

混合信道下 LDPC 码稳定条件分析及度序列优化

孙康宁¹, 马林华^{1,2}, 茹乐¹, 范文同³, 胡星¹, 黄绍城¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071; 3. 解放军 94626 部队, 福建 福州 350002)

摘 要: 在高斯噪声和随机删除同时存在的背景下, 提出 LDPC 码度序列的稳定收敛条件, 理论证明了高斯信道下阈值较高的度序列不适用于混合信道, 并仿真验证了该结论。将随机粒子群算法和模拟退火算法相结合, 不同删除概率下寻找了一些高阈值混合信道的度序列, 删除概率为 40% 时, 度序列信噪比阈值最大可提高 1.615 9 dB, 适用于光记录、伴随窄带阻塞干扰的跳频通信等混合信道环境。

关键词: 低密度奇偶校验码; 混合信道; 高斯近似; 随机粒子群优化; 模拟退火

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

Analysis of stability condition for LDPC codes and optimizing degree sequences over mixed channel

SUN Kang-ning¹, MA Lin-hua^{1,2}, RU Le¹, FAN Wen-tong³, HU Xing¹, HUANG Shao-cheng¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. PLA 94626 Troops, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Under the circumstance that white Gaussian noise and random erasures exist all at once, the stability condition for LDPC codes over mixed channel was proposed. And it was proved that a good degree sequence of LDPC codes was not optimized over mixed channel. It can also be proved by simulation. The random particle swarm optimization (RPSO) and simulated annealing (SA) algorithm were combined to find some capacity-approaching degree sequences over mixed channel with different erasure probabilities. The threshold of signal-to-noise ratio improves 1.615 9 dB than that of the classical degree sequences calculated by Gaussian approximation over mixed channel. These degree sequences are optimal for optical recording and frequency-hopping communication with narrow-band interference.

Key words: low density parity check codes, mixed channel, Gaussian approximation, random particle swarm optimization (RPSO), simulated annealing

1 引言

低密度奇偶校验 (LDPC, low density parity check) 码由于其逼近香农限的优异性能^[1~4], 已经成为一种应用范围广泛的信道编码。设计性能优异的 LDPC 码的一个关键因素就是寻找合适的高阈值度序列, 且满足稳定收敛条件^[5]。LDPC 的纠错性能具有门限效应, 即当实际信噪比大于度序列的阈

值 σ 时, 随着码字长度的增大并经过一定次数的迭代后, 错误概率可以小于任意的数 ε 。

当前, 在各类信道上的度序列设计已经取得了丰硕的成果, Richardson 等^[5]对高斯信道、二进制对称信道、二进制删除信道下的 LDPC 码度序列设计进行了研究, 提出了广义的稳定收敛条件, 并给出了一些高斯信道下优秀的度序列。Hou 等^[6]提出了瑞利信道下的度序列稳定收敛条件, 仿真了一些

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2016-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61472442); 综合业务网国家重点实验室 (西安电子科技大学) 开放研究基金资助项目 (No.INS-15-13); 航空科学基金资助项目 (No.20155896025)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61472442), Open Foundation of the State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University (No.INS-15-13), Aviation Science Foundation (No.20155896025)

瑞利信道下优秀的度序列。然而，针对高斯噪声和随机删除同时存在的混合信道的 LDPC 码度序列却一直未被人们所关注，适合不同删除概率的混合信道度序列一直未被提出，这种信道广泛地存在于光记录、伴随窄带阻塞干扰的跳频通信等应用环境中，且在工程实际中一般都是运用高斯信道下性能优异的度序列^[7~10]。

本文首先从理论和仿真实验这 2 个方面证明了高斯信道下性能好的度序列在混合信道下性能不一定好，尤其是在高删除概率时，性能退化较为严重，因此在该环境下设计优化的度序列是很有必要的。其次，结合混合信道下的高斯近似方法^[11,12]，利用随机粒子群与模拟退火相结合的寻优算法^[13,14]，对目标函数进行合理的降维，在不同删除概率的条件下搜索出一些阈值较高的度序列，较高斯信道下阈值较高的度序列应用在混合信道时优势明显，可以较好地适应实际中的光记录及伴随窄带阻塞干扰的跳频通信环境。

