

Dk-hop: 一个有向 k 跳无线干扰模型

徐朝农^{1,2} 黄长喜³ 胡存钢³ 刘勇⁴

摘要 无线链路调度算法的性能直接受无线干扰模型准确性的影响. 尽管由于其简单性而被广泛采用, k 跳干扰模型并不能准确建模真实的无线干扰特性, 从而导致链路调度算法的理论性能与实际性能之间存在很大差异. 本文考虑无线传输方向性因素对干扰的影响, 提出了 Dk-hop 无线干扰模型. 该模型有效排除了 k 跳隐藏链路, 从而更准确地对无线干扰进行了建模. 理论分析表明, 当 k 值不超过 $IR + 1$ 时 (IR 为载波感知距离和传输距离之比), Dk-hop 比 k 跳干扰模型更为准确, 且仍然保持了 k 跳干扰模型的简单性. 为与真实的无线干扰保持接近, k 的合理取值范围应为 $[IR - 2, IR + 1]$.

关键词 无线干扰, 链路调度, 干扰模型, 隐藏终端, 暴露终端

引用格式 徐朝农, 黄长喜, 胡存钢, 刘勇. Dk-hop: 一个有向 k 跳无线干扰模型. 自动化学报, 2012, 38(6): 1042–1050

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01042

Dk-hop: A Directed k -hop Wireless Interference Model

XU Chao-Nong^{1,2} HUANG Chang-Xi³ HU Cun-Gang³ LIU Yong⁴

Abstract The performance of link scheduling algorithm is greatly influenced by the accuracy of wireless interference model. Despite its simplicity and popularity, the k -hop interference model can not model real interference accurately, which results in the great gap between theoretic and realistic performances of the link scheduling algorithm. Motivated by the fact that wireless interference has great relationship with transmission direction, this paper proposes the Dk-hop interference model. Excluding the k -hop hidden link, Dk-hop excludes the k -hop hidden link and is more realistic than the k -hop interference model, with its simplicity still being kept. Theoretical analysis reveals that Dk-hop is closer to reality than the k -hop interference model if k is no greater than $IR + 1$, where IR is the ratio of carrier sensing range to transmission range. Furthermore, to keep close with the realistic wireless interference, valid range of the value of k for Dk-hop is deduced as $[IR - 2, IR + 1]$.

Key words Wireless interference, link scheduling, interference model, hidden terminal, exposed terminal

Citation Xu Chao-Nong, Huang Chang-Xi, Hu Cun-Gang, Liu Yong. Dk-hop: a directed k -hop wireless interference model. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(6): 1042–1050

收稿日期 2010-12-21 录用日期 2012-02-24
Manuscript received December 21, 2010; accepted February 24, 2012

国家自然科学基金 (61003307, 61173132), 国家科技重大专项 (2010ZX03006-002, 2010ZX03006-007), 中国科学院计算机系统结构重点实验室开放课题 (ICT-ARCH200901), 中国互联网网络信息中心互联网基础技术开放实验室开放课题 (2012-N03) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61003307, 61173132), National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2010ZX03006-002, 2010ZX03006-007), Open Project of the Key Laboratory of Computer System and Architecture, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences (ICT-ARCH200901), and Open Project of the Open Laboratory for the Internet Technology, China Internet Network Information Center (2012-N03)

本文责任编辑 韩崇昭

Recommended by Associate Editor HAN Chong-Zhao

1. 中国石油大学 (北京) 北京 102249 2. 中国科学院计算机系统结构重点实验室 北京 100190 3. 合肥工业大学 合肥 230009 4. 海军装备研究院 北京 100161

1. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249
2. State Key Laboratory of Computer Architecture, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
3. Hefei University of Technology, Hefei 230009
4. Naval Academy of Armament, Beijing 100161

近年, 无线通信技术有了极大发展. 然而, 相对有线通信, 由于其带宽有限, 无线通信的应用场合仍然受限^[1]. 造成无线带宽有限的因素之一是无线干扰的存在, 无线干扰导致物理层、MAC (Media access control) 层、网络层和传输层之间的耦合, 因而基于跨层优化 (Cross-layer optimization) 的网络设计方法成为研究的热点^[2].

然而最近的研究发现, 网络的跨层优化设计问题可以分解为多个单层协议设计问题, 并且这些单层协议设计问题通过一些网络参数, 如队列长度、传输延迟等发生耦合^[3-4]. 因此, 无线网络的单层协议优化仍有很大意义. 本文则聚焦于 MAC 层的设计.

无线干扰模型是各种 MAC 层算法和协议的基础. 例如, 链路调度算法总是在干扰模型的基础上寻找出存在冲撞的传输, 随后将这些冲撞传输安排在不同的时槽进行, 以避免无线冲撞. 显然, 干扰模型的准确性在很大程度上决定了链路调度算法的带宽性能.

