

# IDMA 系统中基于 SNR 演进和差分进化的功率优化研究

雷 萌<sup>1</sup> 朱光喜<sup>1,2</sup> 杨永立<sup>1</sup> 谭 力<sup>1</sup>

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)<sup>1</sup> (武汉国家光电实验室 武汉 430074)<sup>2</sup>

**摘 要** 交织多址(IDMA)是一种依靠交织方式来区分多用户的多址接入技术。由于其性能在等功率分配和用户数较多时急剧下降,因此在 IDMA 系统中功率控制对提高系统性能尤为重要。提出了一种基于遗传算法的新型功率优化策略,该算法利用差分进化(DE)和 SNR 演进方法来实现 IDMA 的功率控制,所得结果与之前线性规划(LP)算法的相当,但是避免了 LP 算法中需要量化和分组变量以及需要使用步进参数等缺点。

**关键词** 交织多址,SNR 演进,差分进化(DE),功率优化

**中图分类号** TP911 **文献标识码** A

## Power Optimization in IDMA with SNR and Differential Evolutions

TASSING Remi<sup>1</sup> ZHU Guang-xi<sup>1,2</sup> YANG Yong-li<sup>1</sup> TAN Li<sup>1</sup>

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)<sup>1</sup>

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Interleave Division Multiple Access(IDMA) is a multiple access scheme in which users are separated by the only means of interleavers. However, the performance of IDMA depends on power optimization because equal power re-partition significantly deteriorates the performance when the number of users increases. Therefore, we proposed the application of the genetic annealing Differential Evolution algorithm to SNR evolution for solving this optimum power allocation problem. The results obtained are similar to those with Linear Programming but there is no need to quantize or group power variables, the decay factor for controlling convergence speed is also not needed.

**Keywords** Interleave division multiple access, SNR evolution, Differential evolution, Power optimization

## 1 引言

已有的研究已经证明多用户检测可以通过减少符号间干扰、小区间和小区内干扰及多址干扰而有效地提高通信性能。因此,该技术很有希望被应用在未来无线通信系统中。然而,最优多用户检测算法的复杂度很高,其指数随用户数的增加而增长。因此,在大型系统中应用这种算法是不现实的<sup>[1]</sup>。显然,次优算法的诞生显得很正常,其代价是性能略低于最优算法。线性多用户检测算法,如解相关检测器和线性最小均方误差(LMMSE),是最常用的线性次优多用户检测算法。其复杂度与用户数的关系为  $O(K^2)$ 。这么高的复杂度对大多数蜂窝系统来说仍然是不能接受的。文献[2]中提出的迭代干扰消除算法可以提高系统性能,但是复杂度相当。

交织多址与 DS-CDMA 十分相似,完全可以把它当作 CDMA 的一种特例,在抗多径衰落和抗符号间干扰方面, IDMA 具有与 CDMA 相同的特点。除此之外,码片交织器可以进一步提高 IDMA 的性能,其复杂度却大大降低,且对码片数和迭代次数归一化后与用户数无关<sup>[3]</sup>。值得一提的是, ID-

MA 系统负载(用户数与扩频长度之比)可以很容易地超过 1,不过需要适当地控制功率<sup>[4,5]</sup>。

在已有文献中,结合线性规划的 SNR 演进最早被用于解决 IDMA 系统中的功率控制问题。文献[4]指出,等功率控制在很多情况下的实际性能很差。针对线性规划方法需要量化变量和根据经验把所有的用户分成若干组而显得不够精确和严谨的缺点,文献[6]提出了一种更加通用的优化方法即差分进化。该文献使用差分进化的方法来最大化用户效能并证实了文献[4]中得到的结论即 IDMA 系统的负载可以高达 4。该文献的主导思想是让系统经过多次迭代后能达到单用户的性能上界或者说是多用户效能等于 1,但是这种利用单一目标函数的方法有可能导致接收端的迭代次数过高。这也是文献[6]提出使用多目标函数来优化功率分配的原因之一。

在以上研究和分析的基础上,本文提出的方法是把差分进化应用于 SNR 演进来搜索最优功率分配,可以很好地消除步进参数  $\delta$  的影响和量化优化变量,对 IDMA 频谱效率的实证研究提供了很有效的工具。为了比较性能,本文使用频谱效率而不是用系统负载,原因是在 IDMA 中使用卷积码之类

