

面向高可靠低时延通信的顺序统计译码(OSD) 关键技术综述

王千帆¹, 郭延庚², 毕胜³, 王义文², 宋林琦^{1,4}, 马啸^{2*}

(1. 香港城市大学, 香港 999077; 2. 中山大学计算机学院, 广东广州 510006;
3. 华南理工大学, 广东广州 510006; 4. 香港城市大学深圳研究院, 广东深圳 518000)

摘要: 高可靠低时延通信(Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC)是5G的三大核心场景之一,其增强版本极高可靠极低时延通信(Hyper-Reliable Low-Latency Communication, HRLLC)场景也已成为6G六大场景之一。高可靠低时延类通信场景对传输时延与可靠性提出了极致要求,这为短码编译码技术带来了新的机遇与挑战。顺序统计译码(Ordered Statistics Decoding, OSD)是一种近似最大似然(Near-Maximum-Likelihood, Near-ML)译码性能的通用短码译码算法,其在该类场景中具有重要潜力,但过高的计算复杂度严重制约了OSD算法的实际应用。本文系统综述了OSD算法中测试错误模式(Test Error Pattern, TEP)在测试顺序、跳过机制与提前终止策略等方面的代表性成果和最新研究进展,并对未来潜在研究方向进行了总结展望。具体地,首先讨论了汉明重量顺序、软重量顺序及基于有序可靠位的逻辑重量顺序对译码性能与复杂度的影响,指出逻辑权重顺序可以获得可靠性和实现复杂度间的有效折中。其次,分类总结了几种跳过与终止机制,阐明其基本思想是通过动态软信息判断或概率决策来降低冗余重编码次数。进一步,重点探讨了基于软度量和基于额外校验的TEP生成、跳过、终止机制及其联合设计,表明此类方法通过结构性约束与混合判断策略,在几乎不损失误帧率的前提下,将平均重编码次数降低1~2个数量级。数值结果显示,对于BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)码[127, 64],联合跳过机制在信噪比为4 dB处仅需十余次重编码,较原始OSD可减少超过90%的计算开销。最后,本文指出OSD在非二进制编码、时变信道适应性及硬件实现等方面仍面临挑战,尤其是对于码长更长的中码率区域,并展望了针对OSD算法的未来研究方向。

关键词: 纠错码;顺序统计译码;测试顺序;跳过机制;终止机制

基金项目: 国家自然科学基金(No.62301617, No.62471506, No.62371411);广东省自然科学基金面上项目(No.2025A1515011650);港澳“青年科技人才托举工程”项目(No.QT-2025-048);广东省量子科学战略专项项目(No.GDZX2503001);香港特别行政区研究资助局优配研究金(No.11217823)

中图分类号: TN911.22; TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)01-0466-13

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20251062

A Survey of Key Techniques in Ordered Statistics Decoding (OSD) for Ultra-Reliable Low-Latency Communications

WANG Qianfan¹, GUO Yangeng², BI Sheng³, WANG Yiwen², SONG Linqi^{1,4}, MA Xiao^{2*}

(1. City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

3. South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

4. City University of Hong Kong Shenzhen Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Ultra-reliable low-latency communications (URLLC) is one of the three key scenarios in 5G, and its enhanced form, hyper-reliability low-latency communications (HRLLC), has been proposed as one of the six typical scenarios for 6G. These services impose very stringent constraints on latency and reliability, presenting new opportunities and challenges for the coding and decoding of short-blocklength codes. Ordered statistics decoding (OSD) is a universal near-maximum-likelihood (Near-ML) decoding algorithm for short codes with strong potential in such scenarios, but its high computational complexity severely limits practical deployment. This paper surveys recent advances in OSD with a focus on the design of test error pattern (TEP), including ordering rules, skipping mechanisms, and early termination strategies, and outlines future research directions. Specifically, we first examine Hamming-weight, soft-weight, and logical-weight TEP orderings, and show that logical-weight ordering achieves an effective balance between reliability and implementation complexi-

ty. We then review existing skipping and termination mechanisms, which exploit dynamic soft information or probabilistic decisions to avoid redundant re-encodings. Moreover, we concentrate on TEP generation, skipping, and termination schemes driven by soft metrics and additional parity checks, as well as their joint design. By combining structural constraints with hybrid decision strategies, such schemes can reduce the average number of re-encodings by one to two orders of magnitude with almost no loss in frame error rate. Simulation results show that, for the bose-chaudhuri-hocquenghem (BCH) code [127, 64], a combined skipping mechanism requires only tens of re-encodings at an SNR of 4 dB, reducing the computational cost by more than 90% compared to the original OSD algorithm. Finally, we discuss open challenges related to non-binary codes, time-varying channels, and hardware implementations for longer blocklengths and medium-rate codes, and outline several promising directions for future research.

Keywords: error-correcting code; ordered statistics decoding; test order; skipping mechanism; stop mechanism

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of china (No.62301617, No.62471506, No.62371411); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2025A1515011650); Young Talent Support Project of Guangzhou Association for Science and Technology (No.QT-2025-048); the Guangdong Provincial Quantum Science Strategic Initiative (No.GDZX2503001); Hong Kong SAR Research Grants Council's General Research Fund (No.11217823)

0 引言

第五代移动通信(5G)首次提出了高可靠低时延通信(Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC)场景,其要求可靠性不低于99.999%,端到端时延不超过1 ms^[1]。最近,国际电信联盟(ITU)发布的6G愿景^[2],进一步提出了极高可靠极低时延通信(Hyper-Reliable Low-Latency Communication, HURLLC)场景,对可靠性和时延提出了更为严苛的要求:可靠性需达到99.999 99%,端到端时延需控制在0.1~1 ms^[3-4]范围内。未来通信场景对时延与可靠性的极致要求,为信道编码技术,尤其是短码设计^[5]带来了新的机遇与挑战。

在编码方面,对于长码而言,低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码^[6-8]、耦合LDPC码^[9-12]以及极化(Polar)^[13-14]码等均可逼近香农限。而在短码长区域,研究表明,若采用最大似然(Maximum-Likelihood, ML)或近似最大似然(Near-ML)译码算法,多种短码如BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)码、Polar码和咬尾卷积码(Tail-Biting Convolutional Code, TBCC)等均能够逼近随机编码联合(Random Coding Union, RCU)界等有限码长性能界^[15-16]。然而,尽管这些短码在可靠性方面表现优异,其译码通常需要较大的复杂度和时延,这成为制约其实际应用的主要瓶颈。此外,面向多样的场景与复杂的实际需求,支持多种编码的通用译码算法可在接收端实现硬件标准化与复用,从而显著降低复杂度和实现成本,其工程价值日益凸显。

在译码算法方面,顺序统计译码(Ordered Statistics Decoding, OSD)算法^[17]是一种著名的接近ML通用译码方法,其可应用于任意线性分组码。OSD的核心思想在于利用比特可靠性的差异,通过高斯消元确定最可靠基(Most Reliable Basis, MRB),并基于测试

错误模式(Test Error Pattern, TEP)对MRB进行翻转测试与重编码,从而生成一系列候选码字,并最终选择似然值最高的候选作为译码结果。通过这样的设计,对于多种不同的编码,OSD均可以获得接近ML的译码性能,在理论与实践上都展现出较大潜力。

OSD算法具备接近ML性能的通用性,使其成为满足URLLC/HURLLC极端要求并实现接收端硬件通用化的关键候选技术,然而其面临的复杂度等问题严重限制其实际部署使用。为推动OSD的实际部署,近年来学术界围绕其复杂度降低展开了大量研究。目前,制约OSD实际使用的最重要不足是OSD的复杂度问题。具体地,为达到接近ML的性能,传统OSD需要通过组合方式生成翻转模式,导致重编码次数呈组合爆炸增长,难以在实际系统实现,这严重制约了OSD算法在URLLC与HURLLC等场景中的实际应用。为此,需要在不牺牲译码性能的前提下,降低重编码次数与总体复杂度,从而提升OSD算法的实用性与工程可行性。为达到此目标,可以从两个角度考虑。

(1)搜索顺序。传统OSD是按照汉明重量递增顺序来进行TEP翻转测试的,但其并未充分利用信道接收的软信息。因而,需要进一步考虑信道软信息,优化TEP的测试顺序并同时兼顾TEP生成复杂度,从而在相同的最大列表下提升误帧率(Frame Error Rate, FER),或在相同FER下降低所需列表搜索数目。其中,基于局部约束的搜索顺序优化可以提升搜索效率,大幅降低平均搜索数目^[18-23],并实现拓展应用^[24-29]。关于OSD搜索顺序方面具有代表性的研究见表1。

(2)跳过和终止。重编码列表搜索中,在给定的搜索顺序下,我们一方面可以执行跳过操作,即通过一些度量或准则,跳过某些TEP的重编码;另一方面可以在列表中已经包含足够好的候选序列后,直接提前停止列

