

# 无线传输中 Raptor 译码算法研究

何秀慧<sup>1</sup>,袁琳<sup>2</sup>

(1.浙江师范大学行知学院,浙江金华 321004;

2.天津光电通信技术有限公司,天津 300211)

**摘要:**研究了在加性高斯白噪声(AWGN)信道中采用最小频移键控(MSK)调制的 Raptor 码的译码算法设计问题。基于 Raptor 码和 MSK 调制的特点,提出了一种改进的 Raptor 码置信传播译码算法。仿真结果证明该译码算法具有更好的译码性能。

**关键词:** Raptor 码;因子图;AWGN 信道;置信传播译码

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)18-0049-03

## Research of Raptor decoding algorithm in wireless transmission

He Xiuhui<sup>1</sup>, Yuan Lin<sup>2</sup>

(1.Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2.Tianjin Optical Electrical Communication Technology Co., Ltd., Tianjin 300211, China)

**Abstract:** This paper focuses on the design of the decoding algorithm for Raptor codes with minimum shift keying(MSK) modulation over additive white Gaussian noise (AWGN) channels. Based on the characteristics of Raptor codes and MSK modulation, an improved belief propagation decoding algorithm for Raptor codes is proposed. Simulation results prove that the proposed decoding algorithm has a better decoding performance.

**Key words:** Raptor codes; factor graph; AWGN channels; belief propagation decoding

继 Turbo 码和 LDPC 码之后, 喷泉码成为了近年来纠错码领域新的研究热点<sup>[1]</sup>。喷泉码由于其无比率特性非常适用于时变信道。目前主要的两类喷泉码是 LT 码<sup>[2]</sup>和 Raptor 码<sup>[3]</sup>。Raptor 码是 LT 码的一种扩展, 它由预编码和 LT 码两部分组成。Shokrollahi 等人设计的系统 Raptor 码已被第三代蜂窝网络多媒体广播/多点传送服务标准所采用。Raptor 码最初是为在删除信道中应用而提出的, 现已证明在加性高斯白噪声 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 信道和衰落信道中 Raptor 码同样拥有接近信道容量的性能<sup>[4-6]</sup>。

参考文献[4]和参考文献[5]中对 Raptor 码在 AWGN 信道中采用二进制相移键控 BPSK(Binary Phase Shift Keying)调制的设计问题进行了深入研究, 给出了 Raptor 码在 AWGN 信道中的置信传播 BP(Belief Propagation)软判决译码算法, 其原理为先进行 LT 码译码再进行预编码译码。最小频移键控 MSK(Minimum Shift Keying)由于其属于恒包络调制和良好的频谱特性已被广泛应用。本文研究了采用 MSK 调制的无线系统中 Raptor 码译码算

法的设计问题, 给出了一种类似于 Turbo 码译码的算法。仿真性能表明所提出的 Raptor 码译码算法优于参考文献[4]中的译码算法。

### 1 Raptor 码及其 BP 译码算法

Raptor 码是一种级联码, 其编码过程由预编码过程和 LT 码编码过程组成。预编码通常选用高码率的线性分组码, 本文中采用了 LDPC 码作为预编码。预编码过程将输入的信息比特通过传统的编码转换为中间比特, 中间比特再进行编码比特度分布函数为  $\Omega(x)$  的 LT 码编码, 从而得到 Raptor 码的编码比特。

相比于 LT 码, Raptor 码中由于预编码有一定的纠错能力, 放宽了对编码比特度分布函数  $\Omega(x)$  的设计要求, 从而整体降低了编译码的复杂度。图 1 给出了 Raptor 码的因子图表示。

假定长度为  $k$  的信息字  $S=[s_1, \dots, s_k]$  采用 Raptor 码编码器产生  $n$  个编码比特  $C=[c_1, \dots, c_n]$ , 其中  $c_i \in \{0, 1\}$ 。 $\gamma=n/k$  称为 Raptor 码的译码开销。编码比特序列采用 MSK 调制产生调制符号序列  $X=[x_1, \dots, x_n]$ , 调制符号序

