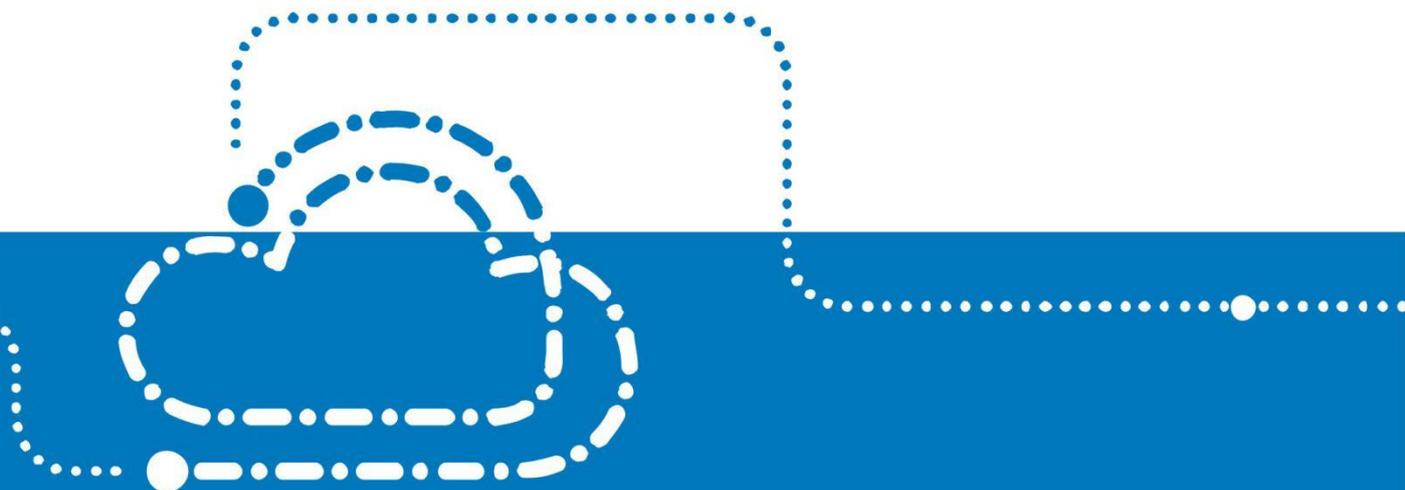


ZTE中兴

时钟同步技术白皮书



中兴通讯时钟同步技术白皮书

版本	日期	作者	审核者	备注
V1.0	2021/07/26	ZTE	ZTE	新建

© 2021 ZTE Corporation. All rights reserved.

2021 版权所有 中兴通讯股份有限公司 保留所有权利

版权声明:

本文档著作权由中兴通讯股份有限公司享有。文中涉及中兴通讯股份有限公司的专有信息，未经中兴通讯股份有限公司书面许可，任何单位和个人不得使用 and 泄漏该文档以及该文档包含的任何图片、表格、数据及其他信息。

本文档中的信息随着中兴通讯股份有限公司产品和技术的进步将不断更新，中兴通讯股份有限公司不再通知此类信息的更新。

目录

1 技术简介.....	3
1.1 时钟同步.....	3
1.2 同步需求来源.....	4
1.2.1 基本同步需求.....	4
1.2.2 协同业务的需求.....	4
1.2.3 承载网的需求.....	5
1.2.4 5G 垂直行业应用.....	5
2 通讯网时间同步解决方案.....	7
3 关键技术.....	9
3.1 时钟同步.....	9
3.1.1 同步以太网.....	9
3.1.2 时钟同步级联.....	10
3.1.3 锁相环模块.....	10
3.1.4 SSM 消息.....	10
3.2 时间同步.....	12
3.2.1 时间同步模式.....	12
3.2.2 时间端口状态.....	13
3.2.3 PTP 消息分类.....	13
3.2.4 报文发送间隔.....	14
3.2.5 PTP 消息格式.....	14
3.2.6 PTP 消息传输承载类型.....	21
3.2.7 FlexE 接口.....	23
3.2.8 BMC 算法.....	24
3.2.9 1588 时间校正.....	25
3.2.10 时间同步过程.....	27
3.3 智能时间网.....	27
3.3.1 自动规划.....	27
3.3.2 时间网络分割.....	28
3.3.3 单纤双向时间传递技术.....	28
3.3.4 基站时间回送承载网.....	29
3.3.5 时钟时间智能故障诊断.....	30
4 总结.....	33
5 缩略语.....	34

1 技术简介

时钟和时间同步是承载设备的基本功能要求之一，它提供了网络运维所需要的时钟和时间的同步功能。

1.1 时钟同步

同步技术包括：时钟同步（频率同步）和时间同步（相位同步），时钟同步是通过频率比对将分布在不同地方的频率源的率值调整到一定的准确度或一定的符合度，而时间同步是通过时刻比对将分布在不同地方的钟时刻值调整到一定的准确度或一定的符合度。

时钟同步和相位同步其关系可以用下面的秒表的例子来说明（图 1 所示），假设有两块具有秒针的秒表，如果两块表的频率同步，意味着两块表的秒针具有相同的“跳跃”周期，也就是两块表走得一样快。但是这并不意味着两块表所表示的相位相同。相位同步首先要求两块表有相同的时标（Time Scale），也就是时间的起始点（Epoch）和固定的时间间隔（Time Interval）。

通常情况下，我们选择其中一块表作为同步参考源，即主时钟；另一块表作为从时钟，使其保持与主时钟的频率和相位同步。为了消除相位差，主时钟可以提供以 60 秒为周期的基准脉冲信号（即“对表”信号），使从时钟秒针的跳变位置在每一个基准信号脉冲出现时，与主时钟秒针的跳变位置保持一致，则两块表就能保持相位的对齐（或相位同步）和频率同步。

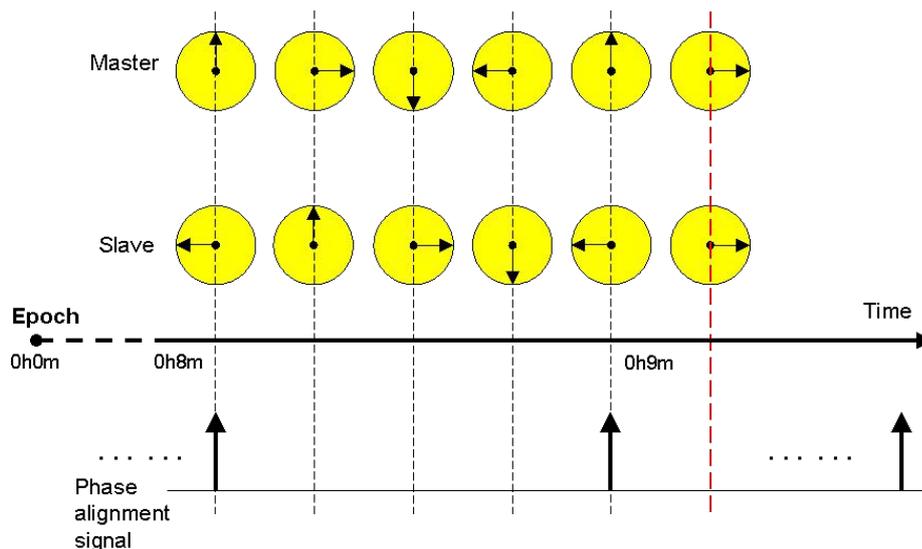


图 1 频率同步与相位同步的关系

1.2 同步需求来源

1.2.1 基本同步需求

5G 系统采用 TDD 制式，其基本同步要求主要是为了防止不同基站之间的干扰以及不同终端之间的干扰。

为避免不同基站之间和 UE 之间的上下行干扰，提出了基站空口的时间同步需求。通过对不同干扰场景的分析，可见时间同步精度由保护周期（ GP ）、基站同步误差、基站收发转换时间、UE 收发转换时间、小区覆盖半径等多方面因素共同决定，且这些因素之间需要满足下述约束关系： $T_{sync} < (T_{GP} - 2 * T_{prop,BS1-BS2} - T_{BS,on \rightarrow off} - T_{BS,off \rightarrow on}) / 2$ 。其中， T_{sync} 是基站之间的同步偏差， T_{GP} 是保护间隔时间， $T_{prop,BS1-BS2}$ 是基站之间由距离引入的传输时延， $T_{BS,on \rightarrow off}$ 是基站从“开”到“关”的转换延迟， $T_{BS,off \rightarrow on}$ 是基站从“关”到“开”的转换延迟。

