

应用室内结构布局提高Wi-Fi定位精度和稳定性

周 瑞

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

【摘要】采用基于历史的Wi-Fi指纹定位算法,根据若干个时间上连续的Wi-Fi信号指纹进行移动设备的室内定位。提出将室内结构和布局通过无向连通图进行建模,并将其应用到基于历史的Wi-Fi指纹定位算法中。实验结果表明,该方法能够明显削弱信号不稳定造成的影响,有效地提高室内定位的精度和稳定性,同时减少错误的房间和楼层估计。针对多楼层情况,提出了一个针对多楼层的处理算法,进一步提高了楼层的正确估计率。

关键词 精度; 室内结构布局; 位置; 定位; Wi-Fi指纹定位

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.02.022

Improve the Accuracy and Stability of Wi-Fi Fingerprinting by Applying the Interior Structure of Buildings

ZHOU Rui

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Wireless positioning technologies and location-based services have gained much attention and development over the past several years. As a compensate to global positioning system (GPS), Wi-Fi positioning, Wi-Fi fingerprinting in particular, which makes use of widely-deployed wireless LANs, has been accepted as a common solution to indoor positioning. Due to the interference of various factors during the signal transmission, positioning accuracy is often degraded and unstable. The estimation of the room and the floor that the user is in is often wrong. This paper proposes to use a history-based Wi-Fi fingerprinting algorithm in combination with the interior structure of the building for indoor positioning. Experiments show that the enhanced algorithm is able to improve the accuracy and stability of Wi-Fi fingerprinting and reduce wrong estimations of rooms and floors. Furthermore, this paper proposes a multi-floor handling algorithm which is able to reduce wrong estimations of floors.

Key words accuracy; interior structure; location; positioning; Wi-Fi fingerprinting

移动计算的发展促进了位置服务(location-based services)的产生和发展。位置服务能够根据用户的当前地理位置推测用户的兴趣或正在进行的活动,并据此提供更适合该用户的信息和服务。汽车导航系统、城市导游系统、博物馆参观讲解系统、移动黄页、紧急定位救援系统、贵重设备监控等都是位置服务的实例^[1]。位置服务的最基本和最重要的前提是一个精确的能够满足应用需求的定位系统,没有定位系统提供的用户位置,位置服务无从谈起。GPS是目前使用最为广泛的定位系统^[2],并已经成为室外导航的事实标准。但是在室内和高楼密集的城市中心区域,由于无法接收到良好的卫星信号,GPS的定位精度大大降低,甚至无法定位。而Wi-Fi定位可以用来弥补GPS的不足。Wi-Fi定位根据移动设备

从802.11无线接入点接收到的信号确定移动设备的位置,由于利用广泛架设的802.11无线局域网,因而不产生额外的费用。但是Wi-Fi信号在传输过程中会受到各种外界因素的干扰,常呈现出信号不稳定的现象,导致Wi-Fi定位也存在定位精度不够高和不稳定的问题。同时,Wi-Fi信号具有穿透能力,不同房间或不同楼层的邻近位置常具有相似的信号指纹,使传统的Wi-Fi定位算法难以区分不同楼层和房间。

本文采用基于历史的Wi-Fi指纹定位算法,即使用若干个时间上连续的信号指纹进行定位,提出将室内结构和布局应用到该算法中,以提高Wi-Fi定位的精度和稳定性,并正确估计出用户所在的房间和楼层。针对多楼层环境,本文提出了一个多楼层处理算法,以进一步提高楼层的正确估计率。

收稿日期: 2011-08-09; 修回日期: 2012-03-01

作者简介: 周瑞(1974-),女,博士,主要从事定位技术、位置服务、嵌入式系统等方面的研究。

1 Wi-Fi指纹定位

Wi-Fi定位在近几年得到了迅速的发展,国内外学者在该领域做了很多的研究工作^[3-9]。Wi-Fi定位使用广泛架设的802.11无线局域网进行定位,在进行数据通信的同时提供定位服务。Wi-Fi定位存在不同的方法,最常用的是Wi-Fi指纹定位。Wi-Fi指纹指是在某个位置从多个802.11无线接入点接收到的信号强度,如果用SS表示信号强度,AP表示无线接入点的标识(通常用MAC地址表示), n 表示无线接入点的个数,信号指纹SF表示为:

