



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

**Rateless Codes:  
Theory, Algorithms and Applications**

**无速率编码：  
原理、算法和应用**

费泽松 © 编著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

**Rateless Codes:  
Theory, Algorithms and Applications**

# 无速率编码： 原理、算法和应用

费泽松 © 编著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书主要介绍信道编码中的无速率编码技术,以及以无速率编码思想为基础的其他相关技术。无速率编码技术是一种重要的信道编码技术,广泛应用多媒体广播、在卫星通信、分布式存储与计算等诸多领域,也是实现后5G/6G时代超低时延超高可靠通信的潜在技术之一。本书对无速率码进行全面、系统而深入的讲解,从传统的LT码入手,介绍其基本原理与优化方法,还介绍了BATS码、Spinal码、在线喷泉码等新兴的无速率编码技术,以及以无速率思想为基础的编码随机接入、无速率调制等相关技术。此外,本书兼顾理论与实践,介绍了在实际通信标准中广泛使用的RaptorQ、Raptor10等编码方案,并结合实际场景介绍了无速率码的应用。

本书适合高等学校通信学科高年级学生和研究生用作教材,也可供科研人员和工程技术人员作为参考资料使用。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

无速率编码:原理、算法和应用/费泽松编著.--  
北京:北京理工大学出版社,2023.1  
ISBN 978-7-5763-2070-1

I. ①无… II. ①费… III. ①信道编码-研究 IV.  
①TN911.22

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第010833号

---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京捷迅佳彩印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/15.75

彩 插/6

字 数/325千字

版 次/2023年1月第1版 2023年1月第1次印刷

定 价/69.00元

责任编辑/曾 仙

文案编辑/曾 仙

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

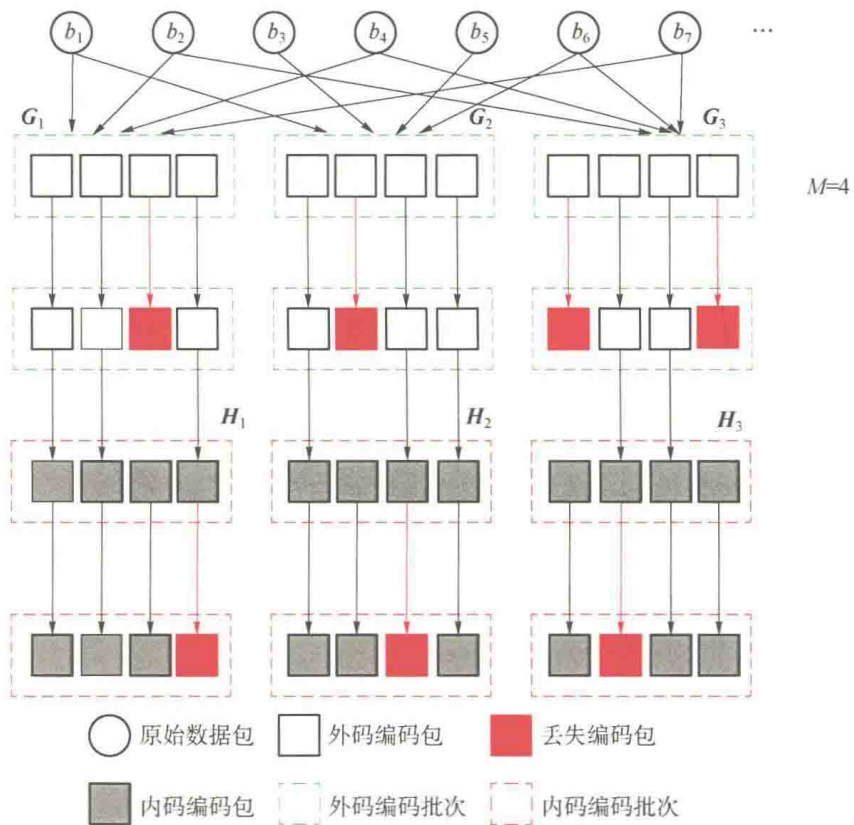


图 2.4.2 BATS 编码的 Tanner 图表示

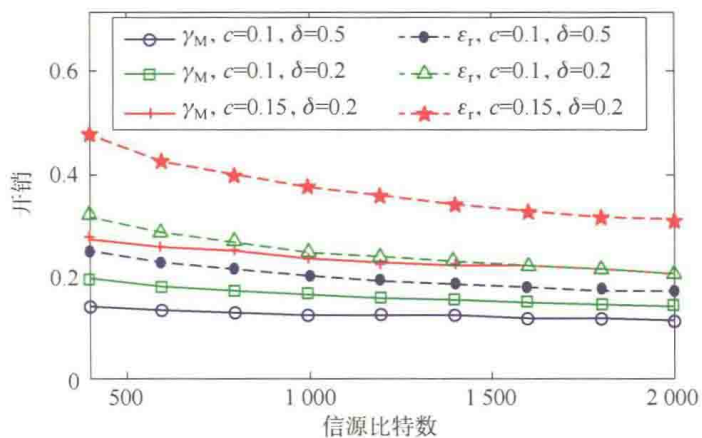


图 3.3.2 开销区域  $\gamma_M$  以及  $\epsilon_r$

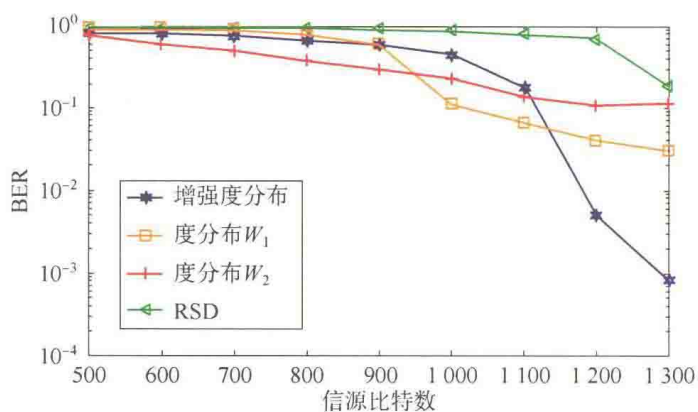
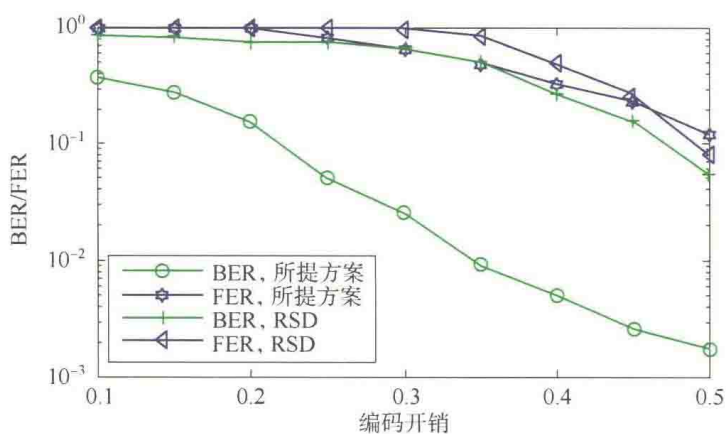
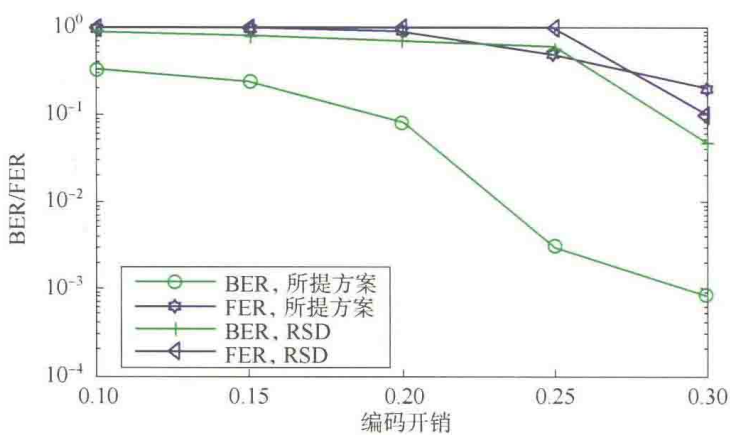


