

无线传感网络中特征序列构造与识别算法^①

文 玲, 董 旋

(国防科学技术大学 计算机学院, 长沙 410072)

摘 要: 无线传感网络中设备之间的干扰逐步成为制约网络性能提高的瓶颈, 但干扰并不会导致信号的所有信息被完全淹没. 为准确识别并发通信的链路, 需要为每条链路分配唯一的特征序列. 传统的 MAC 地址在干扰背景下难以被识别. 本文利用信号的特征信息, 提出了一种基于多哈希的特征序列的分布式构造与识别策略. 这种构造与识别策略利用干扰信息提高无线信号的传输效率、提升并发传输的特征序列识别能力, 并显著降低识别特征序列的处理时间开销. 实验利用软件无线电试验环境 USRP + GNU Radio 构建实测平台进行对所设计的算法进行评估, 实验结果充分验证了特征序列的构造与识别算法的高效性.

关键词: 无线传感网络; 特征序列; 多哈希策略

Construction and Identification Algorithm of Signature in Wireless Sensor Networks

WEN Ling, DONG Xuan

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Interference between the devices becomes the bottleneck of network throughput in wireless sensor network, but wireless interference does not necessarily result in the loss of all the information of the desired signal. Currently, many researchers exploit the interference information to assist with the parallel communication, and the identification of signature is a key point to these works. We apply a distribute construction and identification signature algorithm based on multi-hash policy with the characteristics of signal, which helps to improve the efficiency of wireless communication and increase the ability of signature identification and significantly decrease the time cost of the algorithm. We build a testbed based on USRP + GNU Radio to evaluate the algorithm, and the results show the construction and identification algorithm of signature is valid.

Key words: wireless sensor network; signature; multi-hash policy

1 引言

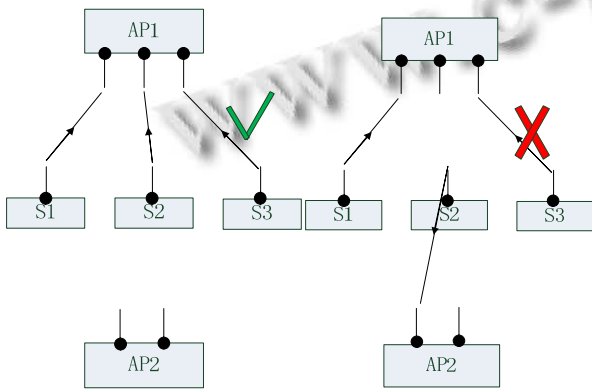
无线传感网络近来在无线通信领域得到了快速的发展, 其基本的思想就是利用众多无线设备以及传感器服务于我们的日常生活^[1]. 然而, 随着无线设备和传感器节点数量的增多, 无线设备之间的信息交互而发生干扰的概率大幅度提高. 然而多个无线信号同时在无线网络中传播时, 虽然信号接收节点无法完成信号的解调工作, 但无线信号的某些特征并没有被其它干扰信号所完全淹没.

近期, 针对在无线通信的干扰背景下, 大量研究

工作^[2-8]集中在如何有效利用这些干扰的信息. 与传统无线通信中的冲突避免机制存在着本质的不同, 他们的研究重点主要是将传统无线通信串行化的思想, 逐渐向满足特定条件的并发传输思想转变, 使得无线传感网络的传输效率得到显著的提高. 识别并发中的各条链路是并发通信面临的重要问题. 如图 1 所示, 假设 AP1 与 AP2 为两个多天线的 AP 节点, S1、S2 和 S3 节点为单天线的传感器节点, AP1 与 AP2 都在 S1、S2 和 S3 的通信范围之内, 图 1(a)中由于 AP1 具有 3 根天线, 可以同时接收 S1、S2 和 S3 同时发送的报文, 并成

^① 收稿时间:2013-10-15;收到修改稿时间:2014-01-17

功完成解码工作. 图 1(b)中, 由于 AP2 只有两根天线, 且在 S1 向 AP1 发生信息干扰的条件下, 需要接收 S2 发送的报文, 因此其两根天线所带来的两个自由度已经耗尽, 如果 S3 再向 AP1 发送报文, 虽然 AP1 能够完成报文的解调工作, 但 AP2 无法正常解调出 S2 的报文, 因此 S3 不应该发送该报文. 所以 S3 在发送报文之前, 需要监听无线网络中的信道信息, 这种监听并不像传统信道监听那样将信道划分为忙闲两种状态, 而是需要更加细粒度地获取当前占用信道的链路信息. 采用传统设备识别的方法只能用于识别报文的发送者, 对于报文的接受者信息无法表达. 由于 S3 接收到的是 S1 和 S2 的混合报文, 因此不能完成解调工作, 因此, 需要引入特征序列的概念来标注链路信息.



