

引用格式:吉凯,胡金龙,苏泳涛. 基于博弈论的卫星移动通信上行功率控制算法[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(10): 42-46.
[JI K, HU J L, SU Y T. Game-theoretic power control algorithm in satellite mobile communications[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(10): 42-46]

基于博弈论的卫星移动通信上行功率控制算法

吉 凯^{1,2,3}, 胡金龙^{2,3}, 苏泳涛^{2,3}

(1 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065;
2 中国科学院 计算技术研究所 无线通信技术研究中心, 北京 100190;
3 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 为改善卫星通信中短时延信道引起的控制滞后性, 以低的卫星接收功率与低的功率控制误差为目标, 设计出新的代价函数, 以此代价函数提出一种适用于卫星移动通信系统的上行功率控制算法, 并在算法迭代过程中引入 ARIMA 链路预测模型结果作为判决准则之一. 文中分析了该代价函数较现有代价函数的优点, 并证明了该算法的纳什均衡存在性与收敛性, 并最终通过仿真验证其性能. 仿真结果表明该算法较经典算法有一定改善.

关键词: 功率控制; 卫星移动通信; 纳什均衡; 无线资源管理; CDMA

中图分类号: TN927+. 23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—7180(2019)10—0042—05

Game-theoretic power control algorithm in satellite mobile communications

Ji kai^{1,2,3}, HU jin-long^{2,3}, SU yong-tao^{2,3}

(1 School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2 Research Center for Wireless Communication Technology, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3 Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to improve the control lag caused by long delay channel in satellite communication, a new cost function is designed with low satellite receiving power and low power control error. A cost function is proposed for satellite mobile communication system. The uplink power control algorithm introduces the ARIMA link prediction model result as one of the decision criteria in the algorithm iteration process. The advantages of the cost function over the existing cost function are analyzed, and the existence and convergence of the Nash equilibrium of the algorithm are proved. Finally, the performance is verified by simulation. Simulation results show that the algorithm has some improvement over the classical algorithm.

Key words: power control; satellite mobile communication; nash game; radio resource management; CDMA

1 引言

传输功率控制是一种可靠有效的实现抑制干扰、抵抗信道衰落、提高系统容量^[1]的方法. 开环功

率控制由终端估计信道质量后决策, 无需基站侧控制, 所以该类算法无时延, 但误差大^[2]. 闭环功率控制通过由基站侧根据信号质量决策并反馈至终端, 该结构时延影响大, 控制精度高^[3].

DPC 算法是经典的分布式闭环功率控制算法^[4],解决了集中式算法难以实施的问题. C. U. Saraydar 与 Sarah Koskie 分别提出了非合作博弈的功率控制算法^[5-6],后者以信干比平衡为目标,其收敛结果低于目标信干比. 文献^[7]算法基于博弈论以低误比特率为目标,其算法仅适用于非相关频移键控.

在地面通信系统中闭环功率控制能够满足 SIR (信干比)需求^[8-11],但卫星信道长时延特性将导致闭环功率控制误差增大^[12-13],原因在于信关站得到的反向链路 SIR 并不能代表 MES(移动地球站)当前的信道质量, MES 得到的控制信令同样是已过去数个周期的决策结果^[14]. 已有文献提出卫星通信系统闭环功率控制需要结合预测技术^[15],但并未将预测结果与功控迭代算法相结合. 尽管也有文献提出基于开环控制的卫星功控算法以避免时延影响^[16-17],但这类算法具有仅适用于 Ka 以上频段抗雨衰的局限性.

针对以上问题,本文基于信干比平衡准则,提出一种新的博弈功率控制算法,并将链路预测结果作为判决准则之一.

2 系统模型

卫星移动通信系统,由地面段信关站、空间段高轨卫星以及用户段 MES 构成. MES 的上行消息需经用户链路至卫星,再由卫星转发至馈电链路,最后抵达信关站接收,信关站再经馈电链路 with 用户链路反馈闭环功率控制结果至 MES.

