

TEMATICKÁ
PŘÍLOHA č. 4/2013

METROLOGIE

VĚDECKÁ
LEGÁLNÍ
PRAKTICKÁ



METROLOGIE ČASU A FREKVENCE

Ing. Otokar Buzek, CSc. Co je čas?	2
Ing. Otokar Buzek, CSc., Ing. Jan Čermák, Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ing. Petr Pánek, CSc. Jednotka času - sekunda	3
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Časové stupnice a jejich stručná historie	9
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Koordinovaný světový čas UTC	14
Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ing. Petr Pánek, CSc. Charakterizace hodin a oscilátorů	19
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Kvantové etalony času a frekvence	23
RNDr. Petr Balling, Ph.D., RNDr. Miroslav Doležal Optické hodiny	28
Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ing. Petr Pánek, CSc. Distribuce přesného času v internetu	32
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Využití systémů GNSS v metrologii času a frekvence	33

METROLOGY OF TIME AND FREQUENCY

Ing. Otokar Buzek, CSc. What Is Time?	2
Ing. Otokar Buzek, CSc., Ing. Jan Čermák, Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ing. Petr Pánek, CSc. Unit of Time – the Second	3
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Time Scales and Their History in Brief	9
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Coordinated Universal Time - UTC	14
Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ing. Petr Pánek, CSc. Characterisation of Clocks and Oscillators	19
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Quantum Etalons of Time and Frequency	23
RNDr. Petr Balling, Ph.D., RNDr. Miroslav Doležal Optical Clock	28
Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ing. Petr Pánek, CSc. Precise Time Distribution on Internet	32
Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Alexander Kuna, Ph.D. Employing GNS Systems in the Metrology of Time and Frequency	33

CO JE ČAS?

Význam metrologie času a frekvence je úměrný stupni technické a kulturní vyspělosti společnosti. Bez existence signálů s extrémní frekvenční stabilitou a vysokou časovou přesností si dnes můžeme jen stěží představit existenci takových oblastí, jako jsou pozemní a kosmické komunikace, navigace, doprava, počítačové informační systémy a pod. Měření času má prvořadý význam i pro rozvoj vědeckého poznání. Míra našeho poznávání okolního světa je přímo závislá na přesnosti měření fyzikálních veličin. Pokud jde o měření času, lze bez nadsázky říci, že svou přesností v řádu až 10^{-16} znamená současný vrchol poznání přírody.

Slovo čas je nám dnes všední a samozřejmé. S časem se setkáváme na každém kroku, ve vědě, v technice i v běžném životě. Čas nám pomáhá sledovat přírodu a popisovat její zákony. Určuje, kdy máme jít za prací a kdy za zábavou. Čas sledujeme na hodinkách, měříme jej a porovnáváme, cítíme, jak plyne – vnímáme minulost, přítomnost, budoucnost. A přece, položíme-li si otázku *Co je čas?*, jen těžko hledáme odpověď.

Z dochovaných pramenů lze usuzovat, že v dávných dobách nebyli lidé ovlivňováni časem zdaleka tolik jako my. Pro naše předky nebyl čas nic abstraktního, něco nezávislého na událostech. Události se neděly v čase, jak říkáme dnes my, nýbrž samy byly časem. Ještě staří Číňané pohlíželi na různé časové intervaly mezi událostmi jako na nezávislé, a čas jim zřejmě neubíhal plynule.

Teprve ve starém Řecku počali čas od událostí abstrahovat. Platón například chápal čas jako zvláštní číslo vyjadřující periodicitu pohybu nebeských těles. Tvrdil, že Slunce, Měsíc a planety byly vytvořeny k tomu, aby definovaly a uchovávaly čísla představující čas. Říkal, že čas ubíhá rovnoměrně, přitom však zároveň sám pochyboval, že by pohyby nebeských těles, tj. reálných pozorovatelných objektů, mohly trvat nekonečně dlouho bez nejmenších změn.

První, kdo se pokusil vytvořit ucelenou teorii času, byl Aristoteles. Říkal, že čas neexistuje, není-li pohyb. Neztotožňoval však přímo čas s pohybem. Podle Aristotela pohyb se určuje časem, ale i naopak, čas se určuje pohybem, neboť pohyb a čas se vzájemně definují. Čas je však přitom rovnoměrný, zatímco pohyb obecně nikoliv. Říkal, že čas nemá konce ani počátku.

Ve starověku byla rovněž rozšířená představa cyklického času. Stoikové například tvrdili, že se události po určité době, kdy Slunce, Měsíc a planety zaujmou znovu svou vzájemnou počáteční polohu, budou opakovat. Tato představa však byla vytlačována pod vlivem křesťanství, které považovalo události související s Kristem za jedinečné a neopakovatelné. Středověk se pak nesl hlavně spory mezi koncepcí cyklickou a lineární.

Zhruba od 17. století se v důsledku rozvoje fyzikálních věd začaly v chápání času stále více uplatňovat názory fyziků. Za jejich vyvrcholení je možné považovat práce Newtonovy, který zavedl do své dynamiky pojem absolutního času. Definoval jej takto: *Absolutní, pravý a matematický čas plyne sám o sobě rovnoměrně a nemá vztah k žádné-*

mu vnějšímu předmětu. Čas, který měříme, je čas relativní, zdánlivý a obyčejný, což je jen pozorovatelná a jakási vnější míra trvání pohybem, již se obyčejně užívá místo času pravého.

Zdálo se, že touto definicí Newton vyřešil otázku, co je čas jednou pro vždy. S příchodem nových fyzikálních teorií na počátku našeho století, především pak Einsteinovy teorie relativity, počala se však tato Newtonova představa o čase hroutit a to do té míry, že v dnešní době stojí filozofové a fyzikové před touto otázkou znovu poněkud bezradní a jejich názory se různí.

Do úzkých se také dostaneme, položíme-li si otázku, co znamená, že čas plyne. Ačkoli v běžném životě je pro nás směr plynutí času z minulosti přes přítomnost do budoucnosti zcela samozřejmý a nepochybný, vzorce klasické mechaniky ani atomové fyziky nic takového neobsahují. Pohyby těles i částic by mohly stejně dobře probíhat podle stejných fyzikálních zákonů opačně, tedy z budoucnosti do minulosti. Ve fyzice se směr plynutí času poprvé objevuje v termodynamice a to v druhé větě termodynamické, která říká, že entropie systému s časem roste nebo zůstává stejná.

Přes všechny nejasnosti se ale musíme s otázkou *Co je čas?* nějak vypořádat, aby bylo jasné, co vlastně měříme, říkáme-li, že měříme čas. Je zřejmé, že čas, který můžeme a umíme měřit, musí nějak fyzicky existovat, musí jej vytvářet sama příroda. Bude to čas vytvářený nějakým skutečným pohybem v přírodě, ať už je jeho fyzikální původ jakýkoliv. Časem tak prakticky rozumíme zmíněný Newtonův „*relativní, zdánlivý a obyčejný čas*“, onu „*pozorovatelnou a jakousi vnější míru trvání pohybem*“, která je číslem, vyjadřujícím zlomek či násobek měrného intervalu odvozeného z nějakého definičního pohybu. Z této představy ovšem vyplývá, že neexistuje jediný univerzální čas, neboť každý pohyb vytváří svůj vlastní čas.

Samo slovo *čas* má v češtině dvojí, třebaže úzce související význam. Čteme-li v novinách zprávu, že na atletických závodech uběhli dva sprinteři 100 m v čase 10 s, dovíme se, jak dlouho jim trvalo, než proběhli úsek od startu do cíle. Zpráva však neříká, kdy sprinteři tuto trať běželi, zda odpoledne, či večer, a nedovíme se ani, jestli běželi současně nebo každý v jiném závodě. Hlásí-li však nádražní rozhlas časy odjezdů vlaků, informuje nás, kdy vlaky vyjždí z nádraží. Z hlášení poznáme, který vlak odjíždí dříve a který později, nedovíme se však, jak dlouho cesta vlakem bude trvat. Ačkoli jde v obou uvedených příkladech o *čas*, je zřejmé, že se odpovědi na otázku *Jak dlouho?* a na otázku *Kdy?* určitým způsobem liší. V prvním případě se jedná o *časový interval*, v druhém o *časový okamžik* – čas nějaké události, který vztahujeme k určité časové stupnici.

Časový interval můžeme definovat jako časovou odlehlost dvou událostí vyjádřenou pomocí nějakého měrného intervalu – jednotky času. U periodických změn a pohybů se zavádí vedle pojmu časový interval či perioda rovněž duální pojem *kmitočet* či *frekvence*, definovaný jako počet period v jednotkovém časovém intervalu. Rozměr časového intervalu a roz-

měr kmitočtu jsou reciproké veličiny a je v podstatě jedno, hovoříme-li o zdroji časových intervalů či o zdroji kmitočtu.

Pokud chceme měřit časový okamžik – čas nějaké události, se samotnou jednotkou času již nevystačíme. Musíme definovat časovou stupnici, tedy systém, který umožňuje přiřadit jednotlivým událostem jednoznačný časový údaj. Časová stupnice je pak zpravidla určena jednotkou času a svým počátkem.

Přestože otázka *Co je čas?* je stále otázkou navýsost filosofickou, v následujících článcích se budeme věnovat problematice času a jeho měření z pohledu velmi praktického. Seznámíme se podrobně s definicí jednotky času a její his-

torií. Zmapujeme dlouhý a spleťový vývoj časových stupnic od intuitivního vnímání času na základě střídání dne a noci po moderní relativistické časové stupnice. Řekneme si, co je koordinovaný světový čas UTC a mezinárodní atomový čas TAI a jak se dnes tyto časové stupnice vytvářejí. Ukážeme, jak se charakterizují vlastnosti hodin a oscilátorů, především, jak se popisuje jejich stabilita. Probereme funkci nejdůležitějších typů kvantových etalonů času a frekvence a to jak těch klasických, tak nejnovějších optických. Také ukážeme, jak se dnes přesný čas šíří v internetu a jak se porovnává na velké vzdálenosti s využitím signálů globálních družicových navigačních systémů.



JEDNOTKA ČASU – SEKUNDA

Jednotkou času je sekunda. Přesněji řečeno, sekunda je jednotkou délky časového intervalu. Pokud máme definovat jednotkový časový interval, neznamená to z obecného hlediska nic jiného než přesně popsat podmínky, za jakých se děje nějaký vhodně vybraný pohyb v přírodě a jakým způsobem se z něho jednotka času vymezuje. Základním požadavkem na pohyb, z něhož má být odvozen měrný časový interval je jeho rovnoměrnost. Tento požadavek vychází z představy o rovnoměrnosti plynutí času a zaručuje, že jeden měrný interval se od druhého nebude lišit.

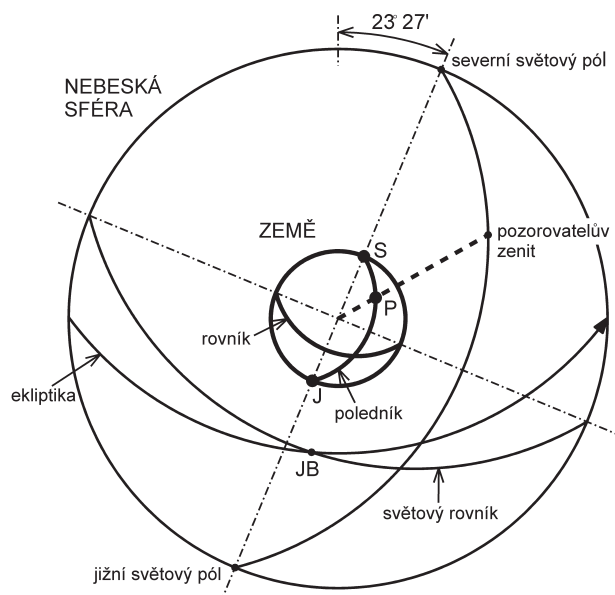
Snaha o stále preciznější definici sekundy v sobě odráží vývoj, kterým fyzika a v důsledku toho i chronometrie prošly. Tak došlo k tomu, že první definice sekundy, která zcela přirozeně vycházela z rotace Země, byla v druhé polovině 20. století dvakrát redefinována. I další definice – efemeridová sekunda – vycházela z pohybů nebeských těles, ale tentokrát z oběžného pohybu Země kolem Slunce. Současná definice – atomová sekunda – je už založena na zcela jiném fyzikálním principu než definice předchozí a využívá existence určitých spektrálních čar v elektromagnetickém poli vyzařovaném či pohlcovaném atomy.

Rotační sekunda

Označení *rotační sekunda* vychází z definičního pohybu, kterým je rotace Země. Definice rotační sekundy byla platná až do roku 1956 a stálo v ní, že:

Sekunda je rovna 1/86 400 středního slunečního dne 31. prosince 1899 v 0 hodin.

Abychom definici porozuměli, musíme si nejprve učinit alespoň hrubou představu o pohybech nebeských těles, v tomto případě o vzájemném pohybu Země a Slunce. Na **obr. 1** je znázorněna Země ve středu nebeské sféry, s jejíž pomocí se definuje poloha nebeských těles (a tedy i Slunce) při jejich zdánlivém pohybu po obloze. Z obrázku je patrné, jak průsečnice roviny zemského rovníku se sférou vytváří světový rovník a průsečíky zemské osy se sférou tvoří světové póly – severní a jižní. Bod na sféře, v němž ji protíná vertikála vztyčená v místě pozorovatele, se nazývá zenit.



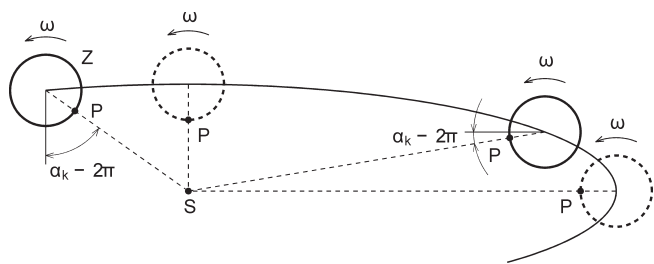
Obr. 1: Země uprostřed nebeské sféry. Pozorovatel se nachází v bodě P. Jarní bod je označen JB.

Důležitým bodem na nebeské sféře je průsečík zdánlivé dráhy (ekliptiky) Slunce na obloze se světovým rovníkem. Při přechodu Slunce z jižní hvězdné oblohy do severní nastává jarní rovnodennost, a proto se tomuto průsečíku říká *jarní bod*. Poloha hvězd na nebeské sféře se určuje dvěma souřadnicemi: *rektascenzí* a *deklinací*. Rektascenze je oblouk na světovém rovníku mezi jarním bodem a průsečíkem světového rovníku s tzv. deklinační kružnicí hvězdy. Ta je na nebeské sféře analogií zemského poledníku. Prochází oběma světovými póly a sledovanou hvězdou a je kolmá na světový rovník. Deklinace je pak oblouk na této kružnici mezi hvězdou a světovým rovníkem, jak je znázorněno na **obr. 1**.

Země otáčející se kolem své osy vytváří pro pozorovatele na Zemi časové intervaly, určené vždy dvěma následujícími kulminacemi Slunce. Kulminace přitom odpovídají okamžikům

kům, kdy Slunce prochází nejvyšším místem nad obzorem, tj. kdy protíná myšlenou rovinu tvořenou světovými póly a pozorovatelským zenitem. Systém „otáčející se Země – Slunce“ představuje sluneční hodiny, jejichž základním časovým intervalem je tzv. *pravý sluneční den*. Rovnoměrnost, s jakou je vytvářen, závisí ovšem nejenom na samotném definičním pohybu, tedy na otáčení Země kolem své osy, nýbrž i na způsobu, jakým se pravý sluneční den z tohoto otáčivého pohybu odvozuje. V našem případě jej vymezuje sluneční kulminace, a ta je nestálá, jakmile referujeme k jiným, rovnoměrnějším časovým intervallům.

Existují dva důvody, které způsobují, že pravý sluneční den nemůže být v principu rovnoměrný časový interval. Prvním z nich je skutečnost, že Země obíhá kolem Slunce po elipse (Slunce je přitom v ohnisku), v důsledku čehož se mění v průběhu roku vzdálenost Země od Slunce i rychlost jejího pohybu po oběžné dráze. Pozorovateli na Zemi se pak jeví sluneční kulminace podle **obr. 2** nakresleného tak, že rovina oběžné dráhy je totožná s rovinou papíru. Pro lepší názornost předpokládáme, že i rovina zemského rovníku je totožná s rovinou papíru (rovinou oběžné dráhy) a že se pozorovatel P nachází na rovníku. Úhel, o nějž se otočí Země mezi dvěma slunečními kulminacemi určenými pozorovatelem, označíme α_k .



Obr. 2: Vliv eliptické oběžné dráhy Země (Z) kolem Slunce (S) na délku pravého slunečního dne. Pozorovatel se nachází v bodě P.

Z **obr. 2** je zřejmé, že pro α_k platí $\alpha_k > 2\pi$, tj. Země se musí po vykonání jedné otáčky ještě natočit o úhel $\alpha_k - 2\pi$, aby se Slunce dostalo do roviny pozorovatelova zenitu. Poněvadž se však úhel $\alpha_k - 2\pi$ mění v závislosti na vzájemné poloze Země a Slunce, mění se i délka pravého slunečního dne, třebaže úhlovou rychlost otáčející se Země považujeme za konstantní. K tomuto jevu by nedocházelo, kdyby Země buď neobíhala kolem Slunce, anebo kdyby kolem Slunce obíhala po kružnici se Sluncem v jejím středu.

Je tu však ještě druhý důvod, který spolupůsobí nerovnoměrnost pravého slunečního dne a který jsme v **obr. 2** neuvažovali, a to je náklon roviny zemského rovníku vůči rovině oběžné dráhy, který činí $23^\circ 27'$. Vliv náklonu lze pozorovat na **obr. 1**. Sledujeme-li úhel, který svírá tečna vedená k ekliptice v její rovině s rovinou světového rovníku, vidíme, že se mění. V okolí jarního a podzimního bodu je největší, na počátku zimy a léta nulový (tečna k ekliptice je rovnoběžná s rovinou světového rovníku). Proto se dva stejné úseky opsané Sluncem na ekliptice promítají na světový rovník nestejně a interval mezi dvěma slunečními kulminacemi se mění.

I když jsou oba vlivy systematické a lze je tedy předpovědět a provést korekci, pravý sluneční den se pro svou nerovnoměrnost k definici jednotky času nehodí. Proto byl zaveden pojem *střední sluneční den*, který je ročním průměrem pravých slunečních dnů. Potom, jak stojí v definici, $1/86400$ středního slunečního dne je *střední sluneční sekunda*. Střední sluneční den i z něho odvozená sekunda jsou tedy intervaly vypočtené a sluneční hodiny tvořené systémem „otáčející se Země – Slunce“ je přímo nevytvářejí. Sekunda podle této definice fyzicky existuje pouze zprostředkovaně, pomocí jiných hodin. Mluvíme-li o ročním průměru, je ještě třeba říci, že rokem (v tomto případě slunečním nebo též tropickým) se rozumí interval mezi dvěma průchody Slunce jarním bodem ekliptiky. Jeden tropický rok je přitom roven $365,2422$ středních slunečních dnů.

Prakticky se pravý sluneční den nestanovuje přímo ze sluneční kulminace, nýbrž z kulminace stálic, což jsou všechny hvězdy kromě Slunce. Jak už jejich název říká, vyznačují se stálou polohou vůči Zemi, ať je pozorujeme z jakéhokoli místa oběžné dráhy. Je to proto, že rozměry oběžné dráhy jsou zcela zanedbatelné proti ohromným vzdálenostem, které oddělují hvězdy od Země. Určování intervalu mezi dvěma kulminacemi hvězdy potom nezávisí na obíhání Země kolem Slunce, jako tomu bylo při určování pravého slunečního dne. Základní interval hvězdného času tzv. hvězdný den, který se vztahuje ke kulminacím jarního bodu, je proto mnohem rovnoměrnější než pravý sluneční den. Tím, že vztahujeme svá pozorování k jarnímu bodu, narážíme však opět na určitou potíž. Jarní bod nemá totiž mezi hvězdami na nebeské sféře pevnou polohu, nýbrž se pomalu posouvá po ekliptice proti směru zdánlivého pohybu Slunce. Jeden oběh mu přitom trvá asi 26 000 let. Tento pohyb, jemuž se v astronomii říká *precese*, vzniká v důsledku měnícího se náklonu zemské osy vůči rovině oběžné dráhy. Náklon je ovlivňován přitažlivými silami Slunce a Měsíce, které působí na nerovnoměrně rozloženou hmotu Země. Kdyby Země nebyla zploštělá, precese by nenastávala. Kombinovaným působením těchto sil vykazuje precese kromě pomalé rovnoměrné složky ještě rychlejší periodickou složku zvanou *nutace*. Precese i nutace mají vliv na vymezení slunečního roku, neboť ten, jak již víme, je vztažen právě k jarnímu bodu. Sluneční rok je proto poněkud kratší než rok hvězdný, neboť ten se vztahuje k pevnému bodu ekliptiky nepodléhajícímu precesi ani nutaci.

Počet hvězdných dnů v roce je o jeden vyšší než počet dnů slunečních. Tuto skutečnost lze snadno vysvětlit, když si představíme, že rotace zemská neexistuje a že se Země na své cestě kolem Slunce natáčí pouze tak, aby měl pozorovatel Slunce stále v kulminaci. Pak ovšem sluneční čas ve smyslu definice přestane pozorovateli plynout. Hvězdný čas mu však plynout nepřestane, neboť vůči hvězdám se bude pozorovatel stále pomalu otáčet tak, jak bude Země postupovat po oběžné dráze a natáčet se ke Slunci. Výsledkem bude, že se pozorovatel za jeden rok otočí právě jednou kolem zemské osy, a toto jedno otočení zaznamená jako jeden hvězdný den a napočítá jej navíc oproti dnům slunečním. Hvězdný den vyjádřený ve středním slunečním čase je proto asi o 4 minuty kratší než střední sluneční den. Podobně jako

tomu bylo u slunečního času, i zde se matematickou cestou zavádí pojem *střední hvězdný den*, jímž se rozumí interval mezi dvěma kulminacemi tak zvaného středního jarního bodu, tj. jarního bodu zbaveného nutace.

Všechny vlivy narušující rovnoměrnost rotačního času, o nichž jsme hovořili, mají systematický charakter a nebeská mechanika je umí předvídat. Lze je tedy matematickou cestou odstranit a učinit rotační čas, ať sluneční či hvězdný hypoteticky rovnoměrný. Až na výhrady praktického rázu, mohli bychom být s touto definicí sekundy vcelku spokojeni. Jistou nevýhodou je hlavně skutečnost, že definiční pohyb v systému „otáčející se Země – Slunce“, neposkytuje jednotku času přímo, nýbrž pouze zprostředkovaně. Základní interval – pravý sluneční den – je navíc pro praktickou potřebu příliš dlouhý a sekundu z něho nelze získat jinak než nějakými pomocnými hodinami. To všechno by ještě tolik nevadilo, kdyby se neukázala zásadní a principiální potíž, že totiž rotace Země není rovnoměrná. Toto zjištění očekávali astronomové i fyzikové již dříve, neboť pohled na Zemi jako na zploštělou kouli vyplněnou homogenní nehybnou masou je jen hrubá aproximace. Ve skutečnosti je zemská masa proměnlivá a značně nehomogenní, a tak veškerý její vnitřní pohyb a přesuny (přiliv a odliv, oceánské proudy, proudění atmosféry, tektonická činnost atd.) musí nutně působit i na úhlovou rychlost zemské rotace. Tu si pak můžeme představit jako superpozici složky konstantní, zajišťující ono hypotetické rovnoměrné otáčení, a složek rušivých, které mohou být pomalé i náhlé, periodické i náhodné. Otázka je, jak tyto rušivé složky zjistit a nepravidelnost zemské rotace prokázat, kde vzít jiný referenční pohyb, o němž bychom mohli předpokládat, že je rovnoměrnější než zemská rotace.

Takovými pohyby jsou oběžné pohyby nebeských těles, tj. planet kolem Slunce a měsíců kolem planet, zvláště pak obíhání Měsíce kolem Země, neboť to lze sledovat velice přesně. Planety a měsíce nabízejí v průběhu času řadu různých charakteristických seskupení a koincidenčí, které umí nebeská mechanika předvídat. Jelikož tyto úkazy pozorovali astronomové již v dávné minulosti a zanechali o svých pozorováních záznamy, lze dnes jejich pečlivým porovnáním s teoretickou předpovědí dojít k závěrům o dlouhodobé tendenci zemské rotace. Již na počátku minulého století zjistil hvězdář Newcomb, že poloha Měsíce, tak jak ji průběžně sledoval, neodpovídá poloze vypočtené. Vztaženo k rotačnímu času, Měsíc se vůči vypočtené poloze někdy „předbíhá“, jindy „opoždí“. Již tehdy vyslovil Newcomb domněnku, že by jev mohl být způsoben nerovnoměrností zemské rotace. V roce 1939 ukázal anglický hvězdář S. Jones, že podobné tendence má i Slunce a planeta Merkur, a potvrdil tak domněnku Newcombovu. Došel i k dalšímu zajímavému závěru. Pozorováním záznamů o zatmění Slunce již od 7. století před naším letopočtem zjistil, že se perioda zemské rotace prodlužuje, a to v průměru asi o 1,6 ms za století. Toto tzv. sekulární zpomalování se vysvětluje postupnou ztrátou kinetické energie Země v důsledku působení slapových sil.

Odhalit krátkodobé fluktuace v zemské rotaci však oběžné pohyby planet a Měsíce nemohou, neboť tolerance, s níž lze okamžik nebeské koincidence určit, je větší než samotné

krátkodobé fluktuace. Zde je potřeba hodin, jejichž definiční pohyb je krátkodobě dostatečně rovnoměrný a které umožňují velice přesné určování časového okamžiku. Soubor velice dokonalých kyvadlových hodin, jenž byl systematicky dlouhodobě sledován v letech 1936 až 1937 pracovníky pařížské observatoře, se na jaře a létě proti rotačnímu času předcházeli, na podzim a v zimě naopak zpožďoval. Bylo zřejmé, že tyto sezónní změny vykazuje zemská rotace. Pozdější poválečná pozorování, již s pomocí hodin založených na krystalových oscilátorech, tyto závěry potvrdila.

Ze současných dlouhodobých záznamů získaných proti atomové časové stupnici vyplývá, že zemská rotace vykazuje celou řadu periodických rušivých složek. Kromě sezónních variací s roční a půlroční periodou o amplitudě 25 ms a 9 ms, lze ve spektru nalézt i rychlé složky s periodou 14 a 28 dnů, obě s amplitudou kolem 0,7 ms a pomalou složku s periodou asi 18,6 roku s výraznou amplitudou kolem 150 ms. Všechny tyto složky se dají vysvětlit souhrnným působením přitažlivých sil Slunce, Měsíce a planet na Zemi. Do další kategorie fluktuací ovlivňujících rotační čas spadají fluktuace způsobené pohybem zemských pólů. Osa zemské rotace se vůči zemské ose přesouvá, což ovlivňuje zeměpisné souřadnice míst na zemském povrchu, tím i rektascen-si a v důsledku toho i rotační čas.

Shrme-li uvedené poznatky, dojdeme k závěru, že rotační sekunda nepředstavuje rovnoměrný časový interval, který by vyhovoval současné fyzice, a tudíž rotace Země není vhodný definiční pohyb. Proto se metrologie snažila nalézt vhodnější definici sekundy, která by fyzice poskytovala rovnoměrnější časovou bázi.

Efemeridová sekunda

Jak jsme se již zmínili, rovnoměrnější než rotace Země jsou oběžné dráhy nebeských těles. K nim právě referoval Newcomb, když poprvé pojal podezření, že s rotací zemskou to není tak docela v pořádku. Proto byl jako základ nové definice sekundy vybrán oběžný pohyb Země kolem Slunce:

Sekunda je 1/31 556 925,974 741 5 tropického roku pro 12 hodin 0. ledna 1900 efemeridního času.

