

移动 sinks 无线移动传感器网络时延性能分析*

余华平^a, 郭梅^b, 胡杰^a

(长江大学 a. 计算机科学学院; b. 科学技术处, 湖北 荆州 434023)

摘要: 结合 mWSNs 体系结构, 分析了移动 sinks 无线传感器网络的时延组成和时延特性, 并通过仿真实验分析了移动性对时延的影响。该分析结果既能用于 mWSNs 时延系统性能评价, 又可为 mWSNs 系统参数(如移动 sinks 数量、速度、传输半径及数据包长度等)优化提供理论依据。同时, 时延性能要与能量消耗综合考虑。

关键词: 移动 sinks 无线传感器网络; 体系结构; 时延; 移动 sinks; 网络性能

中图分类号: TP393.11; TP273 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)01-0317-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.094

Delay performance analysis for mobile sinks wireless sensor networks

YU Hua-ping^a, GUO Mei^b, HU Jie^a

(a. College of Computer Science, b. Dept. of Science & Technology, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434023, China)

Abstract: Firstly, analyzed the delay composition and delay characteristic based on the architecture of mWSNs, then, investigated the influence of sink mobility on delay through some simulation experiments. The result is not only benefits for the analysis of delay and the evaluation of system performance but also provides the theoretical evidence of the optimizing of system parameters, such as mobile sinks' s number, mobile sinks velocity, transmission radius and the length of data. And the delays of WSN should be studied with energy efficiency.

Key words: mobile sinks wireless sensor networks(mWSNs); architectures; delay; mobile sinks; network performance

近年来,为了解决传统无线传感器网络节点的能量消耗不均衡,网络的连通性和覆盖范围不能得到保证等问题。一些研究人员提出引入移动 sinks 节点来解决上述问题,即移动 sinks 无线传感器网络(mWSNs)^[1]。然而,移动 sinks 节点的无线传感器网络的主要缺点就是增加了网络的时间延迟,传感器节点感测到数据须暂存在节点的缓存中,等待移动节点移动到附近时,才能将数据转发给移动节点。这样就导致了过多的时延,这些时延在某些情况下不能容忍。例如,在城市的污染状况监测,当发生紧急的突发泄露数据时,必须在造成严重后果前传到基站进行处理。

移动 sinks 无线传感器网络由大量的传感器节点(sensors)和相对较少数量的移动 sinks(mobile sinks)组成。图 1 所示移动 sinks 无线传感器网络体系结构包括三层^[1]。

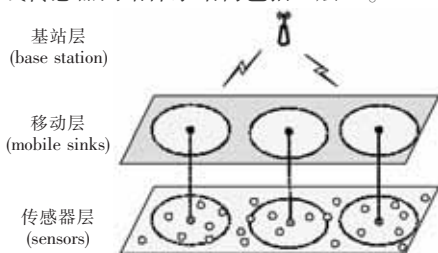


图 1 移动 sinks 无线传感器网络

一般地,所有的符号和标记如下:

S_i : 传感器节点 $i, i=1, 2, \dots, n$ 。 n 表示网络中传感器节点的个数。节点具有短距离无线通信能力,能够与移动 sinks 节点和附近的其他传感器节点进行无线数据通信。传感器节点能感测周围事件,并记入节点缓存中。其缓存小、计算能力低、

能量有限且不能补充。

M_k : 移动 sinks 节点 $k, k=1, 2, \dots, m$ 。 m 表示网络中移动 sinks 节点的数量。移动 sinks 节点具有较大的缓存空间,数据不会溢出,计算能力相对强大,能量能够方便地得到补充。

1 mWSNs 时延组成与分析

时延是以时隙为基本单位,定义为数据从生成到达目的节点所经历的时隙个数。

1.1 mWSNs 数据操作方式

在 mWSNs 中存在两类数据操作^[2]: a) 由观察者发出查询指令,查询指令经过基站、移动 sinks、簇头,最后到感测数据的传感器;传感器接到指令后,实施数据采集,采样结束后,把数据逐跳传发到传感器簇头存储,等待移动 sinks 来收集数据,最后将数据返回查询数据的基站,即为被动式网络,如图 2(a)所示。 b) 数据操作是没有查询指令,只有节点监测数据超过自身监测阈值或根据预先设定的周期进行采样(即分别基于事件和时间驱动),才将监测数据发送出去。经过簇头存储,移动 sinks,直到基站,即为主动式网络,如图 2(b)所示。

