

高精度な周波数と時刻を生成・維持、そして供給する技術の開発

■概要

正確な時刻と周波数は、情報通信システムの維持・発展を支えるとともに、精密物理計測の基盤となっている。時空標準研究室では、標準時及び周波数標準の更なる高精度化、高信頼化を目指して、日本標準時やそこから得られる標準周波数の実用技術の開発、光周波数標準の開発及びその評価や展開に不可欠な比較・伝送技術の開発を行う。平成30年度は第4期中長期計画の3年目であり、日本標準時神戸副局の開局、Sr光格子時計の国際承認取得及びこれによる国際原子時校正、 In^+ イオントラップ光周波数標準及び一酸化炭素分子によるTHz量子標準の開発及びVLBI技術を用いた高精度周波数比較技術の開発を進め、また周波数標準の利活用技術として、無線双方向技術及びチップスケール原子時計の開発を進めた。

■平成30年度の成果

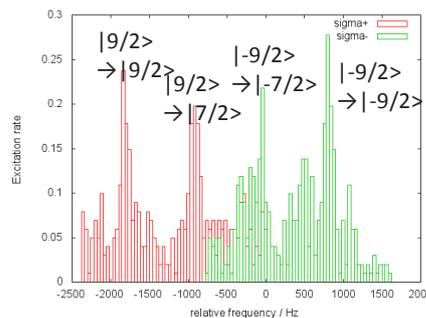
1. 標準時及び周波数標準の発生と供給に関する業務

日本標準時の発生では、定常業務を安定に継続した。平成30年度は発生系と供給系の設備更新のための資材調達を完了した。標準時分散化システムの構築では、6月10日に神戸副局を開局した。開局以来、日本標準時に対して4ナノ秒以内の同期精度を維持しており、本部の発生系を冗長化できていることを確認した(図1)。

日本標準時の供給に関しては、テレホンJJYで月間17万アクセスとなる状況が続くとともに、公開NTPサービスでは1日あたり60億を超えるアクセス数が続いている。標準電波は、1送信所以上から送信した送信時間率として99.99%以上(年度全体)で安定運用で



図1 神戸副局時系と本部時系の時刻差

図2 狭窄化された In^+ 時計遷移のスペクトル

きた。また新たな時刻供給法として試験運用を行ってきた「光電話回線による時刻供給(光テレホンJJY)」を平成31年2月から正式運用に移行した。

国際活動においては、原子時計データを継続して国際度量衡局に提供し世界の標準時構築に貢献するとともに、度量衡の国際委員会でWGチェア等の委員活動を実施したほか、アジア太平洋地域でも国際比較調整などで活動をけん引し、ITU-Rに日本代表として参加した。その他、タイムビジネス認証制度の時刻配信業務に関する規格JIS X5094について、国際規格のISO/IEC 18014-4と整合を取るよう改訂し、またドイツPTB主導で推進されているアジア新興国標準機関支援プロジェクトの一環で、GNSS校正の指導的立場で参画した。

2. 次世代周波数標準器の研究開発

光周波数標準の開発では、光信号とマイクロ波信号間の精密な周波数リンクを実現するため、光周波数コムを含む光周波数計測系の高度化を推進し、光周波数標準による国際原子時校正や近い将来の光周波数標準を参照した日本標準時生成に対応可能な計測系を開発した。そしてストロンチウム(Sr)光格子時計を参照して国際原子時の1秒の長さ(歩度)を評価し、その再現性を確認した。さらに、Sr光格子時計による国際原子時校正能力の認定を目指して、過去7か月分のSr光格子時計による国際原子時の歩度の評価結果を国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会の一次・二次周波数標準の作業部会に提出し、11月末に光周波数標準として世界で2例目となる二次周波数標準に認定された。認定直後の12月に