在 5G 基本时间同步方面，3GPP 采用设置 GP 的方式防止上下行时隙干扰，考虑到 5G 系统中高频子载波的 GP 较小。3GPP 通过设置多个 GP 符号数，使 T_{GP} 时间相同，仍为 3us，与 4G 系统保持一致，需要网同步实现每个基站 1.5us 的绝对时间精度。其中，中国移动建议采用取最小 GP 符号数的原则，把时间同步精度归一化到 0.6us，对应的绝对时间精度为 0.3us。此外，在 5G 基本频率同步方面，5G 的频率同步要求仍为 0.05ppm，与 4G 相同。

1.2.2 协同业务的需求

站间协同特性是指到同一个用户的数据可以通过不同基站的 RRU 收发，使用户可以在交叠覆盖区合并多个信号，从而提升业务增益。多信号间的时延差须满足一定要求，否则无法合并，时延差主要由站间同步偏差和站间传播时延组成，可以推导出协同业务对站间同步的要求。假定 UE 采用一套定时机制，根据 3GPP TS36.922 协议描述，空口协同要求 $TD1 + TD2 + TD3 = TotalTD \leq CP$ 。其中， $TD1$ 为空口到用户不同距离产生的时间差， $TD2$ 为多径传播导致的时延差， $TD3$ 为同步定时偏差， $TotalTD$ 为用户接收到来自不同基站信号的时间总差。为了避免不同路径符号间的干扰，符号和符号之间通过 CP （循环前缀）隔离，不同 RRU 到 UE 的信号延时差异要小于 CP 的长度。

在 5G 协同业务时间同步方面，不同子载波间隔的协同业务具有不同的时间同步需求，低频

(15kHz)、中频(30kHz)、高频(120kHz)需求分别为3 μ s、0.7 μ s、190ns; MIMO、发射分集(3GPP)要求相对时间偏差为65ns,一般在单个RRU内部,无需网同步;带内连续载波聚合(CA)要求相对时间偏差260ns,一般在单个RRU内部,无需网同步,可能发生在一个基站的不同RRU之间,需要前传解决相对同步问题;带间CA或带内非连续CA,要求相对时间偏差3 μ s,一般发生在基站的不同RRU之间,需要前传解决。此外,5G协同业务频率同步方面无特殊要求。

1.2.3 承载网的需求

时间同步在承载网的应用,主要在时间片调度和量化时延两个领域。

5G网络对承载提出了低时延和确定性时延的需求,引入了Inband OAM技术,解决当前OAM技术的不足。基于真实业务的报文,该技术可进行端到端及逐点检测业务的时延和丢包情况,实现对真实业务全网覆盖的“逐包”检测和纳秒级的时延检测,从而保证用户的服务体验。

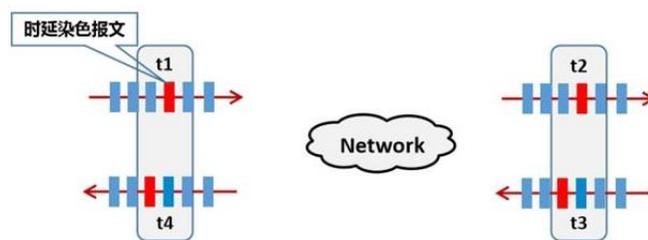


图 2 承载网时延检测

Inband OAM的时延检测在发送端对被检测业务流的其中一个报文进行时延染色,记录该报文的入口时戳,在接收端记录被检测业务流时延染色报文的出口时戳,从而进行时延检测。时延的精度取决于发送端和接收端两侧的时间同步精度。

1.2.4 5G 垂直行业应用

除了基站同步需求,5G网络支撑的多种新业务可能具备高精度同步需求,比如高精度定位业务、电力、高速移动业务覆盖和其他新业务(如物联网,工业互联网),不同的细分领域时间同步的精度需求存在差异。

基于测距的算法是目前比较典型的定位技术,包括到达时间法(Time of Arrival, TOA)、到达时间差法(Time Difference of Arrival, TDOA),基站定位可以采用类似的方法。TOA定位方法是一种通过计算信号由发生器到达接收点的延迟时间来确定两者相对距离的方法。基于TOA(或TDOA)的基站定位技术,时间同步精度与定位精度要求直接相关。例如,要满足3m的定位精度,要求基站间的空口信号同步误差为10ns;要满足m级的定位精度,要求基站间的空口信号同步误差为3ns。需要网同步实现,可结合其它相关定位技术。

另外的典型应用是电力系统同步，电力系统同步主要涉及三类设备，第一类为保护设备，主要用于保护变压器、线路、断路器等重要装置；第二类为自动化设备，主要用于提高对设备运行情况的监视、测量、控制和协调水平；第三类为显示时钟、电子挂钟等其他设备。不同的设备对时间同步的精度要求不同，覆盖范围从 $1\ \mu\text{s}$ 到 1s ，其中线路行波故障测距、同步相量测量及雷电定位的同步精度要求在 $1\ \mu\text{s}$ 内。

时间同步是许多工业应用的必要需求，例如运动控制中的精准事件序列、实时数据记录等场景。在工业领域中，通常要求独立的设备单元系统（产线、车间）的设备时间同步精度小于 $1\ \mu\text{s}$ 。精准的时间同步还是时间敏感网络其他特性的先决条件。业领域大量典型应用存在分布式实时性部署要求，如运动控制、过程控制、高清机器视觉、实时数据采集等。

2 通讯网时间同步解决方案

通讯网时钟时间同步主要有两种解决方案：一种是基站直接搜时；一种是通过时间服务器连接有线时间网进行网络搜时。

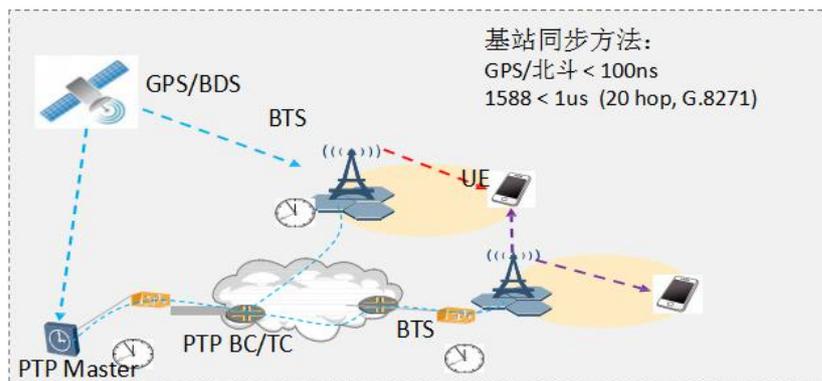


图 3 通讯网授时的方法

这两种授时方式各有优点和缺点，可以相互补充，弥补各自的不足。

方案	优势	劣势
基站 GPS 方案	问题定位定界方便	低可靠、低安全 安装施工困难
1588V2 方案	较高可靠 较高安全	1588 开局工作量大 1588 故障定位较困难

图 4 授时方法比较

有线授时方案主要有时间服务器、地面时钟网和时间网构成。时钟网和时间网构成双层平面。用基于物理层比特流的同步以太网技术实现频率同步，在此基础上采用 1588 实现相位调整，从而实现时间同步。

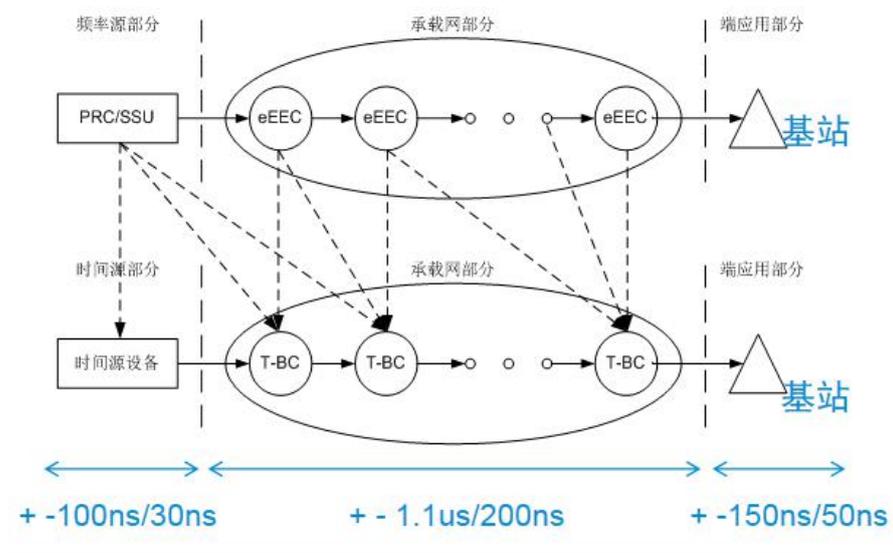


图 5 地面网授时架构

3 关键技术

ITU-T 的 G. 826x 和 G. 827x 系列提出了分组网络传递电信级时钟的要求，包括了时钟网络、时间网络，时钟源、时间源等，到 2020 年已经发布的标准如下：

