

无线 Ad hoc 网络中的联合信源信道有效用户安全识别方法

范 靛^① 张 灿^{①②} 丁赤飏^③ 吴伟仁^① 涂国防^①

^①(中国科学院研究生院信息科学与工程学院 北京 100049)

^②(中国科学院研究生院信息安全国家重点实验室 北京 100049)

^③(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 无线Ad hoc网络采用无线信道、有限电源、分布式控制等技术,因此存在信道安全威胁和大量的能量消耗等问题。为了克服以上问题,论文提出了一种基于DS-CDMA的无线Ad hoc联合信源信道有效用户安全识别方法,对已知头标识采用加密保护,在接收机结点处应用基于子空间的多用户检测技术,并通过有效用户识别方法只对头部数据进行有效用户安全识别。仿真实验表明:本方法改善了漏警概率和活动用户数估计精度,不但减少了丢弃重发,节省无线模组工作时的能量消耗,同时达到了对有效用户安全识别的目的,提高了信道安全性能。

关键词: 无线 Ad hoc 网络; DS-CDMA; 信道安全; 基于子空间多用户检测; 有效用户安全识别

中图分类号: TN915.08

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2220-05

Joint Source and Channel Virtual User Safety Identification Method for Wireless Ad hoc networks

Fan Liang^① Zhang Can^{①②} Ding Chi-biao^③ Wu Wei-ren^① Tu Guo-fang^①

^①(School of Information Science and Engineering, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^②(State Key Laboratory of Information Security, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: It is adopted the wireless channel, limited battery energy and distributed control techniques in wireless Ad hoc networks, so the existing questions are channel safety threat and more power consumption. To solve above questions, we develop a joint source and channel virtual user safety identification method for DS-CDMA wireless Ad hoc networks. The method can protect and encrypt the header by embedding a random, safe and identifiable header. A subspace-based multi-user detection and virtual user safety identification method can be used at receiver nodes, and the virtual user safety identification method only identifies the header information. Simulation results show that our proposed scheme improves miss rate and active user estimation precision, reduces the probability of retransmission, then saves running radio module power consumption, achieves virtual user safety identification and obtains advanced channel safety.

Key words: Wireless Ad hoc networks; DS-CDMA; Channel safety; Subspace-based multi-user detection; Virtual user identification

1 引言

Ad hoc 网络(mobile Ad hoc network)是一种特殊的无线通信网络,具有分布式网络动态的拓扑结构,带宽和资源受限等特点。由于采用无线信道、有限资源、分布式控制等技术,其安全性较差,容易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务、剥夺“睡眠”等网络攻击。信道加密、抗干扰、用户认证显得尤为重要。

Ad hoc网络大多数移动自组网节点资源受限(电源,带

宽等),采用怎样的信道接入协议进行有效用户安全识别,减轻解码负担,减少不必要的接收机能量消耗是一个急待解决的问题。

通常无线 Ad hoc 网络采用同步 DS-CDMA(Direct Sequence spread spectrum Code Division Multiple Access)接入技术,允许同时接收多个报文的可能。当同一时刻多个发射机向同一接收机发送报文时,将出现报文冲突。Common Code 和Receiver-Based Code信道接入协议^[1]很难解决报文冲突的问题。Transmitter-Based Code信道接入协议^[1]与多用户检测^[2-5]技术结合可以解决报文冲突,但固定

的报文头标识又不具备随机性,对整个报文来说这段信息最易跟踪和截取,攻击者可以集中干扰地址信息部分,发送大量含有该头地址的无用信息,从而给接收机带来繁重的解码负担,无线Ad hoc网络将面临安全威胁和大量的能量消耗。

本文在采用 Transmitter-Based Code 信道接入协议的基础上,提出一种无线 Ad hoc 网络中的联合信源信道有效用户安全识别方法。在基带数字调制时在每个报文的开始处嵌入一个与信源数据有关的随机、安全可靠的、可识别的头标识,对已知头标识采用加密保护。在接收机结点处应用基于子空间的多用户检测技术,并通过有效用户识别算法只对头部数据进行有效用户安全识别,无需对整个报文解扩,达到节省接收机能量消耗的目的。