(a) S3 可以进行并发传输 (b) S3 不能进行并发传输
图 1 无线传感器网络的并发通信机会示意图

由于采用了软件无线电综合平台进行实验数据的收集. 因此, 可以获得物理波形信号采样后的复数信号, 这些信号数据未经解调的处理, 因而携带有丰富的原始物理信号信息. 又因为信号的识别并不等同于信号的解码 (信号的识别只是需要鉴别出某一段特殊的报文序列, 信号的解码却需要完成所有报文的解调工作), 所以信号解码的难度要远远高于信号的识别. 而通过这些信号的额外原始物理信息能够很好地协助完成干扰条件下进行信号的识别工作, 使得干扰条件下在软件端进行特征信号序列的识别成为可能.

同时, 现有的 MAC 地址等具有全局唯一的特点, 但在干扰背景下难以被检测. 无线传感网络中大部分的无线设备和传感器只需要负责信息的感知、收集, 处理和传递, 其只具有局部的特征, 并不要求具有全网唯一的标识. 因此, 只需要保证无线设备在其局部

范围内保证能够被唯一地识别即可.

然而特征序列在通信领域被广泛应用于信号的识别与检测工作, 但其表达能力取决于信号的长度, 这一点极大地限制了特征序列的表达能力, 也将无法满足网络中节点数量不断增大所导致的特征序列过长的问题. 多哈希策略被广泛应用于编码标记、图像识别等多种领域^[10,11]用于增加信息的识别和表示能力.

本文研究并发链路的特征序列分配问题, 提出一种基于多 hash 特征序列的构造与识别策略, 通过分布式的方式实现特征序列的分配. 这种分配策略充分利用干扰信息提高无线信号的传输效率, 提升并发传输过程的特征序列识别能力, 并显著降低识别特征序列的处理时间开销. 同时, 多 hash 策略实现了特定序列的动态构造, 确保了无线设备在局部网络中的唯一性. 通过软件无线电综合实验平台 USRP(Universal Software Radio Peripheral) + GNU Radio 进行测试, 我们验证了算法的有效性. 本文的贡献主要包含以下几个方面:

① 提出基于多 hash 策略的特征序列分配方法. 它提高了部分现有 MAC 协议 (需要使用干扰信息的 MAC 协议) 的处理能力, 显著地降低了特征序列识别算法的时间复杂性, 且几乎不需要修改现有的网络协议流程.

② 在软件无线电综合实验平台上实现与评估了特征序列的识别算法, 证实了算法的可行性.

③ 在具有 3 个节点的 USRP 实验平台上进行了实际测试, 实验的结果指出, 多 hash 的特征序列分配策略能够在较低冲突的条件下, 动态地分配特征序列. 与传统的信号识别算法相比, 基于多 hash 策略的特征序列识别算法的效能提升了近两个数量级.

2 相关工作

目前, 国内外大量研究人员针对无线通信干扰条件下信号的传输效率问题开展研究, 研究工作主要分为两个部分:

利用现有并发通信协议中利用特征序列作为干扰条件信息识别的有效途径, 主要有分为两类: 1) 利用特征序列精确地了解干扰报文的初始位置. ANC^[3]在已知干扰报文精确位置的前提下, 利用已知的信号序列对干扰后的混合报文信息进行异或操作, 而后解调出所需报文的信息. Zigzag^[2]利用报文两次干扰不完全

