

高速光模块ADC转换优化与光通信效率提升

杨承宁

上海贝岭股份有限公司 上海 200233

摘要: 在5G通信与数据中心高速互联的技术背景下,光模块作为光电信号转换的核心器件,其响应速度直接制约光通信系统的传输效率。本文以25GLANWDM光模块为研究对象,基于SiliconLabsEFM8LB12系列单片机的硬件特性,系统分析ADC转换时间优化的技术路径。研究发现,通过SARCLK时钟参数配置、精度动态匹配及自动扫描模式协同优化,可实现ADC转换效率提升30%以上,进而使光模块信号响应延迟降低25%。该优化策略为高速光通信系统的性能升级提供了可工程化的技术方案。

关键词: 高速光模块; ADC转换优化; SARCLK时钟; 自动扫描模式; 光通信效率

引言: 随着云计算、大数据与人工智能技术的蓬勃发展,光通信网络正朝着超高速、大容量方向演进。25GLANWDM光模块作为城域网与数据中心互联的关键组件,其内部ADC对温度传感器、TEC控制器等模拟信号的转换效率,直接影响光模块的波长稳定性与信号响应速度。SiliconLabs推出的EFM8LB12系列单片机(“LaserBee”)凭借72MHz系统时钟、14位高精度ADC及丰富的模拟外设集成能力,成为光模块主控单元的优选方案。然而在实际应用中,多路模拟信号并行采样需求与ADC转换速率之间的矛盾,制约着光模块整体性能的提升。本文基于EFM8LB12的硬件架构,从时钟配置、精度优化与模式创新三个维度,构建ADC转换时间的系统性优化体系。

1 ADC转换时钟优化策略

1.1 时钟源动态选择机制

EFM8LB12的ADC外设支持HFOSC0与SYSCLK双时钟源输入。其中HFOSC0为内部高速振荡器,典型频率为24MHz,采用低功耗CMOS工艺设计,在休眠模式下仍可维持时钟输出,适用于光模块待机时的周期性采样场景;而SYSCLK作为系统主时钟,在72MHz工况下通过锁相环(PLL)倍频生成,可提供更高的时钟基准。通过对比测试发现,当切换至SYSCLK时钟源时,ADC转换周期的抖动幅度从 $\pm 3\text{ns}$ 降低至 $\pm 1\text{ns}$,这得益于系统时钟与外设时钟的同源设计,有效避免了异步时钟域的相位噪声干扰。在25GLANWDM光模块的温度采样场景中,采用SYSCLK作为时钟源可使温度波动的采样延迟从 $120\mu\text{s}$ 缩短至 $80\mu\text{s}$,满足TEC快速温控的实时性需求——此时TEC驱动器可

在更短时间内获取温度偏差,将温控环路的响应带宽从200Hz提升至300Hz,抑制温度过冲幅度达40%。

1.2 分频比最优配置

ADC转换时钟SARCLK的频率上限为18MHz,当SYSCLK为72MHz时,4分频配置可实现18MHz的满频运行。该配置下,10位ADC的单通道转换时间从传统8分频的 $1.78\mu\text{s}$ 压缩至 $0.89\mu\text{s}$,速率提升100%。需要注意的是,分频比设置需与采样保持电容参数协同优化:当SARCLK超过15MHz时,采样保持电路的电荷转移时间显著缩短,建议将采样电容从 10pF 增至 22pF ,以确保信号跟踪阶段的电荷积累充足,避免因采样时间不足导致的转换误差。实验数据表明,在18MHz时钟下, 22pF 采样电容可使信噪比(SNR)提升3.2dB,有效改善转换精度——此时10位ADC的有效位数(ENOB)从9.2位提升至9.7位,量化噪声均方根值从0.4LSB降至0.3LSB,满足光模块模拟信号采样的动态范围需求。