表搜索过程。基于跳过或终止操作可以降低平均重编 码次数,相关具有代表性的研究见表 2^[41-47]。

表 1 OSD 的搜索顺序具有代表性的研究

Table 1 Representative studies on the search order of OSD

年份	贡献团队	具体研究	关键突破	文献
1974	Dorsch	按软信息升序生成关于信息位的 TEP,并在当前 TEP 的软重量超过已得所有候选的最小软重量时提前终止搜索。	引入软信息,保障性能,为此后重编码搜索译码研究奠定基础。	文献[30]
1995	Fossorier & Lin	提出 OSD:基于可靠度重排,先确定 MRB,再按汉明重量递增枚举 TEP 并重编码,从而得到候选码字列表。	奠定“按重量递增”与 MRB 搜索框架;提出短码场景接近 ML 的普适方法。	文献[17]
2004	Valembois & Fossorier	BMA(Box-and-Match):在 OSD 框架内用“盒”结构对 TEP 进行搜索,显著降低最坏复杂度。	在不牺牲性能的前提下,重排候选生成与匹配,搜索更高效。	文献[31]
2012	Alnawayseh et al.	分割 OSD:将最高可靠独立位分割为多个不相交的段,每段独立构造 TEP 列表,最后合并列表进行译码。同时提出 Partial OSD,通过对部分信息位排序完全避免高斯消元。	通过分割策略,可在更小列表大小下获得接近 OSD 的性能,Partial OSD 仅对部分位排序,无需复杂的高斯消元步骤,显著降低了计算复杂度。	文献[32]
2019	Yue et al.	SD(Segmentation-Discarding) OSD:将 TEP 分段,按段优先级搜索,段变化时判断是否终止搜索。	在同等性能下显著减少需测试的 TEP 数,兼顾顺序与早停。	文献[33]
2021	Yue et al.	分析 OSD 重编码阶段的加权汉明距离分布,提出基于统计分布的排序与判据,用以优化候选生成与搜索顺序。	以距离分布与概率为依据建立更接近软重量最优的搜索准则,在保持接近 ML 性能的同时显著降低译码复杂度。	文献[34]
2021	Yue et al.	LE(Linear-Equation) OSD:以高可靠校验位建方程,从而对能形成可解线性方程的有效 TEP 进行测试。	需测试的 TEP 数显著减少,顺序更集中于校验位,特别适用于低码率码。	文献[35]
2021	Yue et al.	基于概率(Probability-Based, PB) OSD:定义“成功概率/有望概率”,据此给出 TEP 的测试顺序。	概率驱动的测试顺序,在同等 FER 下所需测试数更少。	文献[36]
2022	马啸团队	LC(Local-Constraint) OSD: TEP 的搜索空间从 k 扩展到 $k + \delta$,从而引入局部校验约束,基于此约束可以执行串行维特比等算产生软重量递增的合法 TEP。	达到相同译码性能所需的重编码次数显著降低,高信噪比下平均重编码次数甚至可以降低至 10 次以内。	文献[18]
2023	牛凯团队	PEPOSD:预配置错误模式,配合软信息生成 TEP,避免在线的 TEP 生成。	生成 TEP 复杂度显著降低,在短码上实现了接近 ML 性能的高效译码。	文献[37]
2024	中兴通讯研究团队	FWB-OSD:以翻转重量为核心指标优化 TEP 生成,并与置信传播结合进行译码。	在短码长 LDPC/星地链路验证中取得良好的误码率与复杂度折中。	文献[38]
2024	马啸团队	针对阶梯矩阵码(随机阶梯矩阵码/polar 码,任意分组码转换的阶梯矩阵码)局部选择可靠比特构建重编码基,实现并行高斯消元,并引入局部约束进一步构造扩展重编码基,从而限制搜索空间。	利用阶梯矩阵的结构特性实现并行高斯消元,显著降低译码延迟;通过扩展基约束和应用提前终止,在保持接近 ML 性能的同时大幅减少平均 TEP 数。	文献[39]
2025	黄勤团队	顺序统计导数译码:利用仿射不变性对仿射不变码进行无高斯消元 OSD。	在不进行高斯消除的情况下,通过更优的搜索顺序,能够提供优于传统高阶 OSD 的性能。	文献[40]

图 1 展示了 OSD 算法的重要工作发展脉络,包含猜测码字译码(Guessing Codeword Decoding, GCD)^[48],整合了时序与技术分类,直观揭示 OSD 算法的演进路径。

TEP 顺序、跳过与终止策略在 OSD 复杂度优化中具有核心地位。然而,现有 OSD 算法在复杂度和性能的平衡方面仍有待进一步研究设计。为系统梳理

该领域的研究脉络,把握最新进展并明确未来趋势,本文从 OSD 算法的基本原理出发。首先,介绍系统模型与经典 OSD 框架,并重点分析不同 TEP 生成顺序对译码性能与复杂度的影响;之后,分类总结 TEP 跳过与提前终止机制,包括在线策略与离线设计方法;最后,系统展示并总结基于度量判断和额外校验信息的混合跳过与终止方法,并对未来高效 OSD 算法的

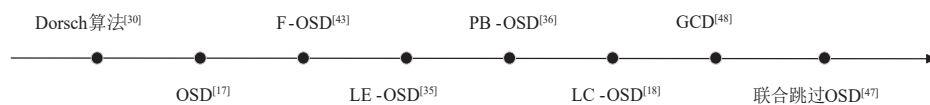


图 1 OSD 算法发展的代表性工作(主要聚焦于基于度量和校验方面的低复杂度设计)

Figure 1 Representative works on the development of OSD algorithms (Mainly focusing on low-complexity designs based on metrics and parity check)

表 2 OSD算法跳过终止具有代表性的研究

Table 2 Representative studies on OSD algorithm skip-and-termination

年份	贡献团队	具体研究	关键突破	文献
2016	李颖团队	设定可靠性阈值,跳过高可靠比特测试;提出循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)辅助OSD,进一步筛选减少候选码字。	通过阈值机制显著减少TEP,降低解码复杂度;在高码率下CRC-OSD性能优于CRC列表译码;首次将OSD应用于短极化码译码。	文献[41]
2019	涂国防团队	阈值型OSD:设置候选码字与硬判决序列差异度阈值,跳过度量较差的候选码字。	平均重编码次数下降,性能接近ML。	文献[42]
2019	Choi et al.	提出快速可扩展(Fast and scalable, F) OSD:引入可调惩罚项,得到更紧软重量预估下界,同时设置参数终止或跳过计算。	随着信噪比的增加,计算复杂度迅速收敛到一阶OSD复杂度。	文献[43]
2024	马啸团队	在局部约束搜索树中定制早停准则,包括Trivial和动态近似理想(Dynamic Approximate Ideal, DAI)两种早停原则。	Trivial早停准则可在不损失性能前提下大幅降低平均搜索次数,DAI准则可在Trivial准则基础上进一步降低平均搜索次数。	文献[44]
2024	陈立团队	阶数跳过(Order Skipping, OS) OSD,在TEP阶数切换时通过估计软重量值从而判断是否终止后续搜索。预估软重量实质上是文献[44]提出的DAI终止度量。	在几乎不影响性能的情况下,降低重编码次数。	文献[45]
2025	Yue et al.	Guesswork of OSD:提出“猜测工作量”上界与饱和阈值,在阶数变化时判断是否继续。	量化复杂度与性能折中关系,进一步支持工程化。	文献[46]
2025	马啸团队	联合跳过OSD:将MRB拓展为 $k+\delta$ 位,引入离线的部分重编码校验,从而跳过不合法的MRB,同时结合基于度量的跳过准则实现联合跳过。	FER保持与传统OSD相近,但平均重编码次数显著下降,优于现有其他方案。	文献[47]

研究方向进行展望。

本文常用的符号及其含义如表3所示。

表 3 本文常用符号及其含义

Table 3 Frequently used symbols and their meanings in this paper

符号	含义
$\mathbb{F}_2 = \{0, 1\}$	二进制域
$\mathcal{C}[n, k]$	码长为 n , 维度为 k 的线性分组码
\mathbf{G}	生成矩阵
\mathbf{H}	校验矩阵
$\mathbf{u} \in \mathbb{F}_2^k$	消息序列
$\mathbf{c} \in \mathbb{F}_2^n$	码字
$\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$	接收信号序列
$\mathbf{r} \in \mathbb{R}^n$	对数似然比序列
$\mathbf{z} \in \mathbb{F}_2^n$	硬判决序列
$\mathbf{e} \in \mathbb{F}_2^n$	错误模式

