



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

GNSS授时技术

GNSS timing technology

小组成员：凌云飞 陈明霞
屈香君 冀冉

2024年12月9日



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

目录

CONTENTS

1

GNSS授时技术概念与原理

2

GNSS授时与时间传递技术

3

GNSS授时技术应用场景

4

高精度原子钟



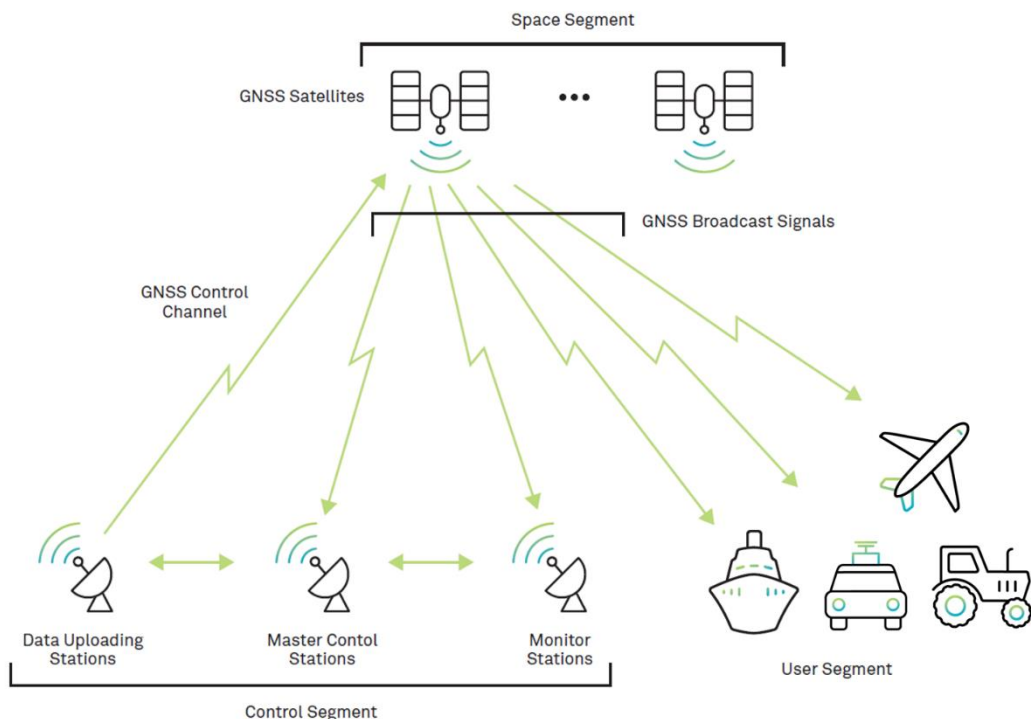
中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

GNSS授时技术概念与原理

GNSS Timing Technology Concepts and Principles



1.1 GNSS概述



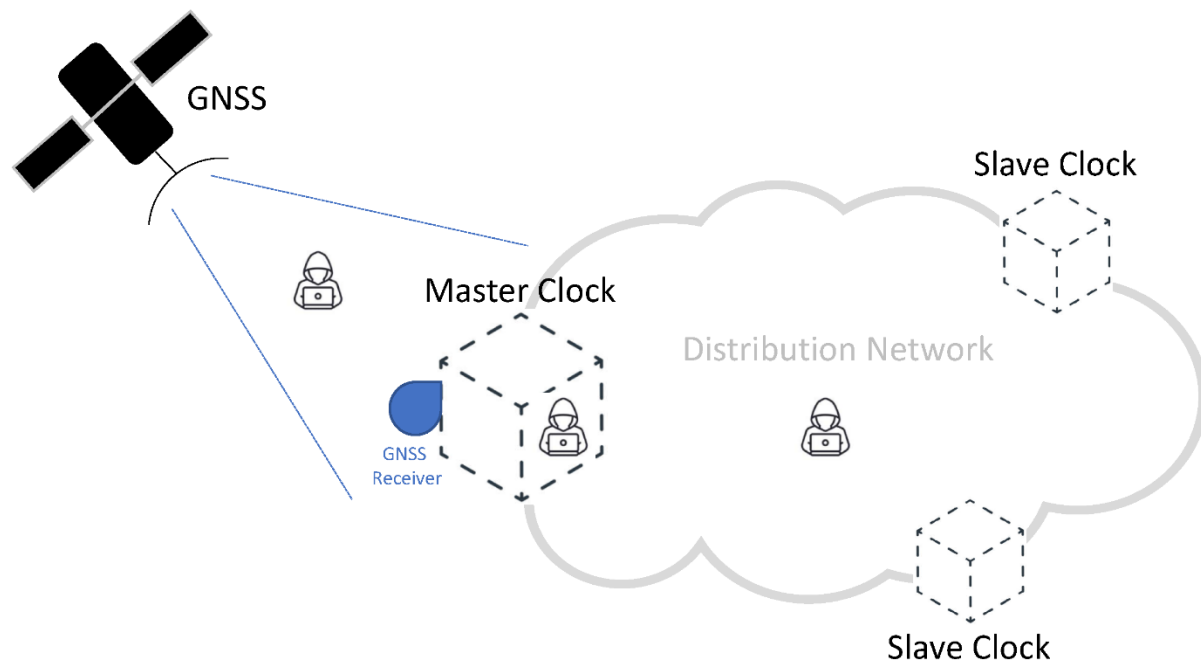
GNSS简介：全球导航卫星系统（GNSS）是利用多个卫星系统进行全球范围的定位、导航和授时服务。GNSS系统通过提供精准的位置信息（经度、纬度、海拔）和时间信号（高精度授时），已广泛应用于航空、航海、地质勘探、天气预报、通信等领域。

主要组成：GNSS由多个卫星系统组成，常见的有：

- GPS（美国）：目前最广泛使用的卫星导航系统。
- GLONASS（俄罗斯）：俄罗斯的全球卫星导航系统。
- Galileo（欧洲）：欧洲发射的全球导航系统，计划与GPS兼容。
- 北斗（中国）：中国的全球卫星导航系统，近几年也开始在全球范围提供服务。



1.2 GNSS授时技术原理



GNSS授时技术的核心是利用卫星携带的原子钟和接收机的时钟之间的时间差来计算精准的时间。



1.2 GNSS授时技术原理

卫星原子钟

GNSS卫星上搭载了非常精准的原子钟，常见的有铯原子钟和氢原子钟。这些原子钟利用原子跃迁频率的稳定性来提供极高精度的时间信号。卫星的时钟误差通常在 10^{-14} 秒量级，这为GNSS提供了高精度授时的基础。

