

机会路由中一种候选节点数量估计方法

姚金宝 张新有 邢焕来

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 611756)

摘要 针对机会路由中候选节点数量过多的问题,提出一种基于距离的候选节点数量估计方法(DBNCE)。该方法根据当前节点到目的节点的距离,结合网络密度、当前节点邻居节点的数量等因素,为参与数据包转发的每个节点设置相应数量的候选节点。仿真结果表明,在机会路由中应用该方法,能够在保证数据传输成功率的基础上,有效地减少网络中候选节点的数量,从而提升网络的性能。

关键词 机会路由,期望传输次数,候选节点,平均候选节点数量

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.019

Estimation Method of Number of Candidate Nodes in Opportunistic Routing

YAO Jin-bao ZHANG Xin-you XING Huan-lai

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract Because the number of candidate nodes in opportunistic routing is too large, this paper proposed an estimation method of the number of candidate nodes based on distance (DBNCE). This method is used to set the number of candidate nodes for each node, which participates in forwarding data package according to the distance between the current node and the destination node, combining with network density and the number of neighbor nodes in current node. Simulation results show that using DBNCE in opportunistic routing will reduce the number of candidate nodes effectively while guarantee the success rate of data transmission, and improve the performance of the network.

Keywords Opportunistic routing, Expected number of transmissions, Candidate nodes, Mean number of candidate nodes

1 引言

机会路由^[1-3]的概念首先由 MIT 的研究者 Biswas 等人在 2004 年提出,近年来逐渐成为研究的热点。与传统无线路由协议^[4,5]相比,机会路由用候选节点集来代替传统路由单一固定的下一跳节点来转发数据包,候选节点集中收到数据包的中间候选节点根据自身的优先级和所掌握的当前网络拓扑信息智能地进行判断,各自决定是否作为下一跳路由节点对收到的数据包进行转发。机会路由技术能够充分利用无线信道特有的广播特性以及多路径传输提供的分集增益来提高无线多跳网络的吞吐量和可靠性,弥补了传统无线路由协议的不足。

ExOR^[6]是最先提出的机会路由协议,它是一个以端到端最短路径的 ETX^[7]值(期望传输次数)作为度量的机会路由算法。之后,在 ExOR 的基础上又提出了各种机会路由协议。文献[8]提出一种基于端到端迭代策略的 LCOR 协议,这是最先提出的基于迭代算法的机会路由协议,作为对 ExOR 协议的改进。文献[9]提出一种基于网络编码策略的 MORE 协议,将机会路由与网络编码两个研究领域有效地结合起来。国内方面,文献[10]提出一种以多路径期望传输次数为路由度量的候选节点选择算法,减少了数据包的平均传

输次数,增加了数据报文的成功传输率。文献[11]提出一种反馈式机会路由(FOR)算法,该算法采用基于 EPDTX 指标的候选节点集产生策略,有效地减少了数据包重传次数。文献[12]提出一种分布式联合候选节点选择和速率分配的多流机会路由算法,该算法迭代进行流速率分配,并在速率分配过程中完成候选节点选择,提高了网络的吞吐量。

上述各种关于机会路由的研究主要侧重于候选节点的选择方式问题,但是并没有考虑到如何优化候选节点数量的问题。一般的做法是,在传输开始之前,根据对网络状况的评估,为网络中所有节点设置一个共同的候选节点数量最大值 MNCand,即每个参与转发的节点在选择候选节点时,在数量不超过 MNCand 的情况下,只要有符合该节点候选节点条件的节点,都要被加入到其候选节点集中。这样带来的问题是,某些节点可能只需要少量的候选节点就可以以很高的传输效率完成转发任务,但是根据算法的规定,还需要加入其他的很少参与转发的候选节点,虽然数量更多的候选节点可以提高转发成功率,但是较多的候选节点在转发数据时难以协调,会产生更多的控制开销,降低带宽利用率。因此,在不影响转发成功率的前提下应该考虑尽量减少候选节点的数量。文献[13]提出一种基于跳数的候选节点数量控制方法(D-MACE),但是没有考虑到链路的质量以及网络密度的影响,

