

# 直流微电网内多源协同变换器信息-能量复合调制的 Goertzel 高效解调技术

吴煜轩, 王睿<sup>†</sup>, 郭宇涵, 孙秋野

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 信息-能量复合调制技术逐步成为直流微电网多源变换器的高效分布式协同控制的通信基础, 相较于传统光纤和电力载波通信技术, 具备无需专用通信线路和特定信号发生单元的优势。然而, 现有解调方法普遍依赖离散傅里叶变换 (DFT) 进行频谱分析, 在嵌入式系统“资源受限、非同步采样”的约束下, 面临频谱泄露与实时性不足问题。鉴于此, 提出一种基于 Goertzel 算法的高效解调技术。首先, 以典型的功率/数据 2FSK 单载波调制方案为研究对象, 阐述其解调性能的挑战; 其次, 设计一种基于 Goertzel 算法的高效解调技术, 通过较低的计算复杂度有效缓解频谱泄露与实时性不足; 最后, 为验证所提出方法设计系统的仿真对比实验, 实验结果表明: 在相同计算资源下, 所提出方法的幅值估计均方根误差较传统 DFT 方案最高降低 98%, 有效抑制了频谱泄露; 在分析窗长相等的条件下, 其处理耗时较传统 DFT 算法平均减少 60.5%, 实现 2.53 倍的加速比。

**关键词:** 直流微电网; 信息-能量复合调制; 功率/数据 2FSK 单载波调制; Goertzel 算法; 频谱泄露; 实时性

**中图分类号:** TN763 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2026.0036

**引用格式:** 吴煜轩, 王睿, 郭宇涵, 等. 直流微电网内多源协同变换器信息-能量复合调制的 Goertzel 高效解调技术 [J]. 控制与决策, xxxx, x(x): xxxx-xxxx.

## Goertzel-based efficient demodulation technology for cyber-energy dual modulation in multi-source coordinated converters within DC microgrids

WU Yu-xuan, WANG Rui<sup>†</sup>, GUO Yu-han, SUN Qiu-ye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Cyber-energy dual modulation technology is emerging as the communication foundation for efficient distributed coordinated control of multi-source converters in DC microgrids. It offers advantages over traditional optical fiber and power line carrier communication by eliminating the need for dedicated lines and specific signal generation units. However, existing demodulation methods predominantly rely on discrete Fourier transform (DFT) for spectrum analysis and face challenges of spectral leakage and insufficient real-time performance under the “resource-limited, non-synchronous sampling” constraints of embedded systems. This paper proposes an efficient demodulation technology based on the Goertzel algorithm. Firstly, taking the typical power/data 2FSK single-carrier modulation as the research subject, it analyzes its demodulation challenges. Secondly, an efficient demodulation scheme based on the Goertzel algorithm is designed, which alleviates spectral leakage and real-time limitations with lower computational complexity. Finally, systematic simulation comparison experiments are conducted for validation. Results show that, under the same computational budget, the proposed method reduces the root-mean-square error of amplitude estimation by up to 98% compared to the conventional DFT-based scheme, effectively suppressing spectral leakage. Under equal analysis window length, its processing time is reduced by an average of 60.5% compared to the traditional DFT algorithm, achieving a speedup factor of 2.53.

**Keywords:** DC microgrid; cyber-energy dual modulation; power/data 2FSK single-carrier modulation; Goertzel algorithm; spectral leakage; real-time performance

收稿日期: 2026-01-12; 录用日期: 2026-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52307194); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (N25GFZ004).

责任编委: 邢兰涛.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: wangrui@ise.neu.edu.cn.

## 0 引言

随着可再生能源渗透率的不断提高与电力电子装备的广泛部署<sup>[1]</sup>,以直流微电网为代表的分布式能源系统因其高效、灵活、可靠和控制复杂度较低的特性,正成为新型电力系统的关键形态<sup>[2-3]</sup>.如图1所示,直流微电网通常由光伏、储能电池、超级电容等多类型分布式电源通过电力电子变换器并联至公共直流母线构成.为实现系统内功率的精确分配、母线电压的稳定控制以及“源-储-荷”的智能协同,各变换器之间必须进行快速、可靠的信息交互.然而,在极端环境(如偏远山区、海岛)、高电磁干扰工业现场或对成本敏感的规模化应用中,为每个变换器额外部署通信线路不仅大幅增加系统复杂性与成本,更引入了额外的故障点,降低了整体可靠性<sup>[4]</sup>.因此,利用电力电子变换器自身已有的功率开关动作,在传输能量的同时传输数据,即“信息-能量复合调制”技术,成为解决上述矛盾的理想途径.然而,目前的研究大部分都聚焦在优化调制策略本身,在解调方面仍然采用离散傅里叶变换(DFT)系列的解调手段,会面临频谱泄露、实时性受限等问题,因此本文提出一种基于Goertzel算法的高效解调技术来改善上述问题.

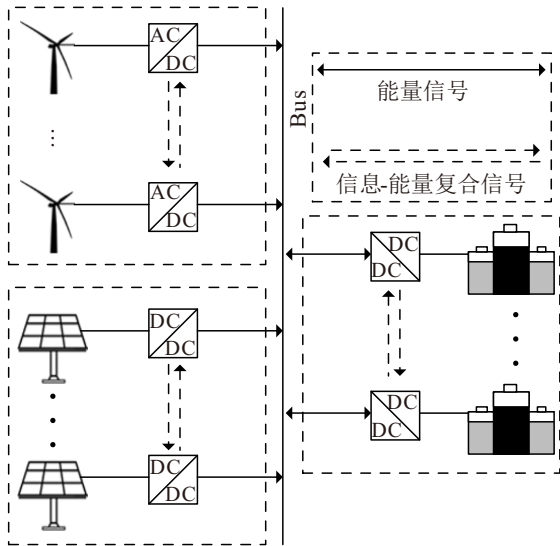


图1 直流微电网拓扑图

目前,信息-能量复合调制技术已经得到了广泛的研究,该技术通过在变换器的脉冲宽度调制(PWM)控制信号中,巧妙地嵌入代表数据的特征扰动(如频率、相位变化),实现“一线两用”,在单一物理通道上同步完成电能变换与数据通信<sup>[5-6]</sup>.

在数据通信的解调方面,基于离散傅里叶变换或快速傅里叶变换(FFT)的幅值检测是工程中的普遍选择<sup>[7-9]</sup>.然而,DFT系列解调方法在直流微电网

多源协同变换器的嵌入式应用场景下面临严峻挑战:

1) 频谱泄露严重:为保证控制的实时性,变换器控制器(如DSP、低成本MCU)通常只能在每个通信符号周期内,调用一次固定点数的频谱分析IP核.在非整数周期采样时,短窗DFT会产生严重的频谱泄露,导致目标频点能量扩散至旁频,显著降低幅值估计精度<sup>[10-12]</sup>.

2) 计算资源紧张:DFT/FFT需要计算整个频带或大量频点,其FFT复数乘加运算量( $O(N \log_2^N)$ )对于同时承担复杂功率控制任务的处理器而言负担较重.

3) 实时性受限:上述计算复杂度和固定的窗长,限制了系统响应速度和通信速率提升的空间.

值得注意的是,这种“每个符号周期仅允许单次、固定长度频谱分析”的约束,在基于统一硬件平台的模块化、低成本多源协同变换器设计中极为常见.它既是出于降低芯片资源和功耗的考虑,也是为了保证各控制与通信任务的时序确定性<sup>[13]</sup>.