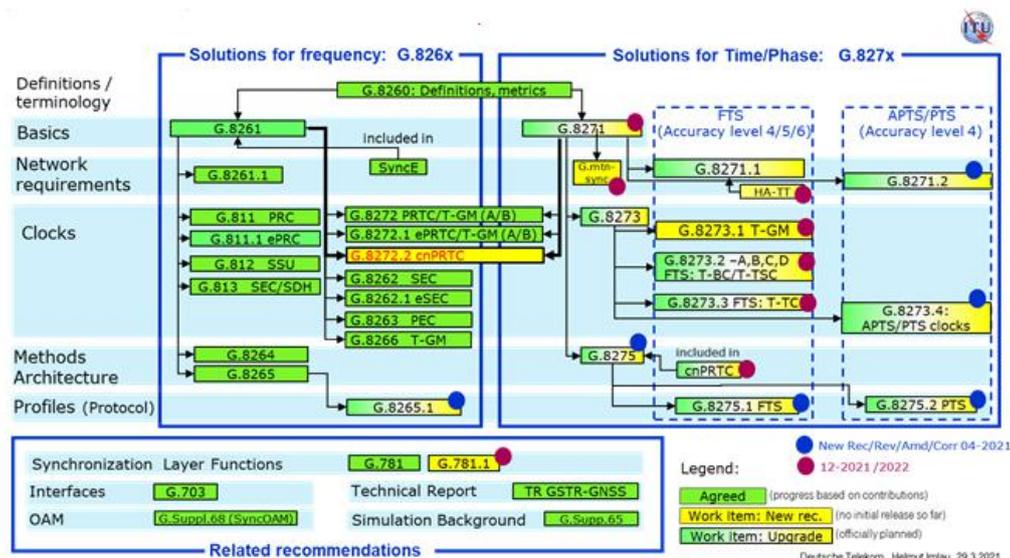


图 6 标准的关系

3.1 时钟同步

3.1.1 同步以太网

同步以太网是一种采用以太网链路码流恢复时钟的技术，发送侧设备将高精度时钟注入以太网的物理层芯片 (PHY)，PHY 芯片用这个高精度的时钟将数据发送出去。接收侧的设备的 PHY 芯片可以从数据码流中提取这个时钟，在这个过程中时钟的精度不会有损失，可以与源端保证精确的时钟同步。

同步以太网从物理链路恢复时钟，因此从恢复的时钟质量不受链路业务流量影响，可提供与 SDH/SONET 网络相同的时钟树部署和时钟质量，满足 G. 823 规定的接口指标。

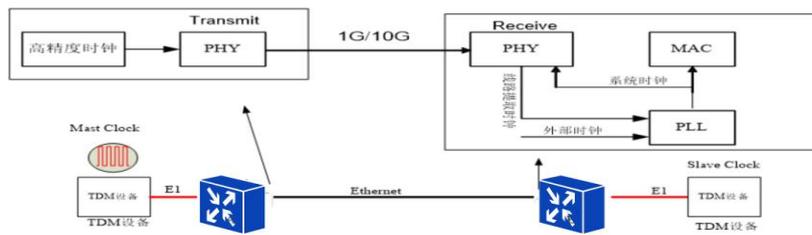


图 7 同步以太网原理

3.1.2 时钟同步级联

采用同步以太的构建时钟同步网络，每个节点可以从链接上游节点的物理链路提取线路时钟，并从多个时钟源中进行时钟质量选择，使本地时钟锁定在最高质量的时钟源，并将锁定后的时钟传送到下游设备，通过逐级锁定，从而实现全网逐级同步到主参考时钟。其原理如图所示。

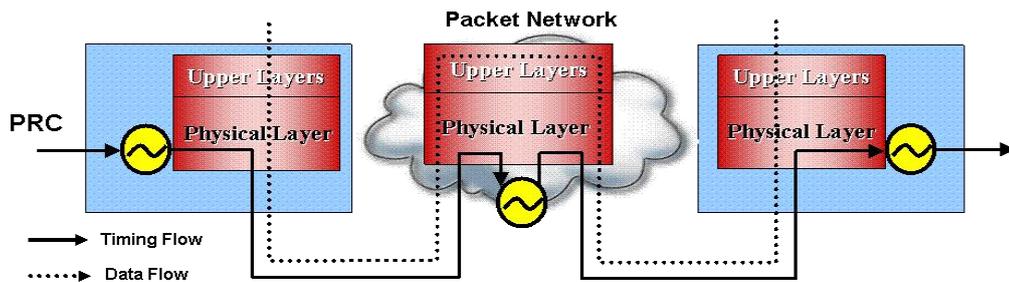


图 8 分组网络物理层同步原理

3.1.3 锁相环模块

时钟同步可以通过物理链路方式获取上游时钟，也可以通过 1588 报文恢复时钟，运营商网络通常使用物理链路恢复时钟，其核心模块为满足 G. 8262.1 标准的锁相环模块。

同步以太网节点的时钟锁相模块（PLL）实现时钟锁相、分发功能，时钟锁相模块（PLL）有三种工作模式：锁相、保持和自由运行，锁相模式即为 PLL 锁定参考基准，系统时钟精度和参考基准的精度保持一致，参考基准是从上一级节点内置数据码流中下发的时钟，保持模式为 PLL 失去参考基准，根据已往的时钟参数在一段时间内保持原有的时钟精度，保持模式一般可持续 24 小时，经过保持模式，PLL 即进入自由运行模式，在自由运行模式下，系统时钟精度取决于本地振荡器时钟精度。

3.1.4 SSM 消息

时钟同步网络使用 SSM 报文进行同步网络构建。SSM 算法源于 SDH 的时钟同步控制，使

用规则和时钟选择算法符合 G. 781 的规范，同步以太网的 SSM 控制继承了 SDH 网络特性，在传统时钟网的基础上通过增加以太网同步消息信道（ESMC）丰富了同步以太网的支持，标准 G. 8264 里对其有所描述。

以太网同步消息信道（ESMC）是 MAC 层的单向广播协议信道，用于在设备间传送同步状态信息 SSM。设备根据 ESMC 报文的 SSM 信息选择最优时钟源。

在同步以太网的 SSM 信息封装公式参见 G. 8264，符合 IEEE802.3 标准。

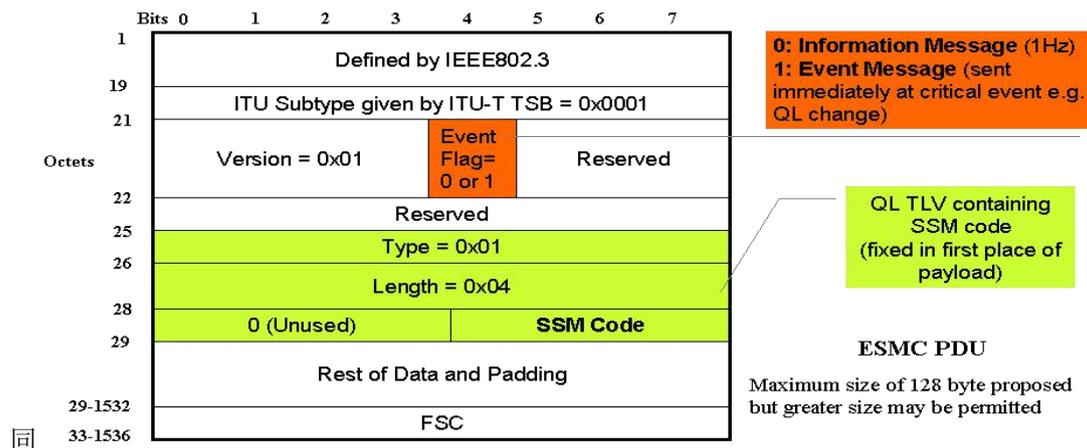


图 9 SSM 以太封装格式

IEEE802.3 头定义的结构如下表：

表 1 SSM 报文 IEEE802.3 头定义的结构

Octet number	Size	Field
1-6	6 octets	Destination Address = 01-80-C2-00-00-02 (hex)
7-12	6 octets	Source Address
13-14	2 octets	Slow Protocol Ethertype = 88-09 (hex)
15	1 octet	Slow Protocol Subtype (0A (hex))
16-18	3 octets	ITU-OUI = 00-19-A7 (hex)

