

功率受限和自动重传请求条件下系统吞吐量最大化的研究^{*})

彭烈新 朱光喜 卢小峰 宁国勤

(华中科技大学电信系宽带无线通信与多媒体技术研究中心 武汉光电国家实验室 武汉 430074)

摘要 本文研究了具有 ARQ 功能的基于衰落信道和数据链路层缓冲区队列状态的资源最优分配问题,目标是通过自适应调整功率分配和调制方式,在系统平均功率的限制下,使系统的吞吐量达到最大。在这个系统中并不限制 ARQ 的重发次数,所以最大化系统的吞吐量等效于使链路层的缓冲区溢出的数据包最小。本文把这样一个优化问题构造为马尔可夫决策过程,并提出了用动态规划解决该问题的方法。出于实用性的考虑,本文还提出了一种简单的次优资源分配方法,仿真结果显示这种方法与最优的调度方法性能非常接近。

关键词 MDP, 动态规划, 吞吐量, ARQ, POMDP

On Maximization under the Constraint of Power with ARQ Considering the Fading Channels and Buffer

PENG Lie-Xin ZHU Guang-Xi LU Xiao-Feng NING Guo-Qin

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan National Laboratory For Optoelectronics, Wuhan 430074)

Abstract The problem of adaptive power allocation and modulation mode selection with ARQ over fading channels and finite buffer size in the link layer is considered. In the model, the paper first assumes that knowledge of the buffer occupancy and the fading state is available at the transmitter. The objective is to vary the transmission power and modulation mode according to the buffer and channel conditions so that the long-term system throughput is maximized under some average and peak transmission power constraint. Here, the retransmission times of ARQ is not constrained, so maximization of system throughput is equivalent to minimizing packet loss due to buffer overflow regardless of transmission error. The paper formulates this optimization problem as a Markov decision process(MDP) and use dynamic programming techniques to obtain the solution. A simplified scheduling scheme is also presented for package transmission and the results show that the minimum of the package loss is very close to that achieved by the optimal policy.

Keywords MDP, Dynamic programming, Throughput, ARQ, POMDP

1 引言

在现代通信系统中,要达到某一性能,必须对所获得的资源进行优化。这些资源包括功率、频率等。在无线通信中,设备的功率和无线链路上所能得到的速率尤为宝贵。然而,当我们考虑这些资源分配的最优化时,数据链路层的缓冲区的状态是必须考虑的。但在实际系统中,网络数据是突发性的,以至到达各个用户的数据并不能保证和目标的传输速率同步。换句话说,当系统的物理层已经分配速率以及发射功率的时候,有可能并没有这么多要发送给用户的数据,也有可能缓冲区的数据得不到及时发送,造成较大时延甚至溢出。所以,预先设定的用户传输速率将使系统的资源得不到最好的利用。这种状况促使我们产生把资源分配和缓冲区状态联合优化的动力。同时为了减轻无线信道的不利影响,我们还引入链路层的自动重传请求(ARQ)技术来综合优化。

在我们的系统中,数据包按泊松分布抵达缓冲区,调度器从缓冲区取出数据包并映射为多进制正交幅度调制(MQAM)符号。我们的信道模型为有限状态的 Rayleigh 相关信道 FSMC^[1]。优化的目的是在限制平均功率的条件下,通过调整发射功率和调制方式来使系统吞吐量最大。在这个

系统中,我们并不限制 ARQ 的重发次数。因此,我们定义系统吞吐量为进入缓冲区的数据包与缓冲区溢出的数据包之差,同时用进入缓冲区的数据包来归一化。

在定义完以上问题后,我们还要在接收机端作出两种假设:首先,接收机对发射机的发射功率和 QAM 调制尺度是已知的。其次,反馈信道是理想化的,也就是说,从发射机返回的 ARQ 的信息无差错地反馈给发射机。

关于这方面的研究已经有了一些成果^[2~4]。文[2]提出了可变速率、可调功率的 MQAM 调制方案。为了使平均速率达到最大,作者提出注水法的功率分配方式。文[3]分析了根据信道状态和缓冲区的数据长度进行功率和速率的自适应优化的问题,优化的目标是在链路层数据发射时延的限制下,平均功率最小化。这些分析表明,结合物理层和数据链路层的自适应方案很有必要,比单独的物理层或链路层的自适应方案具有更好的性能。文[4]证明了最优发射速率是信道增益的单调非降函数。

