

# 基于聚类分析的抗时延抖动时隙分配算法

于明秋<sup>1</sup> 周创明<sup>1</sup> 赵敏<sup>2</sup>

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)<sup>1</sup> (中国人民解放军 93942 部队 咸阳 712000)<sup>2</sup>

**摘要** 信息传输的实时性是战术数据链的突出特征,要求数据链通信不仅有较好的时延特性,还要具备可靠的时延抖动特性。随机报文流的产生具有随机性、突发性的特点,需按照需求动态地分配时隙,对算法的实时性要求较高。因此,提出基于聚类分析的抗时延抖动时隙分配算法,应用聚类的方法将空闲时隙划分成时隙簇,简化了时隙分配的分析过程。实验仿真表明:该算法分配的时隙能够满足时延抖动的要求,而且算法的复杂度小,可以有效处理周期性随机报文流的时隙分配问题。

**关键词** 战术数据链,周期性随机报文流,时延抖动,聚类分析

中图分类号 TN919.2 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.017

## De-jitter Dynamic Slot Allocation Algorithm Based on Cluster Analysis

YU Ming-qiu<sup>1</sup> ZHOU Chuang-ming<sup>1</sup> ZHAO Min<sup>2</sup>

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)<sup>1</sup>

(Unit 93942 of PLA, Xianyang 712000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Instantaneity of information transmission is a prominent feature of tactical data link. Data chain communication is required possessing good delay feature as well as reliable delay jitter performance. The generation of random message flow possesses characteristics of randomness and abruptness, and should dynamically allocate timeslot in accordance with demands, which requires a high real-time capability for algorithm. Therefore, a de-jitter dynamic slot allocation algorithm based on cluster analysis was proposed and the clustering method was adopted to divide idle timeslot into slot cluster, which can thus simplify the analysis process of slot allocation. The simulation result shows that timeslot allocated by the algorithm can meet the requirement of delay jitter and the algorithm is of low complexity which can settle timeslot assignment of periodic random message flow efficiently.

**Keywords** Tactical data link, Periodic random message flow, Delay jitter, Cluster analysis

## 1 引言

战术数据链(Tactical Data Link, TDL)作为军队指挥、控制与情报系统传输信息的工具与手段,在信息化战争中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。战术数据链一般采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)接入方式。TDMA接入机制将时间分成周期性的帧,每一帧再分成若干个时隙,各节点通过时隙进行信息传输。

在战术数据链中,根据其生成特点,报文流可以分成固定报文流和随机报文流。固定报文流主要是周期性报文流,其业务在整个系统周期内恒定不变,而且优先级较高。固定报文流的时隙分配可以在离线状态下一性进行,对算法的实时性没有严苛的要求。而随机报文流的产生具有随机性、突发性的特点,需根据需求动态地分配时隙,算法实时性要求较高。随机报文流可以是周期性业务,也可以是非周期性业务。

在战术数据链中,无论是固定报文流还是随机报文流,对

时延抖动的要求都十分苛刻。如预警机发送监视信息的抖动不能大于10%,否则将无法精确定位<sup>[2]</sup>。因此在分配时隙的过程中,时延抖动是需要重点考虑的问题。

## 2 相关研究

时隙的位置对业务时延性能有重要影响。在相同带宽(时隙数/帧)分配下,时隙位置越均匀,业务的平均时延越短,抖动越小<sup>[3]</sup>。现有的相关文献大都是从这个角度进行研究的。

典型的战术数据链时隙分配算法是以二叉树的时隙块结构实现时隙分配的,可以应用于固定报文流,也可以进行随机报文流的时隙分配。但该算法只能保证时隙周期内的时隙间隔非常均匀。而周期性报文流的持续时间大于一个时隙的长度,这就要求时隙之间的时隙间隔也必须是均匀的。

梁爽<sup>[4]</sup>、黄凯<sup>[5]</sup>等人提出了基于二叉树内均分法的动态时隙分配方案,可以保证不同时隙之间时隙间隔的均匀性。算法中定义了块间间隔BI,在选择节点块的组合时,所选节

