

认知无线网络中基于 Sigmoid 函数的功率控制算法研究

邓小芳, 夏伟伟, 赵峰

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了实现认知无线网络中频谱分配公平性以及契合现代化绿色通信的需求, 根据非合作博弈论和干扰温度, 引入信道状态概念, 设计出一种新型功率控制算法, 分析了该算法的收敛性、纳什均衡解的存在性和唯一性; 该算法不仅可以快速收敛, 符合实时通信, 而且分布式实施, 简单实用; 仿真结果表明, 相比其他算法, 该算法系统干扰小, 能源消耗低, 具有抗干扰性能, 而且在日益多用户网络的情况下, 具有低功率、低干扰, 提高网络的整体效益, 更加符合现代化的绿色通信的需求。

关键词: 认知无线网络; 功率控制; 信道状态; 博弈论

Research on Power Control Algorithm Based on Sigmoid Function in Cognitive Radio Networks

Deng Xiaofang, Xia Weiwei, Zhao Feng

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To resolve the problem that the cognitive radio needs to realize the fairness of spectrum of spectrum allocation in the cognitive radio and satisfy the demand of modern green communication, a new utility function considering channel status, non-cooperative game theory and interference temperature is proposed, meanwhile, the convergence and the existent and unique of the Nash equilibrium is proved in this paper. The advantage of the proposed algorithm is not only meet to the real-time communication with rapid convergence but also can be implemented distributively with simple. Compared with the referenced algorithm, simulation show that this algorithm not only can save energy consumption and achieve better anti-noise effect but also can improve the overall effectiveness of the network with low power and low interference and satisfy the demand of modern green communication.

Keywords: cognitive radio network; power control; channel status; game theory

0 引言

认知无线网络中, 认知用户和主用户共享频谱, 必将对主用户产生不同程度的干扰。因此, 寻求一种有效的功率控制算法至关重要。

目前早期的大部分文献的效用函数都是基于帧成功传输效率^[1-2], 不太适合动态频谱接入的认知无线电系统, 显得不太“智能”。随后把信干噪比作为考量效用函数的主要因素, 文献[3]提出一种信干噪比(SINR)平衡算法, 具有简单和实用性, 但其 SINR 收敛于目标值上, 收敛速度低。Koskie 和 Gajic^[4]结合文献[3]设计出一种可感知干扰和背景噪音的变化动态调整 SINR, 但其效用函数中的代价部分只考虑用户的发射功率。近几年, 学者主要结合 Koskie-Gajic 算法的设计理念进行研究和设计^[5-8]。Alpcan 等人^[5]运用博弈论手段提出新的效用函数, 其代价函数以 SINR 的对数形式和功率的线性形式组成, 以实现用户成本的最小化。文献[6]设计一种由 SINR 误差的平方和线性功率的加权和组合形成新的效用函数。

本文基于上述文献中的设计思路和现代化绿色通信低功

耗、低干扰和简单实时等需求下提出一种新颖的效用函数, 并在此基础上提出了一种基于 sigmoid 函数的功率控制算法, 证明了该算法的收敛性、纳什均衡解的存在性和唯一性。最后通过仿真验证了算法的性能。

1 系统模型

首先考虑一个 N 个认知用户与 1 个主用户的认知无线网络模型, 第 i 个用户与其基站之间的增益表示为 h_i , 忽略快衰落和阴影衰落的影响, 增益可以通过公式 $h_i = \frac{A}{r_i^\alpha}$ 计算得出, 其中 A 为增益常数, α 为增益因子, r_i 是用户 i 到基站的距离。本文只研究上行链路的功率控制算法, 未考虑其他问题。认知用户 i 的信干比可以表示为:

$$r_i = \frac{p_i h_i}{\sum_{j \neq i} p_j h_j c_{ij} + \sigma_i^2} \quad (1)$$

其中: p_i 为认知用户 i 的发射功率, c_{ij} 表示各用户之间扩频码之间的相关系数, σ_i^2 为背景噪声功率, 为了进一步阐述和计算, 定义

$$g_{ij} = \begin{cases} h_i, & i = j \\ h_i c_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