到稿日期:2008-11-20 返修日期:2009-07-24 本文受国际科技合作计划项目(2008DFA11630),863 基金项目(2008AA01Z204)以及国家自然科学基金项目(60802009)资助。

雷 萌(1982-),男,博士生,主要研究方向为交织多址及多用户检测;朱光喜(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带多媒体通信等;杨永立(1971-),男,博士生,副教授,主要研究方向为无线通信系统的关键技术研究等;谭 力(1976-),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线通信系统关键技术研究及实现。

的信道编码时系统负载并不涵盖编码速率。本文通过改变编码方式(卷积码或重复码)、用户数、迭代次数等系统参数来比较其性能。仿真证明,利用简单的信道编码,IDMA系统的频谱效率也能达到3。如果使用比较低码率信道编码如LDPC码,则可以进一步减少所需的迭代次数和最小信噪比。

本文第2节给出IDMA和SNR演进的介绍;第3节是差分进化的分析;第4节给出仿真参数和结果;最后是全文总结。

## 2 SNR演进和差分进化

### 2.1 SNR演进

顾名思义,交织多址是一个唯一靠交织器来区分用户的多址接入技术。IDMA的发射端和接收端如图1所示,由此图可以看出IDMA和传统DS-CDMA系统十分相似。我们可以将扩频器视为一个重复编码模块,并与一个FEC编码模块相连,构成一个对所有用户无差别,且可获得相同码率的低码率编码器。

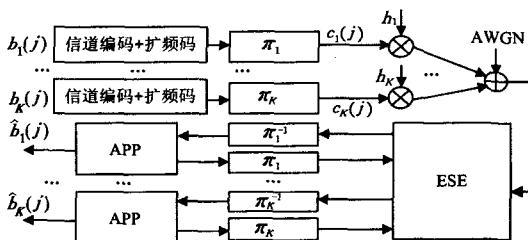


图1 IDMA系统结构

不失一般性,本文采用了BPSK调制和单路径模型。而本文得出的结论在复信道、多径衰落和多天线环境下的推广是非常直接和方便的<sup>[7]</sup>。IDMA系统接收端的详细解调算法可以参考文献[3],本文将重点集中在SNR演进方面。它最大的好处就是不需要直接仿真IDMA系统就可以通过式(1)来预测该系统的性能和误比特率。其迭代过程如式(1)所示:

$$snr_{k,new} = \frac{|h_k|^2}{\sum_{k' \neq k} |h_{k'}|^2 f(sn_{k',old}) + \sigma^2}, \forall k \quad (1)$$

其中,  $snr_k$  代表用户  $k$  的信干噪比 SINR,  $|h_k|^2$  描述了第  $k$  个用户发射功率和信道衰落的联合作用,为了方便起见,简称为用户  $k$  的功率。函数  $f()$  只与解码模块有关,在给定 SINR 的条件下,函数值为解码器输出的方差。在采用非常简单的编码器时,如重复码,  $f()$  函数可以显式地表达出来,不过文献中一般都采用蒙特卡罗仿真来得到。最后,  $\sigma^2$  是零均值高斯白噪声的方差。式(1)只给出了一个用户在进行一次迭代后的 SINR 值,要得到所有用户的 SINR 值,就需要对所有用户进行迭代。

在 IDMA 系统中,除了需要支持比较多的用户之外,各个用户所使用的交织器深度也应该足够高,否则 SNR 演进就无法很好地模拟 IDMA 的解调过程。但是,仿真实验表明用户数为 16 而且交织器长度等于 4096 已经足以达到该要求。

当迭代结束之后,最终的误比特率可以通过函数  $g$  来得到,  $BER = g(SINR)$ 。类似于  $f()$  函数,函数  $g()$  只和所使用的编码方式有关而跟用户数无关,可以通过与  $f$  相同的方法来得到。

