

# 基于超长相干 OFDM 技术的时间同步系统研究

付国梁, 刘倩, 张思源, 李正平

(海军航空大学, 山东烟台 264001)

**摘要:** 为提高无线通信的多信道通信同步性和数据传输的准确度, 进一步解决在复杂环境中, 飞机、舰船上无线通信系统信号容易失真的问题, 在对比分析现有时间同步方案的基础上, 对正交频分复用技术进行了研究, 创新性提出了超长相干 OFDM 技术, 设计出一种分布式皮秒级高精度时间同步系统, 经试验测试该系统能够提高复杂电磁环境中多信道通信的抗干扰性能和同步精度, 并且实现了时间同步与数据传输的一体化, 进一步确保数据传输的可靠性。

**关键词:** 超长相干 OFDM; 多信道通信; 抗干扰; 高精度时间同步; 性能校准

## Research on Time Synchronization System Based on Ultra-Long Coherent OFDM

FU Guoliang, LIU Qian, ZHANG Siyuan, LI Zhengping

(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to improve the synchronization of multichannel communication and the accuracy of data transmission in wireless communication, and further solve the problem that it is easy for the signals of wireless communication system on aircraft and ships to be distorted in complex environments. On the basis of comparing and analyzing the existing time synchronization schemes and studying orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology, an innovative ultra-long coherence OFDM technology is proposed, and a distributed picosecond high precision time synchronization system is designed. Through experimental testing, this system can not only improve the anti-interference performance and time synchronization accuracy of multi-channel communication in complex electromagnetic environments, but also realize the integration of time synchronization and data transmission, and further ensure the reliability of data transmission.

**Keywords:** ultra-long coherent OFDM; multichannel communication; anti-interference; high precision time synchronization; performance calibration

## 0 引言

通信系统对于飞机、舰船都至关重要, 而同步时钟在通信系统中又起着关键性作用, 当面对反射效应、衍射效应、电磁干扰等环境条件影响时, 信号衰减会引起时间同步性差、数据传输速度降低等问题, 亟需设计出一种时间同步系统能够适应不同的信道条件, 包括非线性效应和多径干扰。

近年来, 国内外关于无线时间同步的技术方案被相继提出: 1) 采用基于星间链路的精确时间协议 (PTP) 同步方法, 通过卫星之间交换时间戳实现亚微秒级同步<sup>[1]</sup>。然而, 该方法受限于星间链路的传输时

延和信道质量, 在星间距离较远或空间环境恶劣时, 同步精度会明显下降; 2) 结合高稳原子钟的闭环反馈控制方法, 利用相对论效应构建时空基准, 实现皮秒量级的长期同步<sup>[2]</sup>。但该方法对原子钟的性能要求极高, 而目前空间环境下原子钟的长期稳定性还难以达到皮秒量级; 3) 采用基于光纤通信和光频梳技术的高精度时频传递方法, 通过飞秒激光实现信号皮秒级同步<sup>[3]</sup>。但该方法需要建立稳定的光纤链路, 工程实现难度大, 且容易受空间辐射等因素的影响; 4) 采用基于飞秒激光的光学时间同步方法, 利用飞秒激光频率梳产生高稳定度的光学频率基准, 通过锁相技术实现毫微秒到皮秒量级的星间同步<sup>[4]</sup>。该方法具有极高的

收稿日期: 2025-01-07; 修回日期: 2025-02-14。

作者简介: 付国梁 (1983-), 男, 硕士, 工程师。

通讯作者: 刘倩 (1991-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 付国梁, 刘倩, 张思源, 等. 基于超长相干 OFDM 技术的时间同步系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 272-277, 287.

