

文章编号:1001-9081(2010)09-2497-04

基于小世界的无线传感器网络的路由算法

任秀丽,董姜颖,薛建生

(辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036)

(yushumeilin@163.com)

摘要:针对小世界的拓扑特性,提出一种基于小世界的无线传感器网络(WSN)的路由算法。该路由算法引入超级节点环概念,将超级节点环视为无向图,利用改进的 Floyd 算法计算出最短传输路径,缩短路由建立时间,进而提高网络的传输效率,降低无线传感器网络的能耗。仿真结果表明,该算法与针对小世界提出的路由算法 PSCF、SWRP 和 MH 相比,在路由建立时间、能量消耗和网络吞吐量方面效果显著。

关键词:小世界;无线传感器网络;路由算法

中图分类号: TP393.07 **文献标志码:**A

Small world routing algorithm of wireless sensor network

REN Xiu-li, DONG Jiang-ying, XUE Jian-sheng

(College of Information, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China)

Abstract: Concerning the small-world topology characteristics, Small World Routing Algorithm (SWRA) of wireless sensor network was proposed in this paper. The algorithm introduced super-node ring which was considered as an undirected graph. The improved Floyd algorithm was used to calculate the shortest transmission path and shorten the route setup time in order to increase transmission efficiency and reduce energy consumption in wireless sensor networks. The simulation results show that the proposed algorithm is more effective and available than the others in the routing setup time, energy dissipation and network throughput.

Key words: small world; Wireless Sensor Network (WSN); routing algorithm

0 引言

小世界理论来源于 1967 年,美国哈佛大学的社会心理学家 Stanley Milgram 提出了“六度分隔”(Six Degrees of Separation)的理论,即人可以通过“朋友的朋友”进行相互联系,最多只要经过六次转达即可实现。研究发现,小世界网络普遍存在于实际网络之中。1998 年,为了描述从规则网络到随机网络的过渡,Watts 和 Strogatz (WS)提出了小世界(Small World)^[1]的观点,并介绍了一种小世界模型,即 WS 小世界模型。

目前对小世界的研究,主要是针对其模型的研究,把小世界理论应用于实际网络路由的比较少,其中 Oskar Sandberg 提出利用 Metropolis Hastings(MH)算法^[2]解决基于小世界的路由的问题;吴杰等人在网络中引入一种特殊的移动节点,构建具有小世界特性的网络,提出 Polylogarithmic Store-Carry-Forward (PSCF)路由算法^[3];文献[4]中将小世界的理论引入无线传感器网络,节点从不同的强链接出发采用洪泛的方法搜索路径,从中选择最优路径,提出了小世界路由协议(Small World Routing Protocol, SWRP)。这些路由算法都是基于 WS 小世界模型的,所构建的网络具有小世界的特性,但是均没有针对小世界的网络拓扑特性提出路由算法。

本文针对小世界的拓扑特性,提出一种基于小世界的能量有效的无线传感器网络路由(Small World Routing Algorithm, SWRA)算法,该算法缩短路由建立时间,提高了网

络传输效率,降低了网络能耗,延长了网络寿命。

1 基于小世界的网络模型

小世界网络有较高的聚集系数和较短的平均路径长度,而无线传感器网络具有小世界网络的特点^[4-5]。根据小世界的性质,在无线传感器网络中建立适当的长链接,使得平均路由长度减少,从而减少网络的能量消耗,提高网络的生存时间;也可减少错误发生的概率,增强网络的稳健性。由于多数节点的链接度基本不变,只有少数节点链接度较高,因此更短的传输路径不会加重节点的负担,对能量节约也有作用。

小世界网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是介于其间的具有较大聚集系数的规则网络和具有较小平均路径长度的复杂网络。

1.1 基本概念

在小世界网络中涉及到如下的定义。

定义 1 每一个簇仅有一个超级节点,使用固定能源提供能量,具有存储和数据处理能力。超级节点可以与簇内任一普通节点建立链接;超级节点以概率 p 随机地链接到其他簇的超级节点。