2 混合信道特性

在光记录环境中，由于光介质表面划痕的存在，会在进行激光激励写入操作时造成信息无法写入，发生数据删除，加上热表面高斯噪声，严重影响读取时的数据恢复能力^[11]；在带有窄带阻塞干扰的跳频通信中，由于在部分频带的强干扰压制，使在这些频点传输的数据严重失真，在接收端通过信道估计手段可确定受干扰的频点，从而将这些频点传输的信息删除，需要利用从其他频点接收到数据进行纠错恢复。上述 2 种环境的信道均可被称为混合信道，如图 1 所示。

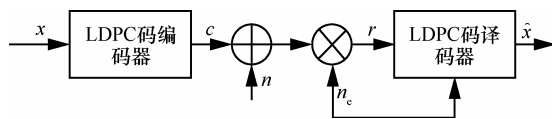


图 1 混合信道简化模型

其中， x 表示二进制源信息 $\{0,1\}$ ； c 表示 LDPC 码编码并经过 BPSK 映射的信息 $\{+1,-1\}$ ； n 表示加性高斯白噪声， $n \sim N(0,\sigma_n^2)$ ； n_c 表示乘性删除噪声， $P(n_c = 0) = e^{(0)}$ ， $P(n_c = 1) = 1 - e^{(0)}$ ， $e^{(0)}$ 为未进行译码迭代时信道初始删除概率； r 为信道输出值； \hat{x} 表示经 LDPC 码译码器译码并进行了 BPSK 解调的 $\{0,1\}$ 信息。信道输出数值 r 的概率密度函数如图 2 所示，其中， $f_r(r|c = \pm 1)$ 表示 $c = \pm 1$ 时译码器前端

接收信号数值的概率密度函数， $\Delta_0(r) = \delta(r)$ 为冲击函数。当 $r = 0$ 时，一种情况是未被删除的，由于高斯噪声造成的信道输出值为 0；另一种情况是该码元被删除的，在译码端被视为 0。

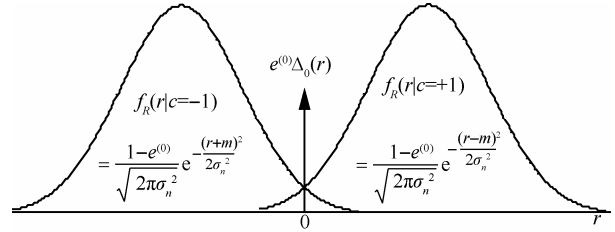


图 2 混合信道输出值概率密度函数

因此，信道输出概率密度函数的 LLR(对数似然比)可以表示为

$$f(v) = \frac{1 - e^{(0)}}{\sqrt{4\pi m_v^{(0)}}} e^{-\frac{(v \pm m_v^{(0)})^2}{4m_v^{(0)}}} + e^{(0)} \Delta_0(v) \quad (1)$$

其中， $v = \ln \left[\frac{P(r|c=+1)}{P(r|c=-1)} \right]$ ； $m_v^{(0)} = E[v|v \neq 0]$ 为未进行迭代时 LLR 信道输出的均值； $Var(v^{(0)}|v \neq 0) = 2m_v^{(0)}$ ； $f(v) = f(-v)e^v$ ，满足对称性条件。

本文在进行高斯近似分析及稳定收敛条件推导时均基于上述信道。

3 混合信道下非规则码的高斯近似

Jeongseok 等^[11]把高斯近似拓展到了混合信道，利用该方法在混合信道下计算度序列阈值，混合信道下高斯近似简述如下。

为了描述非规则码度序列，设

$$\lambda(x) = \sum_{i=2}^{d_v} \lambda_i x^{i-1}, \quad \rho(x) = \sum_{i=2}^{d_c} \rho_i x^{i-1} \quad (2)$$

其中， $\lambda(x)$ 、 $\rho(x)$ 分别为变量节点和校验节点的度分布， λ_i 和 ρ_i 分别代表与度为 i 的变量节点、校验节点相连的边占总边数的比率。

