 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i9.7455

Design of clock synchronization method in narrowband Internet of Things smart gas meter communication

Mengyang Li Weijian Zhang Xiuqi Lv Yongcheng Liu Shizhang Liu

1. Kunlun Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing, 102206, China
2. CNPC Kunlun Gas Co., Ltd, Jinan, Shandong, 250400, China

Abstract

For remote communication between smart gas meters equipped with Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) and remote data acquisition systems, synchronization of system clocks between both ends is essential to enable the meters to utilize the acquisition system's clock. Although NB-IoT modules in smart gas meters feature manufacturer-specific time synchronization AT commands, differences in meter embedded systems, NB-IoT module models, and telecom operators often prevent unified access, configuration, and operational management of clock servers. Building on the NTP clock synchronization concept for universal servers, this paper proposes a timestamp-based method to calculate network transmission delays for clock synchronization. This approach allows gas companies to achieve standardized clock synchronization across meters using different manufacturers' IoT modules through NB-IoT networks via a unified application-layer protocol. Experimental verification demonstrates that clock synchronization accuracy between smart gas meters and information acquisition system servers can reach 5ms.

Keywords

clock synchronization; NB-IoT; narrowband Internet of Things; NTP; smart gas meter

窄带物联网智能燃气表通信中的时钟同步方法设计

李梦洋 [1] 张炜健 [2] 吕修琦 [2] 刘永成 [1] 刘世章 [1]

1. 昆仑数智科技有限责任公司，中国 · 北京 102206
2. 中石油昆仑燃气有限公司山东分公司，中国 · 山东 济南 250400

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

1 引言

随着物联网技术的快速发展，以及 5G 通信网络的有力支撑，燃气领域中居民使用的传统插卡式 IC 卡燃气表正在逐步升级为基于物联网的智能燃气表 [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]，使燃气企业具备了可以通过远端数据采集平台采集表端计量信息进行实时计费和远程控制的能力。

燃气企业的远端采集平台，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。

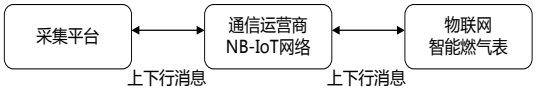


图 1 物联网智能燃气表通信模式

在采集平台和物联网智能燃气表进行通信的过程中，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，智能燃气表具中使用的 NB-IoT 模组虽具有厂商扩展的

【作者简介】李梦洋（1988–），男，中国辽宁锦州人，博士，工程师，从事能源领域信息与数智化技术研究。

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。

2 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 [5]

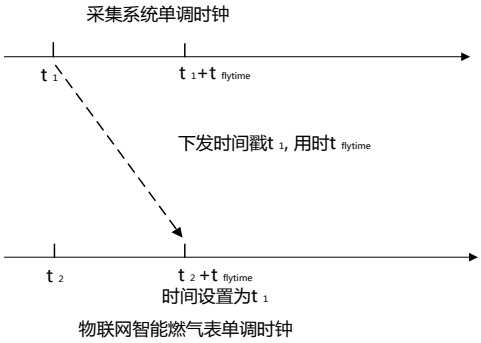


图 2 物联网智能燃气表简单时钟同步

这一过程如图 2 所示，采集系统在 t_1 时刻（此时物联网智能燃气表的时钟为 t_2 时刻）将系统时钟（时间戳 t_1）下发，当物联网智能燃气表收到时间戳 t_1 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 $t_{flytime}$，表具应在 $t_2+t_{flytime}$ 时刻将其时钟设定为 。

$t_{flytime}$ 受网络传输状况的影响较大，是一个随时间变化的数值，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。

因此，工程实践中，表具在 $t_2+t_{flytime}$ 时刻收到时间戳，通常直接将时间修正为 t_1。但当 $t_2 > t_1$ 时，在时刻 $t_2+t_{flytime}$ 将时间调整为 t_1，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，引起第三者视角从时间维度看到的业务产生混乱。

