

LT 码度分布的优化与设计

刘聪, 费炜, 胡胜*

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 武汉 430068)

摘要:喷泉码作为一种信道编码是解决大气对自由空间光通信干扰的重要技术,而度分布是影响喷泉码性能的关键因素。针对喷泉码的度分布,首先从原理上分析了鲁棒孤子分布和固定度分布在性能上的不足,之后改进了固定度分布函数,提出了一种将滑动鲁棒孤子分布和改进的固定度分布这 2 种度分布相结合,并通过一个比例系数进行连接的新型联合度分布设计方案。仿真结果表明,提出的联合度分布的译码性能要远远高于鲁棒孤子分布和固定度分布。

关键词:LT 码;度分布;优化方案;译码成功率

中图分类号:TN911.2 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)03-0010-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization and design of degree distribution of LT codes

LIU Cong, FEI Wei, HU Sheng*

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: As a kind of channel coding, fountain code is an important technique to solve the interference of atmosphere on free space optical communication. Degree distribution is a key factor affecting the performance of fountain code. In the light of the degree distribution of fountain code, robust soliton distribution and fixed degree distribution is firstly analyzed from the principle and the deficiency on the performance, after that, the fixed degree distribution function is improved, then a new joint degree distribution design is proposed to combine the moved robust soliton distribution with the improved fixed degree distribution by a proportion ratio. The simulation results show that the decoding performance of the joint degree distribution proposed in this paper is much higher than the robust soliton distribution and fixedness distribution.

Key words: Luby transform codes; degree distribution; optimization scheme; decoding success rate

0 引言

射频无线通信频谱资源较紧张,传输速率有限。而自由空间光通信具有良好的抗干扰和抗截获性能,其频谱不受限,传输速率高,在未来有望取代无线通信。在地-地、地-空激光通信系统信号传输中,大气信道的状态是难以预测的,大气对光的折射和散射都会使得光信号的传输受到干扰,特别是在强湍流情况下干扰会更加严重,因此研究大气信道具有重要意义。

收稿日期:2019-07-22。

基金项目:国家自然科学基金(61601177)资助;湖北省教育厅科技攻关项目(Q20171401)资助。

作者简介:刘聪(1982-),男,湖北公安人。2011 年曾在微软亚洲研究院从事认知网络下多媒体传输的相关研究,2012 年在清华大学做访问学者,2014 年获华中科技大学博士学位。现为湖北工业大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为自由空间光通信、移动通信、数字图像处理和认知无线电。

* 通信作者:胡胜(E-mail: shenghu@hust.edu.cn)。



学术界通常采用信道编码技术来消除对大气信道的各种干扰^[1]。

数字喷泉码作为一种有效的信道编码技术,因其码率不受限、可在线产生、低编译码开销和编译码复杂度等优点被广泛应用于大数据量的组播和广播。在深空通信、无线中继系统、分布式数据存储、水声信道和窃听信道等领域都有大量应用。度分布是数字喷泉码的重要组成部分,它的性能直接影响数字喷泉码的编译码性能。2 种经典的度分布为理想孤子分布(ISD)和鲁棒孤子分布(RSD)。在 ISD 中,因为度分布映射的随机性,会出现度 1 编码分组丢失而使译码中断的情况。RSD 克服了这种随机性,它提高了大度值编码分组出现的概率,但是小度值编码分组的概率很小,因此在码长较短时性能不佳。文献[2]提出了具有很强实用性的固定度分布,其平均度值不会随着码长的变化而改变,但是固定度分布适用于长码长,在短码长情

况下性能也不够理想。为解决以上问题,本文对 RSD 和固定度分布进行结合并优化,提出一种新的联合度分布设计方案。

1 经典度分布的优化

1.1 RSD 的优化

RSD 由 ISD 的 $\rho(d)$ 函数和 $\tau(d)$ 函数组成,其表达式如下:

$$\mu(d) = [\rho(d) + \tau(d)] / \sum_{d=1}^k [\rho(d) + \tau(d)] \quad (1)$$

由 RSD 的函数表达式(1)和图 1 的概率分布曲线可知,第一个峰值点是度值为 2 的点,它由 $\rho(d)$ 决定,根据文献[3]的度分布设计思路,为了降低度值 2 出现的概率,提升大度值出现的概率,对 RSD 进行如下改进从而得到滑动-鲁棒孤子分布(Moved-RSD):

$$\eta(d) = [\rho'(d) + \tau(d)] / \sum_{d=1}^k [\rho'(d) + \tau(d)] \quad (2)$$

$$\rho'(d) = \begin{cases} \frac{1-b \left(1 - \frac{1}{k-n+2}\right)}{n-1}, & 1 \leq d \leq n-1 \\ \frac{b}{(d-n+1)}, & n \leq d \leq k \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\eta(d)$ 代表 Moved-RSD; $\rho'(d)$ 为改进的 ISD; n 为第一峰值点; b 为第一峰值系数,大小为 0~1。我们假设码长 $k=200$, $n=15$, $b=0.75$,则 Moved-RSD 的概率分布曲线如图 2 所示。对比图 1 可以看出,第一峰值点从度为 2 的点移动到了度为 15 的点,且概率也由原来的 0.439 变为 0.3429。