到稿日期:2015-08-04 返修日期:2015-11-23 本文受国家自然科学基金项目(61401374)资助。

姚金宝(1988—),男,硕士生,主要研究方向为机会路由与网络编码,E-mail:baojy_5011@sina.com;张新有(1971—),男,副教授,主要研究方向为计算机网络、网络体系结构、Ad hoc 网络;邢焕来(1984—),男,副教授,主要研究方向为 SDN、无线网络。

应用场景有限。文献[14]提出一种基于有效范围的候选节点数量控制方法(HU-COP),但是候选范围的大小很难控制得恰到好处。如果候选范围过大,则达不到减少候选节点数量的效果;如果选择范围过小,某些节点可能无法选到足够数量的候选节点转发数据,影响转发效率,因此实用性不强。为此,本文提出一种基于距离(基于某种测度的最短路径上的跳数)的候选节点数量估计方法 DBNCE(Distance Based Number of Candidate Estimation),在保证传输效率的同时,为每个参与转发的节点设置数量合适的候选节点,减少网络中候选节点的数量。

2 问题描述

考虑如图 1 所示的简单网络,源节点 S 向目的节点 D 发送数据。为了说明问题,分别作了 3 组对比实验,结果如表 1 所列。在 Case-1 中, S 选择 3 个候选节点, A 和 B 分别选择 2 个候选节点,然后计算其 ETX 的值为 $ETX_1=2.055$,网络中候选节点的数量(Number of Candidate, NoC)为 $NoC_1=7$;在 Case-2 中,源节点 S 的候选节点数量不变,仍为 3 个,减少距离目的节点较近的节点 A 和 B 的候选节点的数量,分别选择 1 个候选节点,计算得到 $ETX_2=2.112$, $NoC_2=5$;在 Case-3 中,减少距离目的节点较远的源节点 S 的候选节点的数量,只将 A 节点作为其候选节点,而 A 节点仍选择两个候选节点,这样再计算得到 $ETX_3=2.389$, $NoC_3=3$ 。

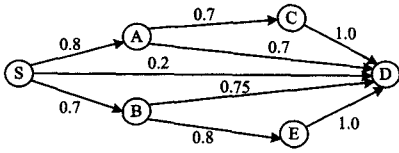


图 1 网络拓扑

表 1 3 组实验对比结果

	Case-1	Case-2	Case-3
S	A, B, D	A, B, D	A
A	C, D	D	C, D
B	E, D	D	
ETX	$ETX_1=2.055$	$ETX_2=2.112$	$ETX_3=2.389$
NoC	$NoC_1=7$	$NoC_2=5$	$NoC_3=3$

可以看出, Case-2 中 ETX 的值相对于 Case-1 增加了 2.7%, 而候选节点数量 NoC 减少了 28.6%。Case-3 中候选节点数量 NoC 相对于 Case-1 减少了 57.1%, 然而 ETX 的值增加了 16.3%, 虽然候选节点数量大幅度减少, 但是期望传输次数却增加过多。

由此可以推断, 在机会路由中, 对于距离目的节点较近的节点, 适当地减少其候选节点的数量对期望传输次数的影响较小; 对于距离目的节点较远的节点, 情况则相反。所以, 如果考虑减少某些候选节点的数量, 则应该尽量选择距离目的节点近的节点, 这是本文思路的一个出发点。

3 基于距离的候选节点数量估计方法

由于距离目的节点较近的节点到目的节点的传输成功率会更高, 并且由前面的分析 (Case-1 和 Case-2) 可知, 对于这些节点, 增加其候选节点数量并不会带来更多好处, 反而会增加控制开销。因此, 对于网络中不同位置的节点, 应该考虑为其设置不同数量的候选节点。

由此提出一种基于距离的候选节点数量估计方法 DBNCE。假设一个网络中有 n 个节点, s 和 d 分别为源节点和目的节点, D_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的距离。 $MNCand$ 表示在传输开始之前为网络中所有节点设定的候选节点数量最大值, 称为候选节点数量最大值。 $Neighbor(v)$ 表示节点 v 的所有邻居节点, $Ne(v)$ 表示节点 v 邻居节点的数量; $\overline{Neighbor(v)}$ 表示在节点 v 的所有邻居节点中, 在某种机会路由协议下 (例如 ExOR), 理论上可以选作节点 v 候选节点的邻居节点, 称为节点 v 的可选邻居节点, $\overline{Ne(v)}$ 表示节点 v 的可选邻居节点的数量。在选取 $MNCand$ 的值时, 一般来说应满足:

$$2 \leq MNCand \leq \max_{1 \leq i \leq n} (Ne(v_i)) \quad (1)$$

令 $NCand(v)$ 表示节点 v 的候选节点数量。下面给出 DBNCE 的计算方法: 当 $D_{ud} \neq 0$ 时, 令

$$N_{dist}(v) = \lfloor MNCand \times \frac{D_{ud}}{D_{sd}} \times \alpha + MNCand \times \beta \rfloor \quad (2)$$

$$\alpha + \beta = 1, 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$$

其中, $N_{dist}(v)$ 是根据节点 v 到目的节点的距离和参数 $MNCand$ 计算出的当前节点候选节点数量的初始值, 是节点 v 到目的节点距离的函数。 α 和 β 是权重因子, 可以根据不同密度的网络设置相应的值。如果网络密度较大, 则 α 的取值较大, 反之 α 的取值较小。通过将距离与网络密度两个因素考虑进来, 经过加权求和之后, 有

$$0 \leq N_{dist}(v) \leq MNCand \quad (3)$$

另外, 考虑到当 $N_{dist}(v)$ 的值很小 (在 0 到 1 之间) 时, 为了保证数据以机会路由的方式转发, 令

$$\overline{N_{dist}(v)} = \max(N_{dist}(v), 2) \quad (4)$$

最后, 节点 v 的候选节点必须在其可选邻居节点中选择, 即

$$\overline{N_{dist}(v)} \leq \overline{Ne(v)} \quad (5)$$

所以当 $D_{ud} \neq 0$ 时, 有

$$NCand(v) = \min(\overline{N_{dist}(v)}, \overline{Ne(v)}) \quad (6)$$

当 $D_{ud} = 0$ 时, 节点 v 为目的节点, 此时节点 v 没有候选节点, 即

$$NCand(v) = 0 \quad (7)$$

综合以上讨论, 给出最终计算公式:

$$NCand(v) = \begin{cases} \min(\overline{N_{dist}(v)}, \overline{Ne(v)}), & D_{ud} \neq 0 \\ 0, & D_{ud} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

使用上述 DBNCE 方法的 ExOR 算法的伪代码表示如下。

```

1.  $G_{cnt} \leftarrow$  current network topology
2.  $cost(v) \leftarrow ETX(v, d)$  in  $G_{cnt}$ 
3.  $C^{v,d} \leftarrow \emptyset$ 
4. while  $|C^{v,d}| < NCand(v)$  &  $(v, d)$  is connected in  $G_{cnt}$  do
5.    $u \leftarrow$  first node after  $v$  in the SPF( $v, d$ ) in  $G_{cnt}$ 
6.   if  $u = d$  then
7.      $C^{v,d} \leftarrow C^{v,d} \cup d$ 
8.      $cost(u) \leftarrow 0$ 
9.   else
10.     $cost(u) \leftarrow ETX(u, d)$  in  $G_{cnt}$ 
11.    if  $cost(u) < cost(v)$  then
12.       $C^{v,d} \leftarrow C^{v,d} \cup u$ 
13.    end if
14.  end if

```

15 end while

16 $C^{v,d} \leftarrow C^{v,d}$ ordered by cost

使用上述候选节点数量确定方法的 LCOR 及 MORE 协议类似上述算法描述,仅在候选节点选择方式上稍作修改。

4 性能分析

将 DBNCE 方法分别应用于 ExOR^[6], LCOR^[8] 以及 MORE^[9] 协议中,分别对平均候选节点数量和期望传输次数两项指标进行分析。接着将该方法与已提出的 HU-COP 和 D-MACE 两种控制候选节点数量的方法进行对比。仿真场景空间设定为范围为 500m * 500m 的一个方形空间,源节点、目的节点固定在对角线两端,其他中间节点随机分布在该区域内,数据包大小为 512Byte,MAC 层协议使用 802.11,关闭 RTS/CTS,节点通信半径为 100m。令 $ExOR(n)$ 表示在 ExOR 协议中,为每个节点设置的最大候选节点数量为 n ,即 $MNCand = n$, $ExOR-DBNCE(n)$ 表示在应用了 DBNCE 方法的 ExOR 协议中, $MNCand = n$ 。同样,为 LCOR 和 MORE 协议也设定同样意义的符号 $LCOR(n)$, $LCOR-DBNCE(n)$, $MORE(n)$, $MORE-DBNCE(n)$ 。另外,在网络规模小于 50 的情况下, α 取 0.7, β 取 0.3;在网络规模大于或等于 50 的情况下, α 取 0.9, β 取 0.1。

