

采用数字喷泉码的无线协作中继方案及其性能分析

雷维嘉¹, 谢显中², 李广军¹

(1. 电子科技大学通信与信息工程学院, 四川成都 610054; 2. 重庆邮电大学个人通信研究所, 重庆 400065)

摘 要: 协作中继传输是无中心节点的无线网络中的重要传输方式. 在中继传输中应用数字喷泉码, 能降低反馈信息的传输量, 并在多个中继节点的情况下明显提高前向传输效率. 提出了能量累积方式和信息累积方式两种喷泉码中继传输方案, 并对源节点至中继节点、中继节点至目的节点的传输性能进行了理论分析和仿真. 能量累积方式在降低节点传输功耗上更为有效, 而信息累积方式则能明显降低传输时间, 并能适应中继节点数量和转发能力的变化, 充分利用其转发能力. 理论分析和仿真的结果表明, 喷泉码中继传输的性能明显优于普通中继传输的性能.

关键词: 协作中继; 中继传输; 数字喷泉码; 能量累积; 信息累积

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0228-06

The Scheme and Performance of Wireless Cooperative Relay System Using Digital Fountain Codes

LEI Wei-jia¹, XIE Xian-zhong², LI Guang-jun¹

(1. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China; 2. Institute of Personal Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Cooperative relay transmission is an important transmission scheme in the decentralized wireless network. The use of digital fountain codes in cooperative relay transmission can decrease the amount of feedback information, and greatly improve the efficiency of forward transmission in the case there are multi relay nodes. Two relay transmission techniques using fountain codes—energy accumulation and information accumulation, are proposed, and the transmission performance is analyzed. The energy accumulation scheme is more effective to decline the power consumption; while the information accumulation scheme can obviously shorten transmission time. At the same time, the latter adapts well to the changes of the number and transmission capabilities of relay nodes so that it can make full use of their transmission capabilities. The results of theory analyzing and simulation show that the performance of fountain relay transmission is much better than that of normal relay transmission.

Key words: cooperative relay; relay transmission; digital fountain codes; energy accumulation; information accumulation

1 引言

协作通信是近年来无线通信领域学术界关注的热点问题之一, 其思想是通过在无线通信网络的终端间进行协作, 在系统功耗、误码特性、中断概率、覆盖范围等方面改善系统性能^[1]. 在 Ad hoc 等无中心节点的网络中, 节点间数据的传输是通过节点间的相互协作、采用中继的方式实现的^[2]. 另外在蜂窝移动通信等有中心节点的网络中, 也可以采用协作中继的方式提高系统的覆盖范围.

在通过擦除信道进行传输的数据通信系统中, 如果传输中出现数据丢失, 或出现无法恢复的错误, 接收端需要给发端发送反馈信号, 请求重发. 采用混合纠错方式来保证可靠传输的信道也可认为是擦除信道. 当信道

的擦除概率较高时, 传输中反馈数据量很大. 另一方面, 在广播或者多播传输的情况下, 任何一个接收端没有正确接收发送的信息, 发端都需要重发. 当接收端较多、信道较差时, 发送端重发的信息量会大大增加, 导致传输效率明显下降, 时延增加. 采用数字喷泉码^[3~7]能有效地解决这两个问题. 运用数字喷泉码的传输系统, 发送端先对传输的信息进行喷泉编码, 能得到的编码信息的长度远大于原始信息的长度. 接收端只要接收到足够多的编码信息就能将原始信息译出. 接收端在收到足够的编码信息后向发端反馈一次, 发送端根据反馈信息控制喷泉编码的进行和编码信息的发送, 故喷泉编码的码率不是固定的. 而在多个接收端的情况下, 发送端不需要为特定的接收端重发特定的信息, 改善了传输效率和时延性能. 虽然数字喷泉码为擦除信道设计的, 但在噪声

信道和衰落信道下也有很好的性能^[8,9].