Tato definice pochází z roku 1956 a byla ratifikována na 11. Generální konferenci pro míry a váhy CGPM, konané roku 1960. Přívlasek *efemeridový* je odvozen od slov *efemeris*, tj. tabulky, která udává vzájemné polohy Slunce, planet a Měsíce předpovězené na základě nebeské mechaniky. Hodnota jmenovatele v definičním zlomku byla zvolena tak, aby se efemeridová sekunda svou délkou co nejvíce přiblížila k sekundě rotační. Datum 0. ledna použité v definici odpovídá konvenci používané v astronomických ročenkách a označuje den před 1. lednem daného roku, tedy 31. prosinec minulého roku.

Efemeridová sekunda poskytuje z dlouhodobého hlediska zcela jistě rovnoměrnější bázi než sekunda rotační. Potud by bylo vše v pořádku a s definicí bychom mohli být spokojeni. Potíž je v tom, že efemeridová sekunda je ještě nepřístupnější než sekunda rotační. Nemůžeme ji získat okamžitě, nýbrž teprve postupným upřesňováním na základě dlouhodobých systematických pozorování. Pokud někdo po-

třeboval určit rotační sekundu, získal ji na základě pozorování hvězdných kulminací v principu za jediný den. Použil-li k tomu dokonale pozorovací zařízení, určil kulminaci s přesností až 1 ms. Měl-li navíc interpolační hodiny, které během pozorování poskytovaly dostatečně rovnoměrnou časovou základnu, mohl za jediný den realizovat sekundu s rozlišením v řádu 10^{-8} . I to už však bylo nepraktické a zdoluhavé. Po této stránce je to s efemeridovou sekundou ještě horší. Důvodem je skutečnost, že oběžné pohyby nebeských těles mají mnohem delší periodu než rotace zemská a určování okamžiku nebeských koincidencí je poměrně nepřesné. Prakticky se efemeridový čas odvozuje podle zákrytu hvězd Měsícem. Avšak i při použití nejpresnějších pozorovacích přístrojů nelze určit okamžik zákrytu s přesností lepší než stovky milisekund. Z toho ovšem vyplývá, že na stejné rozlišení musíme u efemeridové sekundy čekat déle, než tomu bylo u sekundy rotační. Zatímco u rotační sekundy jsme na rozlišení v řádu 10^{-8} museli čekat 1 den, musíme u efemeridové sekundy čekat na stejné rozlišení přibližně 100 dnů.

Snad by se i přes tyto obtíže efemeridová sekunda udržela a i fyzika by ji prakticky přijala. V době, kdy se o zavedení efemeridové sekundy rozhodovalo, existovaly již velice stabilní krystalové oscilátory, které poskytovaly dostatečně rovnoměrnou časovou základnu pro interpolaci mezi astronomickými pozorováními. Byla tu však kvantová mechanika a s ní spojená spektroskopie, jejíž nebývalý rozvoj přinesl do chronometrie zásadní změny.

Atomová sekunda

Nebeské periodické pohyby, na nichž jsou založeny obě astronomické definice sekundy, rotační i efemeridová, si dovedeme snadno představit. Jsou nám svou makroskopickou podstatou blízké, a dovedeme je popsat na základě osvědčené Newtonovské mechaniky.

Kvantová spektroskopie nám však nabízí periodické pohyby ze zcela jiného světa, ze světa molekul a atomů, pohyby s rovnoměrností nesrovnatelně větší než mají pozorovatelné pohyby makroskopické. Cesta k jejich objevení a hlavně k poznání jejich zákonů nebyla jednoduchá. Už proto, že se o mikrokosmu a jeho uspořádání můžeme dovídat pouze nepřímo, zprostředkovaně, a soudit o něm a utvářet si svoje představy jen na základě jeho integrálních projevů ve světě našich rozměrů. I přesto fyzikové objevili mnoho pozoruhodných a mnohdy ne zcela očekávaných jevů. Patří mezi ně i existence spektrálních čar v elektromagnetickém poli vyzařovaném či pohlcovaném atomy, jev, který předurčil definici atomové sekundy. Aby i čtenář neznalý principů kvantové mechaniky této definici v hrubých rysech porozuměl, považujeme za účelné nejprve zopakovat základní představy, na kterých je kvantová definice sekundy založená.

Klasická fyzika si představovala atom v podobě jakési miniaturní sluneční soustavy. Jádru atomu složené z kladně nabitého protonu a elektricky neutrálního neutronu bylo ekvivalentní Slunci, zatímco planetám odpovídaly záporně nabitě elektrony, které obíhaly kolem jádra. Gravitační síly přitahující nebeská tělesa byly nahrazeny silami elektrickými, jimiž na sebe působily elektricky nabitě částice. Předpo-

kládalo se, že Newtonova mechanika i Maxwellova teorie elektromagnetického pole mají v přírodě platnost zcela univerzální, stejně v dalekém vesmíru jako v nitru atomu, a proto se klasická fyzika snažila popsat veškerý vnitřní pohyb atomu právě pomocí těchto teorií. Ukázalo se však, že tyto představy selhávají, že jsou v rozporu se skutečností. Tak například pohybující se elektron nemůže vyzařovat elektromagnetickou energii, jak předpovídá Maxwellova teorie. Podle ní nabitá částice konající kruhový pohyb s úhlovou rychlostí ω , tj. pohyb, při kterém na částici působí neustále zrychlení, musí vyzařovat elektromagnetické pole o určité frekvenci. Kdyby tomu tak ovšem bylo a elektron energii skutečně vyzařoval, jeho rychlost by se neustále zpomalovala, poloměr oběžné dráhy by se zmenšoval, až by elektron dopadl na jádro a atom by se zborčil. Jevů, které klasická fyzika nedovede vysvětlit, existuje celá řada, z čehož plyne závěr, že mikroskopické objekty se chovají jinak, než jsme zvyklí z makrokosmu.

Kvantová mechanika, jež vystihuje zvláštní povahu mikročástic, jejich stav, jejich pohyb, neznamena však popření mechaniky klasické. Tu v sobě zcela zahrnuje a pro makroskopické objekty v ní přechází. V klasickém pojetí byly částice v pravém slova smyslu částicemi, jakými nepatrnými pohybujícími se kuličkami, které se od makroskopických předmětů lišily jen svými rozměry. Jejich stav v prostoru a v čase mohl být proto znám v principu s neomezenou přesností. V kvantovém pojetí je tomu jinak. Makroskopický objekt má jak korpuskulární, tak vlnový charakter a v závislosti na interakci se svým okolím se někdy projevuje jako částice jindy zase jako vlna. Mikrokosmický objekt je tak jednotou dvou koncepcí – korpuskulární a vlnové, vyjádřenou vzájemným spojujícím jeho hybnost p s délkou vlny λ

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js je Planckova konstanta.

V mikrokosmu nemá částice svou trajektorii v tom smyslu, v jakém jsme zvyklí chápat trajektorii makroskopických objektů. Stav částice se popisuje jistou parciální diferenciální rovnicí, jejímž řešením je komplexní funkce prostorových souřadnic a času, které se říká vlnová funkce. Kvadrát amplitudy vlnové funkce vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou se částice nachází v určitém místě v prostoru. Podle klasické mechaniky, kdybychom nějakým způsobem znali stavy všech mikrokosmických objektů v jednom okamžiku, mohli bychom v principu určit i jejich stavy v libovolném okamžiku v budoucnosti. Podle kvantové mechaniky nikoliv. Tam je vývoj pouze věcí určité pravděpodobnosti, což však neznamena, že by kvantová mechanika nebyla deterministická. Její determinismus spočívá v tom, že jestliže známe vlnovou funkci v jednom okamžiku, známe ji jednoznačně i v kterémkoliv okamžiku následujícím. Pravděpodobnost vyplývající z vlnové funkce je třeba interpretovat tak, jako by částice byla rozmazána v prostoru.

Elementární částice atomu se různým způsobem pohybují, interagují, přitom však na sebe působí soudržnými silami, v jejichž důsledku se atom jeví jako stabilní soustava. Vedle

elektrostatické interakce mezi elektronem a jádrem existuje tu i interakce v důsledku orbitálního a vlastního úhlového momentu elektronu a u atomů s více elektrony působí ještě elektrostatické a magnetické síly mezi jednotlivými elektrony. Tento složitý vnitřní pohyb atomu určuje jeho stav, jemuž odpovídá určitá celková energie. Podle kvantových představ se však tato energie nemůže měnit spojitě, nýbrž jen v diskretních krocích – v energetických kvantech. Jestliže atom interaguje s jinými atomy či částicemi, pak jediné, co může změnit jeho stav, je pohlcení nebo vyzáření elektromagnetické energie. Rovněž tato výměna energie s elektromagnetickým polem se děje v kvantech. Kvantum elektromagnetického pole – foton – se chová podobně jako elementární částice. Lze mu přisoudit vlastnosti vlnové i korpuskulární.

Foton příslušící monochromatickému záření o frekvenci f má přitom energii

$$E = hf.$$

Změní-li atom svůj stav z nějaké vyšší energetické úrovně E_2 na nižší úroveň E_1 ($E_2 > E_1$), vyzáří přitom energii odpovídající jednomu fotonu

$$hf = E_2 - E_1.$$

Pohltní-li atom nacházející se ve stavu E_1 týž foton, přejde zase zpět na úroveň E_2 . Energie E_1 , E_2 nejsou ovšem libovolné, neboť atom libovolnou energii nabývat nemůže. E_1 a E_2 musí patřit mezi povolené diskretní úrovně, které tvoří pro každý atom určitou posloupnost danou kvantově mechanickými pravidly. Posloupnost povolených úrovní energie určuje i frekvence spektrálních čar odpovídajících přechodům mezi jednotlivými energetickými stavy atomu. Obecně však všechny přechody odpovídající možným kombinacím povoleny nejsou. Které přechody jsou povoleny, to opět vyplývá z kvantově mechanických pravidel. Je nasnadě, že čím složitější má atom strukturu, tím více stavů může zaujímat a tím větší je i počet čar v jeho spektru. Proto také nejjednodušší spektrum má atom vodíku tvořený jádrem a jediným elektronem.

Stav elektronu v atomu je charakterizován čtyřmi kvantovými čísly n, l, m, s . Hlavní kvantové číslo $n = 1, 2, 3, \dots$, vedlejší kvantové číslo $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$, magnetické kvantové číslo m ($-l \leq m \leq l$) a spinové kvantové číslo $s = -1/2, 1/2$. Přitom podle Pauliho vylučovacího principu nejsou v atomu přítomny dva elektrony, které by měly všechna čtyři kvantová čísla stejná.

Každý izolovaný atom má snahu dříve či později zaujmout stav s minimální energií, kterému se říká *základní stav*. Atom je v tomto stavu nejstabilnější. Elektrony, které mají stejné hlavní kvantové číslo n , se v radiálním směru od jádra shlukují a vytvářejí kolem jádra slupky. Čím blíže k jádru, tím nižší mají elektrony energii. Slupce s nejnižší energií odpovídá nejnižší kvantové číslo n . Vzhledem k tomu, že u atomů se složitější strukturou je prakticky nemožné vyjádřit všechny energetické stavy, zjednodušuje se situace tím, že se sledují pouze stavy, které mohou zaujmout elektrony nacházející se mimo zaplněné slupky. Tyto elektrony mohou svůj stav změnit mnohem snáze než elektrony v zaplněných slupkách.

Přechod atomu na jinou energetickou úroveň je spojen s vyzářením nebo pohlcením elektromagnetické energie.

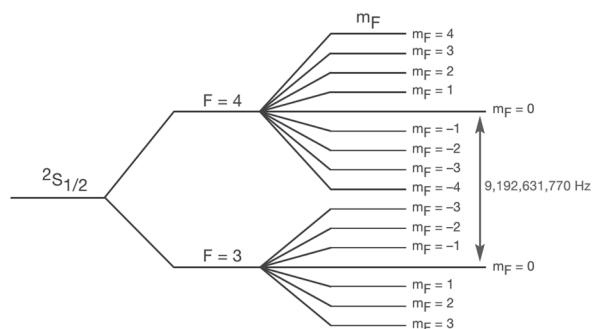
Energetické stavy atomů se obvykle zakreslují do diagramu. Povolené úrovně jsou znázorněny vodorovnými úsečkami, mezi nimiž jsou naznačeny i některé z možných přechodů spolu s příslušnými frekvencemi. Znovu je třeba si uvědomit, že ne všechny přechody jsou povolené. Hlavní kvantové číslo n je připsáno ke každé úsečce, zbylá tři čísla jsou pak skryta v symbolickém zápisu ve tvaru $^{2m+1}l_s$, kde se ovšem vedlejší kvantové číslo l vyjadřuje písmeny místo číselné hodnoty, např. „S“ pro $l = 0$, „P“ pro $l = 1$, „D“ pro $l = 2$ nebo „F“ pro $l = 3$. Tak lze např. ze zápisu $^2S_{1/2}$ vyčíst, že $l = 0$, $m = 0$ a $s = 1/2$.

Pohlížíme-li na atom z hlediska jeho spektrálních projevů, mohli bychom jej přirovnat k makroskopické soustavě obsahující velký počet rezonátorů, které určují frekvence, které může soustava přijímat nebo vysílat. Každému rezonátoru přísluší jedna rezonanční frekvence, tj. jedna spektrální čára. Za určitých podmínek lze tedy těchto periodických projevů využít jako referenčních pro účely chronometrie a to nejenom pro samotnou definici sekundy, jako fundamentálního časového intervalu, ale i pro její fyzickou realizaci prostřednictvím kvantových etalonů frekvence.

Co musí atom splňovat, aby mohl být použit k tomuto účelu? Frekvenci odpovídající přechodu, který chceme využít, musíme umět zpracovat a měřit. Takové přechody byly nalezeny. Vyplývají z tzv. velmi jemné interakce mezi elektrony a jádrem, která vzniká vzájemným magnetickým působením v důsledku jejich vlastní točivosti (spinu). Tato interakce je velmi slabá a způsobuje jen malou změnu celkové energie, již zase odpovídá poměrně nízká frekvence přechodu. Znamená to, že energetická úroveň příslušející základnímu stavu i stavům vybuzeným se ještě dále štěpí, přičemž každá nová úroveň je charakterizována novým kvantovým číslem, označeným jako F . Kolik těchto nových úrovní může vzniknout, to určují opět kvantově mechanická pravidla. Ukázalo se, že i tyto velmi jemné úrovně se ještě mohou štěpit (Zeemanův jev), a to působením vnějšího magnetického pole. Vzniklé podúrovně jsou charakterizovány dalším kvantovým číslem, jež je zvykem označovat m_F . Příklad takového štěpení ukazuje **obr. 3**, na němž jsou znázorněny velmi jemné úrovně

$F = 3$ a $F = 4$ atomu cesia v základním stavu $^2S_{1/2}$ a jejich další štěpení na podúrovně m_F v závislosti na intenzitě vnějšího magnetického pole H . Z obrázku je patrné, jak se s rostoucí hodnotou m_F zvyšuje i závislost energie na intenzitě magnetického pole. Minimalizace této závislosti je důležitým požadavkem při volbě přechodu, neboť závislost se odráží i ve frekvenci, která přechodu odpovídá. Z tohoto hlediska je v daném případě nejvhodnější přechod mezi úrovněmi $F = 3$, $m_F = 0$ a $F = 4$, $m_F = 0$. Někdy se píše symbolicky $F(3, 0) \leftrightarrow F(4, 0)$.

Rovněž se od vhodného atomu požaduje, aby nabýval předepsané energie s co možná největší pravděpodobností. K tomu je třeba dostatečné separace od sousedních povole-



Obr. 3: Schematické znázornění energetických hladin základního stavu atomu cesia 133.

ných úrovní, neboť malá separace může způsobit nežádoucí přechody právě na tyto sousední úrovně. Každý atom má nejvíce separovány úrovně odpovídající základnímu a prvnímu vybuzenému stavu, absolutně největší separace úrovní mají pak atomy, jejichž základní stav je právě $2S_{1/2}$.

Vzhledem k tomu, že se v kvantových etalonech frekvence využívá magnetické interakce, musí mít atom i vhodné magnetické vlastnosti. To se týká jeho celkového magnetického momentu, který by měl být především nenulový, ne však zase příliš velký, aby nedocházelo vlivem interakce s ostatními atomy k nežádoucímu rozšíření spektrální čáry.

Velice důležitá je i celková inertnost atomu. Měl by být inertní jak vůči ostatním shodným atomům, tak vůči všem atomům i molekulám nacházejícím se v prostoru interakce s elektromagnetickým polem.

Poslední požadavek má úzkou souvislost s uspořádáním kvantového etalonu. Jestliže se detekce atomů, které uskutečnily přechod, děje tak, že se atomy ionizují a detekují jako ionty, je zapotřebí, aby měl atom i dostatečně nízký ionizační potenciál.

Shrneme-li hlavní požadavky heslovitě, jsou to: nízká frekvence přechodu, vysoká pravděpodobnost vybraného stavu, vhodné magnetické vlastnosti, malá závislost frekvence přechodu na vnějším magnetickém poli, inertnost, nízký ionizační potenciál. Ukazuje se, že tyto požadavky jsou do jisté míry protichůdné, a proto i volba vhodného atomu představuje kompromis, kterému vyhovuje například atom vodíku nebo atomy alkalických kovů, zvláště pak rubidia a cesia.

Možnosti využití spektrálních čar odpovídajících těmto přechodům pro účely chronometrie se začaly jevit reálné již krátce po válce. Na počátku 50. let byl v americkém NBS (National Bureau of Standards) zkonstruován první cesiový svazkový etalon a v roce 1955 pak také v britské NPL (National Physical Laboratory). Na základě měření provedených Greenwichskou observatoří vůči rotační sekundě byla stanovena frekvence odpovídající použitému přechodu atomu cesia, jehož hodnota činila 9 192 631 830 Hz. Tak byla definována jakási provizorní časová jednotka – atomová sekunda. Bylo však nutné měřením ověřit její vztah k sekundě efemeridové. Toto měření dlouhodobého charakteru bylo realizováno v NPL a USNO (U. S. Naval Observatory) a v lednu 1957 dospěla měření a jejich vyhodnocení k závěru, že hodnota

frekvence odpovídající přechodu v atomu cesia vůči efemeridové sekundě činila 9 192 631 770 Hz, tedy o 60 Hz méně než činila původně stanovená hodnota vůči sekundě rotační.

Přestože formálně stále platila definice efemeridová, atomová sekunda se uplatňovala více a více, úměrně s rostoucím počtem cesiových svazkových etalonů. S dalším zvýšením jejich přesnosti a frekvenční stability bylo jen otázkou času, kdy dojde k redefinici sekundy. Formálně byla nová definice sekundy přijata v říjnu 1967 13. Generální konferencí pro míry a váhy CGPM a její znění bylo následující:

Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133.

Definice sekundy byla později roku 1997 doplněna na jednání Mezinárodního výboru pro míry a váhy CIPM následujícím dodatkem:

Tato definice odkazuje na atom cesia v klidu při teplotě 0 K.

Záměrem tohoto doplnění bylo ujasnit, že definice sekundy je založena na atomu cesia, který není ovlivněn vyzařováním černého tělesa, to znamená, že se nachází v prostředí s termodynamickou teplotou 0 K. Posun frekvence primárních etalonů způsobený tímto vyzařováním by proto měl být korigován.

V roce 2011 vzala 24. Generální konference pro míry a váhy na vědomí návrh Mezinárodního výboru pro míry a váhy CIPM na novou definici sekundy, která se však týká pouze změny formulace tak, aby měla shodný tvar pro všechny základní jednotky. Definice sekundy by měla mít podle návrhu znění:

Sekunda, symbol s, je jednotkou času; její velikost je určena stanovením číselné hodnoty frekvence hyper-jemného rozštěpení základního stavu atomu cesia 133 v klidu a při teplotě 0 K tak, aby se rovnala přesně 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce soustavy SI s⁻¹, což je rovno Hz.

Zatímco u astronomických definic byla sekunda vymezena zlomky definiční periody (rotační sekunda zlomku středního slunečního dne, efemeridová sekunda zlomkem tropického roku), je atomová sekunda vymezena násobkem definiční periody, což je velice důležitá podmínka pro bezprostřední přístupnost sekundy. Definice je úzce spjata s konkrétními přístroji – cesiovými etalony frekvence. Každý takový etalon, jakých dnes pracuje ve světě bezpočet, může definici atomové sekundy realizovat se značnou přesností a lze jej proto považovat za etalon časového intervalu.

Literatura

- [1] O. Buzek, J. Čermák, „Přesný čas ve vědě a technice,“ ÚŘE ČSAV 1987.
- [2] V. Ptáček, „Čas a rotace Země“, Vesmír, roč. 50 (1971), č. 10, s. 295–297.
- [3] E. Wichman, „Quantum Physics Berkeley Physics Course,“ vol. 4, McGraw, 1967.
- [4] „The International System of Units (SI),“ Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 8th edition 2006.
- [5] „Resolutions of the 24th CGPM meeting,“ 17–21 October 2011.

ČASOVÉ STUPNICE A JEJICH STRUČNÁ HISTORIE

Při měření časového intervalu porovnáváme jeho délku s jednotkou času. Pokud ale chceme měřit čas nějaké události, se samotnou jednotkou času nevystačíme. Musíme definovat časovou stupnici, tedy systém, který umožňuje přiřadit jednotlivým událostem jednoznačný časový údaj. Tento časový údaj pak měříme hodinami. Dnes se časové stupnice zpravidla realizují integrací kmitů nějakého referenčního oscilátoru – v kyvadlových hodinách se pomocí hodinového stroje počítaly kyvy kyvadla, v krystalových hodinách se elektronickým čítačem čítají kmity krystalového oscilátoru. Takto chápaná časová stupnice je pak určena jednak jednotkou času a jednak svým počátkem, který se také označuje termínem *epocha*.

Tento článek se pokouší zmapovat dlouhý vývoj časových stupnic od intuitivního vnímání času na základě střídání dne a noci po moderní relativistické časové stupnice. Definice časové stupnice široce užívané k určování času v nejrůznějších oborech lidské činnosti vždy byla výsledkem konsensu mnoha zainteresovaných stran. Do vývoje časových stupnic se proto promítaly nejen odborná hlediska ale i zájmy mocenské a hospodářské a tento vývoj byl často dosti spletitý. Přesné měření času spolu s astronomií dlouho nacházelo praktické využití hlavně v námořní navigaci. Pro námořní velmoci mělo měření času vždy značný národohospodářský a vojenský význam a do jeho rozvoje vkládaly nemalé prostředky, které umožnily vznik institucí systematicky se zabývajících měřením času a udržováním časových stupnic.

Vnímání běhu času bylo vždy spojeno s pohybem Slunce po obloze a s dalšími pravidelně se opakujícími úkazy na obloze. Proto zcela přirozeně postupně vznikla řada časových stupnic odvozených od rotace Země a po dlouhou dobu precizní určování času patřilo k hlavním praktickým úkolům astronomie. Problémem těchto časových stupnic je skutečnost, že Země se nechová jako ideální setrvačnická a z pohledu dnešní fyziky není rychlost její rotace zdaleka konstantní. Snaha o řešení tohoto problému se prolíná celou historií užívání rotačního času. Toto snažení posléze vyústilo v zavedení času atomového, který je na astronomických jevech zcela nezávislý.

Zdálo by se, že zavedením atomového času role astronomie v měření času končí, ale není tomu tak. Atomové hodiny v podstatě řeší pouze problém realizace zdroje velmi přesné a stabilní frekvence. Teoretické otázky spojené s určováním času událostí, dynamický čas, moderní relativistické časové stupnice zůstávají stále převážně doménou fundamentální astronomie. Nakonec i občanský čas, s nímž přicházíme do styku v běžném životě, je nadále svázán s astronomickým rotačním časem. Blízká budoucnost ukáže, zda tato vazba zůstane v nějaké formě zachována i nadále.

Pravý sluneční čas

Pravý sluneční čas bezprostředně sleduje pohyb Slunce na obloze. Nejvíce se tedy blíží intuitivnímu chápání času, podle něhož lidé po tisíciletí řídili svůj denní režim. Pravý

sluneční čas zobrazují sluneční hodiny. Definice pravého slunečního času vychází z hodinového úhlu Slunce, tj. úhlu mezi místním poledníkem a deklinací kružnicí Slunce (průmětem Slunce na horizont). Hodinový úhel se udává v hodinách ($1 \text{ h} = 15^\circ$). Hodinový úhel Slunce je nulový v poledne a roste s pohybem Slunce od východu k západu. Pravý sluneční čas tedy dostaneme tak, že k hodinovému úhlu Slunce přičteme 12 h. Pravý sluneční čas se mění s polohou pozorovatele na Zemi. Vedle místního pravého slunečního času, který závisí na zeměpisné délce, se proto používá Greenwichský pravý sluneční čas, který odpovídá nultému poledníku. Rozdíl mezi místním pravým slunečním časem a Greenwichským časem je dán zeměpisnou délkou daného místa.

Využití pravého slunečního času výrazně komplikuje skutečnost, že délka pravého slunečního dne se během roku mění a pravý sluneční čas tedy plyne nerovnoměrně. Tyto výkyvy mají dvě různé příčiny. Jednak jsou důsledkem toho, že Země neobíhá kolem Slunce po kruhové, ale eliptické dráze a jednak toho, že osa rotace Země není kolmá na rovinu ekliptiky, v níž Země obíhá kolem Slunce. Změny takto realizované jednotky času se během roku pohybují zhruba v mezích $\pm 3 \cdot 10^{-4}$.

Až do druhé poloviny 18. století byl pravý sluneční čas všeobecně užíván jako základ občanského času. Mechanické hodiny používané od konce 13. století byly seřizovány právě vzhledem k pravému slunečnímu času. V podstatě se dá říci, že hodinové stroje sloužily k extrapolaci pravého slunečního času až do jeho příštího stanovení na základě astronomického měření.

V pražském Klementinu se každý den určovalo pravé poledne v Meridianové (poledníkové) siní astronomické věži (**obr. 1**). Je zde instalováno zařízení, které sestává ze struny napjaté ve směru místního poledníku a malého otvoru v okénku na jižní stěně. Kolem poledne se otvorem na bílou plochu promítá sluneční kotouč. Za pravé poledne se považuje okamžik, kdy stín struny pólí obraz Slunce. Toto zařízení se v časové službě využívalo až do počátku 20. století.



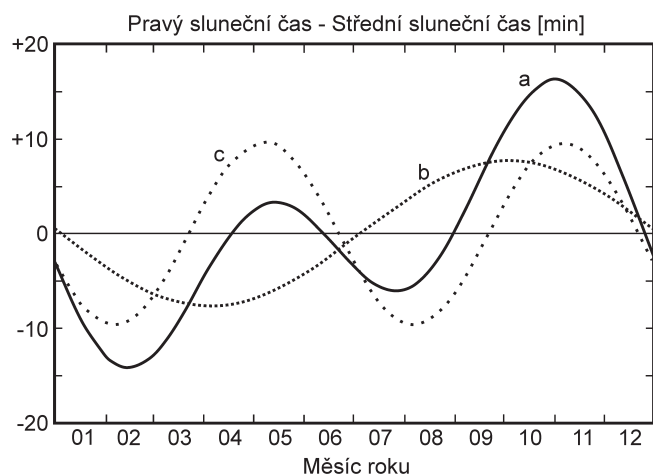
Obr. 1: V pražském Klementinu se až do začátku 20. století určovalo pravé poledne v Meridianové siní astronomické věži.