同步的特性,提出了一种干扰条件下信号循环解码的思想,完成信号解调工作. 2) 设计特定的特征序列用于传递并发通信的控制报文. CSMA/CN^[5]直接发送特征序列代替有线网络 CSMA/CD 协议中的信道侦听过程,即当监听到无线网络中发生错误,直接向报文的发送者发送特征序列告诉其本次发送错误,发送者立刻停止发送报文,因此节约了无线信道资源. CRMA^[6]利用 OFDM 机制对子信道进行编码,通过特征序列用于识别报文的发送者,并利用线性规划的方法解调干扰信号. 上述工作都存在以下两个不足: 1) 构造特征序列或者利用已有的序列作为识别这种特殊的干扰. 将无线传输中并发传输信号的干扰等同与白噪声信号干扰处理,与实际网络的情况并不完全相符. 2) 对于所构造的特定序列(一般选用伪随机序列)都是在实验前事先确定. 因此,不能适应大规模网络和网络动态性变化的需求. 本文提出的基于多哈希策略的特征序列构造策略是在区分白噪声与信号干扰的基础上对特征序列进行特殊的设计,使其更加具有抗干扰的特性. 并且节点可以根据自身的特征自主地构造特征序列,能够很好地适应网络动态变化的需求.

特征序列的识别很难利用现有方法在软件端完成报文的实时检测, George^[9]利用 USRP 上的 FPGA 实现了报文特征序列的实时检测,但特征序列需要实验前进行设置,不能根据实验的环境变化而动态改变. 而且需要对硬件底层工作进行大量的修改,不具有良好的可移植性. 本文设计的特征报文构造策略与识别算法只需在软件层面上进行,不对硬件设备提出任何需求,而且能根据环境的变化自适应地构造与识别特征序列,能够完成在软件层面上对特征序列的实时检测.

3 特征序列识别原理

无线传输将报文的比特信号映射到复数域作为调制的一个部分,因此,可以将一段传输的信号表示为一个复数序列, $x[n]$ 表示发送序列的第 n 个传输信号, $y[n]$ 表示传输信号经过无线信道衰减后接收到的复数序列,则 $y[n] = Hx[n] + w[n]$, 其中 H 表示信号发送者与接受者之间信道的参数, $w[n]$ 表示信道的高斯白噪声.

假设需要在接收信号 $y[n]$ 中识别一个已知长度为 L 的特征信号模式 S , 特征信号的识别结果 $R(y, p) = \sum_{k=1}^L S^*[k]y(k+p)$, 其中 p 表示接收信号发

生的偏移距离, $S^*[k]$ 表示特征信号模式 S 的共轭. 如果接收序列 $y[n]$ 中包含特征信号模式 S , 则识别的结果将会出现一个峰值. 否则, 特征信号的识别结果的值将比较低.

当网络中存在多个报文并发传输时, 接收序列 $y[n] = y_A[n] + y_B[n]$, 其中 $y_i[n] = H_i x_i[n] + w_i[n]$, 特征信号的识别结果 $R(y, p)$ 表示为:

$$\begin{aligned} R(y, p) &= \sum_{k=1}^L S^*[k]y(k+p) \\ &= \sum_{k=1}^L S^*[k](y_A(k+p_A) + y_B(k+p_B) + w(k+p)) \\ &= \sum_{k=1}^L S^*[k](H_A x_A(k+p_A) + H_B x_B(k+p_B) + w(k+p)) \end{aligned}$$

若只有信号 $x_A[n]$ 中包含特征序列 S , 由于特征序列 S 独立于 $x_B[n]$ 和 $w[n]$, 则

$$\sum_{k=1}^L (S^*[k]H_B x_B(k+p_B) + S^*[k]w(k+p)) \approx 0$$

因此, $R(y, p) = \sum_{k=1}^L S^*[k]H_A x_A(k+p_A)$, 若匹配成功, 则 $R(y, p)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} R(y, p) &= \sum_{k=1}^L S^*[k]H_A S[k] = H_A \sum_{k=1}^L S^*[k]S[k] \\ &= H_A \sum_{k=1}^L |S[k]|^2 \end{aligned}$$

无线信号在网络中传输时, 由于信号发送者与接收者之间的时钟晶振存在微小的差别, 因此两种之间存在微小的频偏 δf , 故在真实的网络环境下识别结果 $R(y, p) = H_A \sum_{k=1}^L |S[k]|^2 e^{j2\pi k \delta f}$, 所以接收者需要对两种之间的频率偏差进行估计. 在实验中, 由于频偏只与设备有关, 故可以利用^[12, 3]中提出的现有方法在网络初始化时进行测量设备之间的频偏, 在实际计算时进行频偏补偿. 因此, 通过上述方法可以完成信号识别的工作.

