

# 基于优选 RFID 观测值的 GPS/RFID 组合定位方法\*

彭 竞<sup>1,2</sup>, 刘增军<sup>1</sup>, 朱 明<sup>2</sup>, 王飞雪<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 墨尔本理工大学 数学与空间地理学院, 澳大利亚 墨尔本 3001)

**摘要:**在典型的城市环境中,单一 GPS 定位模式已很难满足连续定位的要求,采用 GPS 和其他非 LOS (Line of Sight, 视线矢量) 定位方法(如 RFID 定位方法)进行组合可实现弱信号或无导航信号环境下的定位。针对 GPS/RFID 组合定位系统中全选 RFID 观测值所带来的较高的计算复杂度的问题,提出了一种在加权观测值条件下使组合定位误差最小的 RFID 观测值优选方法。实测实验结果表明,采用这种优选 RFID 观测值的 GPS/RFID 组合定位系统可改善在 GPS 信号受遮挡条件下的 GDOP 值,有效提高单一卫星导航定位系统的定位可用性和定位精度,并大大降低了系统的计算复杂度。

**关键词:**全球定位系统;无线射频识别;几何精度因子;组合定位

中图分类号: TN967.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)02-0070-06

## Research on GPS/RFID integration algorithm based on the optimal selection of RFID observations

PENG Jing<sup>1,2</sup>, LIU Zengjun<sup>1</sup>, ZHU Ming<sup>2</sup>, WANG Feixue<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne VIC 3001, Australia)

**Abstract:** In the typical urban environment, GPS standalone can hardly satisfy the requirement of continuous positioning, particularly in the weak signal or no signal environment. Fortunately, this problem can be solved by using the integration method based on GPS and non-LOS (Line of Sight) positioning such as RFID positioning. To solve the problem of computational load in the traditional GPS/RFID integration based on all selection of RFID observations, this research proposed an optimal selection method of RFID observations with the minimum positioning error under the weighted observation condition. The experiment results show that the geometric distribution of precision in the environments, such as shadow or blockage, can be improved by using the proposed method, and both availability and accuracy of positioning can be improved efficiently. Moreover, the computational load can be decreased dramatically through this proposed method.

**Key words:** GPS; RFID; GDOP; integration positioning

GPS 是一种全天候的卫星导航定位方式,可向全球范围内的用户提供精确、连续的三维位置和时间信息<sup>[1]</sup>。但在许多卫星信号受遮挡或多路径误差较严重的地区,例如室内、树林、高楼环境、隧道等,弱信号、无信号或多径误差较严重的环境会导致接收机测距误差增大而无法获得正确的定位结果,甚至无法进行定位。为了克服 GPS 系统的弱点,则需要采用导航传感器或其他无线定位手段(如 RFID 定位技术)与 GPS 定位系统相结合的方法来提高导航系统的定位精度和定位可用性<sup>[2-4]</sup>。

RFID(Radio Frequency Identification)技术是一种无线射频识别技术,常用于物流应用中的物

品识别,近年来逐渐广泛应用于物联网<sup>[5]</sup>。RFID 系统主要由 RFID 天线、RFID 读卡器和 RFID 标签组成,RFID 标签主要包括可用于短距离定位的被动式标签和适合长距离定位的主动式标签。RFID 定位主要基于信号强度进行测距或定位,包括 fingerprinting、LANDMARC、CoO( Cell of Origin) 等方法<sup>[6-8]</sup>,其定位精度取决于所选取的标签类型、标签的分布密集程度以及待定位区域动态物体的干扰情况。一般来说,在 RFID 标签分布合理且信号接收良好的情况下,采用主动式 RFID 标签进行室内定位的精度为 3 ~ 4m<sup>[7]</sup>,户外定位精度为 2 ~ 5m<sup>[3]</sup>。但是这种定位方法不适合大面积范围内的定位,一般可作为 GPS 在城市环境下

\* 收稿日期:2011-11-29

基金项目:第二届中国卫星导航学术年会青年优秀论文获奖者资助课题项目(CSNC2011-QY-11)

作者简介:彭竞(1981—),女,湖南临湘人,博士研究生,E-mail: pengjing@nudt.edu.cn;

王飞雪(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: wangfeixue365@sina.com

