

多用户接入与 SLT 编码的二维喷泉系统及性能分析

徐大专^{1,2} 邓昭^{1,2}

(1. 南京航空航天大学江苏省物联网和控制技术重点实验室, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要: 在物联网时代, 多用户接入系统的设计将迎来巨大的挑战。本文在现有系统基础上提出了一种多用户接入与 SLT 编码结合的二维喷泉系统。在时间层上对各用户原始信息进行 SLT 编码, 在用户层上各用户通过接入概率竞争传输, 从而构成一种二维喷泉形式, 该系统充分利用喷泉编码能有效提高信号抗干扰能力。对于采用 SLT 编码的每个用户, 可以简单地使用置信传播译码算法进行译码。仿真结果表明, 与已有多用户接入系统相比, 本文提出的系统明显能实现更好的吞吐性能, 且解决了已有系统译码算法在较高接入概率下性能急剧下降的问题, 从而能给更多的用户进行信息传输的机会, 在多用户数据传输中有很好的实用性。

关键词: 数字喷泉码; SLT 码; 多用户接入; 吞吐效率; 接入概率

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Two-Dimensional Multiuser Access and SLT Coding Fountain System and Its Performance

Xu Dazhuan^{1,2}, Deng Zhao^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Internet of Things and Control Technologies, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In internet of things, the design of multiuser access system will meet great challenges. In this paper, a two-dimensional fountain system of multiuser access and SLT coding is presented based on the existing system. First of all, each user's original information is encoded by SLT codes on the time layer, and then each user competes for transmission according to the access probability on the user layer to form a two-dimensional fountain. The system makes full use of fountain codes to effectively improve the signal anti-interference ability. Secondly, for each user using SLT codes, we can simply employ the belief propagation decoding algorithm to decode. Simulation results show that compared with the existing multiuser access system, the proposed system can significantly achieve better throughput performance and solve the problem that the performance of the existing system decoding algorithm has a sharp decline in the higher access probability, so then can provide more users with the opportunity of information transmission which has good practicability in multiuser data transmission.

Key words: digital fountain codes; SLT codes; multiuser access; throughput performance; access probability

引 言

多址接入技术允许多个用户共享公共无线资源,以满足各自的传输需求。由于其实施的简单性和分布性,随机多址接入技术已经被几乎所有的通信网络所使用^[1]。传统的 ALOHA 协议^[2]实现起来简单灵活,但是,在多用户同时传输时,ALOHA 协议不能很好地利用用户间的碰撞信息,在系统吞吐性能方面遇到了很大的限制。此外,扩频等先进技术也被用于随机多址方案的设计中,如码分多址(Code division multiple access, CDMA)^[3]、交织多址(Interleave division multiple access, IDMA)^[4]等,但是所有这些多址方案采用的都是固定码率编码或者有限长的码序列,为了保证传输的可靠性,集中协调和有效重传必不可少。在实际应用中,这必然造成大量的资源浪费。

喷泉码^[5]也称无码率码,是一类最初为二元删除信道(Binary erasure channel, BEC)而提出的纠删码。喷泉码可以根据需要产生任意数量的码字,直至成功恢复原始数据信息。LT(Luby transform)码^[6]是第一类实用的喷泉码,它的编译码方法简单,但译码复杂度非线性且有较差的错误平底现象。较之 LT 码,Raptor 码^[7]有线性的编译码复杂度。系统码相对非系统码而言,在实际应用中更受欢迎,因为系统码可以更有效地恢复原始数据信息。然而 LT 码^[6]和 Raptor 码^[7]最初设计都是非系统码。因此,LT 码的系统形式,即系统 LT 码(SLT 码)^[8]继而被提出。