现有研究主要围绕优化调制策略本身以提升抗干扰能力、确保时序与提高频带利用率,而较少对后端通用的DFT解调手段进行深度优化.现有的策略可分为两个主要方向:其一,在数模转换频带,通过发掘控制环与滤波网络间的“安静”频带<sup>[14]</sup>,并采用FSK<sup>[15]</sup>、DPSK<sup>[16-17]</sup>、OFDM<sup>[18]</sup>等高效数字调制技术嵌入数据,以规避功率控制干扰并提升传输距离与效率;其二,在开关调制频带,则直接利用开关纹波作为信息载体,采用FH-DPSK<sup>[8]</sup>、DSSS<sup>[19]</sup>乃至QAM<sup>[20-21]</sup>等编码型调制来抑制输出电压扰动、提升抗噪性与通信速率.这些研究显著推进了“能量-信息”一体化传输的可行性与性能边界.

然而,一个普遍存在的局限是:上述先进的调制方法,其解调后端往往仍默认依赖基于DFT/FFT的通用频谱分析单元进行信息提取.文献[22]指出,在非同步采样条件下,DFT的频谱泄露问题会导致幅值估计精度显著下降,而传统的加窗插值校正方法虽然能够部分缓解这一问题,但会引入额外的计算开销,难以满足嵌入式平台的实时性要求.文献[23]进一步从“信息-能量”基本关系出发,指出信息能源深度融合系统对信号处理算法的计算效率与精度提出了双重挑战,传统频谱分析方法已难以适应此类应用场景的需求.这意味着,无论前端的调制策略如何优化,其最终的通信性能仍受制于DFT方法固有的频谱泄露、计算负担重和实时性僵化等瓶颈.特别是在直流微电网多源协同变换器所面临的“单次、固定短窗”的严苛资源约束下,这些瓶颈被进一步放

大,限制了先进调制技术潜力的充分发挥。

在此背景下,本文引入 Goertzel 算法作为解调的核心方案,以二进制频移键控 (2FSK) 为例,其优越性在于本质性地区别于全局频谱分析的 DFT 思路。Goertzel 算法是一种针对单个或极少数已知频点的优化离散傅里叶系数计算算法。它通过将 DFT 计算等效为一个二阶 IIR 滤波器的迭代过程,仅对感兴趣的 2FSK 特征频点进行“定点”计算,从而带来了两大核心优势:第一,在计算效率上,它避免了 DFT/FFT 的全局复数运算,将计算复杂度降至  $O(N)$ ,且所需存储资源极少,很大程度上缓解了嵌入式处理器的计算压力;第二,在工程实现上,在相同的“单次调用”约束下,其算法结构允许将计算资源全部集中于目标频点的能量累积,等效于延长了有效观测窗口,从而在非整数周期采样条件下,能更有效地抑制频谱泄露,提升低信噪比环境下的幅值估计精度与解调鲁棒性。

本文的创新点主要体现在以下两个方面:

1) 针对直流微电网多源协同变换器的信息-能量复合调制场景,考虑到解调端通常运行于嵌入式平台,受限于每个符号周期仅能进行一次固定短窗频谱分析,且非同步采样易导致频谱泄露等工程约束,本文将 Goertzel 算法引入功率/数据 2FSK 单载波解调环节:仅围绕 2FSK 的两个目标频点进行递推幅值提取与判决,在有限计算预算下提升幅值估计精度与解调鲁棒性,并通过典型系统仿真验证其可行性与有效性。

2) 通过面向单频检测递归结构的设计,将计算资源精准集中于目标频率,在相同计算资源下,其幅值估计均方根误差较传统 DFT 方案最高可降低 98%,有效抑制了频谱泄露。在分析窗长相等的条件下,其处理耗时较传统 DFT 算法平均减少 60.5%。

## 1 信息-能量复合调制技术

### 1.1 电力电子变换的信息本征特性

电力电子变换器作为现代电能转换的核心装置,其工作机理蕴含着承载信息的天然属性。回顾其发展,早期线性电源因晶体管工作于放大区而效率低下,且模拟控制易受干扰。以图 2 所示 Buck 变换器为代表的开关电源的普及,标志着一个根本性转变:功率管在数字 PWM 信号驱动下工作于开关状态,将连续输入电能斩波为离散的高频脉冲序列,再经滤波后输出。这一“模拟-离散-模拟”的变换过程,其核心在于生成了一个离散化的电能脉冲序列。该序列的宏观参数(如平均电压、电流)由占空比控制以

完成功率变换,而其微观形态(如脉冲的精确时序、边沿)则具备了表征数字信号的潜力,从而在物理层面统一了能量传递与信息传递的载体。

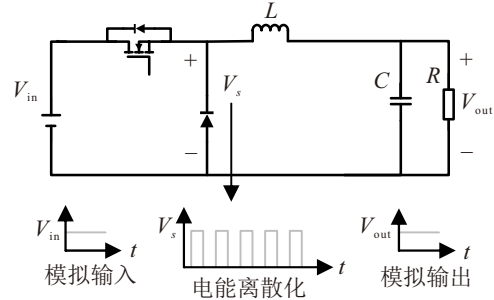


图2 Buck 变换器原理图

从控制自由度分析,数字 PWM 生成的门极驱动信号  $g(t)$  本质上由载波与调制波比较产生。此过程存在三个独立的可控参数:开关频率  $f$ 、相位  $\phi$  与占空比  $d$ 。若假设这些参数可在特定集合中自由选择,那么输出电能序列所能表征的不同状态数(即其信息量)便可借用信息熵的概念进行度量。由此定义变换器工作状态携带的信息量为功率变换熵  $H_{pc}$ ,其表达式为:

$$H_{pc} = H(f) + H(\phi) + H(d), \quad (1)$$

$$H(f) = - \sum_{i=1}^{N_f} P(f = f_i) \log P(f = f_i), \quad (2)$$

$$H(\phi) = - \sum_{i=1}^{N_\phi} P(\phi = \phi_i) \log P(\phi = \phi_i), \quad (3)$$

$$H(d) = - \sum_{i=1}^{N_d} P(d = d_i) \log P(d = d_i). \quad (4)$$

其中,  $H(f)$ 、 $H(\phi)$ 、 $H(d)$  分别为各参数独立变化所贡献的熵值。当占空比  $d$  完全专用于功率控制时,可用于信息调制的熵则简化为:

$$H_{pc} = H(f) + H(\phi). \quad (5)$$

上述分析从信息论角度严格证明,电力电子变换器不仅是一个能量处理器,其内在的、未被功率控制完全占用的自由度(如  $f$  和  $\phi$ ) 更构成了一个并行的信息信道。这一内蕴的信息本征特性,是信息-能量复合调制技术的理论基础,使得通过单一功率端口同步传输电能与数据成为可能,能够显著简化系统布线、提升可靠性并降低成本,特别适用于直流微电网等分布式系统。

在众多复合调制技术中,功率/数据 2FSK 单载波调制因其原理直观、抗噪声能力强、对变换器功率环路影响小而成为当前主流且常用的实施方案之一。该技术通常选择开关频率  $f$  作为信息载体,通过将其

在两个预设频点 $f_0$ 与 $f_1$ 之间切换来分别表征二进制数据“0”和“1”。由于其调制信号在频域上表现为两个离散的谱线,因此解调的核心便归结为从复杂的功率波形中,快速、准确地检测这两个特定频点的幅值或能量。对这一高效、可靠解调算法的追求,正是推动本领域发展的关键环节,也为本文在解调侧进行算法革新、提升系统整体性能提供了明确的研究意义与价值导向。下文将具体阐述功率/数据 2FSK 单载波调制的工作原理。

## 1.2 功率/数据 2FSK 单载波调制原理

如 1.1 节所述,电力电子变换器内蕴的频率与相位自由度,为实现信息与能量的同步传输提供了物理基础。本节将具体阐述如何利用这一基础,实现功率/数据 2FSK 单载波调制。该技术是实现“信息-能量复合调制”的一种经典且高效的工程化方案。