我们的工作与文[2]很相似,都是有限功率下发射速率或吞吐量的最大化问题。但是,在文[2]中,作者假设在数据链路层总是有足够的数据供物理层的发射机使用,这显然与实际的系统不相符合,我们的研究不但考虑了数据链路层的数

^{*}国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统基础理论与技术研究”(No. 60496315)、国家高技术研究发展计划(863 计划)(No. 2003AA12331005)。彭烈新 博士研究生;朱光喜 教授、博导,国务院信息与通信学科评议组成员。

据长度,还考虑了数据抵达链路层的模型,与文[2]相比,我们的研究更接近实际的应用系统。

我们的研究也与文[3]、[4]和[7]不同,我们设定的缓冲区的长度是有限的,对速率的控制采用 MQAM 的方式并结合了链路层的 ARQ,使系统的分析更为全面和实用。我们的自适应调整是基于数据帧的,也就是说,在一帧内,我们保持发射功率和调制方式不变。这避免了如文[2]和[4]因发射机和接收机频繁交换状态信息导致系统过于复杂的问题。

本文第 2 节更详细地定义我们的优化问题。第 3 节把问题建模为马尔可夫决策过程,并用动态规划的方法解决这个问题。第 4 节提出了更为简单的次优解决方案。第 5 节用仿真结果验证方案的可行性。最后给出了的结论。

2 问题的定义

2.1 系统模型

我们首先定义本文使用的参数:数据按泊松分布抵达缓冲区,平均速率为 λ 包/秒,包的长度为 L 位。缓冲区最大长度为 B 个数据包,使用 WHz 信道带宽。假定噪声为高斯加性噪声,其功率谱密度为 $N_0/2$ 。信道为 Rayleigh 衰落信道,其最大多普勒频移是 f_m Hz。K 是 FSMC 模型的最大状态数。 T_s 是 QAM 调制符号的周期。选择奈奎斯特信号脉冲 $\text{sinc}(t/T_s)$,那么 $T_s=1/W$ 。在发射功率和信号星座图间变化的条件下,每一帧的调制符号的长度都为 F ,并且帧周期为 $T_f=FT_s$ 。

用 $S_i=(B_i, H_i, Q_i)$ 表示帧 i 的系统状态,其中 B_i 是在帧 i 开始时缓冲区的数据包的个数; H_i 是信道状态,它在整个帧周期内是不变的; Q_i 是接收机返回的 ARQ 应答。显然有 $0 \leq B_i \leq B$ 。在已知 S_i 的条件下,调度器采用控制行动,其行动集为: $\Omega_i=U_i \times P_i$,其中 U_i 是发射速率, P_i 是发射功率。在每一帧开始时,调度器从数据缓冲器取 u 个数据包,先经过编码调制后,由发射机发射到无线信道;信号经过无线信道的衰减和高斯噪声恶化后被接收机接收,并处理后进行解调。然后接收机先试图纠正解调信号中的错误。如果所有的错误都能被纠正,表明这次发送是成功的,接收机随后通过理想信道给发送机发送一个正确接收的应答($Q_i=1$)。发射机接收到这个应答后,调度器从缓冲区清除刚才发送的数据。否则,接收机就会丢弃接收的数据包并向发射机返回接收失败的应答($Q_i=0$),要求发射机重新发送刚才的数据包。发射机接收到失败的应答,会重新发送刚才的数据包。这个过程会一直重复下去,直到接收到正确的应答或数据缓冲区溢出。这个过程的动态方程可表示如下:

$$b_{k+1} = \min\{b_k - q_k u_k + a_{k+1}, B\} \quad (1)$$

这里 b 是缓冲区队列长度, u 是调度器送给发射机的数据包, a 是进入缓冲区的数据包, q 是接收机的应答。

2.2 FSMC 模型

我们要用有限状态的马尔可夫信道(FSMC)模型来代表 Rayleigh 信道。假定 γ 代表信道功率增益,那么 γ 服从指数分布:

$$p_\gamma(x) = 1/\gamma_{avr} \exp(-x/\gamma_{avr}) \quad (2)$$

这里 γ_{avr} 是平均信道功率增益。把 γ 分割成有限个间隔值,即离散化处理, Rayleigh 衰落信道就可以由 FSMC 来近似描述。关于这方面的详细分析,可参阅 Wang 和 Moayeri 的文[1],在这一节里我们只给出我们要用到的结果。