信号受遮挡地区的辅助定位方式。

在城市环境中,可采用 GPS/RFID 组合方式进行定位,最常用的方法是采用同一观测时刻获得的所有 RFID 和 GPS 观测值进行联合定位解算,这种定位方法充分利用了 GPS 和 RFID 系统的观测信息,可有效减小单一 GPS 和 RFID 定位系统的 GDOP 值。但是在这种全选观测值的方法中,如果同一时刻观测得到的 GPS 和 RFID 观测值数量较多,定位方程数量也会随之增大,从而给系统带来较大的计算复杂度。同时,RFID 观测误差受 RFID 标签摆放位置以及天线增益等因素的影响,在非加权观测条件下,全选 RFID 观测值会引入较大的定位误差。考虑到全选 RFID 观测值组合定位方法中存在的问题,本文分析了不同测距精度的 RFID 观测值对定位误差的影响,提出了一种在加权观测值条件下使组合定位误差最小的 RFID 观测值优选方法,在提高单一 GPS 系统的定位可用性和定位精度的同时,还能有效降低系统的计算复杂度。

## 1 GPS/RFID 组合定位原理

RFID 定位方法包括多种,本文采用的是基于 RFID 信号强度进行测距,然后与 GPS 观测值进行联合定位解算的 GPS/RFID 组合定位方法。在 GPS 信号较弱或无信号的地区,先将一组 RFID 参考标签按照地形特点和分布规律安放在该地区,当装载有 RFID 移动读卡器和 GPS 接收机的车辆经过 RFID 参考标签覆盖区域时,可自动检测到来自于 RFID 参考标签的数据信息;当 RFID 移动读卡器未检测到 RFID 标签信息时,则采用 GPS 单独定位模式。GPS 和 RFID 定位系统通过协调世界时(UTC)<sup>[1]</sup>进行时间同步,参考坐标系均采用地心地固(ECEF)坐标系<sup>[1]</sup>。GPS/RFID 组合定位系统示意图如图 1 所示。

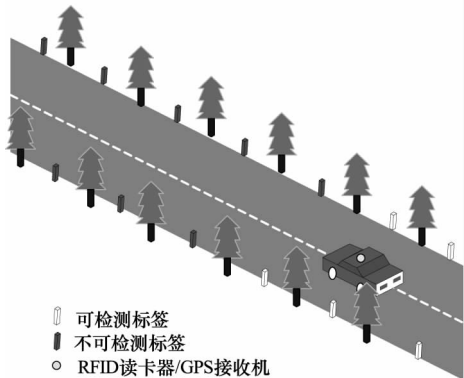


图1 GPS/RFID 组合定位系统场景示意图  
Fig. 1 Schematic graph of the GPS/RFID positioning scenario

为了避免在 RFID 读卡器和标签之间大量的信息传输,可事先将每个 RFID 标签所在的位置坐标按照标签序号存储在系统的数据库中,在定位过程中仅传输参考标签的 ID 信息、信号强度指示值及系统时间信息等数据信息,当读卡器获得标签的 ID 信息后,可在系统数据库中查询相应的导航信息。本文采用主动式 RFID 标签作为系统参考标签,可检测信号强度的门限为  $-75\text{dBm}$ ,对应信号传输距离为  $20\sim 30\text{m}$ ,适合较长距离定位。用户在获得 RFID 标签的信号强度以后,采用信号衰减模型将信号强度转换成 RFID 参考标签与移动读卡器之间的几何距离,再对 RFID 和 GPS 的测距值进行联合解算得到用户的位置坐标。GPS/RFID 组合定位系统工作原理图如图 2 所示,采用卡尔曼滤波器作为 GPS/RFID 组合定位系统数据处理的主滤波器。

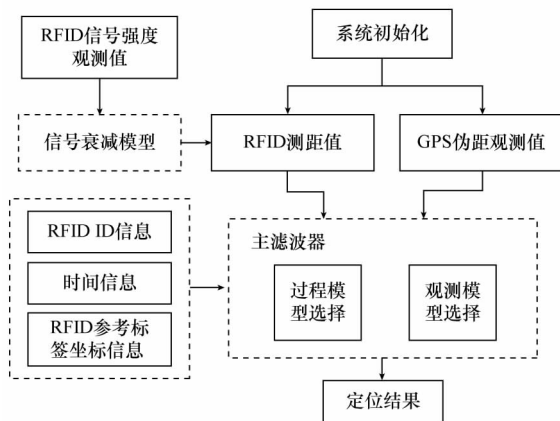


图2 GPS/RFID 组合定位系统工作原理图

Fig. 2 Schematic flow chart of the GPS/RFID integration System

长距离路径损耗模型<sup>[9]</sup>

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

其中,  $PL(d)$  为目标距离  $d$  处的路径损耗,  $PL(d_0)$  为参考距离  $d_0$  ( $d_0 > 0$ , 一般取  $d_0 = 1\text{m}$ ) 处的路径损耗,  $\gamma$  为路径衰减因子。