传统的 PWM 功率控制技术的核心是通过一个固定频率的三角载波 $v_{tr}(t)$ 与功率控制参考信号 $v_c(t)$ 进行比较,生成占空比 $d$ 可调的矩形波门极驱动信号 $\delta(t)$ ,从而控制输出功率。在此过程中,占空比 $d$ 是实现功率变换的主控自由度。然而,式(1)揭示,矩形波序列除占空比外,还存在频率 $f$ 与相位 $\phi$ 两个独立的控制维度。

功率/数据 2FSK 单载波调制技术正是基于上述原理,其工作框图与波形如图 3 所示。该技术采用分时复用同一载波的策略,巧妙地将功率通道转化为通信信道:

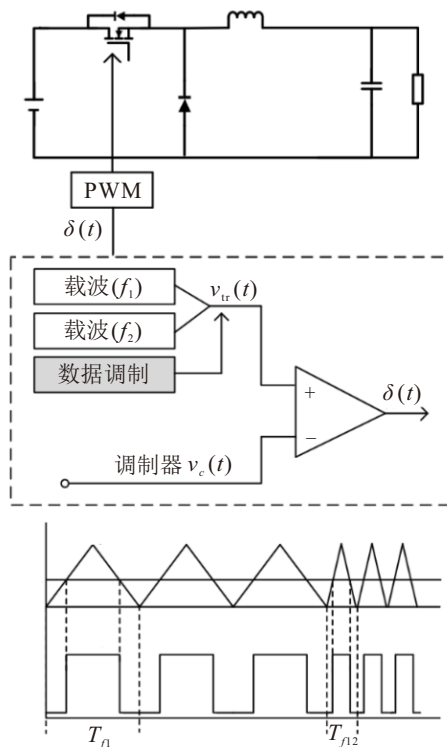


图3 功率/数据 2FSK 单载波调制系统框图 [6]

1) 功率调制维度:功率控制信息依然通过调节脉冲的占空比 $d$ 来实现,确保电能变换的首要功能。

2) 数据调制维度:二进制通信数据则通过调制载波自身的频率 $f$ 来传递。具体而言,设定两个不同的载波频率 $f_0$ 与 $f_1$ ,分别代表二进制符号“0”和“1”。在每个开关周期 $T_s$ 内,三角载波 $v_{tr}(t)$ 的频率根据待发送的数据位在 $f_0$ 与 $f_1$ 之间切换。

由于占空比控制与频率调制作用于脉冲序列两个完全正交的参数,因此功率调节与数据传输互不干扰,实现了“一线双传”。最终,承载了复合调制信息的门极信号 $\delta(t)$ 驱动功率开关管,使得数据的频移键控特征直接被映射到变换器输出侧的电压或电流开关纹波上。接收端通过检测该纹波中特定频率分量( $f_0$ 与 $f_1$ )的强弱,即可解调出原始数据。

目前,在工程实践中,从接收到的复合纹波信号中提取 $f_0$ 与 $f_1$ 频率分量幅值的主流方法,是采用离散傅里叶变换或其快速算法。DFT 解调算法通过对一个时间窗口内的采样信号进行频谱分析,能够同时计算出 $f_0$ 和 $f_1$ 处的频谱幅值,进而通过比较两者大小判决数据位。这种方法因其原理直观、易于实现,已被广泛采用。

然而,DFT 解调方法在嵌入式、强实时性的功率变换应用场景中,其理论基础上的局限性——特别是由非同步采样引起的频谱泄露问题——将变得尤为突出,严重影响解调的可靠性。

## 2 Goertzel 与 DFT 解调算法原理对比

### 2.1 DFT 算法解调原理

在功率/数据 2FSK 单载波调制系统中,接收端需从混杂着功率开关噪声、电路非线性扰动及信道干扰的母线电压纹波中,准确提取出表征数据位的两个特征频率分量( $f_0$ 与 $f_1$ )的幅值。DFT 算法因其数学上的严谨性及对周期信号频谱的精确刻画能力,成为实现该解调任务的经典频域方法。其核心思想在于,将时域的离散采样序列变换到频域,通过直接观察并比较目标频点处的频谱幅值来完成数据判决。

对于一个长度为 $N$ 的离散时间信号序列 $x[n]$ ( $n = 0, 1, \dots, N - 1$ ),其 $N$ 点 DFT 定义为:

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}. \quad (6)$$

其中, $X[k]$ 是第 $k$ 个频率分量的复数频谱,对应的模拟频率为 $f_k = kf_s/N$ , $f_s$ 为采样频率。在 2FSK 解调应用中,目标频率 $f_0$ 和 $f_1$ 是预先已知的。通过计算这两个频率点对应的频谱索引 $k_0 = \text{round}(f_0 \cdot N/f_s)$ 和 $k_1 = \text{round}(f_1 \cdot N/f_s)$ ,即可直接获取其频谱幅

值 $|X[k_0]|$ 与 $|X[k_1]|$ 。解调判决规则简单直观表现为比较两幅值大小,幅值较大的频点即判定为当前发送的数据位,在实际工程上可以参见文献[6]中功率/数据单载波调制的实验。

需要指出的是,在实际工程实现中,DFT通常借助快速傅里叶变换(FFT)完成计算。FFT是DFT的一种高效算法,它利用旋转因子 $W_N^{kn} = e^{-j2\pi kn/N}$ 的周期性和对称性,将DFT的运算复杂度从 $O(N^2)$ 降低至 $O(N \log_2 N)$ 。从解调原理角度,FFT与DFT在数学上完全等价:对长度为 $N$ 的离散序列 $x[n]$ 进行 $N$ 点FFT变换,所得结果即为式(6)定义的频谱 $X[k]$ 。因此,若采用FFT实现2FSK解调,其核心步骤与DFT解调一致:先通过FFT获得整个频谱,再提取目标频点处的幅值 $|X[k_0]|$ 与 $|X[k_1]|$ ,最后通过比较幅值大小完成数据判决。然而,FFT在提供全频谱信息的同时也引入了额外的计算开销;对于仅需两个目标频点的解调任务,使用FFT计算所有频点会造成计算资源的浪费。这一差异将在3.2节的性能对比实验中进一步验证。

上述算法的性能对比及适用场景分析详见表1,尽管DFT解调原理清晰,但其性能建立在一个关键的理论假设之上:对目标频率分量的采样必须满足整数周期关系,即数据窗 $N$ 点内应包含目标频率信号的整数个周期。在此理想条件下,目标频率能量将完全集中于单个DFT频点上,从而获得无偏差的幅值估计。

表1 DFT与FFT算法性能对比

对比维度	DFT	FFT
数学本质	计算式(6)	式(6)的快速实现
计算复杂度	$O(N^2)$	$O(N \log_2 N)$
存储需求	较高	较低
适用场景	少数指定频点	全频谱
优势	计算任意频点	计算效率高
缺陷	计算全频点时效率低下	即使只需少数频点也需计算全部输出

然而,在实际的直流微电网嵌入式解调场景中,此条件极难满足:

1) 非同步采样:发送端变换器的开关频率(载波)与接收端ADC的采样时钟源自不同的晶振,存在固有频偏。因此,几乎无法保证在任意截取的 $N$ 点数据窗内, $f_0$ 与 $f_1$ 的信号恰好完成整数个周期振荡。

2) 短窗运算约束:如引言所述,受限于控制器的实时性,每个通信符号周期内通常只能进行一次固定长度 $N$ 的频谱分析。这个 $N$ 值通常较小(如128

或256),以降低单次计算延时。短窗进一步恶化了非整数周期采样带来的问题。

当上述条件不满足时,DFT解调将面临根本性的理论缺陷——频谱泄露,即目标频率的能量将无法集中于一点,而是“泄露”到整个频域的多个频点上,从而增大解调时的幅值估计误差,降低系统的抗干扰能力。