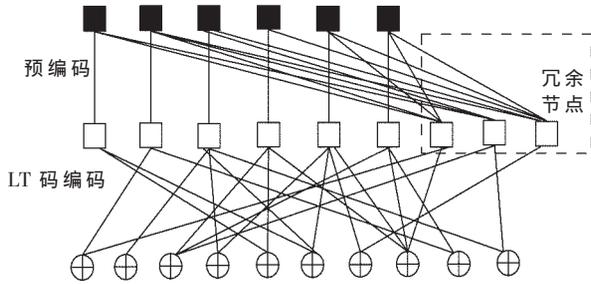


图1 Raptor码因子图表示

列经过无线信道传输,无线信道为均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的AWGN信道。接收信号序列为 $Y=[y_1, \dots, y_n]$ ,其中, $y_i=x_i+v_i, v_i(i=1, \dots, n)$ 为高斯白噪声的样本值。图2给出了本文构建的Raptor码编码的无线系统图示。

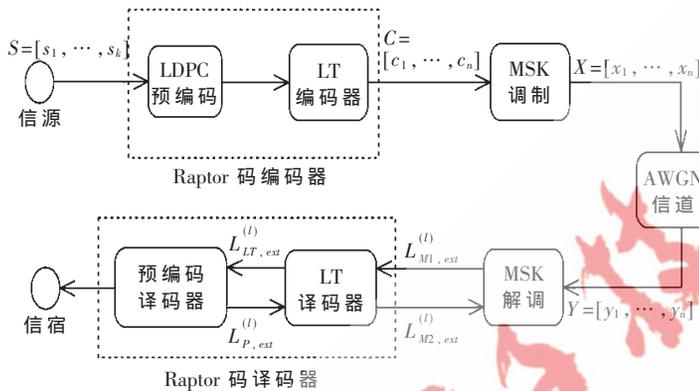


图2 Raptor码编码的无线系统模型

参考文献[4]给出了Raptor码的软判决BP译码算法,其由LT码的BP译码算法和LDPC预编码的BP译码算法两部分构成。在接收端首先MSK解调器采用BCJR译码算法<sup>[7]</sup>获得编码比特的对数似然比LLR(Log-Likelihood) $L(c_i)$ ,接着LT码的BP译码器开始工作,用 $Q_{nm}^l$ 表示第 $l$ 次迭代时从第 $n$ 个中间比特向第 $m$ 个编码比特传递的LLR值消息, $L_{mn}^l$ 表示第 $l$ 次迭代时从第 $m$ 个编码比特向第 $n$ 个中间比特传递的LLR值消息, $\Psi(n)$ 表示中间比特或者编码比特 $n$ 的邻点集合,则LT码BP算法处理步骤如下:

$$L_{mn}^l = 2 \tanh^{-1} \left( \tanh \left( \frac{L(c_m)}{2} \right) \prod_{n' \in \Psi(m) \setminus n} \tanh \left( \frac{Q_{n'm}^{l-1}}{2} \right) \right) \quad (1)$$

$$Q_{nm}^l = \sum_{m' \in \Psi(m) \setminus n} L_{m'n}^l \quad (2)$$

在 $p$ 次迭代译码后,第 $i$ 个中间比特的LLR值消息为:

$$L(I_i) = \sum_{m' \in \Psi(i)} L_{m'i}^p \quad (3)$$

最后运行LDPC预编码的BP译码器,用 $Q_{nm}^l$ 表示LDPC码第 $l$ 次迭代时从第 $n$ 个变量节点向第 $m$ 个校验节点传递的LLR值消息, $L_{mn}^l$ 表示LDPC码第 $l$ 次迭代时从第 $m$ 个校验节点向第 $n$ 个变量节点传递的LLR值消息,