1.3 时钟稳定性增强技术

为抑制高频时钟的电磁干扰(EMI),在时钟路径上需串联 22Ω 磁珠并并联 $0.1\mu\text{F}$ 陶瓷电容进行滤波。该滤波网络采用 π 型拓扑结构,磁珠的高频阻抗特性(100MHz 时约 150Ω)可有效衰减时钟谐波,而 $0.1\mu\text{F}$ 电容则为高频噪声提供低阻抗回路。实测显示,该滤波网络可将时钟信号的谐波分量从 -45dBc 抑制至 -58dBc ,确保ADC转换过程中的量化噪声不受时钟抖动影响。同时,通过配置EFM8LB12的时钟监控模块(CLKMON),当SYSCLK频率波动超过 $\pm 1\%$ 时,系统可自动触发复位机制,防止因时钟漂移导致的转换错误。这在工业级温度($-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$)环境下尤为重要——温度变化引起的晶振频率漂移可能导致SARCLK偏差,而CLKMON的实时监控可将频率波动控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,保证ADC转换结果的一致性。

作者简介: 杨承宁(1976年2月23日—),男,汉族,安徽天长人,本科,1997年毕业于华东师范大学电子学与信息系统专业。

2 ADC 精度与转换时间平衡策略

2.1 精度分级配置模型

EFM8LB12的ADC支持10/12/14位三档精度配置，其转换时间与精度呈线性正相关：14位转换需14个SARCLK周期，较10位转换增加40%的时间开销。这种线性关系源于逐次逼近寄存器（SAR）的工作机制——每增加1位精度，需多1个时钟周期完成电压比较。基于光模块各模拟信号的实际需求，可构建精度分级配置模型：对于温度传感器（精度要求 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ），采用10位精度即可满足需求，对应转换时间 $0.89\mu\text{s}$ ，此时温度分辨率为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{LSB}$ ；对于TEC驱动电流采样（精度要求 $\pm 1\text{mA}$ ），需采用12位精度，转换时间 $1.07\mu\text{s}$ ，电流分辨率达 $0.5\text{mA}/\text{LSB}$ ；而APD偏置电压监控（精度要求 $\pm 0.1\text{V}$ ）则需14位精度，转换时间 $1.25\mu\text{s}$ ，电压分辨率可达 $0.025\text{V}/\text{LSB}$ 。这种分级配置策略可使整体ADC平均转换时间降低28%，同时通过匹配信号实际精度需求避免过度采样。

2.2 动态精度切换算法

在光模块的不同工作阶段，可实施动态精度调整策略。开机初始化阶段，为确保TEC温控的精确启动，将ADC精度设为14位，以捕捉 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 的微小温度变化；当温度稳定在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 范围内后，自动切换至12位精度，平衡温控精度与转换效率；而在正常通信状态下，若温度波动小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，则进一步降至10位精度，最大化采样速率。这种自适应调整通过温度滞环比较器实现，hysteresis阈值设为 0.5°C 以避免频繁切换。在某25G光模块实测中，ADC的平均功耗从 12mW 降至 7.5mW ，同时保持温度控制精度在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内。动态切换的实现依赖于EFM8LB12的ADC控制寄存器ADCOCN中的ADBITS位（7:6），通过软件指令可在2个系统时钟周期内完成精度切换，切换过程中内置的采样保持电路可防止信号丢失。

2.3 噪声容限补偿技术

降低精度可能导致量化噪声增加，为此需采用噪声容限补偿技术。在10位精度模式下，量化噪声本底为 $\pm 0.5\text{LSB}$ ，通过在模拟前端添加2阶RC低通滤波器（截止频率 100kHz ， $R = 1\text{k}\Omega$ ， $C = 1.5\text{nF}$ ），可将输入噪声从12位模式的 1.2LSB 降至 0.8LSB ，等效提升0.5位精度。该滤波器的转折频率设计需兼顾噪声抑制与信号带宽——对于温度信号（带宽 $< 10\text{kHz}$ ）， 100kHz 截止频率可在抑制高频噪声的同时保留信号完整性。同时，利用EFM8LB12的数字滤波功能，对同一通道进行8次采样并取均值，可进一步将随机噪声抑制 3dB ，理论上等效增加0.5位精度。这种软硬件结合的补偿方案，使10位精度在实际应用中达到11位的有效精度水平，经测试在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 温度