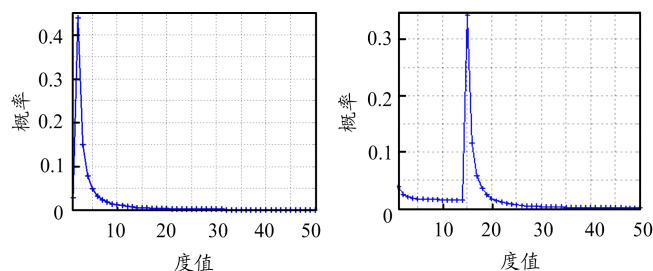


图 1 RSD 的概率分布曲线

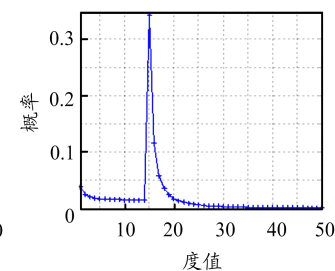


图 2 Moved-RSD 的概率分布曲线

1.2 固定度分布的优化

固定度分布表达式为:

$$S(x) = 0.007969x + 0.493570x^2 + 0.166220x^3 + 0.072646x^4 + 0.082558x^5 + 0.056058x^8 + 0.037229x^9 + 0.055590x^{19} + 0.025023x^{65} + 0.003135x^{66} \quad (4)$$

按照文献[3]的度分布设计思路:度 1 的概率值应

适当大,度 2 的概率值应接近 0.5,同时保证具有一定的最大度值的概率。但固定度分布度值为 2 的概率接近 0.5,度值为 1 的概率太小,而度值为 3 的概率很大。为了增大度值为 1 的概率,我们对式(4)进行调整,将度值为 3 的概率与度值为 1 的概率进行互换,然后将除度值 2 之外的其它度值的概率都减小 10%,减小的概率值都加在最大度值 66 的概率上。改进后的新固定度分布 $S'(x)$ 的函数表达式为:

$$S'(x) = 0.149598x + 0.493570x^2 + 0.0071721x^3 + 0.00653814x^4 + 0.0743022x^5 + 0.0504522x^8 + 0.0335061x^9 + 0.050031x^{19} + 0.0225207x^{65} + 0.078858x^{66} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,改进后的固定度分布除度值 2 外的其它度值的概率都发生了变化,但是它们的变化量相互抵消,因此整个度分布的平均度值仍然是固定值,即大小为 5.8703。

2 联合度分布

本文提出的 Moved-RSD 和改进的固定度分布更加符合文献[3]提出的一个性能优良的度分布设计标准。为了利用这 2 种度分布的优势,本文将这 2 种度分布进行结合,从而提出一种联合的度分布,其函数表达式为:

$$\theta(d) = \alpha\eta(d) + (1-\alpha)S'(d) \quad (6)$$

其中, $\theta(d)$ 、 $\eta(d)$ 和 $S'(d)$ 分别代表联合的度分布、Moved-RSD 和改进的固定度分布; α 为比例系数,大小为[0,1]。

本文提出的联合度分布在数学形式上就是通过一个比例系数 α 将 Moved-RSD 和改进的固定度分布进行简单相加,通过 α 值的大小来调节 2 种度分布在联合度分布中所占的比重。当 α 值过大,进行 LT 编码时主要采用 Moved-RSD;当 α 值过小,进行 LT 编码时主要采用改进的固定度分布。因此只有在比例系数 α 取最优值时,提出的联合度分布的性能达到最好。

3 仿真结果及分析

3.1 联合度分布的 α 值的确定

首先需要确定联合度分布中的比例系数 α 的最优值, α 值很难用理论公式推导,因此本文采用蒙特卡罗模拟来近似寻找。在码长 $k=200$ 和 $k=500$ 的情况下统计译码开销为 0.15 时译码成功率与 α 值的关系,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在 $k=200$ 和 $k=500$ 这 2 种情况

下,随着 α 值的增大,译码成功率均呈先上升后下降的趋势,在 $\alpha=0.6$ 时,2 种码长情况的译码成功率均达到最大。因此,通过仿真可以确定 α 的最优值为 0.6,即联合度分布的函数表达式为:

$$\theta(d)=0.6\eta(d)+0.4S'(d) \quad (7)$$

3.2 译码性能的分析比较

本文测试了固定度分布、RSD 以及联合度分布的译码性能,将译码成功率作为性能指标,仿真基本参数设置如表 2 所示。其中 c 为 0~1 之间的常数, δ 为译码失败的概率,得到的结果如图 4 所示。