4 多hash策略实现PN序列的动态分配

本文设计了一种基于多 hash 的特征序列分配模型, 实现了在特征序列长度受限的情况下, 将特征序列转化为局部网络唯一标识的算法. 该算法还可以适应网络拓扑结构动态变化, 使得节点的特征序列不再通过网络初始化阶段静态的设置, 对于新加入网络的节点可以动态地为自己设置特征序列, 使得网络中所有节点都局部唯一的标识. 特征序列的设计还需考虑网络的干扰背景, 即报文数据无法完成正常的解码时, 也要能完成特征序列的检测工作.

4.1 特征序列的构造策略

在发送模型中, 初始时需选取 n 个不同的 hash 函

数: $h_1(key), h_2(key), \dots, h_n(key)$, 其中 key 为 $hash$ 函数的关键字. 为了确保无线网络局部范围内, 每个节点具有唯一性, 这就要求表征每个节点的关键字也具有唯一特性. 因为 MAC 地址的前 3 个字节代表的是厂家特定的编号, 而后 3 个字节为具体无线网卡的编号且该数据是独立的, 故选择其作为 key 的值. 如图 2 所示, 对于每个 $hash$ 函数构建一张公共的映射表, 映射表由 k 个不同的特征序列构成, 每个网络节点的 key 值经过 n 个 $hash$ 函数计算后, 可以得到表征节点唯一标识信息的特征数组 $[num_1, num_2, \dots, num_n]$, 其中 $num_i = h_i(key) \% k$, 在发送端发送节点发送数据时, 将特征数组 $(PN[num_1], PN[num_2], \dots, PN[num_n])$ 代替 MAC 地址在报文中的位置, 将其作为节点在网络中的唯一标识.

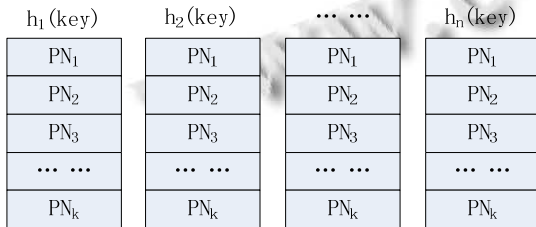


图 2 多 hash 函数的示意图

4.2 特征序列的检测算法

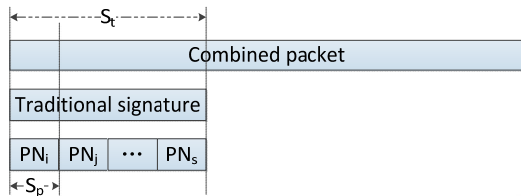


图 3 特征序列识别中多 hash 策略与传统策略对比示意图

在接收模型中, 引入了多 $hash$ 策略, 由于所有 $hash$ 函数对应着同一映射表, 使得特征序列的检测长度从原来的 St 缩短为 Sp , 通过这种方式可以缩短特征序列检测算法所需的时间, 从而保证了识别算法高效性.

通过网络初始化过程, 可以获得该节点周围节点的特征数组 $[num_1, num_2, \dots, num_n]_m$, $m=1, 2, \dots, s$, 其中 s 为该节点周围节点的数目, 将第 i 个节点周围所有节点的特征数组一起构建二维特征数组判决矩阵:

在实时通信的过程中, 接收节点通过匹配操作可以得到报文识别的特征数组 $[num'_1, num'_2, \dots, num'_n]$,

若在判决矩阵中无法找到相应的报文特征数组, 则将该特征数组加入到判决矩阵中, 并利用最近最少使用原则对判决矩阵进行更新. 否则通过报文识别验证算法可以确定出报文的具体接收者, 具体算法描述如下:

① 通过相关运算完成特征数组的识别, 即得到特征数组 $[num'_1, num'_2, \dots, num'_n]$.