通过实测，当前采集平台端到表端的时间误差 $t_{flytime}$ 通常可达秒级。 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 [6]，则容易引起合同纠纷。

3 时钟同步设计

为提供一个可统一接入管理时钟误差的解决方案，以及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），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 3 所示。

图 3 中，燃气企业数据采集平台通过局域网 NTP 服务器实现数据采集服务集群内服务器间的时钟同步。通信运营商的 NB-IoT 网络平台通过广域网网关与燃气企业数据采集平台实现跨域通信，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。

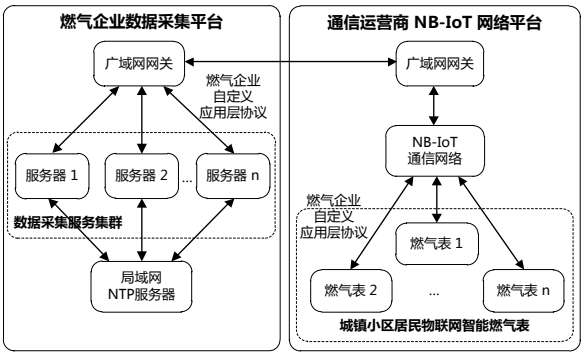


图 3 系统架构设计

核心的，在通信过程中需要利用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。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 4 所示的过程。

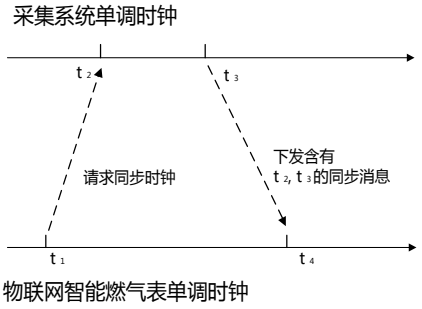


图 4 端到端的时钟同步设计

根据图 4，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 t_n 为，

$$t_n=(t_4-t_1)-(t_3-t_2)$$

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 $t_{flytime}$ 为，

$$t_{flytime}=\frac{1}{2}t_n=\frac{1}{2}[(t_4-t_1)-(t_3-t_2)]$$

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 t_d 为，

$$t_d=t_2-(t_1+t_{flytime})=\frac{1}{2}[(t_2-t_1)-(t_4-t_3)]$$

需特别注意 $t_d<0$ 的情况，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 $|t_d|$。若直接进行调整，则可能会导致表端业务时序混乱，如图 5 所示，此时，以第三者视角看来，表端的业务时序产生混乱。

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 [7]，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。

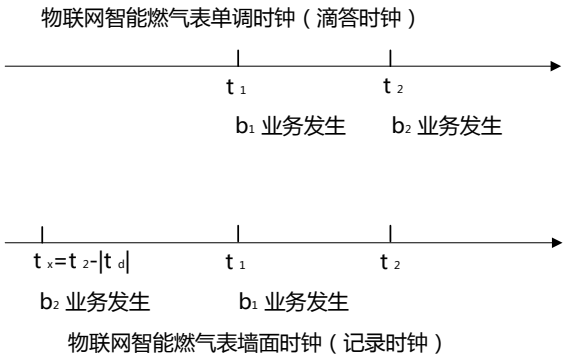


图 5 “时光倒流”现象示意图

4 实验验证

4.1 实验设计

实验网络拓扑如图 6 所示。主机 *h1* 模拟数据采集平台，主机 *h2* 模拟燃气表具，设定 *h1* 到 *h2* 端到端网络传输延迟时间为 1s，即 *h1* - *h2* 的网络 RTT（Round Trip Time，即网络往返时间）为 2s，*h1* - *h2* 的网络带宽设置为 200Kbps，模拟实际 NB-IoT 网络的端到端的延迟以及传输带宽 [8]。

