25]。この問題を解決するために、

銅製共振器のエンドキャップの表面にスロット状の切れ込みをいれ、余計なモードが立ちにくい工夫をしている。サファイア結晶を囲んでいる共振器に切れ込みをいれても、サファイア結晶のWGモードのQ値は影響を受けない。なぜなら電磁波のエネルギーはサファイア結晶内に閉じ込められているからである。

もし結晶に欠陥がなく、表面もよごれもなければ、WGモードのQ値はサファイア誘電体のロスタンジェント($\tan \delta$: 誘電率の虚数部と実数部の比)により決まっている。温度 $50 < T < 80$ Kでは、ロスタンジェントは温度の5乗に比例しているが($\tan \delta \propto T^5$)、温度が下がると結晶の不完全さによりこの温度依存性は小さくなり、HEMEX法で結晶化されたサファイアは温度2-12 Kで $\tan \delta \propto T$ の傾向を持つ。このような特性をもつHEMEXサファイア結晶は、液体ヘリウム温度で共鳴周波数10 GHzにおいて 10^9 という高いQ値を実現する。これまで観測された一番高いQ値は温度1.8 Kで 1.8×10^{10} である[26]。

最高級HEMEXサファイアでも常磁性体イオン(Cr^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{3+} , Mo^{3+})を完全に除去することはできない。この常磁性体イオンがQ値に与える影響は少ないが、サファイア結晶を磁化し、共鳴周波数の温度依存性に強く影響する。磁気感受率の変化が引き起こす温度変化による周波数シフトの向きは、サファイア誘電体の誘電率の温度依存性に起因する周波数シフトの向きと逆である。15 K以下ではそのシフトの大きさはほぼ同等となり、CSO共振器の共鳴周波数の温度依存性に極大点を作る。このような現象はHEMEXサファイア結晶の発振周波数が電子スピン共鳴周波数(Mo^{3+} イオンの場合165 GHz)以下の全てのWGモードで起こっている。

図1に直径30 mm、高さ50 mmのサファイア共振器の共鳴周波数の温度依存性を示す。このWGモードの発振周波数は11.9 GHzである。この図からわかるとおり共鳴周波数の温度依存性には極大点が存在している。極大点の存在が、サファイア結晶を超高安定発振器の核に使用する理由の1つでもある。しかし、この極大点がどこに現れるかを予想するのは難しい。それは不純物の種類と量によるからである。その不純物の割合は非常に低いためその割合を制御する事はできな

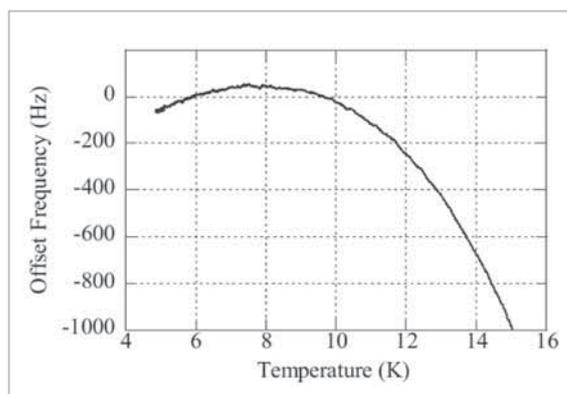


図1 11.9 GHz WGEモードの温度依存性

い。そのため、HEMEXサファイアには当りはずれがあり、いくつかHEMEXサファイアをチェックして適当な温度に極大点があるものを選ばなくてはならない。付け加えて、極大点付近の傾きも重要である。この傾きによって必要な温度制御の精度が決まる。この曲線の傾きは $\kappa = (1/f_0) d^2f/dT^2$ で定義される。 f_0 は共鳴周波数、 d^2f/dT^2 は温度依存性の2次微分。HEMEXサファイア結晶において一番小さいこの2次微分は $\kappa = 10^{-9} \text{K}^{-2}$ である。極大点から1 mK以内の精度で、温度のふらつきを0.1 mK以下まで抑えられれば、 10^{-16} 台の周波数安定度が得られる事になる。この制御は高感度で低ノイズのカーボングラスサーミスタを使えば実現可能である。

図2に冷却サファイア共振器の真空槽部分を示す。サファイア結晶は二重の真空槽(Outer CanとInner Can)によって、液体ヘリウム容器から温度的に切り離されている。CSO共振器の温度は、4線式のカーボングラスのサーミスタとヒーターによって、約10 μK の精度で安定化されている。そのサーミスタとヒーターパッドはCSO共振器を支えている銅製のシャフトに取り付けられている。銅製シャフトは上部のステンレスロッドと接続されている。材質の違う素材を組み合わせることで熱伝導率を下げ、液体ヘリウムの蒸発による急激な温度変化に対して素早く反応しないようしている。Outer CanとInner Canの間にはマイクロ波アイソレーターがいくつか使用されており、SMAケーブル端面での反射による干渉を防いでいる。周波数サーボ用、パワーサーボ用の検出器もInner CanとOuter Canの間に取り付けられて