喷泉码的码率自适应性受到了广泛的关注,它的无码率特性也被应用于多址系统的设计中,如文献[9-11]。文献[9,10]提出的无码率多址系统能充分利用无码率码的码率自适应性,并且传输过程中不需要知道信道状态信息和各种反馈信息,在删除信道和无线信道下的多用户检测方面都有很出色的性能。但是,为了从接收端把所有用户信息译出,译码需要使用复杂的多层迭代译码,即在每一次译码迭代中,每一个用户的似然比信息都需要从其他用户的似然比信息更新得到,这在多用户通信系统中会带来极大的计算复杂度和传输时延。文献[11]提出了一种新的多址接入系统——无编码的随机多址接入(Non-coded rateless multiple access, NC-RMA)系统,它能充分利用多用户同时接入时产生的碰撞信息且用户信息是以分散的形式进行传输。相应地,文献[11]提出了一种多用户迭代检测译码算法用于译码,这使得每个用户可以独立进行译码,在多址接入系统中可以明显降低译码复杂度。但是原始信息不进行任何编码而直接传入信道,这将增加信息传输误码情况,尤其在较差的信道条件下,这将极大地降低系统的吞吐性能。此外,该系统提出的多用户迭代检测译码算法存在局限性,即在较高的接入概率下译码性能会急剧下降。这导致必须找到临界接入概率才能使系统吞吐性能最佳,且在不同活跃用户数下,临界接入概率并不确定。基于此,本文提出了一种多用户接入和 SLT 编码结合的二维喷泉系统,简称为二维喷泉系统,能有效地解决上述问题。多用户接入和 SLT 编码的二维喷泉系统,有以下几点优势。

(1)在时间层上将各用户原始信息进行 SLT 编码,在每一接入时隙以相同长度帧的形式发送至信道。利用喷泉码的无码率和信道自适应性,接收端不需要知道信道状态信息,即使在较差的信道条件下,也能有效地利用喷泉编码的抗干扰能力,对信道中多用户信息传输差错进行纠检错,实现更好的吞吐性能。

(2)在用户层上通过接入概率,用户公平竞争接入信道,等效于一种喷泉编码形式。当有用户译出时,下一时隙该用户或新的用户继续与其他用户竞争接入,发送新一帧待传输信息,保证信道中总的活跃用户数不变,这一设计更符合实际用户需求。

(3)对于(1),(2)构成的二维喷泉系统,接收端可以简单地使用置信传播(Belief propagation, BP)译码算法^[12]对各用户进行译码。BP 译码算法实现简单、译码复杂度低,且能有效解决 NC-RMA 系统中多用户迭代检测译码算法在较高接入概率下译码性能急剧下降的问题,在多用户通信中有很好的

实用性。

1 系统模型

本文提出了一种二维喷泉系统,并对其性能进行了一些仿真分析,该系统是在 NC-RMA 系统^[11]基础上做的一些改进设计。NC-RMA 系统模型如图 1 所示。

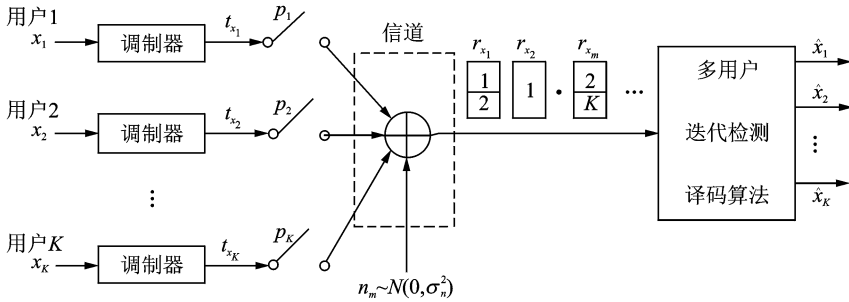


图 1 NC-RMA 系统模型
Fig. 1 NC-RMA system model

考虑有 K 个潜在活跃用户,每个用户 $k(k=1,2,\dots,K)$ 的原始信息帧 x_k 由 W 个比特组成,经调制后得到调制数据帧 t_{x_k} 继而通过接入概率 p_k 竞争接入信道,用户 k 重复上述操作直至接收端收到足够数量的接收数据帧 r_{x_k} 以成功恢复原始信息帧 x_k ,其中 r_{x_k} 可能是不同用户同时接入时的碰撞信息帧,如图 1 标有不同数字的方块所示。从编码的角度来看,不同用户数据帧的碰撞信息可以视为这些数据帧在欧式域的线性叠加编码。因此,NC-RMA 系统的传输过程可以视为基于图 2 的二分图^[11]的线性叠加编码过程。基于此,该系统设计了一种多用户迭代检测译码算法^[11]用于译码。