短期稳定度, 但长期稳定性受限于飞秒激光器件的性能, 且在轨实现难度大; 5) 采用基于相干光学载波相位同步方法, 利用星间光学通信的相干光学链路, 通过锁定载波的相位实现高精度频率同步, 再通过调制解调技术传输时间信息<sup>[5]</sup>。该方法可在皮秒量级实现频率传递, 但容易受到空间激光链路的影响, 在远距离、长时间同步中稳定性不足。

上述各类时间同步方案都还存在不同程度的局限性, 难以完全满足未来高精度、长稳定、全自主的时统需求。

## 1 超长相干 OFDM 技术

在高精度无线通信系统中, 实现空口精确同步离不开时间同步错误的准确估计与补偿。往返时间 (RTT, round-trip time) 测量是一种典型的双向时间传递方法, 通过测量时间同步帧在发送端 (Tx) 和接收端 (Rx) 的收发时刻, 可以估计系统的固有时延和时钟偏差, 从而实现精确同步。

然而, RTT 测量中时间戳的获取面临诸多技术挑战, 尤其是接收时间的精确测量难度更大。当同步帧到达接收机时, 其首先经过射频前端 (RFE, Rf front end) 完成下变频和模数转换 (ADC, analog-digital conversion), 再经过数字基带的同步跟踪单元确定精确的帧定时。但数字侧的定时测量存在一个固有的“亚采样”问题, 即接收时间戳的分辨率无法高于 ADC 采样周期。例如, 如果基带使用 20 MHz ADC, 其采样间隔为 50 ns, 即接收时间戳的分辨率为 50 ns。显然, 接收时间戳的分辨率限制了 RTT 测量和时间同步的极限精度。

为了突破 ADC 采样率的限制, 一种可能的解决方案是充分利用 ADC 的采样精度, 即 ADC 采样分辨率。现代高速 ADC 不仅具有高采样率, 而且具有高达 12 位、14 位甚至 16 位的采样分辨率。这意味着, 在每个采样时刻, ADC 能够将模拟信号的瞬时幅度量化为 4 096、16 384 甚至 65 536 个离散电平。通过双通道 I/Q 采样模式, 接收端可充分复用高分辨率采样值所蕴含的相位信息, 实现远高于采样间隔的定时分辨率。这种基于 ADC 采样值的相位分析方法, 能够将定时测量的分辨率从采样间隔提高到采样值的量化间隔, 理论上可将接收时间戳分辨率提高 10 倍以上。这为高精度 RTT 测量和时间同步开辟了新的途径。不过, 这种方法对接收信噪比和相干积累时间提出了更高要求, 所以需要在采样率、量化精度、积累时间等参数之间进行权衡, 以满足不同应用场景下的同步精度需求。

基于以上分析, 应考虑将 ADC 采样率与 ADC 采样精度两个维度充分复用, 实现亚采样级精确定时。在采

样率方面, 收发双方将采用多载波通信技术, 如正交频分复用技术 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing), 该技术是一种多载波调制技术, 通过将高速数据流分割为多个低速子数据流, 然后并行调制到不同的正交子载波上, 实现对 ADC 采样率 (即可用通信带宽) 的充分复用<sup>[6]</sup>。OFDM 的时域信号体现为众多子载波的混叠信号, Rx 端在 ADC 采样之后复用 FFT 变换, 可分离出众多单音子载波, 即估计出各子载波的复数增益。再利用相位内插算法去估计整个带宽内的时延偏差。这种频域相位分析方法能够克服时域噪声的影响, 获得更高的估计精度。此外, 还可利用信道估计算法联合估计定时偏差和信道响应, 进一步提升估计性能。

然而, 在实际应用中, OFDM 技术仍然存在许多不足: 1) 收发机之间存在广泛的时钟不同步问题, 例如收发机基带的 ADC/DAC 采样率差异以及射频频率 LO 的差异<sup>[7]</sup>, 若不加以补偿, 则接收时间戳会随时钟漂移而偏离真实值; 2) 飞机、舰船收发机存在相对运动, 而 RTT 测量失准, 若不加以补偿, 每次测量的 RTT 值会包含双向运动距离, 无法反映真实的信号传播时延<sup>[8]</sup>。为消除以上不足而产生的误差, 需进一步考虑“超长相干”测量技术。

