

文章编号: 1001-893X(2011)03-0084-05

采用喷泉码的无线协同多跳信息累积广播协议^{*}

于国海, 王呈贵, 张 哲

(解放军理工大学 通信工程学院, 南京 210007)

摘 要:为提高无线多跳广播的能量效率,提出了采用喷泉码的协同多跳信息累积广播协议:令注水速率最大的节点进行发送,其发送功率由传输速率和注水速率决定。当有接收节点成功接收时,再由更新后注水速率最大的节点发送。各发送节点采用不同的喷泉码进行编码,使接收节点获得复用增益,并且节点可以接收可靠传输范围以外的信息并进行累积直至成功译码。根据节点是否掌握全局网络信息,给出了集中式信息累积启发算法和分布式信息累积算法,并且将本协议与现有的能量累积协议进行了比较,仿真结果表明所提协议在能量效率上有较大的提高。

关键词:无线广播;协同通信;喷泉码;信息累积

中图分类号: TN911.2 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.019

Cooperative Multi-hop Broadcast Protocols Using Fountain Codes for Wireless Networks

YU Guo-hai, WANG Cheng-gui, ZHANG Zhe

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to improve the energy efficiency of broadcast protocols for wireless networks, cooperative multi-hop information accumulated broadcast protocols based on fountain codes are proposed in this paper. Node which has the largest fill rate transmits the information to other nodes that doesn't complete reception. Transmit power is determined by the transmission rate and fill rate. Fill rate of all nodes is recomputed if there is one more node receiving the information successfully and then the node has the largest fill rate is chosen to transmit. The transmitters use different fountain codes, so receivers enjoy multiplex gain. Nodes beyond the nominal range of a transmitter can accumulate the information of unreliably receiving overheard signals till complete reception. According to the situations that the nodes have global network information or not, information accumulates centralized heuristic protocol and information accumulates distributed protocol are proposed in this paper. Simulations show that the proposed protocols work more efficiently compared with the existing energy accumulate protocols.

Key words: wireless broadcast; cooperative communication; fountain codes; information accumulate

1 引 言

在无线网络中,广播作为一种可以将信息从源节点发送到多个目的节点的传输方式,在多跳网络通信中起着重要的作用。广播方案的效率受多种因素影响,如系统的可靠性、能量效率、可扩展性、复杂

度和延时等。针对不同的场合,不同因素所起的作用也不一样,如在广播流媒体时,延时是需要重点考虑的因素;当网络中的节点要更新软件时,传输的可靠性就显得十分重要。

在无线通信系统环境中,系统中节点的能量是受限的,因此降低系统的能量消耗显得十分重要,它

^{*} 收稿日期:2010-12-28;修回日期:2011-02-22

已经成为广播协议的一个研究热点。Maric 提出利用无线组播优势,节点可以接收可靠传输范围以外的信息,并进行信息的累积,系统通过获得分集增益来提高能量效率^[1]。Kailas 提出了带有判决门限的机会大阵列协议^[2],通过对接收信号信噪比的检测,系统只允许在下一次传输中发挥作用较大的节点进行发送,发挥作用较小的节点不发送。这种算法在节点密度较高的环境下适用,当密度节点较低时系统性能将受影响。

在广播通信中,一个节点发送数据, N 个目的节点接收数据。如果有目的节点没有成功接收,为保证传输的可靠性,则发送节点需要重新发送。没有成功接收的节点通过反馈告知发送节点它需要哪些数据,由发送节点对应发送。由于通常这些未成功译码目的节点所需重传的数据是不同的,源节点向某一个节点重传的数据对于其它节点来说是没有用的,这样就浪费了系统资源。喷泉码的出现很好地解决了这个问题^[3-5]。源节点的数据通过喷泉编码可以产生远大于原信息长度的编码信息,它发送的编码信息对于每一个没有成功译码的接收节点都是有用的。此外,喷泉码可以自适应信道链路状态,无需信道状态反馈信息就可以达到信道容量,因此考虑到将喷泉码引入到广播传输系统中来提高系统的能量效率。

本文提出了采用喷泉码的信息累积传输协议:接收节点利用可靠传输范围之外的信息,直至接收节点积累的信息量可以成功译码。根据节点是否拥有网络的全局链路信息,给出了集中式信息累积协议和分布式信息累积协议,并将提出的这两个协议与现有的能量累积广播协议进行了比较。