4.1 平均候选节点数量分析

本节就平均候选节点数量这一指标对应用了 DBNCE 方法的 ExOR 协议、LCOR 协议和 MORE 协议与没有应用该方法的版本进行对比。首先给出平均候选节点数量 (Mean Number of Candidate, MNC) 的定义:

$$MNC = \frac{\sum_{i=1}^N u_{i_Nc}}{N} \quad (9)$$

其中, u_{i_Nc} 表示节点 v_i 的候选节点数量, N 为网络中节点总数。图 2 示出当 $MNCand = 5$ 时,在不同网络规模下,网络中平均候选节点数量的变化情况。可以看到,应用了 DBNCE 的协议 ($ExOR-DBNCE(5)$, $LCOR-DBNCE(5)$, $MORE-DBNCE(5)$) 在平均候选节点数量这一指标上明显少于原始版本。

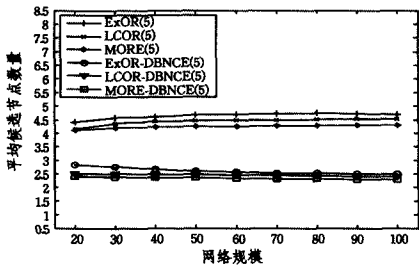


图 2 $MNCand = 5$ 时平均候选节点数量 MNC 与网络规模的关系

为使结果更精确,定义平均候选节点数量增益(减少率)为:

$$I_n = \frac{MNC_n - MNC_{DBNCE(n)}}{MNC_n} \quad (10)$$

其中, $MNC_{DBNCE(n)}$ 表示在应用了 DBNCE 的协议中,当 $MNCand = n$ 时,网络中平均候选节点的数量;同样, MNC_n 表示在没有应用 DBNCE 的协议中,当 $MNCand = n$ 时,网络中平均候选节点的数量。

图 3 显示了 I_n 在不同网络规模下的变化情况。可以看出,应用 DBNCE 方法可以有效地减少网络中平均候选节点的数量,并且随着网络规模的增大,效果更加明显。例如,当 $N = 20$ 时, I_n 的值约为 37%; 当 $N = 100$ 时, I_n 的值约为 48%。另外也可以看出, DBNCE 基本不受不同候选节点选择算法标准的影响。

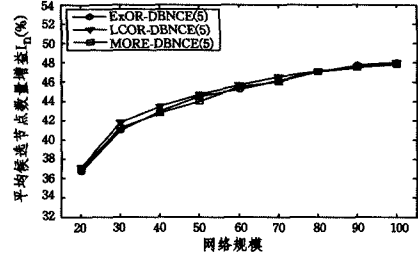


图 3 I_n 在不同网络规模下的变化情况

图 4 和图 5 显示了在网络规模一定的情况下 ($N = 20$ 和 $N = 100$), 平均候选节点数量在 $MNCand$ 取不同值时的变化情况。可以看出,在应用了 DBNCE 的协议中,平均候选节点数量明显少于原始版本;当 $MNCand$ 值增加时,平均候选节点数量的增加率比原始版本小很多,并且 I_n 的变化情况基本不受网络规模的影响。