为度量几种算法的检测性能,本文主要以漏警概率和估计方差为主要衡量指标,结果表明:本方法改善了漏警概率和活动用户数估计精度,不但减少了丢弃重发,节省无线模组工作时的能量消耗,同时达到了对有效用户安全识别的目的,提高了信道安全性能。

2 联合信源信道安全头标识编码方法

通信安全技术中低概率截取、低概率位置锁定的扩展频谱技术发展迅速,其中 DS-CDMA 已经得到了广泛应用。虽然扩频技术用于保密通信有一定的安全性,但仍存在安全隐患,例如当攻击者或未经授权的用户企图冒充合法用户进入无线通信系统时,用户头标识截取是最危险的。而以往的分组报文头标识是一些固定的、唯一表示源或目的地址的码字序列(ID),这些码字序列从信号级的角度可看成是固定的确知的信号,不具备随机性,对整个报文来说这段信息最易跟踪和截取。如果在基带数字调制时对确知头标识采用加密保护,将进一步提高安全性能。本文提出了一种联合信源信道安全报文头标识编码方法。

联合信源信道安全头标识编码方法报文结构如图 1 所示:整个报文 P bit,头标识 J bit。基带数字调制时对确知头标识采用加密保护,对每个报文头标识嵌入一个随机数据(密钥)。如此,报文将难被截获,敌方也将更难施加干扰。

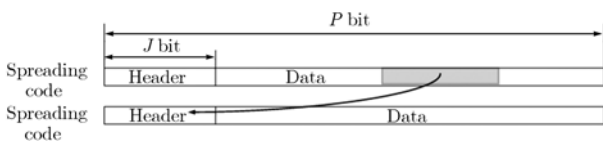


图 1 报文结构

假设 h_{ji} 表示发送结点 j 发往接收结点 i 加密后的报文头信息,该向量由标识接收结点唯一地址 w_i (正交 Walsh 序列)和一个密钥 k_j ($j \in \text{TRtoRE}_i$) 点乘(异或)获得,其中 TRtoRE_i 是所有发往接收结点 i 的发送结点索引集合,如下式

$$h_{ji} = k_j \circ w_i, \quad h_{ji}, k_j, w_i \in \mathbf{R}^{1 \times J} \quad (1)$$

如果在接收端要正常接收到该报文,需要接收结点预先获知 k_j , 经过逆运算

$$w_i = h_{ji} \circ k_j \quad (2)$$

才可以识别该报文的指定接收机是否为结点 i 。为了让接收结点 i 预先获得密钥信息, k_j 取自于发送结点 j 发往接收结点 i 前帧中的一段原始数据。调制前结点 j 报文信息为

$$d_j = [h_{ji}, \text{data}_j]^T, \quad \text{data}_j \in \mathbf{R}^{1 \times (P-J)}, \quad d_j \in \mathbf{R}^{P \times 1} \quad (3)$$

采用 Transmitter-Based Code 信道接入协议^[1],用发送结点的扩频码子将整个报文信息扩频后调制发送到无线物理信道中去,扩频调制后结点 j 发送的信息为

$$s_j = a_j c_j d_j^T, \quad c_j \in \mathbf{R}^{N \times 1}, \quad s_j \in \mathbf{R}^{N \times P} \quad (4)$$

a_j 为调制幅度,扩频码子 c_j 要能够唯一标识发送结点,各码子应是正交或近似正交的,即每个扩频码子可以代表一个逻辑信道。因此该编码方法被称为联合信源信道安全头标识编码方法。由于 k_j 是 n 位的随机输出序列,根据生日定理一个想对随机序列求逆的攻击者大概要尝试 $2^{n/2}$ 次才能找到与其匹配的随机序列^[6]。用该方法无需用多余的信息 bit 即对头标识进行了加密处理,同时密钥的随机性也起到了使头标识随机化的目的。

