

计算机协会通讯

CACM.ACM.ORG

2014 年 7 月第 57 卷第 7 期

拿手机当地震侦测器



计算领域的学者
和学术研究

自动化 QA 测试

大数据的挑战

联合多用户波束
成形技术的力量

Association for
Computing Machinery



观点



34

34 观点

结构性的挑战及适应的需要
扩展关于计算和信息研究领域学者和学术研究的探讨
Batya Friedman

实践

- 50 **艺电的自动化 QA 测试**
与 Michael Donat、
Jafar Husain、Terry Coatta 的讨论

投稿文章



66

- 66 **社区感知和响应系统：拿手机当地震侦测器**
加州理工学院 (Caltech) CSN 项目从数千台个人设备上采集传感器数据来对危险地震做出实时响应。
Matthew Faulkner, Robert Clayton, Thomas Heaton, K. Mani Chandy, Monica Kohler, Julian Bunn, Richard Guy, Annie Liu, Michael Olson, MingHei Cheng, Andreas Krause

评论文章



86

- 86 **大数据及其技术挑战**
探索在挖掘大数据潜力时面临的内在技术挑战
H.V. Jagadish, Johannes Gehrke, Alexandros Labrinidis, Yannis Papakonstantinou, Jignesh M. Patel, Raghu Ramakrishnan, Cyrus Shahabi

研究亮点

- 96 **技术视角**
联合多用户波束成形技术的力量
Konstantina (Dina) Papagiannaki
- 97 **JMB: 随用户需求缩放无线容量**
Hariharan Rahul, Swarun Kumar, Dina Katabi, Zoran Popovic



关于封面：

加州理工学院开展了一个有趣的项目，通过收集数千部智能手机的实时传感数据，实时知道并应对具有威胁性的地震。作者跟踪了加州理工学院社区地震台网的发展和部署，详见自第 66 页开始的文章。封面插图照片：hitandrun。



观点

结构性的挑战及适应的需要

扩展关于计算和信息研究领域学者和学术研究的探讨

在一个领域衍变进程的关键阶段，需要一些调整以刺激和保持活跃、富有生气的学术研究。在

本期《观点》栏目中，我将阐述计算和信息研究正处于这样的一个阶段，需要结构性改变以保证该领域继续健康发展。近来，通讯的作者和其他人士参与讨论了计算研究的出版文化及其对该领域影响。^{1,3,6} 这场讨论在某种程度上针对的是 20 世纪 90 年代后期主要计算档案出版格式的变化，从页数长度不一，灵活提交，多轮会议论文审阅周期改变为文章长度限定在 10-15 页，设定截稿期限以及最短的审阅周期。⁴ 这里，我想将讨论进一步扩大，关注这一问题中最突出的部分：就整个领域及个人研究者而言，我们如何创造出稳定的科学和工程新知识？学术研究的深度和活力、个人职业轨迹、出版、署名规范、主要信息和成果的报告、发明的创造和应用、评价标准和其它讨论都是由这一核心问题而引发的。

为了正确看待我的评论，先退一步看看，从相关的个体学者知识生命周期发展的角度，任何一个年轻领域的发展有哪几个基本的观



察。从定义上说，一个新领域是从一个或多个现有领域中脱胎和成型的。^a 起初可能会有大量的新问题和新机会。在一个领域的发展初期，可以作为基础的前人工作相对较少；更多工作可能都是首开先河。即使是在争取创造早期经典工作时，新兴领域的首批学者常常会有跨学科思考的倾向。在这种情况下，他们来自于其它领域，受过其

它领域的训练，并带来了提出科学问题和开展科学工作的多种方式。随着时间的流逝，这些开创领域的学者建立了第一批院系，训练了下一代研究者，并将博士学位授予一些人，这些人又训练下一代的年轻研究者，如此延续，使得跨学科的观点逐渐消失。这些学科的往往会摆脱跨学科的倾向，发展出一个新领域独特的文化和标准。

随着一个领域继续成熟，研究不断积累，综合性、集成性活动的需求开始出现。真正新颖的重大贡

a 计算和信息研究的转变发生在 20 世纪 50 年代和 60 年代之间，源于电子工程学、信息理论、数学等等。

献出现的几率越来越小，甚至需要更高超的独创性才能产生。对于年轻领域而言，这里描述的过程并不罕见。计算和信息领域也不例外。在我们的领域中，这些因素和其它因素以显著而又复杂的方式综合在一起，因此，是时候重新思考一些衍变中的过程和规范，并考虑加以调整。这样的调整有助于促进持续稳健的发展。

为达到这一目的，在本期《观点》栏目中，我想针对该领域知识创造的活力和能力提出七个结构性的挑战，简要指出该领域中实践和激励手段的潜力在作为建设性的力量同时，也需要慎重地把握好这种转变，特别是那些可能危及年轻学者的事业的转变。

活跃学术研究的七个结构性挑战

这里每个假设和讨论的结构性挑战都与我们提出哪些科学问题以及针对这些问题进行研究和报告的重要方式有关。

1. 基于前人工作继续发展在某种程度上，基于前人的想法发展，对前人的想法进行延伸或驳斥促进了知识的进步。当研究者承认并明确他们的新发现和发现与前人的理解有何联系时，就对这一领域做出了贡献。通常，这样做需要时间和空间。需要时间想清楚这些联系，以及需要发表渠道的空间来报告这些想法。目前，计算和信息科学、工程的大部分子领域都十分强调会议论文，将相对较短的论文作为主要的发表渠道。这样的强调造成的一个显然的结果就是：可能就是没有足够的空间来详细地报告作者是如何基于前人的工作继续研究的。考虑到篇幅长度，理所当然只能将重点放在报告新工作的贡献和结果上。此外，在某种程度上，由于研究结果通常是以短（较短）篇幅报告的，要发现问题领域和

随着一个领域的成熟和研究的积累，综合性、集成性活动的需求也随之产生。

子领域之间的联系变得十分困难甚至不可能，更不用说探索和发展这些联系。就个人而言，研究者不再积极承担责任，来清晰地阐述他们的新贡献与前人工作的关联，以及如何补充、延伸、区别于或挑战前人的研究。而就整个领域而言，研究的持续性和一致性受到了阻碍。如此下去，我们将可能会丧失知识更大发展的机会。

2. 方法的健全性研究的发现和结果在这样的语境中才有意义：我们知道它们是在什么情况下，如何产生的。只有在这时，我们是作为个人学者以及一个领域来判断其创新性、活力，以及它们的局限性，后者是同样重要的。在这里，较短的发表长度也会形成缺陷。方法的健全报告需要有空间来包含足够多的细节，这样审阅者才能评价工作的恰当性和质量；出版物的近期读者才能在语境中理解结果，从而能够加以使用、应用、复制、扩展或反驳；未来的读者才能了解该领域方法和思想的历史发展。上述这些现在都得不到保证。此外，也许最令人困扰的是，研究者明显越来越不用为报告健全的方法负责，而相应地，方法也会变得更加不严格。

3. 研究问题的范围和深度一个领域是通过其提出的问题来界定的。这里，同样可以联想到当前的发表文化。虽然相对快速的短篇会议论文出版周期可以产生更简洁的

结果报告，但它也可能导致研究者提出的问题都是在 15 页或更短篇幅内就可以轻松解答的。^b 这样的论文在审阅过程中也许还会更胜一筹，因为它们可以在页数限制下更加充分地阐述。诚然，一些大（较大）型、有意义的问题和结果可以精要地表达和辩护，特别是对于那些用精确的数学符号表达想法的子领域而言。但其它有意义的问题的范围是较小的。这些问题也应该得到探讨。但是，当前会议发表周期对于研究问题范围和深度的影响过分扩大，这需要得到研究和解决。

4. 综合和理论建设综合和理论建设^c这两个工具可以使大量个体知识变得有意义，并可以反过来为后续研究提供方向。它们提供了一种方法来研究大（较大）的想法，以（更）宏观的方式和持续的知识对话来实现。虽然它们在一个领域发展的任何一个阶段都是有价值的，但当一个领域成熟、细分、并积累了大批看起来毫无关联的研究成果时，这些工具变得尤为重要。例如，在人机交互和计算机安全中，都有成百上千的研究在某些方面涉及隐私问题；但我们基本上没有看到一些分析能把这些文献串联起来，提供囊括这些研究结果的解读和综述。在计算和信息研究的一些子领域，这样的工作几乎没有报告的渠道。此外，依所在的子领域不同，这样的贡献在永久教职和晋升过程中所起的作用十分有限。产出这样有质量内容的能力需要持续地投入精力去培养，目前年轻学者很少接受这方面明确的训练，而这样的能力经常也得不到认可。

5. 跨学科工作：署名规范和报告主要成果。成熟和正在成熟的领

^b 关于出版速度对研究的范围和深度的影响还有很多地方值得探讨（包括会议论文发表周期，行业暑期实习的持续时间和期望），然而由于版面空间的限制，这些讨论已超出了本文的范围。

^c 我所使用的“理论”和“理论建设”泛指广义的数学和社会科学活动。

ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems



This quarterly publication is a peer-reviewed and archival journal that covers reconfigurable technology, systems, and applications on reconfigurable computers. Topics include all levels of reconfigurable system abstractions and all aspects of reconfigurable technology including platforms, programming environments and application successes.

www.acm.org/trets
www.acm.org/subscribe



Association for
Computing Machinery

域需要持续注入新想法来维持创新和活力。跨学科工作正是源泉之一。在知识的边界，业已形成的概念遇见不同的范式、熟悉的问题、新方法和工具，从中又产生了新的问题（和解决方案）。更一般地说，多样化的思考方式会激发创造力和想象力。即便如此，进行跨学科工作并非没有挑战。在众多挑战中有两个挑战，即署名规范和主要成果的发表与跨学科工作的发表有关。它们令人关注之处在于会使研究者无意间陷入道德困境。关于署名，不同领域（甚至子领域）在认可知识贡献方面也许有不同的、有时相互矛盾的规范。^d 考虑到这些矛盾，如果跨学科工作以及进行该工作的学者想要成功，那么重建署名规范则十分重要。

发表主要成果同样也面临相似的挑战。目前科学出版相关的道德公约不允许超过一次发表主要成果。从事跨学科工作的学者只能选择：要么违反这一道德规范，要么无法在所有相关的研究学界都充分发表主要成果。此外，后一种的选择意味着随着时间推移，无意的偏见可能出现，导致一些领域的预期交流（例如，发表）平台上无法直接了解或获取到这些主要成果。从研究学界的角度看，这好似研究根本就没有进行。这也存在某种道德过失。这些挑战的根本问题在于我们对道德的科学实践的理解，以及这一事实：对于好的跨学科工作，我们没办法指定其主要学科。的确，解决这些挑战的方案必须跨越计算和信息研究界，从其它科学乃至更广泛的领域中寻找。

^d 为了澄清这一困境，请看这个真实的例子：在某一领域，著作署名的期望是“学生第一，教员随后”（这在计算和信息研究的子领域是很普遍的）。而在另一些领域，“著作署名的顺序应该准确地反映参与者的相对贡献”（例如心理学的规范³）；设想有一名教员是一个跨学科团队的知识引导者，这一团队包括来自不同学科的学生和教员。倘若他们正确地遵守其中一个领域关于著作署名顺序的规范，那么他们必然会违背其它领域的规范，反之亦然。

6. 扎实的学术性以及创新的稀缺大体上说，成熟领域的大部分研究贡献的是增量式的新知识，即填补已有想法之间的空白，以及验证其边界。我们称之为有趣的扎实工作。真正的新想法常常是先进的，引发范式的转变，质疑先前接受的基础知识或者提供全新的思考方式。这样的工作是真正新奇、创新的。如果我们坦率地说，这样的工作也是非常稀少的。这两种工作都非常重要，并相得益彰。即便如此，一流大学的人才招聘和终身教职委员会大都看重创新。事实上，这些委员会会问年轻学者：“你做过什么新研究？你创建了什么新领域（或子领域或次子领域）？”这样的标准至少会造成两种无意识的结果：他们鼓励或者甚至奖赏那些将熟悉观点轻微改造就命名为新想法的研究者；他们低估或甚至惩罚那些深入研究前人工作并适当肯定知识遗产的研究者。当然，偶尔会有全新的发明和重大突破，这些也需要得到承认。

7. 学者的成长不仅一个领域在成长，领域中的个人学者也在成长，正是他们的努力使得领域得以持续活跃和发展。此外，经验也很重要。但我注意到，在该领域生态系统复杂的力量和压力下，较为缺乏经验的研究者经常过早地承担起关键的知识领导角色（例如，会议上主要是研究生在宣读论文，在一些子领域，研究生还担任主要会议和期刊的审阅者）。他们还接手越来越多的框架性研究问题，甚至是主要的研究项目。我并非反对经验相对缺乏的研究者进行上述活动，而是想指出目前状况是失衡的。简而言之，我们没有充分培养好经验欠缺的研究者，或者为知识成熟提供时间和空间；相应地我们破坏了更加成熟的研究者做出重大知识贡献的机会。

和其它动态的生态系统一样，计算和信息研究领域无法保持静止不变。

促进调整：发展成一个（更加）富有活力的学术生态系统

具体要如何调整目前本领域的惯例和激励措施来解决本期《观点》中提出的结构性问题还有待探讨。至少，我们可以期望达到研究和学术最基本的标准和预期。例如，目前产出许多短（较短）篇幅论文的趋势应该通过政策和措施得到扭转，并奖励数量较少但质量更高的论文。事实上，在某种程度上为了解决此类和相关问题，在美国，我们已经看到国家科学基金会近来做出的政策改变，将每位主要研究者向一些项目提交的申请数量限制为每年两个。这一政策和其它类似政策将会鼓励撰写少而精的项目申请。其它实践和激励措施需要重视基于前人工作的切实研究；认可扎实的知识发展（而不要求所有或者大多数研究者创造新的子领域或发明新词）；奖励综合以及理论建设。对于跨学科工作而言，我们将需要重新思考并明确一些规范，以认可知识贡献和署名，以及成果的主要发表。所有这些的关键在于重新审视经验丰富和经验欠缺的研究者之间的活动平衡及分配。当然，这些都将需要本领域内（以及在更广阔的科学界中与跨学科研究相关的方面）的仔细思考和讨论。

生物学家们警告我们在生态系统变化时，那些能很好地适应一种环境的物种会在其它环境中受到威胁。² 因此，社会生态环境中有重大变化的时候也是如此，就如这里

所倡导的这些变化。即使我们调整了规范、期望和实践以实现该领域的可持续发展，我们还需要关心那些有才能的年轻研究者的事业，他们将经历领域的变化。特别是当招聘、升职和终身教职委员会相应地改变其评估标准，例如重视少量更加坚实的论文，这里讨论的改变才真正有效。因此，指导博士生的教师、新晋博士以及招聘委员会和升职及终身教职委员会都需要注意这一转变及其对他们所指导和评估的学者的意义。

和其它活跃的生态系统一样，计算和信息研究领域也不可能静止不变。在正常的进程中，一个领域在一些方面发生改变：积累了新知识，训练年轻的研究者，改变了论文发表模式，其它方面也需要相应地做出调整。此外，在活跃系统的一些关键发展阶段需要有意识地进行关键调整以保障其后续的生存能力和活力。如前所述，若想保证本领域能够继续产生新的、变革性的知识，确保深厚的学术研究并维持影响力，那么该领域是时候应该做出调整了。即便如此，扰乱一个正常运作的生态系统是有风险的。一个领域内小小的调整也许会有深远的影响，这些风险有些或者许多是无法预测的。因此进行改变时需要慎重考虑，因时制宜和见机行事（再调整）。作为学术界，我们既要勇于保证一流的学术水平和持续的影响力，同时也要保持慎重态度，尽可能减少伤害新一代，他们将推进领域的继续发展。

可以说本期《观点》想要表达的就是这些。我提出的每一个挑战可能都是一个值得严肃、深入分析的主题。也许下一步可以围绕此继续展开。此外，我避免直接提出具体的解决方案，因为我认为这需要整个学术界在周密的行动和探讨后方能提出。我希望本期《观点》能延续和深化对于这些及相关话题的讨论。 □

参考资料

1. Birman, K. and Schneider, F.B. Program committee overload in systems. *Commun.ACM* 52, 5 (May 2009), 34-37.
2. Dubos, R. *Man Adapting* (enlarged edition). Yale University Press, New Haven, CT and London, England. 1965, 1980.
3. Grudin, J. Technology, conferences, and community. *Commun.ACM* 54, 2 (Feb. 2011), 41-43.
4. Patterson, D., Snyder, L., and Ullman, J. Best practices memo: Evaluating computer scientists and engineers for promotion and tenure. *Computing Research News* (Aug. 1999); http://cra.org/resources/bp-view/evaluating_computer_scientists_and_engineers_for_promotion_and_tenure/.
5. *Publication Manual of the American Psychological Association* (Sixth Edition). American Psychological Association, Washington, D.C., 2010.
6. Vardi, M.Y. Revisiting the publication culture in computing research. *Commun.ACM* 53, 5 (May 2010).

Batya Friedman (batya@uw.edu) 是华盛顿大学信息学院的教授，计算机科学和工程系的副教授，人本设计与工程系的副教授，同时她还共同指导了价值敏感设计研究室和威斯康辛大学技术策略实验室。

感谢国家研究委员会的 Lynette Millett 和关于计算研究出版文化的 Dagstuhl 研讨会的参与者对本话题的扩展讨论。同时，也感谢 Jon Eisenberg, Jonathan Grudin, Fred Schneider, Jacob Wobbrock, Ellen Zegura 和三位匿名审阅者对本文的评论。

译文责任编辑：陈文光

版权归属于作者 / 所有者

文章编写主导者 [acmqueue](http://acmqueue.queue.acm.org)
queue.acm.org

与 Michael Donat、Jafar Husain、
Terry Coatta 的讨论

艺电的自动化 QA 测试

在数以百万计的游戏爱好者看来，艺电 (Electronic Arts) 的质量保证 (QA) 测试员岗位一定是梦幻般的工作。但是从该公司的角度来看，质量保证方面的花销看起来会十分惊人，尤其是在大型多人在线游戏的时代。

因此，自动化 QA 测试吸引人的地方在于，有潜力变得比人工测试速度更快、更具成本效益、更高效、更具扩展性。虽然自动化不能模仿测试人员的一切操作，但对于许多基础测试，它可以起到很大帮助。不过，事实证明，转向自动化测试远远不像最初看起来那样简单。我们在这里讨论了一些最棘手的问题。

在位于不列颠哥伦比亚省温哥华的美国艺电 (EA)，Michael Donat 是自动化的倡导者。他目前的工作重点是玩家和业务分析团队的流程改进。他曾在 Silicon Chalk 和 ActiveState Corp 担任 QA 经理，在微软担任软件设计工程师。

参与讨论的有 Netflix 首席软件工程师 Jafar Husain。此前，他曾在微软工作，有一项任务涉及创建 Silverlight 开发平台的测试环境。在那里，他接触到了模型视图视图模型 (MVVM)。他表示，现在自己是 MVVM 的信徒，只要有合适的机会就会传播 MVVM 的信条。

ACM Queue 理事会成员 Terry Coatta 召集了这组人一起讨论自动化 QA 测试的潜力。他曾和 Donat 在 Silicon Chalk 共事，当时的任务就包括创建复杂的测试环境。Coatta 现任 Marine Learning Systems 首席技术官，负责开发面向海事工作者的学习管理系统。

TERRY COATTA: 据我了解，目前为止，你们在 EA 应用自动化 QA 测试的过程有点坎坷。

MICHAEL DONAT: 最初，我们认为自动化是个好主意，但后来尝试了一下，失败了。尽管如此，我们找到了问题所在，解决了问题。虽然我们发展到了不错的稳定阶段，但我们知道还有很长的路要走。我们的解决方案显然无法满足我们的一切要求，即广泛应用自动化测试。为此，加上其他一些原因，我们中有些人断定，我们真正需要的是沿着 MVVM 路线建立新架构。

JAFAR HUSAIN: 你们推进自动化的首要动力究竟是什么？

DONAT: 我们的首要动机完全是因为人工测试的成本。由于



MICHAEL DONAT

我们正努力确定如何能够具体说明这些东西，而且是以可理解、可维护、能灵活修改的方式。



我们的游戏复杂，人工测试的成本变得非常高昂。基本上，需要我们全部重新人工测试的代码变更成本可能会高得惊人。通过降低这些成本，我们原以为有机会让测试人员脱离自动化能够处理的所谓“稳定性测试”，从而能开始更多地关注游戏体验的可靠性和趣味性。

COATTA: 在稳定性测试方面，你认为自动化首先能获得什么机会？

DONAT: 开始认真考虑自动化的时候，我们正在开发 EA Sports 的足球游戏 FIFA 10。最初是 10 对 10 的游戏，后来加入了守门员，变成了 11 对 11。所以我们需要很多测试人员，20 名或者 22 名。但是还不仅限于此，因为我们还需要测试不同比赛之间的交互，确保服务器不会分不清发送什么信

息到哪场比赛。因此，除了要求测试人员玩一场比赛外，我们还需要同时至少有另外一场比赛正在进行，这意味着，我们实际上需要有 40 名左右测试人员同时参与。

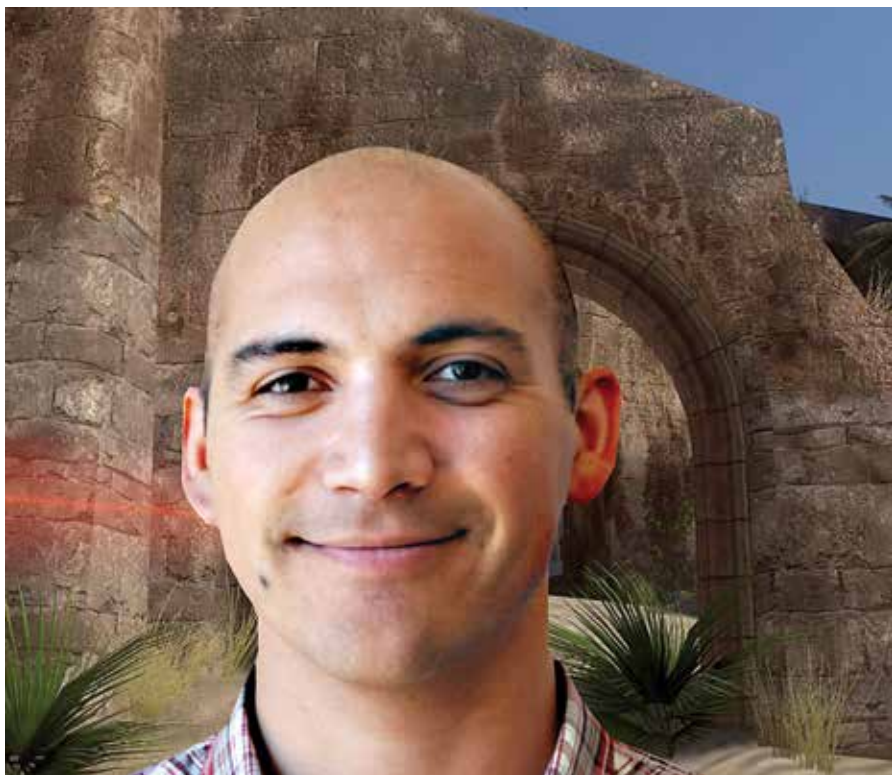
即便我们想方设法把所有人组织得井然有序，最终可能比赛刚开始几秒就遇到一个无足轻重的细小漏洞，导致整个测试失败。这不仅造成浪费，也非常令人沮丧，许多人原本可以用这段时间做一些更富有成效的事情。综合所有这些原因，自动化势在必行。

COATTA: 在朝这一目标努力的过程中，你们遇到了一些什么问题？

DONAT: 首先，在 FIFA 10 中建立一场在线多人模式 (OTP) 比赛需要用户经过一些界面。我们有 20 台游戏主机，脚本是按时间设置的，这意味着脚本会向游戏主机



一个代码库有两个不同但类似的库是一回事，而同一代码库有两种不同的范式完全是另一回事。在这种情况下，新来的开发人员非常难以弄清楚到底该怎么做。



发送命令，然后等待规定的时间，让所有游戏主机全部进入正确的状态。随后，脚本会发出下一批命令。我们的目标是通过一组界面切换，让游戏主机以一致的步骤前进，从而设置好游戏：参与者选择玩哪一边，穿什么球衣，玩什么位置，以及其他各种参数。所有这些都需要保持同步，这只是为了让游戏编程尽可能简单。

当时，我们原始的测试自动化系统使前台导航出现了问题。时机必须恰到好处，否则测试会失败。因此，当时我开始主张完全跳过前台的方式，但后来不得不改变我的观点。FIFA 10 OTP 的人工测试过程中出现了一些问题。实际上，问题相当多，以致于人工测试的预算不得不显著增加。我们面临的问题是，“今后如何才能避免这种情况发生？”

为此，我分析了在 QA 周期中获得的 300 个左右崩溃漏洞。我的目标之一是看继续追求自动化是否能带来显著的投资回报率。我发现，

半数多一点崩溃漏洞实际上是在那些最初的屏幕切换中出现的。事实证明，我一直跟游戏开发人员所讲的东西是错误的。也就是说，我们确实既需要在前台测试，也需要在后台测试。仅凭去掉前台测试无法让自动化变得更简单。

COATTA: 有意思。似乎前台的所有操作就是选择菜单项，那么你们有多大可能性发现其中的漏洞？实际上，像选择菜单项这样看似简单的过程实际上相当于分布式计算。20 个不同的操作同时进行，而输入来自所有这些不同的地方，现在必须协调所有这一切。