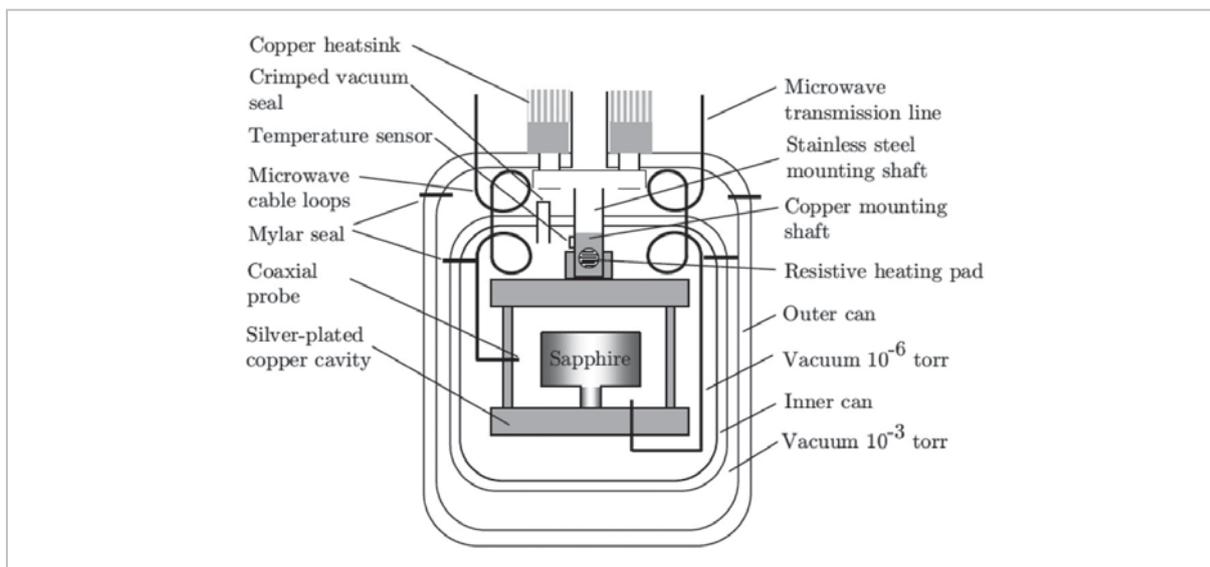


図2 液体ヘリウム容器の中に沈められる真空槽

二重の真空槽内にサファイア結晶が入られた共振器が入っている。

いる。図2が示すようにサファイア結晶は下から1つのスピンドルを持つように支えられている。このような支え方がメカニカルなストレスを避ける事ができ、電磁波をより多く閉じ込める事ができる[27]。以前のCSOに採用していた上下2つのスピンドルを金属製共振器で挟んでいた時よりも優れている事を確認している。

CSO共振器を共鳴周波数・温度依存性の極大点付近で動作させた場合、CSOの周波数安定度は3つのノイズ成分によって制限されている。1つ目は、検出器の電圧ノイズや制御回路内の電気素子自身の揺らぎに起因するPound周波数分別器の本質的なノイズ[28][29]、2つ目はサファイア共振器に入力する信号のAMノイズによるもの、3つ目は誘電体内部に閉じ込められる電磁波の輻射エネルギーに起因するマイクロ波強度のゆらぎによるもの。最初の2つのノイズ成分は、サファイア共振器へのカップリングを上げることで軽減できる。しかし、室温でのカップリング効率と4.2 K周辺でのカップリング効率はかなり異なるので、トライアンドエラーでカップリング効率を上げて行く必要がある。実際には、液体ヘリウム温度での100%近くのカップリング効率を得るには、室温でのカップリング効率は 10^{-4} ぐらいにする必要がある。

原理的には、比較的高い動作温度(40-80 K)で

サファイア共振器のWGEモードとWGHモードの両方を励起することができる[12][13]。サファイアの異方性によりそれぞれのモードの温度依存性は異なり、周波数・温度依存性に極大点を持つことができる。2つのモードの周波数比は次式で与えられる。 $f_{WGE}/f_{WGH} \approx \alpha_{\parallel}/\alpha_{\perp}$ 、 α_{\parallel} と α_{\perp} はサファイア誘電率の結晶軸に対して平行な成分と直交な成分。液体窒素温度に冷却されたCSOのXバンドにおける $\alpha_{\parallel}/\alpha_{\perp}=1.34$ であり、これは2つのモード間隔は3-4 GHzに相当する。しかし、このような温度40-50 KでDualモード発振するCSOの周波数安定度は平均化時間1秒で 4×10^{-14} 程度であり[31]、高い短期安定度を必要としない実験では十分であるが、液体ヘリウム温度のCSOの性能には及ばない。

図3にCSOの発振回路の簡略図を示す。高いQ値のサファイア共振器はバンドパスフィルターの働きとPound周波数分別器(frequency discriminator: FD)の分散信号を与える働きをする。Pound FDはマイクロ波の入力信号を高速に周波数変調し得ている。もし発振周波数が高いQ値共振器の共鳴周波数とずれていたならば、共振器からの反射信号は強度変調を受けており、この強度変調の深さと位相は発振周波数と共振周波数の周波数差に依存している。この強度変調を受けている反射信号は元々の変調周波数で位相敏感