假如我们把信道功率增益分成 $K+1$ 个状态区间, $0=\gamma_0$

$< \gamma_1 < \dots < \gamma_K = \infty$ 。在每一帧开始时,如果信道功率增益 γ 处于区间 $[\gamma_k, \gamma_{k+1}]$,我们就说信道的状态为 k ,其静态概率为:

$$p_k = \exp(-\gamma_k/\gamma_{avr}) - \exp(-\gamma_{k+1}/\gamma_{avr})$$

假定信道是慢衰落信道,那么状态变化只在相邻的状态间产生,即

$$p_{k,k+1} = N_{k+1} T_f / p_k, p_{k,k-1} = N_{k-1} T_f / p_k$$

$$p_{i,j} = 0 \quad |i-j| \geq 2$$

其中 N_k 是在状态 k 跳变的速率(向一个方向,向下或向上),其近似值为:

$$N_k = \sqrt{2\pi\gamma_k/\gamma_{avr}} f_m \exp(-\gamma_{k+1}/\gamma_{avr})$$

状态 k 保持不变的概率为:

$$P_{k,k} = 1 - P_{k,k+1} - P_{k,k-1}$$

3 受约束的 MDP

一个马尔可夫决策过程由以下要素组成:一个时隙集合 $T=\{1,2,\dots,m\}$ 、一个状态集合 $S=\{S^1, S^2, \dots, S^Q\}$ 、一个行动集合 $U=\{U^1, U^2, \dots, U^Q\}$ 、一个当前目标函数和一个与行动有关的状态转移概率函数集合。我们的目标函数是在一定条件下使系统的吞吐量最大化。前面已分析过,系统的吞吐量最大化等效于最小化缓冲区的溢出包的个数 L_0 。在时刻 i 期间,数据包溢出的个数为:

$$L_0(b, u, q) = \sum_{k=1}^{\infty} k p_A(B - (b - qu) + k)$$

$$= (\lambda T_f - (B - b + qu)) \left(1 - \sum_{k=0}^{B-b+qu-1} P_A(k)\right)$$

$$+ (B - b + qu) p_A(B - b + qu)$$

其中, b 是缓冲区的包的数量, A 是在时隙 i 时段内进入缓冲区的包数, k 是溢出的包数。下面计算包的错误的概率。在已知编码调制方式、发送速率、发送功率和信道状态的情况下,可以得到比特错误的概率。在已知纠错方案的前提下,可以得到包的错误概率,假定纠错方案可以纠正长度为 L 位的数据包中的 l 位错误,我们得到数据包的错误概率为:

$$P_b(u, h, P) = \sum_{j=1}^L \binom{L}{j} (P_b(u, h, P))^j (1 - P_b(u, h, P))^{L-j} \quad (3)$$

现在计算位错误概率 P_b 。采用 MQAM 调制方式,在前面假定的信道模型下,还要假定解调方式是理想相干相位检测。在这样的假设条件下,我们可以得到位错误概率的一个边界条件[6]:

$$P_b(u, h, P) \leq 2 \exp\left(-1.5 \frac{P\gamma_h}{W N_0 (2^u - 1)}\right) \quad (5)$$

进一步假设 $h \geq 2$ 和 $0 \leq \text{SNR} \leq 30$ dB,可以得到更紧的边界:

$$P_b(u, h, P) \leq 0.2 \exp\left(-1.5 \frac{P\gamma_h}{W N_0 (2^u - 1)}\right) \quad (6)$$

可以形成如下马尔可夫决策过程:当 $T \rightarrow \infty$ 时,确定 $[(U_0, P_0), (U_1, P_1), \dots, (U_{T-1}, P_{T-1})]$,使

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} L_0(S_i, \Omega_i) \right\} \quad (7)$$

