

Redefinição do Segundo e disseminação de relógios ópticos

Mauro Vieira de Lima

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)

A definição da unidade de tempo do SI (Sistema Internacional de Unidades) foi baseada em fenômenos astronômicos até 1967. Nesta data, a definição que, tradicionalmente, era realizada pelo campo da astronomia mudou para o campo da física quântica. A definição atual é baseada em medições de frequência com a premissa do Modelo Padrão da física de que as frequências de ressonância atômica são universais e constantes.

A definição da unidade segundo do SI é a duração de 9 192 631 770 períodos de radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133 [1]. Tal definição tornou o césio o elemento universal para utilização como padrão de frequência primária. Atualmente, tais padrões primários realizam a unidade de tempo com incerteza relativa de 10^{-16} através da tecnologia do chafariz de átomos frios de césio.

O desenvolvimento da tecnologia de padrões de frequência óptica (OFS – *optical frequency standards*), nas últimas duas décadas, permitiu ultrapassar em duas ordens de grandeza a exatidão dos padrões primários como demonstra a evolução na Figura 1. Considerando essa evolução, o CCTF (Comitê Consultivo para Tempo e Frequência) emitiu em 2016 a primeira versão de um *roadmap* para redefinição da unidade segundo do SI.

Impacto da redefinição

A revisão do sistema de unidades do SI em 2018 pelo CGPM (Conferência Geral de Pesos e Medidas) efetuou a redefinição de quatro

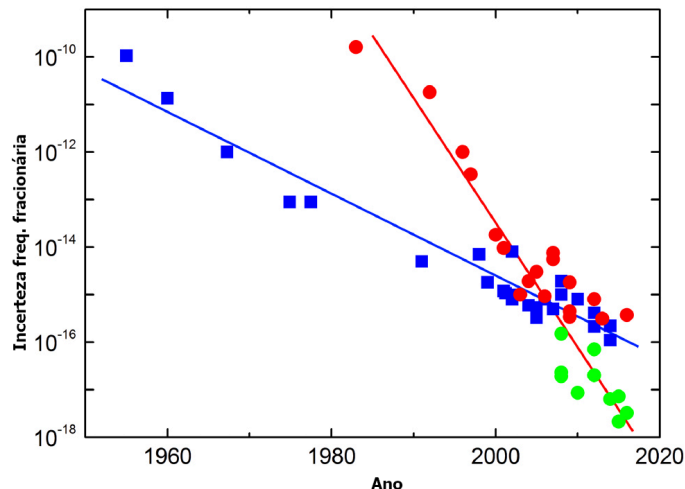


Figura 1. Evolução da incerteza fracionária. Quadrados azuis representam padrões primários de césio. Círculos vermelhos representam padrões de frequência óptica comparados diretamente com relógios atômicos de césio. Círculos verdes representam incertezas estimadas publicadas de relógios ópticos. Linhas azul e vermelha mostram tendência dos padrões primários e ópticos, respectivamente. Adaptado de [2].

unidades do SI, fixando os valores de suas constantes fundamentais: quilograma (constante de Planck h), Ampere (carga elementar e), Kelvin (constante de Boltzmann k_B) e mol (constante de Avogadro N_A). A unidade de tempo do SI foi colocada em uma posição central após a revisão de 2018, pois a fixação das constantes fundamentais na definição das unidades trouxe uma dependência, de todas as unidades do SI, para a definição da unidade segundo, com exceção do mol. Essa dependência das outras unidades do SI ao segundo impacta diversas áreas e entidades, entre elas os institutos nacionais de metrologia (NMI – *national metrology institutes*).

Os NMI desenvolvem as melhores realizações das unidades SI e constroem padrões primários da mais alta exatidão. Considerando a dependência das unidades do SI à unidade segundo, os NMI necessitam de sinais de tempo e frequência com alta exatidão para fornecer serviços de disseminação do SI dentro dos seus países. Os atuais padrões de frequência primária foram superados em estabilidade e incerteza pelos relógios ópticos. Logo, os NMI devem impulsionar a transição para a nova definição da unidade segundo do SI.

A capacidade de sincronização, com tempo inferior a μs é uma característica essencial para grande parte da infraestrutura crítica de um país, tais como as áreas de telecomunicações, energia, finanças, transportes, espacial, defesa, entre outras. Apesar de desconhecida pela maioria da população, padrões e sinais de tempo e frequência são a infraestrutura de base que suporta essa infraestrutura crítica.

