

利用方向性天线的 Ad Hoc 网络节点定位方法

单志龙

SHAN Zhi-long

华南师范大学 计算机学院, 广州 510631

School of Computer, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

E-mail: sunmyszl@163.com

SHAN Zhi-long. Novel localization with directional antennas in Ad Hoc networks. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(16): 96-98.

Abstract: This paper studies a localization method using Angle of Arrival (AOA) estimations by directional antenna equipped beacons in Ad-Hoc networks. The node to be localized sends a signal to its surrounding beacons. The beacons estimate the signal directions with high resolution AOA methods and calculate the distance between the node and the beacon using RSSI (Received Signal Strength Indicator). Only one beacon is needed to estimate the location of the node in this method. When AOA estimates from two or more beacons are received, the averaging resolution method is proposed. As estimation bias is heavily dependent on antenna orientations the center-facing approach is found to give better performance in a square field.

Key words: directional antennas; Ad Hoc networks; localization; Angle of Arrival (AOA)

摘要:提出了一种新的基于方向性天线的 Ad Hoc 网络节点定位算法,当锚节点装配了智能天线或自适应天线阵列这样的方向性天线时,锚节点利用高分辨率的波达方向估计方法估计出节点向锚节点发送信号的方向,并根据收到的信号功率大小估算出节点和锚节点之间的距离后,锚节点即可完成对未知节点的定位。该方法只需要利用一个锚节点就可以完成未知节点的定位,且适当改变锚节点天线的阵列摆放,就可以提高定位的精度。理论分析和仿真实验证明了所得结论。

关键词:方向性天线; Ad Hoc 网络; 定位; 波达方向估计

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.16.027 **文章编号:** 1002-8331(2009)16-0096-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TN911.23

1 引言

自组织网络作为一种自组织和自管理的网络,由于其组网快速灵活、低成本和易于维护等优点,在战争、抗灾、工业等领域有着广泛的应用。在许多情况下,传感器节点必须明确自身位置才能详细说明“在什么位置或区域发生了特定事件”,实现对外部目标的定位和追踪,不能提供相应的位置信息的数据将没有实际意义^[1]。此外,知道节点位置信息还可以提高路由效率,为网络提供命名空间,向部署者报告网络的覆盖质量,实现网络的负载均衡以及网络拓扑的自配置^[2]。在 Ad Hoc 网络中,为每个节点手动设置位置是不可取的,而为每个节点配置一个 GPS 接收器也会受到成本、功耗和配置条件不允许(GPS 接收机不能在室内工作)等问题的限制。因此一个可行的解决方案就是网络中存在少量位置已知的节点(称为锚节点或信标节点),其位置可以通过 GPS 定位设备等手段来获得。除锚节点之外的其他位置未知的节点称为未知节点,未知节点从锚节点获取相关信息,并依据定位方法完成自身位置的确定。

目前自组织网络中用于节点定位的方法主要可以分为两类: Range-free 和 Range-based。Range-free 定位方法利用节点

间的邻近信息进行定位,它只能提供大概的定位信息,但其在成本、功耗等方面具有优势。而 Range-based 定位方法则利用 RSSI (Received Signal Strength Indicator)、TOA (Time of Arrival) 和 TDOA (Time Difference of Arrival) 等信息来测量节点间的距离,利用 AOA (Angle of Arrival) 估算邻节点发送信号方向来测量节点间的角度^[3],通过三边测量法、三角测量法或最大似然估计法来计算节点位置。一般来说,使用三边或三角测量法需要知道节点之间的距离或角度等相关信息。已有研究表明,因为角度估计噪声远比基于信号强度的距离估计噪声小,所以使用角度方法比使用距离方法进行定位会有更好的性能表现^[4]。相比较 Range-free 方法, Range-based 方法节点位置估计的精度更高,能够满足一些需要准确位置信息的应用。

当利用锚节点来测定方向时,通常情况下都会在锚节点部署方向性天线来提升性能。已有研究表明,使用方向性天线位置估计的精度比使用全向天线通过三角测量法求得的精度好 3 倍,而且利用全向天线进行位置估计,至少需要 3 个锚节点来确定一个节点的位置^[5]。目前已有一些文献对自组织网络应用 AOA 信息进行定位估计进行了研究,这些算法在不同程度

基金项目:广东省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China under Grant No.07006488);国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10771080);广东省博士启动基金(No.06300907)。