由于概率密度函数满足对称性条件，则第 k 次迭代时，变量消息 $v^{(k)}$ 和校验消息 $u^{(k)}$ 的分布，分别近似服从 $N(m_v^{(k)}, 2m_v^{(k)})$ 和 $N(m_u^{(k)}, 2m_u^{(k)})$ 分布，其中， $m_v^{(k)}$ ($m_u^{(k)}$) 为 k 次迭代时变量 (校验) 节点消息的平均值，并且可得 $m_v^{(0)} = \frac{2}{\sigma^2}$ ， σ^2 为噪声方差， $m_u^{(0)} = 0$ 。

与高斯信道下的高斯近似不同，随机删除的存在导致了混合信道下校验节点消息均值回归方程^[11]变为

$$m_u^{(k)} = \sum_{s=2}^{d_s} \rho_s \phi^{-1} \left(1 - \frac{1}{(1 - e^{(k)})^{s-1}} \left[1 - \sum_{j=2}^{d_v} \lambda_j \left\{ e^{(0)} \sum_{i=0}^{j-1} \chi_i^{(k)} \phi(im_u^{(k-1)}) + (1 - e^{(0)}) \sum_{i=0}^{j-1} \chi_i^{(k)} \phi(im_u^{(k-1)} + m_v^{(0)}) \right\} \right]^{s-1} \right) \quad (3)$$

其中, $\phi(x)$ 为定义的单调递减函数如下

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\sqrt{4\pi x}} \int_R \tanh \frac{u}{2} e^{-\frac{(u-x)^2}{4x}} du, & x > 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$e^{(k)}(\varepsilon^{(k)})$ 表示第 k 次迭代时变量 (校验) 节点消息等于 0 的概率; $d_v(d_c)$ 表示变量 (校验) 节点的度; $\chi_m^{(k)} = C_m^n (\varepsilon^{k-1})^{n-m} (1 - \varepsilon^{k-1})^m$ 。

高斯近似的唯一启动值是由信道参数确定的 $m_v^{(0)} = \frac{2}{\sigma^2}$ 。当 $k \rightarrow \infty$ 时, 使 $m_u^{(k)} \rightarrow \infty$ 成立的下确界 m_0^* 对应的 σ^* 就是该给定码的阈值。

4 混合信道下度序列的稳定收敛条件

Richardson 等^[5]提出了 LDPC 码的广义稳定收敛条件, 具体如下。

对于非规则码而言, 当变量消息的初始概率密度满足对称条件 $P_0(x) = e^x P_0(-x)$ 时, 设 $r = -\ln \left(\int_R P_0(x) e^{-\frac{x}{2}} dx \right)$, 对于任意 s , 若满足 $\int_R e^{sx} dP_0(x) < \infty$, 则有如下性质。

必要性: 如果度序列满足 $\lambda'(0)\rho'(1) > e^r$, 存在一个常数 $\xi = \xi(\lambda, \rho, P_0), \xi > 0$, 当译码迭代次数 $l \rightarrow \infty$, 错误概率 $P_e(P^\ell) > \xi$ 。

充分性: 如果度序列满足 $\lambda'(0)\rho'(1) < e^r$, 存在一个常数 $\xi = \xi(\lambda, \rho, P_0), \xi > 0$, 当译码迭代次数 $l \rightarrow \infty$, 错误概率 $P_e(P^\ell) \rightarrow 0$ 。

也就是说, 如果给定的度序列不满足所在信道的稳定收敛条件, 其误码率会存在一个下限, 影响 LDPC 码的纠错性能。

根据上述理论, 本文给出了混合信道下 LDPC 码度序列稳定性条件, 过程如下。

根据广义稳定收敛条件^[5]得

$$e^{-r} = \int_R f(x) e^{-\frac{x}{2}} dx \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{1 - e^{(0)}}{\sqrt{4\pi m_{u_0}}} e^{-\frac{(x \pm m_{u_0})^2}{4m_{u_0}}} + e^{(0)} \Delta_0(x)$$

$$= (1 - e^{(0)}) \sqrt{\frac{\sigma^2}{8\pi}} e^{-\frac{(x \pm \frac{\sigma^2}{2})^2 \sigma^2}{8}} + e^{(0)} \delta(x) \quad (6)$$