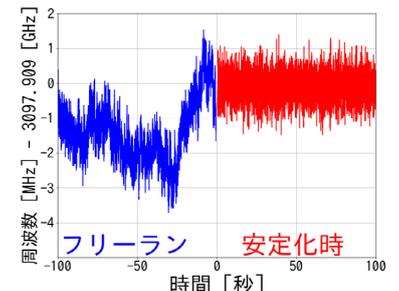


図3 量子カスケードレーザーの一酸化炭素分子回転遷移への安定化

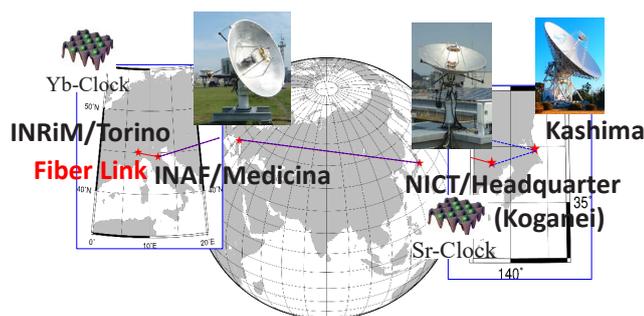


図4 VLBIリンクによるNICTのSr光格子時計とINRiM (イタリアトリノ) のYb光格子時計間の周波数比較を開始

は、Sr光格子時計を時間率90%以上で10日間連続運転を行い、光周波数標準として初めて直近の国際原子時の歩度を評価・報告した。

一方、インジウムイオン (In^+) 光周波数標準では、動的な磁場制御で量子状態を限定する手法を新たに導入することで時計遷移スペクトル線幅を従来比1/10程度の半値全幅80 Hzまで狭窄化した(図2)。また、これを用いて同イオン種では世界で初めて時計レーザーの時計遷移への周波数ロック動作を達成し、更なる確度向上への見通しが得られた。

テラヘルツ周波数標準技術においては、量子周波数標準となることが期待される一酸化炭素の回転吸収スペクトルに3.1 THz量子カスケードレーザーを安定化することに成功した(図3)。また、市販THz測定器の簡易校正用ツールとなり得る、精度6桁程度の可搬型THz標準の開発を目的として、THz差周波発生用アセチレン分子安定化レーザーを開発し、その性能評価を実施した。

3. 高精度な時刻・周波数比較・伝送技術の研究開発

衛星双方向周波数比較-搬送波位相方式を実現するための装置開発を前年度終了し、平成30年度は主に国内で実証実験を実施した。周波数比較精度についてこれまでと同様の値が得られることを確認した。時刻比較に必要な校正実験をNICT本部(小金井)-NICT未来ICT研究所(神戸)で行い、GNSS校正結果と誤差の範囲内で一致し、時刻比較にも利用可能であることが実証された。

欧州宇宙機関(ESA)が主導する科学衛星プロジェクトACES参加準備に関しては、日本代表機関として運用する予定の地上局運用に必要な電源供給系、ネットワーク系及び無線免許取得準備等の環境整備を進めた。一方ESAにおける機器開発の遅れにより、地上局設置がさらに延期され2019年初頭から2020年春頃へ、また国際宇宙ステーション(ISS)への実験機器打ち上げが同年夏頃に延期となった旨の連絡をESAから受けた。

VLBI周波数比較では、光格子時計を開発しているイ

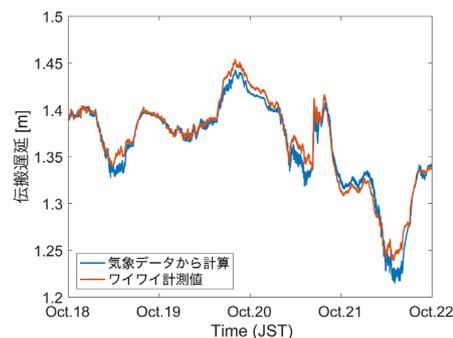


図5 無線双方向時刻比較(ワイワイ)によるNICT本部(小金井)-田無タワー間の電波伝搬遅延観測

タリア国立計量研究所(INRiM)とその標準信号が光ファイバリンクにて伝送されているイタリア天体物理研究所(INAF)との共同研究を開始した(図4)。8月に小型広帯域VLBI観測が可能な小型アンテナをイタリアに輸送し、INAFのMedicina電波天文観測所に設置したうえでINRiMで開発したYb光格子時計とNICTのSr光格子時計のVLBIによる初めての周波数リンクの共同実験を、10月より開始した。受信信号の二偏波合成や電離層推定を含む広帯域バンド幅合成など、広帯域VLBI観測を大陸間距離で実施することに伴って必要な新たな信号処理技術を開発し、着実に実験を進めている。

4. 高精度な時刻・周波数の利活用技術の研究開発

平成29年度に試作した無線双方向時刻比較(ワイワイ)モジュールの3号機ハイパワー版のファームウェアを作製し、NICT本部(小金井)-田無タワー間(基線4.3 km)での大気屈折率変動計測を開始した。9月と12月にそれぞれ1週間程度ワイワイによる大気屈折率変動の計測を行い、気象測器の計測値から推測した値と良い一致を見た(図5)。これによりワイワイモジュールを用いて地表付近の水蒸気を安価にモニターできる可能性があることを示した。また、ワイワイモジュール4台をネットワーク時空間同期し、移動体の二次元変位計測システムを構築した。この変位計測システムの値は大型電波暗室においてレーザー測距計の値と10 cmの精度で一致した。また、IoT時代のキーデバイスとして期待されるチップスケール原子時計の開発については、原子時計の心臓部となるFBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)を利用した3.4 GHz発振器の小型・高機能化に取り組むとともに、小型化に向く反射型MEMSガスセルを新規に開発した。これらの素子は、それぞれ、原子時計システムへの組み込み評価を実施し、論文誌及び国際学会にて発表した。また、光学系の波数安定度が原子共鳴検出に及ぼす影響を高速に演算できるシミュレータも新規に提案し論文化を行った。