

GENERATOARELE OPTICE DE FRECVENȚĂ – ROLUL LOR ÎN DOMENIUL METROLOGIEI

OPTICAL FREQUENCY GENERATORS - THEIR ROLE IN METROLOGY

Anca NICULESCU

INSTITUTUL NAȚIONAL DE METROLOGIE
NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY

Rezumat: În ultimii cinci ani, progresul realizat în stabilizarea laserilor, a măsurării frecvenței în domeniul optic, a dezvoltării și stabilizării laserilor fs (femtosecundă), a dispozitivelor optice nelineare și a celor înrudite, a fost exploziv și neașteptat. Datorită realizării sintetizoarelor optice, bazate pe laseri fs, domeniul metrologiei frecvențelor optice a avut o dezvoltare spectaculoasă, iar rezultatele extraordinare din domeniul spectroscopiei de înaltă rezoluție au deschis o nouă perspectivă metrologiei.

Cuvinte cheie: măsurarea frecvenței laser, generator optic tip "pieptene", frecvență optică

Abstrac.: In the past five years, progress in laser stabilization, optical frequency measurement, femtosecond (fs) laser development and stabilization, nonlinear optics and related topics, has been stunning and unexpected. Thanks to the advent of optical synthesizers, based on fs mode-locked lasers, the field of optical frequency metrology has experienced an extraordinary growth, producing outstanding results in precision spectroscopy and opening new perspectives in the metrological field.

Key words: laser frequency measurement, optical comb generator, optical frequency

1. INTRODUCERE

Cercetările începute cu mai bine de patruzeci de ani în urmă, odată cu construirea laserilor monocromatici, a permis, ca urmare a unui șir lung de experimente din ce în ce mai exacte, descoperirea legilor fizicii cuantice, determinarea constantelor fundamentale și construirea de noi etaloane.

În particular, câteva experimente importante au demonstrat că, pentru a obține rezultate cu un grad mare de exactitate, este mai bine să fie măsurată frecvența decât lungimea de undă (metrologia frecvențelor optice). Aceasta se datorează faptului că intervalul de timp poate fi măsurat mult mai exact decât orice altă mărime fizică.

Deasemenea, deoarece valoarea vitezei luminii a fost definită, în 1983, ca fiind exact 299.792.458 m/s în vid, convertirea frecvenței în lungime de undă poate fi efectuată fără pierderea exactității de măsurare.

2. CADRUL ISTORIC

În ultimele decade, a fost făcut un efort susținut pentru extinderea intervalului de măsurare a frecvenței cu exactitate mare, care, în mod tradițional, era limitat la domeniul frecvențelor radio (de până la 100 GHz), către

1. INTRODUCTION

The research activity, triggered by nearly forty years ago by the realization of highly monochromatic lasers, has brought in a long line of more and more accurate experiments, allowing for discovery of quantum physics laws, determination of fundamental constants and realization of new standards.

In particular, few important experiments have demonstrated that, in order to obtain highly accurate results, it's better to measure the frequency of light rather than its wavelength (optical frequency metrology). This is because time can be measured with much more accuracy than any other physical quantity.

Moreover, since the value of the speed of light was defined in 1983 to be precisely 299.792.458 m/s in vacuum, the conversion between frequency and wavelength can be done without loss in accuracy.

2. HISTORICAL BACKGROUND

In the last decades, a great effort has been devoted to extend the potential for high accuracy frequency measurements, traditionally restricted to radio frequencies (up to 100 GHz), to the domain of optical oscillations (hundreds

domeniul frecvențelor optice (sute de THz). Inițial, problema a fost abordată cu ajutorul lanțurilor armonicilor de frecvență. Acestea porneau de la un orologiu atomic cu cesiu care funcționa, conform definiției secunde SI, la 9.192.631.770 Hz stabilind astfel limita inferioară a lanțului. De la această frecvență, erau generate armonicile superioare utilizând mixere, cristale și alte dispozitive neliniare, coerența fiind păstrată de oscilatoarele de transfer blocate în fază, inserate după fiecare etaj de conversie a frecvenței. În acest fel, realizarea unei transpuneri a domeniului frecvențelor radio în cel al frecvențelor optice era greoaie și complicată.