1 系统模型与传统 OSD 算法回顾

1.1 系统模型

令 \mathbb{F}_2 代表二元域, $\mathcal{C}[n, k]$ 代表码长为 n 、维度为 k 的线性分组码,生成矩阵记为 \mathbf{G} ,校验矩阵记为 \mathbf{H} 。在发送端,首先对消息序列 $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{k-1}) \in \mathbb{F}_2^k$ 进行编码,得到码字 $\mathbf{c} = \mathbf{u}\mathbf{G} = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \in \mathbb{F}_2^n$,接着对码字进行二进制相移键控(Binary Phase-Shift Keying, BPSK)调制,得到信号序列 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$,其中 $x_i = (-1)^{c_i}$ 。信号序列经过加性高斯白噪声(Addi-

tive White Gaussian Noise, AWGN)信道传输后,接收端接收到的信号序列为 $\mathbf{y} = (y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$,其分量为

$$y_i = x_i + w_i, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (1)$$

其中, $w_i \in \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ 为高斯噪声。在接收端,接收到的信号首先通过解调过程,生成对应的对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR)序列 $\mathbf{r} = (r_0, r_1, \dots, r_{n-1})$,其中:

$$r_i = \ln \frac{P_{\text{Y|C}}(y_i | c_i = 0)}{P_{\text{Y|C}}(y_i | c_i = 1)}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (2)$$

根据LLR序列,可以得到硬判决序列 $\mathbf{z} = (z_0, z_1, \dots, z_{n-1})$,

其中:

$$z_i = \begin{cases} 1, & r_i < 0 \\ 0, & r_i \geq 0 \end{cases}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (3)$$

ML译码的目标是找到码字 \mathbf{c}^* 满足:

$$\mathbf{c}^* = \arg \max_{\mathbf{c} \in \mathcal{C}} P_{\text{Y|C}}(\mathbf{y} | \mathbf{c}) = \arg \min_{\mathbf{c} \in \mathcal{C}} \ln \frac{P_{\text{Y|C}}(\mathbf{y} | \mathbf{z})}{P_{\text{Y|C}}(\mathbf{y} | \mathbf{c})} \quad (4)$$

定义 \mathbf{e} 的软重量为

$$\Gamma_S(\mathbf{e}) \triangleq \ln \frac{P_{\text{Y|C}}(\mathbf{y} | \mathbf{z})}{P_{\text{Y|C}}(\mathbf{y} | \mathbf{z} \oplus \mathbf{e})} = \sum_{i=0}^{n-1} e_i |r_i| \quad (5)$$

其中, $\mathbf{e} = (e_0, e_1, \dots, e_{n-1})$ 为一个合法TEP,则其对应的码字 $\mathbf{c} = \mathbf{z} \oplus \mathbf{e}$ 。此时,ML译码问题转化为最小软重量错误模式搜索,即

$$\mathbf{e}^* = \arg \min_{\mathbf{e} \in \mathbb{F}_2^n, \mathbf{z} \oplus \mathbf{e} \in \mathcal{C}} \Gamma_S(\mathbf{e}) \quad (6)$$

1.2 传统 OSD 算法

OSD 是一种经典的普适软判决译码技术,其基本思想是先利用接收信号的可靠度对接收序列进行重

排序,并通过高斯消元确定 MRB,再对这些基位进行翻转与重编码,最后通过计算候选码字的软重量(等价于似然值)来选择译码输出。OSD 算法流程如图 2 所示。

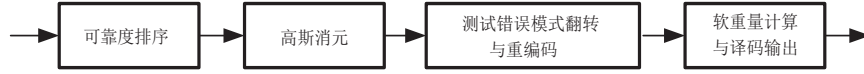


图 2 OSD 算法流程

Figure 2 Flowchart of the OSD algorithm

OSD 算法的具体步骤描述如下:

(1) 可靠度排序。根据式(2)计算每个比特的 LLR,并根据 LLR 绝对值对 LLR 序列 \mathbf{r} 降序交织排列。用置换矩阵 Π_1 记录此次交织顺序,并将生成矩阵 \mathbf{G} 同步重排,得到 $\mathbf{G}\Pi_1$ 。

(2) 高斯消元。对重排后的 $\mathbf{G}\Pi_1$ 进行高斯消元,将其转化为系统形式 $\mathbf{G}_s = [\mathbf{I}_k | \mathbf{P}]$ 并记录可能的交织 Π_2 。特别地,当且仅当 $\mathbf{G}\Pi_1$ 的前 k 列线性相关时会引入额外的 Π_2 ,其目的是将后 $n-k$ 位中最可靠且与前面线性无关的列换入前 k 位。为描述简单,我们记 $\Pi = \Pi_1 \Pi_2$,并根据 Π 对应判决序列 \mathbf{z} 、LLR 序列 \mathbf{r} 和接收序列 \mathbf{y} 进行相应的交织置换,得到 $\tilde{\mathbf{z}}$ 、 $\tilde{\mathbf{r}}$ 和 $\tilde{\mathbf{y}}$ 。特别地,我们记 $\tilde{\mathbf{z}}$ 中前 k 位为 $\tilde{\mathbf{z}}_L$,其代表 MRB。

(3) 测试错误模式翻转与重编码。生成部分 TEP,记为 $\mathbf{e}_L^{(0)}, \mathbf{e}_L^{(1)}, \dots, \mathbf{e}_L^{(l_{\max}-1)}$,其中 $\mathbf{e}_L^{(i)} \in \mathbb{F}_2^k$ 。对 $(\mathbf{e}_L^{(i)} \oplus \tilde{\mathbf{z}}_L)$ 进行重编码,得到对应的 n 长候选码字 $\tilde{\mathbf{c}}^{(i)} = (\mathbf{e}_L^{(i)} \oplus \tilde{\mathbf{z}}_L) \mathbf{G}_s$,其对应的 n 长错误模式为 $\mathbf{e}^{(i)} = \tilde{\mathbf{z}} \oplus \tilde{\mathbf{c}}^{(i)} = (\mathbf{e}_L^{(i)}, \mathbf{e}_R^{(i)})$ 。

(4) 软重量计算与译码输出。对每个候选错误模式计算软重量 $\Gamma_s(\mathbf{e}^{(i)}) = \sum_{j=0}^{n-1} e_j^{(i)} \cdot |\tilde{r}_j|$,选出具有最小软重量的 $\hat{\mathbf{e}}_{\text{opt}}$ 和对应的 $\tilde{\mathbf{c}}_{\text{opt}}$,并经逆置换后得到译码估计 $\hat{\mathbf{c}} = \tilde{\mathbf{c}}_{\text{opt}} \Pi^{-1}$ 。

2 TEP 顺序

在 OSD 框架中,译码性能和复杂度依赖于 TEP 生成和测试的顺序。接下来,我们以长度为 k 的部分 TEP 为例,讨论适用于 OSD 的 TEP 生成顺序。我们将回顾三种常用且典型的 TEP 生成顺序,包括汉明重量顺序、软重量顺序和逻辑重量顺序,并对比三种顺序下 OSD 算法的性能。

2.1 TEP 顺序的定义

基于汉明重量的 TEP 顺序在传统 OSD 算法中 TEP 按汉明重量排序:

$$\Gamma_H(\mathbf{e}_L^{(1)}) \leq \Gamma_H(\mathbf{e}_L^{(2)}) \leq \dots \quad (7)$$

其中, $\Gamma_H(\cdot)$ 是序列的汉明重量,即 $\Gamma_H(\mathbf{e}_L) = \sum_{i=0}^{k-1} e_i$ 。

基于软重量的 TEP 顺序本质上等同于似然顺序,其中 TEP 按以下顺序排序:

$$\Gamma_s(\mathbf{e}_L^{(1)}) \leq \Gamma_s(\mathbf{e}_L^{(2)}) \leq \dots \quad (8)$$

其中, $\Gamma_s(\cdot)$ 定义为 $\Gamma_s(\mathbf{e}_L) = \sum_{i=0}^{k-1} e_i \cdot |\tilde{r}_i|$ 。该顺序在 ML 意义上是最优的,但直接枚举复杂度较高。一种结构化的解决方案是将所有 TEP 组织成树形结构,如翻转模式树(Flipping Pattern Tree, FPT),通过 FPT,可以高效地枚举 TEP^[19]。

基于逻辑重量的 TEP 顺序来源于在数值观察中,排序后的 LLR 绝对值与其排序位次之间大致存在线性关系^[49]。因此,研究者提出了有序可靠位(Ordered Reliability Bits, ORB)方法,从而将软重量映射到整数排序,实现按逻辑重量排序。正式地,令 $A_i \in \{n, n-1, \dots, 1\}$ 表示第 i 位的排序位次。当 $|r_i|$ 按降序排序时,一个 TEP \mathbf{e}_L 的逻辑重量定义为

$$\Gamma_L(\mathbf{e}_L) = \sum_{i=0}^{k-1} A_i e_i \quad (9)$$

因此,TEP 可以按递增的逻辑重量顺序进行测试:

$$\Gamma_L(\mathbf{e}_L^{(1)}) \leq \Gamma_L(\mathbf{e}_L^{(2)}) \leq \dots \quad (10)$$