$\Psi(n)$ 表示变量节点或者校验节点 $n$ 的邻点集合,则LDPC码BP算法处理过程如下:

$$Q_{nm}^l = L(I_n) + \sum_{m' \in \Psi(n) \setminus m} L_{m'n}^l \quad (4)$$

$$L_{mn}^l = 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{n' \in \Psi(m) \setminus n} \tanh \left( \frac{Q_{n'm}^{l-1}}{2} \right) \right) \quad (5)$$

在 $q$ 次迭代译码后,第 $i$ 个信息比特( $i=1, \dots, k$ )的LLR值消息为:

$$L(s_i) = L(I_i) + \sum_{m' \in \Psi(i)} L_{m'i}^q \quad (6)$$

## 2 改进的BP译码算法

MSK调制可看成是一种编码调制方案,其由二进制连续相位编码器和一个无记忆映射器构成<sup>[8]</sup>。在Raptor码编码的无线系统中,可以在MSK解调器、LT码译码器以及预编码译码器之间进行LLR值消息交换,从而达到进一步改善译码性能的目的。

具体译码过程描述如下,在第 $l$ 次译码迭代时,首先MSK解调器采用BCJR译码算法获得编码比特的LLR值消息:

$$L^{(l)}(c_k) = \lg \frac{P(c_k=0|Y, L_{M2, ext}^{(l-1)})}{P(c_k=1|Y, L_{M2, ext}^{(l-1)})} \quad (7)$$

其中, $L_{M2, ext}^{(l-1)}$ 表示LT码译码器提供给MSK解调器的外部LLR值消息,初始时, $L_{M2, ext}^{(0)}$ 为0。则MSK解调器提供给LT码译码器的外部LLR值消息为:

$$L_{M1, ext}^{(l)}(c_i) = L^{(l)}(c_i) - L_{M2, ext}^{(l-1)}(c_i) \quad (8)$$

接着运行LT码BP译码处理过程:

$$L_{nm}^l = 2 \tanh^{-1} \left( \tanh \left( \frac{L_{M1, ext}^{(l)}(c_m)}{2} \right) \prod_{n' \in \Psi(m) \setminus n} \tanh \left( \frac{Q_{n'm}^{l-1}}{2} \right) \right) \quad (9)$$

$$Q_{nm}^l = L_{P, ext}^{(l-1)}(I_n) + \sum_{m' \in \Psi(n) \setminus m} L_{m'n}^l \quad (10)$$

其中, $L_{P, ext}^{(l-1)}$ 表示LDPC预编码译码器提供给LT码译码器的外部LLR值消息,初始时, $L_{P, ext}^{(0)}$ 为0。则LT码译码器提供给预编码译码器的外部LLR值消息为:

$$L_{LT, ext}^{(l)}(I_i) = \sum_{m' \in \Psi(i)} L_{m'i}^l \quad (11)$$

LT码译码器提供给MSK解调器的外部LLR值消息为:

$$L_{P, ext}^{(l)}(c_m) = 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{n' \in \Psi(m)} \tanh \left( \frac{Q_{n'm}^l}{2} \right) \right) \quad (12)$$

其次运行LDPC码的BP译码器:

$$Q_{nm}^l = L_{LT, ext}^{(l)}(I_n) + \sum_{m' \in \Psi(n) \setminus m} L_{m'n}^l \quad (13)$$

$$L_{mn}^l = 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{n' \in \Psi(m) \setminus n} \tanh \left( \frac{Q_{n'm}^{l-1}}{2} \right) \right) \quad (14)$$