信号传输

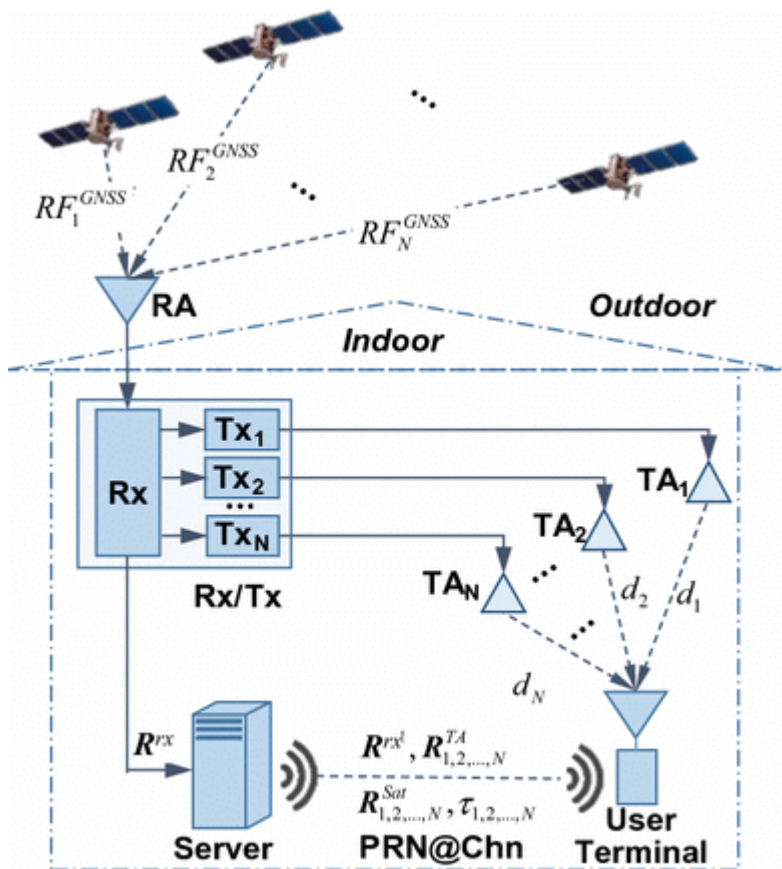
GNSS卫星通过广播电磁波信号，携带着卫星的时钟信息。这些信号以光速传播，因此信号从卫星传输到地面的时间差是计算定位和授时的关键。接收机通过接收至少4颗卫星的信号来计算传播时间差，并通过测量不同卫星信号到达接收机的时间差，推算出当前位置的时间信息。

时间同步

接收机的时钟通常不如卫星的原子钟精确。为了进行精确授时，接收机需要从多个卫星信号中提取时间信息，利用时间差法同步本地时钟。接收机通过接收至少4颗卫星的信号，计算出每颗卫星的传播时间，并将这些时间信号与接收机的时钟进行比较，从而获得精确的授时信息。



1.3授时精度的关键因素



1.精密的原子钟

GNSS卫星上的原子钟（如铯钟、氢钟）具有极高的时间稳定性，能够提供误差在纳秒级别的时间信号。卫星时钟的稳定性是高精度授时的核心基础。

2.时间同步与时间差法

接收机通过接收来自多颗卫星的时间戳信号，利用时间差法（Time of Arrival）推算本地时间，并校正接收机的时钟误差。使用多个卫星可以极大地降低单一卫星的时钟偏差对授时精度的影响。

3.地面基准站和差分技术

差分GNSS（DGPS）利用地面基准站提供的校正数据，可以进一步提高授时精度，尤其是在电离层和对流层变化剧烈的区域。

4.高精度算法与误差建模

GNSS系统采用精密的轨道计算和误差建模（如对流层延迟模型、电离层延迟模型）来减少时间误差。此外，利用接收机内置的滤波算法进一步优化时间信号。



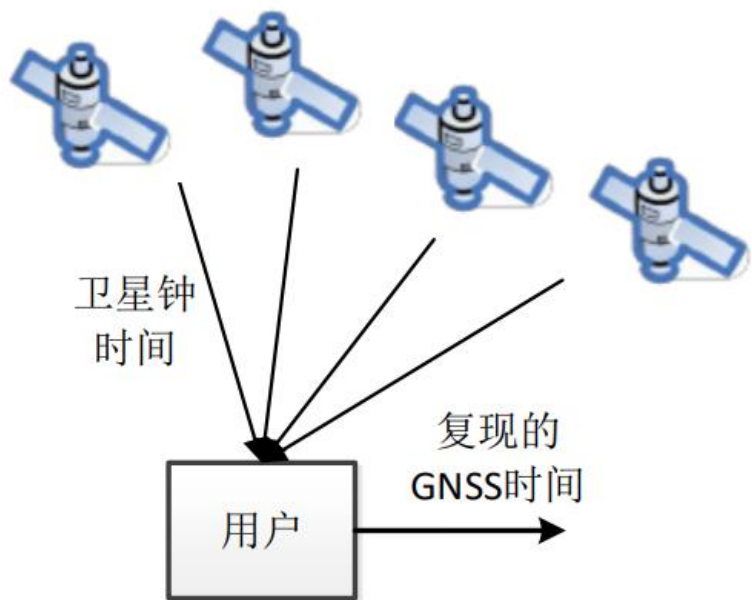
中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

GNSS授时与时间传递技术

GNSS Timing and Time Transfer Technology



2.1 GNSS单向授时



使用简单、成本低

01

用户容量不受限

02

精度不高

03

GNSS接收机在完成定位的同时会估计出接收机本地时间相对于GNSS卫星的钟差，当接收机天线坐标事先解算过的情况下，只需要一颗星就可以进行接收机钟差解算。接收机根据估计出的接收机钟差修正本地时间，然后输出秒脉冲和时刻信息，从而达到将卫星导航系统时间传递到用户端的目的，其复现的卫星导航系统时间是所有可见卫星上卫星钟时间的加权平均。



2.3 基于共视原理的卫星授时

(a) 将国家授时中心守时实验室设立为共视主站,在主站接收GNSS导航信号,测量国家标准时间与GNSS系统时间的时差,将时差数据进行分析 and 建模,得到时差模型后由通信链路广播;

(b) 通信链路可采用Internet网络、GPRS和通信卫星,将时差模型实时向覆盖区的用户广播;

(c) 用户观测GNSS卫星,测量其本地时间与GNSS系统时间的时差;同时接收主站广播的时差模型数据,经外推获得用户观测时刻的国家标准时间与GNSS系统时间的时差。将两个时差值相减就获得用户本地时间与国家标准时间的差,完成授时。

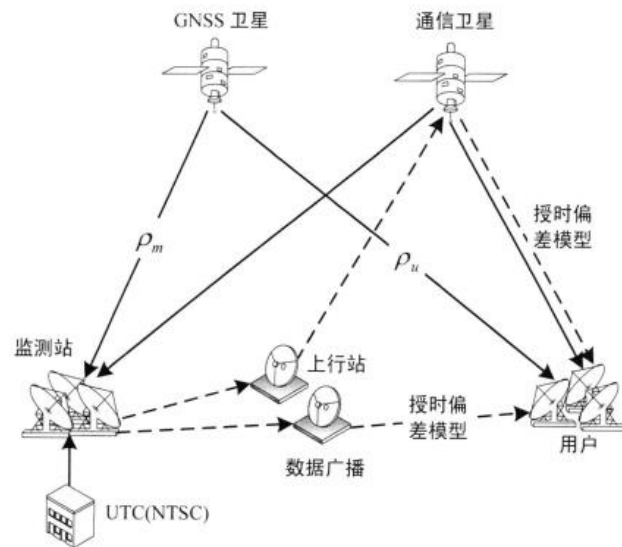


图 2.1 基于共视原理的单向授时方法原理示意图

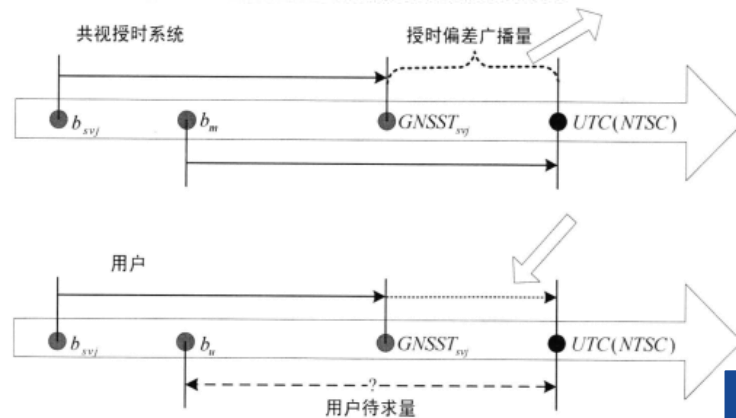


图 2.2 共视授时新方法的时序修正关系

2.2基于共视原理的卫星授时

共视时间对比原理:

利用空间原子钟S作为参考源,实现两地面站间的高精度共视时间比对。A, B两站分别观测本地时间与空间原子钟的钟差,通过数据交互网络交换测量数据,求差后可以得到A, B两站的时间偏差为 $\Delta T_{AB}=T_A-T_B$,所求结果包含两站的传输链路时延测量误差。

$$\Delta T_{AS} = P_A - \left(\frac{\rho_{SA}}{c} + \tau_{SA}^{ion} + \tau_{SA}^{tro} + \tau_{SS}^{rel} + \tau_{SA}^{glav} + \tau_{SS}^{hdlay} + \tau_{RA}^{hdlay} \right)$$

$$\Delta T_{BS} = P_B - \left(\frac{\rho_{SB}}{c} + \tau_{SB}^{ion} + \tau_{SB}^{tro} + \tau_{SS}^{rel} + \tau_{SA}^{glav} + \tau_{SS}^{hdlay} + \tau_{RB}^{hdlay} \right)$$

$$\Delta T_{AB} = (P_A - P_B) - \left(\frac{\rho_{SA} - \rho_{SB}}{c} \right) - (\tau_{SA}^{ion} - \tau_{SB}^{ion}) - (\tau_{SA}^{tro} - \tau_{SB}^{tro}) - (\tau_{SA}^{glav} - \tau_{SB}^{glav}) - (\tau_{RA}^{hdlay} - \tau_{RB}^{hdlay})$$

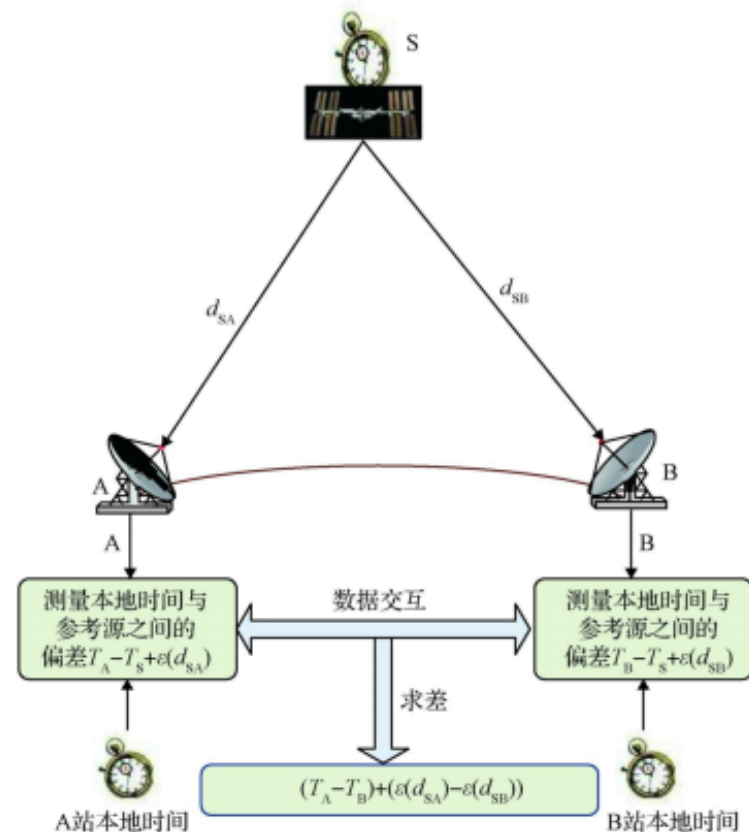


图1 共视时间对比基本原理

Fig. 1 Principle of common-view time comparison



2.4基于GNSSPPP技术的时间传递方法

PPP单向授时及时间传递原理

GNSS PPP单向授时使用载波相位和伪距观测值，结合国际GNSS服务组织（International GNSS Service, IGS）提供的高精度卫星轨道和钟差等产品，由用户通过PPP方式解算出本地接收机钟差。由于IGS钟差文件对应的是IGS时间基准IGST，因此通过改正本地接收机钟差，即可使得本地时间与IGST同步。

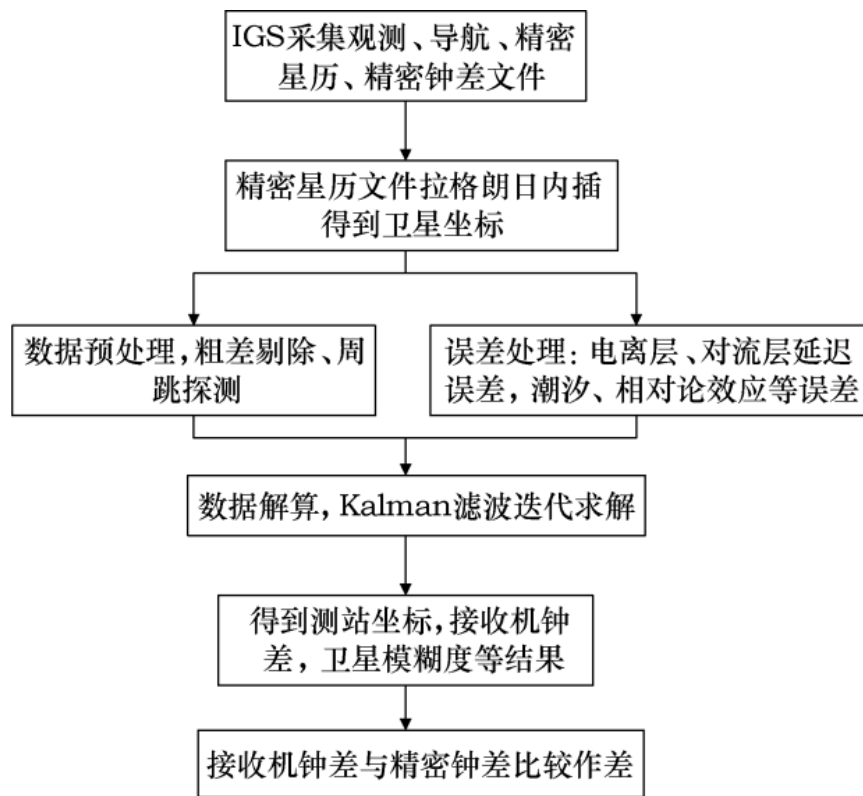


图1 PPP模型及授时流程图



2.4基于GNSSPPP技术的时间传递方法

IF-PPP (ionosphere-freePPP) , 无电离层组合PPP模型

$$\begin{cases} P_{IF} = \rho_s^r + t_r + \alpha_r^s \cdot T_r^s + b_{r,IF}^s + \varepsilon_{IF,P} \\ \phi_{IF} = \rho_s^r + t_r + \alpha_r^s \cdot T_r^s + \lambda_{IF} \cdot N_{IF} + \varepsilon_{IF,\phi} \end{cases}$$

