

基于 TDOA 残差分析的多点定位抗干扰方法

卢宇^{1,2,3*}, 吴宏刚³, 徐自励³

(1. 四川师范大学 计算机科学学院, 成都 610101; 2. 电子科技大学 通信抗干扰国家重点实验室, 成都 611731;

3. 中国民航总局 第二研究所, 成都 610041)

(* 通信作者电子邮箱 onemore_luck@163.com)

摘要:针对多点定位(MLAT)技术对信号从目标到接收站点时间差(TDOA)的依赖性及其 TDOA 精度对定位精度的影响,提出了一种基于 TDOA 残差分析的定位抗干扰方法。该方法通过 TDOA 在定位前后的残差来评判接收站点的时钟精度,从而实现站点优化选择和抗干扰,达到提高定位精度的目的。仿真实验和机场真实数据实验表明该方法可以显著提升 MLAT 的定位精度,不仅可行,而且有效。

关键词:多点定位;接收时间差;抗干扰;监视;机场

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Anti-interference method based on TDOA residual error in multilateration system

LU Yu^{1,2,3*}, WU Honggang³, XU Zili³

(1. College of Computer Science, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan 610101, China;

2. National Communication Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China;

3. The Second Research Institute, Civil Aviation Administration of China, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: In view of the fact that Multilateration (MLAT) technique locates the target according to the Time Difference Of Arrival (TDOA) from target to each station and the fact that the precision of clock in each station is crucial to the precision of target locating, an anti-interference method based on the residual error of TDOA was proposed. It estimated the clock precision of each station by the residual error, and archived the goal of the optimal stations selection and the locating precision improvement. The experimental results based on both simulation and practical data illustrate the proposed method can significantly enhance the locating precision, not only feasible but also effective.

Key words: Multilateration (MLAT); Time Difference Of Arrival (TDOA); anti-interference; surveillance; airport

0 引言

长期以来,传统的雷达技术在民航交通信息监视中扮演着重要角色。但是近些年来,随着卫星定位技术、空地数据链技术以及地面站接收技术的深入研究与发展,出现了一系列新型的监视技术^[1-2],多点定位(Multilateration, MLAT)技术就是其中的典型代表^[3]。在国际民航组织的先进场面活动目标导航与控制系统(Advanced Surface Movement Guidance & Control System, A-SMGCS)规范中,MLAT 技术被推荐为未来大型机场场面监视的必备技术,代表了未来场面精确监视技术的发展方向^[4]。就定位原理上看,MLAT 技术类似于全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS)技术,但它是依赖于陆基的地面接收站。它依据信号源到达各接收站之间的时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)以及地面站之间的位置关系来确定目标的位置。定位结果可直接通过地面有线链路传至数据中心,因此信息安全性高;而在定位精度上,由于摆脱了 GPS 系统卫星站点移动、时间同步困难等因素的限制,因此在理论上 MLAT 精度可以达到米级,甚至亚米级。

但是,在长期对 MLAT 理论及工程技术^[5-8]进行深入研究的基础上,发现 MLAT 在实际应用中要达到理想的精度必须解决抗干扰问题。MLAT 的定位精度主要取决于两个重要因素:一个是监视位置的几何精度稀释因子(Geometric Dilution Of Precision, GDOP),另一个是地面站收到目标信号

的时钟误差^[9-10]。对于第一个因素,误差源是目标与地面站位置的相互关系,可以通过合理且冗余的布站得以解决;对于第二个因素,误差源自于接收站晶振频率的抖动和偏移而导致的时钟误差。特别地,由于目标的位置解算需要信号接收站点协同配合,如有个别接收站点时钟误差较大,将会恶化整个定位解算的结果。目前,对定位误差的抑制方法主要是通过事后滤波与平滑,这只能在一定程度上缓解时钟不准对定位结果的影响。如果能及时发现时钟不准的接收站,则可以在定位解算时将误差站点数据排除在外,从而在源头上确保目标的定位精度。

本文正是致力于研究一种在位置解算时排除时钟误差较大站点,实现站点优选,从而提高定位精度的抗干扰方法。由于误差的随机性,当时钟误差较大的接收站点数据参与定位运算后,TDOA 事后估计的残差较大。对站点组合定位运算后的 TDOA 残差进行统计分析,可以发现并排除故障站点。基于此,本文建立了基于 TDOA 残差的误差站点检测方法。基于仿真数据的实验和实际数据的实验均表明了本文方法的有效性。