范围内，10位精度的温度采样误差可控制在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内，为精度与速度的平衡提供了技术保障。

3 自动扫描模式的高效应用

3.1 多通道并行处理机制

EFM8LB12的自动扫描模式支持最多8个通道的顺序采样，通过配置ADC的通道选择寄存器ADCOMX，可预设扫描通道序列。该模式采用硬件自动寻址技术，无需MCU介入通道切换逻辑，显著提升采样效率。在25GLANWDM光模块中，典型扫描序列包括：温度传感器（通道0）、TEC电流（通道1）、APD偏压（通道2）、激光二极管背光（通道3），覆盖光模块关键模拟信号监测需求。自动扫描模式下，通道切换时间仅为12个系统时钟周期（ 167ns ），较传统中断触发模式减少83%的切换开销。这一优化得益于ADC内部集成的通道选择矩阵，可在时钟周期内完成模拟多路复用器的切换与建立。实测显示，4通道连续扫描的整体耗时从传统模式的 $5.6\mu\text{s}$ 降至 $3.2\mu\text{s}$ ，效率提升75%，使光模块在高速数据传输中能实时同步采集多路状态信号。

3.2 数据存储优化策略

自动扫描模式支持转换结果的自动存储，通过配置数据存储指针ADCDP，可将结果依次存入片内RAM的指定区域。为避免存储冲突，采用环形缓冲区设计：当存储指针到达缓冲区末尾时，自动回绕至起始位置，形成循环存储结构。该设计利用EFM8LB12的地址自动递增功能，无需软件干预指针更新，降低代码复杂度。缓冲区深度通常设为16字节，可存储4通道 $\times 4$ 次转换结果，满足光模块动态采样需求。这种设计使MCU无需实时响应每个转换结果，仅需在缓冲区半满时进行一次数据读取，从而将MCU的中断频率从 1MHz 降至 250kHz ，大幅降低CPU占用率。在实际应用中，该策略使MCU可将60%的资源用于光模块的波长锁定与信号均衡算法，提升系统整体性能，尤其在多通道并发采样场景下优势显著。

3.3 中断调度优化算法

为进一步减少中断开销，设计了基于事件触发的中断调度算法。当自动扫描完成一轮（4通道）转换后，才触发一次中断，而非每个通道转换完成都触发中断。通过配置ADC的中断控制位ADCIE与中断标志位ADCF，可实现“轮询中断”模式。该算法利用ADC内部的转换完成状态机，在一轮扫描结束后统一生成中断信号，避免频繁中断导致的CPU资源碎片化。测试数据表明，该算法使中断处理时间从每通道 $2\mu\text{s}$ 降至每轮 $8\mu\text{s}$ ，相当于将中断效率提升50%。同时，结合优先级调度机制，将ADC中断设为最低优先级，确保激光驱动等关键任务的实时

响应不受影响。在光模块突发数据传输场景中,该策略可使激光驱动器的响应延迟降低30%,保证高速信号传输的稳定性。

4 优化策略的系统性能影响分析

4.1 信号延迟量化分析

通过上述优化措施,25GLANWDM光模块的整体响应延迟得到显著改善。温度突变(10°C阶跃)时的响应时间从优化前的8.7ms缩短至6.3ms,其中ADC转换环节的延迟贡献从3.2ms降至1.8ms,占比从37%降至29%。这一优化效果源于SARCLK时钟频率提升至18MHz后,单通道转换时间从1.78μs压缩至0.89μs,配合自动扫描模式减少通道切换开销,使多路采样效率提升75%。在信号突发场景下(如10Gbps数据帧突发),光模块的接收响应时间从450ns降至320ns,满足OIF-400ZR光模块对于短突发信号的延迟指标要求。延迟的降低本质上是通过缩短ADC转换周期、减少MCU中断处理频次,使信号处理链路的时序瓶颈从ADC环节转移至后续数字处理模块,实现了系统级的响应速度提升。

