

无线链路质量突变性感知的机会路由协议

许文浩 沈 航 白光伟

(南京工业大学计算机科学与技术学院 南京 211816)

摘 要 现有无线链路空间相关性感知的机会路由度量无法感知链路突变性。针对该问题,提出了能够同时感知无线链路空间相关性和突变性的机会路由测度 μ ETX。在此基础之上,提出了基于 μ ETX 的机会路由算法 ORALB。ORALB 充分利用了无线链路空间的相关性,选择相关性较低的节点作为转发节点集;同时又能感知无线链路突变性,避免了选择传输开销较高的无线链路。仿真结果表明,与其他相关机会路由相比,ORALB 可以有效减小数据包的传输开销,提高传输可靠性。

关键词 无线链路突变性,无线链路空间相关性,无线网络,机会路由

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.015

Link Burstiness-aware Opportunistic Routing Protocol in Wireless Networks

XU Wen-hao SHEN Hang BAI Guang-wei

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract The existing wireless link spatial correlation-based opportunistic routing metrics cannot perceive link burstiness. To address this problem, a burstiness-aware metric, called μ ETX, was proposed, and based on this, a new opportunistic routing algorithm (ORALB) was introduced for link correlated wireless network. ORALB sufficiently exploits wireless link correlation by choosing low correlated nodes as candidate forwarder set, meanwhile, it is a burstiness-aware opportunistic routing, which can avoid selecting wireless links with high-transmission cost. Simulation results show that, compared with other relevant routing protocols, ORALB performs more efficiently on decreasing average packets transmission cost and improving transmission reliability.

Keywords Wireless link burstiness, Wireless link spatial correlation, Wireless network, Opportunistic routing

1 引言

机会路由是由 Biswas 等提出的一种无线网络多跳路由^[1],其主要思想是在源节点向目的节点发送数据包的过程中选择一系列转发节点集(Forwarder List),并且为转发节点集中的每个节点分配优先权。源节点首先将数据包发送给第一跳转发节点集,再转发节点集中收到数据包并且具有高优先权的节点会将数据包继续转发到下一转发节点集,按此重复直到目的节点收到数据包。机会路由充分利用了无线信道的广播特性,提高了传输的可靠性和吞吐量。

相关研究表明,多种无线网络协议共享一个频段,比如 802.11b/g/n 和 802.15.4 都在 2.4GHz ISM 频段上,高功率无线网络(如 Wi-Fi)会对低功率无线网络(如 ZigBee)产生交叉干扰;此外,由于无线信号在传播过程中受障碍物的阻隔,因此具有相同发送节点的不同接收节点间的数据包接受情况是相关的,即链路空间相关性(Link Correlation)^[6]。针对该

问题,文献[11]分析了链路相关性对机会路由的影响,并提出了 cEAX 测度来优化转发节点集的选择,有效减少了数据包的传输开销;文献[12]进一步提出了链路相关性感知的路由协议 LCAOR,减少了从源节点到目的节点之间的数据包传输次数,获得了较高的包投递率,同时还解决了转发节点集中的节点数量受限的问题。

现有文献主要针对链路相关性问题进行机会路由的性能优化,并提出了多种相关性度量和基于此的机会路由协议,然而在链路突变环境中基于相关性的机会路由的研究成果较少。链路突变环境中,链路质量的变化更为复杂,对链路相关性的感知不同于在链路质量稳定的环境中,相应的路由协议无法直接应用到链路质量突变的环境。例如,文献[11]在假设链路质量不变的前提下,计算不同链路之间的相关性 cEAX;文献[12]提出的基于链路相关性的 LCAOR 协议虽有效地优化了路由性能,但未考虑链路质量突变的环境。

针对现有基于链路相关性的机会路由中的问题,本文在

到稿日期:2017-03-25 返修日期:2017-06-18 本文受国家自然科学基金项目(61502230,61073197),江苏省自然科学基金项目(BK20150960),江苏省普通高校自然科学研究项目(15KJB520015),中美计算机科学研究中心开放课题(KJR16078),江苏省六大高峰人才基金资助项目(第八批)资助。

许文浩(1992—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:njtxwh@njtech.edu.cn;沈航(1984—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等,E-mail:hshen@njtech.edu.cn;白光伟(1961—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为移动互联网、无线传感器网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等,E-mail:bai@njtech.edu.cn(通信作者)。

文献[11-12]的基础上提出了一种改进测度 μ ETX,其不但利用了不同链路之间的空间相关性,而且能够充分感知不同链路的突变性,从而进一步优化转发节点集的选择;在此基础上,提出了 ORALB 机会路由算法,以 μ ETX 为度量选择转发节点集,有效地提高了传输的可靠性,减少了传输开销。