1 MLAT 原理

场面 MLAT 系统基本结构如图 1 所示。信号源,即目标、发射信号。该信号被布设在机场场面及周边的远端地面接收站捕获。因为信号源距离各远端站的距离是不同的,因此到

收稿日期:2012-11-06;修回日期:2013-01-01。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61079006);国家科技支撑计划项目(2011BAH24B06);四川省教育厅项目(11ZB071)。

作者简介:卢宇(1979-),男,四川乐山人,讲师,博士,主要研究方向:目标检测与跟踪、多源数据融合; 吴宏刚(1977-),男,四川乐山人,高级工程师,博士,主要研究方向:目标检测与跟踪; 徐自励(1974-),男,贵州贵阳人,高级工程师,博士,主要研究方向:目标检测与跟踪。

达各远端站的时间(Time Of Arrival, TOA)也不同。其中的时间差就是 TDOA,它反映了信号源与各站点之间的位置关系。由于远端站位置固定,而且可以事前被准确地测量,因此只要能获取准确的 TDOA,目标的位置也就可以被准确地计算出来。站点位置和 TDOA 被送至中心站进行解算。对于场面二维坐标表示的目标,至少应确保有 3 个站点可以捕获目标信号。理论上,要达到米级的定位精度,TOA 误差应达到纳秒级。

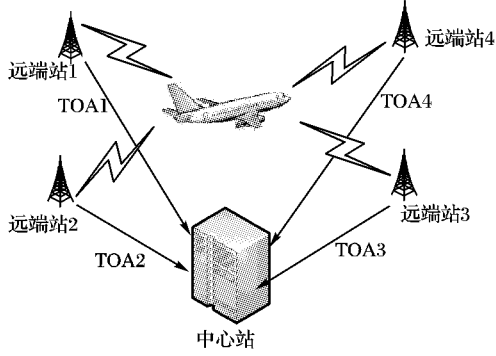


图 1 MLAT 系统结构

设有 $M (M \geq 3)$ 个远端站捕获到目标信息, (x, y) 为目标待估计的位置坐标, (X_i, Y_i) 为站点 i 的坐标且已准确获取。于是,目标距站点 i 的真实距离可表示为:

$$r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (1)$$

设站点 1 为基准站,定义目标到站点 i 与到基准站的距离之差的测量值为 $r_{i,1}$,它实际上是通过两站之间的 TDOA 测量值来体现的。将此 TDOA 测量值定义为 $\tau_{i,1}$,于是有:

$$r_{i,1} = c\tau_{i,1} = r_i - r_1 + cn_{i,1} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} + cn_{i,1} \quad (2)$$

其中: c 为光速; $n_{i,1}$ 为站点 i 与站点 1 之间的时钟误差,符合分布 $N(0, \sigma^2)$ 。

这样 MLAT 实际上就是寻找恰当的 (\hat{x}, \hat{y}) ,使得 Δr 与 $r - r_1$ 最接近,即

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg\{\min[\|\Delta r - (r - r_1)\|^2]\} \quad (3)$$

其中:向量 $r = [r_2, r_3, \dots, r_M]^T$, 向量 $r_1 = [r_1, r_1, \dots, r_1]^T$, 向量 $n = [n_{2,1}, n_{3,1}, \dots, n_{M,1}]^T$, 向量 $\Delta r = r - r_1 + cn = [r_2 - r_1, r_3 - r_1, \dots, r_M - r_1]^T + cn$ 。

有多种方法可以解此最小值求解问题,包括基于迭代运算的 Taylor 方法^[11]、基于非迭代运送的 Chan 方法、Si 方法等^[12]。出于效率因素的考虑,本文选择 Chan 方法,简化表示为:

$$P_{TGR} = CHAN(P_s, TDOA_s) \quad (4)$$

其中: P_{TGR} 表示目标位置估计; $TDOA_s = [\tau_{2,1}, \tau_{3,1}, \dots, \tau_{M,1}]^T$; P_s 表示地面接收站位置,如式(5), p_x^i, p_y^i 为站点 i 坐标。

$$P_s = \begin{bmatrix} p_x^1 & p_x^2 & \dots & p_x^M \\ p_y^1 & p_y^2 & \dots & p_y^M \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