定义 2 簇中超级节点以外的节点是普通节点。普通节点保持与超级节点的链接。普通节点亦可以与任一节点建立链接。

定义 3 相邻超级节点按照一定顺序链接成超级节点环,它是建立超级节点间长链接的基础,便于路由算法进行统

收稿日期:2010-03-24;修回日期:2010-05-26。基金项目:国家自然科学基金资助项目(60704046);辽宁大学“211 工程”三期建设项目;辽宁省教育厅 2008 年度高等学校科研项目(253)。

作者简介:任秀丽(1965-),女,吉林四平人,教授,博士,主要研究方向:无线网络与通信; 董姜颖(1987-),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络; 薛建生(1954-),女,北京人,教授,博士,主要研究方向:计算机网络。

一标识。

定义 4 同一簇内节点之间的链接称为短链接。

定义 5 超级节点之间随机以概率 p 的链接称为长链接。

定义 6 聚集系数描述了节点和网络的聚集程度,反映了相邻两个节点之间朋友圈子的重合度,即该节点的朋友之间也是朋友的程度。假设某个节点有 k 条边,则这 k 条边链接的节点之间最多可能存在的边的条数为 $k(k-1)/2$,用实际存在的边数除以最多可能存在的边数定义聚集系数,对于以添加链接形成的小世界网络,整个网络的聚集系数 $C = \frac{3(k-1)}{2(2k-1)}(1-p)^3$; k 表示无线传感器网络的邻近节点数; p 为链接概率^[6]。

定义 7 平均路径长度是网络中任意两点的平均最短路径长度,目前还没有非常精确的答案,采用重正化群的方法得到平均路径长度的近似比例关系式为: $L = \frac{N}{k}f(Nkp)$, 其中 N 为超级节点个数, $f(x)$ 为比例函数,利用平均场法,可以求出 $f(x) = \frac{1}{2\sqrt{x^2+2x}} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{x}{x+2}}$ 。当 $p=0$ 时,无线传感器网络为规则网络,平均路径长度趋向于 $L=N/(4K)$; 当 $p=1$ 时,无线传感器网络为随机网络; 当 $0 < p < 1$ 时,小世界网络的平均路径长度为 $L \sim \log L$ ^[6]。

1.2 网络拓扑结构

基于小世界的无线传感器网络由普通节点、超级节点、长链接和短链接组成。超级节点链接成超级节点环,每个超级节点和普通节点形成一个簇。

超级节点在每个簇中相当于簇头节点,它存储、处理和转发大量的数据,并且具有数据融合的功能。由超级节点组成的长链接使用次数较多,因此,超级节点一般使用稳定的电源,位置相对固定。

每个超级节点标记相应的序号,如作 X 标记,它们链接成超级节点环,如图 1 所示。根据参数 N, k, p 确定平均长链接的数量 M ^[6]。在超级节点环中,随机选取 M 个超级节点,以概率 p 链接到其他超级节点,每条长链接标记为 $\langle X, Y \rangle$ 。

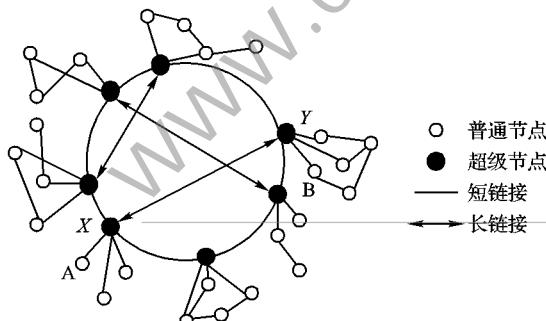


图 1 基于小世界的无线传感器网络拓扑结构

普通节点根据自己与超级节点之间的距离选择加入哪个簇,并通知超级节点。当超级节点接收到所有的加入信息后,就产生一个 TDMA 定时信息,并通知该簇所有节点。同时将超级节点标记为 X 后再发送给簇内每个普通节点,普通节点将本簇超级节点序号为 X 保存在自己的缓存中。簇内普通节点不仅可以与超级节点联系,普通节点之间也可以相互通信交换数据。