A redefinição do segundo, inicialmente, será utilizada em aplicações científicas, mas surgirão aplicações industriais à medida que a tecnologia se tornar disponível. Comunicações quânticas, por exemplo, necessitam de estabilidade e incertezas na ordem de femtossegundos, algo dificilmente alcançável com as tecnologias atuais.

Entre as aplicações científicas existentes, os experimentos de física fundamental são os que mais se beneficiarão com a melhoria da infraestrutura de tempo e frequência obtida pela redefinição do segundo. Assim, relógios ópticos podem dar suporte aos experimentos para investigação da física que se estende além do modelo padrão, bem como variação temporal das constantes fundamentais, busca por matéria escura, detecção de ondas gravitacionais entre outras [3]. Os OFS podem dar suporte a espectroscopia molecular, *arrays* de telescópios de alta resolução, novas gerações de VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), monitoração de geopotencial com resolução de centímetros, entre outros. A Tabela 1 mostra os níveis de exatidão e as respectivas oportunidades de aplicação na área informados pelas respectivas comunidades científicas.

Estado da arte dos padrões de frequência óptica

A redefinição do segundo do SI está programada para ocorrer conforme o atendimento de critérios e condições que visam medir o nível de maturidade dos diversos aspectos da tecnologia dos relógios ópticos e da sua disseminação. O critério de maior relevância já foi alcançado pelos

Incerteza	Oportunidade de aplicação
1×10^{-15}	Espectroscopia / matéria escura / comunicações seguras
1×10^{-16}	Cosmologia
1×10^{-17}	Matéria escura / Interferometria
1×10^{-18}	Localização por satélite / Geodesia em Tempo Real / Nova geração de Relógios
1×10^{-19}	Geodinâmica
1×10^{-20}	Geodesia Relativística / Teorias alternativas da gravitação

OFS que é oferecer uma melhoria de 10 a 100 vezes a incerteza da melhor realização dos padrões de frequência primária, alcançando de 10^{-17} a 10^{-18} de incerteza da frequência relativa. Além disso o novo padrão deve oferecer potencial melhoria a longo prazo. Um segundo critério mandatório é a disponibilidade de técnicas sustentáveis para comparação entre os OFS [4].

As pesquisas atuais direcionadas à investigação de transições ópticas para servir como padrões de frequência, se diferenciam, basicamente, por buscar padrões de frequência definidos pelo estado de carga do átomo ou pelo método usado para armadilhamento. Este último tem como exemplo os relógios ópticos *trapped ions* e *lattice* com átomos neutros. Atualmente, dez transições ópticas e uma transição de micro-

ondas (^{87}Rb) são recomendadas como representação secundária do segundo (SRS - *secondary representations of the SI second*), entre elas estão algumas que já contribuem para a escala de tempo atômica internacional (TAI - *Temps Atomique International*), conforme listadas na Tabela 2 [1].

A maioria das transições ópticas propostas pode atingir um nível de incerteza abaixo de 10^{-18} . O recorde atual de incerteza foi obtido pelo relógio de lógica quântica $^{27}\text{Al}^+$ com uma incerteza sistemática da frequência fracionária de 9.4×10^{-19} . Relógios ópticos *lattice* de Yb e Sr estão próximos desse valor com 1.4×10^{-18} e 2×10^{-18} , respectivamente. O desenvolvimento de pentes de frequência óptica (OFC *optical frequency combs*) permitiram comparar frequências ópticas diretamente com frequências de micro-ondas

Tabela 2. Transições ópticas recomendadas para SRS pelo CCTF.

Transição Óptica	Comprimento de onda [nm]	Frequência [Hz]	Número de NMI que contribuem para TAI
^{199}Hg	265	1128 575 290 808 154.32	
$^{27}\text{Al}^+$	267	1121 015 393 207 859.16	
$^{199}\text{Hg}^+$	282	1064 721 609 899 146.96	
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E2})$	436	688 358 979 309 308.24	
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E3})$	467	642 121 496 772 645.12	
^{171}Yb	578	518 295 836 590 863.63	4
$^{88}\text{Sr}^+$	674	444 779 044 095 486.3	
^{88}Sr	698	429 228 066 418 007.01	
^{87}Sr	698	429 228 004 229 872.99	3
$^{40}\text{Ca}^+$	729	411 042 129 776 400.4	
^{87}Rb		6834 682 610.904 3126	1

com medidas de alta exatidão.

