

虚实结合时钟同步方案及部署实验

1. 实验目的

本实验旨在实现并验证一种高精度的虚实结合时钟同步方案。通过部署 NTP 时间同步协议，利用服务器端与客户端的时间戳交换机制，精确计算时延与时钟偏差，验证各节点间时钟同步效果。同时，结合编写的时间同步偏差测试工具（[receiver.py](#) 和 [time_sync_test.py](#)），测试系统间时钟同步的准确性与稳定性，确保在局域网环境下，各节点系统时间误差低于 1ms，从而提升多节点协同工作的同步性和可靠性，为分布式系统的高效运行提供有力支持。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；Unreal Engine 4.27；MeshLab。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_default，推荐PX4固件版本为：1.12.3。其他配套飞控及编译命令请见：<https://rflysim.com/doc/zh/1/Hardware.html>

- 硬件要求：笔记本/台式电脑 1台；NX 2个^[2]。

3. 实验地址

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\9.RflySimComm\3.CustExps\e1.VRClockSyncTest](#)

- **receiver.py**：接收端程序，用于接收测试包并记录接收时刻，参与时钟同步偏差测试。
- **time_sync_test.py**：时间同步测试程序，用于发送测试包并计算时延和时钟偏差，验证各节点间时钟同步效果。

4. 实验内容或步骤

4.1 NTP部署

在本地做验证的时，部署2个NX+1台Windows主机，以NX1作为服务器端，NX2和Windows作为客户端，三台设备用一个交换机形成一个局域网。下面分别介绍服务器端和客户端NTP的部署方法：

步骤1 服务器端（NX1）

NX1：IP为192.168.0.5，Linux系统，安装NTP服务，这里安装chrony

```
1 | sudo apt update
2 | sudo apt install chrony
```

编辑 /etc/chrony/chrony.conf，添加如下内容

```
# Welcome to the chrony configuration file. See chrony.conf(5) for more
# information about usable directives.

# This will use (up to):
# - 4 sources from ntp.ubuntu.com which some are ipv6 enabled
# - 2 sources from 2.ubuntu.pool.ntp.org which is ipv6 enabled as well
# - 1 source from [01].ubuntu.pool.ntp.org each (ipv4 only atm)
# This means by default, up to 6 dual-stack and up to 2 additional IPv4-only
# sources will be used.
# At the same time it retains some protection against one of the entries being
# down (compare to just using one of the lines). See (LP: #1754358) for the
# discussion.
#
# About using servers from the NTP Pool Project in general see (LP: #184525).
# Approved by Ubuntu Technical Board on 2011-02-08.
# See http://www.pool.ntp.org/join.html for more information.

# pool ntp.ubuntu.com iburst maxsources 4
# pool 0.ubuntu.pool.ntp.org iburst maxsources 1
# pool 1.ubuntu.pool.ntp.org iburst maxsources 1
# pool 2.ubuntu.pool.ntp.org iburst maxsources 2
    如果可以联网，取消这4行注释，选择联网时钟

local stratum 8
    本地参考时钟，仅用于无外网环境

allow 192.168.0.0/24
bindaddress 192.168.0.5

# This directive specify the location of the file containing ID/key pairs for
# NTP authentication.
keyfile /etc/chrony/chrony.keys

# This directive specify the file into which chronyd will store the rate
# information.
driftfile /var/lib/chrony/chrony.drift

# Uncomment the following line to turn logging on.
#log tracking measurements statistics

# Log files location.
logdir /var/log/chrony

# Stop bad estimates upsetting machine clock.
maxupdateskew 100.0

# This directive enables kernel synchronisation (every 11 minutes) of the
# real-time clock. Note that it can't be used along with the 'rtcfile' directive.
rtcsync

# Step the system clock instead of slewing it if the adjustment is larger than
# one second, but only in the first three clock updates.
makestep 1 3
~
~
~
~
~
~
~
"/etc/chrony/chrony.conf" 51L, 1839C
42,12 All
```

```
# Welcome to the chrony configuration file. See chrony.conf(5) for more
# information about usable directives.

# This will use (up to):
# - 4 sources from ntp.ubuntu.com which some are ipv6 enabled
# - 2 sources from 2.ubuntu.pool.ntp.org which is ipv6 enabled as well
# - 1 source from [01].ubuntu.pool.ntp.org each (ipv4 only atm)
# This means by default, up to 6 dual-stack and up to 2 additional IPv4-only
# sources will be used.
# At the same time it retains some protection against one of the entries being
# down (compare to just using one of the lines). See (LP: #1754358) for the
# discussion.
#
# About using servers from the NTP Pool Project in general see (LP: #104525).
# Approved by Ubuntu Technical Board on 2011-02-08.
# See http://www.pool.ntp.org/join.html for more information.

# pool ntp.ubuntu.com          iburst maxsources 4
# pool 0.ubuntu.pool.ntp.org  iburst maxsources 1
# pool 1.ubuntu.pool.ntp.org  iburst maxsources 1
#pool 2.ubuntu.pool.ntp.org  iburst maxsources 2

local stratum 8 ← 能支持离线环境

allow 192.168.0.0/24 ← 允许192.168.0这个网段的同步该服务器, 按需求修改
bindaddress 192.168.0.5 ← 服务器IP

# This directive specify the location of the file containing ID/key pairs for
# NTP authentication.
keyfile /etc/chrony/chrony.keys

# This directive specify the file into which chronyd will store the rate
# information.
driftfile /var/lib/chrony/chrony.drift

# Uncomment the following line to turn logging on.
#log tracking measurements statistics

# Log files location.
logdir /var/log/chrony

# Stop bad estimates upsetting machine clock.
maxupdateskew 100.0

# This directive enables kernel synchronisation (every 11 minutes) of the
# real-time clock. Note that it can't be used along with the 'rtcfile' directive.
rtcsync

# Step the system clock instead of slewing it if the adjustment is larger than
# one second, but only in the first three clock updates.
makestep 1 2
~
```