现在按照先后顺序分别说明：

A: 目的地址: 为慢协议多播地址 01-80-C2-00-00-02

B: 源地址: 出端口的 mac 地址

C: 协议类型: 0X8809

D: 子类型: 0X0A

E: ITU OUI: 定义协议组织身份识别, 00-19-A7

F: ITU 子类型: 0X0001

G: 版本: 0X01

H: 事件标志: 当为普通 SSM 通告报文时值 0, 当为 G. 781 中定义的时间发生时, 导致 SSM 信息发生变化, 该字段置 1

I: 缺省字段: 为了将来扩充协议

J: 报文内容: 包括时钟质量信息内容, 与其他扩展信息. 采用的格式都为 TLV 形式。

K: FCS 校正字段。

3.2 时间同步

3.2.1 时间同步模式

1588v2 边界时钟 (BC) 和普通时钟 (OC) 模式是, E2E 透明时钟 (E2E TC) 模式。

普通时钟OC

OC (Ordinary Clock) 是网络始端或终端设备, 该设备只有一个 1588 端口, 该端口只能作为 SLAVE 或 MASTER。

边界时钟BC

BC (Boundary Clock) 是网络中间节点时钟设备, 该设备有多个 1588 端口。其中一个端口可作为 SLAVE, 设备系统时钟的频率和时间同步于上一级设备, 其他端口作为 MASTER, 可以实现逐级的时间传递。

(1) BC 的所有端口的本地时钟是相同的;

(2) 每个端口的协议状态机都有一个辅助功能: 分析每个端口状态, 根据所有端口的状态决定来自那个端口的时间信号用来同步本地时钟。

用来同步和建立主从关系的 Announce 报文以及 Signaling 报文中止于 BC 节点, 不会往下透传。管理报文可以通过 BC 的其他端口继续向前传。

透传时钟TC

网络中间透传时钟设备为 TC (Transparent Clock) 设备, 其可分为 E2ETC (END TO END TC) 和 P2PTC (PEER TO PEER TC) 两种:

(1) E2ETC: 该设备实现 1588 报文透传。对于 Event 报文, 计算报文设备内驻留时间, 修正时间戳信息。对于 General 报文, 直接透传。

(2) P2PTC: 该设备实现 1588 报文透传。对于 Event 报文, 通过 Pdelay 协议计算路径延时, 同时计算报文在设备内驻留时间, 修正时间戳信息。对于 General 报文, 直接透传。

TC 方式由于不易控制时间传递路由, 难以控制非对称性, 所以一般在应用中不使用。

3.2.2 时间端口状态

实现 PTP 协议, 各以太网端口可选支持 IEEE1588 时间同步功能, 各启用时间同步功能的端口可工作于 Master、Slave 或 Passive 模式, 任何时候系统最多应只有一个端口工作于 Slave 模式 (可以没有 Slave 端口, 此时本点使用自己的时间源), 所有 IEEE1588 时间同步协议的端口使用本系统同一时间源信息。Slave 端口用于同步到上游设备的绝对时间, 并测量到上游设备 Master 端口的链路时延, 其它启用端口工作于 Master 或 Passive 模式, Master 端口用于向下游设备发布同步时间, Passive 端口不进行任何操作, 既不发布同步时间, 也不同步于对端端口, 除了 Pdelay_Req, Pdelay_Resp, Pdelay_Resp_Follow_Up 消息和信令以及必须响应的管理消息外不发送任何 PTP 消息。

3.2.3 PTP 消息分类

1588V2 协议定义了 PTP event 消息和 general 消息, event 消息是定时消息, 在于发送和接收事件消息时要生成准确的时间戳。general 消息不要求生成准确的时戳。

- Event 消息集包括:
 - a) Sync
 - b) Delay_Req
 - c) Pdelay_Req
 - d) Pdelay_Resp
- General 消息集包括:
 - a) Announce
 - b) Follow_Up
 - c) Delay_Resp

- d) Pdelay_Resp_Follow_Up
- e) Management
- f) Signaling

Sync、Delay_Req、Follow_Up 和 Delay_Resp 消息用于时间戳信息传递，用延迟请求-响应机制来同步 OC 和 BC 设备时需要这些定时信息。

Pdelay_Req、Pdelay_Resp 和 Pdelay_Resp_Follow_Up 消息用于测量两个实现 Pdelay 机制的时钟端口间的链路延时，链路延时用于修正 P2P TC 系统中 Sync 和 Follow_Up 消息中的定时信息，OC 和 BC 通过执行 Pdelay 机制应用测量的链路延时和 Sync 和 Follow_Up 消息中的信息实现同步。

Announce 消息被用来建立同步体系。

management 消息用来查询和更新时钟维护的 PTP 数据集，这些消息也被用来定制一个 PTP 系统、初始化和故障管理。

Signaling 消息用在时钟设备间实现其他用途的通信，比如 Signaling 消息可用于协商在主从时钟间单播消息的速率。

3.2.4 报文发送间隔

连续消息间的平均时间间隔用秒测量，以对数（以 2 为底）方式表示。这个对数属性的值应该从整数范围-128 到 127 之间选择，服从于特定 PTP 模板确定的进一步限制。实际发包间隔的准确率和恢复时间的精度没有必然关系，标准里指出，对于一个节点 90%包，以申明值正负 30%的误差范围内的间隔发送消息即可。

下面列出各种类型的典型发包间隔：

平均 Sync 消息发送间隔：表示为 2^k ，其中 k 的取值范围-1 到 7 的整数。

平均 pdelay 消息发送间隔：表示为 2^s ，其中 s 的取值范围 0 到 4 的整数。

delay_req 消息发送时间间隔：表示为 $2^{(t+k)}$ ，其中 t 的取值范围为 0 到 4 的整数。k 的值即平均 Sync 消息发送间隔中的 k。

平均 Announce 消息发送间隔：表示为 2^n ，其中 n 的取值范围-1 到 4 的整数。

Announce 消息超时时间：表示为 m，其中 m 取值范围为 2 到 10 的整数。

3.2.5 PTP 消息格式

一般消息格式要求

每一个消息都有一个 header, body 和后缀。后缀长度可能为零。保留的字段在传输给接收端时, 所有的 bit 位应该为零并忽略。

所有 PTP 消息通用字头

如表 2 所示。

表 2 通用消息报头

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
transportSpecific 传送相关				messageType 消息类型				1	0
Reserved 保留				versionPTP 版本 PTP				1	1
messageLength 消息长度								2	2
domainNumber 域编号								1	4
Reserved 保留								1	5
flagField 标志域								2	6
correctionField 修正域								8	8
Reserved 保留								4	16
sourcePortIdentity 源端口标识符								10	20
sequenceId 序列号 ID								2	30
controlField 控制域								1	32
logMessageInterval 录入消息周期								1	33

TransportSpecific (Nibble , 4bit) : 指定报文的封装类型。

messageType (Enumeration4, 4bit) : 指定报文类型

表 3 报文类型字段取值

Message type 消息类型	Message class 消息分类	Value (hex) 取值 (16 进制)
Sync	Event	0
Delay_Req	Event	1
Pdelay_Req	Event	2
Pdelay_Resp	Event	3

Message type 消息类型	Message class 消息分类	Value (hex) 取值 (16 进制)
Reserved	—	4-7
Follow_Up	General	8
Delay_Resp	General	9
Pdelay_Resp_Follow_Up	General	A
Announce	General	B
Signaling	General	C
Management	General	D
Reserved	—	E-F

versionPTP (UInteger4, 4bit)：协议版本，当前为第二版。

messageLength (UInteger16, 16bit)：消息长度的值为所有字节长度，Octet 的计数从字头的第一个 octet 到后缀的最后一个 octet。

domainNumber (UInteger8, 8bit)：缺省数据集的 domainNumber 初始值。

Flags (Octet[2], 16bit)：数组的每一位的值在表 4 中定义。下表中没有定义的，其值为 False。

表 4 Values of flagField flagField 取值

Octet	Bit	Message types	Name	Description
0	0	Announce, Sync, Follow_Up, Delay_Resp	alternateMasterFlag	如果发送侧端口处于 MASTER 状态，则为 FALSE。
0	1	Sync, Pdelay_Resp	twoStepFlag	对于一步时钟，twoStepFlag 取值要求为 FALSE。对于双步时钟，twoStepFlag 取值要求为 TRUE。
0	2	ALL	unicastFlag	如果此消息发送到的传送层协议地址是一个单播地址，则置为 TRUE。如果此消息发送到的传送层协议地址是一个多播地址，则置为 FALSE。
0	5	ALL	PTP profile Specific 1	由一个备选 PTP 模板定义；否则置为 FALSE。