2 系统模型

结合文献[1],本文的多跳广播系统建模如下:考虑一个由 N 个静态节点组成的无线广播网络, N 个节点带有全向发射天线,均匀分布在 10×10 的区域内。节点可靠发送范围为 r ,假设 r 足够大,使网络中节点是全连通的。从任一发送节点 k 到任一接收节点 m 的信道为 AWGN 信道,带宽为 W ,信道增益系数为 $h_{m,k} = \frac{1}{d_{m,k}^\alpha}$,其中 $d_{m,k}$ 为节点 k 和 m 之间的距离, α 为路径衰落系数。在本文的分析中,不考虑瑞利衰落,只考虑路径损耗,因此节点之间的链路增益是不变的。假设系统有足够的带宽资源,可

以保证每个节点的发送都在正交信道中进行。节点 i 发送数据,如果节点 j 处接收的信号功率高于某一个门限值,这时就称节点 j 在节点 i 的可靠传输范围之内。假定每一个节点都可以决定自己的发送功率,也即决定了传输范围。在可靠传输范围以外的节点也可以接收这些数据进行信息的累积,当累积的信息量超过信息熵时,节点即可以成功译码。只有成功接收的节点才可以进行编码转发,每个发送节点都采用不同的喷泉码进行编码,使接收节点可以获得复用增益。在研究中,通常假定喷泉码不需要信道状态信息就可以达到信道容量,这种假设的正确性在文献[6]中已经阐述,并且在文献[7]中也举例加以证明,因此在本文中认为喷泉码可以达到信道容量。

在信息累积广播协议中,系统所需的最小能量可以通过两方面来实现,首先要确定由哪些节点进行转发,然后再确定节点的发送功率。这个问题与最小能量广播问题相似。在最小能量广播问题中,若广播树确定,则发送功率也就确定了^[8-9]。广播树中一个父节点的发送功率由到达它所在组中信道质量最差的子节点决定,但是在信息累积广播中,节点从很多其它发送节点接收信息,节点之间没有明确的父节点和子节点的关系。除此以外,节点的发送功率的最优解可能不是正好使某个节点成功接收的功率值,因为这个接收节点还可以从将来发送的节点接收到所需信息。

信息累积广播协议最为关键的步骤是确定发送节点的发送次序,然后根据这个发送次序进行线性规划,确定节点的最优发送功率。文献[1]中指出寻找这样一个最优次序是不可实现的,基于此,下面就给出两种典型场景下的启发式算法。

3 集中式信息累积广播协议(CIABP)

在 CIABP 协议中,假设所有信道增益系数的信息在各个节点处都是已知的,还要求每一个成功译码节点的注水速率都是已知的,并且节点发送的功率可以确定,恰好使一个未成功译码节点在一个时隙内成功接收。网络中成功译码的节点集合记为 S ,如果节点 j 是在 S 之外的下一个要成功接收的节点,则 S 中的节点发送的功率应使 j 成功接收。如果说要使 j 成功接收所发送的功率使得节点 i 先于节点 j 成功接收,则应安排节点 i 作为下一个接收

节点。这是因为节点 j 的发送不能使节点 i 获得信息,而节点 i 发送可能会使节点 j 获得信息。

算法代码如下:

```

S = [1]; p = 0
while( | S | < N) do
    k = arg maxi ∈ S ∑j ∈ Uj, i hj, i;
    j = arg minm ∈ U( P̄ - ∑i ∈ S lb(1 +  $\frac{h_{mi}p_i}{N_o W}$ )) / hmk;
    pk ← pk + ( P̄ - ∑i ∈ S lb(1 +  $\frac{h_{ji}p_i}{N_o W}$ )) / hjk;
    S ← [ S, j]
end
    
```

假定源节点为 1,未成功译码的节点集合为 U ,任一节点 k 的注水速率定义为节点 k 到所有未成功译码节点的信道增益系数之和:

$$R_k = \sum_{j \in U} h_{j,k} \quad (1)$$

则 CIABP 协议的贪婪注水算法描述如下:

- (1)找出成功译码节点中注水速率最大的节点 k ;
- (2)确定节点 k 的发送功率,使得某一个节点 j 在下一个时隙可以成功译码;
- (3)将节点 j 加到成功译码的节点集合 S 中去。