文献[10,11]将数字喷泉码应用到协作中继传输系统中,提出了准同步和异步两种传输协议,并基于互信息量分析了中继节点数与传输时间和能量消耗的关系.本文进一步探讨数字喷泉码在协作中继传输系统中应用方案及其性能,给出了两种喷泉中继传输方案:能量累积方式和信息累积方式;利用需要发送的数据包数来衡量传输性能,以误块率和中继节点数为参量给出传输时间和功耗的理论分析结果,并在瑞利衰落信道环境下进行了仿真,与普通传输方式(无喷泉编码)进行了性能比较.理论分析和仿真的结果表明,采用喷泉传输机制,能在传输时间和功耗上显著改善系统性能,特别是信息累积方式还能很好地解决中继节点数量及其转发能力随机变化的问题.分析中采用的参量在实际系统中容易获得,结果具体,具有重要的实用价值.

2 系统模型

协作中继系统的系统模型如图 1 所示.为简化分析,只考虑一级中继的情况.源节点向目的节点传送信息,需经过 L 个中继节点转发.假设节点间的信道为平坦瑞利衰落信道, α_{sl} 、 α_{ld} 分别表示源节点—中继节点 l 、中继节点 l —目的节点的信道增益.

基于喷泉码的中继传输的过程分为两个阶段.第一阶段,源节点到中继节点传输.源节点将要发送的信息进行喷泉编码,向中继节点发送编码信息.每个中继节点在收到足够用于译出原始信息的

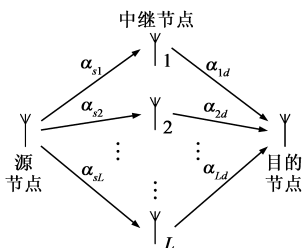


图1 协作中继系统模型

编码信息后停止接收,并向源节点反馈接收完成的信息.当所有中继节点均收够需要的信息后源节点停止发送,第一阶段传输结束.第二阶段,中继节点向目的节点传输.每个中继节点将译出的原始信息重新进行喷泉编码,获得编码信息并向目的节点发送.有两种发送方式:方式1(能量累积方式),在所有的中继节点均译出原始信息后,采用相同的喷泉编码方案进行编码,然后同时向目的节点发送.目的节点将从各个中继节点接收的信息进行合并,然后进行喷泉译码.方式2(信息累积方式),中继节点在译出原始信息并进行喷泉编码后即向目的节点发送编码信息,而不管其它中继节点是否完成接收.不同的中继节点传送编码信息中的不同部分.目的节点对从各中继节点接收到的编码信息进行合并,然后进行喷泉译码.由于喷泉编码的特性,目的节点只要从所有的中继节点接收到足够的信

息即可将原始信息译出,并不要求获得编码信息中的特定部分,不用关心是哪个中继节点发送的.当接收到足够的信息后,目的节点通知中继节点停止发送.目的节点合并实质上是将各个中继节点的信息进行累积.

采用能量累积方式时,不同中继节点发送的信息是相同的,合并的实质是对从各个中继节点接收到的信号进行能量累积,获得分集增益,能降低发送功耗.采用信息累积方式时,各中继节点发送不同的信息,等效于多个信道同时发送,因此信道数量增加,可降低传输所需要的时间.同时该方式不要求各中继节点转发的信息量相同,特别适用于中继节点有不同转发能力的场合.

3 性能分析

下面对喷泉中继系统源—中继节点、中继—目的节点间信息传输的性能进行分析.为简化分析,假定源节点至各中继节点间信道特性相同,各中继节点至目的节点间的信道性能也相同.为比较喷泉传输的性能,同时也对未采用喷泉编码的普通中继系统的性能进行分析.

3.1 源节点—中继节点

由于源—中继节点间是点对多点的多播传输,故从源节点需要发送的数据量上进行分析.假设数据以包的形式进行传输,传输过程中丢包率(即误块率)为 P_{ek} .