本文第 2 节介绍研究背景;第 3 节描述研究问题;第 4 节提出路由度量 μ ETX 模型,并提出机会路由算法(ORALB);第 5 节通过仿真实验对算法性能进行分析评估;最后总结全文。

2 相关工作

机会路由中转发节点集的选择是一个重要课题,选择合适的转发节点集在很大程度上决定着是否可以获得更好的协议性能。现有的机会路由协议^[2-5]在计算 ETX 时假设具有相同发送节点的不同无线链路之间是相互独立的。然而研究表明,不同链路之间并不是相互独立的。文献[6]发现,在多个接收节点之间数据包的接收情况是相关的,并提出 k-factor 来测量不同链路之间的相关程度。此外,文献[7]提出 CPRP 来测量无线链路空间的相关性,并利用这种相关性解决了泛洪中的 ACK 风暴问题。以上链路相关性研究都基于数据包层面,文献[8-9]在此基础上利用无线链路物理层信噪比 SINR 进一步优化了 CPRP 的计算,可以更加精确地测量无线链路的相关性;文献[10]利用机器学习的方法将 SINR 用于测量链路相关性。在上述工作的基础之上,文献[11-12]利用链路相关性来提高机会路由性能,建立 cEAX 测度来优化转发节点的选择,进一步提出了相关性感知机会路由协议 LACOR,取得了较好的效果。

由于较强无线信号的交叉干扰,无线链路质量,尤其是低功率无线传感器网络的链路质量,在短时间内经常出现很大的波动,即无线链路质量突变性(Link Burstiness)^[13],这导致短时间内同一无线链路上数据包的接收或丢失情况具有一定的相关性。文献[14]针对该问题提出 β -factor 来量化这种相关性的强弱。

以上关于无线链路相关性和突变性的研究都是各自独立的,并没有一个路由度量能同时感知这两种链路特性。例如文献[12]在计算相关性感知路由测度 $ETX(s, F, d)$ 时,假设链路质量在一段时间内不变。文献[14]计算单条链路突变性度量 β 时,并未考虑不同链路之间的相关性。因此,本文在以上工作的基础之上提出了基于链路相关性的链路质量突变感知度量。相比于其他链路独立度量或相关性度量,该度量能有效地感知不稳定环境中链路质量的突变,进一步优化转发节点的选择,提高机会路由的性能。

3 研究问题

3.1 链路空间相关性对机会路由的影响

为了讨论链路相关性对机会路由的影响,考虑图 1 所示的场景。

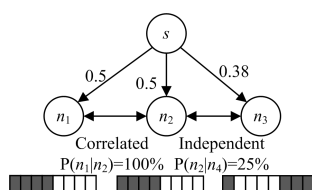


图 1 3 个备选节点的机会路由

Fig. 1 Opportunistic routing of three candidate nodes

其中 s 为源节点, d 为目的节点, $F_{s,d}$ 为 s 到 d 的下一跳转发节点集合, n_i 为具有优先权 i 的备选节点, p_{s,n_i} 为从源节点 s 到 n_i 的数据包投递率, $p_{n_i,s}$ 为从 n_i 到 s 的 ACK 投递率。假定转发节点集的节点数量不超过两个。

1) 链路独立

首先选择第一个转发节点,节点 n_1 或 n_2 收到一个数据包的 ETX 为 $1/p_{s,n_1} = 1/p_{s,n_2} = 1/0.5 = 2$, 节点 n_3 的 ETX 等于 $1/p_{s,n_3} = 1/0.38 = 2.63$, 显然节点 n_1 或节点 n_2 会被选为转发节点。然后考虑加入第二个节点,至少有一个备选转发节点从源节点 s 接收到数据包的 ETX 为:

$$ETX(S, F_{s,d}) = \frac{1}{1 - \prod_i (1 - p_{s,n_i})} \quad (1)$$

如果转发节点集合为 $\{n_1, n_2\}$, 则 $ETX = \frac{1}{1 - (1 - 0.5)(1 - 0.5)} = 1.33$; 如果转发节点集合为 $\{n_1, n_3\}$ 或 $\{n_2, n_3\}$, 则 $ETX = \frac{1}{1 - (1 - 0.5)(1 - 0.38)} = 1.45$ 。因此在假设链路独立的情况下,显然 $\{n_1, n_2\}$ 会被选作转发节点以减少传输开销。

2) 链路相关

如果不同链路之间是相关的,那么此时的 ETX 为:

$$ETX(S, F_{s,d}) = \frac{1}{1 - P(\overline{T_{s,n_1}}, \overline{T_{s,n_2}}, \dots, \overline{T_{s,n_i}})} \quad (2)$$