作者简介:单志龙(1976-),男,博士,副教授。

收稿日期:2009-01-05 **修回日期:**2009-02-13

上提高了节点定位精度。但这些算法要完成一次定位,要么要知道几个锚节点的信息,要么是定位精度不高,不能满足应用的需要。本文提出了一种在锚节点部署阵列天线,利用 AOA 估计和 RSSI 来进行节点定位的方法,只需要一个锚节点就可以实现对未知节点的高精度定位。

2 相关研究工作

如果所有未知节点都能与锚节点直接通信,并通过锚节点计算自己的位置,这就是单跳定位系统,在整个网络中只需布置少数锚节点。一般来说,单跳定位系统为多跳系统提供了基本的技术,对多跳定位系统具有参考意义^[1]。在进行单跳定位时,可以在锚节点或未知节点装配方向性天线来进行方向测定。

在文献[6]中,锚节点持续不断地发出窄的旋转波束,其波束的旋转速度恒定。节点可以测量每个波束的到达时间,并计算两个依次到达信号的时间差,用时间差乘以波束的旋转速度,从而得到该节点与两个锚节点所形成的夹角,再利用三角测量法求出节点的位置。该方法每个节点至少需要与 3 个锚节点通信才能确定自己的位置,而且天线波束必须足够窄,所有的锚节点必须做到旋转的同步。

Niculescu 等提出的 VORBA^[7]方法中,锚节点配置方向性天线,在某个方向上锚节点所收到 RSS 最强,则这个方向为节点的方向。在 56×25 的区域上定位误差约为 3 m。波束的宽度是上述两种方法引起方向估计不确定的主要因素。文献[8]使用旋转天线和 RSS 信息,利用贝叶斯网络来进行节点定位。该方法比 VORBA 方法所需锚节点数更少,如只需 4 个锚节点就可以达到 VORBA 方法 7 个锚节点的效果。

当锚节点装配了智能天线或自适应天线阵列时,锚节点利用高分辨率的 AOA 估计方法,估计出节点向锚节点发送信号的方向,然后把锚节点位置和该方向信息返回给节点,节点利用这些信息求出的两条直线的交点即为节点的位置。该方案利用两个锚节点完成一个节点的定位,估计精度较高^[9]。

除了在锚节点上布置方向性天线来进行位置估计之外,也有一些方法在未知节点上部置方向性天线来测定方向^[10-12]。虽然目前也有不少研究成功地在小节点上布置了诸如切换微带天线这样的方向检测设备^[9],但在很小的节点上装配具有方向检测能力的设备也许还是一个挑战,因此,现在采用的方法还是以锚节点装配方向性天线为主。

3 本文方法

当锚节点部署好之后,随机放置的未知节点向锚节点发送信息,锚节点利用 AOA 估计方法,根据收到的未知节点信号估计出该节点的方向,并利用 RSSI 模型估算出该节点和锚节点之间的距离。锚节点得到了未知节点的方向和距离之后,根据自身的位置信息,只需要一个锚节点即可求出未知节点的位置,而且具有较高的估计精度。如果充分利用几个已知的锚节点估计出来的方向和位置信息,可以对几个估计出来的未知节点位置信息进行简单的平均,也可以在一定程度上提高未知节点位置估计的精度。

3.1 AOA 估计方法

在阵列天线处理中,包括 MUSIC^[13]、ESPRIT^[14]、CA-MUSIC^[15] 等在内的许多方法都可以用来估计 AOA。本文采用了 MUSIC 算法,其估计模型为:

$$\mathbf{X}(t)=[x_1(t), \dots, x_M(t)]^T = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{X}(t)$ 为从 M 个天线观测得到的数据矢量, $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), \dots, s_D(t)]^T$ 是 D 个信源信号的未知矢量, $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$ 是加性噪声矢量,导向矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_D)] \quad (2)$$

其中, $\mathbf{a}(\theta_i)$ 表示第 i 个信号的导向矢量。

对方差矩阵 $E\{\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)\}$ 进行特征值分解之后,可以得到信号子空间和噪声子空间,然后构造空间谱函数

$$\Psi(\theta) = D_{\text{MU}}^{-1}(\theta) = (\mathbf{v}^H(\theta)(\mathbf{I}_M - \mathbf{E}_s \mathbf{E}_s^H) \mathbf{v}(\theta))^{-1} \quad (3)$$