## 2.2 非同步采样下的频谱泄露问题及其对解调性能的影响

频谱泄露是指在进行离散傅里叶变换分析时,由于时域截断和非同步采样,导致信号的真实频谱能量扩散到整个频域范围内,而不是集中在理论频率点上的现象。出现这种现象的主要原因有两点——有限长观察和周期延拓。

1) 有限长观察: DFT处理的信号是一个有限长度的序列( $N$ 个样本)。这意味着,它本质上是将无限长的原始信号乘以一个矩形窗。

2) 周期延拓: DFT在频域分析的基础是,它将这 $N$ 个样本的有限长序列隐式地视为一个周期信号的一个完整周期。

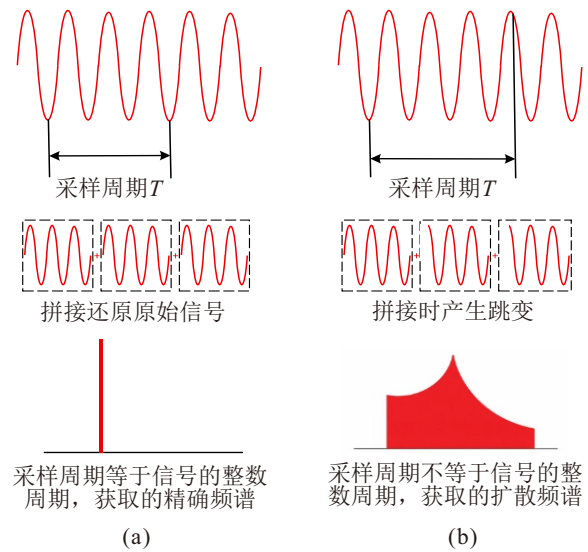


图4 频谱泄露示意图

当在理想情况时(无泄露),如图4(a),如果被分析的信号恰好是一个整数倍于DFT频率分辨率( $f_s/N$ )的正弦波。那么,截取到的 $N$ 个样本恰好是这个正弦波的整数个周期。当我们把这个片段进行周期延拓时,它能完美地拼接成一个连续的、光滑的周期信号。这个周期信号的频谱在DFT的频点上会有一条干净的谱线,其他地方为零。

考虑实际情况时(出现泄露),如图4(b),大多数情况下,由于晶振的固有频偏以及系统干扰,信号的频率并不正好落在DFT的频点上。也就是说,在

$N$  个样本内, 包含的不是整数个周期. 当我们把这个非整数周期的片段进行周期延拓时, 在片段的首尾连接处会出现不连续点. 为了“拟合”这个在边界上不连续的周期信号, DFT 必须调动大量不同频率的正弦分量 (即所有 DFT 频点) 来合成这个跳跃. 这些额外的频率分量在频谱图上就表现为: 原本单一的谱线“扩散”或“泄露”到了整个频域, 能量分散到了多个频点, 并且出现了我们看到的“拖尾”现象.

在功率/数据 2FSK 解调系统中, 频谱泄露将直接导致以下两个严重的性能劣化问题:

1) 幅值估计误差与判决门限失稳, 解调的核心是比较代表“0”和“1”的两个特征频率  $f_0$  与  $f_1$  的幅值  $|X[k_0]|$  与  $|X[k_1]|$ . 频谱泄露导致目标频点的真实能量“流失”到其他频点, 使得在  $k_0$  和  $k_1$  处直接读取的幅值低于其理论值, 且该误差是信号实际频率与最近 DFT 频点之间偏差 (即“频偏”) 的非线性振荡函数.

更重要的是, 在实际系统中, 由于晶振温漂、负载瞬变等因素, 发送端的开关频率  $f_0$  和  $f_1$  可能存在微小波动. 这种波动会导致频偏  $\delta$  实时变化, 进而使得  $|X[k_0]|$  与  $|X[k_1]|$  的测量值产生无规律的起伏, 增加了解调误码率. 文献 [24] 针对嵌入式系统中的非同步采样问题开展了深入研究, 其结果表明: 在固定采样率下, 当电网频率发生  $\pm 0.2\text{Hz}$  的波动时, 由非同步采样引发的频谱泄露可导致谐波幅值测量误差增大 3%~8%, 且该误差随频率偏差呈非线性变化. 将该结论映射至 2FSK 解调场景中, 发送端载波频率的微小漂移将直接导致目标频点幅值估计值的随机波动, 当幅值波动幅度超过判决阈值范围时, 即引发误码. 以本文实验参数为例, 若 83.3 kHz 频点因频偏产生 5% 的幅值衰减, 而 100 kHz 频点因噪声干扰幅值相对抬升, 原本清晰的判决边界将被模糊, 误码率可能上升 1~2 个数量级.

2) 抗干扰能力下降与邻近干扰敏感, 频谱泄露不仅是目标能量的“流失”, 也是对其他频点的“污染”. 泄露产生的旁瓣会抬升整个频域的背景噪声基底. 在直流微电网环境中, 功率开关动作、负载切换等会产生丰富的开关噪声和谐波, 这些干扰频率若恰好位于  $f_0$  或  $f_1$  的旁瓣范围内, 其影响会被显著放大.

此外, 由于 DFT 的固定栅栏效应,  $f_0$  或  $f_1$  本身可能非常接近 (例如 83.3 kHz 与 100 kHz). 在严重频谱泄露的情况下, 一个频率的主瓣和旁瓣可能会直接覆盖或干扰另一个频率的主瓣区域, 造成严重的频间串扰. 这种由于泄露导致的自身信号相互干扰, 在低信噪比条件下尤为致命, 可能使解调器完全失效.

在数字信号处理中常见的缓解频谱泄露的方法主要是: 加窗函数、增加采样长度、提高信号频率与 DFT 频点的对齐程度<sup>[25]</sup>.

综上所述, 基于 DFT 的解调方法在直流微电网这一特定应用场景下面临根本性挑战. 非同步采样引发的频谱泄露, 并非一个可通过简单校准完全消除的误差, 而是 DFT 算法在“有限长、离散化”分析连续时间信号时固有的理论缺陷. 在资源受限、强调实时性与可靠性的嵌入式变换器协同控制中, 这一缺陷被“固定短窗”的约束进一步放大.

### 2.3 面向单频检测的 Goertzel 算法原理与优势

针对 2.2 节所述 DFT 解调在非同步采样下面临的根本性缺陷, 本章节引入并阐述一种面向单频或极少数频点高效检测的优化算法——Goertzel 算法. 该算法并非一种新的频谱估计理论, 而是 DFT 在特定应用场景下的一种智能递归实现形式. 其核心思想在于, 当仅需计算信号在少数几个预定频率点上的频谱分量时, 可以避免传统 DFT/FFT 全局计算的冗余性, 将计算资源“精准投放”于目标频点, 从而在数学结果完全等价的前提下, 实现计算效率、内存占用和工程适用性的显著提升.

对于一个长度为  $N$  的离散时间序列  $x[n]$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ), 其在第  $k$  个频点 (对应模拟频率  $f_k = kf_s/N$ ) 上的 DFT 计算式如 (6) 所示. Goertzel 算法的改良手段在于, 将上述复数乘法和运算, 重新建模为一个信号通过一个二阶无限脉冲响应 (IIR) 滤波器并进行后续处理的递推过程. 此过程分为两个清晰的阶段:

首先, 第一阶段是递推滤波. 定义中间状态变量  $v_k[n]$ , 其递推关系为:

$$v_k[n] = x[n] + 2 \cos(2\pi k/N) v_k[n-1] - v_k[n-2] \quad (7)$$

其中  $v_k[-1] = v_k[-2] = 0$ , 系数  $\text{coeff}_k = 2 \cos(2\pi k/N)$  为常数, 仅依赖于目标频点索引  $k$ , 可预先计算. 此递推对每个输入样本  $x[n]$  仅需 1 次实数乘法和 2 次实数加减法, 遍历全部  $N$  个样本后, 得到最终状态  $v_k[n-1]$  与  $v_k[n-2]$ .