$f(x)$ 为消息输出值概率密度函数, 满足 $f(x) = e^x f(-x)$ 。

$$e^{-r} = (1 - e^{(0)}) \int_R \sqrt{\frac{\sigma^2}{8\pi}} e^{-\frac{(x \pm \frac{\sigma^2}{2})^2 \sigma^2}{8}} e^{-\frac{x}{2}} dx + e^{(0)} \int_R \delta(x) e^{-\frac{x}{2}} dx$$

$$= (1 - e^{(0)}) e^{-\frac{1}{2\sigma^2}} + e^{(0)} \quad (7)$$

混合信道

$$\lambda'(0)\rho'(1) < e^r = \frac{1}{(1 - e^{(0)}) e^{-\frac{1}{2\sigma^2}} + e^{(0)}} = \theta_{\text{mix}} \quad (8)$$

高斯信道下度序列, 稳定性条件为

$$\lambda'(0)\rho'(1) < e^r = e^{\frac{1}{2\sigma^2}} = \theta_{\text{Gauss}}, \lambda'(0)\rho'(1) > 1。$$

$$\theta_{\text{Gauss}} - \theta_{\text{mix}} = e^{\frac{1}{2\sigma^2}} - \frac{1}{(1 - e^{(0)}) e^{-\frac{1}{2\sigma^2}} + e^{(0)}}$$

$$= e^{\frac{1}{2\sigma^2}} \left[1 - \frac{1}{1 - e^{(0)}(1 - e^{\frac{1}{2\sigma^2}})} \right] > 0 \quad (9)$$

由式(9)可以推断出: 高斯信道下性能较好的度序列在混合信道条件下不一定是最优的, 尤其是在高删除概率条件下。

下面通过混合信道密度进化的高斯近似, 给出混合信道下编码效率为 0.5 的 2 个度序列在不同删除概率条件下与香农限距离的变化曲线, 如图 3 所示。

度序列 A 为

$$\begin{cases} \lambda(x) = 0.33175x + 0.2412x^2 + 0.42705x^6 \\ \rho(x) = 0.4529x^5 + 0.5471x^6 \end{cases} \quad (10)$$

度序列 B 为

$$\begin{cases} \lambda(x) = 0.3078x + 0.27287x^2 + 0.41933x^6 \\ \rho(x) = 0.4x^5 + 0.6x^6 \end{cases} \quad (11)$$

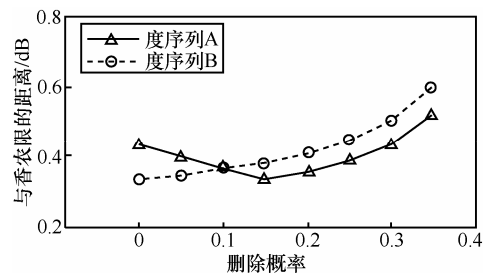


图 3 不同删除概率下与香农限的距离

从图 3 中可以看出，度序列 A 虽然在没有数据删除的高斯信道下性能较度序列 B 差，但是随着删除概率的提高，其性能逐渐超越度序列 B。此变化趋势验证了上述推导的结论。

5 混合随机粒子群优化

李森、孙艺等^[13,14]提出了一种混合随机粒子群算法，能确保解为全局最优解，在高斯信道下寻找到了更接近香农限的度序列，本文将此方法用于寻找混合信道下优化的度序列。其基本思想就是将随机粒子群算法与模拟退火算法结合，对停止进化的粒子以高斯变异的方法产生一个邻域内的变异点，以此进行模拟退火寻找最优解。

随机粒子群算法的主要计算式如下

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 R_1 (p_i' - x_i') + c_2 R_2 (p_g' - x_i') \quad (12)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + V_i^{t+1} \quad (13)$$

其中， V_i^t 表示第 i 个粒子 t 次进化时的速度， ω 表示惯性系数， c_1 和 c_2 表示粒子的加速度， R_1 和 R_2 表示 2 个随机数，范围为 $[0,1]$ ， p_i' 为第 i 个粒子 t 次进化时历经的最好值的位置参数， p_g' 为所有粒子 t 次进化时历经的最好值的位置参数， x_i^t 表示粒子的位置。

