

文章编号:1001-9081(2013)04-0923-03

doi:10.3724/SP.J.1087.2013.00923

基于可靠性度量排序的 λ -广义球形解码算法

刘凯*, 行双双

(上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072)

(* 通信作者电子邮箱 liukai@shu.edu.cn)

摘要: 针对欠定多输入多输出(MIMO)系统中信道矩阵非满秩的问题, 提出基于可靠性度量排序的 λ -广义球形解码(λ -GSD)算法。该算法将信道矩阵直接转换成满秩矩阵, 然后采用基于可靠性度量的排序策略, 将排序后由最小均方误差算法得到的次优解作为 λ -广义球形解码算法的初始值, 减小了初始搜索半径, 同时对球形解码算法搜索半径的收缩进行了指数收敛加速处理。仿真结果表明, 所提算法同最大似然检测算法和原 λ -GSD 算法相比较, 能获得相同的误符号率性能, 而平均运算时间比原 λ -GSD 算法有明显降低。

关键词: 欠定多输入多输出系统; 多用户检测; 广义球形解码; 可靠性度量; 最小均方误差

中图分类号: TN911.72 文献标志码:A

Ordering λ -generalized sphere decoding Algorithm based on reliability measurement

LIU Kai*, XING Shuangshuang

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To solve the rank-deficient problem in the underdetermined Multiple-Input Multiple-Output (underdetermined MIMO) systems, this paper proposed the ordering λ -Generalized Sphere Decoding (λ -GSD) algorithm based on reliability measurement. The proposed algorithm transformed the rank-deficient channel matrix into the full-column-ranked one, and adopted a new ordering strategy based on reliability measurement, and then sorted the sub-optimal values of the Minimum Mean Square Error (MMSE) algorithm in a descending order and made the first point as the initial value of the λ -GSD algorithm to reduce the initial search radius. Meanwhile, the decreasing rate of the radius was accelerated with an exponential converging in the algorithm. The simulation results indicate that the proposed algorithm can approach the optimum maximum-likelihood decoding performance and has a lower average operation time than the original λ -GSD algorithm.

Key words: underdetermined MIMO system; multi-user detection; generalized sphere decoding; Reliability Measurement (RM); Minimum Mean Square Error (MMSE)

0 引言

多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)系统利用空间资源显著提高了信道容量, 但其多天线架构的引入, 增加了需要处理的信号维数, 使得 MIMO 系统的信号检测问题比单天线系统要复杂得多。对 MIMO 系统下的多用户信号检测研究, 从系统性能的意义上来说最优检测是最大似然^[1] (Maximum Likelihood, ML) 检测, 它通过遍历搜索整个发送矢量空间来获得发送矢量的最优估计。但是最大似然检测的复杂度随发送天线数呈指数增长, 在实际系统中难以实现或无法实现。为此, 学者们提出了连续干扰抵消^[2] (Successive Interference Cancellation, SIC) 和树搜索^[3] (Tree Search, TS) 检测等算法。在树搜索检测算法中, 基于信道矩阵的 QR 分解, 学者们提出了著名的球形解码^[3] (Sphere Decoding, SD) 检测算法, 该算法能够在检测性能上接近最大似然检测算法的最优性能, 并且算法的复杂度同最大似然检测算法相比能够大幅度降低, 因而成为 MIMO 系统中研究的一个重要方向。

对于发送天线数目大于接收天线数目($N_t > N_r$)的 MIMO 系统, 称之为欠定 MIMO 系统。对于欠定 MIMO 系统下多用户检测问题, 常规的球形解码算法对欠定信道矩阵进