UCUD-PPP (undifferencedanduncombinedPPP, UDUC-PPP) , 非
差非组合PPP模型

$$\begin{cases} P_{r,f}^s = \rho_r^s + t_r + \alpha_r^s \cdot T_r^s + \beta_f \cdot I_z + b_{r,f}^s + \varepsilon_P \\ \phi_{r,f}^s = \rho_r^s + t_r + \alpha_r^s \cdot T_r^s - \beta_f \cdot I_z + \lambda_{IF} \cdot N_{r,f}^s + \varepsilon_\phi \end{cases}$$



2.4基于GNSSPPP技术的时间传递方法

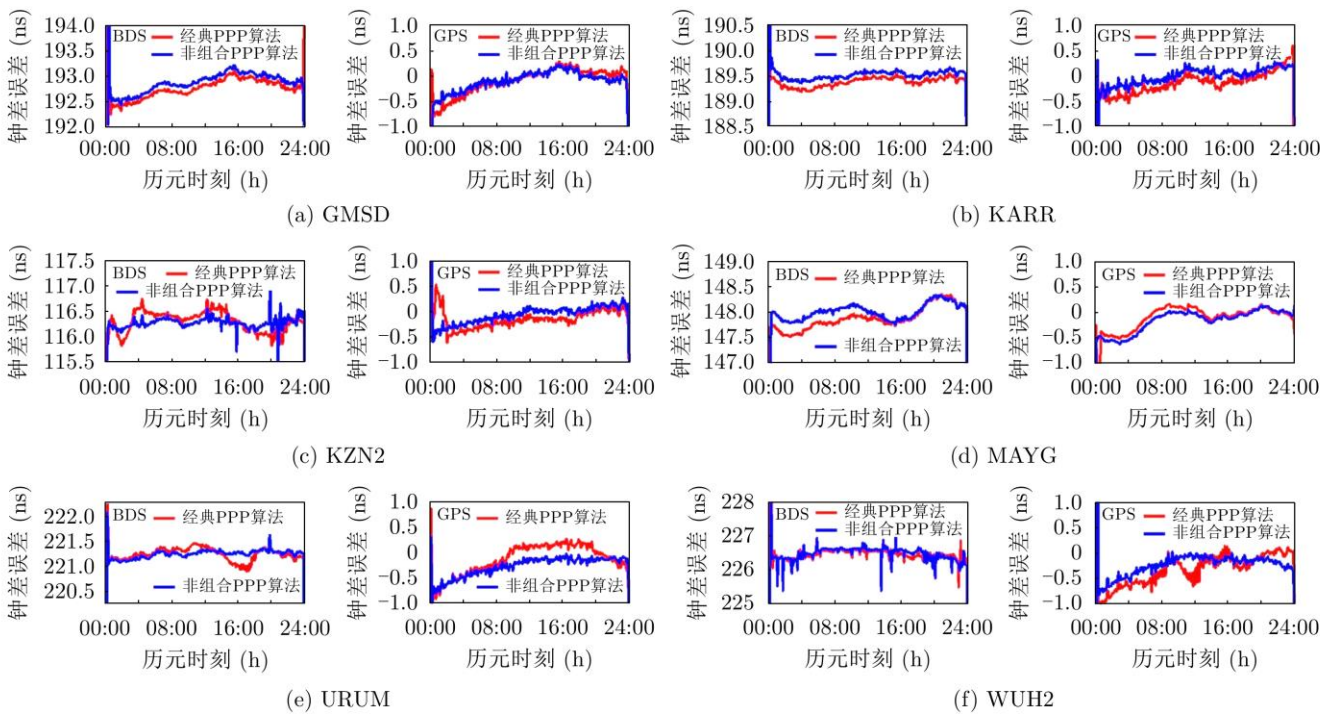


图1 BDS/GPS中经典PPP、非组合PPP模型解算的钟差误差

表 5 GPS静态PPP钟差误差的RMS值(ns)

监测站	GPS	
	消电离层组合PPP	非组合PPP
GMSD	0.257	0.187
KARR	0.245	0.147
KZN2	0.231	0.161
MAYG	0.323	0.258
URUM	0.186	0.222
WUH2	0.278	0.187

表 6 BDS/GPS静态PPP钟差解误差的STD(ns)

监测站	BDS		GPS	
	消电离层组合	非组合	消电离层组合	非组合
GMSD	0.181	0.183	0.246	0.174
KARR	0.089	0.070	0.197	0.147
KZN2	0.203	0.131	0.167	0.150
MAYG	0.217	0.150	0.318	0.171
URUM	0.124	0.075	0.198	0.112
WUH2	0.103	0.148	0.205	0.103



2.5基于通信卫星的双向时间对比技术

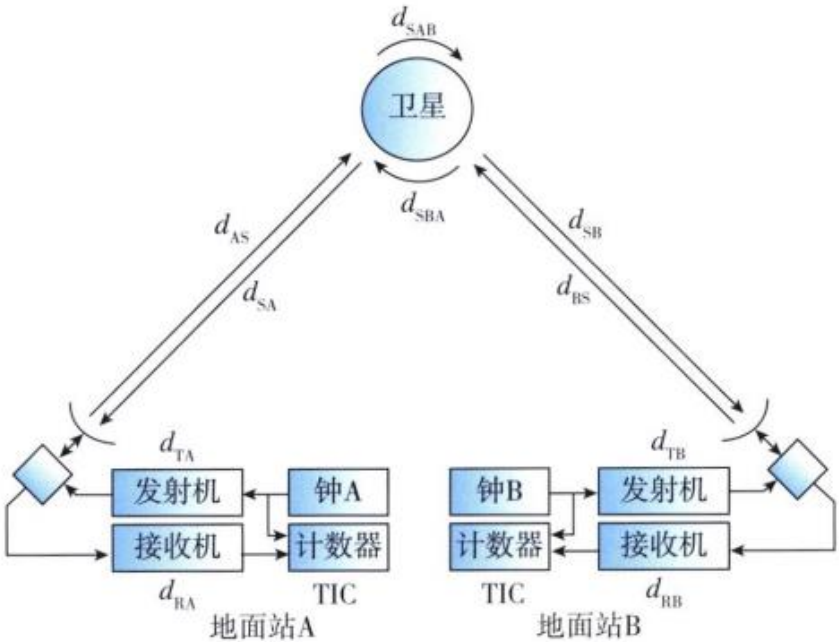


图 3 TWSTFT 原理图
Fig. 3 Schematic of TWSTFT

$$TIC(A) = A - B + d_{TB} + d_{BS} + d_{SBA} + d_{SA} + d_{RA} + S_B$$
$$TIC(B) = B - A + d_{TA} + d_{AS} + d_{SAB} + d_{SB} + d_{RB} + S_A$$