第二阶段是幅值的提取. 经过  $N$  次递推后, 所需的 DFT 系数  $x[k]$  可通过最终两个状态量计算得出. 而目标频点的幅值  $A(k) = |X[k]|$  可通过三角恒等式直接由实数运算获得, 避免了复数运算:

$$|A(k)| = \sqrt{v_k[N-1]^2 + v_k[N-2]^2 - \text{coeff}_k * [N-1] v_k[N-2]} \quad (8)$$

因此,完整的 Goertzel 算法在每个目标频点上的计算复杂度严格为 $O(N)$ ,且常数项极低。

对于功率/数据 2FSK 解调这一具体任务,仅需关注两个目标频率 $f_0$ 与 $f_1$ 。因此,可以并行实例化两个独立的上述递推器,分别使用预计算的系数 $coef f_1$ 与 $coef f_0$ ,共享同一输入采样流 $x[n]$ 。在每接收完 $N$ 个样本后,同步计算幅值 $A(1)$ 与 $A(0)$ ,并通过比较判决逻辑输出数据位。这种结构天然适合流式处理,输入样本随到随处理,无需等待整个数据块。

此外,在阈值判决逻辑方面,本文采用动态阈值判决逻辑。其核心思想是在每个解调窗口内先分别计算两目标频点的幅值,再利用两路幅值的统计量对当前窗口的噪声底进行估计,并据此形成随时间更新的判决阈值。

假设当前符号周期内计算得到的 100kHz 和 83.3kHz 频点幅值分别为 $A_1$ 和 $A_2$ ,则噪声基底估计值 $N_{floor}$ 可定义为:

$$N_{floor} = \eta \cdot \frac{A_1 + A_2}{2}. \quad (9)$$

其中,系数 $\eta = 0.05$ 为根据实验确定的经验值,用于表征两频点平均幅值中的噪声成分比例。该估计方式基于以下假设:在信息-能量复合调制中,两个 FSK 频点在同一符号周期内仅有一个承载主信号能量,另一频点主要包含噪声及泄漏分量,因此两者的平均值可在一定程度上反映当前符号的噪声水平。

Goertzel 算法的上述原理特性,使其极其契合直流微电网多源协同变换器对嵌入式通信解调器的严苛要求,在以下方面展现出相对于传统基于 DFT/FFT 的解调方法的显著工程优势:

1) 良好的计算效率与实时性:如前所述,其 $O(N)$ 的线性复杂度且极低的单样本开销是关键。在引言与 2.2 节描述的常见通信协议中的“每个符号周期仅允许单次、固定长度频谱分析”的强实时性约束下,相同的处理器计算资源预算对于 Goertzel 算法意味着可以支持长得多的有效分析数据窗。窗长 $N$ 的增加直接提高了频率分辨率,使得由非同步采样导致的频谱泄露能量在更精细的频域栅格上相对集中,从而在算法层面为更精确地估计目标频点幅值、抑制频谱泄露干扰创造了条件<sup>[22]</sup>。这是 Goertzel

算法能够提升解调鲁棒性的根本原因。

2) 较低的内存占用与实现简易性:Goertzel 算法采用样本递推、就地更新的工作方式。它只需为每个检测频点存储两三个状态变量和一个系数,无需为整个输入序列、旋转因子或频谱结果分配大型缓冲区。这种极简的内存需求和对片上小容量存储器的友好性,使其能够轻松集成到资源紧张的微控制器(MCU)中,甚至作为后台任务嵌入到现有的功率控制环路中断服务程序中,无需复杂的缓冲管理与任务调度。

3) 固有的灵活性与增强的鲁棒性潜力:算法允许针对任意预知的精确频率进行计算,完全摆脱了 DFT 固定频率栅栏的限制。这为解调器设计带来了灵活性。例如,可以结合通信系统的噪声特性,实施更智能的判决机制:仅当某一频点幅值不仅显著高于另一频点,并且同时超过动态估计的噪声基底一定门限时,才判决为有效数据位,否则保持前一状态。这种机制能有效过滤因暂态干扰或深度频谱泄露造成的错误判决,进一步提升在复杂电磁工况下的通信可靠性。

具体解调性能对比如表 2 所示,Goertzel 算法从原理上提供了一条在“资源受限、强调实时性”的嵌入式平台上,实现高精度、高可靠单频检测的有效路径。它通过将 DFT 计算转化为高效的递推滤波过程,将节省出的计算资源转化为更长的有效观测时间,从而在不改变非同步采样这一物理现实的前提下,通过算法级的工程优化,有效缓解了频谱泄露对解调性能的制约,并同时满足了系统对低延迟、确定性和低资源占用的综合要求。

### 3 仿真实验验证与结果分析

#### 3.1 功率/数据单载波调制仿真实验验证

为验证 Goertzel 算法在功率/数据 2FSK 单载波调制系统中应用的基本可行性,并确保对比基准的公正性,本实验参考文献 [6] 中基于 DFT 解调的实验平台架构与信号处理流程,并对 PI 系数进行优化,将核心解算单元由 DFT 替换为 Goertzel 算法,旨在证明新算法在继承相同严谨实验框架下的有效性与可靠性。

表2 Goertzel 算法与 DFT 算法解调性能对比

特性	Goertzel算法	DFT算法	对解调性能的影响
理论基础	单频点DFT计算	全局频谱分析	两者在幅值估计偏差上理论相等
计算复杂度	$O(N)$	$O(N^2)$	Goertzel可在同等时间内分析更长数据,间接提高分辨率,缓解泄露
资源占用	极低(几个寄存器、实数运算)	高(存储复数、旋转因子)	Goertzel节省的资源可用于更复杂的预处理(如加窗)或控制任务
输出结果	仅目标频点幅值	整个频段频谱	Goertzel避免全频段噪声干扰,判决更干净

图5为所采用的实验系统原理图. 输入48V直流电压经Buck变换器进行DC-DC变换, 其IGBT开关管由83.3 kHz与100 kHz的2FSK-PWM混合信号驱动, 从而实现能量与数据的同步传输. 接收端信号处理链路与文献[6]保持一致: 对Buck电路输出的直流母线电压交流成分, 先后经由高通滤波器与70-120 kHz带通滤波器以提取开关频率分量; 随后使用AD620放大器进行100倍增益放大; 最终由ADC以16位分辨率、1.2 MHz采样率进行数字化. 数字化后的信号送入MATLAB Function模块, 该模块集成了Goertzel算法与动态阈值判决逻辑, 完成数据解调. 实验具体参数详见表3.