当前, 物理干扰模型 (Physical interference

model) 是最为准确的无线干扰模型^[5]. 但由于其相关参数均为时变且位置相关的^[6], 难以准确在线获得, 因此在无线网络领域中的应用受限. k 跳干扰模型则因为其简单性和直观性得到广泛应用. 在 k 跳干扰模型下, 当两个链路的跳距 (Hop distance) 不小于 k 时, 它们之间不会产生冲撞^[7]. 现实中很多被广泛使用的无线干扰模型都是 k 跳干扰模型的特例. 例如, 在蓝牙和跳频 CDMA 无线系统中使用的主干扰模型 (Primary interference model) 是 1 跳干扰模型、在 IEEE 802.11 直序扩频 (Direct sequence spread spectrum) 网络中使用的次干扰模型 (Secondary interference model) 是 2 跳干扰模型. 这些例子充分表明了 k 跳干扰模型的实用性^[8]. 然而, k 跳干扰模型也存在着严重缺陷: 由于干扰的存在与否与节点间的距离直接相关, 而节点间的跳距并不能准确表征它们的物理距离, 因此 k 跳干扰模型和真实情况存在很大差异, 进而导致运行在其上的各种调度算法的理论性能和实际性能之间存在较大差异. 总之, 找到既简单又贴近真实的无线干扰模型成为目前迫切需要解决的问题.

本文的研究源于以下三点: 1) k 跳干扰模型不能排除 k 跳隐藏终端问题^[9]; 2) 在 k 跳干扰模型下, k 跳隐藏终端能够造成无线冲撞; 3) 如果所有传输的方向已知, 则至少一部分 k 跳隐藏终端可被发现并排除, 有利于提高传输带宽. 基于此, 我们在 k 跳干扰模型的基础上, 考虑了传输的方向性, 提出 k 跳隐藏链路和 k 跳暴露链路的概念. 进一步提出了一个新的干扰模型 Dk-hop (Directed k -hop interference model). Dk-hop 排除了由 k 跳隐藏链路所引发的无线冲撞. 理论分析表明, 相对 k 跳干扰模型, 当 k 值不超过 $IR+1$ 时 (其中 IR 是载波感知距离和传输距离之比), Dk-hop 比 k 跳干扰模型更准确地对无线干扰进行建模. 从而, 任何在基于 Dk-hop 模型下的链路调度算法能取得比在 k 跳干扰模型下更大的带宽. 为了与真实的无线干扰模型保持一致, 参数 k 的合理取值范围应为 $[IR-2, IR+1]$. 仿真结果验证了该结论.

对于已知的任何链路调度算法, 如 MWS (Maximum weight scheduling)^[10]、GMS (Greedy maximal scheduling)^[7]、LGS (Local greedy scheduling)^[11] 等, 无论分布式还是集中式链路调度算法, 在算法运行过程中, 队列长度信息是必须要获取的. 因此, 尽管与 k 跳干扰模型相比, Dk-hop 模型需要额外的传输方向信息, 但这些信息完全可以捎带在队列长度报文中. 也即 Dk-hop 干扰模型的建立过程并不需要增加额外的报文开销.

本文结构如下: 第 1 节介绍涉及的网络和干扰模型, 第 2 节提出 Dk-hop 干扰模型, 第 3 节推导参数 k 的合理范围值, 第 4 节为仿真实验, 第 5 节为相关工作, 最后为结论和未来的工作.

1 网络与干扰模型

1.1 网络模型

一个无线网络可以用一个有向图 $G_N = (V_N, E_N)$ 表示, 其中, V_N 是节点集, E_N 是有向链路集. $\vec{ij} \in E_N$ 表示节点 j 处于节点 i 的传输距离 r_C 内, 即在不受到任何干扰的情况下, 节点 j 能正确收到节点 i 的报文, 也可表示为节点 j 处的信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 不小于接收阈值 β_C .

$$\frac{G_{ij}P_i}{\eta_j} \geq \beta_C \quad (1)$$

其中, η_j 是节点 j 的热噪声, P_i 是节点 i 的传输功率, G_{ij} 是从节点 i 到节点 j 的传播增益. 传播增益和节点间的距离紧密相关, 一般有:

$$G_{ij} = \frac{1}{d^\alpha(i, j)}$$

其中, $d(i, j)$ 是节点 i 到节点 j 的传播距离, α 是路径损耗参数, 对于室外环境, $2 < \alpha \leq 5$.

类似地, 如果节点 j 处的 SNR 在干扰阈值 β_I 和接收阈值 β_C 之间, 则称节点 j 处于节点 i 的载波感知距离 r_I 内.

假设全网时间同步且被划分为时槽结构. 节点采用全向天线, 传输功率均相同且保持不变.

1.2 干扰模型

如前所述, 为了发现不能在同一时槽被调度的链路, 必须首先发现链路间的冲撞关系, 而后者由干扰模型所确定的. 物理干扰模型和 k 跳干扰模型是两个最为常用的干扰模型. 在物理干扰模型下, 当

$$\frac{G_{ij}P_i}{\eta_j + \sum_{k=1, k \neq i}^M G_{kj}P_k} \geq \beta_C \quad (2)$$

时, 节点 j 可以接收到节点 i 的报文. 其中, M 为与链路 \vec{ij} 同时进行传输的链路数, 即节点 j 处的信号干扰噪声比 (Signal-to-interference-noise ratio, SINR) 必须大于等于接收阈值 β_C . 接收阈值和传输速率、误码率、调制参数、编码等因素直接相关.

物理干扰模型是一个准确描述了无线信号物理特性的干扰模型, 但式 (2) 不具有局部性的特点, 并

且其中的参数, 如 η_j, G_{ij} 等, 由于存在时变性而难以确定.

而 k 跳干扰模型定义非常简单, 当两个链路的跳距不小于 $k - 1$ 时, 则认为非冲撞的. 显然, k 跳干扰模型具有局部性的特点, 抽象层次也更高, 与现实之间的差距也更大.