假定卫星通信系统中当前存在 N 个 MES. 记第 i 个 MES 的发射功率与 SIR 分别为 p_i 与 γ_i ,其接收背景噪声功率为 η ,并且认为噪声功率为恒定值. 由此可以给出 MES 的 SIR 模型为

$$\gamma_i = \frac{p_i G_i^T G_i^R h_i}{\sum_{j \neq i} p_j G_j^T G_j^R h_j C_{i,j} + \eta} \quad (1)$$

式中, G_i^T 为 MES _{i} 的发射天线增益; G_i^R 为卫星对 MES _{i} 的接收增益; h_i 为 MES _{i} 到卫星的信道衰落; $C_{i,j}$ 为 MES _{i} 与 MES _{j} 的扩频相关系数; 且 $C_{i,j} = (S_j^T S_i)^2$, 其中 S 为扩频码序列. 卫星天线增益随视轴偏离角变化关系如(2)式所示^[18], G_m 是主瓣中的最大增益值; Ψ 是偏离视轴角; Ψ_0 是 3 dB 波束宽度的一半; $J(\cdot)$ 是贝塞尔函数; $u = 2.071\ 23 \frac{\sin(\Psi)}{\sin(\Psi_0)}$.

$$G(\Psi) = G_m \left(\frac{J_1(u)}{2u} + 36 \frac{J_3(u)}{u^3} \right)^2 \quad (2)$$

记 $g_j = G_j^T G_j^R h_j C_{i,j}$ 为链路增益; $q_i = \sum_{j \neq i} p_j g_i$ 为来自其他 MES 的干扰功率, $I_i = q_i + \eta$ 为总干扰功率, 则 SIR 模型可简化表达为

$$\gamma_i = \frac{p_i g_i}{I_i} \quad (3)$$

3 功率控制算法

3.1 链路预测模型

若以 1 ms 为链路预测周期,则实际链路增益值就是以 1ms 为间隔的时间序列. 根据 GEO 卫星信道时间相关性,采用 ARIMA 模型对增益时间序列预测. ARMA 数学表达式可写作式(4),将原始数据进行差分后带入式(4)即为 ARIMA 模型, 式中 g_t 是当前值; μ 是常数项; p 是 AR 模型阶数; α_i 是 AR 模型自相关系数; ϵ_t 是误差值; q 是 MA 模型阶数; θ_i 是 MA 模型的相关系数.

$$y_t = \mu + \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{t-i} + \epsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \epsilon_{t-i} \quad (4)$$

3.2 算法原理

假定用户 i 的代价函数为 $J_i(p_i, \gamma_i(\mathbf{p}))$, 其中 $\mathbf{p}$ 为系统内 MES 发射功率矩阵, 记为 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T$. 当无一参与者可以独自行动而增加收益(即为了自身利益的最大化,没有任何单独的一方愿意改变其策略的),则此策略组合被称为纳什均衡,可记为(5)式,式中 $\mathbf{p}^*$ 为纳什均衡下的发射功率矩阵

$$J_i(p_i^*, \gamma_i(\mathbf{p}^*)) \leq J_i(p_i, \gamma_i(p_1^*, p_2^*, \dots, p_i^*, \dots, p_N^*)), \forall p_i, \forall i \quad (5)$$

非合作博弈过程中,代价函数的设计直接影响算法的性能结果. 一方面卫星通信相对于地面系统而言,卫星是资源受限系统,其上行总功率应远低于 TWTA(行波管放大器)最大功率,代价函数中应使 MES 信号到达卫星的功率尽可能低;另一方面,信干比平衡准则要求功率控制结果应实现终端上行 SIR 一致,且满足目标 SIR. 由此代价函数设计如(6)式所示

$$J_i(p_i, \gamma_i) = a p_i g_i + e^{b(\gamma^{tar} - \gamma_i)} \quad (6)$$

式中, a, b 为恒正的权重系数; γ^{tar} 为目标 SIR, 该值由外环功率控制提供.