A-B=[TIC(A)-TIC(B)]/2	计数器读数
$+(d_{TA}-d_{RA})/2-(d_{TB}-d_{RB})/2$	地面站设备延时部分
$+(d_{AS}-d_{SA})/2-(d_{BS}-d_{SB})/2$	空间传播时延
$+(d_{SAB}-d_{SBA})/2$	卫星时延
$-2\omega Ar/2$	Sagnac效应 ($-2\omega Ar/2$ 相当于 $-S_A$ 或 $+S_B$)

注：这里TIC(A)和TIC(B)是时间间隔计数器的读数；A和B是两站各自的钟面时间； d_{xx} 是各自的传播时延； S_A 和 S_B 是Sagnac效应改正。



2.6 北斗不同服务体制下的授时模型——RDSS

RDSS授时服务采用四程测距模式，由地主控站（MCC）完成用户所需的授时信息计算，主要包括RDSS单向授时和RDSS双向授时两种方式，二者的差别主要在于从MCC到用户传播时延的获取方式不同。

RDSS单向授时模型

RDSS双向授时模型

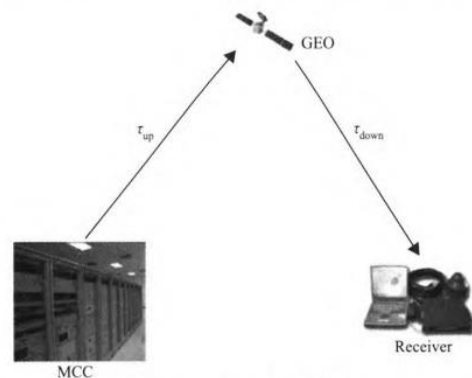


图 1 RDSS 单向授时原理图

Fig. 1 RDSS One-way Timing Principle

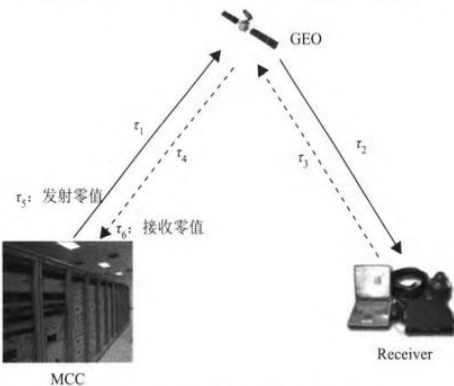


图 2 RDSS 双向授时原理图

Fig. 2 RDSS Two-way Timing Principle



2.6 北斗不同服务体制下的授时模型——RNSS

RNSS授时服务主要由用户根据伪距测量值和导航电文信息完成钟差计算，主要包括RNSS单频授时和双频授时两种方式，二者的差别在于双频授时可消去电离层误差的影响

RNSS单频授时模型

RNSS双频授时模型

$$\Delta T = (\rho^i - \rho) / c + \Delta t_{sv} - \tau^R - (\tau^{tro} + k_i \times \tau_i^{ion} + \tau^{pha} + \tau^{rel} + \tau^{sag} + \tau^{mul} + \tau^{tgd}) + \varepsilon$$

$$\Delta T = (PR - \rho) / c + \Delta t_{sv} - \tau^R - (\tau^{tro} + \tau^{pha} + \tau^{rel} + \tau^{sag} + \tau^{mul} + \tau^{tgd}) + \varepsilon$$

ρ^i 为RNSS用户机基于Bi频点观测的伪距观测量， ρ 为卫星至RNSS定时用户机的空间几何距离， c 为光速， Δt_{sv} 为卫星钟差参数解算的时延， τ^R 为RNSS用户机时延， τ^{tro} 为对流层传播时延， τ^{ion} 为Bi电离层传播时延， k_i 表示比例因子， τ^{pha} 为RNSS用户机天线相位中心改正时延， τ^{sag} 为地球自转修正时延， τ^{rel} 为相对论改正时延， τ^{mul} 为多路径效应引起的时延偏差， ε_i 为Bi频率的观测噪声， τ^{tgd} 为卫星通道Bi频率时延偏差。

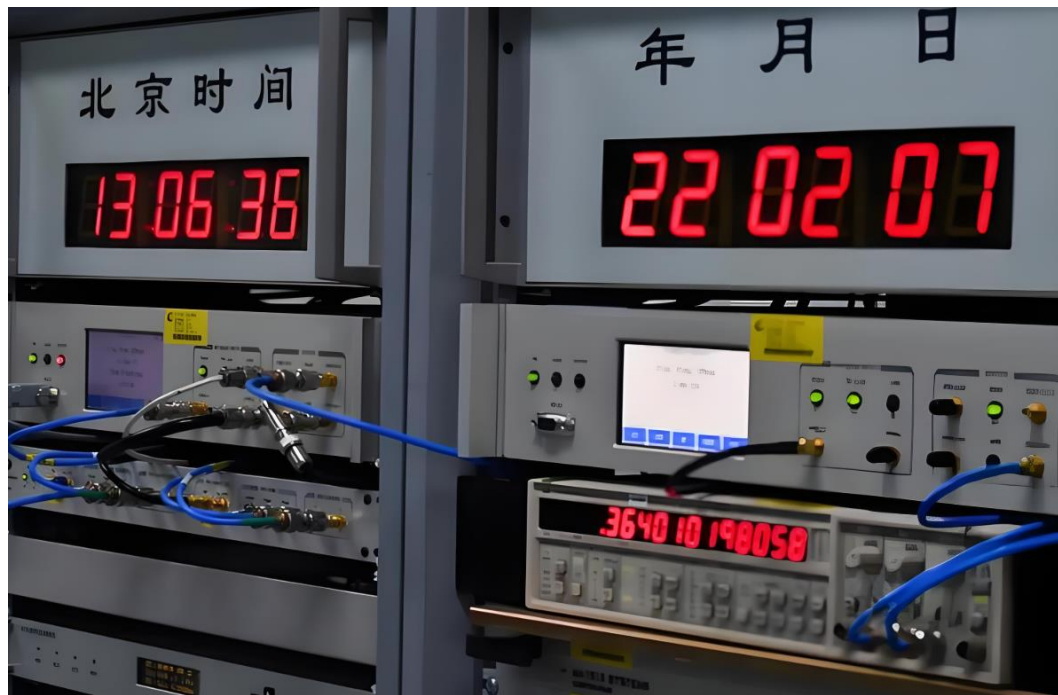
PR为Bi频点、Bj频点双频用户机采用双频消电离层组合修正的伪距观测量； τ^{tgd} 为双频群延迟修正时延。