3.1.1 普通传输方式(无喷泉编码)

在普通传送方式下,中继节点如没能正确译出数据包,要向源节点反馈请求重传的信息.源节点需要不断进行重传,直到所有的中继节点均正确译码.对某个数据包源节点的发送次数是一个随机变量,设该随机变量为 N . $N = n$ 的条件是:在 L 个中继节点中至少有一个节点在源节点第 n 次发送时才正确接收,而其它节点在源节点第 $1 \sim n-1$ 次发送时正确接收.其概率为

$$\begin{cases} P\{N=1\} = (1 - P_{ek})^L \\ P\{N=n\} = C_L^1 P_n \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i \right)^{L-1} \\ \quad + C_L^2 (P_n)^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i \right)^{L-2} + \dots \\ \quad + C_L^{L-1} (P_n)^{L-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} P_i + P_n^L \\ = \sum_{j=1}^L [C_L^j (P_n)^j \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i \right)^{L-j}] \\ = [P_n + \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i \right)]^L - \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i \right)^L \\ = (1 - P_{ek}^n)^L - (1 - P_{ek}^{n-1})^L, n \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_i 表示一个中继节点在源节点第 i 次发送时正确接收的概率:

$$P_i = P_{ek}^{-1} \cdot (1 - P_{ek}) \quad (2)$$

为使所有的中继节点均正确接收一个数据包, 发送节点需要发送该数据包的平均次数 \bar{N} 为

$$\begin{aligned} \bar{N} &= E[N] = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot P\{N=n\} \\ &= (1 - P_{ek})^L + \sum_{n=2}^{\infty} \{n \cdot [(1 - P_{ek}^n)^L - (1 - P_{ek}^{n-1})^L]\} \end{aligned} \quad (3)$$

3.1.2 喷泉传输方式

采用喷泉传输方式时, 假设源节点以 M 个原始数据包为一组进行喷泉编码, 任何一个中继节点只需从源节点发送的编码信息中正确接收到 M 个数据包, 即将原始的 M 个数据包译出. 为使所有的中继节点均正确译出原始信息, 源节点需要发送的数据包数为 N_M . $N_M = n$ 的条件是: 在 L 个中继节点中至少有一个节点在源节点发送第 n 个数据包后才将原始信息译出, 而其它节点在源节点发送第 $M \sim n-1$ 个数据包后将原始信息译出. 其概率为

$$\begin{aligned} P\{N_M = M\} &= (1 - P_{ek})^{M \times L} \\ P\{N_M = n\} &= C_L^1 P_{Mn} \cdot \left(\sum_{i=M}^{n-1} P_{Mi} \right)^{L-1} \\ &\quad + C_L^2 (P_{Mn})^2 \cdot \left(\sum_{i=M}^{n-1} P_{Mi} \right)^{L-2} \\ &\quad + \cdots + C_L^{L-1} (P_{Mn})^{L-1} \cdot \sum_{i=M}^{n-1} P_{Mi} + (P_{Mn})^L \\ &= \sum_{j=1}^L [C_L^j (P_{Mn})^j \cdot \left(\sum_{i=M}^{n-1} P_{Mi} \right)^{L-j}]^L \\ &= \left(\sum_{i=M}^n P_{Mi} \right)^L - \left(\sum_{i=M}^{n-1} P_{Mi} \right)^L, \quad n \geq M+1 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, P_{Mi} 表示一个中继节点在源节点发送 i 个数据包后将原始信息正确译出的概率, 即该节点正确接收了源节点所发送的 i 个数据包中的 M 个, 且其中第 i 个数据包是正确接收的第 M 个数据包的概率:

$$P_{Mi} = C_{i-1}^{M-1} P_{ek}^{i-M} \cdot (1 - P_{ek})^M \quad (5)$$

为使所有的中继节点均正确译出原始信息, 发送节点需要发送的编码数据包的平均数 \bar{N}_M 为

$$\begin{aligned} \bar{N}_M &= E[N_M] = \sum_{n=M}^{\infty} n \cdot P\{N_M=n\} \\ &= M \cdot (1 - P_{ek})^{M \times L} + \sum_{n=M+1}^{\infty} n \cdot \left[\left(\sum_{i=M}^n P_{Mi} \right)^L - \left(\sum_{i=M}^{n-1} P_{Mi} \right)^L \right] \end{aligned} \quad (6)$$

平均到一个原始数据包, 源节点需要发送的数据包数 \bar{N}_{M1} 为

$$\bar{N}_{M1} = \bar{N}_M / M \quad (7)$$

式(3)和(7)较难推出其闭式解, 我们通过计算机数值计算的方法求出当 $M = 100, 1000$, $P_{ek} = 10^{-1}, 10^{-2}$, 中继节点数 $L = 1, 2, \dots, 8$ 时, 对于每一个数据包, 源节点需要发送的平均数据包数, 如图 2 所示.