② 利用二维特征数组判决矩阵 $Judge$, 通过矩阵运算得到匹配结果矩阵 $R_{1 \times s}$,

$$R_{1 \times s} = [num'_1, num'_2, \dots, num'_n] \oplus Judge_{n \times s}$$

$$= [\sum_{i=1}^n num'_i \oplus num_i^{(1)}, \dots, \sum_{i=1}^n num'_i \oplus num_i^{(s)}]$$

$$\text{其中, } num'_i \oplus num_i^{(k)} = \begin{cases} 1, num'_i = num_i^{(k)} \\ 0, num'_i \neq num_i^{(k)} \end{cases}$$

③若 $R_{1 \times s}$ 中存在某个分量 k 使得 $R_{1 \times s}[k] \geq n - r_{error}$, 则说明判决矩阵中的第 k 个特征数组匹配成功, 若有多个特征数组满足该条件, 则选择数值最大者获胜, 其中 r_{error} 为算法的容错能力. 若中所有的分量都小于 $n - r_{error}$, 则将特征数组 $[num'_1, num'_2, \dots, num'_n]$ 加入到判决矩阵 $Judge$ 中.

④ 根据最近最少使用原则, 当某个节点的特征数组 $[num'_1, num'_2, \dots, num'_n]$ 在一定的时间内没有出现, 则在判决矩阵 $Judge$ 内删除其对应列.

4.3 复杂度分析

报文识别算法可以完成报文接收者对无线网络中特征信号的实时检测. 通过多 $hash$ 函数保证了的节点在其局部区域内具有唯一性, 因为发送节点根据自身唯一 key 值作为 n 个 $hash$ 函数的输入, 而后通过映射关系得到特征数组, 通过这种表示方式总共可以标识 kn 个不同的网络节点, 即两两节点产生冲突的概率为 $1/k^n$ 不妨设通信节点周围节点的密度为 η , 节点的干扰半径为 r , 则通信节点在其干扰半径范围内网络标识产生冲突的概率为 $C_{\eta\pi r^2}^2 / k^n$, η 和 r 在通信系统中是可以事先通过测量得知, 所以只要通过增加 k 和 n 的值即可减低冲突的概率, 但由于采用特征序列代替原有的 MAC 地址, 所以特征序列的长度 $C = n * strlen(num_i)$ 是受限的. 因此, 特征序列的总长度是一个定值, 因此 n 的值不能无限的增加. 通过对报文识别验证算法进行分析, 接收端多 $hash$ 策略实现的时间复杂性为 $O(Clk \log_{\eta\pi r^2}^k + n\eta\pi r^2)$, 其中为

网络中待匹配报文的长度, 因此, 可以通过调整 k 的大小来控制算法的时间复杂性, 但必须满足节点间的特征序列不发生冲突 (节点间冲突的概率为 $C_{\eta\pi r^2}^2 / k^n$).

5 实验评估

5.1 实验平台介绍

软件无线电 SDR (Software Defined Radios) 在软件层面上执行整个无线通信系统的所有信号处理过程 (包括扩频编码、调制解调、时钟恢复等), 其硬件设备只是一个简单的射频发射前端作为接入无线信道的接口, 射频前端通过将 SDR 产生的复数信号传输到数模转换 DAC 中产生模拟信号, 最后再将模拟信号搬到信号的载波频段后, 将其发送到无线网络中. 接收过程为发送过程的逆过程, 首先将无线网络中的接收到的信号搬移至基带, 通过模数转换后转变为离散的复数信号, 最后再传递给 SDR 进行处理. 对于支持 SDR 的底层硬件, 我们采用带有 RFX240 子版的 USRP 设备, 可以在 2.4GHz 的频段上进行工作, 这样就能够很好地模拟 802.11 系列的无线网络协议.

5.2 实验原型

实验通过 USRP + GNU Radio 软件无线电平台进行测试, 采用两个 USRP 节点作为报文的发送节点、一个 USRP 节点作为报文的接收节点. 两个发送节点同时向接收节点发送报文, 构造无线通信环境下干扰的情形. 实验中由于时钟晶振偏差的影响, 很难控制两个 USRP 的发送节点同时发送两个报文. 为此, 通过接收端的 USRP 分别记录两个发送端 USRP 的报文信息, 然后随机初始位置对两个报文进行叠加.