其中, $\overline{T_{s,n_i}}$ 为节点 n_i 在一次传送中的丢包。以图 1 为例,节点 n_1 和 n_2 是完全相关的,因此 $P(\overline{T_{s,n_1}}, \overline{T_{s,n_2}}) = 0.5$, 则 $\{n_1, n_2\}$ 作为转发节点集的 ETX 为 $\frac{1}{1 - 0.5} = 2$, 这比 $\{n_2, n_3\}$ 或 $\{n_1, n_3\}$ 作为转发节点集时的 $ETX = 1.45$ 大,因此在链路相关性模型下选择 $\{n_2, n_3\}$ 或 $\{n_1, n_3\}$ 更能减小传输开销。

由以上分析可以看出,链路相关性模型与链路独立模型的转发节点集有很大区别,因此在机会路由中链路相关性是必须考虑的一个重要因素。

3.2 链路质量突变性对机会路由的影响

3.1 节中对链路相关性的分析建立在每条链路质量在一段时间内不变的前提下,此时的数据包接收率(Packet Reception Rate, PRR)是该时间段内 PRR 的均值,反映了该时间段的链路质量。

为了讨论实际链路质量的变化,在有无线干扰的真实环境下搭建由 5 个节点组成的两跳无线网络,其中包含源节点 s 、目的节点 d 和 3 个转发节点。源节点 s 每隔 0.2s 向目的节点 d 发送数据包,实验持续 50min,然后统计各条无线链路的 PRR。图 2 给出了网络中同一链路在不同时间段内 PRR 的变化情况(黑色横线表示 PRR 均值)。

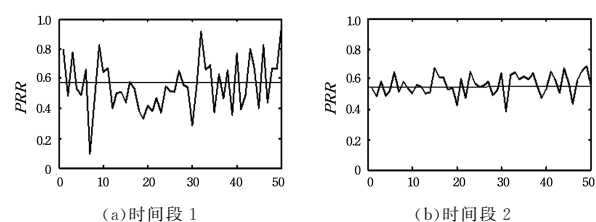


图 2 PRR 在不同时间段的变化情况

Fig. 2 Variation of PRR in different time intervals

从图 2 中可以看出,虽然两时间段内 PRR 的均值几乎相等,但不同时间段内的 PRR 的变化却有很大差异:在时间段 1

内的链路突变性很强,PRR 的波动很大,变化幅度为 0.09~0.92;而时间段 2 中 PRR 的变化相对稳定,变化幅度为 0.38~0.69,链路突变性较弱。

为了进一步分析 PRR 变化对 ETX 的影响,定义 n_{loss} 为成功收到数据包之前丢包的次数,则 $ETX = n_{loss} + 1$ 。图 3 给出了图 2 中两个时间段内数据包的 ETX 的累计分布函数,由图 3 可以看出:时间段 1 内只有约 40%的数据包的 ETX 为 1.08~1.72 且超过 50%的数据包的 ETX 大于 2;而时间段 2 内约 80%的数据包的 ETX 为 1.44~1.78 且超过 90%的数据包的 ETX 小于 2。其原因在于时间段 1 内链路质量很不稳定,PRR 在 50%以上的时间内都小于 0.5。相反,时间段 2 内链路质量突变性较弱,PRR 几乎都大于 0.5。如果以两时间段内 PRR 的均值来计算 ETX,则有 $ETX_1 = \frac{1}{0.58} = 1.72$, $ETX_2 = \frac{1}{0.56} = 1.78$,可以认为该链路在时间段 1 和时间段 2 内所有数据包的 ETX 几乎是相等的。这与图 3 反映的实际数据包的 ETX 有很大差异。

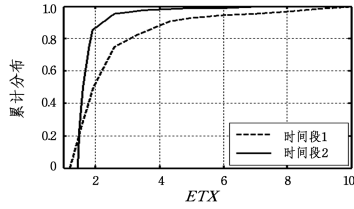


图 3 不同时间段内 ETX 的累计分布

Fig. 3 Cumulative distribution of ETX in different time intervals

由分析可知,在 3.1 节中以 PRR 均值计算 ETX 的方法不能反映链路突变环境中实际链路质量的变化,而且在机会路由中利用 ETX 选择转发节点时,需尽可能避免选择突变性较强的链路(见图 2(a))以减少传输开销。然而现有的基于无线链路空间相关性的机会路由在计算路由度量 ETX 时却无法感知单条链路的突变性,导致选择的转发节点不是最优的,进而影响机会路由的性能。基于此,很有必要建立链路质量突变环境中的链路相关性感知度量,进而提出基于此度量的机会路由协议。