Medições simultâneas da mesma relação de frequência óptica com dois OFC independentes mostraram concordância no nível de 10^{-21} , demonstrando a capacidade de suportar medições com razão de frequência óptica no limite das incertezas dos OFS.

A comparação de diferentes relógios ópticos permite validar suas incertezas. Comparações realizadas dentro do mesmo instituto alcançaram uma incerteza melhor que 5×10^{-18} . Enquanto, as realizadas entre diferentes institutos estão no nível de 5×10^{-17} . Observa-se que comparações entre relógios em diferentes locais são desafiadoras porque envolvem instabilidades devido à transferência de tempo e frequência de longa distância cujos níveis de desempenho são mais baixos do que as que são realizadas em laboratório.

Opções para redefinição do segundo

Um conjunto de sete constantes com valores numéricos fixos define as unidades do SI, sendo que entre elas está a constante que define a unidade de tempo, $\Delta\nu_{Cs}$, que decorre da propriedade do átomo de césio.

Uma das opções para a redefinição do segundo, já utilizada em algumas unidades do SI, seria a definição de uma constante fundamental da física. As constantes mais estudadas para esse fim são m_e (massa do elétron); ν_e (frequência Compton) e R_∞ (frequência de Rydberg). Entretanto, as experiências em CODATA 2018 [5] obtiveram incertezas de várias ordens de grandeza superior à atual incerteza obtida pelo padrão primário de 10^{-16} , excluindo assim essa opção devido ao atual estado da arte.

Duas opções são aplicáveis para a redefinição do segundo do SI. A primeira consiste em escolher uma única transição e fixar o valor numérico da frequência desta

transição, conforme foi realizado para o Cs. A segunda consiste em criar uma constante baseada em um conjunto de transições, sendo seu valor definido como uma média geométrica ponderada das frequências dessas transições, assim:

$$\prod_j v_j^{w_j} = N(\text{Hz})$$

v_j é a frequência da transição; w_j o peso atribuído à transição j , sendo seu somatório igual a 1, e N a constante usada para a definição do segundo.

A primeira opção não descartaria outras transições de participarem como SRS na geração do segundo através da escala atômica TAI, como já ocorre atualmente. A discussão para essa opção se concentra nos critérios para atualização periódica da transição adotada.

Por outro lado, a segunda opção não descartaria a utilização de um único padrão de frequência óptica baseado em qualquer uma das transições escolhidas. Note que a definição da unidade de tempo usando várias transições oferece uma abordagem dinâmica para lidar com o atual cenário onde várias transições atômicas diferentes fornecem OFS com incertezas próximas de 10^{-18} .

Estado da arte da transferência de tempo e frequência para comparações dos OFS

Um dos desafios para adoção de OFS na definição da unidade de tempo do SI está nas comparações remotas, uma vez que essas comparações são de extrema importância para validar as incertezas dos padrões de frequência e para disseminar a realização local do padrão de tempo com toda sua exatidão.

Os sistemas mais difundidos de transferência de sinais de tempo e frequência são os que utilizam enlaces de micro-ondas por satélite, tais como GNSS e TWSTFT (*Two-way Satellite Time and Frequency Transfer*). Entretanto sua estabilidade e incerteza ainda se encontram abaixo dos atuais OFS. As técnicas ópticas que utilizam links de fibra óptica oferecem estabilidade e incerteza melhoradas, entretanto a longa distância para utilização entre NMI de países diferentes reduz sua capacidade de expansão para uma cobertura geográfica global. Os OFS transportáveis ou Relógios Ópticos Transportáveis (TOC - *Transportable Optical Clocks*) podem obter comparações com um nível de precisão de 10^{-18} . Neste caso a utilização em uma cobertura geográfica global demanda alto custo operacional e tempo de medição longo.