DONAT: 没错。很明显，我们需要完全不同的机制。仅仅发送控制输入还不够。我们需要让测试程序知道在特定游戏主机上处于什么位置，然后以可纠错方式从该位置前进。

最初开发 FIFA 测试自动化框架的人员意识到这是必要的，但多年来处理这种框架的能力已经彻底丧失，到我们准备好测试 FIFA 11

的时候已经不存在了。所以，有一件事情非做不可，那就是得到我们需要在用户界面 (UI) 中看到的细节，这样我们就能知道实际的操作步骤。

HUSAIN: 我猜想，不应从视图层开始推进，即经过控制器和视图，相反，需要绕过此视图，直接处理模式本身。

DONAT: 信不信由你，我们当时还没有到那个阶段。那时，我们只是很高兴有了可靠得多的脚本，仅仅因为它们知道自己在程序中所处的状态。

COATTA: 这样一来，你实际上可以关闭反馈环路。在此之前，你需要发送一条命令，然后无奈等待，希望上天保佑其间不要出现问题，而现在你不用这样期盼，因为你可以验证。

DONAT: 对。我们现在有了更多受控状态转换。我们在 FIFA 11 上取得的另一项重大 QA 改进是增加自动辅助，借此可让自动化自行运行游戏，由一两名人工测试人员为选定的游戏主机提供控制器输入来推动实际的游戏玩法。他们并不需要手头有 20 个人。这代表一项巨大的改进。

COATTA: 到了那一步，有些人可能会止步不前。

DONAT: 但或许对我来说，这还只是走了一步。将自动化测试引入一些类似 FIFA OTP 的具体应用十分美妙，我真正想要的是通过更广泛的应用来提高稳定性，只有这样才能使我们的测试人员专注于整体游戏体验。这才是开发卓越产品的方式。

FIFA 11 上的工作让 EA 确信了自动化测试的潜在好处，但实现这一目标显然需要不同的架构。答案似乎在 MVVM 模式中。MVVM 是一种主要基于 MVC 的架构模式，它方便将图形用户界面开发和后台逻辑开发明确分离开来，这意味着它

可让 EA 将 OTP 游戏玩法测试与 UI 测试分离。

COATTA: 回首你们在 FIFA 11 自动化测试上取得的成果，你认为接下来的步骤是什么？

DONAT: 事实证明，FIFA 11 令人鼓舞，但问题是我们不得不花费大量时间编码。这主要是因为在游戏中，某些界面经常变化，因此我们不得不对测试自动化脚本做出相应修改。这并不总是能得到适当协调，因此最终会出现问题。因此，我们的测试自动化脚本非常脆弱，几乎需要一名软件工程师专门负责维护。

就 FIFA 11 OTP 而言，费用是合理的，但我无法在所有其他游戏领域中使测试自动化工作达到类似水平。我们必须继续依靠大量的人工测试来完成测试的所有环节。显然，我们需要找出一种测试编码方式，降低持续维护的频率，减少占用昂贵的资源。

COATTA: 这把你们引向了什么方向？

DONAT: 基本上，这意味着需要改变架构。在界面切换方面，应该很容易看出游戏的设计方式，但也应随时可以访问这些界面切换所依照的数据。一般情况下，更高的抽象层次上的东西要比当前层次的东西更容易访问。

HUSAIN: 是否可以这样说，你想专注于独立于实际 UI 控件的工作流程？

DONAT: 一点没错。局势明朗后，我们意识到需要一个不同架构，它要更像 MVVM。这并不是说它必须是 MVVM，只是需要有那种能力。

COATTA: MVVM 模式有什么重要之处？

DONAT: 实质上，它使我们能够将界面本身与其使用的数据分开。我们需要这样分开，这样自动化系统就可以获取它们需要处理的东西。

HUSAIN: 将 MVVM 方式与很多开发人员可能更熟悉的其他模式（例如 MVC）对比一下可能有助理解。在 MVC 架构中，控制器和视图彼此了解并直接相互发送消息。MVVM 架构中没有控制器，取而代之的是视图模型。视图模型存储视图的状态，视图对象决定应该如何展示视图模型的状态。

与 MVC 模式不同的是，视图模型并不直接了解视图，不直接向视图发送消息，而是通过观察者模式间接更新视图。当视图模型发生变化时，它会广播这些变化，视图会随之自我更新。这样做的主要好处是，甚至无需实例化视图对象，就可以测试视图模型是否处于正确状态，这可以增加很多异步操作（通常与渲染相关），从而不得不进行协调。

用这种方式测试新模型很容易，因为模型公开了可以直接调用的方法。通过视图层测试逻辑容易出错得多，因为它需要等待按钮来加载并且依赖易变消息的传达，如模拟鼠标点击和按键事件。

你们不止在 FIFA 11 上用了这种方式，那么在朝 MVVM 这类体系结构发展还采取了些什么措施？

DONAT: 我要指出的是，改进测试自动化只是 MVVM 的好处之一。出于各种原因，EA 其他几个小组也正在转向这种方式。目前为止我们采取的措施大多是使数据与界面更加明显地分离。遗憾的是，FIFA 界面太多，我们无法一一进入并重写一切。但是，我们所能做的是在新功能中运用新范式。

HUSAIN: 有趣的是，面对如此多的挑战，你们选择了向 MVVM 逐步演化架构。你们似乎发现，只添加遵循这种新模式的新事件或额外的组件更容易，然后在可以时开始使用这些事件或组件。我相信，在某种程度上，计划是更大规模地

转向 MVVM 或类似技术，正如这一机会所展示的一样。

DONAT: 之所以这样计划，是因为这实际上是我们唯一能采取的方式。实现我所追求的全面自动化需要一段时间，但至少我们正在朝着正确的方向发展。

我们的下一个问题是搞清楚如何具体说明我们的测试，因为现在没有可让我们获取该内容的架构。但我们仍然不知道这些测试应该是怎样，应该如何打包，如何包含易于维护且对维护者有意义的信息。

COATTA: 主张类似 MVVM 的环境会遇到什么阻力？人们是否会害怕这一转变太困难？

DONAT: 毫无疑问，这很困难。更糟糕的是，软件工程师将不得不做出这些变化来代替增加一些新功能，而这种牺牲的合理性非常难以证明。我甚至无法准确说出自动化能带来多大节省。事实是，可能无法带来那么多节省，因为我们只是在将人工资源从一种测试转移到另一种测试。

COATTA: 你是否认为用 MVVM 开发实际上代价更高？或者，更多是因为软件工程师不愿意改变自己习惯的工作方式？

DONAT: 这取决于所涉及的底层代码。此外，我们有时会渐进式修改现有功能。也就是说，我们有时需要重写功能，因为它们需要演化到超出原来的设计。重写功能肯定会带来利用新方式的机会。

另一方面，如果我们要给现有的游戏模式加入一些新花样，或在现有基础上增加一个小功能，那将非常难以采用新的方式，而所有旧东西仍然存在。这只会使所有这些渐进式修改代价更加昂贵。

HUSAIN: 看来，为了取得一定实际效果，你们需要将完整的工作流程转移到 MVVM。我想这很难通过渐进方式完成。

DONAT: 没错。

HUSAIN: 我们在 Netflix 也碰到了这个问题。我想你已经触及了一些值得指出的问题，即一个代码库有两个不同但类似的库是一回事，而同一代码库有两种不同的范式完全是另一回事。在这种情况下，新来的开发人员非常难以弄清楚到底该怎么做。你有没有发现这是一块绊脚石？有没有导致什么摩擦？

DONAT: 当然是。世界各地有许多 FIFA 开发人员，所以很难想象让所有人统一支持向更接近 MVVM 的方向转变。

HUSAIN: 我不知道这些开发人员目前对 MVVM 的态度是否反映你宣称的好处只会在下游实现。除此之外，他们是否知道，撇开测试方面的好处，一般而言 MVVM 对于开发可能是更好的架构？

DONAT: 其实，我对这家公司的软件工程师同事一直印象深刻。他们似乎都知道什么是正确的做法。但时间也是一个问题。

HUSAIN: 是否可以这样说，开发人员对 MVVM 并没有任何异议，甚至可能非常赞成做出必要的改变来使用 MVVM？

DONAT: 通常情况下，当我向一组游戏开发人员谈一些想法时，他们会说，“哦，我们知道该这样做”，但是到了实现的时候，由于时间限制，他们却不能遵循。

HUSAIN: 在你们的推进方式方面，我发现还有一些架构方面的问题，你们也仍在努力探索针对测试人员的 API 应该是什么样子。

DONAT: 是的，尽管我强调规范而不是 API，因为编程的费用高昂。我们正努力确定如何能够具体说明这些东西，而且是以可理解、可维护、能灵活修改的方式。也就是说，在最纯粹的形式下，你想运行一个有 22 台游戏主机参与的 OTP 测试，11 台分配给一个队，另外 11 台分给另一边，而且能将所有合适的参数相互关联。

接下来的问题是：怎样具体指定这种情况，使其涵盖各种各样的测试？当然，这是因为每次运行测试时，你希望能够做不同的事情。例如，如果是多场比赛的情况，你可能希望遍历所有球队、球场和球衣，这样，在几周的测试过程中，你可以循环使用尽可能多的组合，而所有这些基本上只需要指定一次测试。这就是我们的目标，但我们暂时还不完全清楚要如何处理。

HUSAIN: 确实有两个问题：

(1) 是否有可能？(2) 是否可扩展？还有一些更先进的方法可以用来构建异步测试，但初级开发人员或测试工程师会用吗？

DONAT: 对。如果不能以低成本实现这点，这样做就没有意义。当涉及到人力资源时，向自动化测试转变的成本因素很重要。首先，必须说服习惯于某种工作方式的软件工程师做出改变。他们必须学习新的范式，从同步编程转向异步编程，甚至学习领域特定语言 (DSL) 来编写基于事件的测试。

其次，成本较低的 QA 测试人员所做的工作和留给高收入专家的工作之间必须取得适当的平衡。这意味着，通过强调由事件启动和控制的声明性测试，同时设计编排为完成这些事件的测试，借此利用游戏的异步性质。这可以让大量廉价程序员编写声明性测试，同时让精心挑选的高薪程序员专注于更复杂的编排问题。

HUSAIN: 你们有没有探索其他语言，其可能使较低级的开发人员更容易编写基于事件的测试？

DONAT: 我一直在考虑使用 DSL 的可能性。但最令我担心的是，有一次我们不得不将游戏信息编码到测试代码中，如果我们当时选择了错误的 DSL，恐怕最终要回归在一些其他类型的代码中编码信息。

我们准备使用的 DSL 属性之一是游戏信息容器，这个容器必须足



TERRY COATTA

我的团队一直在开发用于异步环境的程序，有限状态机在这方面表现非常出色。我们发现，对于捕捉事件和转换之类的东西的相关信息，有限状态机是一种非常好的方法。



够透明，以便人们可以很容易地访问这些信息。QA 人员和游戏制作人员都能用熟悉的词汇访问这些信息，这点很重要。

HUSAIN: 理解了。DSL 开始和库结束的地方之间的界线可能有点模糊。但是，DSL 也可以嵌入已经使用的通用编程语言。

DONAT: 目前，我认为我们并非真的要考虑 if-then-else 循环编码问题。我们可能只是在刺激和响应的层次上谈论测试，也就是说，“当程序以在这种特殊方式响应时，则提供这种刺激。”

COATTA: Jafar，你在 Netflix 有没有用过 DSL？

HUSAIN: 实际上我们目前正在努力进行类似的转变，但主要不是为了测试，更多的是为了找到更好的方式来在我们的应用程序中协调并发。我们现在用的是 Rx (Reactive Extension) 库。有意思的是，这个库实际上已经集成到 C# 中，这意味着你可以在更高层次上使用它，而非仅仅在 if-then-else 层面

用于协调异步进程。Reactive Extension 还有 JavaScript 版本，我们现在用的就是这个。

虽然这应该会使事情变得非常容易，但在实践中我们发现，这对于开发人员是一种全新思维方式，特别是以往使用 if-then-else、命令式、自顶向下编程的开发人员，尽管 Rx 抽象所处的层次高得多，实际上相当偏声明性，而且显然很灵活、强大，有足够的处理能力来处理各种复杂的异步操作。这不是学习一门新语言难不难的问题，而是说从同步编程的思维方式转向异步编程是非常困难的。

在学习一些新东西和完全不同的编码思维方式方面，异步编程需要大量的投入。也就是说，要设法找出一种 DSL，能在几个星期甚至产品周期过程中将同步编程程序员转变为异步编程程序员，对此我表示怀疑。

DONAT: 我也担心这点。团队内需要有熟练异步编程的人。编写这些异类 OTP 测试的人肯定需要

这些技能，在这些测试中，我们有三两场比赛同时进行。

但我尚未解决的问题是：怎么能做到这一点，并且仍然让 QA 人员指定大部分测试？只要达到 QA 人员编写的测试能覆盖 80% 的游戏代码，这样就很不错了。如果其他 20% 的 OTP 测试必须由高薪专家编写，那也可以。只要能以较低成本覆盖很大一部分代码，我就觉得好极了。

HUSAIN: 这些专业开发人员可能费用昂贵，但如果他们使用合适的工具、语言、框架或范式，你就有可能从他们身上获得更高价值。辨别哪些人有异步编程的天赋并对其进行强化培训，这样可以产生真正的价值。除此之外，我认为我们开始发现更多有潜力带来巨大节约功效的框架和工具。一旦开始利用它们，那些专家每天编写的测试就不只是两个，而是六七个甚至八个。

COATTA: Michael，起初我感觉你希望找到一种 DSL，它可以让你通过使 QA 人员能够执行相当广泛的测试，从而更好地利用他们。Jafar，听起来你到目前为止的经验是，异步编程足够复杂，真正的胜利在于找到一些拥有异步编程天赋的人，然后让他们发挥超高效率。

长远下去应该怎样？异步编程是否太难，将始终只是牛人的天下？或者有什么建议可让低级程序员更容易使用异步编程？

DONAT: 我认为会二者兼有。产品的很大一部分仍会保持相当简单，一旦确立了正确的框架，成本较低的程序员很可能就能处理这部分编码。但是，建立该框架的人需要了解异步，有处理其他相当复杂的要求方面的经验并接受过相关培训。肯定要有一些训练有素的优秀人才，但你也确保可以利用这些工作，使他们的贡献可以广泛应用。

HUSAIN: 我对此有点悲观。最近，我们正在开发一些在 Netflix 服务器上运行的异步框架，我认为我们的一些开发人员开始时的态度类似，即假定也许 80% 的异步问题通过一些辅助方法可以轻松解决。当时的想法是为较常见的并发模式提供一些简单的 API，这样初级开发人员就能够解决大部分异步问题。我们发现，简单的 API 只能解决约 10% 到 15% 的最终用户案例，而不是 80%。这是因为很容易出现直线下降，此时就有必要恢复为处理原语，如信号或事件订阅。

事实证明，即使是看似微不足道的异步问题实际上也相当复杂。例如，如果你正在发出远程请求，就始终会需要一些错误处理，例如重试。如果两个操作同时执行，你需要一种方法来为每个操作指定不同的错误处理策略。更重要的是，每个操作可能会由一些其他顺序操作和并发操作组成。在实际应用中，需要有组合系统才能表达如此丰富的语义。

我承认，一些简单的辅助 API 对开发测试可能会更有用，因为要求没有应用程序开发那么严格。Michael，也许你的观点是对的，可以将低级程序员和高级程序员相结合使用。不过，究竟该怎样结合还有待观察。

DONAT: 我完全同意。我认为这是个大问题。

COATTA: 有些不同的是，我的团队一直在开发用于异步环境的程序，有限状态机在这方面表现非常出色。我们发现，对于捕捉事件和转换之类的东西的相关信息，有限状态机是一种非常好的方法。你对使用状态机和围绕它打造的一些语言看法如何？状态机是否足够简单，QA 人员这样技术水平较低的开发人员能够有效地使用它们吗？

DONAT: 当然，我认为状态机能够足够好地描述数学运算。转

变实际上相当于一个刺激反应对。你可以将我们所谈论的描述成分层状态机。没错，这就是用于讨论这个的完美数学范式。但是你无法向低薪人员展示这点并期望他们能够用它做任何事情。你可以做的是，使用那些相同的数学运算创造驱动所有这些东西的工具和机器。不过，要论给 QA 人员的现成东西，任何东西都比不上他们已视为激励他们寻求的响应的东西。

HUSAIN: 我完全同意。的确，原语非常简单，每个人都能理解如何关联事件，设置变量，状态转变。然而在实践中，这些简单的原语并不意味着整个程序本身会简单。事实上，它会相当复杂，因为它有许多不同的活动部分。

JavaScript 开发人员开始追随的另一种异步编程方式是围绕一种叫做 Promises 的抽象设计的。常见的 JS 和 F# 中将要集成 Promises。它带来了一种异步类型，这种类型具有可组合性，同时可让你以无状态方式开发异步程序。这可能是你最终不得不接受的模型（以声明性无状态方式描述异步计算），因为这种抽象层次技术水平较低的开发人员也许能利用。

COATTA: 你可以举一个这样的例子吗？

HUSAIN: 最终结论是，有一种新的异步程序思维方式。从 GOTO 语句转向结构化程序提升了抽象层次。如今，我们开发带有回调和状态机的异步程序，而这些程序和基于 GOTO 语句的旧程序有一些相同的缺点：逻辑往往分割成许多不同的部分。我们可以采取和之前一样的方法（提高抽象层次）来解决这个问题。我们不用回调和状态机来开发异步程序，而是将其建模为数据序列。例如，事件可以视为数据序列（没有终点的序列）。鼠标移动事件没法说，“嘿，我完成了。”它只会永远延续。

值得注意的是，同步编程中已经有一种序列建模方式：我们所熟悉的迭代器就是一种由左到右遍历数据结构的同步方式，只需继续请求下一项，直到迭代器最终报告没有数据了。Erik Meijer 在微软的时候彻底研究了迭代器模式，最后发现了观察者模式。用数学术语来讲，观察者模式是迭代器模式的对偶。这是非常重要的统一，因为这意味着我们对迭代器所能做的也可以对事件侦听器之类的观察者做。

其意义在于，我们有一些用于操作数据结构的高级语言，这些数据结构可以表示为迭代器。最相关的例子是 SQL，我认为它是一种非常成功的高级语言，因为它允许开发人员创建易于理解、功能强大的复杂查询。发现观察者模式和迭代器模式是对偶后，Erik 成功建立了一个允许用类似 SQL 的语言创建异步程序的框架。

他认为，事件和数据的异步请求是集合，就像数组一样。唯一的区别是，异步集合随着时间的推移而到达。可以在内存中的集合上执行的大多数操作也可以在随时间推移而到达的集合上执行。因此，我们发现 C# 中原本用来编写数据同步序列的 DSL 也可以用来编写异步序列。这样就产生了一种开发异步程序的高级语言，它具有 SQL 的表达能力和可读性。

DONAT: 这是朝正确方向迈出的一步。我一定要进一步研究。

HUSAIN: 我们现在正在 Xbox 平台上使用这项技术。Michael，这似乎就是你所追求的。

COATTA: 你能描述一下 Erik Meijer 的 Reactive Extensions 工作在 QA 环境中如何运用？比如你有许多游戏主机需要通过某些序列来驱动，则可以验证你正在测试的游戏中是否发生了某些事情。Rx 从何处融入其中？在那种情况下你会

查询什么？怎样能够将其转换为测试结果？

HUSAIN: 这个问题问得好，因为有些人看不到查询数据库和创建测试之间的联系。测试本身实际上是一种查询：“在触发某个特定事件进而导致发生其他事件前，是这个流触发还是那个流触发？”这真的和查询表看某个条件是否真的没有区别。

COATTA: 我们仍然需要某种机制来通过不同的状态驱动系统。或许甚至可以用 Rx。在每个阶段，查询返回 true 或 false。如果返回 false，那么我们就知道测试没有通过，因为我们此前预期的事件序列与我们发出的查询不一致。

HUSAIN: 完全正确。但是，这可以分为两步。第一步是 Michael 提过的：转换系统，使之更可观察。总的来说，这只是添加一些事件，这些事件在发生有趣的事情时触发。第二步是对这些事件建立查询。这些查询会具有声明性（根本不会是状态机），因此在经过系统时，你可以确认符合某些条件。

COATTA: 听起来好像你正在产品中运用这种方式。这种经历是否已被证明是积极的？你是否发现，非专业人士可能可以用 Rx 语法或查询语法捕捉系统的相关信息？

HUSAIN: 到目前为止，我认为语法的帮助尚未达到预期。真正的挑战是跨越到将事件作为集合考虑。大多数人整个职业生涯都在很机械地考虑事件。虽然将事件作为集合考虑在概念上讲可能比较简单，在组织层面上实现转变却会很困难，这是因为不好的旧习惯如此难以打破。但我感觉，如果你能找到一些已经倾向于函数式编程的开发人员，那么当你给他们这些强大的新异步编程工具时，你就会体会到我们讨论的种种经济效益问题。 ▣

queue.acm.org 上的相关文章

Q Orchestrating an Automated Test Lab

Michael Donat

<http://queue.acm.org/detail.cfm?id=1046946>

Finding Usability Bugs with Automated Tests

Julian Harty

<http://queue.acm.org/detail.cfm?id=1925091>

Adopting DevOps Practices in Quality Assurance

James Roche

<http://queue.acm.org/detail.cfm?id=254098>

译文责任编辑：谢涛

© 2014 ACM 0001-0782/14/07 \$15.00

加州理工学院 (Caltech) CSN 项目从数千台个人设备上采集传感器数据来对危险地震做出实时响应。

作者: MATTHEW FAULKNER, ROBERT CLAYTON, THOMAS HEATON, K. MANI CHANDY, MONICA KOHLER, JULIAN BUNN, RICHARD GUY, ANNIE LIU, MICHAEL OLSON, MINGHEI CHENG, ANDREAS KRAUSE

社区感知和响应系统：拿手机当地震侦测器

数量激增的智能手机和其他配有传感器、功能强大的消费类设备开启了一类新的网络应用：社区感知和响应系统 (CSR)。其与常规的网络应用的不同之处在于，它们利用了属于社区的商业传感器硬件。CSR 系统从联网的用户设备中采集、分享并处理传感器数据，就像社交网络联系和分享人类书写的内容一样。本文中我们探讨了加州理工学院的社区地震网 (CSN)。



它是一个利用智能手机和消费类电子产品中的加速度计的 CSR 原型系统，除了系统之外，我们还讨论了在设计、构建以及评估用于实时感知危险地震的可伸缩网络时所面临的诸多算法挑战。

自 2012 年起，世界上每天激活的安卓和 iOS 设备数量约为两百万

» 重要见解

- 智能手机和消费类硬件中的传感器能让科学家以前所未有的广度和细节感知物理世界。
- CSR 与志愿者合作，理解像自然灾害那种甚至能严重影响整个城市的事件，并做出响应。
- 虽然 CSR 系统依赖大量 (可能不可靠的) 的消费类传感器，但它们必须提供快速可靠的响应。



台，其中每一台都带有多个传感器和高速互联网连接。最近，已经有若干感知项目寻求与这些设备和其他消费类设备的所有者合作，围绕可能影响千百万生命现象，对相关的传感器数据进行采集、分享和处理。与云计算平台结合后，这些网络可以实现传感器网络之前无法达到的广阔覆盖范围。⁶ Boulos 等人⁵ 的著作对社交和移动网络如何帮助人们利用从个人及其传感器设备上采集的众包数据做了精彩概述。其他社区和参与式感知的应用包括了解交通流量，^{4,14,16,20} 确定环境污染源、^{1,2} 监测公共卫生、¹⁸ 以及应对自然灾害（如飓风、洪灾和地震）^{8,9,11,15}。通过使用自愿参与的传感器，和采用低成本网络解决方案进行数据的采集和存储，这些系统成为

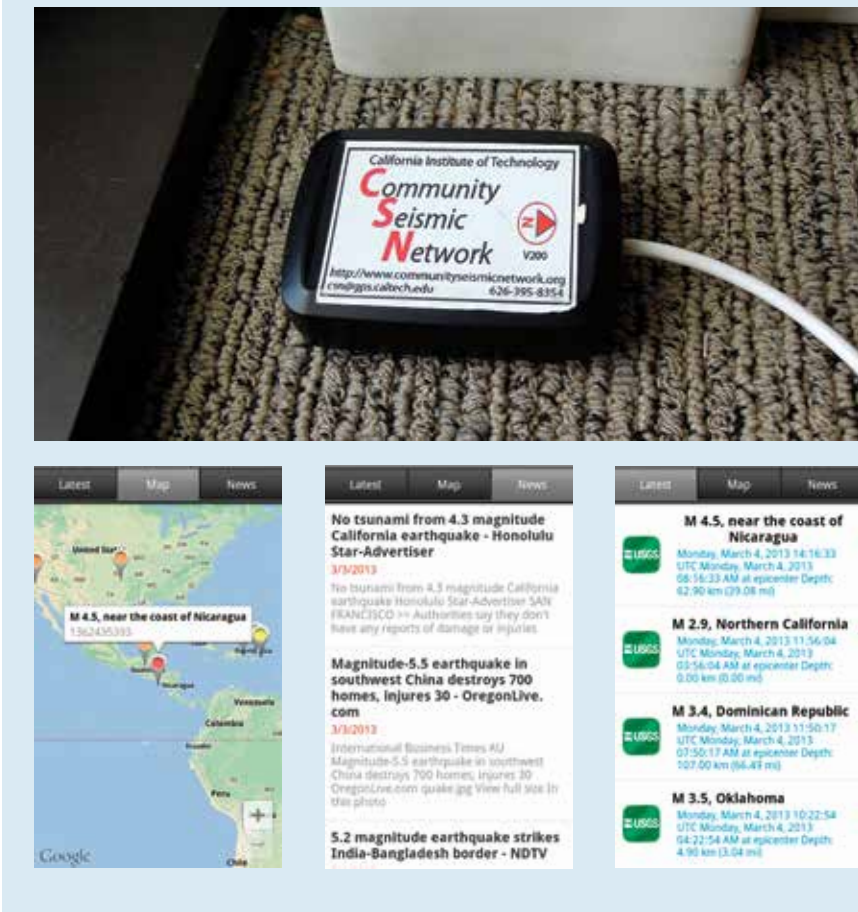
了可能。然而，随着各系统日益成熟，它们不会再局限于数据采集功能，而是会代表社区采取实时行动；例如，交通网络可在出现撞车时重新设置交通路线，而地震网络则可以自动减慢火车的行驶速度，防止脱轨。

