

守时原子钟数据交互系统^①

王玉琢, 王伟波, 张爱敏

(中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 异地原子钟数据的比对与同步是原子时标准确性和稳定性的基础保障. 介绍了 GPS 共视法计算异地原子钟钟差数据的基本原理, 讨论了基于 FTP 文件传输协议实现异地原子钟数据交互方案的设计和实现.

关键词: 数据交互; FTP; GPS 共视法; 守时

Atomic Clocks' Data Exchange System for Time Keeping

WANG Yu-Zhuo, WANG Wei-Bo, ZHANG Ai-Min

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The comparisons and synchronizations of remote atomic clocks' data are vitally significant for accuracy and stability of atomic time scale. This paper introduces GPS common-view method for calculating the time difference between remote atomic clocks. The design and implementation of remote atomic clocks' data exchange system by file transfer protocol is detailedly discussed.

Key words: data exchange; FTP; GPS common-view method; time keeping

1 引言

原子钟的诞生标志人类对时间的测量技术达到了前所未有的高度. 1967 年国际计量大会重新定义了秒长为位于海平面上的铯原子钟内铯原子(Cs 133)基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁辐射震荡 9192631770 个周期所持续的时间, 至此人类进入了原子时时代^[1]. 现今, 精准时间计量已经成为国民经济的基础, 它在电力、通信、导航以及自动控制等诸多领域扮演者重要角色, 在国防建设中更是不可或缺. 世界标准时间(又称协调世界时 UTC)由分布在全球 70 多个实验室近 500 台原子钟经过加权平均产生^[2,3], 而 GPS 共视法正是世界原子时合作的主要手段之一^[4]. 为了最小化实验室条件、自然灾害等对地方时标以及国际时标的影响, 异地钟组联合守时是最佳方案. 因此, 异地原子钟数据的比对与同步是产生地方时标和国际时标的基础. 本文结合中国计量科学研究院(NIM)守时实验条件和国际原子时合作需求, 阐述了 NIM 守时系统中异地钟差计算和原子钟数据文件交互的设计

与实现方案.

2 分析与设计

原子时标有三个重要特性: 准确性、稳定性、连续性^[5]. 这些特性决定了参与原子时计算的原子钟也要尽量保持相应的性能. 除原子钟自身性能外, 异地钟差数据的及时交互是维持原子时标性能的基础条件. 目前, 国际原子时合作快速 UTC(UTC_r)采用每天报数, 即地方原子钟数据(NIM)每天交互汇总一次, 指定时间段内传送到国际计量局(BIPM)原子钟数据接收端. 为了节约成本、减少干预, 及时、高效地参与国际原子时合作, 本系统采用全自动 24 小时连续运行, 自动定时进行异地钟差数据计算和数据交互工作. 此外, 在地方原子时的计算和比较分析中, 依据实际需求可采取适当的时间间隔和相应原则, 实现异地或远程数据交互.

2.1 时钟参考源

由于单一原子钟的真实数据(时刻读数)无法获知,

^① 基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ090943)

收稿时间: 2015-12-25; 收到修改稿时间: 2016-01-14 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005289]

参与计算原子时标的原子钟数据以钟差形式体现。而多个不同地域不同实验室条件下的原子钟数据进行比较分析时，需要首先将各原子钟数据归算到相同的时间参考源。为了保障数据的准确性和可靠性，通常将运行最稳定的原子钟作为参考。对于本地实验室而言，直接测量得到各个原子钟与本地参考源的钟差数据。而不同实验室(异地或远程)原子钟数据归算到统一参考源并不容易，GPS 共视法是目前最广泛采用的技术方法，它也是国际原子时合作的主要手段之一。GPS 共视法的主要原理是在同一颗 GPS 卫星视角内，任意两台原子钟可以通过同一时刻接收到的同一卫星信号进行时间频率的比对^[6]。考虑到单一卫星信号的时延和误差，共视法则采用多个卫星信号计算时差的平均值，以此方法提高时间频率比对精度。

