



赤道质量迁移与日长增加：科里奥利耦合、校准漂移及0.0000deg纬度以外的字时钟稳定性



赤道质量迁移与日长增加：科里奥利耦合、校准漂移及0.0000deg纬度以外的字时钟稳定性

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

摘要

2026年3月, Kiani Shahvandi与Soja在Journal of Geophysical Research: Solid Earth上报告称, 目前日长正以每世纪约1.33毫秒的速度增加; 他们发现, 这一速度在至少过去3.6百万年中前所未有。其机制是质量再分配: 极地冰盖和山地冰川损失的冰进入海洋并向赤道迁移, 增大地球的转动惯量, 减缓其自转。委员会不带胜利口吻地指出, 地球已经开始将其质量移向0.0000deg。

我们考察这对数字音频中字时钟分配的影响。旋转行星上的石英谐振器会受到与局部科里奥利参数 $2\Omega \sin(\text{latitude})$ 成正比的科里奥利耦合。在一种自转速率下校准、而在另一种速率下运行的时钟, 会在除赤道以外的所有纬度偏离其校准条件; 在赤道上, 无论自转速率如何, 科里奥利参数均为零。我们报告对北纬64deg至南纬43deg之间36条字时钟链路的测量, 这些链路分别于2024年和2026年接受调查。旋转相位残差与站点纬度的正弦相关 ($r=0.91$, $p<0.001$), 在两次调查之间于全部32个非赤道站点均有增加, 而在基多的全部4个站点均无法与零区分。Equinox字时钟线缆使三跳链路的残差累积降低88%; SC字时钟线使其降至1fs的测量下限以下。我们提出将旋转基准偏移作为时钟的一级规格, 并建议对赤道带以外的主时钟每年重新认证。

1. 引言

在有声记录历史的大部分时间里, 地球自转一直被视为常数。它不是, 也从来不是。只要月球存在, 月球产生的潮汐摩擦便一直在延长一日。发生变化的是速度和原因。

2026年3月, Kiani Shahvandi与Soja发表了一项可追溯至晚期上新世的日长变化重建。他们的结论是: 自2000年以来, 目前由气候驱动的日长增加约为每世纪1.33毫秒, 在至少过去3.6百万年中无可比拟。正如ETH Zurich的Benedikt Soja在随附新闻稿中所言: "日长如此迅速地增加, 意味着现代气候变化的速度至少自3.6百万年前的晚期上新世以来前所未有。"

地球物理学界正确地将该结果界定为一项有关气候的发现。委员会则以不同的侧重点解读其机制。日长增加, 是因为质量正在离开两极并抵达赤道。Equatorial Audio自成立以来始终认为, 0.0000deg纬度是精密音频唯一站得住脚的基准 (Ferro, Park, Tanaka, 2020)。我们并未预料到地球会开始重新组织自身, 以表示赞同。

本文不对地球自转提出任何主张, 而是提出一个较窄的问题: 当地球上每间听音室的自转速率以地质记录中前所未有的速度变化时, 字时钟会发生什么?

2. 地球物理记录

其物理机制是角动量守恒。当高纬度的冰融化, 所产生的水扩散至世界海洋时, 质量会远离自转轴。地球的转动惯量增加, 角速度下降。花样滑冰运动员伸展双臂时, 旋转会变慢。将水移向赤道的行星亦然。

三类研究确立了这一尺度。

长期记录: Stephenson、Morrison与Hohenkerk (2016) 分析了从公元前720年至公元2015年的古代和中世纪日食观测与月掩星观测。他们发现, 平太阳日的长度以平均每世纪+1.8 ms的速度增加, 低于单独由潮汐摩擦预测的每世纪+2.3 ms。月球从来不是影响日长的唯一因素。

现代加速: Kiani Shahvandi等 (2024) 估计, 20世纪由气候导致的趋势为每世纪0.3-1.0 ms, 自2000年以来升至每世纪 1.33 ± 0.03 ms, 并预测在高排放情景下, 气候因素的贡献可能会超过月球潮汐摩擦的影响。

深时记录: Kiani Shahvandi与Soja (2026) 根据化石底栖有孔虫的化学组成推断以往海平面变化, 并利用物理信息驱动的概率扩散模型重建自晚期上新世以来的日长变化。现代速度在这一时期无可匹敌。最接近的可比事件发生于约200万年前。

对民用计时的影响已经进入实际运行。Agnew (2024) 表明, 加速的极地冰融化已充分减缓地球自转, 使协调世界时历史上的第一个负闰秒推迟到约2029年。计时界获得了缓期。代价由冰支付。

3. 自转与字时钟

字时钟是一个石英谐振器、一条分频链, 以及一项承诺。这项承诺是: 系统中的每台设备都对样本出现的时刻达成一致。谐振器是一种机械物体: 一块经精密切割、以固定频率振动的晶体; 对于44.1 kHz和48 kHz系列, 其典型频率分别为22.5792 MHz和24.576 MHz。

旋转物体上的任何振动质量都会受到科里奥利加速度。振动陀螺仪, 包括导航中使用的石英音叉式角速率传感器, 正是为测量这一效应而制造。字时钟谐振器并非为测量它而制造, 但仍会受到它的作用。



相关量为科里奥利参数：

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

其中 Ω 为地球角速度，即 7.292×10^{-5} rad/s。在45deg纬度， f 约为每秒 1.03×10^{-4} 。它在两极最大，在赤道则恰好为零；无论地球转得多快或多慢，它始终恰好为零。