O serviço *one-way* oferecido pelo GNSS é utilizado há muitas décadas para a realização do UTC (*Coordinated Universal Time*). O IGS (*International GNSS Service*) possibilitou o aumento da exatidão através da técnica PPP (*Precise Point Positioning*). Atualmente, a técnica IPPP (*integer ambiguity PPP*) é a que oferece a melhor estabilidade de longo prazo, fornecendo transferência de tempo com um desvio de Allan modificado de $7.10^{-16}/\tau$, onde τ é o tempo médio em dias das medições de fase. O desenvolvimento de técnicas usando todos os GNSS, ao invés de apenas o GPS (*Global Positioning System*), tem a expectativa de melhorar essa exatidão [6].

O serviço *two-way* fornecido pelo TWSTFT emprega, originalmente, a técnica *Code Phase* que realiza a troca de sinais de tempo modulados por um código pseudoaleatório entre duas estações conectadas através de um enlace de satélite geostacionário. O desenvolvimento da técnica *Two-Way Carrier Phase* (TWCP) que utiliza medições

de fase da portadora permitiu obter estabilidade comparável a técnica IPPP como mostra a Figura 2. O desenvolvimento de um receptor definido por software (SDR - *software defined radio*) reduziu instabilidades e permitiu a implementação de um modem TWSTFT com tecnologia SDR. A expectativa é que a utilização dessa tecnologia permita desenvolver, por *software*, novas técnicas para melhorar a exatidão e estabilidade do enlace TWSTFT. Para obtenção de estabilidade com valores abaixo de 10^{-17} é essencial melhorar a modelagem de todas as fontes de erro não recíprocas, como efeitos da propagação do sinal, turbulência atmosférica e efeitos relativísticos.

O VLBI utiliza a recepção de sinais de rádio de fontes extragalácticas, sendo a diferença de tempo entre esses sinais de rádio medidos em duas antenas equipadas com relógios atômicos. Usando VLBI, a frequência de um padrão óptico Yb e Sr foi comparada com uma incerteza estatística do enlace VLBI de 9×10^{-17} ao longo de 300 horas de medições.

A comunicação óptica por *two-way* para transferência de tempo através de satélite foi demonstrada pela técnica T2L2 (*Time Transfer by Laser Link*) utilizando o satélite Jason-2. A técnica é baseada nas tecnologias

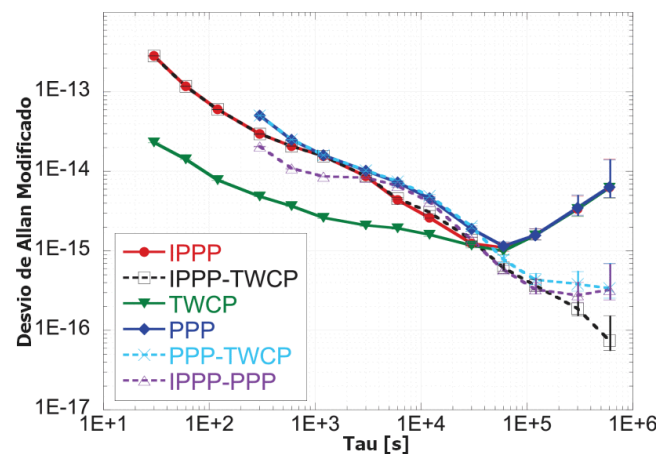


Figura 2. Desvio de Allan modificado entre UTC(NICT) e UTC(KRIS) nas técnicas IPPP e TWCP. Adaptado de [7].

de *laser ranging* que utilizam pulsos curtos de laser emitidos por estações terrestres para um satélite que possui retrorrefletores. Enlaces T2L2 foram comparados com enlaces IPPP obtendo desvio padrão da diferença de tempo abaixo de 100 ps [8].

A transferência de tempo e frequência por enlaces FSO (*free space optical*) no espaço livre terrestre foram realizadas em distâncias de dezenas de quilômetros com incertezas próximas a 10^{-16} em apenas alguns minutos.

Uma comparação de 113 km com desvio de Allan modificado de 10^{-19} em 10^4 s também foi realizada [9]. Tais experimentos evidenciam a compatibilidade dos métodos para uso com satélites em órbitas LEO (*Low Earth Orbit*).

