窄带物联网智能燃气表通信中的时钟同步方法设计

刘永成1

（1. 昆仑数智科技有限责任公司，北京，102206）

中图分类号：TP311.1

**摘  要：**在基于窄带物联网（Narrow Band Internet of Things，简称 NB-IoT）的智能燃气表表具和远端数据采集系统进行远程通信时，需要对通信两端进行系统时钟的同步，以达到表具采用采集系统时钟的目的。智能燃气表具中使用的 NB-IoT 模组虽具有厂商扩展的时间同步 AT 指令，但由于表具嵌入式系统、NB-IoT 模组型号以及通信运营商的差异性，往往无法进行时钟服务器的统一接入、配置以及后期的统一运营。本文基于通用服务器的 NTP 时钟同步思想，设计了一种基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，使得燃气企业能够以统一的应用层协议方式将来自不同厂商、使用不同物联网模组的表具按统一的方式通过 NB-IoT 网络实现网络时钟同步。通过实验验证，物联网智能燃气表与信息采集系统服务器之间的时钟同步精度可达到 5ms 。

**关键词：**时钟同步；NB-IoT；窄带物联网；NTP；智能燃气表

**Time synchronization design for smart gas meter communicating with server via NB-IoT network**

Liu Yongcheng1, Dai songlin1, Liu Shizhang1

(1. Kunlun Digital Technology Co. Ltd.，Beijing，102206)

**Abstract:**  Time synchronization should to be done when smart gas meter communicates with remote data collecting system via NB-IoT network. The time synchronization AT command of NB-IoT module extended by manufacture was a possible way to be used, but the difference among gas meters in aspect of embedded system, NB-IoT module type and access of internet service provider let the way be difficult. In fact there was no uniform time synchronization channel could be used in such situation. A simplified time synchronization method was designed according to NTP, which could be used in communication between embedded system and general X86 architecture system via NB-IoT with uniformed application layer protocol self-defined by gas suppliers. Time synchronization was implemented between smart gas meter and data collecting server, and experiments shew that the time synchronization accuracy of the system can meet 5ms.

**Keywords:** time synchronization, NB-IoT, narrow band internet of things, NTP, network time protocol, smart gas meter

# 0 引言

随着无线通信技术尤其是5G通信技术的快速发展，万物互联逐渐成为一种大的趋势，燃气领域中居民使用的传统基于插卡式 IC卡、线下缴费的燃气表也在逐步向基于物联网、线上缴费的智能燃气表转变[1, 2]。 智能燃气表是一种在燃气计量基表基础上新增了电子和通信模块的新型燃气表[3]，目前逐步在民用和工业领域得到大规模应用。具备远程控制功能的物联网智能燃气表，使燃气企业具备了在远端数据采集平台采集表端计量信息从而进行计费等业务的能力，并支持从远端采集平台下发控制指令，实现了远程控制燃气表以及远程获取数据的功能。

燃气企业信息系统中的远端采集平台（以下简称采集平台），一般采用通用的互联网服务架构，以请求响应的方式通过通信运营商的 NB-IoT（Narrow Band Internet of Things，窄带物联网技术）网络，实现与物联网智能燃气表的通信，以及进行相应的业务控制[4]，如图1所示。