影响式(3)和(4)的主要因素是 GDOP 和时钟偏差,分别反映为式(4)的第 1 个参数和第 2 个参数。其中 GDOP 的影响可以在工程上通过合理且冗余的布站得以解决。一旦站点拓扑结构确定, GDOP 的影响就确定了。因此,在这种情况下,排除第 2 个参数中的干扰因素,即检测并去除时钟误差较大站的数据,使式(3)和式(4)入口参数处于良好的工作区间,就成为提升 MLAT 系统定位精度的关键。

2 基于 TDOA 残差统计的故障站点估计

在 GDOP 状态良好的条件下,站点 TOA 时钟误差成为 MLAT 定位误差的主要来源,定位误差又进一步反映为站点间原始 TDOA 与事后估计 TDOA 之间的差异。由于误差具有一定随机性,需结合统计方法进行分析。本文建立了这种统计方法及与之匹配的实时处理步骤。

2.1 统计方法

设目标存在于 GDOP 良好的区域,有 M 个远端站捕获到场面目标信号,其中有站点可能存在相对较大的时钟误差。若站点数 $M \geq 4$,则存在冗余站点,本文利用下列方法对误差站点进行排除。

对于待分析的站点 i ,首先在组合 M_i 中去除该站点 i ,得到 TDOA 事前估计量为:

$$TDOA_{i-} = [\tau_{2,1}, \tau_{3,1}, \dots, \tau_{i-1,1}, \tau_{i+1,1}, \dots, \tau_{M,1}]^T \quad (6)$$

及对应组合的站点坐标:

$$P_i = \begin{bmatrix} p_x^1 & p_x^2 & \dots & p_x^{i-1} & p_x^{i+1} & \dots & p_x^M \\ p_y^1 & p_y^2 & \dots & p_y^{i-1} & p_y^{i+1} & \dots & p_y^M \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

利用 Chan 算法,解得目标估计位置:

$$P_{TGR}^i = CHAN(P_i, TDOA_{i-}) \quad (8)$$

利用目标估计位置坐标 $P_{TGR}^i = [p_{TGR}^{i,x}, p_{TGR}^{i,y}]$ 和已知组合站点位置 P_i ,得去除站点 i 后 TDOA 的事后估计量:

$$TDOA'_{i-} = [\tau'_{2,1}, \tau'_{3,1}, \dots, \tau'_{i-1,1}, \tau'_{i+1,1}, \dots, \tau'_{M,1}]^T \quad (9)$$

其中:

$$\tau'_{k,1} = \left[\frac{\sqrt{(p_x^k - p_{TGR}^{i,x})^2 + (p_y^k - p_{TGR}^{i,y})^2} - \sqrt{(p_x^1 - p_{TGR}^{i,x})^2 + (p_y^1 - p_{TGR}^{i,y})^2}}{c} \right] \quad (10)$$

于是得到基于站点 i 去除后的单次定位 TDOA 残差统计量:

$$v_{i-} = (TDOA'_{i-} - TDOA_{i-})^T (TDOA'_{i-} - TDOA_{i-}) \quad (11)$$

显然,对于每一轮统计,都可以得到站点 1 至站点 M 的单次残差统计量。将第 j 轮统计量记为 $\{v_1^j, v_2^j, \dots, v_M^j\}$ 。考虑到噪声因素,单轮统计量易受干扰。在单轮统计量基础上,构建基于滑窗修正的平均统计量以增强抗干扰性。对每一个站点 i ,有

$$v_{i-}^* = \sum_{k=0}^{l-1} v_{i-}^{t-k} / l \quad (12)$$

其中: t 表示当前时刻, l 表示滑窗的长度。

在 MLAT 系统工程实施过程中,通过合理且冗余的布站可以保障对监视区域有良好的 GDOP 覆盖。在此情况下,对目标的监视精度将主要取决于站点的时钟精度。而该时钟精度对目标监视的影响又反映为 v_{i-}^*, v_{i-}^* 越小,表明站点 i 的时钟精度越差。去除时钟精度较差的站点后,可以在源头排除定位的干扰因素,从而确保监视精度。

2.2 实时处理步骤

利用上述算法可以抑制部分站点时钟不准而带来的干扰因素,从而提高定位精度。但是上述统计方法因存在重复运算过程,因此有较大的时间复杂度。结合统计特征的稳定性和延续性,对流程进行优化,从而实现目标位置解算的实时处理,流程如图 2。

可以看出,当接收到站点及 TOA 信息后,依据 TDOA 残差统计库优选站点进行位置解算并立即输出目标位置。然后再通过遍历过程对每一个站点统计反映时钟误差的 TDOA 残差,并将其写入 TDOA 残差库。由于统计特性具有稳定性和

