



# 通过MEMS时钟解决方案增强5G系统性能

网络研讨会

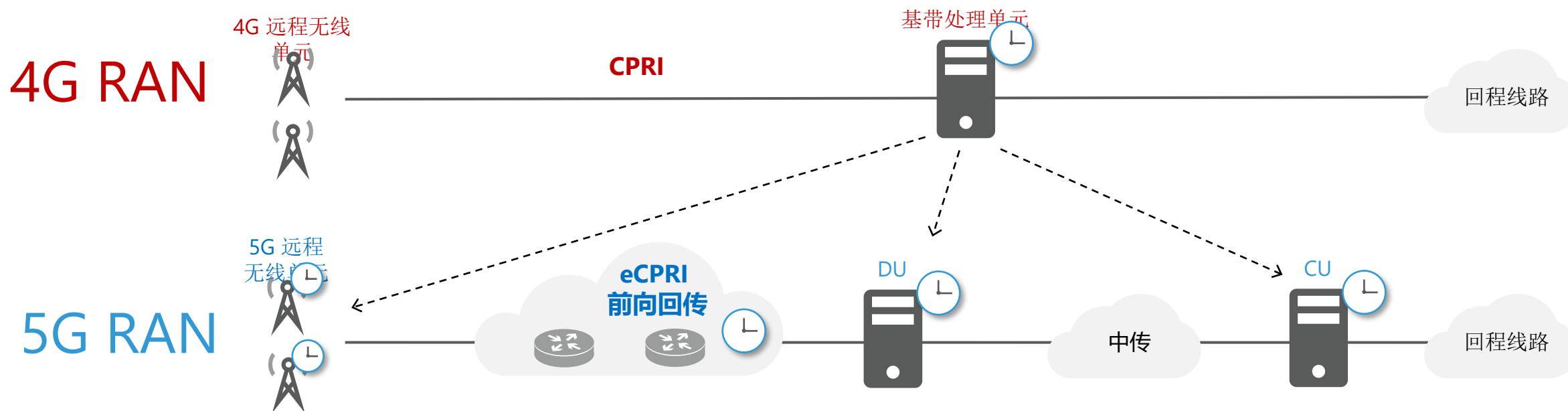
Jeff Gao  
高级市场总监

David Hsieh  
亚太区销售副总

Tommy Lin  
深资客户端应用经理

Ben Huang  
大联大品佳集团产品经理

# 5G RAN的挑战：以太网前回传（Fronthaul）上的时间同步



- 5G 无线接入网功能分散化和虚拟化, BBU分为三个功能单元
  - RU (远程无线单元)、DU (分布式单元)、CU (集中单元)
- 打造基于以太网的前向回传, eCPRI成为标准
- 通过eCPRI支持10倍严格时钟要求, 难以满足要求
  - 最低65纳秒, 在环境压力下 (热、振动等)

使用案例	RU-RU时间协调
MIMO, TX多样性	65 ns
载体聚合 - 相邻	130 ns
载体聚合 - 非相邻	260 ns



# 5G采用时钟来源组合实现同步

- SyncE, IEEE1588通常用于混合模式以确保最佳时间精度
- GNSS通常用于分布式单元（DU），以支持前向回传的Grand Master (GM) 功能

频率/时间源	频率同步	时间同步	挑战
IEEE 1588V2 精准时间协议(PTP)	√	√	准确度受网络拓补和负载条件影响
同步以太网(SyncE)	√	-	没有时间信息，常用来支持时间发现
全球导航卫星系统(GNSS)	√	√	长期准确，容易出现拥堵，也受天气和欺诈攻击影响



# 时间同步要求高精度振荡器和网络同步器

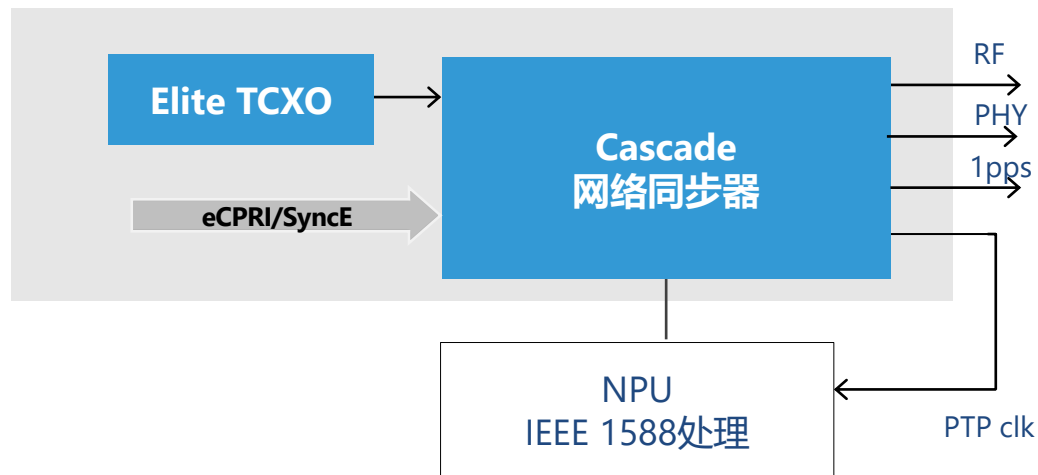
## 远程无线单元（RU）的MEMS时钟树

### • 远程无线单元（RU）时钟特点

- 遵守IEEE1588精确时间协议
- SyncE可选，取决于使用案例
- 仅限时钟恢复，无holdover
- 户外，高振动环境

### • 振荡器选择：TCXO

- 主要特性：抗高温、抗振动



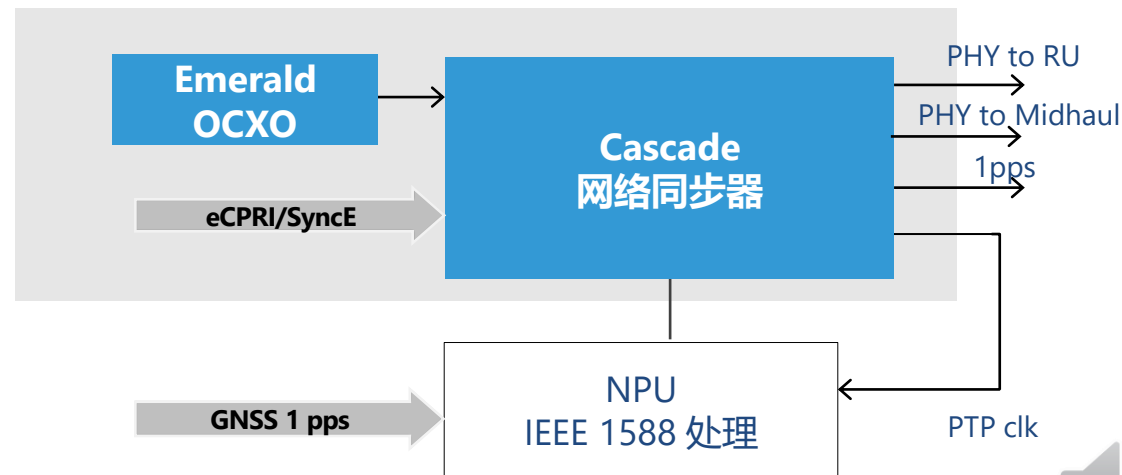
## 分布式单元（DU）的MEMS时钟树

### • 分布式单元（DU）时钟特点

- IEEE1588精确时间协议边界时钟 (控制或遵守)
- 1 pps, syncE (Northbound)
- 需要Holdover，通常为4到8小时
- 可用于户外，高振动环境