3 基于子空间的有效用户识别

Wu 和 Chen^[7]提出采用门限界定方法估计活动用户数,但由于该方法中设定的判决门限受信噪比影响较严重,通常只适用于信噪比较高的通信环境下。Liu 提出的报文编码方法^[8]头标识取正交码字,通过对报文头信息进行处理虽然能够实现用户识别,但报文头信息不具有随机性,易被跟踪和截取。针对在低信噪比下对活动用户数估计和报文传送中信道安全两方面问题,依据基于子空间的多信号分类方法的基本原理,本文提出了基于子空间的有效用户识别。其中对活动用户估计采用了一种新的方法:差分极大算法,本方法能够在低信噪比下对活动用户数有较高精度的估计。

3.1 接收机系统框图

图 2 为接收机系统框图:此系统包括匹配滤波器、预处理和后续处理几大部分。接收到的模拟信号 $r(t)$,经匹配滤波器后以码片时间间隔采样 $r(n)$,之后比特(bit)成帧形成观测向量 r 。取每帧的头部数据进行预处理,其中活动用户识别器对活动用户数和观测矩阵的估计,对头部数据的解密,而有效用户识别器对有效用户数和扩频码字组的确定。如确

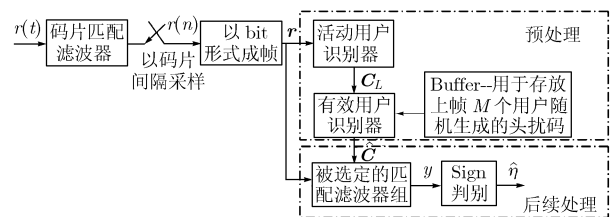


图 2 接收机系统框图

定为有效用户将进入后续处理部分,反之亦然,将省略此部分的工作,达到节省接收机能量消耗的目的。

实验中 Ad hoc 网络所有结点通信方式都是半双工通信;网络中的结点总数记为 M ;网络中处于发送信息状态的结点即活动用户(active user)数记为 K ;对于某指定接收机来说, K 个活动用户中确实发往该指定接收机的用户数即该指定接收机的有效用户(virtual user)数记为 $L(L \leq K)$;此外,扩频处理增益即扩频序列长度为 N 。

根据式(4),在某指定接收机接收端经码片采样成帧后观测向量 \mathbf{r} 的表达式:

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^K \mathbf{s}_k + \mathbf{n} = \sum_{k=1}^K a_k \mathbf{c}_k \mathbf{d}_k^T + \mathbf{n} = \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{d} + \mathbf{n},$$

$$\mathbf{r}, \mathbf{n} \in \mathbf{R}^{N \times P}, \mathbf{C} \in \mathbf{R}^{N \times K}, \mathbf{A} \in \mathbf{R}^{K \times K}, \mathbf{d} \in \mathbf{R}^{K \times P} \quad (5)$$

结合式(3),式(4),式(5)观测向量 \mathbf{r} 又可以分为头部数据 \mathbf{r}_H 和数据 \mathbf{r}_D 两部分表示:

$$\mathbf{r} = [\mathbf{r}_H; \mathbf{r}_D], \quad \mathbf{r}_H = \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{H}, \quad \mathbf{r}_D = \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{Data},$$

$$\mathbf{r}_H \in \mathbf{R}^{N \times J}, \quad \mathbf{r}_D \in \mathbf{R}^{N \times (P-J)} \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_K^T]^T, \quad \mathbf{Data} = [\mathbf{data}_1^T, \mathbf{data}_2^T, \dots, \mathbf{data}_K^T]^T,$$

$$\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{K \times J}, \quad \mathbf{Data} \in \mathbf{R}^{K \times (P-J)} \quad (7)$$