图 3.3.4 多种度分布函数的 BER 性能比较



(a)



(b)

图 3.3.6 基于所设计的度分布函数的点对点传输机制的仿真结果

(a)  $k=400$ ; (b)  $k=2000$

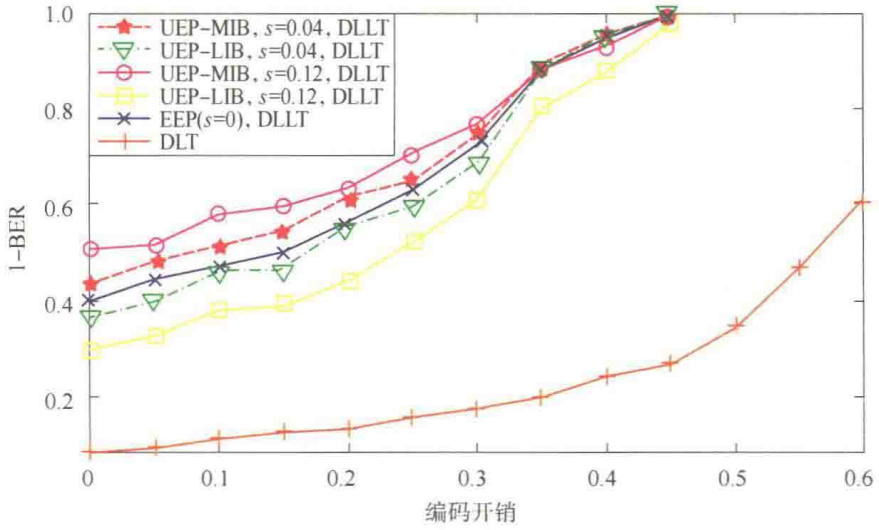


图 3.3.8 低开销分布式 LT 码的仿真结果

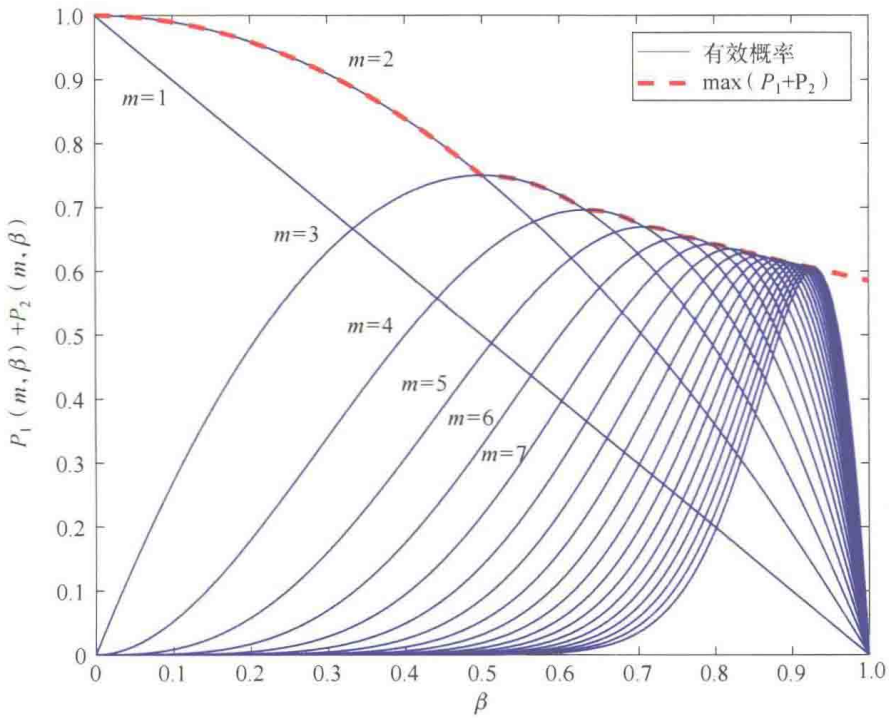


图 4.2.2 恢复比例与有效概率之间的关系

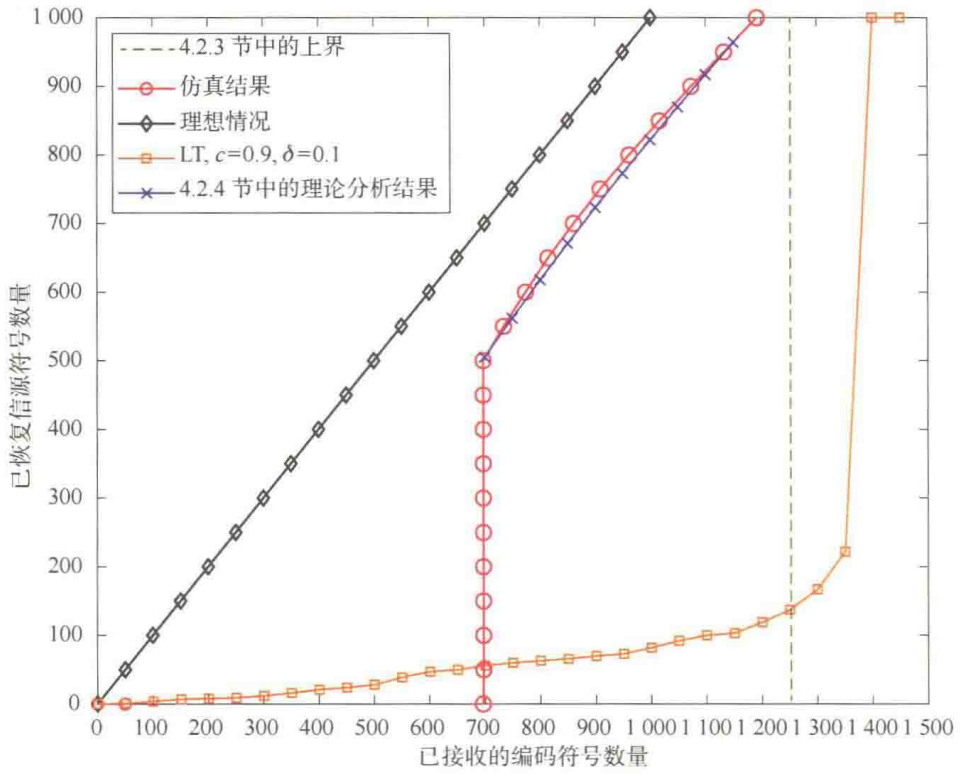


图 4.2.3 编码符号与恢复的信源符号间的数量关系

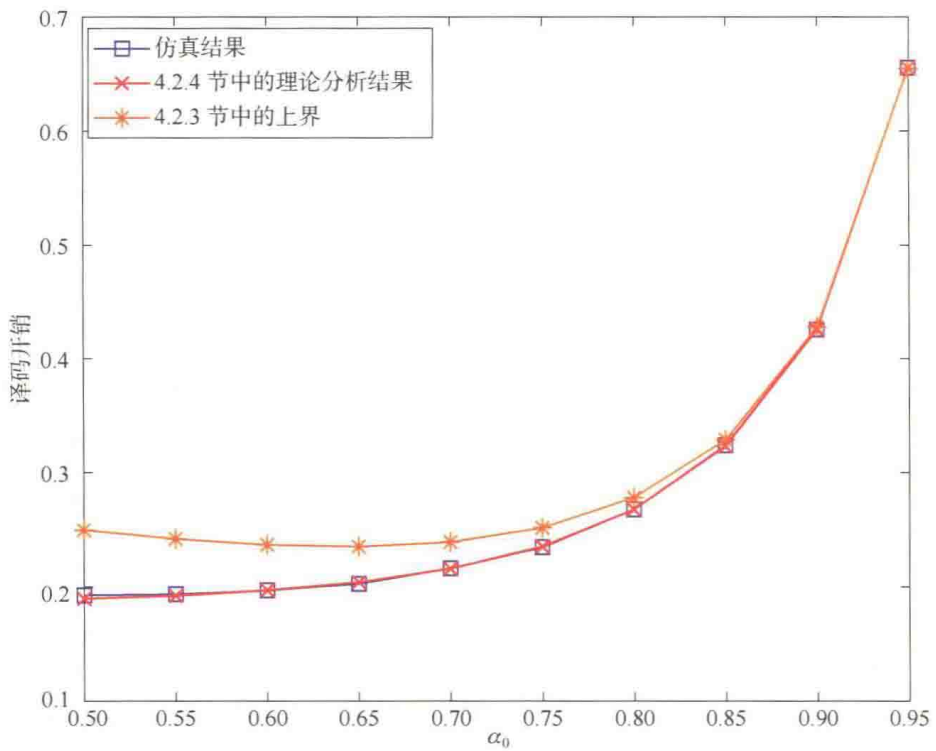


图 4.2.4 译码开销与  $\alpha_0$  间的关系