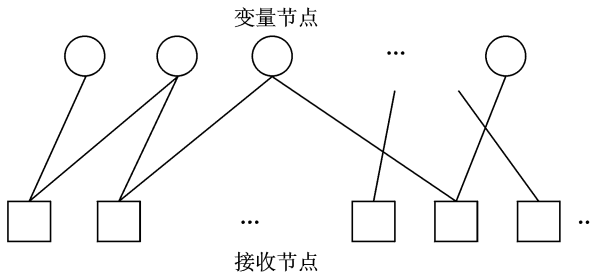


图 2 NC-RMA 系统的等效编码图
Fig. 2 Equivalent coding graph of NC-RMA system

从图 1,2 可以看出,用户原始信息未经任何编码而直接发送至信道,且用户在每个接入时隙发送的都是同一数据帧,这种设计无法实现对信道中多用户信息传输差错进行纠错,影响系统整体吞吐性能,尤其在信道条件较差的情况下。此外,该系统的译码算法也存在缺陷,多用户迭代检测译码算法是基于有着稀疏二分图的原始信息码字,但是在实际固定活跃用户数的 NC-RMA 系统中,原始信息帧的长度并不足够长。在这种情况下,一个较大的接入概率会导致节点度数很大的非稀疏二分图。此时,迭代检测算法的译码性能会急剧下降,导致存在一个临界的接入概率使系统吞吐性能最优。而对于不同的活跃用户数,临界接入概率也不同。为了实现较好的系统吞吐性能,首先得解决临界接入概率的问题。综上所述,NC-RMA 系统在实际多址接入系统中并不适用。

为了解决上述问题,在 NC-RMA 系统的基础上,本文提出了一种二维喷泉系统,系统模型如图 3 所示。首先,在每个时隙 $m(m=1,2,\dots,M)$ 对原始信息帧 x_k 进行 SLT 编码得到编码数据帧 $c_{k,m} = \mathbf{x}_k \cdot \mathbf{G}_{k,m}$,再经过调制得到调制数据帧 $t_{x_{k,m}}$,最后通过接入概率 p_k 竞争接入信道,其中 M 为总的传输时隙数, $\mathbf{G}_{k,m}$ 为用户 k 在第 m 个时隙的编码生成矩阵。相较于传统的固定码率码,喷泉码的无码率特性能够很好地适应信道的变化,无论信道条件如何,都能有效地对信道中信息传输差错进行纠错。简单地考虑,本文让每个用户使用同一喷泉编码且在每个接入时隙发送数据帧长度相同。需要注意的是,用户在每个接入时隙经过喷泉编码后发送至信道的都是相同长度的不同数据帧。对于使用 SLT 编码的每个用户,在接收端可以简单地使用置信传播译码算法进行译码。BP 译码算法实现简单且能有效解决 NC-RMA 系统中迭代检测译码算法存在的问题。