O abordare alternativă a fost sinteza diferențelor de frecvență bazată pe posibilitatea de a subîmpărți un interval mare de frecvențe optice în intervale mai mici care pot fi corelate cu frecvența inițială. Din marea varietate a schemelor de sinteză vom aminti, aici, doar două.

Prima schemă folosea divizarea în două sub-intervale de frecvență coerente, care generează media aritmetică a două frecvențe laser f_1 și f_2 prin blocarea în fază, a armonicilor de ordin doi a frecvenței unui al treilea laser f_3 , pe suma frecvențelor f_1 și f_2 . Frecvența f_3 împarte astfel intervalul $f_1 - f_2$ în două subintervale egale. În acest context, cea mai importantă realizare a fost aceea a grupului de cercetare a lui Hänsch. Ei au folosit un lanț de blocare în fază pentru cinci astfel de subintervale pentru a acoperi breșa dintre frecvența de rezonanță, 1S-2S, a atomului de hidrogen și a 28-a armonică a laserului etalon, HeNe/CH₄, pentru 3,39 μm. Acest fapt a permis îmbunătățirea determinării constantei Rydberg și a deplasării Lamb a atomului de hidrogen în stare fundamentală [1].

A doua schemă, folosită în timpul anilor 90, s-a bazat pe generarea în intervalul THz a unui spectru tip „pieptene” obținut prin plasarea unui modulator electro-optic de radio frecvență (RF) în interiorul unei cavități optice cu pierderi mici [2]. Noul generator optic tip „pieptene” (OFCG) a avut un efect imediat în domeniul măsurării frecvențelor optice.

Lățimea de bandă obținută cu un OFCG clasic era limitată datorită dispersiei în cavitate și a eficacității modulării. Pentru a depăși această limitare, metrologii și-au îndreptat atenția spre o tehnologie extrem de promițătoare, aceea a laserilor în regim de moduri blocate (ML). ML este o tehnică aplicată în optică prin care un laser poate genera impulsuri de lumină extrem de scurte de ordinul picosecundelor

of THz). The early approach to this problem made use of harmonic frequency chains. These started with a Cs atomic clock that operated, by definition of the SI second, at 9.192.631.770 Hz and set the lower end of the chain. From this frequency, higher harmonics were generated using nonlinear diode mixers, crystals and other nonlinear devices. The coherence was preserved by phase-locked transfer oscillators, after each frequency – conversion step. This way, a chain linking the radio frequency domain to the optical one was extremely huge and complex.

An alternative approach is represented by difference – frequency synthesis that relies on the capability to subdivide a large optical frequency interval into smaller portions with a known relationship to the original frequency gap. Here we will mention just two among various difference – frequency synthesis schemes.

The first scheme was a coherent frequency – interval bisection which generates the arithmetic average of two laser frequencies f_1 and f_2 by phase locking the second harmonic of a third laser at frequency f_3 to the sum frequency of f_1 and f_2 . The frequency f_3 thus divides the interval $f_1 - f_2$ into two equal sections. In this frame, the most notable achievement so far was the one made by Hänsch's group. They used a phase – locked chain of five frequency bisection stages to bridge the gap between the hydrogen 1S-2S resonance and the 28th harmonic of the laser standard, HeNe/CH₄, for 3,39 μm. This realization has led to an improved determination of the Rydberg constant and the hydrogen ground state Lamb shift [1].

The second scheme, pursued during the 1990s, was based on generation of THz-spanning optical comb, obtained by placing a RF (radio-frequency) electro optic modulator in a low-loss optical cavity [2]. This newly conceived optical frequency comb generator (OFCG) had an immediate impact on the field of optical frequency measurement.