在自由空间取  $\gamma = 2$ , 由式(1)可推导出 RFID 参考标签与 RFID 移动读卡器之间的距离  $\hat{d}$ :

$$\hat{d} = d_0 \cdot 10^{\frac{S(d_0) - S(d)}{10\gamma}} \quad (2)$$

其中,  $S(d_0)$  为参考距离处的信号强度,  $S(d)$  为目标距离处的信号强度观测值, 单位为  $\text{dBm}$ 。

## 2 优选 RFID 观测值的 GPS/RFID 组合定位方法

在 GPS/RFID 组合定位系统中, RFID 标签一般安装在无 GPS 卫星信号或卫星信号受遮挡较

严重的地区,采用 RFID 和 GPS 观测值进行联合定位解算可有效减小 GDOP 值,并提高定位可用性。此外,当 RFID 标签安装在同一路面时,相对接收机天线相位中心的仰角较小,因此参与三维定位的 RFID 标签的几何构型一般较差,而 GPS 系统中高仰角可见卫星的加入也会对 RFID 定位的几何因子有所改善。

但是,当系统的可见卫星数和可测得的 RFID 标签数量较多时,参与定位解算的观测方程数显著增多,在滤波器中大量的高维矩阵运算会给系统带来较大的计算复杂度,因此有必要对 RFID 观测值进行优选。图 3 给出了卡尔曼滤波在取不同观测向量维数时的计算复杂度比较。其中  $n$  为系统状态变量维数,令  $n=4$ ;  $l$  为观测向量维数。

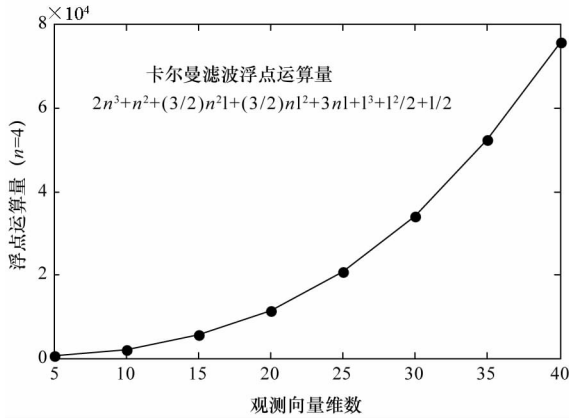


图 3 不同观测向量维数的卡尔曼滤波计算复杂度比较

Fig. 3 Comparison of calculation of Kalman filter with different observation dimension

## 2.1 增加单个 RFID 观测值对定位误差的影响

在 RFID/GPS 组合导航系统中,每个 RFID 标签所处的位置不同,而 RFID 标签周围动态物体的变化也会造成 RFID 天线增益在不同的方向有所不同,可能会造成每个 RFID 的测距误差存在一定的差异。下面给出增加一个 RFID 观测值对定位误差的影响分析。

根据 GDOP 值随观测值数量增多而减小的特点,增加一个观测值对减小 GDOP 值的贡献  $q$  为<sup>[10]</sup>:

$$\text{GDOP}_m^2 = \text{GDOP}_{m-1}^2 - q \quad (3)$$

$$q \equiv \text{Tr} \left( \frac{\mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_{m-1}^i}{1 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i} \right) > 0 \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{A}_{m-1}^i = \mathbf{A}_{m-1}^T = (\mathbf{H}_{m-1}^T \mathbf{H}_{m-1})^{-1}$ ,  $\mathbf{H}_{m-1}$  为从  $m$  颗卫星中去掉第  $i$  个观测值所得到的视线矢量矩阵,  $\mathbf{g}_i = [e_{x_i} \ e_{y_i} \ e_{z_i} \ 1]^T$  为第  $i$  个观测值的视线矢量。由于 RFID 测距值不涉及时间信