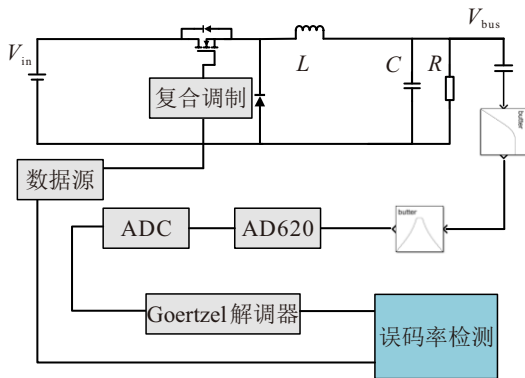


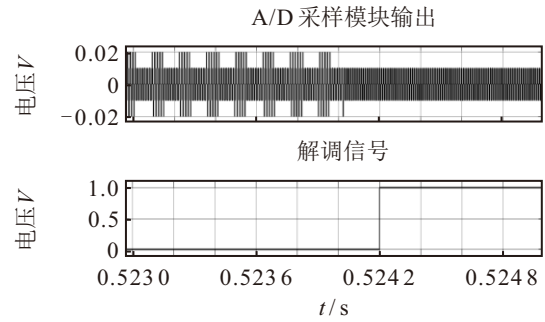
图5 功率/数据 2FSK 单载波调制实验原理图

表3 功率/数据 2FSK 单载波调制仿真实验参数

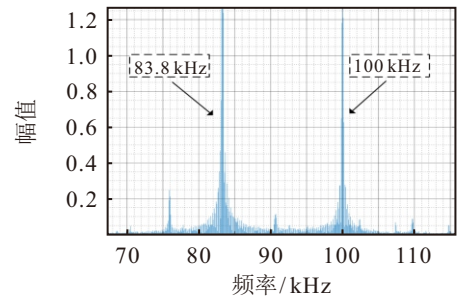
参数	取值
$V_{in}/V$	48
$V_{bus}/V$	24
$C/mF$	1
$L/\mu H$	650
$R/\Omega$	50
$K_P$	30
$K_I$	1
通信速率/kbps	0.25

上述流程完整实现了信号调理、采样到幅值提取的解调全过程. 如图6示波器波形所示, 可以清晰观察到混合调制、信号调理及最终解调输出的全过程. 此外, 为直观验证信息-能量复合调制中能量传递路径的完整性, 图7给出了输出电压仿真实验波形, 清晰展示了从48V到24V的DC-DC变换过程以及电压纹波中的切频现象. 实验结果表明, 基于Goertzel算法的解调器能够准确恢复传输的数字信号.

在系统固有的电力电子开关噪声环境下, 对Goertzel算法与DFT算法进行了误码率测试. 结果显示, 二者误码率均低于0.004, 这证实了将文献



(a) Goertzel解调功率/数据单载波实验波形图



(b) 输出电压频谱

图6 Goertzel解调仿真实验结果

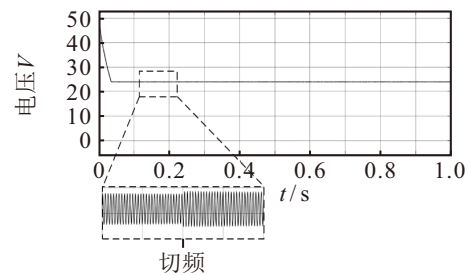


图7 输出电压仿真实验波形

[6]的成熟解调流程迁移至Goertzel算法是完全可行的, 且在高信噪比的较为理想条件下, 两者均能实现极高的解调准确度. 基于上述可行性验证, 为深入揭示Goertzel算法的工程优势, 本文后续将针对频谱泄露抑制能力与实时性能两项关键指标, 展开对比实验研究.

### 3.2 频谱泄露抑制实验

为深入验证Goertzel算法在直流微电网典型“资源受限、非同步采样”场景下对频谱泄露的抑制能力, 本节设计并开展了三组递进式的蒙特卡洛仿真对比实验. 所有实验遵循统一的核心约束: 固定实数乘法运算总次数, 以此严格模拟嵌入式数字信号处理器(DSP)或微控制器(MCU)在单个通信符号周期内所能提供的最大计算预算.

实验的基础参数设定如下: 采样频率 $f_s$ 为1.2 MHz; 目标信号幅值为0.5; 待检测频点数 $M$ 为2点, 以对应2FSK解调需求. 为精确量化频谱泄露的影响, 实验选取了一组偏离整数频率栅格的频点进行测试, 其归一化频点索引(bin)为[7.1, 7.25, 7.5, 7.8,

8.3], 对应的实际频率分别为 [66.56, 67.97, 70.31, 73.44, 77.34] kHz. 此“非整数 bin”设定是模拟“非同同步采样”与诱发频谱泄露现象的核心: 它保证了在有限长观测窗口内, 信号周期数不为整数, 从而在离散傅里叶变换中必然产生频谱能量扩散. 此外, 仿真覆盖了-5 dB 至 25 dB 的信噪比 (SNR) 范围, 以评估算法在不同噪声环境下的鲁棒性; 每个组合 (频点, SNR) 均进行 300 次蒙特卡洛独立实验, 以结果统计量的均方根相对误差 (RMS Error) 作为幅值估计精度的评判标准, 确保结论的普适性与统计显著性.

首先, 实验一是与传统的全频点 DFT 算法<sup>[6]</sup>的策略性效率对比, 本实验旨在最基础的算法策略层面进行对比, 揭示在“仅需检测少数频点”这一特定任务中, 专用算法相比通用全局频谱分析算法的根本性效率优势.

以计算全部  $N_{dft} = 128$  点频谱的朴素 DFT 为基准. 其复数运算复杂度为  $O(N^2)$ , 对应的实数乘法预算为  $B_1 = 4N_{dft}^2$ . 在相同预算  $B_1$  下, Goertzel 算法可支撑的等效窗长  $N_{g1}$  由等式  $2MN_{g1} = B_1$  决定. 计算可得  $N_{g1} = 16384$ , 窗长扩展倍数高达 128 倍. 这一巨大差异直观体现了全频点 DFT 在此场景下的计算冗余.

仿真结果 (如图 8 所示, 具体实验数据见表 4) 表明, Goertzel 算法在幅值估计精度上具有显著优势: 在不同信噪比条件下, 其 RMS 误差平均比全频点 DFT 方案低 93% 以上. 这一结果充分说明, 在面对明确且有限的频点检测任务时, 采用全频点 DFT 计算整个频谱的策略在计算资源利用上极不经济; 而 Goertzel 算法通过节省计算资源, 可将其有效转化为更长的信号观测时间, 从而显著缓解频谱泄露与噪声对估计精度的影响.

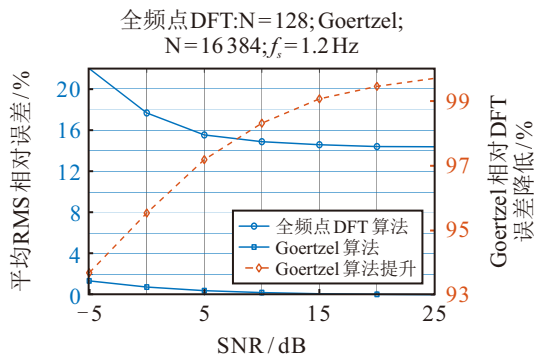


图8 与传统全频点 DFT 对比仿真实验结果

其次, 实验二是与工程中普遍采用的 FFT 算法的工程实用优势对比, 旨在验证 Goertzel 算法在面对高度优化的通用算法时, 是否仍具备工程实用价值.

其中, 对比基准与窗长换算: 以  $N_{fft} = 128$  点

表4 与传统全频点 DFT 的平均 RMS 相对误差对比结果

SNR (dB)	全频点DFT (%)	Goertzel (%)
-5	21.98	1.39
0	17.68	0.79
5	15.54	0.44
10	14.89	0.25
15	14.59	0.14
20	14.42	0.08
25	14.40	0.04

基 2-FFT 为基准, 其复杂度为  $O(N \log N)$ , 预算为  $B_2 = 4N_{fft} \log_2 N_{fft}$ . 根据等预算原则  $2MN_{g2} = B_2$ , 可推得 Goertzel 的等效窗长  $N_{g2} = 896$ , 窗长扩展为 FFT 的 7 倍. 这体现了专用算法在资源利用上的“精准性”优势.