为了得到均衡时的发射功率,对 $J_i(p_i, \gamma_i)$ 求 p_i 的偏导数:

$$\frac{\partial J_i(p_i, \gamma_i)}{\partial p_i} = a g_i - b e^{b(\gamma^{tar} - \gamma_i)}$$

$$= ag_i - be^{b(\gamma^{kar} - \frac{p_i g_i}{I_i})} \quad (7)$$

$$\text{令 } \frac{\partial J_i(p_i, \gamma_i)}{\partial p_i} = 0, \text{得}$$

$$p_i = \frac{I_i}{g_i} \left[\gamma^{kar} - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i}{b} \right) \right] \quad (8)$$

利用牛顿迭代法,可得功率控制算法迭代公式如下所示

$$p_i^{(n+1)} = \frac{p_i^{(n)}}{\gamma_i^{(n)}} \left[\gamma^{kar} - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i}{b} \right) \right] \quad (9)$$

为追踪链路变化,令式(9)中 $g_i = g_i^{\wedge(n+1)}$ 为预测的未来链路增益,即

$$p_i^{(n+1)} = \frac{p_i^{(n)}}{\gamma_i^{(n)}} \left[\gamma^{kar} - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i^{\wedge(n+1)}}{b} \right) \right] \quad (10)$$

所提代价表达式以卫星接收功率为惩罚之一,从而利用预测的链路衰减值得降低长时延带来的滞后性缺陷.以信干比平衡为目标的经典功控算法以 γ 与 γ^{kar} 差的平方为表达,但该表达的问题在于 γ 高于或低于 γ^{kar} 得到的惩罚一致,并且在功率惩罚的影响下,会更大概率使 γ 最终低于 γ^{kar} . 所提代价表达式(6)中 γ 项 $e^{b(\gamma^{kar} - \gamma)}$ 对 γ 的一阶导为 $-be^\Delta$, 其中 $\Delta = b(\gamma^{kar} - \gamma)$. 当 $\Delta > 0$ (补偿不足),代价将随 Δ 指数增长,这将迫使 γ 逼近 γ^{kar} ; 当 $\Delta < 0$ 时(过补偿),此时 e^Δ 取值为 $(0, 1)$, γ 对代价的影响变得微弱,功率将成为主要惩罚因素,抑制过补偿现象.

每控制周期内算法流程图如图1所示,计算过程中可能计算出无效解,此时需要调整权重系数使之处于有效范围,若多次循环后仍无效则取边缘值.

3.3 纳什均衡存在性

已知如果一个博弈模型 $G = \{\Gamma, \{p\}, u(\cdot)\}$, Γ 为参与者集合, $\{p\}$ 为策略空间, $u(\cdot)$ 为代价函数,满足:

(1) 策略空间 $\{p\}$ 是 R^N 中非空的、闭的、有界的凸集,其中 R^N 是欧几里得空间;

$u(\cdot)$ 在其策略空间上为拟凸(凹)函数且连续.

则该博弈模型一定存在纳什均衡^{[7][19]}.

证明(1):在本文中,策略空间取值 $[0, p_{\max}]$,显然满足条件(1).

证明(2):根据代价函数表达式(6),显然其在策略空间上连续.

对 $J_i(p_i, \gamma_i)$ 求 p_i 的二阶偏导数:

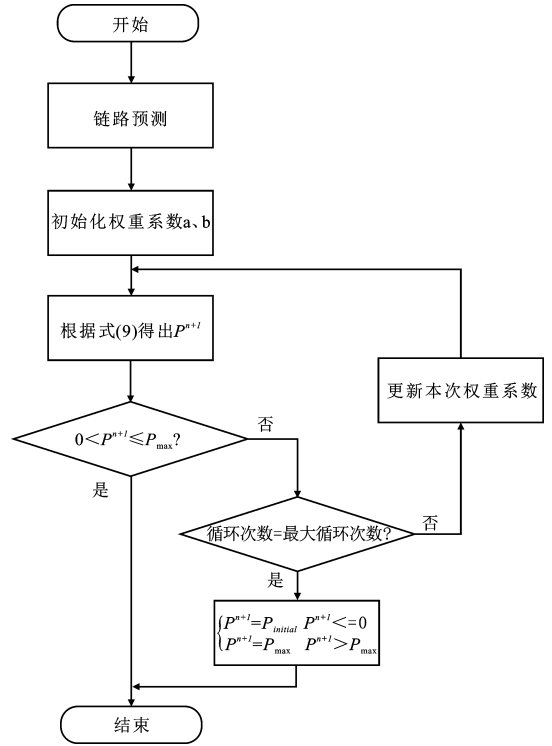


图1 算法流程图

$$\frac{\partial^2 J_i(p_i, \gamma_i)}{\partial p_i^2} = b^2 e^{b(\gamma^{kar} - \gamma)} \quad (11)$$

显然(11)式大于0,所以代价函数在策略空间上是凸函数,所以其必然也是拟凸函数,条件(2)得证.

3.4 纳什均衡收敛性

为方便后续证明,设函数 $f(p_i) = \frac{I_i}{g_i} \left[\gamma^{kar} - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i}{b} \right) \right]$. 已知若一个纳什均衡同时满足以下三条性质^[20]:

(1) 正数性,即 $f(p_i) > 0$;

(2) 单调性,即 $\forall p > p'$, 满足 $f(p) - f(p') > 0$;

(3) 可扩展性,即 $\forall \alpha > 1$, 满足 $\alpha f(p) - f(\alpha p) > 0$.

则该纳什均衡一定能够收敛.

证明(1):由 $f(p_i)$ 表达式可知当 $\gamma^{kar} > \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i}{b} \right)$ 时, $f(p_i) > 0$.

证明(2):

$$f(p) - f(p') = \frac{I_i - I_i'}{g_i} \left[\gamma^{kar} - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i}{b} \right) \right]$$

由 $p > p'$, 所以 $I_i > I_i'$, 当 $\gamma^{kar} > \frac{1}{b} \ln \left(\frac{ag_i}{b} \right)$ 时满足单调性.

证明(3):

$$\begin{aligned} \alpha f(\mathbf{p}) - f(\alpha \mathbf{p}) &= \frac{\alpha(q_i + \eta)}{g_i} \left[\gamma^{\text{tar}} - \frac{1}{b} \ln\left(\frac{\alpha g_i}{b}\right) \right] \\ &\quad - \frac{\alpha q_i + \eta}{g_i} \left[\gamma^{\text{tar}} - \frac{1}{b} \ln\left(\frac{\alpha g_i}{b}\right) \right] \\ &= \frac{(\alpha - 1)\eta}{g_i} \left[\gamma^{\text{tar}} - \frac{1}{b} \ln\left(\frac{\alpha g_i}{b}\right) \right] \end{aligned}$$

当 $\gamma^{\text{tar}} > \frac{1}{b} \ln\left(\frac{\alpha g_i}{b}\right)$ 时满足可扩展性

综上所述,当 $\gamma^{\text{tar}} > \frac{1}{b} \ln\left(\frac{\alpha g_i}{b}\right)$, 即 $\frac{a}{b} < \frac{e^{b\gamma^{\text{tar}}}}{g_i}$ 时

该纳什均衡一定收敛。

4 仿真结果

仿真中选取中等树林环境^[21],信道变化平均相关长度为 1 m,使用三阶样条插值,往返时延 $T_{\text{delay}} = 540$ ms,功率控制周期 1 ms,自由空间衰减为 $92.45 + 20\lg(f+d)$, $f = 2.6$ GHz, d 为 MES 与卫星的距离。卫星位于 0 纬度 100 经度 36 000 km 高度,3 dB 波束宽度 2° ,最大增益 $G_m = 40$ dB,各方向增益由式(2)计算所得,小区中心点位置(即天线视轴方向)为 40 纬度 110 经度。MES 均匀分布于小区内(小区大小为 3 dB 波束范围),天线仰角 40° ,使用理想点波束天线,增益 30 dB,128 位随机扩频序列,且持续上报发射功率值。初始发射功率为 $p_{\text{initial}} = -40$ dBW,最大发射功率 5 dBW, $\gamma^{\text{tar}} = 8$ dB,噪声功率恒定 -256.98 dBW。权重系数 $b = 0.4$, $a = b/g_u^n$,循环中更新 $b' = b * 6$, $a' = b'/g_u^n$ 。