行 QR 分解时, 上三角矩阵 R 的对角线上会出现多个零元素, 在这种情况下, 常规的球形解码算法不能直接应用。在对欠定 MIMO 系统的多用户检测问题研究中, 许多学者基于常规的球形解码算法, 提出了广义球形解码(Generalized SD, GSD) 算法。文献[5]将信道矩阵划分为两个部分, 内部为列满秩矩阵, 直接利用常规的球形解码算法, 而外部使用最大似然算法; 文献[6–7]把发送信号矢量划分成两个子矢量, 然后分别执行球形解码。这两种算法对于非恒模调制的信号进行检测时, 需要将其转换成多层 PSK 调制信号, 算法的运算量会大大增加。文献[8]将信道矩阵转换为满秩矩阵, 对转换后的满秩系统采用常规的球形解码算法, 称为 λ -广义球形解码(λ -GSD)算法。 λ -GSD 算法无需将非恒模调制(比如 QAM 调制)的信号转成多层 PSK 调制信号, 而是直接将欠定 MIMO 系统转换成新的列满秩系统, 使用常规的球形解码算法进行多用户检测, 进而缩小球形解码的搜索范围, 降低算法的复杂度。 λ -GSD 算法能够实现同最大似然检测相同的最佳性能, 但针对实际应用, 其复杂度依然很大^[8]。

为了进一步降低 λ -GSD 算法的运算复杂度, 本文在 λ -GSD 算法^[8]的基础上, 采用基于可靠性度量的排序策略, 将排序后所得到的最小均方误差(Minimum Mean Square Error,

收稿日期:2012-09-07;修回日期:2012-11-16。

基金项目:上海市教育委员会科研创新项目(11YZ14);上海大学研究生创新基金资助项目(SHUCX120144)。

作者简介:刘凯(1981-),男,湖北襄樊人,副教授,博士,主要研究方向:非线性信号处理、通信信号处理; 行双双(1987-),女,河南焦作人,硕士研究生,主要研究方向:MIMO 多用户检测。

MMSE) 次优解作为 λ -GSD 算法的初始值, 同时根据当前搜索半径的大小和发送信号的信噪比对搜索半径的收缩速度进行调整。该算法在不损失原 λ -GSD 算法的性能基础上, 能够进一步的降低检测时搜索树的维数, 从而使得算法的复杂度得到优化。

1 系统模型

考虑一个 $N_r \times N_t$ 的 MIMO 系统模型, 具有 N_r 个发送天线, N_t 个接收天线, 其中 $N_r < N_t$ 。某个时刻接收信号的矢量表达式为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{v} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{N_r}\}^T$ 是均值为 0, 方差为 σ^2 的复高斯噪声矢量; \mathbf{H} 是信道矩阵, 信道条件为平坦衰落, 每对发射天线和接收天线之间的信道衰落系数是相互独立的, 且 $\text{rank}(\mathbf{H}) = N_r$; $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_t}\}^T$ 是发射信号矢量, 每个信号分量等概率的选自复星座集合 A , 每个星座点用 q 比特表示, 星座点集合的大小为 $|A| = 2^q$; 当发送信号采用 M-QAM 调制时, 其实部和虚部均相当于采用 \sqrt{M} -PAM 调制, 即

$$\begin{aligned} \text{Re}(x_i), \text{Im}(x_i) \in \\ \{-\sqrt{M}+1, \dots, -1, 1, \dots, \sqrt{M}-1\}; 1 \leq i \leq N_t \end{aligned} \quad (2)$$

2 广义球形解码算法—— λ -GSD 算法

欠定 MIMO 系统下多用户检测就是在接收信号 \mathbf{y} 和信道矩阵 \mathbf{H} 已知的条件下检测出发送信号 \mathbf{x} 。采用最大似然算法对 MIMO 信号进行检测的目标函数可以由式(3)给出:

$$\mathbf{x}_{\text{ML}} = \min_{\mathbf{x} \in A} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2^2 \quad (3)$$

由于算法的复杂度随着用户数目的增加而呈现指数级增长, 最大似然检测算法并不能在实际中得到广泛应用。Wang 等^[7-8] 提出了 λ -GSD 算法来解决欠定 MIMO 系统下的多用户检测问题。在接收端, 将信道矩阵 \mathbf{H} 划分成 $\mathbf{H} = [\bar{\mathbf{H}}_1 \quad \bar{\mathbf{H}}_2]$, $\bar{\mathbf{H}}_1$ 为 $(N_r \times N_r)$ 的矩阵, $\bar{\mathbf{H}}_2$ 为 $(N_r \times (N_t - N_r))$ 的矩阵, 相对应的, 发送信号也被划分为 $\mathbf{x} = [\bar{\mathbf{x}}_1^T \quad \bar{\mathbf{x}}_2^T]^T$, 式(1)即为

$$\mathbf{y} = [\bar{\mathbf{H}}_1 \quad \bar{\mathbf{H}}_2] [\bar{\mathbf{x}}_1^T \quad \bar{\mathbf{x}}_2^T]^T + \mathbf{v} \quad (4)$$