息,对于 RFID 观测值有  $\mathbf{g}_i = [e_{x_i} \ e_{y_i} \ e_{z_i} \ 0]^T$ 。

一般而言, GPS 伪距观测值和 RFID 观测值具有不同的观测精度,加入一个 RFID 观测值后系统定位误差的推导如式(5)所示。其中  $\mathbf{dx}$  为三维位置和时间的估计误差,  $\text{cov}(\mathbf{dx})$  表示  $\mathbf{dx}$  的协方差,  $\sigma_{\text{URE}}$  和  $\sigma_{R_i}$  分别为 GPS 伪距观测值和 RFID 观测值的观测误差标准偏差。

$$\begin{aligned} \text{cov}(\mathbf{dx}) &= E[\mathbf{dx} \mathbf{dx}^T] \\ &= (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \text{cov}(\mathbf{d\rho}) \mathbf{H}_m [(\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1}]^T \\ &= \mathbf{A}_m [\mathbf{H}_{m-1}^T \ \mathbf{g}_i^T] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m-1} \sigma_{\text{URE}}^2 & \\ & \sigma_{R_i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{m-1}^i \\ \mathbf{g}_i \end{bmatrix} \mathbf{A}_m \\ &= \mathbf{A}_m (\mathbf{H}_{m-1}^T \mathbf{H}_{m-1}^i \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \sigma_{R_i}^2) \mathbf{A}_m \\ &= \mathbf{A}_m [(\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m - \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i) \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \sigma_{R_i}^2] \mathbf{A}_m \\ &= \mathbf{A}_m \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m (\sigma_{R_i}^2 - \sigma_{\text{URE}}^2) \\ &= (\mathbf{A}_{m-1}^i - \Delta \mathbf{A}_m) \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m (\sigma_{R_i}^2 - \sigma_{\text{URE}}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

故系统定位误差  $\sigma_x^2$  为:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \text{Tr}(\mathbf{A}_{m-1}^i) \sigma_{\text{URE}}^2 - \text{Tr}(\Delta \mathbf{A}_m) \sigma_{\text{URE}}^2 \\ &\quad + \text{Tr}(\mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m) (\sigma_{R_i}^2 - \sigma_{\text{URE}}^2) \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_m &= (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} = (\mathbf{H}_{m-1}^T \mathbf{H}_{m-1} + \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i)^{-1} \\ &= \mathbf{A}_{m-1}^i - \Delta \mathbf{A}_m \end{aligned} \quad (7)$$

根据矩阵反演公式,易证:

$$\Delta \mathbf{A}_m \equiv \frac{\mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_{m-1}^i}{1 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i} = \frac{\mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m}{1 - \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_m \mathbf{g}_i} \quad (8)$$

由式(6)可知,等式右边第二项中的  $\text{Tr}(\Delta \mathbf{A}_m)$  为增加一个观测值对 GDOP 值的贡献。当  $m \geq 4$  时,可证  $\text{Tr}(\mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m) > 0$ <sup>[10]</sup>。因此在非加权观测的条件下,当  $\sigma_{R_i}^2 > \sigma_{\text{URE}}^2$  时,即使增加一个观测值可减小 GDOP 值,等式右边第三项仍会引入额外的定位误差。本文将式(6)右边第二项和第三项之和称为增加一个 RFID 观测值对定位误差的贡献值。

令  $v \equiv \frac{1}{1 - \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_m \mathbf{g}_i}$ , 将式(6)改写成:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \text{Tr}(\mathbf{A}_{m-1}^i) \sigma_{\text{URE}}^2 + \text{Tr}(\mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m) \sigma_{R_i}^2 \\ &\quad - (1 + v) \text{Tr}(\mathbf{A}_m \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m) \sigma_{\text{URE}}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

可见,当  $\sigma_{R_i}^2 > (1 + v) \sigma_{\text{URE}}^2$  时,定位误差贡献大于 0。在这种情况下,增加一个 RFID 观测值反而会使定位误差较之增加 RFID 观测值之前有所增大。

特别地,当  $\sigma_{R_i}^2 = \sigma_{\text{URE}}^2$  时,式(6)可改写为:

$$\text{cov}(\mathbf{dx}) = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} \text{cov}(\mathbf{d\rho})$$

$$= (\mathbf{A}_{m-1}^i - \Delta \mathbf{A}_m) \sigma_{\text{URE}}^2 \quad (10)$$