4 机会路由度量及协议

本节首先描述了计算路由开销所需的网络模型,然后给出了机会路由开销 μETX 的数学模型,最后提出了基于 μETX 的机会路由算法。

4.1 网络模型

给定具有相同发送节点 s 的接收节点集合 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_k\}$,每个节点对应的数据包接收位图集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ 。

首先将 N 中各个节点的接收位图同时划分为大小都为 W 的 n 个子窗口,窗口集合定义为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。

其次计算窗口 $t_i \in T (i = 1, 2, \dots, n)$ 中接收节点 $N_j \in N (j = 1, 2, \dots, k)$ 的 PRR 值:

$$PRR = \frac{C(1)}{W} \quad (3)$$

其中, $C(1)$ 为窗口 t_i 中接收节点 N_j 位图中“1”的个数, W 为窗口大小。

然后将同一窗口 t_i 中所有节点的 PRR 值作为数组 PT_i ,

此时 $PT_i = [PRR_1, PRR_2, \dots, PRR_k]$, 计算每个 PRR 数组 PT_i 的概率值:

$$P = \frac{f(PT_i)}{n} \quad (4)$$

其中, $f(PT_i)$ 表示与 PRR 数组 PT_i 相同的数组出现的次数, n 为划分的窗口总数。

经过以上步骤,可以得到各个窗口对应的 PRR 数组 $\{PT_1, PT_2, \dots, PT_m\}$ 及其对应的概率 $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 其中 $m \leq n$, 即在计算路由度量 μETX 时所用到的链路模型。不同的 PRR 数组表示各条链路短时间内的 PRR 值, PRR 数组 PT_i 的概率反映了链路质量的突变性。

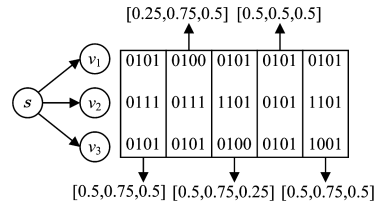


图 4 以窗口 $W = 4$ 划分数据包接收位图示意图

Fig. 4 Dividing packet reception bitmap with $W = 4$

以图 4 所示的场景为例,其中 s 为发送节点, n_1, n_2 和 n_3 为 3 个接收节点,接收位图中“1”和“0”分别代表数据包的接收与丢失。给定每个节点的数据包接收情况,首先将其划分为若干个窗口(每个窗口包含 4 个数据包),每个窗口可以得到一个 PRR 数组,例如第一个窗口的 PRR 数组为 $[0.75, 0.5, 0.5]$,表示在该窗口中 3 条链路的 PRR 值分别为 0.75, 0.5 和 0.5。然后计算各个 PRR 数组的概率,可以得到如表 1 所列的不同 PRR 数组的概率值。

表 1 不同 PRR 数组对应的概率值

Table 1 Different probabilities in different PRR tuples

概率值	PRR 数组
0.4	$[0.75, 0.5, 0.5]$
0.2	$[0.75, 0.5, 0.25]$
0.2	$[0.75, 0.25, 0.5]$
0.2	$[0.5, 0.5, 0.5]$

4.2 路由开销量化

给定转发节点集 $F = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$, 在链路相关性条件下,将从源节点到目的节点的期望传输次数定义为 $\mu ETX(s, F, d)$, 其计算公式如下:

$$\mu ETX(s, F, d) = \mu + \beta \quad (5)$$

其中, μ 表示源节点 s 向 F 中至少一个节点成功发送数据包且收到 ACK 消息的期望传输次数; β 表示 F 中收到数据包的节点向下一跳转发节点继续发送数据包所需的期望传输次数。

图 5 示出了以 3 个节点为例的网络拓扑图。

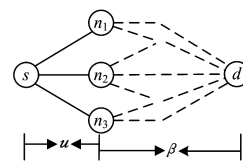


图 5 网络拓扑图

Fig. 5 Network topology

4.2.1 源节点到转发节点集的开销

将初始节点向第一跳转发节点发送数据包的 ETX 定义为 μ :

$$\mu = \frac{1}{p_r^s} \quad (6)$$

其中, p_r^s 为 F 中至少一个节点收到数据包的概率。因为每个节点的数据包接收位图被划分为不同的窗口, 所以可得:

$$p_r^s = \sum_{\forall t_i \in T} p(t_i) \sum_{k=1}^i (-1)^{k-1} P(n^k) \quad (7)$$