引入等式

$$\mathbf{0} = \lambda \bar{\mathbf{x}}_2 - \lambda \bar{\mathbf{x}}_2 \quad (5)$$

其中: $\mathbf{0}$ 是一个长度为 $(N_t - N_r)$ 的零向量, λ 为权重因子。式(4)可变换为

$$\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x} + \tilde{\mathbf{v}} \quad (6)$$

其中: $\tilde{\mathbf{y}} = \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ 0 \end{pmatrix}$, $\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{H}}_1 & \bar{\mathbf{H}}_2 \\ 0 & \lambda \mathbf{I}_{(N_t - N_r) \times (N_t - N_r)} \end{bmatrix}$, $\tilde{\mathbf{v}} = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ -\lambda \bar{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix}$ 。因

为零均值的信号矢量 \mathbf{x} 同零均值的噪声矢量 \mathbf{v} 是相互独立的, 所以, 噪声矢量 $\tilde{\mathbf{v}}$ 仍然是一个零均值的白噪声矢量, 其方差为 $(\sigma^2, \dots, \sigma^2, \lambda P_{N_r+1}, \dots, \lambda P_{N_t})$, 其中 P_i 是 $\bar{\mathbf{x}}_2$ 中第 i 个分量 ($i = (N_r+1), \dots, N_t$) 的能量, 有 $P_i = E\{\|\bar{\mathbf{x}}_2\|_2^2\}$ 。此时, 在接收端的最大似然检测可表示为:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{ML}} = \min_{\mathbf{x} \in A} \|\tilde{\mathbf{y}} - \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x}\|_2^2 \quad (7)$$

文献[8]对 λ -GSD 算法中的权重因子的选择进行了推导, λ 应满足

$$\lambda \leq \sigma(32\varepsilon)^{1/4} / \sqrt{\delta_{\max}} \quad (8)$$

其中: $\delta_{\max} = \max\{\delta | \delta \in B_d\}$, $\delta = |\|\bar{\mathbf{x}}_{2a}\|_2^2 - \|\bar{\mathbf{x}}_2\|_2^2|$, B_d

是 δ 的所有可能值集合, ε 反映了 λ -GSD 算法和最大似然检测算法的误码概率上界之间的性能差。当信号的调制方式为 M-QAM 时, 有 $\delta_{\max} = 3E_s(N_t - N_r)((\sqrt{M} - 1)^2 / (M - 1))$, 其中 E_s 表示为平均符号能量。

3 基于可靠性度量排序的 λ -GSD 算法

3.1 可靠性度量排序方法

确定信道矩阵 \mathbf{H} 的转换矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$ 之后, 常规的球形解码算法就可以直接应用于式(7)。而在球形解码算法中, 选择的初始点如果足够靠近最大似然检测点, 球形解码算法的搜索过程将会加快。文献[8]采用迫零(Zero Forcing, ZF)检测算法的值作为球形解码算法的初始点, 但是迫零检测会使得到的初始半径仍然相对偏大, 而最小均方误差(MMSE)算法则能更好地逼近最大似然检测的值, 因此选择 MMSE 的解作为初始值: $\mathbf{x}_{int,N_t} = [(\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{I}_{N_t \times N_t} / \gamma_s)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{y}}]_{N_t}$, 其中 γ_s 为信噪比值。

同时, 恰当的检测顺序能够减少球形解码算法中搜索半径的更新次数, 进而很好地降低球形解码算法的复杂度^[9]。排序的目的在于找出一个排序矩阵, 使得信道矩阵 \mathbf{H} 进行 QR 分解后, 对发送信号的估计值能够尽可能靠近最大似然检测点, 提高球形解码算法的效率。加入排序矩阵后应有:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} = (\mathbf{HP})(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x}) = \mathbf{H}'\mathbf{x}' \quad (9)$$