实现过程：1) 初始化各参数及粒子的位置，并计算各粒子的适应值 $f(\cdot)$ ，也称为目标函数；2) 对 p_i' 、 p_g' 、 x_i' 进行计算，当 $x_i^t = p_j = p_g$ ，并且其他的粒子也无法找到更优解时，则会出现粒子聚集的现象，丧失搜索能力，此时为改善此现象，记录最好位置 p_g ，并在搜索范围内重新随机生成粒子 j 的新位置 x_j^{t+1} ，其他粒子仍然按照式(12)、式(13)进化；3) 最后，若满足停止条件，则输出解，否则返回过程 2)，继续进行寻优。

为了使随机生成粒子 j 的新位置更加趋近于最优解，本文利用具有局部最佳逃离能力的模拟退火(SA)算法更新位置。

停止进化粒子的模拟退火更新过程如下。

Step1 设置初始退火温度 $T_k (k = 0)$ ，初始解为 $x_0 = x_j'$ 。

Step2 通过高斯变异，在 x_k 的邻域内产生解 $x = x_k(1 + Guass)$ 且 $Guass \sim N(0, \delta)$ 。计算 $\Delta f = f(x) - f(x_k)$ ，如果 $\Delta f < 0$ ，则 $x_k = x$ ，否则 $x_k = x$ 的概率为 $\exp\left(-\frac{\Delta f}{T_k}\right)$ 。

Step3 令 $T_{k+1} = CT_k, k = k + 1$ ，其中，退火系数 $C \in (0,1)$ ，如果满足停止条件，结束循环并输出最优解，否则转至 Step2。

在进行模拟退火更新时需引入一个高斯变异波动方差值 δ 控制新位置的范围，避免新位置的过分偏离，根据度序列约束条件，本文设定 $\delta = 0.1$ 。

文献[15,16]中提出，校验节点的度序列的性能影响不大，且一般只有 2~3 项，本文在优化过程中选取具有 2 个非零项的校验节点度序列，根据已知的码率和寻找到的最优变量节点的度分布即可推算出校验节点度分布，以此降低搜索难度，解空间的围数降至 $n = d_v - 1$ ，简化了粒子群优化的目标函数。本文粒子群优化问题变为寻找 $\min f(\lambda) = -GA(\lambda, \rho)$ ，其中， $f(\lambda)$ 为最小化目标函数， $GA(\lambda, \rho)$ 为利用混合信道下高斯近似得到的给定度序列的阈值。

6 混合信道高阈值度序列

各类仿真实验参数为：模拟退火算法初始温度 $T_0 = 1000$ ，退火系数 0.96，粒子数 30，加速系数 c_1 、 c_2 为 2.5。粒子群优化迭代 150 次，惯性系数为 $0.9 - \frac{0.5t}{t_{\max}}$ ，编码效率为 0.5。

本文搜索到了一些删除概率为 0.1~0.4 的混合信道条件下阈值较高的度序列，与文献[5]中的度序列在混合信道时的阈值进行了对比，并将阈值的提高转化成信噪比阈值之差 ΔSNR 的形式进行表示。 σ 表示本文搜索到的优化的度序列在一定删除概率的混合信道下的阈值， σ' 表示文献[5]中度序列在一定删除概率的混合信道下的阈值。

由表 1~表 4 可知，本文搜索到的度序列在各个删除概率的混合信道下阈值均优于文献[5]中提出的度序列，尤其是在高删除概率时，度序列的信噪比容量最大提升了 1.615 9 dB。此外，可以观察到随着变量节点最大度数的提高，优化度序列性能提升的幅度降低，这是因为最大度数越大，度序列性能越接近香农限，可提高的空间也就越小。但最大度数的提高带来的是校验矩阵平均列重的增大，提高了编译码复杂度，因此在实际应用中应当根据硬件特点合理选择度序列。

表 1 10%删除概率的混合信道下优秀的度序列

变量节点最 大度数	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
6	0.348 772	0.203 68			0.447 548				
7	0.326 726	0.240 377				0.432 897			
8	0.305 478	0.255 63					0.438 892		
9	0.290 06	0.257 019	0.000 621 2					0.452 921	
10	0.263 796	0.284 713							0.451 491
11	0.253 568	0.239 817	0.065 674 8						
12	0.241 166	0.239 673							