其中, $p(t_i)$ 表示 PRR 数组 t_i 的概率, $n^k \subset F = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ 是节点数目为 k 的任意转发节点集, $P(n^k)$ 是 k 个转发节点成功收到数据包并且返回 ACK 消息的概率。

当 $k=1$ 时, p_r^s 的计算公式为:

$$p_r^s = \sum_{\forall t_i \in T} p(t_i) P(n_j) \quad (8)$$

其中, $n_j \in F = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$, 此时 p_r^s 表示源节点 s 到 F 中各接收节点的 PRR, μ 为源节点 s 到各接收节点的 ETX。

当 $k>1$ 时, $P(n^k)$ 的计算公式为:

$$P(n^k) = \sum_{n^i \subset F} P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_i}) \prod_{i=1}^k p_{n_i,s} \quad (9)$$

其中, $p_{n_i,s}$ 表示源节点 s 成功收到转发节点 n_i 的 ACK 消息的概率。 $P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_i})$ 为节点 n_1, n_2, \dots, n_k 同时收到数据包的概率, 其值表示不同链路之间的相关程度。

在机会路由中, 要求转发节点集 F 中至少有一个节点收到数据包, 显然, 若 $P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_i})$ 值越小, 即节点之间的相关程度越低, 则节点间数据包接收情况的差异越大, F 中至少存在一个节点收到数据包的概率越大, 机会路由的传输开销也就越低。在图 6 所示的维恩图中, 总面积表示 3 个节点中至少一个节点收到数据包的概率, 相交部分的面积表示节点之间的相关程度。对比图 6(a) 和图 6(b) 可知, 若相交部分面积越小, 则总面积越大, 至少存在一个节点收到数据包的概率也就越大。

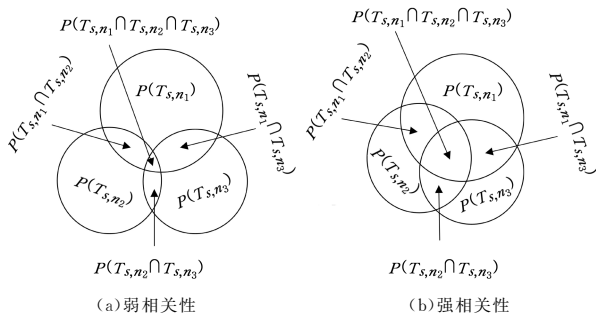


图 6 数据包接收情况的不同相关程度

Fig. 6 Different correlation degree of packet reception

假定划分窗口大小为 W , 式 (9) 中 $P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_i})$ 的计算公式如下:

$$P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_i}) = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W R_{n_1}(j) \& R_{n_2}(j) \& \dots \& R_{n_i}(j) \quad (10)$$

其中, $R_{n_i}(j)$ 为节点 n_i 在窗口 W 中的数据包接收位图, $R_{n_i}(j)=1$ 表示收到包; 反之, $R_{n_i}(j)=0$ 。以图 4 中的窗口一为例:

$$P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_3}) = \frac{1}{4} (0 \& 0 \& 0 + 1 \& 1 \& 1 \& 1 + 1 \& 0 \& 0 + 1 \& 1 \& 0) = 50\%,$$

表示此时节点 n_1, n_2 和 n_3 之间的相关程度为 0.5。

4.2.2 转发节点集到下一跳的开销

对于已经收到数据包的转发节点, 将其继续向下一跳转

发节点发送数据包的 ETX 定义为 β , 计算公式如下:

$$\beta = \mu_0 \sum_{j=1}^i (\mu ETX(n_j, F, d) \cdot (1 - \lambda_j)) \quad (11)$$

当式 (9) 中源节点 s 不需要收到节点 n_j 的 ACK 消息时, 可以得到:

$$P_0(n^k) = \sum_{n^i \subset F} P(T_{s,n_1}, T_{s,n_2}, \dots, T_{s,n_i}) \quad (12)$$

此时,

$$p_{0_r}^s = \sum_{\forall t_i \in T} p(t_i) \sum_{k=1}^i (-1)^{k-1} P_0(n^k) \quad (13)$$

则式 (11) 中 $\mu_0 = \frac{1}{p_{0_r}^s}$, λ_j 表示备选转发节点 n_j 不会转发数据包的概率, 在计算 λ_j 时考虑以下 3 种情形:

- 1) 节点 n_j 丢包;
- 2) 节点 n_j 直接收到来自更高优先级节点的 ACK 消息;
- 3) 节点 n_j 收到来自低优先级节点的间接 ACK 消息。