重启并验证:

- 1 | sudo systemctl restart chrony
- 2 | chronyc tracking # 验证同步状态

```
nvidia@nvidia-desktop:~/DelayCount/0617$ chronyc tracking
Reference ID      : 7F7F0101 ( )
Stratum          : 8
Ref time (UTC)   : Wed Jun 18 06:05:18 2025
System time      : 0.000000082 seconds slow of NTP time
Last offset      : +0.000000000 seconds
RMS offset       : 0.000000000 seconds
Frequency        : 21.788 ppm slow
Residual freq    : +0.000 ppm
Skew             : 0.000 ppm
Root delay       : 0.000000000 seconds
Root dispersion  : 0.000000000 seconds
Update interval  : 0.0 seconds
Leap status      : Normal
```

成功标志：Reference ID 为有效服务器 IP、Stratum ≥ 1 、Leap status: Normal。

步骤2 Linux客户端 (NX2)

1. 安装Chrony

```
1 | sudo apt update
2 | sudo apt install chrony
```

2. 编辑 /etc/chrony/chrony.conf:

```

# Welcome to the chrony configuration file. See chrony.conf(5) for more
# information about usable directives.

# This will use (up to):
# - 4 sources from ntp.ubuntu.com which some are ipv6 enabled
# - 2 sources from 2.ubuntu.pool.ntp.org which is ipv6 enabled as well
# - 1 source from [01].ubuntu.pool.ntp.org each (ipv4 only atm)
# This means by default, up to 6 dual-stack and up to 2 additional IPv4-only
# sources will be used.
# At the same time it retains some protection against one of the entries being
# down (compare to just using one of the lines). See (LP: #1754358) for the
# discussion.
#
# About using servers from the NTP Pool Project in general see (LP: #104525).
# Approved by Ubuntu Technical Board on 2011-02-08.
# See http://www.pool.ntp.org/join.html for more information.
pool ntp.ubuntu.com iburst maxsources 4
pool 0.ubuntu.pool.ntp.org iburst maxsources 1
pool 1.ubuntu.pool.ntp.org iburst maxsources 1
pool 2.ubuntu.pool.ntp.org iburst maxsources 2

server 192.168.0.5 iburst 使用NTP主机作为时钟源

# This directive specify the location of the file containing ID/key pairs for
# NTP authentication.
keyfile /etc/chrony/chrony.keys

# This directive specify the file into which chronyd will store the rate
# information.
driftfile /var/lib/chrony/chrony.drift

# Uncomment the following line to turn logging on.
#log tracking measurements statistics

# Log files location.
logdir /var/log/chrony

# Stop bad estimates upsetting machine clock.
maxupdateskew 100.0

# This directive enables kernel synchronisation (every 11 minutes) of the
# real-time clock. Note that it can't be used along with the 'rtcfile' directive.
rtcsync

# Step the system clock instead of slewing it if the adjustment is larger than
# one second, but only in the first three clock updates.
makestep 1 3

~