图 2 是 MES 数为 20 个、速度 10 km/h 时,信干比与卫星接收功率随时间的变化关系,所提算法较 Koskie 算法信干比更多收敛范围更集中于 8 dB,且卫星接收功率值有少量降低,与本文算法的目的之一致,防止行波管饱和。

图 3、图 4、图 5 分别给出了在 MES 数量为 15、20、25 时的控制误差的累积概率分布图,其中每条曲线代表不同 MES 速度时的误差累积概率分布。从图中可以看出,在 10、20 km/h 时,本文提出的算法有较明显更低的控制误差。但速度提高后,本文算法的优势减少,原因在于随着信道变化速率的提高,ARIMA 的预测性能开始下降,导致本文算法控制误差的提高。10、20 km/h 时 MES 个数的增多将引起误差的增大,两者算法在该项上趋势类似,但在 30 km/h 时 MES 的增多并未明显增大误差,因为链路变化仍是主要误差原因。

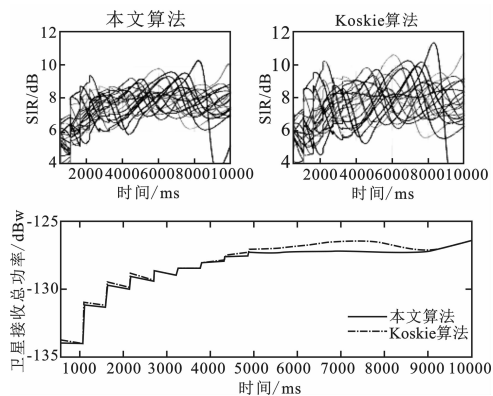


图 2 信干比与卫星接收功率

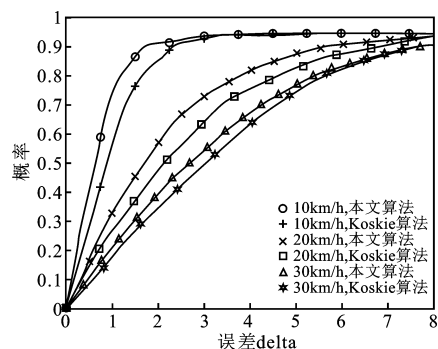


图 3 15 个 MES 时,误差累积概率密度

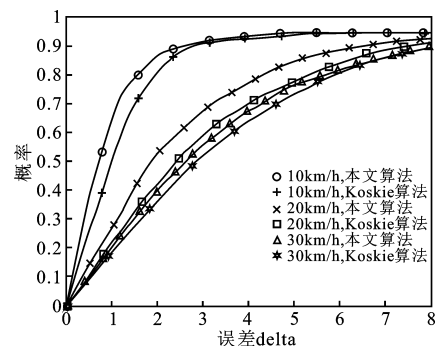


图 4 20 个 MES 时,误差累积概率密度

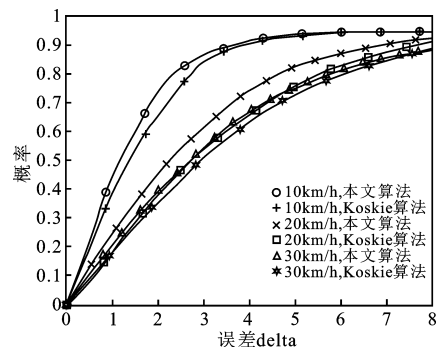


图 5 25 个 MES 时,误差累积概率密度

5 结束语

本文提出一种适用于卫星移动通信系统中的上行功率控制算法,该算法代价函数主要以低的卫星接收功率与信干比平衡为目标,从理论上论证了其纳什均衡的存在性与收敛性,在迭代公式中引入预测能在低速率降低时延带来的滞后性影响。仿真结果证实该算法在低速时相比经典算法有更低的控制误差。