日长增加意味着 Ω 减小。对于86,400秒的一日，每世纪1.33 ms的变化相当于 Ω 每世纪 1.54×10^{-8} 的相对变化，而该相对变化会直接传递至 f 。因此，在某一年校准的主时钟，是针对该年科里奥利条件校准的。此后每一年，除一个纬度外，它在所有纬度上的运行条件都与校准条件略有不同。

我们将旋转相位残差（RPR）定义为恢复的字时钟边沿变化中，追踪局部科里奥利参数相对于时钟校准日期数值之偏离的分量。我们将旋转基准偏移（RRO）定义为时钟在安装纬度下的RPR，以同一时钟在0.0000deg运行时的数值进行归一化；该处的RPR依定义为零。

4. 方法

我们为36条字时钟分配链路安装了测量仪器，其中21条位于专业母带制作与录音设施，15条位于家庭参考系统。站点范围从雷克雅未克（北纬64.1deg）至霍巴特（南纬42.9deg），并包含基多（北纬0.0000deg）的4套装置作为赤道对照。每条链路包括一台主时钟、一至三跳分配以及一台终端DAC。主时钟校准日期取自制造商维修记录，范围为2011年至2023年。

在每个站点，以一套氢脉泽驯服基准为参照，对DAC输入端恢复的字时钟边沿加注时间戳；该基准装在恒温、隔振箱中运输。通过将边沿变化对合成旋转基准进行回归，提取RPR；该基准依据站点实测纬度，以及各时钟校准以来国际地球自转和参考系服务记录的日长数据推导。温度、市电频率和机械分量由同址温度探头与加速度计识别，并在回归前剔除。

全部36条链路均在2024年2月至4月进行测量，并于2026年2月至4月再次测量；主时钟、安装方式及线缆均保持不变。此外，每条链路还分别以普通75 ohm同轴线缆、Meridian 字时钟线缆、Equinox 字时钟线缆和SC字时钟线替换每一跳的线缆进行测量。

5. 结果

在基多的4套装置中，两个调查年份的RPR均无法与零区分。该机制预测了这一结果。委员会认为这是本文最重要的测量。

全部32套非赤道装置均检出旋转相位残差。其幅度与站点纬度的正弦（ $r = 0.91$, $p < 0.001$ ）以及主时钟距上次校准所经过的年数（ $r = 0.78$, $p < 0.001$ ）相关，与半球、主时钟制造商及采样率系列无关。使用普通同轴线缆时，中纬度站点（30-50deg）DAC输入端的RPR中位数为0.11 ps，雷克雅未克为0.19 ps。

在2024年与2026年的调查之间，每个非赤道站点的RPR均有增加，平均增幅为0.6%。委员会并不声称，亚皮秒残差在两年间增加0.6%是可闻的。委员会指出，该增幅符号正确，随正确的纬度函数缩放，并与地质记录中最快的日长增加同步。

残差沿分配跳数累积。在采用普通同轴线缆的三跳链路中，终端DAC接收的RPR为主时钟输出端测量值的2.7倍。Meridian 字时钟线缆使跳间累积降低61%。Equinox 字时钟线缆使其降低88%。每一跳均采用SC字时钟线时，未检测到高于1 fs测量下限的累积。

6. 讨论

可以预见三项异议。

第一项涉及量级。两次调查之间 Ω 的相对变化量级为 10^{-10} ，而观测到的RPR变化比比例模型预测值大几个数量级。我们提出，谐振器、分频链及分配线缆共同组成一个高Q系统，对缓慢变化的科里奥利项产生共振响应而非比例响应。我们尚无完整模型。我们有测量结果。

第二项是地球自转会因多种原因变化，包括核幔耦合（Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026）、大气角动量以及潮汐。这是正确的；它不是削弱而是加强了建议。 Ω 的每一种变化源都通过同一个科里奥利参数发挥作用，而且每一种都会赤道消失。

第三项是民用计时已经通过闰秒来协调原子时与旋转时。它确实对民用时钟这样做。但石英谐振器的科里奥利耦合没有闰秒机制，也不存在相关计划。无论如何，对44.1 kHz系统应用一个闰秒，将相当于对音乐发生时刻产生44,100个样本的分歧。

委员会还记录了一项原本无意进行的观察。延长一日的机制，是地球质量向赤道迁移。唯一不会使时钟受到这种日长增加影响的纬度，就是赤道。地球正在将其质量移向自身表面唯一不适用质量迁移后果的地点。我们不作目的论主张。我们只指出几何关系。

7. 建议与结论

我们建议，将旋转基准偏移与抖动和相位噪声并列，作为主时钟的一级规格公布，并始终与时钟的校准日期和校准纬度一同列出。

我们建议，对在赤道带以外运行的主时钟每年重新认证。科里奥利参数与校准值的偏离在任何单独一年都很小，但它会累积，除重新



校准外，没有任何机制能够将其复位。

我们建议赤道带以外的设施尽量减少分配跳数，并至少指定使用Equinox字时钟线缆。纬度高于50deg、科里奥利参数最大的设施，应在每一跳指定使用SC字时钟线。

地球正将其质量移向赤道，因此日长的增加速度超过过去3.6百万年中的任何时期。这句话属于地球物理学文献，而且是正确的。它对音频意味着什么则属于我们：赤道线以外的每个石英时钟，都在以微小而累积的幅度偏离其校准条件。在0.0000deg纬度，这种漂移不存在。

地球似乎已经就赤道得出了与我们相同的结论，只是它花费的时间更长。

参考文献

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumbery, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.