V novodobé astronomii se pravý sluneční čas již neurčoval měřením průchodu Slunce místním poledníkem, ale s využitím přesnější nepřímé metody založené na měření průcho-

du hvězd místním poledníkem. V současnosti se pak přesná měření rotace Země provádějí na základě moderních přístrojových metod jako je měření signálů družic GNSS (Global Navigation Satellite System) nebo interferometrie na velmi dlouhé bázi VLBI (Very Long Base Interferometry).

Střední sluneční čas

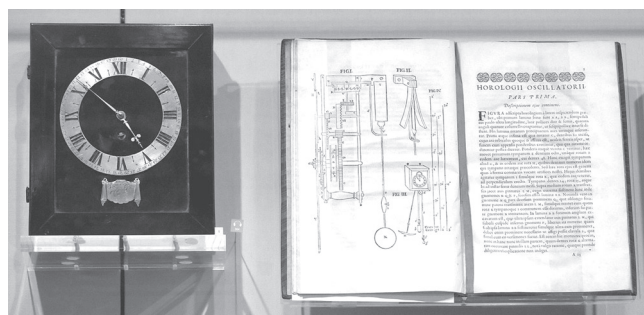
Střední sluneční čas byl zaveden s cílem odstranit nerovnoměrnost pravého slunečního času. Toho bylo dosaženo tak, že skutečné Slunce bylo nahrazeno myšleným bodem, který se rovnoměrně pohybuje nad zemským rovníkem východním směrem rychlostí, která je rovna průměrné rychlosti pohybu Slunce v ekliptice. Tento myšlený bod se označuje jako „střední Slunce“. Stejně jako pravý sluneční čas i střední sluneční čas závisí na zeměpisné délce a máme proto vedle místního středního slunečního času Greenwichský střední sluneční čas, který je základem moderního občanského času.



Obr. 2: Časová rovnice (a) udává rozdíl mezi pravým a středním slunečním časem v průběhu roku. Tento rozdíl má dvě dílčí složky. Složka (b) je způsobena excentricitou oběžné dráhy Země kolem Slunce, složka (c) je způsobena sklonem zemské osy.

Rozdíl mezi pravým a středním slunečním časem udává časová rovnice. Průběh této odchylky v průběhu roku je vynešen v grafu na **obr. 2**. Jsou zde vyneseny i její dílčí složky způsobené excentricitou oběžné dráhy Země a sklonem zemské osy. Hodnota časové rovnice nezávisí na místě pozorování. Z průběhu je zřejmé, že oba časy se shodují čtyřikrát do roka a to 15./16. dubna, 14./15. června, 1./2. září a 25./26. prosince. Mezních hodnot nabývá odchylka 12. února, kdy je pravý sluneční čas opožděn za středním o 14,4 min, a 3. listopadu, kdy pravý sluneční čas předchází střední o 16,4 min. Sklon rotační osy se přitom podílí na časové rovnici maximálně 10 minutami, excentricita oběžné dráhy Země nejvýše 7 minutami.

Koncepce středního slunečního času má svoje počátky už v pracích Klaudia Ptolemaia, kterému byl problém proměnné délky pravého slunečního dne a potřeby rovnoměrné časové stupnice dobře znám. Časová rovnice pak byla poprvé tabelována středověkými arabskými učiteli. Prvním Evropanem, který zpracoval přesné tabulky časové rovnice, byl v roce 1660 Christiaan Huygens. Jeho práce byla motivována potřebou navázat na astronomický čas velmi přesné kyvadlové hodiny (**obr. 3**), které zkonstruoval v roce 1656.



Obr. 3: Jedny z prvních kyvadlových hodin zkonstruovaných Christianem Huygensem a jeho pojednání o kyvadlu *Horologii Oscillatorii* z roku 1673. Huygense uváděl, že přesnost těchto hodin byla asi 10 s za den. Foto: Rob Koopman CC BY-SA 2.0

Stabilita těchto hodinových strojů byla taková, že mechanicky generovaná časová stupnice již byla rovnoměrnější než pravý sluneční čas a navázání na pravý sluneční čas začalo být praktickým problémem. S postupným zdokonalováním hodinových strojů byl během druhé poloviny 18. století a počátkem 19. století při přesném měření času pravý sluneční čas postupně nahrazován středním slunečním časem.

V Praze bylo první distribucí občanského času založeného na středním slunečním čase pražské polední znamení zavedené v roce 1842. Realizovalo se máváním praporem z ochozu astronomické věže Klementina, později také výstřelem z děla na Mariánských hradbách. Pražské polední znamení se řídilo místním středním slunečním časem až do roku 1912, kdy začal být používán středoevropský čas vztažený k poledníku na 15° východní délky.

Hvězdný čas

Střední sluneční čas se běžně určuje na základě měření průchodu hvězd místním poledníkem a tedy přepočtem z hvězdného času. Zatímco sluneční čas je definován na základě rotace Země vzhledem k Slunci, hvězdný (siderický) čas je definován na základě rotace Země vzhledem ke zvořeným hvězdám.

Jeden den hvězdného času netrvá 24 hodin, ale 23 hodin, 56 minut a 4,09 sekundy. Rozdíl je způsoben tím, že zatímco Země vykoná jednu otáčku vůči hvězdám, posune se zároveň po své dráze kolem Slunce. Za jeden rok tak vykoná Země o jednu otáčku více vůči vzdáleným hvězdám než vůči Slunci, které oběhla. Rozdíl přepočítaný na jeden den dává necelé 4 minuty. Hvězdný a sluneční čas mají stejnou hodnotu jednou za rok – o podzimní rovnodennosti.

Střední greenwichský čas GMT

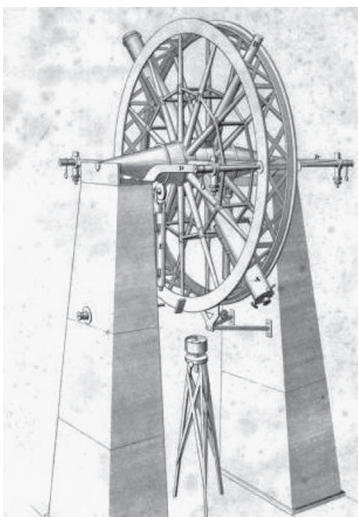
Dnes považujeme za samozřejmé, že zeměpisná délka se měří od greenwichského poledníku. Až do druhé poloviny 19. století to ale vůbec samozřejmé nebylo. Pro potřeby námořní navigace si koloniální velmoci postupně definovaly celou řadu základních poledníků a s nimi spojených úředních časů. Historicky nejvýznamnější byl základní poledník procházející ostrovem El Hiero označovaný také Ferro. Další významné poledníky procházely Paříží, Petrohradem, Římem či Filadelfií. Tento stav byl dále neudržitelný a bylo nutné hledat mezinárodní shodu.

Greenwichský základní poledník začal být postupně používán poté, co greenwichská observatoř začala v roce 1766 vydávat hojně užívanou astronomickou ročenku *The Nautical Almanac*. Oficiálně však byl akceptován jako nultý poledník až po sérii mezinárodních konferencí v letech 1881 až 1884. Mezinárodní poledníková konference (International Meridian Conference) ve Washingtonu v roce 1884 nakonec schválila doporučení vládám 25 zúčastněných zemí, aby poledník, který prochází středem hlavního pasážníku (přístroje pro měření průchodu hvězd poledníkem) v greenwichské observatoři (**obr. 4**), byl přijat jako počáteční poledník pro určování zeměpisné délky a aby zeměpisná délka se od tohoto poledníku měřila 180° východním směrem a 180° západním směrem. Konference také definovala *světový den* (universal day), který je roven střednímu slunečnímu dnu a který na celém světě začíná o střední půlnoci na nultém poledníku a je rozdělen na 24 hodin. Bylo přijato doporučení, aby *světový den* byl užíván pro všechny účely, pro které je vhodný a kde nekoliduje s použitím místních nebo jiných standardních časů.

To, že *světový den* podle definice začíná o půlnoci, nebylo samozřejmé, protože astronomové v té době měřili čas od poledne a v této praxi pokračovali ještě dlouho po oficiálním přijetí *světového dne*. Střední sluneční čas měřený od středního poledne na greenwichském poledníku byl tehdy označován zkratkou GMT (Greenwich Mean Time).

Po první světové válce v roce 1919 byla při pařížské observatoři ustanovena mezinárodní časová služba BIH (Bureau International de l'Heure), jejímž hlavním úkolem bylo koordinovat vysílání různých rádiových časových signálů. Tato činnost spočívala v pravidelném vyhodnocování odchylky časových signálů od času určeného astronomicky a publikování výsledků těchto měření. Publikované výsledky byly přitom vztaženy k greenwichskému občanskému času GCT (Greenwich Civil Time), který byl definován jako $\text{GMT} + 12 \text{ h}$ a měřil se tedy od půlnoci.

Teprve v roce 1925 akceptovali měření času od půlnoci do půlnoci i astronomové, což vedlo k dvanáctihodinové nespojitosti časových údajů v tehdejších astronomických ročenkách. Po této změně britský *Nautical Almanac* pokračoval v označení tohoto času zkratkou GMT, ale americký *American Ephemeris* začal používat nové označení GCT. Ve snaze předejít nedorozumění se začalo pro původní čas GMT



Obr. 4: K měření času průchodu hvězd místním poledníkem se používá pasážník. Jedná se o dalekohled, kterým lze otáčet jen kolem jedné osy v rovině poledníku. Na obrázku je Groombridgeův pasážník z roku 1806.

měřený od poledne používat označení greenwichský střední astronomický čas GMAT (Greenwich Mean Astronomical Time). Z celé této spletné historie je zřejmé, že kolem používání zkratky GMT pro označení času panoval značný zmatek. K nedorozumění však dochází dodnes. Zkratka GMT se často používá pro označení občanského času v základním časovém pásmu, ale zároveň se toto označení používá pro časovou stupnici UT1, o níž se zmíníme dále. Proto se doporučuje zkratku GMT ve spojitosti s přesným měřením času již nepoužívat vůbec.

Světový čas UT

V roce 1928 mezinárodní astronomická unie IAU (International Astronomical Union) doporučila používat pro označení času v astronomických ročenkách namísto zkratk GMT a GCT označení *světový čas* (Universal Time). Toto označení se objevovalo už dříve ve smyslu světového času, který není vázán na časová pásma. V tomto případě však bylo označení *Universal Time* poprvé zavedeno oficiálně.

Od roku 1956 pak IAU zavedla tři verze světového času s označením UT0, UT1 a UT2. Časovou stupnicí UT0 se rozumí greenwichský střední sluneční čas určený na základě měření kdekoli na Zemi. Časovou stupnicí UT1 dostaneme tak, že na UT0 aplikujeme korekci pohybu rotačních pólů Země. UT1 se také označuje jako *rotační čas*. UT2 navíc obsahuje periodickou korekci sezónních změn rychlosti rotace Země.

S časovými stupnicemi UT0 a UT1 se pracuje dodnes. Čas UT1 do roku 1960 sloužil jako časový argument efemerid v astronomických ročenkách. Stupnice UT2 byla počátkem padesátých let 20. století považována za nejdokonalější časovou stupnici a sloužila jako základní reference pro rádiové časové signály. Později, po zavedení efemeridového a atomového času, ale ztratila význam.

Efemeridový čas ET

Se zdokonalováním hodin bylo stále zřejmější, že rychlost zemské rotace je v důsledku různých vlivů nestálá a Země jako etalon času nedokonalá. Rotace Země se dokonce v důsledku působení slapových sil neustále nepatrně zpomaluje. Odpovědí na tato zjištění bylo vytvoření astronomické časové stupnice, která není odvozena od rotace Země, ale z dynamiky pohybu planet sluneční soustavy. Efemeridový čas ET (Ephemeris Time) zavedený v padesátých letech vycházel z modelu založeného na newtonovské mechanice.

Definice efemeridového času ET vychází z časové stupnice navržené v roce 1948 G. M. Clemencem. Tato stupnice je odvozena od doby oběhu Země kolem Slunce tak, jak ji matematicky popsal S. Newcomb ve svých slunečních tabulkách v roce 1895. V souladu s takto definovaným efemeridovým časem také byla definována efemeridová sekunda přijatá v roce 1960 11. Generální konferencí pro míry a váhy CGPM (General Conference on Weights and Measures) za základní jednotku času. Efemeridový čas ET se používal jako argument astronomických efemeridů do roku 1983. Ačkoli byl definován na základě oběhu Země kolem Slunce, prakticky se určoval hlavně z pozorování zákrytů hvězd

Měsícem. Slabinou časové stupnice ET byla především obtížnost její realizace v reálném čase a později také fakt, že nerespektovala relativistické jevy.

Mezinárodní atomový čas TAI

Ve stejné době, kdy astronomové pracovali na konceptu dynamické časové stupnice, kvantová fyzika směřovala k realizaci extrémně rovnoměrné časové stupnice pomocí atomových hodin. Ty využívají skutečnosti, že změny energetických stavů atomů jsou spojeny s pohlcením nebo vyzařením elektromagnetického vlnění o mimořádně přesné frekvenci.

Historie atomových časových stupnic začíná v roce 1955, kdy greenwichská observatoř začala generovat časovou stupnici s označením GA (Greenwich Atomic). Tato stupnice využívala cesiový frekvenční etalon v NPL (National Physical Laboratory) k pravidelné kalibraci svých hodin řízených krystalem. Referenční atomové hodiny nepracovaly trvale, ale zapínaly se jen na krátkou dobu potřebnou k navázání krystalových hodin.

Mezinárodní časová služba BIH zahájila vytváření atomového času v červenci 1955 a tato časová stupnice je nepřetržitě pod různým označením udržována dodnes. Její původní označení bylo AM. Počátek byl stanoven tak, aby 1. ledna 1958 v 0 h byl časový údaj totožný s časem UT2. Při vytváření této časové stupnice se využívaly místní cesiové hodiny a porovnání s atomovými hodinami v kooperujících laboratořích. Porovnávání času probíhalo prostřednictvím dlouhovělných rádiových signálů.

Počet atomových hodin v různých laboratořích rychle rostl a bylo třeba řešit otázku, které budou pro přesnost vytvářené stupnice přínosem a které ne. V roce 1963 mezinárodní časová služba zavedla novou metodiku vytváření atomového času, která nebyla založena na datech všech laboratoří provozujících atomové hodiny jako dosud, ale jen na třech frekvenčních etalonech umístěných v americkém National Bureau of Standards, švýcarském Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères a britské National Physical Laboratory. V souvislosti s touto změnou bylo označení atomové stupnice změněno na A3, aby se zdůraznilo výhradní využití dat ze tří kooperujících laboratoří. Ačkoli byl později počet přispívajících laboratoří zvýšen, označení A3 zůstalo.

V roce 1969 bylo označení časové stupnice plynule navazující na A3 změněno na TA(BIH). Tato časová stupnice byla založena na dílčích časových stupnicích s označením TA(*k*), kde *k* je identifikátor laboratoře, která časovou stupnici realizuje. Tento formální postup se udržel dodnes. Na konci roku 1969 bylo těchto participujících laboratoří sedm. Časová stupnice měla formu časových odchylek [TA(BIH)-TA(*k*)], které byly publikovány jedenkrát měsíčně v cirkulářích BIH. Tyto časové odchylky byly k dispozici se zpožděním jednoho až dvou měsíců a jejich nejistota se pohybovala mezi 1 μs a 10 μs.

V roce 1967 13. Generální konference pro míry a váhy CGPM přijala atomovou sekundu jako jednotku času mezinárodního systému jednotek. Bylo zřejmé, že svět směřuje k širokému využití atomového času a vedle atomové defini-

ce sekundy bude třeba začlenit do metrologického systému také na ni navazující atomovou časovou stupnici. Oficiálně schválila ustanovení mezinárodního atomového času TAI (Temps Atomique International) 14. generální konference pro míry a váhy CGPM v roce 1971. Vytvářením této časové stupnice na základě měření atomových hodin různých institucí byla pověřena BIH. Vzhledem k tomu, že čas TAI plynule navazuje na původní atomovou časovou stupnici BIH, používá se dnes označení TAI pro celou tuto stupnici v celé její historii trvající od roku 1955.

V roce 1976 se tři významné laboratoře shodli na závěru, že časová stupnice TAI se vzhledem k jejich primárním etalonům frekvence odchyluje. Mezinárodní astronomická unie IAU na základě těchto měření vydala doporučení, aby na stupnici TAI byla provedena frekvenční korekce $-10 \cdot 10^{-13}$. Tato korekce byla aplikována od 1. ledna 1977. Jednalo se o první korekci provedenou na základě porovnání s velmi přesnými primárními etalony frekvence. Od této doby se na časovou stupnici TAI aplikují korekce zjištěné z porovnání s vybranými primárními etalony frekvence pravidelně. Tak byla zavedena praxe, kdy se časová stupnice TAI vytváří na základě velkého počtu atomových hodin v několika desítkách laboratoří po celém světě, ale časová jednotka stupnice TAI (sekunda SI) se určuje na základě jen několika primárních etalonů frekvence.

Protože původní definice TAI nerespektovala důsledky obecné teorie relativity, byla v roce 1980 upřesněna v tom smyslu, že TAI je souřadnicový čas definovaný v geocentrickém souřadnicovém systému a vytvářený ze sekundy SI realizované na rotujícím geoidu.

Od roku 1988 převzala odpovědnost za udržování časové stupnice TAI časová sekce Mezinárodního úřadu pro míry a váhy BIPM, která udržuje mezinárodní atomový čas i v současné době. Mezinárodní atomový čas TAI nikdy nebyl přímo šířen ani užíván pro určování času. Tuto roli hraje koordinovaný světový čas UTC (Universal Time Coordinated), který je na časovou stupnici TAI bezprostředně navázán.

Koordinovaný světový čas UTC

Kolem roku 1960 již přední laboratoře času a frekvence vytvářely atomové stupnice a přesný čas šířily po celém světě pomocí rádiových časových signálů. Pro fyziky byla nepochybně představa snadno dostupné, dokonale rovnoměrné časové stupnice atraktivní. Nejčastější využití však časové signály v té době nacházely jako časová reference při astronomické navigaci a pro tuto komunitu byl atomový čas zvolen divergující od otáčení Země těžko akceptovatelnou novinkou. Proto se atomový čas při generování rádiových časových signálů posouval tak, aby časové signály byly v souladu s astronomickou časovou stupnicí UT2. Při znalosti prováděných korekcí tak bylo možné z časových signálů rekonstruovat atomový čas a většinoví uživatelé přitom mohli používat časové signály tak, jak byli dosud zvyklí. Realizace posouvání atomového času byla ale nejednotná a časové signály vysílané různými vysílači proto nebyly konzistentní. Snahy o celosvětovou koordinaci korekcí atomového času pro účely rádiového šíření formálně vyústily v roce 1972 v doporuče-

ní TF.460-6 vydané CCIR (International Radio Consultative Committee). Toto doporučení stanoví, že všechny vysílané časové signály mají co nejpřesněji odpovídat světovému koordinovanému času UTC, který se liší od mezinárodního atomového času TAI o celý počet sekund tak, aby se přibližně shodoval s časovou stupnicí UT1. V roce 1972 bezprostředně po zavedení světového koordinovaného času UTC, činil rozdíl TAI - UTC přesně 10 s. Od té doby bylo do časové stupnice UTC postupně vloženo 25 přestupných sekund, takže obě časové stupnice se v roce 2013 liší o 35 s.

Světový koordinovaný čas UTC je široce využívaná časová stupnice, na jejímž základě se formálním posunutím do příslušného časového pásma vytváří jednotný občanský čas, který slouží ke koordinaci veškeré lidské činnosti.

Terestrický čas TT a další relativistické časové stupnice

Poté, co požadavky na užití přesného času v astronomii dosáhly takové úrovně, že bylo třeba respektovat důsledky obecné teorie relativity, začalo být zřejmé, že efemeridový čas již není dostačující. Mezinárodní astronomická unie proto v roce 1976 přijala definici terestrického dynamického času TDT (Terrestrial Dynamical Time) a barycentrického dynamického času TDB (Barycentric Dynamical Time). Tyto nové časové stupnice již respektovaly obecnou teorii relativity.

Terestrický dynamický čas používal jako jednotku času sekundu SI. Počátek této časové stupnice byl stanoven vzhledem k mezinárodnímu atomovému času TAI tak, že 1. leden 1977 v 0 h času TAI byl ztotožněn s 1. lednem 1977 v 00 h 00 m 32,184 s TDT. Odchylka 32,148 s byla zvolena tak, aby TDT plynule navazoval na efemeridový čas ET. Volba počátku na začátek roku 1977 byla dána tím, že k tomuto času byla na mezinárodní atomový čas TAI aplikována frekvenční korekce, která čas TAI uvedla do lepšího souladu s definicí sekundy SI.

Zatímco čas TDT byl svázán se souřadnou soustavou spojenou se Zemí, čas TDB sloužil jako argument pohybových rovnic popisujících pohyb těles v souřadnicové soustavě vázané na těžiště sluneční soustavy. Od času TDT se lišil o odchylku způsobenou relativistickými jevy. Od roku 1984 byl terestrický dynamický čas TDT používán jako časový argument zdánlivých geocentrických poloh nebeských těles.

Definice časové stupnice TDB ale byla v průběhu 80. let shledána z hlediska obecné teorie relativity jako problematická, což vedlo k revizi. V roce 1991 Mezinárodní astronomická unie definovala dvě nové časové stupnice plně konzistentní s obecnou teorií relativity a to geocentrický souřadnicový čas TCG (Geocentric Coordinate Time) a barycentrický souřadnicový čas TCB (Barycentric Coordinate Time). Nově přijaté časové stupnice přesně odpovídají souřadnicovým časům podle obecné teorie relativity tak, aby základní jednotkou byla sekunda SI a aby jednotky souřadnicových časů s ní byly konzistentní. Počátky nově definovaných časových stupnic jsou totožné se starším terestrickým dynamickým časem TDT. Jednotkou času stupnice TCG je sekunda SI v souřadném systému, který se pohybuje se středem Země. V důsledku obecné teorie relativity je proto frek-

vence této časové stupnice asi o $7 \cdot 10^{-10}$ vyšší než frekvence časové stupnice TDT a atomového času TAI. Jednotkou času barycentrického souřadnicového času TCB je pak sekunda SI v souřadném systému, který se pohybuje s těžištěm sluneční soustavy. Frekvence této časové stupnice je ve srovnání s pozemským časem rovněž vyšší. V tomto případě ale činí tato odchylka v průměru zhruba $1,5 \cdot 10^{-8}$.

Zároveň se zavedením nových relativistických časových stupnic byl v roce 1991 terestrický dynamický čas TDT přejmenován na terestrický čas TT (Terrestrial Time).

Definice časových stupnic TCG a TCB byly dále upřesněny v roce 2000 a zároveň byl terestrický čas TT předefinován na základě časové stupnice TCG, od které se liší jen frekvenční odchylkou tak, aby jeho jednotkou času byla sekunda SI na povrchu Země. Podle nové definice je to tedy souřadnicový čas pro souřadný systém, který se pohybuje se středem Země, ale jednotka času této časové stupnice odpovídá sekundě SI na rotujícím geoidu.

Terestrický čas TT je ideální časová stupnice primárně určená jako argument zdánlivých geocentrických poloh nebeských těles. Pro praktické účely se používají její realizace generované hodinami na zemském povrchu. Realizace časové stupnice TT se označují TT(XXX), kde XXX je identifikátor dané realizace. Jednou z realizací je TT(TAI) = TAI + 32,184 s vhodný pro aplikace, které vyžadují čas téměř v reálném čase. Časová sekce BIPM také jedenkrát za rok publikuje přesnější realizaci času TT s označením TT(BIPMXX), kde XX označuje poslední rok, z něhož byla do výpočtu zahrnuta změřená data.

Výhled do blízké budoucnosti

Po odklonu od astronomické navigace v druhé polovině 20. století, ztratily časové stupnice odvozené z rotace Země širší praktické uplatnění. Znalost rotace Země a koncept klasických časových stupnic má dnes smysl jen pro omezenou vědeckou komunitu. Náš občanský čas je však z definice časové stupnice UTC stále se subsekundovou přesností svázán s rotačním časem UT1.

Koncept navázání světového koordinovaného času UTC na rotační čas UT1 zaváděním přestupných sekund tak, jak je uplatňován od roku 1972, je v poslední době předmětem kritiky, která se opírá o komplikace při využití časové stupnice UTC v nejrůznějších elektronických systémech. Hlavní problém spočívá v tom, že vkládání přestupných sekund nelze dlouhodobě predikovat. Otázka zrušení přímé návaznosti času UTC na UT1 a ukončení vkládání přestupných sekund je horké téma, které má řadu zastánců i odpůrců. Původně se k tomuto tématu měla vyjádřit Mezinárodní radiokomunikační konference WRC (World Radio Conference) v roce 2012, ale hlasování k tomuto bodu bylo nakonec odloženo na jednání WRC v roce 2015. Pokud vyzní rozhodnutí tak, že vkládání přestupných sekund bude zastaveno bez jakéhokoli náhradního opatření, začne se čas UT1 za časem UTC stále více zpoužďovat. Zhruba za 500 let tento rozdíl dosáhne hodnoty kolem 30 min. Ve srovnání s tím, že dvakrát do roka jsme postiženi posouváním občanského času o 1 hodinu tam a zpět, by se zjevně nejednalo o žádnou katastrofu a naši potomci by si s narůstající diferencí jistě nějak poradili.

Literatura

- [1] B. Guinot, P. K. Seidelmann, „Time scales: their history, definition and interpretation,“ *Astronomy and astrophysics*, vol. 194 (1988), pp. 304-308.
- [2] D. D. McCarthy, „Evolution of timescales from astronomy to physical metrology,“ *Metrologia*, vol. 48 (2011), pp. s. 132–s. 144.
- [3] B. E. Blair (editor), „Time and Frequency: Theory and Fundamentals,“ U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Boulder, 1974.
- [4] „The International System of Units (SI),“ Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 8th edition 2006.
- [5] „International conference held at Washington for the purpose of fixing a prime meridian and a universal day,“ *Protocols of the proceedings*, October 1884, Gibson Bros., Printers and Bookbinders, Washington 1884. (dostupné na www.gutenberg.org)
- [6] P. Chadima, „Astronomie v pražském Klementinu“, *Pověroň*, roč. 13 (2005), č. 6, s. 19–26.



KOORDINOVANÝ SVĚTOVÝ ČAS UTC

V současné metrologii času a frekvence má klíčovou roli časová stupnice UTC (Universal Time Coordinated), tedy *koordinovaný světový čas*. Plní přitom dvě dosti rozdílné úlohy. Na jejím základě se ve většině zemí formálním posunutím do příslušného časového pásma vytváří jednotný občanský čas, který slouží ke koordinaci veškeré lidské činnosti. Přicházíme s ní tedy do styku denně, protože na ni navazujeme čas na svých hodinkách. Tato časová stupnice, ale také slouží k činnosti nesrovnatelně přesnější. Jejím prostřednictvím se totiž v laboratořích času a frekvence po celém světě provádí metrologické navázání na sekundu SI.

Tento článek uvádí definice časové stupnice UTC a mezinárodního atomového času TAI, který s UTC bezprostředně souvisí, seznamuje s tím, jak se v současné době tyto časové stupnice vytvářejí a distribuují a shrnuje jejich vlastnosti.