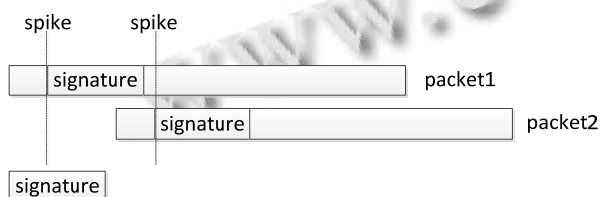


图 4 特征序列识别的实验示意图

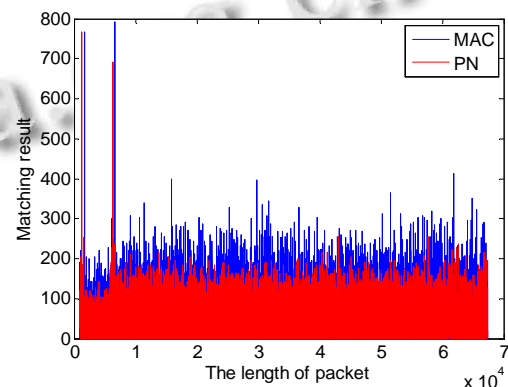
如图 4 所示, 在两个报文中插入同一个特征序列, 而后利用该特征序列在混合报文中进行匹配, 当特征序列完全匹配成功时, 结果会出现一个峰值, 否则匹配的结果保持为较小的值. 一般情况下只要峰值比由其他匹配结果产生最大干扰的两倍以上, 就可以认为

特征序列能够被正确地识别. 因此, 正常情况下, 本实验的结果中会出现两个峰值. 最后, 将实验的结果再送回 GUN Radio 中进行处理.

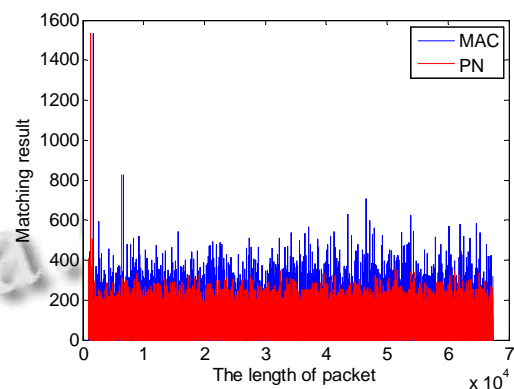
5.3 实验结果

在实验结果中, 为了方便比较 PN 序列与 MAC 地址的性能差别, 将 PN 序列的实验结果向前移动了较小的距离, 而后将 PN 序列与 MAC 地址序列的实验结果放在同一结果图中进行比较.

5.3.1 干扰条件的特征序列选择



(a) 干扰报文与传输报文能量相等



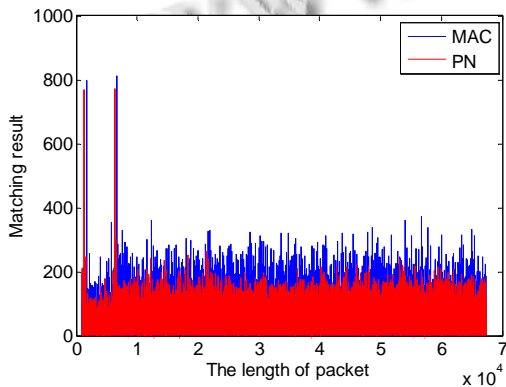
(b) 干扰报文能量为传输报文的两倍

图 5 MAC 地址序列与 PN 序列在不同干扰信号能量条件的对比示意图

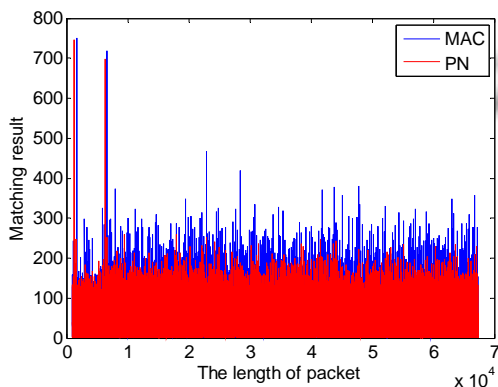
在无线通信干扰条件下, 信号检测一般是通过信号之间的卷积运算进行特征信息的识别, 当网络规模较大或者网络发生动态的变化时, 已有的静态设置伪随机序列的方式已经不能适应网络发展的需求, 但动态设置伪随机序列需要保证其在网络中的唯一性特征. 而节点的 MAC 地址序列也具有表征节点网络唯一性的特征, 当网络中存在干扰, 如果干扰信号的能量与信号能量相等时, 如图 5(a), MAC 地址序列和 PN 序列