将源节点标识为 1,其后续成功接收节点依次标记为 2,3,⋯,如果节点 m 在其它发送节点发送的基础上成功译码,则发送速率可表示为

$$r_m = W \times \sum_{k=1}^{m-1} \text{lb}(1 + \frac{h_{m,k}p_k}{N_o W}) \quad (2)$$

式中, p_k 为节点 k 的发送功率,若节点 k 没有进行发送,则 $p_k = 0$ 。

现将 CIABP 与文献[1]提出的集中式能量累积广播协议(CEABP)进行比较。系统仿真参数设置如下:信道带宽 W 为 200 kHz,单边带功率谱密度 N_o 设定为 5×10^{-6} ,要求达到的通信速率为 270.833 kbit/s,仿真次数为 100。从图 1 中可以看到,在 3 种衰落系数下,CIABP 性能都比 CEABP 好,但是随着衰落系数的增加,CIABP 相比于 CEABP 的性能优势在减小。CIABP 和 CEABP 都随着节点数目的增加,系统需要的总的能量降低,这是因为节点密度增加以后,发送节点和未成功译码节点的平均距离降低,未成功译码的节点可以从发送节点处接收更多的信息。当 $\alpha = 2$ 时,在 $N = 10$ 时,CIABP 比 CEABP 能量消耗少 1.5 dB;在 $N = 150$ 时能量消耗少 1.9 dB。当 $\alpha = 4$ 时,在 $N = 10$ 时,CIABP 比 CEABP 能量消耗少 1.09 dB;在 $N = 150$ 时能量消耗少 1.13 dB。

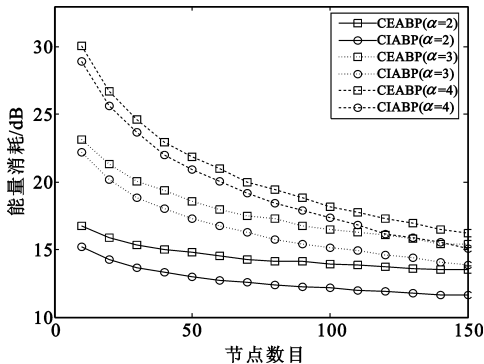


图 1 两种集中式广播协议的能量消耗
Fig.1 Energy consumed of the two centralized broadcast protocols

4 分布式信息累积广播协议(DIABP)

在 CIABP 协议中,不仅要求节点知道所有链路增益系数的信息,还要求每一个成功译码节点的注水速率都是已知的,并且节点发送的功率可以确定,恰好使一个未成功译码节点在一个时隙内成功接收。这些条件要求过于苛刻,下面提出一个只需要局部网络信息的分布式广播协议。

令成功译码的节点 i 以固定功率 P_c 发送一个 ACK 帧(ACK_i),如果一个节点 j 接收到的 ACK_i 超过某一个门限值 $\bar{P}_{N_R}$,那么节点 j 就认为该节点是它的邻居节点。在门限值 $\bar{P}_{N_R}$ 以上的节点,发送节点可以保证在时间 T 的周期内使其成功译码。假定帧的头部信息相比于长的码字来说很短,因此用于帧头信息传输的能量可以忽略。假设即使节点处在发送节点的可靠传输范围之外,帧头信息也可以被正确接收,这样可以使接收节点识别由不同节点发送来的数据。结合文献[1]给出的能量累积算法,现将分布式信息累积算法描述如下:

$$S_i = S \cap N_R(i), U_i = U \cap N_R(i) \quad (3)$$

式中, S_i 代表节点 i 的邻居节点中成功译码的节点的集合, U_i 代表节点 i 的邻居节点中未成功译码的节点的集合, S 代表成功译码的节点的集合, U 代表未成功译码的节点的集合, $N_R(i)$ 代表节点 i 的邻居节点。在发送之初,任一节点 i 初始化为 $S_i = \emptyset$ 。

(1)当节点 i 还没有成功译码时,它从其它的发送节点接收信息,这些发送节点可以是节点 i 的邻居也可以不是节点 i 的邻居。节点 i 接收到功率超过功率门限 $\bar{P}_{N_R}$ 的 ACK_j ,节点 i 就会识别节点 j 是它的邻居节点且已成功译码, $j \in S_i$ 。根据接收到的