However, the bandwidth achievable by a traditional OFCG was limited by cavity dispersion and modulation efficiency. To overcome this restriction, metrologists turned their attention to the extremely promising technology of passively mode-locked (ML) lasers. Mode-locking is a technique in optics by which a laser can be made to produce pulses of light of extremely short duration, on the order of picoseconds (10^{-12} s) or femtoseconds (10^{-15} s). The basis of this technique is to induce a fixed

(10^{-12} s) sau femtosecundelor (10^{-15} s). Principiul acestei tehnici constă prin definirea unei relații unice între faza și modul cavității rezonante a laserului. Laserul va fi considerat blocat în fază sau în regim moduri blocate. Interferențele dintre aceste moduri determină lumina laser să fie emisă sub forma unui tren de impulsuri. În funcție de proprietățile laserului, aceste impulsuri pot fi extrem de scurte, de ordinul femtosecundelor. Deși potențialul folosirii laserilor ML la sinteza frecvențelor optice a fost recunoscută de la început [13], tehnologia nu era pregătită pentru exploatarea acestei idei [1, 3]. Un prim pas înainte a fost făcut spre sfârșitul anilor 90 prin apariția laserilor ML Ti:Sa, ce utilizau o lentilă Kerr foarte eficientă [4-7]. Din acest moment, un efort uriaș a fost depus în dezvoltarea laserilor fs cu performanțe sporite în privința stabilității și acoperirii spectrale.

În anul 1998, utilizând modurile blocate ale unui laser fs ML etalon, colectivul lui Hänsch a fost capabil să măsoare diferențe între frecvențele laser de ordinul zecilor de THz [7]. Ulterior, ei au reușit stabilizarea completă a modurilor „pieptene” prin realizarea primului sistem de autocontrol al purtătoarei – înfășurătoarea fazei impulsurilor laser [8]. Cercetările ulterioare au demonstrat faptul că prin crearea unei legături coerente în fază, între frecvențele optice și cele radio, modurile unui laser fs ML pot fi folosite ca etalon absolut și extrem de exact în metrologia frecvențelor.

3. MĂSURAREA FRECVENȚEI OPTICE

Dintre toate mărimile fizice frecvența poate fi măsurată cu cea mai mare exactitate. În domeniul radio frecvenței (până la 100 GHz), frecvențmetrele au fost folosite de mult timp. Foarte multe din cele mai exacte măsurări din fizică au fost făcute folosind un frecvențmetru care utiliza ca referință externă un orologiu atomic. Pentru a extinde această tehnică la frecvențele înalte, au fost construite, începând cu sfârșitul anilor 60, așa numitele lanțuri de armonice ale frecvenței [5]. Într-un astfel de lanț, elementele neliniare furnizau multiplii de frecvență (armonice) ai unui oscilator dat, pe care era blocat în fază oscilatorul următor. Acesta este necesar deoarece dispozitivele neliniare generează, de obicei, semnale slabe, cel puțin atunci când sunt comandate cu unde continue (cw). Buclele electronice de blocare în fază pot fi utilizate pentru a stabili orice tip de oscilator, chiar și laseri, presupunând că stabilitatea lor intrinsecă este suficientă, astfel

phase relationship between the modes of the laser's resonant cavity. The laser is then said to be phase-locked or mode-locked. The interference between these modes causes the laser light to be produced as a train of pulses. Depending on the properties of the laser, these pulses may be of extremely brief duration, as short as a few femtoseconds. Although the potential for using ML lasers in optical frequency synthesis was early recognized [13], the technology has not been ready for fully exploit their capabilities, until recently [1,3]. A big step ahead was represented in the late 1990s by the advent of very efficient Kerr-lens ML Ti:Sa lasers [4-7]. From that moment on, enormous effort was invested in the development of fs system with improved performances in terms of stability and spectral coverage.

In 1998, by using the modes of optical frequencies emitted by a ML fs laser as a ruler, Hänsch's group were able to measure differences of several tens of THz between laser frequencies [7]. Then, they achieved full frequency stabilization of the comb modes by realizing the first self-referencing control of the carrier – envelope phase of laser pulses [8]. Further, researches definitely pointed out that, by establishing a phase-coherent link between optical frequencies and the radio frequency domain, the modes of a ML fs laser could be used as an extremely precise and absolute ruler in frequency metrology.