其中, \mathbf{I}_M 是 $M \times M$ 的单位矩阵, $\mathbf{v}(\theta) = \mathbf{a}(\theta) / \|\mathbf{a}(\theta)\|$, $\mathbf{E}_s = \text{span}\{e_1, \dots, e_D\}$ 是信号子空间。通过对整个角度空间进行搜索,可以得到空间谱函数的谱峰。这些谱峰所对应的角度就是所要求的 AOA。当快拍数和信噪比无限大时, MUSIC 方法接近于 Cramer-Rao 界。

3.2 RSSI 模型

基于 RSSI 的测距方法利用发送功率、信道衰减模型和接受功率等信息来决定节点之间的距离。该方法最大的优点就在于实现简单,无需额外硬件,而且在市场上已经得到了广泛的应用,多数无线设备具备获取 RSS 特征的能力^[16]。主要缺点就是选定的信道衰减模型中的衰减系数不能够适合所有环境要求。文中采用的 RSSI 模型为^[5]:

$$P_i = \frac{P_r G_t(\theta_t) G_r(\theta_r)}{r^d} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (4)$$

其中, θ_t 和 θ_r 分别为发送和接收角度, r 为发送方和接收方之间的距离, d 为信道衰减系数, G 为天线增益, P 为功率。

4 分析和仿真实验

下面分析和计算机仿真节点的定位情况。如图 1 所示, 100 个节点随机分布在 100 m 的方形中, 4 个锚节点被安放在方形的角落, 所有的锚节点都装配包含 2 个天线的均匀线阵, 阵列间距 \bar{d} 取波长 λ 的一半。令 (x_i, y_i) 和 (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 分别表示节点 i 的真实和估计位置。作为评价标准的 J 个节点的平均估计误差 E 定义为:

$$E = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J \sqrt{(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (5)$$

如图 2 所示, 均匀线阵被水平放置。在计算机模拟实验中, 假定部署区域都采用同一个信道衰减系数 $d=2$, 快拍数 $N=20$, 信噪比从 0 dB 变到 10 dB, 对每一个节点都做 5 次定位估计平均。直观上来说, 用 1 个锚节点估计出的未知节点位置比 2 个锚节点的估计平均要差, 如果利用所有的 4 个锚节点进行估计平均效果应该最好。图 3 给出的就是 100 个节点的平均估计误

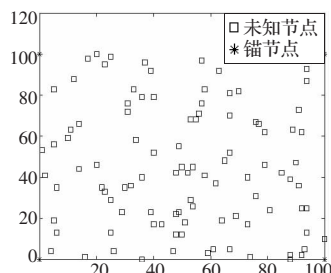


图1 100个节点随机分布在100m的方形内

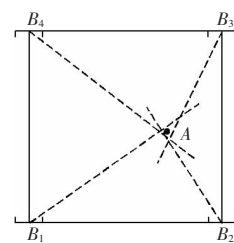


图2 锚节点处的阵列天线水平放置

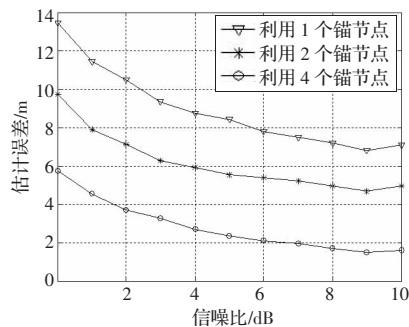


图3 用不同锚节点个数进行节点定位估计的误差

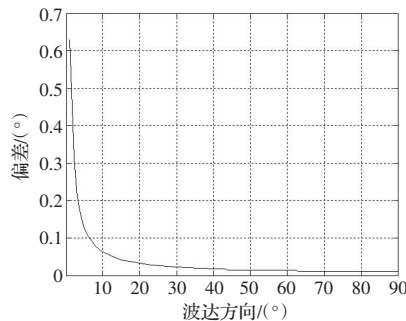


图4 均匀线阵估计单个信源的偏差

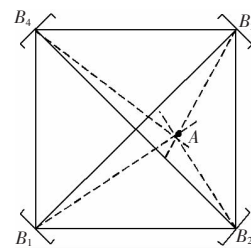


图5 锚节点处的阵列天线旋转放置

差 E 随着信噪比的变化而变化的图形。从图中可以看出,利用所有4个锚节点进行估计平均效果最好。

当 Root-MUSIC^[17]算法应用于均匀线阵时会有更好的性能表现,其一个信源 AOA 估计的偏差为^[18]:

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2\pi d \sin(\theta)}\right)^2 \frac{6}{M^2} \left(\frac{\sigma_n^2}{MP_1 N}\right)} \quad (6)$$