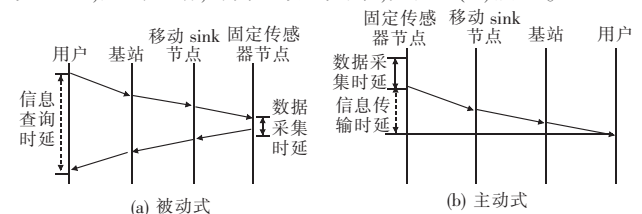


图 2 mWSNs 中端到端网络时延示意图

收稿日期: 2009-03-30; 修回日期: 2009-05-04 基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(Q20081205)

作者简介: 余华平(1978-), 男, 湖北枝江人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为计算机检测与控制、无线传感器网络等(yhpjz@126.com); 郭梅(1981-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络等; 胡杰(1968-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络等。

1.2 路由传输时延组成

基于主动式的数据操作方式,本文将传感器节点向目的基站发送数据包的传输过程分为以下几个阶段^[3]:

- a) n_i 个传感器节点组成静态簇 (cluster), 簇内节点收集的数据经多跳到达簇头, 其时延计为 τ_{sc} 。
- b) 传感器节点或簇首等待运动节点 M_k 进入自己的传输射程。 M_k 进入传输射程后, 传感器节点 (或簇首, cluster header) 将数据发送给 M_k 。 其时延计为 τ_{sm} , 简称为等待时延。
- c) M_k 携带的数据经过移动 sinks 节点若干次中继逐渐向目的基站靠近, 时间延迟计为 τ_{mm} 。
- d) 移动 sinks 节点将数据传输到距离自己最近的基站。 时间延迟计为 τ_{mb} 。
- e) 数据在基站间传输, 最后到达目的基站。 时间延迟计为 τ_{bb} 。

由此可得, 一个数据包从产生到传送用户的时间延迟 D^{total} 计为

$$D^{total} = \tau_{sc} + \tau_{sm} + \tau_{mm} + \tau_{mb} + \tau_{bb} \quad (1)$$

其中: τ_{sc} 和 τ_{sm} 时延是影响网络时延的主要组成部分, 相对于 τ_{sc} 、 τ_{sm} 而言, τ_{mm} 、 τ_{mb} 及 τ_{bb} 阶段已有很成熟的传输技术 (Ad hoc、移动通信技术等), 它们是可以预测的, 且变化不大。此外, 在某些应用模式下, 移动 sinks 节点就是用户, 即 $D^{total} \approx \tau_{sc} + \tau_{sm}$ 。因此本时延研究主要分析这两部分。

1.3 传感器层时延 τ_{sc} 组成与分析

在 mWSNs 中, 信息传输过程的实质是网络上的某节点产生发送信息, 经过各层协议的封装解析并通过网络达到另一个设备的过程。网络时延^[4]就是在这个过程中产生的, 如图 3 所示。

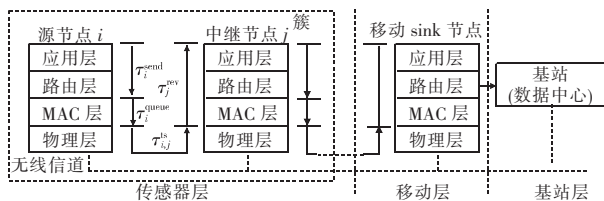


图 3 数据包在 mWSNs 中的传输过程

在数据包传输过程中, 存在许多影响数据包时延的因素, 对于一个由 N 个节点组成的无线传感器网络中, 根据时延产生过程和不同特性, 可将时延 $\tau_{i,j}^{delay}$ 划分为传输时延 $\tau_{i,j}^{ts}$ 、队列时延 τ_i^{queue} 、节点计算时延 τ_i^{co} 与 τ_j^{co} (包括发送端和接收端两个端点的计算时延) 两部分。即:

$$\tau_{i,j}^{delay} = \tau_{i,j}^{ts} + \tau_i^{co} + \tau_i^{queue} + \tau_j^{co} \quad (2)$$