### • 振荡器选择：OCXO

- 主要特性：实际工作条件中的holdover



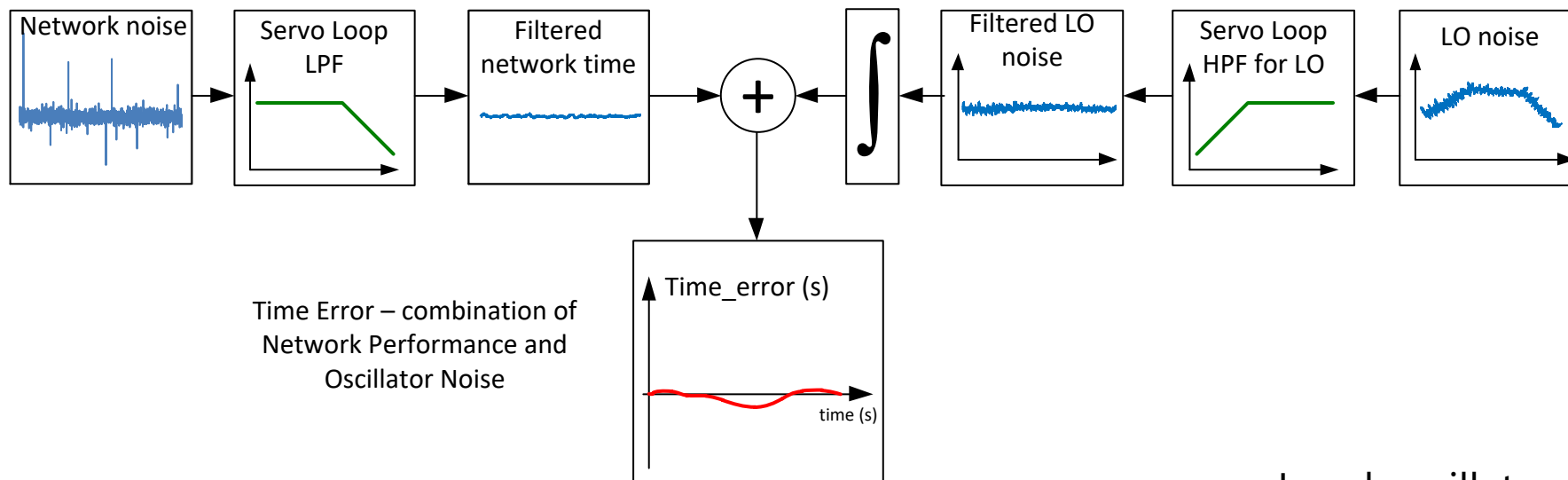
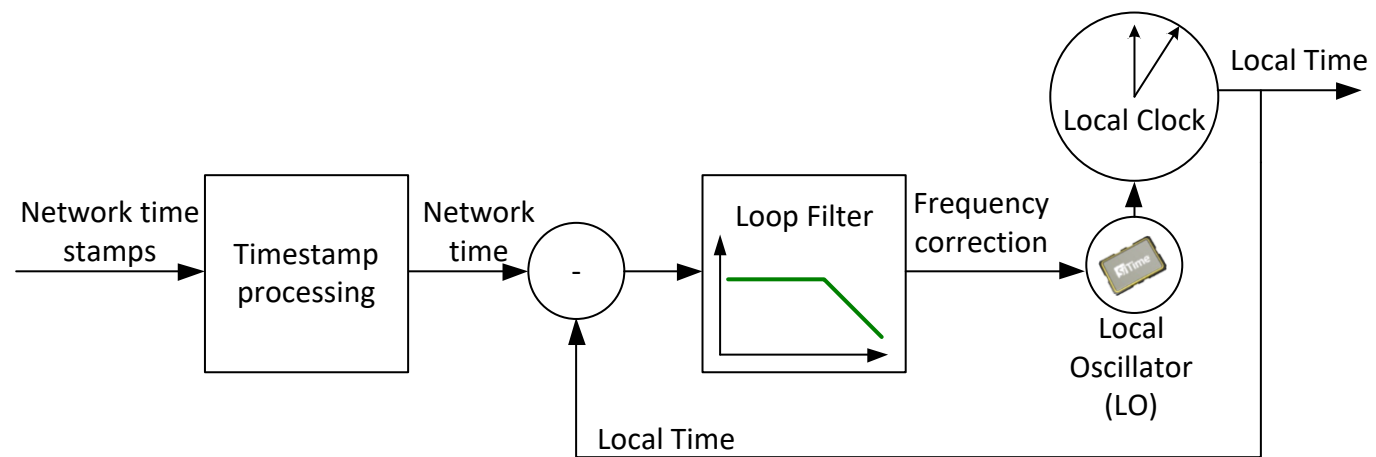
# 振荡器的稳定性以及对时间同步的影响

- 热条件对5G系统的时钟精度和守时保持影响最大
- 频率斜率或 $dF/dT$ 测量频率变化是由于温度小幅变动引起的，这对时钟精度和守时保持都非常重要

精确振荡器参数	时钟恢复	Holdover	系统影响
初始容限(ppb)	×	×	无影响，调教出去
不同温度下的频率稳定性(ppb)	-	-	用作 $dF/dT$ 代理
<b>频率斜率(<math>dF/dT</math>, ppb/°C)</b>	√	√	<b>最重要，因为热条件是影响精度的最主要因素</b>
<b>日老化 ppb/day</b>	×	√	<b>对保持(holdover)非常重要，可补偿</b>
长期老化（最长20年） ppb	×	×	无影响，可校准
Wander (游移)	√	√	频率随机变化，本底噪声可实现的最佳时间精度