### 2.2 差分进化(DE)

差分进化(DE)是一种适用经济、电气工程、机械工程等

各个领域的全局优化算法。该算法可以用来求解不可微分、非线性以及多模问题<sup>[8]</sup>。

DE是一种基于集群的遗传算法。初始化操作在群体(规模为NP)中随机初始化个体:

$$X^0 = [x_{i,1}^0, x_{i,2}^0, \dots, x_{i,DP}^0]$$

个体  $x_i^0 = [x_{i,1}^0, x_{i,2}^0, \dots, x_{i,D}^0]$  用于表征问题的解。 $D$  代表搜索空间的位数(在本文代表用户数目)。

在每次迭代中(进化),试验个体  $u_{i,g}$  由一个父代基向量  $x_{r_0,g}$  和两个或多个父代向量  $x_{r_1,g}$  组合而成。这个步骤称作杂交操作。如果试验个体的代价函数比当前的父代向量  $x_{i,g}$  还小,则进行变异,否则舍去该试验个体。杂交操作和变异操作需要重复进行一定的次数,算法才能结束,该次数被称作最大进化代数。

DE有几种变形,它们之间的差别主要是杂交与变异操作的方法不同。本文只涉及到最常用的,也是最经典的算法即杂交操作需要在群体中随机选择父代基向量  $x_{r_0,g}$  并加上两个随机选择的父代向量之差  $(x_{r_1,g} - x_{r_2,g})$ 。随机选择的向量应该都两两不相同而且都与当前向量不相等。在给定优化参数  $C_r$  (交叉概率)和  $F$  (缩放比例因子)条件下,所得到的试验个体的表达式如下:

$$u_{j,i,g} = \begin{cases} x_{j,r_0,g} + F \times (x_{j,r_1,g} - x_{j,r_2,g}) & \text{如果 } rand_j(0,1) \leq C_r \text{ 或} \\ x_{j,i,g} & \text{其它} \end{cases} \quad j = j_{rand}$$

$$j = 0, 1, \dots, D-1; \quad j_{rand} \in \{0, 1, \dots, D-1\}$$

$$i = 0, 1, \dots, NP-1$$

$$g = 0, 1, \dots, g_{max}$$

$$r_0, r_1, r_2 \in \{0, 1, \dots, NP-1\}, \quad r_0 \neq r_1 \neq r_2 \neq i$$

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g}, & \text{如果 } f_{obj}(u_{i,g}) \leq f_{obj}(x_{i,g}) \\ x_{i,g}, & \text{其它} \end{cases}$$

迭代步数  $g=0$  代表初始化,  $g=g_{max}$  为 DE 最大的进化代数,  $f_{obj}$  是目标或代价函数。

与一般的贪婪算法如最陡下降法相比,DE算法很少陷入局部最优解。它具有鲁棒性强、搜索速度快等特点,在许多优化问题中充分显示了它的优越性。该算法已经被成功地应用在一些经典优化问题中,如切比雪夫多项式拟合问题、Rosenbrock 问题等,是一种应用广泛的优化算法<sup>[8]</sup>。

## 3 功率优化

本文通过使用差分进化来优化 IDMA 功率分配问题。该优化问题的陈述如下:对于给定的最高误比特率  $BER_{given}$ , 存在一个相应的信干噪比  $\Gamma = g^{-1}(BER_{given})$ , 要找到一组功率  $\{|h_k|^2, k=1, \dots, K\}$  使得其总和最小而且在  $Q$  次迭代后, 每个用户的信干噪比均超过所需的  $\Gamma$  即  $\gamma_k^{(Q)} > \Gamma, \forall k$ 。  $\gamma_k^{(Q)}$  的值可以经过 SNR 演进的过程而得:

$$\gamma_k^{(q)} = \frac{|h_k|^2}{\sum_{k' \neq k} |h_{k'}|^2 f(\gamma_{k'}^{(q-1)}) + \sigma^2}, q=1, \dots, Q \quad (2)$$

$$\text{初始值为 } f(\gamma_k^{(0)}) = 1, \forall k$$

如上所述,  $f()$  和  $g()$  函数要通过蒙特卡罗仿真来得到, 但是该过程相当耗时, 因此本文只在某一些点上经过蒙特卡罗仿真得到这些函数值并利用三次 hermite 插值方法<sup>[9]</sup> 来得到中间点。采用码率为 1/2, 生成多项式为 (23, 35)<sub>8</sub> 的卷积