2 路由策略

2.1 SWRA 路由

基于小世界的无线传感器网络路由(SWRA)算法的流程,如图 2 所示,算法的具体实现描述如下。

1) 节点 A 向节点 B 发送数据时,节点 A 所在簇的超级节点序号为 X ,节点 B 所在簇的超级节点序号为 Y 。若 $X=Y$,即为簇内节点之间通信。普通节点和超级节点及普通节点之间都存在短链接,小世界无线传感器网络可通过短链接进行通信。

2) 若 $X \neq Y$,即为不同簇节点通信,此时使用超级节点间的长链接传输数据,缩短路由长度。检查数据包中有无保存的最短传输路径信息。若有,则按照数据包中保存的最短传输路径转发数据包到下一节点;若无,则转向 3)。

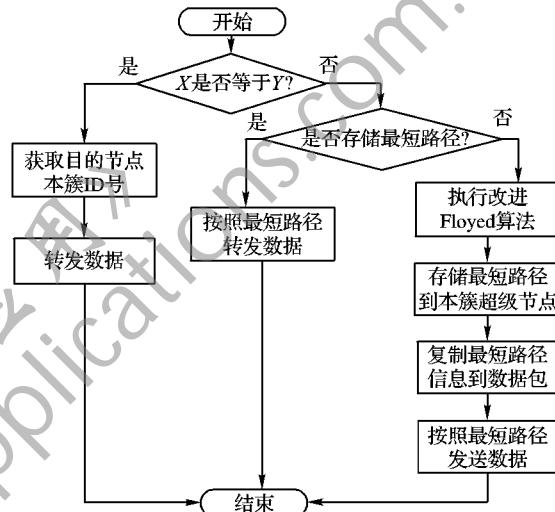


图 2 SWRA 算法流程

3) 节点 X 把数据传送给节点 B 所在簇的超级节点 Y 。本文把超级节点环看做共有 N 个节点的无向图,超级节点 X 利用 Floyd 改进算法计算最短传输路径。在 Floyd 算法中,输入量为节点 i ,在节点 i 到节点 j 的路径上的任意节点 n_{kj} 表示直达 j 的节点,其中 $k=i, \dots, j$,使得最终输出最短路径逆向表示。而本文 Floyd 改进算法输入的是节点 j ,最终顺序输出最短路径^[7],其过程如下。

用 D_{ij} 表示超级节点 i 与超级节点 j 间的距离,因为超级节点使用固定电源提供能量,超级节点之间的距离也相对固定。当 $i=j$ 时, $D_{ii}=0$; 当节点 i 与节点 j 不直接相连时, $D_{ij}=\infty$, n_{ij} 表示节点 i 到节点 j 最先应达到的节点。

- ① 输入节点 $j, D_{ij}, (i, j = 1, 2, \dots, k = 1);$
- ② $i = 1;$
- ③ 若 $i \neq k$, 则 $j = i + 1$ 转到 ④; 否则, $i = k$ 转到 ⑦;
- ④ 若 $j \neq k$, 则转到 ⑤; 否则, $j = k$ 转到 ⑥;
- ⑤ 若 $D_{ik} + D_{kj} = A_{ij} \geq D_{ij}$, 则转到 ⑥; 否则, $A_{ij} < D_{ij}, D_{ij} = A_{ij}, n_{ij} = n_{ik}, D_{ji} = A_{ij}, n_{ji} = n_{jk};$
- ⑥ 若 $j < m$, 则 $j = j + 1$ 转到 ④; 否则, $j = m$ 转到 ⑦;
- ⑦ 若 $i < m$, 则 $i = i + 1$ 转到 ③; 否则, $i = m$ 转到 ⑧;
- ⑧ 若 $k < m$, 则 $k = k + 1$ 转到 ②; 否则, $k = m$, 输出 $D_{ij}, n_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, m)$ 。