**图 1 物联网智能燃气表通信模式**

时钟同步是一个大型系统中其他所有业务的基础[5, 6]，如图 1 所示，在采集平台和物联网智能燃气表进行通信和进行相应控制的过程中，需进行二者之间的时钟同步，建立二者通信的时钟基准。目前实现网络时钟同步的协议主要有 SNTP[7]（Simple Network Time Protocol，简单网络时间协议）以及 SNTP 的升级版 NTP[8]（Network Time Protocol，网络时间协议），还有IEEE 1588 Precision Clock Synchronization Protocol（ 即精密时间同步协议，简称 PTP 协议）[9, 10]， 以上协议都需要底层的 TCP/IP 协议栈的支持，基于 MCU 的简单嵌入式系统直接使用这些协议需要额外的硬件支持[11]。工业实践中，物联网智能燃气表一般采用自研的嵌入式软件系统[1, 12]，同时在硬件上也使用了有别于采集系统通用计算机的硬件时钟，考虑到成本、制造工艺等因素及系统复杂度也尽量不采用额外的硬件。因此，一般以数据采集系统通用服务器的时钟作为基准，对物联网智能燃气表的时钟系统进行校准。行业实践中，有作者通过采用额外的硬件[13]，通过 NTP 协议实现了表端嵌入式系统的时间同步，这种方法会对表具的制造生产产生额外的成本，同时也无法在现有的硬件基础上通过纯软件的方式实现升级，不利于系统改造。目前部分 NB-IoT 通信模组厂商提供了扩展的 AT 指令进行 NTP 时钟同步，然而由于表具嵌入式软件、模组以及通信运营商平台之间的差异性，以及网络环境安全管控等因素，燃气企业很难统一对不同的表具配置统一的 NTP 服务器。

# 1 时钟同步问题

当前民用燃气领域的现状是，燃气企业通过数据采集平台将其系统时钟下发至物联网燃气表，由物联网燃气表根据时间戳对表具端的时钟进行校正[14]。这种时钟校准方法的优点是软件实现相对简单，能够满足基本的通信时钟同步需求。其缺点是时钟校准精度为秒级，同时受 NB-IoT 网络的通信延迟影响较大，因民用燃气业务较为简单，对于一般的民用燃气业务，这种误差不会产生较大影响，但若涉及到阶梯计费[15]，则容易引起合同纠纷。

在工业控制领域，智能计量、数据分析等都需要更精确的时钟[12]，采用时间戳同步的简单时钟同步方法往往会对相应业务计算造成较大的误差，以如图 2 中的示例进行说明。



**图 2 物联网智能燃气表简单时钟同步**

采集系统在 时刻（此时物联网智能燃气表的时钟为 时刻）将系统时钟（时间戳 ）下发，当物联网智能燃气表收到时间戳 时，考虑到网络传输延迟，以及其他业务处理所消耗的时间，端到端的延迟时间计为，表具应在 时刻将其时钟设定为 ，然而 对于表具是不可见的，也无法计算得出，同时 受网络传输状况的影响较大，是一个随时间变化的数值。工程实践中，表具在 时刻收到时间戳 ，直接将时间修正为 ，导致引入一个不确定的误差 。同时，当物联网燃气表上的单调时钟快于采集系统单调时钟，即 时，一旦在时刻 将时间调整为 ，则可能会导致某些按照时间进行计算的逻辑出现“时间倒退”的现象，即当 ，引起第三者视角从时间维度看到的业务产生混乱。

同时，工业领域内的燃气系统瞬时流量较大，在较小的时间内其某些计量的数值也较大，一个较小的时间误差会导致较大的计算误差。在实际的工程中，端到端的延迟包含有线网络的延迟和通信运营商无线通信网络的延迟两部分。有线网络的延迟， 按照北京到乌鲁木齐的公路距离 2753.7 km 计算网络光纤的长度，有线网络传输的物理延迟时间 如公式（1）所示。

**公式（1）**

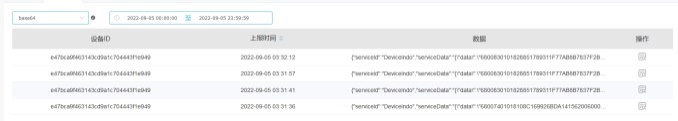
考虑到其他通信设备的延迟时间，单程延迟可达到约 ，实际测得的企业北京数据中心和克拉玛依数据中心有线网络延迟如图 3 所示，约为 33 ms。

*ip addr | grep 11  
inet 11.10.36.\*/26 brd 11.10.36.63 scope global ens160  
[~]$ ping 11.54.\*.\*  
PING 11.54.82.\* 56(84) bytes of data.  
64 bytes from \*.\*:icmp\_seq=1 ttl=51 time=65.7 ms  
64 bytes from \*.\*:icmp\_seq=2 ttl=51 time=65.7 ms*