To, že termín „světový čas“ označuje jednotnou časovou referenci užívanou na celém světě, je jasné. Co ale znamená v označení časové stupnice přívlastek „koordinovaný“? K vysvětlení se musíme vrátit do doby kolem roku 1960. V té době již přední laboratoře času a frekvence vytvářely atomové stupnice nezávislé na rotaci Země a přesný čas šířily prakticky po celém světě pomocí rádiových časových signálů. Nejpočetnější komunitou uživatelů přesného času ovšem byli námořní navigátoři, pro které byl atomový čas zvolna divergující od otáčení Země obtížně akceptovatelný. Proto byla zavedena praxe, že atomový čas se při generování rádiových časových signálů cíleně posouval tak, aby časové signály byly v souladu s astronomickou časovou stupnicí UT2. V podstatě tak vznikaly nové časové stupnice, které sice byly navázány na atomový čas, ale zároveň byly korigovány o známé posunutí tak, aby odpovídaly času vázanému na rotaci Země. Způsob provádění těchto úprav atomového času byl ale nejednotný a bylo poukazováno na skutečnost, že časové signály vysílané různými vysílači nejsou konzistentní. Snahy o celosvětovou „koordinaci“ provádění úprav atomového času pro účely rádiového šíření formálně vyústily v roce 1972 v doporučení TF.460-6 vydané CCIR (International Radio Consultative Committee) – nyní ITU-R (International Communication Union - Radio-communication Sector). Toto doporučení stanoví, že všechny vysílané časové signály mají co nejpřesněji odpovídat světovému koordinovanému času UTC, který definuje takto:

UTC je časová stupnice spravovaná Mezinárodním úřadem pro míry a váhy (BIPM) ve spolupráci s Mezinárodní službou pro rotaci Země (IERS), jež vytváří základy pro koordinované šíření etalonových frekvencí a časových signálů. Frekvence UTC je shodná s frekvencí časové stupnice TAI, liší se ale celistvým počtem sekund. Časová stupnice UTC se upravuje vkládáním či odebráním sekund (kladných nebo záporných přestupných sekund) k zajištění přibližné shody s časovou stupnicí UT1

Doporučení dále předepisuje, že odchylka mezi časovou stupnicí UTC a UT1 nemá překročit $\pm 0,9$ s. Pokud se tato časová odchylka blíží předepsané mezí, Mezinárodní služba pro rotaci Země IERS rozhodne o vložení nebo odebrání přestupné sekundy a toto rozhodnutí zveřejní s předstihem nejméně osm měsíců.



Obr. 1: Časový údaj UTC zachycený v okamžiku, kdy probíhalo vložení přestupné sekundy.

Přestupná sekunda je vždy poslední sekundou v měsíci. Prioritně se jedná o konec prosince nebo června. Pokud by tyto dva termíny nestačily, další prioritou je konec března nebo září. Kladná přestupná sekunda začíná v 23h 59m 60s a končí v 0h 0m 0s prvního dne

následujícího měsíce. V případě záporné přestupné sekundy následuje jednu sekundu po 23h 59m 58s časový údaj 0h 0m 0s prvního dne následujícího měsíce. Při vložení kladné přestupné sekundy se tedy na hodinách správně zobrazujících čas UTC objeví o půlnoci neobvyklý časový údaj zachycený na **obr. 1**. Připomeňme, že u nás tento časový údaj neuvidíme o Silvestra v momentě, kdy bouchají špunty od šampaňského, ale až o hodinu později. Hodiny korektně zobrazující středoevropský čas by tedy měly při vložení přestupné sekundy zobrazit čas 00h 59m 60s.

Dosud vždy docházelo k úpravě nejvýše o jednu přestupnou sekundu za rok a tato úprava se proto prováděla na konci ledna nebo června. Všechny přestupné sekundy měly až dosud kladné znaménko, což souvisí se skutečností, že rotace Země se v důsledku působení slapových sil stále nepatrně zpomaluje.

Časová stupnice UTC je z definice bezprostředně navázána na mezinárodní atomový čas TAI (Temps Atomique International). Liší se od časové stupnice TAI jen formálním posunutím o celý počet sekund. Oficiálně schválila ustanovení mezinárodního atomového času TAI 14. generální konference pro míry a váhy CGPM v roce 1971. Původní přijatá definice mezinárodního atomového času měla toto znění:

Mezinárodní atomový čas TAI (Temps Atomique International) je časová referenční souřadnice stanovená Mezinárodním úřadem pro čas BIH (Bureau International de l'Heure) na základě údajů atomových hodin, které v různých institucích zajišťují definici sekundy, jednotky času mezinárodního systému jednotek.

Původní definice TAI ještě nerespektovala důsledky obecné teorie relativity, v roce 1980 proto byla doplněna:

TAI je souřadnicová časová stupnice definovaná v geocentrickém souřadnicovém systému a vytvářena ze sekundy SI realizované na rotujícím geoidu.

Geoidem se zde rozumí gravitační ekvipotenciální plocha, která přibližně odpovídá střední hladině oceánu. Praktickým důsledkem tohoto doplnění definice TAI bylo zavedení relativistické korekce na výsledky porovnání primárních etalonů frekvence před tím, než jsou použity při vytváření TAI.

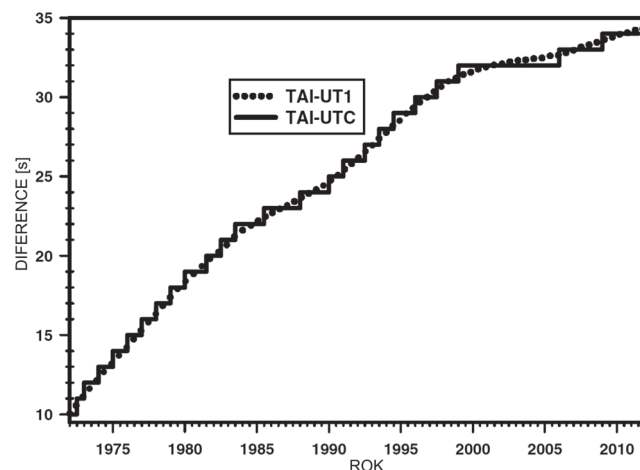
Další rozšíření definice TAI učinila rezoluce Mezinárodní astronomické unie z roku 1991:

TAI je časová stupnice, která až na konstantní odchylku 32,184 s je ve své ideální formě terestrickým časem (TT), který je prostřednictvím konstantního chodu spjat s časovou souřadnicí geocentrické souřadnicové soustavy, tj. s geocentrickým souřadnicovým časem (TGC).

Toto doplnění definice nic nemění na způsobu vytváření mezinárodního atomového času, ale uvádí jej do vztahu s moderními astronomickými časovými stupnicemi TT (Terrestrial Time) a TGC (Geocentric Coordinate Time). Říká, že TAI je až na konstantní časovou odchylku realizací terestrického času TT, který se liší od geocentrického souřadnicového času TGC o konstantní frekvenční odchylku.

Ačkoli TAI byla oficiálně uznána jako mezinárodní atomová stupnice, nikdy nebyla přímo šířena ani užívána pro určování času. Funkci celosvětové časové reference užívá na různých stupních přesnosti při vědeckých experimentech, v telekomunikačních systémech, průmyslu, energetice, všech odvětvích dopravy i běžném životě vždy plnila časová stupnice UTC. Obě časové stupnice UTC i TAI jsou založeny na stejné časové jednotce – sekundě SI, mají shodnou frekvenční stabilitu i shodnou přesnost. Jediný rozdíl je v tom, že stupnice TAI plyne spojitě, kdežto časová stupnice UTC obsahuje občasné jednosekundové nespojitosti.

Bezprostředně po zavedení světového koordinovaného času UTC na začátku roku 1972, činil rozdíl TAI - UTC rovných 10 s. Od té doby bylo do časové stupnice UTC vloženo celkem 25 přestupných sekund, takže rozdíl TAI - UTC v roce 2013 činí celkem 35 s. Historii postupného vkládání přestupných sekund ilustruje **obr. 2**, který zachycuje vývoj časových odchylek TAI - UT1 a TAI - UTC od počátku časové stupnice UTC do současnosti. Z průběhu je zřejmé, že rotační čas se za atomovým časem opožděje a čas UTC sle-



Obr. 2: Průběh časové difference TAI - UT1 a TAI - UTC od počátku časové stupnice UTC do současnosti. Čas UTC sleduje rotační čas UT1 s odchylkou do 0,9 s. Rotační čas se za atomovým časem opožděje. I z čtyřicetileté historie je patrné, že rychlost rotace Země kolísá.

duje rotační čas UT1 s odchylkou do 0,9 s. I z nepříliš dlouhé čtyřicetileté historie je zřetelně patrné, že rychlost zemské rotace kolísá.

Od roku 1988 zajišťuje vytváření mezinárodního atomového času TAI a světového koordinovaného času UTC časové oddělení Mezinárodního úřadu pro míry a váhy BIPM. Na vytváření času UTC se navíc vydáváním rozhodnutí o vložení či vyjmutí přestupné sekundy podílí také Mezinárodní služba pro rotaci Země IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service).

Vytváření časové stupnice UTC

Časová stupnice, která má sloužit jako mezinárodní reference s širokým využitím, musí být mimořádně spolehlivá, musí mít vysoce stabilní frekvenci, musí mít vysokou přesnost a musí být po celém světě dobře dostupná. S ohledem na uvedené požadavky se ustálila koncepce vytváření času UTC, která je založena na zpracování dat z velkého počtu časových laboratorí vybavených převážně komerčně vyráběnými atomovými hodinami s tím, že zvláštní roli při výpočtu časové stupnice hrají data z několika špičkových laboratorí vybavených laboratorními primárními etalony frekvence. Zahrnutí velkého počtu hodin rozmístěných po celém světě dává výsledné časové stupnici dlouhodobou stabilitu a především vysokou spolehlivost. Na druhou stranu vysokou přesnost realizace sekundy SI dokážou zajistit jen vybrané laboratorní primární etalony frekvence provozované vysoce kompetentním personálem. Zapojení velkého počtu laboratorí také napomáhá zajištění návaznosti na čas UTC po celém světě.

Časové stupnice TAI a UTC jsou časy matematické, které se vytvářejí výpočtem. Někdy se takovým časovým stupnicím říká „papírové stupnice“ (paper scale). Taková časová stupnice nemá žádnou skutečnou fyzikální realizaci. V časovém oddělení BIPM se tedy nenachází žádný etalon času, který by ji generoval. Reálně existují pouze aproximace času UTC označované jako UTC(k), které se realizují v jednotlivých participujících laboratorích času a frekvence. Výsledná

časová stupnice UTC se pak distribuuje ve formě odchylek $[UTC - UTC(k)]$, které jsou vztaženy k minulosti. Realizované aproximace $UTC(k)$ tedy mají charakter predikce matematicky vytvářené časové stupnice UTC. Laboratořím se doporučuje, aby zaváděním frekvenční korekce do volně běžící časové stupnice generované atomovými hodinami udržovaly odchylku $|UTC(k) - UTC| < 100$ ns.

Důležitou roli při vytváření a distribuci časové stupnice UTC hrají tzv. „standardní okamžiky“ (Standard Dates). Ty nastávají podle definice v 0 h UTC ve dnech, kdy modifikované juliánské datum MJD (Mean Julian Date) končí na číslo 4 nebo 9. Připomeňme, že datum MJD udává počet dnů od zvoleného počátku, kterým je 17. listopad 1858 (např. 1. ledna 2014 = MJD 56658). Standardní okamžiky nastávají každých 5 dnů a vztahují se k nim některá měření vstupních dat i výsledky výpočtu časové stupnice. Jedná se o jakési vzorkovací okamžiky, ke kterým jsou vztaženy změřené a vypočtené časové odchylky.

Základními vstupními daty pro výpočet UTC jsou časové odchylky měřené jednotlivými participujícími laboratořemi vytvářejícími časovou stupnici $UTC(k)$. Jsou to:

- Časové odchylky $[UTC(k) - AT(i)]$ zasilané do BIPM jednou měsíčně. Čas $AT(i)$ představuje atomovou stupnici volně běžících, tedy frekvenčně nekorigovaných, hodin i , které se přímo navazují na laboratoř k . Odchylky $[UTC(k) - AT(i)]$ jsou vzorky měřené ve standardních okamžicích.
- Časové odchylky $[UTC(k) - T(\text{GPS})]$ měřené nepřetržitě časovými přijímači GPS a zasilané do BIPM jedenkrát za den. Menší počet laboratoří vybavených i zařízením pro dvoucestný družicový časový a frekvenční transfer TWSTFT (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer) navíc zasilá i výsledky porovnání s vybranými partnerskými laboratořemi $[UTC(k) - UTC(j)]$ získané metodou TWSTFT s využitím geostacionárních komunikačních družic.

Samotný výpočet časové stupnice UTC se provádí jedenkrát měsíčně na základě dávky dat za poslední měsíc. Výpočet probíhá ve třech postupných krocích. V prvním kroku se vytvoří volně běžící atomová časová stupnice EAL (Echelle Atomique Libre) jako vážený průměr všech participujících časových stupnic. V druhém kroku se na časovou stupnici EAL aplikuje frekvenční korekce tak, aby její sekunda byla v souladu s definicí sekundy SI. Výsledkem je mezinárodní atomová časová stupnice TAI. V třetím kroku se do stupnice TAI vloží přestupné sekundy tak, aby byl zajištěn soulad s časovou stupnicí UT1 navázanou na rotaci Země. Tímto krokem dostaneme výslednou časovou stupnici UTC. Uvedené výpočetní kroky se realizují algoritmem s označením ALGOS.

Časová stupnice EAL

Volně běžící atomová časová stupnice EAL (Echelle Atomique Libre) je váženým průměrem všech participujících časových stupnic $AT(i)$ generovaných volně běžícími atomovými hodinami. Příslušná výpočetní procedura je navržena s ohledem na dosažení co nejlepší dlouhodobé stability a to bez ohledu na to, do jaké míry sekunda EAL odpovídá sekundě SI.



Obr. 3: Laboratoře času a frekvence participující na vytváření mezinárodního atomového času TAI a světového koordinovaného času UTC. Některé laboratoře přispívají velkým souborem hodin.

Časovou jednotkou stupnice EAL tedy není sekunda SI, ale sekunda stanovená váženým průměrem z mnoha volně běžících atomových hodin provozovaných v podmínkách, které nemusí zcela odpovídat definici sekundy SI.

Celkem do výpočtu váženého průměru vstupuje zhruba 400 atomových hodin provozovaných více než 70 laboratořemi. V naprosté většině jsou laboratoře vybaveny komerčně vyráběnými cesiovými hodinami 5071A. Poměrně velké je také zastoupení komerčně vyráběných aktivních vodíkových maserů. Všechny přispívající laboratoře jsou zachyceny v mapce na **obr. 3**. Místy se může zdát mapka poměrně řídká. Musíme si však uvědomit, že některé laboratoře přispívají velkým souborem hodin. Například americká USNO (U. S. Naval Observatory) provozuje ve dvou různých lokalitách celkem 69 cesiových hodin 5071A a 27 vodíkových maserů. Část tohoto souboru hodin je zachycena na **obr. 4**.



Obr. 4: Část velkého souboru atomových hodin provozovaných v USNO (U.S. Naval Observatory). Ve stojanech jsou umístěny komerčně vyráběné cesiové hodiny 5071A. V popředí komerčně vyráběné aktivní vodíkové masery.

Váha přidělená jednotlivým hodinám odráží jejich dlouhodobou stabilitu. Je nepřímo úměrná střednímu kvadrátu frekvenční odchylky daných hodin vzhledem k EAL vyhodnocené za jeden rok. Maximální možná váha je přitom omezená, aby se předešlo výrazné dominanci některých hodin. V posledních letech dosahuje této maximální váhy kolem 15 % participujících atomových hodin.

Do výpočtu váženého průměru je zahrnut predikční algoritmus, jehož smyslem je zabránit nespojitostem způsobeným změnami v souboru hodin, nad jejichž časovými stupnicemi výpočet probíhá. Donedávna se používal pro predikci jednoduchý lineární model, v němž se frekvence hodin po dobu celého měsíčního období považuje za konstantní. Analýzy ale ukazovaly, že většina atomových hodin vykazuje zřetelný frekvenční drift. Od roku 2011 byl proto zaveden nový predikční algoritmus, který zahrnuje i drift frekvence jednotlivých hodin. Tato změna vedla ke zlepšení dlouhodobé stability a prakticky úplnému odstranění dříve pozorovaného driftu stupnice EAL v řádu 10^{-17} za 1 den.

Časová stupnice TAI

V dalším kroku se upraví časová stupnice EAL tak, aby její sekunda byla v souladu s definicí sekundy SI. Výsledkem je mezinárodní atomový čas TAI. Úprava spočívá v zavedení frekvenční odchylky, která se určí na základě porovnání frekvence časové stupnice EAL s několika laboratorními primárními etalony frekvence. Většinou se jedná o cesiové fontány. Na výsledky měření primárních etalonů se přitom aplikuje relativistická korekce, tak jak to vyžaduje definice TAI. Také se korigují všechny známé jevy, které ovlivňují frekvenci etalonů.

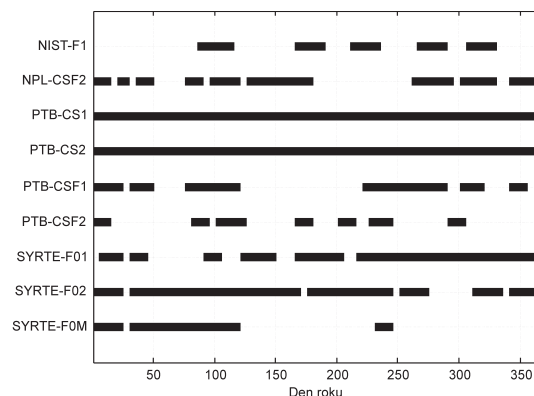
Na základě výsledků tohoto porovnání se pak stanoví frekvenční korekce časové stupnice EAL, která zajistí, aby jednotka času stupnice odpovídala sekundě SI a tato korekce se na i -tý úsek časové stupnice EAL jednoduše aplikuje

$$\text{TAI}(t) = \text{EAL}(t - t_i) + y_i(t - t_i).$$

Tato úprava časové stupnice se označuje jako „steering“, tedy „řízení“ nebo „kormidlování“. Frekvenční korekce y_i se stanovuje jedenkrát za měsíc a pro celý jednoměsíční úsek časové stupnice je použita tatáž hodnota. Hodnoty této frekvenční korekce časové oddělení BIPM v předstihu publikuje v *Cirkuláři T*. V současné době činí tato korekce zhruba $6,5 \cdot 10^{-13}$ a díky zavedení nového predikčního algoritmu se za poslední rok ani na nejnižším řádu 10^{-16} nemění. Dá se předpokládat, že pokud v budoucnu budou řízené zásahy do frekvence stupnice TAI probíhat, jejich vliv na dlouhodobou stabilitu bude nepatrný. Stabilita stupnice TAI je tedy prakticky úplně určena stabilitou stupnice EAL.

V roce 2012 bylo využíváno k navázání stupnice TAI na sekundu SI celkem devět primárních etalonů frekvence provozovaných ve čtyřech laboratořích a to v NIST (USA), NPL (Velká Británie), PTB (Německo) a SYRTE (Francie). Nej přesněji sekundu SI realizují cesiové fontány, kterých bylo využíváno sedm. Nejdokonalejší z nich je NPL-CSF2, pro kterou se uvádí nejistota realizace definice sekundy SI

$u_B = 2,3 \cdot 10^{-16}$. Cesiové fontány však nejsou k dispozici nepřetržitě. Navázání na tyto etalony probíhá jen v rámci jejich provozních možností. Pro ilustraci je na **obr. 5** znázorněna aktivita jednotlivých primárních etalonů frekvence v průběhu roku 2012. V trvalém provozu byly pouze dva laboratorní cesiové svazkové etalony s dlouhou trubicí PTB-CS1 a PTB-CS2. Přesnější z nich je PTB-CS1, který realizuje



Obr. 5: Aktivita primárních etalonů frekvence podílejících se během roku 2012 na realizaci sekundy SI. V trvalém provozu byly pouze dva laboratorní cesiové svazkové etalony s dlouhou trubicí PTB-CS1 a PTB-CS2. Cesiové fontány se zapojovaly v rámci svých provozních možností.

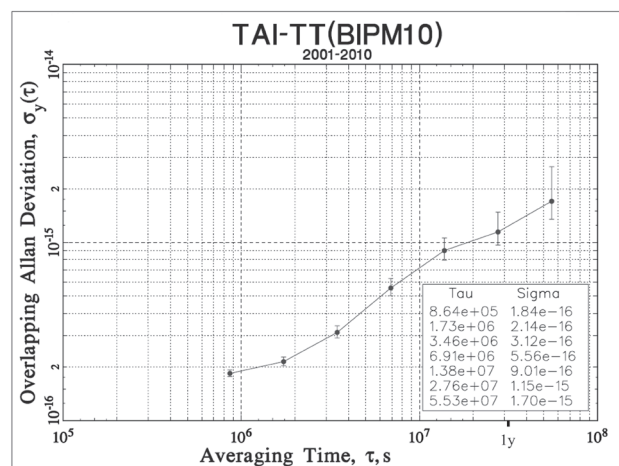


Obr. 6: Cesiové fontány PTB-CSF1 a PTB-CSF2 provozované v PTB Braunschweig. Obě cesiové fontány jsou využívány k navázání času TAI na sekundu SI.

sekundu SI s nejistotou $u_B = 8 \cdot 10^{-15}$. Na **obr. 6** jsou dvě z cesiových fontán využívaných k navázání času TAI na sekundu SI a to PTB-CSF1 a PTB-CSF2 provozované v PTB Braunschweig.

Nejlepší časovou referencí, kterou lze použít k posouzení stability časové stupnice TAI je realizace terestrického času TT(BIPM), o němž se ještě zmíníme. Takto vyhodnocená dlouhodobá nestabilita TAI za období 2001–

2010 je vynesena na **obr. 7**. Z průběhu Allanovy odchylky je patrné, že pro průměrovací interval 1 rok činila nestabilita zhruba 10^{-15} .



Obr. 7: Allanova odchylka časové difference TAI - TT(BIPM10) za roky 2001-2010. Realizace terestrického času TT(BIPM) je nejlepší časovou referencí, kterou lze použít k posouzení stability časové stupnice TAI. Pro průměrovací interval 1 rok činila nestabilita zhruba 10^{-15} .

Časová stupnice UTC

Na závěr se na mezinárodní atomový čas TAI aplikuje posunutí o celý počet sekund, čímž obdržíme světový koordinovaný čas

$$\text{UTC} = \text{TAI} + n.$$

Na konci roku 2013 činilo posunutí $n = -35$ s a jeho hodnota se bude na základě rozhodnutí Mezinárodní služby rotace Země IERS dále měnit podle pravidel daných definicí času UTC.

Koncept navázání světového koordinovaného času UTC na rotační čas UT1 zaváděním přestupných sekund je v poslední době předmětem značné kritiky, která se opírá hlavně o komplikace při využití časové stupnice UTC v informačních a elektronických systémech. V roce 2015 se k tomuto tématu má vyjádřit Mezinárodní radiokomunikační konference WRC (World Radio Conference). Není tedy vyloučeno, že v blízké budoucnosti bude dosavadní praxe vkládání přestupných sekund zastavena a rotační čas UT1 se začne za světovým koordinovaným časem UTC stále více zpožďovat.

Cirkulář T

Distribuce časové stupnice UTC probíhá prostřednictvím *Cirkuláře T* vydávaného každý měsíc časovou sekcí BIPM. Z metrologického hlediska je důležité, že *Cirkulář T* je technickým protokolem klíčového porovnání CCTF-K001.UTC. Status klíčového porovnání činí *Cirkulář T* jediným mezinárodně uznávaným způsobem prokázání návaznosti k časové stupnici UTC a k sekundě SI jako časové jednotce stupnice UTC a dává časovým stupnicím uvedeným v cirkuláři status lokálních realizací UTC.

Výsledky publikované v *Cirkuláři T* mají formu diferencí $[\text{UTC} - \text{UTC}(k)]$, které jsou vztaženy k „standardním okamžikům“. Jsou tedy k dispozici pro každý pátý den. Návaznost pro jiné vztažné časy se musí zajistit vhodnou interpolací. Hodnoty časových diferencí jsou doplněny jejich nejistotami.

V *Cirkuláři T* časová sekce BIPM publikuje i řadu dalších údajů. Jsou zde uváděny hodnoty frekvenční korekce aplikované na časovou stupnici EAL. Dále jsou zde uváděny frekvenční odchylky primárních etalonů frekvence podílejících se na vytváření TAI, které umožňují přístup k jednotlivým realizacím sekundy SI.

S ohledem na zajištění snadné celosvětové dostupnosti času UTC jsou v *Cirkuláři T* uváděny také denní časové difference mezi časem UTC a systémovými časy GPS a GLONASS. Tak je zajištěna návaznost času distribuovaného družicovými navigačními systémy na časovou stupnici UTC. V případě GPS je nejistota tohoto navázání několik nanosekund, pro GLONASS několik desítek nanosekund.

Časová stupnice TT(BIPM)

Terestrický čas TT (Terrestrial Time) je souřadnicový čas v geocentrickém referenčním systému definovaný rezolucí Mezinárodní astronomické unie IAU. Mezinárodní atomový čas TAI je až na konstantní posunutí jednou z realizací času TT. Vzhledem k tomu, že se časová stupni-

ce TAI vytváří téměř v reálném čase a při jejím vytváření je třeba respektovat řadu provozních omezení, nejedná se o optimální realizaci. Časová sekce BIPM proto dodatečně provádí výpočet ještě jedné realizace terestrického času TT s označením TT(BIPMxx), kde dvojčíslí xx značí poslední rok, z něhož byla do výpočtu zahrnuta změřená data. Stupnice se vytváří vždy na začátku následujícího kalendářního roku. Extrapolace této časové stupnice se pak zveřejňuje každý měsíc.

Výpočet TT(BIPM) zahrnuje všechna měření primárních etalonů frekvence dodaná do BIPM od roku 1992. Pro každý měsíc od roku 1993 se vypočte odhad frekvenční odchylky stupnice EAL vzhledem k primárním etalonům frekvence. Posloupnost těchto frekvenčních odchylek se vyhladí, interpoluje a integruje s krokem 5 dnů od MJD 48984 (28. prosince 1992), čímž je zajištěna návaznost na předchozí realizace.

Odhaduje se, že přesnost frekvence časové stupnice TT(BIPM) se v posledních letech pohybuje kolem $3 \cdot 10^{-16}$. Praktické využití nachází tato časová stupnice např. v radioastronomii při analýze signálu pulsarů. O milisekundových pulsarech se totiž do budoucna uvažuje jako o možné časové referenci s mimořádně vysokou dlouhodobou stabilitou.

Časová stupnice Rapid UTC

Výsledky výpočtu časové stupnice UTC jsou k dispozici jen jedenkrát za měsíc, což může v některých případech vést ke zbytečnému zpoždění. Od poloviny roku 2013 proto časová sekce BIPM zveřejňuje jedenkrát týdně také výsledky výpočtu časové stupnice Rapid UTC, označované také UTCr. Tyto výsledky mají formu denních časových odchylek $[\text{UTCr} - \text{UTC}(k)]$. Do výpočtu času UTCr nejsou zahrnuty všechny hodiny participující na časové stupnici UTC. Časové laboratoře poskytují potřebná denní data na dobrovolné bázi. Odchylka času Rapid UTC od finální časové stupnice UTC nepřesahuje 2 ns.

Literatura

- [1] „BIPM Annual Report on Time Activities,“ vol. 7 (2012).
- [2] E. F. Arias, G. Panfilo and G. Petit, „Timescales at the BIPM,“ *Metrologia*, vol. 48 (2011), pp. s. 145–s. 153.
- [3] D. D. McCarthy, „Evolution of timescales from astronomy to physical metrology,“ *Metrologia*, vol. 48 (2011), pp. s. 132–s. 144.
- [4] „The International System of Units (SI),“ Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 8th edition 2006.
- [5] A. Bauch, „Time – the SI Base Unit Second,“ PTB - Mitteilungen, vol. 122 (2012), no. 1, pp. 23–36.



