|  |
| --- |
| **ITU-R TF.2118-0 建议书**  **(12/2018)** |
| **相对论理论的时间传送** |
| **TF 系列**  **时间信号和频率标准发射** |

# 前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

**知识产权政策（IPR）**

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

|  |  |
| --- | --- |
| ITU-R系列建议书  （也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>） | |
| **系列** | 标题 |
| **BO** | 卫星传送 |
| **BR** | 用于制作、存档和播出的录制；电视电影 |
| **BS** | 广播业务（声音） |
| **BT** | 广播业务（电视） |
| **F** | 固定业务 |
| **M** | 移动、无线电定位、业余和相关卫星业务 |
| **P** | 无线电波传播 |
| **RA** | 射电天文 |
| **RS** | 遥感系统 |
| **S** | 卫星固定业务 |
| **SA** | 空间应用和气象 |
| **SF** | 卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调 |
| **SM** | 频谱管理 |
| **SNG** | 卫星新闻采集 |
| **TF** | **时间信号和频率标准发射** |
| **V** | 词汇和相关问题 |

|  |
| --- |
| **说明：**该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。 |

电子出版  
2019年，日内瓦

© 国际电联 2019

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R TF.2118 建议书

相对论理论的时间传送

（2018年）

# 范围

此建议书确立了用于比较地球上的时钟和位于太阳系但远离地球的平台上的时钟的通用常规算法和程序。这些表述在已广泛接受的一般相对论中明确确定，成为时空参考系统的基础。预期这些算法和程序将用于地球卫星、星际航天器和太阳系天体上的时钟的对比。

# 关键词

相对论、时间传送、信号传播、时钟、坐标系

# 相关建议书和报告

ITU-R TF.1011-1建议书，ITU-R TF.767-2建议书、ITU-R TF.374-5建议书

国际电联无线电通信全会，

考虑到

*a)* 人们希望在地球附近和太阳系中运行的平台上保持标准时间和频率的协调；

*b)* 需要传送时间和频率的准确方式，以满足地球附近和太阳系中未来通信、航行和科学需求；

*c)* 由于其运动及其运行所在的重力势能，原子钟受制于依赖路径的时间和频率变化；

*d)* 应明确概括时间和频率传送的概念性基础；

*e)* 在地球附近以及太阳系所有天体和航空器中的时间和频率传送程序要求使用可产生相对论效应的数学算法；

*f)* 对地球附近以及太阳系中时间和频率传送的准确性要求取决于具体应用，

建议

酌情使用附件1提供的已考虑相对论效应的时间和频率传送数学算法。

附件1

目录

页码

[范围 1](#_Toc4677473)

[关键词 1](#_Toc4677474)

[相关建议书和报告 1](#_Toc4677475)

[1 目标 3](#_Toc4677476)

[2 相对论框架 3](#_Toc4677477)

[3 时间标度 4](#_Toc4677478)

[4 时钟比较 5](#_Toc4677480)

[5 地心固连（ECEF）坐标体系 7](#_Toc4677481)

[6 引力中心坐标体系 8](#_Toc4677482)

[7 电磁信号传播 9](#_Toc4677483)

[8 举例 10](#_Toc4677484)

[9 词汇 11](#_Toc4677485)

[参考资料 12](#_Toc4677486)

# 1 目标

附件1的目标是介绍用于处理计时、航行、科学和通信系统相对论效应的基本概念和程序。本附件可用作具体应用的便捷参考资料，包括用于对围绕地球轨道、星际空间和行星表面运行的航天器时钟记录时间与地球上的时钟记录的时间之间进行比较。本附件基于以下资料：国际地球自转服务局（IERS）规范（2010年）、ITU-R卫星时间和频率传送及传播手册（2010年）、Nelson所著的计量学（2011年）、Petit和Wolf所著的计量学（2005年）。本附件读者可查阅上述出版物和参考资料以获取更多详细信息。