延续性,因此将计算量偏大的时钟偏差统计顺序适当延后并不会对站点优选结果带来明显影响,而换来的好处则是目标位置解算实时性的显著提升。

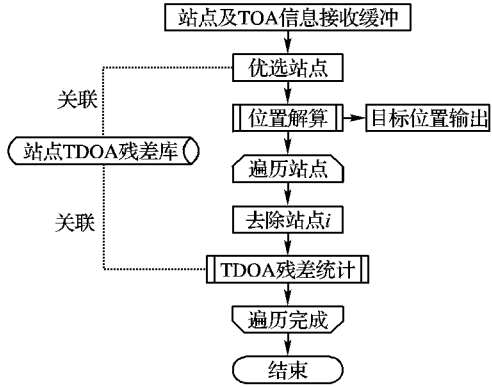


图 2 实时处理框架

3 实验分析

为了测试本文提算法的效果,分别进行仿真实验和机场实测数据实验。在仿真实验中,侧重考察算法的抗干扰性和定位精度;在机场实测数据实验中,侧重考察算法的可行性。

仿真测试场景如图 3,在场面存在 9 个站点,位置如“*”所示,依次编号为 1~9。站点分布形成对中心监视区域 GDOP 的良好覆盖。站点 1~8 时钟工作状态正常,其误差服从 $N(0, \sigma^2)$; 站点 9 时钟抖动异常,误差服从 $N(0, (3\sigma)^2)$ 。在这里, σ 设为 10 ns,与真实系统相似;目标呈蛇形运动。

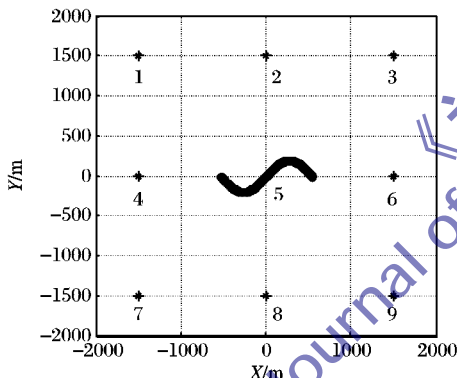


图 3 仿真场景

利用本文方法对站点时钟误差特征进行统计,如图 4 所示。可以看出,排除了站点 9 之后,TOA 残差显著降低,因此确认站点 9 为异常站点。

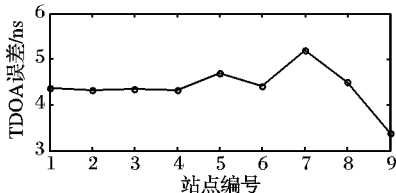


图 4 站点时钟误差特征统计

通过统计特征排除异常站点干扰后,利用剩余站点对目标定位。由于仿真实验可以获得目标的真实位置数据,因此可以对定位误差进行定量分析。作为对比,本文也对无本文抗干扰逻辑的经典 MLAT 定位方法进行了测试和比较。图 5 显示了有抗干扰措施的 Chan 算法定位结果和无抗干扰措施的 Chan 算法定位结果,有抗干扰措施的 Taylor 算法定位结果和无抗干扰措施的 Taylor 算法定位结果。可以看出,本文的抗干扰措施使得定位精度得以明显提升,并且具有普遍有效性。

除了仿真测试外,还在成都双流国际机场及周边区域进行外场验证。在中心站添加了本文抗干扰算法。从实际数据效果来看,场面监视目标位置输出平滑,如图 6 所示。这说明站点时钟抖动得到了良好的抑制,因此本文方法是可行的。