重新表示信干比 γ_i 为:

$$r_i = \frac{p_i g_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j g_{ij} + \sigma_i^2} = \frac{p_i g_{ii}}{I_i(P_{-i})} \quad (3)$$

收稿日期: 2015-01-02; 修回日期: 2015-03-24。

基金项目: 国家自然科学基金(61172055); 国家 973 计划项目课题(2011CB707003)。

作者简介: 邓小芳(1976-), 女, 广西桂林人, 副教授, 博士生, 主要从事通信网络, 认知无线电, 博弈论方向的研究。

$$= p_i - \frac{(\sum_{j \neq i} p_j g_{ij} + \sigma_i^2)}{g_{ii}} S \left(\frac{w_i \sum_{j \neq i} p_j g_{ij} + \sigma_i^2}{g_{ii}}; a, b \right) + \frac{\gamma_i^{tar}}{g_{ii}} (\sum_{j \neq i} p_j g_{ij} + \sigma_i^2) \quad (21)$$

从而得出 jacobian 矩阵:

$$\frac{\partial F_i(p_i, p_{-i}, g_{ii}, g_{ij}, b_i, c_i, a, \sigma_i^2)}{\partial p_i} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial p_1} & \frac{\partial F_1}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial p_N} \\ \frac{\partial F_2}{\partial p_1} & \frac{\partial F_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial p_N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \frac{\partial F_N}{\partial p_1} & \frac{\partial F_N}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial p_N} \end{pmatrix}$$

$$\text{其中: } \frac{\partial F_i}{\partial p_i} = \begin{cases} \frac{g_{ij} \gamma_i^{tar}}{g_{ii}} - \frac{g_{ij}}{g_{ii}} S(\frac{w_i g_{ij}}{g_{ii}}; a, b) & j = i \\ -1 & j \neq i \end{cases} \quad (22)$$

可以看出主元素都为 -1, 其他元素的值由 $g_{ii}, g_{ij}, w_i, b, a, \gamma_i^{tar}$ 共同决定, 通过调节它们的值, 可以使矩阵的其他元素也不为零, 所以此矩阵为非奇异。根据隐函数定律可知, 我们的功率控制算法其 NE 存在的。

4 仿真结果与性能分析

本文在 MATLAB 平台下, 对所提出的算法同 SINR 平衡算法和 KG 算法进行对比和性能分析, 设置 $\sigma_i^2 = 5 \times 10^{-15}$ mW, 信道增益 $g_i = \frac{A}{r_i^\alpha}$, 其中 $A = 0.0075, r_i = 3.6$ 。

4.1 功率和信干噪比收敛性分析

设每个认知用户初始功率为 $P_i^{(1)} = 5 \times 10^{-15}$ mW, $p_i^{max} = 1$ mW, 目标信干噪比 $\gamma_i^{tar} = 5, b_i = 1 \times 10^4, c_i = 1, a = 1, b = 6, w_i = 18000$ 。

图 2~4 表示 3 种算法中功率和 SINR 的迭代情况, 可以明显的看出, SINR 平衡算法收敛最慢, 本文算法和 KG 算法收敛次数均在 10 次以内, 较为理想, 更加适合实时通信的需求。从功率约束上, 本文算法中只有 1 个用户的功率超出了最大功率, 其余用户的发射功率都在最大功率范围内, 而 KG 算法中 30% 的用户都超出了最大功率, SINR 平衡算法接近 80% 用户超出了最大功率。从 SINR 角度, SINR 平衡算法中用户的 SINR 收敛于目标值, 不因环境和用户干扰情况变化, 增加发射功率一味追求高 SINR, KG 算法虽然增加代价惩罚机制, 但考虑因素单一, 没有全面综合的考虑, 导致一部分用户发射功率超出限制, 用户的 SINR 收敛比较分散。本文算法从实际情景下, 综合考虑诸多因素, 用户的 SINR 收敛较为集中。由此可见, 对于日益匮乏的频谱资源, SINR 平衡算法和 KG 算法将造成资源浪费和系统干扰, 本文算法改变了传统算法的弊端, 减少了系统能源消耗, 具有快速收敛的能力, 更加符合现代化的绿色通信的需求。