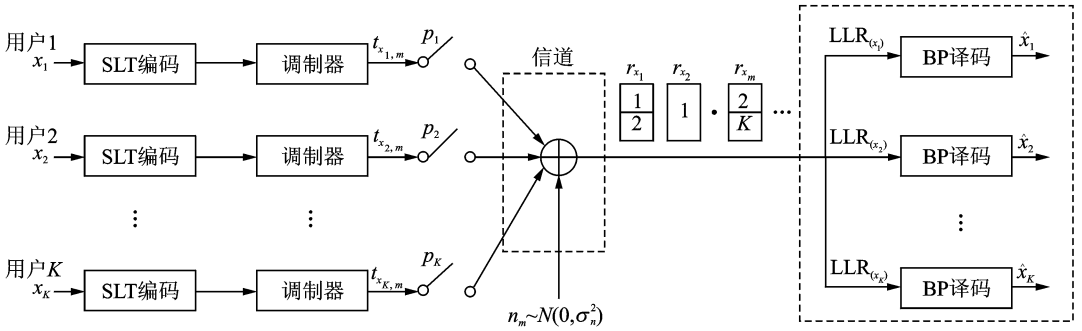


图 3 二维喷泉系统模型

Fig. 3 Two-dimensional fountain system model

2 二维喷泉系统译码算法

把第 m 个时隙 K 个用户的发送信息定义为 $\mathbf{T}_{X_m} = [t_{x_{1,m}}, t_{x_{2,m}}, \dots, t_{x_{K,m}}]^T$,其中 $t_{x_{k,m}}$ 为第 m 个时隙第 k 个用户的发送数据帧,把接收端接收到的信息定义为 $\mathbf{R}_X = [r_{x_1}, r_{x_2}, \dots, r_{x_M}]^T$,其中 r_{x_m} 为第 m 个时隙接收到的数据帧, M 是潜在增长的数目。用 $\mathbf{N} = [n_1, n_2, \dots, n_M]^T$ 表示均值为 0、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声,用矩阵 $\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_M]_{K \times M}$ 表示 K 用户二维喷泉系统的传输系数,其中 $\mathbf{G}_m = [g_{1,m}, g_{2,m}, \dots, g_{K,m}]^T$,如果在第 m 个时隙,用户 k 成功接入信道,则 $g_{k,m} = 1$,否则 $g_{k,m} = 0$ 。假设在准静态信道下,用矩阵 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_M]_{K \times M}$ 表示相应的信道增益,其中 $\mathbf{H}_m = [h_{1,m}, h_{2,m}, \dots, h_{K,m}]^T$,这样可以得到一个新的矩阵 $\mathbf{H}' = [\mathbf{H}'_1, \mathbf{H}'_2, \dots, \mathbf{H}'_M]_{K \times M}$,其中 $\mathbf{H}'_m = [g_{1,m} \cdot h_{1,m}, g_{2,m} \cdot h_{2,m}, \dots, g_{K,m} \cdot h_{K,m}]^T$ 。那么,第 m 个时隙的接收信息帧可以表示为

$$r_{x_m} = (\mathbf{H}'_m)^T \cdot \mathbf{T}_{X_m} + n_m \tag{1}$$

把与接收节点 m 相连的所有变量节点定义为 $V_m = \{v_i | g_{i,m} = 1, i = 1, 2, \dots, K\}$,把与变量节点 k 相连的所有接收节点定义为 $R_k = \{r_j | g_{k,j} = 1, j = 1, 2, \dots, M\}$ 。基于式(1),可以把第 m 个时隙的接收信息帧进一步改为

$$r_{x_m} = \sum_{i: v_i \in V_m} h_{i,m} t_{x_{i,m}} + n_m \tag{2}$$

根据中心极限定理,对于用户 k ,本文把其他用户的发送信息和信道噪声全部视为干扰处理。因此,式(2)可以进一步改写为

$$r_{x_m} = h_{k,m} t_{x_{k,m}} + \left(\sum_{\substack{i: v_i \in V_m \\ i \neq k}} h_{i,m} t_{x_{i,m}} + n_m \right) = h_{k,m} t_{x_{k,m}} + \zeta_m \tag{3}$$