其中: $\tau_{i,j}^{ts}$ 表示数据从传感器节点 i 传输到 j 的时延; τ_i^{queue} 表示传感器节点 i 上的数据包在发送缓存中等待发送的时延; τ_i^{co} 表示传感器节点 i 上的数据计算的时延, 它等于发送处理时延 τ_i^{send} 即 $\tau_i^{co} = \tau_i^{send}$; τ_j^{co} 表示传感器节点 j 上的数据计算的时延, 它等于接收处理时延 τ_j^{rev} , 即 $\tau_j^{co} = \tau_j^{rev}$ 。

具体地, $\tau_{i,j}^{ts}$ 是指物理层信号发送到信道上的发送时间和信号在物理信道上的传输时间。该时延依赖于网络带宽和两节点之间的距离^[5], 可用公式描述为

$$\tau_{i,j}^{ts} = k \times \tau_{bit} + \tau_s \quad (3)$$

其中: k 是所发送数据包的位数; τ_{bit} 是发送一位需要的时间; τ_s 是信号在网络上任意两节点间的传播时间。 $\tau_{i,j}^{ts}$ 主要由网络类型、网络协议、数据包大小、节点的数量、传输距离等因素决定。

队列时延 τ_i^{queue} 是数据链路层数据包在发送缓存中等待 MAC 协议发送的时间, 包括在缓存队列中的排队时间和进行信道竞争等待信道空闲的时间, 其大小由源节点中待发送的数据量和此刻网络流量决定。影响队列时延 τ_i^{queue} 的重要因素有 MAC 层协议、路由层协议、信息连接方式和网络负载; 发送处理时延 τ_i^{send} 是源节点的应用程序产生应用层信息包的时间和将其转换为合适的网络传输格式所需要的时间, 依赖于源节点设备软、硬件的性能, 是可预测的; 接收处理时延 τ_j^{rev} 是指将数据包解析还原为应用层信息并传递给任务的时间, 与目标节点设备的软、硬件性能有关, 也是可预测的, 且 $\tau_i^{send} \approx \tau_j^{rev}$, 即 $\tau_i^{co} \approx \tau_j^{co}$ 。那么式(2)可记为

$$\tau_{i,j}^{delay} = \tau_{i,j}^{ts} + 2\tau_i^{co} + \tau_i^{queue} \quad (4)$$

从上面的分析可以看出, 队列时延 τ_i^{queue} 是影响网络性能的主要时延, 因为相比节点计算时延 τ_i^{co} 、 τ_j^{co} 以及传输时延 $\tau_{i,j}^{ts}$, 队列时延最大, 且是不确定的。特别是在无线通信, 而且网络的拓扑结构易变化, 部分节点可以移动, 这样就加剧了队列时延的不确定性。

1.4 等待时延 τ_{sm} 分析

在 mWSNs 中, 只有当移动 sinks 节点进入某个节点的传输范围或者 k 跳转发范围之内时, 该节点才会触发真正的数据传输; 否则, 数据就缓存到固定节点中等待移动 sinks 节点的访问。这样一来, 在总的时延中, τ_{sm} 时延就是影响性能的主要时延。等待时延 τ_{sm} 的大小与很多因素有关, 如移动 sinks 节点的移动速度、移动 sinks 节点的数量、传感器节点的传输半径、移动 sinks 的移动模型及数据包的长短有关。