## 网络与通信 Network and Communication

则 LDPC 码译码器提供给 LT 码译码器的外部 LLR 值消息为:

$$L_{P,ext}^{(l)}(I_i) = \sum_{m' \in \Psi(n)} L_{m',i}^{(l)} \quad (15)$$

在  $q$  次迭代译码后,第  $i$  个信息比特的 LLR 值为:

$$L(s_i) = L_{P,ext}^{(q)}(I_i) + L_{LT,ext}^{(q)}(I_i) \quad (16)$$

### 3 仿真实验

在 Matlab 软件中构造 Raptor 码编码的无线系统仿真模型。AWGN 信道方差取值为 1, Raptor 码采用码率为 0.9 的规则 LDPC 码作为预编码,其变量节点的度数为 3,校验节点的度数为 30。长度为 9 000 的信息字用 PEG 算法构造<sup>[9]</sup>的 LDPC 码进行预编码产生中间比特,LT 码的编码比特节点度分布函数如下所示<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} \Omega(x) = & 0.007969x + 0.49357x^2 + 0.16622x^3 + 0.072646x^4 + \\ & 0.082558x^5 + 0.056058x^8 + 0.037229x^9 + \\ & 0.056058x^{19} + 0.025023x^{65} + 0.003135x^{66} \end{aligned} \quad (17)$$

Raptor 码译码器分别采用了参考文献[4]中 BP 译码算法和本文提出的改进 BP 译码算法。参考文献[4]BP 译码算法中 LT 码译码器和 LDPC 码译码器各执行 80 次迭代译码。改进 BP 译码算法也进行了 80 次迭代译码。图 3 给出了在不同译码开销  $\gamma$  下两种译码算法的误码率,由图可知,本文所提算法能获得更好的译码性能。

本文研究了在 AWGN 信道中传输 Raptor 码的译码器设计问题,针对 MSK 调制和 Raptor 码的特点提出了一种改进的 Raptor 码译码算法。仿真结果证明了算法的优越性,为 Raptor 码在无线通信中的应用提供了新的依据。

#### 参考文献

- [1] 穆建君,焦晓,曹训志.数字喷泉码及其应用的研究与展望[J].电子学报,2009,37(7):1571-1577.
- [2] LUBY M.LT codes[C].Proc 43ed Ann IEEE Symp on Foundations of Computer Science, Vancouver, BC, Canada, 2002: 271-282.
- [3] SHOKROLLAHI A.Raptor codes[J].IEEE Trans Inform

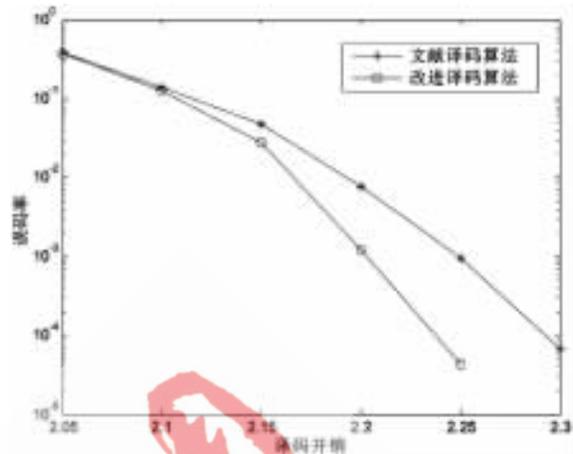


图 3 两种译码算法的误码率仿真曲线

Theory, 2006, 52(6): 2551-2567.

- [4] ETESAMI O, SHOKROLLAHI A.Raptor codes on binary memoryless symmetric channels[J].IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(5): 2033-2051.
- [5] CHENG Z, CASTURA J, MAO Y.On the design of raptor codes for binary-input Gaussian channels[J].IEEE Trans Commun, 2009,57(11): 3269-3277.
- [6] 袁磊,安建平,李祥明.喷泉码在无线中继网络中的应用[J].信息通信技术,2009,12(6): 61-65.
- [7] BAHL L, COCKE J, JELINEK F, et al.Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate[J].IEEE Trans Inform Theory, 1974, 20(2): 284-287.
- [8] RIMOLDI B.A decomposition approach to CPM[J].IEEE Trans Inform Theory, 1988, 34(2): 260-270.
- [9] HU X, ELEFThERIOU E, ARNOLD D.Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs[J].IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51(1): 386-398.

(收稿日期:2011-04-24)

#### 作者简介:

何秀慧,1979年生,讲师,硕士,主要研究方向:信号检测及信道编码。