此时, ζ_m 可以近似为均值为 $E(\zeta_m)$ 、方差为 $\text{Var}(\zeta_m)$ 的高斯随机变量。对于不同的调制方式,有相

应的方法来计算 $E(\zeta_m)$ 和 $\text{Var}(\zeta_m)$ 。本文采用 BPSK 调制来进行系统性能分析,同样地,也可以很容易地推广到 QPSK, 16QAM 调制等。因此,第 m 个时隙,用户 k 的初始对数似然比可以推导为^[11]

$$\text{LLR}_{k,m} = 2h_{k,m} \cdot \frac{r_{x_m} - E(\zeta_m)}{\text{Var}(\zeta_m)} \quad (4)$$

其中, $E(\zeta_m) = 0, \text{Var}(\zeta_m) = \sum_{\substack{i: v_i \in V_m \\ i \neq k}} h_{i,m}^2 + \sigma_n^2$ 。

综上,使用 BP 算法的二维喷泉系统译码过程如下:

(1) 在第 m 个时隙,根据式(4)分别计算出在该时隙所有接入用户的初始似然比信息 $\text{LLR}_{k,m}(v_i \in V_m)$ 。

(2) 用户 $k(v_k \in V_m)$ 根据从开始传输时隙到当前时隙的所有初始似然比信息 $\text{LLR}_{k,m}(r_m \in \mathbf{R}_k)$ 及相应喷泉编码生成矩阵 $\mathbf{G}_{k,m}(r_m \in \mathbf{R}_k)$ 进行 BP 译码。

(3) 如果在第 m 个时隙用户 k 译出,则该用户的所有初始似然比信息及相应校验矩阵清空,下一时隙仍与其他用户竞争发送新一帧待传输数据;如果没有译出,则 $m = m + 1$ 重复步骤(1)和(2)。

3 仿真结果

本文的仿真都是基于 K 个用户相互独立地发送数据帧到一个目标的无线系统。本文把吞吐效率 η 作为系统的性能指标,并定义吞吐效率 η 为在固定时间内被成功恢复的信息符号平均数与该时间内总接收调制符号平均数的比值。如未做提及,本文 SLT 码使用的度分布函数为^[13]

$$\Omega(x) = 0.006x + 0.492x^2 + 0.0339x^3 + 0.2403x^4 + 0.006x^5 + 0.095x^8 + 0.049x^{14} + 0.018x^{30} + 0.0356x^{33} + 0.033x^{200} \quad (5)$$

假设每个用户的原始信息帧长度为 W ,用户每一时隙传输的编码数据帧开销为 ϵ ,采用 BPSK 调制后发送至信道,并假设总的传输时隙数为 M ,且在 M 个时隙里成功恢复的原信息帧数为 L ,那么此时系统的吞吐效率可定义为

$$\eta = E\left(\frac{L \cdot W}{M \cdot W \epsilon}\right) \quad (6)$$

其中 $E(x)$ 表示对 x 取均值。在下面的仿真中,本文先不考虑信道增益情况。

3.1 系统性能仿真比较

在下面的仿真中,本文把提出的二维喷泉系统与已有的 NC-RMA 系统进行比较,研究在不同活跃用户数和不同信噪比下接入概率对吞吐效率的影响。如未作提及,本文的仿真参数都设置为原始信息帧长度 $W = 500$,最大译码迭代次数 $L_{\max} = 10$,每一时隙传输的编码数据帧开销 $\epsilon = 1.2$,总的传输时隙数 $M = 500$ 。图 4 和图 5 分别描述在活跃用户数 $K = 4$ 和 $K = 8$ 时,吞吐效率和接入概率的关系,其中信噪比分别为 $\text{SNR} = 0, 5, 8$ dB。

从图 4 可以看出,和已有 NC-RMA 系统相比,本文提出的二维喷泉系统明显实现了更好的吞吐性能,尤其在较差的信道条件下。因为在多址系统中,随着接入用户数的增多,NC-RMA 系统中原始信息不经过任何编码而直接传入信道必然会造成较大的误码情况。而本文提出的二维喷泉系统使用喷泉编码提高信号抗干扰性,可对信道中多用户信息传输差错进行纠检错,整体上提高了系统的吞吐性能。另外,NC-RMA 系统只有在高信噪比且较低接入概率下(大致在 $p < 0.4$)才能实现较好的吞吐性能,而本文的系统因在较低接入概率下所能实现的校验能力没有得到充分的利用,此时性能稍微不如 NC-RMA 系统,但随着接入概率的增加,系统性能在一个很大的接入概率范围内(大致在 $p > 0.6$)都能达到比较好的吞吐效率。