对 \mathbf{H}' 的列矢量进行变换等效为对 \mathbf{x}' 中的元素做相应的排序变换, 加入排序矩阵后没有改变未知数的边界。

本文采用可靠性度量^[10] (Reliability Measurement, RM) 作为算法的排序策略, 同时采用基于可靠性度量排序所得到的 MMSE 算法的次优解的第一个点作为初始点。

首先计算出式(6)的 MMSE 判决量:

$$\mathbf{z} = (\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{I}_{N_t \times N_t} / \gamma_s)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{y}} \quad (10)$$

对于 \mathbf{z} 中各元素 z_k 的可靠性度量的表达式如下:

$$L_k = (1 - \tilde{\mathbf{H}}_k^H \mathbf{R}_y^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_k)^{-1} |z_k| \quad (11)$$

其中: $\mathbf{R}_y = \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{I}_{N_t \times N_t} / \gamma_s$ 定义 $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{N_t \times N_t} - \tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_y^{-1} \tilde{\mathbf{H}}$, 则式(11)可以写为 $L_k = \mathbf{Q}(k, k)^{-1} |z_k| L_k$ 进行降序排列:

$$L_{(N_t)} > \dots > L_{(2)} > L_{(1)}; L_{(m)} \in \{L_1, L_2, \dots, L_{N_t}\} \quad (12)$$

$L_{(N_t)}$ 为可靠性度量中的最大值, 由降序排列得到的 $L_{(m)}$ 所对应的判决量下标生成排序矩阵 \mathbf{P} , 使得

$$\mathbf{P} = [\mathbf{e}_m \quad \dots \quad \mathbf{e}_n \quad \dots]; 1 \leq m, n \leq N_t \quad (13)$$

其中: \mathbf{e}_m 和 \mathbf{e}_n 为单位矩阵中的列矢量, 满足 $L_{(m)} < L_{(n)}$ 。同时由式(12)可以得到最高可靠性度量 $L_{(N_t)}$ 所对应的 MMSE 判决量, 使得

$$\mathbf{x}_{int,N_t} = [(\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{I}_{N_t \times N_t} / \gamma_s)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{y}}]_{N_t} = [\mathbf{R}(z_k)]_{(N_t)} \quad (14)$$

3.2 搜索半径的收缩速度

在进行球形解码搜索时, 算法的复杂度与球的搜索半径有关^[11]。在一次迭代找到一个有效格点后, 如果该点到接收点的距离, 即到球心的距离 d_{new} , 小于前一次的半径 d 时, 就将半径更新为 d_{new} 。由此可以得出, 半径收缩的快慢将与复杂度有密切关系, 半径收缩的速度快, 球内需搜索的有效格点就少, 计算量就小, 反之亦然。因此对半径的收缩速度进行有效地处理来提高半径收缩速度。当搜索到一个有效格点, 如果有 $d_{\text{new}} < d$, 就将半径更新为:

$$\hat{d}_{\text{new}}^2 = kd_{\text{new}}^2; 0 < k \leq 1 \quad (15)$$

但是并不是 k 值越小越好,当球半径过小时,如果最后一次搜索到的点到接收点的距离的小于最大似然解到接收点的距离 $1/k$ 时,将搜索不到正确的点^[12],而是将上一次搜索的点作为最大似然解,因此 k 值的变化需要满足:

- 1) 搜索半径比较大时,收缩速度加快,减少回溯的次数;
- 2) 高信噪比时,算法的检测准确性提高,此时搜索半径的收缩速度应放缓,避免错过正确的点,发生检测错误。

依据上述条件,设置 k 值为一自适应的量:

$$k(d_{\text{new}}, \gamma_s, q) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{d_{\text{new}}}q\right)^{\gamma_s}\right] \quad (16)$$

其中 q 为每个信号对应的比特数。 $k(d_{\text{new}}, \gamma_s, q)$ 同当前搜索半径 d_{new} 和信噪比值 γ_s 的关系如图1所示。