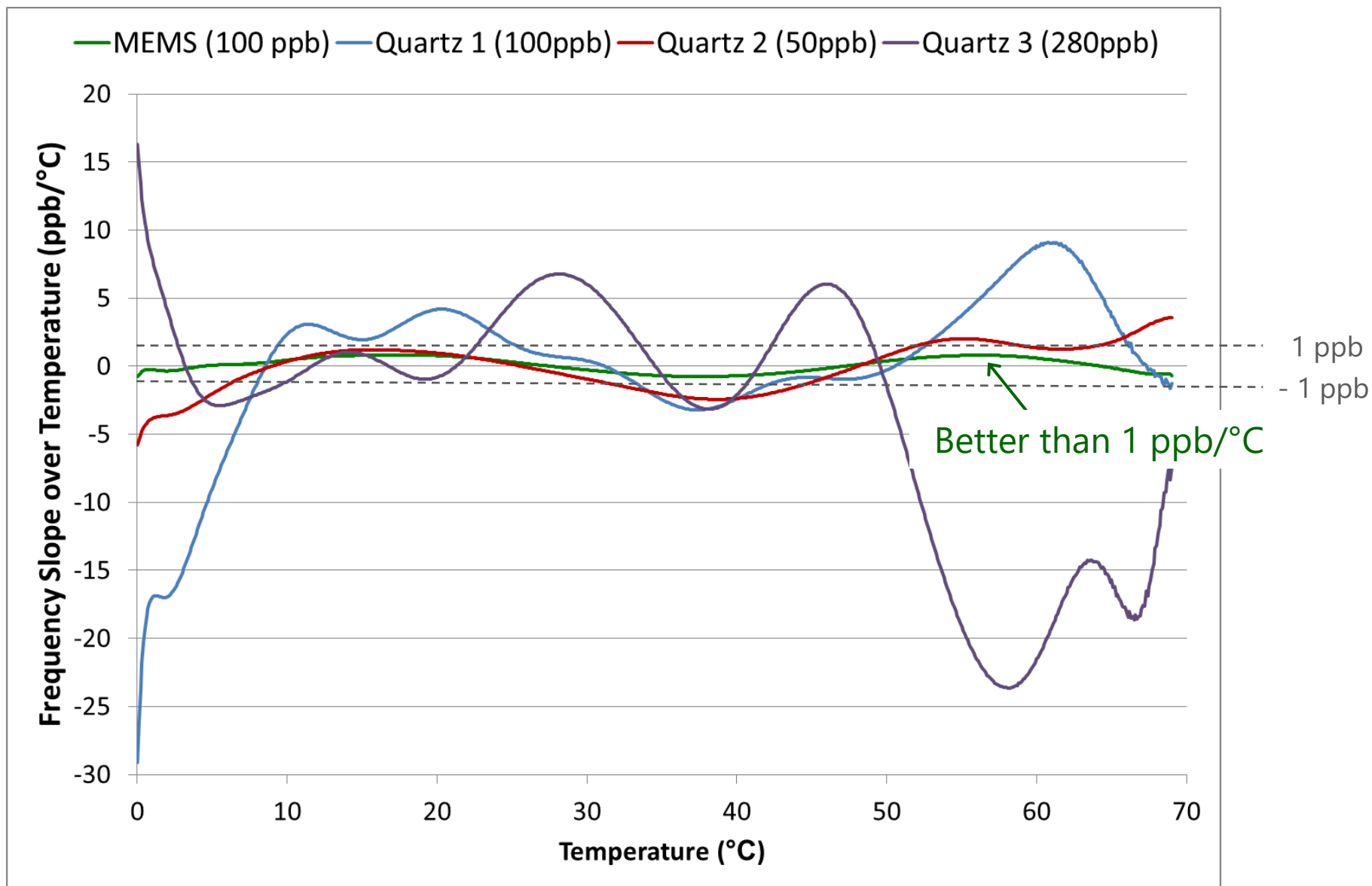


# 建模振荡器噪声和伺服系统对PTP时间误差的影响

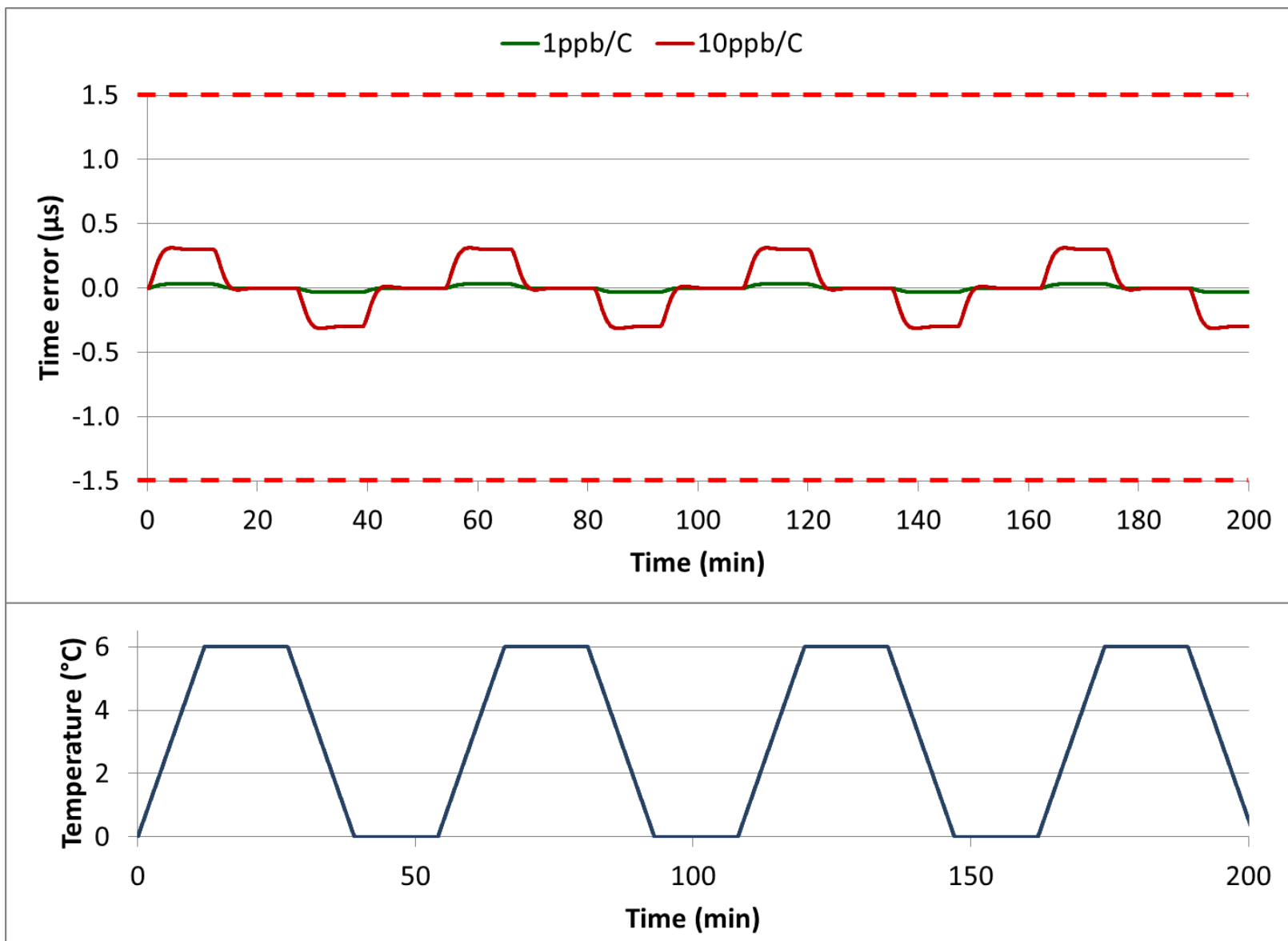


Local oscillator (LO): 本地时钟

# MEMS 对比石英 TCXO dF/dT 性能

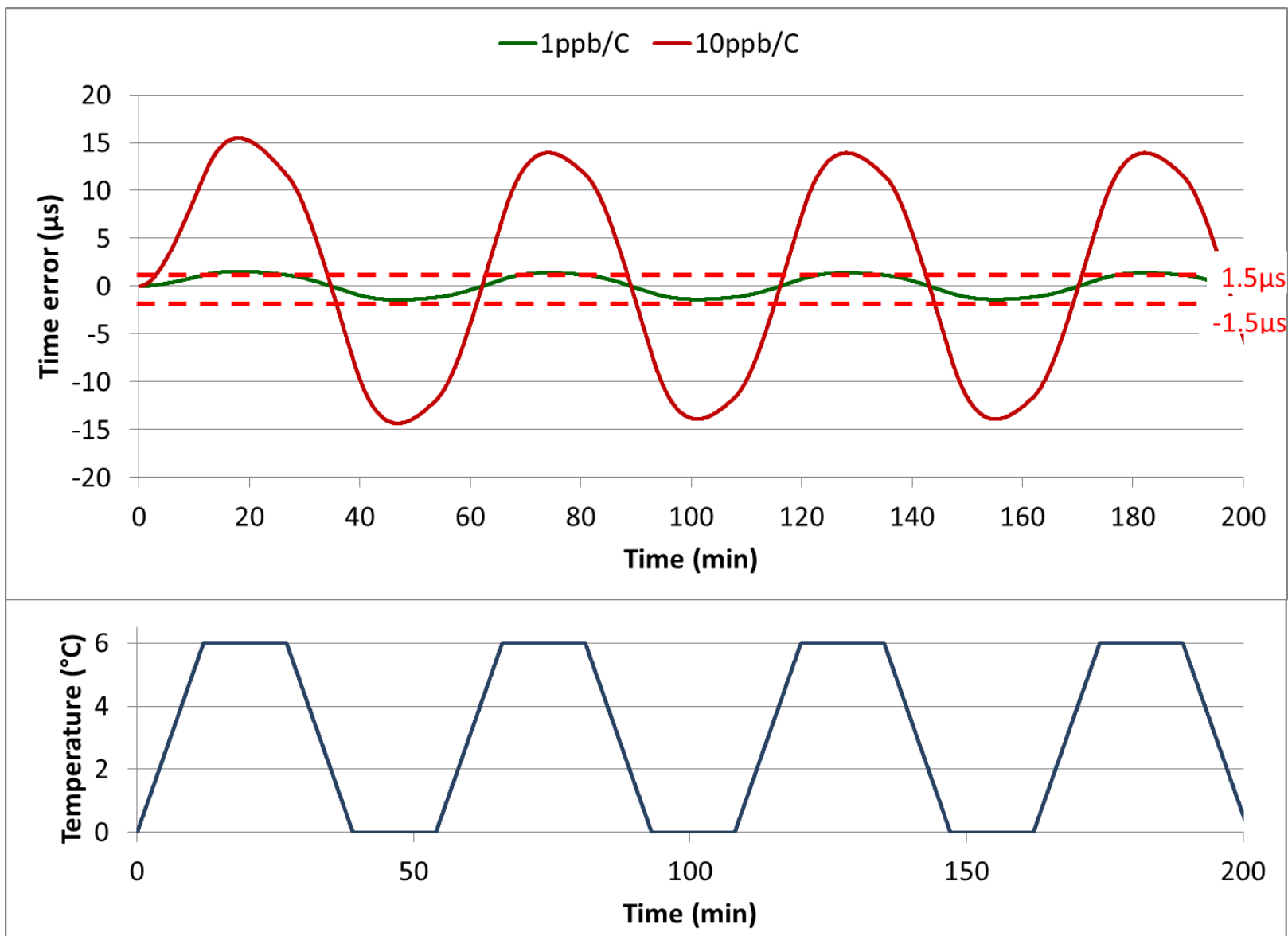


# 1 ppb/°C 和 10 ppb/°C TCXO 的PTP时间误差 (时间常量 = 1分钟)





# 1 ppb/°C 和 10 ppb/°C TCXO 的PTP时间误差 (时间常量 = 10分钟)



# 守时保持的定义

- 时钟输出不再反映连接外部参照的影响就会出现守时保持 [1]
- “守时保持”的两个常见使用案例
  1. **频率**守时保持是指系统丢掉参照时钟锁定后一定时间内与平均频率（单位为ppm）之前的最大频率偏差。
  2. **相 (或时间)** 守时保持 是指系统失去参照时钟锁定后相对于参照时钟所累积的时间误差。
- 时间守时保持与5G RAN的时间同步关系最密切
  - 通常定义为每4、6、8、12、24小时内1.5 微秒