文献[6]中, 作者基于 Random Direction 移动模型^[7]下, 针对单个节点的时延进行了分析, 得出如下结论:

$$Pr[D \geq (4f \log m / crv) \sqrt{1/m}] \leq m^{-f} \quad (5)$$

即: 某个传感器节点最多等待 $4 \log m / crv \sqrt{1/m}$ 的时长后一个移动 sinks 节点到来。且在任意时刻, 传感器节点处于某移动 sinks 节点传输覆盖范围的概率为 $p = (crv \sqrt{m}) / (4 \log m)$ 。其中: m 表示移动 sinks 节点的数量; r 为传感器节点传输半径; v 为移动 sinks 节点的移动速度; D 表示单个节点的平均等待时间, 即节点等待第一个移动节点到来之前所经历的等待时间。明显看出, 增加传输半径 r , 或移动 sink 节点的数量 m 及移动速度 v , 均可以减少节点的等待时间。

文献[8]中, 作者在文献[6]的基础上扩展了服务时间 $\mu = p/s$ 的定义, 分析了数据包的长短 L 与无线信道带宽 w 、传感器节点传输半径 r 、移动 sinks 节点的移动速度 v 、服务概率 $p = (crv \sqrt{m}) / (4 \log m)$ 间的关系, 表达式如下:

$$\mu = wr \sqrt{\pi p} / Lv \quad (6)$$

$$D = (1/\lambda) (\rho + (\rho^2 + \lambda^2 \rho^2) / [2(1-\rho)]) \quad (7)$$

其中: $\rho = \lambda / \mu$, λ 为传感器节点上数据服从 Poisson 分布的到达率。为了简化, 忽略数据到达率的影响, 设 $\lambda = 1$, 则式(7)记为

$$D = 1 / (\mu - 1) = Lv / (wr \sqrt{\pi p} - Lv) \quad (8)$$

一方面, 较高的移动速度会增加固定节点和移动 sinks 节点相遇的概率, 即服务概率 P ; 另一方面, 过高的移动速度也会减少移动节点在某个节点范围内滞留的时间。在节点数据量较大或多节点共享链路时, 过快的速度使得节点不能上报所有缓存的数据。剩余的数据不得不等待下次移动 sinks 的到来, 这样势必会造成数据传输时延的增加。总之, 增加 sinks 节点的速度会提高传感器节点的服务概率, 但同时也减少了服务时

间。当确定移动 sinks 的速度时,要同时兼顾两方面的影响。

2 仿真分析

通过仿真验证移动性对网络的性能增益。为了简化仿真,数据收集方式采用移动 sinks 节点直接向每个传感器节点收集数据的方式,传感器节点感知和采集数据后,缓存在内存中等待移动 sinks 节点来收集;物理层采用 ZigBee 无线网络技术,传感器节点的 MAC 层和路由层协议分别使用 S-MAC 协议^[9]和 TTOD 协议^[10]。在 10 000 m × 10 000 m 的一维场景中均匀部署 1 000 个静态传感器节点,移动 sinks 节点按移动模型 Random Direction 进行运动。传感器节点数据包产生率为 1 个数据包/每周期,仿真运行 10 个周期。其他参数使用默认的参数。主要考察平均数据传输时延、数据传输成功率、数据包分片率等性能指标。

2.1 平均数据传输时延

平均数据传输时延定义为数据从生成到被移动 sinks 节点成功接收所经历的时间,主要为等待时间。比较移动 sinks 的速度 v 、数量 m 、节点传输半径 r 及数据包大小 L 之间的关系。结果如图 4~6 所示。正如图 4 所示,移动 sinks 数量 m 越多,时间延迟越小。仿真结果与上述分析完全一致。结果还说明要选择合适的移动 sinks 速度,当移动 sinks 的速度 v 过低时,传感器节点需要等待较长时间才能得到移动 sinks 的数据传输服务;而当移动 sinks 的速度 v 过快时,尽管移动 sinks 节点和传感器节点相遇的概率增加了,但导致了长数据包不能在一次服务期间内传输完毕(实际网络中数据包只能以分片传输)。