从采集到处理

处理社区传感器的数据和处理标准的网络应用或科学传感器的数据存在本质区别。即使按大型网络应用的标准来衡量，原始数据的潜在数量也很大。社区传感器记录的数据通常还包括操作设备的人所产生的信号。不仅如此，与之前的科学方法相比，期望中的很多应用都需要在更细的尺度上理解物理现象。

CSR 网络能够产生数量庞大的原始数据。智能手机和其他消费类设备通常配有多个传感器，可以生成连续的 GPS 位置、加速度、旋转、音频和视频数据流。即使感兴趣的事件，如交通事故、地震或疾病暴发相当罕见，设备也需要连续不断地监测以侦测这些事件。除了像视频那种明显的重量级数据之外，即使快速监测单独一个加速度计或麦克风，一天也能产生数百兆字节的数据。社区感知能让由数万，甚至数百万设备组成的网络变成现实；例如，在出租车上装配 GPS 设备或空气质量传感器后，在像北京这样的大城市达到 50,000 个传感器的网络相当容易。在这种尺度下，即使采集汇总统计信息的小集也会令

图 1CSN 志愿者贡献自己的低成本加速度计（上）数据以及安卓智能手机中的 CSN 应用（下）数据。



人怯步；如果 50,000 个传感器每分钟报告一次简要的状态更新，消息的总量都能与 Twitter 网络的日均负载比肩。

另外，社区设备与常规科学和工业应用中的对应设备有所不同。社区传感器不仅不如“专业”的传感器精确，它们还可能是移动的，间歇性可用，并受个人用户的家庭或工作场所的特殊环境的影响；例如，智能手机中的加速度计能测量地震，也会测量用户的动作。

通过实现密集覆盖城市的传感器网络，社区传感器使得测量一系列重要现象（包括交通模式、污染和自然灾害）并采取相应行动成为可能。然而，由于当前缺少这些现象的细粒度数据，CSR 系统必须同时学习拟应对的各种现象；例如，为了估计罕见的较大地震的破坏情况，

社区地震网可能需要学习根据多发的较小规模地震构建的各种模型。

由于需要实时做出可靠的决策并保证性能，这类挑战变得更为复杂；例如，自然灾害发生后，使用实时的传感器数据可以帮助人们选择最佳的应急响应策略。不过，误报和数据失实的代价高昂。严格的性能估算和系统评估是自动在真实世界做出响应的前提条件。

加州理工学院的社区地震网络

加州理工学院 (<http://csn.caltech.edu/>) 开发的 CSN 项目旨在通过社区操作的传感器快速地侦测地震，并对其影响做出实时的估计。强震是能够威胁整个城市安全的极少数场景之一。CSN 基于下列设想构建：人们共享个人设备的加速度计数据，集体生成所需的信息用于

危险地震的实时和事后响应。为实现这种目的，它与 1,000 多名洛杉矶地区的志愿者以及世界其他城市的志愿者合作。那些志愿者贡献了他们的安卓智能手机和低成本 USB 传感器产生的实时加速度数据（见图 1）。

地震发生后，消防员、医疗队和其他第一急救者必须首先构建情境感知，然后才能有效地安排他们的资源。由于地下结构存在差异，相距仅一公里的两点可能会呈现截然不同的烈度和震害等级（见图 2）。与此类似，不同的建筑物可能会遭受不同的震害等级，因为它们承受的地震动类型不同。如果城市的通讯中断，可能需要多达一小时的时间才能得到第一幅利用直升机遇绘的全城震害全貌。幸运的是，由于传感器可以在破坏性的横波（S-wave）晃动前侦测出中等强度的纵波（P-wave）晃动，所以它有可能在通讯或电力网络被破坏前提交初期的地震测量数据。这些测量数据可在地震发生后立即为紧急救护人员提供对于烈度和震害的局部估计。

另一个耐人寻味的应用是强震预警。预警基于下列原则：靠近震源的加速度计可在离震源较远位置经历强震前侦测出最初的震动。虽然人们收到告警的时间长短由侦测的速度以及他们距震中的距离决定，但是日本、墨西哥和台湾的预警系统已经实现了几十秒到一分钟不等的告警时间。这些告警可为疏散电梯、停止列车或中止治疗程序提供所需的时间。自 1989 年加利福尼亚州北部发生 Loma Prieta 地震后，清理废墟的紧急救助人员让余震警告又前进了一步。

基于以下几点原因，社区参与是地震遥感的理想选择：首先，社区参与能让人们获得精确测量整个城市的地震烈度所需的密集分布的传感器；例如，按每平方公里一个

传感器的空间分辨率监测大洛杉矶地区便需要 10,000 多个传感器。在传统的地震检波器站点, 安装和运行一个传感器的费用需要数千美元, 但是只要居住在区域内的 0.5% 的人口自愿共享智能手机的数据, 就有可能获得相同数量的传感器。采用这种方式后, 社区传感器可以提供细粒度的空间覆盖, 以之作为对现有稀疏布置的高质量传感器网络的补充。

社区传感器还特别适于在紧急情况下向人们提供帮助。除了采集加速度计的数据之外, 智能手机上的社区感知软件能够报告家庭成员的最近已知位置, 或指出聚集的地点以获取应急团队的帮助; 换句话说, 社区感知应用为人们提供了一种新的途径来了解区域以及所关心的人群的最新情况。

CSN 让志愿者能轻松地通过已经在安卓手机上安装的低成本加速度计和传感器参与进来。免费的安卓应用 CrowdShake (<http://csn.caltech.edu/crowdshake>) 让自愿贡献数据变得如同安装新应用那样简单。CSN 还与洛杉矶地区的学校和社会团体合作, 派发了 3,000 台 Phidgets 公司 (<http://www.phidgets.com>) 生产的低成本加速度计, 这些加速度计可以通过 USB 接口连至 PC 主机、平板电脑或其他接入互联网的设备。Phidgets 传感器已经被安装在洛杉矶地区的几栋高层建筑上, 用以测量这些建筑在地震作用下的结构响应, 如图 1 所示。

可靠、实时地推断空间事件不仅是地震监测的核心任务, 也是对任何使用物理传感器的应用的典型挑战。本文中我们概述了 CSN 团队开发的方法, 利用数千台社区传感器快速侦测地震的方法; 该方法利用了社区设备的计算能力来消除社区操作的硬件中的噪声, 并说明即使在提供严格的性能保证的情况下, 设备本地的学习也能产生可伸缩和异质化的分散式架构。

分散式事件侦测

假设强震在靠近大都市的区域发生, 且区域内有 0.1% 的人口贡献了从个人持有的、接入互联网的的设备中产生的加速度计数据。在洛杉矶县, 岩石和沉积物与断层线交错的海岸盆地同产生振动的高速公路部分重叠在一起。这意味着要从散布在这个地区的 10,000 个充满噪音的传感器处获取数据。传感器网络如何才能尽可能快地侦测地震, 并估算出地震的位置和震级? “经典”的方法是, 采集并集中所有的数据, 如果下列似然比检验为真, 则宣布事件发生:

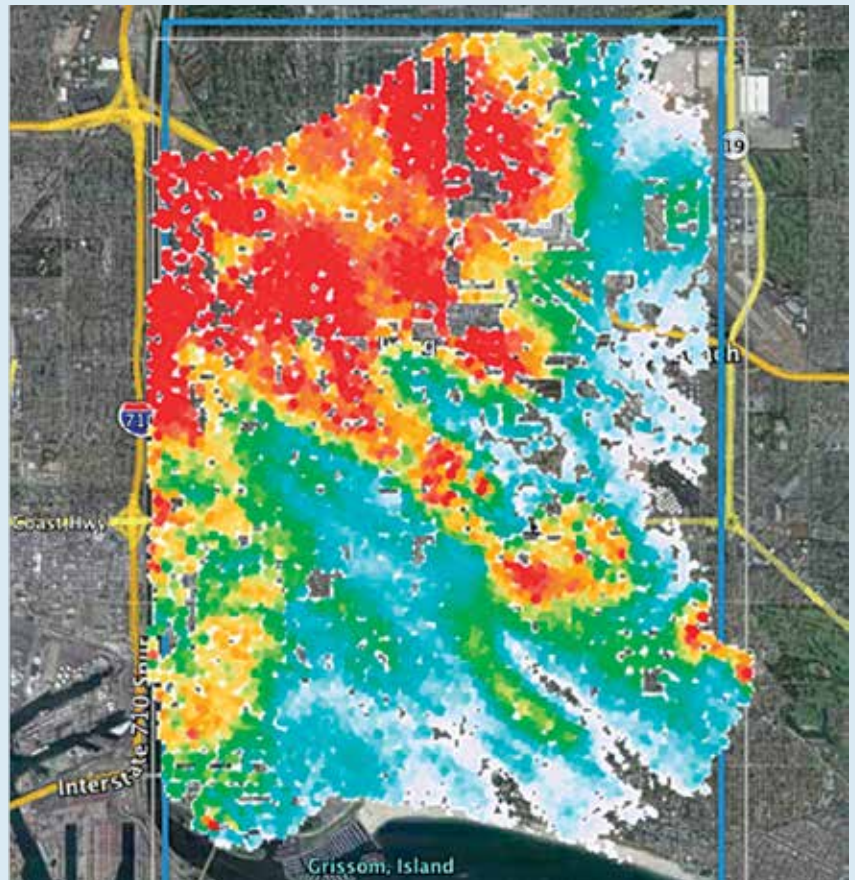
$$\frac{P(\text{所有测量值} | \text{地震})}{P(\text{所有测量值} | \text{地震})} > \tau \quad (1)$$

如果比例超过预定的阈值, 则该检验会宣布侦测到了事件。

显然, 这需要传输天量的数据; 由一百万台手机组成的全球网络每天会传输 30TB 的加速度数据。另外, 似然比检验需要所有传感器数据的分布, 这些数据以强震是否发生为条件。每个社区传感器都是独一无二的, 所以为这些分布建模也就需要为每个单独的传感器建模。

更自然的方法需要采用分散式的结构。假设每台设备只传输其当前数据的有限概要信息, 或者说“触发信息”。中心服务器再次执行假设检验, 但是这次用的是接收到的触发消息, 而不是整个原始数据。分散式假设检验理论的结果说明, 如果传感器的测量值是独立的, 由事件是否已经发生决定, 且每种情况下测量值的概率已知, 那么渐近最优策略为执行分层假设检验;²¹

图 2 土壤条件和地下构造的差异会引起地面震动出现显著区别; 加州长滩 (Long Beach) 网络记录的数据



每个传感器单独执行假设检验，对于某个阈值 τ ，只有在满足下列条件时才触发

$$\frac{P(\text{传感器的测量值} | \text{发生地震})}{P(\text{传感器的测量值} | \text{未发生地震})} > \tau \quad (2)$$

与此类似，云服务器基于给定时间收到的触发数量 S 执行假设检验。如果下列条件满足，则宣布侦测到了事件。

$$\frac{\text{Bin}(S; \tau_T, N)}{\text{Bin}(S; \tau_F, N)} > \tau' \quad (3)$$

参数 τ_T 和 τ_F 为单一传感器的真正 (true positive) 和假正 (false positive) 触发率， $\text{Bin}(\cdot, p, N)$ 为二项分布的概率质量函数。判定规则 (2) 和 (3) 为妥善选择阈值 τ 和 τ' 时使用的渐近最优。²¹ 此外，采集触发数据而不是原始数据有助于保持用户隐私。

不过，使用社区传感器侦测罕见事件向这种经典的分散式侦测方法提出了三大挑战：

似然比检验在为事件发生时的传感器行为准确建模时，如果很难获取所需的数据（如罕见大地震的测量值），那么如何依据每个传感器的数据执行似然比检验？

为每个传感器建模如何为每个传感器建模？服务侧的建模很难实现伸缩，而设备本地的学习又涉及计算和存储限制；以及

空间依赖性如何推翻传感器彼此独立的条件（强）假设，纳入空间依赖性？

接下来，我们会探讨如何利用大量的正常数据来侦测罕见事件，因为罕见事件的训练数据有限；然后，我们会论及计算几何学的新工具，它使得在资源受限的设备上计算所需的概率模型成为可能；最后，我们探讨了服务侧的学习，它可根据空间依赖性改变数据聚合。

利用“正常”数据 (2) 中传感器级的假设检验需要两种条件概率分布：分子利用了强震时特定设备的加速度来建模；不过，因为大地震极少

发生，获取数据不现实。与此相反，分母可利用大量可用的“正常”数据估算得出。还能可靠地侦测地震吗？

最后证明，中等程度的假设，即只使用无地震时加速度时间序列的概率来进行异常侦测的简单方法也可以取得相同的渐近最优性能。在下列条件满足时，触发给定的传感器：

$$P(\text{传感器的测量值} | \text{未发生地震}) < \tau \quad (4)$$

妥善选择阈值后，我们发现该技术能够产生与完整的假设检验相同的触发范围，但在未来未知地震发生时该技术不需要传感器数据的模型；详细情况参见 Faulkner 等人的著作。¹¹

这种异常侦测方案利用了大量的“正常”数据，但是仍然需要面对计算条件分布这一挑战。从理论来说，每个传感器可以保存其历史观测记录，定期估算描述这些数据的概率模型。在移动设备上，这意味着每月记录约 3GB 的加速度数据日志。对于志愿者的智能手机资源来说，存储数量如此庞大的数据并进行估算是一种负担。如果（大大）减少存储空间，还能为传感器数据准确建模吗？

CSN 系统基于在短时窗内获取的加速度统计数据的特征向量，采用高斯混合模型 (GMM) 为加速度计数据建模，就像语音识别中的音位情况一样。GMM 属于多峰分布族中灵活的一员，可以通过使用简单的 EM 算法从数据中估算得出。³ 与单独的高斯不同，学习最优的 GMM 需要访问所有的数据，而单独的高斯可通过数据的均值和方差确定；GMM 也不支持有限充分的统计量。因此，设备必须保存传感器的整个历史记录，这样才能生成最优的 GMM。幸运的是，最后发现在逼近 GMM 时，情况截然不同；这种逼近可以适于任意数量的数据，达到任意程度的近似保证，使用有限的存储空间。

计算几何学中的“核心集 (coreset)”工具可以实现这种近似。一个算法的核心集大概为输入数据的（加权）子集，这样就能让使用核心集运行的算法在常数范围内逼近使用全部输入数据运行的算法。核心集被用于求解多种几何问题的近似值，包括 k -均值和 k -中位数聚类。

最后发现，几何中的很多核心集技术也可用于统计学问题的近似值求解。给定输入数据集 D ，面临的问题是找出 GMM 的均值和方差的最大似然估计。我们将它们统称为 θ 。对于由 k 个高斯分布组成的混合高斯模型而言，如果 $L(C|\theta)$ 的对数似然值有很大的概率是全数据 $L(X|\theta)$ 对数似然值的 ϵ 近似，则加权集 C 为用于 GMM 的 (κ, ϵ) 核心集：

$$(1-\epsilon)L(D|\theta) \leq L(C|\theta) \leq L(D|\theta)(1+\epsilon).$$

Feldman 等人¹² 阐明，对于给定的输入 D ，有可能抽取大小与输入 D 大小无关的核心集 C ，或者，核心集的大小与输入的规模、高斯的数量 k 以及参数 ϵ, δ 存在多项式的依赖关系，其中对于由 κ 个高斯分布组成的所有（非退化）混合高斯模型 θ 而言，概率至少为 $1-\delta$ 。这个结果表明，与从大小任意的整个集合 D 中学习得出的模型相比，从固定大小的核心集 C 中学习得出的混合模型可以获得近似相同的似然值。

但是，从哪儿可以获得 C 呢？Feldman 等人的著作¹² 阐明了一个用于计算投影聚类问题核心集（比如 k -均值和泛化）的有效算法，它可用于为 GMM 提供核心集。其中的关键见解是，在均匀二次抽样时，输入可能会错过“重要”的数据区，而自适应抽样方法则有可能通过在“足够的”区域内抽样来可靠地估计 k 个高斯的混合模型；为

样本加权则可用于纠正抽样偏差。Har-Peled 和 Mazumdar¹³ 发现, 用于许多最优化问题的核心集可以通过并行或流模型有效地计算出来, 本文应用了其中的若干结果。特别是输入数据流可以缓冲到固定大小的存储区, 然后再压缩到核心集。目前, 利用在所有参数中存在的空间和更新时间的多项式以及 n 的对数后, 仔细的合并和压缩这些核心集可提供整个流的近似值。

社区网络中的地震侦测需要从大量充满噪声的传感器测量值中找出复杂的时空模式。地震开始时可能只会影响一小部分网络, 所以事件可能会隐藏在单传感器测量值和全网统计数据之中。最新的高密度地震研究发现 (见图 2), 地下结构的局部差异可能会严重影响距离仅一公里的不同位置的烈度等级。因此, 有效的地震侦测需要一种能够对传感器数据间的精细依赖性进行学习, 并且能从相关的传感器组中侦测变化的算法。

我们前面概述的经典方法假设传感器提供了独立的、完全相同的分散测量值, 其以事件是否发生作为条件。在这种情况下, 如果足够多的传感器报告触发, 不管各传感器所在位置如何, 系统都将宣布事件已经发生。然而, 在很多实际应用中, 传感器的特殊空间布置会影响结果, 并且也不符合独立性假设。如何利用对事件本质的 (定性) 认知改进侦测性能?

事件 (如地震、火灾或传染病) 开始时, 可能只有一小部分靠近事件或对其影响最敏感的传感器组能首先观测到。把它看成是通过充满噪声的信道对向量 $x \in \mathbb{R}^p$ 进行传递, 此信号多数情况下为零 (稀疏), 但是由于噪声的原因, 在收到的向量 y (触发) 中, 有很多位被翻转了。凭直觉而言, 这些小组观测到的信号会被淹没在环境噪声中, 除非系统了解这些传感器之间的依赖

如何利用对事件本质的 (定性) 认知改进侦测性能?

关系。这种直觉 (以及一些期望的解析属性) 可以通过学习正交基底变换矩阵来捕获。该矩阵把服务器接收到的触发投射到坐标系统中, 通过坐标系统大致聚合强相关的传感器小组。给定该类矩阵 B , 其中各列为 b_1, \dots, b_p , 当下列条件满足时, 服务器宣布事件发生:

$$\max_i b_i^T y > \tau$$

为了在信号微弱时获取可靠的侦测结果 (通过 λ_0 伪范数, $\|x\|_0 < \sqrt{p}$ 度量), 传统的假设检验要求在传感器数量 p 增大时, 各传感器的错误率下降 (x 的各元素)。这种要求与传感器越多越好的直觉形成了鲜明的对比, 而且也不符合社区感知使用的 “数量多, 有噪声” 的方法。不过, Faulkner 等人¹⁰ 发现, 如果矩阵 B 稀疏化, 或者 $\|B^T x\|_0 = p^\beta, \|x\|_0 < p^\alpha, 0 < \beta < \alpha < \frac{1}{2}$, 那么对于任何比率的触发错误 $\max_i b_i^T y > \tau, r_{\perp} < \frac{1}{2}$, 检验漏报和误报警告的概率是 “稀疏化比” $P_{\perp} p^0 \Rightarrow B^T \mathbf{0}$ 的函数, 其会呈指数衰减至 0。有效地是, 基底变换允许利用大量充满噪声的传感器来可靠地侦测只有小部分传感器 ($\|x\|_0$) 观测到的信号。

学习稀疏化这些结果取决于 B 聚集弱信号的能力。

学习 B 的直接方法为优化

$$\min_B \|B^T X\|_0 \text{ 限制条件: } BB^T = I \quad (5)$$

其中 X 为矩阵, 矩阵的列是用二进制开示的每个传感器侦测到的事件, 作为, 而 $BB^T = I$ 则为矩阵中非零元素的和。这一约束能确保 B 保持正交。计算等式 (5) 可能不切实际, 对数据中的噪声或异常值敏感也不可行。因此, 找出稀疏地表示 “大多数” 观测值的基可能更为实际。从更形式化的角度来说, 设 Z 为可看成是无噪声信号的变换域 X 中 “原因” 的潜矩阵, 或设 $X = BZ$ 。 Z 应该是稀疏的, 且 BZ 应该

图 3CSN 云把持久化的网络状态存入数据存储中，通过 Memcache 实时处理触发数据，并生成通知和地震统计信息。

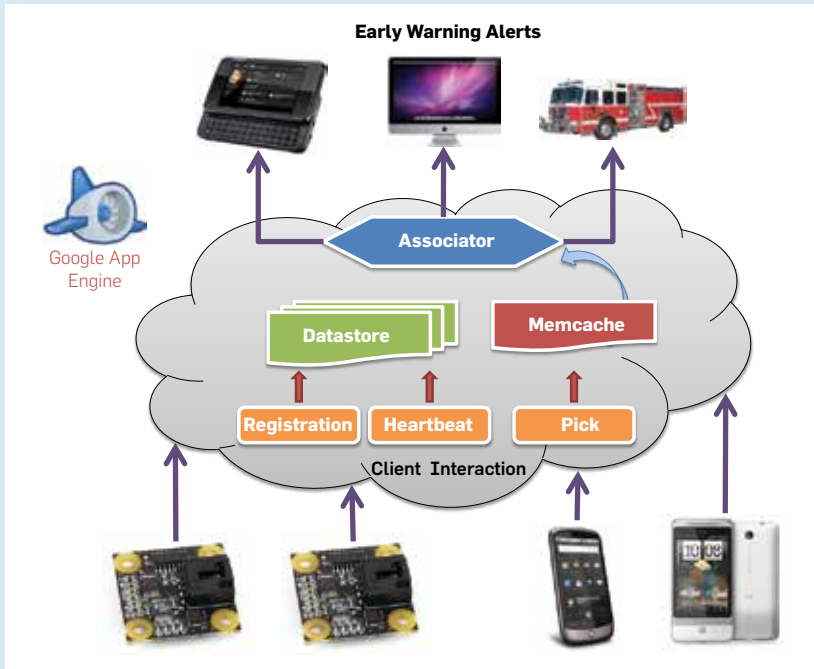


图 4CrowdShake 应用在安卓手机或平板上本地处理传感器数据，发送因可能发生的地震而产生的触发消息，接受告警，并响应数据请求。



接近观测信号 Y 。这些条件说明，下一个最优解（作为等式 (5) 的启发式方法，最初引入时用于文本模型⁷⁾ 为

$$\min_{BZ} \|Y - BZ\|_F^2 + \lambda \|Z\|_1 \quad \text{限制条件:} \quad (6)$$

$$BB^T = I$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的弗罗贝尼乌斯范数， $\lambda > 0$ 为自由参数。等式 (6) 利用稀疏度 Z 基本平衡了 Y 和 X 之间

的差异；更为显著地增大 λ 将会对非稀疏的 Z 的选择做出惩罚。为了保证计算效率，我们用启发式的，“提高-稀疏度”的凸 l_1 -范数替代了 l_0 -范数。

虽然等式 (6) 是非凸的，但是把 B 或 Z 固定后，对于其他凸而言，它成了目标函数。然后，该目标可以通过迭代式的两步骤凸优化过程有效求解（求出局部最小值）。

构建 CSN

从可伸缩性和数据安全的角度来说，管理 CSR 并实时处理其数据是一个难题。云计算平台（如亚马逊的 EC2、Heroku 和谷歌应用引擎）提供了实际可行的、成本效益高的资源来可靠地实现网络应用的伸缩。CSN 网络搭建在谷歌应用引擎之上（见图 3）异质化的传感器包括手机、独立的传感器、通过计算机主机上的 USB 接口接入云的加速度计；云执行事件侦测，就可能发生的地震事件发出通知。另外，云基础设施允许位于世界任何地方的传感器接入，只需要指定 URL。

CSN 网络包括两种传感器客户端：带 USB 加速度计的桌面客户端，手机和平板上的安卓应用，见图 1。图 4 勾勒了云和安卓客户端之间的内部数据流和消息传递模式；而桌面客户端的主要差异在于，它们的触发算法不同，且没有配置 GPS（见图 5）。应用的核心是传感器套件，包括三轴加速度计和 GPS。安卓客户端不停地检验加速度计数据以发现异常（报告为触发），并把原始数据临时记录在本地数据库中，以便进行事后数据采集。客户端侦听服务器推送的通知；通知推送采用谷歌的云消息服务实现。