```

这里192.168.0.5是我部署主机的IP，要换成实际项目用的IP。

3.重启Chrony服务并验证同步：

```

1 | sudo systemctl restart chrony
2 | chronyc tracking

```

```
nvidia@nvidia-desktop:~/DelayCount/0617$ chronyc tracking
Reference ID      : C0A80005 (192.168.0.5)
Stratum          : 9
Ref time (UTC)   : Wed Jun 18 06:12:15 2025
System time      : 0.000000007 seconds slow of NTP time
Last offset      : +0.000015113 seconds
RMS offset       : 0.000015113 seconds
Frequency        : 30.682 ppm slow
Residual freq    : +18.445 ppm
Skew             : 0.066 ppm
Root delay       : 0.000342733 seconds
Root dispersion  : 0.000053979 seconds
Update interval  : 0.0 seconds
Leap status      : Normal
```

```
1 | chronyc sources
```

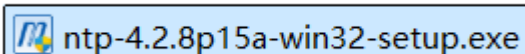
```
nvidia@nvidia-desktop:~/DelayCount/0617$ chronyc sources
210 Number of sources = 1
MS Name/IP address         Stratum Poll Reach LastRx Last sample
=====
^* 192.168.0.5              8      6    37    32   -357ns[ +13us] +/- 165us
```

步骤3 Windows/wsl端

因为wsl的系统时间是完全由windows系统时间决定的，所以要实现wsl和nx时钟误差很小的指标，需要让windows能同步上NTP主机的时间。Windows端自带的W32Time服务部署起来效果不好，推荐使用Meinberg NTP，精度更高，适合工业或仿真系统，部署方法如下：

1. 安装Meinberg NTP

右键点击安装程序，选择`**"以管理员身份运行"*`



安装时务必勾选“安装NTP服务组件”（servers），

2. 禁用并停止windows自带w32time，避免服务冲突

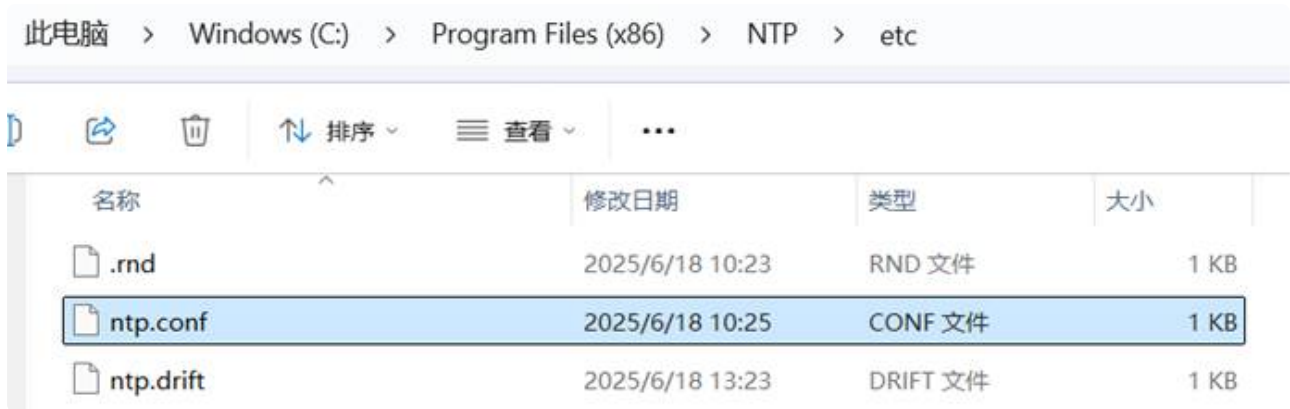
以管理员权限打开cmd，然后运行，

```
1 | net stop w32time
2 | sc config w32time start= disabled
```