码时的  $f()$  和  $g()$  函数如图 2 所示。从图中能看出, 可以用少量点来完好地拟合很光滑的曲线并从中估计更多比较精确的函数值。

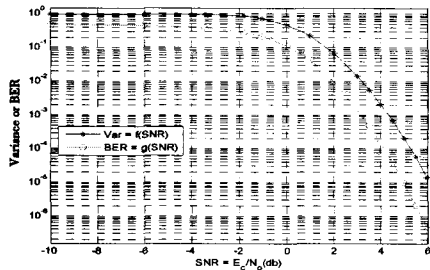


图 2  $f()$  和  $g()$  函数当采用码率为 1/2、生成多项式为 (23, 35)<sub>8</sub> 的卷积码

另外, 如式(2)所示, 方差  $\sigma^2$  的取值不影响功率分配的最优解(与串行解调相比, 在并行解调时功率排序并不重要), 只对最优解的均值有影响, 而且仅考虑在有噪声的情况即  $\sigma^2 \neq 0$  的时候。因此, 最优功率集实际上是满足某一给定的误比特率所需的最低信噪比 ( $E_b/N_0$ )。

文献[4]提出使用线性规划来解决优化问题, 尽管其性能较好但是它需要量化并把变量分组, 而且收敛速度被步进参数  $\delta$  的选择所控制。本文提出使用差分进化, 因为该算法原理简单, 容易实现而且适用于非线性、不可微分而且没有显示表达式的优化问题, 因此克服了线性规划算法的缺点, 既不需要步进参数  $\delta$  也不需要量化变量。

把搜索空间的位数设置为用户数即  $D=K$ 。在运用 DE 时需要注意其参数的选择, 因为常数  $NP$ ,  $F$  和  $C_r$  的选择可以直接影响到搜索的结果。尽管文献[6, 8]中建议使用的参数范围是靠实验得来的经验值, 但是它们可以达到比较好的性能。因此, 本文的仿真也采纳了这些建议:

$$C_r = 0.9, F = 0.5$$

$$NP = \begin{cases} 5 \times D, & 5 \times D > 80 \\ 80, & \text{其它} \end{cases}$$

另外, 文献[11]中采用  $F=0.7$ , 但是发现在同样的设置下, 当  $F=0.5$  时, 收敛速度更快而且所得的结果一致。

#### 4 仿真与结果分析

本文首先在文献[7]所描述的仿真环境下, 仿真了有 4 个用户的 IDMA 系统, 信道编码采用生成多项式为 (23, 35)<sub>8</sub> 码率为 1/2 的卷积码。因此, 该系统的负载等于 2。尽管 IDMA 系统需要假定用户较多, 但我们的仿真表明在高斯信道下较少的用户也可以满足系统正确性假设。尽管 IDMA 解调时一般要假定用户数比较多, 但是我们的仿真证明用户数较少时结论也成立。仿真结果与利用穷举法搜索得到的结果是一致的[4]。本文方法得到的功率分配为 [0, 0.5, 6.427, 7.7815], 而用线性规划方法得出的解为 [0, 0.5, 8.778, 7.6224] (单位为 dB)。二者的结果基本一致, 但本文提出的方法更容易实现, 也不需要事先量化优化变量。

值得注意的是文献[12]中所定义的系统负载  $\beta = K \times R$  ( $K$  为用户的总数, 而  $R$  是重复码和卷积码的总速率), 与文献[10]中所定义的频谱效率  $\eta$  相同。不过, 由于大多数文献更倾向于使用频谱效率的说法, 本文也采用频谱效率来衡量 IDMA 在进行功率分配之前和之后的性能。

仿真结果还证实了文献[4]中所述的结论: 在频谱效率小于等于 1 时, 不需要进行功率分配, 等功率分配就是最优的 (文献[4]使用 2 而不是 1, 因为其采用的调制方式是 QPSK 而本文使用的是 BPSK, 因此结果相当)。可是在  $\eta$  增大时, 最优的功率分配并非等功率分配, 而是将用户分成几个组, 组内用户等功率分配如图 3 所示。这里用户数为  $K=40$ , 重复码的长度只有  $S=16$ ,  $\eta = K/S = 2.5$ 。因此这也可以解释为什么文献[4]中先把用户分成几组等功率的组, 再应用线性规划来求得最优解。