4.2 信道状态与功率分析

设定目标信干噪比 $\gamma_i^{tar} = 5$, 信道状态值 Φ_i^t 从 0 到 1×10^{-3} 变化, 3 种算法中功率值的变化如图 5 所示, 一方面通过图形可以直观的验证了, SINR 平衡算法中功率随信道状态呈线性变化, KG 算法和本文算法中功率因引入代价函数, 皆为曲线变化, 且本文算法中功率值最小。另一方面也通过图形展示了

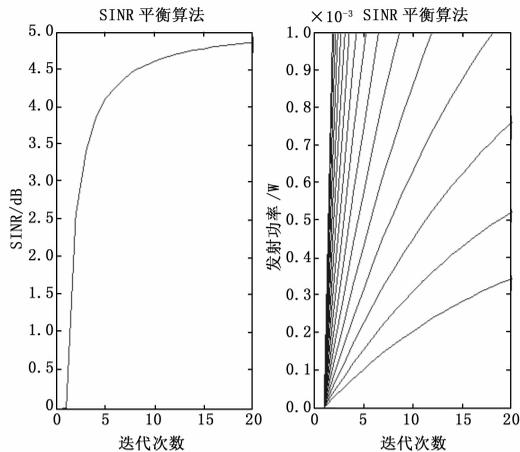


图 2 SINR 平衡算法的收敛示意图

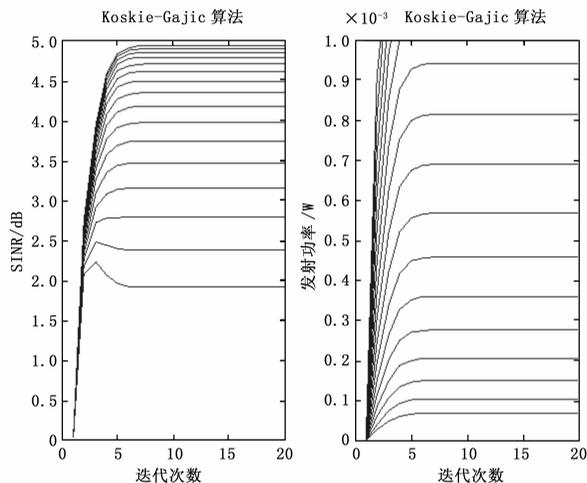


图 3 Koskie-Gajic 算法的收敛示意图

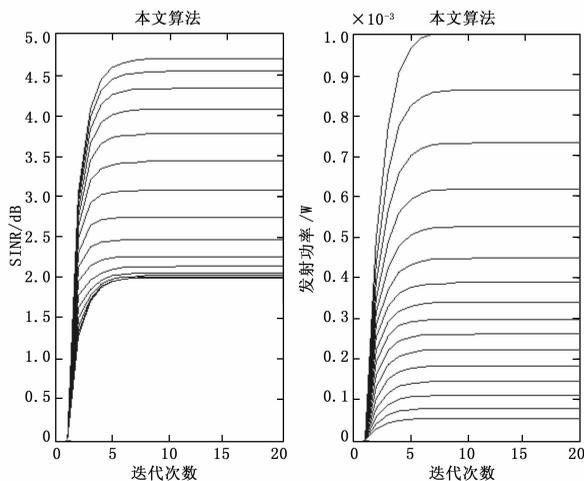


图 4 本文算法的收敛示意图

理论上随着用户受到干扰越大, 用户需要通过增加发射功率来满足自身的传输质量需求, 本文算法中的代价机制考虑多因素的影响, 使得用户之间存在“潜在合作”, 更加理性, 从而使其功率值最小, 更加符合绿色通信低干扰、低功耗等需求。