NIM 守时系统分为两个实验室 A 和 B，每个实验室各有若干台氢钟和铯钟，共同参与地方原子时 UTC(NIM)和国际原子时 UTC 的计算。两实验室相距约 42 公里，其 GPS 共视原理如图 1 所示。设在某一时刻，实验室 A 的时钟参考源为 t_A ，实验室 B 的时钟参考源为 t_B ，此时可共视实验室 A 和 B 的 GPS 卫星的时刻为 t_{GPS} ，那么此时实验室 A 和 B 两地的时钟参考源差为 Δt_{A-B} ，如公式(1)和(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta t_{A-GPS} = t_A - t_{GPS} \\ \Delta t_{B-GPS} = t_B - t_{GPS} \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta t_{A-B} = \Delta t_{A-GPS} - \Delta t_{B-GPS} \quad (2)$$

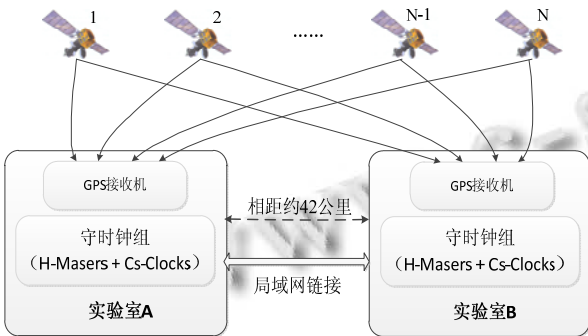


图 1 GPS 共视法时间同步原理

设在一天内不同时刻共有 N 台卫星，同时共视实验室 A 和 B，每次相同卫星依据公式(2)即可求出相应时刻两地时间差 Δt_{A-B} ，取 N 次平均值即为最终 A、B 两地时钟参考源时差。在实际的应用中由 GPS 接收机记录本地参考源与 GPS 卫星的时差，生成标准数据格式文件(GGTTS)。每个实验室中各个原子钟则通过实际信

号测量方式记录它与本实验室时钟参考源的钟差。通过这样的方式，实验室内部所有原子钟数据通过本地时钟参考源可直接对比分析，不同实验室则通过 GPS 共视法实现两地(实验室 A 和 B)时钟参考源对比分析，从而实现任意两台原子钟数据的比对分析。

2.2 数据交互流程

目前，国际原子时和各国地方原子时基本采用后处理的方法进行时标的比对分析，极少数具有高精度实时比对链路的实验室之间才能够实现时标的实时比对和校准。本文以 NIM 实验室 A 和 B 以及国际原子时合作为需求导向，建立一种适于后处理时标比对、校准和计算的原子钟数据交互系统。如前所述，GPS 共视法实现了任意两台钟钟差的比较和计算，但这一过程仅仅是实验室通过接收机采集本地参考源与 GPS 原子钟的钟差，并未进行任何实际的数据交互。而实际的原子钟数据信息的交互渠道是网络。如图 1 所示，实验室 A 和 B 通过高速局域网连接，与之相似 NIM 实验室与国际计量局 BIPM 以及其它实验室也是通过广域网络连接，即网络是原子钟数据交互的主要载体，如图 2 所示。