都可以完成报文的检测任务. 当干扰信号能量强度为原始信号的两倍时, 如图 5(b)所示, 由于干扰信号的影响, MAC 地址序列会出现较多的误判信息, 已经不能很好地完成检测特征序列的任务, 而 PN 序列仍能较好地完成特征序列的检测.

在具有高斯白噪声的网络中进行特征序列的检测实验, 采用 PN 序列进行检测时, 由于序列的伪随机特性, 无论信噪比的强弱, 检测的效果与无噪声序列的比较区别相差并不大. 而采用 MAC 地址序列进行检测时, 虽然仍能识别特征序列, 但干扰对识别产生的影响明显增强. 图 6(a)为信干噪比为 0.5 的条件下, MAC 地址序列与 PN 序列都能很好地识别出特征序列, 图 6(b)为信干噪比为 0.25 的条件下, MAC 地址的特征序列识别受到了较大的影响, 已经无法完成特征序列的识别工作, 但 PN 序列仍能很好地完成特征序列的识别工作.



(a) 无线网络中信干噪比为 0.5



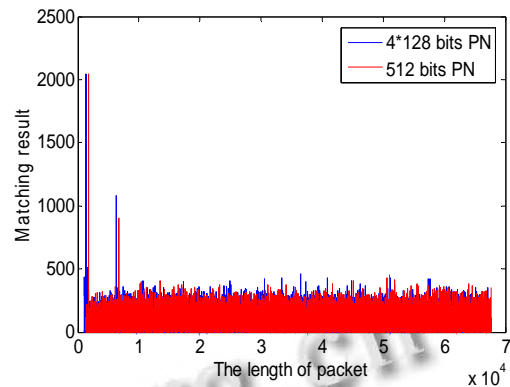
(b) 无线网络中信干噪比为 0.25

图 6 MAC 地址序列与 PN 序列在不同信干噪比条件的对比示意图

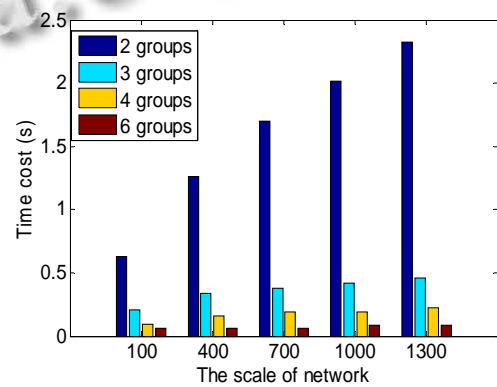
5.3.2 不同分组条件对多 hash 策略性能的影响

多 hash 策略是通过将多个 PN 序列进行拼接进而

构成一个特征序列. 在特征序列总长度确定的情况下, 构成特征序列的 PN 序列越多, 特征序列识别所需的时间就越少, 构造特征序列的单个 PN 序列就越短. 如图 7(a)所示, 分别采用 512 比特的 PN 序列与 4 个 128 比特的 PN 序列构造特征序列, 两者的特征序列识别能力并没有明显的区别. 但 PN 序列的长度小于 32bit 会导致构造的特征序列伪随机性能下降, 导致检测精度下降, 因此特征序列的 PN 序列长度不应小于 32bit. 图 7(b)为多 hash 策略的不同分组的算法时间开销示意图, 从图中可以看出所分的组数越多, 算法所需的时间开销就越小. 为了保证节点地冲突概率, 算法的时间开销会开销随着网络规模的扩大而增加, 当网络规模达到 1300 时, 如果特征序列是由 6 个 PN 序列拼接而成, 其理论上的检测时间小于 0.1s, 能够满足报文实时检测的需求.