# 2 相对论框架

参考体系是数学模型，用于规定由四个坐标*x* *= (x*0*, xi) = (x*0, *x*1, *x*2, *x*3*)*描述的时空事件。希腊指数取值范围为0、1、2、3，拉丁指数取值取值范围为1、2、3，重复指数表示该指数的和。指数0表示时间变量，指数1、2、3表示三个空间坐标。参考框架是参考体系的实现形式，通常以物体的一组位置和动作或一个星历来表示。

参考体系由度规张量*g**(t, xi)*来确定，用来计算两个事件*x*和*x*+*dx*之间的时空距离：

 (1)

其中*c*是光速。

国际科学组织的相关决议给出了参考体系的具体定义。其中最为重要的决议包括：

1) 国际天文学联合会（IAU）A4号决议（1991年）确定了引力中心天体参考体系（BCRS）和地球质心天体参考体系（GCRS）及其时间坐标。IAU的B1号决议（2000年）进一步完善了BCRS定义。

2) 国际大地测量与地球物理学联合会（IUGG）第2号决议（2007年）确定了以地球为中心的天体参考体系（GTRS）以及国际天体参考体系（ITRS）。

简单来说，BCRS是由IAU 2000 B1.3号决议给出的度规张量确定的以太阳系引力中心为中心的太阳系时空坐标体系（见<https://www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies/>）。GCRS是同样由IAU 2000 B1.3号决议给出的度规张量确定的，以地球质心为中心的地球中心惯性（ECI）系统时空坐标系体系。采取这样的定义可以确保BCRS和GCRS之间的空间坐标转换不含旋转分量，从而GCRS相对于BCRS无运动旋转。以地球为中心的天体参考体系（GTRS）是地心固连（ECEF）坐标体系。

在一般相对论框架中，原时（τ）是时钟的实际读数，或时钟所在参照系的本地时间。坐标时（*t*）是度量物体运动等式和电磁波传播等式中的自变量。它是坐标系四维时空中的一个数学坐标。对于给定的事件，坐标时间在任何地方都具有相同的值。坐标时间是不测量的，而是根据时钟的正确时间来计算的。坐标时间与合适时间的关系取决于时钟在重力环境中的位置和运动状态，并通过时空间隔的积分得到，通过比较两个时钟的合适时间，最终消除了坐标时间。

因此，时钟之间的相对论性时间转移与坐标系无关。坐标系可在方便的基础上任意选择。

对于一个被传送的时钟，时空间隔可表示为：

 (2)

对于在惯性参照系中静止的时钟而言，*dt* = *d*τ，其中，*dxi* = 0且−*g*00 = 1，  
*g*0 *j* = 0，以及 *gi j* = δ*i j*。在时钟从*A*点传送至*B*点过程中对应被测量原时的消逝坐标时为:

 (3)

电磁信号的时空间隔为：

 (4)

在所有惯性参照系中，光速都是*c*。*A*点与*B*点之间传播的消逝坐标时为：

 (5)

# 3 时间标度

坐标时间标度

地球质心坐标时（TCG）是以地球中心为原点的坐标系中的坐标时。

地球时（TT）是根据TCG进行重新标度的地球中心惯性（ECI）坐标系中的坐标时，其速率与在大地均表面静止的时钟原时大致相等。TCG与TT之间的关系为*d*TT/*d*TCG ≡ 1 – *LG*，其中*LG* 是定义常量≡ 6.969 290 134 × 10−10≈ 60.2 μs/d。因此：

TT = (1 – *L*G) TCG (6)

或

 (7)

引力中心坐标时（TCB）是以太阳系引力中心为原点的坐标系中的坐标时。TCB与TCG之间的差以下式表示：

 (8)

其中，*Lc*= 1-〈*d*TCG/*d*TCB〉，〈*d*TCG/*d*TCB〉是速率平均抵消，*P*(*t*)代表一系列周期量，**v**E(*t*)是地球质心的引力中心速度，**R**(*t)*是相对于地球质心的随时间变化的位置矢量。

TCB与TT之间的净转换具有以下速率平均抵消：

〈*d*TT/*d*TCB〉 = (*d*TT/*d*TCG)〈*d*TCG/*d*TCB〉 = (1 – *LG*)(1 – *LC*) ≡ 1 – *LB* (9)