\mathbf{r} 为观测向量; \mathbf{c}_k 为扩频码字, $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_K]$; \mathbf{n} 为 0 均值、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声向量; a_k 为接收到的调制在扩频码字 \mathbf{c}_k 上的未知幅度, $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_K)$; 假设 $\mathbf{d}_k \in \{+1, -1\}$ 为独立等概伯努利分布的信息向量, $\mathbf{d}_k = [\mathbf{h}_k, \mathbf{data}_k]^T$, $\mathbf{d}_k \in \mathbf{R}^{P \times 1}$, $\mathbf{d} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_K]^T$ 。

正如图 2 所示,预处理过程(preprocessing)的目的在于估计出有效用户数 K 和识别用户数 L 以及确定出观测矩阵 \mathbf{C} 和期望的解扩矩阵 \mathbf{C}_L 。估值方法的原理主要采用了基于子空间的多信号分类原理(Subspace-Based-MUSIC)。

3.2 基于子空间的多信号分类方法的基本原理

假设 \mathbf{n} 与 $\mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{d}$ 不相关,即 $E\{\mathbf{n}(\mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{d})^T\} = 0$, 观测向量 \mathbf{r} 的自相关矩阵 \mathbf{R} 可表示为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{r} \mathbf{r}^T\} = \mathbf{C} \mathbf{A}^2 \mathbf{C}^T + \sigma^2 \mathbf{I} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_n \quad (8)$$

对 \mathbf{R} 进行特征值分解(EVD)^[9], 又可以表示成下式:

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1}^K (\lambda_i + \sigma^2) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T + \sum_{i=K+1}^N \sigma^2 \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T \quad (9)$$

于是得到下面一些重要的结论^[10]:

(1)用 $\{\rho_i = \lambda_i + \sigma^2\}_{i=1}^N$ 表示 \mathbf{R} 的 N 个特征值,并按降序排列: $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_K > \rho_{K+1} = \rho_{K+2} = \dots = \rho_N = \sigma^2$ 。

(2) $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_K$ 定义为信号特征向量,由这些向量张成的空间定义为信号子空间 $\mathbf{E}_s = \text{span}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_K\}$; $\mathbf{v}_{K+1}, \mathbf{v}_{K+2}, \dots, \mathbf{v}_N$ 定义为噪声特征向量,这些向量张成的空间定义为噪声子空间 $\mathbf{E}_n = \text{span}\{\mathbf{v}_{K+1}, \mathbf{v}_{K+2}, \dots, \mathbf{v}_N\}$ 。信号子空间等价于有效用户的扩频码字向量张成的空间,即 $\text{span}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_K\} \Leftrightarrow \text{span}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_K\}$ 。

(3) $\text{span}\{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_K\}^\perp \Leftrightarrow \text{span}\{\mathbf{v}_{K+1}, \mathbf{v}_{K+2}, \dots, \mathbf{v}_N\} = \mathbf{E}_n$ (\perp 表示正交)。

(4)信号子空间正交于噪声子空间,所以有 $\mathbf{v}_j^T \mathbf{c}_i = 0, i = 1, 2, \dots, K, j = K+1, \dots, N$ 。

实际应用中,不可能取无数多的样本对自相关矩阵 \mathbf{R} 做统计,只能取一定量的样本做观测向量的时间自相关估计 $\hat{\mathbf{R}}$,又因为在预处理过程中先对头部数据做检测,检测结果决定是否进行后续处理,所以在此选择报文头部信息 J bit 的时间长度作估计:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{J} \mathbf{r}_H \mathbf{r}_H^T \quad (10)$$

理论上, J 越大估计结果越精确,但同时也带来了更大的计算量,选择时要兼顾二者来确定。

3.3 基于子空间的有效用户识别及差分极大算法

通常信号的功率要大于背景白噪声功率,得到排序后的特征向量 $\{\hat{\rho}_i = \lambda_i + \sigma^2\}_{i=1}^N$,当观测期间没有活动用户($K = 0$)时,所有的特征向量将近似为 σ^2 ,因此有

$$\hat{\rho}_1 / \sum_{i=1}^N \hat{\rho}_i \approx 1/N \rightarrow K = 0 \quad K = 0 \quad (11)$$