变量节点最 大度数	λ_{11}	λ_{12}	ρ_6	ρ_7	ρ_8	σ	σ^*	$\Delta SNR/dB$
6			0.712 684	0.287 316		0.759 3	0.739 5	0.528 5
7			0.495 713	0.504 287		0.765 0	0.762 7	0.060 2
8			0.363 765	0.636 235		0.768 3	0.767 8	0.013 0
9				0.924 087	0.075 913	0.774 2	0.771 3	0.075 1
10				0.718 439	0.281 561	0.777 3	0.773 3	0.103 2
11	0.440 940 2			0.590 058	0.409 942	0.777 8	0.775 2	0.067 0
12		0.441 727 1		0.393 068	0.606 932	0.778 7	0.776 8	0.048 9

表 2 20%删除概率的混合信道下优秀的度序列

变量节点最 大度数	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
6	0.360 024	0.197 862			0.442 114				
7	0.339 428	0.237 5				0.423 072			
8	0.328 037	0.243 873					0.428 09		
9	0.291 013	0.263 852	0.000 621 2					0.444 513 8	
10	0.270 235	0.285 333							0.444 432
11	0.278 456	0.229 394		0.091 927 3					
12	0.251 084	0.285 552							

变量节点最 大度数	λ_{11}	λ_{12}	ρ_6	ρ_7	ρ_8	σ	σ^*	$\Delta SNR/dB$
6			0.712 684	0.287 316		0.759 3	0.739 5	0.528 5
7			0.495 713	0.504 287		0.765 0	0.762 7	0.060 2
8			0.363 765	0.636 235		0.768 3	0.767 8	0.013 0
9				0.924 087	0.075 913	0.774 2	0.771 3	0.075 1
10				0.718 439	0.281 561	0.777 3	0.773 3	0.103 2
11	0.400 222 7			0.590 058	0.409 942	0.777 8	0.775 2	0.067 0
12		0.463 364		0.393 068	0.606 932	0.778 7	0.776 8	0.048 9

表 3 30%删除概率的混合信道下优秀的度序列

变量节点 最大度数	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
6	0.376 12	0.183 439			0.440 441				
7	0.351 341	0.214 155				0.434 504			
8	0.329 475	0.250 915					0.419 61		
9	0.310 765	0.258 623						0.430 612	
10	0.281 642	0.282 192							0.436 166
11	0.285 014	0.255 886		0.013 929 6					
12	0.277 149	0.175 268	0.128 691						

变量节点 最大度数	λ_{11}	λ_{12}	ρ_6	ρ_7	ρ_8	σ	σ^*	$\Delta SNR/dB$
6			0.774 876	0.225 124		0.654 4	0.631 5	0.712 4
7			0.491 677	0.508 323		0.661 1	0.654 8	0.191 5
8			0.317 369	0.682 631		0.666 2	0.660 1	0.184 0
9			0.161 002	0.838 998		0.668 9	0.662 7	0.186 2
10				0.811 591	0.188 409	0.671 7	0.664 3	0.221 6
11	0.445 170 4			0.705 986	0.294 014	0.673 2	0.665 9	0.218 1
12		0.418 892		0.394 167	0.605 833	0.675 7	0.667 2	0.253 2

表 4 40%删除概率的混合信道下优秀的度序列

变量节点 最大度数	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
6	0.405 845	0.163 717			0.430 438				
7	0.377 761	0.197 289				0.424 941			
8	0.350 37	0.227 777					0.421 859		
9	0.324 075	0.253 083						0.422 842	
10	0.301 084	0.252 888							0.446 028
11	0.308 276	0.182 559	0.106 238						
12	0.277 534	0.272 35							

变量节点 最大度数	λ_{11}	λ_{12}	ρ_6	ρ_7	ρ_8	σ	σ^*	$\Delta SNR/dB$
6			0.913 922	0.086 078		0.508 9	0.469 4	1.615 9
7			0.622 401	0.377 599		0.517 9	0.501 8	0.631 6
8			0.380 694	0.619 306		0.524 1	0.509 1	0.580 8
9			0.161 002	0.838 998		0.528	0.510 5	0.674 1
10				0.842 852	0.157 148	0.532 8	0.512 1	0.792 5
11	0.402 927			0.789 044	0.210 956	0.533 1	0.513 7	0.741 4
12		0.450 116		0.568 513	0.431 487	0.534 1	0.514 8	0.736 1