表 2 仿真基本参数设定

重要参数	RSD	固定度分布	联合度分布
RSD 参数 c	0.05	—	0.05
RSD 参数 δ	0.05	—	0.05
Moved-RSD 第一峰值 n	3	—	3
Moved-RSD 第一峰值系数 b	0.7	—	0.7
比例系数 α	—	—	0.6

从图 4 (a) 可以看出,当 $k=200$ 时,固定度分布的初始译码成功率比联合度分布和 RSD 要高,随着译码开销的增加,联合度分布和 RSD 的译码成功率相较固定度分布上升得更快;RSD 因为缺少小度包导致初始译码成功率低,在译码开销达到 40% 以后, RSD 的译码成功率反超固定度分布。从图 4(b) 可以看出,当 $k=500$ 时固定度分布的初始

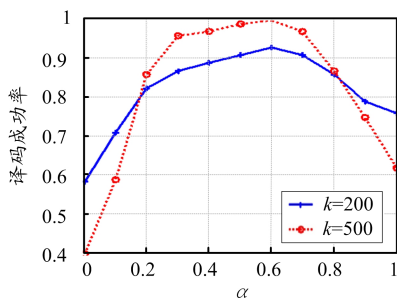
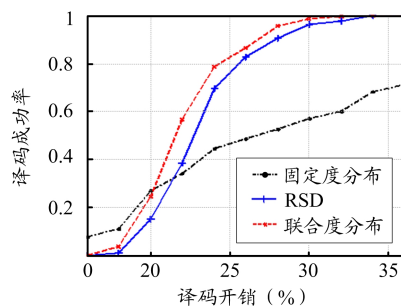


图 3 译码成功率与 α 值的关系

译码成功率高于联合度分布和 RS-D,但是相差不大;当译码开销达到 25% 以后,联合度分布和 RSD 的译码成功率高于固定度分布。从图 4(c) 可以看出,当 $k=1000$ 时,结果和前面 2 种码长的情况一样;当译码开销达



(c) $k=1000$ 时,3 种度分布的译码成功率与译码开销的关系

图 4 3 种度分布的译码开销与译码成功率的关系

到 20% 以后,联合度分布和 RSD 的译码成功率均高于固定度分布。

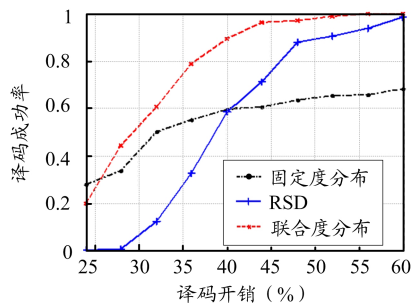
从总体上来看,随着 k 的增加,联合度分布和 RSD 的初始译码成功率在不断靠近固定度分布,也就是说 k 越大,RSD 和本文提出的联合度分布的性能越好。在译码开销 > 75% 区间内,联合度分布的译码成功率远远高于 RSD 和固定度分布,而且始终是高于 RSD 的,因此联合度分布的译码性能更加优良。

4 结束语

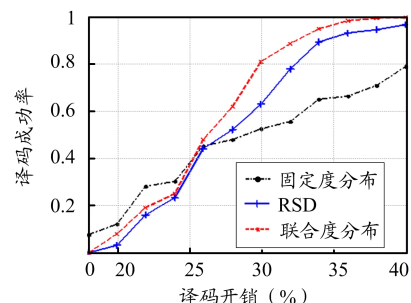
针对自由空间光通信在强湍流环境下大气信道可靠数据传输的问题,本文研究了信道编码中的数字喷泉码技术,聚焦在度分布的设计上提出了一种可靠且高效的联合度分布设计方案。首先,将 RSD 和固定度分布进行优化;然后,将这 2 种优化后的度分布通过一个比例系数进行结合;最后确定出最优的比例系数,从而得到性能最佳的联合度分布。从仿真结果可以看出,在码长 $k=200$ 、 $k=500$ 和 $k=1000$ 的情况下,本文提出的联合度分布的译码性能远远好于固定度分布和 RSD,且随着 k 值的增加,联合度分布的性能越来越好,即使在短码长情况下,也有比 RSD 更好的性能。

参考文献:

- [1] 郝士琦,冷蛟峰. 基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统性能[J]. 中国激光,2012,39(B06):175-180.
- [2] SHOKROLLAHI A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567.
- [3] YEN Kuo-Kuang, LIAO Yen-Chin, CHEN Chih-Lung, et al. Modified Robust Soliton Distribution (MRSD) with Improved Ripple Size for LT Codes[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(5): 976-979.



(a) $k=200$ 时,3 种度分布的译码成功率与译码开销的关系



(b) $k=500$ 时,3 种度分布的译码成功率与译码开销的关系