2 Dk-hop: 有向 k 跳干扰模型

2.1 隐藏链路和暴露链路

图 1 是在物理干扰模型下的隐藏终端和暴露终端现象^[12]. 在图 1(a) 中, 当以下两个条件同时满足时, 节点 C 称为节点 A 的隐藏终端.

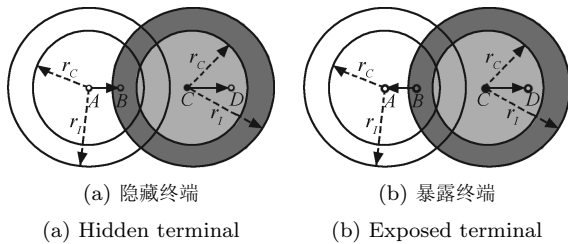


图 1 物理干扰模型的隐藏终端和暴露终端

Fig. 1 Hidden terminal and exposed terminal of physical interference model

- 1) 节点 C 在节点 A 的载波感知距离外, 即节点 C 不能感知到节点 A 的发射;
- 2) 节点 B 在节点 C 的载波感知距离或传输范围内.

在图 1(b) 中, 当以下两个条件同时满足时, 节点 B 称为节点 C 的暴露终端.

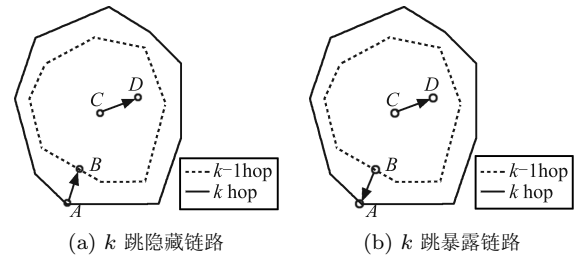
- 1) 节点 B 在节点 C 的传输距离内, 即节点 B 能正确接收到节点 C 的发射报文;
- 2) 节点 A 在节点 C 的载波感知距离外, 即节点 A 不会受到节点 C 的干扰.

对于在物理干扰模型下的 MAC 协议, 如 CSMA/CA (Carrier sense multiple access/Collision avoidance)^[13-14], 隐藏终端将会引起无线冲撞, 而暴露终端虽不会引起冲撞, 但会导致带宽利用率的下降. 它们是影响网络带宽最大化的两个主要阻碍.

与隐藏终端和暴露终端的定义类似, 在 k 跳干扰模型下定义 k 跳隐藏链路和 k 跳暴露链路. 定义 $D(\vec{ij}, \vec{pq})$ 为 \vec{ij} 与 \vec{pq} 之间的跳距, 具体为

$$D(\vec{ij}, \vec{pq}) = \min(d(i, p), d(i, q), d(j, p), d(j, q)) \quad (3)$$

其中, $d(i, p)$ 为节点 i 和节点 p 在网络图中的最小跳数. 与图 1 类似, 在图 2(a) 中, 当以下三个条件同时满足时, \vec{CD} 称为 \vec{AB} 的 k 跳隐藏链路.



(a) The k -hop hidden link (b) The k -hop exposed link

图 2 k 跳干扰模型的隐藏链路和暴露链路

Fig. 2 Hidden link and exposed link of k -hop interference model

- 1) $d(A, C) = k$, 即节点 C 不能感知到节点 A ;
- 2) $d(B, C) = k - 1$, 即节点 C 能干扰节点 B ;
- 3) $d(A, D) > k - 1$, 即节点 D 不会受到节点 A 的干扰.

k 跳隐藏链路是非对称的. 例如, 在图 2(a) 中, \vec{CD} 能干扰 \vec{AB} , 而 \vec{AB} 却不能干扰 \vec{CD} . 显然, 在 k 跳干扰模型下, k 跳隐藏链路将会导致冲撞.

在图 2(b) 中, 当以下三个条件同时满足时, \vec{CD} 称为 \vec{BA} 的 k 跳暴露链路.

- 1) $d(B, C) = k - 1$, 即节点 B 和节点 C 能正确接收到对方的报文;
- 2) $d(A, C) > k - 1$, 即节点 A 不会受到节点 C 的干扰;
- 3) $d(B, D) > k - 1$.

k 跳暴露链路是对称的. 例如, \vec{CD} 是 \vec{BA} 的 k 跳暴露链路, 则 \vec{BA} 是 \vec{CD} 的 k 跳暴露链路.

事实上, 尽管链路及其 k 跳暴露链路的发送方都能相互感知到对方, 但实际上它们都可以同时进行传输. 由于在 k 跳干扰模型下, 任何一条链路和其 k 跳暴露链路是非冲撞的, 因此, k 跳暴露链路不会引起网络带宽利用率的下降, 因此, 我们侧重研究如何解决 k 跳隐藏链路的问题.

2.2 Dk-hop: 有向 k 跳干扰模型

考虑 k 跳暴露链路和 k 跳隐藏链路, 修改 k 跳干扰模型的定义如下:

- 1) 当两个链路的跳距小于 $k - 1$ 时, 它们是冲撞的;
- 2) 链路及其 k 跳隐藏链路是冲撞的;
- 3) 链路及其 k 跳暴露链路是非冲撞的;
- 4) 当两个链路的跳距大于 $k - 1$ 时, 它们是非冲撞的.