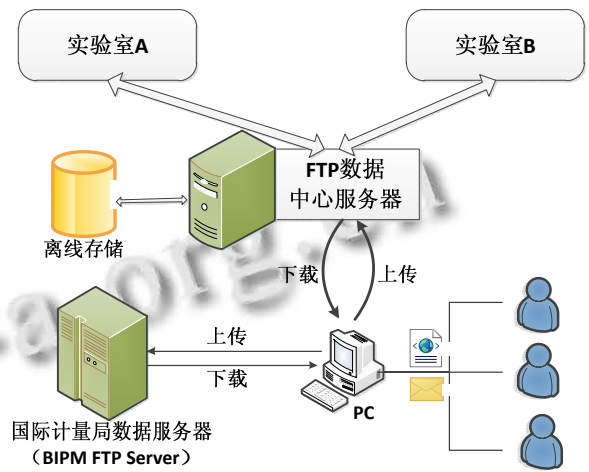


图 2 数据交互业务逻辑

NIM 原子钟数据交互系统设有 FTP 数据中心服务器，它是整个系统数据流转的中心站，负责管理、调度 NIM 所有原子钟数据资源。实验室 A 和 B 每日将通过 GPS 共视产生的本地原子钟数据，定时传送至 FTP 数据中心服务器。中心服务器依据系统运行的实际情况，定期对数据资源进行差异备份。用户端(普通用户、系统管理员、服务器管理员)通过 PC 端修改 XML 配置文件对数据交互任务进行适当的设置。PC 机是本系统

运行的主要载体,依据 XML 任务配置文件自动定时实现数据文件的上传下载以及异地原子钟数据归算等操作.当前,NIM 实验室采用数据每天汇总、定时计算(GPS 共视法),形成国际计量局 BIPM 要求的数据格式,自动定期上传,并以邮件方式向指定用户反馈数据上传结果.

3 系统实现方案

3.1 系统框架与开发

美国微软公司发布的 Microsoft Visual Studio(VS)开发工具是基于 Windows 进行系统开发的主流平台之一.它囊括了大量的工具包,对常用工具包进行了封装,可编译多种程序语言(如 VB, C, C++和 C#),适合多程序语言协作团队开发.本文采用 C#基于 .NET Framework 4.5.2 进行控制台应用程序开发,主要应用平台内置封装类有: System.IO.FileInfo; System.Net.FtpWebRequest; System.Xml.XmlDocument; System.Collections.Generic; System.Exception 等.

守时原子钟数据交互系统的设计秉承简单、快捷、稳定的开发理念,应用 .NET Framework 提供的基本封装类实现系统的主要功能,包括参考源转换计算、基于 FTP 的文件流转和系统工作日志及数据备份.而系统涉及的大量定时任务则采用 Windows 系统自身提供的计划任务实现,以降低系统开发成本,减少开发工作量.Windows 系统为用户提供了强大计划任务功能,本文以 Microsoft Windows XP Professional Service Pack 2 版本为例,通过控制面板调用任务计划,依据任务规则设置相应的任务属性,执行周期可选择按天、按周或按月等,具体执行时间可任意设计.由于北京处东八时区,本系统的执行周期和时间为每天上午 8 时,相当于 UTC 的 0 时.系统模块结构如图 3 所示.

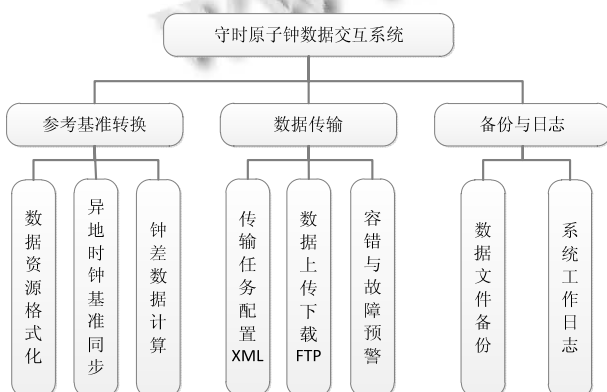


图 3 系统模块结构

1) 参考源转换:守时工作是一项常态工作,NIM 守时系统每天向 BIPM 报数.首要问题是依据 GPS 共视原理同步实验室 A 和 B 的参考源.位于实验室 A 和 B 的接收机,每天自动生产 GPS 标准数据文件(GGTTS)^[6].依据 GGTTS 文件格式,分别提取实验室 A 和 B 的时钟参考源,采用平均值法计算两者的参考源钟差.两地原子钟归并到相同参考源后,形成当日原子钟数据文件,文件名格式为 CDIM_XX.XXX,其中 XXXXX 表示当日儒略日(MJD).