GNSS授时技术应用场景

Background and Significance



3.1电力系统时间同步



提供标准时间源

提供准确时间

精确时间测量

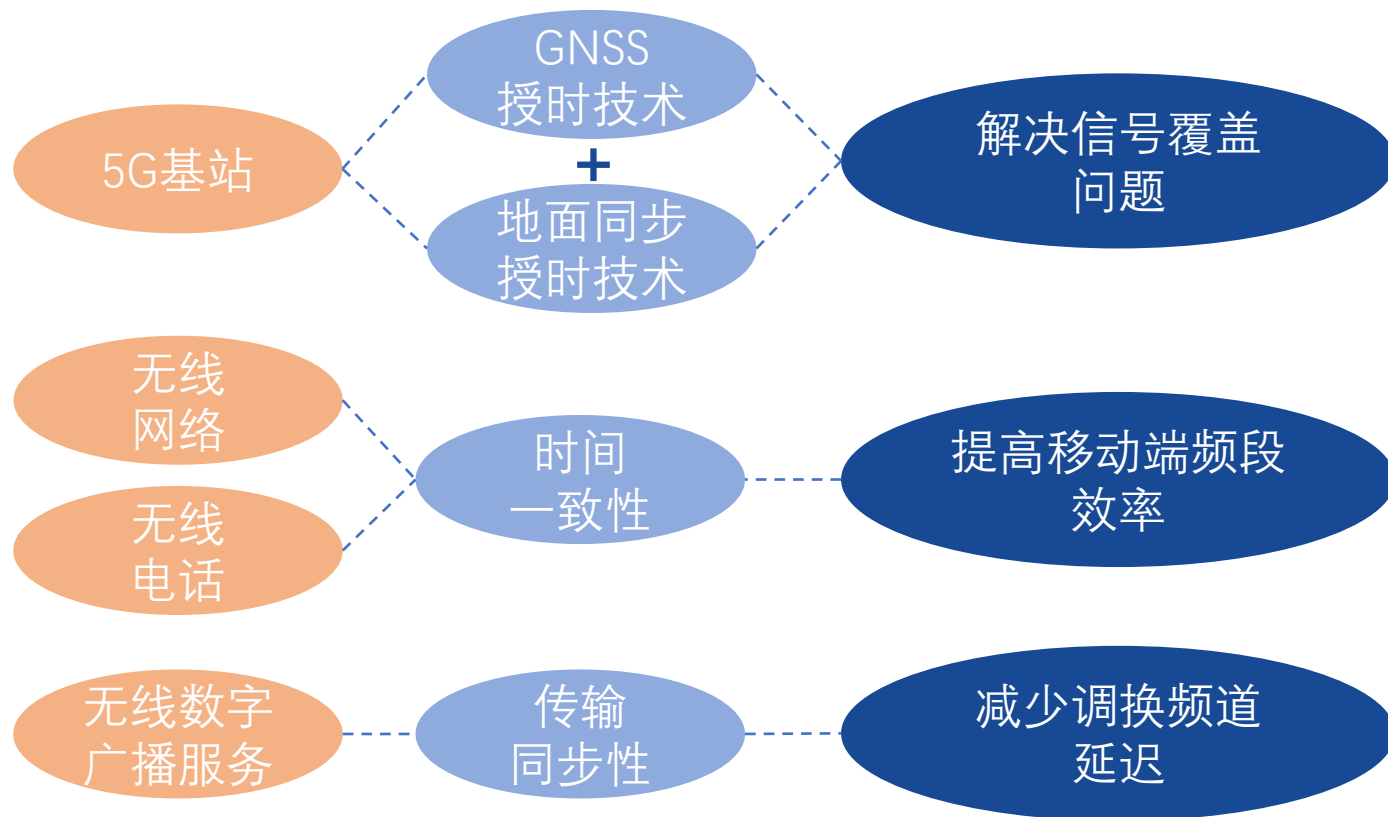
各级电力调度
机构

发电厂

变电站

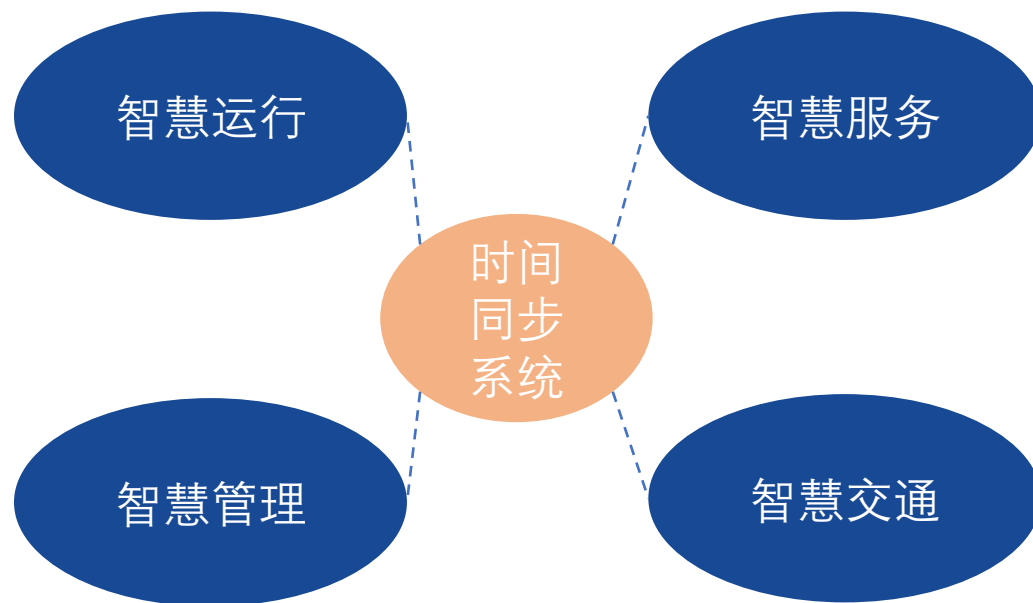


3.2 通信基站时间同步





3.3 交通调度时间同步





3.4服务器时间同步



互联网
服务器
系统

金融系统

公安系统

监控系统

收费系统

.....