云计算服务非常适于 CSR 系统的网络维护和实时响应任务。图 3 概述了云之间的主要数据流：首先，CSN 通过谷歌应用引擎的高效复制数据存储（high replication datastore）把客户端的注册信息和心跳消息写入多个数据中心。然后，输入的触发信息将按地理哈希从空间上聚合在 memcache 中。memcache 是一种分布式内存数据高速缓存。虽然 memcache 无法持久化（由于内存的限制，对象会从高速缓存中弹出），但是它比数据存储快得多。Memcache 也是需要执行快速计算时的理想选择；而且，因为它支持设置值的失效时间，所以它也非常适于存储一段时间后失效的数据。最后，CSN 云根据聚合后的触发进行事件侦测。在谷歌应用引擎上实现该架构存在以下优点：

动态伸缩输入请求自动通过负载均衡机制在实例之间分配，且实例的创建和销毁以当前的需求水平为基础。这种设置可以简化算法的开发工作，降低空闲时的成本。

鲁棒的数据数据存储的写入会自动复制到位于不同地理位置的数据中心。对于任何应用而言，复制是更谨慎的做法；对灾难响应系统而言，这点特别重要；以及

部署容易在谷歌应用引擎上部署应用相当直接，因为不需要针对每个单独的服务器实例进行配置和协同。另外，由于使用的前端与支持谷歌搜索平台的前端相同，对世界任何地理位置来说，谷歌应用引擎中的应用都有望获得低延时。这种可伸缩性可以让网络随时纳入新城市或新国家的志愿者。

实验评价

评价 CSR 系统时，需要同时考虑硬件和算法。就 CSN 而言，这意味着确定社区硬件是否能够侦测强震，根据他们的能力评价侦测算法是否能侦测出无法建模或无法预测的未来的地震，并验证在移动设备和云平台上实现该系统的可行性（见图 6）。

CSN 团队评价了社区硬件，发现低成本的 MEMS 加速度计能够测量地震动。在采用名为“振动台”的大型执行器的试验中，我们让传感器接触了我们准确重现的中等大

小的（震级 4.5-5.5）历史地震。该振动台证明，USB 传感器和低质量的手机加速度计均能侦测初期的较小晃动（纵波 P-wave）和第二次较强的晃动（横波 S-wave），只要这些晃动呈现出地震的特性签名（见图 7）。CSN 网络观测到的实际地震的测量值佐证了这些实验室中的试验；图 5 说明了类似的签名，其中涉及 3.6 级地震的测量值的子集。第二个试验评估了社区传感器是否能够侦

测由地震引起的建筑物运动的变化。CSN 团队利用在屋顶上放置大型的偏心重块让加州理工学院校园中 10 层高的 Millikan 图书馆产生了振动。CSN 传感器测量到了建筑物的共振频率（约 1.7Hz），确认了低成本的传感器能够实现对建筑物的监测。

本文中，我们评估了在无训练数据的情况下社区传感器侦测未来地震的能力。虽然地震极少发生，但社区传感器采集的数据可能相当

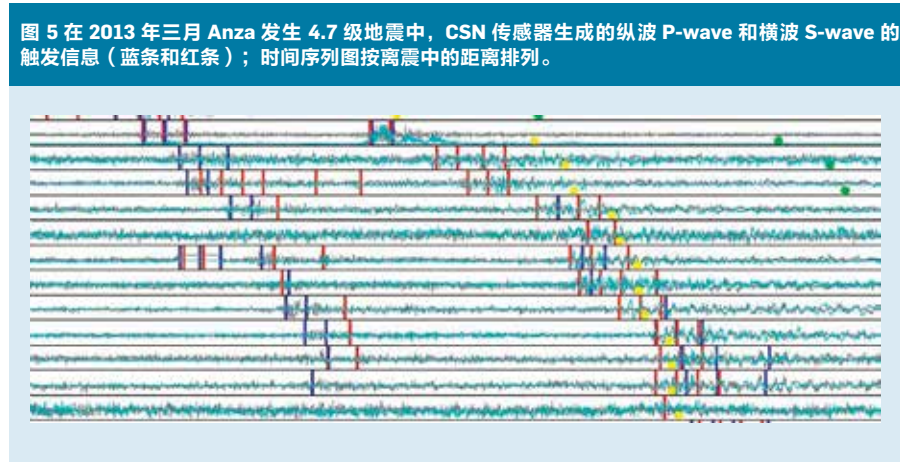


图 5 在 2013 年三月 Anza 发生 4.7 级地震中，CSN 传感器生成的纵波 P-wave 和横波 S-wave 的触发信息（蓝条和红条）；时间序列图按离震中的距离排列。

图 6 偏心重块晃动 Millikan 图书馆，说明 CSN 硬件对建筑物的共振频率敏感。

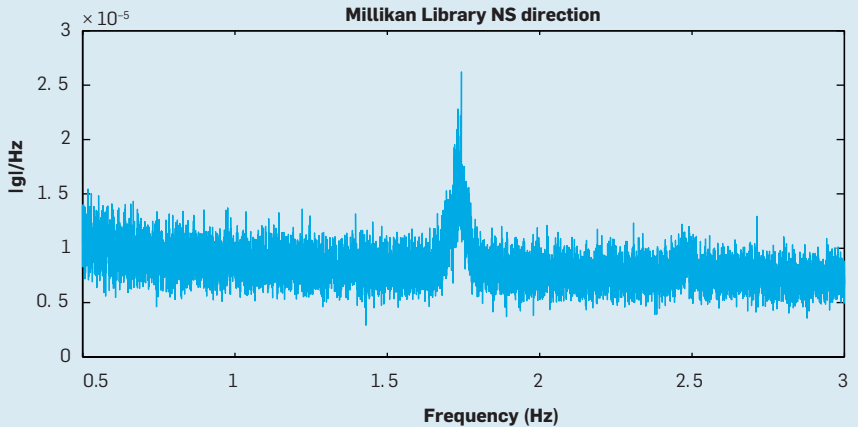
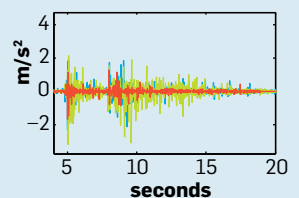
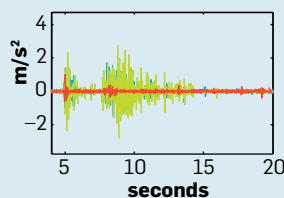
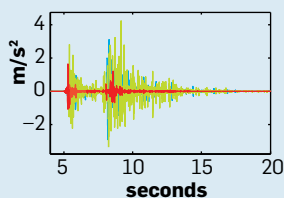


图 7 在振动台试验中，安卓加速度计准确记录了强晃动：（a）振动台的试验装置；（b）真实数据；（c）安卓手机；以及（d）背包中的安卓手机。



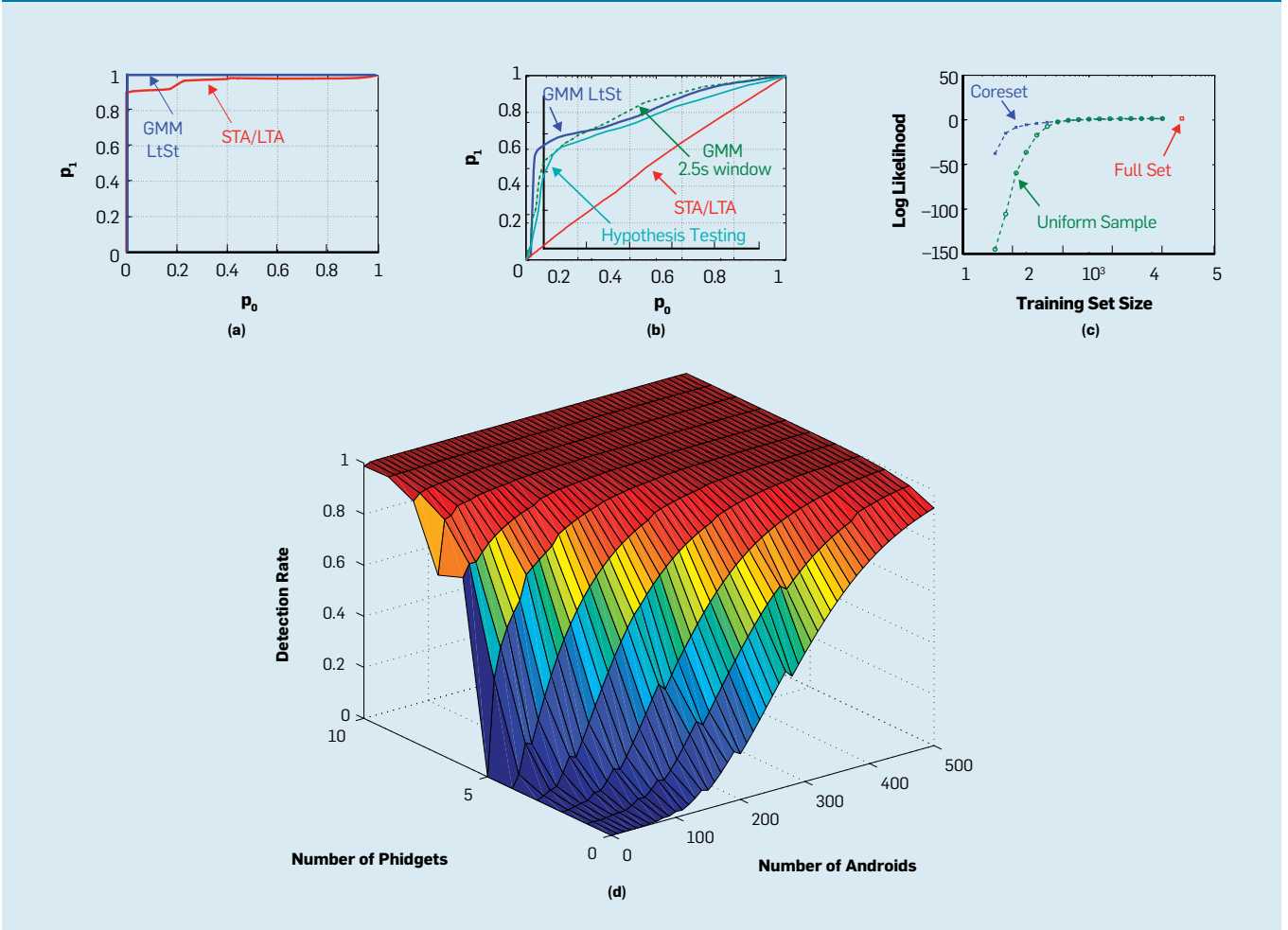
(a)

(b)

(c)

(d)

图 8 可达到的真正 (true positive) 和假正 (false positive) 触发率: (a) USB 加速度计和 (b) 安卓手机的加速度计; (c) 使用加速度计数据的核心集产生准确的加速度模型时, 需要的存储空间更少; 以及 (d) 在给定区域内混合使用 USB 和手机传感器时, 估算出的地震侦测率。



丰富。为了刻画“正常的” (背景) 数据, 加州理工学院的几个学生和教职工志愿者在他们的日常活动中带上了安卓手机, 采集了 7GB 多的手机加速度计数据; 20 台桌面 USB 加速度计记录了 55GB 的加速度数据。根据这些数据, CSN 团队估算出了每个传感器类型的正常操作行

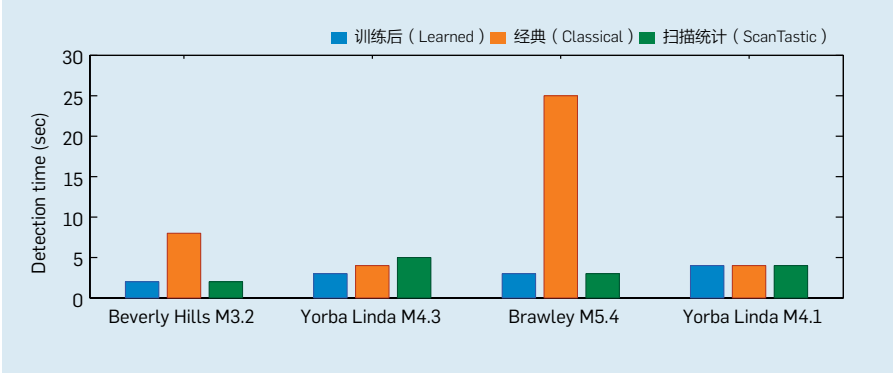
为的模型, 并利用 32 次中等大小 (5-5.5 级) 事件的历史记录 (在南加州地震网 <http://www.scsn.org> 中记录) 评估了它们的异常侦测性能。单独的传感器能够以接受者操作特性曲线的形式向云服务器发出“事件”或“无事件”的信号, 它们的异常侦测性能超过了数个标准的基

线 (见图 8)。图中纵轴为单个传感器可达到的侦测 (触发) 率, 而横轴则代表允许的误差侦测 (触发) 率。

核心集提供了在智能手机上学习加速度计数据的 GMM 的有效方法; 如果训练集的大小固定, 那么与对可用数据的均匀二次抽样相比, 核心集能够生成更加精确的模型。结合 USB 和安卓传感器的准确度结果后, 图 8d 勾勒了如果使用混合的传感器类型进行侦测, 把误报限制在每年一次时的权衡情况。这些结果说明, 约 50 台手机或 10 台 Phidget 足以侦测附近的 5 级或 5 级以上的地震, 其侦测率接近 100%。

虽然地震本质上是无法预测的, 但仿真可以让人们定性把握传感器之间的空间依赖性, 再用它来训练侦测器。使用根据美国地质调查局

图 9 针对 2012 年 CSN 记录的四次在洛杉矶地区发生的地震, 训练后的“稀疏化”模型比标准的空间事件侦测算法性能更好, 侦测的速度更快。



数据库中记录的历史地震 (<http://www.data.scec.org>) 构建的先验分布后, 我们的社区传感器模拟器 (与 Liu 等人¹⁷ 开发的模拟器类似) 模拟了在 1,000 次模拟地震中 128 个 CSN 传感器的触发情况。这些触发情况被用来作为稀疏化基、全网范围的假设检验和空间扫描的统计数据的训练数据。我们使用网络记录的实际测量值, 按算法侦测四个最新事件的能力评估了每个算法 (见图 9); 就每个事件而言, 垂直条说明了训练后的基, 经典假设检验和竞争性扫描统计算法的侦测时间。总体来说, 通过简单的模拟训练得出的基能实现更快的侦测 (在侦测 9 月 3 日美国加利福尼亚州比华利山 (Beverly Hills) 2102 号发生的 3.2 级事件时, 较竞争性算法快八秒)。

结语

我们概述了在使用大量低成本社区传感器促进罕见和复杂空间信号侦测时采用的几种算法原理和系统原理。在分散式架构的每个阶段使用机器学习后, 我们可以有效地利用传感器层面和云层面的资源; 当对特定的社区传感器知之甚少, 或对感兴趣的事件知之甚少时, 这种方法对保证性能非常重要。社区感知可应用于多种不同的应用领域 (包括火灾、洪灾、辐射、传染病和交通事故), 也能用于监测污染、行人交通和城市环境中的噪音水平。在所有的场景中, “响应”的范围很宽, 既可以是采取物理行动, 也可以是仅仅为感兴趣的事件分配更多的资源。虽然 CSN 项目受侦测和应对强震这一公共需求的驱动, 但这些领域和其他领域的 CSR 系统都需要相似的用于机器学习和可伸缩系统的蓝图。

鸣谢

我们在此感谢戈登与贝蒂·摩尔基金会 (Gordon and Betty Moore Foundation), 美国国家科学

基金会 (资助号 CNS0932392、IIS0953413) 以及欧洲研究委员会 (启动经费号 307036)。Andreas Krause 的部分资助来源于微软研究院教职经费 (Microsoft Research Faculty Fellowship)。我们还要感谢 Signal Hill Petroleum 和 Nodal Seismic 提供了长滩网络 (Long Beach Network) 的数据, 同时感谢南加州地震网 (Southern California Seismic Network) 提供了从南加州的永久性地震网络中获取的数据。□

参考资料

1. Aberer, K., Sathe, S., Chakraborty, D., Martinoli, A., Barrenetxea, G., Faltings, B., and Thiele, L. Opensense: Open community driven sensing of environment. In *Proceedings of the ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming* (San Jose, CA, Nov. 2–5). ACM Press, New York, 2010, 39–42.
2. Aoki, P.M., Honicky, R.J., Mainwaring, A., Myers, C., Paulos, E., Subramanian, S., and Woodruff, A. A vehicle for research: Using street sweepers to explore the landscape of environmental community action. In *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems* (Boston, Apr. 4–9). ACM Press, New York, 2009, 375–384.
3. J. Bilmes. *A Gentle Tutorial on the EM Algorithm Including Gaussian Mixtures and Baum-Welch*. International Computer Science Institute Technical Report TR-97-021, May 1997.
4. Borokhov, P., Blandin, S., Samaranyake, S., Goldschmidt, O., and Bayen, A. An adaptive routing system for location-aware mobile devices on the road network. In *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (Washington, D.C., Oct. 5–7). IEEE Computer Society Press, New York, 2011, 1839–1845.
5. Boulos, M.N.K., Resch, B., Crowley, D.N., Breslin, J.G., Sohn, G., Burtner, R., Pike, W.A., Jezierski, E., and Chuang, K.-Y.S. Crowdsourcing, citizen sensing and sensor Web technologies for public and environmental health surveillance and crisis management: Trends, OGC standards, and application examples. *International Journal of Health Geographics* 10, 1 (2011).
6. Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S., and Srivastava, M.B. Participatory sensing. In the Workshop on World Sensor Web Workshop (Boulder, CO, Oct. 31–Nov. 3, 2006), 1–5.
7. Chen, X., Qi, Y., Bai, B., Lin, Q., and Carbonell, J.G. Sparse latent semantic analysis. In *Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining* (Mesa, AZ, Apr. 28–30). SIAM, Philadelphia, 2011, 474–485.
8. Cochran, E.S., Lawrence, J.F., Christensen, C., and Jakka, R.S. The Quake-Catcher Network: Citizen science expanding seismic horizons. *Seismological Research Letters* 80, 1 (2009), 26–30.
9. Ervasti, M., Dashti, S., Reilly, J., Bray, J.D., Bayen, A., and Glaser, S. iShake: Mobile phones as seismic sensors, user study findings. In *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* (Beijing, Dec. 7–9). ACM Press, New York, 2011, 43–52.
10. Faulkner, M., Liu, A., and Krause, A. A fresh perspective: Learning to sparsify for detection in massive noisy sensor networks. In *Proceedings of the 12th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (Philadelphia, Apr. 8–11). ACM Press, New York, 2013, 7–18.
11. Faulkner, M., Olson, M., Chandy, R., Krause, J., Chandy, K.M., and Krause, A. The next big one: Detecting earthquakes and other rare events from community-based sensors. In *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (Chicago, Apr. 12–14). ACM Press, New York, 2011, 13–24.
12. Feldman, D., Faulkner, M., and Krause, A. Scalable training of mixture models via coresets. In *Proceedings of the Neural Information Processing Systems Annual Conference* (Granada, Spain, Dec. 12–14, 2011).
13. Har-Peled, S. and Mazumdar, S. On coresets for

k-means and *k*-median clustering. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on Theory of Computing* (Chicago, June 13–15). ACM Press, New York, 2004, 291–300.

14. Hoh, B., Gruteser, M., Herring, R., Ban, J., Work, D., Herrera, J.C., Bayen, A.M., Annavaram, M., and Jacobson, Q. Virtual trip lines for distributed privacy-preserving traffic monitoring. In *Proceedings of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services* (Breckenridge, CO, June 17–20, 2008), 17–20.
15. Kapoor, A., Eagle, N., and Horvitz, E. People, quakes, and communications: Inferences from call dynamics about a seismic event and its influences on a population. In *Proceedings of AAAI Symposium on Artificial Intelligence for Development* (Atlanta, July 11–15). AAAI, Palo Alto, CA, 2010, 51–56.
16. Krause, A., Horvitz, E., Kansal, A., and Zhao, F. Toward community sensing. In *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (St. Louis, MO, Apr. 22–24). IEEE Computer Society Press, Washington, D.C., 2008, 481–492.
17. Liu, A., Olson, M., Bunn, J., and Chandy, K.M. Towards a discipline of geospatial distributed event-based systems. In *Proceedings of the Sixth ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems* (Berlin, July 16–20). ACM Press, New York, 2012, 95–106.
18. Mun, M., Reddy, S., Shilton, K., Yau, N., Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Howard, E., West, R., and Boda, P. Peir: The personal environmental impact report as a platform for participatory sensing systems research. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services* (Kraków, Poland, June 22–25). ACM Press, New York, 2009, 55–68.
19. Neill, D.B. Fast subset scan for spatial pattern detection. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 74 (2012), 337–360.
20. Thiagarajan, A., Ravindranath, L., LaCurtis, K., Madden, S., Batakrisnan, H., Toledo, S., and Eriksson, J. VTrack: Accurate, energy-aware road traffic delay estimation using mobile phones. In *Proceedings of the Seventh ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (Berkeley, CA, Nov. 4–6). ACM Press, New York, 2009, 85–98.
21. Tsitsiklis, J.N. Decentralized detection by a large number of sensors. *Mathematics of Control, Signals, and Systems* 1, 2 (1988), 167–182.

Matthew Faulkner (mfaultk@caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院计算机科学专业的在读博士。

Robert Clayton (clay@gps.caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院地球物理学教授。

Thomas Heaton (heaton@gps.caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院地球物理学和土木工程教授。

K. Mani Chandy (mani@cs.caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院计算机科学教授。

Monica Kohler (kohler@caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院机械和土木工程专业高级研究员。

Julian Bunn (julian.bunn@caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院高级计算研究中心的首席计算科学家。

Richard Guy (rguy@gps.caltech.edu) 是美国加利福尼亚州帕萨迪纳加州理工学院社区地震网 (Community Seismic Network) 的项目经理。

Annie Liu (aliu@cms.caltech.edu) 是美国加利福尼亚州门洛帕克 (Menlo Park) 脸谱网 (Facebook) 的软件工程师; 她在本文中的研究是她是在加州理工学院攻读计算机科学博士的一部分。

Michael Olson (molson@cs.caltech.edu) 是美国加利福尼亚州山景城 (Mountain View) 谷歌公司的软件工程师; 他在本文中的研究是他是在加州理工学院攻读计算机科学博士的一部分。

MingHei Cheng (mmhcheng@caltech.edu) 在本文中的研究是他是在加州理工学院攻读机械和土木工程博士的一部分。

Andreas Krause (krausea@ethz.ch) 是瑞士苏黎世市苏黎世联邦理工学院计算机科学的助理教授。

译文责任编辑: 田丰

© 2014 ACM 0001-0782/14/07 \$15.00

探索在挖掘大数据潜力时面临的内在技术挑战

作者: H.V. JAGADISH, JOHANNES GEHRKE,
ALEXANDROS LABRINIDIS, YANNIS PAPAKONSTANTINOY,
JIGNESH M. PATEL, RAGHU RAMAKRISHNAN,
CYRUS SHAHABI

大数据及其技术挑战

在广阔的应用领域中,数据正在以前所未有的规模增长。以前,决策基于猜测或人工构建的模型,费时费力;现在,人们使用数据驱动的数学模型做出决策。此类大数据分析现在几乎驱动了社会各领域的进步,包括移动服务、零售、制造、金融服务、生命科学和物理学领域。

举例来说,科学研究因为大数据已经发生了根本变革。^{1,12} 斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey)²³ 已经变革了天文学;之前天文学家的大部分工作是拍摄天空的图片;现在天文学家的工作是从数据库中找出感兴趣的对象和现象,因为照片已经存放在数据库中。在生物科学领域,把科学数据存放入公共的存储库现已成为一种约定俗成的习俗。该习俗也包括创建公共数据库供其他科学家使用。不仅如此,随着技术日益进步,特别是在下一代测序 (NGS) 出现后,可用的试验数据集的规模和数量均呈指数级增长。¹³