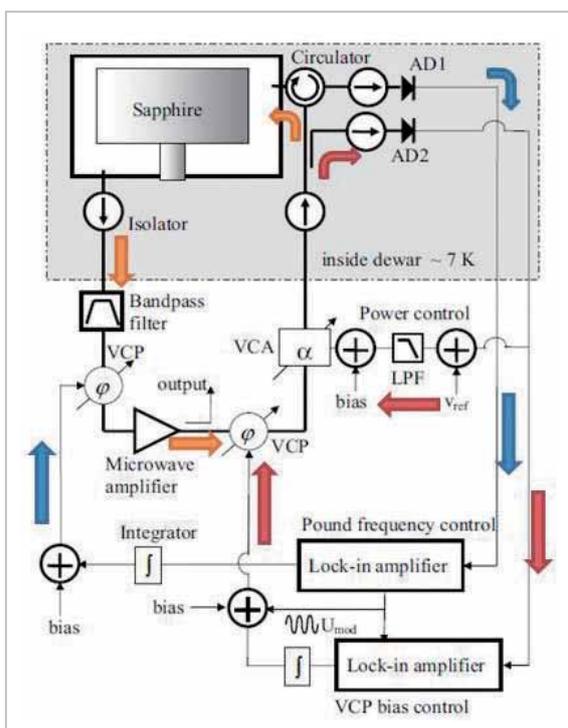


図 3 CSO の制御回路

周波数制御、パワー制御、制御によって生じる AM ノイズの除去、の 3 つの制御が行われている。太線はマイクロ波の信号線。VCP = 電圧制御位相シフター、VCA = 電圧制御減衰器、LPF = ローパスフィルター。オレンジの矢印: CSO 発振ループ、青い矢印: 周波数サーボ、赤い矢印: パワーサーボ

検波することでエラー信号が作られる。エラー信号は CSO 発振回路内の電圧制御可能な位相シフター (VCP) に戻され、発振周波数はサファイア共振器の共振モードに安定化する。共振周波数からのズレを検知し周波数安定化を行う、周波数分別器、フィルター、VCP などは液体ヘリウム容器の外に置かれている。周波数制御のゲインが十分大きいならば、周波数安定化の性能は周波数分別器周辺のノイズ特性によって決まる。正しく効果的な Pound 周波数制御を行うには、正しい変調周波数を選ぶ必要がある。変調周波数は高 Q 値共振器の共鳴線幅よりも大きくなくてはならない。線幅よりも高い周波数を選ぶ事でこれは変調サイドバンドのロス小さくし、周波数分別器の周波数-電圧効率を高める事ができる。また、変調周波数が共鳴線幅より低い場合、共鳴周波数ではないのにゼロクロスするエラー信号が観測される事がある。このようなゼロクロスエラー成分は正しい周波数安定化を乱す。変調周波数を上げること

は、そのような余分なゼロクロス信号を作らない効果もある。

CSO 発振したマイクロ波のパワーも安定化する必要がある。なぜならパワーが変わると CSO 発振ループ内に閉じ込められる電磁波のパワーが変わりサファイア共振器の共鳴周波数に周波数シフトを及ぼすからである。この効果の大きさは Q 値が約 10^9 の高純度 HEMEX サファイアの場合、約 $5 \times 10^{-11} / \text{mW}$ である [30]。CSO 発振パワーの変動の原因は、液体ヘリウム容器内に設置された SMA ケーブルのロスが液体ヘリウムの蒸発により変化してしまう事に起因している。CSO 発振のパワー安定化は、冷却ヘリウム容器内のサファイア共振器近くに置かれた強度検出器と、室温に置かれた制御ボックス内の電圧制御減衰器によって行われる。CSO 共振器の温度は周波数-温度曲線の極大点で安定化され、周辺の環境変化による共鳴周波数の影響を小さくしている。詳しくは文献 [32] を参照。

3 冷却サファイア共振器の周波数安定度

CSO 自身の短期安定度を測定するために 11.2 GHz で発振する全く同一性能の CSO を 2 台製作した。2 台とも 7 K 近くで周波数-温度曲線の極大点が存在している。温調は市販の温調器とカーボングラスのサーミスタで行っている。2 つの CSO の周波数差 f_{beat} は 131.181 kHz であり、この周波数を水素メーザーをリファレンスにした周波数カウンターで測定し、周波数安定度を求めた。測定システムのノイズレベルは $\sigma_{y,\text{count}} \approx 10^{-16} / \sqrt{\tau}$ であり、周波数カウンターのトリガーエラーにより決まっている。

図 4 に、周波数安定化のみを行った場合、周波数制御とパワー制御を施した場合、さらに周波数制御を施した時に発生する強度変調制御を施した場合、の安定度を示す。図から分かるように、パワー制御と強度変調抑圧が非常に効果的である事がわかる。