此外,提出的二维喷泉系统在接收端可以简单地使用 BP 译码算法进行译码,有效解决了 NC-

RMA 系统中迭代检测译码算法在较高接入概率下译码性能急剧变差的问题,本文的系统基本上能实现随着接入概率的增加系统性能逐渐变好直至饱和的情况。从图 4,5 中也可以看出,无论在怎样的活跃用户数和信噪比下,NC-RMA 系统能实现较好吞吐性能的平均接入用户数在 1~2 左右,而本文的系统基本能实现所有活跃用户同时接入时仍有很好的性能,充分利用了喷泉码的纠错性能。很显然,在保证性能良好的情况下,本文提出的二维喷泉系统能给更多的用户进行信息传输的机会。

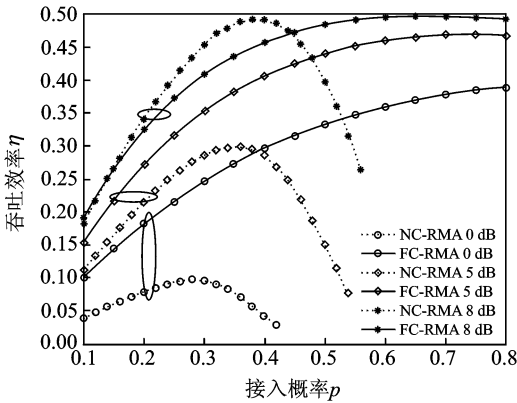


图 4 $K=4$ 时 NC-RMA 系统和本文提出的二维喷泉系统吞吐性能比较

Fig. 4 Throughput performance comparison between NC-RMA system and proposed two-dimensional fountain system for $K=4$

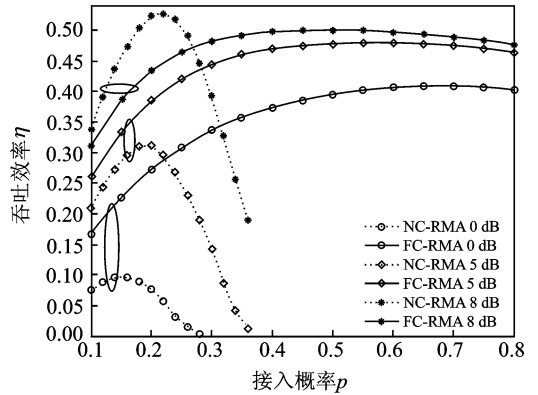


图 5 $K=8$ 时 NC-RMA 系统和本文提出的二维喷泉系统吞吐性能比较

Fig. 5 Throughput performance comparison between NC-RMA system and proposed two-dimensional system for $K=8$

另外,从图 4,5 中也可以发现 NC-RMA 系统对信道条件特别敏感,稍微改变信噪比系统性能就会有很大的变化,尤其在较低的信噪比(如 $\text{SNR}=0$ dB)下,系统吞吐性能相对较差;而本文提出的二维喷泉系统在较低信噪比下仍有较好的吞吐性能,且随着信噪比的增加,系统吞吐性能整体提高但相对稳定些。而在实际通信中信道状态是不稳定的,相比之下本文提出的系统在实际多用户通信中有更好的适用性。

3.2 二维喷泉系统参数分析

从系统的编译码过程来看,影响系统吞吐性能的主要参数包括:活跃用户数 K ,喷泉编码度分布 $\Omega(x)$,信噪比 SNR 等。3.1 节已经描述了系统吞吐性能与信噪比的关系,接下来将主要研究活跃用户数和编码度分布对系统性能的影响。