(a) 不同分组构造特征序列的识别示意图



(b) 不同网络规模下不同分组的算法时间开销

图 7 特征序列在不同分组条件下性能对比示意图

5.3.3 多 hash 策略的时间开销以及冲突概率分析

由于特征序列的长度受限, 采用多 hash 的策略会

导致单个 PN 序列的长度降低, 如果 PN 序列长度过短, 可能导致识别精度下降. 从另一个方面看, 采用多 hash 的策略可以有效地增加网络的容量、降低网络中节点特征序列冲突的概率, 同时特征序列的识别速度得到了较大的提高. 从特征序列的识别效率来说, 如表 1 所示, 采用 6 个 hash 函数对算法进行实测, 由于算法的时间可以通过调节 PN 序列的分组数以及映射表的大小进行控制. 因此, 在保证网络中不存在冲突概率的条件下, 算法的时间开销几乎不会发生变化. 而利用传统的方法进行特征序列的检测, 其时间开销成线性增加, 相比我们提出的多 hash 策略增加了近两个数量级. 从冲突概率的方面来说, 如图 8 所示, 构成特征序列所分的组数越多, 网络中产生冲突的概率就越小. Hash 函数映射表内的 PN 序列数量越多, 所提供构造特征序列的 PN 序列也就越丰富, 网络中发生冲突的概率也就越低.

表 1 多 hash 策略与传统方式进行信号特征序列识别时间复杂性对比表

网络规模	Traditional(ms)	6-hash(ms)
100	11716	687
400	52510	702
700	91588	693
1000	132741	701
1300	170821	695

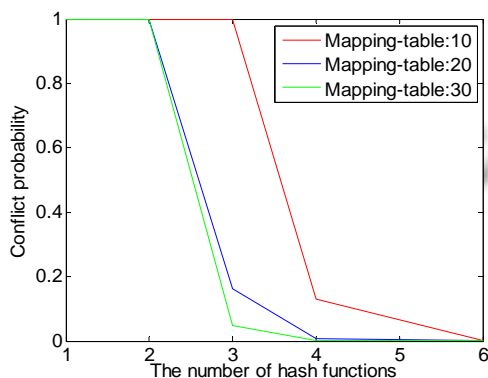


图 8 网络中有 1300 个节点时, hash 函数映射表内 PN 序列的数量与网络冲突概率的关系

6 结束语

本文在无线传感网络的背景下, 针对并发链路的特征序列分配问题, 利用干扰条件下无线信号特征不会完全淹没的特性, 提出了一种多 hash 特征序列的构造方法. 与现有方法相比, 它的鲁棒性更好, 检测更为高效. 结合本文的方法, 就可以充分利用节点之间并发传输所带来的优势, 提高无线网络的实际.

未来的工作包括将链路的信息附加到特征序列中, 使得特征序列的检测即为链路信息的识别, 并进而设计高效的 MAC 协议.

参考文献

- Atzori L, Iera A, Morabito G. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 2010.
- Gollakota S, Katabi D. ZigZag Decoding: Combating hidden terminals in wireless networks. *SIGCOMM*, 2008.
- Katti S, Gollakota S, Katabi D. Embracing wireless interference: Analog Network Coding. *SIGCOMM*, 2007.
- Chen D, Zhang J, Zhang Q, Coding S. A fast multi-channel coordination approach in cognitive radio networks. *MOBICOM*, 2011.
- Sen S, Choudhury RR, Nelakuditi S. CSMA/CN: Carrier sense multiple access with collision notification. *MOBICOM*, 2010.
- Li T, Han MK, Bhartia A, Qiu L, Rozner E, Zhang Y, Zarikoff B. CRMA: Collision-resistant multiple access. *MOBICOM*, 2011.
- Wu K, Tan H, Liu Y, Zhang J, Zhang Q, Ni LM. Side channel: Bits over interference. *MOBICOM*, 2010.
- Gollakota S, Perli SD, Katabi D. Interference alignment and cancellation. *SIGCOMM*, 2009.
- Nychis G, Hottelier T, Yang Z, Seshan S, Steenkiste P. Enabling MAC protocol implementations on software-defined radios. *NSDI*, 2009: 91—1
- Coppersmith D, Jakobsson M. Almost optimal? hash sequence traversal. *Springer*, 2003, 2357: 102—119
- Nguyen Q S. Multi-dimensional hash chains and application to micropayment schemes. *Springer*, 2006, 3969: 218—228