其中, P_1 和 σ_n^2 分别表示信源和噪声功率的大小。如图4所示,一个2天线均匀线阵在快拍数 $N=20$, 信噪比 $SNR=15$ dB 时,入射信号角度越大,信号估计的偏差越小。于是,可以把锚节点的阵列天线旋转 45° ,如图5所示,使其估计的角度增大,从而减少估计偏差。图6的仿真结果表明,单个锚节点的定位估计时,阵列天线旋转之后估计的偏差小于水平放置阵列天线的估计偏差,从而说明了通过适当的阵列放置可以有效地改变系统的估计性能。

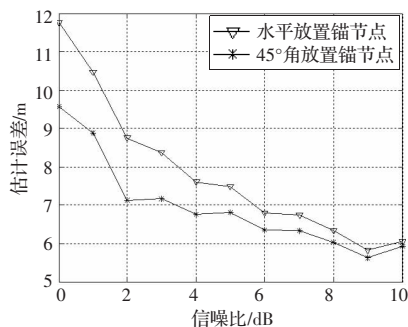


图6 锚节点阵列天线水平和旋转放置估计误差比较

5 结论

本文提出了一种基于方向性天线的 Ad Hoc 网络节点定位方法,该方法通过高精度的 AOA 估计方法估计出节点的方向,并且利用 RSSI 测算出节点和锚节点之间的距离,只需要一个锚节点就可以完成未知节点的位置估计,其估计误差较小,具有较好的性能表现。当把阵列天线进行适当摆放,还可以进一步提升定位的精度。如果能够充分利用多个锚节点的信息,利用简单的平均就可以显著提高系统性能。理论分析和计算机模拟实验表明,本文的方法可行而且有效。

参考文献:

[1] 卡勒,维里西.无线传感器网络协议与体系结构[M].邱天爽,唐洪,译.北京:电子工业出版社,2007.
[2] 王福豹,史龙,任丰原.无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J].软件学报,2005,16(5):857-868.

[3] 顾学迈,曹贺秋,石硕.Ad Hoc 网络中一种基于方向的定位算法[J].计算机工程与应用,2008,44(7):155-157.
[4] Roy S,Chatterjee S,Bandyopadhyay S,et al.Neighborhood tracking and location estimation of nodes in Ad hoc networks using directional antenna:A testbed Implementation[C]//WirelessCom,2005.
[5] Malhotra N,Krasniewski M,Yang C,et al.Location estimation in Ad Hoc networks with directional antennas[C]//IEEE ICDCS,2005:633-642.
[6] Nasipuri A,Li A.A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks[C]//ACM WSNA,2002:105-111.
[7] Niculescu D,Nath B.VOR base stations for indoor 802.11 positioning[C]//ACM MOBICOM,2004:58-69.
[8] Elnahrawy E,Austen-Francisco J,Martin R P.Adding angle of arrival modality to basic RSS location management techniques[C]//International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC),2007.
[9] Shan Z L,Yum T S.Precise localization with smart antennas in Ad-Hoc networks[C]//IEEE Globecom,2007:1053-1057.
[10] Ash J N,Potter L C.Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas[C]//Proc of the Allerton Conference on Communication,Control,and Computing,2004:1861-1870.
[11] Winfree S.Angle of arrival estimation using received signal strength with directional antennas[D].Degree Bachelor of Science with Distinction in Electrical and Computer Engineering of The Ohio State University,2007.
[12] Kathiravan K,Selvi S T.An efficient location tracking algorithm for MANET using direction antennas[C]//IEEE ICSCN,2007:139-144.
[13] Schmidt R O.Multiple emitter location and signal parameter estimation[J].IEEE Trans Signal Processing,1986,34(3):276-280.
[14] Roy R,Kailath I.ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J].IEEE Trans on Acoustics,Speech, and Signal Processing,1989,37(7):984-995.
[15] Shan Z L,Yum T S.A conjugate augmented approach to direction of arrival estimation[J].IEEE Trans Signal Processing,2005,53(11):4104-4109.
[16] 朱建新,高蕾娜,张新访.RSS 测距定位模型的 Cramer-Rao 界分析[J].计算机工程与应用,2008,44(35):100-102.
[17] Barabell A J.Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms[C]//Proc IEEE International Conference on Acoustic,Speech,Signal Processing,1983:336-339.
[18] Rao B D,Hari K V S.Performance analysis of root-music[J].IEEE Trans Signal Processing,1989,37(12):1939-1949.