特别地,为了实现 ORB 方法,可以使用整数划分模式生成器来高效枚举 TEP^[49],确保满足式(10)中的顺序。逻辑重量顺序相较于软重量排序更具硬件友好性,主要体现在以下方面:(1) 运算简化。软重量计算需要实时浮点运算,而逻辑重量只需整数运算。(2) 避免实时排序。软重量顺序需要在线计算并比较浮点值来产生 TEP,涉及复杂的实时排序,而逻辑重量顺序只需要离线在初始化阶段进行一次 TEP 计算生成,无需在线比较和排序。因此,ORB 通过整数化和离线生成 TEP,在保持接近软重量排序性能的同时,大幅降低了硬件实现的复杂度和实时计算延迟。

例如,考虑 $n=4$ 且假设 $r_1 \leq r_2 \leq r_3 \leq r_4$ 的情况。通过分解整数来生成逻辑重量递增的 TEP 的示例为

- 1→1000
- 2→0100

•3→0010, 1100

例 1(排序策略比较):考虑 $n=4$ 且 $r=(2, 3, 4, 8)$ 。表 4 列出了汉明重量不超过 2 的 TEP 的汉明重量 $\Gamma_H(e)$ 、软重量 $\Gamma_S(e)$ 和逻辑重量 $\Gamma_L(e)$ 。这三种度量标准的部分测试顺序如下,可以看到,三种度量下靠后的 TEP 顺序显著不同。

软重量排序:0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, ...; 汉明重量排序:0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, ...; ORB 排序:0000, 1000, 0100, 0010, 1100, 0001, ...。

表 4 部分 $n=4$ 的 TEP 对应的三种重量(其中 $r=(2, 3, 4, 8)$)

Table 4 Three weights corresponding to TEPs for partial $n=4$ where $r=(2, 3, 4, 8)$

TEP	$\Gamma_H(e)$	$\Gamma_S(e)$	$\Gamma_L(e)$
0000	0	0	0
1000	1	2	1
0100	1	3	2
0010	1	4	3
0001	1	8	4
1100	2	5	3
1010	2	6	4
0110	2	7	5
1001	2	10	5
0101	2	11	6
0011	2	12	7

2.2 TEP 顺序对性能的影响比较

例 2(三种 TEP 顺序的性能对比):考虑 eBCH 码 [128,64], 其码字经由 BPSK-AWGN 信道传输。我们分别仿真了按汉明重量排序、软重量排序和逻辑重量排序的 OSD 算法,其中最大搜索阶数为 $t=1(l_{\max}=65)$ 、 $t=2(l_{\max}=2\ 081)$ 和 $t=3(l_{\max}=43\ 745)$ 。图 3 展示了三种 TEP 顺序下的 FER 对比,从图中可以看出按汉明重量排序的 FER 最差,按 ORB 排序次之,按软重量排序最好。

综上,汉明重量排序简单,但没有充分利用软信息,导致在有限搜索次数下表现次优。软重量排序在 ML 度量上是最优的,但在实时实现中需要在线处理。ORB 排序提供了一个实际的折中方案,其基于整数的排名是硬件友好的,且可以兼顾软重量的性能优势和汉明重量的实现简单的优势,实现性能和复杂度的有效折中。

3 传统 TEP 跳过与终止

给定搜索顺序后,降低复杂度的另一个主要办法是跳过(跳过一些非必要的重编码)和终止(终止后续所有重编码)。关于跳过与终止机制方面的代表性工作简介如下。

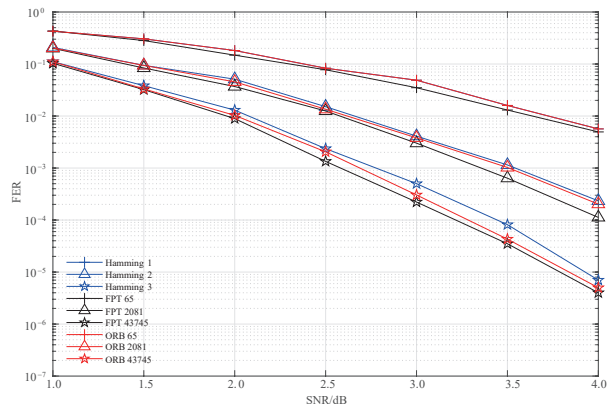


图 3 三种 TEP 顺序性能对比

Figure 3 Performance comparison of three TEP orders

3.1 基于概率必要/充分条件(Probabilistic Necessary/Sufficient Conditions-Based, PNC/PSC) OSD

从概率判定的角度出发,文献[50-51]提出在 OSD 译码过程中引入 PNC 与 PSC 设计,其基本思想是利用接收符号的软信息构建概率性约束,从而在候选码字生成与译码阶数增加的不同阶段提前终止无效计算,以降低计算复杂度并保持译码性能。PNC 与 PSC 可独立使用,也可联合应用,为 OSD 算法提供了多层次的复杂度优化手段,分别从译码阶数控制与候选码字筛选两个层面优化计算过程,通过概率条件实现了复杂度与性能间的良好平衡。

具体而言,PNC 机制从译码阶数角度出发,通过建立阶数处理的可靠性下界来实现早期终止。对于每一阶 t ,PNC 机制计算 MRB 中最不可靠的 t 位软信息之和,作为此阶数的可靠性下界。若当前最优候选码字的软重量已低于此下界,则表明更高阶翻转无法产生更优解,可直接终止。该机制在中高信噪比条件下尤为有效,能够在不损失译码性能的前提下显著减少运算量,其下界可表示为

$$S_{\text{PNC}} = \sum_{j=k-1-i}^{k-1} |\tilde{y}_j| \quad (11)$$

与此相对,PSC 机制从候选码字筛选的角度出发,通过对接收向量与候选码字之间的汉明距离进行概率判定,来快速确定是否跳过或终止。若距离低于阈值 τ_E ,则直接输出当前候选码字作为译码结果;若超过阈值 τ_{PSC} ,则立即排除该候选码字,避免后续不必要的软重量计算。

3.2 F-OSD

从译码复杂度控制与可扩展性优化的角度出发,文献[43]提出了 F-OSD 算法,其基本思想是通过在译码过程中对最优解的软重量进行动态预测与多阈值

判定,从而无需遍历全部翻转阶数即可高效逼近 ML 译码性能。F-OSD 基于软信息分布特性的下界估计与早停机制,在复杂度、性能与可扩展性之间实现了有效平衡,使得 OSD 算法在高阶翻转及大维度码字条件下仍能保持优异的译码效率。

具体而言,F-OSD 机制在传统 PNC^[51]所定义的可靠性下界基础上,引入了一个基于最不可靠比特(Least Reliable Bit, LRB)错误分布特性的惩罚项,构建出更为紧凑的预测下界。该下界不仅考虑了 MRB 中软信息的累积可靠性,还利用了当 MRB 中存在错误时,LRB 中往往同时存在错误的统计规律,从而更准确地反映了错误的实际分布特性。若当前最优候选的软信息已低于该预测下界,则认为继续执行更高阶译码无法获得更优解,算法即可跳过后续阶数的重编码。该预测下界可表示为

$$s_{\text{Prop},l} = \sum_{j=k-1-i}^{k-1} |\tilde{y}_j| + \beta(n-k) \quad (12)$$

其中, β 为可调参数,用于调节复杂度与性能之间的权衡。当 $s_{\text{Prop},l}$ 大于当前最小代价时,译码终止。此外,F-OSD 还可与 PSC^[43]相结合,通过引入两个可调参数 τ_E 和 τ_{PSC} ,实现对候选码字的提前判定:若重编码结果与硬判决序列的汉明距离小于 τ_E ,则直接输出该候选码字;若大于 τ_{PSC} ,则跳过其计算软信息。最终,算法输出匹配代价最小者作为译码结果。

3.3 OS-OSD

从搜索空间简化与复杂度控制的角度出发,文献[45]提出 OS-OSD 算法,其基本思想是在译码过程中动态评估更高阶 TEP 是否可能带来更优解,从而可终止后续阶数的所有重编码。该算法通过在不同阶数间引入相关距离下界判定机制,在判定结果表明增大阶数无法得到更优解时提前终止后续译码,从而在几乎不牺牲译码性能的前提下显著降低算法的平均复杂度。

具体而言,OS-OSD 机制在传统 OSD 的基础上,利用 DAI 度量^[44](在文献[45]中称为接收符号信息的相关距离下界)在阶数变化时判断当前已找到的最佳码字是否已优于所有更高阶 TEP 可能生成候选码字。若当前最优相关距离低于该下界,译码搜索应终止。在第 i 阶变为第 $i+1$ 阶时,下界可按以下形式计算:

$$\Gamma_s^{(i+1)} = \sum_{j=k-1-i}^{k-1} |\tilde{r}_j| + \sum_{j=k}^{n-1} \frac{|\tilde{r}_j|}{1 + \exp(|\tilde{r}_j|)} \quad (13)$$