CHARAKTERIZACE HODIN A OSCILÁTORŮ

Zdroje přesného času a frekvence, jako jsou kvantové etalony času a frekvence nebo vysoce stabilní krystalové oscilátory, hrají důležitou roli v mnoha aplikacích. K popisu vlastností těchto zdrojů je proto zapotřebí jednoznačný koncept, který umožňuje charakterizovat variace ve frekvenci, fázi nebo čase vytvářených z nějakého reálného zdroje. Tento článek shrnuje základy aparátu, který se běžně používá pro charakterizaci zdrojů přesného času a frekvence.

Ideální a skutečný harmonický signál

Ideální harmonický signál definujeme

$$u(t) = U_0 \sin(2\pi f_0 t),$$

kde U_0 je nominální amplituda a f_0 jeho nominální frekvence.

Skutečný harmonický signál pak popíšeme

$$u(t) = (U_0 + a(t)) \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)),$$

kde $a(t)$ je amplitudový šum a $\phi(t)$ je fázový šum. Na základě fázového šumu $\phi(t)$ se pak definují další dva šumové procesy: *časová odchylka*, či *fázový čas*

$$x(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi f_0}$$

a *okamžitá relativní frekvenční odchylka*

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi f_0} \frac{d\phi(t)}{dt}.$$

Vlastnosti reálného zdroje času či frekvence zpravidla charakterizujeme na základě vlastností uvedených šumových procesů.

Průměrná frekvenční odchylka

Frekvenci vždy vyhodnocujeme na nějakém intervalu o nenulové délce τ . Proto nikdy nezměříme okamžitou frekvenční odchylku $y(t)$, ale průměrnou frekvenční odchylku

$\bar{y}(t)$ na daném intervalu. Z průběhu časové odchylky $x(t)$ určíme průběh *průměrné relativní frekvenční odchylky*

$$\bar{y}(t, \tau) = \frac{x(t + \tau) - x(t)}{\tau}.$$

Údaj o průměrné frekvenční odchylce musí být vždy doplněn informací o délce intervalu τ , na němž byla frekvenční odchylka vyhodnocena. V řadě případů nedává informace o frekvenční odchylce bez bližší specifikace délky intervalu větší smysl.

Charakterizace ve frekvenční oblasti

Ve frekvenční oblasti se frekvenční stabilita popisuje pomocí průběhu *spektrální výkonové hustoty* již zmíněných šumových procesů. Předmětem zájmu je přitom zpravidla pouze fázový šum $\phi(t)$, podíl amplitudového šumu $a(t)$

se v kvalitních zdrojích přesné frekvence považuje za zanedbatelný. Dále se předpokládá, že systematické chyby, jako je frekvenční posunutí nebo frekvenční drift (stárnutí) jsou před analýzou frekvenční stability ze změřených průběhů vyjmuty a vyhodnocuje se pouze nestabilita způsobená jevy, které mají náhodný charakter.

Spektrální výkonová hustota fázových fluktuací $S_\phi(f)$

udává výkon fázového šumu $\phi(t)$ ve frekvenčním pásmu o šířce 1 Hz v okolí frekvence f . Frekvence se přitom pohybuje od 0 do $+\infty$. Jedná se tedy o jednostrannou spektrální výkonovou hustotu. Spektrální výkonová hustota fázových fluktuací se vyjadřuje v rad^2/Hz .

Spektrální výkonová hustota fluktuací relativní frekvenční

odchylky $S_y(f)$ udává výkon okamžité relativní frekvenční odchylky $y(t)$ ve frekvenčním pásmu o šířce 1 Hz v okolí frekvence f . Opět se jedná o jednostrannou spektrální výkonovou hustotu. Její rozměr je Hz^{-1} . Mezi spektrální výkonovou hustotou fázových fluktuací a spektrální výkonovou hustotou fluktuací relativní frekvenční odchylky platí vztah

$$S_y(f) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 S_\phi(f).$$

Ve stejném duchu se definuje *spektrální výkonová hustota fluktuací časové odchylky* $S_x(f)$, která udává výkon fluktuací časové odchylky $x(t)$ ve frekvenčním pásmu o šířce 1 Hz v okolí frekvence f . Opět se jedná o jednostrannou spektrální výkonovou hustotu, vyjadřuje se v s^2/Hz . Mezi spektrální výkonovou hustotou fluktuací časové odchylky a již definovanými spektrálními výkonovými hustotami platí relace

$$S_x(f) = \frac{S_y(f)}{(2\pi f)^2} = \frac{S_\phi(f)}{(2\pi f_0)^2}.$$

V praxi se často používá ještě další způsob popisu frekvenční stability ve frekvenční oblasti, který vychází ze skutečnosti, že modulace harmonického signálu fázovým šumem se ve frekvenční doméně projeví vznikem postranních pásem. Jejich spektrální výkonová hustota je rozložena symetricky kolem frekvence nosné f_0 .

Spektrální výkonová hustota $L(f)$ udává poměr výkonu v jednom z postranních pásem ve frekvenčním pásmu o šířce 1 Hz ve vzdálenosti f od frekvence nosné k celkovému výkonu nosné. Vyjadřuje se zpravidla v logaritmické míře a jako jednotka se pak uvádí dBc/Hz, aby se zdůraznilo, že spektrální výkonová hustota je vztažena k výkonu nosné (carrier). Průběh spektrální výkonové hustoty $L(f)$ bychom

tedy mohli přímo změřit spektrálním analyzátozem, pokud to ovšem jeho dynamický rozsah umožňuje. V anglických textech se spektrální výkonová hustota $L(f)$ často označuje jako *Single Sideband Phase Noise*, nebo *SSB Phase Noise*.

Za předpokladu, že je splněna podmínka, že velikost fázových fluktuací $\phi(t) \ll 1$, platí poměrně přesně relace

$$L(f) \approx \frac{1}{2} S_{\phi}(f), \text{ resp. } L_{dB}(f) \approx 10 \log \left(\frac{1}{2} S_{\phi}(f) \right)$$

a jednotlivé spektrální výkonové hustoty je mezi sebou možné jednoduše převádět.

Šumové procesy ve zdrojích frekvence a času

Ve zdrojích přesného času a frekvence se typicky objevuje pět typů šumových procesů, jejichž spektrální výkonové hustoty vykazují v závislosti na frekvenci typický průběh – typickou rychlost poklesu s rostoucí frekvencí. Jedná se o:

- náhodný chod frekvence (*Random Walk Frequency Modulation* – RWFM),
- blikavý frekvenční šum (*Flicker Frequency Modulation* – FFM),
- bílý frekvenční šum (*White Frequency Modulation* – WFM),
- blikavý fázový šum (*Flicker Phase Modulation* – FPM)
- bílý fázový šum (*White Phase Modulation* – WPM).

Spektrální výkonová hustota fluktuací relativní frekvenční odchylky pro jednotlivé typy šumu má průběh

$$S_y(f) = h_{\alpha} f^{\alpha}, \quad 0 < f < f_h$$

a spektrální výkonová hustota fázových fluktuací

$$S_{\phi}(f) = h_{\beta} f^{\beta}, \quad 0 < f < f_h,$$

kde f_h je horní mezní frekvence a exponenty α a $\beta = \alpha - 2$ jsou pro jednotlivé typy šumu uvedeny v **tab. 1**.

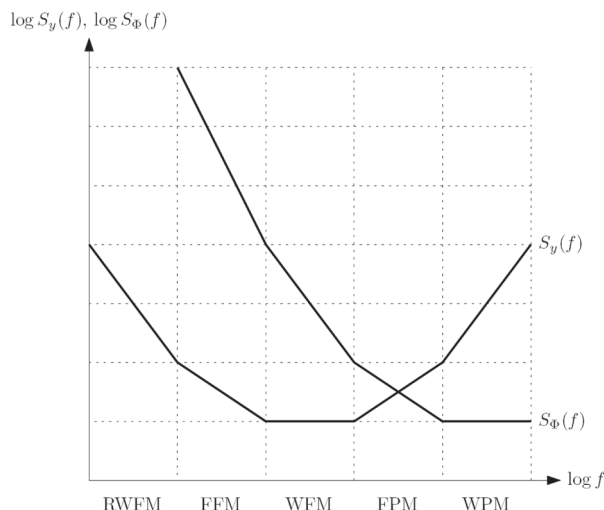
Celková výkonová spektrální hustota se pak vyjadřuje jako suma spektrálních výkonových hustot dílčích šumů

$$S_y(f) = \begin{cases} \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha} & 0 < f < f_h \\ 0 & f > f_h \end{cases}$$

nebo

$$S_{\phi}(f) = \begin{cases} \sum_{\beta=-4}^0 h_{\beta} f^{\beta} & 0 < f < f_h \\ 0 & f > f_h \end{cases}.$$

Vzhledem k tomu, že spektrální výkonová hustota jednotlivých složek klesá s frekvencí s různou strmostí, v určitém intervalu frekvencí vždy převládá pouze jeden z uvedených šumových procesů a ostatní jsou více či méně zanedbatelné. Je-li průběh spektrální výkonové hustoty vyneseno v logaritmických souřadnicích, každý z uvedených typů šumu se do grafu promítne jako přímka s charakteristickým sklonem, který odpovídá exponentu α , respektive β , jak ukazuje **obr. 1**.



Obr. 1: Typický průběh spektrální výkonové hustoty fázového šumu a spektrální výkonové hustoty relativní frekvenční odchylky. Jednotlivé typy šumu se do grafu promítají jako přímka s charakteristickým sklonem. V určitém intervalu frekvencí vždy převládá pouze jeden z šumových procesů.

Bílý fázový šum a blikavý fázový šum mají původ především v elektronických obvodech oscilátorů, zesilovačů či frekvenčních násobičů. Bílý fázový šum zde vzniká v důsledku fázové modulační termickým šumem, zatímco bílý fázový šum v důsledku fázové modulační blikavým šumem. Blikavý šum, podle charakteristického průběhu spektrální výkonové hustoty také označovaný jako šum $1/f$, je ve větší či menší míře pozorován ve většině polovodičových prvků.

Bílý frekvenční šum typicky vzniká v důsledku frekvenční modulační bílým termickým šumem elektronických prvků. Také se objevuje všude, kde se přesná frekvence určuje na základě měření nějaké rezonanční frekvence. Typickým případem jsou kvantové etalony frekvence.

Blikavý frekvenční šum může vzniknout v důsledku frekvenční modulační šumem $1/f$. Také může vzniknout v souvislosti s procesy v piezoelektrických rezonátorech. Objevuje se proto v signálu generovaném krystalovými oscilátory.

Náhodný chod frekvence obvykle úzce souvisí s vlivem okolního prostředí. Bývá způsoben změnami okolní teploty nebo mechanickými vibracemi.

Charakterizace v časové oblasti

Běžně užívaná směrodatná odchylka, resp. rozptyl je definován

$$\sigma^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2,$$

kde M je konečný počet vzorků relativní frekvenční odchylky y_i a $\bar{y}$ je v tomto případě průměr relativních frekvenčních odchylek

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i.$$

Prostý rozptyl či směrodatnou odchylku frekvenční odchylky však nelze obecně použít pro popis frekvenční stability, protože tato míra pro některé uvedené typy šumů diverguje.

Pro popis frekvenční stability v časové oblasti se proto často používá *Allanova odchylka* $\sigma_y(\tau)$ nebo *Allanova variance* $\sigma_y^2(\tau)$. Často se označují jako *ADEV*, resp. *AVAR*. Allanova variance je definována vztahem

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle [\bar{y}(t+\tau) - \bar{y}(t)]^2 \right\rangle,$$

kde špičaté závorky značí průměr přes nekonečně dlouhý časový interval. Na rozdíl od směrodatné odchylky Allanova odchylka konverguje pro všechny typy šumů, které se objevují ve zdrojích frekvence a je necitlivá na konstantní posuv frekvence.

Odhad Allanovy variance se v praxi určuje z konečného počtu M vzorků průměrné relativní frekvenční odchylky $\bar{y}_i$ změřené na po sobě jdoucích intervalech o délce τ podle vztahu

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2$$

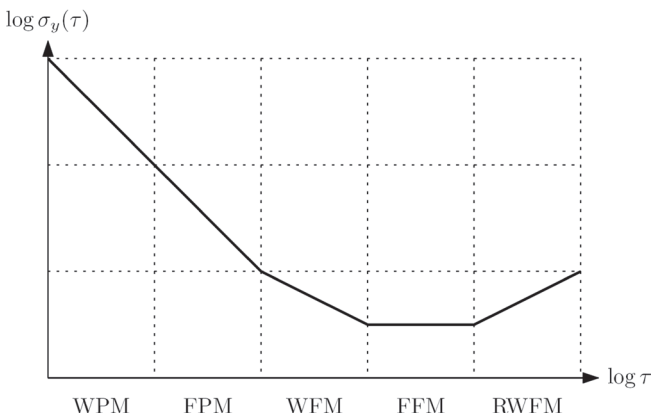
nebo z konečného počtu $N = M + 1$ vzorků časových odchylek x_i podle vztahu

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2.$$

Allanova variance $\sigma_y^2(\tau)$ a Allanova odchylka $\sigma_y(\tau)$ mají opět v závislosti na délce průměrovacího intervalu τ pro jednotlivé základní typy šumových procesů charakteristický průběh

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(\tau) &= h_\mu \tau^\mu, \\ \sigma_y(\tau) &= \sqrt{h_\mu} \tau^{\mu/2}. \end{aligned}$$

Hodnoty μ jsou pro jednotlivé typy šumu uvedeny v **tab. 1**. Charakteristický průběh Allanovy odchylky v logaritmickém měřítku je vyneseno na **obr. 2**. Každý z typů šumu se do grafu promítne jako přímka s charakteristickým sklonem.



Obr. 2: Typická závislost Allanovy deviace ADEV na délce průměrovacího intervalu.

V určitém rozsahu intervalu τ vždy převládá jen jeden ze šumových procesů.

Zvláště při vysokých hodnotách průměrovacího intervalu τ lze změřená data lépe využít a dosáhnout podstatně přesnějšího odhadu pokud se odhad AVAR počítá jako Allanova variance s překryvem podle vztahu

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i)^2,$$

kde průměrovací interval $\tau = m\tau_0$ a τ_0 je délka elementárního vzorkovacího intervalu.

Pokud vycházíme z průměrných relativních frekvenčních odchylek $\bar{y}_i$, pak Allanovu varianci s překryvem určíme

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2(M-2m+1)} \sum_{i=1}^{M-2m+1} \left[\sum_{j=i}^{i+m-1} (\bar{y}_{j+m} - \bar{y}_j) \right]^2,$$

kde $M = N - 1$ je konečný počet vzorků průměrných relativních frekvenčních odchylek $\bar{y}_i$.

Jak je zřejmé z **tab. 1**, v průběhu AVAR nebo ADEV nedokážeme rozlišit mezi bílým a blikavým fázovým šumem.

V obou případech $\sigma_y(\tau)$ klesá s τ^{-1} . Aby bylo možné tyto dva šумы od sebe při analýze v časové oblasti rozpoznat,

byla zavedena *modifikovaná Allanova variance* $\text{Mod } \sigma_y^2(\tau)$,

resp. *modifikovaná Allanova odchylka* $\text{Mod } \sigma_y(\tau)$, které se často označují zkratkami MVAR a MDEV.

Modifikovaná Allanova variance se vypočte

$$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2 m^2 (N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right]^2,$$

kde N je konečný počet vzorků x_i vzdálených τ_0 a průměrovací interval $\tau = m\tau_0$. Modifikovaná Allanova variance se počítá vždy s překryvem a v maximální možné míře tak využívá naměřená data.

Z konečného počtu N vzorků průměrných relativních frekvenčních odchylek $\bar{y}_i$ se pak MVAR vypočte

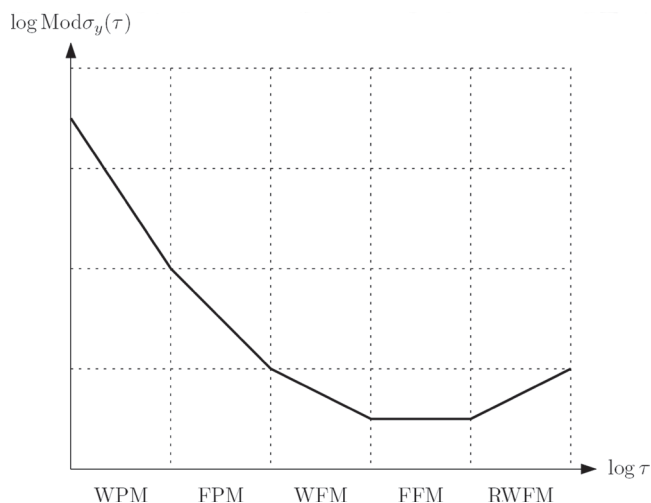
$$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^4(M-3m+2)} \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} \sum_{k=i}^{i+m-1} (\bar{y}_{k+m} - \bar{y}_k) \right]^2.$$

Na rozdíl od Allanovy variance AVAR závislost MVAR klesá s délkou průměrovacího intervalu τ v případě bílého fázového šumu s τ^{-3} a v případě blikavého fázového šumu s τ^{-2} (viz **tab. 1**). Zdůrazněme, že AVAR a MVAR jsou dvě různé míry stability, nikoli jen dva různé postupy stanovení odhadu téže charakteristiky a jejich hodnoty tedy mezi sebou nelze jednoduše srovnávat. Typický průběh modifikované Allanovy odchylky je vyneseno v grafu na **obr. 3**.

Pro charakterizaci stability času nebo zpoždění se používá časová variance $\sigma_x^2(\tau)$. Běžně se označuje zkratkou

TVAR, resp. její odmocnina se označuje TDEV. TVAR se definuje na základě modifikované Allanovy variance

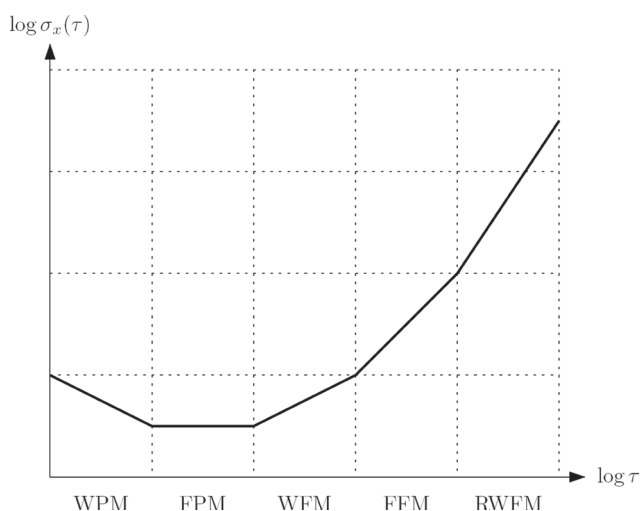
$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{\tau^2}{3} \text{Mod } \sigma_y^2(\tau).$$



Obr. 3: Typická závislost modifikované Allanovy deviace MDEV na délce průměrovacího intervalu. Na rozdíl od průběhu ADEV je zde možné odlišit bílý fázový šum od blikavého fázového šumu.

Rozměr TVAR je s^2 , TDEV se vyjadřuje v sekundách. Normování v definici TVAR je zvoleno tak, aby v případě bílého fázového šumu byla hodnota rovna prostému rozptylu tohoto šumu na jednotlivých vzorcích. Vzhledem k tomu, že definice TVAR vychází z MVAR, i v tomto případě závis-

losti na délce průměrovacího intervalu mají pro bílý fázový šum a pro blikavý fázový šum různou strmost a lze je tedy v průběhu rozlišit.



Obr. 4: Typická závislost časové odchylky TDEV na délce průměrovacího intervalu.

Závislosti TVAR a TDEV na délce průměrovacího intervalu pro základní typy šumových procesů jsou uvedeny v **tab. 1**. Charakteristický průběh TDEV v logaritickém měřítku je vynesena na **obr. 4**. TVAR nebo TDEV se často používá k popisu stability přenosu časové informace po nějaké lince nebo pro charakterizaci kvality porovnání časových signálů.

	Frekvenční oblast		Časová oblast					
	$S_y(f)$	$S_\Phi(f)$	$\sigma_y^2(\tau)$	$\sigma_y(\tau)$	$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau)$	$\text{Mod } \sigma_y(\tau)$	$\sigma_x^2(\tau)$	$\sigma_x(\tau)$
Typ šumu	α	β	μ	$\mu/2$	μ'	$\mu'/2$	μ'_x	$\mu'_x/2$
RWFM	-2	-4	1	1/2	1	1/2	2	3/2
FFM	-1	-3	0	0	0	0	2	1
WFM	0	-2	-1	-1/2	-1	-1/2	1	1/2
FPM	1	-1	-2	-1	-2	-1	0	0
WPM	2	0	-2	-1	-3	-3/2	-1	-1/2

Tab. 1: Exponenty závislosti spektrálních výkonových hustot na frekvenci a varianci na délce průměrovacího intervalu pro jednotlivé typy šumu.

Šumový proces	$\sigma_y^2(\tau) = S_y(f) \cdot$	$S_y(f) = \sigma_y^2(\tau) \cdot$	$S_\Phi(f) = f_0^2 \sigma_y^2(\tau) \cdot$
RWFM	$A f^2 \tau^1$	$A^{-1} \tau^{-1} f^{-2}$	$A^{-1} \tau^{-1} f^{-4}$
FFM	$B f^1 \tau^0$	$B^{-1} \tau^0 f^{-1}$	$B^{-1} \tau^0 f^{-3}$
WFM	$C f^0 \tau^{-1}$	$C^{-1} \tau^1 f^0$	$C^{-1} \tau^1 f^{-2}$
FPM	$D f^{-1} \tau^{-2}$	$D^{-1} \tau^2 f^1$	$D^{-1} \tau^2 f^{-1}$
WPM	$E f^{-2} \tau^{-2}$	$E^{-1} \tau^2 f^2$	$E^{-1} \tau^2 f^0$

Tab. 2: Vztahy pro převod mezi charakterizací v časové a frekvenční oblasti.

$$A = \frac{2\pi^2}{3}, B = 2 \ln 2, C = \frac{1}{2}, D = \frac{1,038 + 3 \ln(2\pi f_h \tau_0)}{4\pi^2}, E = \frac{3f_h}{4\pi^2}.$$

Převod mezi charakterizací v časové a frekvenční oblasti

Rychlé fázové fluktuace (vysoké f , malé τ) se obvykle měří a charakterizují ve frekvenční oblasti. Využívá se přitom většinou výsledků měření fázového šumu pomocí fázové detekce a spektrální analýzy. Na druhou stranu pomalé fluktuace (nízké f , velké τ) se měří a vyhodnocují v časové oblasti. Typicky měřením časového intervalu čítačem nebo s využitím metod násobení časové odchylky.

Výsledky získané měřením ve frekvenční oblasti je možné převést do časové oblasti a naopak. Postupuje se přitom tak, že ve změřeném průběhu se identifikují jednotlivé typy šumu, určí se jejich úroveň ve smyslu použité charakterizace a převedou se z frekvenční do časové oblasti, nebo naopak pomocí vztahů uvedených v **tab. 2**. Poté se z převedených úrovní šumů opět složí celý průběh jako součet dílčích příspěvků jednotlivých šumů.

Dekompozice frekvenční stability

Při měření frekvenční stability se vždy porovnává signál testovaného zdroje času či frekvence s nějakým referenčním signálem. Výslednou stabilitu lze určit pokud dopředu víme, že fázový šum reference má mnohem nižší úroveň než šum testovaného zdroje. Pak lze šum reference prostě zanedbat.

Situace je ovšem řešitelná také v případě, že předem víme, že oba zdroje mají srovnatelnou stabilitu. Změřenou varianci označme σ_{AB}^2 a jednotlivé variance σ_A^2 a σ_B^2 . Předpokládejme, že šumy v jednotlivých zdrojích jsou nezávislé.

Párová stabilita σ_{AB}^2 je pak dána součtem

$$\sigma_{AB}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2.$$

V případě, kdy frekvenční stabilita reference je srovnatelná se stabilitou testovaného zdroje, tedy $\sigma_A^2 \approx \sigma_B^2$, stano-

víme frekvenční stabilitu obou zdrojů ve smyslu variance nebo odchylky z párové stability

$$\sigma_A^2 = \sigma_B^2 = \frac{\sigma_{AB}^2}{2}$$

a

$$\sigma_A = \sigma_B = \frac{\sigma_{AB}}{\sqrt{2}}.$$

Pokud ani jednu předchozí podmínku nelze splnit, stabilitu jednotlivých zdrojů lze ještě určit na základě párových měření na trojici signálů zdrojů frekvence. Párové stability naměřené na jednotkách A, B a C označíme

$$\sigma_{AB}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2,$$

$$\sigma_{AC}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_C^2,$$

$$\sigma_{BC}^2 = \sigma_B^2 + \sigma_C^2.$$

Jednotlivé stability následně určíme

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{AB}^2 + \sigma_{AC}^2 - \sigma_{BC}^2),$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{AB}^2 + \sigma_{BC}^2 - \sigma_{AC}^2),$$

$$\sigma_C^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{AC}^2 + \sigma_{BC}^2 - \sigma_{AB}^2).$$

Tento postup se někdy označuje jako metoda „trojrohého klobouku“. Tato metoda dává nejlepší výsledky, pokud fázový šum všech tří zdrojů je nezávislý a jeho velikost je srovnatelná.

Literatura

- [1] „Characterization of clocks and oscillators,“ NIST technical note 1337, March 1990.
- [2] W. J. Riley, „Handbook of frequency stability analysis,“ Hamilton technical services, 2007.



KVANTOVÉ ETALONY ČASU A FREKVENCE

Podle kvantové fyziky se atomy mohou nacházet pouze v určitých energetických stavech charakteristických pro daný prvek. Pokud na atom působíme elektromagnetickým polem určité frekvence, může dojít k jeho excitaci, tedy přechodu z nižšího energetického stavu E1 do vyššího energetického stavu E2, což je provázáno pohlcením fotonu elektromagnetického záření s frekvencí

$$\nu = \frac{E2 - E1}{h},$$

kde h je Planckova konstanta. Na druhou stranu, atom může také přejít z vyššího energetického stavu E2 do nižšího energetického stavu E1, což je zase provázáno vyzářením elektromagnetického vlnění o frekvenci ν . Tyto skutečnosti dávají tušit, že v každém atomu se vlastně skrývá

maličký etalon určitých jmenovitých frekvencí, které jsou dány jen fyzikálními konstantami. Pokud se tedy dohodneme na použití atomů určitého vhodného prvku, můžeme nezávisle vytvářet etalony stejné frekvence, aniž bychom je mezi sebou navazovali. Nejvyšším etalonem je zde sama hmota.

Z výše uvedeného by se mohlo zdát, že koncept kvantových etalonů vede k dokonalé reprodukovatelnosti generovaných frekvencí. Tak tomu ale není. Procesy probíhající na atomární úrovni je třeba nějak změřit, abychom je mohli převést na běžně použitelné elektrické signály, a každé měření je zatíženo nějakou nejistotou. Ta tedy limituje i reprodukovatelnost kvantových etalonů frekvence. V případě pokročilejších kvantových etalonů frekvence se dnes tato nejistota pohybuje v řádu 10^{-16} .

