

地面数字电视单频网 (SFN) 同步技术改进与仿真

陈 盟

巨野县融媒体中心 山东 菏泽 274900

摘要: 地面数字电视单频网 (SFN) 通过多发射机同频同播提升频谱效率与覆盖性能, 但其性能高度依赖严格的系统同步, 微小误差即可引发严重符号间干扰 (ISI), 导致信号失真甚至解调失败。本文分析了SFN同步原理, 梳理了时钟漂移、链路时延抖动及GPS信号不稳定等主要误差来源。针对传统GPS/10MHz+1PPS方案成本高、依赖性强、抗毁性差等问题, 提出两种改进方向: 一是采用IEEE 1588v2精确时间协议 (PTP), 依托以太网实现亚微秒级同步, 降低对GPS的依赖; 二是引入深度学习技术, 构建数据驱动的自适应同步模型, 动态补偿误差。为验证方案有效性, 搭建了基于DTMB标准TDS-OFDM信号的MATLAB/Simulink仿真平台, 支持灵活配置同步误差场景。结果表明, PTP方案在局域网中可满足SFN同步精度要求, 而深度学习方法在复杂非线性信道下展现出优异的误差预测与补偿能力, 为SFN同步技术发展提供了新路径。

关键词: 地面数字电视; 单频网 (SFN); 同步技术; MATLAB仿真

引言

地面数字电视 (DTTB) 作为主流传输方式之一, 凭借免费、开放和移动接收优势广泛应用。我国自主制定的DTMB标准已成为国际认可的数字电视标准。为克服单发射塔覆盖受限问题, 单频网 (SFN) 技术通过多发射机同步广播相同信号, 形成“虚拟”大功率源, 显著提升频谱效率并消除同频干扰, 实现无缝覆盖扩展。然而, SFN高度依赖严格的时间与频率同步: 依据DTMB标准, 任意两路信号到达接收端的时间差须控制在OFDM保护间隔内 (通常仅几十微秒)。超限将引发码间串扰, 破坏子载波正交性, 导致系统崩溃。因此, 发展高精度、高可靠且低成本的同步技术至关重要。本文系统分析现有方案瓶颈, 探索融合IEEE 1588v2精确时间协议 (PTP) 与人工智能等新兴技术的改进路径, 并通过MATLAB/Simulink平台开展仿真实验, 验证新方法在DTMB-SFN环境下的可行性与性能优势, 为网络优化提供理论支撑与工程参考。

1 地面数字电视 SFN 同步技术基础

1.1 SFN基本原理与架构

单频网 (SFN) 是一种特殊的多点协同发射网络。其核心思想是“三同”原则: 同频率、同时刻、同内容。一个典型的SFN系统由中心前端、节目分配网络和多个发射台站组成。(1) 中心前端: 负责生成符合传输标准的基带数字电视信号流 (通常是TS流), 并插入用于SFN同步的关键信息包, 如DTMB标准中的SIP (Second-frame Initialization Packet)。(2) 节目分配网络: 将前端产生的信号流分发至各个远端发射台站。该网络可以有

线光纤网络, 也可以是卫星或微波链路^[1]。(3) 发射台站: 每个台站配备激励器和发射机。激励器接收来自分配网络的信号流, 利用外部高精度参考时钟 (如GPS提供的10MHz频率参考和1PPS秒脉冲) 进行精确的时钟恢复和同步, 确保所有发射机在绝对时间基准下同步工作, 最终通过天线将射频信号辐射出去。在接收端, 用户接收到的是来自所有可视发射机信号的线性叠加。得益于OFDM技术固有的抗多径特性, 只要这些信号副本之间的时间差小于保护间隔, 它们就会被视为有益的多径分量, 反而能增强接收信号的能量, 提升信噪比。

1.2 OFDM与保护间隔机制

正交频分复用 (OFDM) 是地面数字电视的核心调制技术, 通过将高速数据流并行分配到多个正交子载波上, 有效对抗频率选择性衰落。然而, 无线多径效应会引起符号间干扰 (ISI)。为此, OFDM在每个符号前插入保护间隔 (GI), 通常采用循环前缀 (CP) ——即复制符号尾部置于开头。GI具有双重作用: 一是消除ISI, 只要多径时延小于GI长度, 就不会干扰下一符号; 二是维持子载波正交性, 使信道卷积等效为循环卷积, 经FFT后仅表现为乘性衰落, 避免载波间干扰 (ICI)。在单频网 (SFN) 中, 不同发射机到接收机的路径差异等效于超大多径时延, 因此同步的关键要求是: 所有信号到达接收端的最大相对时延必须小于保护间隔长度。