2) 数据传输:国际原子时合作中采用文件传输方式,BIPM 建立的 FTP 数据文件服务器.NIM 将本地守时原子钟数据文件通过 FTP 文件传输协议上传至 BIPM 实现原子时合作.同样,NIM 实验室 A 和 B 与之相似,也是采用这种方式实现异地原子钟数据的同步.因此,文件传输是异地原子钟数据交互、参考源转换以及国际原子时合作的重要工具.为了满足本地传输任务和国际原子时合作任务的需求,系统中设计了 XML 传输任务配置文件以及相应的传输任务容错与故障预警机制.

3) 备份与日志:原子钟数据资源是国家时间频率体系的重要资源之一,原子时标的性能分析、算法研究、新技术新方法开发都将以历史数据资源为基础.系统采用定期离线差异备份,保证资源的完整性.系统日志者记录了从参考源转换到文件传输的所有工作流程,其目的是方便故障排查和资源管理.

3.2 核心模块的设计与实现

3.2.1 数据文件的产生

上报 BIPM 的数据文件 Data(NIM)由四个文件经 GPS 共视方法产生,Data(NIM)数据的参考源选为实验室 B 的参考源,因此主要对实验室 A 的数据进行处理.数据处理与合并的流程如图 4 所示,Time(A)和 Time(B)分别为实验室 A 和 B 的参考源,数据 Data(A)和 Data(B)为实验室 A 和 B 各自的原子钟数据集.合并数据过程设计的主要问题是文件载入、参考源钟差计算、数据存储格式、文件合并与生成.参考源 GGTTS 文件格式如图 5 所示,其参数的详解参见^[6].

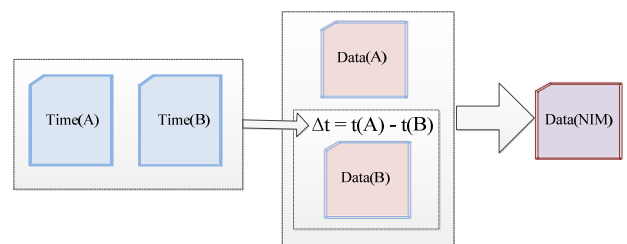


图 4 钟差数据文件产生的流程

```

GGTTS GPS/GLONASS DATA FORMAT VERSION = 02
REV DATE = 2015-09-30
RCVR = GTR50 1007011 1.6.6
CH = 2d
IMS = GTR50 1007011 1.6.6
LAB = NIM
X = -2154388.06 m
Y = +4373440.56 m
Z = +4098884.94 m
FRAME = ITRF
COMMENTS = Cal_Id=1001-2014
INT DLY = -32.0 ns (GPS P1), -19.8 ns (GPS P2)
CAB DLY = 248.7 ns
REF DLY = 122.2 ns
REF = UTC(NIM)
CKSUM = 56