当有活动用户($K > 0$)时,由于 M 个用户中最多可以有 $M-1$ 个用户作为发射结点,因此从总的特征向量中取出前 M 个特征向量,差分后进行搜索,搜索到的最大值所对应的索引作为估计的活动用户数 K (通常在较好的功率控制下,信号子空间的最后一个特征向量与噪声子空间的第一个特征向量的差值最大)。

$$\max\left\{\Delta \hat{\rho}_i = \hat{\rho}_i - \hat{\rho}_{i+1}\right\}_{i=1}^{M-1} \rightarrow \Delta \hat{\rho}_K \rightarrow K \quad K > 0 \quad (12)$$

根据 MUSIC-based 方法,选择 K 个最大的特征值对应的特征向量组成信号子空间

$$\hat{\mathbf{E}}_s = [\hat{\mathbf{v}}_1, \hat{\mathbf{v}}_2, \dots, \hat{\mathbf{v}}_K] \quad (13)$$

根据前面提到 3.2 节中的(3)和(4)两条性质结合式(12)

$$g'_i = \left\| \mathbf{c}_i^T \hat{\mathbf{E}}_s \right\|^2 = \sum_{j=1}^K (\mathbf{c}_i^T \hat{\mathbf{v}}_j)^2, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

从 $\{g'_1, g'_2, \dots, g'_M\}$ 中选出 K 个最大值,对应的扩频码字序列构成所估计的观测矩阵 \mathbf{C} 。

对头部数据解扩后可形成 $K \times J$ 的矩阵记为 $\hat{\mathbf{H}} = [\hat{\mathbf{h}}_1^T, \hat{\mathbf{h}}_2^T, \dots, \hat{\mathbf{h}}_K^T]^T$ 。由于每个结点都分配了唯一的地址标识,接收结点 i 的地址表示为 \mathbf{w}_i ,如果正确解扩出头部数据,则 $\hat{\mathbf{h}}_{j_i} = \mathbf{h}_{j_i} = \mathbf{k}_j \circ \mathbf{w}_i$,从 Buffer 中找出相对应的 K 个密钥 \mathbf{k}_j ($j \in \text{TRtoRE}_i$),经过有效用户识别器解密处理 $\hat{\mathbf{h}}_{j_i} \circ \mathbf{k}_j = \mathbf{w}_i$ 后,可以确定出哪 L 个用户向接收结点 i 发送了报文。经过有效用户识别后构成的扩频码字向量记为 \mathbf{C}_L ,用于后续处理解扩数据部分信息。

4 仿真实验结果

本文应用 Matlab6.5 仿真软件实现了联合信源信道有效用户安全识别方法,将本文差分极大算法对活动用户数 K 的

估计结果与 Wu 和 Chen 文中提到的门限界定算法^[7], Liu 提出的新报文编码方法^[8]进行了比较。为度量各种算法的检测性能,本文采用估计理论中最常用到的估值统计量方差 $\sigma_K^2 = E\left[\left(K - \widehat{K}\right)^2\right]$ (活动用户数 K 的方差)和能够代表接收机性能之一的漏警概率 $P_{\text{miss}} = P(\widehat{K} < K)$ 为度量标准, \widehat{K} 是估计结果。

实验中 Ad hoc 网络模型参数 $M, K, L(L < K), N, J$ 依据各仿真情况而定。仿真在加性高斯白噪声(AWGN)信道中随机生成报文,由报头和数据两部分组成。数据部分为 1024bit 的随机二进制符号;扩频码序列为 m 序列。仿真结果是在平均 1000 次的独立运行下得到的。