図 5 に NICT に導入した CSO の周波数安定度を示す。平均化時間 20 秒で $\sigma_{y,\text{min}} \approx 5.6 \times 10^{-16}$ に達している。また水素メーザーと周波数比較を行い長期の安定度を測定した。1000 秒付近までは水

素メーザーの位相ノイズが支配的になるが、それよりも長い平均化時間では CSO の周波数ドリフトが支配的になる。

周波数安定度 σ_y は、周波数ドリフトの影響など取り除いたあと計算した結果ではなく、生データから計算されたものである。NICT の CSO は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ で温度管理されている部屋で維持されている。長期安定度は図 5 よりも 1 桁程度良く、これはドリフトレートとしては約 $10^{-14}/\text{日}$ 程度に相

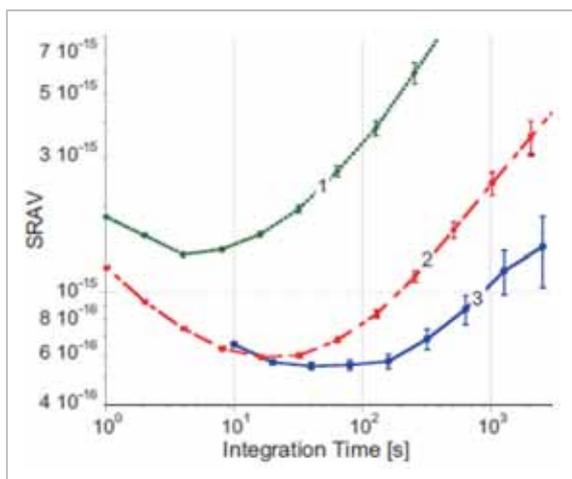


図 4 測定された CSO の安定度

カーブ 1: 周波数制御のみを施した時 (サンプリング時間 1 秒)、カーブ 2: 周波数制御とパワー制御を施した時 (サンプリング時間 1 秒)、カーブ 3: 制御によって生じた AM ノイズも抑圧した時 (サンプリング時間 10 秒)

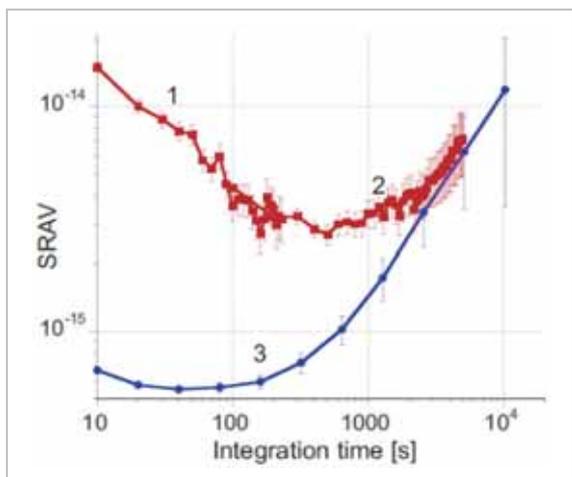


図 5 得られた CSO の安定度

カーブ 3: 2 台の CSO から得られた短期安定度 (サンプリング時間は 10 秒)、カーブ 1 とカーブ 2: 水素メーザーとの比較安定度 (サンプリング時間はそれぞれ 10 秒と 100 秒)

当する。

4 周波数コンバータ

この CSO 信号を様々な実験で利用するために 11.2 GHz を 1 GHz に変換する周波数コンバータを開発した。図 6 に 1 GHz ダウンコンバータ (D/C) のブロック図を示す。1 GHz の低ノイズ SAW 発振器の出力は増幅され、nonlinear transmission line (NLTL) に入力される。この NLTL は周波数コムジェネレーターとして働き、入力信号の高調波を発生させる。11 次高調波 (11 GHz) は CSO の発振周波数 11.2 GHz とミキシングされ、200.5 MHz の信号を発生させる。NLTL 出力の 5 次高調波 (5 GHz) は 24 分周され 208.3 MHz になり、先ほどの 200.5 MHz とミキシングし 7.8 MHz の信号を発生する。周波数コンバータの周波数調整は内部の Direct Digital Synthesizer (DDS) によって行われる。DDS から 7.8 MHz の信号を発生させ、先ほどの 7.8 MHz とミキシングしエラー信号を発生させる。エラー信号はループフィルターを介して 1 GHz SAW 発振器にフィードバックされ、1 GHz SAW 発振器の位相が CSO の位相に安定化される。CSO、DDS、SAW 発振器の周波数の間には次の関係式が成り立っている。

$$CSO - \left(11 + \frac{5}{24}\right) \cdot SAW = DDS$$

結果として、1 GHz SAW 発振器の信号は CSO の安定度を保ったまま、約 $0.1 \mu\text{Hz}$ の分解能で周波数を変えることができる。また、CSO の長期ドリ