其中,右侧的关于 LRP 的补偿项正是在 LC-OSD 算法中提出的 DAI 终止度量^[44]。

3.4 PB-OSD

从概率判定与候选筛选优化的角度出发,文

献[36]提出 PB-OSD 算法,其基本思想是利用接收软信息的概率分布,定义成功概率(Success Probability, SP)与希望概率(Promising Probability, PP)两种概率度量,分别用于提前终止译码和排除无效的 TEP 重编码,以此在不牺牲译码性能的前提下显著降低计算复杂度。

具体地,SP 用于评估当前候选码字为正确译码结果的后验概率。当某个 TEP 对应的 SP 超过预设阈值时,认为该码字已足够可靠,可立即停止后续译码,从而避免进一步的高阶重编码操作。相对地,PP 用于判断一个 TEP 是否仍有可能生成比当前最优码字更优的候选码字。当某个 TEP 对应的 PP 低于设定阈值时,即可直接舍弃该 TEP,跳过相关的重编码过程。通过 SP 与 PP 的联合判定,PB-OSD 能够在译码早期动态剔除无效 TEP 或终止译码,实现译码复杂度的显著降低。此外,PB-OSD 提出了一种基于树结构的最优 TEP 搜索策略,其本质思想与 FPT 算法^[19]类似。PB-OSD 基于树结构按照 TEP 的先验正确概率而非传统的汉明重量进行排序与扩展,从而优先探索更具潜在正确性的候选路径。译码过程中,算法动态维护一个待处理 TEP 集合,并结合 SP/PP 双重概率准则进行筛选与更新。实验结果表明,PB-OSD 在保持与传统 OSD 相近误码性能的同时,显著减少了平均处理的 TEP 数量与重编码次数,实现了性能与复杂度之间的有效折中。

4 基于度量与额外校验的 TEP 处理机制

区别于上述方法,本节将进一步介绍基于度量的 TEP 跳过^[47]或终止机制^[19]以及基于额外校验的 TEP 生成^[18]与跳过^[47]机制。此外,额外校验和度量可以互相结合,从而更大程度地降低重编码复杂度。

4.1 基于软度量的跳过或终止机制

基于软度量的跳过或终止机制的基本思想是在重编码搜索过程中,实时记录并更新当前候选列表中错误模式的最小软重量。对于最新生成的每个长度为 k 的部分 TEP,若其软重量超过当前列表中的最小软重量,则视情况跳过该 TEP 的重编码操作或终止搜索。具体而言,形成了 Trivial 准则和 DAI 准则,其正式描述如下。

令 $\Gamma_{\text{opt}}^{(j)}$ 代表处理第 j 个 TEP 后当前列表中错误模式的最小软重量,即

$$\Gamma_{\text{opt}}^{(j)} = \min \left\{ \Gamma(e^{(1)}), \Gamma(e^{(2)}), \dots, \Gamma(e^{(l)}) \right\} \quad (14)$$

其中, $l(\leq j)$ 代表总共执行的重编码次数。因此,当前最优的错误模式为

$$e_{\text{opt}}^{(j)} = \arg \min_{e^{(i)}, 1 \leq i \leq l} \Gamma(e^{(i)}) \quad (15)$$

Trivial 准则。对于第 j 个 TEP $e_l^{(j)}$,若其软重量

满足:

$$\Gamma(\mathbf{e}_L^{(j)}) > \Gamma_{\text{opt}}^{(j-1)} \quad (16)$$

则根据 TEP 的排序方式可分别进行跳过或终止操作:若 TEP 按软重量升序排列,则此时可直接终止搜索;若未采用升序排列,则跳过该 $\mathbf{e}_L^{(j)}$,无需对此 TEP 执行重编码。若上述条件不成立,则对 $\mathbf{e}_L^{(j)}$ 执行重编码。

命题: Trivial 跳过准则不会损失纠错性能。

证明: 若 $\Gamma(\mathbf{e}_L^{(j)}) > \Gamma_{\text{opt}}^{(j-1)}$, 则对其重编码得到的 TEP 的软重量 $\Gamma(\mathbf{e}_L^{(j)}) \geq \Gamma(\mathbf{e}_L^{(j)}) > \Gamma_{\text{opt}}^{(j-1)}$, 则此次重编码不会得到比当前更优的候选输出。

DAI 机制相对于 Trivial 跳过机制引入了关于 \mathbf{e}_R 部分软重量的期望 Γ_{DAI} 作为补偿项, 其中:

$$\Gamma_{\text{DAI}} = \sum_{i=k}^{n-1} \frac{|\tilde{r}_i|}{1 + \exp(|\tilde{r}_i|)} \quad (17)$$

DAI 准则。对于第 j 个 TEP $\mathbf{e}_L^{(j)}$, 若其软重量满足:

$$\Gamma(\mathbf{e}_L^{(j)}) + \Gamma_{\text{DAI}} > \Gamma_{\text{opt}}^{(j-1)} \quad (18)$$

根据 TEP 的排序方式可分别进行跳过或终止操作:若 TEP 按软重量升序排列,则此时可直接终止搜索;若未采用升序排列,则跳过该 $\mathbf{e}_L^{(j)}$,无需对此 TEP 执行重编码。若上述条件不成立,则对 $\mathbf{e}_L^{(j)}$ 执行重编码。

DAI 准则虽然无法严格保证纠错性能不受损失,但相比 Trivial 准则,其在判断条件中额外引入了 \mathbf{e}_R 部分软重量的期望,从而能够更有效地减少重编码次数。值得注意的是,DAI 准则在降低复杂度的同时几乎不引起性能损失,图 4 展示了两个准则与 ML 之间关系的示意图,采用 DAI 准则可以更快终止搜索,降低计算复杂度。

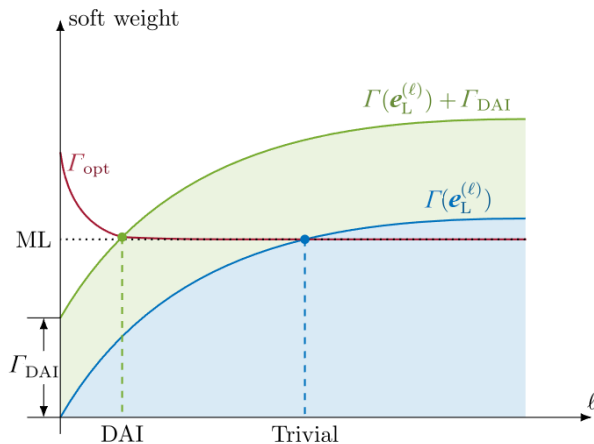


图 4 Trivial 准则与 DAI 准则和 ML 的关系示意图

Figure 4 Schematic diagram of the relationship among the Trivial criterion, DAI criterion, and ML

4.2 基于额外校验的 TEP 生成或跳过设计

区别于上述方法,本节进一步介绍基于额外校验的 TEP 生成设计和 TEP 跳过机制。前者在 TEP 生成阶段通过拓展的 $k + \delta$ 维 MRB 来获得满足额外校验约束的 TEP,从而在线跳过大量不合法的 TEP,以降低重编码消耗;后者在生成 $k + \delta$ 维 TEP 后,通过部分重编码判断其是否满足额外校验,来跳过不满足条件的 TEP,从而在保持阶数不变的情况下大幅降低了重编码次数。

4.2.1 基于额外校验的 TEP 在线生成设计

在传统 OSD 算法中,TEP 的生成通常局限于维度为 k 的 MRB 上,并按照汉明重量递增的方式进行搜索。为了进一步提升搜索效率并引入结构化约束,对于在线产生的 TEP 方案,文献[18]提出了 LC-OSD 算法,将搜索空间从 k 维扩展至 $k + \delta$ 维,并通过引入局部校验约束来在线产生合法的 TEP,从而显著减少重编码次数。

具体而言,LC-OSD 算法首先通过高斯消元将校验矩阵 \mathbf{H} 转化为如下系统形式:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n-k-\delta} & \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, \mathbf{P}_2 是一个 $\delta \times (k + \delta)$ 的二元矩阵,对应于扩展 MRB 中引入的局部约束。给定上述形式校验矩阵,任何有效码字必须满足:

$$\mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{e}}_R^T = \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{z}}_R^T \quad (20)$$

其中, $\tilde{\mathbf{e}}_R, \tilde{\mathbf{z}}_R \in \mathbb{F}_2^{k+\delta}$ 表示扩展 MRB 上的部分码字候选与硬判决序列。