相比于前两种情况, 第三种情形发生的概率非常低, 在计算 λ_j 时可以忽略不计, 因此 λ_j 的计算公式为:

$$\lambda_j = (1 - p_{s,n_j}) + \sum_{k=1}^{\omega < j} (-1)^{k-1} P(n^k) \quad (14)$$

其中, $(1 - p_{s,n_j})$ 表示第一种情形; $\sum_{k=1}^{\omega < j} (-1)^{k-1} P(n^k)$ 表示第二种情形, 即转发节点收到了更高优先级节点的直接 ACK 消息。

4.3 路由协议的设计

转发节点集的选择是机会路由协议中非常关键的部分, 本节提出基于 μ ETX 的转发节点选择算法和整体的路由协议 ORALB 的设计。算法中的符号及注释如表 2 所列。

表 2 符号定义

Table 2 Definition of variables

符号	说明
num	跳数
$N(x)$	x 的邻居节点集合
I_x	初始节点集
F_{num}	第 num 跳的转发节点集
$ETX(x, n)$	节点 x 到节点 n 的期望传输次数
$n_{F_{num}}$	F_{num} 中的任意节点
α	ETX 阈值
x	转发节点

协议的主要步骤如下:

- 1) 设定初始转发节点集 F_1 为源节点 s , 从源节点到目的节点跳数的初始值为 1 ($num=1$)。
 - 2) 在 x 的下一跳邻居节点集合中, 将所有 ETX 值小于阈值 α 的节点加入初始节点集合 I_x 中, I_x 中不能包含已经加入原来转发节点集的节点 (用式 (6) 和式 (8) 计算 ETX)。
 - 3) 从节点集 I_x 中选出 i 个节点组成集合 F , F 中的节点有多种组合形式, 计算 $\mu ETX(s, F, d)$ (见式 (5))。
 - 4) $num=num+1$, 然后选择 $\mu ETX(s, F, d)$ 值最小的 F 作为第 num 跳的转发节点集 F_{num} , 将 F 和 I_x 设置为空集。
 - 5) 在 F_{num} 中收到数据包且有最高优先转发权限的节点将会成为第 num 跳转发节点, $ETX(x, n_{F_{num}})$ 值越小, $n_{F_{num}}$ ($n_{F_{num}} \in F_{num}$) 优先权越高。
 - 6) 重复步骤 2) 至步骤 5), 直到 $d \in F_{num}$ 。 $F_2, F_3, \dots, F_{num-1}$ 为源节点到目的节点的多跳转发节点集。
- 算法伪代码如算法 1 所示。

算法 1 ORALB 中转发节点集的选择

```

1.  $F_1 = \{s\}; F_2 = F_3 = \dots = F_n = \emptyset; x = s; \text{num} = 1;$ 
2. while  $d \notin F_{\text{num}};$ 
3.    $I_x \leftarrow \emptyset; F \leftarrow \emptyset;$ 
4.   for all  $n \in N(x)$  do
5.     if  $\text{ETX}(n, d) < \text{ETX}(x, d)$  and  $\text{ETX}(x, n) < \alpha$ 
6.        $I_x \leftarrow I_x \cup n;$ 
7.     end if
8.   end for
9.   for all  $F \subset I_x$  do //  $F = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ 
10.     $\text{num} = \text{num} + 1;$ 
11.     $F_{\text{num}} \leftarrow \arg \min \mu \text{ETX}(s, F, d);$ 
12.     $x = \arg \min \text{ETX}(x, n_{F_{\text{num}}});$ 
13.  end for
14. end while
    
```

5 仿真实验与结果分析

5.1 实验设计

为了产生相关性链路,本文采用了相关性伯努利随机变量取样算法^[15],该算法的输入是联合伯努利分布的均值和协方差矩阵。然后使用二值化多元高斯分布对多元伯努利分布进行采样,最终产生一系列具有相关性的二值序列。

使用产生的数据在 OMNET++ 平台上的 Castalia 模型中进行仿真实验。在一个 50 m × 50 m 的通信范围内随机分布 50 个节点,节点的有效通信距离为 30 m,任意节点间的 PRR 随节点距离的增加而减小,并且受其他节点的干扰。单个数据包的大小为 512 byte,数据包每 200 ms 传输一次,源节点向目的节点发送 5000 个数据包。

本节对 ExOR, LACOR 以及 ORALB 3 种协议进行模拟仿真,设计了 3 组实验来分别对数据包传输次数和端到端投递率进行评估分析。其中,第一组实验分析 3 种协议数据包传输次数的变化情况;第二组实验针对不同跳数下端到端的包投递率进行对比研究;第三组实验分析在不同投递率情况下 3 种协议的平均数据包传输次数的变化趋势。