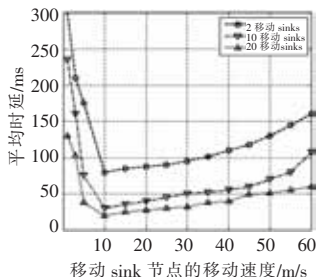


图 4 移动 sinks 节点个数和速度对平均时延的影响

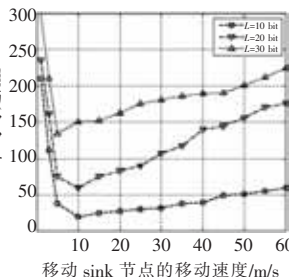


图 5 移动 sinks 的速度和数据包的大小对平均时延的影响

图 5 显示了移动 sinks 的速度和数据包的大小对平均时延的影响。数据包越长,时延性能衰退越严重。其实,增加移动 sinks 节点速度,就相当于减少了每次服务传感器节点的服务时间,相应的对于固定带宽的信道来说,一次传输的数据量就减少。因此,要一次完成数据包的传输,就要减小数据包的长度 L ,即增加速度,实际上就是要减少数据包的长度。从图中可以看出,当数据包长度增加时,时延性能衰退也相应提前。

图 6 表示了传感器节点半径和数量对平均时延的影响。可以看出,半径越大,传输的时延迟也小。另外,增加传输半径的另外一个好处在于它可以增加服务概率,延长移动 sinks 在节点附近停留的时间。值得注意一点,传感器节点是资源受限的,大的传输半径需要大的传输功率,而大的传输功率会消耗更多的能量。

2.2 数据传输成功率

数据传输成功率定义为移动 sinks 成功收到的数据分组数量与网络生成数据数量之比。比较移动 sinks 的速度 v 、数量 m 等之间的关系。结果如图 7 所示。

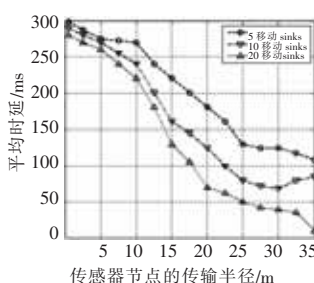


图 6 节点传输半径对时延的影响

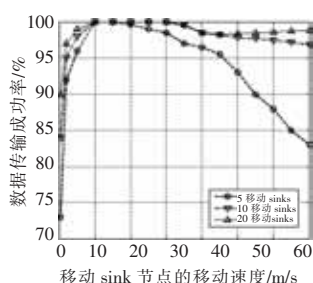


图 7 不同移动速度下的数据传输成功率

图 7 描述了不同速度下的数据成功率,也表现出与图 4 相似的特点。如果一个消息或消息的其中一部分数据被缓存很长时间而无法发送出去,那么该消息被认为失去了应用价值而从队列中丢弃。

2.3 数据包分片率

数据包分片率定义为移动 sinks 节点分片收到的数据包分组数量与网络生成数据数量之比。讨论数据包时序 T (定义为传输需要的时序数 $T=L/w$),节点的传输半径 r ,移动 sinks 的速度 v ,以及数据包分片率 P_{split} 之间的关系。

从上面的分析可以看出,当一个移动 sink 沿着预先确定的轨迹移动时,移动速度的选择很重要,过低的移动速度造成较大的时延;过快的移动速度,导致数据包在一次移动 sink 节点访问期间不能传输完毕。数据包就需要进行分片,把剩余的部分继续缓存起来等待下一次移动 sinks 节点的服务周期到来,从而间接引起时延和丢包率增加。

为了能准确地描述出 P_{split} 、 r 、 v 、 T 之间的关系,保证数据包在时序 T 内完成数据传输。本文首先定义了一个零分片区域,如图 8 所示阴影部分,用字母 H 表示零分片的概率,因为静态传感器节点与移动 sink 节点之间在时序 T 内保持 100% 的连接。区域 H 的边界是由两个半径为 r 的圆分割而成的。显然,如果 H 被视为队列系统, H 的面积越大(更大的单次服务时间),平均数据包分片率就越低。经计算, H 的面积为

$$H_{area} = 4 \times \left(\frac{r^2}{2} \arccos \frac{\sqrt{vT} - vT}{\sqrt{2r}} - \frac{vT}{4} \sqrt{r^2 - \left(\frac{vT}{2}\right)^2} \right), r \geq \frac{vT}{2} \quad (10)$$