在此框架下,TEP 的生成不再采用简单的汉明重量枚举,而是通过串行列表 Viterbi 算法 (Serial List Viterbi Algorithm, SLVA) 在 \mathbf{P}_2 定义的网格上进行,该网格最多包含 2^δ 个状态。SLVA 能够按照软重量递增的顺序生成满足约束条件 $\mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{e}}_R^T = \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{z}}_R^T$ 的 TEP 序列,其他不合法的 TEP 被自然跳过,从而优化了列表搜索顺序,提升了搜索效率。

4.2.2 基于额外校验的 TEP 离线跳过设计

在 TEP 离线产生过程中,文献[47]将搜索维度从 k 维扩展到 $k + \delta$ 维,从而引入额外校验机制来跳过不合法的 TEP。即相比于搜索 k 维的部分 TEP,生成矩阵 \mathbf{G}_s 的前 $k + \delta$ 列,并按汉明重量搜索 $k + \delta$ 维的部分 TEP。 \mathbf{G}_s 的前 $k + \delta$ 列天然引入了额外的校验,从而跳过大量不满足额外校验的 TEP,降低了重编码次数。区别于 LC-OSD, 这里的研究主要考虑的是离线的产生与跳过设计。

具体地,按汉明重量递增搜索 $(\mathbf{e}_L, \mathbf{e}_\delta) \in \mathbb{F}_2^{k+\delta}$, 这里 $\mathbf{e}_L \in \mathbb{F}_2^k$ 如前文定义, $\mathbf{e}_\delta \in \mathbb{F}_2^\delta$ 代表除 MRB 外的最可靠的 δ 个位置对应的测试错误模式。相应地,定义

$\tilde{\mathbf{z}}_\delta \in \mathbb{F}_2^\delta$ 代表除 MRB 外的最可靠的 δ 个位置对应的硬判决比特, 并将 \mathbf{G}_s 记为 $[\mathbf{I}|\mathbf{P}_\delta|\mathbf{P}_{n-k-\delta}]$, 其中, \mathbf{I} 代表 k 阶单位阵, \mathbf{P}_δ 代表大小为 $k \times \delta$ 的二元矩阵, 其对应于 MRB 以外最可靠的 δ 个比特, 而 $\mathbf{P}_{n-k-\delta}$ 代表大小为 $k \times (n-k-\delta)$ 的二元矩阵, 其对应于非 MRB 中除 δ 个比特外的剩余比特。

有额外校验跳过准则如下: 对于第 j 个 TEP $(\mathbf{e}_L^{(j)}, \mathbf{e}_\delta^{(j)})$, 若 $(\mathbf{e}_L^{(j)} \oplus \tilde{\mathbf{z}}_\delta) \mathbf{P}_\delta \oplus \tilde{\mathbf{z}}_\delta \neq \mathbf{e}_\delta^{(j)}$, 则跳过 $(\mathbf{e}_L^{(j)}, \mathbf{e}_\delta^{(j)})$, 不对其执行重编码。反之, 则对其进行重编码。

额外校验跳过后平均意义上的重编码次数为

$$\frac{\sum_{i=0}^t \binom{k+\delta}{i}}{2^\delta} \quad (21)$$

定理 1 证明平均重编码次数均随参数 δ 增大而减小^[47], 说明额外校验跳过准则能降低平均重编码次数。下面给出证明。

证明 令

$$S(n) = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} \quad (22)$$

$$f(\delta) = \frac{\sum_{i=0}^t \binom{k+\delta}{i}}{2^\delta} \quad (23)$$

其中, k, t, δ 为给定正整数 ($k+\delta \geq t$)。

由组合数递推关系:

$$\binom{n+1}{i} = \binom{n}{i} + \binom{n}{i-1} \quad (24)$$

对任意 $\delta \geq 0$ 都有:

$$f(\delta+1) = \frac{S(k+\delta+1)}{2^{\delta+1}} < \frac{2S(k+\delta)}{2^{\delta+1}} = \frac{S(k+\delta)}{2^\delta} = f(\delta) \quad (25)$$

得证。

例 3 (额外校验跳过机制与传统算法的性能对比): 针对 eBCH 码 [128, 64] 在 BPSK-AWGN 信道下的传输场景, 对原始 OSD 算法以及引入不同 δ 参数的额外校验跳过 OSD 算法进行了仿真比较, 其中最大翻转阶数统一设定为 $t=4$ 。图 5 展示了两种类型算法在平均重编码次数方面的对比结果。可以看出, 随着 δ 值的增大, 平均重编码次数显著降低, 且该减少趋势几乎不受 SNR 变化的影响。具体而言, 相较于原始 OSD 算法^[17], 当 $\delta=4$ 时, 额外校验跳过机制的引入可使平均重编码次数下降超过 90%, 体现出显著的计算效率优势。

4.3 联合设计

软度量与额外校验从不同维度提升了 OSD 算法的性能, 两者结合能够进一步增强其译码性能。

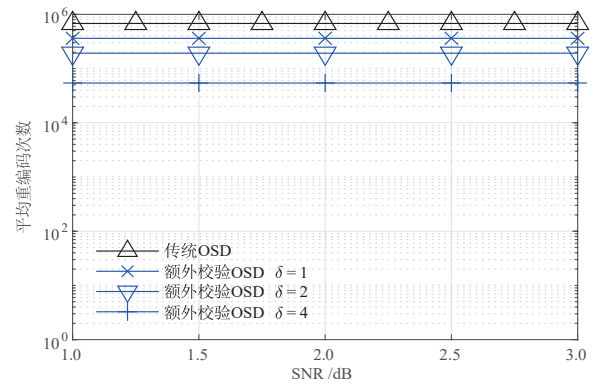


图 5 $\delta=1, 2, 4$ 下的额外校验跳过 OSD 与传统 OSD^[17]性能比较 (其中采用 eBCH [128, 64], OSD 最大翻转阶数 $t=4$)

Figure 5 Performance comparison between the extra parity-check-skipped OSD and the conventional OSD^[17] for $\delta=1, 2, 4$ (Using eBCH [128, 64], with OSD maximum flipping order $t=4$)

4.3.1 基于部分约束和度量的在线早停准则设计

与传统 OSD 算法相比, LC-OSD 在 TEP 生成过程中天然具备软重量升序的排列特性, 使得其能够与早停准则紧密结合。传统 OSD 需要在固定列表大小下遍历候选 TEP, 计算开销较大, 而 LC-OSD 结合 DAI 或 Trivial 终止准则, 可以在搜索过程中动态截断低优先级 TEP, 从而在保证 FER 性能提升的同时, 显著降低重编码次数和整体译码复杂度。更为重要的是, 该联合机制打破了传统 OSD 在性能与复杂度之间的固有权衡, 使得 LC-OSD 在大规模码字、低时延或计算资源受限的应用场景中展现出更优的实用性与扩展潜力。实际上, LC-OSD 在相关领域已获得多种应用, 包括短包通信^[52-53]、短码构造^[54-55]、抗干扰通信^[56]以及量子纠错^[56-60]等。

例 4 (LC-OSD 与 PB-OSD 性能对比): 考虑最小汉明距离为 22 的 eBCH 码 [128, 64]。在 BPSK-AWGN 信道下的传输场景, 对原始 OSD 算法, $\delta=8, l_{\max}=4096, \alpha=0.6$ 的 LC-OSD 算法和 PB-OSD 算法进行了比较。仿真结果如图 6 所示。可以看到, $\delta=8, l_{\max}=4096, \alpha=0.6$ 的 LC-OSD 的平均重编码次数远少于 PB-OSD。

4.3.2 基于部分校验和度量的离线跳过准则设计

基于软度量跳过和基于额外校验跳过机制从不同的方面入手, 降低了 OSD 算法的重编码次数, 将两种机制结合, 先对部分 TEP 利用 DAI 跳过机制判断是否跳过, 再利用额外校验判断长度为 $k+\delta$ 的 TEP 的合法性进一步降低重编码次数。此时 DAI 跳过中的补偿项计算为

$$\Gamma_{\text{DAI}}^\delta = \sum_{i=1}^{n-k-\delta} \frac{|\tilde{r}_i|}{1 + \exp(|\tilde{r}_i|)} \quad (26)$$