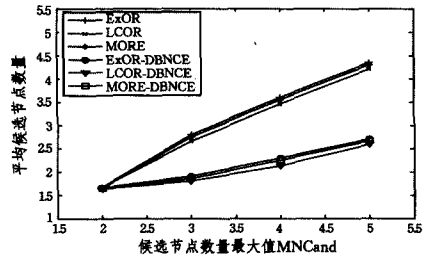


图 4 $N = 20$ 时平均候选节点数量 MNC 与 $MNCand$ 的关系

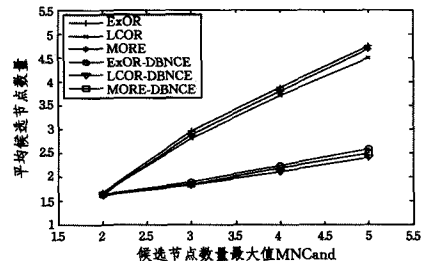


图 5 $N = 100$ 时平均候选节点数量 MNC 与 $MNCand$ 的关系

4.2 期望传输次数的分析

下面分析将 DBNCE 应用到 ExOR、LCOR 和 MORE 协议中后,源节点发送数据包到目的节点的期望传输次数的变化情况,并与未应用的版本进行对比。

图 6 为取 $MNCand$ 为固定值 5 时,两个版本协议的期望传输次数在不同网络规模下的变化情况。图 7 和图 8 显示了在网络中节点数分别固定为 $N = 20$ 和 $N = 100$ 时,期望传输次数在 $MNCand$ 取不同值时的变化情况。从图中可以看出,应用了 DBNCE 之后,两个协议的期望传输次数比未应用的版本高出 3.5% 左右,这是因为在应用了 DBNCE 之后,网络中候选节点的数量会减少,从而使期望传输次数略有增加;但是网络中候选节点的数量却大幅降低(约 45%),这样会大大减少网络中控制消息的数量。

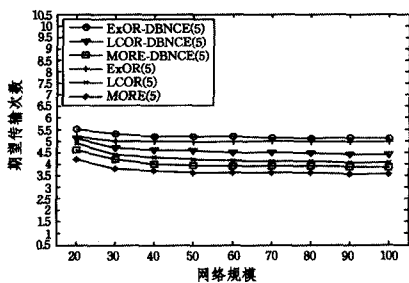


图6 $MNCand=5$ 时期望传输次数与网络规模的关系

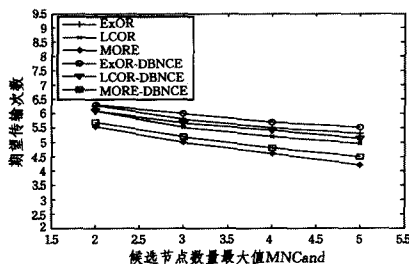


图7 $N=20$ 时期望传输次数与 $MNCand$ 的关系

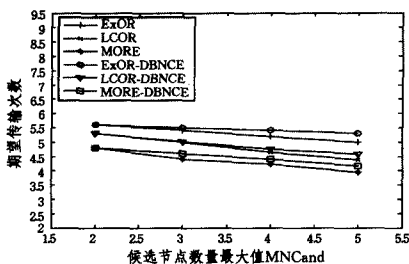


图8 $N=100$ 时期望传输次数与 $MNCand$ 的关系

4.3 与提出方法的对比分析

本节将提出的方法与已提出的 D-MACE 和 HU-COP 两种方法进行对比,以 ExOR 协议作为载体, $MNCand$ 的值为 5。图 9 和图 10 分别显示了 3 种方法在不同网络规模下,平均候选节点数量和期望传输次数的变化情况。可以看出,3 种方法在不同网络规模下期望传输次数相差无几,而在平均候选节点数量方面,DBNCE 方法明显优于另外两种方法。

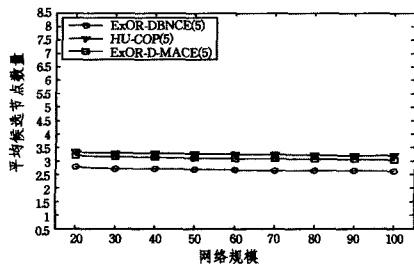


图9 3 种方法的平均候选节点数量在不同网络规模下的变化情况

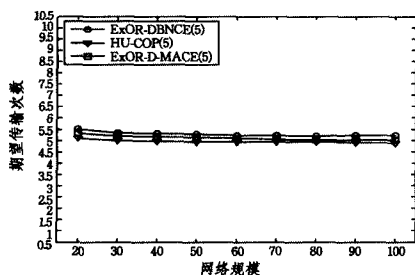


图10 3 种方法的期望传输次数在不同网络规模下的变化情况

结束语 本文首先分析了网络中不同位置的节点选取不同数量的候选节点对机会路由的影响,进而提出一种基于距离的候选节点数量估计方法 DBNCE。DBNCE 根据当前节点与目的节点的距离,综合考虑了网络密度以及节点邻居节点数量等因素来确定该节点候选节点的数量,距离目的节点越近的节点,其候选节点数量越少。仿真结果表明,DBNCE 方法性能优于已提出的两种方案。应用 DBNCE 能够在保证数据传输成功率的基础上有效地减少网络中候选节点的数量,从而减少候选节点之间协调过程中产生的控制开销,提升网络的性能。