到稿日期:2016-06-28 返修日期:2016-10-30

于明秋(1992-),男,硕士生,主要研究方向为计算机网络与信息安全, E-mail: 15511743667@163.com;周创明(1967-),男,硕士,副教授,主要研究方向为数据库应用与智能信息处理;赵敏(1981-),女,硕士生,主要研究方向为智能信息处理。

点块间的BI越大,时隙间隔越均匀。但块间间隔的计算过程繁杂,算法的实现比较困难,不适合处理随机性和突发性的业务。

国内外关于固定报文流时隙分配算法的研究较多,其中如何减小时延抖动是一个普遍关注的问题。

文献[6]利用动态规划技术给出了一种优化算法。动态规划的求解过程会占用大量内存空间,因此该算法只适用于时帧较小的情况,对于战术数据链时隙分配这类规模较大的问题,其实用性不强。文献[7]将时隙分配问题转化为图论问题加以求解,其给出的方法同样难以应用于规模较大的时隙分配问题中。

在国内,刘星等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于最小时延抖动的固定时隙分配算法,该算法将时隙均匀分配问题转化为图论中包含确定边数的不含回路的最短路径环问题,然后采用动态规划来求取最优解。该算法提高了时隙分配成功的概率以及分配时隙的均匀度,但也不适用于处理大规模的时隙分配问题。文献[9]引入了遗传算法,对时隙位置进行染色体编码,经多代遗传获得间隔较为均匀的时隙序列。但遗传算法的局部搜索能力较差,获得可靠解需要大量的训练时间,不能满足战术数据链信息传输的实时性要求。

周期性随机报文流与固定报文流有相似的特点,其传输都需要在多个时帧周期中进行,本文假定初次分配给业务的时隙在后面的周期中还保留给该业务。针对固定报文流的时隙分配算法,其分配结果的时延抖动特性比较理想。因此,引入固定报文流时隙分配算法的优点,降低算法的复杂度,是解决周期性随机报文流时隙分配问题的一个很好的思路。从这一点出发,本文提出基于聚类分析的动态时隙分配算法(Dynamic Slot Allocation Algorithm based on Cluster Analysis, CDSA 算法),通过聚类处理来完成时隙的动态分配。

### 3 基于聚类分析的时隙分配算法

#### 3.1 C-DSA 算法分析

聚类(Clustering)是对物理的或抽象的对象进行集合分组的过程。聚类生成的组称为簇,同一簇中任意两个对象之间具有较高的相似度<sup>[10]</sup>。在实际应用中,通常将一个簇中的数据对象作为一个整体来看待,这样可以使问题得到简化。

对象间的距离是最常用的相似度度量指标。时隙的相似度可以用时隙的间隔距离度量。对于周期为  $n$  的时帧  $T$ ,  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ , 时隙间隔为:

$$D = L(T_i) - L(T_j), 1 \leq j < i \leq n, i, j \in Z \quad (1)$$

其中,  $L(T_i)$  为时隙  $T_i$  在整个时帧中的位置,即  $T_i$  是时帧的第  $L(T_i)$  个时隙,如图 1 所示。

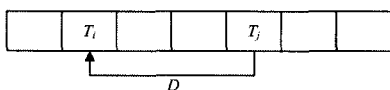


图1 时隙间隔图

由图1可以看出,时隙具有明确的“时间前后”关系,因此研究时隙相似度只需关注相邻时隙和相邻时隙簇的间隔。文献[6]提出距离限制的概念,距离限制指分配给报文流相邻两个时隙的最大时间间隔,算法中限定相邻时隙的间隔不能大

于距离限制。距离限制可以有效限制时延过大的情况,但无法改善时延抖动。基于聚类分析的思想,本文重新定义距离限制  $MinD$  为分配给报文流两个相邻时隙的最小间隔距离,限定  $D < MinD$  的两个时隙不能分配给同一业务,因此这样的两个时隙在时间上有较高的相似度。将相似度较高的时隙合并为一个时隙簇,则对时隙的分析可简化为对时隙簇的分析。