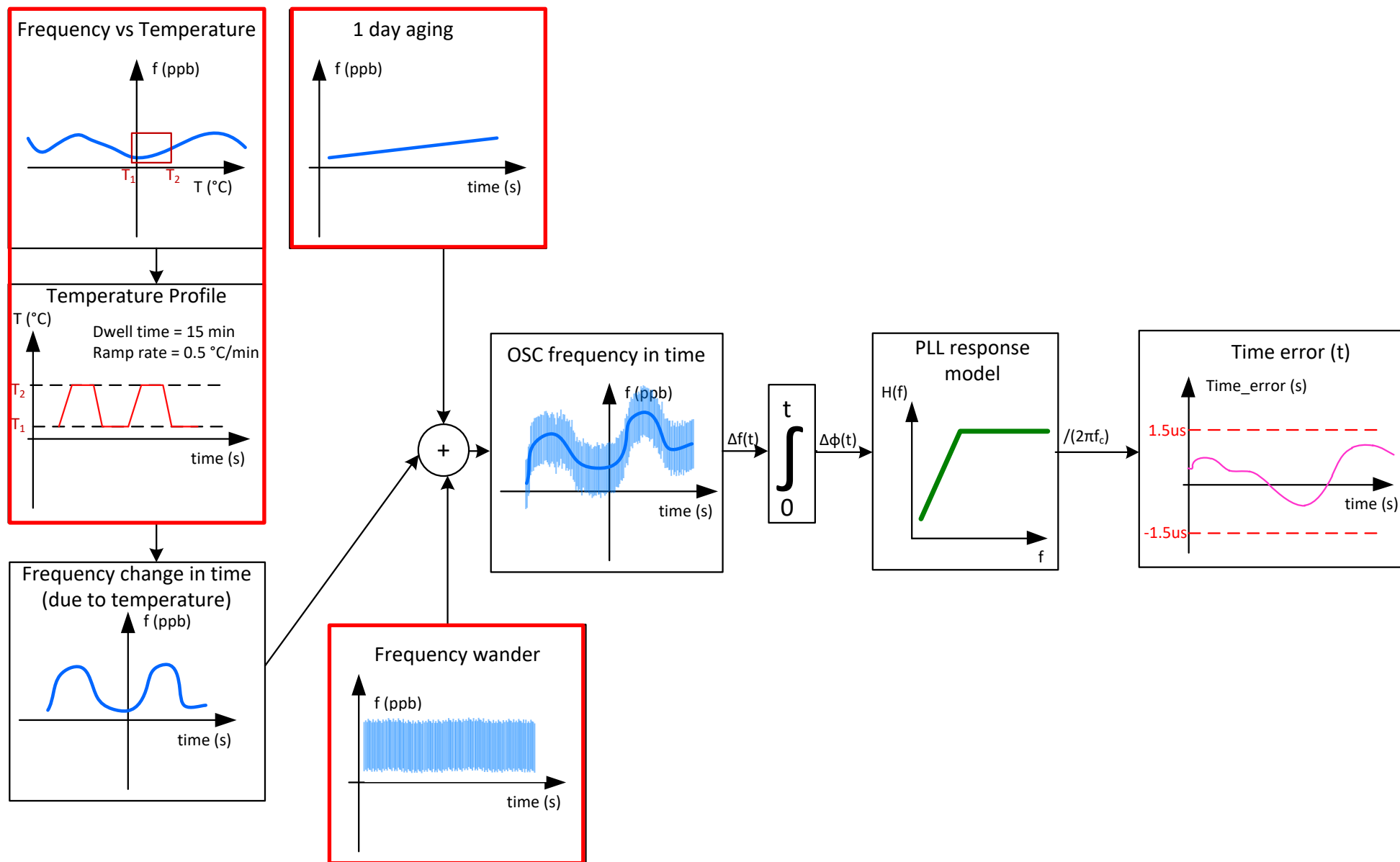
[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Holdover\\_in\\_synchronization\\_applications](https://en.wikipedia.org/wiki/Holdover_in_synchronization_applications)



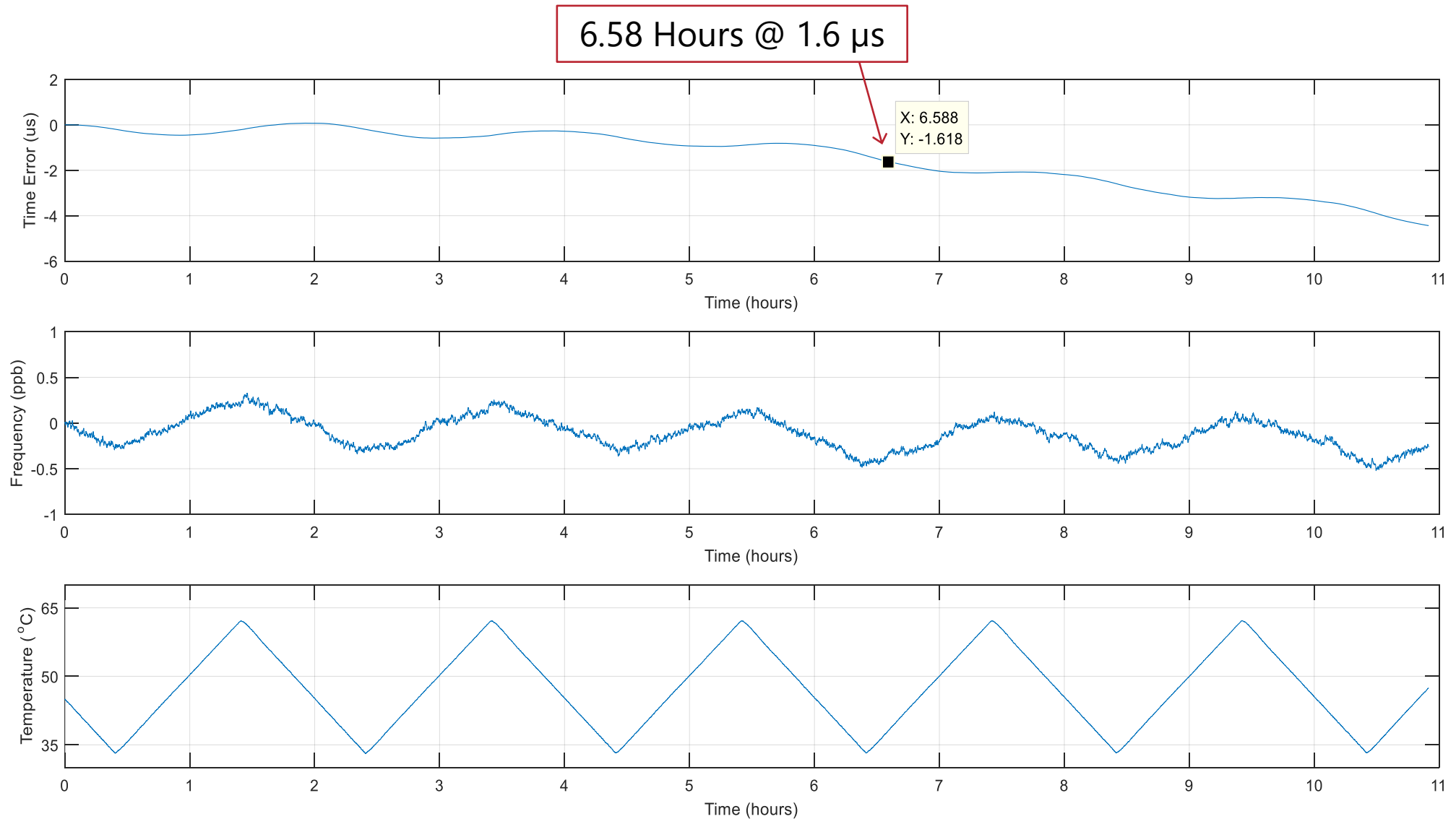
# 影响振荡器守时保持的主要因素

- **由温度引起的频率变化：** 振荡器的频率敏感度( $dF/dT$ )随温度变化，单位为ppb/ $^{\circ}C$  (温度变化1摄氏度的频率变化)。因此，振荡器的频率有环境温度变化调制
- **短期老化：** 量化振荡器因老化而每天改变的频率，通常近似于一条直线
- **时间偏离(Wander):**量化振荡器的随机相波动 (random phase fluctuation)