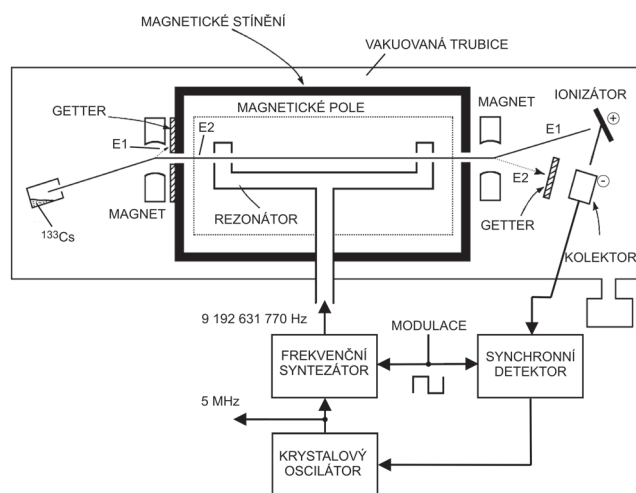
Kvantové etalony frekvence se dělí na aktivní a pasivní. V aktivních etalonech se přímo využívá elektromagnetického vlnění vyzářeného atomy nebo molekulami při změně jejich energetického stavu. V pasivních etalonech se porovnává frekvence nějakého externího generátoru s frekvencí, která odpovídá určitému kvantovému přechodu vybraných atomů, které zde v podstatě slouží jako velmi přesný a velmi jakostní rezonátor.

Tradiční kvantové mikrovlnné etalony frekvence jsou založeny na využití atomů tří prvků: vodíku, cesia nebo rubidia. Atomy těchto prvků patří do první skupiny periodické soustavy prvků a vyznačují se tím, že mají právě dva základní energetické stavy. Z metrologického hlediska mají specifické postavení mezi kvantovými etalony frekvence cesiové etalony, protože z definice realizují sekundu SI.

Cesiový svazkový etalon

Pokud atom prochází magnetickým polem, působí na něj síla, jejíž velikost závisí na jeho magnetickém momentu a tedy i jeho energetickém stavu. Toho se využívá k selekci atomů v různých energetických stavech v cesiovém svazkovém etalonu.

Principiální schéma cesiového svazkového etalonu je na **obr. 1**. Klíčové součásti jsou umístěny v trubici, v níž se udržuje vysoké vakuum. Na jednom konci této trubice je termostatovaná komůrka, z níž ústí do vakuované trubice úzký kanálek, případně svazek souběžných kanálků. V komůrce je náplň izotopu cesia ^{133}Cs , která se zde zahřívá na teplotu přibližně 100°C . Při této teplotě je cesium v kapalném skupenství a uvolňuje se z něho řídká pára s tak nízkým tlakem, že emitované atomy procházejí kanálkem do vakuované trubice poměrně řídké a bez vzájemných kolizí. Tak se vytvoří jen mírně divergentní svazek atomů cesia pohybujících se od ústí kanálku směrem k druhému konci trubice, kde je umístěn velmi citlivý detektor intenzity dopadajícího svazku atomů.



Obr. 1: Schéma cesiového svazkového oscilátoru.

Detektor se skládá z ionizátoru a kolektoru iontů, mezi nimiž je připojeno napětí (kladný pól na ionizátor, záporný na kolektor). Ionizátor je tvořen žhavým wolframovým drátem, kde dopadající atomy cesia odevzdají elektron, přičemž

vznikají kladné ionty, které jsou odváděny na kolektor. Tento proces je provázen vznikem slabého elektrického proudu, jehož velikost je úměrná počtu atomů přicházejících na detektor.

Na své cestě k detektoru prochází svazek atomů cesia mezi póly dvou silných magnetů, které rozštěpí svazek do různých směrů v závislosti na jejich energetickém stavu. Mezi oběma magnety je pak mikrovlnný rezonátor. Zde na procházející atomy působí jednak stejnosměrné magnetické pole a jednak mikrovlnné elektromagnetické pole generované frekvenčním syntezátorem z krystalového oscilátoru, jehož frekvenci lze v malém rozsahu řídit napětím. Krystalový oscilátor pracuje na některé „standardní“ frekvenci. S ohledem na dosažení co nejlepší krátkodobé stability je to často 5 MHz.

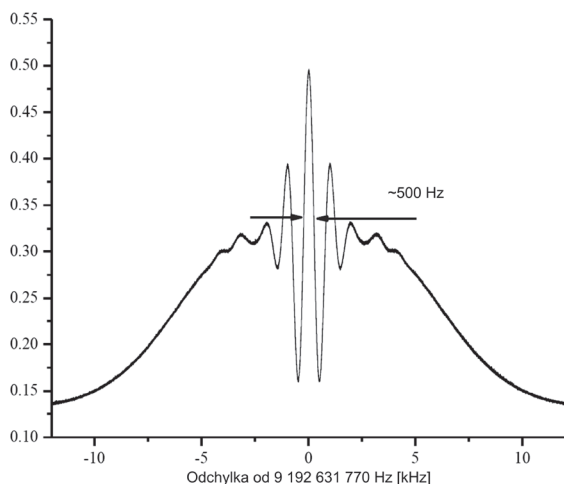
Emitovaný svazek na svém počátku obsahuje stejný počet atomů v energetických stavech E1 a E2. Při průchodu prvním magnetem se odkloní atomy v energetickém stavu E1 mimo rezonátor, kde jsou zachyceny v getteru (materiál, který ve vakuu pohlcuje atomy zbytkových plynů). Svazek atomů v energetickém stavu E2 pokračuje do prostoru mikrovlnného rezonátoru. Zde prochází elektromagnetickým polem s frekvencí 9 192 631 770 Hz, která odpovídá přechodu mezi dvěma základními energetickými stavy atomu cesia E1 a E2. V důsledku interakce s elektromagnetickým polem při současném působení stejnosměrného magnetického pole dochází s určitou pravděpodobností k změně energetického stavu atomů z E2 na E1. Pravděpodobnost přechodu je nejvyšší v rezonanci, kdy frekvence elektromagnetického pole je rovna frekvenci, která odpovídá přechodu mezi oběma energetickými stavy. Při této frekvenci je tedy počet atomů, které se po průchodu rezonátorem nacházejí ve stavu E1, maximální. Za rezonátorem prochází svazek dalším magnetem, kde se odkloní atomy v energetickém stavu E2 mimo detektor, kde jsou zachyceny getterem. Atomy ve stavu E1 jsou odkloněny na detektor, který měří intenzitu dopadajícího svazku.

Pokud nepatrně rozladíme frekvenci elektromagnetického pole a sledujeme proud detektoru, dostaneme závislost s výraznou rezonanční čarou v nejbližším okolí frekvence, která odpovídá přechodu mezi dvěma základními energetickými stavy atomu cesia. Čím je rezonanční čára užší, tím přesněji je možné vyhodnotit rezonanci a tím přesněji dokážeme realizovat sekundu SI.

Šířka rezonanční čáry je nepřímo úměrná době průchodu atomů rezonátorem. Je tedy přímo úměrná rychlosti pohybu atomů a nepřímo úměrná délce rezonátoru. Snaha o zúžení rezonanční čáry prodlužováním rezonátoru by ale vedla ke zvýšení disperze svazku. Při velkých rozměrech je také obtížné zajistit, aby magnetické pole bylo po celé délce rezonátoru homogenní. Ani snaha o prodloužení doby průchodu atomů rezonátorem zpomalením atomů na základě snížení teploty není bez problémů, protože by se snížila intenzita svazku.

V cesiových svazkových etalonech běžné konstrukce se proto dosahuje co možná nejúžší rezonanční čáry použitím Ramseyova dutinového rezonátoru, což je rezonátor

podkovovitého tvaru, jímž prochází svazek dvakrát. Jednou na začátku rezonátoru, podruhé na jeho konci. Oba úseky, v nichž dochází k interakci atomů s elektromagnetickým polem, jsou přitom poměrně krátké vzhledem k celkové délce rezonátoru. Požadavek na stálost a homogenitu stejnosměrného magnetického pole se pak omezuje jen na dvě nepříliš velké oblasti. Typický průběh rezonanční křivky při použití Ramseyova rezonátoru je na **obr. 2**. Široká základna křivky je dána délkou úseků, v nichž svazek prochází elektromagnetickým polem. Šířka úzké rezonanční čáry uprostřed je dána vzdáleností mezi těmito úseky, tj. celkovou délkou rezonátoru.



Obr. 2: Průběh rezonanční křivky při použití Ramseyova rezonátoru. Komerčně vyráběný cesiový svazkový etalon.

Aby bylo možné vyhodnotit rezonanci, elektromagnetické pole se frekvenčně moduluje periodickým signálem, v laboratorních primárních etalonech frekvence zpravidla obdélníkovým průběhem. Tento signál se pak objeví jako střídavá složka proudu na výstupu detektoru. Na základě porovnání detekovaného průběhu s modulačním průběhem v synchronním detektoru se vyhodnotí odchylka od rezonanční frekvence. Ta se využívá k řízení frekvence základního krystalového oscilátoru tak, aby střední frekvence elektromagnetického pole byla totožná s frekvencí rezonanční. Protože frekvence elektromagnetického pole a frekvence krystalového oscilátoru jsou v pevném celočíselném poměru (např. $919263377/5000000$), výsledná frekvence krystalového oscilátoru v ustáleném stavu vykazuje přesnost a stabilitu atomového rezonátoru.

Cesiové etalony frekvence vynikají především dlouhodobou stabilitou a přesností generované frekvence. Ve velkém rozsahu intervalů lze jejich nestabilitu charakterizovat jako bílý frekvenční šum. Komerčně vyráběné cesiové svazkové hodiny typicky vykazují stabilitu $5 \cdot 10^{-14}$ za 1 den. Typický průběh Allanovy odchylky ve velké rozsahu intervalů je vyneseno na **obr. 7**.

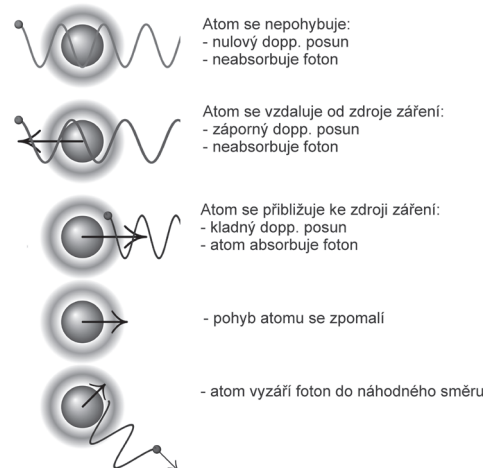
Vzhledem k tomu, že cesiové svazkové hodiny jsou provozně poměrně nenáročné, daří se je udržovat v nepřetržitém provozu po mnoho let. Např. primární etalony frekvence CS1 a CS2 v německém PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) pracovaly nepřetržitě po několik desítek let.

Nepřetržitá doba provozu komerčně vyráběných cesiových hodin je limitována životností trubice, která činí zhruba 6 let.

Cesiová fontána

Vývoj atomových hodin byl vždy veden cílem, aby doba, po kterou probíhá interakce atomů s mikrovlnným elektromagnetickým polem, byla co nejdelší, což je předpoklad pro dosažení velmi úzké rezonanční čáry a tak i vysoké přesnosti a frekvenční stability. Významným impulzem v tomto snažení byl v polovině 80. let dvacátého století objev laserového ochlazování atomů, jehož význam pro další rozvoj kvantových etalonů frekvence byl okamžitě rozpoznán.

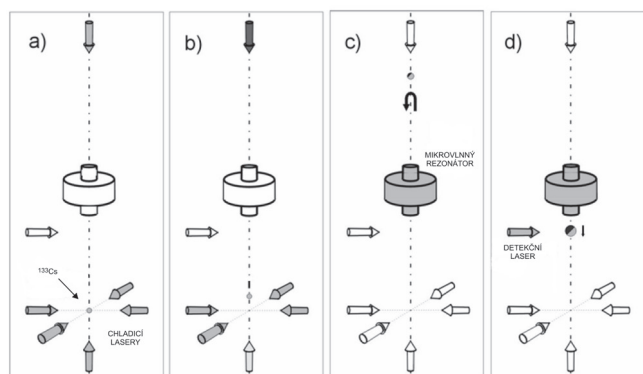
Jak je možné něco ochladit působením světla? Dříve než se pokusíme tento zajímavý mechanismus vysvětlit, ujasněme si, co je vlastně teplota. Atom sám o sobě žádnou teplotu nemá. Teplotu má soubor atomů a je určena tím, jak rychle se vůči sobě atomy chaoticky pohybují. Čím intenzivnější je tento pohyb, tím vyšší je jejich teplota. Ochlazením atomů se tedy rozumí zpomalení jejich pohybu.



Obr. 3: Princip dopplerovského laserového ochlazování atomů.

V závislosti na struktuře svých energetických stavů mohou atomy absorbovat fotony záření určité frekvence. Jestliže na atom posvítíme světlem, jehož frekvence je o trochu menší, nebude se takové záření absorbovat (**obr. 3**). Pokud se však atom pohybuje proti zdroji světla, frekvence dopadajícího záření má díky Dopplerově posunu vyšší frekvenci a k absorpci proto v tomto případě dojde. Protože při absorpci je atomu předána hybnost fotonu, pohyb atomu ve směru ke zdroji záření se zpomalí. Atom však nevydrží být vybuděn dlouho. Po chvíli se přijatý foton opět vyzáří a atom urychlí, ale do náhodného směru. Opakování tohoto procesu absorpce a následné emise fotonů proto vede k postupnému snižování složky rychlosti atomů ve směru ke zdroji záření. Abychom mohli mluvit o ochlazení, je třeba ale snížit rychlost pohybu atomů ve všech směrech. Toho docílíme tak, že kolem ochlazované oblasti rozmístíme šest zdrojů záření, dva proti sobě do každé osy pravotočivé souřadné soustavy. Uvedený postup ochlazování atomů se označuje jako dopplerovské chlazení a umožňuje snížit teplotu atomů blízko k absolutní nule.

Činnost samotné cesiové fontány ilustruje **obr. 4**. Atomy cesia se nacházejí v plynném skupenství uvnitř vertikálně



Obr. 4: Princip cesiové fontány: a) Působením záření chladicích laserů se rychlost atomů sníží a jejich teplota klesne k absolutní nule. Současně je na atomy aplikováno magnetické pole, čímž se vytvoří shluk atomů o průměru několika milimetrů. b) Magnetické pole je vypnuto a vertikálně orientované lasery uvedou shluk atomů do pohybu směrem nahoru. c) Všechny lasery jsou vypnuty. Shluk atomů vyletí do výšky asi 1 m a v důsledku působení gravitace zase padá dolů. Přitom atomy dvakrát prolétnou mikrovlnným rezonátorem, kde na ně působí elektromagnetické pole. d) Shluk padajících atomů se ozáří světlem detekčního laseru, které způsobí, že atomy ve vyšším energetickém stavu vyzáří fotony, které se pak detekují fotodetektozem. Intenzita detekovaného světla odpovídá množství excitovaných atomů a je maximální, když frekvence elektromagnetického pole přesně odpovídá přechodu mezi dvěma základními energetickými stavy atomu cesia, tj. 9 192 631 770 Hz. Uvedené kroky se periodicky opakují.

orientované trubice s hlubokým vakuem. Působením záření chladicích infračervených laserů se rychlost atomů sníží a jejich teplota klesne až na hodnotu několika mikrokkelvinů. Současně je na atomy aplikováno magnetické pole pomocí vhodně uspořádaných cívek, čímž se vytvoří shluk atomů o průměru několika milimetrů zachycený v tzv. magneto-optické pasti. Následně je magnetické pole vypnuto a pomocí dvojice vertikálně orientovaných laserů je shluk atomů uveden do pohybu směrem nahoru. Všechny lasery jsou poté vypnuty. Podobně jako voda ve fontáně, shluk atomů vyletí vzhůru do výšky zhruba jednoho metru a poté v důsledku působení gravitace zase padá dolů. Během tohoto pohybu nahoru a dolů atomy dvakrát prolétnou mikrovlnným rezonátorem, kde na ně působí elektromagnetické pole s frekvencí, která odpovídá přechodu mezi dvěma základními energetickými stavy atomu cesia. V důsledku interakce s elektromagnetickým polem část atomů přejde z nižšího energetického stavu E1 do vyššího energetického stavu E2. K detekci těchto atomů se využívá fluorescence. Shluk padajících atomů se ozáří světlem detekčního laseru, které způsobí, že atomy ve vyšším energetickém stavu E2 vyzáří fotony, které se pak detekují fotodetektozem. Intenzita detekovaného světla tedy odpovídá množství excitovaných atomů. Uvedené kroky se periodicky opakují.

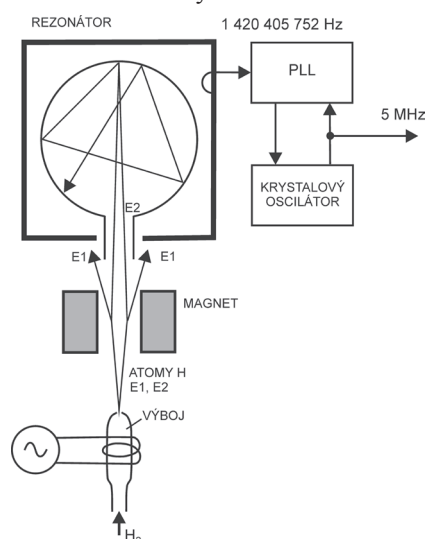
Pokud měníme frekvenci elektromagnetického pole v mikrovlnném rezonátoru a sledujeme výstup fotodetektoru, dostaneme stejně jako v případě cesiového svazkového etalonu závislost s výraznou rezonanční čarou v okolí frekvence 9 192 631 770 Hz. V tomto případě je však čára výrazně užší, což je důsledkem výrazně delší interakce s elektromagnetickým polem. Zatímco v cesiovém svazkovém etalonu je rychlost atomů několik set metrů za sekundu a doba inter-

akce s elektromagnetickým polem činí několik milisekund, v cesiové fontáně se ochlazené atomy pohybují rychlostí jen několik centimetrů za sekundu a délka působení elektromagnetického pole je kolem jedné sekundy. Zúžení spektrální čáry také odpovídá výrazně lepší přesnost a stabilita cesiové fontány. V současné době nejmenší standardní nejistota realizace sekundy SI vykazuje cesiová fontána CSF2 provozovaná v britské NPL a to $2,3 \cdot 10^{-16}$ a běžně je standardní nejistota cesiových fontán lepší než 10^{-15} .

Aktivní vodíkový maser

Jak naznačuje název, aktivní vodíkový maser je aktivním etalonem frekvence. To znamená, že se zde přímo využívá elektromagnetického vlnění vyzářeného atomy při změně jejich energetického stavu. Slovo „maser“ je zkratkou z anglického „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, tedy „zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření“. Jedná se o zařízení, které pracuje na stejném principu jako laser, ale v mikrovlnném frekvenčním pásmu.

Aktivní vodíkové masery jsou ve srovnání s ostatními komerčně vyráběnými kvantovými etalony frekvence poměrně komplikovaná a nákladná zařízení, ačkoli jejich principiální schéma (obr. 5) příliš složité není. Molekulární vodík se pod stálým tlakem přivádí do skleněné komůrky, kde se působením silného elektromagnetického pole vyvolá výboj, který způsobí rozštěpení molekul H_2 na jednotlivé atomy vodíku. Z komůrky atomy volného vodíku unikají do vakuovaného prostoru, kde se z nich pomocí malého kolimátoru formuje svazek, který postupuje v ose šestipólového magnetu. Zde se v důsledku působení magnetického pole atomy ve vyšším energetickém stavu přikloní do osy magnetu a postupují do baňky, zatímco ostatní atomy se odkloní.



Obr. 5: Schéma aktivního vodíkového maseru.

Křemenná baňka má průměr zhruba 10 cm a délku kolem 20 cm a její vnitřní stěna je potažena teflonem. Tímto opatřením se snižuje četnost přechodů atomů do základního energetického stavu a jejich rekombinace na molekulární vodík. Tak se daří udržet atomy ve vyšším energetickém stavu po dobu až několik sekund. Baňka je vložena do dutinového

rezonátoru naladěného na frekvenci 1420 MHz. Rezonátor musí být mimořádně jakostní. Většinou se jedná o keramický materiál potažený stříbrem.

V baňce dochází k stimulované emisi. Atomy, které přejdou do nižšího energetického stavu, vyzáří elektromagnetické záření. Toto záření stimuluje další atomy k přechodu do nižšího energetického stavu za současné emise záření, které je ve fázi s již existujícím zářením. Záření se tak zesiluje. Pokud jsou ztráty v rezonátoru dostatečně nízké a intenzita svazku atomů vstupujících do baňky dostatečně velká, v rezonátoru se uvedeným mechanismem udržují samovolné oscilace na frekvenci 1 420 405 752 Hz. Takto generovaný vysokofrekvenční výkon je však nesmírně nízký. Běžně se pohybuje v řádu 10^{-13} W. Signál vystupující z dutinového rezonátoru je po zesílení přiveden do fázového závěsu, kde je na něj navázán krystalový oscilátor o vhodné nominální frekvenci.

Frekvenci oscilací aktivního vodíkového maseru ovlivňuje řada faktorů, jejichž působení se omezuje pomocí různých opatření. Vliv vnějšího magnetického pole se eliminuje několikvrstevným magnetickým stíněním. Často se používá i aktivní kompenzace magnetického pole. Značný vliv mají také změny rezonanční frekvence dutinového rezonátoru. Teplota klíčových částí maseru se proto stabilizuje velmi přesným termostatem a někdy se zavádí i automatické doladování rezonátoru.

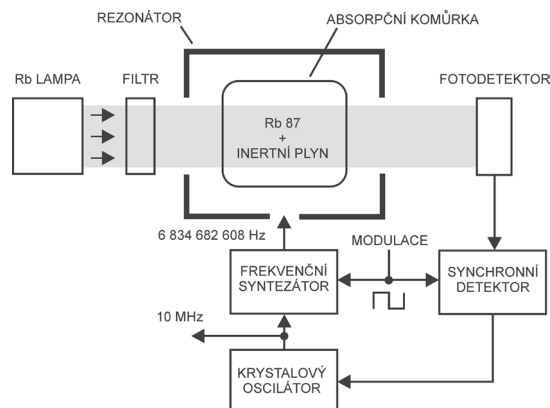
Aktivní vodíkové masery vynikají svou krátkodobou stabilitou, která je pro intervaly až několik dnů podstatně lepší než u komerčních cesiových etalonů. Dlouhodobá stabilita je ale horší než u cesiových etalonů. I u pokročilých aktivních vodíkových maserů je třeba počítat s driftem frekvence v řádu 10^{-16} za 1 den. Aktivní vodíkové masery nacházejí uplatnění všude, kde méně záleží na absolutní přesnosti vytvářené frekvence a využije se jejich vynikající krátkodobá stabilita. Slouží jako sekundární etalony u laboratorních etalonů frekvence, které není možné udržovat v nepřetržitém provozu. Také patří k standardnímu vybavení stanic VLBI (Very Long Base Interferometry).

Rubidiový etalon

Rubidiové frekvenční etalony jsou ze všech kvantových zdrojů přesné frekvence nejdostupnější a nejkompaktnější. Jejich rozměry i cena jsou v některých případech srovnatelné s kvalitním krystalovým oscilátorem.

Typické uspořádání rubidiového etalonu je znázorněno na obr. 6. Klíčovou součástí je vyhřívaná absorpční komůrka, která obsahuje páry izotopu rubidia 87 spolu s vhodným nosným inertním plynem. Teplota náplně se udržuje zhruba na 85°C. Absorpční komůrka je umístěna v mikrovlnném rezonátoru, který je buzen elektromagnetickým polem o frekvenci blízké 6 834 682 608 Hz, což je frekvence, která odpovídá přechodu mezi hyperjemnými energetickými hladinami rubidia 87. Budící vysokofrekvenční signál se generuje pomocí frekvenčního syntezátoru ze signálu krystalového oscilátoru.

K excitaci atomů rubidia se využívá světelné záření o vlnové délce 780 nm emitované výbojem v rubidiové lampě.



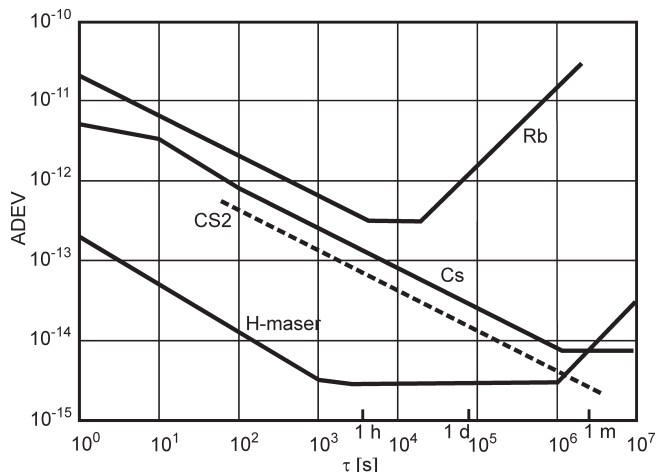
Obr. 6: Schéma rubidiového etalonu frekvence.

Jedná se o vyhřívanou baňku, která obsahuje rubidium 87 spolu s inertním zapalovacím plynem. Baňka je vložena do cívky, která vytváří silné vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Tak se v baňce vyvolá výboj. Záření výbojky dále prochází filtrem, který obsahuje páry rubidia 85. Filtrem vyčistí spektrum emitované výbojem tak, aby obsahovalo pouze požadovanou spektrální čáru. Intenzita světla, které prošlo absorpční komůrkou, se vyhodnocuje fotodetektorem.

Atomy rubidia v absorpční komůrce se za normálních okolností nacházejí se stejnou pravděpodobností v nižším energetickém stavu E1 a vyšším energetickém stavu E2. Trvalým působením světla rubidiové lampy přejdou postupně téměř všechny atomy v energetickém stavu E1 do vyššího energetického stavu E2. Využívá se přitom optického pumpování, které způsobí excitaci atomů, které se nacházejí v energetickém stavu E1 do vysokého energetického stavu Ee, z kterého však samovolně přecházejí do stavů E1 a E2 a to se stejnou pravděpodobností.

Pokud na atomy navíc působí elektromagnetické pole o frekvenci, která přesně odpovídá přechodu mezi energetickými stavy E1 a E2, začnou přecházet ze stavu E2 do nižšího energetického stavu E1. Působením světla ale vzápětí přejdou do vyššího energetického stavu E2. Tato excitace je ovšem provázena absorpcí světla. Pokud nepatrně měníme frekvenci elektromagnetického pole a sledujeme intenzitu detekovaného světla, dostaneme závislost s výraznou absorpční čarou. Čím je frekvence elektromagnetického pole blíží rezonanci, tím menší je intenzita světla vyhodnocená fotodetektorem. Šířka absorpční rezonanční čáry odpovídá typicky jakosti Q kolem 10^7 . Frekvenci krystalového oscilátoru, který slouží jako základní reference pro frekvenční syntezátor, je tedy třeba řídit tak, aby detekovaná intenzita světla byla minimální. Využívá se přitom frekvenční modulace nízkofrekvenčním signálem a synchronní detekce stejně jako v cesiovém svazkovém etalonu.

Rubidiové frekvenční etalony vykazují velmi dobrou krátkodobou stabilitu. Kvalitní komerční výrobky mívají pro časové intervaly až do několika tisíc sekund dokonce lepší stabilitu než některé cesiové etalony se standardní trubici. V důsledku působení různých vlivů je však poněkud problematická přesnost generované frekvence a její dlouhodobá stabilita. Drift generované frekvence je běžně kolem 10^{-12} za 1 den. Rubidiové etalony je proto třeba pra-



Obr. 7: Srovnání typické frekvenční stability kvantových etalonů frekvence vyjádřené Allanovou odchylkou ADEV v závislosti na délce průměrovacího intervalu. Cs – komerčně vyráběný cesiový svazkový etalon s „high performance“ trubící, CS2 – laboratorní cesiový svazkový etalon s dlouhou trubící provozovaný v PTB Braunschweig, H-maser – komerčně vyráběný aktivní vodíkový maser, Rb – komerčně vyráběný rubidiový etalon.

videlně kalibrovat. Ideálním řešením je jejich fázové zavěšení na vhodnou externí referenci, nejlépe na časový signál generovaný přijímačem GPS. Pokud se frekvence řídí se správnou časovou konstantou, vykazuje takto „disciplinovaný“ oscilátor vynikající krátkodobou i dlouhodobou stabilitu i přesnost generované frekvence.