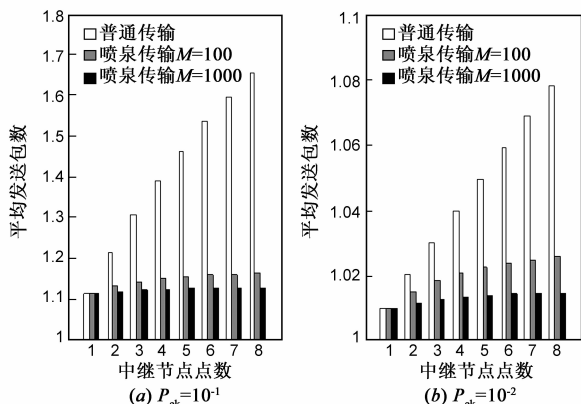


图2 对于每个数据包源节点平均发包数

从分析的结果中可以看出, 当中继节点数为 1 时, 普通传输和喷泉传输性能相同(将式(7)中的 L 用 1 替换, 经推导后结果与式(3)相同), 但采用喷泉传输时, 中继节点只在接收完用于译码所需的 M 个数据包后发送一次反馈信息; 而普通传输时, 只要任何一个数据包接收错误, 就要发送反馈信息. 因此喷泉传输能降低反馈信息量. 当中继节点数增加时, 普通传输时源节点发送的数据量显著增加, 信道越差增加越明显; 喷泉传输时则只有轻微的增加. 喷泉编码的码长越长, 效果越好, 但时延也越大.

3.2 中继节点一目的节点

为使性能分析结果更有可比性, 规定三种方式下对同一个符号的发送总功率相同, 即普通传输和能量累积方式下, 每个中继节点以平均功率 P/L 进行发送, 而信息累积方式下每个中继节点以平均功率 P 进行发送.

3.2.1 普通传输

设所有中继节点发送信号相同, 均为 $s_r(t)$. 目的节点接收到的来自一个中继节点的信号为

$$s_{ld}(t) = \alpha_{ld} e^{-j\varphi_{ld}} s_r(t) + z(t), \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

式中, $\alpha_{ld} e^{-j\varphi_{ld}}$ 为信道的衰落因子, l 为中继节点序号, $z(t)$ 是双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声. 假设目的节点能对信道进行正确估计, 从而消除相移的影响, 并采用最佳接收方式. 目的节点先将从各中继节点接收到的信号进行合并. 采用与文献[12]类似的分析方法, 可得到信号合并后的瞬时信噪比为

$$\gamma_s = \frac{\epsilon_s}{N_0} \sum_{l=1}^L \alpha_{ld}^2 = \frac{P \cdot T_s}{L \cdot N_0} \sum_{l=1}^L \alpha_{ld}^2 \quad (9)$$

T_s 为符号周期, ϵ_s 为一个符号携带的能量, $\epsilon_s = P \cdot T_s / L$. γ_s 的概率密度函数为^[12]

$$p(\gamma_s) = \frac{1}{(L-1)!} \frac{\gamma_s^{L-1}}{\bar{\gamma}_c} e^{-\gamma_s/\bar{\gamma}_c}, \gamma_s \geq 0 \quad (10)$$

式中, $\bar{\gamma}_c$ 是单个中继一目的节点间信道的平均信噪比, 对所有信道其值相同, 为

$$\bar{\gamma}_c = \frac{\epsilon_s}{N_0} E[\alpha_{ld}^2] = \frac{P \cdot T_s}{L \cdot N_0} E[\alpha_{ld}^2] \quad (11)$$