这四条规则就是 Dk-hop 无线干扰模型的定义.

根据上述定义, 两条链路之间干扰与否, 对于 Dk-hop 干扰模型和 k 跳干扰模型, 只有在这两条链路的跳距等于 $k - 1$ 时才会得到不同的结论. 即

Dk-hop 干扰模型和 k 跳干扰模型的差距仅仅体现在当链路间的跳距恰为 k - 1 时. 因此仅就此情况进行讨论.

3 确定 k 的有效范围

由于 k 的值直接影响 Dk-hop 模型的准确性, 因此下面推导 k 的有效范围.

用状态变量 $(d(S1, S2), d(S1, D2), d(S2, D1), d(D1, D2))$ 指代链路 $\overrightarrow{S1D1}$ 和 $\overrightarrow{S2D2}$ 的相对位置. 当它们之间的跳距为 k - 1 时, 变量 $(d(S1, S2), d(S1, D2), d(S2, D1), d(D1, D2))$ 共有 65 个不同的值 $(d(S1, S2), d(S1, D2), d(S2, D1), d(D1, D2)) \in S = \{k - 1, k, k + 1\}$, 且 $d(S1, S2), d(S1, D2), d(S2, D1), d(D1, D2)$ 至少有一个值为 k - 1). 将这 65 个值按链路 $\overrightarrow{S1D1}$ 和 $\overrightarrow{S2D2}$ 的相对位置关系分为 6 个子类. 如表 1 所示, 其中 x 代表集合 S 中的任意值, 第 2 ~ 5 列为每个子类的值, 第 6 列为每个子类包含的实例个数, 最

后一列为一个典型实例. 显然, 在子类 I 中, $\overrightarrow{S1D1}$ 和 $\overrightarrow{S2D2}$ 互为 k 跳隐藏链路; 在子类 II 中, $\overrightarrow{S2D2}$ 是 $\overrightarrow{S1D1}$ 的 k 跳隐藏链路; 在子类 III 中, $\overrightarrow{S1D1}$ 是 $\overrightarrow{S2D2}$ 的 k 跳隐藏链路; 在子类 V 和 VI 中, $\overrightarrow{S1D1}$ 和 $\overrightarrow{S2D2}$ 互为 k 跳暴露链路.

定义干扰率 IR 为节点的载波感知距离和传输距离之比, 即 $IR = r_I / r_C$.

k 的取值可以为以下三种情况之一: $k > IR + 1, k < IR + 1, k = IR + 1$. 在这三种情况下, 两个链路之间的冲撞情况在不同的干扰模型会得到不同的结果. 针对上述的 6 个子类以及 k 取值的三种情况共 18 种组合实例, 表 2 中的每个单元分别表示每种实例在 k 跳干扰模型、Dk-hop 干扰模型和物理干扰模型下两条链路的冲撞情况. 其中, “1” 代表两条链路非冲撞, “0” 代表两条链路冲撞.

由表 2 可以看出, 对于子类 IV, V 和 VI, 无论 k 取何值, k 跳干扰模型和 Dk-hop 干扰模型均得到了同样的结论, 表明在没有 k 跳隐藏链路的情况下, Dk-hop 干扰模型和 k 跳干扰模型实际并无区别.

表 1 状态的分类

Table 1 Classification of states

子类	$d(S1, S2)$	$d(S1, D2)$	$d(S2, D1)$	$d(D1, D2)$	实例数	典型实例
I	x	k - 1	k - 1	x	9	
II	x	k - 1	> k - 1	x	18	
III	x	> k - 1	k - 1	x	18	
IV	> k - 1	> k - 1	> k - 1	k - 1	8	
V	k - 1	> k - 1	> k - 1	> k - 1	8	
VI	k - 1	> k - 1	> k - 1	k - 1	4	

表 2 在 k 跳、 Dk -hop 和物理干扰模型下的链路冲撞情况
Table 2 Collision drawn under the k -hop, the Dk -hop, and the physical interference models with varied k

子类	$k > IR + 1$			$k = IR + 1$			$k < IR + 1$		
I	1	0	1	1	0	0	1	0	0
II	1	0	1	1	0	0	1	0	0
III	1	0	1	1	0	0	1	0	0
IV	1	1	1	1	1	1	1	1	0
V	1	1	1	1	1	1	1	1	0
VI	1	1	1	1	1	1	1	1	0

基于表 2, 我们获得了三个矩阵 C_u, C_d 和 C_p , 分别称为 k 跳干扰模型、 Dk -hop 干扰模型和物理干扰模型的冲撞矩阵. 矩阵的每个元素反映在相应干扰模型和 k 的取值区间下的链路冲撞情况. 与表 2 类似, 矩阵元素“1”代表两条链路非冲撞, “0”代表两条链路冲撞.

$$C_u = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad C_d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

定义一个包含 3 个分量的可能性向量 \mathbf{W} , 其分量依次为 $k > IR + 1, IR < k \leq IR + 1, k \leq IR$ 的可能性值, 即:

$$\mathbf{W} = (w_l \quad w_m \quad w_s)^T$$

其中, $w_l + w_m + w_s = 1, w_l, w_m, w_s \in \{0, 1\}$.