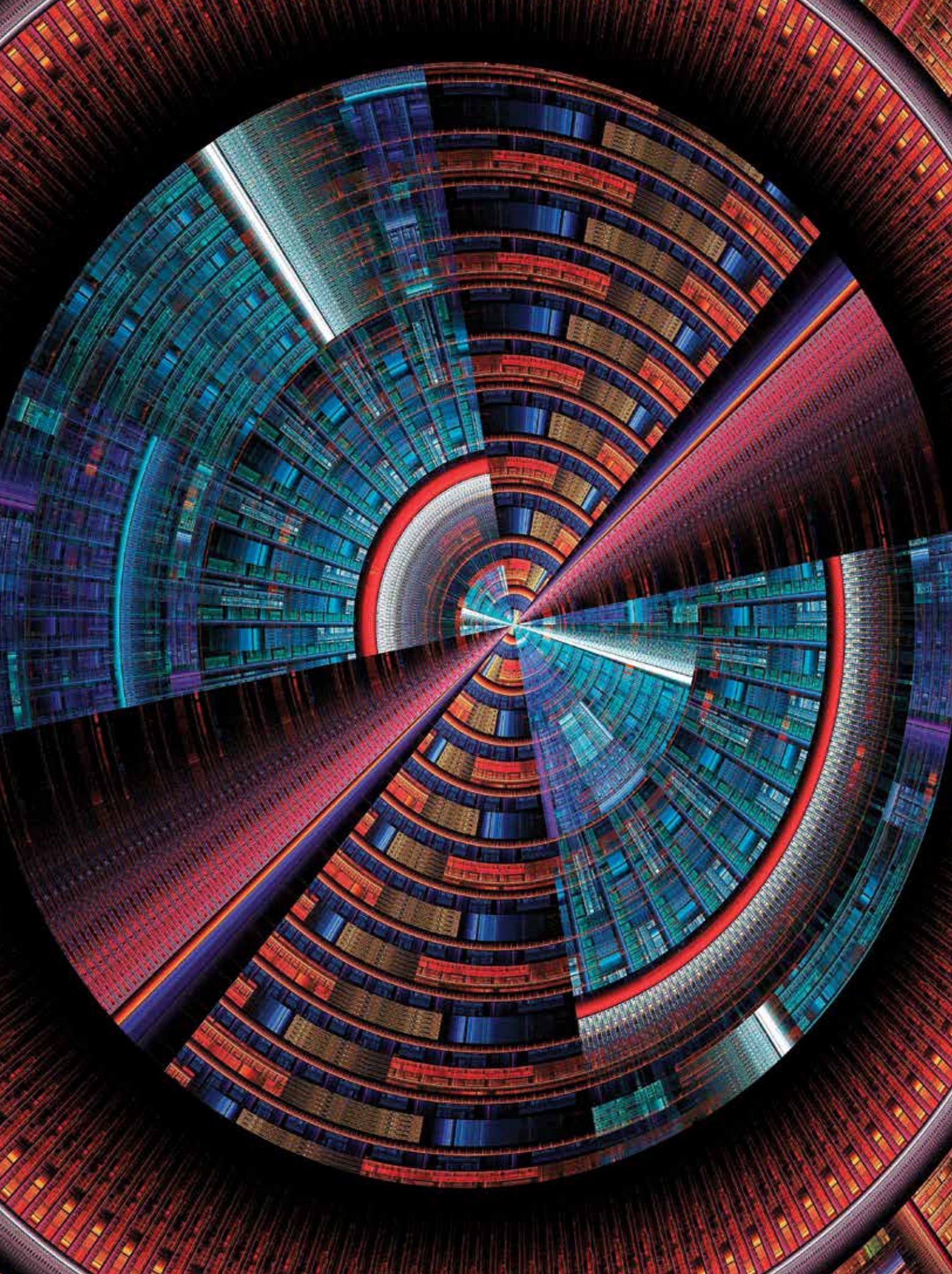
其他科学家使用。不仅如此,随着技术日益进步,特别是在下一代测序 (NGS) 出现后,可用的试验数据集的规模和数量均呈指数级增长。¹³

按每台单独的 NGS 机器产生的原始序列数据计算,当前 NGS 方法的输出增长速度如图 1 所示,图中还描绘了 SPECint CPU 基准的性能增长情况。很明显,对于单线程应用 (本文中的 SPECint) 来说,NGS 序列数据的增长远远超过了摩尔定律提供的性能增长。请注意,图 1 中的序列数据大小为分析 NGS 仪器实际产生的原始图像后得出的输出结果。由于这些原始图像数据集本身规模太大 (每天每个实验室产生数个 TB 的数据),即便是在现在,考虑保存他们也不切实际。而且,序列数据是在实时分析图像时产生并保存的。

大数据不仅对科学研究带来巨大的变化,而且有潜力在其它方面带来更大的变革。Google 对谷歌文件系统 (Google File System) 和 MapReduce 的研究以及随后出现的像 Hadoop 这样的开源系统已

» 重要见解

- 大数据正在彻底改变我们生活的所有方面,从企业到消费者,从科学到政府,均经历着根本性的变革。
- 从大数据中创造价值是一个包含下列多个步骤的流程:采集,信息抽取和清理,数据集成,建模和分析,以及解释和部署。许多对大数据的论述只关注了一两个步骤,却忽视了其他的步骤。
- 研究想光的挑战很多,范围包含从数据的异质性、不一致和不完整、及时性、隐私、可视化效果和协作到围绕大数据形成的工具生态系统等多个方面。
- 很多案例表明,能够正确驾驭大数据的人将会赋予丰厚的奖赏。



经引发了业界对大数据技术最广泛的开发和应用。专注于 Web 的公司，如脸谱网 (Facebook)、领英 (LinkedIn)、微软、Quantcast、Twitter 和雅虎等公司引领了这一潮流。它们已经成了众多应用中不可或缺的基础，涵盖了从网络搜索到内容推荐和计算广告学等各种领域。在下列领域中，利用大数据价值的真实案例已然出现，且颇具说服力：医疗保健（通过基于家庭的连续性监测和跨供应商集成）、³ 城市规划（通过融合高保真地理数据）、智能交通（通过分析和可视化展现实时的详细路网数据）、环

境建模（通过无处不在的传感器网络收集数据）、⁴ 节能（通过揭示使用模式）、智能材料（通过新材料基因组计划¹⁸、自然语言之间的机器翻译（通过分析大型语料库）、教育（特别是在线课程）、² 计算社会学（一种越来越热门的新方法论，因为获取数据的成本大大降低）、¹⁴ 金融领域的系统性风险分析（通过集中分析大量的合同来找出金融实体之间的依赖关系）、⁸ 国土安全（通过分析社交网络和潜在恐怖分子的金融交易）、计算机安全（通过分析日志记录的事件，也被称为安全信息与事件管理 SIEM）等。

2010 年，企业和用户存储了超过 13 万亿字节的新数据；这是美国国会图书馆的数据的 50,000 多倍。根据麦肯锡最近发布的报告，对于终端用户而言，全球个人位置数据的潜在价值估计有 7 千亿美元，它可以让产品开发和组装成本最多降低 50%。¹⁷ 麦肯锡预测，大数据在就业方面也会造成同等规模的巨大影响，其中美国将需要 140,000 - 190,000 名拥有“深入分析”经验的员工；不仅如此，150 万名经理将需要精通数据。不令人吃惊的是，美国总统科技咨询委员会最近发布了一份有关网络化与 IT 研发的报告²²，其中把大数据确定为“前沿研究方向”，它能够“快速推动范围广泛的重点项目取得进展。”现在，即使是大众新闻媒体也开始认识大数据的价值，《经济学人》、⁷ 《纽约时报》、^{15,16} 美国全国公共广播电台、^{19,20} 和《福布斯》杂志的相关报道可以证明这点。⁹

虽然大数据的潜在利益是真实又巨大的，而且也取得了一些初步的成功（比如斯隆数字巡天），但为了全部实现这一潜力，必须解决很多尚存的技术挑战。海量的数据当然是一个主要的挑战，也是最容易识别的挑战之一。不过，还有其他挑战。行业分析公司会指出，不仅在数量上存在挑战，而且在多样性和速度上也存在挑战¹⁰，所以公司不应该只重视其中的第一点。多样性指数据类型、表现形式和语义解释的异质性。速度有两种含义，一种是数据到达的速率，另一种是必须对数据处理的速率。虽然上述三点相当重要，但是这份简短的清单却未能覆盖其他重要的要求。各方已经提出了几项其他要求，比如真实性。其他的顾虑，如隐私和可用性，仍然继续存在。

大数据的分析是一个迭代的过程，每次迭代都会面临自己的挑战，也会涉及很多独特的阶段，如图 2

图 1 下一代序列数据的规模与 SPECint 的对比

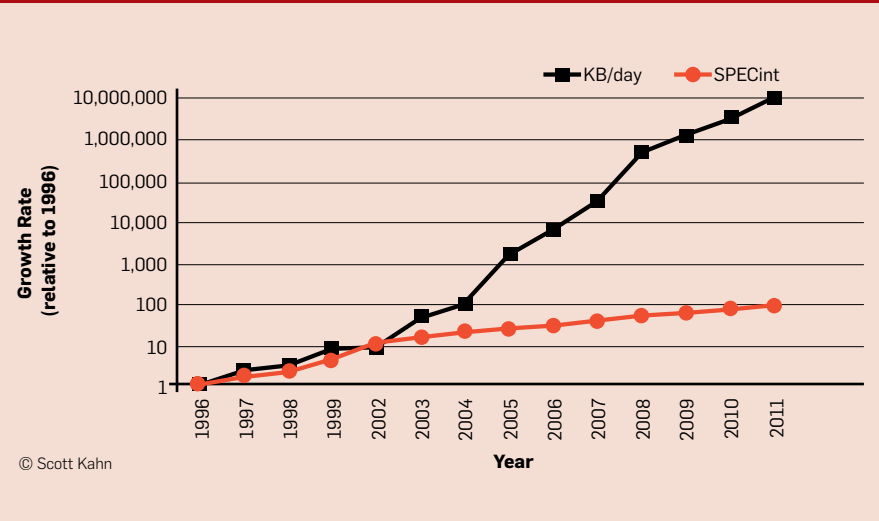
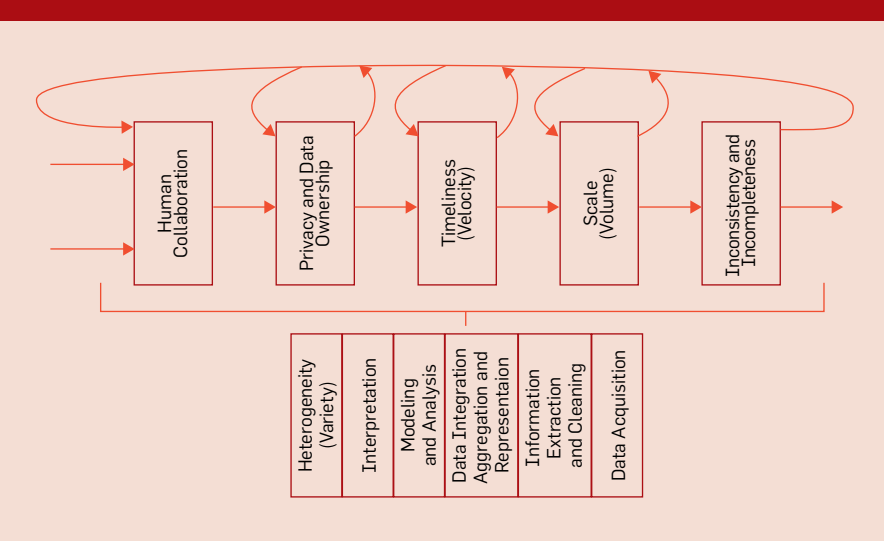


图 2 大数据分析管道图的上半部分说明了大数据分析的主要步骤。注意，在所有的阶段中均存在可能的反馈循环。图的下半部分说明了造成这些步骤颇具挑战的大数据特性。



所示。在此，我们探讨一下端到端的大数据生命周期。

大数据生命周期的各阶段

不幸的是，很多人只关注分析/建模步骤 - 虽然这一步特别重要，但是如果缺少数据分析管道中的其他阶段，这一步几乎无用。例如，我们必须从数据在我们可能无法完全预料的方面存在价值这个角度来探讨应该记录哪些数据的问题，然后开发各种方法来从捕获的不完美和不完整的数据中推导出价值。这样做之后，便产生了追踪来源以及处理不确定性与错误的需求。让我们来看另一个例子，如果相同的信息以重复或重叠的方式呈现，那么它支持我们利用统计技术来应对数据集成和实体/关系抽取等各种挑战。这可能是成功利用多个数据来源数据的关键点（例如，不同的实验室报告的相关实验，众包的交通信息，从不同的网站提取出的特定领域的的数据，比如娱乐数据）。上述方面对成功至关重要，但却极少得到像大数据那样的广泛论述。即使在分析阶段，虽然该阶段已经备受关注，但是研究人员对在多租户集群背景下多个用户程序并发运行时的复杂度却知之甚少。

在一处完成所有任务最重要的转变很可能是，随着相同的数据越来越多地经历生命周期中的所有五个阶段，对数据各阶段的处理任务分别独立进行将很难让人接收。我们如何才能提供一种数据管理和分析能力的综合集，为所有五个阶段提供足够的支持？

在本文的后续部分中，我们会首先讨论大数据管道中的五个阶段以及每个阶段中的特殊挑战。然后，我们会提供一个案例研究（见侧边条），用实例说明在不同阶段中面临的问题。在此，我们讨论一下六个相互交织的挑战。

数据采集。大数据并非从真空中产生：它是对潜在感兴趣的活动

记录。例如，以我们感知和观测周围世界的能力为例，其中包括了从老年人的心率、呼吸的空气中存在的毒素到网站上的用户活动日志或软件系统中的事件日志等多种数据。如今，传感器、仿真器和科学实验能够产生大量的数据。例如，规划中的平方公里阵列望远镜每天能够产生高达一百万太字节（terabyte）的原始数据。

把概要推到边缘设备。我们可以筛选和压缩的东西往往与拟实现的分析紧密结合，所以固定的筛选策略效果不佳。我们能否提供灵活的复杂事件处理框架（这种框架会根据用户的分析把允许的筛选和压缩准则推向产生数据的边缘设备，进而实现数据采集的优化）？

在不影响我们对感兴趣的潜在活动进行推理的条件下，该数据中的很大部分将会以数分之一比率筛选和压缩。挑战之一是妥善定义这些“在线”筛选器，使得它们不会抛弃有用的数据，因为原始数据往往太大，实际上不允许我们全部存储。例如，收集的传感器数据在大多数情况下与空间和时间相关（比如相同路段上的交通传感器）。假设，某个传感器的读数与其他传感器存在明显区别。原因可能是传感器出故障了，但是我们怎么能确定这个读数没有实际意义呢？

不仅如此，加载大型的数据集通常也是一种挑战，特别是在结合使用在线筛选和数据精简的情况下；同时我们还需要有效的增量处理技术。即使如此，对于很多应用而言，这可能还不够，还需要设计高效的即时处理方法。

信息抽取和清理。收集的信息往往与分析时使用的格式不符。例如，以在医院里收集的电子健康记录为例，该记录包括多位医生的口述笔录，传感器和测量值的结构化数据（可能带有某种关联的不确定性），图片数据（如X光片）和探

测仪的视频。我们不能让数据的格式保持现状，然后还要有效地对其进行分析。与此相反，我们需要一种信息抽取流程把所需的信息从底层数据源抽取出来，然后再以适于分析的结构化形式呈现。正确、完整地实现这一流程会一直成为技术挑战。此类抽取依赖应用的程度通常很高（例如，从一张核磁共振成像中抽取信息与从一张恒星的图片或监测照片中抽出有用信息截然不同）。生产率方面则要求创造新的声明性方法来精确地规定信息抽取任务，然后在处理新数据时对这些任务的执行进行优化。

众所周知，大多数数据源都不可靠；传感器可能会出现故障，人们可能会偏见的观点，远程的网站可能变旧（stale），等等。理解并为这些错误源建模是开发数据清理技术的第一步。不幸的是，工作的很多方面取决于数据源和应用。

数据集成、聚合和展现。有效的大规模分析往往需要从多个数据源收集异质数据。例如，获取病人（或人群）的360度健康视图时，可以通过整合和分析医疗健康记录获益，同时可以利用通过互联网获取的环境数据，随后甚至还能利用多种不同仪表的读数（例如，血糖仪、心率仪、加速度计以及其他仪表³⁾）。数据转换和集成工具集帮助数据分析师解决数据结构和语义上的异质性问题。这种针对异质性的解决方案会促成集成后的数据在社区内部的统一性，因为它们符合标准化方案，满足分析要求。不过，由于完全集成的成本往往非常昂贵，而且分析需求变化迅速，所以最近的“按需付费”集成技术提供了一个诱人的“松弛”方法，它通过在线执行工作来支持临时的分析探索任务。

值得注意的是，互联网上大量可用的数据，若与支持生成派生数据的集成和分析工具结合，会导

致另一种类型的数据激增；此时不仅存在大数据量的问题，还要面对追溯此类派生数据的来源这种问题（随后我们会进行讨论）。

即使对于仅依赖一个数据集的较简分析而言，通常也会存在多种方法来保存相同的数据，每种方法均有利弊。作为证明，举例来说，生物信息学的数据库结构多种多样，但都包含了基本类似的实体（如基因）信息。如今，数据库设计是一种技能，在企业中由薪酬丰厚的专业人员谨慎地进行。我们必须让其他的专业人员（如专门领域科学家）具备创造有效数据存储的能力，或是通过设计工具帮助他们完成设计过程，或是完全放弃设计过程，开发在缺乏精细的数据库设计的情况下仍能有效使用数据的技术。

建模和分析。查询和挖掘大数据的方法与传统的小样本统计分析方法存在根本区别。大数据往往充满噪声，动态变化，异质，相关关联，且不可靠。然而，即使充满噪声的大数据也比微小的样本更有价值，因为从频繁模式和相关性分析得出的综合统计结果通常不仅能减弱个体数据的抖动和偏差，还能揭示更可靠的隐藏模式和知识。事实上，妥善利用统计方法后，研究人员能够使用近似分析来获取可靠的结果，而不会被数量难倒。

解释。决策者最终拿到分析结果后，必须解释这些结果。通常情况下，这需要审查做出的所有假设，并追溯分析。此外，还会存在很多可能的错误源：计算机系统可能存在错误，模型绝大多数时候都包含假设，结果可能基于错误的数据库。因为上述原因，负责的用户不会把他的职责转交给计算机系统。与此相反，她会想办法去理解和验证计算机生成的结果。计算机系统必须让上述工作变得容易。对于大数据而言，由于其相当复杂，这项工作

虽然大数据的潜在利益是真实又重要的，而且也取得了一些初步的成功，但为了全部实现这一潜力，必须解决很多尚存的技术挑战。

尤为困难。在记录的数据背后，往往会存在一些至关重要的假设。分析管道可能包含多个步骤，并内置了各种假设。最近，抵押贷款对金融系统的冲击表明决策者迫切需要在这方面的尽职调查，而不是按面值接受金融机构所宣称的偿付能力，决策者必须认真审视在多个分析阶段中做出的各种假设。总之，只提供结果很难够用。更准确的说，不仅需要赋予用户解释所获取的分析结果的能力，还必须能让用户采用不同的假设、参数或数据集重复分析过程，以更好的支撑人类的思考过程和满足社会环境的要求。

数据解释是数据处理过程最后的环节，往往形成对基础数据带有观点性的注释。常见的情况是，这类观点彼此之间可能互相冲突，或者为它们做支撑的底层数据不够充分。在上述情况下，社区需要参与解决冲突的“编辑”过程（维基百科社区便是该过程的一个典型例子）。我们需要一种新型的数据工作平台。在该平台中，社区参与者能够对基础数据添加解释性的元数据注释，解决他们的分歧，并清理数据集；与此同时存在的部分干净或一致的数据仍然有待人工检查。

大数据分析中的挑战

在描述大数据分析管道中的多个阶段后，我们现在转向一些因大数据的特性而产生的共同挑战。在上述的很多阶段，有时是全部阶段中，人们都会面临这些挑战。图2的下部分用六个框说明了这些挑战。

异质性。当人们消费信息时，他们可以毫无困难地容忍大量的异质性。事实上，自然语言的细微差异和丰富性提供了颇具价值的研究深度。不过，机器分析算法却期望得到同质数据，因为它们理解细微差异的能力很差。因此，在数据分

案例研究

从 2010 年秋季开始，作为与洛杉矶大都会交通管理局 (LA-Metro) 的合同的一部分，南加州大学 (USC) 综合多媒体系统中心 (IMSC) 的研究人员获得了访问源于洛杉矶县路网的高分辨率时空交通数据。该数据以每分钟 46 兆字节的速度产生，迄今为止已经收集了超过 15 太字节的数据。IMSC 的研究人员开发了一套名为 TransDec (用于交通决策) 的端到端系统来采集、存储、分析和可视化这些数据集 (见附图)。在此，我们探讨一下与图 2 中描绘的大数据流程对应的多个 TransDec 组件。

采集：现有系统实时采集下列数据集：

► **交通用线圈探测器：**高速公路和交通干线上布置的约 8,900 个传感器收集交通参数，比如承载量、交通量和以及按读数 / 传感器 / 分钟的速率衡量的速度。

► **公共汽车和轨道交通：**包含的信息覆盖了在洛杉矶县运营的约 2,036 辆公共汽车和在 145 条不同的路线上行驶的 35 列火车。传感

器数据包括每隔两分钟记录的每辆公共汽车的地理空间位置，相对于当前位置的下一个车站的信息以及相对于预先确定的时间表的延误信息。

► **匝道控制灯和 CMS (可变情报板)：**1851 组匝道控制灯根据当前的交通情况调节进入高速公路的车流量；160 个可变情报板 (CMS) 向旅行者说明了路况信息，比如延误、事故或道路施工区域。每组匝道控制灯和每个 CMS 传感器的更新速率是 75 秒。

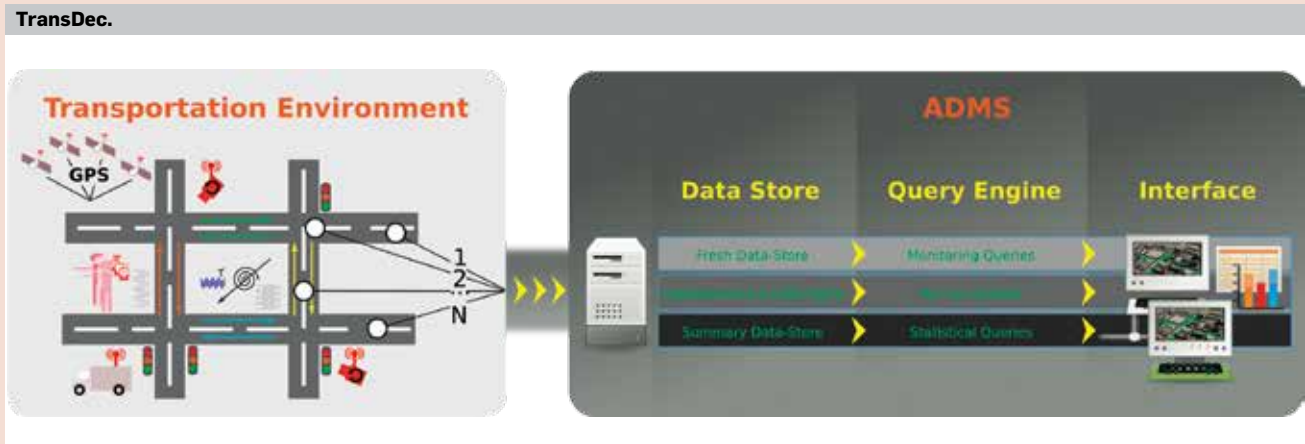
► **事件：**从三个不同的机构中获取的有关特殊事件 (比如撞车、交通危险等事件) 的详细自由文本格式信息 (例如，伤亡人数，救护车到达时间)。

清理：数据清理算法使用微软的复杂事件处理 (StreamInsight) 删除多余的 XML 头，探测和删除多余的传感器读数等数据，让 46MB/ 分钟的输入数据缩减到 25MB/ 分钟。然后，结果被作为简单的表转储到微软 Azure 云平台上。

聚合 / 展现：使用 Oracle 11g 中的表集合聚合了数据，并建立了索引 (利用 R- 树和 B- 树在空间和时间上建立了索引)。例如，聚合了数据以创建概要，以便支持预定的空间和时间查询集 (例如，I-110 北部路段平均每小时的速度)。

分析：应用了数种机器学习技术来生成不同时间下 (一天内不同时段 (例如，高峰期)，一周内的不同日期 (例如，周末) 以及不同的季节) 洛杉矶县各路段的准确的交通模式 / 模型。使用了历史事故数据来为新的事故分类，以预测清道时间和事故引发的交通滞留的长度。

解释：在复杂的系统中，很多东西都可能出错，导致出现虚假的结果。例如，系统各 (独立的) 组件的失效可能无人关注，导致数据丢失。与此类似，有时候某个组织改变了数据格式后，却没有通知下游的组织，导致解析错误。为了解决此类问题，业界开发了多个监控用脚本，并配有相应的机制来获取用户的确认和纠正。



© Luciano Nocera

析的第一步 (或之前)，人们必须细心地把数据结构化。

相关的挑战之一是自动生成正确的元数据来描述记录的数据。例如，在科学试验中，为了正确地解释结果，可能需要与特定的试验条件和试验程序有关的大量细节。元数据获取系统能够尽可能地减少人们构建元数据的负担。在数据产生时就记录与数据有关的信息用处不大，除非这些信息能

在数据分析管道中得到解释和传递。人们把它称为数据溯源。例如，某个步骤的处理错误可能会让后续分析毫无用处；有了合适的溯源机制后，我们可以轻松地定位依赖于该步骤的所有后续处理。因此，我们需要数据系统，以便在数据分析管道中传递数据源及其元数据。

不一致和不完整。大数据越来越多地包含来自多源的，不同可靠

性的数据。不确定性、错误和遗失值很常见，必须对它们加以管理。从好的一面来看，往往可以利用大数据的数量和冗余信息来弥补遗失的数据，交叉验证冲突的情况，验证可信的关系，揭示内在的聚集，发现隐藏的关系和模型。

众包中也出现了类似的问题。虽然群体中的其他成员会发现并纠正大多数的此类错误，但是我们需

要各种技术来便利这一过程。作为人类，我们阅读某种产品的评论，其中有些让人动心，也有一些是负面的，然后我们会形成总结性的评价，并根据它来决定是否购买该产品。我们需要计算机具备完成上述任务的能力。在名为参与式感知的特殊众包中，不确定性和错误的问题更为明显。在这种众包中，携带手机的每个人都能作为一个即时收集多种类型数据的多模式传感器（比如照片、视频、音频、位置、时间、速度、方向和加速度）。此处存在的另一种挑战是数据收集设备固有的不确定性。事实上，收集的数据可能存在时空相关性，我们可以利用这点来更好地评估它们的正确性。如果众包数据通过雇佣的方式获取，比如 Mechanical Turks 的情况，那么工人的不同动机也会引发另一种错误模型。