中继一目的节点间的瞬时信道容量为^[13]

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_s}{T_s} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P}{L \cdot N_0} \sum_{l=1}^L \alpha_{ld}^2 \right) \quad (12)$$

假设采用了理想的信道编码方案, 每个数据包编码后得到一个码字. 根据香农信道容量理论^[13], 当传输速率 R 小于信道容量 C 时, 能实现无差错传输; 当码字传输时 $C < R$, 或信噪比 γ_s 小于 $C = R$ 时要求的信噪比 γ_{th} 时将发生传输错误. 数据包传输错误的概率为

$$P_e = P\{C < R\} = P\{\gamma_s < \gamma_{th}\} = \int_0^{\gamma_{th}} p(\gamma_s) d\gamma_s$$

$$= 1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_c} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} \left[\frac{1}{(L-k-1)!} \left(\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_c} \right)^{L-k-1} \right] \quad (13)$$

设为使目的节点正确接收一个数据包, 中继节点要发送的数据包数为 N_{nf} , 则

$$P\{N_{nf} = n\} = P_e^{n-1} \cdot (1 - P_e), n \geq 1 \quad (14)$$

中继节点发送的平均数据包数为

$$\bar{N}_{nf} = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot P\{N_{nf} = n\} = \sum_{n=1}^{\infty} [n \cdot P_e^{n-1} (1 - P_e)]$$

$$= \frac{1}{1 - P_e} \quad (15)$$

若要传送的数据包数为 H_t , 考虑到传输错误需要重传, 则平均中继一目的节点间传送的数据包数为 $H_t \cdot \bar{N}_{nf}$. 设码字长度为 k 个符号, 传输所需的平均时间和能量分别为

$$\bar{T}_{nf} = H_t \cdot \bar{N}_{nf} \cdot T_s \cdot k \quad (16)$$

$$\bar{E}_{nf} = H_t \cdot \bar{N}_{nf} \cdot T_s \cdot k \cdot P \quad (17)$$

3.2.2 喷泉传输——能量累积方式

该方式下信号合并后的瞬时信噪比与与普通传输方式相同, 因此数据包错误概率也相同, 均为 P_e .

设进行喷泉编码的原始数据长度为 M , 目的节点为正确译出这 M 个原始数据包, 中继节点需要发送的数据包数为 N_{Me} , 则

$$P\{N_{Me} = n\} = C_{n-1}^{M-1} \cdot P_e^{n-M} (1 - P_e)^M, n \geq M \quad (18)$$

平均发送数据包数为

$$\bar{N}_{Me} = \sum_{n=M}^{\infty} n \cdot P\{N_{Me} = n\}$$

$$= \sum_{n=M}^{\infty} [n \cdot C_{n-1}^{M-1} \cdot P_e^{n-M} (1 - P_e)^M]$$

$$= \frac{(1 - P_e)^M}{(M-1)!} \cdot \frac{M!}{(1 - P_e)^{M+1}} = \frac{M}{1 - P_e} \quad (19)$$

平均到每个数据包, 中继节点需要发送的平均数据包数为

$$\bar{N}_e = \frac{\bar{N}_{Me}}{M} = \frac{1}{1 - P_e} \quad (20)$$

该结果与普通传输方式完全相同. 若不考虑反馈信息的传送, 则在中继一目的节点间普通传输方式与能量累积喷泉传输方式性能相同.

3.2.3 喷泉传输——信息累积方式

该方式下目的节点从其中一个中继节点接收的信号瞬时信噪比的概率密度函数为^[12]:

$$p(\gamma_{si}) = \frac{1}{\bar{\gamma}_s} e^{-\gamma_{si}/\bar{\gamma}_s}, \gamma_{si} \geq 0 \quad (21)$$

其中, $\bar{\gamma}_s$ 为平均信噪比:

$$\bar{\gamma}_s = \frac{\epsilon_{si}}{N_0} E[\alpha_{ld}^2] = \frac{P \cdot T_s}{N_0} E[\alpha_{ld}^2] = L \times \bar{\gamma}_c \quad (22)$$

由于各中继一目的节点间信道特性相同, 因此其平均信噪比也相同.