7 结束语

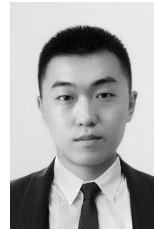
混合信道下 LDPC 码的相关设计问题一直以来未能引起研究人员的足够重视, 本文通过对混合信道下 LDPC 码度序列的研究, 提出了该信道下度序列稳定收敛条件, 并与高斯信道度序列稳定收敛条件进行了对比, 得出了高斯信道下性能较好的度序列在混合信道条件下不一定最优的结论, 并进行了仿真验证。通过混合粒子群算法进行寻优, 寻找到了在一些在不同删除概率的混合信道下阈值较高的度序列。这些度序列适用于光记录环境及伴随有窄带阻塞干扰的跳频通信环境, 能有效提高这些应用的抗噪声性能。

参考文献:

- [1] GALLAGER R G. Low density parity-check codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [2] MACKEY D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45: 399-431.
- [3] HOU Y, LIU R, PENG H, et al. High throughput pipeline decoder for LDPC convolutional codes on GPU[J]. IEEE Communication Letters, 2015, 19(12):2066-2069.
- [4] 赵明, 张晓林. 基于改进 2-D GRS 码的 QC-LDPC 码高效构造[J]. 通信学报, 2015,36(2):1-7.
ZHAO M, ZHANG X L. Novel construction of QC-LDPC codes with modified 2-D GRS codes[J]. Journal on Communications, 2015, 36(2):1-7.
- [5] RICHARDSON T J, SHOKROLLAHI M A, URBANKE R. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2001, 47(2):619-637.
- [6] HOU J L, PAUL H, SIEGEL B. Performance analysis and code optimization of low density-parity check codes on rayleigh fading channels[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communication, 2001, 19(5):126-147.
- [7] YANG K Z, ZHANG B N, WANG H X. The performance analysis of LDPC coded SFH/BPSK anti-jamming system[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing, China, 2015:1-5.
- [8] IMMINK K A S. A survey of codes for optical disk recording[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(16): 2669-2675.
- [9] LEE J. A new DC-free multimode code design with error correction capability for optical storage systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(3):936-948.
- [10] SONG J H, MO L, LEE Y H. Holography optical memory recorded with error correcting bits[J]. Journal of Optics, 2014, 16(6):97-107.

- [11] JEONGSEOK H, STEVEN W. Low-density parity-check codes over Gaussian channels with erasures[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2003, 49(7):1801-1809.
- [12] TAN W J, CRUZ J R. Analyzing low-density parity-check codes on partial response channels with erasures using density evolution[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(5): 3411-3418.
- [13] 李森, 王洁, 马林华. 基于粒子群算法的非规则 LDPC 码度序列设计[J]. 系统工程与电子技术, 2010,32(6):1151-1154.
LI S, WANG J, MA L H. Design of degree sequence for irregular LDPC codes on PSO[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(6): 1151-1154.
- [14] 孙艺, 王晓凯, 郭大波, 等. 基于粒子群的数据协调优化算法[J]. 测量技术学报, 2015, 29(2):149-157.
SUN Y, WANG X K, GUO D B, et al. The optimized algorithm for data reconciliation based on particle swarm optimization[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(2):149-157.
- [15] LAN L, ZENG L Q, TAI Y. Construction of quasi-cyclic LDPC codes for AWGN and binary erasure channels: a finite field approach[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(7):2429-2458.
- [16] PRADHAN A, THANGARAJ A, SUBRAMANIAN A. Construction of near-capacity protograph LDPC code sequences with block-error thresholds[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 11(7): 1417-1428.

作者简介:



孙康宁 (1991-), 男, 山东淄博人, 空军工程大学硕士生, 主要研究方向为信道编码、光磁记录技术、抗干扰通信。

马林华 (1965-), 男, 陕西汉中, 博士, 空军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为抗干扰通信、信道编码、无线自组织网络。

茹乐 (1978-), 男, 陕西西安人, 博士, 空军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为光磁记录技术、抗干扰通信。

范文同 (1983-), 男, 江苏盐城人, 博士, 解放军 94626 部队助理工程师, 主要研究方向为信道编码、协作通信、无线自组织网络。

胡星 (1990-), 男, 河南南阳人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为模拟量编码、卫星通信。

黄绍城 (1990-), 男, 广西贵港人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为无人机自组织网络。