参考文献:

- [1] J. ZANDER. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992,41(1):57-62.
- [2] GAO Y, ZHANG X, YANG D. A Novel Power Control Algorithm on the Reverse Link of CDMA Systems [C] //2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring, Dublin, 2007: 2832-2836.
- [3] 刘冰. 基于 SIR 平衡的 CDMA 分布式功率控制算法研究[D]. 南京邮电大学,2012.
- [4] FOSCHINI G J, MILJANIC Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence [J], IEEE Transactionson In Vehicular Technology. 1993. 42(4): 641-647.
- [5] C. U. SARAYDAR, N. B. MANDAYAM, D. J. GOODMAN. Efficient power control via pricing in wireless data networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002,50(2): 291-303.
- [6] S. KOSKIE, Z. GAJIC. A nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005,13(5):1017-1026.
- [7] 喻的雄,蔡跃明,钟卫. CDMA 系统中一种新的分布式博弈功率控制算法[J]. 电子与信息学报,2008(02): 443-446.
- [8] S. SARKAR, S. MITRA, T. NATH et al. Performance of different power control schemes for a hybrid LTE system with channel impairment[C] //2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, 2017: 1-4.
- [9] WANG Y, QIAN M, HAN X, et al. Game-Theoretic Power Control for Interference Mitigation in Two-Tier Small Cell Networks[C] //2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Seoul, 2014: 1-5.
- [10] 王园园,周一青,李永会,等. 基于随机学习的异构蜂窝网络离散功率控制机制[J]. 高技术通讯,2016,26(05):432-439.
- [11] 田霖,翟国伟,黄亮,等. 基于集中式接入网架构的异构无线网络资源管理技术研究[J]. 电信科学,2013,29(06):25-31.
- [12] A. M. MONK, L. B. MILSTEIN. Open-loop Power Control Error in Land mobile Satellite System [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995,13(2): 205-212.
- [13] 汪春霆. 卫星通信系统[M]. 北京:国防工业出版社,2012:161-163.
- [14] F. GUNNARSSON, F. GUSTAFSSON, J. BLOM. Dynamical Effects of Time Delays and Time Delay Compensation in Power Controlled DS-CDMA [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001,19(1): 141-151.
- [15] H. S. H. GOMBACHIKA, R. TAFAZOLLI, B. G. EVANS. Predictive power control for S-UMTS based on least-mean-square algorithm[C] // Third International Conference on 3G Mobile Communication Technologies, London, UK, 2002: 128-132.
- [16] ZHANG F, ZUO Y, SUN H. Techniques of rain fade countermeasures in Ka-band satellite communication on ships[C] //2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, 2017: 1-3.
- [17] HAJIME FUKUCHI, TAKAYUKI SAITO. Novel mitigation technologies for rain attenuation in broadband satellite communication system using from Ka- to W-band[C] //2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing, Singapore, 2007: 1-5.
- [18] SHI S, LI G, AN K, et al. Optimal Power Control for Real-Time Applications in Cognitive Satellite Terrestrial Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017,21(8): 1815-1818.
- [19] R. D. YATES. A framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995,13(7): 1341-1347.
- [20] E. ALTMAN, Z. ALTMAN. S-modular games and power control in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003,48(5): 839-842.
- [21] F. P. FONTAN, M. VAZQUEZ-CASTRO, C. E. CABADO, et al. Statistical modeling of the LMS channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001,50(6): 1549-1567.

$\tilde{R}_{\beta \Delta k}(\tilde{Y}) = \{x_2, x_3, x_6, x_8, x_9, x_{10}\}$, 与 $\beta = 0.3$, $k = 2$ 比较, 满足前面定理 3.

根据粗糙区域可得, 模糊集合 $\tilde{Y}$ 在 $\beta = 0.3, k = 3$ 时的症状肯定得了急性支气管炎或扁桃体炎. 选 $\beta = 0.45, k = 3$ 时的症状肯定得了鼻炎、肺结核、高血压, 急性支气管炎, 脑膜炎, 扁桃体炎 6 种疾病. 经比较选 $\beta = 0.3, k = 3$ 或 $\beta = 0.3, k = 2$ 似乎更符合实际情况, 在现实生活中这需要根据实际的症状表现, 选择适当的数据和参数进行计算.