参考文献

- [1] Tian Ke, Zhang Bao-xian, Ma Jian, et al. Opportunistic Routing Protocols for Wireless Multihop Networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(10): 2542-2553 (in Chinese)
田克, 张宝贤, 马建, 等. 无线多跳网络中的机会路由[J]. 软件学报, 2010, 21(10): 2542-2553
- [2] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multihop wireless networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(1): 69-74
- [3] Khan T F, Loyd B D, Jagadeesan D. A study on opportunistic routing in wireless mesh network[J]. International Research Journal of Computer Science, 2014, 1(3): 7-12
- [4] Perkins C, Bhagwat P. Highly dynamic Destination Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers[C]// Proceedings of ACM SIGCOMM. London: ACM Press, 1994: 234-244
- [5] Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing[C]// Kristine K, ed. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA), 1999: 90-100
- [6] Biswas S, Morris R. ExOR: Opportunistic Routing in Multi-hop Wireless Networks[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005. New York: ACM Press, 2005: 134-143
- [7] Couto D D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[C]// Proceedings of the ACM/IEEE MobiCom 2003 Washington: IEEE Computer Society Press, 2003: 134-146
- [8] Dubois F H, Grossglauser M, Vetterli M. Least-cost opportunistic routing[R]. Technical Report, LCAV-REPORT-2007-001, School of Computer and Communication Sciences, EPFL, 2007
- [9] Chachulski S, Jennings M, Katti S, et al. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2007. New York: ACM Press, 2007: 169-180
- [10] Song Yuan, Yao Xiang-hua, Zhang Xin-man. On algorithm of forwarding candidate set for opportunistic routing protocol in Ad hoc networks[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(12): 18-20 (in Chinese)
宋渊, 姚向华, 张新曼. Ad Hoc 网络机会路由协议转发候选集算法的研究[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(12): 18-20
- [11] Li Yang-hui, Zeng Zhi-wen, Chen Zhi-gang, et al. Feedback Opportunistic Routing in Multihop Wireless Networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(5): 900-903 (in Chinese)

(下转第 119 页)

进行仿真测试,并将仿真结果收集,结果如图 8 所示。图 8 示出在 4-PSK 调制方式下两个卫星通信场景在不同信噪比 SNR 下系统的 PEP 性能。需要说明的是两个卫星通信场景在仿真中处于相同位置的卫星节点参数设置相同,并假设信道均服从 Rayleigh 衰落且相互独立。可以发现,随着信噪比 SNR 增加,两个卫星通信场景的 PEP 仿真曲线与渐近线不断接近,当信噪比 SNR 达到 35dB 以后,两个卫星通信系统的 PEP 仿真曲线已非常靠近其渐近线,这也验证了 3.2 节中 PEP 分析的正确性。

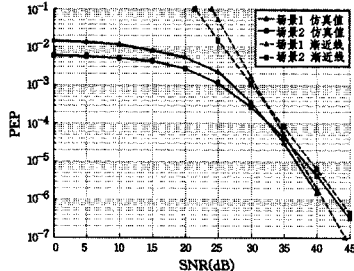


图 8 两个场景的成对差错概率

结束语 双层卫星通信系统是未来天基通信网络的重要组成部分。本文提出了一种基于复数域的源信息编码方案,在 LEO&MEO 双层卫星通信系统中,分析了两种不同应用场景下的编码方案,并给出了系统的输入输出模型。该方案在考虑卫星通信系统可靠性的基础上,结合复数域网络编码的特性,使得接收端仅依靠接收信号就可解析出源信号,从而提高了卫星网络的吞吐量。经仿真验证,在较高 SNR 的情况下,各方案下的吞吐量均接近上限值,本文提出的方案要明显优于路由和传统的 CFNC 方案;且 PEP 的仿真数值也与理论值接近,支持了 PEP 理论分析。该方案还可以扩展到 N 个地面用户,此时则需要更高的调制方案实现解调,系统具有较好的普适性。在下一步工作中,将更为深入地研究如何选取高性能系统增益的编码系数 θ 和 δ ,以及如何在实际卫星通信网络中实用化该方案。