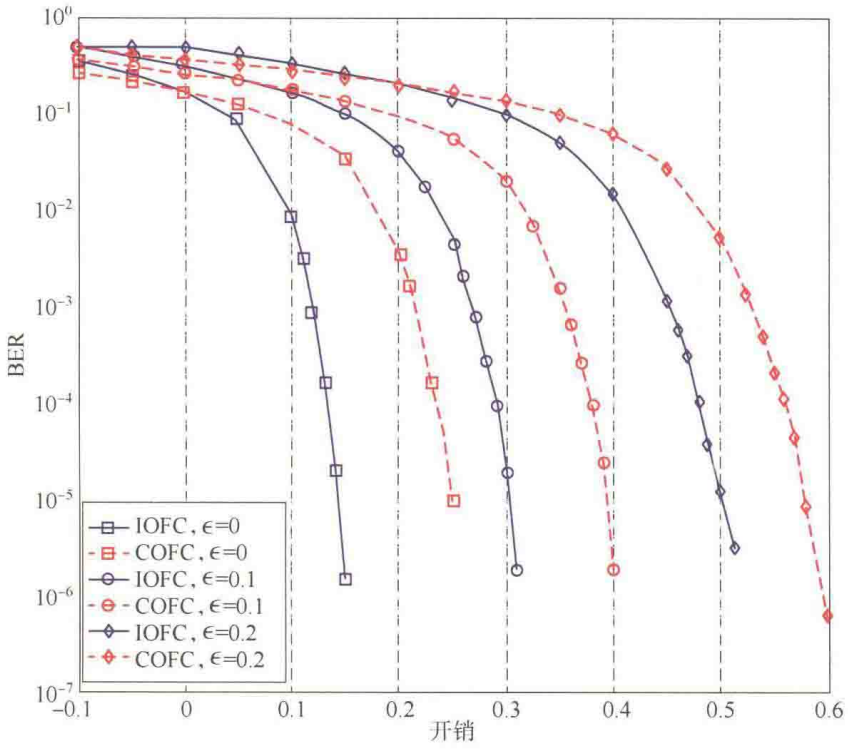


图 4.3.2 IOFC 与传统在线喷泉码 BER 新能对比

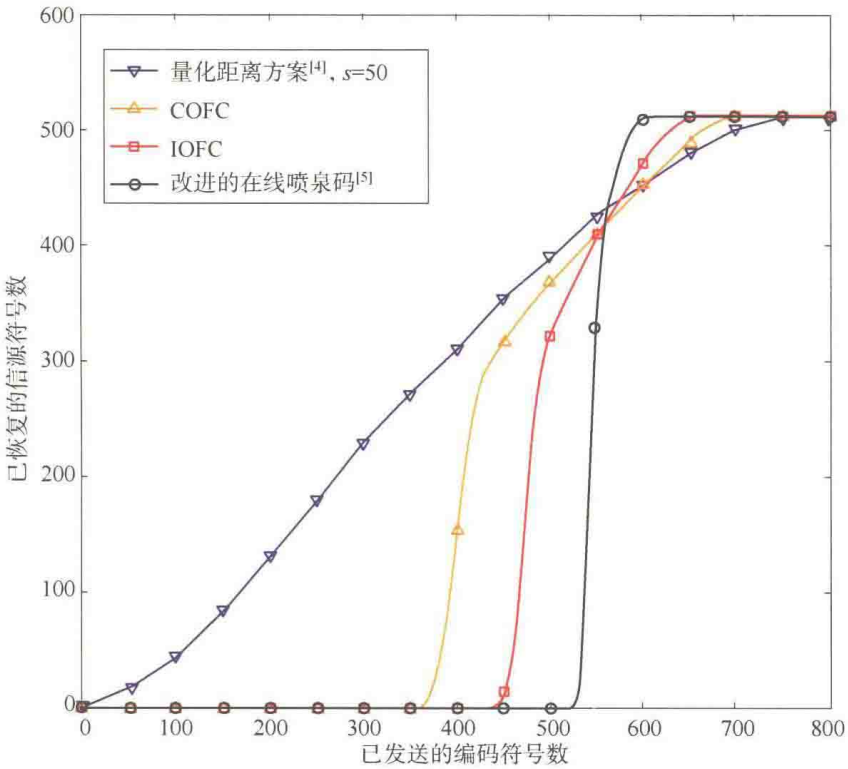


图 4.3.4 不同基于反馈的喷泉码方案的中间性能对比

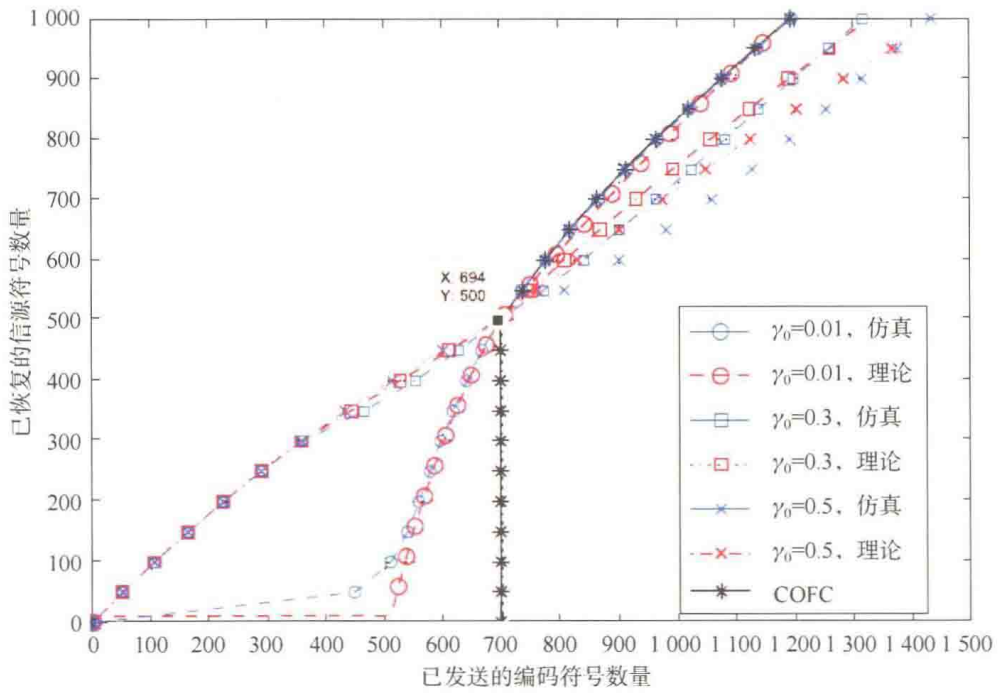


图 4.3.6 OFCNB 理论结果与仿真结果对比

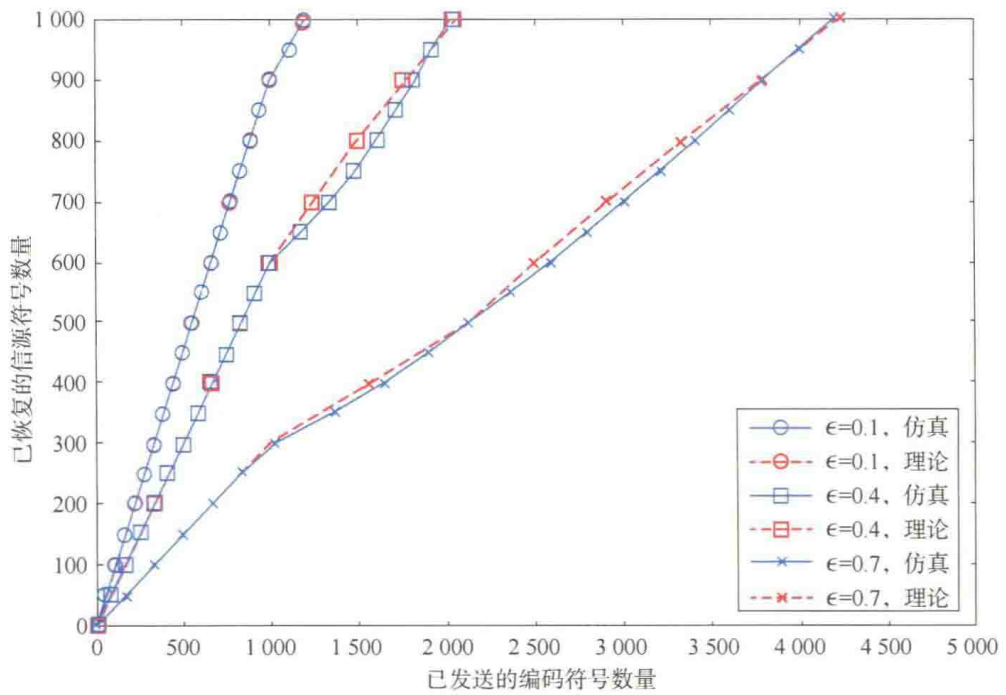


图 4.3.7 SOFC 理论结果与仿真结果对比

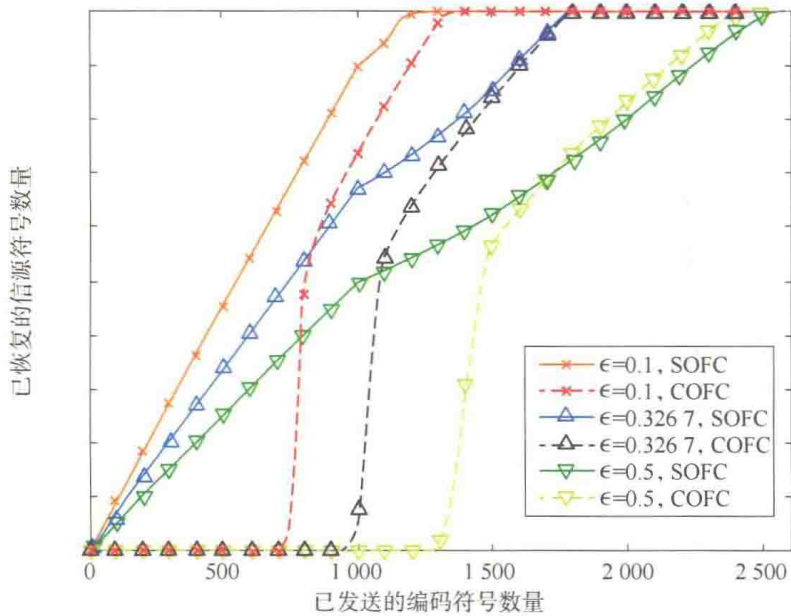


图 4.3.8 不同信道擦除概率下 SOFC 与传统在线喷泉码性能对比