```

PRN	L	MJD	STTIME	TRKL	ELW	AZTH	REFSV	SRSV	REFGPS	SRGPS	DSG	IOE	MOTR	SMOT	MDIO	SMDI	MSIO	SMSI	ISG	FR	HC	FRC	CK
			hhmmss	s	.ldg	.ldg	.lns	.lps/s	.lns	lps/s	.lns	.lns	lps/s	.lns	lps/s	.lns	lps/s	.lns	lps/s	lps/s	lps/s	lps/s	lps/s
2	F	57369	001400	780	418	2814	-5977599	-33	+13	-26	21	065	121	-12	93	+14	93	+14	17	0	0	L3P	14
6	F	57369	001400	780	709	3436	-1111426	-33	+43	+32	14	116	86	+0	57	-19	57	-19	11	0	0	L3P	E3
9	F	57369	001400	780	269	1119	-272970	-35	+36	+44	50	017	179	-28	137	-36	137	-36	39	0	0	L3P	40
12	F	57369	001400	780	335	3015	-3528272	-14	+12	+16	46	089	146	-12	83	-2	83	-2	35	0	0	L3P	F2
17	F	57369	001400	780	539	1210	+1963816	+18	+32	+8	20	032	100	+9	97	+15	97	+15	16	0	0	L3P	F3
19	F	57369	001400	780	247	1221	+5236736	-38	+9	-41	56	086	193	+44	145	+56	145	+56	43	0	0	L3P	43
23	F	57369	001400	780	231	713	+1493873	+85	-5	+65	65	049	205	-5	143	-40	143	-40	50	0	0	L3P	09
2	F	57369	003000	780	468	2882	-5977595	+8	+23	+15	21	065	111	-9	80	-20	80	-20	16	0	0	L3P	E4
5	F	57369	003000	780	188	2179	+1656345	-37	+6	-1	38	048	250	-87	146	-27	146	-27	30	0	0	L3P	22
6	F	57369	003000	780	703	60	-1111486	-64	+37	+0	16	009	86	+1	58	+0	58	+0	13	0	0	L3P	79
9	F	57369	003000	780	309	1046	-273043	-133	+47	-54	62	017	157	-18	114	+24	114	+24	48	0	0	L3P	28
12	F	57369	003000	780	357	2931	-3528296	-26	+14	+3	26	089	138	-5	89	-1	89	-1	21	0	0	L3P	E9
17	F	57369	003000	780	471	1279	+1963835	+2	+42	-7	31	032	111	+13	97	+12	97	+12	25	0	0	L3P	P0
19	F	57369	003000	780	189	1267	+5236718	+84	-13	+80	50	086	249	+76	193	-30	193	-30	37	0	0	L3P	5B
23	F	57369	003000	780	231	640	+1493906	-41	+8	-62	64	049	205	+5	125	+45	125	+45	50	0	0	L3P	00
2	F	57369	004600	780	518	2956	-5977594	-48	+30	-42	17	065	103	-7	74	+42	74	+42	15	0	0	L3P	16
5	F	57369	004600	780	255	2210	+1858291	-12	-13	+25	21	048	187	+48	141	+46	141	+46	16	0	0	L3P	2D
6	F	57369	004600	780	681	261	-1111561	-61	+24	+4	13	009	87	+2	71	-1	71	-1	12	0	0	L3P	89
9	F	57369	004600	780	342	965	-273149	-21	+17	+59	45	017	144	-11	122	-63	122	-63	33	0	0	L3P	10

图5 GGTTS文件示例

儒略日 (MJD)	NIM单位代码	氢钟编号和时差	铯钟编号和时差
57370	10048	1352769 0047720.1 1351235 0048594.0	1404835 0035861.9 1404878 0044962.7 1404871 0076071.2
57370	10048	1404832 0056710.5 1404879 0057785.0	1404880 0018569.6 1352256 0023251.6 1352483 -003852.0
57370	10048	1352643 -006743.7 1352744 -007363.3	1352767 -034645.8

图6 数据格式示例

本系统应用卫星编号 PRN, 跟踪卫星时刻 STTIME, 时差 REFSV 计算异地时差, 计算过程中采用每行读入 System.IO.StreamReader.ReadLine(), 将结果利用 String.Split 函数以空格进行拆分, 保存每行 PRN、STTIME 和 REFSV 三者的信息, 以动态数组 System.Collections.Generic.List 作为存储容器. 采用双重循环遍历实验室 A 和 B 的参考源数据, 计算两者参考源时差 Δt . 转换实验室 A 的原子钟数据 Data(A) 的参考源与 Data(B) 合并, 形成标准格式的数据文件. 钟差数据在系统计算过程中采用浮点双精度 System.Double 类型, 而最终数据采用 System. Double. T. oString("#0.0") 四舍五入法保留一位小数, 小数点前整数部分保留 7 位(含负号“-”, 不含正号“+”), 如不够 7 位高为补“0”, 少于 7 位舍去高数值. 系统生成的国际原子时合作的数据格式示例如图 6 所示, 包含了 7 台铯台原子钟和 6 台氢原子钟数据.