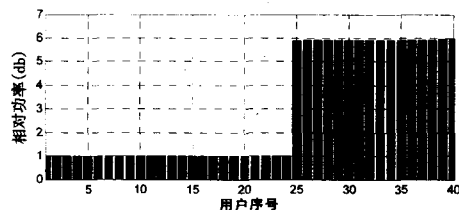


图 3 用户数为 40, 采用长度为 16 的重复码的最优功率分配

另外, 还对最优功率分配与频谱效率和迭代次数之间的关系进行了研究。本文仿真信噪比 ( $E_b/N_0$ ) 限制在 50dB 以内, 迭代次数限制在 5 到 30, 如图 4 所示。图 4(a) 采用一个速率为 1/2 的卷积码, 生成多项式为 (23, 35)<sub>8</sub>, 而没有重复码 (跟第 2 小节一致)。图 4(b) 采用相同的卷积码和长度为 8 的重复码的级联, 而图 4(c) 和图 4(d) 只采用重复码, 而且其长度分别为 32 和 16。

如图 4(a) 所示, 在没有复杂的信道编码的情况下, IDMA 的频谱效率也可以达到  $\eta=4$ 。可是随着带宽扩展增大, 要达到比较高的频谱效率 (增加用户数) 就需要适当地增加迭代次数, 如图 4(b), 4(c), 4(d) 所示。在图 4(c) 和图 4(d) 中可以看出在只有重复码的情况下, 频谱效率也可以达到传统 DS-SSMA 系统的性能极限  $\eta=1$ , 而迭代次数只有 5。当迭代次数为 30 时, 该性能可以达到 DS-SSMA 性能极限的 3 倍。为了进一步降低迭代次数, 我们认为如果采用更有效的低码率编码方式, 如 LDPC 码或 Turbo-Hadamard 码[13], 则在相同的性能条件下应该可以减少迭代次数, 而且频谱效率甚至可以接近 4。

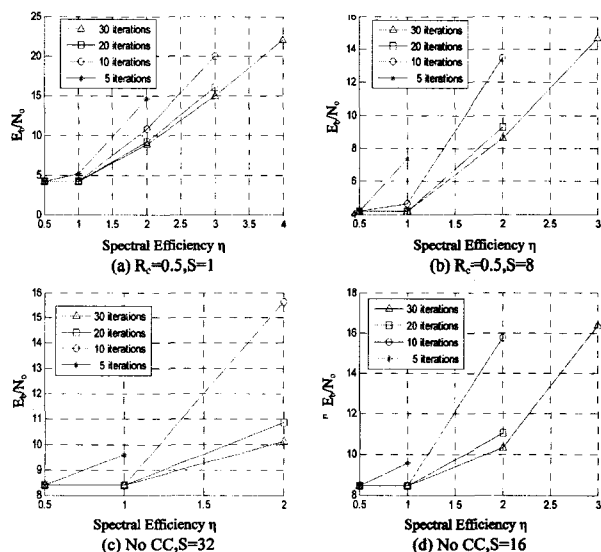


图 4 BER 为  $10^{-4}$  时系统所需要的最低平均信噪比

当然, 随着用户数的增加 ( $\eta > 1$ ), 所需要的平均发射功率

和迭代次数也会增加。由于无线通信设备对电池的要求也比较苛刻,因此这些参数是互相矛盾的。也就是说,迭代次数越多,解码和解调时间也就越长,这也会造成在接收端浪费更多的电源和有更大的时延,因此需要在这些参数中做折中。

**结束语** IDMA 是很有希望被未来超 3G(4G)系统采纳的一种多址接入技术。利用迭代多用户检测和码片交织器, IDMA 的总体性能可以超过传统的扩频系统。本文主要提出应用差分进化算法和 SNR 演进来解决 IDMA 系统中的功率分配问题。本文通过仿真得到一些有意思的结论,即采用重复码或简单的卷积码时, IDMA 系统的频谱效率可以超过 1。这有利于研究 IDMA 频谱效率极限及其功率优化理论。

### 参 考 文 献

[1] Verdu S. Multiuser detection[M]. Cambridge University Press, August 1998;474

[2] Xiaodong W, Poor H V. Iterative(turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA[J]. IEEE Transactions on communications, 1999, 47: 16