定义 1. 假定 $P_{m \times n}$ 和 $M_{m \times n}$ 是两个不同的干扰模型的冲撞矩阵, \mathbf{W} 为干扰模型的某个参数的可能性向量. 定义 $P_{m \times n}$ 和 $M_{m \times n}$ 在 \mathbf{W} 下的相似度

为

$$SV_{PM|\mathbf{W}} = \begin{cases} \sum_{\text{所有满足条件的 } j} W_i, & \text{存在 } j \in [1, n] \text{ 且 } P_{ij} = M_{ij} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

定义 2. 假定 $P_{m \times n}, Q_{m \times n}, M_{m \times n}$ 分别为干扰模型 P, Q, M 的冲撞矩阵. n 维向量 \mathbf{W} 为某参数的可能性向量. $SV_{PM|\mathbf{W}} > SV_{QM|\mathbf{W}}$ (即干扰模型 P 比 Q 更接近 M) 当且仅当 $SV_{PM|\mathbf{W}}$ 的每个分量不小于 $SV_{QM|\mathbf{W}}$ 的相应分量, 并且 $SV_{PM|\mathbf{W}}$ 至少有一个分量大于 $SV_{QM|\mathbf{W}}$.

定理 1. 如果 $w_l < w_m + w_s$, Dk -hop 比 k 跳干扰模型更接近物理干扰模型.

证明. 由于

$$SV_{C_u C_p|\mathbf{W}} = \begin{pmatrix} w_l \\ w_l \\ w_l \\ w_l + w_m \\ w_l + w_m \\ w_l + w_m \end{pmatrix}, \quad SV_{C_d C_p|\mathbf{W}} = \begin{pmatrix} w_m + w_s \\ w_m + w_s \\ w_m + w_s \\ w_l + w_m \\ w_l + w_m \\ w_l + w_m \end{pmatrix}$$

如果 $w_l < w_m + w_s$, 则 $SV_{C_u C_p|\mathbf{W}} < SV_{C_d C_p|\mathbf{W}}$. \square

由于当 $k \leq IR + 1$ 时, $w_l < w_m + w_s$. 因此当 $k \leq IR + 1$ 时, Dk -hop 模型比 k 跳干扰模型更接近物理干扰模型.

可以从相对直观的角度对定理 1 进行解释. 如果 $k \leq IR + 1$, 比较 C_d, C_u 和 C_p 的后两列可知, C_d 的任何单元值总不会比 C_u 的相应单元值离 C_p 的差距更大. 从而, 当 $k \leq IR + 1$ 时, Dk -hop 干扰模型比 k 跳干扰模型更接近物理干扰模型.

针对 Dk -hop 干扰模型寻找 k 的一个合理下界.

引理 1. 对无线网络 $G_N = (V_N, E_N)$, 节点有相同的传输距离 r_C , 对任何两对节点 i 和 j , 若它们之间的跳距为 k , 则 $d(i, j) \leq kr_C$.

证明. 采用数学归纳法, 易证. \square

定理 2. 对无线网络 $G_N = (V_N, E_N)$, 所有节点有相同的传输距离 r_C 和载波感知距离 r_I , 如果两个有向链路在物理干扰模型下为非冲撞的, 且在 Dk -hop 干扰模型下也为非冲撞的, 则 $k \geq IR - 2$.

证明. 对于 G_N 中的两个有向链路 $\overrightarrow{S1D1}$ 和 $\overrightarrow{S2D2}$, 如果 $k + 2 \leq \max(d(S1, S2), d(S1, D2), d(S2, D1), d(D1, D2)) \leq k + m$ ($m \geq 2$), 则 $k \leq D(\overrightarrow{S1D1}, \overrightarrow{S2D2}) \leq k + m - 2$. 不失一般性, 假设 $d(S1, S2) = \max(d(S1, S2), d(S1, D2), d(S2, D1), d(D1, D2))$.

根据 Dk-hop 干扰模型的定义, 如果 $m \geq 2$, 上述两条链路被认为是非冲撞的. 基于引理 1 得:

$$d(S1, S2) \leq (k + m)r_C \quad (4)$$

由假设, 这两个链路在物理干扰模型下是非冲撞的, 因此

$$d(S1, S2) \geq r_I \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 得:

$$k + m \geq \frac{d(S1, S2)}{r_C} \geq \frac{r_I}{r_C} = IR$$

从而, 对于 $m \geq 2$, $k \geq IR - m$ 都成立, 即 $k \geq IR - 2$. \square

从而对于 Dk-hop 干扰模型, $IR - 2 \leq k \leq IR + 1$ 为 k 的一个合理取值区间.

4 仿真实验

在一个 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的正方形区域内随机布设 50 个节点. 物理层参数设置如下: $\alpha = 5$, $P_i = 10\text{ mw}$, $\beta_C = 15\text{ db}$, $\eta_i = -80\text{ dbm}$, $\beta_I = 5\text{ db}$. 易得 $r_C = 31.6\text{ m}$, $r_I = 50\text{ m}$. 该值与文献 [15] 完全相同. 仿真结果表明 $|E_N| = 160$, 从而共有 12770 对链路.

第一个仿真实验的目的是比较 Dk-hop 和物理干扰模型之间的差距. k 依次被设置为 1, 2, 3, 4 时, 对每对链路, 在 Dk-hop 模型下确定它们是否存在冲撞, 然后与在物理干扰模型下的冲撞情况做比较, 记录不匹配的总次数. 同样地, 对 k 跳干扰模型与物理干扰模型也做了比较. 表 3 的实验结果表明, 尽管 Dk-hop 模型和 k 跳干扰模型都与物理干扰模型有很大差异, 但当 k 为 1 和 2 时, 相对 k 跳干扰模型, Dk-hop 干扰模型更接近物理干扰模型. 这个结果和定理 1 完全吻合, 因为 IR 值约为 1.6.