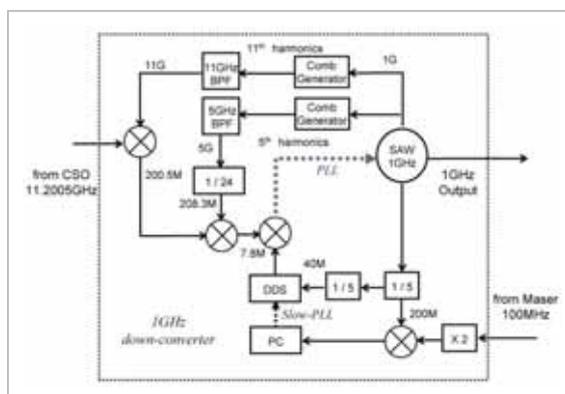


図 6 1 GHz ダウンコンバータのブロック図

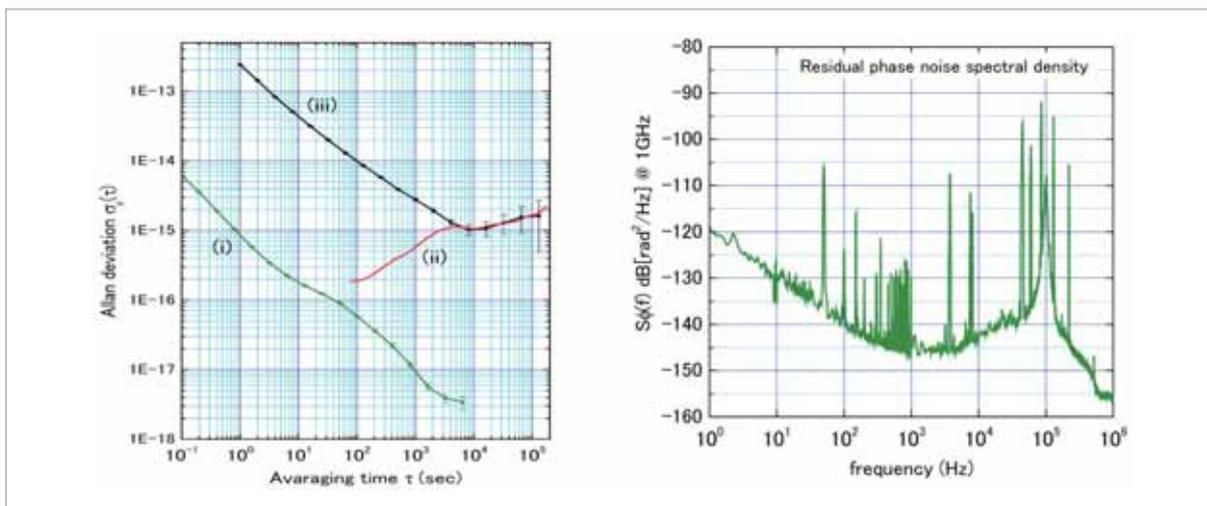


図7 (左) (i) 1 GHz ダウンコンバータの残留安定度、(ii) 長期を水素メーザーに安定化した時の 1 GHz ダウンコンバータの安定度、(iii) 水素メーザーの安定度。(右) 1 GHz ダウンコンバータの残留位相ノイズ。

フトは水素メーザーよりも悪いため、CSO の長期ドリフトを取り除くように DDS の周波数を調整する。ダウンコンバータ内の 200 MHz 信号と水素メーザーの 100 MHz 信号の 2 通倍をミキシングし、ミキサー出力を A/D コンバータで取り込む。その出力が長期的に一定になるよう DDS の周波数を調整し、1 GHz 信号は水素メーザーに安定化される。周波数調整の時定数は約 1000 秒である。この遅い周波数調整により、1 GHz 信号は水素メーザーに安定化され、最終的には日本標準時や国際原子時にトレーサブルな信号になる。これらの安定化により、短期は CSO の、長期は水素メーザーの安定度をもつ 1 GHz 信号源が完成した。

完成した 1 GHz ダウンコンバータの性能を評価するために、同一のダウンコンバータを 2 台製作した。CSO の 11.2 GHz の信号を 2 つに分け、2 台のダウンコンバータの 1 GHz SAW 発振器を安定化する。ダウンコンバータ内の DDS の周波数をそれぞれ変えることにより、1 GHz の出力周波数を独立に制御する事ができる。図 7 にアジレント社の位相ノイズ測定器 E5500 で測定した位相ノイズスペクトラムを示す。2 台のダウンコンバータのうち、1 台を被測定信号、1 台を参照信号として使用した。得られた残留位相ノイズはフーリエ周波数 1 Hz で $-118 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ 、100 Hz 以上では $-140 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ 以下であった。また、アンリツ社の