1.3 DTMB标准下的同步机制

我国的DTMB标准采用了独特的TDS-OFDM (Time Domain Synchronous OFDM) 调制技术, 与欧洲的DVB-T (C-OFDM) 有所不同。其帧结构由帧头和帧体交替组

成,其中帧头是一个已知的伪随机(PN)序列。DTMB的同步机制主要依赖于这个PN帧头:(1)帧同步:接收机通过本地生成相同的PN序列,并与接收信号进行滑动相关运算。当相关值出现峰值时,即可确定帧头的起始位置,完成帧同步^[2]。(2)频率同步:利用PN序列良好的自相关和互相关特性,可以精确估计出载波频率偏移,并进行校正。(3)信道估计:由于帧头是已知的,接收机可以直接利用接收到的帧头信号来估计信道的冲激响应,无需额外的导频开销,提高了频谱效率。在SFN层面,DTMB标准规定在TS流层面插入SIP包。SIP包包含了精确的UTC时间信息,激励器通过解析SIP包,并结合外部1PPS参考信号,可以精确地对齐整个信号帧的发送时刻,从而保证网络内所有发射机的同步播出。

2 SFN 同步误差来源分析

尽管有上述精密的同步机制,但在实际工程部署中,多种因素仍会引入难以避免的同步误差。

2.1 时钟源误差

这是最根本的误差来源。即使使用高稳晶振或原子钟,其频率也存在固有的漂移(Allan方差)。长期运行下,这种漂移会累积成显著的时间偏差。

2.2 GPS参考信号不稳定

目前主流的SFN同步方案严重依赖GPS。然而,GPS信号在城市峡谷、室内或遭遇恶意干扰时可能失效或精度下降,导致1PPS和10MHz信号失准,进而引发整个网络的同步崩溃。

2.3 节目分配网络时延抖动

信号从中心前端分发到各个发射台站的过程中,经过的光纤、交换机、路由器等设备会引入传输时延。这些时延并非恒定,会因温度变化、设备负载等因素产生抖动(Jitter),导致各台站接收到的信号流存在微小但关键的时间差。

2.4 激励器处理时延差异

不同厂商、甚至同厂商不同批次的激励器,其内部信号处理电路(如FPGA逻辑、缓存等)可能存在微小的固有处理时延差异。这种差异在纳秒到微秒量级,但对于要求严苛的SFN来说,同样是不可忽视的误差源。

这些误差的综合作用,使得维持整个SFN网络在保护间隔内的同步成为一个复杂的系统工程挑战。

3 SFN 同步技术的改进方向

针对上述挑战,本文提出以下两种改进思路:

3.1 基于IEEE 1588v2 (PTP) 的同步方案

IEEE 1588v2,即精确时间协议(Precision Time Protocol, PTP),是一种专为局域网设计的高精度时钟同

步协议。它通过主从架构,利用硬件时间戳技术,可以在以太网环境中实现亚微秒(甚至纳秒)级的时间同步精度,远高于传统的NTP协议(毫秒级)。

3.1.1 改进方案设计

(1)架构调整:在网络中心部署一台高精度的PTP主时钟(Grandmaster Clock),该主时钟可由GPS或其他高稳时钟源授时。(2)网络改造:各发射台站的激励器需支持PTP协议(作为从时钟,Slave Clock),并通过支持硬件时间戳的交换机接入同一个PTP域^[3]。(3)同步机制:PTP主时钟周期性地向从时钟发送Sync消息,并记录精确的发送时间戳。从时钟接收到Sync消息后,记录精确的接收时间戳,并通过Delay_Req/Delay_Resp消息对计算出网络路径延迟。从时钟利用这些信息,不断调整自身的本地时钟,使其与主时钟保持高度一致。

3.1.2 优势

一是降低成本:减少了每个台站对独立GPS接收机的依赖,只需在中心部署一个高质量主时钟。二是提高可靠性:在GPS信号丢失的情况下,PTP网络可以依靠主时钟的守时能力(Holdover)维持一段时间的高精度同步。三是易于管理:PTP协议提供了完善的管理和监控机制,便于网络运维。

3.2 基于深度学习的同步误差补偿

传统同步算法多为基于模型的,对于复杂的、非线性性的信道环境和设备老化等因素引起的同步误差,其补偿能力有限。深度学习技术,特别是循环神经网络(RNN)和长短期记忆网络(LSTM),在处理时间序列数据方面表现出色,能够从历史数据中学习复杂的非线性映射关系。