图 6 描述了在不同活跃用户数下吞吐效率和接入概率的关系,其中信噪比 $\text{SNR}=5$ dB。从图 6 中可以看出在较低接入概率(大致在 $p < 0.5$)下随着活跃用户数的增多,系统吞吐性能逐渐变好,而在较高接入概率(大致在 $p \geq 0.6$)下对于不同活跃用户数($K \geq 4$),系统所能实现的最优吞吐性能逐渐趋于一致,并且在超出系统校验能力范围的大接入概率(大致在 $p \geq 0.85$)下吞吐性能稍微有所下降。此外,在系统校验能力范围内,对于较小的活跃用户数($K < 4$),所有用户可以同时接入达到最高吞吐性能。整体来看,在任意活跃用户数下,本文提出的系统基本实现了随着接入概率增加而吞吐性能逐渐变好的情况,有效解决了 NC-RMA 系统中在较高接入概率下吞吐性能急剧下降的问题。

另外,本文比较了在不同编码度分布下吞吐效率和接入概率的关系,其中信噪比 $\text{SNR}=5\text{ dB}$ 。为了方便起见,把文献[13]中的度分布表示为 $\Omega_{R1}(x)$,平均度数为 11.843 7;把文献[7]中的度分布表示为 $\Omega_{R2}(x)$,平均度数为 5.87;把文献[14]中的度分布表示为 $\Omega_{P2}(x)$,平均度数为 12.505 6,仿真结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出用户编码度分布的选择对系统吞吐性能的影响很大,而且输出度分布平均度数对系统吞吐性能的影响不成规律。可见,如何设计一个好的度分布使系统吞吐性能最优是至关重要的。

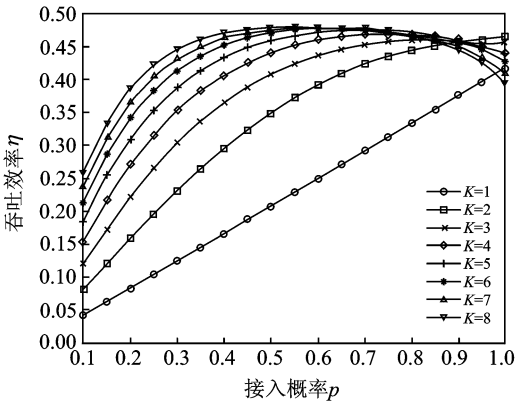


图 6 不同活跃用户数下吞吐效率与接入概率的关系 ($\text{SNR}=5\text{ dB}$)

Fig. 6 Relationship between throughput and access probability under different active users ($\text{SNR}=5\text{ dB}$)

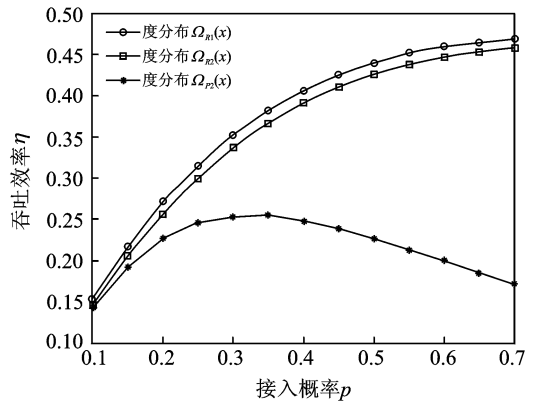


图 7 不同度分布下吞吐效率与接入概率的关系 ($k=4$)

Fig. 7 Relationship between throughput and access probability under different degree distributions ($k=4$)