# 振荡器噪声对时间保持影响的建模



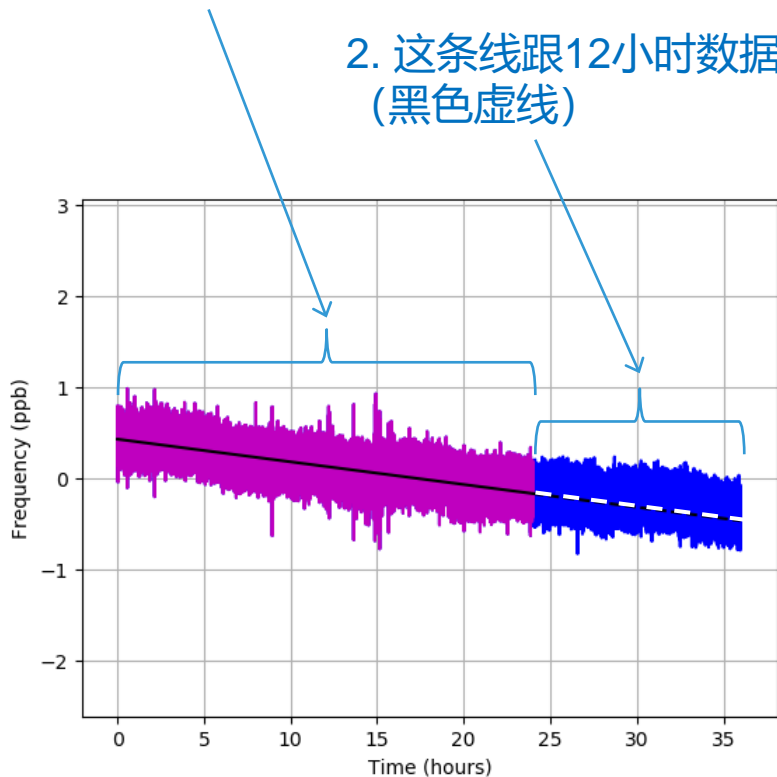
# 示例 OCXO 保持 (Holdover) 温度范围为 $45 \pm 15$ °C, 0.5 °C/分钟的温度斜坡



# 老化补偿提高稳定性

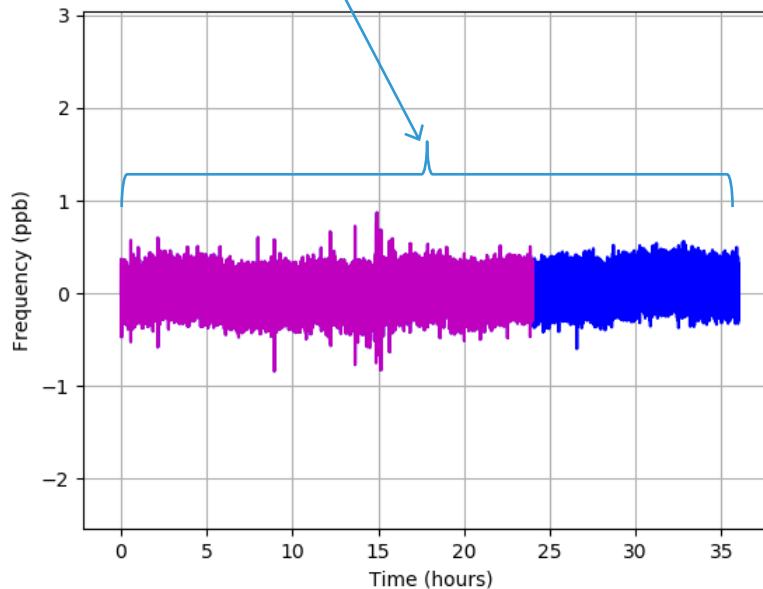
- 日老化预测具有一定的精确度
- 随着时间的推移，观察到的老化可用来预测/移除频率漂移

1. 头24小时数据对应线 (黑色实线)



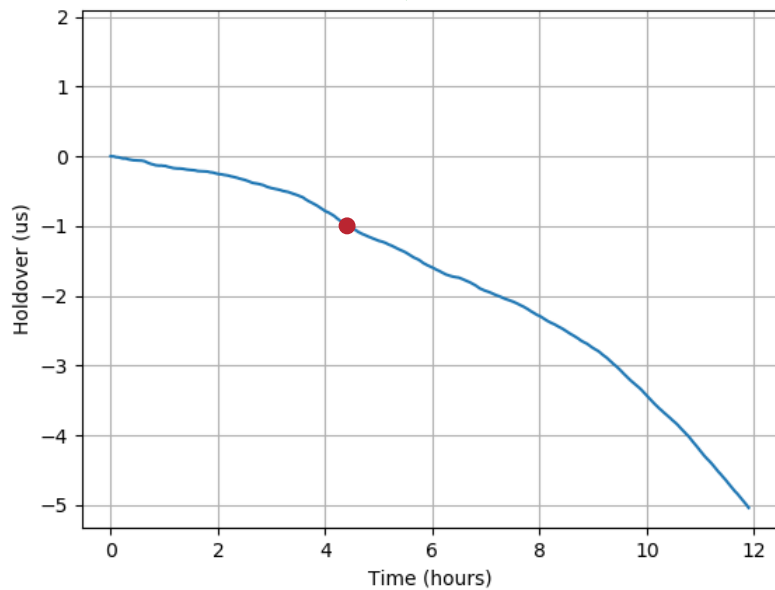
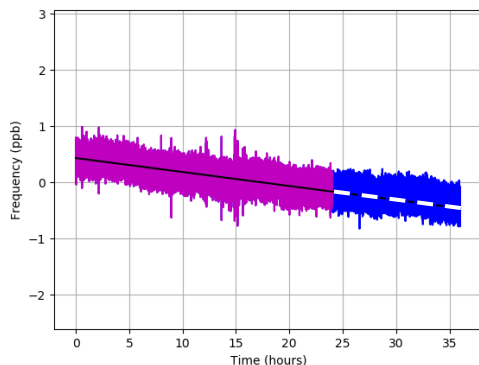
2. 这条线跟12小时数据线在一起 (黑色虚线)