$$SF = ((AP_1, SS_1), (AP_2, SS_2), \dots, (AP_n, SS_n))$$

1.1 指纹采样

实施定位系统之前,需要先对定位区域进行指纹采样(calibration),建立指纹数据库。首先确定遍布整个定位区域的采样点,即参考点。系统管理员遍历这些采样点,使用802.11无线适配器采集在各个采样点的信号指纹,将这些信息存储到数据库中(称为采样数据库或指纹数据库)。每个采样点的信息包括该位置的地理坐标和在该位置采集到的信号指纹。指纹数据库表示为:

$$\text{CalibrationSet} = \{(L_i, SF_i) \mid i = 1, 2, \dots, N\}$$

$$L_i = (x_i, y_i, \text{floor}_i)$$

$$SF_i = ((AP_{i1}, SS_{i1}), (AP_{i2}, SS_{i2}), \dots, (AP_{im}, SS_{im}))$$

式中, L_i 为采样点 i 的位置,由坐标 $(x_i, y_i, \text{floor}_i)$ 表示; SF_i 为在采样点 i 采集的信号指纹; N 为采样点的总个数。

采样点之间的距离对定位精度有一定的影响。采样点间距在1~2 m时定位精度最好,此时减小间距几乎不能再提高精度;间距3~4 m时定位精度略有下降;间距超过4 m后定位精度开始迅速降低^[10]。因此在实际布置定位系统时,需要根据精度要求和定位区域的大小选择采样点之间的距离。对于高精度要求的应用,该距离一般可设为1~2 m。

采样是一个相对费时的过程,特别是对于高精度大范围的应用,由于采样点间距较小,采样点的总个数会很多,而管理员必须遍历所有的采样点才能建立完整的指纹数据库。在较小的区域,采样所需的时间通常不超过几小时,属于可以接受的范围。但是在大型楼宇内,采样成为一个很费时的过程。缩短采样时间可以通过适当缩短在每个采样点的采样时间和适量减少采样点的个数进行,但是定位精度会或多或少受到影响。研究人员提出一种采用径向基函数(radial basis function)插值(interpolation)根

据少量采样数据确定用户位置的算法,并通过实验证明在采样数据大量减少的情况下,该算法能够较少量地降低定位精度。

1.2 最近邻居算法

实际进行定位时,用户移动设备上的802.11无线适配器实时采集当前未知位置的信号指纹,定位算法将该信号指纹与采样数据库中的信号指纹进行比较,最接近的信号指纹所在的采样点被认为是用户的当前位置,该算法称作最近邻居算法(nearest neighbor algorithm)^[3]。最近邻居算法可以采用不同的准则确定最近邻居,信号指纹之间的欧几里德距离(euclidean distance)是其中很常用一种。假设 $SF_x = ((AP_{x1}, SS_{x1}), (AP_{x2}, SS_{x2}), \dots, (AP_{xm}, SS_{xm}))$ 代表当前在未知位置 x 的信号指纹, $SF_i = ((AP_{i1}, SS_{i1}), (AP_{i2}, SS_{i2}), \dots, (AP_{im}, SS_{im}))$ 代表指纹数据库中采样点 i 的信号指纹,则信号指纹 SF_x 和 SF_i 之间的欧几里德距离为:

$$\text{EucDis}(SF_x, SF_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (SS_{xj} - SS_{ij})^2}$$

用户的当前位置 L_x 就是具有最小欧几里德距离的采样点的位置,即:

$$L_x = \{L_m \mid \forall i, \text{EucDis}(SF_x, SF_m) \leq \text{EucDis}(SF_x, SF_i)\}$$

最近邻居算法的效率取决于采样点的个数 N ,如果采用线性查找,该算法的时间复杂度是 $O(N)$ 。对于小型楼房和区域,该算法是可行的;但是对于大型楼宇,随着采样点的增加,线性查找的效率无法满足实时定位的要求,需要对算法进行优化:1) 首先确定各个无线接入点的具体位置及其发射范围,这些信息在放置和配置无线接入点时能够确定下来;2) 在实时定位时,根据在未知位置检测到的无线接入点列表及其位置,以及发射范围初步确定用户所在的大致区域;3) 从该区域内的采样点中通过线性查找确定最近邻居。