3. OPTICAL FREQUENCY MEASUREMENT

Frequency can be measured with by far the highest precision of all physical quantities. In the radio frequency domain (say up to 100 GHz), frequency counters have existed for a long time. Almost any of the most precise measurements in physics have been performed with such a counter that uses an atomic clock as a time base. To extend this accurate technique to higher frequencies, so called harmonic frequency chains have been constructed since the late 1960s [5]. In such a chain, nonlinear elements produce frequency multiples (harmonics) of a given oscillator to which a subsequent oscillator is phase locked. The latter is necessary because nonlinear devices usually produce weak signals, at least when they are driven with a continuous wave (cw). Electronic phase-locked loops can be used to stabilize any kind of oscillator, even lasers, provided their intrinsic stability is sufficient so that there is no

încât să nu fie necesare corecții rapide ale frecvenței. Prin repetarea procedurilor de multiplicare și blocare în fază este posibilă convertirea unei referințe de radio frecvență, de exemplu, de la un orologiu atomic la frecvențe mult mai mari.

Dezavantajul acestor lanțuri de armonici a fost nu numai faptul că ocupau un spațiu foarte mare, ci și faptul că ele puteau fi folosite pentru a măsura o singură frecvență optică.

Aceste moduri blocate sunt deosebit de uniforme, de exemplu, distanța între modurile adiacente este constantă pentru întreg „pieptenele” de frecvență [6-8]. Acest model regulat este caracteristica cea mai importantă folosită în măsurările frecvenței optice. Spectrul de frecvență al laserului ML este de tip „pieptene”, având frecvența exprimată prin ecuația (1):

$$f_n = nf_{rep} + f_0 \quad (1)$$

Ecuația (1) indică relația care leagă cele două frecvențe, f_{rep} și f_0 , de frecvența optică f_n a laserului. Din acest motiv laseri ML sunt capabili să înlocuiască lanțul de armonice utilizat în trecut. Ieșirea laserului ML, în domeniul timp, constă într-un tren regulat de impulsuri scurte separate de intervale de timp $\tau = 1/f_{rep}$, unde f_{rep} este frecvența de repetiție a laserului. În domeniul frecvență, ieșirea este un „pieptene” de frecvențe cu "dinții" spațiați la distanțe egale cu f_{rep} (vezi Fig.1).

need for very rapid frequency corrections. Repeating the multiplication and phase-lock procedure many times makes it possible to convert a reference radio frequency, say from an atomic clock, to much higher frequencies.

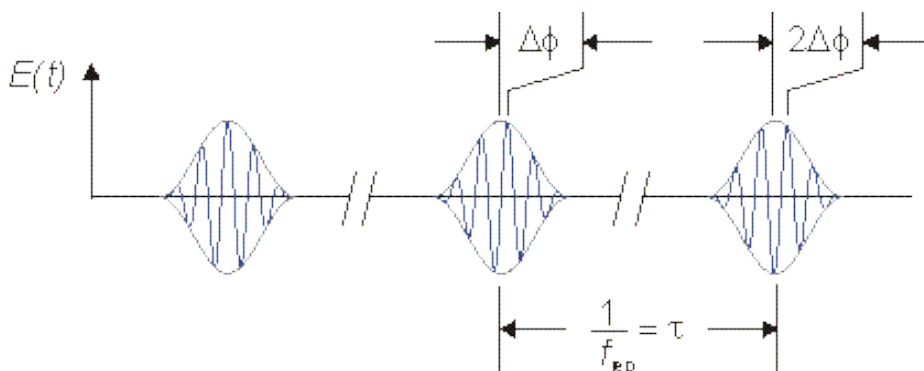
The disadvantage of these harmonic frequency chains was not only that they could easily fill several large laser laboratories at one time, but that they could be used to measure only a single optical frequency.