3.2.1 改进方案设计

(1)数据采集:在发射端或接收端部署监测探针,持续采集与同步状态相关的特征数据,如接收信号强度(RSSI)、信道冲激响应(CIR)、误码率(BER)、本地时钟与参考时钟的偏差等。(2)模型构建:构建一个LSTM网络模型。输入为历史N个时刻的特征向量,输出为下一时刻的同步误差预测值(如定时偏移、频偏)^[4]。(3)在线补偿:将预测出的同步误差实时反馈给接收机的同步模块,用于动态调整其同步参数,实现前瞻性的误差补偿。

3.2.2 优势

一是自适应性强:能够自动适应环境变化和特性缓慢漂移。二是处理非线性:可以有效补偿传统线性模型无法处理的复杂误差。三是提升鲁棒性:在信道条件恶劣或同步参考信号质量下降时,仍能维持较好的

接收性能。

4 仿真平台设计与结果分析

为验证上述改进方案的有效性，本文在MATLAB R2023a环境下构建了一个端到端的DTMB-SFN仿真平台。

4.1 仿真平台架构

仿真平台主要包含以下几个模块：（1）信源与信道编码模块：生成随机比特流，并进行LDPC编码和QAM调制。（2）TDS-OFDM调制模块：按照DTMB标准，构造包含PN帧头的OFDM符号，并添加保护间隔。（3）SFN信道模块：模拟两个发射机到接收机的信道。可以独立设置每条路径的时延、多普勒频移和加性高斯白噪声（AWGN）。（4）同步与接收模块：实现帧同步、频率同步、信道估计和均衡、解调及信道译码。（5）改进算法模块：分别集成PTP同步误差模型和LSTM同步误差预测模型。

4.2 仿真场景与参数设置

（1）基本参数：采用DTMB标准模式，载波数3780，QPSK调制，码率0.6，保护间隔长度为 $59.2\mu\text{s}$ （对应模式7）。（2）场景1 - PTP同步性能评估：模拟一个两发射机SFN。设置理想同步时延差为0。然后，在其中一个发射机的信号路径上人为引入一个服从高斯分布的同步抖动（均值0，标准差 σ ）。对比在不同 σ 值下，采用传统GPS同步（视为理想）和采用PTP同步（ $\sigma = 0.1\mu\text{s}$, $0.5\mu\text{s}$, $1.0\mu\text{s}$ ）时系统的BER性能。（3）场景2 - 深度学习补偿效果：在固定同步时延差（例如 $10\mu\text{s}$ ，小于GI）的基础上，叠加一个随时间缓慢变化的非线性时延漂移（模拟设备老化）。训练一个LSTM模型来预测此漂移，并在接收端进行补偿。对比补偿前后的星座图和BER曲线。

4.3 仿真结果与分析

（1）PTP方案结果：仿真结果表明，当PTP引入的同步抖动标准差 σ 小于 $0.5\mu\text{s}$ 时，系统的BER性能与理想同步

情况几乎无异。即使在 $\sigma = 1.0\mu\text{s}$ 的极端情况下，BER性能的损失也在可接受范围内。这证明了在精心设计的局域网中，PTP完全有能力满足SFN的同步精度要求。（2）深度学习方案结果：在未进行补偿时，由于非线性时延漂移的存在，接收信号的星座点出现了明显的弥散。经过LSTM模型预测并补偿后，星座点重新聚拢，清晰度显著提升。BER曲线（图3）也显示，在SNR为15dB时，补偿后的BER比补偿前降低了近一个数量级，充分证明了该方法的有效性。

5 结语

本文系统研究了地面数字电视单频网（SFN）的同步技术难题，深入分析了SFN工作原理、OFDM保护间隔机制、DTMB同步方法及误差来源。在此基础上，提出两项创新改进：一是采用IEEE 1588v2（PTP）协议构建高精度、低成本同步网络，降低对GPS依赖；二是引入深度学习技术，实现对复杂同步误差的智能预测与动态补偿。通过搭建MATLAB/Simulink仿真平台，验证了两种方案的有效性：PTP方案满足同步精度要求，深度学习方案在非线性信道中表现优异。未来将探索二者融合——以PTP提供稳定时间基准，深度学习补偿高频残余抖动，构建更鲁棒、智能的下一代SFN同步系统，并拓展至多发射机、大规模MIMO-SFN等复杂场景。

参考文献

- [1]赵敏.地面数字电视单频网同步研究[J].广播电视网络,2021,(S1):77-79.
- [2]陆星光,庞载宁,李赐林.地面数字电视单频网同步传输技术研究[J].电视技术,2025,49(10):124-126.
- [3]庞宏杰.地面数字电视单频网同步研究[J].电声技术,2023,47(05):67-70.
- [4]韦雪萍.700 MHz频率迁移项目单频网网络优化与同步验证研究[J].电声技术,2025,49(01):147-150+154.