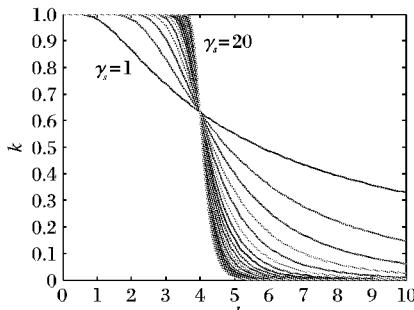


图1 $q=4$ 时, k 值的曲线

从图1可看出: k 值的变化趋势同搜索半径 d_{new} 和信噪比值 γ_s 的变化都有关系。当信噪比一定时,搜索半径 d_{new} 的取值为 $4 \leq d_{\text{new}} \leq 5$ 时, k 的取值相对比较小,更新的半径会收缩得比较快;当 $d_{\text{new}} \leq 2$ 时, k 无限趋近于1,更新的半径基本不变。当 $\gamma_s \geq 10$ 时, k 的取值无限趋近于1,这是因为信噪比越高,检测得到的信号准确性越高,搜索半径不能快速变化,避免信号检测错误。

由上述两节讨论得出改进后的 λ -GSD算法流程如图2。

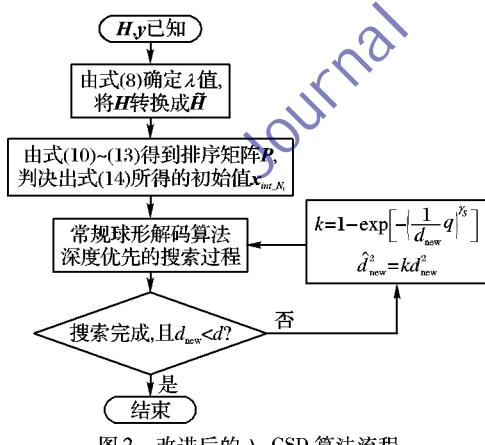


图2 改进后的 λ -GSD算法流程

4 仿真结果

考虑一个采用16-QAM调制的欠定MIMO系统,接收天线数 $N_r = 2, N_t > N_r$,信道矩阵 H 中的矩阵元素服从具有单位方差的零均值复高斯分布,噪声服从均值为零,方差为 σ^2 的复高斯分布。SNR定义为接收天线上每比特能量同噪声功率谱密度的比值,误差因子 ε 设置为0.01, λ 的值由式(8)得出。

图3为4发2收的MIMO系统,对ML、 λ -GSD^[8]和本文所提的算法进行误符号率的比较。由图3可看出,本文所提

出的算法具有同ML相同的误符号率曲线,说明所提出的算法在性能上能实现同ML相同的误符号率。

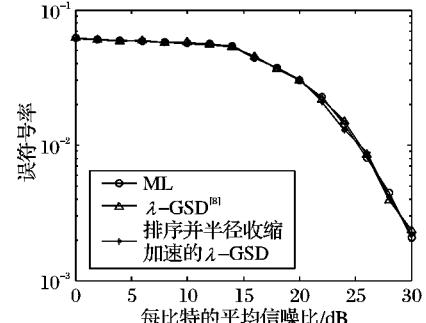


图3 4发2收MIMO系统下不同算法性能

表1 采用16-QAM调制的4发2收MIMO系统的发送和检测序列

16-QAM发送序列	所提算法检测后序列
-0.500 - 1.500i	-0.500 - 1.500i
-1.500 + 0.500i	-1.500 + 0.500i
1.500 + 0.500i	1.500 + 0.500i
-1.500 + 1.500i	0.500 - 1.500i

同时,给出一组发送序列和检测后的序列作为算法性能的参考。表1所列的是4发2收MIMO系统,信噪比为20 dB,采用16-QAM调制的发送序列和所提算法检测后的序列,可以看出所提算法能获得理想的误符号率。