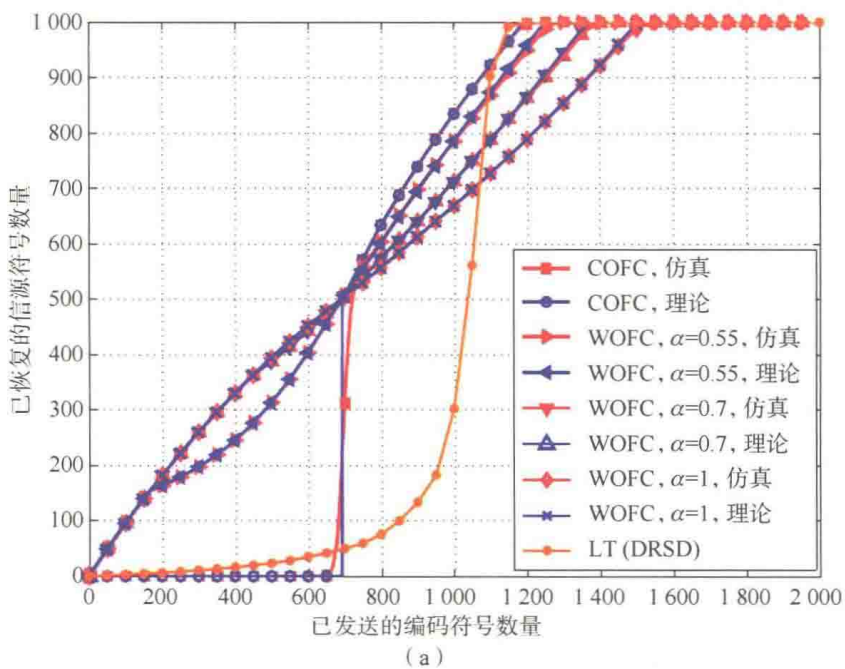


图 4.4.2 给定编码符号数量下的恢复比例和译码缓存占用量

(a) 恢复比例

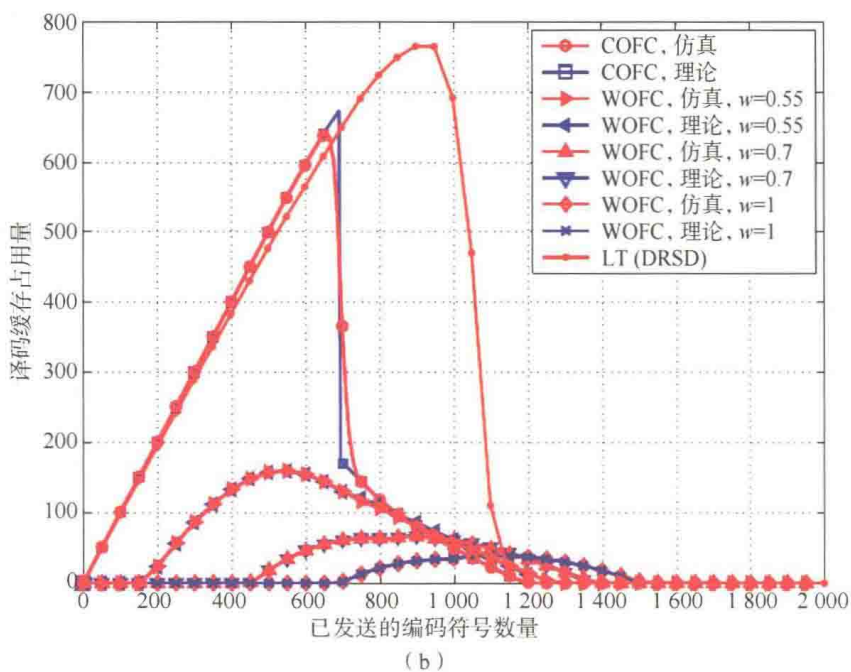


图 4.4.2 给定编码符号数量下的恢复比例和译码缓存占用量

(b) 译码缓存占用量

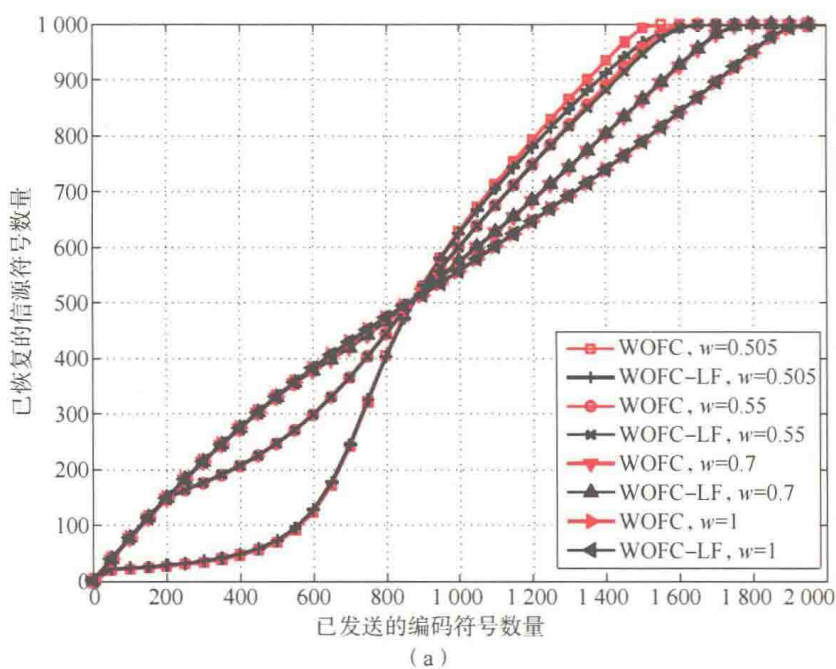


图 4.4.3 WOFC-LF 与 WOFC 在  $\epsilon=0.2$  的删除信道下的性能对比

(a) 恢复比例

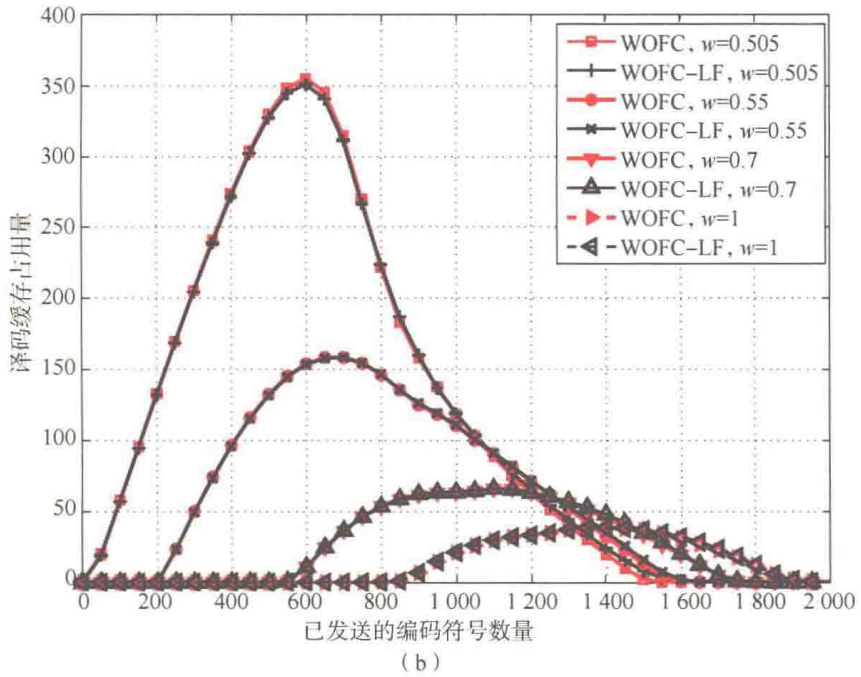


图 4.4.3 WOFC-LF 与 WOFC 在  $\epsilon=0.2$  的删除信道下的性能对比  