2 应用室内结构布局

Wi-Fi信号容易受到其他信号如手机信号、蓝牙信号等的干扰,又存在反射、折射、衍射、多路等现象,定位精度常常不稳定。不同楼层或者不同房间在空间上邻近的位置往往具有相似的信号指纹,定位系统不能正确地区别,从而导致将用户定位在错误的房间或者楼层。而实际上,用户在室内走动时,其位置是连续的,不可能从一个房间跳跃到另一个房间,也不可能从一个楼层跳跃到另一个楼层,

用户走动的轨迹必须符合室内结构和布局。基于此, 本文提出将室内结构和布局应用在基于历史的Wi-Fi指纹算法中, 在实验中取得了良好的效果。

2.1 基于历史的算法

采用当前一个信号指纹确定用户位置很容易受到干扰因素的影响, 因此本文使用多个时间上连续的信号指纹进行定位, 以削弱信号波动的影响^[4]。对于每一个信号指纹, 系统根据欧几里德最近邻居算法找到在该信号指纹的情况下用户最有可能所在的 K 个位置(称为 K 个最近邻居)。以图1为例, 系统使用3个时间上连续的信号指纹进行定位, 即历史深度为3($H=3$), 最近邻居个数为4($K=4$)。图中的圆点为采样点。 a 、 b 、 c 、 d 是信号指纹1的最近邻居, e 、 f 、 g 、 h 是信号指纹2的最近邻居, i 、 g 、 j 、 k 是信号指纹3的最近邻居。该算法获得的最短路径是 $x \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow g$ 。

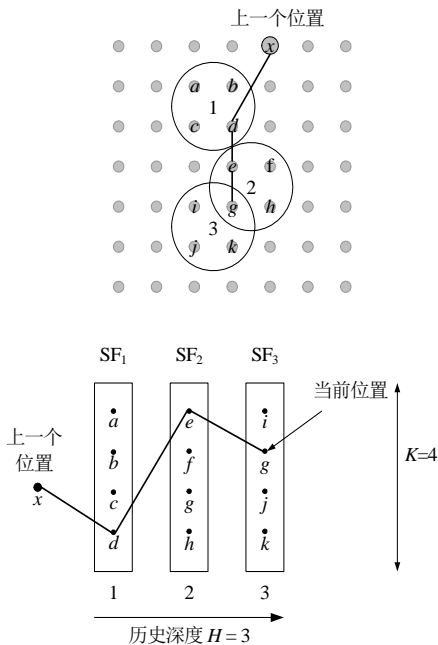


图1 基于历史的Wi-Fi指纹定位算法

在信号指纹1的情况下, 系统找到最近邻居 a 、 b 、 c 和 d ; 在信号指纹2的情况下, 系统找到最近邻居 e 、 f 、 g 和 h ; 在信号指纹3的情况下, 系统找到最近邻居 i 、 g 、 j 和 k ; 这些最近邻居组成一个深度为3的序列。利用Dijkstra最短路径算法系统计算出从上一次用户位置 x , 经过区域1和区域2, 到区域3的最短路径: $x \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow g$ 。该算法中两个位置之间距离是它们的空间直线距离。最短路径的终点 g 被认为是用户的当前位置。

和最近邻居算法相比, 基于历史的算法增加了计算历史序列最短路径的时间。由于历史深度 H 和最近邻居个数 K 都是很小的整数, 这个时间可以忽略

不计, 因此基于历史的算法几乎没有增加计算复杂度。该算法使用若干个时间上连续的信号指纹进行定位, 有效地增强了定位的稳定性, 并在一定程度上提高了定位精度。

2.2 室内结构布局

由于受到外部因素的干扰以及信号的反射和多路等现象, 在室内的不同位置测量得到的信号指纹有可能非常相似, 称作混淆(alias)现象。在墙的两边或者相邻楼层的相同位置都可能发生混淆现象, 虽然这些位置之间的空间直线距离并不大, 但是将用户定位到错误的楼层或者错误的房间属于较大的定位错误。本文提出将室内结构和布局应用到定位算法^[7,11]中, 以减少混淆引起的错误, 同时有效地提高定位精度和稳定性。