联合跳过准则。对于第 j 个 TEP $(\mathbf{e}_L^{(j)}, \mathbf{e}_\delta^{(j)})$, 若

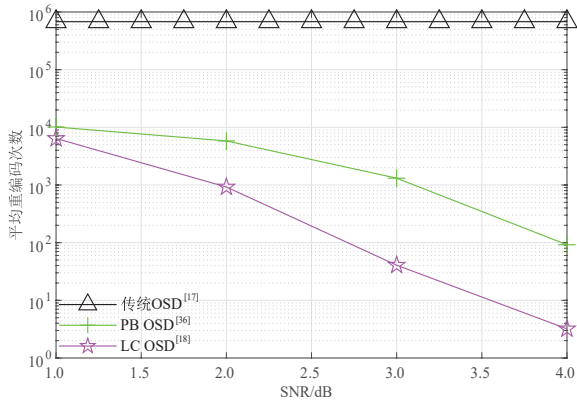


图6 LC-OSD、PB-OSD与传统OSD的性能比较

Figure 6 Performance comparison of LC-OSD, PB-OSD, and conventional OSD

$\Gamma\left(\left(e_L^{(j)}, e_\delta^{(j)}\right) + \Gamma_{\text{DAI}}^\delta > \Gamma_{\text{opt}}^{(j-1)}\right)$ 或 $\left(e_L^{(j)} \oplus \tilde{z}_L\right) P_\delta \oplus \tilde{z}_\delta \neq e_\delta^{(j)}$, 则跳过 $\left(e_L^{(j)}, e_\delta^{(j)}\right)$, 不对其执行重编码。否则, 对其进行重编码。

例5(联合跳过准则与其他译码方案的性能对比): 针对 BCH 码 [127, 64] 在 BPSK-AWGN 信道下的传输场景, 本文对比了原始 OSD [17]、PSC [50] 结合 PNC [51]、FOSD [43]、OS-OSD [45] 以及联合跳过 OSD ($\delta=4$) [47] 等多种算法, 各算法最大翻转阶数统一设为 $t=4$ 。图 7 展示了不同算法的平均重编码次数对比。从结果可以看出, 相较于此前文献中的多种方案, 联合跳过 OSD 算法在平均重编码次数方面表现最优, 尤其在低信噪比区域相比性能较优的 OS-OSD 可降低约两个数量级。值得注意的是, 在 SNR = 4 dB 时, 联合跳过 OSD 算法仅需十余次重编码即可完成译码, 展现出显著的计算效率优势。

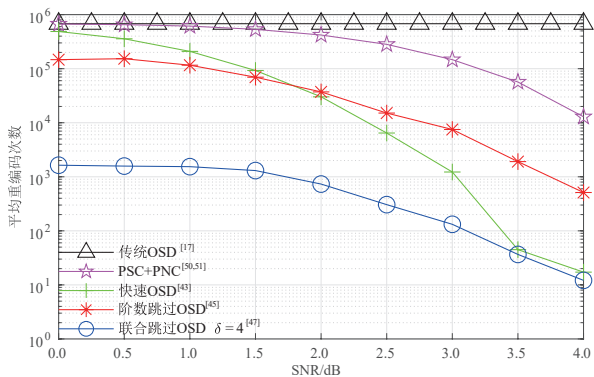


图7 联合跳过准则与其他跳过方案性能对比(其中采用 BCH[127, 64], OSD 最大翻转阶数 $t=4$)

Figure 7 Performance comparison of the joint skipping criterion and other skipping schemes (Using BCH[127, 64], with OSD maximum flipping order $t=4$)

5 总结展望

在 5G/6G 对超高可靠与超低时延通信的严格要求下, OSD 作为一类具备 ML 译码潜力的通用译码方法, 其译码复杂度是制约其实际应用的核心问题。本文从 OSD 的基本框架出发, 系统综述了面向高可靠低时延通信的 OSD 算法中测试错误模式 TEP 的顺序优化、跳过策略与提前终止机制的最新研究进展。关于 TEP 测试顺序, 系统比较了不同 TEP 生成顺序, 包括汉明重量顺序、软重量顺序与 ORB 顺序对译码性能和复杂度的不同影响, 其中软重量顺序虽在理论上最优, 却因高计算复杂度难以实用化, 汉明重量虽然更容易产生, 但会损失性能。而 ORB 顺序在性能与实现复杂度之间实现了较好的平衡。

在跳过与提前终止机制方面, 本文系统归类并综述了基于 PNC/PSC、F-OSD、OS-OSD 和 PB-OSD 等策略。这些方法通过动态利用译码软信息或引入概率决策, 显著减少了重编码操作。本文重点剖析了基于软度量的终止或跳过机制(如 Trivial 准则与 DAI 准则)和基于额外校验的 TEP 处理方法, 指出其通过引入结构性约束和混合判断策略, 在几乎不损失译码性能的前提下, 将平均重编码次数降低数个数量级。数值仿真表明, 所提出的联合跳过机制在高信噪比条件下甚至能够将重编码次数从百万次大幅降低至个位数, 表现出优异的实用性和可扩展性。

尽管现有研究在降低 OSD 复杂度方面已取得显著成果, 其在非二进制编码、时变信道环境、动态列表大小控制与硬件高效实现等方面仍存在挑战。图 8 给出了 OSD 算法的未来可研究方向, 包括基于深度学习辅助的 TEP 生成策略、跨层联合译码结构、自适应终止门限机制, 以及面向 6G 新场景的轻量化 OSD 变体设计, 从而推动 OSD 技术在工业物联网、空天地一体化网络及其他超高可靠低时延通信系统中的应用落地。

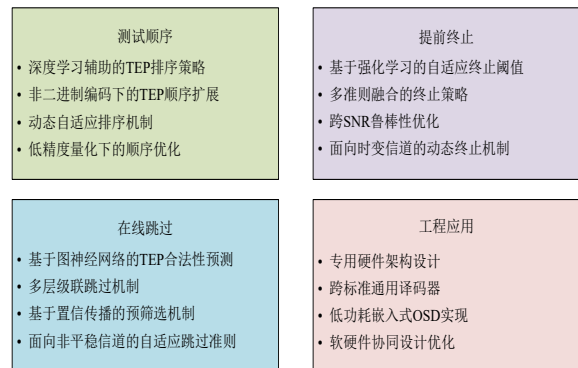


图8 OSD 未来发展图景

Figure 8 Future development landscape of OSD

参考文献

- [1] 3GPP. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies v14.2.0 (release 14) [R/OL]. [2025-08-29]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2996>.
- [2] ITU-R. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and beyond [R/OL]. [2025-08-29]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160-0-202311-I/en>.
- [3] Rowshan M, Qiu M, Xie Y X, et al. Channel coding toward 6G: Technical overview and outlook[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 2585-2685.
- [4] Tataria H, Shafi M, Molisch A F, et al. 6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(7): 1166-1199.
- [5] 蔡穗华, 王义文, 白宝明, 等. 面向高可靠低时延通信的信道编码技术研究综述[J]. *电子学报*, 2025, 53(2): 629-644.
Cai Suihua, Wang Yiwen, Bai Baoming, et al. Channel coding techniques for ultra-reliable and low-latency communication[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(2): 629-644. (in Chinese)
- [6] Gallager R. Low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(1): 21-28.
- [7] MacKay D J C, Neal R M. Near Shannon limit performance of low density paritycheck codes[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(18): 1645-1646.
- [8] 李二保, 雷菁, 徐富兵. 非规则 LDPC 度分布优化设计[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(11): 2788-2791.
Li Erbao, Lei Jing, Xu Fubing. Design and optimization of degree distributions of irregular LDPC[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(11): 2788-2791. (in Chinese)
- [9] Jimenez Felstrom A, Zigangirov K S. Time-varying periodic convolutional codes with low-density parity-check matrix[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(6): 2181-2191.
- [10] Pusane A E, Smarandache R, Vontobel P O, et al. Deriving good LDPC convolutional codes from LDPC block codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(2): 835-857.
- [11] Wang Q F, Cai S H, Lin W C, et al. Spatially coupled LDPC codes via partial superposition and their application to HARQ[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(4): 3493-3504.
- [12] 王千帆, 杨佳仪, 王寅楚, 等. 面向流式通信的耦合 LDPC 码研究综述[J]. *电子学报*, 2024, 52(8): 2913-2932.
Wang Qianfan, Yang Jiayi, Wang Yinchu, et al. A review of coupled LDPC codes for streaming communications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(8): 2913-2932. (in Chinese)
- [13] Arikan E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [14] 牛凯. 极化码原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 56-60.
Niu Kai. Principle and application of polarization code[M]. Beijing: Science Press, 2021: 56-60. (in Chinese)
- [15] Coşkun M C, Durisi G, Jerkovits T, et al. Efficient error-correcting codes in the short blocklength regime[J]. *Physical Communication*, 2019, 34: 66-79.
- [16] Shirvanimoghaddam M, Mohammadi M S, Abbas R, et al. Short block-length codes for ultra-reliable low latency communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(2): 130-137.
- [17] Fossorier M P C, Lin S. Soft-decision decoding of linear block codes based on ordered statistics[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(5): 1379-1396.
- [18] Wang Y W, Liang J F, Ma X. Local constraint-based ordered statistics decoding for short block codes[C]//2022 IEEE Information Theory Workshop. Piscataway: IEEE, 2022: 107-112.
- [19] Liang J F, Ma X. A random coding approach to performance analysis of the ordered statistic decoding with local constraints[PP/OL]. V1.arXiv (2024-01-30)[2025-12-16]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.16709>.
- [20] Wang Y W, Wang Q F, Zheng X P, et al. Reduced-complexity guessing codeword decoding of BCH codes with most reliable cyclic basis[C]//GLOBECOM 2025-2025 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2025: 115-120.
- [21] Wang Q F, Wang Y W, Zheng X P, et al. Ordered reliability bits guessing codeword decoding of short codes[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(9): 2823-2827.
- [22] Zheng X P, Wang Q F, Ma X. SCL-GCD of short polar codes[C]//GLOBECOM 2024-2024 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2024: 686-691.
- [23] 王义文, 王千帆, 梁济凡, 等. 多矩阵的代表性顺序统计量译码算法[J]. *电子与信息学报*, 2026, 48(1): 45-56.
Wang Yiwen, Wang Qianfan, Liang Jifan, et al. Multi-matrix representative ordered statistics decoding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*,