**图 3 有线网络延迟测量**

通信运营商无线通信网络的延迟部分， NB-IoT 的空口信道延迟基本在 350 ms 以上[16, 17]。在实际的工程实践中，由于通信运营商的信息系统和燃气业务信息系统是两个独立的系统[18]，属于不同的域，如图 1 所示，两个域之间还需要进行数据的互联互通，跨域数据传输也会引入额外的端对端延迟。

工程实践中实际的 NB-IoT 网络端对端的通信延迟如图 4 所示，由于图 4 中的指令通信采用的是 HTTP 协议，可估算出采集平台端到表端的网络链路延迟为 ，即因为链路延迟引入的时间误差在秒级，即图 2 中端到端的传输时间 。



**图4 工程实践中测量的端对端通信延迟**

# 2时钟同步设计

为解决图 2 中的的时钟误差问题，提升时钟同步的精度，参考 RFC 5905 Network Time Protocol（简称 NTP， 网络时间协议）[8]，本文设计了一种智能燃气表嵌入式系统时钟同步方法，可以屏蔽不同的表具型号、不同的 NB-IoT 模组型号，以统一的应用层协议的方式实现时钟同步，系统架构如图5 所示。



**图 5 系统架构设计**

图 5 中，燃气企业数据采集平台通过其网络域内的局域网 NTP 服务器实现数据采集服务集群中的多台服务器之间的时钟同步。通信运营商的 NB-IoT 网络平台通过其域内的广域网网关与燃气企业数据采集平台中的广域网网关实现跨域通信，NB-IoT 通信网络通过无线通信实现与城镇小区居民物联网智能燃气表的通信，最终实现燃气企业数据采集服务集群和城镇小区居民物联网智能燃气表的互联互通。在通信过程中，通过燃气企业自定义的应用层协议实现燃气表和数据采集服务器的时钟同步。考虑到实际工程实现的复杂程度，忽略中间的链路，将端到端的系统进行抽象简化，以采集系统端的单调时钟为时钟基准，进行物联网智能燃气表端系统时钟同步的方法可概括为如图 6 所示的过程。



**图 6 端到端的时钟同步设计**

图 6 中 物联网智能燃气表在按其单调时钟系统记录的 时刻发起时钟同步请求，采集系统收到同步请求后，按其单调时钟系统记录收到请求的时刻为 ，在下发时钟同步消息时按其时钟系统记录时刻为 ，时钟同步消息中含有 和 ，当物联网智能燃气表收到时钟同步消息时，按其单调时钟记录时刻为 ，则物联网智能燃气表可在表端计算获得整个通信过程中的网络传输时间 如公式（2）所示。

**公式（2）**

此处的网络传输时间 为双向通信（一个通信往返）的网络传输时间，假定上下行通信的延迟时间是相同的，则可计算出单程网络传输时间，即图 2 中的 如公式（3）所示。

**公式（3）**

若实际网络环境中上下行通信的延迟时间不同，则公式（3）中的 需要重新计算。图 6 中，表端单调时钟的 时间戳发送至采集系统后，采集系统按照其单调时钟系统记录的时间戳为 ，考虑公式（3）中的单程网络传输时间 ，若表端在 时刻进行时钟调整，则 时刻表端单调时钟时间戳为 ，则表端可计算其时钟系统和采集系统时钟系统的时间误差 如公式（4）所示。

**公式（4）**

表端得到了准确的时钟误差 后，若在时刻 调整其时钟，则时钟调整如公式（5）所示。

**公式（5）**

考虑到物联网燃气表表端的一些业务逻辑中需获取时钟，时钟调整对表端业务逻辑的影响通过图 7 中的代码片段进行说明。

*long t1 = getTime();* //(1) 获取系统时间 t1 *do { b1(t1) };* //(2)处理业务 b1  *sys.time() = sys.time() + td;* //(3)其他进程按照公式（4）中计算获取的 td 调整系统时间 *long t2 = getTime();* //(4) 获取系统时间 t2 *long b1\_time\_used = t2 - t1* //(5)计算业务 b1 的用时 *do { b2(t2) };* //(6)处理业务 b2