在空闲时隙序列  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  中,空闲时隙的数量为  $k$ 。相邻空闲时隙的距离为:

$$D_i^r = \begin{cases} L(m_{i+1}) - L(m_i), & i = 1, \dots, k-1 \\ L(m_1) + n - L(m_k), & i = k \end{cases} \quad (2)$$

相邻时隙簇之间距离的度量采用簇的最大距离。最大距离指从两个聚类中抽取的每对样本的距离的最大值。如果相邻的两个时隙簇  $M_j$  和  $M_{j+1}$  包含第  $a$  到第  $b$  个空闲时隙,则  $M_j$  与  $M_{j+1}$  的最大距离为:

$$D_j^M = \begin{cases} \sum_a^{b-1} D_i^r, & a < b \\ \sum_a^k D_i^r + \sum_1^{b-1} D_i^r, & a > b \end{cases} \quad (3)$$

若需分配的时隙数为  $f$ ,则理想的相邻时隙间隔为  $A = n/f$ ,此时将不存在抖动。因此  $MinD$  的理想取值为  $A = n/f$ 。但由于  $A$  通常不能取整,而且时隙本身划分有抖动域,使系统能够承受一定的抖动,因此定义比例因子  $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ ,令  $MinD = \rho A$ 。若  $D_j^M < MinD$ ,则将时隙簇  $M_j$  和  $M_{j+1}$  合并。通过调整  $\rho$  的值可以改变时隙分配效果。

#### 3.2 算法的主要步骤

算法的主要步骤如下。

Step1 初始,把每个空闲时隙作为一个单独的时隙簇。

Step2 将  $D_j^M < MinD$  的两个时隙簇合并,修正合并后的时隙簇与相邻两个簇的距离,直到任意两个相邻时隙簇的距离  $D_j^M$  不小于  $MinD$ ,统计合并的次数  $c$ 。

Step3 若  $c > k - f$ ,则说明存在的空闲时隙无法满足分配要求,等待下一个时帧周期,否则进行下一步。

Step4 遍历整个空闲时隙簇序列,将距离  $D_j^M$  最小的两个时隙簇合并。重复,直到合并次数达到  $k - f$ 。

Step5 把每个空闲时隙簇中的第 1 个时隙分配给节点业务,完成分配。

### 4 实验仿真与分析

Link-16 战术数据链是全美军武器系统中的主要综合性战术数据链。在 Link-16 战术数据链中,一天 24h 被分为周期性的时帧,每个时帧周期长为 1536,即含有 1536 个时隙。实验以 Link-16 战术数据链为模型,在 MatlabR2012a 环境下进行仿真。

实验分 3 个步骤:首先,验证比例因子  $\rho$  对算法性能的影响;然后对比二叉树分配方法,检验 C-DSA 算法的效率;最后对算法实时性进行分析。

实验 1 实验中关注两个指标:分配成功的概率与时延抖动。分配成功的概率由多次实验统计获得。设  $D^f$  为已分配时隙中相邻时隙的间隔,时延抖动的计算公式为:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^f (D_i^f - A)^2}{A} \quad (4)$$

语音业务是实时进行的,对端到端的时延要求比较严格。在战术数据链中要求有较高的语音质量,延迟需小于200ms<sup>[11]</sup>。Link-16数据链限定了相邻时隙的间隔最大为25,需要分配时隙的数量至少为60。设定帧长度 $n=1536$ ,需分配时隙数 $f=60$ 。图2显示的是 $\rho$ 分别取0.85,0.90,0.95时,时隙分配成功的概率随空闲时隙数增加的变化。空闲时隙数 $k$ 按步长10从10增加到1530,每次随机生成5000个空闲时隙状态,统计成功的概率。图3中设定空闲时隙数 $k=1000$ 。图3显示的是比例因子 $\rho$ 分别为0.75,0.80,0.85,0.90,0.95时,均匀度 $\sigma$ 的取值,各计算1000次,形成 $\sigma$ 的取值分布。