These modes are remarkably uniform, i.e., the separation between adjacent modes is constant across the frequency comb [6-8]. This strictly regular arrangement is the most important feature used for optical frequency measurement. The frequency spectrum mode-locked laser is therefore comb with frequency expressed as in equation 1:

$$f_n = nf_{rep} + f_0 \quad (1)$$

With the help of Equation (1), two radio frequencies, f_{rep} and f_0 , are linked to the optical frequencies f_n of the laser. For this reason, mode-locked lasers are capable of replacing the harmonic frequency chains of the past. The output of a mode-locked laser, in time domain, consists of a regular train of short pulses separated by time $\tau = 1/f_{rep}$ where f_{rep} is the repetition rate of laser. In frequency domain, the output is a comb of frequencies with spacing equal to f_{rep} (see Fig. 1).

Domeniu timp / Time domain



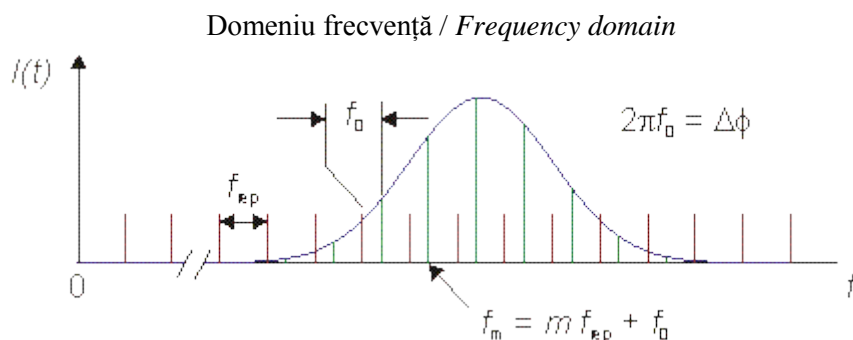


Fig. 1 Trei impulsuri consecutive ale trenului emis de un laser în regim moduri blocate și spectrul corespunzător pentru domeniul timp și, respectiv, frecvență

Fig. 1 Three consecutive pulses of the pulse train emitted by a mode-locked laser and the corresponding spectrum for time and frequency domain

În general, modurile „pieptenului” nu conțin un număr întreg, exact, de multipli ai frecvenței de repetiție. Diferența dintre vitezele de grup și de fază, din interiorul cavității laser, determină o deplasare a fazei purtătoarei $\Delta\varphi$ în raport cu vârful înfășurătoarei impulsului. Acest fapt determină o deviere f_0 a întregului „pieptene” față de frecvența originală.

Pentru stabilizarea frecvenței „pieptenului” pe o referință exactă, RF, nu este suficientă măsurarea celor doi parametri f_{rep} și f_0 ; ei trebuie să fie și controlați separat.

Simplificarea remarcabilă a lanțului complex de frecvențe optice la un singur laser mod blocat a ușurat enorm măsurările din domeniul metrologiei frecvențelor optice. Un alt aspect important al acestei noi tehnologii este acela al gradului ridicat de încredere, exactitate, precum și absența erorilor sistematice.

4. APLICAȚIILE GENERATORULUI „PIEPTENE”

Realizarea legăturii directe între domeniul microundelor și domeniul optic a revitalizat dezvoltarea etaloanelor optice de frecvență, având ca rezultat faptul că, o nouă generație de orologii, ce folosesc tranzițiile optice, a fost dezvoltată în laboratoarele din întreaga lume.

Actualele etaloane de frecvență, cum sunt orologiile atomice care lucrează în domeniul microundelor împreună cu generatorul tip „pieptene”, aduc exactitatea acestor orologii în regiunea optică a spectrului electromagnetic. O simplă buclă de reacție permite blocarea frecvenței de repetiție pe o frecvență etalon.

Aplicații ale generatorului „pieptene” se regăsesc atât în domeniul metrologiei optice, în generarea lanțurilor de frecvență, la orologiile

In general, the comb modes are not exact integer multiples of the repetition frequency. The difference between the phase and group velocities inside the laser cavity leads to pulse-to-pulse phase shift $\Delta\varphi$ of the carrier with respect to the peak of pulse envelope. This leads to an offset f_0 of the whole comb from the frequency origin.

To stabilize the frequency comb to a precise RF reference, it is not sufficient to measure the two comb parameters f_{rep} and f_0 ; they also have to be controlled separately.