**图 7 表端业务逻辑处理代码片段**

考虑以下两种情况。

（1） > 0，即表端单调时钟系统滞后于采集系统单调时钟系统，表端需向前步进时间单位 。直接进行调整，可以观察到按照时间记录的业务 的处理时间延长了时间 ，但表端业务发生的时序没有发生变化。

（2） < 0，即表端单调时钟系统超前于采集系统单调时钟系统，表端需要向后步进时间单位 。直接进行调整，则可能会导致表端业务时序混乱。例如，实际上，按照表具单调时钟系统（滴答时钟，时间只能向前）， 时刻发生 业务， 时刻发生 业务， 时刻晚于 时刻。在 发生后 发生前，进行了表具时钟的调整（图 7 中的步骤 3 ），这样从表具的墙面时钟（记录的时间）来看， 业务 的发生在时间上早于业务 ，出现了“时光倒流”，如图 8 所示。此时，以第三者视角看来，表端的业务时序产生混乱。



**图 8 “时光倒流”现象示意图**

为了避免出现 “时光倒流”的现象，表具端应按照其实际时钟记录精度（例如 1ms），将需要调整的时钟误差 分割成多个较小的单位，按照逐步逼近的方式，多次进行时钟调整。或者，考虑到表具嵌入式系统中的微控制器实际时间的控制程度[19]，可以使其单调时钟系统的“滴答”变慢，最终实现平滑的时间过渡，避免出现图 8 中的问题，引起业务时序混乱。

# 3 实验验证

## 3.1 实验设计

实验验证环境的网络拓扑如图 9 所示。主机 *h*1 模拟数据采集平台，主机*h*2模拟燃气表具，设定*h*1到*h*2、*h*2 到*h*1的端到端网络传输延迟时间为 1s，即 *h*1-*h*2 的网络 RTT（Round Trip Time ，即网络往返时间）为 2s，*h*1-*h*2 的网络带宽设置为200Kbps，模拟如图 5 所示的实际 NB-IoT 网络的端到端的延迟以及传输带宽[20]。



**图 9 时钟同步实验网络拓扑示意图**

主机 *h*3 作为监控机器节点，实时获取节点 *h*1 和节点 *h*2 的系统时间，为了减少引入的时间误差，将 *h*3-*h*1、*h*3-*h*2 之间的网络带宽设置为 100 Mbps，RTT 设置为 0.5 ms。 *h*1、*h*2 、*h*3 3 个节点中的数据传输采用 TCP 协议。

（1）按照简单时间戳下发的方法进行时钟同步，通过 *h*3 记录时钟同步后主机 *h*1 和 *h*2 的时钟，计算时钟差；

（2）按照本文设计的如图 6 和公式（4）所示的基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法进行时钟同步，通过*h*3记录时钟同步后主机 *h*1和*h*2的时间差，与（1）进行比较，查看时钟同步精度的提升程度。