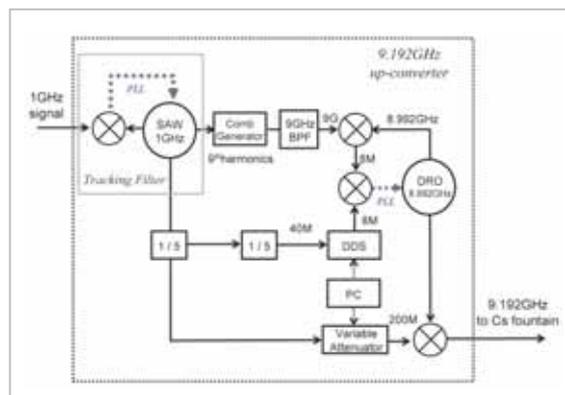


図8 9.192 GHz アップコンバータのブロック図

安定度測定システムで残留周波数安定度を測定した[33]。このシステムでは DMTD テクニックを使っており、2つの 1 GHz 入力信号は共通リファレンス 989.9 MHz によりそれぞれ 10.1 MHz にミックスダウンされる。2つの 10.1 MHz 信号の位相差を高速 A/D コンバータにより PC に取り込まれる。得られた安定度は平均化時間 1 秒で 1×10^{-15} (測定帯域 5 Hz) よりも良く、1 GHz ダウンコンバータは全く CSO の安定度を損なってないといえる。

更に、NICT のセシウム原子泉周波数標準器用に 9.192 GHz のマイクロ波発振器を開発した。この 9.192 GHz は先ほどの 1 GHz から作られる。9.192 GHz アップコンバータのブロック図を図 8

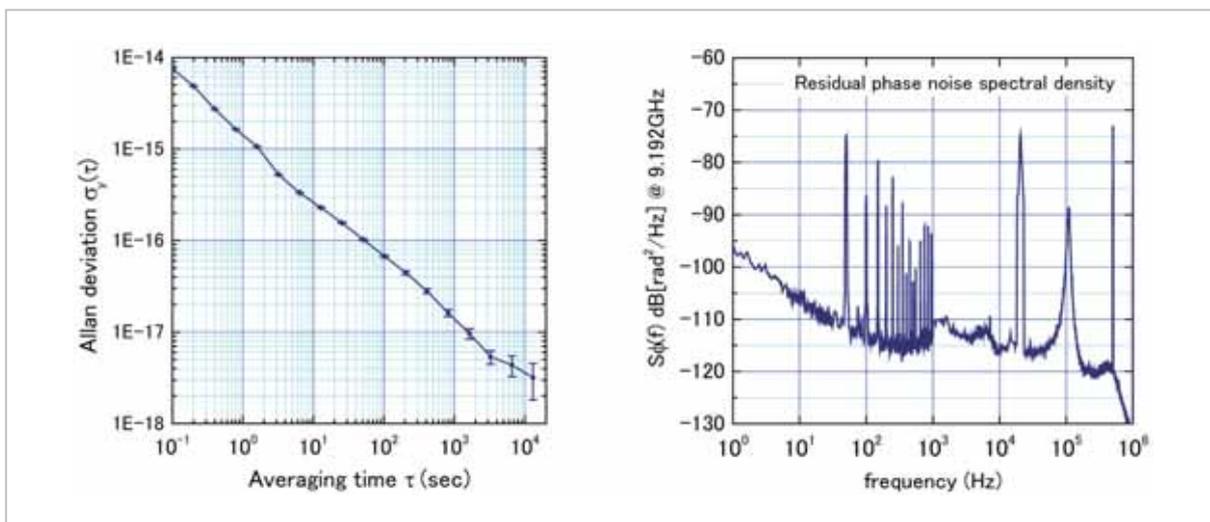


図9 (左)9.192 GHz アップコンバータの周波数安定度、(右)残留位相ノイズ

に示す。

まず初めに、1 GHz SAW 発振器が分配された 1 GHz によって位相安定化される。このトラッキングフィルターにより分配信号の強度ゆらぎも取り除くことができる。位相安定化された 1 GHz 信号は増幅され NLTL に入射され高調波を発生させる。9 次高調波 (9 GHz) は 8.992 GHz の dielectric resonant oscillator (DRO) とミキシングし 8 MHz 信号を発生させる。この信号と DDS の 8 MHz 信号位相比較し、8.992 GHz DRO を安定化する。安定化された 8.992 GHz 信号が 1 GHz 信号を分周した 200 MHz とミキシングされ 9.192 GHz を発生させる。9.192 GHz の周波数は DDS の周波数によって制御され、強度は 200 MHz の振幅を変えることにより制御可能となる。

この 9.192 GHz アップコンバータも 2 台作りその性能を評価した。位相ノイズはフーリエ周波数 1 Hz で $-97 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ であり、安定度は平均時間 1 秒で 1×10^{-15} である。

5 CSOを用いた実験

この CSO ベースの超高安定な信号源を 729 nm 超線幅レーザーの安定度評価に用いた。チタンサファイアベースの周波数コムを繰り返し周波数を CSO ベースの 1 GHz 信号に安定化し、狭い線幅レーザーの安定度を測定した。得られた結果を図 10 に示す。水素レーザーの参照信号として使