ACK_j 帧的功率,节点 i 可以计算出两个节点之间的信道增益系数 h_{ij} ,之后节点 i 向节点 j 发送一个包含 h_{ij} 的链路增益控制帧 LG_i ,节点 j 就会知道 $i \in N_R(j)$ 。当节点接收的信息量超过信息熵时,则节点成功接收:

$$W \times \sum_{k=1}^{m-1} \text{lb}(1 + \frac{h_{m,k} p_k}{N_o W}) t_k \geq B \tag{4}$$

式中, B 为发送信息的长度, t_k 为节点 k 的发送时间。

(2)一旦节点 i 成功译码,节点 i 发送 ACK_i ,促使节点 i 的邻居中任一未成功译码的节点 k 接收到 ACK_i 后发送 LG_k 给节点 i 。节点 i 接收到所有链路增益控制帧 LG 之后就可以计算出自己的注水速率,然后将它的注水速率用控制帧 FR_i 广播给它的邻居节点。在本文中,如果两个节点同为某一个节点的邻居,则认为这两个节点可以可靠接收对方的控制帧 FR 。

(3)成功译码的节点 i 收到 ACK_j 后,如果它正在发送,则停止发送。节点 i 更新 S_i 、 U_i 和注水速率 R_i ,并将自己的注水速率用控制帧 FR_i 广播给它的邻居节点,然后由 S_i 中注水速率最大的节点进行发送,当节点 i 的所有邻居节点都成功译码时,这个过程停止。

在节点 i 的发送过程中,与能量累积协议中重复发送相同的编码信息不同,节点 i 一直在发送不同的编码信息,这依赖于喷泉码可以产生源源不断的编码信息的特性。在本算法中,节点的动作都是由 ACK 帧触发的。

图 2 对 DIABP 协议与文献[1]提出的分布式能量累积协议 (DEABP) 进行了比较,仿真参数设置如下:信道带宽 W 为 200 kHz,单边带功率谱密度 N_0 为 5×10^{-6} ,帧长 B 为 1.56,仿真次数为 100。为保证网络节点的全连通,根据文献[10],将节点的可靠发送范围设为 $r = 2.6$,节点的发送信息功率 $p = 1.56$,发送控制帧的功率 $p_c = 1.56$ 。从图中可以看出,DIABP 协议比 DEABP 协议的能量效率要高。更重要的是随着节点数目的增加,DIABP 协议所需的能量逐渐降低,而 DEABP 则有缓慢上升的趋势。这是因为随着节点间距离的降低,复用增益产生的作用比分集增益的作用更加明显。在 $N = 80$ 时,DIABP 比 DEABP 协议所需的能量少 0.64 dB;在 $N = 300$ 时,DIABP 比 DEABP 协议所需的能量少 1.56 dB。图上也给出了 CIABP 协议和 DIABP 协议的比较,可以看出 DIABP 相比于 CIABP 协议性能还是下降较大。

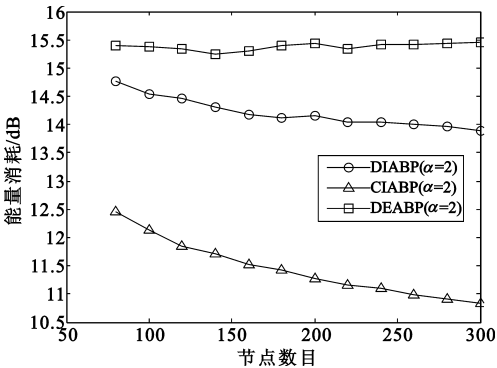


图 2 两种分布式广播协议的能量消耗
Fig.2 Energy consumed of the two distributed broadcast protocols

5 结 论

本文将喷泉码引入到协同多跳广播传输系统中,令成功译码中注水速率最大的节点发送,接收节点成功接收后,再由更新后注水速率最大的节点发送。接收节点对接收到的喷泉编码信息进行累积,直至成功译码。针对不同的应用环境,提出了 CIABP 和 DIABP 协议,并将这两种协议与现有的能量累积广播协议进了仿真比较。结果表明,采用喷泉码的信息累积协议其能量效率要明显优于能量累积广播协议。下一步的研究方向是简化 DIABP 协议设计,提高协议的空分复用性。

参考文献:

[1] Maric I, Yates R D. Cooperative multi - hop broadcast for wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6):1080 - 1088.