4 结束语

在物联网高速发展的时代,多用户接入系统的设计受到了越来越多的关注。从最初的 ALOHA 协议,到 CDMA, IDMA 的固定码率随机多址接入系统,再到无码率随机多址接入系统,这其中经历了不断的改进。但现有的无码率随机多址接入系统仍存在着一些不足,在 NC-RMA 系统中,用户原始信息不经过任何编码而直接传入信道,在多用户信息传输中不能很好地对传输差错进行纠错,尤其在信道条件较差的情况下,严重影响了系统整体吞吐性能。基于 NC-RMA 系统,本文提出了一种多用户接入和 SLT 编码的二维喷泉系统,在时间层上对各用户原始信息进行 SLT 编码,在用户层上让各用户通过接入概率竞争传输,从而构成一种二维喷泉形式。对于采用 SLT 编码的每个用户,在接收端可以简单地使用 BP 译码方法进行译码。本文提出的二维喷泉系统充分利用了喷泉码的信道自适应性和纠错能力,即使在接入概率较高的情况下,也能实现很好的吞吐性能,在实际通信中可以给更多的用户进行信息传输的机会,并且译码采用 BP 算法,实现简单、复杂度低,能有效解决 NC-RMA 系统中多用户迭代检测译码算法在较高接入概率下译码性能急剧下降的问题。如何进一步优化改进系统以实现最优的吞吐效率将是今后研究的重要课题,作者将从以下几个方面进行考虑:(1) 用户所采用的 SLT 编码度分布的优化设计;(2) 对时间层 SLT 编码和用户层随机接入构成的二维喷泉设计更有效的联合译码方案。

参考文献:

[1] Fan Pingzhi. Multiple access technologies for next generation mobile communications[C]// Proceedings of the 6th Interna-

tional Conference on ITS Telecommunications. Chengdu, China: IEEE, 2006:10-11.

- [2] Abramson N. The ALOHA System: Another alternative for computer communications[C]// Fall Joint Computer Conference. Houston: IEEE, 1970:281-285.
- [3] Reed M C, Schlegel C B, Alexander P D, et al. Iterative multiuser detection for CDMA with FEC: Near-single-user performance[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46:1693-1699.
- [4] Li Ping, Liu Lihai, Leung W K. A simple approach to near-optimal multiuser detection: Interleave-division multiple-access [C]// Wireless Communications and Networking. New Orleans, USA: IEEE, 2003:391-396.
- [5] Mackay D J C. Fountain codes[J]. IEE Proceeding Communications, 2005, 152(6):1062-1068.
- [6] Luby M. LT codes [C]// Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2002:271-280.
- [7] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6):2551-2567.
- [8] Nguyen T D, Yang L L, Hanzo L. Systematic Luby transform codes and their soft decoding[C]// IEEE Workshop on Signal Processing Systems. Shanghai, China: IEEE, 2007:67-72.
- [9] Wu Kedi, Zhang Zhaoyang, Chen Shaolei. Rateless multiple access over erasure channel[C]// Proceedings of the 71st Vehicular Technology Conference. Taipei, China: IEEE, 2010:1-6.
- [10] Wu Kedi, Zhang Zhaoyang, Chen Shaolei. Rateless multiple access over noisy channel[C]// Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Caen, France: ACM, 2010:271-275.
- [11] Zhang Zhaoyang, Chen Shaolei, Wu Kedi. Non-coded rateless multiple access[C]// Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Huangshan, China: IEEE, 2013:1-6.
- [12] Jenka C H, Mayer T, Stockhammer T, et al. Soft decoding of LT codes for wireless broadcast[C]// Proceedings of IST Mobile Summit. Dresden, Germany: IEEE, 2005:1-5.
- [13] Etesami O, Shokrollahi A. Raptor codes on binary memoryless symmetric channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(5): 2033-2051.
- [14] Xu Shengkai, Xu Dazhuan. Optimization design and asymptotic analysis of systematic Luby Transform codes over BIAWGN channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(8):3160-3168.

作者简介:



徐大专(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:通信理论与信号处理, E-mail: xudazhuan@nuaa.edu.cn.



邓昭(1994-),女,硕士研究生,研究方向:数字喷泉码、无线通信, E-mail: dz@nuaa.edu.cn.

(编辑:陈珺)