同样, 若信噪比 γ_{si} 小于 γ_{th} 时将发生传输错误, 数据包传输错误概率为

$$P_{ei} = P\{\gamma_{si} < \gamma_{th}\} = \int_0^{\gamma_{th}} p(\gamma_{si}) d\gamma_{si} = 1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_s} \quad (23)$$

各中继一目的节点间有相同的传输性能. 与能量累积方式的分析方法完全类似, 可以得到平均传送一个数据包, 中继节点需要发送的数据包数为

$$\bar{N}_i = \frac{1}{1 - P_{ei}} \quad (24)$$

每个中继节点符号传送速率仍为 $R_s = 1/T_s$, 由于各中继节点传送不同的信息, 因此总的符号传输速率为 $L \times R_s$, 传送 H_t 个数据包所需的平均时间和能量分别为

$$\bar{T}_i = H_t \cdot \bar{N}_i \cdot T_s \cdot k / L \quad (25)$$

$$\bar{E}_i = H_t \cdot \bar{N}_i \cdot T_s \cdot k \cdot P \quad (26)$$

图3是用计算机按上面的结论进行计算的结果, 分别是两种喷泉传输方式下(普通传输方式的性能与能量累积方式相同), 为使目的节点正确接收一个数据包中继节点需要发送数据的平均时间和能量. 计算时将

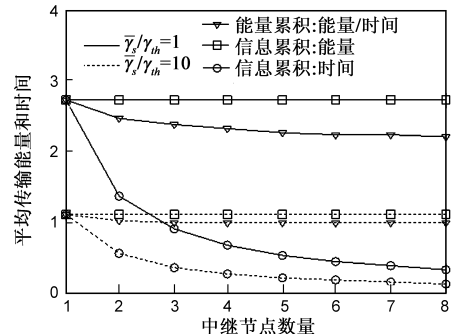


图3 两种中继方式的平均发送能量和时间

码字周期(即 $T_s \times k$)、发送功率 P 均归一化为 1, $\bar{\gamma}_s/\gamma_{th} = 1, 10$. 从结果中可以看到, 采用能量累积方式时, 由于有分集增益, 可以降低数据传输的误块率, 减少数据传输量, 因而能降低功耗. 信道性能差时改善尤其明显. 采用信息累积方式时, 由于信道数量增加为 L 倍, 因而传输时间大大减少.

在实际的网络中, 中继节点本身也有信息要发送, 同时, 其可能同时为多个节点转发信息, 而各节点信息(包括中继节点自身)的发送量一般是随机的, 因此中继节点为某个节点转发信息的能力也是随机变化的. 当中继节点自身要发送的信息或要求其转发信息的节点数较少时, 其就有较大的能力为某个节点转发信息; 反之则其为某个节点转发信息的能力就弱. 采用普通中继传输方式时, 需要采取复杂的中继节点调度和分配算法, 并不断对中继节点进行调整, 且不能充分利用中继节点的转发能力, 这必然导致系统复杂度的增加和性能的下降. 采用信息累积喷泉中继传输方式可以很好地解决这个问题. 由于目的节点只要能收到足够的信息即可译出原始信息, 而不关心其接收的信息是由哪个中继节点转发的; 同时, 各中继节点间在转发信息时并不需要同步, 因而中间节点的信息转发量不需固定, 转发能力强时可以多转发一些信息, 而能力差时少转发一些. 因此能充分利用中继节点的转发能力, 且不需要复杂的中继调度算法.

4 仿真结果

我们对喷泉传输的中继系统进行了性能仿真. 仿真中采用(255, 101)的 RS 码作为喷泉码, 采用文献[14]中的编译码算法. 采用码长 1008、码率 0.5 的二进制 LDPC 规则码作为纠错编码; BPSK 调制; 信道为瑞利衰落信道, 衰落系数每个 LDPC 码字变化一次; 各源—中继节点间、中继—目的节点间的信道具有相同的性能. 为比较喷泉中继传输的性能, 也对采用相同的纠错编码和调制方式的普通中继传输进行了仿真. 喷泉码的编译码过程请参考文献[14].

