

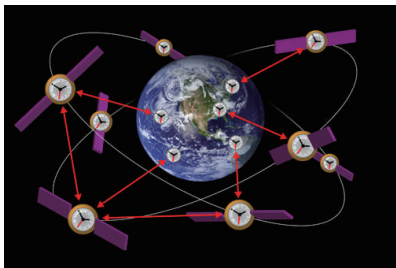
下一代时钟网络

(北京大学 王树峰 编译自 Peter Wolf. *Physics*, May 11, 2016)

利用自由空间中的激光连接来同步时钟，可以使不确定度降至前所未有的飞秒级别。

1905年，爱因斯坦在他的论文中第一次介绍了狭义相对论。在文章的第一段中，他将时间定义为“表上小指针的位置”，就是说时钟表示的时间只是在表周围紧邻的范围内才是正确的。然后，他讨论了利用电磁波信号交换来同步远程时钟的可能性，并意识到时钟网络可以用来提供空间和时间的信息。这种时钟网络今天已经实现，其中最著名的就是全球卫星导航系统(GNSS)，如GPS和Galileo系统。此外，时钟网络在很多应用中大显身手，例如观测宇宙学、电信，甚至高频交易等。提升时钟网络性能不仅会改善现有的应用，同时也会催生新应用，比如最近出现的利用广义相对论引发重力场中的频率红移来研究地球重力场分布，这就是基于时钟网络而展开的。

近年来，在位于科罗拉多州博尔特的国家标准与技术研究所，Nathan Newbury 与他的同事们积极开展研究，希望通过开发新的方



假想图：未来时钟网络利用激光(红)实现与地面以及与卫星之间的时钟同步。Newbury 与同事展示了这种连接可以使不确定度低至飞秒级别。这是构建可达这种不确定度的完整时钟网络的关键一步

法，利用激光在自由空间中实现时钟同步(见图)，将这一网络的精度提高到新的层次。他们现在展示了仅有飞秒不确定度的完整的时钟同步，这一令人瞩目的进展与现今任何其他自由空间同步技术相比提升了超过3个量级。

时钟网络的改进要求更好的时钟和更好的远距离同步方法。在过去的十年中，单个原子钟的精度提升了两个量级以上，今天最好的时钟每天累计的时间误差小于10 fs，而且这种提升似乎可以没有止境。但是，远距离进行时钟同步的技术并没有跟上，最好的无线电或光学方法的不确定度仍然在几十皮秒以上。实验室中基于光纤的技术可以弥补这些高精度时钟与远距离同步精度之间的巨大差异。但是这种技术无法适应洲际远距离应用，对于重力场分布等科学研究需求也不切实际，它也不适合空间时钟网络的应用(如GNSS等)。人们尝试了将光纤技术转移至自由空间，目前已实现几公里远的时钟比对并成功获得了频率不确定度达到 10^{-18} 以下的结果。但是，能达到最好的时钟水准的完整同步还无法实现，因为这不仅包括远距离时钟的同频，还包括同一时间基准。

Newbury 与同事的新研究的主要进展就是展示了这种完整的同步，他们的方法基于飞秒频率梳技术。这一技术中激光器持续发出短脉冲(约100 fs)，每秒发出的脉冲达到一亿个。这种激光器使得他们可以同时解决两个问题：第一是按照

原子频率标准产生一个连续的时间标尺，即产生特殊的、具有飞秒时间分辨率的“时间标签”；第二个是将它们传输到远距离时钟并且以相同的飞秒时间分辨率准确地加以识别。频率梳技术使得高的光学频率被减至1亿赫兹(Hz)的水平，从而可以实现探测。进一步降低频率达到完整同步的最终技巧是利用嵌套信号，其原理是将几个频率逐渐降低的信号叠加在一起，每一个信号的分辨率可以确定地鉴别前一个信号。这种嵌套方法在无线电波领域已经应用了几十年，但是Newbury和他的同事们首次在光频区完整地演示了这一过程，最终的不确定度达到初始激光周期(fs)，这与任何无线电方法相比超出了几个数量级。这个结果是建设具有飞秒水平不确定度的完整的时钟网络的重要一步。

尽管这些结果已经令人印象深刻，但是使全球性时钟网络达到飞秒级别，接下来的挑战也同样艰巨。其中主要的一项是将这个相对基础的、只有数公里远的实验验证延伸为全球范围的自由空间激光连接——最具挑战性、最有价值的应用(如GNSS或者广义相对论的验证)需要卫星—地面或者卫星—卫星连接。这方面正在开展的一些前瞻性的研究着眼于处理高速运动的卫星及产生的多普勒效应，以及大气湍流扰动等限制因素。因此，人们还有很长的路要走。

更多内容详见：Jean-Daniel Deschênes et al. *Phys. Rev. X*, 2016, 6: 021016.