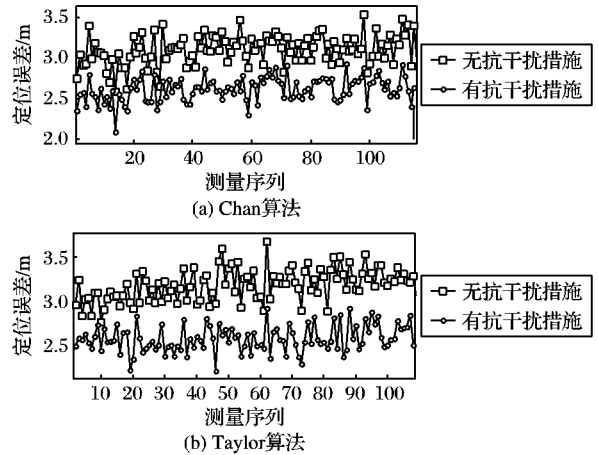


图 5 改进前后的定位精度对比

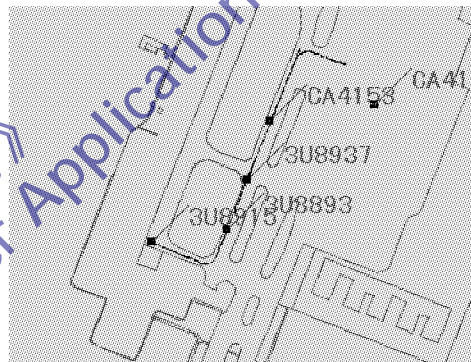


图 6 实测数据效果

4 结语

时钟精度是 MLAT 系统的关键。本文结合站点时钟抖动对定位结果的影响,提出了一种基于 TOA 残差的统计方法,用以衡量各 MLAT 地面站时钟的精度,从而对站点数据进行优化选择,抑制异常站点时钟不准给定位带来的干扰,提高 MLAT 系统定位精度。基于仿真数据的实验表明了该算法具有较高的准确性,而基于机场实际测试数据的实验表明该算法有效且可行。在下一步的工作中,将进一步对本文算法流程进行完善和优化,实现 TOA 残差统计与目标位置解算的并行处理,为未来我国机场 MLAT 系统的工程化建设提供依据。

参考文献:

- [1] HENDRICKS T, U. S. airline industry perspective on NextGen: the view from Washington [C]// IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 1-9.
- [2] POURVOYEUR K, MATHIAS A, HEIDGER R. Investigation of measurement characteristics of MLAT / WAM and ADS-B [C]// TIWDC/ESAV: IEEE International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 203-206.
- [3] NEVEN W H L, QUILTER T J, WEEDON R, et al. Wide area multilateration, Report on EATMP TRS 131/04 Version 1.1 [R]. [S. l.]: Eurocontrol, 2005.
- [4] ICAO Doc9830 AN/452, Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual [M]. [S. l.]: ICAO, 2004.

```
#make ARCH = powerpc
CROSS_COMPILE = powerpc-linux- uImage
```

3.4 DTS 文件编译和移植

设备树编译器 DTC 通过编译 DTS 文件生成设备树对象 DTB,其使用方法如下:

```
#dtc -O dtb -o mpc8247.dtb -b 0 mpc8247.dts
```

内核在 2.6.25 版本之后包含了 dtc 编译器,所以可以直接在 Linux-3.4.4 根目录下,使用 make 命令编译 DTS 文件:

```
#make ARCH = powerpc CROSS_COMPILE =
powerpc-linux- mpc8247.dtb
```

最后,将 uImage 和 mpc8247.dtb 分别加载到内存中,可以看到一个典型的引导过程中,DTB 是如何得到使用的。

3.5 根文件系统制作

在系统调试期间使用网络文件系统 (Network File System, NFS),部署期间使用 Ramdisk 根文件系统^[12]。Ramdisk 用内存空间模拟出硬盘分区,通常用于保存经压缩的磁盘文件系统 (例如 ext2)。我们建立一个基于 Ext2 的 Ramdisk 映像以供目标板使用。Ramdisk 根文件系统的制作及移植步骤如下 (这里省略具体执行命令):

- 1) 创建根文件系统目录。
- 2) 创建各种必要的系统文件和设备文件。
- 3) 建立启动相关的配置文件。
- 4) 拷贝工具箱。
- 5) 编译 Busybox,安装系统软件和应用。
- 6) 将制作的根文件系统转换成 Ext2 映像,使用 mkfs.ext2

命令:

```
#losetup /dev/loop2 ramdisk.img
#mkfs.ext2 /dev/loop2
7) 使用 mkimage 制作 U-Boot 映像文件。
#gzip -v9 ramdisk.img
#mkimage -T ramdisk -C gzip -n
'Ramdisk Image' -d ramdisk.img.gz uRamdisk
```

- 8) 将制作的 Ramdisk 映像加载至内存。

3.6 系统部署

在前面几节创建的 u-boot.bin、uImage.dtb 和 Ramdisk,经过系统部署后能够在目标板上运行嵌入式 Linux 操作系统。基本步骤如下:通过 BDI2000 及 JTAG 接口将 u-boot.bin 烧写到 Flash 位置,通过 U-Boot 和 TFTP,将 uImage.dtb 和 Ramdisk 烧写到 Flash 相应位置。设置 U-Boot 的相应启动参数,即可自动引导启动嵌入式 Linux 系统。