4) 将顺序输出的节点 i 到节点 j 的最短传输路径 d_{ij} 保存到超级节点缓存中,并复制一份存储即将发送的数据包中。

5) 数据包按照最短传输路径将数据从超级节点 X 传送

到超级节点Y,再将数据从超级节点Y传输到本簇节点B,完成数据的传输,转向1)。

2.2 路由稳定性策略

SWRA路由依赖于小世界特殊的拓扑结构,节点失效将影响网络的稳定性,尤其是超级节点失效势必影响小世界无线传感器网络的传输效果。

1)普通节点稳定性。

普通节点定时向其邻居节点发送验证消息,等待其邻居节点确认它的存在。若其邻居节点没有回复该消息,则关闭此链接并通知本簇超级节点更新记录。

2)超级节点和超级节点环稳定性。

超级节点一般使用固定的电源,位置相对固定,一般情况下,超级节点不会失效。特殊情况下,超级节点能量低于设定能量值时,判定超级节点即为失效。为了延长网络的生存时间,便于网络的负载均衡,则比较失效超级节点的前序节点和后继节点所在簇的普通节点数,如果前序节点所在簇的普通节点较多,该失效超级节点将其在超级节点环中的前序节点信息和其他长链接信息发送给其后继节点,后继节点收到消息后,发送携带本簇序号 $X+1$ 的消息给失效超节点的前序节点和长链接节点;反之,将其在超级节点环中的后继节点信息和其他长链接信息发送给其前序节点,前序节点收到消息后,发送携带本簇序号 $X-1$ 的消息给失效超节点的后继节点和长链接节点。当环中这些节点收到此信息后进行回复,与其前序或者后继节点建立新的链接。

接收失效超级节点信息的超级节点向超级节点环中的每个超级节点发送广播消息,通知簇序号为X超级节点失效,将X簇中所有普通节点归属它,把它的簇序号告知接收的普通节点,执行SWRA路由算法,建立新的传输路由。

3 仿真实验分析

为了评价SWRA路由算法的性能,对SWRA的平均路由建立时间、普通节点剩余能量和网络吞吐量方面进行了检验。平均路由建立时间是一个数据包从源节点网络层成功到达目的节点网络层所平均经过的时间,该参数能反映网络是否通畅,时间越小证明网络越通畅。普通节点平均剩余能量,即普通节点能量消耗情况。超级节点由固定能源提供能量,普通节点的能量消耗越少,网络生存时间越长,节能效果越好。在仿真环境下,将本文提出的SWRA和PSCF、MH在前面提到的3种性能方面进行了比较。实验环境配置为节点分布在 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的区域中;普通节点50个,均匀分布;超级节点20个,固定分布在区域中;普通节点初始能量为1J;仿真总时间为840 min。小世界的相关参数设定是 $N=20$, $p=0.2$, $k=4$ 。

图3反映了3种不同算法在平均路由建立时间随距离增大的变化关系。从图中可以看到,SWRA的平均路由建立时间小于PSCF和MH的平均路由建立时间。由于MH是一种动态的自适应算法,随着距离的增加,平均路由时间也变大。PSCF算法则是通过移动节点携带信息传输给普通节点,平均路由建立时间随着移动距离增加而增加。SWRP协议采用洪泛的方法搜索路径,通过相关参数控制代理程序选择路径,平均路由建立时间比SWRA较高。而本文提出的SWRA算法,在小范围之内,因为普通节点之间不通过超级节点通信,平均路由建立时间会随着距离的增加而增加。但是,不同簇之间节点则通过超级节点通信,按照改进Floyd算法计算出的最

短传输路径传输数据,平均路由建立时间最小。

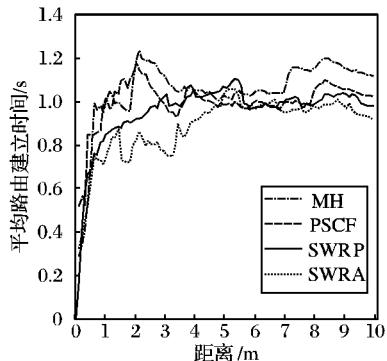


图3 平均路由建立时间

图4反映了普通节点在能量相同的情况下,采用3种不同的路由算法能量变化情况。由图4可知,SWRA的节点剩余能量变化最慢,普通节点的生存时间最长。PSCF算法,普通节点需要向邻近的移动节点周期性地发送确认信息,确保链接存在,消耗大量能量;在MH算法中,普通节点采用贪婪路由算法计算节点间的距离之后,再与周围普通节点进行通信,在计算过程中消耗大量的能量;SWRP协议,节点代理程序需要从多个强链接出发计算传输路径,进而做出选择,而计算次数由与这个节点相连的强链接的个数决定,因而消耗了大量的能量;而SWRA算法中,普通节点没有承担网络中计算和主要的数据传输任务,而由能量和位置相对固定的超级节点承担,因此为普通节点节省了能量,从而延长了整个网络寿命。