3.2.2 FTP 文件传输

FTP 文件传输协议已经被广泛应用于网络数据传输 [7-8], .NET Framework 提供了 FTP 封装类 System.Net.FtpWebRequest, 满足开发者对数据传输操作的基本需求. 为了进一步封装文件传输相关业务方法, 系统设计了 FTP 文件操作类 FTPCtrl, 其基本属性

包括服务器地址 ftpIP, 服务器远程路径 ftpRemotePath, 用户名 ftpUserName, 密码 ftpPassword. FTPCtrl 中实例化 System.Net.FtpWebRequest, 作为文件上传下载业务底层的主要操作对象, 具体操作方法请参考相关帮助文档. 为了满足不同时间段多数据文件交互的需求, 系统设计了传输任务文件配置, 允许多文件多目标路径同时传输. 在实际应用过程中限于网络以及相关设备硬件条件, 传输故障在所难免, 因此系统设计了异常处理模块, 负责系统传输以及相关业务处理中的所有异常情况.

1) 配置文件

系统采用 XML 做为传输任务配置文件, 在 C# 程序开发中可以通过 System.Xml.XmlDocument 非常方便地读取 XML 文件信息. 本系统的传输任务配置如图 7 所示, 任务配置结构包含三部分内容: 基本属性、FTP 属性和路径信息. 任务编号是每个传输任务在系统中的唯一编号, 用于系统日志记录任务的工作状态, 便于系统维护和故障排查. 操作类型目前有上传和下载两种. 数据类型的设计是为了区分业务规则, 如 UTCr 表示国际比对任务. 执行状态标识当前任务是否加入定时任务序列, ON 表示加入定时序列, OFF 表示不加入定时序列. FTP 信息记录登录的地址、用户和

密码. 路径信息中记录了本地、远程路径用于指定文件存取位置, 本地备用路径用于备份数据文件. 实验室之间原子钟数据的比对以及国际合作中, 一般可按月、周、日、时四个层次进行, 目前本系统以按日为主, 每天进行数据交互. 通常以儒略日(MJD)作为文件名的一部分, 因此路径信息中增加了文件名命名规则. 例如规则“(MJD, 0-1).(MJD,2-4)”, 当 MJD=57369 时, 目标文件为“前缀+57.369”. 备注记录该任务其它信息.

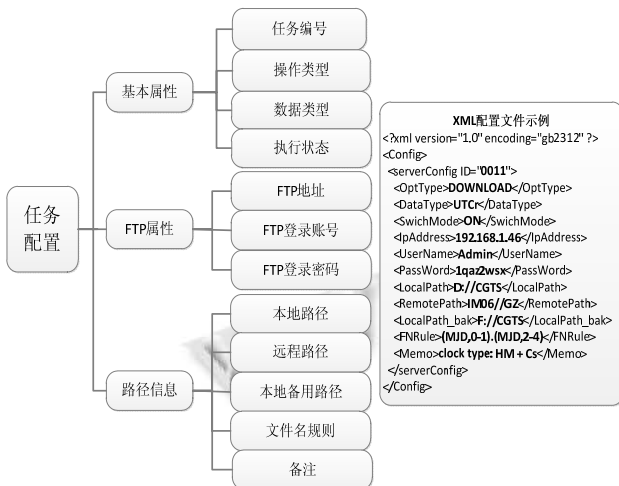


图 7 传输任务配置结构及示例

2) 流程控制

为保证比对的连续性和校准的准确性, 遇到传输故障需要及时解决, 因此异常处理和系统日志尤为重要. 系统任意模块遇到未知异常时, 均直接跳转到异常处理模块, 例如文件格式不正确、目标路径文件不存在、数值计算异常等情况. 异常处理模块记录当前报错的位置和系统抛出的错误, 并将相应的信息提交到系统日志, 便于系统维护和错误排查. 为此在系统主控程序中设计了 Insert_Standard_ErrorLog 类用于建立系统日志存储, 以无返回值的静态方法(static Insert)将报错位置和异常信息插入日志文件.