[3] Li P, Lihai L, Leung W K. A simple approach to near-optimal multiuser detection; interleave-division multiple-access[J]. IEEE Wireless Communications and Networking, 2003, 1: 391-396

[4] Li P, Lihai L. Analysis and design of IDMA systems based on SNR evolution and power allocation[C]//VTC'04-Fall. Vol. 2, 2004;1068-1072

[5] Lihai L, Jun T, Li P. Analysis and optimization of CDMA systems with chip-level interleavers[J]. Selected Areas in Commu-

nications, IEEE Journal on, 2006, 24: 141-150

[6] Zielinski K, Weitkemper P, Laur R, et al. Parameter study for Differential Evolution using a power allocation problem including interference cancellation[C]//2006 Ieee Congress on Evolutionary Computation. Vols 1-6, 2006; 1842-1849

[7] Li P, Lihai L, Keying W, et al. Interleave division multiple-access [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5: 938-947

[8] Price K, Storn R M, Lampinen J A. Differential Evolution: A Practical Approach To Global Optimization Endnote [M]. Springer, 2005

[9] David K, Cleve M, Stephen N. Numerical Methods and Software [M]. Prentice Hall, 1989

[10] L Kai, W Xiaodong, L Ping. Analysis and optimization of interleave-division multiple-access communication systems[C]// IC-ASSP '05. Vol. 3, 2005; III/917-III/920

[11] Tassing R, Zhu G, Lin P, et al. Power optimization in IDMA with SNR and Differential Evolutions[C]// 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian, China, 2008

[12] Weitkemper P, Kammeyer K D. Analysis and performance of an efficient iterative detection strategy for IDMA systems[C]// Multi-Carrier Spread Spectrum 2007. vol. 1, 2007; 87-96

[13] Li P, Leung W K, Wu K Y. Low-rate turbo-Hadamard codes [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2003, 49: 3213-3224

(上接第 10 页)

[38] Zhou B, Xu K, Gerla M. Group and Swarm Mobility Models for Ad hoc Network Scenarios Using Virtual Tracks[C]// Proceedings of MILCOM 2004. 2004

[39] Xue G T. Group mobility model in mobile peer-to-peer media streaming system[C]// Shanghai, China; IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA 90720-1314, United States. 2004

[40] 段炼, 张浩亮, 吴伟陵. 基于优选速度和方向的无线网络用户移动性模型[J]. 北京邮电大学学报, 2002, 25(4): 26-30

[41] Leung K K, Massey W A, Whitt W. Traffic models for wireless communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(8): 1353-1364

[42] Lombardo A, Palazzo S, Tedesco M. A comparative study of tracking strategies using directional mobility models [C]// 'Waves of the Year 2000'. PIMRC '97, The 8th IEEE International Symposium. 1997

[43] Kim M, Kotz D, Kim S. Extracting a mobility model from real user traces[C]//IEEE INFOCOM'06. Barcelona, Spain, 2006

[44] Blough D M, Resta G, Santi P. A statistical analysis of the long-run node spatial distribution in mobile Ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2004, 10(5): 543-554

[45] Blough D M, Resta G, Santi P. Analysis of Ad hoc networks; A

statistical analysis of the longrun node spatial distribution in mobile ad hoc networks[C]//The 5th ACM Int'l Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Atlanta, Georgia, USA, 2002

[46] Bettstetter C, Krause O. On border effects in modeling and simulation of wireless ad hoc networks[C]// The 3rd IEEE Int'l Conf on Mobile and Wireless Communication Networks(MWC-MN). Recife, Brazil, 2001

[47] 时锐, 杨孝宗. 自组网 Random Waypoint 移动模型节点空间概率分布的研究[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(12): 2056-2062

[48] 时锐, 杨孝宗. 自组网 Random Direction 移动模型点空间概率分布的研究[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1166-1173

[49] Esa H, Jorma V. Random waypoint model in n - dimensional space[J]. Operations Research Letters, 2005, 33(6): 567-571

[50] Hyytia E, Lassila P, Virtamo J. Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 680-694

[51] Navidi W, Camp T. Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(1): 99-108

[52] 康槿, 陈彦辉. 无线网络中的移动模型[J]. 电子科技, 2005(8): 62-64