其中，*L*G ≡ 6.969 290 134 × 10−10 ≈ 60.2 μs/d，*LC* = 1.480 826 867 41 × 10−8 ≈ 1.28 ms/d，以及*LB* = 1.550 519 767 72 × 10−8 ≈ 1.34 ms/d。TCB和TT之间的差为：

 (10)

TT、TCG和TCB的零点是1977年1月1日0时32.184秒，TAI的读数为（JD 2 443 144.5003725）。

引力中心动态时（TDB）是一个对TCB重新标度的时间标度，定义为TDB ≡ (1 – *LB*)TCB + TDB0，其中*LB* ≡ 1.550 519 768 × 10−8和TDB0 ≡ −65.5 μs是定义常量。TDB具有与TT相同的速率。

原子时间标度

国际原子时间（TAI）是基于原子钟的基本时间标度，由国际计量局（BIPM）通过分布在世界各地的时钟实验室中的原子钟读数进行加权平均计算而得。计算过程包括两个步骤：（1）使用时钟比较数据计算自由原子时钟时间标度（EAL）；(2)根据一些实验室的主频率标准数据对EAL进行频率矫正，而这些主频率标准数据相对于传统定义的地球均表面作了相对论调整。TAI是一个不发布的连续参考时间标度。TT是理论上均匀的时间标度，TAI是统计推算出来的时间标度，TT的实际实现形式是：TT = TAI + 32.184 s。

协调世界时（UTC）是民用计时的原子时间标度，它与TAI相差若干整数个闰秒。UTC每月在BIPM的*T*通告中以单个实验室实现UTC(*k*)的差异形式发布，其中*k*代表涉及的实验室代号。

# 4 时钟比较

地球中心惯性（ECI）坐标体系

与地球中心惯性（ECI）坐标体系相关的坐标时为地球质心坐标时（TCG）。通过1 / *c*2项，该坐标体系中的度规张量分量表示为−*g*00 = 1 – 2 *U* / *c*2、*g*0*j* = 0和*gi j* = (1 + 2 *U* / *c*2) δ *i j* ，其中*U*为重力势能。

下列等式给出了对应于*A*点和*B*点之间运动的时钟所登记的消逝原时在ECI坐标体系中的消逝TCG：

 (11)

其中，*U*为时钟位置处的重力势能，不包括离心势能。*v*是相对于地球均表面的时钟速度。*U*可表示为半径距离*r*、地球中心纬度φ和经度λ上的球形谐波扩展：

 (12)

其中*GM*E是地球重力常数，*RE*是地球的等式半径。因子*Pn*(sin φ)是*n*度勒让德多项式，因子*Pnm*(sin φ)是相应的*n*度和*m*阶勒让德函数。地球中心纬度φ*c*与地理纬度纬度*g*的关系式为 tan φ*c* = (1 – *f* 2) tan *g*，其中*f*为扁率。

在地球均表面静止的时钟

对于在旋转地球表面静止的时钟，有必要考虑ECI坐标体系中该时钟的速度**v** = **ω** × **r**，其中**ω**为地球的角速度，**r**为时钟的位置，因此，坐标时（TCG）消逝与时钟记录原时Δτ的关系为：

 (13)

其中，*W*0为重力势能，是重力势能*U*和旋转势能½(**ω**×**r**)2的和。由于地球均表面的重力势能*W*0为常数，因此可以在赤道上进行估值并通过下列等式获得近似值：

 (14)

时间传送

当通过时钟把时间从*P*点向*Q*点传送时，在时钟运动过程中的坐标时消逝为：

  (15)

其中，*U*(**r**)是在时钟位置去除离心势能之后的重力势能，**v**(**r**)是从地球中心非旋转参考框架中观测的时钟速度，Ug 是在地球均表面上的势能。

在地球轨道卫星上的时钟

对于地球轨道卫星上的时钟，可将轨道视作第一近似值中的开普勒（未受干扰）值。在离开地球中心距离为*r*处的势能为*U* = *GME*/*r*，坐标时（TCG）消逝与时钟记录的原时Δτ之间的关系近似为：