表 3 k 跳、Dk-hop 和物理干扰模型之间的不匹配情况

Table 3 Mismatch between the k -hop, the Dk-hop and the physical interference models

k	k 跳干扰模型和物理干扰模型的不匹配总数	Dk-hop 干扰模型和物理干扰模型的不匹配总数
1	7774	6700
2	6362	6028
3	6230	6874
4	7118	7668

进一步地, 我们研究在 Dk-hop 模型下, 一个典型的链路调度算法是否能取得比在 k 跳干扰模型下更好的带宽性能.

最大权调度算法已被证明是最优链路调度算法^[10]. 事实上, 当 $k > 1$ 时, 它是一个 NP 难问题^[8]. 因此采用一个类似的但复杂度更低的链路调度算法更为实际. 我们采用了 GMS 算法, 其复杂度为 $O(n)$. 在每个时槽下, 算法步骤如算法 1 所示.

算法 1. GMS 算法

- 1) 初始化: $L \leftarrow \emptyset, E \leftarrow E_N$.
- 2) repeat
- 3) 找到最大权链路 $l \in E$.
- 4) $L \leftarrow L \cup l$.
- 5) $E \leftarrow E - l$.
- 6) for E 中的每条链路 s do
- 7) if (在干扰模型下 s 和 l 有冲撞) then
- 8) $E \leftarrow E - s$
- 9) end if
- 10) end for
- 11) until $E = \emptyset$
- 12) 对 L 中的所有链路进行调度.

显然, 由于待测干扰模型和物理干扰模型的不一致性, 冲撞仍会发生. 因此, 根据物理干扰模型 (式 (2)), 设置了一个称为冲撞检查的组件. 当采用 GMS 算法确定了某时槽下的调度链路集 L 后, 冲撞检查组件依次检查 L 中的每条链路是否会被其他链路冲撞. 如果发现存在冲撞, 则使该链路上的传输失败.

平均队列长度 (Average queue length, AQL) 是评价链路调度算法带宽性能的一个非常客观的标准. 在相同的传输量和相同的链路调度算法下, AQL 值越小, 其带宽性能也就越佳.

我们在上述的网络拓扑和参数设置的条件下仿真 GMS 算法. 链路 l 的带宽为 c_l , 即在每个时槽下可传输 c_l 个报文, c_l 是在区间 $[3, 8]$ 中的随机数. 仅关注 MAC 层, 即所有的报文只传输 1 跳距离就到达目标节点. 链路 l 在每个时槽下的报文产生数服从均值为 λ_l 的泊松分布, λ_l 也为随机数:

$$\lambda_l = \begin{cases} 0, & p = 0.2 \\ 1, & p = 0.6 \\ 2, & p = 0.2 \end{cases}$$

初始时, 所有队列均为空. 在 k 分别取值 1, 2, 3, 4 时, 在 Dk-hop 干扰模型和 k 跳干扰模型下, 仿真过程均持续了 1000 个时槽. 图 3 为仿真后的 AQL 值. 为了便于直观地比较, 表 4 列出了失败的传输总数和最后一个时槽结束时的 AQL 值.

由图 3 可知, 1) AQL 持续增加, 表明网络系统在给定的通信量的情况下并不稳定^[10]; 2) 当 k 为 1 和 2 时, GMS 算法在 Dk -hop 干扰模型下的性能优于在 k 跳干扰模型下的性能, 而当 k 为 3 和 4 时则相反. 这样的结果与定理 1 和定理 2 是完全吻合的.

表 4 在 k 跳和 Dk -hop 干扰模型下 GMS 算法的性能
Table 4 Performance of GMS under the k -hop and the Dk -hop interference models

k	失败传输数		仿真结束时的平均队列长度	
	k 跳 干扰模型	Dk -hop 干扰模型	k 跳 干扰模型	Dk -hop 干扰模型
1	6 067	2 028	949	911
2	763	64	861	845
3	43	39	868	890
4	0	0	887	895