The dramatic simplification of a complex optical frequency chain to that of a single mode-locked laser has greatly facilitated optical frequency measurement. Another important aspect of this new technology is its high degree of reliability and accuracy and absence of systematic errors.

4. APPLICATIONS OF THE COMB FREQUENCY GENERATOR

This straightforward connection between the microwave and optical domains has invigorated the development of optical frequency standards, with the result that a new generation of clocks based on optical transitions are being developed in laboratories around the world.

Current frequency standards such as atomic clocks operate in the microwave region of the spectrum, and the frequency comb brings the accuracy of such clocks into the optical part of the electromagnetic spectrum. A simple electronic feedback loop can lock the repetition rate to a frequency standard.

Applications for the frequency comb technique include optical metrology, frequency chain generation, optical atomic clocks, high

atomice optice, în spectroscopia de înaltă rezoluție, cât și la o tehnologie GPS mai precisă.

În prezent, cea mai bună realizare a secunde SI este cea a etaloanelor primare de frecvență, tip fântână cu cesiu. Exactitatea frecvenței scării atomice de timp TAI ale acestor etaloane, este mai mică de 10^{-15} [5]. Vechile orologii comerciale cu cesiu, instalate în laboratoarele de timp, realizau secunda cu o exactitate de 10^{-12} și o stabilitate pe termen lung de 10^{-14} [11].

În privința stabilității și reproductibilității, orologiile optice oferă perspective care le depășesc pe cele ale celor clasice cu cesiu. Recent, două orologii optice, care utilizează ioni de 27Al^+ și atomi neutri de 87Sr prezintă incertitudini sistematice semnificativ mai mici decât cele mai bune evaluări ale etaloanelor primare cu cesiu disponibile în prezent.

Estimările recente (2007/2008) ale incertitudinilor sistematice și a stabilității pe termen scurt ($\tau = 100$ s) pentru orologiile optice, recomandate de CIPM, sunt date în Tabelul 2.

precision spectroscopy, and more precise GPS technology.

The best realization of the SI second today is served by cesium fountain primary frequency standards. The frequency accuracy of atomic time scale TAI developed by these standards is less than 10^{-15} [5]. The old commercial cesium clocks installed in time laboratories realized the second with the accuracy 10^{-12} and long term stability of 10^{-14} [11].

Optical clocks offer the prospects of stabilities and reproducibilities that exceed those of old cesium. Recently, two optical clocks, based on 27Al^+ ions and neutral 87Sr atoms, demonstrated systematic uncertainties which significantly exceed the current best evaluations of cesium primary standards.

Recently evaluated (2007/2008) systematic uncertainties and short term stabilities ($\tau = 100$ s) for the optical clocks recommended by CIPM are summarized in Table 2.

Tabelul 2. Incertitudinile sistematice și stabilitățile diferitelor orologii optice
Table 2. Systematic uncertainties and stabilities for various optical clocks

Orologii optice <i>Optical clocks</i>	$87\text{Sr}/$ 40Ca	$88\text{Sr}^+ /$ 133Cs	$171\text{Yb}^+ /$ 171Yb^+	$191\text{Hg}^+ /$ 27Al^+	$27\text{Al}^+ /$ 191Hg^+
$\sigma_y(\tau)$ $\tau = 100$ s	6×10^{-15}	3×10^{-15}	1×10^{-15}	4×10^{-16}	4×10^{-16}
U_B	$1,5 \times 10^{-16}$	3×10^{-15}	$1,5 \times 10^{-15}$	$1,9 \times 10^{-17}$	$2,3 \times 10^{-17}$

Realizările recente din domeniul măsurării frecvențelor optice permit atingerea unor exactități foarte mari în comparațiile orologiilor optice situate la distanțe de kilometri. Prin intermediul acestor comparații, incertitudinea orologiilor optice aflate în diferite laboratoare poate fi evaluată cu o exactitate de 10^{-16} sau chiar mai bună.