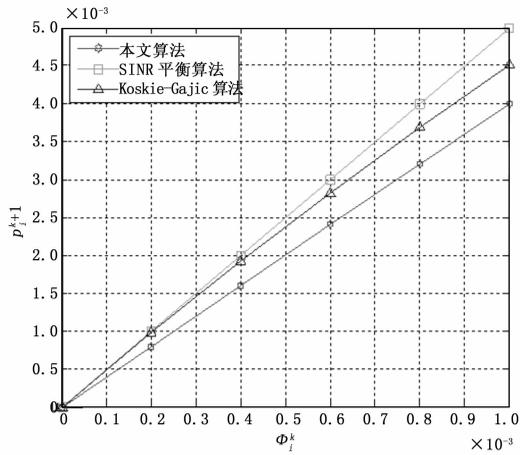


图 5 3 种算法中功率更新随信道状态的变化示意图

4.3 抗噪声影响分析

这部分主要分析抗噪声性能, 图 6 表示噪声 AWGN 对 3 种算法中平均功率和平均 SINR 的影响。随着 AWGN 值从 2×10^{-15} mW 增加到 5×10^{-15} mW, 3 种算法的平均功率值都呈非线性增加, 其中 SINR 平衡算法的平均功率增加速率最快, 且其值最大, 这是由于 SINR 平衡算法的用户一味追求高 SINR 而盲目增加自身的发射功率。相反, KG 算法和本文算法提出了动态代价机制, 使得用户在增加发射功率和追求 SINR 的同时, 付出了相应的代价, 有效地避免了用户在竞争中的非理性。对于 KG 算法和本文算法, 本文算法的所需要的平均功率较低, 增加速率较缓慢, 这是因为本文算法中的代价机制是基于综合考虑, 而 KG 算法中的代价机制只考虑用户的发射功率。所以对于现代网络多元化的固定频谱管理模式, 本文算法较传统算法将会有更好的抗噪声性能。

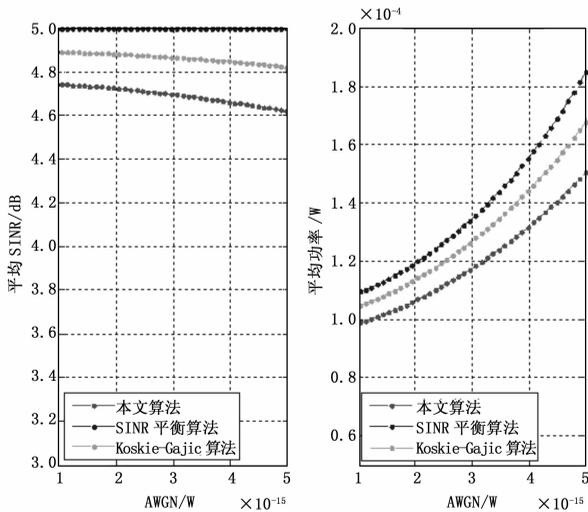


图 6 3 种算法中平均 SINR 和平均功率随背景噪声变化示意图

4.4 功率信干噪比与用户数分析

为了更好地研究用户数与平均功率和平均 SINR 的关系, 将用户数量上升至 50 个, 图 7~8 分别表示用户数与 3 种算法的平均功率和平均 SINR 的变化情况。可以看出, 在用户数低于 25 时, 3 种算法的平均功率相差不大, 且变化速率也相似。但

随着用户数超过 25 并且不断的增加时, 3 种算法中的平均功率发生了明显的变化, 本文算法中平均功率随着用户数的增加变化最慢, KG 算法次之, SINR 平衡算法平均功率增加最快。当用户超过 50 时, 本文算法中平均功率增加速率较其他两种算法更加缓慢, 优势更加突出。这是因为, 3 种算法中功率表达式前一部分都相同即为: $\Phi_i^{(k)} \gamma_i^{ar}$, 后一部分, 对于 SINR 平衡算法是 0; KG 算法是 $\frac{b_i (\Phi_i^{(k)})^2}{2c_i}$; 本文算法是: $\Phi_i^{(k)} S(\omega; \Phi_i; a, b)$, 可以通过理论分析比较得出: $S(\omega; \Phi_i; a, b) > \frac{b_i \Phi_i}{2c_i} > 0$, 从而也验证了仿真图的正确性。同时, SINR 平衡算法中平均 SINR 却不随用户数的变化而变化, 始终保持在目标 SINR 上, 这是以牺牲用户的发射功率为代价, 显然在现代化的绿色通信的模式下, 显得不太妥当。KG 算法和本文算法中平均 SINR 皆随着用户数的增加而不同程度的减少, 但却换来了低功率、低干扰, 从而提高了网络的整体效益。