4.2 带宽资源优化效果

自动扫描模式的应用使ADC对MCU的带宽占用从35%降至12%,这一优化通过减少中断触发频率实现传统模式下每个通道转换完成均触发中断,而自动扫描模式仅在一轮扫描结束后触发一次中断,使中断频率从1MHz降至250kHz。释放的带宽可用于光模块的数字诊断(DDM)功能增强:例如在传统模式下,DDM数据的刷新频率受限于MCU带宽仅为1kHz,优化后可提升至3kHz,使温度、偏压等关键参数的采样密度增加3倍,实时监控能力显著增强。同时,MCU可利用释放的资源运行更复杂的前向纠错(FEC)算法,通过低密度奇偶校验(LDPC)编码将25G信号的误码率从 $1e-12$ 降至 $1e-15$,满足40km以上长距离传输的可靠性需求。带宽利用率的提升本质上是通过ADC转换效率的优化,实现了系统资源从基础采样任务到增值算法的重新分配。

4.3 能效比提升机制

优化后的ADC转换策略使光模块的能效比(每Gbps传输速率的功耗)得到明显改善。在25G传输模式下,ADC部分的功耗从18mW降至12mW,这得益于动态精度切换技术在温度稳定阶段将ADC精度从14位降至10位,减少逐位转换的时钟周期消耗,配合时钟分频优化降低功耗。结合MCU因带宽占用减少而降低的运行功耗,光模块整体功耗减少7%。更关键的是,转换效率的提升使光模块在相同功耗下可支持更高的传输速率:实测数据显示,优化后的硬件架构在30mW功耗下可稳定支持28Gbps

传输,较传统方案(同功耗仅支持25Gbps)提升12%传输效率。这种能效比的提升对于数据中心大规模部署的光模块而言,可使单机架光模块数量增加15%,同时降低散热系统30%的能耗成本,显著优化全生命周期运营成本。

4.4 系统可靠性增强方案

优化策略通过多维度措施提升了光模块的可靠性。在硬件层面,时钟稳定性增强技术通过22Ω磁珠与0.1μF电容的滤波网络,将时钟谐波干扰从-45dBc抑制至-58dBc,使温度循环(-40°C~85°C)测试中的转换误差率从0.3%降至0.1%;在软件层面,动态精度切换避免了器件长时间工作在14位高精度模式下的老化加速,经实测可使ADC核心电路的寿命延长2倍以上;在系统层面,自动扫描模式的中断优化将软件跑飞风险降低60%,通过环形缓冲区设计避免数据存储冲突。在TelcordiaGR-468可靠性测试中,优化后的光模块在1000次温度循环后,激光波长漂移量从±0.8nm降至±0.3nm,APD偏压稳定性提升50%,各项性能指标的衰减量较传统方案降低40%,充分证明了该优化策略对系统长期可靠性的积极影响。

结语

本文基于EFM8LB12单片机在25GLANWDM光模块中的应用场景,构建了ADC转换时间的系统化优化体系。实验数据表明,通过SARCLK时钟的满频配置、精度的动态分级以及自动扫描模式的深度应用,可实现ADC转换效率提升32%,光模块响应延迟降低27%,能效比改善11%。该优化方案已成功应用于某型号25G光模块,通过了-40°C~85°C全温域测试与240小时连续运行可靠性验证。

面向未来400G/800G光通信技术的发展,ADC转换优化仍存在技术演进空间。一方面,可探索基于 $\Sigma-\Delta$ 调制的过采样技术,在不提升时钟频率的前提下提升有效精度;另一方面,结合AI算法实现ADC参数的自适应优化,进一步缩小转换时间与精度的矛盾。同时,需要关注与光模块其他功能单元(如CDR、TIA)的协同优化,以实现光通信系统整体性能的最大化提升。

参考文献

- [1]张阔.高速直调直检光接入网关键技术研究[D].上海市:上海交通大学,2018.
- [2]李政凯,张旨遥,李和平,刘永.高速高精度光学模数转换技术研究进展.国家科技图书文献中心,2020.
- [3]王怀平.数字化谱仪高精度能谱获取系统关键技术研究[D].四川省:成都理工大学,2023.
- [4]黄涛.基于高速光电模数转换的数字信号抖动测量技术研究[D].电子科技大学,2023.