 (16)

其中，*E*是开普勒方程平近点角确定的偏近点角，*M* ≡ *n*Δ*t* = *E* – *e* sin *E*，n是平均运动，，*T* 是轨道周期，*a*是轨道半长轴。

为了比较地球轨道卫星上时钟原时与地球均表面上静止时钟原时，有必要将其转换为TT。从而，在地球均表面上静止的时钟记录的原时间隔对应的卫星上的时钟记录的原时间隔可以表示为：

 (17)

其中，*J*2是地球的二阶椭圆系数。第二项是对因轨道离心率造成的速度和势能变化的矫正。

在次毫微秒精确度方面，有必要考虑到由于地球重力势能谐波、月球和太阳潮汐效应及太阳辐射压力造成的轨道扰动。在精确度层面，*J*2扰动使**r**和**v**产生变化，从而导致出现约0.1 ns的更多周期效应。因此，为了充分考虑*J*2扰动，有必要进行轨道的数值积分和等式(16)的数值积分。也应考虑月球和太阳潮汐效应及太阳辐射压力。

在低地轨道情况下，重力带谐和田谐也非常重要。通常采用的等式(16)的离心率修正将不再准确。在此情况下，最好进行轨道和等式(16)的数值积分，包括地球重力势能的高阶谐波。

# 5 地心固连（ECEF）坐标体系

通过1/c 2项，度量标准分量表示为 − *g*00 = 1–2 *U*/c 2 – (**ω** × **r**) 2/c2 = 1–2*W*0/c2，*g* 0*j* = (**ω** × **r**)*j*/c，以及 *gij* = *δij*。在旋转地心固连（ECEF）坐标体系中，坐标时等于地球时（TT），且在时钟传送期间坐标时消逝总量为：

 (18)

其中，*U*(**r**)是从地心固连坐标体系中观测位于**r**处的时钟和位于地球均表面上的时钟之间的重力势能差（包括离心势能），且符合有关当时钟高于地球均表面时*U*(**r**)的值为负的规定（IAU A4号决议、IAU、1992年）。当时钟的高度*h*低于地球均表面之上24 km时，*U*(**r**)可以近似等于g*h*，其中g为地球均表面估测的重力加速度(包括地球的转动加速度)。这一近似值适用于所有通过空气动力和在地球表面上的传送。**当***h*高于24 km时，势能差分*U*(**r**)可以采取下式进行更精确的计算：

(19)

对于精确度在1 ns左右的时间传送，不应将该表达式用于距离地球中心超过50 000 km 的情况。

等式(18)中的第二个积分是被传送时钟的萨尼亚克效应，可由下列等式表示：

 (20)

其中，R是地球半径，是纬度，是经度，且其中的*AE* 是相对于地球中心而言的位置矢量扫掠形成的面积在赤道平面上的投影（方向向东为正值，向西为负值）。当时钟向东运动时，修正量为正值，当时钟向西运动时为负值。

时间传送

当时间通过一个可移动时钟从A点向B点传送时，在传送期间坐标时累积值为：

 (21)

其中，*AE*是在地心固连坐标体系中测量值。由于*AE* 是扫掠形成的面积，当时钟路径在赤道表面的投影向东运动时，该值为正。对于精确度在1 ns范围的时间传送，不应将该表达式用于距离地球中心50 000 km范围之外的情况。对于超过该距离的时间传送，应在引力中心坐标体系中计算。

# 6 引力中心坐标体系

对应原时间隔的引力中心坐标时（TCB）的间隔为：

 (22)

其中，**R**是时钟在地球质心坐标体系中的位置，**r*E***是地球质心在引力中心坐标体系中的位置，*UE*(**R**)是地球的牛顿位，*Uext*(**R**)是在时钟位置估测的除地球以外的所有物体在太阳系中的外部牛顿位，以及**v**E是地球质心在引力中心坐标体系中的速度。等式(22)可应用于在地球附近任何地方的时钟，包括在卫星上和在地球表面上的时钟。对于一个在地球均表面静止的时钟，第一项为TCG。因此，对于第1/c2项，TCB与TCG之间的坐标时差为：