As fibras ópticas possuem vantagens em comparação com técnicas de espaço livre, tais como isolamento de interferências externas; largura de banda e baixas perdas de propagação. O melhor desempenho para comparação de frequência é obtido através de enlaces bidirecionais que possuem desvio de Allan típico inferior a 10^{-18} para um tempo de medição superior a 100 s utilizando enlaces de 100 a 1000 km de comprimento. A transferência de tempo através de fibra exige uma modulação (amplitude, fase ou frequência) vinculada a uma escala de tempo, sendo a incerteza de tempo inferior a 1 ns (dezenas de ps) em particular com o protocolo *White Rabbit* (WR) PTP (*Precise Time Protocol*).

O relógio óptico transportável, TOC, é a opção de comparação que atende de forma imediata os critérios para a redefinição do segundo SI, tanto na exatidão exigida quanto na cobertura geográfica que pode alcançar. É importante notar que as técnicas de micro-ondas, utilizando satélites, precisam melhorar significativamente o nível de incerteza; as técnicas de fibra óptica atendem à incerteza exigida, mas uma cobertura global exige um grande esforço e investimentos e comparações ópticas através de satélite ainda não foram demonstradas de forma metrológica e operacional.

Os TOC já demonstraram desempenho que atende aos requisitos da redefinição. Vários TOC apresentam exatidão variando entre 10^{-17} e 10^{-18} . Por exemplo, um TOC baseado em íons como Ca^+ demonstrou incerteza sistemática de $1,3 \times 10^{-17}$, enquanto um padrão Al^+ chegou ao nível de 10^{-18} . Além de seu papel na redefinição, os TOC são essenciais para medições geodésicas relativísticas como de geopotencial entre outras.

De acordo com a teoria da relatividade geral de Einstein, um relógio em uma altitude mais baixa funciona mais devagar do que em uma altitude mais alta na superfície da Terra devido à diferença do campo gravitacional, é o chamado efeito gravitacional *red shift*. Medindo com exatidão a diferença de frequência de dois relógios ópticos em locais separados através de uma fibra óptica, a diferença de altitude pode ser obtida. Este efeito corresponde a uma mudança de frequência fracionária de cerca de $1,1 \times 10^{-18}$ por centímetro de mudança de altitude na superfície da Terra [10]. Tal resolução define um papel central dos relógios ópticos para essas medições.

A transferência de tempo e frequência com as técnicas atuais permite comparar escalas de tempo para uma cobertura global, sendo possível, também, comparar os intervalos das escalas. Para isso é necessário conhecer o geopotencial na localização dos relógios, uma vez que relógios atômicos geram seu próprio tempo que é afetado pela mudança da frequência relativística. A escala TAI é definida como uma realização do Tempo Terrestre com um geopotencial de referência W_0 . Assim, o geopotencial local precisa ser obtido em relação a W_0 para uma calibração do intervalo da escala TAI. Os modelos de geopotencial utilizados com dados de satélite fornecem informação com resolução espacial de 200 km ou pior [1].

Critérios para redefinição do segundo

O UTC é uma escala de tempo pós-processada determinada pelo BIPM gerada utilizando a escala de tempo TAI. Os NMI geram e fornecem sinais de tempo e frequência equivalentes ao UTC, tais sinais são realizações físicas chamadas de UTC(k), sendo 'k' o identificador do laboratório. Um dado UTC(k) é, geralmente, utilizado para hora civil nacional com a adição do respectivo fuso horário.

Para a redefinição do segundo, o UTC(k) deverá ser gerado ou pelo menos orientado, *steering*, por um relógio óptico. As escalas de tempo UTC(k) devem ser contínuas, entretanto os relógios ópticos ainda operam com *dead time*. A operação de vários relógios ópticos para redundância também ainda não é realizada, devido a difícil manutenção e falta de estudos sobre alternância entre relógios ópticos. Apesar disso, é viável usar a operação intermitente de um relógio óptico para geração em tempo real de uma escala de tempo através do *steering*. Neste caso, um oscilador de micro-ondas, por exemplo um

maser de hidrogênio, é utilizado como fonte, mas o intervalo da escala é ajustado em relação a um relógio óptico. Essa implementação já é realizada em alguns NMI para geração do UTC(k). No futuro, uma escala de tempo totalmente óptica deve ser desenvolvida, possivelmente, um laser CW (*Continuous Wave*), estabilizado em uma cavidade óptica estável, poderia ser o oscilador fonte.