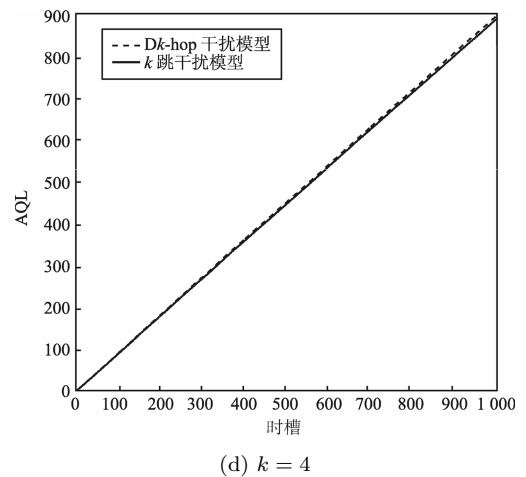
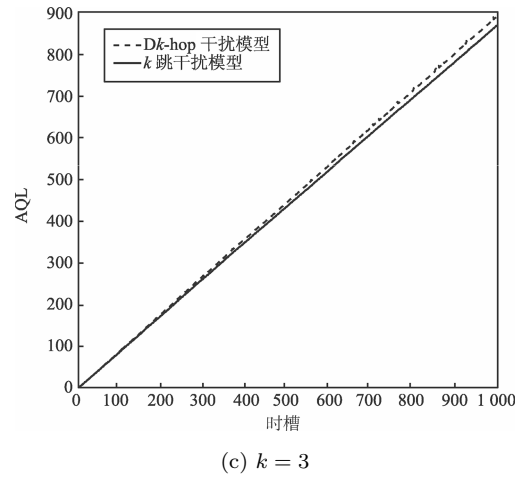
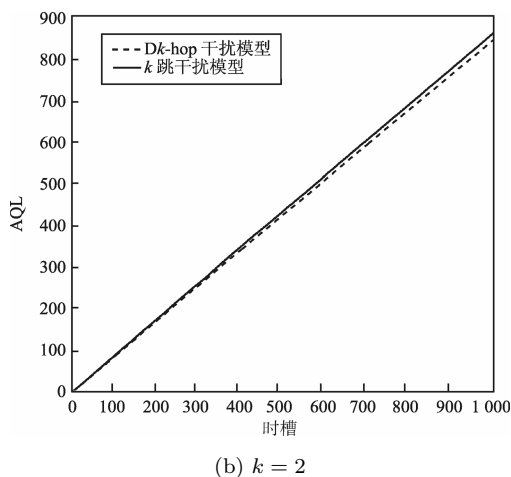
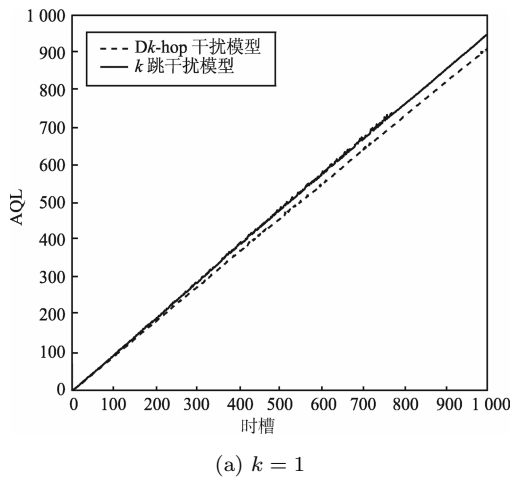


图 3 在不同 k 值下的平均队列长度

Fig. 3 Average queue lengths with different value of k

5 相关工作

当前, k 跳干扰模型和物理干扰模型是两个最常用的无线干扰模型. 前者通常用于协议设计, 后者通常用于通信理论研究. 它们之间的差异早就为人们所认识. 文献 [15] 的仿真结果表明, 相对物理干扰模型, k 跳干扰模型会导致至少 1/3 以上的带宽被浪费. 鉴于两者之间的巨大差异, 文献 [16] 建议在物理干扰模型下而非 k 跳干扰模型下设计链路调度算法. 文献 [17] 结合节点的位置信息提出了“物理图”模型以减小两者的差异.

为解决冲撞问题, 当前很多的链路调度算法在 1 跳干扰模型^[18-20]、2 跳干扰模型^[21] 和 k 跳干扰模型^[22] 下寻找最大独立集 (Maximum independent set): Behzad 对无线网络图的最大独立集的必要性进行了研究^[23], 仿真结果表明, 在 k 跳干扰模型下, 一味强调独立集的最大化并不能带来实际带宽性能的提高, 究其原因还是 k 跳干扰模型和物理干扰模型之间的巨大差距.

尽管 k 跳干扰模型存在缺陷, 然而由于它抽象出无线网络的复杂性, 具有简单明了的优点, 因此仍然得到了广泛的应用. 例如, 文献 [22, 24] 中的链路调度算法就是在 k 跳干扰模型下设计的. k 跳干扰模型不仅具有理论意义, 相对于物理干扰模型, 基于其上的链路调度算法更易于以分布式的方式实现^[5, 25], 因此也更适合于移动自组织网络.

6 结论与下一步的工作

鉴于 k 跳干扰模型和物理干扰模型之间的巨大差异, 本文提出了一个考虑传输方向的 k 跳有向干扰模型 Dk -hop, Dk -hop 干扰模型比 k 跳干扰模型更接近物理干扰模型. 我们推导出 k 的一个合理区间为 $[IR - 2, IR + 1]$, 其中 IR 为节点的载波感知距离和传输距离之比.

我们并不是将 k 跳干扰模型和物理干扰模型完全对立, 事实上, k 跳干扰模型的简单性优点具有很大的优势. 我们认为在 k 跳干扰模型的基础上适当考虑无线传输的一些特性将有助于增强 k 跳干扰模型的准确性.

在未来的工作中, 我们将考虑在实际部署中如何确定最优 k 值的问题, 尤其是当传输功率时变的情况. 这一问题的求解过程将使基于 k 跳干扰模型的链路调度算法趋于实用.