即使在应用了纠错技术之后，数据中的某些不完整性和某些错误可能仍然存在。这种不完整性等错误必须在数据分析中加以管理。正确地实现这一任务也是一种挑战。处理和查询带概率和冲突数据的最新研究为这一方面的发展进步提供了有效的手段。

规模。当然，提到大数据时，所有人想到的第一个因素就是它的规模。在过去几十年里，管理迅速增长的大量数据一直是一个颇具挑战性的问题。过去，由于处理器遵守摩尔定律而变得越来越快，这种挑战得以缓解。不过，如今却正在发生根本性转变：数据量比 CPU 速度和其他计算资源的增长速度要更快。

由于功率限制，时钟速度的增长已经基本停滞，现在的处理器开始构建数量越来越多的核。总之，人们必须处理单一节点内部的并行。不幸的是，过去应用于跨节点数据处理的并行数据处理技术并不能直接用于节点内部的并行处理，因为两者的架构看起来截然不同。

例如，在单一的节点中，各核共享了更多的硬件资源，比如处理器高速缓存和处理器内存通道。

另一个正在发生的巨大转变是云计算；云计算现在把多种毫不相干、性能目标各异的工作负载聚合在一起，放入非常大的集群。在昂贵和大型的集群中实现上述级别的资源共享不仅需要着重利用以前的网格和集群计算技术，还需要新的手段来确定如何运行和执行数据处理作业，以便我们能够用划算的方式实现每个工作负载的目标，并确定如何处理系统故障（当我们操作的系统变得越来越大时，系统故障发生得越来越频繁）。

这带来了跨多个用户程序进行全局优化的需求，其中甚至也包括那些执行复杂机器学习任务的程序。对于依赖用户驱动的程序优化，通过虚拟化取得的集群使用率可能会相当低，因为用户不知道其他用户程序的情况。系统驱动的整体性优化需要程序足够透明。就像在关系数据库系统中，设计声明式查询语言时就考虑了这点。事实上，如果用户想要生成和构建用于大数据处理的复杂分析性管道，他们必须规定合适的高层级原语来明确说明他们的需求。

深入开发用于大数据分析的声明式方法除了技术上的原因外，还存在相当强的业务需要。组织一般会把大数据处理或是其中很多方面的工作外包出去。描述性的规范文档是必要的，用来制定可实施的服务协议，因为外包的目的就是精确的指定需执行任务，而不需要深入实现细节。

及时性。随着数据的增长，我们需要实时技术来汇总并筛选出需要存储的数据，因为在很多情况下，存储原始数据在经济上并不可行。这就产生了前文描述的采集率方面的挑战，以及后文我们将要讨论的及时性挑战。例如，如果怀疑出现了欺骗性质

的信用卡交易，最理想的状况是能在该交易完成前予以标记 - 其有可能从根本上防止交易的发生。很明显，对用户购买历史进行实时全量分析不大可行。与此相反，我们需要提前计算出部分结果，以便在获取新数据时，可以使用少量的增量计算来实现快速判断。根本性的挑战是保证对高容量事件流进行大规模复杂查询时的交互响应时间。

另一个共同的模式是在极大的数据集中找出符合特定条件的元素。在数据分析的过程中，这种搜索可能会反复发生。通过扫描整个数据集来找出合适的元素明显不切实际。与此相反，人们提前创建了索引结构以便迅速找到满足条件的元素。例如，拿交通管理系统来说，其中包含了道路上行驶的数千辆车辆的信息以及局部的热点信息。该系统可能需要预测在用户选中的路线上存在的潜在拥堵点，并提出其他方案。实现此任务需要评估多个空间邻近查询，处理多个移动物体的运动轨迹。我们需要设计新的索引结构来支持多需求的查询。

隐私和数据所有权。数据的隐私是另一个不容忽视的因素，并且这一因素在大数据的背景下愈加明显。对于电子健康记录，存在严格的法规规定在何种的场景中可以披露何种数据。对于其他数据，特别是在美国，法规要宽松一点。然而，公众对于个人数据的不当使用，特别是将个人数据连接到多个数据源，抱有相当大的恐惧。有效的管理隐私不仅是技术问题，还是社会问题，必须从这两个方面同时着手才能实现大数据的远景。

例如，从基于位置的服务中收集的数据，需要用户向服务提供商分享他的 / 她的位置。其中明显有很多隐私方面的担忧，仅仅通过隐藏用户身份，而不隐藏她的位置无法平息这些担忧。攻击者或（可能恶意的）基于位置的服务器可以（后

续的) 位置信息中推断出查询源的身份。例如, 用户可能会留下一些能与其住所或办公室位置关联的“数据包碎屑踪迹”, 从而可用于确定用户的身份。其他几种特殊的隐私信息, 比如健康问题(例如癌症治疗中心的探访情况)或宗教偏好(例如, 教堂的拜访情况), 可以通过观察匿名用户在较长时间内的移动和使用模式揭示。总体来说, 研究已经发现, 人们的身份和他们的移动模式存在密切的相关性。¹¹ 但是, 对于基于位置的服务而言, 需要用户的位置用于成功的数据访问或数据收集, 所以地完成该项工作颇具挑战。

另一个问题是, 现在很多在线服务都需要我们分享隐私信息(想想 Facebook 应用), 但是除了记录级的访问控制外, 我们并不了解分享数据意味着什么, 分享的数据如何被关联在一起, 以及如何以符合直觉但却有效的方式允许用户对其分享数据进行细粒度的控制。另外, 真实数据并不是静止不变的, 而是会随时间变得越来越多; 现在流行的技术中没有一种能在这种场景下揭示任何有用的内容。

隐私只是数据所有权的一个方面。总体来说, 随着数据的价值逐渐得到认可, 某个组织拥有的数据的价值会变成一种首要的战略考量。组织会关注如何在保持其独特数据优势的情况下利用这种数据; 而且, 如何在不失去控制的情况下分享或销售数据等问题会变得相当重要。在分发渠道从物理媒介(如 CD)的销售转向数字购买时, 音乐界面临了数字版权管理(DRM)的问题, 但上述问题与 DRM 不同; 我们需要有效和灵活的数据 DRM 方法。

人类的视角: 可视化和协作。
为了让大数据实现其全部潜力, 我们不仅需要从系统角度考虑规模, 还要从人类的角度考虑规模。我们

如果用户想要生成和构建用于大数据处理的复杂分析性管道, 他们必须拥有合适的高层级原语来明确说明他们的需求。

必须保最终目标——人类——能够正确地“吸收”分析结果, 而不会迷失在数据海洋中。例如, 排序和推荐算法可结合用户的偏好为他/她识别最感兴趣的数据。然而, 特别是当这些技术被用于科学发现和探索时, 又必须采取特别的措施, 从而避免把最终用户禁锢在仅由他们之前已经看过的类似数据构成的“过滤气泡”内²¹——很多有趣的发现源于探测和解释例外现象。

尽管计算分析已经取得了长足的进度, 但是仍然存在很多人类能轻松地发现, 计算机算法却很难找出的模式。例如, 验证码(CAPTCHA)精确地利用了这一事实来区分网络中的人类用户和计算机程序。理想情况下, 大数据的分析不会全部都是计算性质的——相反, 设计时会明确在其环路中包含人类。视觉分析这一新分支正在尝试这样做, 至少在管道的建模和分析阶段做成这样。在分析管道中的所有阶段, 人类输入都有类似的对应值。

在今日的复杂世界中, 通常需要多位来自不同领域的专家携手, 才能真正了解正在发生的事情。大数据分析系统必须支持多位人类专家的输入以及共享探索结果。当把整个团队聚集在一间房间内的成本过高时, 多位专家可能会被时空分隔。数据系统必须接受分布式的专家输入, 并支持他们的协作。从技术层面讲, 这需要我们考虑共享原始数据集之外的数据; 我们还必须考虑如何支持这种共享算法和人工制品, 比如实验结果(例如, 在不断变化的数据集的某个指定快照上, 采用特定的参数值后, 应用一种算法所获得的实验结果)。

可视化效果可以迅速被创建, 是向用户传递查询结果的最容易的理解方式和展示细节的手段。虽然早期的商业智能系统的用户满足于表格展现方式, 但是今天的分析师需要用强大的可视化效果来包装和展现结果, 因为这些可视化效果能帮

助他们解释结果，并支持用户协作。不仅如此，只要点击几次，用户应该就能向下钻取她观察到的每一种信息，并了解信息的源头。因为越来越多的人拥有数据，也希望分析数据，所以这点变得尤为重要。

大数据合作实验室随着很多社区开始依赖于云的数据管理以及大规模的共享数据储存库变成关键资源，使用共享数据开展协作的潜在价值得到了迅猛提升。我们如何允许用户创建一种结合自身数据与共享数据的数据分析，并（有选择性地）允许其他用户再次运行、再次改进和重新分配这些分析的人工制品，其范围可能包括从单一的查询到完整的建模和评分 workflow 等多项任务？这要求我们处理各种问题（比如，源头、访问控制或工作流），但处理时仍为不断增加的协作保留巨大的潜力，并提高协作工作的透明度等级（设想一下，您能用作者使用过的数据和代码重新运行论文中描述的所有分析，还能改进和发布结果！）。

众包是一种广为流行的，驾驭人类聪明才智用以解决问题的新方法。维基百科是一本在线百科全书，它可能是最有名的众包数据范例。采用社会化方法进行大数据分析具有广阔的前景。当我们把以各种各样以数据为中心的人工制品变成可共享的东西后，我们打开了一扇通往社会机制的门。这些社会机制包括人工制品的评级，领先榜（例如，透明地比较几种算法在相同数据集上的有效性）以及所形成的算法和专家的声誉。

结论

我们已经进入了大数据时代。经济中的很多领域现在正在转向以数据驱动的决策模型，其中核心业务依赖于对不断产生的大量繁杂数据进行分析。在这个数据驱动的世界里，存在某种可提升企业效率和提高生活质量的潜力。然而，在我们利用大数据的全部潜力之前，尚有若干必须应对的挑战。本文重点阐述了我们必须应对的关键技术挑战。同时本文承认还存在其他的挑战，比如经济、社会和政治方面的挑战，这些挑战在本文中并未论及，但也必须加以解决。另外，本文中探讨的所有技术

挑战不一定会在所有的应用场景中出现。但是大多数挑战会出现。同理，某种挑战的解决方案可能无法在所有情况下通用。但是，同上面的情况一样，他们之间的相似之处不少，足以支持交叉学习。因此，本文中描述的多种挑战为计算机科学的跨领域研究提供了丰富的素材。我们还收集了一些建议供进一步阅读，请访问 <http://db.cs.pitt.edu/bigdata/resources>。我们依据广度和重要性选择了几十篇论文，而没有编制全面的参考书目。因为那样做的话，可能会包含几千篇论文。

鸣谢

本文根据由众多研究人员编著的白皮书⁵写就。我们在此向他们表示谢意。感谢 Divyakant Agrawal, Philip Bernstein, Elisa Bertino, Susan Davidson, Umeshwar Dayal, Michael Franklin, Laura Haas, Alon Halevy, Sam Madden, Kenneth Ross, Dan Suciu, Shiv Vaithyanathan, 和 Jennifer Widom。

H.V.J. 的部分资金来源于美国国家科学基金会的资助 (IIS1017296, IIS1017149 和 IIS1250880)。A.L. 的部分资金来源于美国国家科学基金会的资助 (NSF IIS-0746696, NSFOIA-1028162 和 NSF CBET-1250171)。Y.P. 的部分资金来源于美国国家科学基金会的资助 (IIS-1117527, SHB-1237174, DC-0910820) 以及 Informatica 研究奖。J.M.P. 的部分资金来源于美国国家科学基金会的资助 (III-0963993, IIS-1250886, IIS-1110948, CNS-1218432) 以及谷歌、江森自控、微软、赛门铁克和 Oracle 的捐赠。C.S. 的部分资金来源于美国国家科学基金会的资助 (IIS-1115153)，与洛杉矶大都会交通管理局 (LA Metro) 的合同以及 Microsoft 和 Oracle 的无限制现金捐赠。

本文阐述的任何观点、发现、结论或建议仅属于其作者所有。

参考资料

1. Computing Community Consortium. *Advancing Discovery in Science and Engineering*. Spring 2011.
2. Computing Community Consortium. *Advancing*

3. Personalized Education. Spring 2011.
3. Computing Community Consortium. *Smart Health and Wellbeing*. Spring 2011.
4. Computing Community Consortium. *A Sustainable Future*. Summer 2011.
5. Computer Research Association. *Challenges and Opportunities with Big Data*. Community white paper available at <http://cra.org/ccc/docs/init/bigdatawhitepaper.pdf>
6. Dobbie, W. and Fryer, Jr. R.G. *Getting Beneath the Veil of Effective Schools: Evidence from New York City*. NBER Working Paper No. 17632. Issued Dec. 2011.
7. *Economist*. *Drowning in numbers: Digital data will flood the planet—and help us understand it better.* (Nov 18, 2011); <http://www.economist.com/blogs/dailychart/2011/11/big-data-0>
8. Flood, M., Jagadish, H.V., Kyle, A., Olken, F. and Raschid, L. *Using data for systemic financial risk management*. In *Proc. 5th Biennial Conf. Innovative Data Systems Research* (Jan. 2011).
9. *Forbes*. *Data-driven: Improving business and society through data*. (Feb. 10, 2012); <http://www.forbes.com/special-report/data-driven.html>
10. Gartner Group. *Pattern-Based Strategy: Getting Value from Big Data*. (July 2011 press release); <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1731916>
11. González, M.C., Hidalgo, C.A. and Barabási, A-L. *Understanding individual human mobility patterns.* *Nature* 453, (June 5, 2008), 779–782.
12. Hey, T., Tansley, S. and Tolle, K., eds. *The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery*. Microsoft Research, 2009.
13. Kahn, S.D. *On the future of genomic data.* *Science* 331, 6018 (Feb. 11, 2011), 728–729.
14. Lazar, D. et al. *Computational social science.* *Science* 323, 5915 (Feb. 6, 2009), 721–723.
15. Lohr, A. *The age of Big Data.* *New York Times* (Feb. 11, 2012); <http://www.nytimes.com/2012/02/12/sunday-review/big-datas-impact-in-the-world.html>
16. Lohr, S. *How Big Data became so big.* *New York Times* (Aug. 11, 2012); <http://www.nytimes.com/2012/08/12/business/how-big-data-became-so-big-unboxed.html>
17. Manyika, J. et al. *Big Data: The next frontier for innovation, competition, and productivity.* McKinsey Global Institute. May 2011.
18. National Science and Technology Council. *Materials Genome Initiative for Global Competitiveness*. June 2011.
19. Noguchi, Y. *Following the Breadcrumbs to Big Data Gold.* National Public Radio (Nov. 29, 2011); <http://www.npr.org/2011/11/29/142521910/the-digital-breadcrumbs-that-lead-to-big-data>
20. Noguchi, Y. *The Search for Analysts to Make Sense of Big Data.* National Public Radio, (Nov. 30, 2011); <http://www.npr.org/2011/11/30/142893065/the-search-for-analysts-to-make-sense-of-big-data>
21. Pariser, E. *The Filter Bubble: What the Internet Is Hiding From You.* Penguin Press, May 2011.
22. PCAST Report. *Designing a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information Technology* (Dec. 2010); <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd-report-2010.pdf>
23. SDSS-III. *Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way Galaxy, and Extrasolar Planetary Systems* (Jan. 2008); <http://www.sdss3.org/collaboration/description.pdf>

H.V. Jagadish (jag@umich.edu) 是安阿伯市密歇根大学电气工程和计算机专业 Bernard A. Galler 大学教授。

Johannes Gehrke (johannes@cs.cornell.edu) 是纽约州伊萨卡市康乃尔大学计算机科学系的 Tisch 大学教授。

Alexandros Labrinidis (labrinid@cs.pitt.edu) 是匹兹堡大学计算机科学系副教授及高级数据管理技术实验室的联席主任。

Yannis Papakonstantinou (yannis@cs.ucsd.edu) 是圣地亚哥加利福尼亚大学计算机科学与工程教授。

Jignesh M. Patel (jignesh@cs.wisc.edu) 是麦迪逊市威斯康星大学计算机科学教授。

Raghu Ramakrishnan (raghu@microsoft.com) 是位于华盛顿州雷德蒙市的微软公司技术院士和信息服务技术总监。

Cyrus Shahabi (shahabi@usc.edu) 是南加州大学计算机科学与工程教授兼信息实验室主任，以及美国国家科学基金会综合多媒体系统中心主任。

译文责任编辑：唐杰

© 2014 ACM 0001-0782/14/07 \$15.00

技术视角 联合多用户波束成形 技术的力量

作者: Konstantina (Dina) Papagiannaki

无线通信已彻底革新了人际交往和信息访问的方式。随着 Wi-Fi 和 3G/4G 蜂窝技术的兴起, 我们几乎可以在世界上每一个角落访问互联网, 不必受到线缆的牵绊; 更为重要的是, 我们可以随时随地访问。平板电脑和智能手机等功能愈加强大的便携式设备进一步提高了无线基础设施的流量需求。

无线网络容量的增加可以通过两种方式实现: 获得授权使用更多或更宽的频段, 或者借助部署更多 Wi-Fi 接入点 (AP) 或蜂窝网络基站 (BTS) 来增大底层无线基础设施的密度。前一解决方案通常冗长、代价昂贵并且受到严格管制。后者则为运营商带来巨大的投资成本, 该成本目前由多家部署毫微微蜂窝基站和微微蜂窝基站的蜂窝网络提供商承担。就 Wi-Fi 网络而言, 企业们倾向于花费巨资, 以高达每四米一 AP 的密度部署 AP (通常见于企业级 Wi-Fi 部署中)。

然而, 单纯增加 Wi-Fi AP 或蜂窝网络基站的密度本身并不能够解决问题。网络中设备数量增加时, 其管理复杂性也会加剧, 而且更为重要的是, 其配置要能够实现所需的增益。只有运营商能够将频率/频段妥当地调配到网络中的不同设备, 最大程度地减少同一频率上运行的 AP 之间的重叠区域, 才能实现容量方面的优势。频段选择中要解决的基本问题是, 由于无线介质是共享的, 同一频段中运行的设备越多, 每个设备的有效吞吐量就越

低 (这也导致当设备位于频率重叠的基站覆盖区域的时候, 性能会更低)。功率控制与智能频率选择算法结合, 力求增加频率重用 — 能够重用通常跨越空间的同一频率, 而不造成频率重叠区域。

此类任务的复杂性让胆小者却步, 而且基本上导致一个围绕 Wi-Fi 中央化架构的新行业诞生, 安移通 (Aruba)、梅鲁网络 (Meru Networks) 和思科 (Cisco) 等公司正是这一行业的先行者。

而按照下面这篇论文所述, 覆盖区域重叠的多台 AP 在同一频率上运行将不再是一个问题。作者介绍的解决方案可以使无线 LAN 通过持续增加同一频道上的 AP 数量来放大其吞吐量。在会议室或礼堂等目标部署场景中, AP 通过高速有线网络互相连接, 绝对需要密集型 AP 部署来容纳流量需求, 而且频道数量过于有限而无法避免重叠。


作者借鉴了当今多入多出 (MIMO) 发射器中的基本工作原理 — 波束成形技术, 使它能够跨越多

作者介绍的解决方案可以使无线 LAN 通过持续增加同一频道上的 AP 数量来放大其吞吐量。

个独立发射器运用。他们把这一方案称为联合多用户波束成形 (JMB)。有个必须要解决的难题: JMB 发射器需要控制其传输的信号的对相位, 以便有效实现波束成形, 从而抵销传输到非预期接收者的信号。由于独立发射器具有独立的振荡器, 这样的要求无法自然满足。

论文作者通过将无线 LAN 中的一个 AP 指定为主导 AP 攻克了这一难题。该解决方案分为两个阶段。在测量阶段, 每一 AP 测量其至各个接收器的频道, 以及主导 AP 至从属 AP 的频道。在数据传输阶段, 各从属 AP 校正与主导 AP 相关的频率偏移, 所有 AP 联合进行传输, 从而将数据包并发传送到多个接收器。其研究显示, 此类机制可以轻松融入 802.11n 的环境中。

在 10 节点软件无线电 Wi-Fi 测试平台上的实际实施情况表明, 网络吞吐量有了线性增加, 中值增益达到 8.1 到 9.4 倍。未经修改的 802.11n 卡上的进一步实验凸显了提议解决方案的巨大潜力。

本论文中探讨的成果有可能彻底改变密集型企业级无线 LAN 部署的基本设计理念。 

Konstantina (Dina) Papagiannaki (dina@tid.es) 是西班牙巴塞罗那 Telefonica I+D 的互联网系统和联网科学组科学主管。

译文责任编辑: 陈文光

版权归属于作者 / 所有者

JMB: 随用户需求缩放无线容量

作者: Hariharan Rahul、Swarun Kumar 和 Dina Katabi

摘要

我们为您展示 JMB (联合多用户波束成形系统), 它可以使独立接入点 (AP) 如同在一个大型 MIMO 发射器上一样, 实现其信号波束成形并在同一频道上与客户端进行通信。JMB 背后的关键技术是一种新型低开销技术, 以分布的方式同步多个发射器的相位。该设计可以使无线 LAN 通过持续增加同一频道上的 AP 数量来提高其吞吐量。我们利用软件无线电客户端和现成 802.11n 卡对 JMB 进行了实施和测试, 并在类似会议室的高密度部署中进行了评估。在包括了 10 个 AP 的软件无线电测试平台上的结果表明, 网络吞吐量有了线性增加, 中值增益达到 8.1 到 9.4 倍。我们的结果也表明, JMB 联合多用户波束成形可为未经修改的 802.11n 卡提供吞吐量增益。

1. 引言

无线频谱资源有限, 但无线需求会无限增长。例如, 会议室、宾馆和企业等环境中的 Wi-Fi 网络非常繁忙, 跟不上用户的需求, ^{10, 24} 甚至会导致 Steve Jobs 在发表 iPhone 4 主题演讲期间无线网络崩溃这样的严重事故。蜂窝网络处于相似的窘境, 其需求预计在未来几年中将超过可用容量。²⁰ 这并不是因为无线设备性能止步不前。事实上, 个体设备的性能借助多天线系统、更好的硬件和更低的接收器噪声等创新, 在近几年有了大幅提升。而问题在于, 用户需求增长方式与网络吞吐量扩展途径之间不匹配; 用户需求随着网络中设备数量的增加而增加, 网络吞吐量则不是。除非网络吞吐量也随着设备数量而升降, 否则无线网络始终难以跟上其需求, 预计的需求总会超过预测的容量。

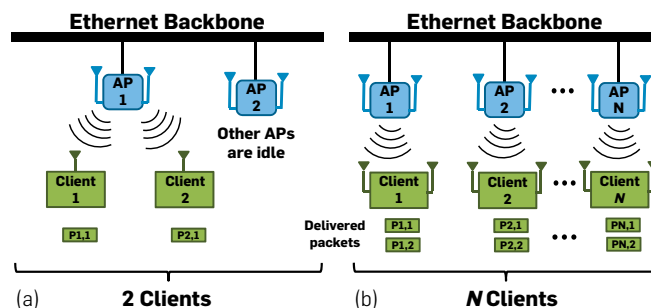
本文中我们展示了一种系统, 它可以随着传输设备数量的增加而增加其吞吐量。我们重点关注典型的繁忙无线环境场景, 如会议室、企业和宾馆等存在许多用户的场景。我们使得无线 LAN 可以通过持续增加同一频道上的接入点 (AP) 数量来提高其总吞吐量。

此系统背后的关键理念是联合多用户波束成形 (JMB)。多用户波束成形是一项已知的技术, 它可以使 MIMO 发射器将多个独立数据流 (即数据包) 发送到具有较少天线的接收器。如图 1(a) 所示, 一个双天线

接入点将两个数据包并发传送到两个单天线接收器。相比之下, 如图 1(b) 所示, JMB 让同一频道上的多个接入点将数据包并发传送到多个接收器, 而不会互相干扰。此系统通过设备数量来扩展网络吞吐量, 其并发传输的数据流 / 数据包数可达所有 AP 上的天线总数。此外, 它还利用了个体设备性能和可靠性的持续改进 (例如, 每一设备的天线数目越来越多)。

实施 JMB 的主要挑战源自需要同步分布式发射器的相位。具体而言, 波束成形的目标是要确保每一客户端能够在不受干扰的前提下解码其预期的信号。因此, 在各个客户端上, 预期发送至其他客户端的信号必须互相抵消。这要求发射器能够控制所传输信号的相对相位, 以便实现所需的信号抵消。这样的要求在单一设备执行多用户波束成形时可以自然满足。然而在 JMB 情形中, 各个发射器具有独立的振荡器, 其载波频率必然存在差异。如果试图简单地对这些来自不同发射器的独立信号执行联合波束成形, 振荡器之间的漂移将使得信号以相互不同的相对速度旋转, 导致相位偏移, 进而妨碍波束成形。

图 1. 传统与联合多用户波束成形比较。(a) 在配有多个双天线 AP 的传统多用户波束成形系统中, 给定的时间上只能有一个 AP 在一个给定频道上传输信号。这导致最多同时进行两个数据包传输, 而无论 AP 的总数为多少。(b) 与之相反, JMB 可以使所有 AP 在同一频道上进行传输, 如果有 N 个双天线 AP, 则可允许同时进行最多 $2N$ 个数据包传输。