最小化,同时限制

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \sum_{i=0}^{T-1} P_i \right\} \leq \bar{P}, i=0, 1, \dots, T-1$$

这里 \bar{P} 是限制的平均功率。对这一类的优化问题[5],可以用动态规划来解决。首先列出 Bellman 方程[8]:

$$\theta + J(S_i) = \min_{u_i \in U} [L_0(S_i, \Omega_i) + \int_0^\infty pr(S_i \rightarrow S_{i+1} |$$

$$\Omega_k)J(S_{i+1})dS_{i+1}]$$

从这个方程中可以看出,解决这类问题的关键是要得到状态(信道、缓冲区和应答)转移概率。在这几个状态中,信道和缓冲区状态是相互独立的,但应答状态要依赖前两个状态。写出状态转移概率公式:

$$p(s_{k+1}=S' | s_k=S', (u_k, P_k) \in \Omega_k) = p(b_{k+1}, h_{k+1}, q_{k+1} | b_k, h_k, q_k, u_k, P_k) = p(q_{k+1} | h_k, u_k, P_k) p(h_{k+1} | h_k) * \delta(b_{k+1} - (b_k + u_k * q_{k+1} + \lambda T_f))$$

式中, $p(h_{k+1} | h_k)$ 是已知的, $p(q_{k+1} | h_k, u_k, P_k)$ 也可以由下式计算出:

$$p(q_{k+1}=0 | h_k, u_k, P_k) = P_p(u, h, p)$$

$$p(q_{k+1}=1 | h_k, u_k, P_k) = 1 - P_p(u, h, p)$$

所以能得到从 S_k 到 S_{k+1} 的转移概率。用动态规划的方法,很容易得到最优的调度方案。但详细的计算过程不在此处详细介绍。

4 一种简化的次优调度方案

用前面所介绍的动态规划的方法可以很精确地解决我们的问题,并且结果在理论上是最优的。但是这种最优的解决方法有以下两种缺陷:1)用动态规划解决问题非常繁琐,可能会造成较大的时延。2)动态规划要存储每一步的运算结果,这要耗费大量的设备存储空间。显然,动态规划解决此类问题是不实用的,促使我们研究一种更简单的次优算法。这一节介绍我们提出的次优方案。

显然,从公式(7)中,我们并不能得到任何的提示。我们先从信息理论的角度分析物理层的特性:当信道 SNR 很小时,有 $\log(1 + P_n h_n) \approx P_n h_n$; 当信道 SNR 很大时,得到 $\log(1 + P_n h_n) \approx \log P_n + \log h_n$ 。从以上信道、功率和容量的关系,站在物理层的角度,我们知道:当信道很差时,自适应的功率分配方案是必要的;但当信道条件很好时,用固定功率发送与自适应功率分配方案产生的差别并不大。这个现象与注水法的功率分配方式也是吻合的。下面考虑链路层的缓冲区的状态。很显然,缓冲区的数据包越多,为使缓冲区不致于溢出,就要求数据包尽快发送,这就要求物理层分配较大的功率和较高的速率。综合这两种因素提出我们的次优的功率分配方案。发送速率可以由信息理论计算:

$$p_n = \begin{cases} 0 & \text{if } 1/h_n > 1/T^0 \\ \tau_n (\lambda_n - \beta_n 1/h_n) & \text{if } 1/T^0 \geq 1/h_n \geq 1/T_n^p - P'_n \\ P'_n \tau_n & \text{if } 1/h_n < 1/T_n^p - P'_n \end{cases}$$

这里, τ_n 是与缓冲区的队列长度成正比的系数, λ_n 和 β_n 由下式确定:

$$\lambda_n = \frac{P'_n 1/T^0}{1/T^0 - 1/T_n^p + P'_n}, \beta_n = \frac{P'_n}{1/T^0 - 1/T_n^p + P'_n}$$

$1/T^0, 1/T_n^p$ 对应物理层中分配零功率和满功率的两个特殊点。感兴趣的读者可参阅文[9]。功率分配完毕后,要计算 $C_n = \log(1 + P_n h_n)$, 然后从发射速率集 U 中找出小于或等于 C_n 的最接近的值 u_n 作为我们的发射速率。这样就形成了我们的次优方案。