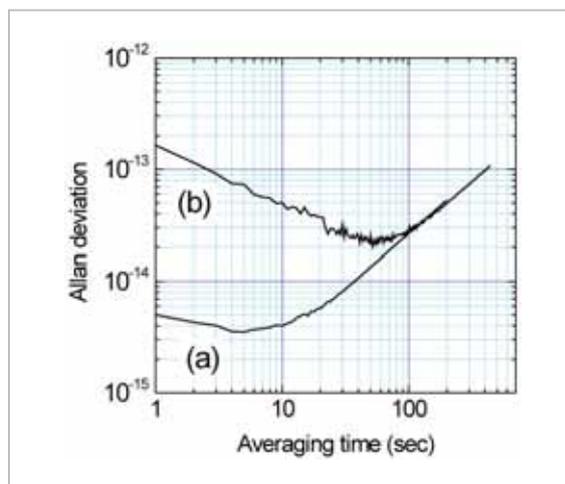


図10 729 nm 狭線幅レーザーの安定度

周波数コムを (a) CSO に安定化した時と (b) 水素レーザーに安定化した時の結果。

用した時はその安定度は水素レーザーの安定度に制限されているが、CSO の信号を使用した時は 1 秒で 10^{-15} 台の周波数安定度を得ている。

6 まとめ

NICT は UWA で開発された冷却サファイア共振器を導入した。その短期安定度は平均化時間 1 秒で 2×10^{-15} 以下である。またこの超高安定な CSO は 11.2 GHz で発振しており、様々な実験で利用できるように 11.2 GHz から 1 GHz に下げる

ダウンコンバータと、原子泉標準器用に1 GHz から9.192 GHzに上げるアップコンバータを開発した。共にCSOの安定度を損なわない性能を有している。

謝辞

The authors wish to acknowledge past and present members of the Frequency Standards and Metrology Research Group at UWA; A. N. Luiten, S. Chang and A. Mann, P. L. Stanwix, M. E. Tobar, and E. N. Ivanov.

参考文献

- 1 M. Kumagai, H. Ito, M. Kajita, and M. Hosokawa, "Evaluation of caesium atomic fountain NICT-CsF1," *Metrologia*, Vol. 45, pp. 139–148, 2008.
- 2 S. Nagano, H. Ito, Y. Li, K. Matsubara, and M. Hosokawa, "Stable Operation of Femtosecond Laser Frequency Combs with Uncertainty at the 10^{-17} Level toward Optical Frequency Standards," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, No. 042301, pp. 1–8, 2009.
- 3 V. B. Braginsky, V. P. Mitrofanov, and V. I. Panov, "Systems with Small Dissipation," University of Chicago Press, 1985.
- 4 A. G. Mann, "Frequency Measurement and Control: Advanced Techniques and Future Trends, edited by A. N. Luiten," Springer, pp. 37–66, 2001.
- 5 A. J. Giles, A. G. Mann, S. K. Jones, D. G. Blair, and M. J. Buckingham, "A very high stability sapphire loaded superconducting cavity oscillator," *Physica B*, Vol. 165, pp. 145–146, 1990.
- 6 A. N. Luiten, A. G. Mann, and D. G. Blair, "Power stabilized cryogenic sapphire oscillator," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 44, pp. 132–135, 1995.
- 7 See http://www.crystalsystems.com/hemex_sapph.html
- 8 G. Santarelli, Ph. Laurent, P. Lemonde, A. Clairon, A. G. Mann, S. Chang, A. N. Luiten, and C. Salomon, "Quantum Projection Noise in an Atomic Fountain: A High Stability Cesium Frequency Standard," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 82, pp. 4619–4622, 1999.
- 9 P. Wolf, S. Bize, A. Clairon, A. N. Luiten, and G. Santarelli, "Tests of Lorentz Invariance using a Microwave Resonator," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 90, No. 060402, pp. 1–4, 2003.
- 10 P. Lemonde, P. Laurent, E. Simon, G. Santarelli, A. Clairon, C. Salomon, N. Dimarcq, and P. Petit, "Test of a cold atom clock prototype in absence of gravity," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 48, pp. 512–515, 1999.
- 11 J. G. Hartnett, C. R. Locke, E. N. Ivanov, M. E. Tobar, and P. L. Stanwix, "Cryogenic sapphire oscillator with exceptionally high long-term frequency stability," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 89, No. 203513, pp. 1–3, 2006.
- 12 M. E. Tobar, E. N. Ivanov, C. R. Locke, J. G. Hartnett, and D. Cros, "Improving the frequency stability of microwave oscillators by utilizing the dual-mode sapphire loaded cavity resonator," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 30, pp. 1284–1288, 2002.
- 13 M. E. Tobar, G. L. Hamilton, E. N. Ivanov, and J. G. Hartnett, "New Method to Build a High Stability Sapphire Oscillator from the Temperature Compensation of the Difference Frequency Between Modes of Orthogonal Polarization," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 50, pp. 214–219, 2003.
- 14 J. G. Hartnett, M. E. Tobar, and J. Krupka, "Complex paramagnetic susceptibility in titanium-doped sapphire at microwave frequencies," *J. Phys. D*, Vol. 34, pp. 959–967, 2001.