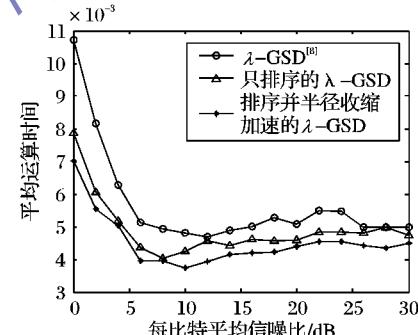


图4 4发2收MIMO系统下不同算法运算所用平均时间

对于算法的复杂度,采用平均运算时间来比较。做算法仿真的平台条件如下:CPU为Intel酷睿i3 2120处理器,主频3.3 GHz,内存4 GB,操作系统Windows XP,Matlab版本为R20011b。平均运算时间是采用Matlab中的“tic”和“toc”命令,对算法的主体运算部分的运算时间进行统计比较。

同样采用4发2收的MIMO系统,每个发送天线上发送信号的数目为 $N = 10^4$ 。由图4可以看出,所提出的算法在平均运算时间上始终小于 λ -GSD算法^[8],因为基于可靠性度量的排序策略和搜索半径收缩速度加快的处理都能够减少格点的搜索个数,从而使得球形解码算法的运算量减小,平均运算时间减少,相对应的就是算法的运算复杂度有所降低。

5 结语

针对欠定MIMO系统的多用户检测问题,本文算法在原 λ -GSD算法的基础上,采用了基于可靠性度量的排序策略,利用最小均方误差算法得到的次优解作为 λ -GSD算法的初始值,设置半径收缩因数,对搜索半径的收缩速度进行了自适应的调整。仿真表明,该算法可以达到同最大似然检测算法相同的性能,同原 λ -GSD算法相比,算法的复杂度也有明显的降低。

(下转第930页)

- (10): 12–22.
- [2] BAKER F, 毕军, 殷康. IPv4/IPv6 的共存、过渡与寻址[J]. 电信科学, 2008, 24(10): 30–37.
- [3] BELLOVIN S, TAYLOR T. RFC 2026, ICMP traceback messages [S]. [S. l.]: IETF, 2003.
- [4] WU S F, ZHANG L X, MASSEY D, et al. draft-wu-itrace-intention-00, Intention-driven ICMP traceback[S]. [S. l.]: IETF, 2001.
- [5] SAVAGE S, WETHERALL D, KARKIN A, et al. Practical network support for IP traceback [C]// ACM Special Interest Group Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM Press, 2000: 295–306.
- [6] BELENKY A, ANSARI N. Tracing multiple attackers with Deterministic Packet Marking (DPM) [C]// IEEE Pacific Rim Conference on Communications, 2003. New York: IEEE, 2003: 49–52.
- [7] BELENKY A, ANSARI N. IP traceback with deterministic packet marking [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(4): 162–164.
- [8] SNOEREN A C, PARTRIDGE C, SANCHEZ L A, et al. Hash-based IP traceback [C]// SICCOMM'01. New York: ACM Press, 2001: 3–14.
- [9] SNOEREN A C, PARTRIDGE C, SANCHEZ L A, et al. Single-packet IP traceback [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(6): 721–734.
- [10] FERGUSON P, SENIE D. RFC 2267, Network ingress filtering; defeating denial of service attacks which employ IP source address spoofing[S]. [S. l.]: IETF, 1998.
- [11] STONE R. CenterTrack: an IP overlay network for tracking DoS floods [C]// Proceedings of the 9th USENIX Security Symposium, 2000. Berkley: USENIX, 2000: 199–212.
- [12] BURCH H, CHESWICK B. Tracing anonymous packets to their approximate source [C]// USENIX LISA '00. Berkley: USENIX, 2000: 319–327.
- [13] WU J P, BI J, LI X, et al. RFC 5210, A Source Address Validation Architecture (SAVA) testbed and deployment experience [S]. [S. l.]: IETF, 2008.
- [14] 吴建平, 任罡, 李星. IPv6 网络自治系统间源地址验证技术研究[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(10): 715–719.
- [15] 吴建平, 毕军. 可信任的下一代互联网及其发展[J]. 中兴通讯技术, 2008, 14(1): 8–12.
- [16] 吴建平, 任罡, 李星. 构建基于真实 IPv6 源地址验证体系结构的下一代互联网[J]. 中国科学: 信息科学, 2008, 38(10): 1583–1593.
- [17] GILLIGAN R, NORDMARK E. RFC 2893, Transition mechanisms for IPv6 hosts and routers [S]. [S. l.]: IETF, 2000.
- [18] TSIRTSIS G, SRISURESH P. RFC 2766, Network Address Translation-protocol Translation (NAT-PT) [S]. [S. l.]: IETF, 2000.
- [19] HAGEN S. IPv6 精髓[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] SRISURESH P, EGEVANG K. RFC 3022, Traditional IP network address translator (traditional NAT) [S]. [S. l.]: IETF, 2001.
- [21] BAGNULO M, MATTHEWS P, BEIJNUM I V. RFC 6146, Stateful NAT64: network address and protocol translation from IPv6 clients to IPv4 servers [S]. [S. l.]: IETF, 2011.
- [22] NORDMARK E. RFC2765, Stateless IP/ICMP Translation Algorithm (SIIT) [S]. [S. l.]: IETF, 2000.
- [23] LI X, BAO C X, CHEN M K, et al. RFC 6219, The China Education and Research Network (CERNET) IVI translation design and deployment for the IPv4/IPv6 coexistence and transition (IVI) [S]. [S. l.]: IETF, 2011.
- [24] MANKIN A, MASSEY D, WU C L, et al. On design and evaluation of “intention-driven” ICMP traceback[C]// IEEE 10th International Conference on Computer Communications and Networks. New York: IEEE, 2001: 159–165.
- [25] BURCH H, CHESWICK B. Tracing anonymous packets to their approximate source [C]// Conference: USENIX Systems Administration Conference – LISA. Berkley: USENIX, 1999: 319–327.
- [26] SAGER G. Presentation at the Internet 2 working group: security fun with Ocxmon and Cflowd [R]. San Diego: Pacific Institute for Computer Security, 1998.
- [27] STRAYER W T, JONES C E, TCHAKOUNTIO F, et al. SPIE-IPv6: Single IPv6 Packet Traceback [C]// LCN'04: Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 118–125.