În următorii câțiva ani, orologiile optice cu stabilități și exactități de ordinul 10^{-18} vor fi utilizate în laboratoarele de timp și frecvență. Dezvoltarea orologiilor optice este atât de rapidă încât, în viitorul apropiat, este foarte probabil să fie necesară redefinirea secunde.

În prezent, definiția metrului este „lungimea drumului parcurs de lumină, în vid, în intervalul de timp de $1/299.792.458$ dintr-o secundă”. Această definiție stabilește viteza luminii în vid la $c = 299.792.458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, unde $c = f \cdot \lambda$. Ca urmare, măsurările de lungime pot fi efectuate utilizând etaloane optice de frecvență [10].

Comparațiile internaționale ale laserilor – etaloane de lungime – ar putea fi realizate prin

Recent advances in optical frequency measurements technique allows achieving very high accuracy of remote optical clocks comparison over kilometer distances. Through this comparison, the uncertainty of optical clocks placed in different laboratories can be evaluated at the 10^{-16} or at better level.

It seems that the optical clocks with instabilities and inaccuracies at 10^{-18} level are expected in the time and frequency laboratories over the next several years. The progress in optical clocks is so rapid that in the near future the redefinition of the second will be most probably required.

Now, the meter is defined as: “the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of $1/299.792.458$ of a second”. This fixes the speed of light in vacuum at $c = 299.792.458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, but $c = f \cdot \lambda$. So, practical measurements of length are carried out using optical frequency standards [10].

The international comparisons of length-standard lasers could, now, be accomplished by

etalonări locale cu ajutorul sistemului GPS, ceea ce va permite obținerea de exactități mai mici de 10^{-13} pentru timpi de mediere adecvați.

Sintetizorul optic de frecvență cu laser fs a permis dezvoltarea multor aplicații în domeniul metrologiei. Un exemplu este acela al măsurării absolute a distanțelor. În acest context, o sarcină importantă a institutelor naționale de metrologie o reprezintă etalonarea lungimii absolute a blocurilor de cale cu trasabilitate la definiția metrului.

Alte aplicații ale etaloanelor optice de frecvență pot fi: experimentări privind teoria relativității, măsurarea constantelor fundamentale și determinarea variației lor în timp, măsurarea indicelui de refracție al aerului [9]. În geodezie, compararea orologiilor terestre cu exactități de ordinul 10^{-18} fac posibile măsurări directe ale geopotentialului terestru cu o rezoluție de ordinul 1 cm.

Pentru ambele componente, satelit și terestră, ale sistemului de sateliți GPS/Galileo, folosirea orologiilor optice va îmbunătăți atât rezoluția de măsurare a informației de timp/loc, cât și integritatea și autonomia sateliților.

În viitor, orologiile optice vor juca un rol important, atât în astronomie (detectarea undelor gravitaționale, monitorizarea stelelor și a planetelor folosind interferometria de bază largă), cât și în telecomunicații.

5. CONCLUZII

Deoarece calitatea măsurării timpului a însemnat întotdeauna un progres semnificativ al umanității, putem fi convingeți că suntem abia la începutul unei noi ere științifice și tehnice. Acum, putem doar să anticipăm că potențialii utilizatori nu vor fi numai cercetătorii implicați în experimente revoluționare pentru testare a legilor fundamentale ale naturii ci, eventual, pentru descoperirea altora noi și neașteptate. Accesul, pe scară largă, la etaloane pentru interval de timp, de calitate ridicată, va îmbunătăți semnificativ măsurarea tuturor mărimilor legate de timp, deschizând noi perspective în domeniile importante ale cercetării, ca, de exemplu: în telecomunicații sau în navigația terestră/maritimă/spațială, pentru care în final să contribuie la creșterea calității vieții.

REFERINȚE

[1] Jun Ye and Steven T. Cundiff, „Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications”, Springer, 2005

local calibrations with GPS systems, leading to achievable precision below 10^{-13} with adequate averaging times.

Optical frequency comb synthesizer by fs laser has already produced a number of other interesting metrological applications. One example is given by absolute distance measurement. In this frame, a relevant task of national metrological institutions is represented by absolute length calibration of gauge blocks traceable to the definition of the meter.