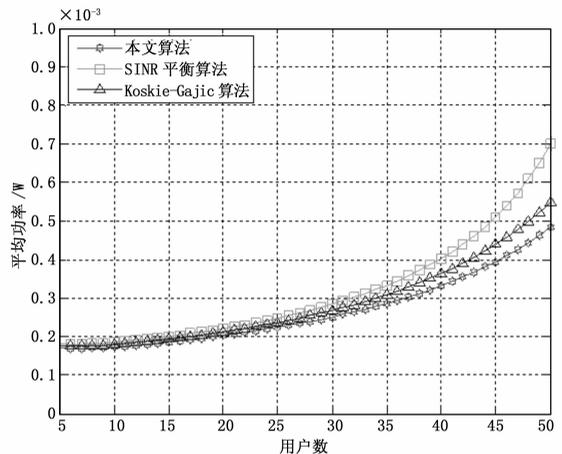


图 7 3 种算法中平均功率随用户数变化示意图

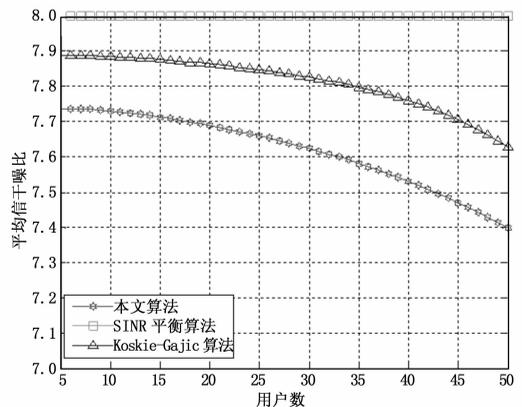


图 8 3 种算法中平均 SINR 随用户数变化示意图

5 结束语

结合非合作博弈论和干扰温度, 引入信道状态概念, 综合考虑设计出新的效用函数, 并在此基础上提出一个基于非合作博弈论的新颖功率控制算法, 仿真结果表明, 与 SINR 平衡算法和 KG 算法相比, 该算法系统干扰小, 能源消耗低, 具有抗干扰性能, 从而提高网络的整体效益, 更加符合现代化的绿色通信的需求。

环境并估计定位的误差，软件环境采用 Matlab7.0。车辆的初始位置设为 (x_0, y_0) ，移动速度在 40~70 km/h 匀速提升，所处位置为如图 1 所示的四车道高速公路路段。

由于本文讨论的定位算法在纵向上主要是确定车道编号，因此具体的纵坐标的误差等级仿真意义并不大。下图展示了实际距离与横坐标定位误差的关系，并与传统的 GPS 定位、RSSI 测距定位做了比较。

图 4 中虚线为 RSSI 的定位误差曲线，稍居下侧的是 GPS 的误差曲线，处于最下侧且用“*”打点的是本文算法的误差曲线。

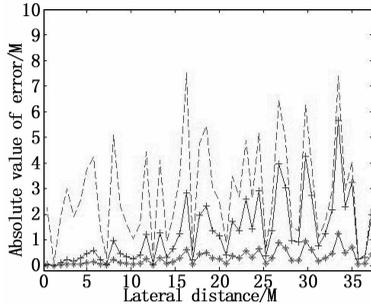


图 4 实际横向距离与误差仿真关系图

根据图 4 三段曲线可知，本文算法在 35 米内误差值稳定且在 2 米以下，15 米的范围内能到达 1 米以下；而 RSSI 测距和 GPS 定位的波动则很大，RSSI 定位的误差甚至超过了 7 米。通过仿真实验表明，该算法在时速不高于 70 km/h 下的移动跟踪误差能达到 1 m 以内，定位延时 0.2 s，比传统的 GPS 定位精度提高了 25% 左右。