参考文献

- [1] Wang R C, Rao Y, Zhen Y, et al. Satellite Communication Network Routing Technology and Simulation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010: 23-30 (in Chinese)
- [2] Hu J H, Li T, Wu S Q. Research of LEO & MEO double-layered satellite network with intersatellite links [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(4): 31-35 (in Chinese)
- [3] Kimura K, Inagaki K. Double layered inclined orbit constellation for advanced satellite communications network [J]. IEICE Transaction on Communications, 1997, 80(1): 93-102
- [4] Ahlswede R, Cai N, Li S Y, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [5] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008, 16(3): 497-510
- [6] Wang T, Giannakis G B. Complex Field Network Coding for Multiuser Cooperative Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(3): 561-571
- [7] Peng C, Zhang Q, Zhao M, et al. On the performance analysis of network-coded cooperation in wireless networks [C] // 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007). Alaska, USA: IEEE Press, 2007: 1460-1468
- [8] Wang J, Liu X, Chi K, et al. Complex field network-coded cooperation based on multi-user detection in wireless networks [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(2): 215-221
- [9] Wang G R, Li J, Luo J, et al. Research on the complex field network coding for the throughput improving of satellite communication systems [J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(8): 882-890 (in Chinese)
- [10] Sharifian S, Hashemitarab B, Gulliver T. Performance of Complex Field Network Coding in Multi-Way Relay Channels [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3100-3112
- [11] Eritmen K, Keskinöz M. Improving the Performance of Wireless Sensor Networks through Optimized Complex Field Network Coding [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(5): 2934-2946
- [12] Xin Y, Wang Z D, Giannakis G B. Space-Time Diversity Systems Based on Linear Constellation Precoding [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2000, 2(2): 1204-1216
- [13] Jing Y. Combination of MRC and Distributed Space-Time Coding in Networks with Multiple-Antenna Relays [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2010, 9(8): 2550-2559
- [14] Peng T, de Lamare R C, Schmeink A. Adaptive Distributed Space-Time Coding Based on Adjustable Code Matrices for Cooperative MIMO Relaying Systems [J]. IEEE Trans. on Communications, 2013, 61(7): 2692-2703
- [15] Ding Y, Hang J K, Wong K M. The Amplify-and-Forward Half-Duplex Cooperative System: Pairwise Error Probability and Precoder Design [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2007, 55(2): 605-617
- [16] Jeffrey A, Zwillinger D. Table of Integrals, Series, and Products (7th Edition) [M]. USA: Academic Press, 2000: 932-933
- [17] 王庚润, 李炯, 罗建, 等. 提高卫星通信系统吞吐量的复数域网络编码算法 [J]. 信号处理, 2014, 30(8): 882-890
- [18] 李阳辉, 曾志文, 陈志刚, 等. 多跳无线网络中反馈式机会路由研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(5): 900-903
- [19] He Shi-ming, Zhang Da-fang, Xie Kun, et al. Opportunistic Routing for Multi-Flow in Wireless Mesh Networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(5): 1004-1008 (in Chinese)
- [20] 何施茗, 张大方, 谢鲲, 等. 多并发流无线网中的机会路由算法 [J]. 电子学报, 2014, 42(5): 1004-1008
- [21] Darehshoorzadeh A, Almulla M, Boukerche A, et al. On the Number of Candidates in Opportunistic Routing for Multi-hop Wireless Network [C] // Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access. New York: ACM Press, 2013: 9-16
- [22] Darehshoorzadeh A, Boukerche A. An Efficient Heuristic Candidate Selection Algorithm for Opportunistic Routing in Wireless Multihop Networks [C] // 2014 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC). 2014: 1-6

(上接第 106 页)

- [12] He Shi-ming, Zhang Da-fang, Xie Kun, et al. Opportunistic Routing for Multi-Flow in Wireless Mesh Networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(5): 1004-1008 (in Chinese)
- [13] 何施茗, 张大方, 谢鲲, 等. 多并发流无线网中的机会路由算法 [J]. 电子学报, 2014, 42(5): 1004-1008