(b) 译码缓存占用量

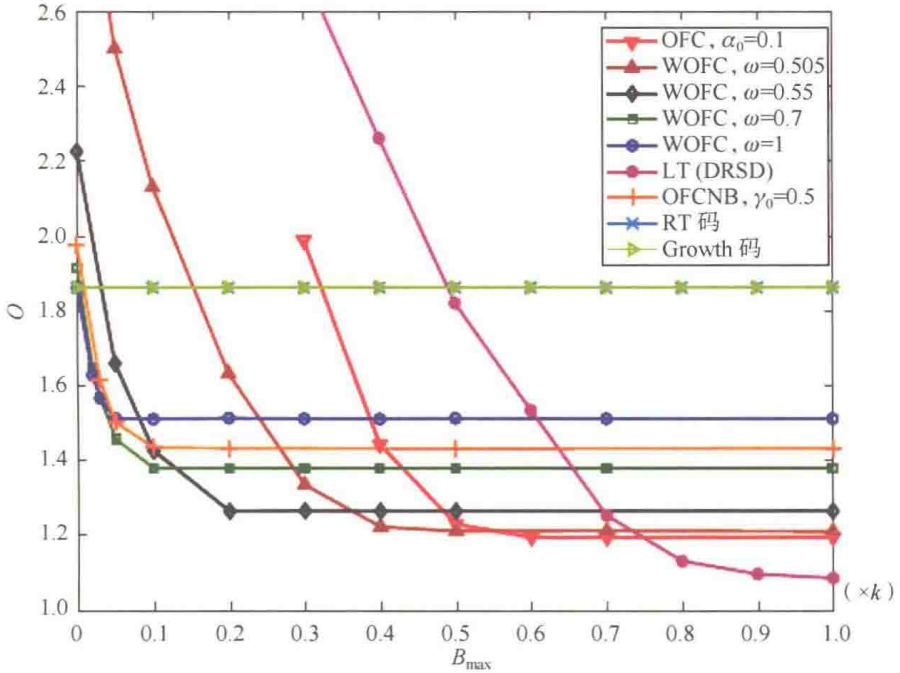


图 4.4.4 译码缓存容量变化时的全恢复性能

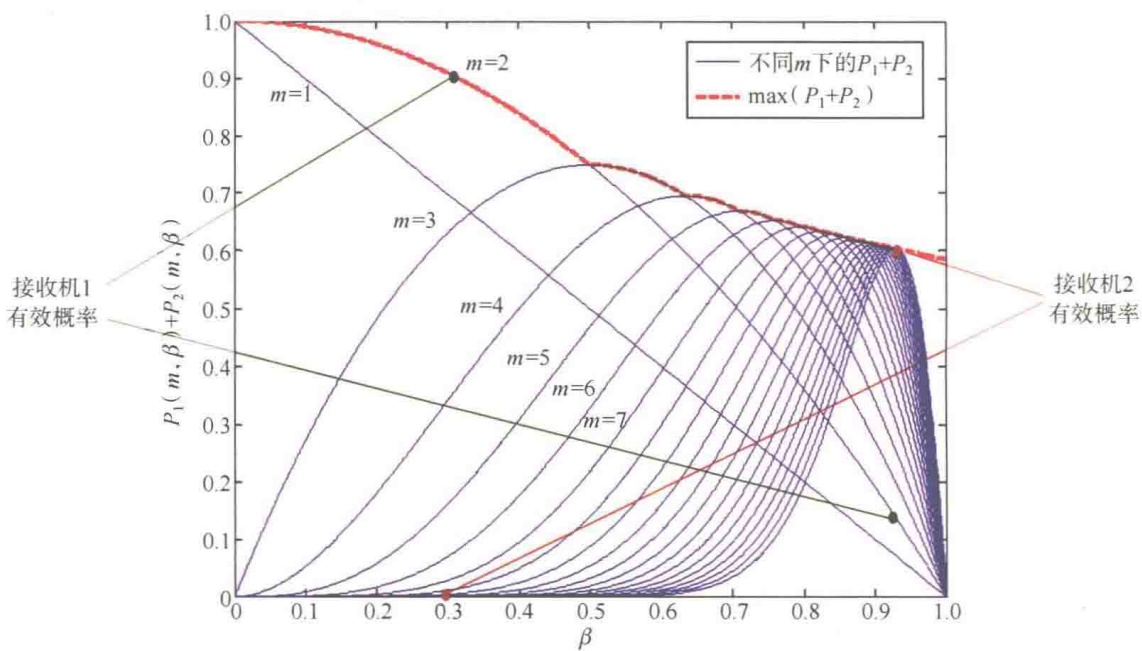


图 4.5.1 不同状态的接收机之间产生多状态干扰

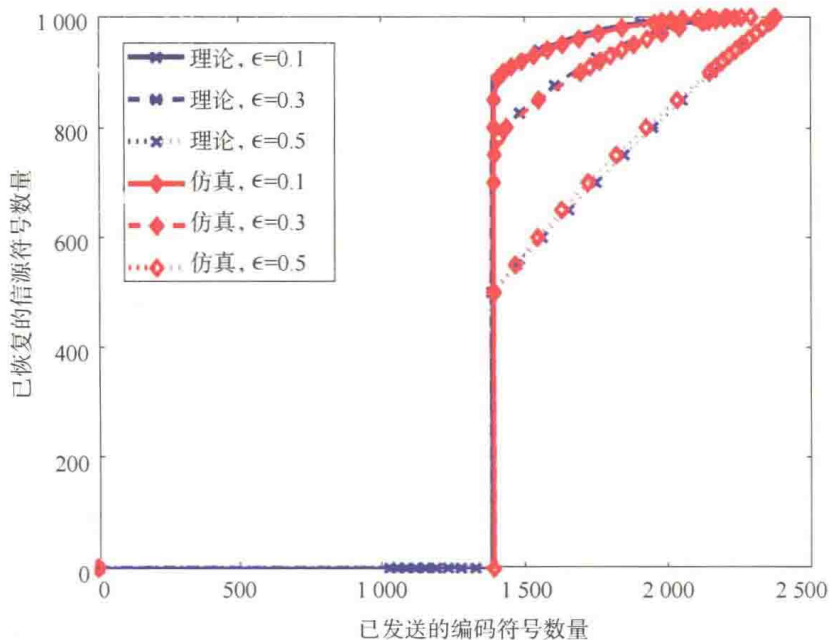


图 4.5.2 WB-OFC 性能仿真结果

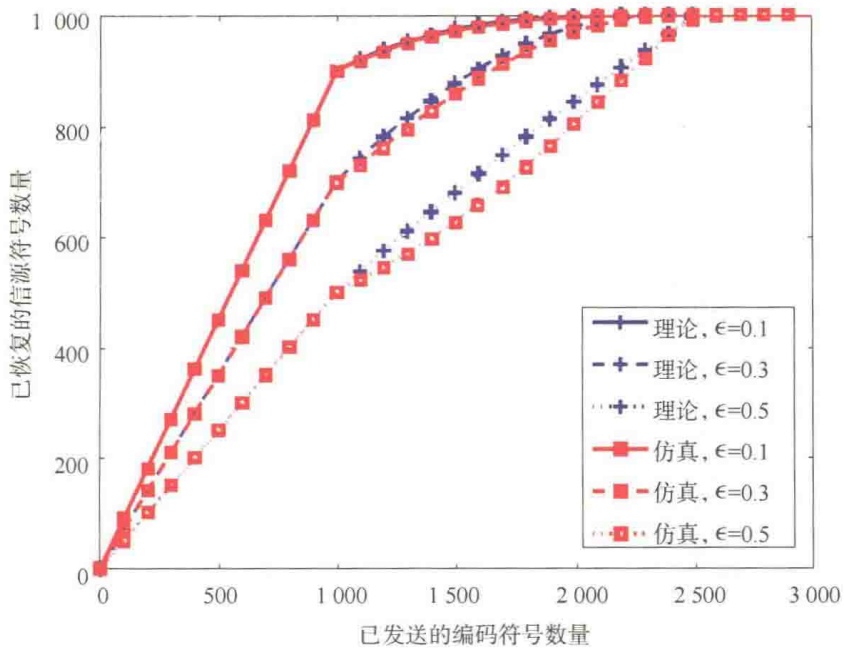


图 4.5.3 WB-SOFC 性能仿真结果

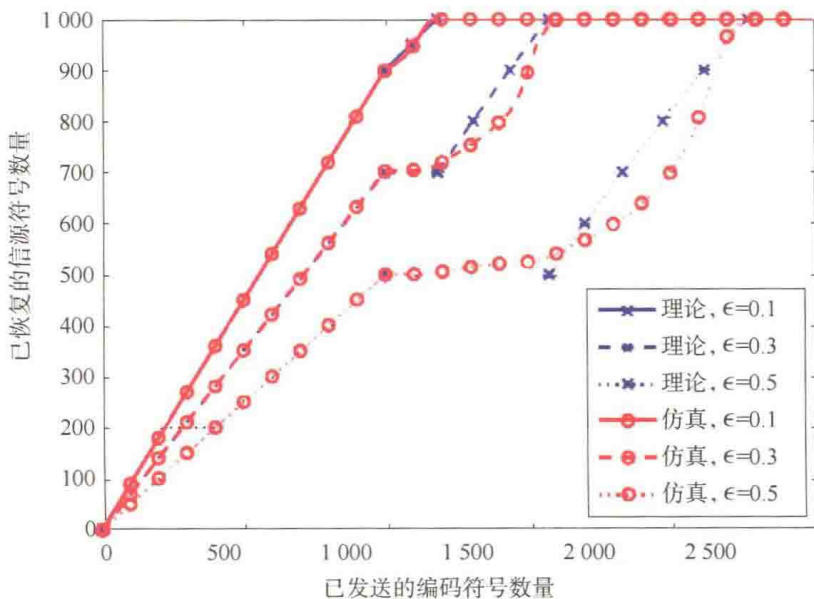


图 4.5.4 HB-SOFC 性能仿真结果