表1给出了GPS时为第1494周,周内秒为第352 282s的观测时刻在某固定点采用GPS/RFID定位方法,选择不同RFID观测值所得到的定位结果比较。该观测时刻的可见卫星数为10颗,事先采用GPS RTK方法测得每个RFID标签与读卡器之间的测距误差以及固定点的参考位置坐标。表中分析结果采用事后处理获得,GPS伪距观测值均经过了伪距误差修正, $\sigma_{\text{URE}}$ 取经验值5.3m。

从表1中可以看出,在未对GPS和RFID观

测值进行加权的条件下,对GDOP贡献最大的RFID观测值并不一定使定位误差最小,定位误差由GDOP贡献值和RFID观测误差共同决定。

### 2.2 优选单个RFID观测值

由于GPS和RFID观测值具有不同的观测误差,因此应考虑在对观测方程加权的条件下对RFID观测值进行优选。在对观测方程加权的条件下,定位误差如式(11)所示。

表1 选择不同RFID观测值的定位误差比较

Tab.1 Comparison of positioning errors with different RFID observations

RFID 标签编号	GDOP 贡献	定位误差 贡献(m <sup>2</sup> )	实际观测 误差(m)	非加权观测定位 误差(m)	加权观测定位 误差(m)
1	0.53	3.07	3.74	1.80	0.85
2	0.22	6.73	7.11	2.75	0.93
3	0.37	-0.85	1.45	0.98	0.84
4	0.18	1.74	4.18	1.13	0.83
全选	0.65	42.10	-	9.10	0.95

$$\begin{aligned} \text{cov}(\mathbf{dx}) &= (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}^{-1} \text{cov}(\mathbf{d\rho}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_m [(\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1}]^T \\ &= \mathbf{A}_m^W \mathbf{H}_m^T \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m-1} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{URE}}^2} \\ \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{R_i}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m-1} \sigma_{\text{URE}}^2 & \\ & \sigma_{R_i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m-1} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{URE}}^2} \\ \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{R_i}^2} \end{bmatrix} \mathbf{H}_m \mathbf{A}_m^W \\ &= \mathbf{A}_m^W \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_m \mathbf{A}_m^W \sigma_0^2 = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \sigma_0^2 \\ &= \left( \mathbf{H}_{m-1}^i \mathbf{H}_{m-1}^i \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{URE}}^2} + \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{R_i}^2} \right)^{-1} \sigma_0^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中,定义 $\mathbf{A}_m^W \equiv (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1}$ ;  $\mathbf{R}^{-1}$ 为加权矩阵, $\sigma_0$ 为单位权方差。为了简单起见,假设所有卫星伪距观测值的误差标准偏差均为 $\sigma_{\text{URE}}$ 。

由矩阵反演公式可以得到:

$$\text{cov}(\mathbf{dx}) = \mathbf{A}_{m-1}^i \sigma_{\text{URE}}^2 - \frac{\mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_{m-1}^i}{\sigma_{R_i}^2 / \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i} \sigma_{\text{URE}}^2 \quad (12)$$

因此在加权观测条件下系统定位误差可表示为:

$$\sigma_x^2 = \text{Tr}(\mathbf{A}_{m-1}^i) \sigma_{\text{URE}}^2 - \text{Tr} \left( \frac{\mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_{m-1}^i}{\sigma_{R_i}^2 / \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i} \right) \sigma_{\text{URE}}^2 \quad (13)$$

定义:

$$\Delta \mathbf{A}_m^W \equiv \frac{\mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_{m-1}^i}{\sigma_{R_i}^2 / \sigma_{\text{URE}}^2 + \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_{m-1}^i \mathbf{g}_i} \quad (14)$$

当 $m \geq 4$ 时,可证 $\text{Tr}(\Delta \mathbf{A}_m^W) > 0$ ,选择使 $\text{Tr}(\Delta \mathbf{A}_m^W)$ 最大的观测值作为加权观测条件下的优

选观测值。

当 $m=4$ 时, $\mathbf{H}_{m-1}^i \mathbf{H}_{m-1}^i$ 为秩亏矩阵,因此可将式(14)改写为下式,以求得 $\text{Tr}(\Delta \mathbf{A}_m^W)$ 。

$$\sigma_x^2 = \text{Tr} \left( \mathbf{A}_{m-1}^i \frac{\sigma_{\text{URE}}^2}{\sigma_0^2} \right) \sigma_0^2 - \text{Tr} \left( \frac{\mathbf{A}_m^W \mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i \mathbf{A}_m^W}{\sigma_{R_i}^2 / \sigma_0^2 - \mathbf{g}_i^T \mathbf{A}_m^W \mathbf{g}_i} \right) \sigma_0^2 \quad (15)$$