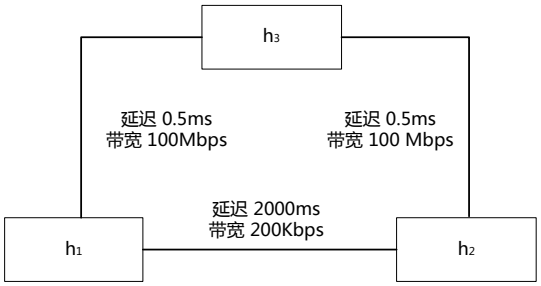


图 6 时钟同步实验网络拓扑示意图

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。

然后分别按照简单时间戳下发的方法，和本文设计如图 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，对比时钟同步精度的提升程度。

4.2 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。

智能燃气表端作为客户端，主动发起时钟同步请求。数据采集平台端作为服务端，响应客户端的时钟同步请求。两者响应流程如 7 图所示。

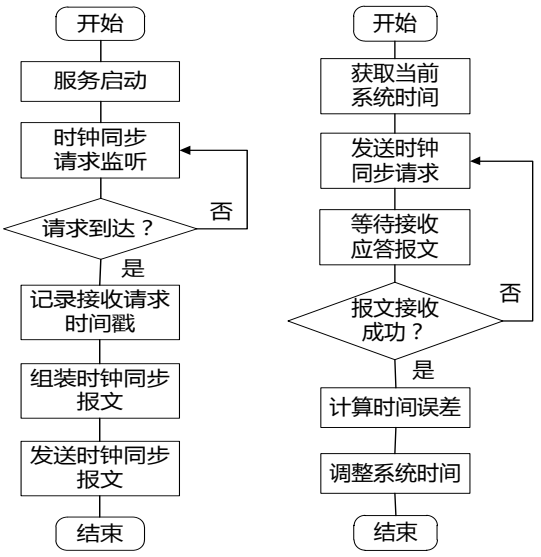


图 7 响应流程示意图

4.3 实验结果

通过表 1 的实验数据可知，运用简单时间戳下发的时钟同步方式后，客户端 h2 和服务端 h1 之间存在约 1 秒的时钟误差，且误差稳定为负值，处于 -1.002 秒到 -1.005 秒区间，这表明 h2 的时钟相较于 h1 慢了大约 1 秒，凸显出同步过程中无法回避的网络传输延迟。简单时间戳下发方法的本质是造成这种误差的主要原因：服务端直接把当前时间发送给客户端，客户端收到时间后加以设置，然而在信息传递进程中，信息传输时，数据包在网络传输中出现了延迟，且简单方法未对往返延迟和传输时间做补偿，故而会引入恒定的时间偏差，鉴于网络状况或许会出现波动，该方法在不同网络环境下的精准度或许会进一步降低，依据实验结果，即便误差大概为 1 秒，但误差值相对稳定且一致，表明该方法在短期内具备一定的稳定性与可重复性。

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

分析表 2 的实验数据可知，当采用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法之后，客户端 h2 和服务端 h1 间的时钟误差大幅降低，误差值处于 -0.004 秒至 -0.002 秒范围，约 2 到 4 毫秒，实验环境中同步精度可达 5ms。这显示该方法能有力克服网络传输延迟对时钟同步造成的干扰，和简单时间戳下发方法相比，精度提高了两个数量级。这种高精度

得以实现，主要是因为该方法在同步时把网络传输延迟纳入考量，通过记录消息收发的时间戳，算出往返时间并加以补偿，让客户端时钟能更精准地与服务端时钟同步。此外，实验环境下数据误差波动小，表明实验环境中，网络传输稳定且方法具备较强的抗干扰能力，即便历经多次同步，时钟误差依旧稳定在毫秒级，体现出极佳的稳定性与可靠性，利用时间戳计算网络传输时延的时钟同步手段，不但可明显降低固定偏差，又能在真实网络状况下实现高度精确的同步，适合对时间要求苛刻的分布式系统、工业控制以及金融交易。

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 (h_1) 时钟	客户端 (h_2) 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
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

5 结语

使用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，可以在实验网络条件下，将时钟同步精度由 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 7 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 5 所示的表端业务时序逻辑问题。

参考文献

[1] 瞿淳麟. 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] 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].

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.