NIM 实验室 A 和 B 异地数据合并以及参与国际原子时合作的业务流程如图 8 所示. 系统载入传输任务 XML 配置文件, 依据传输任务类型执行任务. 一般而言, 首先, 执行下载任务, 下载实验室 A 和 B 的时钟参考源文件和原子钟数据文件, 进行参考源转换、合并数据、生成本地目标数据文件(实验室 A 和 B 的原子钟数据). 其次, 依据传输规则将生成的原子钟数据文件, 上传至 BIPM 数据服务器. 最后, 将下载、数据处

理、上传等操作过程中各环节相关信息记录在系统日志, 结束本次任务. 执行过程中如遇未知情况, 执行异常处理、记录系统日志、对于重要任务异常情况, 系统采用 System.Net.Mail.MailMessage 向管理员发送预警. 管理员利用移动终端(手机)智能邮件系统, 可及时收到异常情况, 做出相应的处理手段.

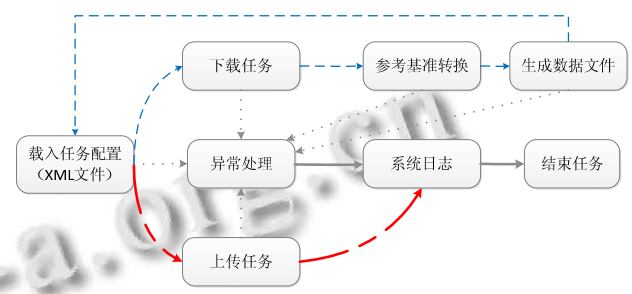


图 8 数据传输流程

4 结语

异地原子钟数据交互是高精准时间频率比对和校准的前提, 交互系统的稳定性和可靠性直接影响地方原子时性能. 本文结合 BIPM 制定的国际原子时合作数据文件格式, 采用 GPS 共视原理设计了异地原子钟数据的比对方案, 应用 FTP 文件传输技术实现了远程原子钟数据的交互. 系统采用了简单数据存储, 避免了复杂的控制流程, 降低了开发和维护成本. 但对原子钟数据资源的检索、再处理, 个性化比对等方面仍然存在不足.

参考文献

- 1 高源, 张爱敏, 李天初. 原子时标: 闰秒和取消闰秒. 物理, 2015, 6: 385-389.
- 2 Petit G, Arias F, Harmegnies A, Panfilo G, Tisserrand L. UTCr: a rapid realization of UTC. Metrologia, 2014, 51(1): 33-39.
- 3 Guinot B, Arias F. Atomic time-keeping from 1955 to the present. Institute of Physics Publishing, 2005, 42: S20-S30.
- 4 高小珣, 高源, 张越, 宁大愚, 王伟波. GPS 共视法远距离时间频率传递技术研究. 计量学报, 2008, 1: 80-83.
- 5 马凤鸣. 地方自由原子时的计算. 计量学报, 1984, 1: 28-35.
- 6 张越, 高小珣. GPS 共视法定时参数的研究. 计量学报, 2004, 2: 167-170.
- 7 赵洁. 同步 FTP 上载/下载程序的实现技术. 计算机系统应用, 2002, 11(6): 38-40.
- 8 许南山, 陈亮, 刘淑梅. 基于 FTP 的电视台素材流转系统. 计算机系统应用, 2012, 21(8): 19-22.