“超长相干”就是在收发机之间, 通过数百微秒甚至数百毫秒级别的长时间相干测量充分累计测量冗余, 估计收发机时钟偏差、相对运动带来的距离变化并提高相位分辨率。超长相干测量利用了信号在长时间范围内的相干累积增益, 可有效消除量化噪声, 并放大微小的频偏和相位变化, 从而获得更高的估计精度。超长相干 OFDM 技术的基本原理是在一次测量过程中, RTT 测量端都在常规 OFDM 调制的基础上, 额外插入定时重复的信道测量序列, 并在每个 OFDM 符号内插入导频子载波。接收端利用这些信道测量序列及导频子载波, 提取出相干时间内的累积相位, 通过跟踪相位随时间的变化率, 即可估计出亚采样级的时钟偏差、时延偏差并抑制量化噪声。最后, 利用超分辨率频谱估计算法逼近现有系统信噪比条件下的工程上限。

超长相干 OFDM 技术除了在测距精度和通信速率上具有优势外, 还能够提供卓越的抗干扰能力。1) OFDM 调制方式本身具有抗多径干扰和频率选择性衰落特性<sup>[9-11]</sup>。2) 超长相干 OFDM 能够通过自适应调制与编码机制, 根据信道状况动态调整调制阶数和编码速率, 在通信可靠性和频谱效率之间进行灵活权衡<sup>[12-13]</sup>。当信道质量较好时, 可采用高阶调制 (如 64QAM) 和高码率 (如 3/4), 以追求更高的数据传输速率; 当信道恶化时, 则切换到低阶调制 (如 BPSK) 和低码率 (如 1/2), 以保证通信的可靠性。3) 超长相干 OFDM 中

引入的大量信道测量序列为快速信道估计提供了有力支撑<sup>[14-15]</sup>。在高动态场景下,信道时变速度快,导频密度往往跟不上信道变化,导致信道估计精度下降,而超长相干 OFDM 利用信道测量序列实现了信道的快速重估计。通过缩短信道测量序列的发送间隔,可以显著提高信道估计的迭代速度。同时,连续的信道测量序列还能跟踪信道的多普勒频移,补偿高速运动带来的影响。

因此,超长相干 OFDM 具有更强的抗多普勒能力和抗时变能力。并且超长相干 OFDM 采用了强大的信道编码机制,在帧/包层引入了前向纠错和协议层自动重传技术,使超长相干 OFDM 能够实现高可靠、低延时的数据传输。

## 2 无线时间同步系统总体结构

高精度时间同步系统采用星形拓扑结构,由多台支持无线互联的时钟设备组成。每台时钟设备分为时钟单元和同步单元两大功能模块,分别负责时间信号的产生和维护,以及与其他时钟进行同步。该系统的整体架构如图 1 所示。

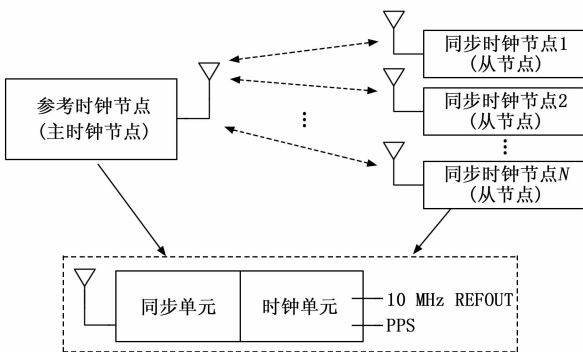


图 1 时间同步系统总体结构

每个时钟设备的时钟单元集成了高性能的晶振电路,能够输出两种标准时间信号:

1) 10 MHz 时钟信号 (Ref\_Out): 提供一个稳定的 10 MHz 周期性脉冲,用于下游电路实现精确计时和产生定时事件等功能。

2) 每秒脉冲信号 (PPS): 每隔 1 秒钟产生一个脉冲,用于标识秒的“起跳边沿”,是实现时间同步的重要参考。

时钟设备的同步单元的作用是实现不同时钟设备之间的无线同步,并根据同步结果对本地时钟单元进行校正,确保整个系统的时间一致性。同步单元支持两种工作模式:

1) 主时钟节点模式: 作为授时节点,通过无线方式向其他时钟节点广播同步信号和时间信息,作为全局时间的参考源。

2) 从时钟节点模式: 接收来自主节点的同步信号,提取时间信息,评估自身与主节点的时间偏差,并控制时钟单元进行调整,实现与主节点的同步和对齐。

在实际应用中,高精度时间同步系统通常采用“1 主 N 从”的部署方式<sup>[16-17]</sup>。1 台时钟设备被指定为主节点,负责向其余 N 台从节点提供授时服务。这种星形同步组网方案可以避免从节点之间的相互干扰,有效降低系统的同步复杂度。

## 3 时间同步系统硬件设计

下面将从低相位噪声内部时钟源、无线通信/同步模块、时钟校正及分配单元的 3 个方面简要描述该硬件系统的实现方案。时间同步硬件方案设计的原理如图 2 所示。

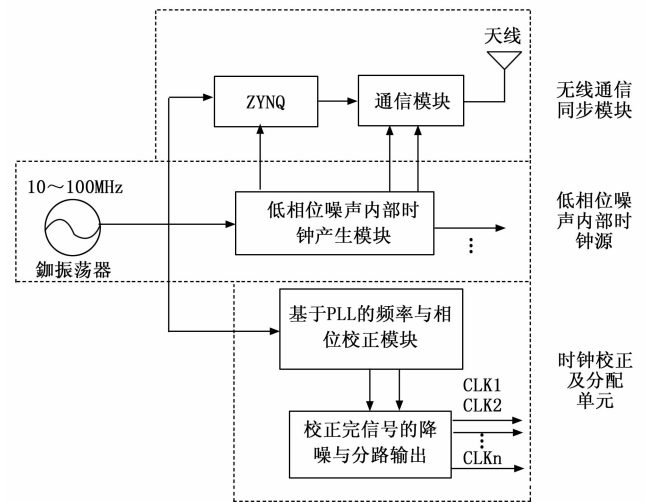


图 2 时间同步硬件方案图

### 3.1 低相位噪声内部时钟源

低相位噪声内部时钟源是整个设备的核心,其性能直接决定了输出时钟信号的精度和稳定性。考虑到高精度的要求,本方案拟采用铷振荡器作为低相位噪声内部时钟源。铷振荡器相比廉价的温度补偿晶体振荡器 (TXCO, temperature compensated crystal oscillator) 及恒温晶体振荡器 (OCXO, oven controlled crystal oscillator) 具有明显的优势<sup>[18-19]</sup>: 1) 铷振荡器提供非常高的长期频率稳定性; 2) 铷振荡器由于其物理原理,对温度变化的反应极为微小,因而在广泛的温度范围内都能保持稳定的输出; 3) 铷振荡器的频率变化非常小,老化率低; 4) 其功耗较低并且启动时间相对较短。

由于低相位噪声时钟源的输出频率一般比较低,而整个无线通信与同步模块的工作频率种类较多,经常有支撑数字和模拟的多种时钟树,因此本系统将通过集成锁相环-压控振荡器 (PLL-VCO, phase-locked loop-voltage controlled oscillator) 实现低相位噪声、低抖动