这样会停止并禁止启动 Windows 默认时间服务。

3. 配置Meinberg NTP，编辑ntp.conf

找到对应的路径



用记事本已管理员身份打开ntp.conf



```
1 | driftfile "C:\Program Files (x86)\NTP\etc\ntp.drift"
2 | tinker panic 0
```

使用局域网时间服务器

```
1 | server 192.168.0.5 iburst
2 |
3 | \# 限制
4 | restrict 127.0.0.1
5 |
6 | restrict 192.168.0.5 nomodify notrap nopeer
7 | restrict default ignore
```

保存后以管理员权限重启NTP服务

4. 启动Meinberg NTP服务

以管理员身份运行cmd，依次输入

```
1 | net stop ntp
2 | net stop ntp
3 | net start ntp
```

```
C:\Windows>net stop ntp
Network Time Protocol Daemon 服务正在停止。
Network Time Protocol Daemon 服务已成功停止。

C:\Windows>net start ntp
Network Time Protocol Daemon 服务正在启动。
Network Time Protocol Daemon 服务已经启动成功。
```

5. 验证同步状态

```
C:\Windows>w32tm /stripchart /computer:192.168.0.5 /dataonly /samples:5
正在跟踪 192.168.0.5 [192.168.0.5:123]。
正在收集 5 示例。
当前时间是 2025/6/18 14:32:00。
14:32:00, -00.0005700s
14:32:02, -00.0005443s
14:32:04, -00.0004219s
14:32:06, -00.0004264s
14:32:08, -00.0003605s

C:\Windows>sc query NTP

SERVICE_NAME: NTP
        TYPE               : 10  WIN32_OWN_PROCESS
        STATE                : 4   RUNNING
                        (STOPPABLE, NOT_PAUSABLE, ACCEPTS_SHUTDOWN)
        WIN32_EXIT_CODE       : 0    (0x0)
        SERVICE_EXIT_CODE   : 0    (0x0)
        CHECKPOINT           : 0x0
        WAIT_HINT            : 0x0
```

4.2 部署后测试

1. 在客户端运行receiver.py

Wsl端

```
root@yyx:/mnt/e/Test/DelayCount/0617# ./receiver.py
```

Nx2端

```
nvidia@nvidia-desktop:~/DelayCount/0617$ ./receiver.py
```

2. 在服务端运行 `time_sync_test.py`

```
nvidia@nvidia-desktop:~/DelayCount/0617$ ./time_sync_test.py  
测试序号: 1, 响应端: 192.168.0.2, 时延: 0.436 ms, 时钟偏差: 0.578 ms  
测试序号: 1, 响应端: 192.168.0.4, 时延: 0.411 ms, 时钟偏差: 0.248 ms  
测试序号: 2, 响应端: 192.168.0.2, 时延: 0.414 ms, 时钟偏差: 0.474 ms  
测试序号: 2, 响应端: 192.168.0.4, 时延: 0.354 ms, 时钟偏差: 0.221 ms
```

统计结果如下:

```
=== 分 IP 时统精度 & 时延统计 ===  
  
响应端 IP: 192.168.0.2  
样本数量: 50  
>> 时延 (delay) :  
    最大: 2.002 ms  
    平均: 0.408 ms  
    标准差: 0.244 ms  
>> 时钟偏差 (delta) :  
    最大: 2.059 ms  
    平均: 0.565 ms  
    标准差: 0.234 ms  
  
响应端 IP: 192.168.0.4  
样本数量: 50  
>> 时延 (delay) :  
    最大: 0.430 ms  
    平均: 0.333 ms  
    标准差: 0.069 ms  
>> 时钟偏差 (delta) :  
    最大: 0.248 ms  
    平均: 0.128 ms  
    标准差: 0.083 ms
```