3. 从数据组中剔除一起列出的线

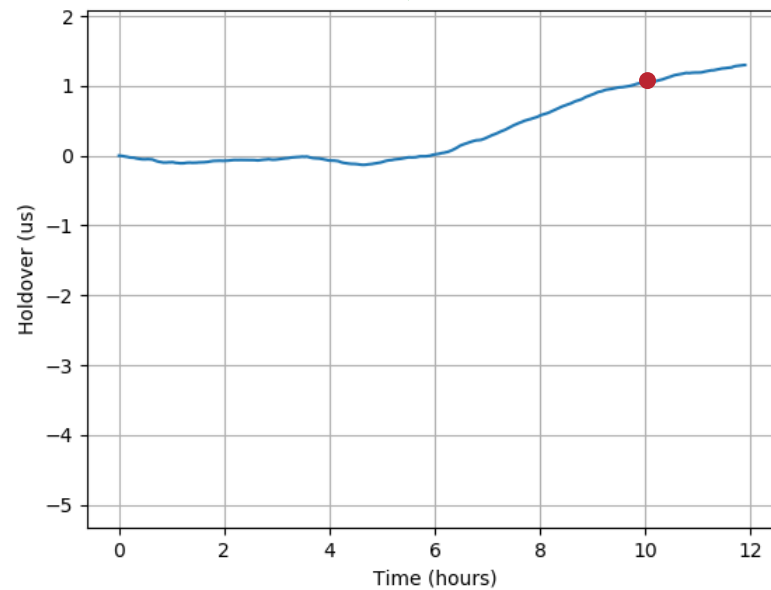
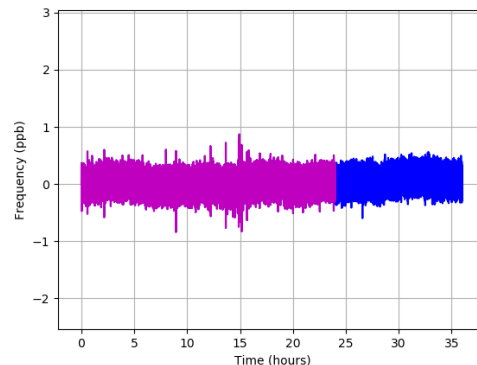


# 老化补偿改进守时保持

## 无老化补偿



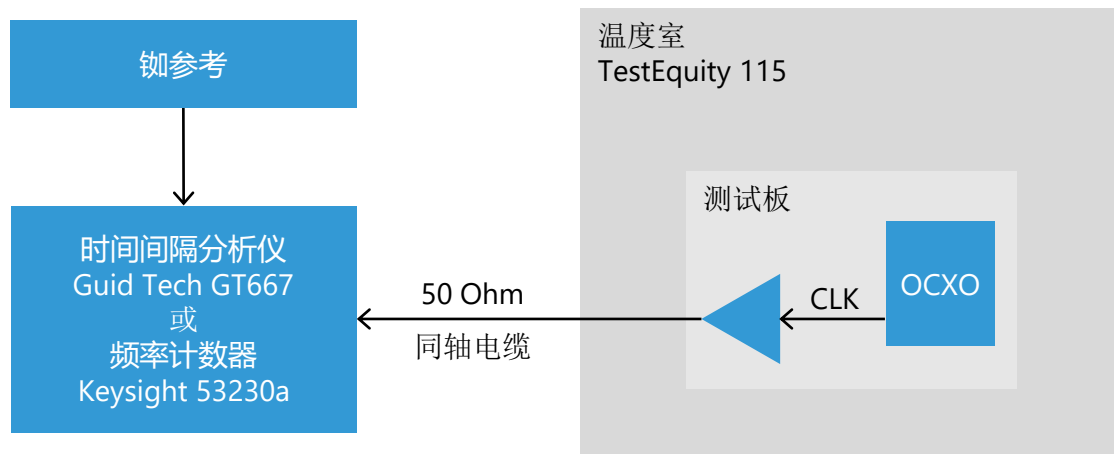
## 有老化补偿



# 在组件或系统层面进行守时保持测量

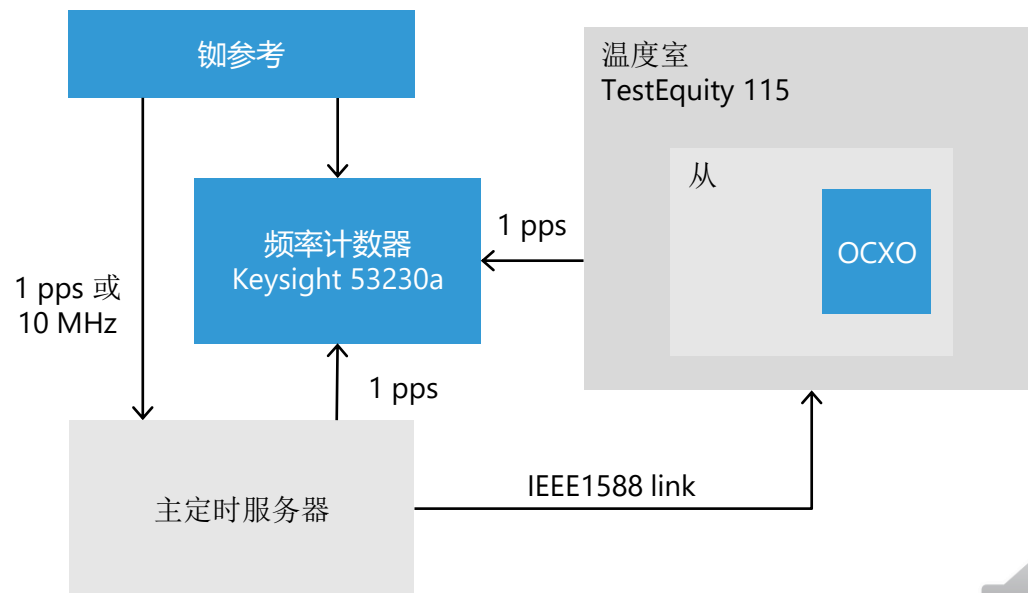
## 振荡器器件层面的测量要求仪器能进行长时间（好几天）测量

- 时钟频率持续高分辨率，无间隙，如Keysight 53230a 频率计数器或
- 边缘时间（时间戳边缘），每1秒钟或更短间隔持续，高分辨率，如GuideTech GT667 CTIA



## 系统层面的测量要求仪器能监测

- 主到从时间误差（不同1 PPS信号从时间主到从的时差），如Keysight 53230a频率计数器或
- 数字振荡器或其他能准确测量2个独立输入边缘之间时间的仪器。





# TCXO/OCXO选择标准——在数据表单之外的考虑

- 我是否需要一小时以上的守时保持？
  - 如果需要，那么就要采用 $\leq 10$  ppb的器件，因为热的问题对守时保持最重要
- 我是否需要TCXO或OCXO时钟恢复？
  - 关键不在于TCXO或OCXO，关键是 $dF/dT$ 。
  - 如 $dF/dT$ 相似，那么TCXO和OCXO的表现差不多。
  - 就前向回转应用而言， $dF/dT$ 最好 $< 5$  ppb/ $^{\circ}C$
- 我的热条件是什么？ 是否是影响时钟精度和holdover的主要因素？
  - 在评估TCXO/OCXO之前首先定义热画像 (如 $50^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ )
  - 在定义的热条件内评估TCXO/OCXO参数 ( $dF/dT$ 、日老化等)
- 我还需要考虑哪些其他参数？
  - 微跳或活动下降，这可能导致守时保持大幅衰减
  - 颤噪敏感性，这会因PCB flex影响时钟精度和守时保持
  - 供电和负载敏感性，这会让确保性能的设计变得更加复杂