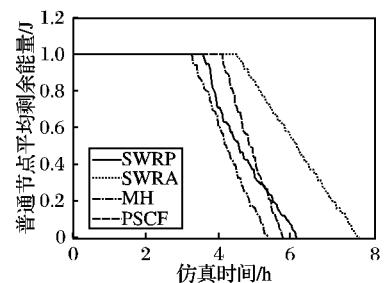


图4 普通节点平均剩余能量

图5表明SWRA算法比PSCF算法在短距离内网络平均吞吐量较小,SWRA短距离内多是簇内普通节点通信,不采用超级节点通信。而在PSCF算法中,采用携带长链接信息的移动节点充当超级节点传输数据。而在长距离方面进行通信,SWRA算法较PSCF算法的网络吞吐量大,这是因为在SWRA算法中,超级节点环上的节点链接是相对稳定的。所以,从整体上看,SWRA算法强于PSCF算法;MH算法通过计算节点间距离自适应的选择传输路径,导致传输效率低,较SWRA算法网络吞吐量小;SWRP协议中从一个节点到下一个节点传输数据,代理协议需要重新选择路径,大大影响了数据传输效率,网络吞吐量较SWRA小。

表1是在普通节点和超级节点数目不变,改变邻近节点数k和链接概率p,改变网络聚集系数C,即网络的拓扑结构变化的情况下,考查网络的生存时间。实验表明,在邻近节点个数取2~6时,网络生存时间变化显著,而邻近节点的增加并不能使网络生存时间有更明显的变化,从而验证了小世界的网络特性;邻近节点数不变的情况下,随着p增大,平均路径L减小,但是聚集系数C也减小。因此,只有当C和L取合适的值时,网络生存时间最长,所以对于基于小世界无线传感器网络需要合理地配置网络中的邻近节点数和链接概率,从而

使网络性能达到最优。

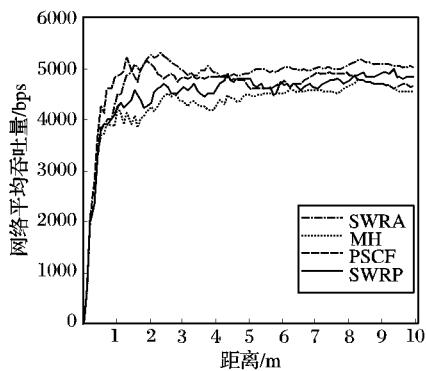


图 5 网络平均吞吐量

表 1 不同参数下的网络生存时间

k	p	C	L	网络生存时间/h
2	0.2	0.256	0.781	5.771
3	0.2	0.307	0.352	7.024
4	0.1	0.468	0.393	8.302
4	0.2	0.329	0.204	8.561
4	0.3	0.221	0.153	8.355
4	0.5	0.083	0.085	8.272
5	0.2	0.341	0.128	9.106
6	0.2	0.349	0.095	9.953
7	0.2	0.354	0.065	10.014
8	0.2	0.358	0.050	10.236

4 结语

小世界具有较高的聚集系数和较短的平均路径长度。本文将小世界理论应用到无线传感器网络的路由选择中，并针

(上接第 2487 页)

表 3 5 条 TCP Vegas/TCP Vegas-W 连接的吞吐量对比 Kbps

Source	TCP Vegas	TCP Vegas-W
S_1	253	290
S_2	162	170
S_3	202	230
S_4	235	215
S_5	288	217
标准差	43.14	38.55