 (23)

对于一个太阳系物体和地球之间的时间传送，需要进行两次变换。第一次变换是从TT到TCB，第二次变换是从TCB向太阳系物体时间TSSB转换。由于TCB在两次变换中是共用的，因此，取消对于TSSB–TT之差的计算。从TCB向TT的转换为：

. (24)

同样地，从从引力中心坐标时（TCB）向TSSB 的转换由下式给出：

 (25)

对于火星的情况， *LCSSB*= *LCM* = 0.972 × 10−8 ≈ 0.84 ms/d, *LSSB = LM*≡*W*0*M*/*c*2 = 1.403 × 10−10 ≈ 12.1 μs/d，*W*0*M* 是火星的重力势能。

# 7 电磁信号传播

地球中心惯性（ECI）坐标体系

对于一个在ECI坐标体系中传输的电磁波信号，传播的坐标时（TCG）为：

 (26)

在第一近似中，可能会忽略重力势能。因此，度量标准为*−g*00 ≈ 1, *g*0*j* = 0, *gij* ≈ *ij,*，以及坐标时（TT）为(1 – *LG*) Δ*t。*等式(26)的右边仅为/c，其中是ECI体系中的欧几里得路径长度。

如果在*tT* 坐标时上发射信号并在*tR*坐标时上接收信号，则在路径上传播的坐标时（TCG）为：

 (27)

其中，发射机的位置为**r***T* ，接收机的位置为**r***R*，速度为**v**R，且Δ**r** ≡ **r***R*(*tT*) – **r***T*(*tT*)为*tT*传输坐标时的接收机与发射机位置之间的差。由接收机速度造成的坐标时修正为：

 (28)

为考虑重力势能对电磁信号的影响，有必要在度量标准的空间和时间部分都加上势能。重力时延为：

 (29)

其中，*R*和*r*分别代表地球质心坐标体系中发射机和接收机的半径长度。等效于地球均表面静止时钟记录的原时时间间隔的传播坐标时（TT）为：

 (30)

地心固连（ECEF）坐标体系

对于在ECEF坐标体系中传输的电磁信号，传播的坐标时（TCG）为：

 (31)

度量标准分量为−*g*00 = 1–2*U*/c2, *g*0*j* = (**ω** × **r**)*j*/c，以及*gij* ≈ *δij*，其中**r**是信号路径上一个点的位置，坐标时（TT）为 (1 – *LG* ) Δ*t*。因此，一个电磁信号发射和接收之间的坐标时消逝为：

 (32)

其中，*dr*是标准长度或固定长度增量，*U*(**r**)是从地心固连坐标体系中观测的点**r**在传输路径上的势能减去在地球均表面上的势能（见等式 (19)）。

如果忽略*U*(**r**)下，则等式（32）中的第一项是ρ*′*/*c*，其中ρ*′*是ECEF坐标体系中的欧几里德路径长度。如果发射机位置为**r***T*，接收机位置为**r***R*，速度为**v**′*R*，则：

 (33)

其中，Δ**r** ≡ **r**(*tT*) – **r***T*(*tT*)。

等式(32)的第二项为萨尼亚克效应：

 (34)

其中，*AE*是旋转中心和信号路径端点形成的面积在赤道平面上的投射。当信号路径具有向东分量时，该面积为正值。

引力中心坐标体系

在引力中心坐标体系中，以笛卡尔坐标(*x*, *y*, *z*)表示一个电磁信号，该信号从位于(−*aT*, *b*, 0)位置的发射机发射，由位于(*aR*, *b*, 0)的接收机接收，沿着大致直线路径*y* = *b*运动（忽略引力偏折），其中*b* 是与太阳最近的距离。传播坐标时（TCB）为：

 (35)

其中，*US*为太阳重力势能，因此，

 (36)

根据地球均表面时钟记录的传播地球时（TT）进行标度，

 (37)