Octet	Bit	Message types	Name	Description
0	6	ALL	PTP profile Specific 2	由一个备选 PTP 模板定义；否则置为 FALSE。
0	7	ALL	Reserved	
1	0	Announce	leap61	timePropertiesDS.leap61 的取值
1	1	Announce	leap59	timePropertiesDS.leap59 的取值
1	2	Announce	currentUtcOffsetValid	timePropertiesDS.currentUtcOffsetValid 的取值
1	3	Announce	ptpTimescale	timePropertiesDS.ptpTimescale 的取值
1	4	Announce	timeTraceable	timePropertiesDS.timeTraceable 的取值
1	5	Announce	frequencyTraceable	timePropertiesDS.frequencyTraceable 的取值

CorrectionField (Integer64, 64bit) : CorrectionField 为校正测量的值，以纳秒为单位，乘以 2 的 16 次方，例如，2.5ns 表示为 0x0000000000028000。CorrectionField 的值依赖于表 15 中定义的消息的类型。

sourcePortIdentity (80bit) : 端口配置数据集元素，port_identity 值。

sequenceId (UInteger16, 16bit) : 由发信端分配队列 ID。

control (UInteger8, 8bit) : 控制字段值由消息类型确定，定义见表 5。

表 5 controlField enumeration controlField 枚举

Message type	controlField value (hex)
Sync	00
Delay_Req	01
Follow_Up	02
Delay_Resp	03
Management	04
All others	05
Reserved	06-FF

logMeanMessageInterval (Integer8, 8bit) : 指报文的发送频率，logMeanMessageInterval 字段的值由消息类型确定，定义见下表。

表 6 Values of logMessageInterval field logMessageInterval 字段取值

Message type	Value of logMessageInterval
Announce	数据集中 portDS. logAnnounceInterval 成员取值
Sync, Follow_Up	多播消息中置为数据集 portDS. logSyncInterval 成员取值， 单播消息中置为 7F（16 进制）
Delay_Resp	多播消息中置为数据集 portDS. logMinDelayReqInterval 成 员取值，单播消息中置为 7F（16 进制）
Delay_Req	7F
Signaling	7F
Management	7F
Pdelay_Req	7F
Pdelay_Resp	7F
Pdelay_Resp_Follow_Up	7F

Announce 消息

Announce 消息字段定义如表所示。

表 7 Announce 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
Header 报头								34	0
originTimestamp 源时间戳								10	34
currentUtcOffset								2	44
Reserved 保留								1	46
grandmasterPriority1								1	47
grandmasterClockQuality								4	48
grandmasterPriority2								1	52
grandmasterIdentity								8	53
stepsRemoved								2	61
timeSource								1	63

originTimestamp (Timestamp, 96bit)：公告发送时本地时间估计值。

announceFlags (OctetArray[2], 16bit)：没有用到的标志位接收端认为 0 或者被忽略。

currentUtcOffset, 是 timePropertiesDs.currentUtcOffset 字段的值;

grandmasterPriority1, 是 parentDs.grandmasterPriority1 字段的值;

grandmasterClockQuality, 是 parentDs.grandmasterClockQuality 字段的值;

grandmasterPriority2, 是 parentDs.grandmasterPriority2 字段的值;

grandmasterIdentity, 是 parentDs.grandmasterIdentity 字段的值;

stepsRemoved, 是 currentDS.stepsRemoved 字段的值;

timeSource, 是 timePropertiesDs.timeSource 字段的值;

Sync 及 Delay_req 消息

表 8 Sync 和 Delay_Req 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
Header 报头								34	0
originTimestamp 源时间标签								10	34

OriginTimestamp (Timestamp,96bit): OriginTimestamp 字段在 header 字段后, 为精准时间戳。

Follow_Up 消息

表 9 Follow_Up message fields Follow_Up 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
Header 报头)								34	0
preciseOriginTimestamp 精确源时间标签								10	34

preciseOriginTimestamp (Timestamp,96bit): preciseOriginTimestamp 字段在 header 字段后, 为精准时间戳。

Delay_Resp 消息

表 10 Delay_Resp 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
Header 报头)								34	0
receiveTimestamp 接收时间戳								10	34

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
requestingPortIdentity 请求端口标识								10	44

receiveTimestamp, 报文接收时的时间;

requestingPortIdentity, 延时请求报文中携带的 sourcePortIdentity

Pdelay_Req 消息

表 11 Pdelay_Req 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
Header (see 13.3) 报头 (参见 13.3)								34	0
originTimestamp 源时间戳								10	34
Reserved 保留								10	44

OriginTimestamp, 报文发送时的时间

对等延时应答 (pdelay_resp) 报文

表 12 Pdelay_resp 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
header (see 13.3)								34	0
requestReceiptTimestamp								10	34
requestingPortIdentity								10	44

requestReceiptTimestamp, 请求报文到达时的时间;

requestingPortIdentity, 请求报文中携带的 sourcePortIdentity

对等延时应答跟随 (pdelay_resp_follow_up) 报文

表 13 pdelay_resp_follow_up 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
header (see 13.3)								34	0
responseOriginTimestamp								10	34
requestingPortIdentity								10	44

ResponseOriginTimestamp, 请求报文到达时间;

requestingPortIdentity, 请求报文中对应的 sourcePortIdentity

信号 (signaling) 报文

表 14 signaling 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
header (see 13.3)								34	0
targetPortIdentity								10	34
One or more TLVs								M	44

该类型的消息报文在时钟之间交互，主要用于单播频率协商等。

管理消息（management）报文

表 15 management 消息字段

Bits								Octets	Offset
7	6	5	4	3	2	1	0		
header (see 13.3)								34	0
targetPortIdentity								10	34
startingBoundaryHops								1	44
boundaryHops								1	45
reserved				actionField				1	46
reserved								1	47
managementTLV								M	48

管理消息用于管理和更新数据集。

3.2.6 PTP 消息传输承载类型

3.2.6.1 UDP over IPV4 封装方式

PTN 设备对 PTP 消息也可通过 IP 报文发送。此时报文的封装格式遵循 IEEE 1588-2008 Annex D 的规则，即通过 UDP/IPv4 报文进行封装，如图所示。PTP 报文使用的 UDP 协议端口号如表 1-xx 所示。当 PTP 消息通过 IP 组播方式发送时，组播地址的分配如表所示。

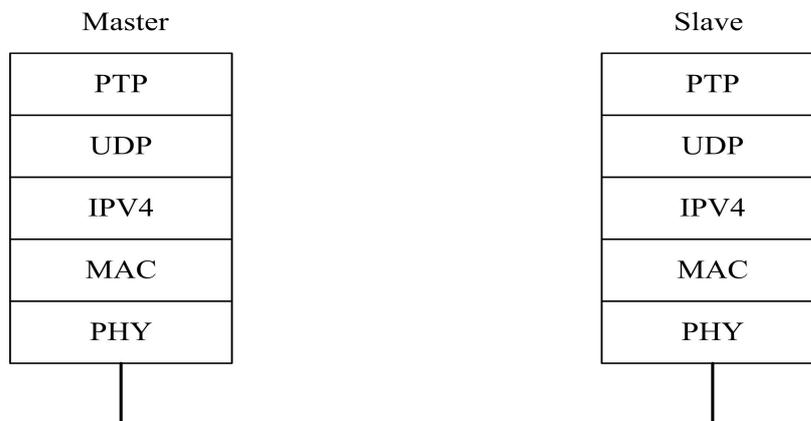


图 10 UDP/IPv4 报文封装

表 16 UDP 协议端口号

PTP 消息类型	UDP 端口号
事件消息	319
组播一般消息	320
单播一般消息	320

表 17 组播地址的分配

IANA 分类名	PTP 消息类型	地址
PTP-primary	所有非 Peer delay 机制消息	224. 0. 1. 129
PTP-pdelay	Peer delay 机制消息	224. 0. 0. 107

协议地址

基于 UDP over IPV4 的 PortAddress 类型 addressLength 长度为 4；addressField 表示为 16 进制 8 位位组，例如 IPV4 地址 207. 142. 131. 235 表示为 CF8E83EB（16 进制）。