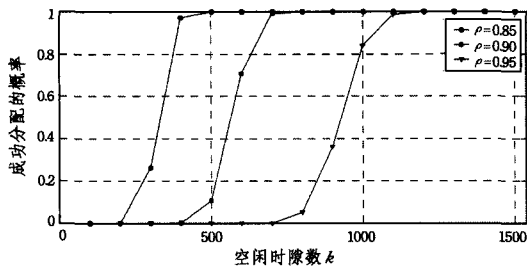


图2 比例因子对分配成功概率的影响

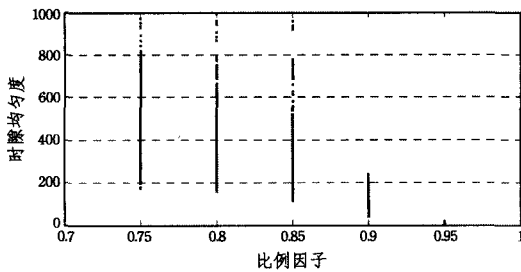


图3 比例因子对时隙均匀度的影响

从图2可以看出,随着空闲时隙数 $k$ 的增加,分配成功的概率逐渐增大。其中比例因子 $\rho$ 的值越小,达到100%成功分配所需的空闲时隙数越小。 $\rho=0.85$ 时,空闲时隙数达到500便一定能成功分配;而 $\rho=0.9$ 时,空闲时隙数则需要达到800; $\rho=0.95$ 时,需要达到1200。这是由于 $\rho$ 越小,能允许的相邻时隙间隔的误差越大,时延抖动则更加显著。图3可以印证这一点,从图3可以看出, $\rho$ 越小,均匀度值的集中分布的区域越高。当 $\rho=0.9$ 时,均匀度 $\sigma$ 在0~300之间,平均到60个时隙上,其相邻时隙间隔与理想间隔的误差为2~3个时隙;当 $\rho=0.95$ 时,误差接近于0。结合图2和图3可以得出结论: $\rho$ 的取值对C-DSA算法性能有重要影响, $\rho$ 的取值偏大会降低成功分配的概率,取值偏小则会导致较差的时延抖动特性。

实验2 比较两种算法的成功概率,也即效率问题。为保证实验的可信度,将两种算法的均匀性指标统一,即参数的选定应使两种算法都能达到均匀性的要求。因此,设定帧长 $n=128$ ,比例因子 $\rho=0.9$ 。实验分两个步骤:1)空闲时隙数 $k=100$ ,二叉树方法中需分配时隙数 $f$ 以2为步长翻倍增加到64,即2,4,8,16,32,64;在C-DSA算法中, $f$ 以1为步长

从1取到64。2)需分配时隙数 $f=4$ ,空闲时隙数 $k$ 从10按步长10增加到100。每次随机生成5000个空闲时隙状态,统计成功概率。实验结果如图4、图5所示。

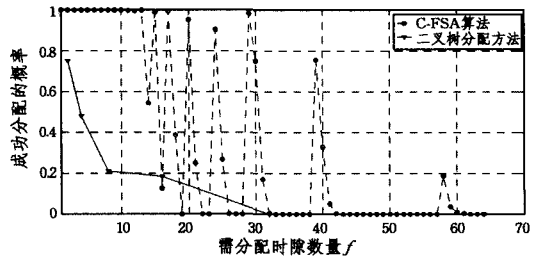


图4 C-DSA算法与二叉树方法的比较(一)

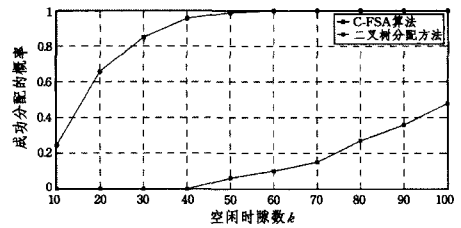


图5 C-DSA算法与二叉树方法的比较(二)