仿真结果 (如图 9 所示, 具体实验数据见表 5) 显示, 即便与经过工程优化的 FFT 相比, Goertzel 算法仍能将幅值估计的 RMS 误差降低 75% 至 98%. 这一结果表明, 在工程常见的资源受限条件下, Goertzel 算法的专用性设计能够将有限的计算资源更集中地用于延长有效观测时间, 进而在抑制频谱泄露和对抗噪声两方面取得优于通用 FFT 方案的综合解调性能.

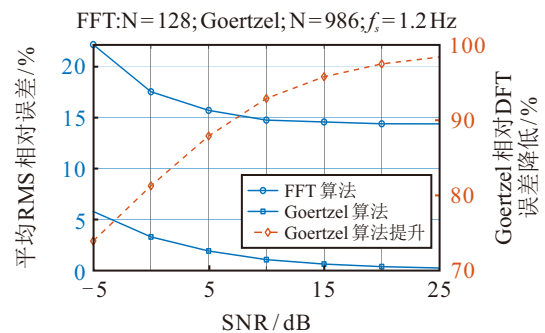


图9 与 FFT 对比仿真实验结果

表5 与 FFT 的平均 RMS 相对误差对比结果

SNR (dB)	FFT (%)	Goertzel (%)
-5	22.19	5.79
0	17.56	3.29
5	15.72	1.91
10	14.77	1.06
15	14.58	0.62
20	14.41	0.37
25	14.40	0.24

最后, 实验三是与单频点直接 DFT 的实现效能对比, 旨在单纯的技术层面进行对比, 剥离宏观算法策略的差异, 聚焦于实现相同数学任务时, 不同计算流程的微观效率.

对比基准与窗长换算: 对比基准为在目标频率处直接按定义求和计算 DTFT (常被称为直接 DFT).

该操作每样本需 1 次复数乘法 (约 4 次实数乘), 对于窗长  $N_{dfft} = 128$ , 其预算为  $B_3 = 4MN_{dfft}$ . 根据等预算模型  $2MN_{g3} = B_3$ , 可得 Goertzel 等效窗长  $N_{g3} = 256$ , 实现效率提升 1 倍, 窗长相应扩展 1 倍. 此优势源于 Goertzel 递归结构避免了重复的三角函数计算.

仿真结果 (如图 10 所示, 具体实验数据见表 6) 证实, 在执行完全相同的数学本质任务时, Goertzel 算法凭借更高的实现效率所获得的额外窗长资源, 能够将其幅值估计误差进一步降低约 30%. 这说明, 即便在任务数学本质完全相同的情况下, 算法实现层面的细微优化也能直接转化为抗干扰性能的切实提升.

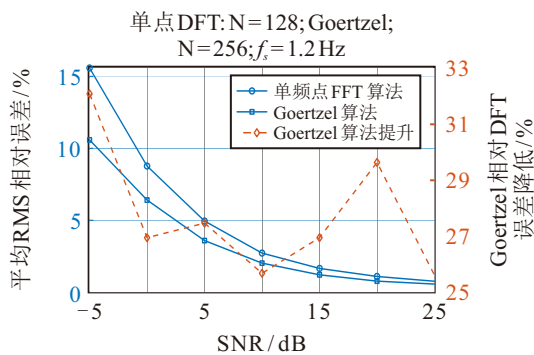


图10 与单点 DFT 对比仿真实验结果

表6 与单点 DFT 的平均 RMS 相对误差对比结果

SNR (dB)	单点DFT (%)	Goertzel (%)
-5	15.58	10.58
0	8.77	6.41
5	4.95	3.59
10	2.72	2.02
15	1.65	1.21
20	1.10	0.77
25	0.76	0.57

上述三组实验构成了一个从策略优势到工程优势, 再到实现优势的完整、严谨的论证链条. 其共同揭示的核心机理在于: 在固定的计算资源约束下, Goertzel 算法凭借其面向单频检测的专用性及高效的递归实现, 始终能够获得比 DFT/FFT 系列算法更长的有效观测窗长.

根据频率分辨率公式  $\Delta f = f_s/N$ , 窗长的直接增加使得频谱分析的“栅格”更为精细, 这对于抑制频谱泄露具有决定性意义. 在非同步采样不可避免的情况下, 更精细的频域栅格意味着泄漏出的信号能量能更集中于目标频点附近的少数区间内, 而非严重扩散至整个频域.

### 3.3 实时性能对比实验

3.2 节的实验在固定计算资源的约束下, 验证了 Goertzel 算法通过其高效递归结构所能获得的等效窗长优势, 从而在根本上增强了抑制频谱泄露与噪声的能力, 这一优势源于其算法内在的计算高效性. 一个自然的推论是, 在分析窗长相等的实际解调任务中, 这种计算高效性将直接转化为处理速度的提升. 因此, 为定量评估 Goertzel 算法在直流微电网功率/数据 2FSK 单载波调制系统中的实时性能优势, 本节设计并开展了面向嵌入式实时处理场景的蒙特卡洛对比仿真实验. 实验基于 3.1 节已验证的可行性框架, 保持信号处理链路不变, 核心聚焦于解算单元的计算效率对比.

实验确保 DFT 与 Goertzel 两种解调算法处理完全相同的输入信号序列, 执行相同的解调判决逻辑, 仅内部频域分析方法不同. 具体实验参数设置见表 7.

表7 实时性能对比实验参数设置

参数	取值
采样频率	1.2 MHz
符号周期	100 $\mu$ s
总信号时长	10 ms
FSK 频点	83.3 kHz/100 kHz
每次解调符号数	100
DFT实现方式	直接计算两目标频点
蒙特卡洛次数	100
非同步采样模拟	$\pm 0.5\%$ 随机频偏
SNR	25 dB

实验流程按照图 5 所示系统架构, 在 MATLAB 仿真环境中构建数字信号处理链路. 每次蒙特卡洛实验独立生成包含随机频偏的测试信号, 以消除特定信号模式带来的偏差.

图 11 展示了基于 100 次蒙特卡洛实验的实时性能对比结果. 图 11(a) 为两种解调器的平均处理时间对比, 其中误差棒表示 95% 置信区间. 实验结果显示, DFT 解调器的平均处理时间为  $0.253 \text{ ms} \pm 0.012 \text{ ms}$ , 而 Goertzel 解调器的平均处理时间仅为  $0.100 \text{ ms} \pm 0.005 \text{ ms}$ , 处理时间减少约 60.5%, 相应的平均加速比达到 2.53 倍. 这一加速比在实际系统中具有明确的工程意义: 以本实验设置的符号周期 100  $\mu$ s 为例, DFT 解调器处理单个符号耗时 0.253 ms, 已超出符号周期本身, 难以满足实时解调需求; 而 Goertzel 解调器处理时间仅为 0.100 ms, 可完全覆盖符号周期内的实时处理. 换算至通信速率层面, 若保持处理器时钟频率不变, Goertzel 算法理论上可支持的符号速率上限约为 DFT 方案的 2.53 倍; 若从控制

周期角度考量,在完成相同解调任务的前提下,采用 Goertzel 算法可释放约 60% 的处理器占用时间,用于执行其他实时控制或监测任务,从而显著提升系统整体的实时性与多任务处理能力.这一差异在嵌入式实时处理场景中具有显著意义,意味着在相同的处理器时钟频率下,Goertzel 算法可支持更高的符号速率或为其他控制任务预留更多计算资源.图 11(b) 进一步展示了加速比的详细分布情况.