Other applications of optical frequency standards involve: test of general relativity, measurements of fundamental constants and searches for time-variation of these constants, measurements of the refractive index air [9]. In geodesy, the comparison of terrestrial clocks, with accuracy of 10^{-18} , permit direct measurement of the earth's geopotential with resolution of order of 1 cm.

For future GPS/Galileo system using optical clocks, in both satellite & ground segments, would improve timing/location resolution and, also, the integrity and autonomy of satellite segment.

In the future, the optical clocks will play an important role in astronomy (gravity wave detection, star and planetary survey using very deep baseline interferometry) and telecommunications.

5. CONCLUSIONS

As the quality of time measurements has always marked a significant human progress, we can be confident that we are just at the beginning of a new scientific and technological era. Now, we can foresee that the potential users will include not just scientists involved in cutting-edge experiments testing the fundamental laws of nature, and eventually discovering new and unexpected laws. Widespread availability of high - quality time references will significantly improve all measurements of time-related quantities, opening new perspectives in crucial research fields, as, for e.g.: telecommunications or ground/sea/air/space based navigation, which, basically will contribute to increasing the quality of our lives.

REFERENCES

[1] Jun Ye and Steven T. Cundiff, „Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications”, Springer, 2005

[2] P. Maddaloni, P. Cancio, P.De Natale, „Optical comb generators for laser frequency measurement”, *Meas. Sci. Technol.*, 20 , 2009

[3] L. Hollberg, S. Diddams, A. Bartels, T. Fortier and K Kim, „The measurement of optical frequencies”, *Metrologia* 42, 2005

[4] J.L.Hall, „Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions”, *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 6 1136–44

[5] Udem T, Holzwarth R and Hansch T W, "Optical frequency metrology", *Nature* 416 2002

[6] Ye J, Schnatz H and Hollberg L , "Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control", *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 9 2003

[7] Hall J L and Ye J "Optical frequency standards and measurement" *IEEE Tr ans. Instrum. Meas.* 52 2003

[8] Hollberg L and others, "Optical frequency standards and measurements" *IEEE J. Quantum Electron.* 37 2001

[9] Fischer M and others, "New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements" *Phys. Rev. Lett.* 92 2004

[10] Quinn T J, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards" *Metrologia* 40 2003

[11] Karol Radecki, Perspective for Using the Optical Frequency Standards in Realization of the Second, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 3 2009

Revizie științifică:

Dragoș BOICIUC, doctor, cercetător științific gradul I, e-mail: dragos.boiciuc@inm.ro

Despre autor:

Anca NICULESCU, doctor, cercetător științific gradul II, e-mail anca.niculescu@inm.ro

[2] P. Maddaloni, P. Cancio, P.De Natale, „Optical comb generators for laser frequency measurement”, *Meas. Sci. Technol.*, 20 , 2009

[3] L. Hollberg, S. Diddams, A. Bartels, T. Fortier and K Kim, „The measurement of optical frequencies”, *Metrologia* 42, 2005

[4] J.L.Hall, „Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions”, *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 6 1136–44

[5] Udem T, Holzwarth R and Hansch T W, "Optical frequency metrology", *Nature* 416 2002

[6] Ye J, Schnatz H and Hollberg L , "Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control", *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 9 2003

[7] Hall J L and Ye J "Optical frequency standards and measurement" *IEEE Tr ans. Instrum. Meas.* 52 2003

[8] Hollberg L and others, "Optical frequency standards and measurements" *IEEE J. Quantum Electron.* 37 2001

[9] Fischer M and others, "New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements" *Phys. Rev. Lett.* 92 2004

[10] Quinn T J, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards" *Metrologia* 40 2003

[11] Karol Radecki, Perspective for Using the Optical Frequency Standards in Realization of the Second, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 3 2009

Scientific revue:

Dragoș BOICIUC, doctor, scientific researcher 1st degree, e-mail: dragos.boiciuc@inm.ro

About the author:

Anca NICULESCU, doctor, scientific researcher 2nd degree, e-mail anca.niculescu@inm.ro