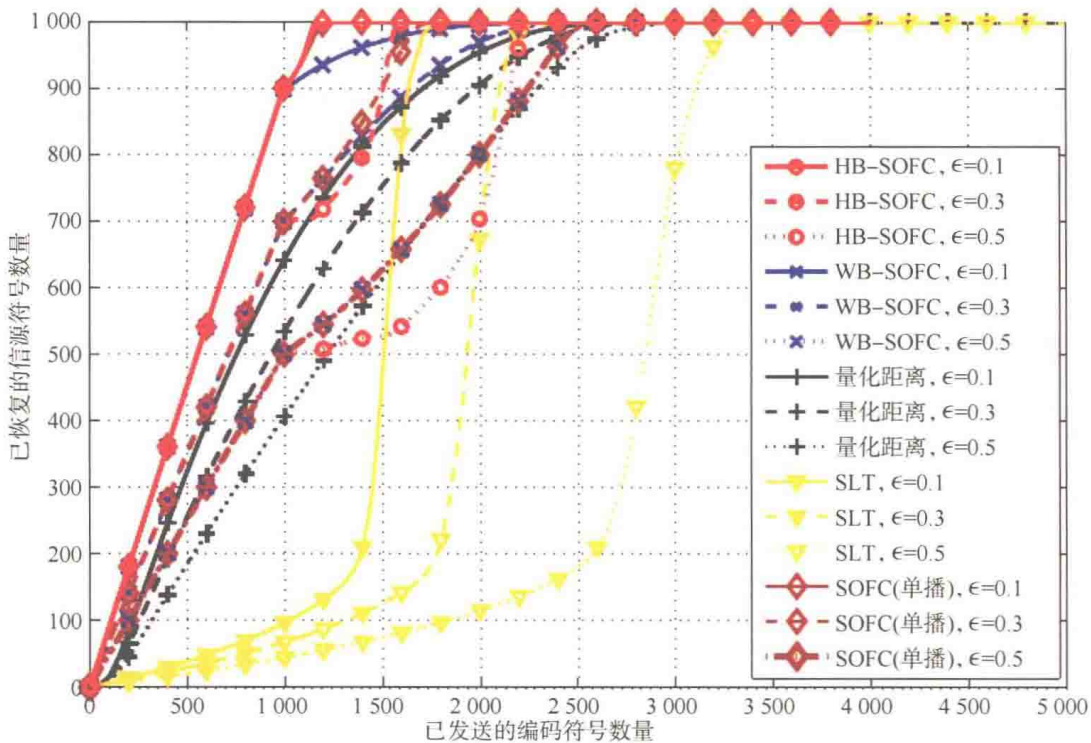


图 4.5.5 不同广播方案的性能比较

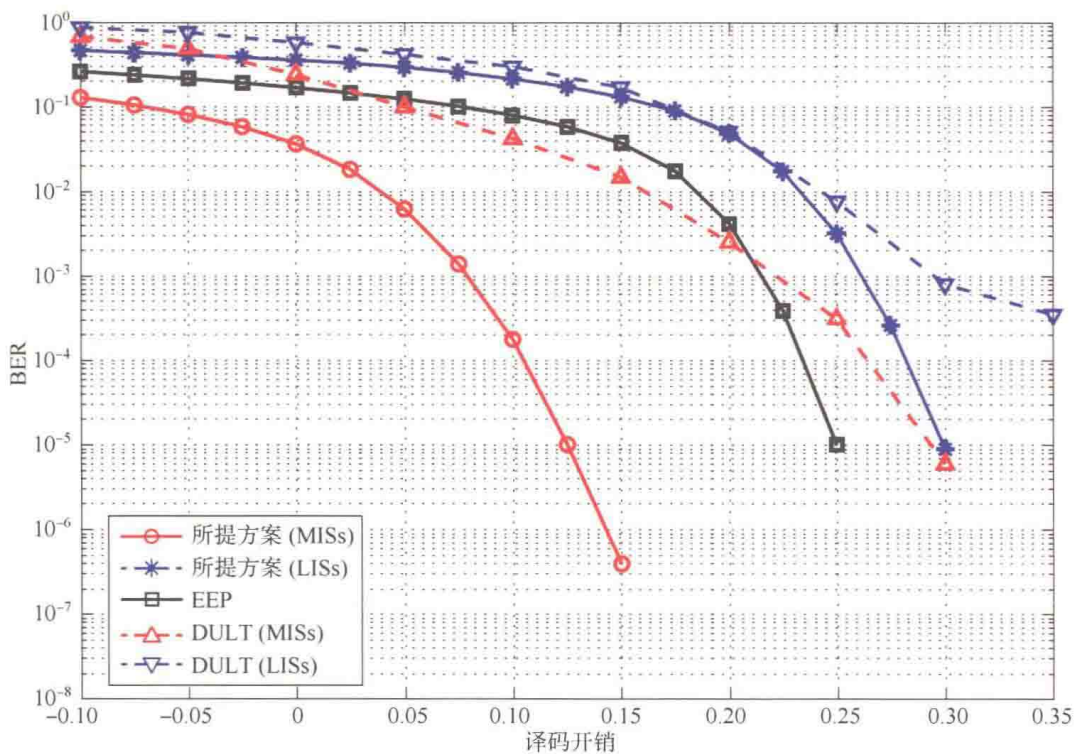


图 4.5.8 不同方案的 BER 性能对比

# 前言

作为信息论的核心内容之一，信道编码本质上是一种通过添加满足一定约束条件的冗余信息以进行差错控制，从而实现可靠数据传输的技术，是通信系统不可或缺的一环。

无速率编码被认为是实现后 5G/6G 时代超低时延、超高可靠通信的潜在信道编码技术之一。自 1998 年数字喷泉的概念被提出以来，因其码率灵活、编译码复杂度低、可靠性高、无须反馈等特点，无速率编码被广泛应用于多媒体广播通信、卫星通信、水声通信、分布式存储与计算等领域。然而，现有大部分教材对于无速率码的介绍过于简略，缺乏对其基本原理与优化方法的深入讲解，以及对其应用场景与优势的系统阐述。