本文的完整版本发表于芬兰赫尔辛基 ACM SIGCOMM 2012 的会刊上。

乍看之下，估算发射器之间的频率偏移（即漂移） $\Delta\omega$ 并对波束成形相位错误进行补偿就已足够： $\Delta\phi = \Delta\omega t$ ，其中 t 是已过时间。然而，这样的方式不现实。众所周知⁹，频率偏移估值存在因噪声导致的误差，使用这样的估值来计算相位会导致错误随时间快速累加。即使很小的误差，如 10Hz (4×10^3 ppm，比规定的 802.11 容差 20 ppm 或蜂窝网络容差 1–2 ppm 还要小几个数量级)，也会在 5.5ms 这么短的间隔内造成 20 度 (0.35 弧度) 这样大的误差。波束成形后的信号存在如此大的相位误差，将导致接收器存在严重干扰，而无法正确解码。

JMB 为多个分布式发射器的相位同步提供了简单而实用的方法。主要的理念是选择一个 AP 作为主导，将其相位用作整个系统的参照。其他 AP（即从属 AP）直接测量主导 AP 的相位，更改自身信号的相位，使之与主导 AP 保持所需的一致性。具体而言，JMB 在每个数据包前面加上主导 AP 传输的若干符号。从属 AP 使用这些符号来直接衡量正确波束成形所需的相位校正。由于这是直接相位测量，而不是根据频率偏移进行预测，因此不存在误差累加。在校正这一相位误差后，从属 AP 使用其频率偏移估值预测整个数据包的任何相位变化，并进行校正。这就限定了数据包期间的最大相位误差累积。可以使用频率偏移的简单长期平均数，确保数据包期间的相位误差累积在所需的性能界限内。

在本文的其余部分中，我们拓展了这一基本理念，展示了它可以跨越多个分布式发射器实现准确的联合波束成形。此外，我们也拓展了这一理念，使之能够适用于现成的 802.11n 卡。这样，企业只需升级其 AP 基础结构即可直接利用 JMB，无需对客户端进行任何改动。

我们在两种环境中实施了 JMB：

- 第一种环境包含 USRP2 AP 和接收器，其中 AP 和客户端都可以改动。在这一环境中，我们验证了 JMB 的缩放属性，也对其组件进行了更为细致的分析。
- 第二种环境包含 USRP2 AP 和配有 Intel Wi-Fi Link 5300 适配器的接收器。每一 AP 包含两个通过外部时钟连接的 USRP2，并配置为可充当双天线 MIMO AP。与其对应，每一接收器 Wi-Fi 卡启用两根天线。在这一环境中，我们确认 JMB 能够为现有的成 802.11n 网卡提供吞吐率增益，而且它也能够为多天线设备提供这些增益。

我们在室内测试平台上评估了 JMB，即在房间中密集部署 AP 和接收器来模拟会议室使用场景。我们的测试得出了下列结果：

- **USRP 测试平台：**JMB 的吞吐率随 AP 数量线性增长。具体而言，在我们由 10 个 AP 组成的测试平台中，相较于传统的 802.11 单播，JMB 可以在 802.11 信噪比 (SNR) 范围内实现 8.1–9.4 倍的中值吞吐率增益。
- **802.11 测试平台：**JMB 随发射器数量线性缩放网络吞吐率的能力也适用于现成的 802.11 客户端。具体而言，JMB 可以同时从两个双天线 AP 传输信号到两个双天线 802.11n 客户端，实现相当于传统 802.11n 1.8 倍的中值吞吐率增益。

贡献：本研究展示了首个能够从分布式独立发射器启用联合波束成形来缩放无线吞吐率的系统。为实现此目的，我们设计了一种简单而实用的方式，能够跨多个分布式发射器进行相位同步。我们也展示了这一系统可以让现成的 802.11n 卡通过联合波束成形获得吞吐率增益。

2. 相关研究

论文的完整版¹⁸中包含相关研究的详细调研。在本版本中，我们提供简要概述。

在过去的经验中，试图执行分布式多用户波束成形^{4,15,19}的系统要求借助全球定位系统 (GPS) 时钟或共享振荡器执行严格同步，或者通过交换收到的信号进行联合解码。其他允许多节点同步传输信号的系统，如 LTE 中的 MU-MIMO、¹² SAM、²¹ 和多用户波束成形，¹ 仅提供恒定的吞吐率增益，而不能随系统中 AP 数量而扩展。另一些研究使用分布式天线和 SourceSync^{3,17} 等系统调整频道分集增益，或者利用相控阵列提供定向增益，⁶ 但无法提供多路增益，因此不能随系统中 AP 的数量而扩展吞吐率。与所有这些系统相反，JMB 经过验证可以利用网络中设备上的独立振荡器实现严格相位同步，允许设备无需同步时钟信号而独立工作，并随着系统中的 AP 数量线性扩展吞吐率。此外，它也适用于现成的 802.11n 卡。

过去对分布式相位同步的理论研究^{2,22} 假定振荡器是同步的，并且仅提供一次性相位偏移校准。过去的理论¹⁶ 也证实，分布式 MIMO 可以随着节点数量而扩展无线容量。虽然 JMB 基于这些基础性研究，但 JMB 是第一款经过实证的系统，能够通过具有非同步振荡器和时变性相位差异的实用系统，展示出网络吞吐率随发射器数量而线性缩放的特点。

3. JMB 概述

JMB 针对无线下行链路而设计。它适用于无线 LAN，尤其是企业、宾馆和会议室等密集部署环境中。JMB AP 可以搭配现成的 Wi-Fi 客户端硬件运行。我们的技术也适用于蜂窝网络，但详细信息不在本文探讨范围内。

JMB AP 通过千兆以太网等高吞吐率后端连接，这与当今的 AP 相同。发往接收器的数据包分发到共享后端上的所有 AP。JMB 使得 AP 如同在一个大型 MIMO 节点上一样并发传输信号到多个客户端，发送的数据流（即数据包）数有望达到所有 AP 上的天线总数。

在下面几个章节中，我们将探讨 JMB 的工作原理。我们首先介绍实现分布式相位同步的基本理念。接着介绍我们实施这一理念来模拟大型 MIMO 节点的协议。最后，我们拓展这一系统，将我们的设计与现成的 Wi-Fi 卡整合。

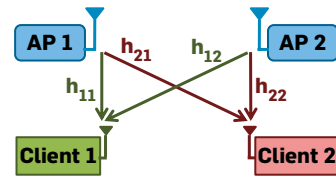
4. 分布式相位同步

分布式相位同步的主要目标是让具有不同振荡器的多个发射器模拟一个多天线发射器，其中所有天线由同一个振荡器驱动。直观地说，我们的解决方案很简单：将一个发射器声明为主导，并使所有其他发射器与主导发射器的振荡器同步；即，每一发射器测量其振荡器和主导振荡器之间的偏移，并通过适当地校正其传输的信号相位对该偏移进行补偿。这一特性使得所有发射器如同它们是同一振荡器控制的同一芯片上的天线一般工作。

我们现在演示这一直观设计如何实现正确的 MIMO 行为，从而使各个接收器正确地解码其预期的信号并且不受到干扰。为简单起见，我们考虑了两个双天线 AP 传输信号到两个单天线客户端的场景，如图 2 中所示。假设 h_{ij} （其中 $i, j \in \{1, 2\}$ ）是 AP j 到客户端 i 的频道， $x_j(t)$ 是需要在时间 t 传送到客户端 j 的符号，而 $y_j(t)$ 则是客户端 j 在时间 t 收到的符号。对应地，假设 $\mathbf{H} = [h_{ij}]$ ， $i, j \in \{1, 2\}$ 是 2×2 频道矩阵， $\mathbf{x}(t) \rightarrow [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ 为所需的符号向量，而 $\mathbf{y}(t) \rightarrow [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ 则为收到的符号向量。

无振荡器偏移：首先假设任何 AP 和客户端之间都没有振荡器偏移。如果每一 AP i 简单地传输信号 $x_i(t)$ ，每个客户端将收到所传输信号的线性组合。由于每个客户端都只有一根天线，所以客户端 1 收到 $y_1(t) = h_{11}x_1(t) + h_{12}x_2(t)$ ，客户端 2 则收到 $y_2(t) = h_{21}x_1(t) + h_{22}x_2(t)$ 。这些方程式中分别都有两个未知数；因此，所有客户端都无法解码其预期的数据。

图 2. 两个 AP 传输至两个客户端的频道矩阵。



为了将两个并发数据包发送到两个客户端，AP 需要确保每个客户端仅收到其预期的信号（即，不受到计划发送到其他客户端的信号的干扰）。具体而言，我们需要传输的信号所经历的有效频道是对角的，即它应当满足：

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中， g_{11} 和 g_{22} 是任何非零复数。在这一情形中，收到的信号将仅出现在各个接收器上，就如它经过了频道 g_{ii} 一样，各个接收器可以使用标准的技巧对其进行估算。

AP 可以利用波束成形来实现这一结果。在波束成形中，AP 测量时间 0 时发射器至接收器的所有频道系数。然后，AP 不直接传输 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ ，而是传输：^a

$$\begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{pmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

在这种情形中，两个客户端收到：

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \mathbf{H} \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{pmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{H}^{-1} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}$$

由于 $\mathbf{H}\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{I}$ ，客户端在这一情形中经历的有效频道是对角矩阵；也就是说，方程式 (1) 得以满足。因此，各个客户端现在可以解码其预期的数据，而不会受到计划发送到其他客户端的信号的干扰。

有振荡器偏移：当 AP 和客户端的振荡器具有不同的频率时会出现什么情况？假设 ω_{T_i} 是 AP i 的振荡器频率， ω_{R_j} 是客户端 j 的振荡器频率， $i, j \in \{1, 2\}$ 。在这一情形中，时间 t 时的频道 $\mathbf{H}(t)$ 可以写为：

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} h_{11}e^{j(\omega_{T_1} - \omega_{R_1})t} & h_{12}e^{j(\omega_{T_2} - \omega_{R_1})t} \\ h_{21}e^{j(\omega_{T_1} - \omega_{R_2})t} & h_{22}e^{j(\omega_{T_2} - \omega_{R_2})t} \end{pmatrix}$$

其中， $j = \text{sqrt}(-1)$ 。因为振荡器会相对于对方旋转，频道不再有固定的相位。

^a AP 也需要规范化 \mathbf{H}^{-1} 以遵从功率限制，但我们为简单起见而忽略了相关细节。

此时, 如果 AP 尝试像之前一样执行波束成形 (使用时间 $t = 0$ 时计算的频道值, 并传输 $\mathbf{H}^{-1}\mathbf{x}^{-}$), 客户端将收到:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \mathbf{H}(t)\mathbf{H}^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

乘积 $\mathbf{H}(t)\mathbf{H}^{-1}$ 不再为对角, 所以接收器无法解码其预期的信号。因此, 标准的 MIMO 波束成形在此情形中不适用。

那么, 对于频道随时间变化的情形, 如何执行波束成形呢? 简单的做法可能是尝试让各个发射器计算每一 t 上的 $\mathbf{H}(t)$, 再将时间信号乘以 $\mathbf{H}(t)^{-1}$ 。假设网络中有 N 个 AP 和 N 个客户端。那么, 这种方式将要求各个发射器以 $\Delta\omega_{ij} = \omega_{Tj} - \omega_{Ri}$ 形式维护 N^2 个频率偏移的准确估值。(此外, 由于节点只能测量相对于其他节点的偏移, 而不是其振荡器的绝对频率, 估值的数量无法减少到 N 。)来自所有这些估值的测量误差将会累积, 从而妨碍准确波束成形, 并且会在接收器端造成干扰。然而, 根据我们最初的直觉, 可以让多个发射器模拟成如同一个 MIMO 节点一般工作, 所以通过使每一发射器仅估算其对主导发射器的频率偏移, 来执行准确的波束成形。换言之, 直觉告诉我们, 将每一发射器维护的频率偏移估值数量从 N^2 减少到 1 是可能的。我们来看看如何实现这一目标。

注意到我们可以将时间 t 时的频道矩阵分解为 $\mathbf{H}(t) = \mathbf{R}(t)\mathbf{H}\mathbf{T}(t)$, 其中 \mathbf{H} 是时间不变量, $\mathbf{R}(t)$ 和 $\mathbf{T}(t)$ 则是如下定义的对角矩阵:

$$\mathbf{R}(t) = \begin{pmatrix} e^{-j\omega_{R1}t} & 0 \\ 0 & e^{-j\omega_{R2}t} \end{pmatrix} \text{ and } \mathbf{T}(t) = \begin{pmatrix} e^{j\omega_{T1}t} & 0 \\ 0 & e^{j\omega_{T2}t} \end{pmatrix}$$

由于 $\mathbf{R}(t)$ 是对角的, 它可以类似方程式 (1) 中的 \mathbf{G} 矩阵作用。因此, 如果发射器在时间 t 时传输改动后的信号 $\mathbf{T}(t)^{-1}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{x}^{-}$, 则收到的信号可以写为:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \mathbf{R}(t)\mathbf{H}\mathbf{T}(t)\mathbf{T}(t)^{-1}\mathbf{H}^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其缩减到所需的方程形式 (1):

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \mathbf{R}(t) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

请注意, $\mathbf{T}(t)$ 也是对角的; 因此, 发射器相位校正矩阵

$$\mathbf{T}(t)^{-1} = \begin{pmatrix} e^{-j\omega_{T1}t} & 0 \\ 0 & e^{-j\omega_{T2}t} \end{pmatrix} \quad (5)$$

也是对角的。此外, 每一 AP 的相位校正入口仅取决于该 AP 的振荡器相位。这意味着, 如果每个 AP i 知道其在时间 t 时的相位 $e^{j\omega_{Ti}t}$, 它可以简单地对该相位补偿, 从而该 AP 不需要任何额外的频率或相位测量。遗憾的是, 这不切实际。AP 无法测量其本地振荡器的确切相位变化。

我们解决了这一难题。我们注意到, 当乘以 $1 = e^{j\omega_{T1}t} e^{-j\omega_{T1}t}$ 时, 相位方程式不会改变, 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(t) &= e^{j\omega_{T1}t}\mathbf{R}(t)\mathbf{H}\mathbf{T}(t)e^{-j\omega_{T1}t} \\ &= \begin{pmatrix} e^{j(\omega_{T1}-\omega_{R1})t} & 0 \\ 0 & e^{j(\omega_{T2}-\omega_{R2})t} \end{pmatrix} \mathbf{H} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j(\omega_{T2}-\omega_{T1})t} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

由于新观察到的频道阵列依然是对角的, 客户端仍然能够继续像之前一样解码收到的信号。

这个系统实现了我们最初的直觉。

5. JMB 协议

我们先简要介绍该协议, 然后再进行详细的阐述。

JMB 的分布式传输协议分为两个阶段:

- JMB 首先进行频道测量阶段, 其中 AP 测量两种类型的频道: (1) 自身到接收器的频道 (即频道矩阵 \mathbf{H}), 此为波束成形频道矩阵, 其逆矩阵被 AP 用来并发传输数据到其客户端; 以及 (2) 主导 AP 至各个从属 AP (h_i^{lead}) 的频道, 它使得各个从属 AP 能够确定其与主导 AP 的振荡器相对偏移。
- 频道测量阶段之后为数据传输阶段。在这一阶段中, AP 通过联合传输数据将并发数据包传送到多个接收器。在各个从属 AP 校正其相对于主导 AP 的频率偏移后, 数据传输使用波束成形。

请注意, 单一频道测量阶段后可以接多个数据传输。频道只需按照相干时间的顺序重新计算, 在典型的室内场景中相干时间为几百毫秒。⁵第 7 节更加详细地阐述 JMB 如何减少频道测量开销。

我们现在详细阐述频道测量和数据传输这两个阶段。(以下描述假定了符号级时间同步, 我们对其使用了 Rahul 等人文章¹⁷中介绍的方案, 该方案提供了最高几纳秒的严格同步。我们的实验结果也纳入了对该方案的实施。)

5.1. 频道测量

频道测量的目标是获取所有 AP 到所有客户端的频道 (即 \mathbf{H}) 和主导 AP 至从属 AP 的参照频道 (即 h_i^{lead}) 的快照, $\forall i$ 。

关键在于, 所有这些频道必须在同一时间进行测量, 即参照时间 $t = 0$ 。否则, 频道将因为频率偏移而

相对于对方旋转，从而出现不一致。下面，我们将频道测量划分为几个子步骤。

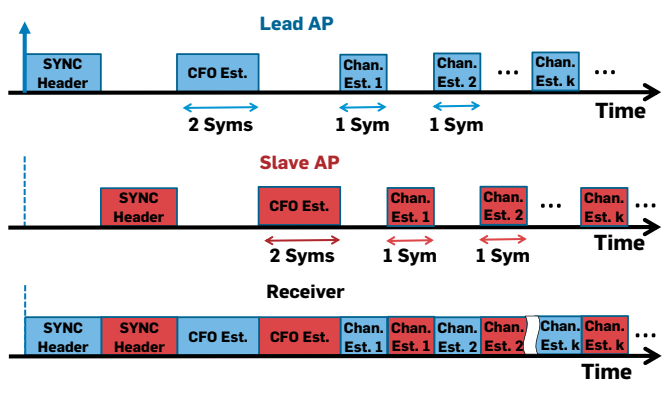
(a) **收集测量结果。** 主导 AP 启动频道测量阶段，其使用一个同步标头，后接频道测量符号，即已知的正交频分多路复用 (OFDM) 符号，客户端使用它们来估算频道。频道测量符号由恒定间隙分隔，其选用的值应允许从属 AP 交错发送自己的频道测量符号和来自主导 AP 的符号。当从属 AP 收到同步标头时，它们就知道在该间隙中逐个传输其频道测量符号，如图 3 所示。

因此，频道测量符号是重复且交错传输的。重复传输是为了通过取多个估值的平均值让客户端获得准确的频道测量结果，从而降低噪声的影响。交错传输是因为我们希望频道测量就像是在同一时间执行的那样。由于完全同时传输将导致 AP 互相干扰，JMB 通过交错传输来自不同 AP 的符号来近似同时传输。

(b) **估算客户端的 H。** 在收到图 3 中的数据包后，每个客户端执行三项任务：计算其对各个 AP 的载波频偏 (CFO)；然后使用其知道的已传输符号和 CFO 计算各个 AP 至其自身的频道；最后，使用其知道的 CFO 旋转频道的相位，使它们就如在完全相同的时间测量的一样。下面我们详述这些任务。

不同的发射器（如 AP）具有相对于接收器的不同振荡器偏移，各个接收器需要测量来自各个发射器的频率偏移，从而适当地校正来自该发射器的对应符号。为此，频道测量传输使用来自各个 AP 的 CFO 符号，后接与传统 OFDM 相似的频道估值符号。⁹ 唯一差别是接收器计算和使用与不同 AP 对应的不同 CFO 和频道估值。

图 3. AP 和接收器角度的数据包结果。蓝色表示的符号由主导 AP 传输，红色表示的符号由从属 AP 传输，而白色表示的符号则反映了静默期间。



请注意，这些频道估值依然不是完全同时的；具体而言，从属 AP i 的频道估值符号与主导 AP 的符号相隔 $i - 1$ 个符号宽度，如图 3 中所示。接收器通过将 AP i 的估算频道旋转 $e^{-j\Delta\omega_i(i-1)kT+D}$ （在每个 OFDM 子载波中）进行补偿，其中 T 是一个 OFDM 符号的持续时间， k 是交错符号的指数，而 D 则是主导 AP 同步标头的持续时间。这可确保所有频道在同一参照时间测量，即同步标头的起点。接收器对来自各个 AP 的频道估值（在各个 OFDM 子载波中）取平均值，以抵销噪声并获得准确的估值。接收器然后通过无线频道将这些估算的频道回送到发射器。

(c) **估算从属 AP 的 h_i^{lead} 。** 每个从属 AP 使用同步标头计算参照时间时主导 AP 到自身的频道值 $h_i^{\text{lead}}(0)$ 。

请注意，在频道测量阶段的末尾，各个从属 AP i 具有可用于波束成形的整个频道矩阵，以及来自主导 AP 的一个参照频道 $h_i^{\text{lead}}(0)$ ，它将在数据传输期间用于对应于一个参照时间测量的所有频道。

5.2. 数据传输

既然频道已测量好，AP 就可使用波束成形来传输数据，而不会有干扰。

(a) **AP 协调：** AP 需要就一个波束成形帧内并发发送的数据包达成一致。为此，我们利用后端千兆以太网的带宽将所有客户端数据包发送到所有 AP。主导 AP 做出所有控制决定，并通过以太网传达到从属 AP。具体而言，它决定哪些数据包合并到一个数据传输中，并通过有线后端传达到从属 AP。

(b) **波束成形：** 客户端数据包从系统中参与的 JMB AP 通过联合波束成形进行传输。注意从属 AP 需要在传输之前校正其信号的相位。其中一种方式是，每个从属 AP 估算主导 AP 至自身的频率偏移 $\omega_{\text{lead}} - \omega_{\text{slave}}$ （使用来自上一阶段的同步标头），然后通过计算 $(\omega_{\text{lead}} - \omega_{\text{slave}})t$ 来计算净已逝相位，其中 t 是自执行频道测量起已过的时间。然而，这将由于初始频率偏移测量不精确而造成误差随时间推移大量累积。例如，即使是初始频率偏移测量中 100Hz 的小误差，也可导致在短至 20ms 的时长内造成 π 弧度的巨大相位误差，因而会大大影响校正波束成形所需的相位一致。除非解决这一问题，否则此误差将妨碍 JMB 在频道相干时间内（如 250ms）分摊单一频道测量的成本，而且让系统不得不每隔几个毫秒就重复测量 H 的过

程，也就意味着几乎每个数据包都产生将频道从所有客户端传到 AP 的开销。

JMB 通过直接测量主导 AP 和从属 AP 之间的相位差异，避免在较大的时间尺度上累积误差的问题。换言之，JMB 不将频率偏移 $\Delta\omega (= \omega_{\text{lead}} - \omega_{\text{slave}})$ 和已过时间相乘（这会导致误差随时间累积），而是直接测量相位差异 $\Delta\phi(t) (= (\omega_{\text{lead}} - \omega_{\text{slave}})t)$ 。

在 JMB 中，主导 AP 使用同步标头发起数据传输，这与频道估算中相似。每个从属 AP 使用此同步标头计算主导 AP 到自身的当前频道 $h_i^{\text{lead}}(t)$ 。注意，当前频道将由于主导 AP 和从属 AP 之间的振荡器偏移，而相对于参照频道旋转。具体而言， $h_i^{\text{lead}}(t) = h_i^{\text{lead}}(0) e^{j(\omega T_1 - \omega T_2)t}$ 。因此，每个从属 AP 从它对主导 AP 的两次测量中直接计算 $e^{j(\omega T_1 - \omega T_2)t}$ 。这样的估算不会有误差随时间而累积，因为它单纯是两次直接测量结果相除。从属 AP 而后将传输的信号与此数量相乘，如第 4 节中所述。

由于所有 AP 振荡器在数据传输开始时都同步，从属 AP 也需要在实际数据包本身的期间内保持其振荡器与主导发射器同步。为此，它将其传输的信号与 $e^{j(\omega T_1 - \omega T_2)t}$ 相乘，其中 t 是自联合传输开始时首次相位同步起的时间。请注意，这一偏移估算仅需要在数据包期间内准确，即持续几百微秒或者最多约 2 毫秒时间。JMB AP 跨越多个传输维护其与主导发射器的偏移的连续平均数，以获得一个能够在数据包以内保持精确相位同步的可靠估值。

还需要注意两点。其一，为了便于阐述，到目前为止我们在校正载波频偏的范畴内讨论了整个系统。然而，任何实际的无线系统也须考虑采样频率偏移。注意，采样频率中的任何偏移只会增加各个 OFDM 子载波中的相位误差。由于我们的相位偏移估算使用同步标头（如第 5 节所述）估算总体相位，它会自动计入从采样频率偏移中累积的初始相位误差。在各个数据包内，JMB 从属 AP 使用长期平均数估值校正数据包期间采样频率偏移的影响，这与载波频率偏移相似。

其二，如前面第 5 节中所述，JMB AP 使用 Rahul 等人文章¹⁷中所述的方案进行时间上的同步。正如 Rahul 等人文章¹⁷中所述，由于不同发射器和不同接收器之间传播延迟的差异，无法同步所有传输的信号而使它们在完全相同的时间到达所有接收器。务必要注意的是，即使存在不同发射器和接收器之间的传播延迟差异，JMB 也能正确工作。这是因为来自不同的 JMB AP 的信号将在互相的循环前导期内到达所有接收器。^b 一个接收器上来自不同 AP 的信号之间的延迟差异将转化为这些 AP 到该接收器的频道之间的相对相

位差异。JMB 的频道测量阶段将这些相对相位差异捕获在频道矩阵中，之后，JMB 的波束成形在计算频道阵列的逆矩阵时已包含了这些相位差异的影响。

5.3. 总体原则

总而言之，JMB 的设计遇到的核心挑战是准确估算和追踪 N 个客户端和 N 个 AP 中每一组合之间的相位差异。这一挑战因为以下两个原因而特别严峻：(1) 每个接收器必须同时追踪 N 个独立发射器的相位；(2) CFO 中估值的误差导致随时间累积的相位偏移，快速造成非常大的误差。我们应对这些难题的总体方式是：让所有发射器和接收器将其相位与单个主导发射器同步。我们对这一方式的实施通过遵循三大总体原则来引导：