5.2 结果分析

1) 数据包传输次数

图 7(a)给出了 3 种路由协议的数据包传输次数累积分布的对比情况。

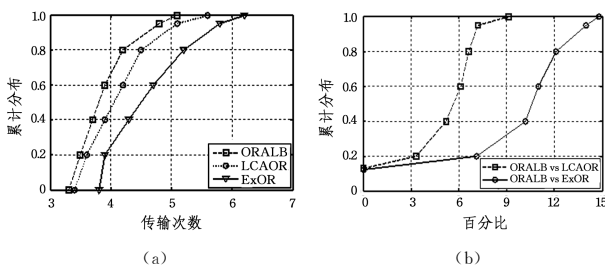


图 7 数据包传输次数及其降低百分比累积分布的对比情况
Fig. 7 CDF comparison of packet transmission counts and its degradation percentage

从图中可以看出,ORALB 协议和 LACOR 协议的传输开销明显小于 ExOR 协议,原因在于二者均利用无线链路相关性来选择合适的转发节点,从而减少了传输次数;ORALB 协

议的传输开销小于 LACOR 协议,这是因为 ORALB 协议不但有效利用了无线链路的空空间相关性,而且能够充分感知链路质量的突变性,从而进一步优化了转发节点的选择,降低了传输开销;图 7(b)给出了 ORALB 协议相对于 LACOR 协议和 ExOR 协议的传输开销降低百分比的累计分布情况。从图中可知,对于 80% 的数据包,ORALB 协议比 ExOR 协议减少了 12% 的传输开销,比 LACOR 协议减少了 6.5% 的传输开销。

2) 端到端投递率

图 8 给出了对于不同跳数,采用 3 种协议时源节点到目的节点的数据包投递率变化的对比情况。由图 8 可以看出,随着跳数的增加,3 种协议的包投递率均减小。在跳数小于 4 时,ORALB 协议的平均投递率比 LACOR 协议和 ExOR 协议分别高出 14% 和 38%;在跳数为 5 时,ORALB 协议的包投递率提升相对于 LACOR 协议有所下降,原因在于当链路质量突变性较弱时,相比于 LACOR 协议,ORALB 协议的转发节点优化空间缩小,其选择的转发节点与 LACOR 几乎相同。但相对于 ExOR 协议,ORALB 协议的数据包投递率提升稳定在 38% 左右,原因在于 ORALB 协议不仅感知了链路的空空间相关性,还将链路突变性加入到了转发节点集选择测度 μETX 中,进一步优化了转发节点的选择,有效提高了数据包的投递率。

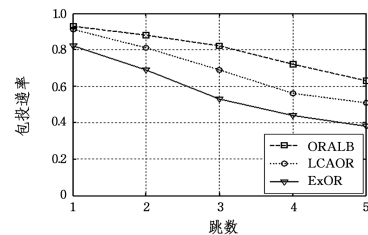


图 8 不同跳数下包投递率变化的对比情况
Fig. 8 Comparison of PRR variation with different hops

3) 传输开销与数据包投递率的关系

图 9 给出了 3 种协议的平均数据包传输次数随投递率变化的对比情况。

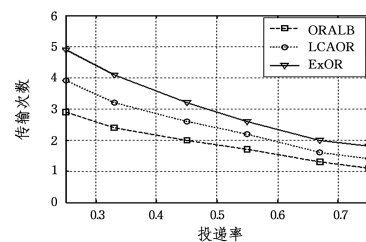


图 9 不同投递率下传输次数变化的对比情况
Fig. 9 Comparison of transmission counts variation with different PRR

由图 9 可知,在投递率固定不变时,ORALB 协议的传输开销总是小于其他两种协议;在数据包投递率从 0.25 变化到 0.5 时,相对于 LACOR 协议和 ExOR 协议,ORALB 协议分别节省了 24% 和 41% 的传输开销;随着数据包投递率逐渐增大,ORALB 协议与其他两种协议的传输开销差距逐渐变小,在投递率为 0.75 时,相对于 LACOR 协议和 ExOR 协议,ORALB 协议节省的传输开销分别只有 2.2% 和 3.3%,3 种

协议的平均传输开销相差很小,这是因为在数据包投递率较高时,接收节点几乎都能收到数据包,节点间的相关程度很高,导致链路相关性感知的机会路由 LCAOR 的性能下降,而且此时链路质量相对稳定,链路质量突变的概率变小,链路突变性感知的 ORALB 协议相对 LACOR 协议和 ExOR 协议的优势逐渐变小。但总体来讲,ORALB 协议的性能优于其他两种协议。