[2] Kailas A, Thanayamkizil L, Ingram M A. A simple cooperative transmission protocol for energy - efficient broadcasting over muti - hop wireless networks [J]. IEEE Journal of Communications and Networks, 2008, 10(2):213 - 220.

[3] Byers J W, Luby M, Mitzenmacher M , et al. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data[C]// Proceedings of ACM Special Interest Group on Data Communication. Vancouver, Canada: IEEE, 1998:56 - 67.

[4] Luby M. LT Codes[C]//Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations Computer Science. Vancouver, Canada:IEEE,2002:271 - 280.

[5] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52(6):2551 - 2567.

[6] Molish A F, Meththa N B, Yedida J S, et al. Performance of fountain codes in collaborative relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(11):4108

- 4119.

[7] Castura J, Mao Y. Rateless coding for wireless relay channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5):1638 - 1642.

[8] Li F, Nikolaidis I. On minimum - energy broadcasting in all - wireless networks [C]//Proceedings of Local Computer Networks. Tampa, FL, USA: IEEE, 2001: 193 - 202.

[9] Ahluwalia A, Modiano E, Shu L. On the complexity and distributed construction of energy - efficient broadcast trees in ad - hoc wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5):2136 - 2147.

[10] Li N, Hou C. BLMST: A scalable, power efficient broadcast algorithm for wireless networks [C]//Proceeding of Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks. Dallas, TX, USA: IEEE, 2004:44 - 51.

作者简介:

于国海(1985 -),男,吉林通化人,2008 年于吉林大学获电子信息工程专业学士学位,现为硕士研究生,主要研究方

向为移动通信;

YU Guo - hai was born in Tonghua, Jilin Province, in 1985. He received the B. S. degree in Jilin University in 2008. He is now a graduate student. His research direction is mobile communications.

Email: ygh985@126.com

王呈贵(1970 -),男,河南新乡人,1999 年获通信与信息系统博士学位,现为副教授,主要研究方向为短波通信和信号处理;

WANG Cheng - gui was born in Xinxiang, Henan Province, in 1970. He received the Ph. D. degree in 1999. He is now an associate professor. His research interests include HF communications and signal processing.

张 哲(1985 -),男,辽宁阜新,2003 年于解放军理工大学获通信工程专业学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为移动通信。

ZHANG Zhe was born in Fuxin, Liaoning Province, in 1985. He received the B. S. degree in PLA University of Science and Technology in 2007. He is now a graduate student. His research direction is mobile communications.

《电讯技术动态》征稿启事

《电讯技术动态》(月刊)创刊于 1972 年,是由中国西南电子技术研究所主办的内部刊物,主要报道与下述专业领域相关的国际厂商科研动态;外军先进装备研发、试验和使用情况;学术交流和展会信息。本着服务于国内军工科研的目的,提供国外军事技术与装备的最新发展动态,服务于研发生产为宗旨的办刊原则,将《电讯技术动态》发展成国内以军工电子为主的行业动态是我们长期不懈的目标。

为促进《电讯技术动态》更好地交流与发展,热诚欢迎业内学者、专家及科研人员踊跃投稿。
投稿领域:

- | | | |
|--------|------------|---------|
| • 航空电子 | • 通 信 | • 飞行器测控 |
| • 卫星应用 | • 情报、侦察与监视 | • 敌我识别 |

来稿要求及注意事项:

- (1)文稿务必主题明确,论述合理,逻辑严谨,数据可靠,叙述清楚,文字精炼;
- (2)文稿一般不应超过 4 000 字,尽量提供 word 文档,对于文中的图片请以附件形式添加发送至指定投稿邮箱;
- (3)投稿务必署名,且对于译稿标明原文详细出处;
- (4)请务必采用 Email 投稿,投稿邮箱: dianxundongtai@163.com。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱;
- (5)本刊编辑部将在 15 天之内对来稿作出取舍,可通过电话或电子邮件查询稿件审查情况,如逾期未收到处理意见,作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用,本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊。请勿一稿多投,否则后果自负。

电 话: (028)87555677 87555634 传 真: (028)87538378