3.2.6.2 IEEE Std 802.3/Ethernet

承载设备支持对 PTP 报文采用 IEEE 1588 - 2008 Annex F 的封装方式，即 PTP 报文直接封装到 IEEE 802.3 以太网帧。如图所示。以太网类型值 Ethertype 为 x88F7。以太网帧使用如表 1 所示的目的 MAC 地址。



图 11 IEEE 802.3 以太网帧报文封装

表 18 IEEE 802.3 以太网帧地址

PTP 消息类型	地址
所有非 Peer delay 机制消息	01-1B-19-00-00-00
Peer delay 机制消息	01-80-C2-00-00-0E

PTN 设备应能支持基于 802.1Q 的具有 VLAN 格式以太网封装，封装格式如图所示。PTP 消息

可以实现基于 VLAN 的转发，可配置的 VLAN ID 范围为 1-4094。

表 19 IEEE 802.3 以太网帧的 VLAN 封装

DA	SA	Ethertype	PTP	CRC		
DA	SA	Ethertype =x8100	VID	Ethertype =x88F7	PTP	CRC

3.2.7 FlexE 接口

PTP 报文通过 FlexE 开销方式承载，FlexE 开销帧结构中第 6 行的完整 66B block 用于同步报文填写，采用 FlexE 复帧方式对 PTP 报文进行传输。FlexE 开销帧结构第 1 行 66B block 中的 Synchronization Configuration(SC)比特用于指示该 FlexE PHY 是否支持同步信息传送。

FlexE Group 支持绑定多个物理 PHY 层链路，PTP 报文在 FlexE Group 的第一个物理 PHY 的开销中进行传递，SC 比特默认设置为 1（支持同步传送）。当检测到用于传输同步信息的 PHY number 号为一的物理 PHY 链路失效时，将所述同步信息按照原 FlexE Group 链路编号顺序依次倒换至其他 PHY 链路进行传输，倒换至的 PHY 链路将 SC 比特设置为 1。当原 group PHY number 号为一的物理 PHY 链路恢复正常时，同步信息倒换回第一个物理 PHY 链路传送。同步信息通过同一个 FlexE Group 中不同物理 PHY 链路传送时，同步信息中携带的源端口 ID 应填写一样的数值。

频率同步 SSM 倒换回第一个物理 PHY 链路时，WTR 的设置规则应满足 ITU-T G.781 中相关规定。在发生多次倒换时，WTR 应独立设置。在倒换回第一个物理 PHY 链路的 WTR 期间，第一个 PHY 链路应首先恢复传送 SSM 信息。

在 FlexE 开销中传送的 PTP 报文应支持完整的以太网封装方式，包括前导码和 MAC 封装。

PTP 时间戳以 PTP 报文前导码所在的 FlexE 复帧开销的帧头经过打戳平面时的时间作为 PTP 时戳。如果 FlexE 接口一个物理 PHY 内部如果存在多个 Lane，PTP 报文打戳需要多 Lane 之间的延时对齐，以延时最长（最晚到达）的 Lane 的 PTP 时戳为准。

3.2.8 BMC 算法

IEEE 1588v2 定义了标准时间选源算法，ITU-T Q13 标准组织为了使其更符合电信使用要求，支持部署多时间源，在 G. 8275.1 标准里在标准 BMC 基础上扩展形成了扩展 BMC 算法。

两种算法的基本模型都相同，承载设备通过 Announce 报文，提取时钟源属性，用 BMC 算法计算出最佳时钟源属性信息，提供给 1588 协议状态机处理模块进行处理，并同时产生并输出和本网元相符的 Announce 报文给下游站点；通过逐级节点的处理实现时钟节点树，完成整个网络的选源控制。对于单个时钟节点来说，这个过程按照下面几个步骤来建立：

- 接收和认证来自其它端口的 announce 报文。
- 利用 BMC 算法决策出端口的推荐状态。

BMC 算法本身由两部分组成的：状态决定算法和数据集比较算法。状态决定算法用来选择完成后确定每个 port 的推荐状态（Master、Slave、Passive），最终实现数据集的更新，数据集比较算法用来计算两个相关时钟端口数据集的比较关系。

- 根据端口决策算法中进入推荐状态的决策点完成端口数据集的更新。

各个 PTP 端口使用状态决策算法决策出一个数据集更新类型，使用这些更新类型，更新相关的协议数据集内容。

- 按照推荐状态和“状态决策事件”，根据端口状态机，决定端口的实际状态，建立主从关系。

IEEE 1588v2 的 BMC 算法和 8275.1 的算法两种处理逻辑有一些区别：

标准 BMC：先判断 GM ID（时间源的标识号）是否相同，如果不相同判断 GM（时间源）优先级 1、GM 质量等级、精度、优先级 2 的信息，GM ID，然后进行跳数、节点 ID（节点的标识号）、端口信息比较；如果 GM ID 相同，则不比较 GM 比较流程，直接根据跳数、节点 ID、端口信息进行判断。

扩展 BMC（G. 8275.1）：先判断 GM 质量等级、精度和优先级 2 的信息，再比较本地优先级，当 clockclass 等于或优于 127 时，后续根据跳数、节点 ID、端口信息进行判断，否则根据 GM ID 选择。

如果 GM 优先级 2 配置不一样（优先级 1 配置一样，优先级 1 扩展算法不使用），两种方法都可以跟踪到全网唯一 GM 优先级 2 最高的源。

扩展 BMC 算法特殊处：如果优先级 1 和优先级 2 配置一样，可以实现多源时源部署，节点跟踪最近的时间源。

标准 BMC 和扩展 BMC 可以兼容，在网络中共存。

标准 BMC 中国移动在 PTN/SPN 设备上使用，其他运营商多数采用 ITUT 的扩展 BMC 算法。

中国移动 SPN 对标准 BMC 协议进行扩展，通过算法中引入累计设备精度，形成精度加强 BMC 算法，精度加权算法为新老不同精度的设备混合组网提供了优选方案，可以实现与普通协议设备对接。

算法处理逻辑如下：

若多个端口接收而来的 GM ID 不同时：

- (1) 先比较报文中的优先级 1，收到较小值的则为 SLAVE 端口。若两者相同，则比较时钟精准级别较小值为 SLAVE 端口；
- (2) 再比较报文优先级 2；同样较小值为 SLAVE 端口。
- (3) 以上比较相同情况下，则比较两个 GM ID 的大小，接收到较小值的为 SLAVE 端口。

若多个端口接收而来的 GM 为同一个 GM ID：

- (1) 比较级联精度，级联精度较小的端口为 SLAVE 端口；
- (2) 比较跳数多少，接收报文跳数少的那个端口则为 SLAVE 端口；
- (3) 若跳数相同，则比较与本节点相连的 PTP 节点的 ID 大小，ID 小的 PTP 节点所对应的本节点的端口为 SLAVE 端口。

3.2.9 1588 时间校正

同步过程：

1588 实现的基本原理

IEEE 1588 (PTP) 通过协议报文的应答实现主从时间同步，1588 的协议实现过程如图 6 所示。

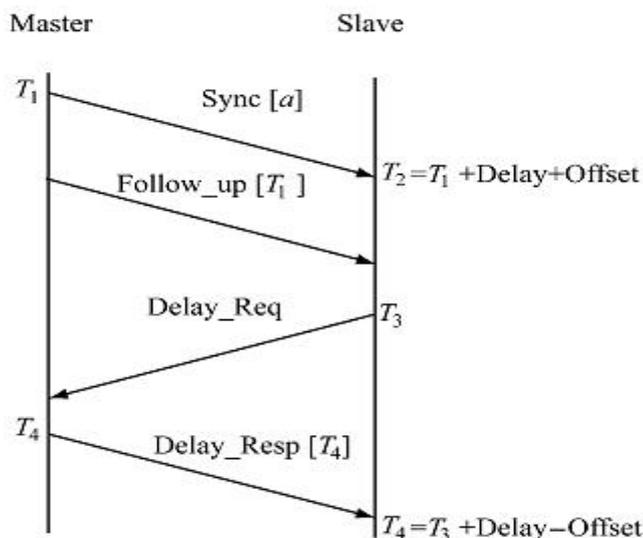


图 12 1588 的协议实现

Master 端口周期性的发送 Sync 消息，并响应对端 Slave 端口的 Delay_Req 消息；

Slave 端口根据对端 Master 端口的 Sync 消息启动协议，在一定时间内都未能完成一次正常的流程，上报对端 Master 不可用告警，并根据端口状态选择算法且选 Slave 端口。Slave 端口应能统计正常协议运行次数，异常中断协议次数以及 Sync 消息超时、Follow_up 消息超时以及 Delay_Resp 消息超时次数。支持两步协议。一步协议可选