References

- Xu C N, Xu Y J, Wang Z G, Luo H Y. A topology-transparent MAC scheduling algorithm with guaranteed QoS for multihop wireless network. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, **9**(1): 106–114
- Fu L Q, Song C L, Huang J W. Fast algorithms for joint power control and scheduling in wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2010, **9**(3): 1186–1197
- Qian L P, Zhang Y J. S-MAPEL: monotonic optimization for non-convex joint power control and scheduling problems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, **9**(5): 1708–1719
- Kong S L, Zhang H S, Zhang Z S, Zhang C H. Joint predictive control of power and rate for wireless networks. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(7): 761–764
- Wan P J, Frieder O, Jia X H, Yao F, Xu X H, Tang S J. Wireless link scheduling under physical interference model. In: Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai, China: IEEE, 2011. 838–845
- Fabio M. Multi-channel power-controlled directional MAC for wireless mesh networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2011, **11**(1): 90–107
- Joo C, Lin X J, Shroff N B. Understanding the capacity region of the greedy maximal scheduling algorithm in multi-hop wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, **17**(4): 1132–1145
- Sharma G, Mazumdar R R, Shroff N B. On the complexity of scheduling in wireless networks. In: Proceedings of the 12th International Conference on Mobile Computing and Networking. Los Angeles, USA: ACM, 2006. 227–238
- Gu Lian-Hua, Chen Liang-Lun, Zhu Quan-Min. $A\mu$ -MAC: an adaptive MAC protocol for wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(1): 54–59 (古连华, 程良伦, Zhu Quan-Min. $A\mu$ -MAC: 一种自适应的无线传感器网络 MAC 协议. 自动化学报, 2010, **36**(1): 54–59)
- Tassiulas L, Ephremides A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, **37**(12): 1936–1949
- Joo C, Shroff N B. Local greedy approximation for scheduling in multihop wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, **11**(3): 414–426
- Yang L, Guan X P, Long C N, Luo X Y. Analysis and design of wireless networked control system utilizing adaptive coded modulation. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(7): 911–918
- Miao J F, Chen W, Sun Y R, Liu J Y. Adaptively robust phase lock loop for low C/N carrier tracking in a GPS software receiver. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(1): 52–60
- Ni J, Tan B, Srikant R. Q-CSMA: queue-length based CSMA/CA algorithms for achieving maximum throughput and low delay in wireless networks. In: Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Computer Communications. San Diego, USA: IEEE, 2010. 1–12
- Grönkvist J, Hansson A. Comparison between graph-based and interference-based STDMA scheduling. In: Proceedings of the 2001 ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Long Beach, USA: ACM, 2001. 255–258
- Iyer A, Rosenberg C, Karnik A. What is the right model for wireless channel interference? *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, **8**(5): 2662–2671
- Rajeswaran A, Negi R. PHY-graph model for ad hoc wireless MAC. In: Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference. Montreal, Canada: IEEE, 2006. 1–5
- Gandham S, Dawande M, Prakash R. Link scheduling in sensor networks: distributed edge coloring revisited. In: Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Computer Communications. Miami, USA: IEEE, 2005. 2492–2501
- Jain K, Padhye J, Padmanabhan V N, Qiu L L. Impact of interference on multi-hop wireless network performance. In: Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego, USA: ACM, 2003. 66–80
- Wang W Z, Wang Y, Li X Y, Song W Z. Efficient interference-aware TDMA link scheduling for static wireless networks. In: Proceedings of the 12th International Conference on Mobile Computing and Networking. Los Angeles, USA, 2006. 262–273
- Balakrishnan H, Barrett C L, Kumar V S A, Marathe M V, Thite S. The distance-2 matching problem and its relationship to the MAC-Layer capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2004, **22**(6): 1069–1078

- 22 Yi Y, Chiang M. Wireless scheduling algorithms with $O(1)$ overhead for M -hop interference model. In: Proceedings of the 2008 International Conference on Communications. Beijing, China: IEEE, 2008. 3105–3109
- 23 Behzad A, Rubin I. On the performance of graph-based scheduling algorithms for packet radio networks. In: Proceedings of the 2003 Global Telecommunications Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2003. 3432–3436
- 24 Modiano E, Shah D, Zussman G. Maximizing throughput in wireless networks via gossiping. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 2006, **34**(1): 27–38
- 25 Tan C W, Chiang M, Srikant R. Maximizing sum rate and minimizing MSE on multiuser downlink: optimality, fast algorithms and equivalence via max-min SINR. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, **59**(12): 6127–6143



徐朝农 博士, 中国石油大学(北京) 计算机系讲师. 主要研究方向为无线网络, 嵌入式系统和分布式计算. 本文通信作者. E-mail: xuchaonong@cup.edu.cn
(**XU Chao-Nong** Ph.D., lecturer in the Department of Computer Science and Technology, China University of Petroleum (Beijing). His research interest covers wireless network, embedded system, and distributed computing. Corresponding author of this paper.)

interest covers wireless network, embedded system, and distributed computing. Corresponding author of this paper.)



黄长喜 合肥工业大学电气与自动化工程副教授. 主要研究方向为无线网络和智能电网. E-mail: hfgdhcx@163.com
(**HUANG Chang-Xi** Associate professor at the School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology. His research interest covers wireless sensor networks and smart grid.)



胡存钢 博士, 合肥工业大学电气与自动化工程副教授. 主要研究方向为电力网技术和智能电网.
E-mail: hcg@hfut.edu.cn
(**HU Cun-Gang** Ph.D., associate professor at the School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology. His research interest covers power electronic technology and smart grid.)



刘勇 海军装备技术研究院工程师. 主要研究方向为网络安全和无线网络.
E-mail: liuyongnudet@gmail.com
(**LIU Yong** Engineer at Naval Academy of Armament. His research interest covers network security and wireless network.)