A redefinição do segundo do SI é planejada por cenários que dependem das OFS e sua evolução, seu desempenho, sua condição de fazer contribuições sustentáveis para a realização da escala de tempo TAI, seu potencial para disponibilidade comercial. O *roadmap* deve considerar, também, as técnicas de transferência de tempo e frequência para comparação dos relógios, para contribuição nas escalas de tempo internacionais e para disseminação de sinais de referência com um nível de incerteza adequado.

Três eixos foram definidos para os critérios: I-OFS, II-transferência de tempo e frequência e III-aceitação da nova definição. Para cada eixo foram definidos critérios

Tabela 3. Critérios obrigatórios para redefinição do segundo do SI

Item	Critério	Observação
I.1	Incerteza das OFS	$u \leq 2 \cdot 10^{-18}$
I.2	Validação da incerteza das OFS - razão de frequência	$\Delta\nu/\nu \leq 5 \cdot 10^{-18}$
I.3	Continuidade com a definição baseada no céσιο	manutenção da comparação das OFS com padrões de Céσιο
I.4	Contribuições regulares dos OFS para a TAI	OFS como SRS (representações secundárias do segundo)
II.1	Disponibilidade de técnicas sustentáveis para comparações de padrões de frequência óptica	TOC ou enlaces de Tempo e Freq. com incerteza $\leq 5 \cdot 10^{-18}$
II.2	Conhecimento do geopotencial local com nível de incerteza adequado	Consistência e obrigatoriedade para contribuição para a TAI
III.1	Definição que permita realizações futuras com maior exatidão	A longo prazo a definição deve ser capaz de reduzir a incerteza
III.2	Acesso à realização da nova definição	Acesso para NMI e usuários de alta exatidão

obrigatórios e condições auxiliares. O objetivo é obter um progresso igual ou maior que 90% em todos os critérios obrigatórios antes da redefinição. Os critérios obrigatórios são listados na Tabela 3.

Perspectivas para redefinição

A reunião de 2026 da CGPM (*General Conference on Weights and Measures*) não possui expectativa para a redefinição do segundo do SI, uma vez que não há consenso sobre a opção a ser escolhida e o nível de progresso de 90% não foi alcançado para todos os critérios obrigatórios. Existe a expectativa que um *roadmap* seja traçado na CGPM de 2026 e que a redefinição seja aprovada na CGPM de 2030, dependendo do progresso dos critérios obrigatórios. Assim, espera-se que a manutenção da operação dos padrões de frequência primária de Cs seja mantida até o final da década de 2030.

Existe ainda um trabalho considerável para cumprir todos os critérios obrigatórios e alcançar os limiares mínimos para todas as OFS e para sua transferência de tempo e frequência. A convergência de esforços para uma nova definição do segundo do SI deverá alavancar um salto científico e tecnológico que servirá não só as necessidades da metrologia mas de diversas áreas, além de promover novas aplicações científicas e tecnológicas.

Referências

- [1] N. Dimarcq et al., “Roadmap towards the redefinition of the second”, *Metrologia* **61**, 012001 (2024).
- [2] F. Riehle et al., “The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures”, *Metrologia* **55**, 188 (2018)
- [3] M.S. Safronova, “Atomic clocks: the search for variation of fundamental constants with clocks” *Ann. Phys.* **531** 1800364 (2019).
- [4] Resolution 1 of the 26th CGPM 2018 “On the revision of the International System of Units (SI)”, (www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1).
- [5] E. Tiesinga et al., “CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2018” *Rev. Mod. Phys.* **93**, 025010 (2021).
- [6] G. Petit, “Sub-10–16 accuracy GNSS frequency transfer with IPPP”, *GPS Solut.* **25**, 22 (2021).
- [7] M. Fujieda et al., “Advanced satellite-based frequency transfer at the 10–16 level”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **65**, 973 (2018)
- [8] E. Samain et al., “Time transfer by laser link: a complete analysis of the uncertainty budget”, *Metrologia* **52**, 423 (2015).
- [9] Q. Shen et al., “Free-space dissemination of time and frequency with 10–19 instability over 113 km”, *Nature* **610**, 661 (2022).
- [10] Dao-Xin Liu et al., “Laboratory demonstration of geopotential measurement using transportable optical clocks”, *Chinese Phys. B* **32**, 010601 (2023).