具体步骤如下：

源端 Master 端口等待 Sync 消息发送周期到，当发送周期到，发送 Sync 报文。对于一步协议 Sync 报文中的时戳是精确的发送时间。对于两步协议 Sync 报文中的时间标签是个粗略的估算值。

如果是两步协议，Sync 报文发送后，发送 Follow_up 消息，消息报文中的时戳是 Sync 的精确发送时间；宿端 Slave 端口接收到 Sync 消息，记录接收到报文的时间 T2。

如果是一步协议则提取 Sync 报文中的时戳为 T1。

如果是两步协议，宿端 Slave 端口接收到 Follow_up 消息，提取 Follow_up 消息中的时戳为 T1。

宿端 Slave 端口等待 Delay_Req 发送周期到，当发送周期到，发送 Delay_Req 报文，并记录发送报文的精确时间 T3；

源端 Master 端口接收到 Delay_Req 消息，记录接收到 Delay_Req 消息的时刻 T4。源端 Master 端口产生 Delay_Resp 消息，报文中填写前面 Delay_Req 消息的接收时刻 T4 时戳。

宿端 Slave 端口接收到 Delay_Resp 消息并提取 Delay_Resp 消息中的 T4 时戳。

宿端 Slave 端口软件根据： $T2=T1+Delay+Offset$ $T4=T3+Delay-Offset$ 两个公式计算 Delay 和 Offset，分别代表链路时延和时间偏差

宿端 Slave 端口软件根据 Offset 调整 FPGA 中绝对时间值。

3.2.10 时间同步过程

时间同步网的建立，需要满足网络里所有节点为 ptp 节点，支持 OC 或 BC

时间同步网的实现主要包括以下两个方面：

通过 SSM 算法建立频率同步网；

通过 BMC 算法建立时间同步网。

时钟同步网络以物理同步方式为优选。

3.3 智能时间网

在 4G 时期大规模时间网建设暴露的主要问题是时钟网规划复杂，配置效率不高，故障定位困难。为了解决规模部署的问题，逐步发展出智能时间网综合解决方案，其核心思路是核心汇聚环部署单纤双向，接入网采用基站回送 GNSS 信号，网络分割，利用大数据和 AI 技术实现有效管控。

3.3.1 自动规划

自动规划，根据物理拓扑和网元时钟同步属性，自动计算和规划所有或指定区域内网元的主备用时钟同步拓扑，根据规则解决时钟时间配置，消除新老不同设备差异性问题的自动优选，例如，建网优先单纤双向路径。

自动更新，根据变化后的拓扑自动对变化的网络区域重新进行同步规划及配置，以实现最小变更，对网络其他区域的已有同步配置不受影响。

这样的步骤高效简易，配置简单，减少建网规划的复杂度，以降低人为的出错。

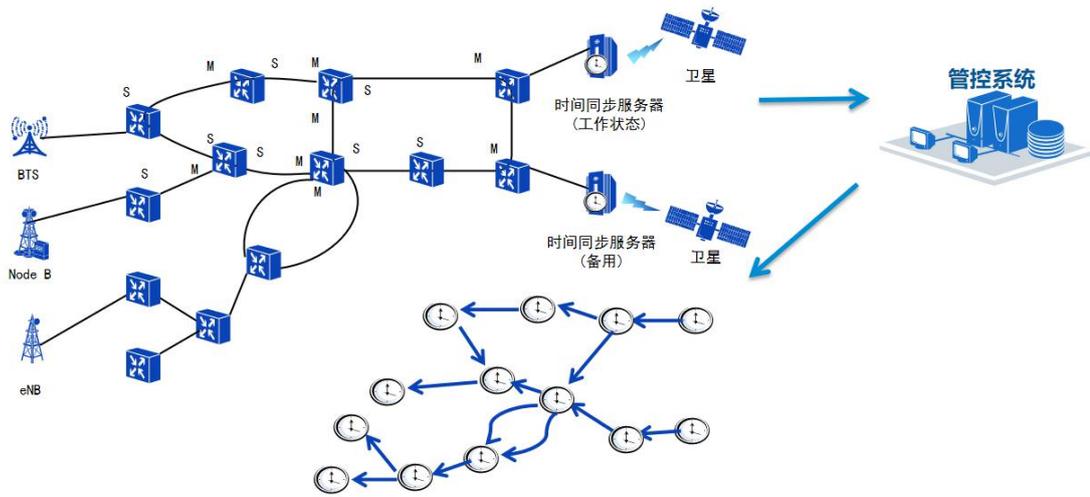


图 13 自动规划

3.3.2 时间网络分割

时间网的组网算法由适应 MESH 结构的 BMC 算法动态实时生成，如果为了加快故障定位，约束故障涉及范围，可以将网络根据等级划分片区。

分割时间网，可以使用下沉时间源到汇聚接入网交汇处，物理上实现多源多区域划分，也可以通过逻辑上将网络切分，将一些承载节点抽象成虚拟时间源注入点。

网管控制器根据节点所处的网络层次，将时间网分为核心汇聚、普通汇聚、接入环时间环。不同层级间单向授时，授时的方向为核心汇聚→普通汇聚→接入环时间环，处于较低层次的环路不能向高级环路授时，实现接入环间故障隔离。每个层次的故障及影响范围明确，易于手动 BMC 算法快速隔离故障区域。

3.3.3 单纤双向时间传递技术

承载网汇聚环以上设备部署，存在长距，OTN 和分组设备共存的情况，时间精度直接影响下游接入环精度，利用专用链路采取 GE/10GE 单纤双向光模块组建汇聚层以上专用时钟时间环，可以减少光纤不对称导致的时延偏差，也能规避相干光模块引入的不确定误差，在增强稳定性的同时，也保证了 OTN 和分组设备同方案的对接。



图 14 典型的建网方案

引入单纤双向后，就需要考虑经过长距离不同波长在光纤中传输的时延差：

以 GE 40km 光模块方案为例，IEEE 标准定义激光器波长范围 1310nm~1490nm，1310nm 和 1490nm 窗口色散系数不同，如果采用 G. 652 光纤，对应传输时延差为 $\pm 1.28\text{ns/km}$ ，40km 的传送将引起 $\pm 25.6\text{ns}$ 的时间差。因而，采用单纤双向光模块组网，如果没有进行补偿，在不适当的匹配关系下，现网波长累积带来的时间误差就不能忽略。

由于波长和时延是线性关系，在已知波长的情况下，可以通过自动估算时延推算时延偏差，从而降低波长偏差带来的误差。

3.3.4 基站时间回送承载网

无线基站主要采用 GNSS 和 1588V2 地面同步技术实现空口时间同步。

为保证同步性能的稳定可靠，基站通常同时开通两种技术，相互之间形成保护。通过将基站 GNSS 获取的时间与 1588 获取的时间差值回传给接入层承载设备，并上报给承载网管控制器系统。

控制器可以根据上下游各站点的数据进行分析，从而推断出基站或承载的性能，更能进一步进行故障根源性确定。

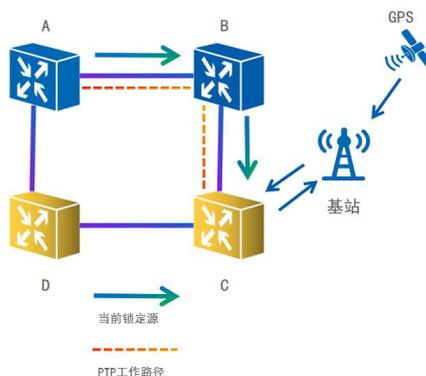


图 15 基站回送时间

基站回送的卫星与承载设备的比对信息，提供了基站相对于地面授时的绝对偏差，承载接入设备根据自身收到的多个基站及上下游节点获取的信息，可以推算当前设备的时间的可信度。

由于基站回送的卫星与承载设备的比对信息是绝对偏差，可以作为重要的智能故障诊断特征，与其它时钟时间告警、配置和性能数据，共同组成智能故障诊断的特征数据，用于计算网络中非接入 GNSS 设备的状态。