应用室内结构和布局, 首先需要确定室内的采样点, 然后根据室内的实际结构和布局确定采样点之间的连通情况。图2所示是一个室内采样点连通情况的例子。图中, 黑点代表采样点, 点与点之间的连线代表它们之间的连通情况。室内采样点的连通情况可以使用无向连通图表示为:

$$G = \langle V, E \rangle$$

$$V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, N\}$$

$$E = \{e_{ij} | i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; i \neq j\}$$

式中, V 表示采样点的集合; v_i 表示采样点 i ; N 表示采样点的个数; E 表示采样点之间直接连通的集合; e_{ij} 表示 v_i 和 v_j 之间直接连通, e_{ij} 的值是 v_i 和 v_j 之间的距离。利用Dijkstra的最短路径算法可以计算出任意两个采样点之间的最短路径距离为:

$$D = \{d_{ij} | i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; i \neq j\}$$

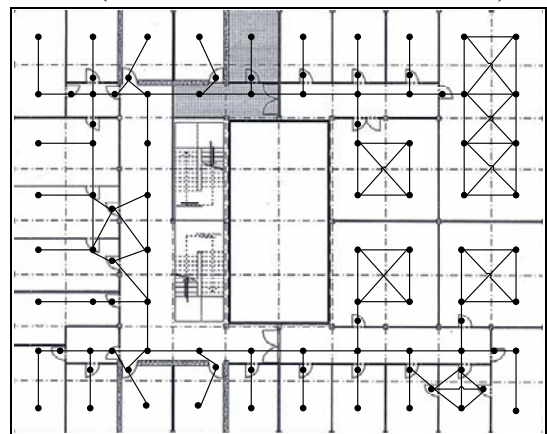


图2 室内采样点连通图

在使用基于历史的Wi-Fi指纹定位算法时, 两个位置之间的距离使用它们之间的最短路径距离, 而不再是空间直线距离。这样室内结构和布局被应用

到了基于历史的算法中。

在实际应用中，任意两个采样点之间的最短路径距离在系统实施之前已被计算好，实时定位的时候直接读取该信息即可，因此几乎不增加计算开销，不会影响到系统定位的实时性。

2.3 多楼层处理算法

在多楼层的情况下，基于历史的Wi-Fi指纹定位算法返回的路径为：

$Path = ((x_1, y_1, floor_1), (x_2, y_2, floor_2), \dots, (x_h, y_h, floor_h))$
 式中， h 为路径长度。

分析实验中获得的路径，常会发现存在 i 和 j ，使 $floor_i \neq floor_j$ 。由于用户不可能在楼层中跳跃，只能通过电梯或者楼梯到达另一楼层，因此，该情况应该予以排除。多楼层处理算法首先找到该路径中发生次数最多的楼层，然后将该路径中楼层号不同的位置删除，剩下的位置组成新的路径，该路径的终点被认为是用户的最终位置^[11-12]。

3 实验结果

本文在一个小型三层楼房里对前面讨论的算法进行了实验^[11]。9个接入点分布在3个楼层内，161个采样点分布在3个楼层的走廊和部分房间内(6个房间)，两个相邻采样点之间的距离大约是1 m。使用的802.11无线适配器是D-Link AirPlus DWL-AG660。对每个采样点对它进行30 s的多方向信号指纹采样，采样间隔为0.5 s，然后将这30 s采样的平均值作为该点的信号指纹。整个采样过程用了约3 h，包括中间的休息调整以及对房间内工作人员的解释。由于系统中采样点的数量较少，本文使用传统的欧几里德最近邻居算法进行线性查找，系统获得的定位精度是2.65 m，但是估计出的用户位置很不稳定，在一定范围内跳跃，房间错误估计率6.6%，楼层错误估计率2.6%。通过使用基于历史的算法，系统的定位精度提高到2.27 m，房间错误估计率降低到2%，楼层错误估计率降低到1.3%，估计出的用户位置也较稳定。基于历史的算法和传统的欧几里德最近邻居算法的定位精度的对比如图3所示。通过应用室内结构和布局以及多楼层处理算法，系统定位精度又进一步提高到2.08 m，房间错误估计率降低到1.3%，楼层错误估计率降低到0.65%，系统定位相当稳定，跳跃现象几乎杜绝。应用室内结构布局的历史算法和普通基于历史的算法的对比如图4所示。