## 3.2 软件设计

本文设计的时钟同步为单向时钟同步方式，两端为服务端（数据采集平台端）和客户端（智能燃气表端），服务端将其时钟单向同步至客户端。

（1）智能燃气表端。智能燃气表端作为客户端，主动发起时钟同步请求，其软件流程设计如图 10 所示。



**图 10 智能燃气表端软件流程设计示意图**

（2）数据采集平台端。数据采集平台端作为服务端，响应客户端的时钟同步请求，其软件流程设计如图 11 所示。



**图 11 数据采集平台端的软件流程设计示意图**

## 3.3 实验结果

（1）采用简单时间戳下发时钟同步方法进行时间同步后，通过 *h*3 采集 *h*1、*h*2 的系统时钟进行比较，测得的时钟误差数据如表 1 所示。

**表 1 简单时间戳下发时钟同步实验数据**

| **No** | **服务端(*h*1)时钟** | **客户端(*h*2)时钟** | **时钟误差（秒）** |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2022-09-13 01:03:33.756 | 2022-09-13 01:03:32.754 | -1.002 |
| 2 | 2022-09-13 01:09:01.294 | 2022-09-13 01:09:00.291 | -1.003 |
| 3 | 2022-09-13 01:10:14.622 | 2022-09-13 01:10:13.617 | -1.005 |
| 4 | 2022-09-13 01:11:17.043 | 2022-09-13 01:11:16.039 | -1.004 |
| 5 | 2022-09-13 01:12:58.703 | 2022-09-13 01:12:57.700 | -1.003 |
| 6 | 2022-09-13 01:16:49.247 | 2022-09-13 01:16:48.245 | -1.002 |
| 7 | 2022-09-13 01:18:09.648 | 2022-09-13 01:18:08.645 | -1.003 |
| 8 | 2022-09-13 01:19:17.876 | 2022-09-13 01:19:16.872 | -1.004 |
| 9 | 2022-09-13 01:20:24.088 | 2022-09-13 01:20:23.085 | -1.002 |
| 10 | 2022-09-13 01:21:21.162 | 2022-09-13 01:21:20.160 | -1.002 |

由表 1 可见， 同步后 *h*2 的时钟相对于 *h*1误差大约为 1s，即通过简单时间戳下发的同步方法，将至少引入一个网络传输延迟的时间。

（2）采用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法进行时钟同步。公式（3）中的 计算结果是基于上下行通信的网络延迟时间相同的前提条件，本实验中由于*h*1和*h*2的通信是基于TCP 进行的，*h*2 到 *h*1 的上行通信中 TCP 建立连接经历了3个网络传输延迟时间[21] ，*h*1到 *h*2的下行通信延迟时间是网络传输延迟时间的 1 倍，所以 应按照公式（6）计算。

**公式（6）**

依据公式（6）对网络延迟计算进行校正，时钟同步结束后，测得的时钟误差数据如表 2 所示。

**表 2 基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步实验数据**

| **No** | **服务端(h1)时钟** | **客户端(h2)时钟** | **时钟误差（秒）** |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2022-09-13 06:02:22.406 | 2022-09-13 06:02:22.403 | -0.003 |
| 2 | 2022-09-13 06:04:00.703 | 2022-09-13 06:04:00.701 | -0.002 |
| 3 | 2022-09-13 06:05:40.831 | 2022-09-13 06:05:40.828 | -0.003 |
| 4 | 2022-09-13 06:07:26.219 | 2022-09-13 06:07:26.217 | -0.002 |
| 5 | 2022-09-13 06:08:47.532 | 2022-09-13 06:08:47.528 | -0.004 |
| 6 | 2022-09-13 06:09:44.996 | 2022-09-13 06:09:44.992 | -0.004 |
| 7 | 2022-09-13 06:10:39.904 | 2022-09-13 06:10:39.901 | -0.003 |
| 8 | 2022-09-13 06:11:30.578 | 2022-09-13 06:11:30.575 | -0.003 |
| 9 | 2022-09-13 06:12:21.581 | 2022-09-13 06:12:21.579 | -0.002 |
| 10 | 2022-09-13 06:13:11.332 | 2022-09-13 06:13:11.330 | -0.002 |

通过表 2 所示的实验数据可以看出，采用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，在实验环境下的时钟同步精度可以达到 5ms 。

# 4 总结

使用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，可以在实验环境下的燃气表具端达到误差为5ms 的时钟同步精度，而采用简单的时间戳下发的时钟同步方法，则至少会引入一个网络传输时间的误差，在本文如图 9 所示的网络条件下此误差为1s， 可见通过采用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，想对于简单时间戳下发的时钟同步方法，时钟同步精度由 1s 提升至5ms，时钟精度提升99.5%。后续还需要在实际的智能燃气表具的嵌入式系统中实现如图 10 所示的软件逻辑，并与现有的燃气企业自定义应用层协议相结合，进一步验证在实际表具终端和通信运营商网络环境中的时钟同步精度。同时，还需要考虑当表端时钟调整超过1ms 时，在燃气表具端需采用分阶段调整的方法，以防止引起如图 7 所示的表端业务时序逻辑问题。

# 5 参考文献

[1] 瞿浡麟. 试论 NB-IoT 物联网智能燃气表及其应用[C].中国燃气运营与安全研讨会（第十一届）暨中国土木工程学会燃气分会2021年学术年会论文集（上册）.2021: 691-696. DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.061668.