- 15 J. G. Hartnett and M. E. Tobar, "Frequency Measurement and Control: Advanced Techniques and Future Trends edited by A. N. Luiten," Springer, pp. 67–79, 2001.
- 16 J. G. Hartnett, M. E. Tobar, A. G. Mann, E. N. Ivanov, J. Krupka, and R. Geyer, "Frequency-temperature compensation in Ti^{3+} and Ti^{4+} doped sapphire whispering gallery mode resonators," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 46, pp. 993–1000, 1999.
- 17 J. Millo, R. Boudot, M. Lours, P. Y. Bourgeois, A. N. Luiten, Y. Le Coq, Y. Kersal?, and G. Santarelli, "Ultra-low-noise microwave extraction from fiber-based optical frequency comb," *Optics Letters*, Vol. 34, No. 23, pp. 3707–3709, 2009.
- 18 Y. Le Coq, J. Millo, W. Zhang, M. Abgrall, M. Lours, H. Jiang, E. M. L. English, R. Boudot, P. Y. Bourgeois, M. E. Tobar, J. Guena, A. Clairon, S. Bize, A. N. Luiten, Y. Kersale, and G. Santarelli, "Ultra-low noise microwave generation using femtosecond lasers and applications," 2010 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), pp. 1–2, 2010.
- 19 D. Chambon, S. Bize, M. Lours, F. Narbonneau, H. Marion, A. Clairon, G. Santarelli, A. Luiten, and M. Tobar, "Design and Realization of a Flywheel Oscillator for Advanced Time and Frequency Metrology," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, No. 094704, pp. 1–5, 2005.
- 20 D. Chambon, M. Lours, F. Chaplet, S. Bize, M. Tobar A. Clairon, and G. Santarelli, "Design and Metrological Features of Microwave Synthesizers for Atomic Fountain Frequency Standard," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 54, pp. 729–735, 2007.
- 21 O. Lopez, A. Amy-Klein, C. Daussy, C. Chardonnet, F. Narbonneau, M. Lours, and G. Santarelli, "86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer," *Eur. Phys. J. D.*, Vol. 48, pp. 35–41, 2008.
- 22 M. Fujieda, M. Kumagai, T. Gotoh, and M. Hosokawa, "Ultrastable Frequency Dissemination via Optical Fiber at NICT," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 58, pp. 1223–1228, 2009.
- 23 L. Rayleigh, "The problem of the whispering gallery," *Philos. Mag.*, Vol. 20, pp. 1001–1004, 1910.
- 24 M. E. Tobar and D. G. Blair, "A generalized equivalent circuit applied to a tunable sapphire-loaded superconducting cavity," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 39, pp. 1582–1594, 1991.
- 25 M. E. Tobar, "Effects of spurious modes in resonant cavities," *J. Phys. D.*, Vol. 26, pp. 2022–2029, 1993.
- 26 S. Chang, A. Mann, and A. Luiten, "Improved cryogenic sapphire oscillator with exceptionally high frequency stability," *Electron. Lett.*, Vol. 36, pp. 480–481, 2000.
- 27 S. Chang, A. Mann, and A. Luiten, "Improved cryogenic sapphire oscillator with exceptionally high frequency stability," *Electron. Lett.*, Vol. 36, pp. 480–481, 2000.
- 28 R. V. Pound, "Electronic Frequency Stabilization of Microwave Oscillators," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 17, pp. 490–505, 1946.
- 29 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B*, Vol. 31, pp. 97–105, 1983.
- 30 S. Chang, A. G. Mann, A. N. Luiten, and D. G. Blair, "Measurements of Radiation Pressure Effect in Cryogenic Sapphire Dielectric Resonators," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 79, pp. 2141–2144, 1997.
- 31 J. D. Anstie, J. G. Hartnett, M. E. Tobar, E. N. Ivanov, and P. L. Stanwix, "Second generation 50 K dual-mode sapphire oscillator," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 53, pp. 284–288, 2006.

- 32 C. R. Locke, E. N. Ivanov, J. G. Hartnett, P. L. Stanwix, and M. E. Tobar, "Invited Article: Design techniques and noise properties of ultrastable cryogenically cooled sapphire-dielectric resonator oscillators," Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, No. 051301, pp. 1–12, 2008.
- 33 K. Mochiozuki, M. Uchino, and T. Morikawa, "Frequency-Stability Measurement System Using High-Speed ADCs and Digital Signal Processing," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 56, pp. 1887–1893, 2007.



Clayton R. Locke
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ特別招聘研究員
 Ph.D.
 光周波数標準、精密時空計測



くまがい もとひろ
熊谷基弘
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ主任研究員
 博士(理学)
 原子周波数標準、
 光ファイバ周波数伝送

いとう ひろゆき
伊東宏之
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ主任研究員
 博士(理学)
 原子周波数標準、光周波数標準

ながの しげお
長野重夫
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ主任研究員
 博士(理学)
 光周波数標準、精密時空計測

John G. Hartnett
 西オーストラリア大学教授
 Ph.D.周波数標準、時空計測

Giorgio Santarelli
 パリ天文台 LNE-SYRTE 研究所



ほそかわ みずひこ
細川瑞彦
 新世代ネットワーク研究センター
 研究センター長 博士(理学)
 原子周波数標準、時空計測