应用基于历史的算法和室内结构和布局，系统

定位的稳定性也得到明显的增强。系统首先对用户的位置 x 进行若干次定位实验，最近邻居算法返回的定位结果在4个位置之间跳跃，而应用室内结构布局的基于历史的算法只有一个定位结果，如图5所示。系统然后又对用户的位置 y 进行若干次定位实验，最近邻居算法的定位结果在3个位置之间跳跃，而应用室内结构布局的基于历史的算法只有一个定位结果。表1总结了3种算法的定位精度和稳定性。

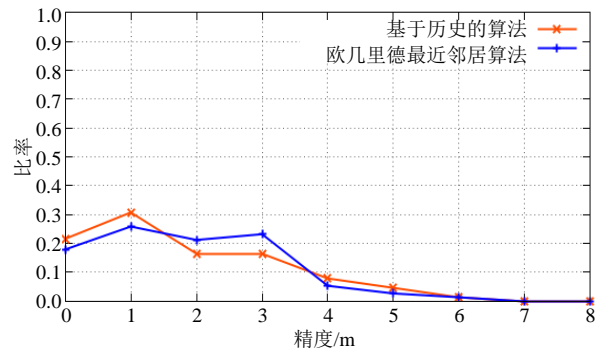


图3 定位精度对比：基于历史的算法和欧几里德最近邻居算法

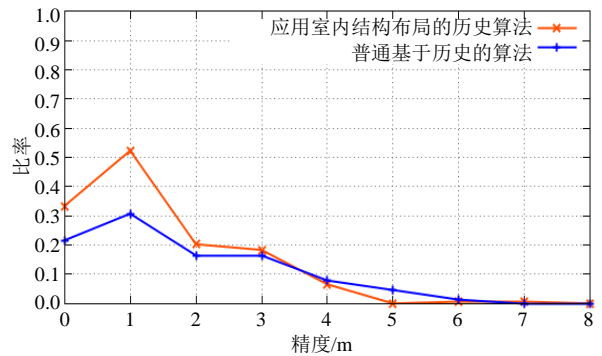
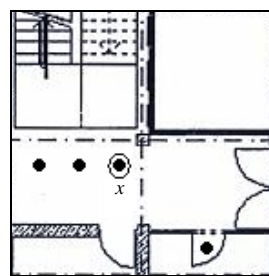


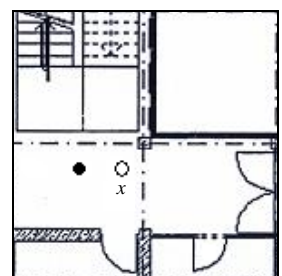
图4 定位精度对比：应用室内结构布局的历史算法和普通基于历史的算法

表1 定位精度对比

定位算法	最近邻居 Wi-Fi 指纹	基于历史 Wi-Fi 指纹	基于历史 Wi-Fi 指纹应 用室内结构和布局
精度/m	2.65	2.27	2.08
错误房间率/(%)	6.6	2.0	1.3
错误楼层率/(%)	2.6	1.3	0.65
稳定性	不稳定	较稳定	稳定



a. 用户在位置 x 时，使用最近邻居测得的用户位置



b. 用户位置在 x 时，使用应用室内结构布局的基于历史的算法测得的用户位置

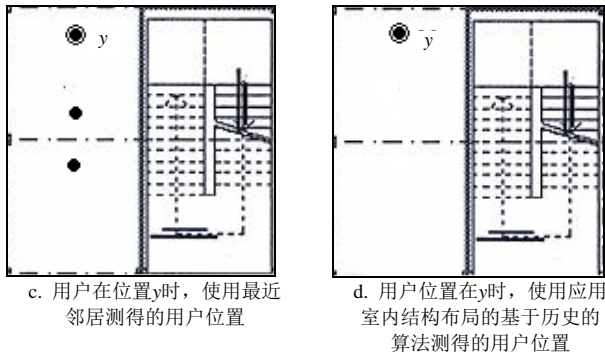


图5 定位稳定性对比: 最近邻居算法和应用室内结构布局的基于历史的算法

4 结论

本文提出将室内结构和布局应用到基于历史的Wi-Fi指纹定位算法中,以削弱Wi-Fi指纹定位中信号不稳定造成的影响。实验表明,该算法提高了定位精度和稳定性,有效地减少了错误的楼层和房间估计。目前系统能够达到2 m左右的定位精度,定位稳定,楼层正确估计率能够达到99%,房间正确估计率达到98%。这样的定位系统可以满足大多数室内位置服务应用对定位精度的需求。