5 仿真结果和讨论

在这一节里,我们要给出不同调度策略下的仿真结果。首先比较使用 ARQ 和不使用 ARQ 的性能差别,然后比较最优的调度策略和我们建议的次优的调度策略。

我们设定的仿真参数如下:进入缓冲区的数据包的平均

速率为 $\lambda = 10^3$ packets/sec, 数据包的位数 $L = 100$ bits, 缓冲区的队列长度 $B = 15$ packets, 帧长 $F = 10$ symbols, 符号周期 $T_s = 0.1$ ms, 噪声功率 $N_0 = 10^{-4}$ Watt/Hz, 多普勒频移 $f_m = 100$ Hz, 信道平均功率增益 $\gamma_{avr} = 0.8$, 信道状态数 $K = 8$ 。还要假设这 8 个信道功率增益区间是按等概率来划分的。现在比较 3 种方案:一种是公式(7)中具有 ARQ 功能的最优方案(ARQ 方案);一种是固定 Ber、速率和功率自适应方案(Fixed-Ber 方案);第三种是 Ber、功率和速率都可调的自适应方案(flexible-Ber 方案)。图 1 给出了这 3 种方案的仿真结果。仿真结果与我们所预料的结果是一致的:ARQ 方案最优, flexible-Ber 方案次之, Fixed-Ber 方案性能最差, 因为它的自由度是最少的。

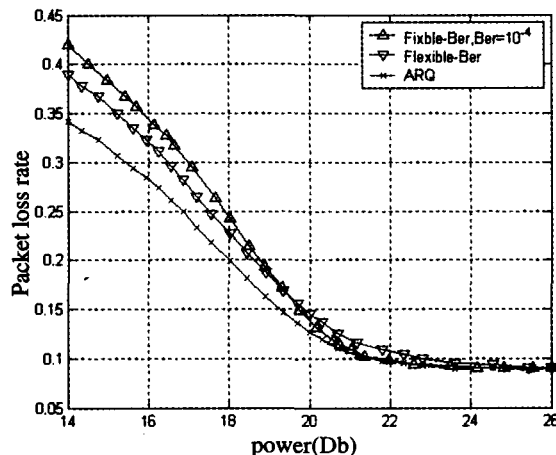


图 1 固定 Ber、可调 Ber 和自适应 ARQ 3 种方案的性能

在图 2 中,我们分别画出了两种速率调制步长(1/4, 1/8, 假如满速率为 1)下最优和次优方案的比较。结果显示,我们的次优方案与最优方案非常接近。但不同的速率步长的方案表现的性能是不同的,速率步长越小,调整越精确,性能就越优异,尤其是在低信噪比情况下。

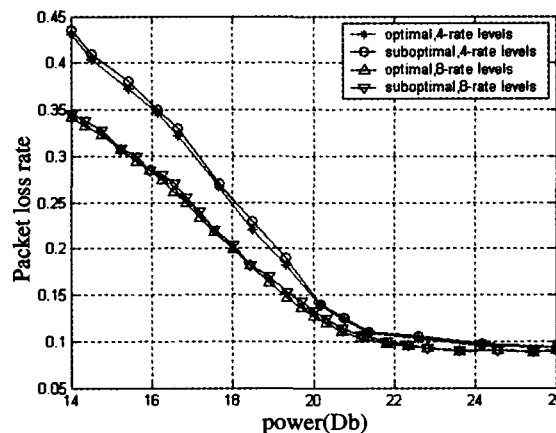


图 2 最优和次优方案在不同速率步长下的性能比较

结论 本文研究了信道和缓冲区队列自适应传输方案和调度的问题,构造了在平均功率限制条件下具有 ARQ 功能的系统吞吐量最大化的马尔可夫决策过程模型。给出了该问题的动态规划求解方法并给出了仿真结果。仿真结果显示,自适应的 ARQ 方案提高了系统的性能。基于实用性考虑,我