根据图 2 接收机系统框图中预处理阶段进行的活动用户和有效用户识别,将主要考虑接收机对活动用户数 K 的估值方差 σ_K^2 和接收机漏警概率 P_{miss} 。图 3 是不同信噪比 SNR 下得到的对活动用户数 K 方差估计曲线,两条曲线所代表的方法分别为 Wu 和 Chen 文中提到的门限界定算法^[7]和本文的改进的差分极大算法。从图 3 中可以看出随着 SNR 的提高方差 σ_K^2 随之下降, K 的估计精度有所提高,并且本文的方法在低信噪比条件下,对 K 的估计精度要优于前者。图 4 是不同信噪比 SNR 情况下比较得到的接收机漏警概率 P_{miss} 曲线,两条曲线所代表的方法分别为 Derong Liu 提出的编码方法^[8]和本文提出的有效用户安全识别方法。由于接收机采用了基于子空间的有效用户识别,检测到的漏警概率要低于 Derong Liu 提出的编码方法。图 3, 图 4 的仿真比较结果如表 1 所示。图 5 是扩频增益分别为 $N = 31$ 、 $N = 63$, 不同活动用户数 K 下得到的接收机漏警概率 P_{miss} 曲线。图中随着 K 的增加 P_{miss} 增大,当 $K = 20$ (约为总的用户数的 2/3)时,两种扩频增益下接收机漏警概率 P_{miss} 分别达到了 4%和 7%左右;同时随着扩频增益的提高,漏警概率 P_{miss} 相对有所下降;当活动用户数 K 达到一定数量时,由于信道中的多址干扰(Multiple Access Interference, MAI)增强,噪声干扰将主要以多址干扰为主,即使提高扩频增益也不能带来接收机漏警概率的有效改善。在给定的漏警概率下无线 Ad hoc 网络中能够“容忍”多少活动用户同时处于发送状态呢?为此先定义一个比值 $\lambda = K / M$, 其意义为活动用户数 K 占整个网络用户数 M 的比重。图 6 的实验证明:当允许接

机漏警概率为 10%以下时, $M = 31$ 的网络允许最多 $K = \lambda M = 0.7 \times 31 \approx 22$ 个活动用户同时处于发送状态,而 $M = 63$ 的网络允许最多 $K = \lambda M = 0.75 \times 63 \approx 47$ 个活动用户同时处于发送状态。图 7 是活动用户数 K 分别为 12、16、20 下,不同信噪比 SNR 下得到的接收机漏警概率 P_{miss} 曲线。随着信噪比 SNR 的提高漏警概率随之下降。此图的仿真结果再次印证了图 5 的仿真结果:随着 K 的增加 P_{miss} 增大。

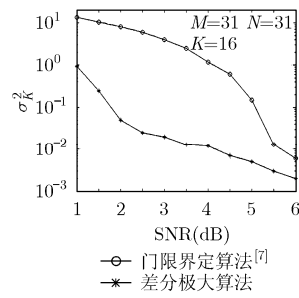


图 3 不同信噪比 SNR 下的活动用户数 K 方差估计

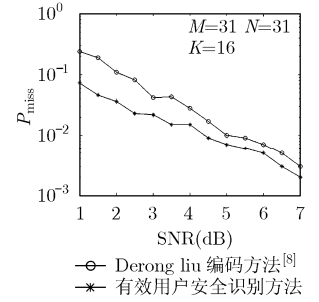


图 4 不同 SNR 两种算法漏警概率

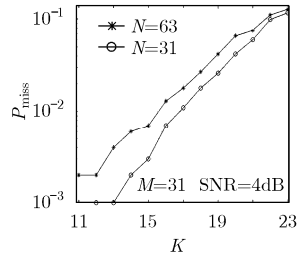


图 5 不同 K 、 N 下的漏警概率

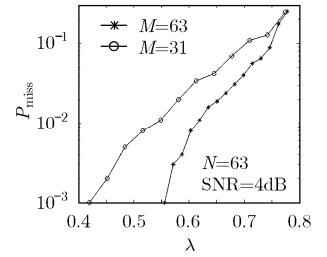


图 6 不同 λ 、 M 下的漏警概率

表 1 与其它方法的测试结果比较

SNR		1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB
σ_K^2	门限界定算法 ^[7]	13.4300	8.0770	3.9810	1.1810	0.1500
	差分极大算法	0.9380	0.0500	0.0200	0.0120	0.0050
P_{miss}	Derong Liu 的编码方法 ^[8]	0.240	0.110	0.042	0.028	0.010
	有效用户安全识别方法	0.073	0.036	0.022	0.015	0.007