图 4 是源—中继节点数据传输性能的仿真结果. 信道信噪比分别为 5dB 和 10dB. 从仿真结果中可以看到,

在普通传输方式中, 随着中继节点数量的增加, 源节点平均需要发送的数据包数明显增加, 特别是信道特性较差时. 采用喷泉编码后, 随着中继节点数量的增加, 源节点发送的数据包数只有非常轻微的增加. 例如, 当信道信噪比为 5dB 时, 只有一个中继节点时, 两种传输方式下源节点发送的数据包数相同, 均为 1.52 个. 而当中继节点数量增加到 8 个, 普通传输时源节点平均需要发送 3.03 个, 增加近一倍; 而喷泉传输时只轻微增加到 1.65 个, 只增加 8.6%.

图 5、图 6 分别是源节点—目的节点间整个传输链路的传输性能仿真结果, 分别是平均传输一个数据包所需要发送的总能量和传输时间(包括源节点和中继节点发送的能量和时间). 仿真中源—中继节点信道信噪比为 10dB, 中继—目的节点信道信噪比为 5dB 和 10dB. 仿真结果已将发送一个数据包的能量和时间均归一化为 1. 从仿真结果可以看到, 对于三种传输方式, 当有 1 个中继节点时, 其前向传输性能是相同的. 当中继节点数增加时, 对于普通中继传输, 其性能并不是单调提升的. 这是因为当有多个中继节点时, 在中继—目的节点间有分集增益, 能使系统性能有一定改善, 特别是信道较差时. 但中继节点的增加同时使源—中继节点间的传输量增加, 在一定程度上抵消了该分集增益, 甚至引起系统性能的下降. 例如, 信噪比为 5dB 时, 两个中继节点时传输性能最好. 而当信噪比为 10dB 时, 由于中继节点数增加带来的分集增益并不明显, 反而是单中继节点时性能最佳. 对于采用能量累积方式的喷泉中继传输, 由于随着中继节点的增加, 源—中继节点间的传输量只有轻微增加, 所以多中继节点的分集增益能很好地体现出来. 信道性能越差, 分集增益越大. 如在信噪比为 5dB 时, 随着中继节点增加, 传输性能持续改善, 但改善的趋势逐渐减缓. 当信噪比为 10dB 时, 分集增益有所下降, 2~3 个中继节点时性能最佳. 对于采用信息累积方式的喷泉传输, 由于在中继—目的节点间没有分集增益, 随着中继节点数的增加, 源—中继节点间的传输量的增加导致总传输能量的增加. 但由于信息累积方式在中继—目的节点间等效于多个信道