4 结语

针对 TCP Vegas 在与 TCP New Reno 共存时难以获得足够的带宽和 TCP Vegas 对旧连接有偏见的问题，本文对拥塞避免阶段的算法进行了改进。在文献[2,7]的研究基础上，得到了新的改进算法 TCP Vegas-W。仿真实验表明，TCP Vegas-W 通过加大拥塞窗口的增长速度和动态调整 α 和 β 值是其比原始算法更具有侵略性，这很好地克服了与 TCP New Reno 共存时的缺陷，并且能获得比 TCP New Reno 更大的带宽。此外，新算法解决了非拥塞连接的 RTT 的估计差异所导致了新的 Vegas 连接享有更大的吞吐量的问题，提高了协议内的公平性。改进的算法还继承了 Vegas 算法原来的优点。本文给出了详细的算法描述，该算法只需在发送端进行修改，不需要修改中间路由器，易于网络实施。

参考文献：

[1] BARKMO L S, LARRY L. TCP Vegas: End to end congestion a-

对小世界特殊的拓扑结构，采用改进的 Floyd 算法计算最短传输路径，不仅缩短平均路由建立时间，提高了网络传输效率，而且节省了普通节点能量，从而达到延长无线传感器网络寿命的目的。

参考文献：

- [1] WANG XIAOFAN, CHEN GUANRONG. Complex networks: Small-world, scale-free and beyond [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2003, 3(1): 6 – 20.
- [2] SANDBERG O. Distributed routing in small-world networks [C]// Proceedings of the Eighth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments and Third Workshop on Analytic Algorithms and Combinatorics. Miami, FL: SIAM, 2006: 144 – 155.
- [3] WU JIE, YANG SHU-HUI. Small world model-based polylogarithmic routing using mobile nodes [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2008, 23(3): 327 – 342.
- [4] CHANG WUYU, WU TUNG-KUANG, CHEN REI-HENG, et al. A small-world routing protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Wireless Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 483 – 490.
- [5] SHARMA G, MAZUMDAR R. Hybrid sensor networks: A small world [C]// MobiHoc'05: Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2005: 366 – 377.
- [6] HELMY A. Small worlds in wireless networks [J]. IEEE Communication Letters, 2003, 7(10): 490 – 492.
- [7] 文家焱, 陈黎, 毛恺. “小世界”无线传感器网络的最佳邻近节点数[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4): 202 – 205.
- [8] 郭强. 对 Floyd 算法的两点注记 [J]. 运筹与管理, 2001, 10(1): 36 – 38.

voidance on a global Internet [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(8): 1465 – 1480.

- [2] SRIJITH K N, LILLYKUTTY JACOB, ANANDA A L. TCP Vegas-A: Improving the performance of TCP Vegas [J]. Computer Communications, 2005, 28(4): 429 – 440.
- [3] 秦楠, 郑应平. 基于 TCP Vegas 与 TCP Reno 的一种改进拥塞控制算法[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(11): 23 – 25.
- [4] MO J, LA R J, ANANTHARAM V, et al. Analysis and comparison of TCP Reno and Vegas [C]// INFOCOM 1999: Proceedings of the Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 1556 – 1563.
- [5] BRAKMO L S, O'MALLEY S W, PETERSON L. TCP Vegas: New techniques for congestion detection and avoidance [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 24(4): 1024 – 1035.
- [6] 李鹏, 陈元琰, 罗晓署. 无线异构网络环境中基于拥塞状态区分的 TCP Vegas 改进算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 309 – 311.
- [7] CHAN YI-CHENG, LIN CHIA-LIANG, HO CHEN-YUAN. Quick vegas: Improving performance of TCP vegas for high bandwidth-delay product networks [J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, E91-b(4): 987 – 997.
- [8] 王云涛, 方建安, 张晓辉, 等. 基于 TCP Vegas 的网络拥塞控制改进算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(12): 4645 – 4647.
- [9] de ANDREA V, BONACCI M, BAIOCCHO A. TCP new vegas: Providing good TCP performance in both homogeneous and heterogeneous environments [EB/OL]. [2010 - 03 - 10]. <http://net.info.com.uniromal.it/papers/ITC-SS15-33-devendictis.pdf>.