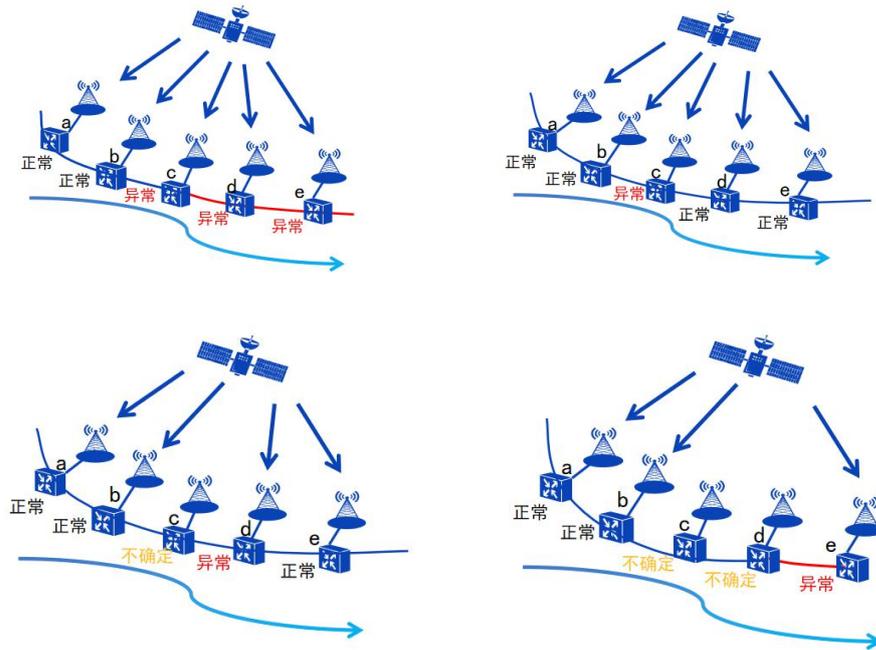


图 16 故障诊断实例

3.3.5 时钟时间智能故障诊断

时钟时间智能故障诊断，主要包括时钟时间网故障识别、时钟时间故障位置的确定和故障根因的确定，其基本思路是网管控制器利用时钟时间相关的配置、告警和性能数据，进行大数据分析，基于 AI 技术进行智能故障诊断。

3.3.5.1 时钟时间网故障识别

时钟时间网故障识别，主要基于采集到的时钟时间网拓扑结构，以及各网元节点的时钟和时间类配置、告警和性能特征数据，基于 AI 技术识别时钟时间网是否存在故障。

为了完成时钟时间网的故障识别，首先，需要采集已标注的时钟时间网样本数据，并将其转换为训练样本集；然后，需要建立相应的 AI 模型；最后采用训练样本集训练模型，从而让模型具备时钟时间网故障识别的能力。

3.3.5.2 故障位置的确定

故障位置的确定有两种技术方案，一种是基于故障依赖关系图+规则的故障位置定位技术，另一种是基于图神经网络的故障位置定位技术。

1. 基于故障依赖关系图+规则的故障位置定位

该方案首先需要基于现网时钟时间配置以及时钟和时间实际路径，建立故障依赖关系图。当需要进行故障位置定位时，基于已建立的故障依赖关系图进行搜索，根据节点判断规则，找出存在异常的实体点状态过滤法：只有当前实节点，通常位于依赖关系最底层的异常实体节点，

就是要确定的故障位置。具体搜索算法有两种：

节点遍历法：无论当前实体节点状态正常或异常，均通过故障依赖关系进行搜索，直到将所有节点遍历。

节点状态异常时，才继续沿故障依赖关系向下搜索，如果该节点状态正常，则终止该路径的搜索。

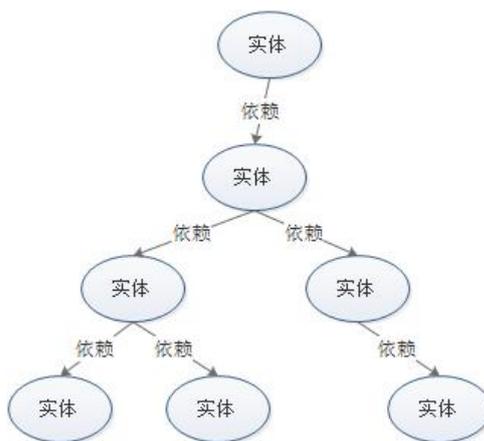


图 17 故障定位

2. 基于图神经网络的故障位置定位

图神经网络的基本思想，就是用周围相邻节点来编码中心节点，通过周围节点的特征向量传播出自己的 Embedding。因此，可以利用图神经网络技术的这种特点，将其应用于故障定位的应用场景。在故障定位时，利用图神经网络技术，不仅利用了自身节点的特征信息，还充分利用了周围相邻节点的特征信息，故障特征信息利用更充分，故障定位准确率更高，效果更好。

为了实现基于图神经网络的故障位置定位，首先，需要对故障定位的场景进行抽象定义，将故障位置定位问题转换为图神经网络的节点分类问题；其次，需要建立一个端到端的基于图神经网络的节点分类模型；然后，需要采集时钟时间网已标注的样本数据，并将其转换为训练样本集，对已建立的基于图神经网络的故障定位模型进行训练，从而具备故障位置定位的能力。

3.3.5.3 故障根因的确定

时钟时间故障根因的确定主要基于故障传播有向图+贝叶斯网络的技术方案，基于故障传播有向图找到所有疑似故障根因，基于贝叶斯网络找到疑似故障根因的概率。

首先，需要基于已标注的故障样本数据通过关联算法学习到故障传播关系，或者借助运维专家的知识经验，建立故障传播有向图。然后，基于故障传播有向图按一定的规则生成对应的贝叶斯网络，并基于已标注的故障样本数据进行训练。

当需要确定故障根因时，首先采集时钟时间网的故障特征数据，依据故障传播有向图，找到所有疑似故障根因节点。然后，将对应的故障特征数据作为证据，将所有疑似故障根因节点作为要推理的变量，基于对应的贝叶斯网络计算出疑似故障根因节点的概率。

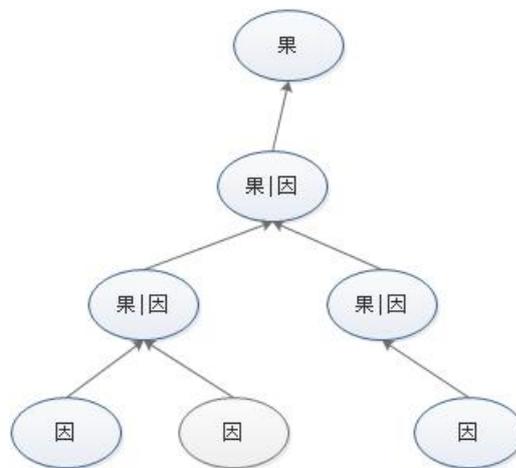


图 18 故障根因分析

4 总结

时钟时间技术是通讯网的底层支撑技术，为移动通讯网基于时间片的调度及量化时延的应用提供保障。时钟网已经有数十年稳定运营的历史，规模时间网近年来也趋于成熟。中国三大运营商的时间网建设是世界上最大规模的同步网建设，由于同步设备数量巨大，时间网的可靠性是巨大挑战，其建设完成，将对我国的授时体系的安全性提供重要的保障。

5 缩略语

AIS	Alarm Indication Signal	告警指示信号
ADEV	Allan DEVIation	阿伦方差
BC	Boundary Clock	边界时钟
BMC	Best Master Clock	最佳主时钟算法
CES	Circuit Emulation Services	电路仿真服务
E2E	end-to-end	端到端
EEC	Synchronous Ethernet Equipment Clock	同步以太网设备时钟
ESMC	Ethernet Synchronization Messaging Channel	以太网同步信息通道
FCS	Fame Check Sequence	帧校验序列
FE	Fast Ethernet	快速以太网
GE	Gigabit Ethernet	千兆比特以太网
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统
ID	Identification	标识符
IPv4, IPv6	Internet Protocol version 4 / 6	网络协议 4.0/6.0
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气和电子工程师学会
IWF	Inter-Working Function	互通功能
MAC	media access control	媒体存取控制
MTIE	Maximum Time Interval Error	最大时间间隔误差
NTP	Network Time Protocol	网络时间协议
OC	ordinary clock	普通时钟
P2P	peer-to-peer	对等
PDV	Packet Delay Variation	包时延抖动
PHY	physical layer	物理层
PPS	pulse per second	秒脉冲
PTP	Precision Time Protocol	精确时间协议
QL	Quality Level	质量等级
SSM	Synchronisation Status Message	同步状态消息
TAI	International Atomic Time	国际原子时间
TC	Transparent Clock	透明时钟
TDEV	Time DEVIation	时间偏差
TDM	Time Division Multiplexing	时分复用
TLV	type, length, value	类型、长度、内容
TOD	Time of Day	日时间

UDP/IP	User Datagram Protocol	用户数据报文协议
UTC	Co-ordinated Universal Time	通用协调时间