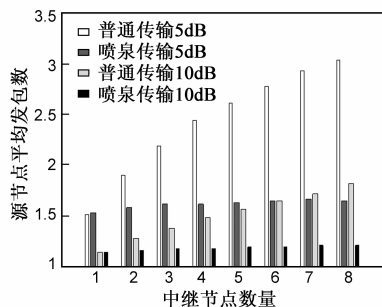


图4 源节点—中继节点传输性能

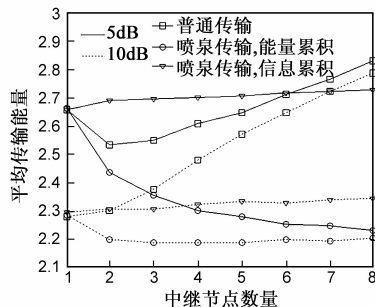


图5 源节点—目的节点传输能量消耗

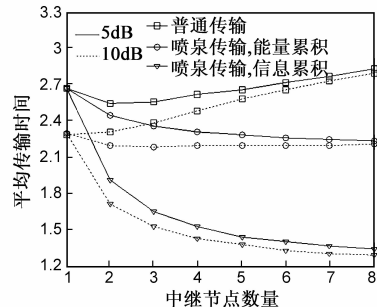


图6 源节点—目的节点传输时间

同时传输,所以所需要的传输时间是随着中继节点数的增加而持续下降的。

5 总结

协作中继传输是无线网络中的一种重要传输方式,尤其是在无中心节点的网络中。而在中继传输中引入喷泉编码,除能大大降低反馈信息量外,在有多个中继节点时,还能大大改善前向传输的性能。其对前向传输性能的改善一方面在于使源—中继节点间的传输量大大下降,另一方面则在于中继—目的节点间传输性能的改善。对于中继—目的节点间的传输本文给出了能量累积和信息累积两种方案,前者能带来分集增益,降低传输误码率,从而改善传输功耗;后者使中继—目的节点间多条信道并行传输,大大减少了传输所需要的时间,而且各中继节点间不需要同步。因此,如果中继节点对功耗有较大的约束时,可以采用能量累积方式;而如果中继节点只能有有限的时间转发信息时,则可采用信息累积方式。在实际网络中,由于中继节点的转发时间和转发能力是变化的,采用信息累积喷泉中继传输方式能自动适应中继节点数量和转发能力的变化,充分利用其转发能力,简化系统中继节点的分配和调度,提高系统性能。另外,本文研究了一级中继的情况,但提出的方案同样适用于多级中继时两级中继节点间的传输。由于两级中继节点间一般为多发—多收的情况,喷泉码对传输性能的改善更为有效。其性能可采用类似方法进行分析。

参考文献:

- [1] F H P Fitzek, M D Katz. Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications [M]. Dordrecht, Netherland: Springer, 2006.
- [2] A Scaglione, D L Goeckel, J N Laneman. Cooperative communications in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(5): 18 – 29.
- [3] J Byers, M Luby, M Mitzenmacher. A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1528 – 1540.
- [4] M Mitzenmacher. Digital fountains: a survey and look forward [A]. Proceedings of IEEE Information Theory Workshop (ITW)[C]. IEEE Press, 2004. 271 – 276.
- [5] D J C Mackay. Fountain codes[J]. IEE Communications Proceedings, 2005, 152(6): 1062 – 1068.
- [6] M Luby. LT codes[A]. Proceedings of IEEE Foundations of Computer Science (FOCS)[C]. IEEE Press, 2002. 271 – 282.
- [7] A Shokrollahi. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551 – 2567.
- [8] R Palanki, J S Yedidia. Rateless codes on noisy channels[A].

Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)[C]. IEEE Press, 2004. 37.

- [9] J Castura, Y Mao. Rateless coding over fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(1): 46 – 48.
- [10] A F Molisch, N B Mehta, J S Yedidia, et al. Cooperative relay networks using fountain codes [A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)[C]. IEEE Press, 2006. 1 – 6.
- [11] A F Molisch, N B Mehta, J S Yedidia, et al. Performance of fountain codes in collaborative relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(11): 4108 – 4119.
- [12] J G Proakis. Digital Communications (Fourth edition)[M]. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2001. 816 – 830.
- [13] S Haykin. Communication Systems (Fourth edition)[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001. 567 – 616.
- [14] Weijia Lei, Guangjun Li, Xiangming Li, Xianzhong Xie. Iterative coding and decoding algorithm of RS digital fountain code [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)[C]. IEEE Press, 2008. 237 – 240.

作者简介:



雷维嘉 男, 1969 年 7 月出生于云南元谋。副教授。1992 年、1999 年分别毕业于重庆邮电学院和北京邮电大学, 获学士和硕士学位。现为电子科技大学在读博士生。主要研究方向为无线通信技术。

E-mail: leiweijia@21cn.com



谢显中 男, 1966 年 1 月出生于四川通江。2000 年毕业于西安电子科技大学, 获博士学位。现为重庆邮电大学计算机科学与技术学院副院长、教授。主要研究方向为无线和移动通信技术。

E-mail: xiezh@cqupt.edu.cn



李广军 男, 1950 年 9 月出生于河北保定。现为电子科技大学通信与信息工程学院副院长, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线和移动通信系统、嵌入式系统。

E-mail: gjli@uestc.edu.cn