3.5 高精度授时代价



高精度授时技术需要精密的设备和技术支持，这涉及到较大的初期投资成本。



GNSS授时技术需要处理卫星和大气误差，这些误差取决于卫星和信号从卫星传播到用户时所采取的路径，因此根据接收器的位置而有所不同。

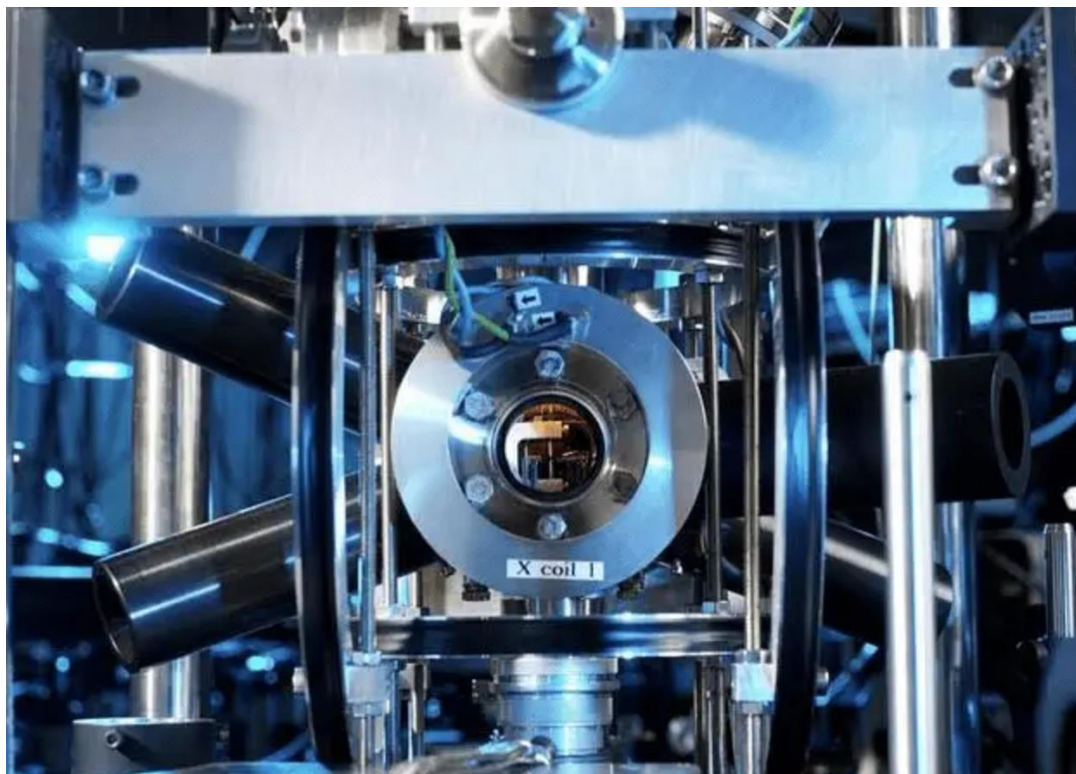


高精度授时设备通常成本较高，且需要定期维护和校准以保持其性能，这涉及到持续的运营成本。



高精度原子钟

High-precision atomic clocks



（原子钟模型图）

原子钟是一种利用原子内部电子能级跃迁频率来测量时间的高精度计时设备。其工作原理基于量子力学中的电子跃迁现象，即当原子的电子从一个能级跃迁到另一个能级时，会吸收或释放特定频率的电磁辐射。这种频率非常稳定，因此可以用来作为时间的标准。

高精度原子钟是现代科技领域的一项重要突破，其基于原子或分子的振荡频率来测量时间，具有极高的精度和稳定性。这种时钟通过测量特定原子或分子跃迁时所释放或吸收的电磁波频率来确定时间，从而实现时间的精确计算



原子钟的发展历程

1949年，美国物理学家发明了首台铯原子钟，但其稳定性存在一些限制；1952年，NBS宣布了第一个使用铯原子作为振动源的原子钟，1955年研制出第一台可靠的铯原子束钟。

基于铯原子的振动，秒被重新定义，1971年，铯原子钟环球飞行实验首次证实了狭义相对论。

随着新技术的发展，新型原子钟技术发展迅速，包括冷原子钟和光钟，它们的稳定度和准确度从 10^{-15} 提高到 10^{-18} 量级

磁共振技术的发展

原子钟的诞生

氢原子钟的发展

精确度提升

光学原子钟的突破

新型原子钟的发展

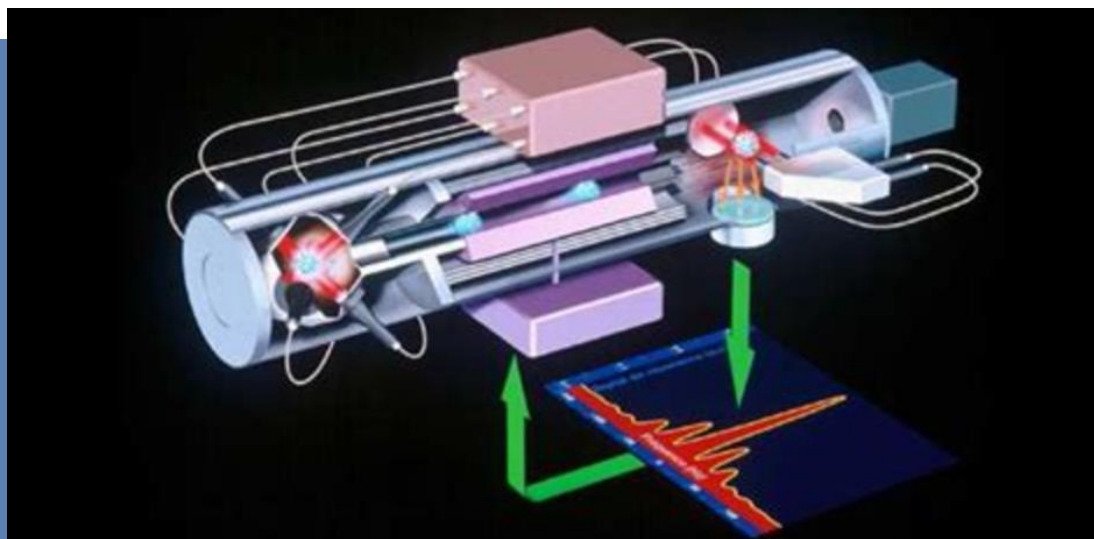
20世纪30年代，哥伦比亚大学研究原子和原子核的基本特性，并发展出了磁共振技术，后来成为制作原子钟的核心技术

1955年，美国物理学家理查兹提出了利用氢原子的自旋磁场效应制作原子钟的想法，这种氢原子钟具有极高的稳定性和精度

研制出了新型的以高频不可见光波和非微波辐射为基础的原子钟，被称为“全光学原子钟”之后发表了铯-87原子“光晶格钟”的研究成果



原子钟的工作过程



原子钟通过利用特定原子的电子能级跃迁来计量时间。首先，原子源提供稳定的原子流（如铯-133原子），这些原子被引导到微波腔，在接近其跃迁频率的微波辐射作用下发生跃迁。