参考文献

- [1] BALDAUF M, DUSTDAR S, ROSENBERG F. A survey on context-aware systems[J]. International Journal of Ad hoc and Ubiquitous Computing, 2007, 2(4): 263-277.
- [2] ALKAN R M, KARAMAN H, SAHIN M. GPS, GALILEO and GLONASS satellite navigation systems & GPS modernization[C]//2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Washington D C, USA: IEEE, 2005.
- [3] BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: an in-building rf-based location and tracking systems[C]//IEEE INFOCOM. Washington D C, USA: IEEE, 2000.
- [4] BAHL P, PADMANABHAN V N, BALACHANDRAN A.

- Enhancements to the radar user location and tracking system[R]. MSR-TR-200-12, Redmond, USA: Microsoft Research, 2000.
- [5] AKIYAMA T, TERANISHI Y, OKAMURA S, et al. A consideration of the precision improvement in Wi-Fi positioning system[C]//International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems. Washington D C, USA: IEEE, 2009.
- [6] ZIRARI S, CANALDA P, SPIES F. Wi-Fi GPS based combined positioning algorithm[C]//IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security. Washington D C, USA: IEEE, 2010.
- [7] KRUMM J, HORVITZ E. LOCADIO: Inferring motion and location from Wi-Fi signal strengths[C]//1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. Washington D C, USA: IEEE, 2004.
- [8] YEH L W, HSU M S, LEE Y F, et al. Indoor localization: Automatically constructing today's radio map by iRobot and RFIDs[C]//IEEE Sensors. Washington D C, USA: IEEE, 2009.
- [9] TOUSSEF M, AGRAWAL A, SHANKAR A U. WLAN location determination via clustering and probability distributions[C]//IEEE PerCom. Washington D C, USA: IEEE, 2003.
- [10] ZHOU R. Enhanced wireless indoor tracking system in multi-floor buildings with location prediction[C]//12th International Conference of European University Information Systems. Tartu, Estonia, USA: University of Tartu, 2006.
- [11] KRUMM J, PLATT J. Minimizing calibration effort for an indoor 802.11 device location measurement system[R]. Technical Report MSR-TR-2003-82. Redmond, USA: Microsoft Research, 2003.
- [12] FIGUERA C, ROJO-ALVAREZ J L, MORA-JIMENEZ I, et al. Time-space sampling and mobile device calibration for Wi-Fi indoor location systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(7): 913-926.

编辑 黄莘

(上接第288页)

- [2] LI Shuo-yen, YEUNG R W, CAI Ning. Linear network coding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381.
- [3] KOETTER R, MEDARD M. An algebraic approach to network coding[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2003, 11(5): 782-795.
- [4] JAGGI S, SANDERS P, CHOU P A, et al. Polynomial time algorithms for multicast network code construction[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(6): 1973-1982.
- [5] HO T, MEDARD M, KOETTER R, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(10): 4413-4430.
- [6] CHOU P A, WU Y, JAIN K. Practical network coding[C]//Allerton Conference on Communication, Control and Computing. Monticello, IL, USA: [s.n.], 2003.

- [7] DANILO S, KSCHISCHANG F R. Rank-metric codes for priority encoding transmission with network coding[C]//10th Canadian Workshop on Information Theory. Edmonton, Canada: [s.n.], 2007.
- [8] WALSH J M, WEBER S. A concatenated network coding scheme for multimedia transmission[C]//4th Workshop on Network Coding, Theory and Applications. HK, China: [s.n.], 2008.
- [9] BARROS J, COSTA R A. Dctive delay control in online network coding[C]//IEEE Infocom. Boston, MA, USA: IEEE, 2009.
- [10] BROOKE S, NATHANIEL M J. Systematic wireless network coding[C]//IEEE Milcom. Boston, MA, USA: IEEE, 2009.

编辑 黄莘