的多种时钟信号<sup>[20-21]</sup>。

### 3.2 无线通信与同步模块

该模块由射频宽带通信硬件、调制解调基带以及上层同步算法 3 部分构成。

射频宽带通信硬件拟采用国产系统级芯片 (SoC, system on chip) + 国产 RF 前端 + 高增益全向天线的硬件结构实现。该模块带宽 10 MHz, 设定工作频段为 P 波段, 也可根据用户实际需求进行更改。其中, ADC 和 DAC 是决定信号精度的关键要素, 其分辨率越高, 得到的模数转换结果越精确, 而 ADC 通常比 DAC 的采样率高, 因此选择的 ADC 分辨率应不低于 10 bit, DAC 分辨率应不低于 12 bit。SoC 采用 ARM + FPGA 架构, ARM 作为微控制器主要用于数据显示, 具有功耗低的优势, FPGA 主要用于数据高速采集和数据处理, ARM + FPGA 架构既能发挥各自独特优势又能处理较为复杂的信号传输问题。CPU 核心选择双核 Cortex A9, 内存不小于 512 MB, 逻辑单元应大于 80 K, 查找表 LUTs 应大于 50 000, 引导方式采用 SD 卡或 QSPI Flash。除射频和天线外, 整体功耗应不超过 50 W。

调制解调基带核心基于超长相干 OFDM 技术, 主要工作参数如表 1 所示。

表 1 调制解调基带主要工作参数

参数	指标
模拟带宽	10 MHz
子载波数	64
子载波带宽	625 kHz
循环前缀	1.6 $\mu$ s
OFDM 符号长度	8 $\mu$ s
子载波调制模式	BPSK、QPSK、16-QAM、64-QAM
子载波编码方案	BCC(块卷积编码)
编码效率	1/2、3/4、5/6
信道测量与校正模式	长训练段 OFDM 符号 + 逐 OFDM 符号导频子载波
帧构成	短训练段、长训练段、编码信息段、数据段
帧校验能力	编码信息段 CRC 校验、数据段 CRC 校验
点对点通信模式	CSMA/CA + ACK 帧
多节点组网通信模式	点对点 + 主节点中继
理论通信速率	3 ~ 32 Mbps

时间同步主要实现的是帧同步和符号同步, 由于超长相干 OFDM 符号的数据传输依靠训练序列完成, 而训练序列是帧构成的前端序列, 如果通过时钟偏差算法实现精度高帧同步就可以同时完成帧同步和符号同步。

时钟偏差算法采用自适应算法, 在 SoC 端运行, 通过前端基带及射频与主时钟设备进行无线的严格定时的测量帧收发, 得到以下关键参数:

1) 相对运行速度  $v$ , 是指收发端点对点相对速率 (m/s);

2) 距离  $d$ , 是指收发端天线到天线距离 (m);

3) 飞行时间  $t$ , 是指收发端天线到天线飞行时间 (s);

4) 采样频率偏差 (clk. diff. fs), 是指收发端基带 AD/DA 频率差异 (Hz)。采样频率是测量误差的影响因素之一, 采样频率过低会使基波幅值发生变化, 从而造成提取波动分量时产生误差。

5) 载波频率偏差 (clk. diff. fc), 是指收发端射频载波频率差异, 单位 Hz。由于在实际应用中, 无法获得完全相同的载波信号, 因此载波频率偏差无法彻底消除。

6) 时钟偏差 (clk. diff. t), 是指收发端点对点基准时钟偏差 (s);

7) 时钟相偏 (clk. diff. p), 是指收发端点对点基准时钟相位差异 (deg/rad)。

时钟单元模拟根据以上参数实时调节频率及相位差异, 完成主从设备之间的精确时钟同步。

### 3.3 时间校正

由无线通信与同步模块测得频率与相位偏差后, 下一步需要通过时钟校正模块对算法参数中的采样频率偏差和载波频率偏差进行补偿。

本系统将采用集成 PLLVCO 来完成时间同步性能校准。

#### 3.3.1 对频率偏差的调整

一般情况下, PLLVCO 具有较高的小数分频位数, 本系统采用 48 bit 的分频器, 在 50 MHz 参考频率情况下可以达到小于 1 Hz 的频率误差, 通过该 1 Hz 的频率步进调整就可以达到精确的频率偏差调整。