此外，大部分教材仅涉及诸如 LT 码和 Raptor 码等传统无速率编码方式，并未介绍新兴无速率码编码技术以及基于无速率思想的通信技术等，导致内容过于陈旧、难以适配现有通信系统的发展。

本书围绕无速率编码进行全面、系统且深入的介绍。从传统 LT 码入手，详尽地论述了其基本原理、编译码算法、改进算法以及分析与优化方法。同时，为兼顾理论性与实践性，本书总结归纳了通信标准中所采用的 RaptorQ、Raptor10 等无速率编码技术，结合实际场景进一步分析了无速率码的应用与优化方案。最后，本书紧跟无速率编码技术最新发展，介绍了 BATS 码、Spinal 码、在线喷泉码等新兴的无速率编码技术，以及以无速率编码思想为基础的无速率调制、编码随机接入、无速率非正交多址接入等本领域最新研究进展。

本书由北京理工大学通信技术研究所费泽松组织编写并统稿，其中第 1 章由费泽松负责撰写，第 2 章由费泽松、黄靖轩负责撰写，第 3 章由王新奕负责撰写，第 4 章由黄靖轩负责撰写，第 5 章由于含笑负责撰写。特别感谢北京理工大学通信技术研究所的孙策、张竞文、赵瑞、赵涵昱、秦

梓峻等研究生对本书所做的贡献。同时，本书的编写得到了国家自然科学基金面上项目“基于编码调制的无人机安全通信技术研究”（项目号：61871032）、科技部重点研发计划项目“面向6G的新型编码调制与波形设计技术”（项目号：2020YFB1807203）和“6G无线覆盖扩展技术”（项目号：2020YFB1806900）等支持。

本书适合高等学校通信学科高年级学生和研究生用作教材，也可供科研人员和工程技术人员作为参考资料使用。

限于笔者的水平，书中难免有不妥之处，敬请读者指正。

费译松

2023年1月