5 结论

本文提出了一种无线 Ad hoc 网络中的联合信源信道有效用户安全识别方法,在每个报文的开始处嵌入一个与信源数据有关的随机、安全可靠的、可识别的头标识,对已知头标识采用加密保护。并通过有效用户识别算法只对头部数据进行有效用户安全识别,无需对整个报文解扩,达到节省接收机能量消耗的目的。

仿真实验结果主要以漏警概率和估计方差为主要衡量指标,并与其它的方法进行了比较,实验表明:本方法改善

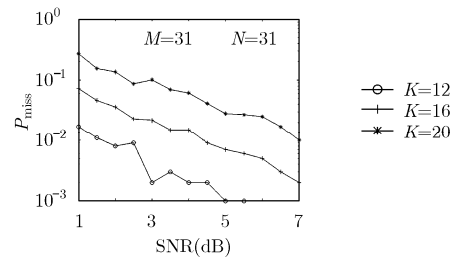


图 7 不同 SNR、 K 下的漏警概率

了漏警概率和活动用户数估计精度,不但减少了丢弃重发,节省无线模组工作时的能量消耗,同时达到了对有效用户安全识别的目的,提高了信道安全性能。

参 考 文 献

- [1] Sousa E S and Silvester J A. Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packet radio networks. *IEEE Trans. on Comms.*, 1988, 36(3): 272-281.
- [2] Varanasi M K and Aazhang B. Multistage detection in asynchronous code division multiple access communications. *IEEE Trans. on Comms.*, 1990, 38(4): 509-519.
- [3] Xie Z, Rushforth C K, Short R T, and Moon T K. Joint signal detection and parameter estimation in multiuser communications. *IEEE Trans. on Comms.*, 1993, 41(8): 1208-1215.
- [4] Varanasi M K. Decision feedback multiuser detection: A systematic approach. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999, 45(1): 219-240.
- [5] Xu Z and Tsatsanis M K. Blind adaptive algorithms for minimum variance CDMA receivers. *IEEE Trans. on Comms.*, 2001, 49(1): 180-194.
- [6] Anderson Ross J 著. 蒋佳, 刘新喜, 等译. 信息安全工程. 机械工业出版社, 2003: 61-63.
- [7] Wu W and Chen K. Identification of active users in synchronous CDMA multiuser detection. *IEEE J. Sel. Areas Comms.*, 1998. 16 (9): 1723-1735.
- [8] Liu D, Cai Y, and Tu G. Novel packet coding scheme immune to packet collisions for CDMA-based wireless Ad hoc networks. *IEE Pro.-Commun.*, 2006, 153(1): 1-4.
- [9] 沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. 信号系统分析与处理. 中国科技大学出版社, 2003: 456-462.
- Shen F L, Ye Z F, and Qian Y M. Signal System Analysis and Processing. University of Science and Technology of China Press. 2003: 456-462.
- [10] Kay S M. Modern Spectral Estimation. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988, ch. 13.
- 范 靛: 女, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为通信与信息系统.
- 张 灿: 女, 1954 年生, 研究员, 研究方向为移动无线通信、无线网络网络安全.
- 丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 研究方向为信号与信息处理.
- 吴伟仁: 男, 1953 年生, 研究员, 研究方向为无线通信、空间通信.
- 涂国防: 男, 1954 年生, 教授, 研究方向为移动无线通信、信号与信息处理.