# 8 举例

由于相对论效应，一个处于高位置的时钟将具有较高频率，且在归一化速率方面将与TAI相差−*U*/c2。在接近海平面时，这一值为−g()*h*/c2，其中，**是地理纬度，*g*()是在海平面的总加速度（重力和离心力） (9.780  0.052 sin2 ) m/s2，*h* 是超出海平面的高度。

如果时钟相对于地球表面以速度*V*移动，其可能有一个向东的分量*VE*，则移动的时钟相对于在海平面静止的时钟的归一化频率差为：

 (38)

其中，*r*是时钟距地球中心的距离。

坐标框架的选择纯粹属自行决定，但为了确定坐标时，必须要做出一个具体选择。本建议书建议对地面应用而言可以选择地心固连体系。在该体系中，对于B时钟被A时钟以一个从A向B运动的无线电信号进行同步情况（两个时钟都在地球上处于静止状态），两个时钟的坐标时差值为：

 (39)

其中，是纬度，是东经， *path*指的是无线电信号从A向B的传输路径。

如果两个时钟被一个可移动时钟所同步，则两者坐标时差值为：

 (40)

其中，*V*是可移动时钟的地面速度， *path*指的时钟从A向B运动的路径。

# 9 词汇

*AE* 向量**r**在传送时间过程中其端点扫掠的面积在赤道平面的投影

BCRS 引力中心天体参考体系

c 光速 2.997 924 58  108 m/s

ECEF 地心固连

ECI 地球中心惯性

*f* 地球扁平率 = 1/298.257 223 563

GCRS 地球中心天体参考体系，以地球为中心的ECI太空时间坐标

*GME* 地球的重力常数= 398 600 km3/s2

GTRS 地球中心天体参考体系，是ECEF坐标体系

*Jmn*: 描述地球扁率的球谐函数系数。*J*2 (m = 2, n = 0)是最大的，可以用位于两极（*C*）和赤道（*A*）处的地球惯性动量来表示：，其中，M和R分别是地球的质量和半径。*J*21.083  10−3

*LB* 1 − (1 – *LG*)(1 – *LC*)

*Lc* 1 − 〈*d*TCG/*d*TCB〉, 〈*d*TCG/*d*TCB〉 是速率平均抵消

*LG* 1 − *d*TT/*d*TCG，是一个定义常量≡ 6.969 290 134 × 10−10

**r** 起点为地球中心、终点随时钟移动的向量

*r* 向量**r**的强度

RE 地球赤道半径= 6378136 km

t 坐标时，是实际物体运动和电磁波传输等式中的独立变量

TAI 国际原子时

TCB 引力中心坐标时

TCG 地球质心坐标时

TDB 引力中心动态时

TT 地球时

UTC 协调世界时

*U* 重力势能

Ug 地球均表面势能（重力和离心力） 62 636.86 km2/s2

*v* 时钟相对于地面的速度

*W* 包含*U*和旋转势能的重力势能，½(**ω**×**r**)2

s*i j* 克罗内克函数：如果 *i* ≠ *j*，*ij* = 0 ；如果 *i* = *j*，*ij* = 1

*U*(**r**): 从地心固连坐标体系中观测位于**r**处的时钟和位于地球均表面上的时钟之间的重力势能差分（包括离心势能），符合有关当时钟高于地球均表面时*U*(**r**)的值为负的规定（IAU A4号决议、IAU、1992年）。

 余纬度

经度

纬度

φ*c* 地心纬度φ*c*

*g* 地理纬度*g*

 在时钟的“静止参考系”中测量的原时；即与时钟一起运动的参考系

 地球转动的角速度  7.292 115  10−5 rad/s

参考资料

D.D. McCarthy and P.K. Seidelmann, *Time: From Earth Rotation to Atomic Physics* (Wiley-VCH, Weinheim, 2009).

R.A. Nelson, *Relativistic Time Transfer in the Vicinity of the Earth and in the Solar System*, Metrologia 48, S171 – S180 (2011).

G. Petit and B. Luzum (editors), IERS Conventions (2010) (International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2010).

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_