Literatura

- [1] A. Bauch, „Atomic frequency standards, properties and applications,“ Proceedings of the International School of Physics „Enrico Fermi“, Metrology and Fundamental Constants, Societa Italiana di Fisica, 2007, pp. 287-315.
- [2] A. Bauch, „Time – the SI Base Unit Second,“ PTB - Mitteilungen, vol. 122 (2012), no. 1, pp. 23–36.
- [3] A. Bauch, „Caesium Atomic Clocks: Function, Performance and Applications,“ Measurement Science and Technology, vol. 14 (2003), p. 1159.
- [4] L. L. Lewis, „An introduction to frequency standards,“ Proceedings of the IEEE, vol. 79 (1991), no. 7, pp. 927-935.
- [5] „BIPM Annual Report on Time Activities,“ vol. 7 (2012).



OPTICKÉ HODINY

V článku je popsán vývoj etalonů frekvence v optické oblasti, stručný přehled typů hodin vyvíjených v předních světových laboratořích s perspektivou možné nové definice sekundy a nejdůležitější příspěvky k jejich nejistotě. Na závěr je představen projekt vývoje ytterbiových iontových hodin v ČMI.

Optickými hodinami myslíme atomové hodiny, které jsou řízeny kvantovým přechodem v pásmu optických frekvencí – stovek terahertz (tedy na sto tisíckrát vyšších frekvencích než radiofrekvence – například cesiové – hodiny, popsané v předchozím článku).

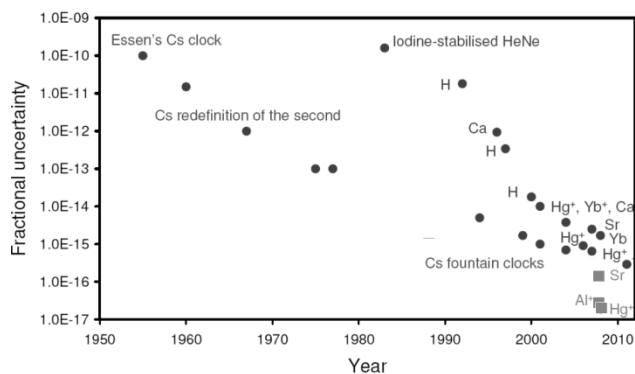
Hodiny se skládají z oscilátoru, hodinového stroje a displeje. Navíc také musí existovat nějaká časová nebo frekvenční reference, se kterou se oscilátor periodicky porovnává („seřizuje“). Od oscilátoru se požaduje krátkodobá stabilita – řídí chod hodin mezi dvěma seřizeními. Historické mechanické hodiny tak třeba tvořil oscilátor: kyvadlo, hodinový stroj: ozubené soukolí, displej: ciferník a referenci: pohyb Země (okolo své osy – efemeridy, nebo okolo Slunce – tropický rok). U současných hodin to může být například kmitání piezokrystalu, elektronický čítač a seřizování podle UTC. U optických hodin je oscilátorem stabilní „hodinový“ laser, hodinovým strojem femtosekundový hřeben a elektronické čítače a referenci vhodný kvantový přechod (v izolovaných – chlazených a zachycených – atomech a iontech); seřizování se provádí co nejčastěji – několikrát za sekundu až jednou za několik sekund.

Vysoká pracovní frekvence oscilátoru má několik výhod – umožňuje přímo měřit krátké časy a umožňuje dosáhnout vyšší krátkodobé stability díky tomu, že vždy přítomný šum se projeví relativně méně. Pro dosažení relativní přesnosti např.

1×10^{-15} při měření intervalu 1 sekunda je při použití 9,2 GHz signálu nutno spočítat ~9,2 miliardy celých kmitů a dále určit zbytek (fázi) s přesností jedné miliontiny kmitu a to přináší značné nároky na čistotu signálu. Naproti tomu existují optické přechody (se sto tisíckrát až milionkrát vyšší frekvencí) v jiných atomech, které mají podstatně vyšší jakost (nižší poměr šířky čáry a pracovní frekvence) a u nichž jsou při stejné relativní přesnosti podstatně nižší nároky na přesnost určení fáze (a tím i vyšší odolnost proti rušivým vlivům). Frekvence některých z těchto optických přechodů jsou navíc i méně ovlivněny fyzikálními vlivy okolí, nutně se vyskytujícími v etalonu (elektrické a magnetické pole pastí, záření hodinového laseru, tepelné záření vlastního zařízení, ...) a proto jsou perspektivně přesnější než realizace současné definice sekundy a v relativně blízké době se předpokládá změna SI definice sekundy na některý optický přechod.

Optické etalony frekvence (optické vlnové délky) se v metrologii používají více než sto let – především v metrologii délky (interferometrii) a spektroskopii (Michelson-Morleyův experiment z roku 1881, metr byl mezi lety 1960 a 1984 definován jako násobek vlnové délky oranžové čáry kryptonu). Optické frekvence ale nelze přímo elektronicky zpracovat (čítat), první fázově koherentní měření optické frekvence se podařilo až na počátku 70. let dvacátého století; na přelomu tisíciletí bylo zjednodušeno pomocí femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí [1], [2]. Původní seznam doporučených etalonů kmitočtu/vakuové vlnové délky, které realizují SI definici metru [3] je v posledních letech udržován společně poradním výborem pro délku a poradním výborem pro čas a frekvenci a zahrnuje i takzvané sekundární reprezentace sekundy – potenciální kandidáty

na novou SI definici sekundy. Stabilita těchto etalonů je již řadu let podstatně lepší, než stabilita cesiových fontán a několik let mají i lepší vlastní nejistotu (měření jejich absolutní frekvence je omezeno nejistotou cesiových hodin), jak je znázorněno na **obr. 1**.



Obr. 1: Graf vývoje relativní přesnosti cesiových atomových hodin (tmavá kolečka) a optických etalonů (světlá kolečka a čtverečky). U čtverečků jde o přesnost určení poměru dvou optických hodin (protože cesiové hodiny již jako reference nestačí). Převzato z prezentace [6], upraveno.

Pro redefinici sekundy ale stále není jednoznačný kandidát – vývoj postupuje rychle a každý rok je nejen navržen ale i realizován nový etalon překonávající předchozí. Je zřejmé, že tento vývoj bude pokračovat i nadále a v budoucnu budou realizovány ještě podstatně přesnější etalony založené na jaderných přechodech, jejichž vlastnosti budou ještě méně ovlivněny parametry okolního prostředí a detekcí než současné optické hodiny.

Cesiové fontány dosahují relativní přesnosti 1×10^{-15} až $2,3 \times 10^{-16}$ [4]. Tato technologie se již blíží svému předpokládanému limitu přesnosti, jenž se pohybuje okolo 1×10^{-16} . Naopak v současnosti jeden z nejlepších optických frekvenčních standardů založený na iontu hliníku má přesnost v řádu 1×10^{-17} [5] a je zde navíc potenciál pro další zlepšení k hodnotám řádu 1×10^{-18} či lepším.

Typy optických hodin

První optické etalony frekvence/vlnové délky používaly jako referenci kvantové přechody (spektrální čáry) detekované v kyvetách s parami o nízkém tlaku. Dopplerovské rozšíření je odstraněno nelineární sub-dopplerovskou spektroskopii (například pomocí saturace absorpce), tlakové srážkové rozšíření a posun je snížen snížením tlaku, ale rozšíření spektrální čáry omezenou dobou setrvání částice v měřicím laserovém svazku (relace neurčitosti čas – energie) neumožňují detekci nejvhodnějších extrémně úzkých spektrálních čar tzv. „zakázaných“ přechodů.

Snížení teploty plynu chlazením stěn kyvety není možné (plyn se „vymrazí“ – zachytí na stěnách, kde díky interakci již nelze detekovat čistý neporušený původní přechod. Proto se pro optické hodiny využívají přechody detekované v laserem chlazených částicích zachycených v úzce vymezeném prostoru (menším než vlnová délka – Lamb-Dickův režim) v ultra vysokém vakuu. Toto prostorové omezení atomů je zcela zásadní požadavek umožňující eliminovat Dopplerův (ne-relativistický) jev prvního řádu.

Jako referenci je potřeba zvolit atom/iont, který má nejen vhodný (úzký) „hodinový“ přechod, jehož frekvence je co nejméně závislá na okolních vlivech, ale i vhodný přechod použitelný pro laserové chlazení.

Podle způsobu zachycení dělíme optické hodiny na dva základní typy – hodiny se zachycením iontu v iontové pasti (*ion clock*) a hodiny se zachycením neutrálních atomů v optické mřížce (*lattice clock*); optickou mřížkou zde myslíme elektromagnetické pole tvořené stojatou vlnou interferujících protiběžných svazků – atomy jsou zachyceny v kmitnách stojaté elektrické vlny.

Jinak se princip činnosti obou typů hodin příliš neliší, u obou typů je třeba zdroj částic, chlazení a zachycení, příprava výchozího kvantového stavu, interakce s „hodinovým“ laserem, a detekce výsledného stavu a zpětná vazba pro hodinový laser podle výsledku.

Významný rozdíl je v tom, že v jedné iontové pasti je zpravidla zachycen jen jeden iont (na vývoji hodin s několika ionty se pracuje), ale v optické mřížce lze zachytit mnoho (desítky tisíc) atomů a tím získat lepší poměr signálu k šumu a lepší krátkodobou stabilitu. U iontových hodin je jeden iont zachycen a používán dlouhou dobu (u některých typů se dosahuje doba zachycení řadu měsíců) a zdroj částic (píčka) může být vypnut. U mřížkových hodin jsou atomy po každém cyklu ztraceny a je třeba zchladit a zachytit nové (píčka běží trvale, její rušivý vliv musí být odstíněn).

Hodinový laser a referenční rezonátor

Hodinový laser plní dvě funkce – generuje signál oscilátoru hodin (odpovídající krátkodobé stabilitě referenčního rezonátoru) a současně je použit pro sondování referenčního přechodu (podle nějž je seřizován oscilátor¹), proto musí mít dostatečně úzkou čáru (~Hertz).

Referenční ultra-stabilní rezonátor je pasivní Fabry-Perotova dutina s vysokou jakostí udržovaná ve vakuu při teplotě odpovídající nulové teplotní roztažnosti (bodu obratu) použitého materiálu (typicky sklo ULE). Rezonátor a jeho uchycení jsou navrženy tak, aby osová délka byla co nejméně ovlivněna vibracemi (ve všech směrech). Již několik let se daří minimalizovat vliv teplotní roztažnosti a vibrací tak, že stabilita rezonátoru je limitována teplotním šumem (Brownovým pohybem), jeho vliv je minimalizován použitím delšího rezonátoru, materiálů s vysokou mechanickou jakostí a rozšířením modu.

Nejlepší stabilita (pod 2×10^{-16} pro sekundové průměry) byla dosažena v PTB s rezonátorem z monokrystalu křemíku při 124 K [6].

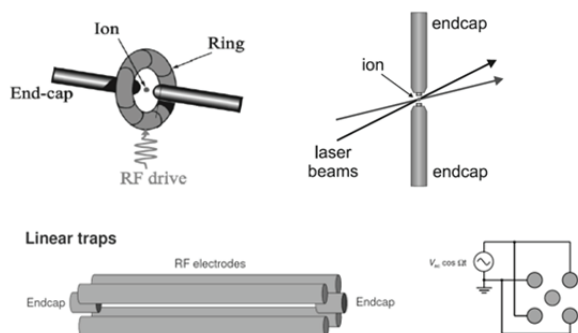
Iontové hodiny

Ze své podstaty mají iontové hodiny značnou výhodu v tom, že se nabitě částice nechají velmi snadno ovládat pomocí elektromagnetických polí. Typicky se k jejich zachycení využívá pasti s radiofrekvenčním polem – tzv. Paulova past. V takovéto pasti jsme schopni držet jediný iont i po dobu několika měsíců a zajistit mu velmi velký stupeň izolace od okolních rušivých vlivů.

¹ Neseřizuje se referenční rezonátor, ale frekvence hodinového laseru nastavitelným ofsetem od rezonátoru

Iont se několikrát za sekundu připraví do výchozího (základního) stavu a pak vystavuje záření hodinového laseru a poté se zjišťuje, zda došlo k excitaci vybraného „hodinového“ přechodu iontu. Výsledkem jednoho takového měření je logická hodnota ano/ne. Tedy je potřeba udělat mnoho takovýchto jednotlivých měření s různě posunutými frekvencemi hodinového laseru v okolí rezonance hodinového přechodu iontu, než můžeme přistoupit ke korekci vlastní frekvence hodinového laseru. Typická schémata pro zachycení jediného nebo několika iontů (lineární kvadrupólová past) jsou znázorněna na **obr. 2**.

V současnosti zažívá velký boom konstrukce miniaturních pastí vyráběných pomocí technologií importovaných z polovodičového průmyslu.



Obr. 2: Typické konstrukce pastí pro ionty.

Pasti pro ionty působí pouze na nabitě částice, a proto tato konstrukce není schopna zachytit neutrální atomy. Poté co se iont zachytí v pasti, je nutné jej pomocí laserového chlazení ochladit na teploty řádu mK, k čemuž dosti často stačí jednostupňové chlazení (1 laser), abychom udrželi iont v oblasti prostoru odpovídající Lamb-Dickově režimu.

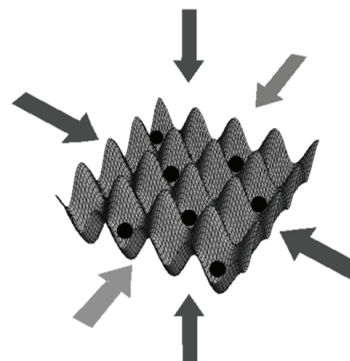
Ke konstrukci iontových hodin se využívají například následující ionty: $^{27}\text{Al}^+$, $^{40}\text{Ca}^+$, $^{88}\text{Sr}^+$, $^{87}\text{Sr}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$; příslušné frekvence a nejistoty jsou uvedeny na internetu [3]. Nejpresnější současné hodiny jsou založeny na $^{27}\text{Al}^+$, byly vyvinuty v NIST v USA. Udávaná relativní nejistota je $8,6 \times 10^{-18}$ [5]. Evropské nejpresnější hodiny jsou pak založeny na $^{171}\text{Yb}^+$ a jsou provozovány v NPL Velká Británie a taktéž v PTB v Německu. Udávaná relativní nejistota je $7,1 \times 10^{-17}$ [8].

Hodiny s optickou mřížkou

Jak už název napovídá, tyto hodiny k zachycení neutrálních atomů využívají stojatou interferenční mřížku tvořenou optickými poli. Typicky se jedná o interferenci jednoho laserového svazku, jenž je pomocí zrcátka odražen zpět proti původnímu svazku a tvoří tak jedno-dimenzionální (1D) mřížku v jejíž kmitnách se atomy zachycují. Tedy máme dobře definovanou polohu atomů v jedné dimenzi. V ostatních dvou dimenzích jsou atomy omezeny tím, že dochází směrem od středu laserového svazku k poklesu intenzity světelného pole a atomy mají tendenci shromažďovat se v poli s vysokou intenzitou². V menší míře se k zachycení používá

² Pokud je frekvence světelného pole vhodně zvolena vůči jeho nejbližším silným přechodům (vhodně podladěna) a v atomu se indukuje dipólový moment, který pak se světelným polem interaguje

více laserových svazků, což umožňuje lepší prostorovou separaci atomů v 2D nebo dokonce 3D mřížce. Takové mřížky vytvářejí pro atom potenciálové jámy, které se ve 2D vizualizaci podobají platu na vajíčka, viz **obr. 3**.



Obr. 3: Znázornění atomů v optické mřížce

Optická mřížka je ale ve srovnání s pastmi pro ionty velmi „mělká“ – tedy jakékoliv dva ionty stejné polarizace by okamžitě z pasti unikly a proto je mřížka vhodná k zachycování výhradně neutrálních atomů.

Malá hloubka optické mřížky má i technologické důsledky. Zatímco iontová past je po ionizaci atomů v oblasti pasti prakticky ihned schopna daný iont zachytit, u hodin s mřížkou je to složitější. Atomy je potřeba nejprve zabrzdit a poté zachytit v tzv. magnetooptické pasti, kde se musí navíc ochladit na teploty řádu μK , k čemuž je typicky potřeba dvou laserových stupňů. Tedy hodiny s optickou mřížkou jsou výrazně technicky složitější.

Nicméně velkou předností je, že hodiny pracují zároveň typicky s 10^4 – 10^6 atomy. Tj. po vystavení této skupiny atomů záření hodinového laseru detekujeme poměr atomů, jež byly excitovány, k celkovému počtu atomů. Toto je mnohem lepší informace než logická hodnota ano/ne získaná v případě iontových hodin. Rovněž poměr signál/šum je mnohem lepší.

V důsledku toho je potřeba k dosažení stejné stability v principu potřeba času, který je odmocnina z počtu použitých atomů krát kratší než v případě jednotlivého iontu. Jelikož se jedná o cca 1000 krát kratší časy, lze tento fakt považovat za jednu z rozhodujících předností hodin s optickou mřížkou.

Takovéto hodiny byly realizovány například s následujícími atomy: ^{171}Yb , ^{174}Yb , ^{87}Sr , ^{88}Sr , ^{199}Hg . Nejstabilnější současné hodiny jsou založeny na neutrálním atomu ^{171}Yb a jsou provozovány v institutu NIST USA. Udávaná hodnota je $1,6 \times 10^{-18}$ po 7 hodinovém průměrování.

Vliv prostředí

U všech optických druhů hodin je potřeba co možná nejvíce eliminovat vliv okolních polí na frekvenci referenčního atomu/iontu. Tohoto cíle dosahujeme jednak v co nejlepším odstínění okolních polí (např. i magnetické pole Země je potřeba odstínit) tak i výběrem vhodného atomu a to tak, aby jeho hodinový přechod vykazoval co možná nejmenší citlivost na okolní pole (např. $^{27}\text{Al}^+$ je příkladem iontu s malou citlivostí na tepelné pole).

Krom polí, která lze nějakým způsobem odstínit, nebo vypnout (laserová záření používaná pro chlazení), zůstávají ve hře pole, která jsou fundamentálně nutná pro běh hodin. S těmi se musíme vypořádat buďto nějakým „trikem“ nebo je alespoň co nejpřesněji vyhodnotit.

Takovým polem je u hodin s optickou mřížkou samotná mřížka, jejíž elektrické pole způsobuje v důsledku AC Starkova jevu posun energetických hladin v atomu. Naštěstí pro hodiny není důležitá absolutní hodnota energií základní a excitované hladiny hodinového přechodu ale jejich rozdíl. Pro vhodné atomy (Sr, Yb, Hg) existuje vlnová délka světla, u které dochází k přesně stejnému posuvu obou hladin a tedy prakticky k eliminaci vlivu optické mřížky na frekvenci hodinového přechodu atomu. Tato vhodná vlnová délka se nazývá „Magickou vlnovou délkou“ (*magic wavelength*) a objev její existence prakticky nastartoval rozvoj tohoto typu hodin.

Druhým příkladem je záření vlastního hodinového laseru. V principu se pracuje se „zakázanými přechody“, které se jednak vyznačují velmi úzkou čarou a tedy vysokou kvalitou přechodu, ale které mají z tohoto důvodu rovněž velmi malou pravděpodobnost excitace. Tedy abychom získali nějaký signál, musí být intenzity svazků hodinového záření relativně vysoké. Eliminace vlivů tohoto záření na chod hodin se dosahuje pomocí vhodných excitačních schémat. Tím se rozumí délka, fáze a časování hodinových pulsů, jimž jsou atomy vystaveny. Příkladem takového řešení je tzv. Hyper-Ramseyova metoda použitá v minulém roce v PTB [7].

Projekt vývoje optických hodin v ČMI

V Konceptu rozvoje národního metrologického systému České republiky pro období let 2012–2016 [7] je v příloze v bodu 1.a. iv. uveden úkol Vývoj optického etalonu kmitočtu pro primární etalonáž délky a času s termínem 12/2019.

Vývojem optických etalonů kmitočtu (frekvenčně stabilizovaných laserů) se v ČR zabývá pracoviště ÚPT AV ČR v Brně a ČMI LPM v Praze, zde vyvinuté stabilizované lasery jsou součástí Státního etalonu délky spolu s interferometry a femtosekundovým hřebenem. Všechny typy vyvinutých etalonů jsou ale založeny na plynových kyvetách při pokojové teplotě. ČMI se od května 2012 účastní malým dílem (návrhem ultra stabilního rezonátoru a modelováním a měřením ohřevu pastí) projektu EMRP SIB04 *High-accuracy optical clocks with trapped ions* <http://www.ptb.de/emrp/ion-clocks.html>.

Pro realizaci nového etalonu – možných budoucích optických hodin v ČMI – byl vybrán iont ytterbia $^{171}\text{Yb}^+$ pro jednodušší techniku iontových oproti mřížkovým hodinám, pro možnost využít dva různé hodinové přechody (kvadrupólový a oktapólový) a pro jednodušší strukturu hladin (hyper-jemné rozštěpení na pouze 2 hladiny).

Vývoj ytterbiových iontových hodin je v ČMI naplánován na léta 2013 až 2019/2020. Postupně budou řešeny následující dílčí projekty: konstrukce Yb pícky a chladicí laser, příprava detekce chladicího záření, excitační laser pro izotopicky selektivní ionizaci, příprava pomocných zařízení pro referenční rezonátor (držák, štít, teplotní regulace, vakuová

aparatura, okna, vláknový kolimátor, dělič, detektor, modulátor, Pound-Drever-Hall elektronika, konstrukce pastí a zachycení iontu, hodinový laser a spektroskopie hodinového přechodu, zpětnovazební hodinová smyčka, elektronika pro řízení excitačních a chladicích a detekčních pulsů, charakteristika a rozpočet nejistoty, fs hřeben pro transfer optické frekvence do radiofrekvenční oblasti.

Souběžně s vývojem hodin se plánujeme zabývat i problematikou distribuce jejich signálu, například v projektu Národní Centrum Síťových Fotonických Služeb (koordinátor CESNET), pokud bude vybrán pro financování v programu TAČR Centra kompetence.

Literatura

- [1] Balling P., „Nobelova cena 2005 pro Johna L. Halla a Theodora W. Hänsche a pokrok v měření optických kmitočtů“, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, ročník 51 (2006), č. 1, str. 12-22
- [2] Balling P., „Primární etalonáž délky“, Metrologie, Tematická příloha č. 4/2009, str. 3-10
- [3] Seznam frekvencí doporučených CIPM pro realizaci definice metru a sekundární reprezentace sekundy http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/appendix2/mep.html
- [4] Ruoxin Li, Kurt Gibble, Krzysztof Szymaniec, „Improved accuracy of the NPL-CsF2 primary frequency standard: evaluation of distributed cavity phase and microwave lensing frequency shifts“, Metrologia, 48 (2011)
- [5] C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeijf, D. J. Wine-land, and T. Rosenband, „Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al⁺ Optical Clocks“, Phys. Rev. Lett. 104, (2010)
- [6] Tanja E. Mehlstäubler, Atomic Clocks - Tutorial (1), prezentace na Varyng Fundamental Constants - Leiden - May 18-20th 2009, <http://www.lorentzcenter.nl/lc/web/2009/358/Tutorials/Mehlstaubler%20-%20Atomic%20clocks%20tutorial%20I.pdf>
- [7] T. Kessler, C. Hagemann, C. Grebing, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, M. J. Martin, L. Chen, J. Ye, „A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity“, Nat. Photonics 6, (2012) 687–692
- [8] N. Huntemann, B. Lipphardt, M. Okhapkin, Chr. Tamm, E. Peik, A. V. Taichenachev and V. I. Yudin, „Generalized Ramsey Excitation Scheme with Suppressed Light Shift“, Phys. Rev. Lett. 109, (2012)
- [9] USNESENÍ VLÁDY ČESKÉ REPUBLIKY ze dne 7. prosince 2011 č. 901 ke Konceptu rozvoje národního metrologického systému České republiky pro období let 2012–2016



DISTRIBUCE PŘESNÉHO ČASU V INTERNETU

Distribuce přesného času v novodobé historii probíhala především s využitím rádiového vysílání časových signálů. Ve Spojených státech bylo zahájeno rádiové šíření přesného času pro potřeby námořní navigace už v roce 1905. V Československu tuto službu zajišťoval v letech 1958 až 1995 dlouhovlnný vysílač OMA 50, který vysílal na výhodné frekvenci 50 kHz z Liblic u Českého Brodu. Časový signál pro vysílání OMA 50 vytvářel tehdejší Ústav radiotechniky a elektroniky (nyní ÚFE AV ČR). Od roku 1970 obdobnou službu v prostoru střední Evropy zajišťuje německý vysílač DCF 77 na frekvenci 77,5 kHz z vysílače Mainflingen nedaleko Frankfurtu nad Mohanem. Odhaduje se, že toto vysílání dnes přijímá kolem 100 miliónů časových zařízení. V naprosté většině se jedná o běžné hodiny a budíky. Uživatelé přesného času s vyššími požadavky na přesnost využívají především signály družicových navigačních systémů GNSS (Global Navigation Satellite System), hlavně amerického systému GPS (Global Positioning System).

Dalším masově užívaným médiem pro distribuci přesného času a to především do informačních systémů je dnes internet. Tento způsob šíření časové informace prožívá mohutný rozmach, o čemž svědčí i fakt, že řada časových serverů dnes vyřizuje řádově tisíce dotazů za sekundu. Jedná se o nejpřirozenější způsob, jak dostat informaci o přesném čase do každého počítače. Přesnost této služby závisí na vlastnostech a momentálním vytížení konkrétní síťové infrastruktury a v běžných případech se pohybuje v řádu 1 ms.

Protokoly pro přenos času byly definovány již v počátcích internetu. Mezi první patří dnes již archaické protokoly *Datetime* a *Time*. Podle protokolu *Datetime* server na výzvu odeslal ASCII řetězec obsahující aktuální čas ve formátu srozumitelném pro člověka. Tento formát protokol blíže nespecifikuje. Protokol *Time* již stanovil, že odpovědí je 32-bitové číslo reprezentující aktuální čas jako počet sekund času UTC od 1. ledna 1900.

Protokol NTP

Základním protokolem pro přenos času v internetu je dnes protokol NTP (Network Time Protocol), který patří mezi nejstarší internetové protokoly. Jeho specifikace byla několikrát revidována. První specifikace NTP V1 [1] pochází z roku 1988. Do další specifikace NTP V2 [2] byla doplněna autentizace. Verze NTP V3 [3] navíc obsahuje revidovaný algoritmus a podporuje výpočet maximální a očekávané chyby navázání času. Poslední verze protokolu je NTP V4 [4], která se od předchozí verze v podstatných rysech neliší.

Samotná časová informace se v protokolu NTP přenáší v 64 bitech. Prvých 32 bitů udává počet sekund UTC od 1. ledna 1900, dalších 32 bitů je zlomek sekundy. Rozlišení přenášeného času je 233 ps a čítač sekund poprvé přeteče v roce 2036. Zdůrazněme, že protokol NTP pracuje s časem UTC. Případný převod časové informace na lokální čas, stejně jako přechod na letní čas, vždy zajišťuje až operační systém počítače.

Případné vložení přestupné sekundy do stupnice UTC se ošetřuje až při převodu časové informace na čas UTC nebo

občanský čas. Využívají se přitom k tomu určené příznaky (leap bits) v časovém kódu NTP.