5 结束语

本文在 U 到 V 的模糊关系上通过“逻辑与”将双论域变精度粗糙集与程度粗糙集相结合, 构造了一种 U 到 V 上双论域双量化粗糙集模型, 并对其模型结构和数学性质进行了深入的研究, 得到了模型的相关结论. 通过案例对该模型的实用性进行了说明. 本文所定义的 U 到 V 型的双论域双量化粗糙集模型, 是对双论域变精度粗糙集和程度粗糙集模型的进一步推广, 扩展了其应用范围和研究领域, 为进一步研究双论域粗糙集模型的规则挖掘和属性约简奠定了理论基础.

参考文献:

- [1] PAWLAK Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [2] 王国胤, 姚一豫, 于洪. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. 计算机学报, 2009, 32(07): 1229-1246.
- [3] 黄锦静, 陈岱, 李梦天. 基于粗糙集的决策树在医疗诊断中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(12): 148-152.
- [4] 阎瑞霞, 郑建国, 翟育明. 双论域粗糙集的不确定性度量[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(12): 1841-1845.
- [5] ZHANG C, LI D, MU Y, et al. An interval-valued hesitant fuzzy multigranulation rough set over two universes model for steam turbine fault diagnosis[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 42: 693-704.
- [6] 孙文鑫. 双论域的一般多粒度粗糙集[J]. 计算机工程

与应用, 2017, 53(04): 79-83+227.

- [7] XU W, SUN W, LIU Y, et al. Fuzzy rough set models over two universes[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2013, 4(6): 631-645.
- [8] SUN B, MA W, ZHAO H. A fuzzy rough set approach to emergency material demand prediction over two universes[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(10-11): 7062-7070.
- [9] ZIARKO W. Variable precision rough set model[J]. Journal of Computer and System Science, 1993, 46(1): 39-59.
- [10] 张文修, 梁怡, 吴伟志. 信息系统与知识发现[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 127-145.
- [11] YAO Y Y, LIN T Y. Generalization of Rough Sets using Modal Logics[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 1996, 2(2): 103-119.
- [12] 李志明, 唐永中. 直觉模糊序信息系统的变精度与程度“逻辑差”粗糙集[J]. 计算机科学与探索, 2017, 11(02): 333-340.
- [13] 张贤勇. 精度与程度逻辑差双量化粗糙集模型的属性约简[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(11): 2925-2931.
- [14] 孙秉珍, 胡晓元. 双论域上量化粗糙集模型及应用[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(20): 50-55.
- [15] 陈华峰, 沈玉玲, 龙建武, 等. 基于“逻辑与”算子的双量化多粒度粗糙集模型[J]. 计算机科学, 2017, 44(S2): 144-147.
- [16] 李蒙蒙, 徐伟华. 优势关系下变精度与程度“逻辑且”粗糙模糊集[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(02): 277-284.
- [17] 庾慧英, 刘尚. 双论域上的变精度粗糙集模型[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(1): 4-7.

作者简介:

李 燃 女, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为粗糙集理论、人工智能.

王青海(通讯作者) 男, (1968-), 教授. 研究方向为人工智能、机器学习等. E-mail: 13243945@qq.com.

鲁小云 男, (1982-), 博士生, 讲师. 研究方向为数据挖掘与粗糙集理论.

(上接第 46 页)

作者简介:

吉 凯 男, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为卫星移动通信系统仿真与上行功控算法的研究.

E-mail: as918171615141@163.com.

胡金龙 男, (1982-), 高级工程师. 研究方向为无线资源管理技术、通信协议栈软件技术、无线通信系统测试技术.

苏泳涛 男, (1976-), 副研究员. 研究方向为通信信号处理、专用 DSP 架构和指令集设计、异构多核处理器实时任务调度.