们提出了一种简单的次优方案,仿真结果显示该方案具有与最优方案相近的性能。

参考文献

- 1 Wang H S, Moayeri N. Finite-state markov channel - a useful model for radio communication channels. *IEEE Trans Vehicular Technology*, 1995;473~479
- 2 Goldsmith A J, Chua S G. Variable-rate variable-power mqam for fading channels. *IEEE Trans Communications*, 1997;1218~1230
- 3 Collins B, Cruz R. Transmission policy for time varying channel with average delay constraints. In: *Proc 1999 Allerton Conf on Commun Control and Comp*, 1999. 1~9
- 4 Berry R A, Gallager R G. Communication over fading channels with delay constraints. *IEEE Trans Information Theory*, 2002;

- 1135~1149
- 5 Bertsekas D P. *Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models*. Prentice Hall, 1987
- 6 Foschini G J, Salz J. Digital communications over fading radio channels. *Bell Syst Tech J*, 1983;429~456
- 7 Hoang A T, Motani M. Buffer and channel adaptive transmission over fading channels with imperfect channel state information. In: *Wireless Communications and Networking Conf*. 2004, 3;1891~1896
- 8 Bertsekas D P. *Dynumic Prngrumming und Optimal Control*. Athena Scientific, 1995, 2
- 9 Liu Xiangheng, Goldsmith A J. Optimal power allocation over fading channels with stringent delay constraints. In: *IEEE International Conference on*, 2002, 3;1413~1418

(上接第 21 页)

4 存在的问题与技术路线

科学合理地建构弱点数据库对收集、存储和组织弱点信息,避免繁重而重复性的整理工作,以及进一步进行弱点分析等方面具有重要意义。通过对现有弱点数据库的分析,我们发现它们普遍存在以下问题:1)现有的弱点数据库在描述程度、收录数量、更新速度等方面各有所长,均不全面;2)对弱点简介等属性的描述通常都使用诸如英语、汉语等自然语言,这种方法尽管给维护者带来一些便利,但由于目前计算机还无法自动有效地处理自然语言,因此对弱点的进一步分析工作需要人参与完成,这给弱点研究工作带来沉重的负担;3)现有的弱点数据库采用各不相同的弱点分类方法,即采用不同的分类属性和属性值,使得同一弱点被不同的弱点数据库描述成不同的弱点,在这种情况下我们很难构建一个全面而综合的弱点库。尽管 CVE 的出现缓解了这一问题,但 CVE 收录的弱点数还不够全面,对弱点相关信息的描述也不够完备,并且不同弱点数据库所采用的弱点属性值不同的问题仍然没有得到解决。

针对上述问题,我们将在未来的弱点数据库研究中采取如下技术路线:开发一个统一标准的完备的弱点分类方法以整合现有的弱点数据资源,并且考虑用形式化或程序语言替代自然语言来描述弱点属性,从而实现弱点信息的自动获取以及弱点的自动检测与分析。我们认为建构这样的综合弱点数据库将具有积极的理论和现实意义。

参考文献

- 1 ISC. Internet Domain Survey. Information from the web at <http://www.isc.org/ds/>, 2005
- 2 Michener J. System insecurity in the Internet age. *IEEE Software*, 1999, 16(4):62~69
- 3 Bruce L. Managed Vulnerability Assessment (MVA)-Improve Security By Understanding Your Own Vulnerabilities! *Network Security*, Elsevier Science, 2002(4):8~9
- 4 CERT/CC. 2005. CERT/CC Statistics 1988-2005. Information from the web at http://www.cert.org/stats/cert_stats.html
- 5 CERT/CC. 2005. CERT/CC Electronic Crime. Information from the web at <http://www.cert.org/about/ecrime.html>
- 6 CNCERT/CC. 2004. CNCERTCC Annual Report. Information from the web at <http://www.cert.org.cn/>
- 7 Furnell S M, Warren M J. Computer abuse and cyber terrorism: The real threats in the New Millennium. *Computers & Security*, 1999, 18(1):28~34
- 8 Cheswick W R, Bellovin S M. *Firewalls and Internet Security: Repelling the Wily Hacker*. Addison-Wesley, 1994
- 9 Denning D E. *Cryptography and Data Security*. Addison-Wesley Publishing Company, 1983
- 10 Bishop M, Bailey D. A Critical Analysis of Vulnerability Taxonomies. [Tech. Rep. CSE-96-11]. Department of Computer Science at the University of California at Davis, Sep. 1996
- 11 Krsul I. Software Vulnerability analysis; [PhD thesis]. Department of Computer Science, Purdue University, West Lafayette,