#### 3.3.2 对相位偏差的调整

对于相位的调整, 通常有数字和模拟两种路径, 传统的移相方法的精度在  $5.625^\circ$  (6 bit), 这无法满足本项目的要求。本项目采用  $\Sigma - \Delta$  调制器相位调制技术, 可以完成小于  $1^\circ$  的相位连续可调, 即从  $0^\circ$  (0) ~  $360^\circ$  (224 - 1) 的全周期调准, 可满足高精度的相位偏差校准。

#### 3.3.3 时间同步性能校准功能的实现

采用上述频率偏差和相位偏差的调整技术对 4 个时钟进行校正, 并得到测试结果。时钟校正模块结构如图 3 所示。

对时间校正模块进行测试, 该方法可以完成频率和相位的调整, 输出任意需要的频率和相位, 并且能够达到皮秒级时间同步精度。

### 3.4 时钟产生和分配

当多信道的时钟校正完成后, 整个网络的时间完成了同步, 对于单星的系统, 需要根据校准后的同步信号完成整个单板的时钟产生和分配, 本系统采用了图 4 所

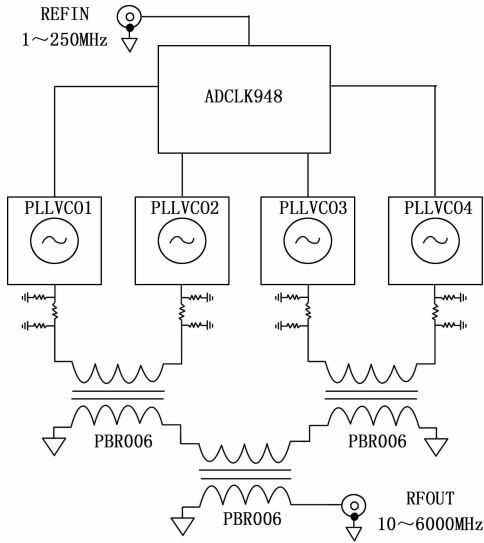


图 3 4 个时钟的校正框图

示的双环时钟产生和分配方案，产生系统需要的多达 14 路的 LVDS、LVPECL 或 CML、COMS 型器件差分

时钟 (DCLK)，整个系统的最大值频率为 3 200 MHz，可满足多种的控制、通信、雷达等系统时钟需求<sup>[22]</sup>。

### 4 时间同步系统软件平台设计

软件平台在硬件模块结构的基础上进行搭建，主要包括操作系统、核心框架、设备服务组件及中间件 4 个部分<sup>[23]</sup>。

操作系统选用 RT-Thread 物联网系统实现，该系统具有可移植、快速启动、低功耗、低成本的优势，同时还包含了实时、嵌入式系统等相关的各个服务组件。核心框架包括核心模块和基础模块两部分，主要提供核心功能的运行管理，核心模块由设备管理、波形管理及服务管理 3 个部分组成，设备管理主要提供设备部署、启动、注册及控制等功能，波形管理主要提供波形安装、部署、启动、连接、控制和应用管理功能，服务管理主要提供服务部署、启动、注册以及分布式文件系统部署功能；基础模块包括域配置文件解析器、组件连接管理和资源管理模块。中间件是连接操作系统和核心框架的中间服务软件，包括 Minimum CORBA、事件服