4 结语

基于自己开发的 MPC8247 嵌入式开发板,成功地实现了

PowePC Linux 系统的开发和部署,并在硬件平台上稳定运行。通过本文,可以理解 PowerPC 架构、MPC8247 开发板及其硬件组成,掌握嵌入式 Linux 系统开发的整个流程。尤其是在理解扁平设备树基础上编写了 DTS 文件,使得整个系统能够顺利运行,这对基于 PowerPC 架构的嵌入式 Linux 系统开发有很好的借鉴作用。

开发的整个 PowerPC 架构 MPC8247 开发板为嵌入式 Linux 的研究提供了很好基础,接下来可以进行嵌入式实时性研究、文件系统研究和深入扁平设备树研究。一个重要的延伸是将 MPC8247 开发成通用的通信设备,例如小型交换机和路由器等。

参考文献:

- [1] FU Y, DENG C, LI C. Optimal design of video decoder based on PowerPC 405[C]// Proceedings of International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2012: 3353 - 3357.
- [2] 刘常清, 黄文君, 詹源. 基于 PowerPC 的车载通信系统设计[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 207 - 209.
- [3] LIKELY G, BOYER J. A symphony of flavours: using the device tree to describe embedded hardware[C]// Proceedings of Linux Symposium. Ottawa, Canada: Linux Symposium, 2008: 26 - 37.
- [4] GIBSON D, HERRENSCHMIDT B. Device trees everywhere[EB/OL]. (2008 - 01 - 09)[2012 - 10 - 11]. http://ozlabs.org/~dgibson/dtc/dtc_git.
- [5] HERRENSCHMIDT B. Booting the Linux/PPC kernel without open firmware[EB/OL]. (2005 - 05 - 01)[2012 - 10 - 11]. <http://ozlabs.org/pipermail/linuxppc64-dev/2005-May/004073.html>.
- [6] DENX. Flattened device tree blob[EB/OL]. [2012 - 10 - 11]. <http://www.denx.de/wiki/DULG/LinuxFDTblob>.
- [7] 王长清, 蔡炜, 蔡惠智. 基于 PowerPC 双核处理器嵌入式 Linux 系统开发[J]. 微计算机信息, 2010, 26(20): 5 - 7.
- [8] Semiconductor Corporation. MPC8272 PowerQUICC II family reference manual[EB/OL]. [2012 - 10 - 11]. http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/MPC8272RM.pdf.
- [9] IEEE Std. 1275-1994, IEEE Standard for Boot (Initialization Configuration) Firmware: Core Requirements and Practices[S]. [S. l.]: IEEE, 1994.
- [10] DENX. The DENX U-Boot and Linux Guide (DULG) for TQM8272[EB/OL]. [2012 - 10 - 11]. <http://www.denx.de/wiki/publish/DULG/DULG-tqm8272.pdf>.
- [11] HALLINAN C. 嵌入式 Linux 基础教程[M]. 2 版. 周鹏, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [12] YAGHMOUR K. 构建嵌入式 Linux 系统[M]. 2 版. 秦云川, 译. 北京: 中国电力出版社, 2010.

(上接第 1472 页)

- [5] 李恒, 徐自励, 金立杰. 数据关联方法在多点定位系统中的应用[J]. 中国测试, 2012, 38(3): 69 - 71.
- [6] 徐自励. 三站定位模糊、GDOP 与站点布局关系分析[J]. 通信技术, 2012, 45(3): 99 - 101.
- [7] LU Y, WU H G, XU Z L, *et al.* An improvement on distributed detection in clock synchronization for MLAT sensor network[C]// 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent System. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 81 - 85
- [8] 张爱清, 叶新荣, 胡海峰. 无线传感器网络质心定位新算法及性能分析[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2429 - 2431.
- [9] WU C-H, SU W-H, HO Y-W. A study on GPS GDOP approximation using support-vector machines [J]. IEEE Transactions on

Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 137 - 145.

- [10] LU Y, LIU C Z, WANG Z N, *et al.* TOA association based on an improved fuzzy clustering method in MLAT for A-SMGCS [C]// IEEE Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 573 - 577.
- [11] ROMERO L A, MASON J. Evaluation of direct and iterative methods for overdetermined systems of TOA geolocation equations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1213 - 1229.
- [12] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905 - 1915.