Existuje také zjednodušená verze protokolu NTP s označením SNTP (Simple Network Time Protocol) [5], která se vyznačuje tím, že klient neuvažuje zpoždění paketů v síti a nepamatuje si stav předchozí komunikace. Tento protokol se používá ve vestavěných zařízeních a v aplikacích, které nepotřebují přesnost NTP.

Princip NTP

Bez ohledu na poměrně dlouhý vývoj protokolu NTP je základní algoritmus od jeho počátků stále stejný. Klient vyšle dotaz, do kterého vloží aktuální hodnotu svého času (timestamp) T_0 . Server přijme dotaz v čase T_1 a odpoví v čase T_2 . Odpověď dorazí klientovi v čase T_3 . Je nutno zdůraznit, že hodnoty T_0 a T_3 se vztahují k lokálním hodinám klienta, zatímco hodnoty T_1 a T_2 k hodinám serveru. Ze znalosti všech čtyř časových údajů si klient spočítá celkovou dobu přenosu od klienta k serveru a zpět δ (delay)

$$\delta = (T_3 - T_0) - (T_2 - T_1)$$

a odchylku svého času vůči času serveru Θ (offset)

$$\Theta = \frac{(T_1 - T_0) - (T_2 - T_3)}{2}$$

Výpočet Θ je založen na předpokladu symetrického zpoždění v obou směrech. Pokud tato podmínka není splněna, přenos času je zatížen systematickou chybou, která je rovna polovině rozdílu zpoždění v jednom a druhém směru.

Klient získá z každého přenosu času trojici hodnot:

- *offset* – pravděpodobná časová odchylka hodin,
- *delay* – doba přenosu signálu, interval nejistoty časové odchylky,
- *dispersion* – stabilita hodin serveru (tento údaj pošle server v odpovědi).

Zjištěné hodnoty jsou náhodně ovlivněné okamžitým stavem sítě. Pro dosažení lepší přesnosti a stability se používá algoritmus specifikovaný protokolem. Klient vysílá periodicky své dotazy několika serverům. Získané vzorky pak průběžně zpracovává tak, že eliminuje hodnoty mimo očekávaný rozsah, provádí filtraci na základě historie osmi posledních odpovědí od každého serveru, počítá vážený průměr a provádí agregaci dat od jednotlivých serverů. Výsledkem je mnohem přesnější výpočet časové odchylky hodin klienta od času UTC, než lze získat z jednoho vzorku. Navíc je vypočtena maximální a odhadovaná chyba.

Klienti NTP

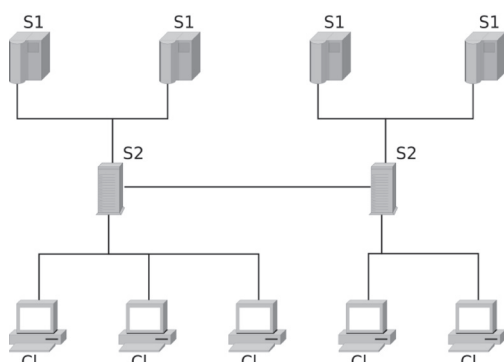
Podle vztahu k řízení hodin existují dva typy NTP klientů. Prvním je klient bez řízení hodin. Tento typ klienta upraví čas svých hodin podle vypočtené časové odchylky. Nijak se nesnaží korigovat frekvenci hodin a tím docílit dlouhodobé stability. Naproti tomu v klientovi s řízením hodin je zjištěná

hodnota časové odchylky vstupem pro zpětnovazební algoritmus, který řídí hodiny počítače. Toto řízení je realizováno v samotném programu nebo v jádře operačního systému.

NTP servery a jejich hierarchie

Každý NTP klient, který má plně implementovanou specifikaci protokolu, se zároveň stává NTP serverem a může tedy svůj čas šířit dalším klientům. NTP server má přiděleno číslo z intervalu 1 až 14, nazývané *Stratum*. Stratum klienta je vždy vyšší než Stratum jeho serveru. Hodnota Stratum přímo nevyjadřuje přesnost serveru, jen jeho „vzdálenost“ od externího zdroje času. Tím vzniká hierarchie časových serverů. Stratum 1 znamená, že server je primární, tj. má externí zdroj času, nezávislý na jiných serverech. Tento zdroj času se v hierarchii označuje jako Stratum 0. Hodnota Stratum 15 indikuje, že server není nasyntionizován na zdroj času ani jiný NTP server.

Praktický význam hierarchie časových serverů je v tom, že primární servery bývají vysoce přesné, ale sekundární servery zajišťují lepší dostupnost služby a odolnost vůči rušivým vlivům, jako je nestabilita sítě nebo porucha externího zdroje času. Typickou doporučenou konfigurací znázorňuje **obr. 6**, kde S1 je primární server Stratum 1, S2 je server Stratum 2 a CI je koncový klient.



Obr. 6: Schéma rubidiového etalonu frekvence.

Na domovské stránce projektu NTP www.ntp.org existuje velmi rozsáhlá dokumentace k tomuto protokolu. Je také průběžně aktualizován seznam veřejných primárních a sekundárních NTP serverů. NTP servery provozuje mnoho institucí pro vlastní potřebu nebo pro své zákazníky. Při pravidelném využívání těchto serverů je nutné splnit podmínky a omezení, která stanovili jejich správci.

Existuje řada možností, jak navázat primární NTP server na časovou stupnici UTC. Nejběžnější je využití přijímačů GPS nebo signálu DCF 77. NTP servery provozují také prakticky všechny laboratoře času a frekvence a navazují je na svoje realizace času UTC.

V Laboratoři Státního etalonu času a frekvence v ÚFE AV ČR je provozován primární NTP server time.ufe.cz, který je přímo navázán na národní časovou stupnici UTC(TP) vytvářenou atomovými hodinami a průběžně navazovanou na světový koordinovaný čas UTC. Tento server NTP byl v ÚFE vytvořen ve spolupráci se sdružením CESNET a obě organizace se podílí na jeho provozu. Služba je poskytována zdarma. Podrobný návod k nastavení synchronizace času počítače pomocí NTP serveru je pro různé operační systémy uveden na stránkách <http://podpora.nic.cz/page/544/>.

Literatura

- [1] RFC 1059, Network Time Protocol (Version 1) Specification and Implementation. The Internet Society, 1988.
- [2] RFC 1119, Network Time Protocol (Version 2) Specification and Implementation. The Internet Society, 1989.
- [3] RFC 1305, Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis. The Internet Society, 1992.
- [4] RFC 5905, Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. The Internet Society, 2010.
- [5] RFC 4330, Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI. The Internet Society, 2006.



VYUŽITÍ SYSTÉMŮ GNSS V METROLOGII ČASU A FREKVENCE

„Elektromagnetické vlny se šíří ohromnou rychlostí světla na všechny strany a jsou ideálním prostředkem k rozšiřování přesného času“. Tento prozíravý postřeh z pera nestora české chronometrie prof. R. Schneidera byl publikován v roce 1926 [1]. A skutečně si dnes distribuci přesného času bez využití rádiových časových signálů již nedovedeme představit.

Zcela nová éra v rádiovém šíření přesného času nastala s rozvinutím systému GPS (Global Positioning System) a později i dalších systémů GNSS (Global Navigation Satellite System). Družice těchto systémů totiž nejsou nic jiného než vysílače velmi přesného časového signálu. Díky jejich existenci je nyní mimořádně přesná časová informace a fre-

kvenční reference nepřetržitě dostupná kdekoli na zemském povrchu. Tyto systémy se také významnou měrou podílejí na vytváření mezinárodního atomového času TAI a koordinovaného světového času UTC, protože právě prostřednictvím signálů družic GPS probíhá nepřetržitě měření časových odchylek všech atomových hodin participujících na vytváření těchto časových stupnic.

Tento článek seznamuje se základními aspekty využití družicových navigačních systémů v metrologii času a frekvence. Pokud jsou zde uváděny konkrétní technické údaje, či technická řešení, týkají se systému GPS. Řešení použitá v ruském systému GLONASS a zvláště pak v připravovaném evropském systému GALILEO jsou velmi podobná.

Čas v systému GPS

Na všech družicích systému GPS jsou umístěny atomové hodiny, které určují palubní čas družice. Na základě tohoto času se pak generují všechny vysílané signály. Týká se to nosných signálů ve frekvenčních kanálech L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz), L5 (1176,45 MHz) i pseudonáhodných kódů, které jsou na těchto nosných namodulované.

Pro činnost dálkoměrného navigačního systému jako je GPS, je nezbytný jednotný systémový čas, ke kterému je vztaženo vysílání signálu všech družic. Tuto funkci plní časová stupnice označovaná „GPS System Time“. Jedná se o kompozitní časovou stupnici, do níž jsou zahrnuty hodiny všech družic a monitorovacích stanic systému. Udržuje se tak, že monitorovací stanice průběžně měří čas přijetí signálu jednotlivých družic vzhledem ke svým místním hodinám. Změřená data ze všech monitorovacích stanic se pravidelně zpracují a určí se systémový čas, který je, zjednodušeně řečeno, průměrem času všech hodin zapojených v systému. Odchyšky času jednotlivých palubních hodin vzhledem k systémovému času jsou pak zahrnuty do navigačních zpráv vysílaných družicemi.

Čas GPS není zcela autonomní stupnicí. Její frekvence se pomalu řídí tak, aby sledovala časovou stupnici UTC (USNO) realizovanou v U.S. Naval Observatory. Díky tomu se odchylka systémového času od UTC (USNO) běžně pohybuje v řádu jednotek nanosekund. Aktuální velikost této odchylky je rovněž zahrnuta do navigačních zpráv vysílaných družicemi a je tedy pro uživatele systému neustále dostupná. Denní časové difference mezi časem UTC a systémovými časy GPS a GLONASS jsou každý měsíc publikovány časovou sekcí BIPM v „Cirkuláři T“, který má statut technického protokolu klíčového porovnání. Tak je oficiálně zajištěna metrologická návaznost času distribuovaného družicovými navigačními systémy na časovou stupnici UTC.

Pokud jsme uvedli, že čas GPS sleduje stupnici UTC (USNO), není to úplně pravda. Na rozdíl od stupnice UTC se totiž do systémového času GPS nekládají přestupné sekundy. Od 6. ledna 1980, kdy byl čas GPS spuštěn, bylo do stupnice UTC dosud vloženo celkem 16 přestupných sekund. Časový údaj GPS je tedy na konci roku 2013 vedle zmíněné drobné odchylky o 16 celých sekund vyšší než údaj UTC.

Distribuce času UTC prostřednictvím GPS

Vzhledem k těsné vazbě systémového času GPS na časovou stupnici UTC (USNO) lze systém GPS využít k přímé distribuci času UTC. Princip přenosu času je prakticky stejný jako v případě pozemních vysílačů časových signálů. Jediným rozdílem je skutečnost, že družice se na rozdíl od pozemních vysílačů neustále pohybují.

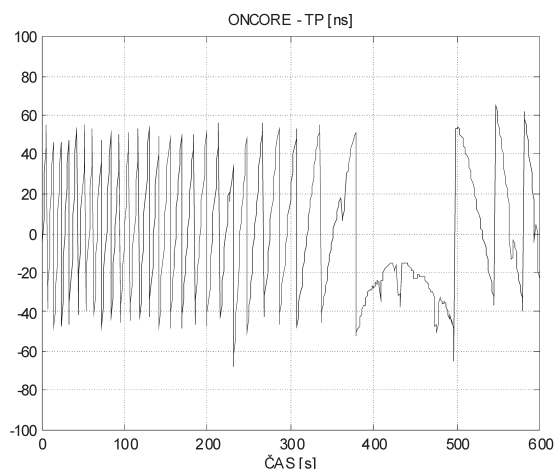
Potřebujeme přijímač signálu GPS, který jednak měří čas přijetí signálu družice vzhledem ke své interní časové stupnici a jednak přijímá navigační zprávy vysílané družicí. Z přijatých zpráv určíme polohu družice a čas UTC v okamžiku vyslání signálu. Z polohy družice a polohy antény přijímače pak vypočteme dráhové zpoždění signálu. Když od času příjmu odečteme čas vyslání a dráhové zpoždění, dostaneme odchylku časové stupnice generované přijímačem od UTC.

Na základě takto změřené odchylky je pak možné generovat aproximaci UTC ve formě sekundových značek 1PPS. Samozřejmě, že tyto operace provádí přijímač automaticky.

Popsaný postup je možný pouze v případě, že známe polohu antény přijímače. Pokud tomu tak není, je situace poněkud složitější. Musíme provést měření alespoň ke čtyřem družicím a současně s výpočtem časové odchylky určit i tři souřadnice polohy antény. To však vede k několikanásobnému zhoršení přesnosti určení času. Zaměření polohy antény a její zadání do přijímače je proto žádoucí.

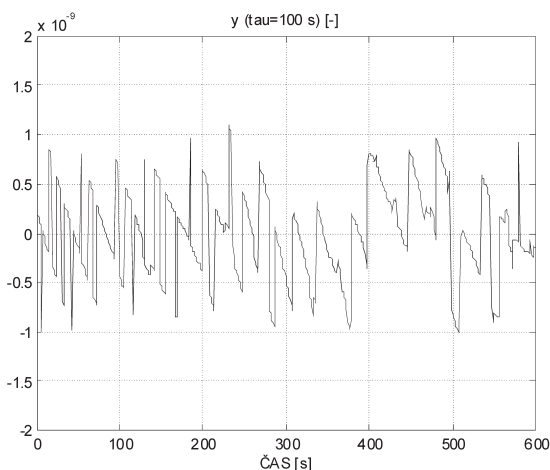
Použití běžného přijímače

Nejdostupnějším řešením, jak získat časovou informaci šířenou GPS, je použití běžného přijímače, který je vybaven výstupem sekundové značky 1PPS. V tomto případě je však přijímač schopen generovat časové značky pouze s rozlišením, které je dáno délkou taktu interní časové stupnice a ta běžně činí alespoň několik desítek nanosekund. Časové značky jsou pak zatíženy zaokrouhlovací chybou s typickým pilovitým průběhem. Příklad průběhu chyby časové stupnice generované běžným přijímačem starší konstrukce je na **obr. 1**. Délka taktu interní časové stupnice přijímače byla v tomto případě 100 ns. Výsledná směrodatná odchylka fluktuací činila 31 ns. Průběh průměrné frekvenční odchylky na intervalu o délce 100 s je pak na **obr. 2**.



Obr. 1: Ukázka průběhu chyby časové stupnice generované běžným přijímačem GPS. Fluktuace s pilovitým průběhem jsou způsobeny zaokrouhlovací chybou při generování časových značek. Délka taktu interní časové stupnice přijímače byla v tomto případě 100 ns. Směrodatná odchylka fluktuací vyhodnocená za 10 min měření činila 31 ns.

Další nectností tohoto řešení je okamžitá reakce generovaných časových značek na nespojitosti způsobené změnou konfigurace družic a na fluktuace vyvolané interferencí s odraženými signály. Nicméně při použití dostatečně kvalitního přijímače lze i tímto jednoduchým způsobem získat aproximaci UTC s nejistotou lepší než 100 ns. Krátkodobá stabilita takto generované časové stupnice je však obecně nepříliš dobrá. Přestože se nejedná o ideální řešení, v řadě aplikací dosahovaná nejistota vyhovuje a poměrně výrazné rychlé fluktuace nevadí.

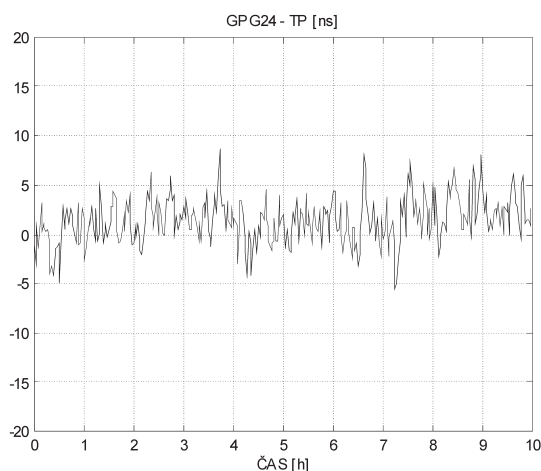


Obr. 2: Ukázka průběhu průměrné frekvenční odchylky za 100 s časové stupnice generované běžným přijímačem GPS. Délka taktu interní časové stupnice přijímače je 100 ns.

Použití oscilátoru řízeného GPS

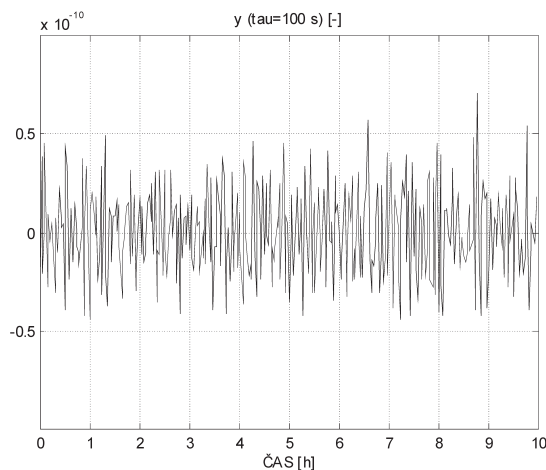
Podstatně lepších výsledků je možné dosáhnout při použití přístroje, který integruje přijímač GPS do jednoho celku s kvalitními hodinami. Zařízení tohoto typu se často označuje jako „GPS disciplined oscillator“ nebo „GPS disciplined clock“. Jako základní oscilátor hodin zpravidla slouží kvalitní krystalový oscilátor nebo rubidiový generátor. Frekvence oscilátoru se s využitím vhodného algoritmu řídí tak, aby generovaná časová stupnice co nejlépe sledovala referenční stupnici UTC. Jedná se v podstatě o softwarově realizovaný fázový závěs. Přístroj je zpravidla vybaven i výstupem referenční frekvence 10 MHz. Krátkodobá stabilita generovaných signálů do značné míry závisí na použitém řídicím algoritmu, ale často se blíží krátkodobé stabilitě základního oscilátoru. V každém případě u těchto přístrojů platí, že GPS určuje přesnost a dlouhodobou stabilitu generovaných signálů. Krátkodobá stabilita je určena hlavně kvalitou základního oscilátoru.

Ukázka průběhu chyby časové stupnice generované zařízením tohoto typu je na **obr. 3**. Směrodatná odchylka fluktuací

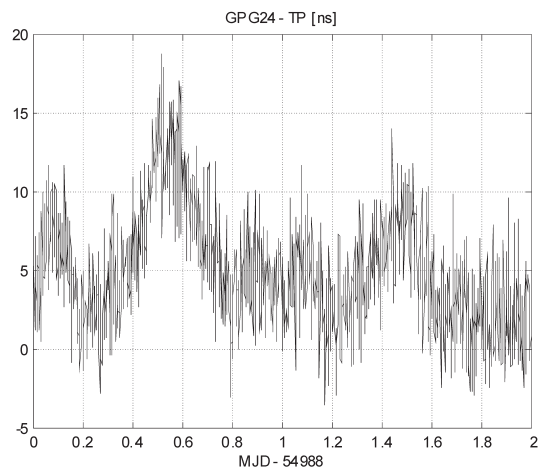


Obr. 3: Ukázka průběhu chyby časové stupnice generované kvalitním krystalovým oscilátorem řízeným GPS. Směrodatná odchylka fluktuací vyhodnocená za 10 h měření činila 2,3 ns.

tuací vyhodnocená za 10 h měření činila 2,3 ns. Změřený průběh průměrné frekvenční odchylky na intervalu o délce 100 s vyneseny na **obr. 4** se pohyboval zhruba v mezích $\pm 5 \cdot 10^{-11}$. Na **obr. 5** je pak vynesena průběh chyby časové stupnice změřený za dva dny. Z tohoto průběhu jsou dobře patrné pomalé diurnální výkyvy způsobené hlavně zbytkovou chybou korekce ionosférického zpoždění. Během dvou dnů chyba nepřevýšila 20 ns.



Obr. 4: Ukázka průběhu průměrné frekvenční odchylky za 100 s časové stupnice generované kvalitním krystalovým oscilátorem řízeným GPS.



Obr. 5: Ukázka průběhu chyby časové stupnice generované kvalitním krystalovým oscilátorem řízeným GPS za dva dny. V průběhu jsou patrné pomalé diurnální výkyvy způsobené hlavně chybou korekce ionosférického zpoždění.

Při použití kvalitního přístroje lze tímto způsobem běžně reprodukovat stupnici UTC s nejistotou v řádu 10 ns. Referenční signály přesné frekvence lze přitom běžně generovat s průměrnou frekvenční odchylkou za 100 s lepší než 10^{-10} a průměrnou frekvenční odchylkou za 1 den lepší než $5 \cdot 10^{-13}$.

Porovnání časových stupnic metodou Common-View

Častým úkolem je porovnat čas hodin na dvou nebo více stanovištích. Takové porovnání se dnes standardně

provádí prostřednictvím družicových navigačních systémů s využitím metody Common-View. Princip této metody je jednoduchý. Na obou stanovištích jsou instalovány přijímače GPS. Přijímače přijmou signál vyslaný stejnou družicí a určí čas příjmu vzhledem k místním hodinám. Od změřených časů se odečtou dráhová zpoždění na trase od družice k přijímači. Odečtením výsledných časů pak dostaneme odchylku mezi časem hodin na jednotlivých stanovištích.

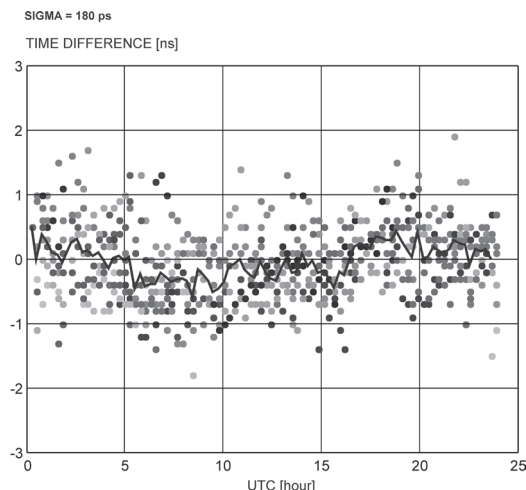
S využitím Common-View je možné dosáhnout mimořádně dobré přesnosti porovnání. Část chyb měření se totiž na obou stanovištích projeví zcela stejně nebo téměř stejně a po odečtení se vyruší. Jedná se o chyby času palubních hodin družice a za předpokladu, že stanoviště nejsou příliš vzdálená, i o chyby polohy družice a zpoždění signálu v atmosféře. Plně se projeví pouze nezávislé chyby jako je vliv mnohacestného šíření signálu, šum přijímače, nebo chyby kalibrace přijímačů.

Metoda Common-View se využívá i při rutinním porovnávání etalonů času a frekvence podílejících se na vytváření mezinárodního atomového času TAI a světového koordinovaného času UTC. Používají se přitom speciální přijímače GPS, do kterých jsou přivedeny časové značky z hodin, které je třeba porovnat. Metodiku měření a formát změřených dat upravuje doporučení CGGTTS [3]. Tato metodika je založena na kódových měřeních ve frekvenčním kanálu L1. Porovnání času neprobíhá spojitě, ale během seancí dlouhých 13 minut. Rozvrh začátků jednotlivých seancí je předem stanoven. Až na výjimky začínají každých 16 minut. Přijímače měří jedenkrát za sekundu zpoždění přijatého signálu všech viditelných družic vzhledem k referenční časové stupnici etalonu. Posloupnost měření v seanci se rozdělí na skupiny po 15 měřeních. Na každé této skupině se provede kvadratické vyrovnání. Tím dostaneme posloupnost 52 hodnot. Od každé této hodnoty se odečte dráhové zpoždění signálu a korekce ionosférického a troposférického zpoždění. Tak dostaneme posloupnost časových diferencí mezi časovou stupnicí etalonu a časem GPS. Na této posloupnosti se pak provede lineární vyrovnání. Výsledky lineárního vyrovnání pro každou družici se zapíší v předepsaném formátu do textového souboru. Podrobněji byl tento formát popsán v [6].

Samotné porovnání pak probíhá tak, že se vezmou změřená data z obou laboratoří, vyhledají se výsledky měření ke stejným družicím provedená během stejné seance se stejnými efemeridami a hodnoty se odečtou. Časové difference získané během stejné seance prostřednictvím různých družic se zprůměrují. Výsledkem je posloupnost časových diferencí změřených typicky každých 16 minut.

S využitím této metodiky se běžně dosahuje nejistoty porovnání v řádu 1 ns, při vzdálenosti stanovišť do několika set kilometrů i méně než 1 ns. Nejistota navázání frekvence je pak běžně lepší než $5 \cdot 10^{-14}$ za 1 den. V ČR je navázání na státní etalon s využitím této metodiky CGGTTS podpořeno webovou aplikací, která je dostupná na adrese <http://utcdelta.ufe.cz>.

Na obr. 6 je ukázka chyby porovnání na malou vzdálenost s použitím metodiky CGGTTS. Do obou přijímačů



Obr. 6: Ukázka výsledků porovnání s použitím metodiky CGGTTS. Do obou přijímačů byla připojena stejná časová reference. Vzdálenost antén byla několik metrů. Jednotlivé body reprezentují výsledek porovnání během jedné seance přes jednu družici. Družice jsou rozlišeny odstínem šedi. Čára je průměr všech výsledků získaných během stejné seance.

byla připojena stejná časová reference. Vzdálenost antén byla několik metrů. Jednotlivé body reprezentují výsledek porovnání během jedné seance přes jednu družici. Družice jsou rozlišeny odstínem šedi. Čára reprezentuje průměr všech výsledků získaných během stejné seance. Směrodatná odchylka porovnání vyhodnocená za 24 h činila 180 ps.

Metodika CGGTTS není jediná. Pro porovnávání primárních etalonů na velké vzdálenosti se často používá její modifikace označovaná L3P, která využívá dvoufrekvenčních měření a umožňuje proto potlačit vliv ionosférického zpoždění. Použití dvoufrekvenčního měření pro porovnání na menší vzdálenosti však není přínosem. Naopak, přesnost je v tomto případě horší, protože potlačení ionosférického zpoždění je provázáno zhruba trojnásobným zvýšením vlivu mnohacestného šíření a šumu přijímačů.

Literatura

- [1] R. Schneider, „Hodiny a hodinky“, Knihovna přátel oblohy, Praha 1926.
- [2] „Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces“, IS-GPS-200D, GPS Joint Program Office, 2004.
- [3] D. W. Allan, C. Thomas, „Technical Directives for Standardization of GPS Time Receiver Software“, Metrologia, vol. 31 (1994), p. 69-79.
- [4] Z. Hrdina, P. Pánek, F. Vejražka, „Rádiové určování polohy – družicový systém GPS“, Vydavatelství ČVUT Praha, 1999.
- [5] P. Pánek, „Přenos přesného času pomocí družicových navigačních systémů“, Metrologie, roč. 20 (2011), č. 3, s. 5-9.
- [6] P. Pánek, A. Kuna, „Porovnávání vzdálených etalonů času a frekvence podle metodiky CGGTTS“, Metrologie, roč. 21 (2012), č. 4, s. 30-32.

Redakční rada:

Ing. Emil Grajciar (předseda), Ing. František Jelínek, CSc. (místopředseda), Ing. Josef Vojtíšek, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Milan Badal, Prof. Ing. Jaroslav Boháček, DrSc., Bc. Jan Klíma, Ing. Jiří Kazda, Mgr. Václava Holušová, RNDr. Klára Popadičová, Ing. Jaroslav Rajlich, Ing. Petr Pánek, CSc., Jitka Hrušková, PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + poštovné a balné + 15 % DPH. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Gorazdova 24, 128 01 Praha 2. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: prosinec 2013. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, tel./fax: +420 326 394 888, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 4/2013 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

Foto na obálce: Pražský orloj

Photo on the front page: The Prague Astronomical Clock