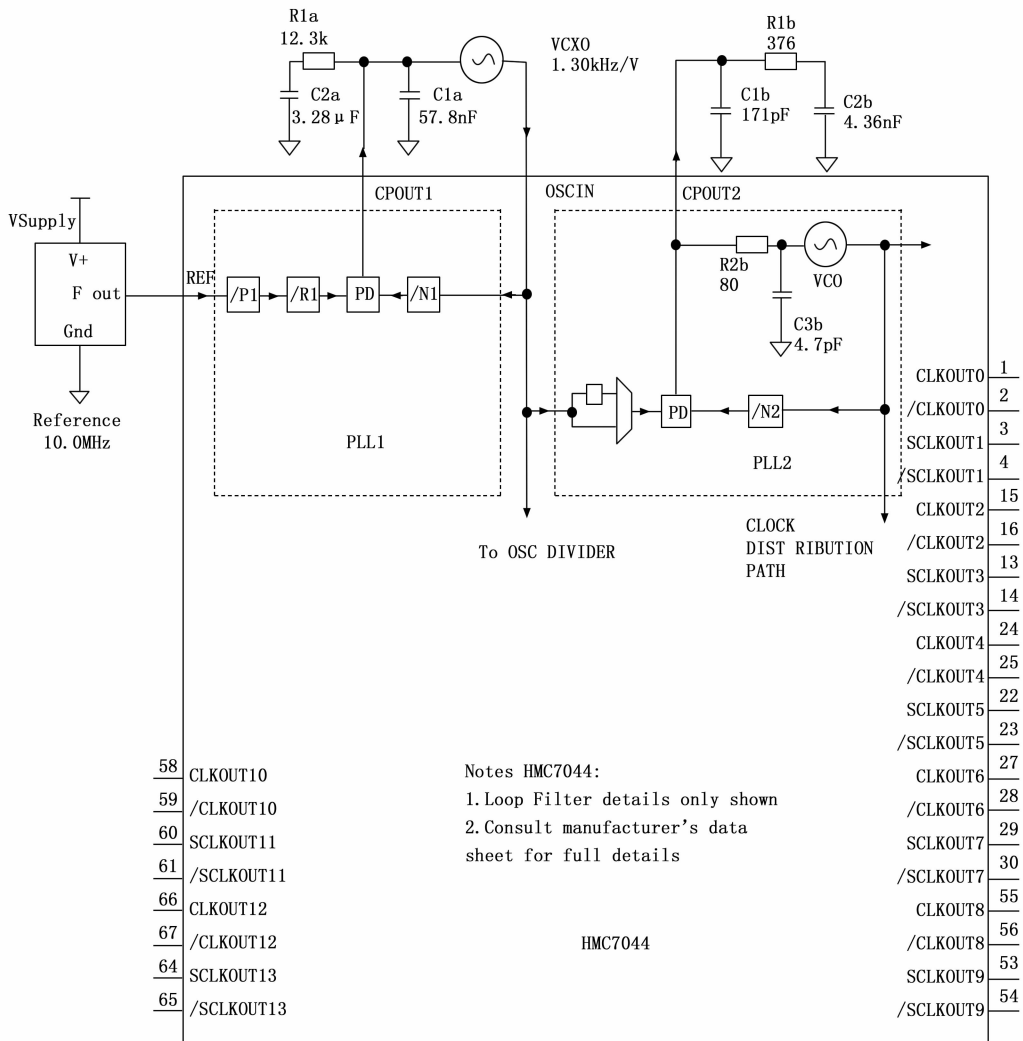


图 4 时钟产生和分配单元原理框图

务、日志服务 3 个部分。设备服务组件包括无线通信设备、串口设备、GPP 设备、FPGA 脉冲计数、平台管理服务,无线通信采用 OFDM 软件接收机,并能够支持 PLLVCO 功能,通过时间截标记、获取功能实现时钟调节。

## 5 时间同步系统性能测试

### 5.1 PPS 精度测试

PPS 精度测试采用对比测试的方法,以授时板作为参考源在测试端输出 1PPS 脉冲信号,进行 4 次测试。PPS 精度计算公式如下:

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \quad (1)$$

式中,  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$  分别为 4 次测试的时间延迟。

将脉冲信号接入时间同步系统,计数器设置为检测信号上升沿,对接收的脉冲信号进行数据处理,显示为时延误差。经过 4 次测试时延误差分别为 160、137、185、159 ps,根据上述公式计算得出,PPS 精度为 160 ps。为测试时间同步系统的普遍适用性,又进行 10 MHz 时钟输出测试,分别生成相位差为 1 ns、1 ms、10 s 的周期信号,进行 3 次测试,通过采集的测量数据,对时间同步系统精度进行计算,得出 1 ns 时间间隔的精度为 50 ps,而随着时间间隔的不断增大,测量精度也在相应增大,1 ns 和 1 ms 精度变化较小,系统较稳定,测量时间间隔为 10 s 时引入的测量噪声等环境干扰逐渐增大,但测量精度均小于 200 ps。

### 5.2 系统同步测试

测试过程中,设置采样频率为 1 Hz,运用 Matlab 软件对采集数据进行处理,通过无线通信与同步模块调整时钟相位偏差,根据统计数据可知,信号间相位偏差的平均值为 27.65 ps,标准偏差为 192.74 ps,输出时钟频率为 9.999 999 9 MHz。结合本次测试结果和时间校正模块测试结果,表明在高速数据传输的同时能够达到多信道时间同步。

### 5.3 系统技术指标

引入超长相干 OFDM 技术的无线多信道时间同步系统可实现皮秒级高精度时统,经上述时间同步性能测试,具体技术指标如表 2 所示。

表 2 技术指标

参数	指标
通信节点数量	$\geq 20$ 个
网络形式	星型及自组织网络模式
最远通信距离	$\geq 100$ m
输出时钟频率	10 MHz
时钟频率误差	$< 100$ ppb
PPS 精度	$< 200$ ps

## 6 结束语

在学习了国内外相关研究的优缺点后本文提出了一种创新的分布式卫星成像的皮秒级高精度时统方案。针对目前 OFDM 技术存在的问题,分析研究了超长相干 OFDM 技术原理及优势,设计出无线时间同步系统的星形拓扑结构总体框架,从低相位噪声内部时钟源、无线通信与同步模块、时间校正、时钟产生和分配 4 个方面对系统硬件进行了优化处理,在硬件结构的基础上设计构建了软件平台,并提供了该时间同步系统可实现的技术指标。该系统使得 ADC 采样率与 ADC 采样精度两个维度得到充分复用,突破了 ADC 采样率的限制,达到了高分辨率的目的。通过严格定时发送的信道测量序列以及逐个 OFDM 符号内插入的导频子载波,实现了高精度距离测量和高速数据传输的一体化。这不仅提高了多信道通信系统中的时间同步精度和稳定度,同时为实现安全、稳定、高效的时统能力建设提供参考。

### 参考文献:

- [1] WANG Z, HAN K, SHEN X, et al. Achieving the performance bounds for sensing and communications in perceptive networks: optimal bandwidth allocation [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11 (9): 1835 - 1839.
- [2] RUGGIERO L M. Synchronization and fundamental time: a connection between relativity and quantum mechanics [J]. Foundations of Physics, 2023, 53 (5): 83.
- [3] TAN S, REN Y, YANG J, et al. Commodity WiFi sensing in ten years: status, challenges, and opportunities [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9 (18): 17832 - 17843.
- [4] 肖庆雯. 基于飞秒激光的微波信号光纤链路远程同步技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [5] 汤昕宇. 空间相干激光通信系统 DSP 算法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [6] 王 怡, 涂 宇, 陈佳才, 等. 正交频分复用技术下舰船短波通信抗干扰研究 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (15): 115 - 118.
- [7] CHEN C, SONG H, LI Q, et al. Wi-Fi sensing based on IEEE 802.11 bf [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 61 (1): 121 - 127.
- [8] ROPITAU T, DA SILVA C R C M, BLANDINO S, et al. IEEE 802.11 bf WLAN Sensing Procedure: Enabling the Widespread Adoption of WiFi Sensing [J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2024, 8 (1): 58 - 64.
- [9] 刘文珂, 金 梁. 基于 OFDM 的自适应传输技术研究 [J]. 信息工程大学学报, 2005, 6 (1): 73 - 76.

(下转第 287 页)