探测器实时监测跃迁的发生情况，如果微波频率与原子跃迁频率不匹配，反馈系统会调整微波源的频率，直到两者完全一致。

最终，经过匹配的微波振荡被用作时间基准，生成精确的时间信号并输出，用于同步通信、导航等系统。整个过程在真空环境和稳定温控下进行，确保极高的精度和稳定性。



原子钟的组成

01

原子源

原子源是原子钟的核心组件，用于提供特定元素的原子（如铯、铷或氢）作为时间计量的基准。

02

微波腔/激光腔

微波腔或激光腔是一个封闭的谐振腔，用于产生和维持电磁波（通常是微波或光波）。原子在通过腔体时会与电磁波相互作用，如果频率匹配，原子会吸收能量并跃迁到高能态。

03

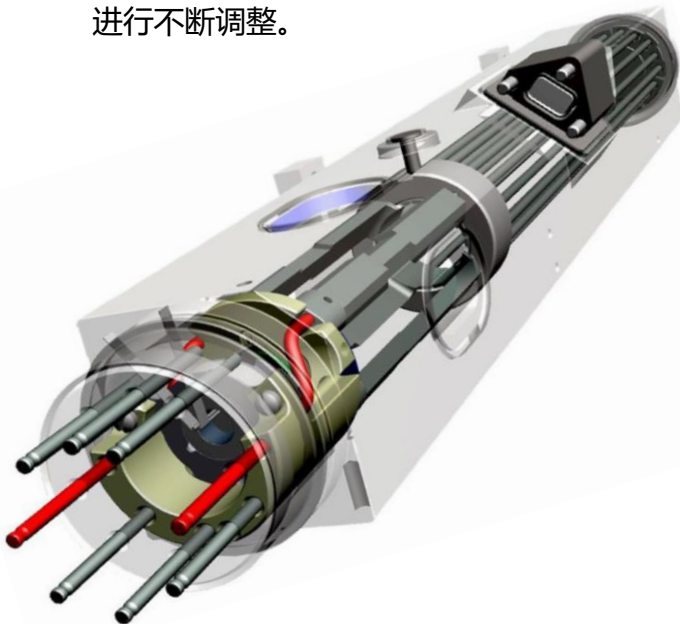
探测器

探测器的作用是监测原子跃迁是否发生，并将结果转化为电信号。这个部件是原子钟反馈机制的关键，因为它提供了振荡器频率调整的依据。

04

微波源（振荡器）

微波源是一个高精度的频率生成器，通常以石英振荡器为基础，用于产生接近原子跃迁频率的电磁波。由于振荡器本身并非完全精确，其输出频率需要通过反馈回路进行不断调整。



05

反馈回路

反馈回路是一个闭环系统，用于调整微波源的频率，使其与原子跃迁频率完全匹配。探测器捕捉到的信号被送入反馈回路，回路会分析微波频率与跃迁频率之间的偏差。

06

控制系统

控制系统负责管理和协调原子钟内所有部件的运行，包括原子源、微波腔、探测器和反馈回路等。控制系统通过计算机或嵌入式系统对各部分进行实时监控，并执行必要的调整。

07

腔体/真空室

原子源和微波腔通常被封装在一个真空腔体内，减少了原子与气体分子之间的碰撞，从而降低了热噪声对跃迁频率的影响。防止外界电磁干扰进入设备内部，保持信号的纯净性。

08

温控系统

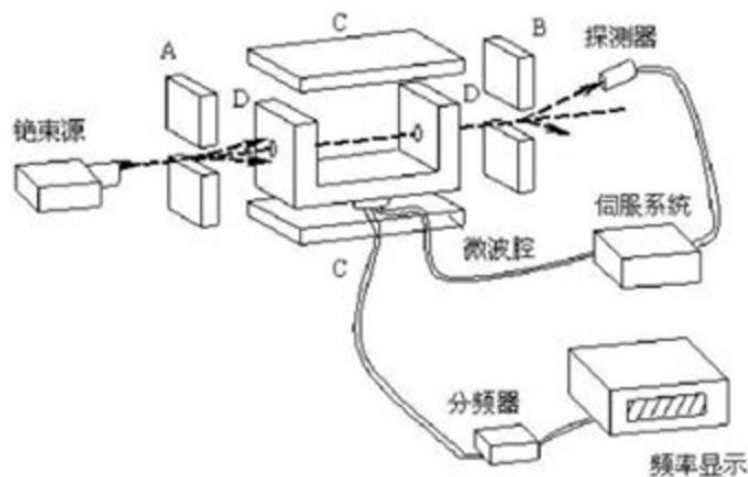
温控系统通过恒温装置（如加热器或冷却器）维持设备在理想的工作温度范围内。

04



不同的原子钟类型

铯原子钟装置



原子钟的核心原理是通过测量原子的辐射频率，将其转换为时间单位。

铯原子钟：

铯原子钟，也被称为“喷泉钟”，以其高精度的时间测量而闻名。通过测量铯-133原子在微波场中超精细能级之间的跃迁频率来确定时间基准。跃迁频率极为稳定精确到9,192,631,770赫兹，被用来定义国际单位制中的秒。

铷原子钟：

铷原子钟利用铷原子的基态超精细结构跃迁作为时间基准。在微波场中，铷原子的能级变化产生周期信号，通过测量这些信号，铷原子钟实现高精度时间测量。与铯原子钟相比，铷原子钟因其较大的原子团簇而具有更高的频率稳定性和精度。

氢原子钟：

氢原子钟通过氢原子的超精细能级跃迁频率来计时。它们利用微波场与氢气相互作用产生振荡，以实现高精度的时间测量，精度可达到50亿分之一秒。



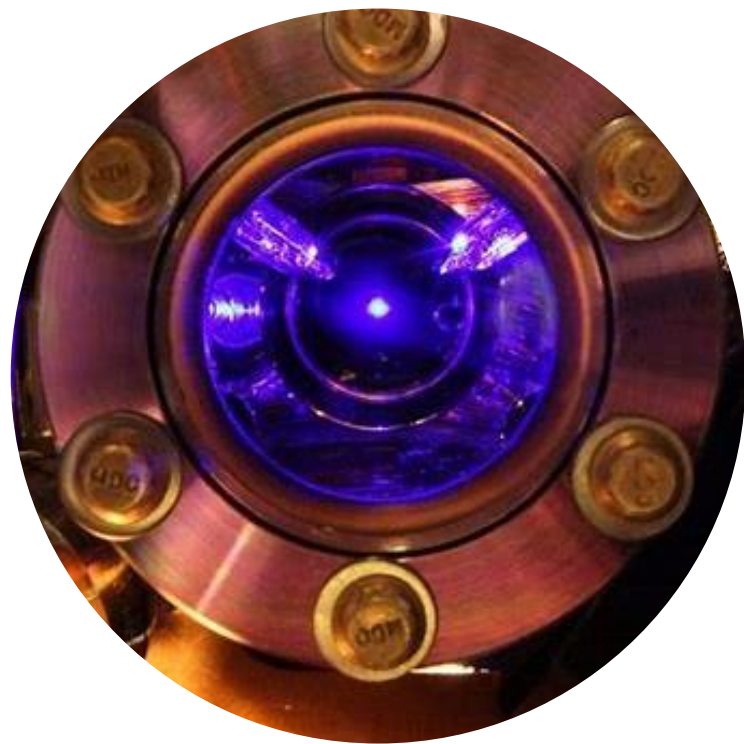
原子钟的发展领域

通信领域：在5G和未来6G通信技术的部署中，对于时间同步的要求将更加严格，新型原子钟可以为通信系统提供更稳定的时间信号，提高通信系统的可靠性和稳定性。

深空探测与航天：可以为卫星导航系统提供更精确的时间基准，提高导航精度和可靠性，从而支持更复杂的太空任务。

科学研究：在粒子物理学中，原子钟可以用来测量粒子的衰变率，帮助科学家了解基本粒子的性质。此外，原子钟还可以用于核磁共振实验，以研究原子核的结构和功能。随着原子钟精度的提升，它们将在引力波探测、暗物质探测等领域发挥重要作用。

量子计算与量子通信：随着量子技术的发展，新一代原子钟将利用更先进的量子力学原理，进一步提高时间测量的精度。例如，光学晶格原子钟和离子阱原子钟等新型原子钟有望实现比现有技术更高的精度，并与量子计算和量子通信技术相结合。





原子钟在卫星导航系统中的具体应用和优势

高精度时间基准：
作为卫星导航系统的核心部件之一，提供高稳定的时间频率基准信号，从而确保了导航系统的时间基准的准确性

01

提高定位精度：
由于原子钟的高精度计时能力，卫星导航系统能够更准确地测量位置与卫星之间的信号传播时间，进而计算出确切位置。

02

增强系统可靠性：
原子钟的高稳定性和精度使得卫星导航系统在各种复杂环境下仍能保持高效运行。

03

自主研发能力的提升：面对欧美技术封锁的情况下，自主研发成功突破了微波腔和铷光谱灯等核心部件的技术难题，达到国际领先水平。

04



技术挑战

提高稳定性和精度:

需要解决相位噪声、温度变化、压力变化等问题，并应用新材料和技术。

微缩化与低功耗设计:

实现小型化和低功耗设计是一个技术挑战，因为这需要在保持高精度和稳定性的同时，减少设备的体积和能耗。



技术集成与标准化:

将高精度原子钟与其他技术集成并制定国际标准是一项复杂的工作，需要跨学科的合作和协调。

新材料和技术的应用:

解决现有的原子钟中存在的问题，如相位噪声、温度变化、压力变化等，需要新材料和技术的应用。



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

汇报结束感谢大家
敬请各位老师同学批评指正