结束语 本文在无线链路相关性感知机会路由的基础上,充分利用了无线链路的突变性,提出了改进的机会路由测度 μ ETX。 μ ETX 不仅是链路相关性感知的度量,而且能在链路不稳定的环境中充分感知链路的突变性。基于此,提出了基于 μ ETX 的机会路由算法 ORALB。ORALB 在每跳数据包传输过程中以 μ ETX 来选择转发节点集,由于 μ ETX 可以同时感知链路相关性和突变性,因此 ORALB 优化了转发节点的选择,避免了选择传输开销较高的转发节点。实验结果表明,与其他相关性感知机会路由协议或一般机会路由协议相比,ORALB 协议可以有效减少传输开销,提高数据传输的可靠性。

参考文献

- [1] BISWAS S, MORRIS R. Opportunistic routing in multi-hop wireless networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(1): 69-74.
- [2] BISWAS S, MORRIS R. ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(4): 133-144.
- [3] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S, et al. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing [M]. ACM, 2007.
- [4] LI Y, CHEN W, ZHANG Z L. Optimal forwarder list selection in opportunistic routing [C] // 2009 IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. IEEE, 2009: 670-675.
- [5] DUBOIS-FERRIERE H, GROSSGLAUSER M, VETTERLI M, et al. Least-cost anypath routing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(2): 333-346.
- [6] SRINIVASAN K, JAIN M, CHOI J I, et al. The κ factor: inferring protocol performance using inter-link reception correlation [C] // Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2010: 317-328.
- [7] ZHU T, ZHONG Z, HE T, et al. Exploring Link Correlation for Efficient Flooding in Wireless Sensor Networks [C] // NSDI. 2010: 1-15.
- [8] ZHAO Z, DONG W, GUAN G, et al. Modeling link correlation in low-power wireless networks [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015: 990-998.
- [9] ZHAO Z W, XU X H, DONG W, et al. An Accurate Link Correlation Estimator for Improving Wireless Protocol Performance [J]. Sensors, 2015, 15(2): 4273-4290.
- [10] KIM S M, WANG S, HE T. Exploiting causes and effects of wireless link correlation for better performance [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015: 379-387.
- [11] BASALAMAH A, KIM S M, GUO S, et al. Link correlation aware opportunistic routing [C] // 2015 IEEE Conference on INFOCOM. IEEE, 2012: 3036-3040.
- [12] WANG S, BASALAMAH A, KIM S M, et al. Link-Correlation-Aware Opportunistic Routing in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 47.
- [13] SRINIVASAN K, DUTTA P, TAVAKOLI A, et al. Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks [C] // 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2006: 419-420.
- [14] SRINIVASAN K, KAZANDJIEVA M A, AGARWAL S, et al. The β -factor: measuring wireless link burstiness [C] // 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. ACM, 2008: 29-42.
- [15] MACKE J H, BERENS P, ECKER A S, et al. Generating spike trains with specified correlation coefficients [J]. Neural Computation, 2009, 21(2): 397-423.
- [16] DAREHSHOORZADEH L, CERDA-ALABERN, PLA V. Modeling and comparison of candidate selection algorithms in opportunistic routing [J]. Computer Networks, 2011, 55(13): 2886-2898.
- [17] KIM S M, WANG S, HE T. cETX: Incorporating Spatiotemporal Correlation for Better Wireless Networking [C] // 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2015: 323-336.
- [18] WANG S, BASALAMAH A, KIM S M, et al. A Unified Metric for Correlated Diversity in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6215-6227.
- [7] (上接第 82 页)
- [7] LIU J, LI J, YU P D. Design of Double Repeat Accumulate Codes Based on Belief Propagation Decoding [J]. Journal on Communications, 2015, 36(6): 205-210. (in Chinese)
刘骏, 李静, 于沛东. 一种 Turbo 码随机交织器的迭代估计方法 [J]. 通信学报, 2015, 36(6): 205-210.
- [8] QIAN M. The Analysis of the Design and Performance of an Interleaver Based on Chaotic Pseudo Random Sequence [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. (in Chinese)
钱明. 基于混沌伪随机序列的交织器设计及性能分析 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [9] ZHANG J Y, JIN M L. An Improved De-coding Algorithm of Repeat Accumulate (RA) Codes [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2616-2621. (in Chinese)
张敬毅, 金明录. 一种改进的 RA 译码算法 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2616-2621.
- [10] WEN W, XIAO E J, ZHU L X. Interleaver Design for Qary Regular RA Codes Based on Improved PEG Algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(2): 196-199. (in Chinese)
文武, 肖而靖, 朱联祥. 基于改进 PEG 算法的多元 RA 码交织器设计 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2010, 22(2): 196-199.