(上接第 925 页)

参考文献:

- [1] JIANG M, HANZO L. Multiuser MIMO-OFDM for next-generation wireless systems [J]. IEEE Proceedings, 2007, 95(7): 1430–1469.
- [2] LIU C H, VAIDYANATHAN P P. MMSE DFE transceiver design over slowly time-varying MIMO channels using ST-GTD [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 27–289.
- [3] 雷胜. MIMO 系统中信号检测算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [4] BOUTROS J, GRESSET N, BRUNEL L, et al. Soft-input soft-output lattice sphere decoder for linear channels [C]// GLOBECOM'03: Global Telecommunications Conference. Paris: IEEE, 2003, 3: 1583–1587.
- [5] DAYAL P, VARANASI M K. A fast generalized sphere decoder for optimum decoding of under-determined MIMO systems [C]// 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computer. Monticello, IL: [s. n.], 2003: 1216–1225.
- [6] YANG Z K, LIU C, HE J H. A new approach for fast generalized sphere decoding in MIMO systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1): 41–44.
- [7] WANG P, LE-NGOC T. Selection of design parameters for generalized sphere decoding algorithms [J]. International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2010, 3(2): 126–132.
- [8] WANG P, LE-NGOC T. A low-complexity generalized sphere decoding approach for underdetermined linear communication systems: performance and complexity evaluation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(11): 3376–3388.
- [9] HASSIBI B, VIKALO H. On the sphere-decoding algorithm II: Generalizations, second-order statistics, and applications to communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 2819–2834.
- [10] LIU K, XING S S. Combined multi-stage MMSE and ML multiuser detection for underdetermined MIMO systems [C]// CCWMC 2011: 2011 International Communication Conference on Wireless Mobile & Computing. Shanghai: IEEE, 2011: 10–14.
- [11] JEON M, LEE J. SNR adaptive limited constellation sphere decoding [C]// VTC 2009-Fall: IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1–5.
- [12] RAZAVIZADEH S M, VAKILI V T, AZMI P. A new faster sphere decoder for MIMO systems [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 86–89.