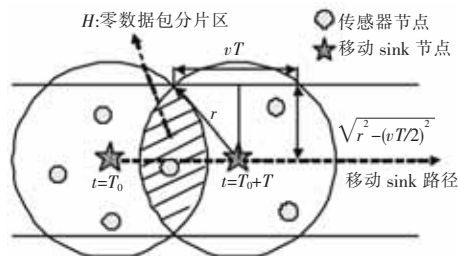


图 8 零数据包分片区 H 与 r, v, T 之间的关系示意图

显然, H_{area} 随半径 r 单调递增,可以通过增加移动 sinks 的传输半径 r ,减少速度 v ,以及时序 T 来达到扩大 H 面积。对于定长数据包 L (即需要的服务时间 T 为常数),可以通过增加节点的传输半径 r ,或降低移动 sinks 的速度。当然,增加传输半径 r ,就要消耗掉更多的能量(需要更大的功率来传送更远的距离),降低移动 sinks 的速度 v 也必然带来时延的增加。所以,要根据实际情况,在各参数之间进行平衡选择。

当设 $T=0.25$ m 时,仿真结果表明传感器节点的半径越长,零数据包分片区就越大,数据包分片率就越小。当然,移动 sinks 节点的速度越小,数据包分片率也相对要小些。而当设移动 sink 节点速度为 $v=15$ m/s,传感器节点 (下转第 322 页)

的迭代过程而使用先前的信道估计,在第一次初始化(使用训练序列)后,当前的信道估计的迭代过程是使用了最后信道估计的初始化过程。然而,在快衰落环境中,由于信道的快速变化,在信号的频域上产生多普勒频移扩散,从而引起信号在时域上时间选择性衰落,这样造成系统性能的下降。因为对一个自适应信道估计算法来说,影响它性能的一个重要因素是信道变化的程度,描述时变信道的重要参数是相干时间和多普勒频移,所以多普勒频移是衡量信道变化的一个重要指标。我们知道,在快衰落(高多普勒频移)时带来的一个主要问题是容易破坏子载波间的正交性,从而引起子载波间干扰(ICI)噪声和在信道跟踪时造成不准确性。因此对多普勒频移的容忍度是衡量一个算法好坏的重要依据^[9]。下面对本文算法在不同多普勒频移下的 BER 性能进行分析。为了研究多普勒频移应对误码性能的影响,本文仿真时设置用户的移动速度分别为 0.28 m/s、5.6 m/s 和 33.3 m/s,载波频率为 5 GHz。

仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,在低信噪比时,性能没有发生明显的下降;但在高信噪比时,性能有些恶化,这是因为在算法中使用直接判决法出现的判决错误增大,而且在多普勒频移增大时,容易使子载波间失去正交性而产生子载波间干扰(ICI),这样引起误码性能有稍微下降。比如当多普勒频移从 5 Hz 增大到 93 Hz 时,在误码率为 10^{-4} 时,其增益下降了大约 1 dB 左右;而当多普勒频移从 93 Hz 增大到 556 Hz 时,其增益只下降了大约 3 dB 左右。由此可以看出,本文算法对多普勒频移有一定的容忍度,不会造成误码性能的明显下降,性能可以保持稳定,算法具有一定的鲁棒性。

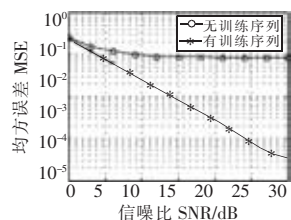


图 4 RLS 算法中 MSE 性能比较

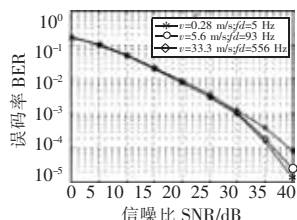


图 5 本文算法在不同多普勒频移下 BER 性能比较

4 结束语

本文提出了一种新的自适应递归信道估计算法,在算法中

(上接第 319 页)的传输半径为 $r = 80$ m 时,仿真结果表明数据包分片率随 T 增加而增加。仿真结果表明: r 越大, T 越小,数据包分片率就越小。