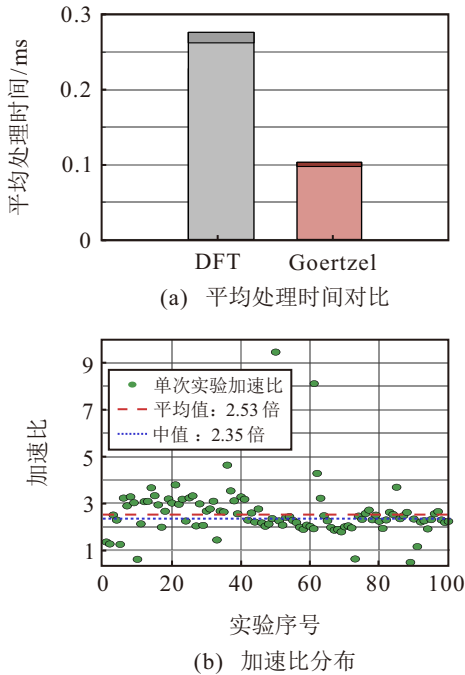


图11 实时性能对比实验图

## 4 结论

本文提出将 Goertzel 算法应用于直流微电网内多源协调变换器的功率/数据 2FSK 单载波解调中,通过理论分析与蒙特卡洛仿真验证了其工程优越性,具体结论如下:

1) 在“固定短窗、非同步采样”的严苛约束下,Goertzel 算法通过面向单频检测的专用递归结构,可将有限计算资源集中转化为更长的等效观测窗,其幅值估计的均方根误差较传统 DFT/FFT 方案最高可降低 90% 以上,显著抑制了频谱泄露.

2) 在实时性方面,Goertzel 算法处理单帧数据平均仅需 0.1ms,相比 DFT 实现 2.53 倍的加速比,为嵌入式处理器在承担功率控制的同时实现可靠通信提供了充沛的算力裕量.

需要指出的是,本文主要针对 2FSK 双频点场景,Goertzel 算法在频点数量较多时,其相对于 DFT 系列算法的效率优势将随频点数增加而减弱;此外,其递归结构对数值误差较敏感,在长窗或低精度定点 DSP 中需考虑稳定性和舍入误差的影响.未

来研究可进一步探索其在多频点复合调制中的高效实现及在强动态噪声环境下的自适应增强方法.

## 参考文献 (References)

- [1] Guo F H, Wang L, Wen C Y, et al. Distributed voltage restoration and current sharing control in islanded DC microgrid systems without continuous communication[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(4): 3043-3053.
- [2] 王睿, 孙秋野, 张化光, 等. 基于信-能复合调制的多母线直流微电网电流边缘控制策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(10): 2783-2794.  
(Wang R, Sun Q Y, Zhang H G, et al. Current edge-control strategy of multi-bus DC microgrids based on information-energy dual modulation[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(10): 2783-2794.)
- [3] 楼琦凯, 陈蓓, 丁劭, 等. 虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(12): 3207-3214.  
(Lou Q K, Chen B, Ding M, et al. Sliding mode control of DC microgrid under false data injection attack[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(12): 3207-3214.)
- [4] Wang R, Li J D, Sun Q Y, et al. Current edge-control strategy for multiple energy routers based on cyber-energy dual modulations[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(4): 4079-4088.
- [5] 吴建德, 杜进, 王睿驰, 等. 基于开关纹波调制的电源线通信技术[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(4): 166-172.  
(Wu J D, Du J, Wang R C, et al. Power line communication technique based on switching ripple modulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(4): 166-172.)
- [6] 何湘宁, 王睿驰, 吴建德, 等. 电力电子变换的信息特性与电能离散数字化到智能化的信息调控技术[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1579-1586.  
(He X N, Wang R C, Wu J D, et al. Info character of power electronic conversion and control with power discretization to digitization then intelligentization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1579-1586.)
- [7] He X N, Wang R C, Wu J D, et al. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2479.
- [8] Chen J H, Wu J D, Liu K M, et al. Improved switching ripple modulation strategy for simultaneous power conversion and data communication in DC-DC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(8): 9275-9284.
- [9] Loose F, Teixeira L, Duarte R R, et al. On the use of the intrinsic ripple of a buck converter for visible light communication in LED drivers[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(3): 1235-1245.
- [10] 杨超, 张淮清, 王耀, 等. 计及全泄漏影响的多点插值离散傅里叶变换校正方法[J]. *电工技术学报*, 2020,

- 35(16): 3385-3395.  
(Yang C, Zhang H Q, Wang Y, et al. Multipoint interpolated discrete Fourier transform correction method considering total leakage effect[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(16): 3385-3395.)
- [11] 王刘旺, 黄建才, 孙建新, 等. 基于加汉宁窗的FFT高精度谐波检测改进算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(24): 28-33.  
(Wang L W, Huang J C, Sun J X, et al. An improved precise algorithm for harmonic analysis based on Hanning-windowed FFT[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(24): 28-33.)
- [12] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值FFT动态谐波分析算法及应用[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(12): 270-277.  
(Wen H, Teng Z S, Wang Y, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(12): 270-277.)
- [13] Wu H, Chen Y, Yuan Y Y, et al. A 28-nm 19.9-to-258.5-TOPS/W 8b digital computing-in-memory processor with two-cycle macro featuring winograd-domain convolution and macro-level parallel dual-side sparsity[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2025, 60(1): 347-361.
- [14] Han R K, Rogers D J. Zero-additional-hardware power line communication for DC-DC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(11): 13107-13118.
- [15] Stefanutti W, Saggini S, Mattavelli P, et al. Power line communication in digitally controlled DC-DC converters using switching frequency modulation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(4): 1509-1518.
- [16] Zhu Y, Wu J D, Wang R C, et al. Embedding power line communication in photovoltaic optimizer by modulating data in power control loop[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(5): 3948-3958.
- [17] Wang R C, Chen G P, Chen J H, et al. An embedded communication method for in-home energy routers with power/signal dual modulation[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(5): 5553-5563.
- [18] Zhang R Q, Hui Y, Wu J D, et al. Embedding OFDM-based carrier communication into power control loop of converter in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(7): 6914-6924.
- [19] Wang R C, Lin Z Y, Du J, et al. Direct sequence spread spectrum-based PWM strategy for harmonic reduction and communication[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(6): 4455-4465.
- [20] Rodríguez J, Lamar D G, Miaja P F, et al. Reproducing single-carrier digital modulation schemes for VLC by controlling the first switching harmonic of the DC-DC power converter output voltage ripple[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9): 7994-8010.
- [21] Rodríguez Mendez J, Lamar D G, Aller D G, et al. Reproducing multicarrier modulation schemes for visible light communication with the ripple modulation technique[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1532-1543.
- [22] Singh A, Parida S K. Goertzel based phasor and frequency measurement for low-cost PMUs[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 237: 111008.
- [23] 慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从“信息-能量”基本关系看信息能源深度融合[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2289-2296.  
(Ci S, Liu Q W, Kang C Q, et al. Fundamental exploration into ICT-energy fusion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2289-2296.)
- [24] 周群, 官子超, 马晓阳, 等. 基于嵌入式系统的非同步采样高精度谐波检测[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 138-146.  
(Zhou Q, Guan Z C, Ma X Y, et al. High precision harmonic detection in non-synchronous sampling based on an embedded system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 138-146.)
- [25] 翟晓军, 周波. 一种改进的插值FFT谐波分析算法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(11): 2952-2958.  
(Zhai X J, Zhou B. An improved interpolated FFT algorithm for harmonic analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(11): 2952-2958.)

## 作者简介

吴煜轩 (2003-), 男, 硕士生, 主要研究方向为信息能量路由器调制策略优化, E-mail: 1748644062@qq.com;

王睿 (1993-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交直流微电网控制, E-mail: wangrui@ise.neu.edu.cn;

郭宇涵 (2002-), 男, 硕士生, 主要研究方向为直流微电网分层分布式协同控制, E-mail: 18841699748@163.com;

孙秋野 (1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源互联网的建模与优化运行、电力电子化的电力系统、多智能体协调控制, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.