4 结论

本文针对高速行驶车辆的定位困难问题，构建了高速路路

段模型，并在此基础上，通过将 GPS 差分定位、RSSI 相对测距和 INS 航位测距的多重方法无缝融合，实现了一个更高精度、更小延时的“车道级”和“车身体级”定位算法，为道路交通中高速、高精度定位的应用奠定了理论基础。尤其在安全预警、车辆防撞等需要更为精确的定位数据的智能交通领域具有广阔的应用前景和推广价值。

参考文献:

[1] Beutel J. Geolocation in a PicoRadio environment (MS. Thesis) [D]. Berkeley: UC Berkeley, 1999.

[2] Bulusu N. Self-Configuring localization systems (Ph. D. Thesis) [D]. Los Angeles: University of California, 2002.

[3] Vardhan S, Wilczynski M, Portie G J. Wireless integrated networks sensors (WINS): Distributed in situ sensing for mission and flight systems [J]. Piscataway, NJ: IEEE, 2000. 459-463.

[4] 吴晓平, 陆炳斌, 沈浩. 基于 RSSI 定位模型的非视距关系识别方法 [J]. 传感技术学报, 2013, 11 (23): 127-131.

[5] 陈锡剑, 程良伦. 基于 RSSI 的功率匹配定位算法的研究与实现 [J]. 传感技术学报, 2013, 12 (5): 17-20.

[6] Doherty L, Ghaoui L E, Pister K S J. Convex position estimation in wireless sensor networks [J]. Anchorage, AK, USA: IEEE Computer and Communications Societies, 2011. 1655-1663.

[7] 张爱清, 叶新荣. 基于 RSSI 每跳分级和跳距修正的 DV-HOP 改进算法 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33 (11): 120-124.

[8] 刘雪兰, 王宜怀. 无线传感器网络 RSSI 定位算法改进 [J]. 计算机应用与软件, 2013 (11): 608-613.

[9] 李论丁, 恩杰, 郝丽娜, 等. 一种改进的煤矿井下指纹定位匹配算法 [J]. 传感技术学报, 2014 (3): 122-125.

[10] 马燕, 袁蔚林, 陈秀万. 基于 WiFi 与 GPS 组合定位算法的无缝定位方法研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2013 (3): 970-974.

(上接第 2463 页)

参考文献:

[1] Shah V, Mandayam N B, Goodman D J. Power control for wireless data based on utility and pricing [A]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. Boston, 1998: 1427-1432.

[2] Saraydar C, Mandayam N, Goodman D. Pricing and power control in a multicell wireless data network [J]. IEEE Journal on selected Areas in communication, 2001, 19 (10): 1883-1892.

[3] Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992, 41 (1): 57-62.

[4] Koskie S, Gajic Z. A nash game algorithm for SIR-Based power control in 3G wireless CDMA networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2005, 13 (5): 1017-1026.

[5] Alpcan T, Basar T, Srikant R, et al. CDMA uplink power control as a noncooperative game [J]. Wireless Networks, 2002, 8 (6): 659-670.

[6] Koskie S, Gajic Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks [J]. IEEE/ACM Transac-

tions on Networking (TON), 2005, 13 (5): 1017-1026.

[7] Li F, Tan X, Wang L. A new game algorithm for power control in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60 (9): 4384-4391.

[8] Lu K, Zhang L, Yang J. An efficient SIR-first adaptive power control method in cognitive radio network [A]. Global High Tech Congress on Electronics (GHTCE) [C]. 2012: 91-94.

[9] Xing Y, Mathurc N, Haleem M A, et al. Dynamic spectrum access with qos and interference temperature constraints [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6 (4): 423-433.

[10] Xiao M, Shroff N B, Chong E K P. Utility-based power control in cellular wireless systems [A]. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. INFOCOM [C]. 2001: 412-421.

[11] YATES R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas In Communications, 1995, 13 (7): 1341-1347.

[12] Ortega J M, Rheinboldt W. Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables [M]. New York: Academic Press, 1970: 592-594.