从图4和图5可以看出,TDMA战术数据链的二叉树时隙分配技术效率不高,当需分配时隙数 $f$ 增加或者空闲时隙数量 $k$ 减少时,时隙成功分配的概率迅速减小。如图4所示,需分配时隙数量 $f \le 8$ 时,二叉树时隙分配技术成功分配的概率也并不高。而C-DSA算法在 $f$ 较小时可以达到100%的成功分配概率。

实验3 帧长 $n=1536$ ,需分配时隙数 $f=60$ ,研究遍历次数与空闲时隙数的关系,实验结果如图6所示。遍历次数指3.2节算法Step4中重复的次数,在算法的整个过程中,Step4是时间消耗的主要环节。

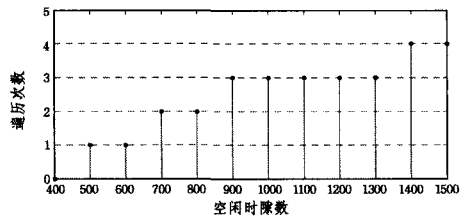


图6 遍历次数与空闲时隙数的关系

仿真结果显示,遍历次数随着空闲时隙数的增加而提高。但即使有1500个空闲时隙时,也只需进行4次遍历选择。这是由于算法在Step2中已完成绝大多数的合并。以普通计算机的标准来衡量(CPU主频在2.5GHz左右),算法整个过程的耗时在 $10^{-3}$ ms数量级,能够达到战术数据链的实时性要求。

结束语 本文通过对战术数据链中不同报文流的时隙分配技术进行探讨,针对实时性与时延抖动特性的要求,提出基于聚类分析的时隙分配算法。应用聚类的方法,所提算法复杂度较低,同时可以使分配的时隙具备可靠的时延抖动特性。仿真结果证明,该算法能够有效处理周期性随机报文流的时隙分配问题。