3 结束语

移动 sinks 无线传感器网络主要应用于利用移动节点进行大规模信息采集的环境下。通过分析和仿真验证表明,需要选择合适的移动 sinks 节点速度来减小时延。当移动 sink 节点速度较大时,应采用小数据包来避免数据包丢失;移动 sink 节点数量越多,时延迟越小;另外传感器节点的半径对时延的影响要和能量消耗综合起来考虑。

参考文献:

[1] MUNI S,REN B,JIAO Wei-wei, *et al.* Mobile wireless sensor network architecture and enabling technologies for ubiquitous computing[C]//Proc of IEEE AINAW. Washington DC: IEEE Computer Society, 2007:113-120.
 [2] AKYILDIZ J,SU W. A survey on sensor networks[J]. IEEE Com-

使用最后的信道估计来对当前信道估计的迭代过程初始化,从而对信道进行估计和跟踪。并且通过递归地更新信道估计值和应用矩阵求逆法来降低计算的复杂度。根据对新算法的分析和仿真表明,与 RLS 算法相比,本文算法在降低计算复杂度和没有影响系统误码性能的情况下,在快衰落环境中也能比较准确地估计和跟踪信道的变化,体现该算法对高多普勒频移有一定的鲁棒性。

参考文献:

[1] SAMPATH H, TALWAR S, TELLADO J, *et al.* A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: design, performance, and field trial results [J]. IEEE Commun Mag, 2002, 40(9): 143-149.
 [2] KARAMI E, SHIVA M. Decision-directed recursive least square MIMO channels tracking [J]. EURASIP J Wireless Commun Networking, 2006, 45(1): 1-10.
 [3] ELNASHAR A, ELNOUBI S, ELMIKATI H. Performance analysis of blind adaptive MOE multiuser receivers using inverse QRD-RLS algorithm[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2008, 55(1): 398-411.
 [4] AMIRI A, FATHY M, AMINTOOSI M, *et al.* A new quantized input RLS, QI-RLS, algorithm[C]//Proc of Int Conf on Computational Science and its Applications. Berlin: Springer, 2007:495-506.
 [5] SAEED M A, NOORDIN N K, ALI B M, *et al.* RLS channel estimation and tracking for MIMO-extended IEEE 802.11a WLANs[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2008, 8(2): 251-256.
 [6] HORN R A, JOHNSON C R. Matrix analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
 [7] MOLISH A F. Wireless communication[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
 [8] YOUNIS W M, SAYED A H. Efficient adaptive receivers for joint equalization and interference cancellation in multiuser space-time block-coded systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(11): 2849-2862.
 [9] KARKHANECHI H M, LERY B C. An efficient adaptive channel estimation algorithm for MIMO OFDM System-study of doppler spread tolerance [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2009, 56(2-3): 261-271.

communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
 [3] 戴沁芸, 胡修林, 张蕴玉. 混合无线网络容量及延迟性能的研究[J]. 计算机科学, 2006, 33(4): 50-54.
 [4] 余华平, 邹春学, 郭梅. 一种时延 NCS 性能衰退分析方法[J]. 微计算机信息, 2006, 22(7-3): 67-69.
 [5] 邹春学, 余镇危. 以太 NCS 协议动态服务性能时延分析[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2005, 2(4): 149-151.
 [6] SPYROPOULOS T, PSONUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Performance analysis of mobility-assisted routing [C]//Proc of ACM Mobi Hoc. New York: ACM Press, 2006:49-60.
 [7] 徐鑫鑫, 王玲, 张衡阳. 无线移动 Ad hoc 网络移动模型研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(3): 804-808.
 [8] REN Biao, MA Jian, CHEN Can-feng. The hybrid mobile wireless sensor networks for data gathering [C]//Proc of IEEE IWCMC. New York: ACM Press, 2006:1085-1090.
 [9] NAR P C, CAYIRCI E. PCSMAC: a power controlled sensor-MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proc of SEWWSN. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2005:81-92.
 [10] YE Fan, LUO Hai-yun, CHENG J, *et al.* A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks [C]//Proc of AIMobiCo and Net. New York: ACM Press, 2002:148-159.