- **在 AP 之间以及在数据包以内，可以使用估算的频率和采样偏移来追踪相位：**我们可以测量 AP 之间的频率和采样偏移，其准确度足够，可使单个数据包内（十到几百微秒）累积的相位差异不足以伤害到性能。具体而言，由于 AP 是基础结构的组成部分，CFO 不会随时间有巨大改变，我们可以通过对许多数据包提取的样本取平均值，获得 AP 之间 CFO 的准确估值。
- **在 AP 之间以及跨越数据包时，不可使用估算的频率和采样偏移来追踪相位：**跨数据包时间尺度（数十到数百毫秒）已过大，即便频率和取样偏移估值非常准确，从遗留误差累积的相位差异也会导致性能严重降低。为解决这一问题，JMB 使用单一标头符号来直接估算总相位偏移，然后在各个数据包的开头重新同步所有节点的相位。
- **在客户端和 AP 之间，不可使用估算的频率和取样偏移来追踪相位，即便是一个数据包期间：**由于客户端是网络的瞬变部分，我们无法获取足够准确的频率和取样偏移估值来用于相位追踪，即使是在一个数据包以内。因此，各个客户端使用标准的 OFDM 技术逐个符号追踪主导 AP 的相位。此外，当执行频道估算时，AP 交错其数据包，以便频道对通用参考时间的校正达到最小误差。

6. 与 802.11 的兼容性

要让 JMB 适用于使用现成 802.11n 卡的客户端，JMB 需要解决两个难题：

^b 实际上，由于 JMB 的常见设计场景是会议室和礼堂等限定的位置，不同 AP 至接收器的传播延迟差异在数十纳秒范围内，小于为最糟糕多路径情形而设计的 802.11 循环前导期（400 或 800 纳秒）。

1. **同步标头**: 同步标头由主导 AP 传出, 以允许从属 AP 计算其振荡器偏移并发起它们的传输, 它不受 802.11 支持。
2. **频道测量**: 按前文所述, JMB 需要在同一时间测量从所有发射器到所有接收器的频道的快照。在第 4 节中, 我们介绍了如何通过带有交错符号的自定义频道测量数据包格式来实现这一目的, 它允许接收器测量来自所有发射器的频道。但是, 这样的数据包不受 802.11 支持, 所以 802.11n 卡无法在同一时间同步测量来自所有 AP 的频道。

JMB 通过将 802.11n 频道状态信息 (CSI) 反馈用于波束成形解决了这些问题。我们现在介绍 JMB 针对上述难题的解决方案。

6.1. 同步标头

JMB 中的主导 AP 需要在每个传输前加上同步标头前缀, 以允许从属发射器测量它们相对于主导发射器的振荡器偏移, 并触发它们的联合传输。混合模式 802.11n 数据包基本上包含一个 802.11n 数据包, 以及由五个传统符号组成的前缀。这些传统符号仅用于触发 802.11a/g 节点中的载波侦听, 而不供 802.11n 接收器使用。因此, 主导 JMB 可将这些传统符号用作同步标头。JMB 从属 AP 使用这些传统符号测量它们相对于主导 AP 的振荡器偏移, 校正其传输信息, 然后在传输实际的 802.11n 符号时将主导 AP 的传输加入到传统符号之后。

6.2. 频道测量

802.11n 不支持交错数据包格式, 而该数据包格式允许 JMB 同时测量从所有发射器到一个接收器的频道的快照。此外, 配有 K (最多为 4) 根天线的 802.11n 接收器一次最多可测量 K 个频道。在 JMB 系统中, 所有 AP 的发射天线总数大于任何一个接收器上的天线数量。因此, 配有现成 802.11n 卡的接收器将无法同时测量所有发射天线到自身的频道。

一种简单的做法是, 可以通过传输来自各个 AP 的独立数据包, 测量所有发射天线的频道, 然后按照第 5.1 节中所述, 使用对接收器的估算频率偏移来校正这些测量。

在第 5.1 节中的场景中, 来自不同 AP 的传输通过几个符号 (利用交错) 相互隔开, 此处则不同, 来自不同 AP 的传输之间至少相隔一个数据包宽度。如第 5.3 节中所述, 由于接收器频率偏移估值中的不准确性, 这一间隔将导致累积成巨大的相位误差。

与之相反, JMB 通过“诱骗”接收器同时测量来自不同 AP 天线的频道, 来执行频道测量。这一诱骗使得 JMB 能够结合至接收器的通用参照频道, 测量各个 AP 到接收器的频道。在所有测量中使用这一通用参照, JMB 便可避免测量接收器频率偏移, 而去直接估算和补偿不同测量之间的相位偏移, 如我们在第 7 节中所述。

为简单起见, 我们重点阐述图 4 中的场景: 具有两个 AP 和一个客户端, 每个节点配有两根天线。我们仅阐述至 R_1 的测量, 因为至 R_2 的频道自然以完全相同的方式与 R_1 一并测量。

在时间 t_0 时, L_1 和 L_2 联合将双流数据包传输到 R_1 。此测量向我们提供了频道 $L_1 \rightarrow R_1$ 和 $L_2 \rightarrow R_1$ (时间 t_0 时)。此外, S_1 使用同步标头测量频道 $L_1 \rightarrow S_1$ 。

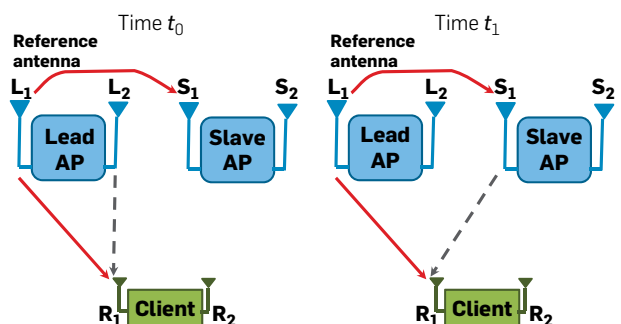
在时间 t_1 时, L_1 和 S_1 通过从两个不同的 AP 联合传输双流数据包来诱骗接收器。此测量向我们提供了频道 $L_1 \rightarrow R_1$ 和 $S_1 \rightarrow R_1$ (时间 t_1 时)。 S_1 再一次使用同步标头测量频道 $L_1 \rightarrow S_1$ 。

问题是希望获得时间 t_0 时的频道 $S_1 \rightarrow R_1$, 但我们只有在 t_1 测量的频道 $S_1 \rightarrow R_1$ 。

因此, 我们需要根据在时间间隔 t_0 到 t_1 内 S_1 和 R_1 之间累积的相位偏移来校正我们测量的频道。为此, 我们可利用这样一个事实: 可以计算时间间隔 t_0 到 t_1 内 L_1 和 R_1 之间以及 L_1 和 S_1 之间累积的相位偏移。

- L_1 和 R_1 : 我们可使用在时间 t_0 和 t_1 测量的频道 $L_1 \rightarrow R_1$, 计算这一累积的相位偏移。
- L_1 和 S_1 : 我们可使用在时间 t_0 和 t_1 测量的频道 $L_1 \rightarrow S_1$, 计算这一累积的相位偏移。

图 4. 802.11n 频道测量。JMB 通过发送一系列双流传输测量到 802.11n 客户端的频道。每一传输包含参照天线 L_1 , 以及另一个天线 (我们的示例中为 L_2 或 S_1)。为清晰起见, 图中未显示发往 / 发自 R_2 和 S_2 的传输, 但 JMB 会自然地同时测量到 R_2 的频道。



这两个累积相位偏移之间的差，就是我们所需的时间间隔 t_0 到 t_1 内 S_1 和 R_1 之间的累积相位偏移。

我们可以类似地测量下一时间段（如 t_2 ）中的频道 $S_2 \rightarrow R_1$ ，并将它转回到时间 t_0 。我们可以对所有 AP 天线重复这一过程。

7. 分离测量到不同的接收器

第 4 节中的方案假定所有 AP 到所有接收器的所有频道是同时测量的。在第 6.2 节中，我们展示了能够为单个接收器放松这一假设。也就是说，我们可以使用所有 AP 针对该接收器的一个共享参考测量，在不同的时间测量不同 AP 到该接收器的频道。但是，到其他接收器的频道呢？如果这一接收器是在第一个接收器的频道测量之后加入网络的，那么两个接收器之间就不可能有共享参考测量。因此，这似乎表明，JMB 对所有频道在同一时间测量的要求将导致每当有接收器加入网络时，或有一个接收器的频道发生改变时，需要重新测量到所有接收器的频道。

实际上，我们可以证明，这样的完整测量是不必要的，而且 JMB 可以将频道测量分离到不同的接收器。主要想法是：JMB 可以将主导 AP 到从属 AP 的频道作为共享的参考，而不是像第 6.2 节中的情形那样，使用从主导 AP 到接收器的频道。Rahul 等人文章¹⁸中证明，使用这一共享参考可使 JMB 在不同的时间测量至不同接收器的频道，而且依然正确执行多用户波束成形。

8. 多样性

目前，我们已探讨了将 JMB 用于多路复用。相同的原则适用于多样性，除了在本例中，所有 AP 联合传输到一个客户端（如客户端 1）。每一 AP 然后将波束成形后的信号计算为 $\frac{h_i}{\|h_i\|} x_1$ ，从属 AP 继续像之前一样执行分布式相位同步。

9. JMB 的链路层

在本文中，我们介绍了 JMB 使多个 AP 同时向多个接收器传输的物理层。建议读者阅读本文的完整版本¹⁸，了解如何设计 JMB 的链路层（MAC、载波检测、应答和重传等）以使用此功能。

10. 测试平台和实施

我们在 USRP 中实施了 JMB 的 AP 设计，并利用 USRP 和现成 802.11n 客户端进行评估。

(a) **软件无线电测试平台实施**：每一节点配备 USRP2 板和 RFX2400 子板，并在 2.4GHz 范围内的 10MHz 频道上通信。我们利用各种 802.11 调制

（BPSK, 4QAM、16QAM 和 64QAM）和编码率在 GNURadio 中实施，并且使用有效的 SNR 比特率选择算法⁸在它们之间挑选。

为执行正确的相位校准，并发发射器必须在相同的级别上同步。为此，我们使用 USRP2 时间戳同步发射器，而不管软件带来的延迟。在各个数据包之前，主导 AP 在 t_{trigger} 时对媒体发送触发信号。所有其他 AP 记录此信号的时间戳，为其添加一个固定的延迟 t_{Δ} ，然后在这一新时间进行并发传输。我们根据软件实施的最大延迟，将 t_{Δ} 选择为 $150\mu\text{s}$ 。最后，为了优化软件周转，我们没有使用 GNURadio，而是自己编写了与 USRP 硬件直接交互的 C 代码。

(b) **802.11n 测试平台实施**：这一测试平台和上文所述测试平台之间存在两大差别。首先，这一平台中的各个客户端使用现成的 802.11n 卡。其次，各个节点具有两根天线，可以当做 MIMO 节点。我们的目标是展示 JMB 可以超越单天线系统；例如，它可以组合两个 2×2 MIMO 系统创建一个 4×4 MIMO 系统。

每个 AP 由两个与外部时钟连接的 USRP2 节点组成，充当一个双天线节点。每个客户端是配有 Intel Wi-Fi Link 5300 a/b/g/n 无线网络适配器（启用了两根天线）的 PC。Intel Wi-Fi Link 5300 适配器使用自定义固件和相关的 iwlmwifi 驱动程序进行了更新，以便能获取用户空间中的频道状态信息。⁷

AP 软件实施与另一测试平台相似，不同点在于，我们使用频道宽度 20MHz 和 802.11n 卡通信。数据包格式也更改为与 802.11n 匹配。客户端软件从固件收集频道测量结果，并记录正确解码的数据包。

(c) **测试平台拓扑**：我们在室内测试平台（如 Rahul 等人文章¹⁸中所示）评估 JMB，该测试平台模拟了 AP 部署在天花板附近的壁架、客户端分散在房间内各处的会议室场景。在每一轮测试中，AP 和客户端随机指派到这些位置。测试平台呈现了多样的 SNR，以及直视和非直视路径（由柱子、家具和壁架等障碍物造成）。AP 传输 1500 字节数据包到客户端。

11. 结果

我们通过在 USRP 和 802.11n 测试平台对 JMB 的组件和集成系统进行微基准测试来评估 JMB。建议读者阅读 Rahul 等人的文章¹⁸以了解相关的微基准测试，本节中我们重点介绍系统性能。

11.1. 通过 AP 数量增加网络吞吐率

JMB 的主要目标是通过 AP 的数量来增加网络吞吐率。本实验验证 JMB 能否实现该目标。

方法。我们在三个有效 SNR 范围内评估 JMB 的性能: 低 (6–12 dB)、中 (12–18 dB) 和高 (>18 dB)。对于每个范围, 我们在测试平台中的随机 AP 位置上放入一定数量的 JMB 节点。然后在随机的客户端位置上放入相同数量的节点, 以便所有客户端均获得所需范围内的有效 SNR。对于每个这样的拓扑, 我们测量通过 802.11n 和 JMB 获得的吞吐率。由于 USRP2 因为软件延迟而无法执行载波检测, 我们通过调度各个客户端使其获得相等的媒体份额, 来测量 802.11n 吞吐率。我们针对 20 种不同的拓扑重复了该实验, 而且也改变了各个 SNR 范围的 JMB AP 数量。

结果。图 5(a)、(b) 和 (c) 显示 802.11n 和 JMB 在不同 AP 数量和不同 SNR 范围获得的总吞吐率。请注意, 和我们预期的一样, 获得的吞吐率随 SNR 而增加 (802.11n 吞吐率在低 SNR 时的吞吐率为 7.75 Mbps, 在中 SNR 时大约 14.9 Mbps, 而高 SNR 时则为 23.6 Mbps)。需要注意的主要有两点:

- 802.11n 无法从增加同一频道上运行的 AP 数量中获益, 而且给定的时间上仅允许一个 AP 处于活动状态。因此, 即使 AP 数量在增加, 其吞吐率依然保持不变。在实际的 802.11n 网络中, 这一吞吐率可能会因为拥塞而随着 AP 的数量改变出现变化; 然而, 由于 USRP 不具备载波检测, 我们通过向各个客户端提供相等的媒体份额来计算 802.11n 吞吐率。JMB 与之相反, 在我们增加 AP 数量时, JMB 可使用这些 AP 向更多接收器并发送传输数据包。因此, JMB 的吞吐率可随 AP 数量线性增长。

- JMB 提供的绝对增益在高 (~9.4 倍, 10 个 AP) 和中 (~9.1 倍) SNR 时比低 SNR (~8.1 倍) 时的高。这是波束成形理论上预测的吞吐率的结果。具体而言, N 个 AP 的波束成形吞吐率按照 $N \log\left(\frac{\text{SNR}}{K}\right) = N \log(\text{SNR}) - N \log(K)$ 缩放, 其中 K 取决于频道矩阵 \mathbf{H} , 并且与我们的调节程度相关。²³ 自然频道矩阵可被视为随机并且良好调整, 因此 K 对于我们的目的基本上可以视为常量。802.11n 吞吐率大体上按照 $\log(\text{SNR})$ 缩放。²³ 因此, JMB 相对于 802.11n 的预期增益可以写为 $N\left(1 - \frac{\log(k)}{\log(\text{SNR})}\right)$, 而且随着 SNR 的增加它会越来越接近于 N 。这就是为何 JMB 的增益在较低 SNR 上的增长速率要慢于较高的 SNR。

11.2. 与 802.11 兼容性

最后, 如第 6 节中所述, JMB 兼容现有的 802.11n 卡。在本节中, 我们将研究 JMB 在与市面上 802.11n 卡搭配时是否能提供吞吐率增益。进一步而言, 由于此系统中的各个 AP 和各个 802.11n 卡均具有两根天线, 本实验也要验证 JMB 能否对多天线发射器和接收器提供预期的增益。

方法。我们将两个 JMB 节点放在测试平台中的随机 AP 位置, 并将两个 802.11n 接收器放在测试平台中的随机客户端位置。对于每一种拓扑, 我们计算使用 802.11n 和 JMB 时的吞吐率。与之前相同, 我们通过向每一发射器提供相等的媒体份额来计算 802.11n 吞吐率。我们对多拓扑和整个 SNR 范围重复该实验。

结果。图 6 显示 SNR 为低、中、高时使用和不使用 JMB 的总吞吐率。由于我们在本实验中使用了两个接收器, 对 802.11n 的理论增益是 2 倍。该图表显示 JMB 在所有 SNR 范围内提供 1.67–1.83 倍的平均增益。与使用 USRP 接收器时的情形相似, 高 SNR 范围内的增益要大于低 SNR 范围内的增益。

图 5. 随 AP 数量缩放吞吐率。在本实验中, AP 的数量等于接收器的数量。在所有 SNR 上, JMB 的网络吞吐率随着 AP 数量的增加而线性增长, 而 802.11 总吞吐率则保持恒定。(a) 高 SNR (>18 dB); (b) 中 SNR (12–18 dB); (c) 低 SNR (6–12 dB)。

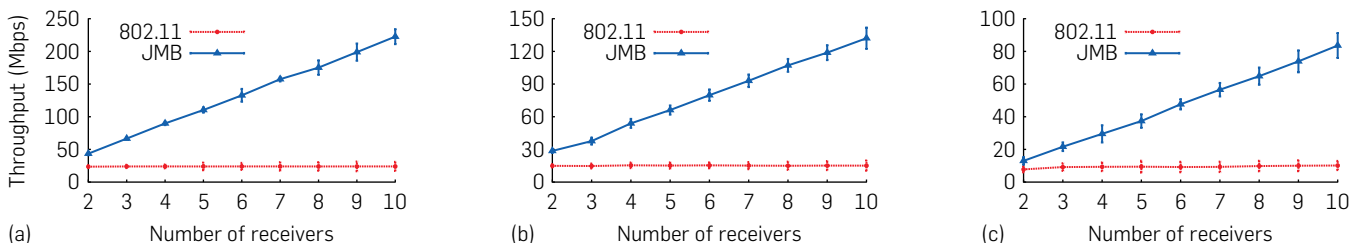


图 6. JMB 对线程 802.11n 卡实现的吞吐量。JMB 大幅提高现成 802.11n 卡在高 (>18 dB)、中 (12–18 dB) 和低 (6–12 dB) SNR 上的性能。

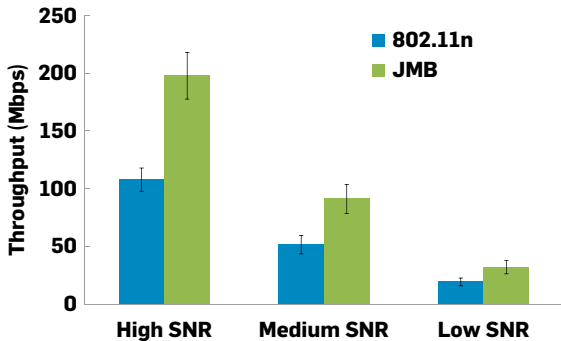
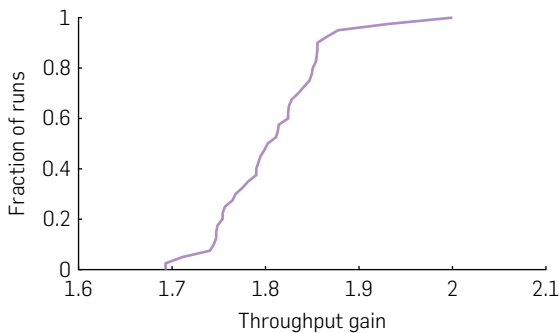


图 7. 公平结果。对于测试平台中的所有节点，JMB 提供了 1.65–2 倍的吞吐量增益，其在各 SNR 范围的中值增益为 1.8 倍。这表明 JMB 可为网络中的每个节点提供相似的吞吐量增益。



我们现在研究 JMB 的公平性，即 JMB 是否能为网络中所有位置和 SNR 的每一个接收器带来吞吐量增益。图 7 显示所有运行中 JMB 与 802.11n 相比获得的吞吐量增益的累积分布函数 (CDF)。结果表明，JMB 为所有接收器带来 1.65–2 倍的吞吐量增益，因而对网络中的接收器而言具有公平性。

12. 结论

本文探讨了分布式独立发射器联合波束成形的实现。提供这一系统的主要挑战是在多个分布式发射器之间执行准确的相位同步。从构建系统并利用真实硬件进行测试中我们得到了以下收获：(1) 频率偏移的估值可以足够准确，以预测（因而校正）802.11 数据包中的相位不齐；但这些估值无法跨越多个数据包使用，因为相位误差会随时间大量累积；(2) 通过根据一个主导发送方同步所有发送方的相位，可以实现联合多用户波束成形，并且不会对接收方造成任何相位同步限制。

我们相信 JMB 设计的意义要比本文中所探讨的更为广泛。具体而言，信息理论的几个方面，如格编码、有噪网络编码和认知网络发射器协调等^{11,13,14} 假定发射器之间严格的相位同步。我们乐观地相信，本文中所示的算法能够使这些理念更接近于现实。 □

参考资料

- Aryafar, E., Anand, N., Salonidis, T., Knightly, E. Design and experimental evaluation of multi-user beamforming in wireless LANs. In *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '10)* (2010). ACM, New York, NY, 197–208. doi:10.1145/1859995.1860019.
- Berger, S., Wittneben, A. Carrier phase synchronization of multiple distributed nodes in a wireless network. In *Proceedings of 8th IEEE Workshop on Signal Processing Advances for Wireless Communications (SPAWC)*, (Helsinki, Finland Jun.2007).
- Distributed Antenna Systems. <http://medicalconnectivity.com/2008/02/05/distributed-antenna-systems-no-replacement-for-wireless-strategy>.
- Forenza, A., Heath, R.W., Jr., Perlman, S.G.. *System and Method for Distributed Input-Distributed Output Wireless Communications*. U.S. Patent Application number 20090067402.
- Goldsmith, A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- Greentouch Consortium. <https://www.youtube.com/watch?v=U3euDDr0uvo>. GreenTouch Demonstrates Large-Scale Antenna.
- Halperin, D., Hu, W., Sheth, A., Wetherall, D. Tool release: Gathering 802.11n traces with channel state information. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 41, 53–53. doi:10.1145/1925861.1925870
- Halperin, D., Hu, W., Sheth, A., Wetherall, D. Predictable 802.11 packet delivery from wireless channel measurements. In *ACM SIGCOMM* (2010).
- Heiskala, J., Terry, J. *OFDM Wireless LANs: A Theoretical & Practical Guide*. Sams Publishing, 2001.
- The iPad and its impact on hotel owners and operators. http://www.ibahn.com/en-us/public/docs/The_Impact_of_iPad.pdf. iBAHN.
- Lim, S., Kim, Y., El Gamal, A., Chung, S. Noisy network coding. In *IEEE Information Theory Workshop* (2010).
- LTE: MIMO techniques in 3GPP-LTE. http://lteportal.com/Files/MarketSpace/Download/130_LTEMIMOTEchniquesFreescaleNov52008.pdf.
- Maric, I., Liu, N., Goldsmith, A. Encoding against an interferer's codebook. In *Allerton* (2008).
- Nazer, B., Gastpar, M. The case for structured random codes in network capacity theorems. *Eur. Trans. Telecommun.* 19, 4 (2008).
- Network MIMO. http://www.alcatel-lucent.com/wps/DocumentStreamerServlet?LMSG_CABINET=Docs_and_Resource_Ctr&LMSG_CONTENT_FILE=Data_Sheets/Network_MIMO.pdf. Alcatel-Lucent.
- Ozgun, A., Leveque, O., Tse, D. Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks. *IEEE Trans. Info. Theor.* 53, 10 (Oct. 2007), 3549–3572. doi:10.1109/TIT.2007.905002.
- Rahul, H., Hassanieh, H., Katabi, D. Sourcesync: A exploiting wireless architecture for exploiting sender diversity. In *SIGCOMM* (2010).
- Rahul, H., Kumar, S., Katabi, D. JMB: Scaling wireless capacity with user demands. In *ACM SIGCOMM 2012* (Helsinki, Finland, Aug. 2012).
- Distributed-input distributed-output wireless technology. http://www.rearden.com/DIDO/DIDO_White_Paper_110727.pdf. Rearden Companies.
- Mobile broadband capacity constraints and the need for optimization. http://rysavv.com/Articles/2010_02_Rysavy_Mobile_Broadband_Capacity_Constraints.pdf. Rysavy Research.
- Tan, K., Liu, H., Fang, J., Wang, W., Zhang, J., Chen, M., Voelker, G.M. SAM: Enabling practical spatial multiple access in wireless LAN. In *MobiCom* (2009).
- Thibault, I., Corazza, G., Deambrogio, L. Phase synchronization algorithms for distributed beamforming with time varying channels in wireless sensor networks. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International* (Jul. 2011), 77–82.
- Tse, D., Vishwanath, P. *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- Turn off your Wi-Fi network! <http://www.youtube.com/watch?v=fFiJ5rnIPVw>. Steve Jobs iPhone4 Keynote.

Hariharan Rahul (rahul@csail.mit.edu) 就职于美国马萨诸塞州剑桥的麻省理工学院计算机科学和人工智能实验室 (CSAIL)。

Swaran Kumar 和 Dina Katabi ([swaran, dk]@mit.edu) 就职于美国马萨诸塞州剑桥的麻省理工学院。

译文责任编辑：陈文光