## 参考文献

- [1] PAWGASAME W. Self-Organized TDMA Protocol for Tactical Data Links[D]. Linköping: Linköping University, 2011.
- [2] BARUAH S, BESTAVROS A. Pinwheel scheduling for fault-tolerant broadcast disks in real-time database systems[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Data Engineering. 1997: 543-551.
- [3] QIN Y, ZHANG J, ZHANG T. Effect of TDMA Timeslot Assignment on Traffic Delay[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 30(10): 2277-2283. (in Chinese)  
秦勇, 张军, 张涛. TDMA 时隙分配对业务时延性能的影响分析[J]. 电子学报, 2009, 30(10): 2277-2283.
- [4] LIANG S, MAO Y Q, ZHAO W Q, et al. The Timeslot Assignment Algorithm of Ground-to-Air Data Link[J]. Journal of Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005, 6(3): 12-15. (in Chinese)  
梁爽, 毛玉泉, 赵伟光, 等. 地空数据链中的时隙分配算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(3): 12-15.
- [5] HUANG K, MAO Y Q, QI Y J. Time-slot Assigning Scheme Used in a New Tactic Network[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2005, 10(3): 23-26. (in Chinese)  
黄凯, 毛玉泉, 戚云军. 一种新型战术通信网的时隙资源分配策略[J]. 西安邮电学院学报, 2005, 10(3): 23-26.
- [6] DONG L, MELHEM R, MOSSE D. Scheduling Algorithms for Dynamic Message Streams with Distance Constraints in TDMA Protocol [C]//Proceedings of EuroMicro Conference on Real-Time Systems, 2000.
- [7] MISIC J, CHAN K L, MISIC V B. Performance of Bluetooth Piconets Under E-limited Scheduling[R]. Winnipeg, Manitoba, Canada: University of Manitoba, 2003.
- [8] LIU X, HE Z X, ZHOU J L. A Mini-jitter Fixed Timeslot Allocation Algorithm for TDMA Tactical Data Link[J]. Systems Engineering, 2012, 30(6): 90-94. (in Chinese)  
刘星, 何肇雄, 周经纶. TDMA 战术数据链中最小时延抖动的固定时隙分配算法[J]. 系统工程, 2012, 30(6): 90-94.
- [9] CHEN J Y, ZHONG Z D, LIU Q. Time Slot Allocation Algorithm for TDMA Tactical Data Link[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(8): 97-100. (in Chinese)  
陈嘉远, 钟章队, 刘强. 基于遗传算法的 TDMA 战术数据链时隙分配算法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(8): 97-100.
- [10] LI X F, DONG Y F, LI J, et al. Data Mining and Knowledge Discovery(second edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 43. (in Chinese)  
李雄飞, 董元方, 李军, 等. 数据挖掘与知识发现(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 43.
- [11] XIA L Y. Tactical Data Link Technology Research[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)  
夏林英. 战术数据链技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- (上接第 67 页)
- [2] SUN D W, CHANG G R, MIAO C S, et al. Analyzing, Modeling and Evaluating Dynamic Adaptive Fault Tolerance Strategies in Cloud Computing Environments[J]. Journal of Super Computing, 2013, 66(1): 193-228.
- [3] YI H Z, WANG F, ZUO K, et al. Asynchronous Checkpoint/Restart Based on Memory Buffer[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(6): 1229-1239. (in Chinese)  
易会战, 王锋, 左克, 等. 基于内存缓存的异步检查点容错技术[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(6): 1229-1239.
- [4] GAO Y, GUPTA S K, WANG Y Z, et al. An Energy-Aware Fault Tolerance Scheduling Framework for Soft Error Resilient Cloud Computing Systems[C]//Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. 2014: 1-6.
- [5] HAMID B, RADERMACHER A, VANUXEEM P, et al. A Fault-Tolerance Framework for Distributed Component Systems [C]//34th Euromicro Conference Software Engineering and Advanced Applications. 2008: 84-91.
- [6] CHEN S H, CHEN T, WEI H, et al. A Study of Suitable Fault Tolerance Frameworks for an Energy-efficient Storage System [C]//Collaboration Technologies and Systems (CTS). 2015: 220-225.
- [7] JHAWAR R, SANTAMBROGIO M. Fault Tolerance Management in Cloud Computing: A System-Level Perspective [J]. IEEE System Journal, 2013, 7(2): 288-297.
- [8] NANDI B B, PAUL H S, BANERJEE A, et al. Fault Tolerance as a Service[C]//IEEE 6th International Conference on Cloud Computing. 2013: 446-453.
- [9] WU X G. Minimum-cost Based Data Replication Strategy in Cloud Computing Environment [J]. Computer Science, 2014, 41(10): 154-159. (in Chinese)  
吴修国. 云计算环境下面向最小成本的数据副本策略[J]. 计算机科学, 2014, 41(10): 154-159.
- [10] YUAN S, GUO Y B, LIU W. Research on voting algorithm in NMR and NVP system [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(11): 3463-3467. (in Chinese)  
袁顺, 郭渊博, 刘伟. NMR 及 NVP 系统中表决算法分析与研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(11): 3463-3467.
- [11] DENG W P. Research on checkpointing in mobile computing environment and modeling with petri nets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)  
邓文平. 移动计算环境下检查点技术与 Petri 网建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [12] ZHAO L H. Search of Cloud Task Allocation Strategy Based on Cloudsim[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2013. (in Chinese)  
赵立慧. 基于 CLOUDSIM 平台的云任务分配策略研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2013.
- [13] 赵东方. 数学模型与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 249-274.
- [14] REN J Z, TAN S Y, DONG L C, et al. Lingo optimization software and its application on optimization of chemical process[J]. Computers and Applied Chemistry, 2010, 27(7): 975-978. (in Chinese)  
任竞争, 谭世语, 董立春, 等. LINGO 及其在化工过程优化中的应用[J]. 计算机应用化学, 2010, 27(7): 975-978.
- [15] ZHENG Z B, LYU M R. Fault Tolerance Management in Cloud Computing: Selecting an optimal fault tolerance strategy for reliable service-oriented system with local and global constraints [J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(1): 219-232.