- 2026, 48(1): 45-56. (in Chinese)
- [24] Chen Y Z, Liang J F, Wang Q F, et al. A new joint source-channel coding scheme with overlay spread spectrum transmission[C]//2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2023: 239-244.
- [25] Zheng X P, Wang Q F, Wei B D, et al. Quasi-OSD of binary image of RS codes with applications to JSCC[C]//2024 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2024: 3576-3581.
- [26] Wang Y W, Wang Q F, Liang J F, et al. Representative ordered statistics decoding of polar codes[C]//2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2024: 1-5.
- [27] Wang Y W, Wang Q F, Liang J F, et al. Representative OSD with local constraints of CA-polar codes[J]. Chinese Journal of Electronics, 2025, 34(4): 1111-1119.
- [28] Wang Q F, Liang J F, Li L Z, et al. BP-LCGCD: A Gaussian-elimination-free and high-performance decoder for surface codes[J]. IEEE Communications Letters, 2026, 30: 782-786.
- [29] Liang J F, Wang Q F, Li L Z, et al. A high-performance list decoding algorithm for surface codes with erroneous syndrome[PP/OL]. V2. arXiv (2024-11-08)[2025-12-16]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.06979>.
- [30] Dorsch B. A decoding algorithm for binary block codes and J-ary output channels (Corresp.) [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(3): 391-394.
- [31] Valembois A, Fossorier M. Box and match techniques applied to soft-decision decoding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(5): 796-810.
- [32] Alnawayseh S E A, Loskot P. Ordered statistics-based list decoding techniques for linear binary block codes[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012(1): 314.
- [33] Yue C T, Shirvanimoghaddam M, Li Y H, et al. Segmentation-discarding ordered-statistic decoding for linear block codes[C]//2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2019: 9014173.
- [34] Yue C T, Shirvanimoghaddam M, Vucetic B, et al. A revisit to ordered statistics decoding: Distance distribution and decoding rules[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2021, 67(7): 4288-4337.
- [35] Yue C T, Shirvanimoghaddam M, Park G, et al. Linear-equation ordered-statistics decoding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(11): 7105-7123.
- [36] Yue C T, Shirvanimoghaddam M, Park G, et al. Probability-based ordered-statistics decoding for short block codes[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(6): 1791-1795.
- [37] Li X Y, Niu K, Han Y X, et al. Pre-configured error pattern ordered statistics decoding for CRC-polar codes[J]. Entropy, 2023, 25(10): 1405.
- [38] 张可, 林文超, 王野. 面向星地通信的低复杂度通用编译码技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 30-40. Zhang Ke, Lin Wenchao, Wang Ye. Low-complexity and universal channel encoding/decoding technology for satellite-to-ground communications[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(5): 30-40. (in Chinese)
- [39] Wang Y W, Liang J F, Wang Q F, et al. Representative ordered statistics decoding of staircase matrix codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(4): 2148-2158.
- [40] YU S, ZHANG B and HUANG Q. Ordered statistics derivative decoding for affine-invariant codes without Gaussian elimination[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(11): 11006-11016.
- [41] Wu D L, Li Y, Guo X D, et al. Ordered statistic decoding for short polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 1064-1067.
- [42] Xing Y S, Tu G F. A low-complexity ordered statistics decoding algorithm for short polar codes[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 831.
- [43] Choi C, Jeong J. Fast and scalable soft decision decoding of linear block codes[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(10): 1753-1756.
- [44] Liang J F, Wang Y W, Cai S H, et al. A low-complexity ordered statistic decoding of short block codes[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(2): 400-403.
- [45] Li X H, Chen W H, Chen L, et al. Order skipping ordered statistics decoding and its performance analysis[C]//2024 IEEE Information Theory Workshop. Piscataway: IEEE, 2024: 448-453.
- [46] Yue C T, She C Y, Vucetic B, et al. The guesswork of ordered statistics decoding: Guesswork complexity and decoder design[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2025, 71(6): 4167-4192.
- [47] 王千帆, 郭延庚, 宋林琦, 等. 基于跳过机制的低复杂度顺序统计译码算法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(11): 4275-4284. Wang Qianfan, Guo Yangeng, Song Linqi, et al. Low-complexity ordered statistic decoding algorithm based on skipping mechanisms[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(11): 4275-4284. (in Chinese)
- [48] Ma X. Guessing what, noise or codeword? [C]//2024 IEEE Information Theory Workshop. Piscataway: IEEE, 2024: 460-465.

- [49] Duffy K R, An W, Médard M. Ordered reliability bits guessing random additive noise decoding[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 4528-4542.
- [50] Jin W Y, Fossorier M. Probabilistic sufficient conditions on optimality for reliability based decoding of linear block codes[C]//2006 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2006: 2235-2239.
- [51] Wu Y Q, Hadjicostis C N. Soft-decision decoding of linear block codes using preprocessing and diversification[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(1): 378-393.
- [52] Wang Q F, Chen Y Z, Liang J F, et al. A new joint source-channel coding for short-packet communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(1): 28-37.
- [53] Wang Q F, Chen Y Z, Liang J F, et al. A new joint source-channel coding in the short blocklength regime[C]//2023 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE, 2023: 1566-1571.
- [54] Wang Q F, Wang Y W, Wang Y X, et al. Random staircase generator matrix codes: Coding theorem, performance analysis, and code design[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2025, 71(5): 3497-3509.
- [55] Wang Q F, Wang Y X, Wang Y W, et al. Random staircase generator matrix codes[C]//2024 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2024: 2622-2627.
- [56] 王义文, 王千帆, 马啸. 强干扰环境下无速率随机码编译码方案及其性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(10): 4017-4023.
Wang Yiwen, Wang Qianfan, Ma Xiao. Rateless random coding scheme and performance analysis in strong interference environments[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(10): 4017-4023. (in Chinese)
- [57] 梁济凡, 王千帆, 宋林琦, 等. 参数列表化置信传播-顺序统计译码算法[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(11): 4254-4263.
Liang Jifan, Wang Qianfan, Song Linqi, et al. Belief propagation-ordered statistics decoding algorithm with parameterized list structures[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(11): 4254-4263. (in Chinese)
- [58] Liang J F, Wang Q F, Li L Z, et al. The BP-LCOSD algorithm for toric codes[C]//2024 IEEE International Symposium on Information Theory Workshops. Piscataway: IEEE, 2024: 10591758.
- [59] Liang J F, Wang Q F, Li L Z, et al. A low-complexity BP-OSD algorithm for quantum LDPC codes[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2025, 234(20): 6211-6222.
- [60] Wang Q F, Wang Y W, Yang J Y, et al. Low-complexity BP-ORBOSD algorithm for short 5G LDPC codes[C]//2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE, 2025: 11148135.

作者简介



王千帆 男, 1992年2月出生于河南省焦作市。现为香港城市大学博士后。主要研究方向为信道编码及其在无线通信中的应用。
E-mail: qwang742@cityu.edu.hk



王义文 男, 1998年3月出生于广东省肇庆市。现为中山大学计算机学院博士研究生。主要研究方向为信息论与编码。
E-mail: wangyw93@mail2.sysu.edu.cn



郭延庚 男, 2004年11月出生于广东省汕头市。现为中山大学计算机学院本科生。主要研究方向为信道译码。
E-mail: guoyg6@mail2.sysu.edu.cn



宋林琦 男, 1983年2月出生于吉林省通化市。现为香港城市大学副教授。主要研究方向为人工智能和信息通信等。
E-mail: linqi.song@cityu.edu.hk



毕胜 男, 1996年9月出生于湖南省常德市。现为华南理工大学博士研究生。主要研究方向为信道编码、透明电网、电力物联网、机器学习。
E-mail: 13719179951@139.com



马啸 男, 1968年10月出生于河南省焦作市。现为中山大学教授。主要研究方向为信息与编码理论编码调制技术、无线通信和光通信等。中国电子学会会员编号: E190005835M。
E-mail: maxiao@mail.sysu.edu.cn