# MEMS超级TCXO在5G 远程无线单元（RU）中取代OCXO

Quartz OCXO

9 x 7 x 4 mm



MEMS Super-TCXO

5 x 3.2 x 1.06 mm



## MEMS超级TCXO的优势

- 韧性提高10倍 - 对振动、温度变化和板噪声具有韧性
- 尺寸减小75% - 设计更加紧凑
- 设计更方便 - 没有盖子或PCB放置限制条件
- 适当衰减 - 支持最高125 °C的极热工作条件
- 可靠性提高40倍 - 15亿个小时 MTBF



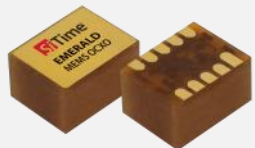
# MEMS Comms-企业时钟产品组合—环境韧性



## 高精度超级TCXOs

1 ~ 220 MHz,  $\pm 0.05 \sim \pm 0.25$  ppm,  $\pm 1$  ppb/ $^{\circ}\text{C}$ , +105 $^{\circ}\text{C}$   
对温度急剧变化、气流和振动具有韧性

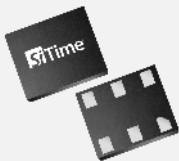
MP



## Stratum 3E OCXOs

1 ~ 60 MHz,  $\pm 5$  ppb,  $\pm 0.04$  ppb/ $^{\circ}\text{C}$   
无频跳(Activity Dips), 最小 9x7 mm 封装

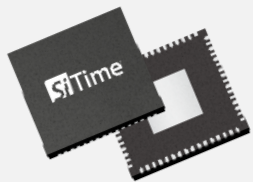
MP



## 超低抖动差分振荡器

1 MHz ~ 1 GHz,  $\pm 10$  ppm, 0.07 ~ 0.23 ps jitter, +105 $^{\circ}\text{C}$   
0.02 ps/mv PSNR, I2C/SPI 可编程

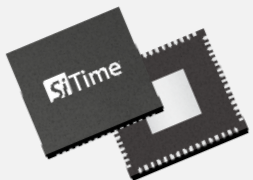
MP



## 时钟发生器

4 个输入, 11 个输出, 8 kHz ~ 2.1 GHz 输出  
片上MEMS谐振器, 不再需要外部时钟

Sample now



## 抖动清除器, 网络同步器

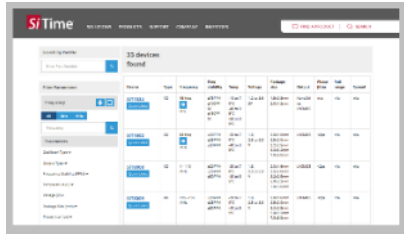
4个PLLs、4个输入、11个输出、8 kHz ~ 2.1 GHz的输出  
26 ps 相位扩建 (无中断切换), 5 ppt DCO

Sample now



# 简化时钟设计的在线工具

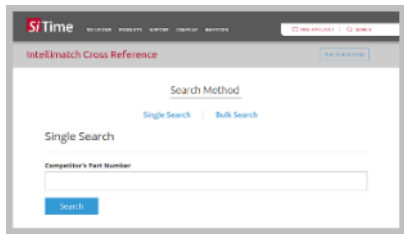
## 找到合适的部件



参数搜索



部件号生成器



交叉参考

## 部件编程和检测



Time Machine II编程工具

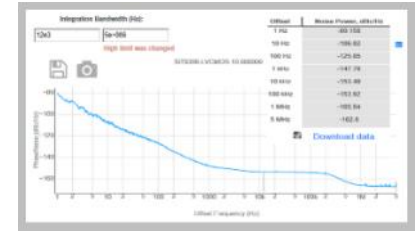


评估板

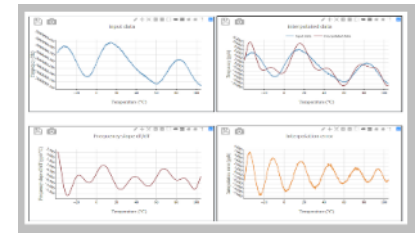


Time Master器件配置软件

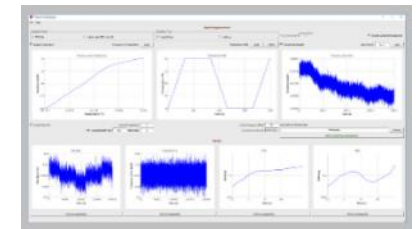
## 获得性能数据



抖动计算器和示意图



频率斜率df/dT计算器



时间误差仿真器软件



# 帮助您开展时钟设计的应用说明和白皮书

## 设计和测量

- [AN10006 最佳设计和布局实践](#)
- [AN10039 TCXO频率稳定性和频率精度预算](#)
- [AN10041 用SiT39xx系列DCXOs进行设计（数控振荡器）](#)
- [AN10050 I2C/SPI可编程振荡器](#)
- [AN10062 振荡器相噪声检测指南](#)
- [AN10064 在高精度超级TCXOs用数字频率调谐提高系统性能](#)
- [AN10066 LVDS输出，带600 mV到1200 mV的摆幅](#)
- [AN20003-SiT9514x电源—供电—噪声—抑制](#)
- [AN20011-SiT9514x-动态控制输出](#)
- [用于Holdover振荡器的适应性漂移补偿](#)
- [时间误差仿真——软件和模型](#)

## 技术和业界标准

- [SiTime的MEMS First™和EpiSeal™进程](#)
- [DualMEMS和TurboCompensation温度感应技术](#)
- [AN10052 IEEE 1588精确时间协议 \(PTP\)，符合ITU-T标准](#)

## 性能和可靠性

- [AN10025 SiTime振荡器的可靠性计算](#)
- [AN10063 TCXO和OCXO稳定性以及标称温度之外的系统影响](#)
- [高精度MEMS TCXOs在环境压力条件下的同步系统性能优势](#)



- 5G Ethernet fronthaul poses significant time synchronization challenges
  - As low as 65 ns, under environmental stressors (heat, vibration, etc)
- TCXO/OCXO thermal performance drives time sync accuracy
  - $dF/dT$  (ppb/°C) 是确保最佳时间精度的最关键参数, not frequency stability over temperature
  - TCXO and OCXO of similar  $dF/dT$  enables similar time accuracy
- SiTime提供具有**环境韧性的**MEMS TCXO/OCXO, 是5G时间同步的理想选择
  - 最佳 $dF/dT$ , 提升5 ~ 10倍
  - 抗环境压力——温度急剧变化、气流、振动