wsl端

nx2端

可以看到部署了NTP后时统精度能达到低于1ms。

5. 关键知识点

关键知识点1：网络时延与同步精度

关于各节点之间的数据传输延时，只要网络条件较好既可以满足指标：各节点之间形成局域网，可以单独用个路由器，或者直接交换机有线连接形成局域网，延时会更低。

关键知识点2：时统精度与NTP协议

时统精度的话，必须得让各节点的系统时间是同步的，否则计算出来的delta会很大。当前我们用的同步方法是NTP。通过客户端主动发起请求，然后服务器应答的双向时间交换机制，NTP能抵消部分由于网络延迟不对称带来的误差，使偏差估算更加准确。NTP不仅连接一个时间源，而是连接多个服务器，然后使用以下机制来选择"最可信"的：

- 1) 过滤器算法：排除延迟波动大的样本
- 2) 时钟选择算法：排除误差较大的服务器
- 3) 钟漂调整：微调系统时钟，不是一次性跳变。

层级结构减少了对原子钟或 GPS 的依赖；提高了系统的可扩展性与稳定性；客户端连接的通常是 Stratum 2 或 3，但仍能保持毫秒级甚至微秒级同步。

时间同步计算方法

- **时延计算**：通过发送端向多播地址发送包含数据发出时刻 t_0 和测试序号 seq 的测试包，响应端接收到请求后，记录接收时刻 t_1 和即将发送响应时的本地时间 t_2 ，返回给发送端。发送端根据 t_3 （收到响应时刻）、 t_0 、 t_1 、 t_2 计算时延 $delay = ((t_3 - t_0) - (t_2 - t_1)) / 2$ 。
- **时钟偏差计算**：考虑网络延时后，对方时钟与本地时钟的偏差 $delta = t_1 - (t_0 + delay)$ 。这些公式能够准确地计算出两节点之间的时间差异，以便评估时钟同步的效果。

NTP 协议部署与应用

- **服务器端部署**：在 Linux 系统的服务器端，安装 Chrony 服务，并编辑配置文件，添加多个时间源，提高时间同步的可靠性和准确性。同时，配置 `bindaddress` 以指定服务器监听的 IP 地址，并重启 Chrony 服务使其生效。通过 `chronyc tracking` 命令验证同

步状态，确保 Reference ID 为有效服务器 IP、Stratum ≥ 1 、Leap status: Normal，表示同步成功。

- **客户端部署**：对于 Linux 客户端，同样安装 Chrony，编辑配置文件，将服务器端 IP 地址配置为时钟源，然后重启服务并验证同步状态。对于 Windows/wsl 端，由于 wsl 的系统时间由 windows 系统时间决定，推荐使用 Meinberg NTP 替代自带的 W32Time 服务，通过安装、配置 Meinberg NTP，使其与局域网中的 NTP 主机进行时间同步。

6. 参考资料

1. [RflySim官方文档](#)

7. 常见问题

Q1：如何验证NTP服务是否同步成功？

A1：可以通过执行 `chronyc tracking` 命令来验证同步状态，成功标志包括：Reference ID 为有效服务器 IP、Stratum ≥ 1 、Leap status: Normal。另外，也可以使用 `chronyc sources` 查看时间源的状态。

Q2：为什么需要禁用Windows自带的W32Time服务而使用Meinberg NTP？

A2：因为WSL的系统时间完全由Windows系统时间决定，Windows自带的W32Time服务部署起来效果不好，精度较低。为了实现wsl和NX时钟误差很小的指标，推荐使用Meinberg NTP，它的精度更高，更适合工业或仿真系统。

Q3：在局域网环境下，如何确保各节点系统时间误差低于1ms？

A3：需要先部署NTP服务，让各节点的系统时间保持同步，这是确保计算出的delta值准确的前提。通过客户端主动发起请求，服务器应答的双向时间交换机制，NTP能抵消部分由于网络延迟不对称带来的误差，使偏差估算更加准确。

1. <https://rflysim.com/> ↩

2. 推荐配置请见: <https://rflysim.com/> ↩