[2] 田小梦. ITU正式将NB-IoT技术纳入5G标准体系促进全球5G发展[J]. 通信世界, 2020(20): 29-30. DOI: 10.13571/j.cnki.cww.2020.20.014.

[3] 刘兴伟, 陈婷婷, 法曙光. 城镇燃气计量仪表智能化标准发展探讨[J]. 煤气与热力,2022, 42(05): 44-46. DOI: 10.13608/j. cnki. 1000-4416.2022.05.018.

[4] 郑红立,刘航,胡洋.NB-IoT技术在物联网智能燃气表领域的应用与推广[J]. 城市燃气,2021(08):6-11.

[5] Bo Xue, Zhitian Li, Pengyu Lei, Yingzi Wang, Xudong Zou. Wicsync: A wireless multi-node clock synchronization solution based on optimized UWB two-way clock synchronization protocol[J], Measurement,2021(183).

[6] Yamamoto Koutarou, Fukuhara Akihiro, Nishi Hiroaki. Hardware Implementation of MQTT Broker and Precise Time Synchronization Using IoT Devices[J], IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 17(2): 209-217.DOI:10.1002/TEE.23511.

[7] Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI (RFC 2030), <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4330>.

[8] Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification (RFC 5905), <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc5905/>.

[9] 孙建鹏,刘欣,洪应平,何鑫,熊继军.基于DP83640的以太网时钟同步方法设计[J].电子学报,2021,49(05):1033-1040.

[10] Nagra Aamir Sohail, Allahi Irfan, Pasha Muhammad etc. Design and FPGA based Implementation of IEEE 1588 Precision Time Protocol for Synchronisation in Distributed IoT Applications[J]. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2022, 19(1): 31-39. DOI: 10.1080/1448837X.2021.2013407.

[11] 凤良山,李俊.一种域控制器片内及片外时间同步的方法[J]. 汽车实用技术, 2022,47(01): 61-64. DOI: 10.16638/j.cnki.1671-7988.2022.001.014.

[12] 胡莽. NB-IoT 无线远传智能燃气表的设计与研究[C]//.中国燃气运营与安全研讨会（第十届）暨中国土木工程学会燃气分会2019年学术年会论文集（中册）.2019: 194-198. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.021995.

[13] 肖蕾,崔建峰.基于 NTP 协议的物联网时间同步设备的设计与实现[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2016,13(03): 46-51.

[14] 王照伟,曾鹏,于海斌.工业物联网环境下的时间同步技术分析[J]. 中兴通讯技术:1-8 [2022-09-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190131.1438.010.html>.

[15] 邵泽华.物联网智能燃气表实施阶梯气价计费的途径[J]. 煤气与热力, 2020, 40(06): 25-26+46. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2020.06.017.

[16] 刘哲,曾伟,蔡凯.NB-IoT网络指标体系研究与应用[J]. 邮电设计技术, 2020(12): 56-60.

[17] 杨观止,陈鹏飞,崔新凯,侯维岩.NB-IoT综述及性能测试[J]. 计算机工程, 2020, 46(01): 1-14.DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055006.

[18] 邵泽华,张磊.智能燃气表物联网系统设计[J]. 物联网技术, 2021,11(06):55-57+61.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2021.06.016.

[19] 吴天强,叶敏,朱剑,潘超.单片机系统实时时钟日差补偿的算法设计[J].科技风,2019(34):10-11.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.201934010.

[20] 邹玉龙,丁晓进,王全全.NB-IoT关键技术及应用前景[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(01): 43-46.

[21] 陈昱琦.网络安全之TCP/IP协议[J].科技风, 2021(16): 77-78.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.202116037.

作者介绍：刘永成，男，1983年11月生，工学硕士研究生。研究方向为计算机网络通信，网络仿真。E-mail： liuyngchng@163.com