- USA. 1998
- 12 邢棚嘉,林闯,蒋屹新. 计算机系统脆弱性评估研究. *计算机学报*, 2004, 27(1):1~11
- 13 Landwehr C E, Bull A R, McDermott J P, Choi W S. A taxonomy of computer program security flaws. *ACM Computing Surveys*, 1994, 26(3):211~254
- 14 Longstaff T. Update: CERT/CC Vulnerability Knowledge base. Technical presentation at a DARPA workshop in Savannah, Georgia, 1997
- 15 Power R. Current And Future Danger: A CSI Primer of Computer Crime & Information Warfare. *CSI Bulletin*, 1996
- 16 Du W, Mathur A P. Categorization of the 21st National Information Systems Security Conference (NISSC' 98), 1998. <http://www.cerias.purdue.edu/homes/duw/research/paper/nissc98.ps>
- 17 Aslam T. A Taxonomy of Security Faults in the Unix Operating System; [M. S. thesis]. Purdue University, 1995
- 18 Aslam T, Krsul I, Spafford E H. Use of a taxonomy of security faults. In: the 19th National Information System Security Conf. Baltimore, Maryland, 1996. 22~25
- 19 Bishop M. A taxonomy of Unix system and network vulnerabilities; [Technical Report CSE-9510]. Department of Computer Science, University of California at Davis, May 1995
- 20 Knight E, Hartley B V. Is your network inviting an attack. *Internet Security Advisor*, 2000(5-6): 2~5
- 21 Venter H S, Eloff J H P. Harmonised vulnerability categories. *South African Computer Journal*, 2003, 29:24~31
- 22 李响,李伟华. 基于星型网模型的安全漏洞分类. *计算机工程与应用*, 2002, 38(1):42, 43, 56
- 23 单国栋,戴英侠,王航. 计算机漏洞分类研究. *计算机工程*, 2002, 28(10):3~6
- 24 张永铮,云晓春,胡铭曾. 基于特权提升的多维量化属性弱点分类法的研究. *通信学报*, 2004, 25(7):107~114
- 25 CERT/CC. CERT/CC Vulnerability Notes Database. Information from the web at <http://www.kb.cert.org/vuls/2005>
- 26 SecurityFocus. Bugtraq Vulnerability Database, Available online at <http://www.securityfocus.com/bid/2005>
- 27 Internet Security Systems. X-Force Vulnerability Database. Available online at <http://xfocus.iss.net/2005>
- 28 Security Bugware. Vulnerability Archive. Available online at <http://www.securitybugware.org/2005>
- 29 Cerias of Purdue. Public Vulnerability Database. Available online at <https://coopvdb.cerias.purdue.edu/2005>
- 30 CNCERT/CC. Vulnerability Notes Database. Information from the web at <http://www.cert.org.cn/2005>
- 31 绿盟. Vulnerability Database. Available online at <http://www.nsfocus.net/2005>
- 32 Xfocus. Vulnerability Database. Available online at <http://www.xfocus.net/2005>
- 33 翟钰,张玉清,武维善,胡建武. 系统安全漏洞研究及数据库实现. *计算机工程*, 2004, 30(8):68~70, 148
- 34 杨洪路,刘海燕,贺振中. 脆弱性数据库系统的设计及构建. *计算机工程*, 2004, 30(9):195~197
- 35 孙学涛,李晓秋,谢余强. 通用脆弱点数据库的构建. *计算机应用*, 2002, 22(9):42~44
- 36 MITRE. Common Vulnerabilities and Exposures. Available online at <http://www.cve.mitre.org/2005>
- 37 eEye. Vulnerability Archive. Available online at <http://www.eeye.com/2005>
- 38 SANS. System Administration, Networking, and Security. Available online at <http://www.sans.org/2003>
- 39 ICAT. A CVE Based Vulnerability Database. Available online at <http://icat.nist.gov/2005>
- 40 INFILSEC. Vulnerability Search Engine. Available online at <http://www.infilsec.com/vulnerabilities/2003>