### 2.3 优选多个RFID观测值

当GPS可见卫星数少于3颗时,需同时选择多个RFID观测值。假设所选取 $M$ 个RFID观测值的观测误差标准偏差为 $\{\sigma_{R_i}, i=1, 2, \dots, M\}$ ,由上节分析可得到增加 $M$ 个RFID观测值后定位误差的一般表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \text{Tr}(\mathbf{A}_{m-M}) \sigma_{\text{URE}}^2 - \\ &\text{Tr} \left[ \mathbf{A}_{m-M} \mathbf{G}_M^T \left( \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{URE}}^2} \mathbf{R}_{\text{RFID}}^{-1} + \mathbf{G}_M \mathbf{A}_{m-M} \mathbf{G}_M^T \right)^{-1} \mathbf{G}_M \mathbf{A}_{m-M} \right] \sigma_{\text{URE}}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

当 $m=4$ 时,可采用下式表示定位误差:

$$\sigma_x^2 = \text{Tr}(\mathbf{A}_{m-M}^W) \sigma_0^2 - \text{Tr}[\mathbf{A}_m^W \mathbf{G}_M^T (\mathbf{R}_{\text{RFID}}^{-1} - \mathbf{G}_M \mathbf{A}_m^W \mathbf{G}_M^T)^{-1} \mathbf{G}_M \mathbf{A}_m^W] \sigma_0^2 \quad (17)$$

其中:

$$\mathbf{R}_{\text{RFID}}^{-1} = \text{diag}\left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_{R_1}^2}, \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{R_2}^2}, \dots, \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{R_M}^2}\right) \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{m-M}^W \equiv (\mathbf{H}_{m-M}^T \mathbf{R}_{\text{GPS}}^{-1} \mathbf{H}_{m-M})^{-1} = \frac{\sigma_{\text{URE}}^2}{\sigma_0^2} \mathbf{A}_{m-M} \quad (19)$$

$\mathbf{G}_M$  为 RFID 观测值的视线矢量矩阵;  $\mathbf{R}_{\text{GPS}}$  和  $\mathbf{R}_{\text{RFID}}$  分别为 GPS 和 RFID 观测值的加权矩阵。同上节分析, 式(17)右侧第二项为增加多个 RFID 观测值对定位误差的贡献值。可选择令其最小的多个观测值作为优选观测值集合。

当观测值数量的增大到一定程度后, GDOP 值的变化将趋于缓慢<sup>[11]</sup>, 若检测到的 RFID 标签较多时, 对减小 GDOP 值所带来的贡献并不显著, 并且随着观测方程数量的增多, 会给系统带来较大计算复杂度。因此本文对 GPS/RFID 组合定位系统中 RFID 观测值的选取数量进行了如下约束:

- (1) 当 GPS 系统可见卫星数  $N \geq 4$  时, 根据定位误差贡献值最小的准则选取单个 RFID 观测值;
- (2) 当 GPS 系统可见卫星数  $0 \leq N < 4$  时, 优选  $4 - N$  个 RFID 观测值。

### 3 实验分析

选取 2008 年 11 月 13 日在澳大利亚墨尔本 Albert 公园采集的观测数据对本文提出的基于优选 RFID 观测值的 GPS/RFID 组合定位方法进行了验证, 车载实验设备如图 4 所示。实验中 RFID 系统的工作频率设为 918MHz, GPS 观测数据由 Trimble R8 接收机采集获得, 观测采样间隔



图 4 车载实验设备组成

Fig. 4 The vehicle experiment equipment

为 1s, 观测历元总数为 325s。其中通过 RFID 标签覆盖区域时, 检测到 RFID 标签的时长约为 30s。当车载用户未检测到 RFID 标签时, 采用 GPS 单独定位模式。采用澳大利亚维多利亚州的 GPSnet<sup>TM</sup> CORS 网络的 RTK 定位结果作为参考定位结果; 当无法使用 RTK 定位方法时, 则采用 Trimble R8 接收机输出的双频定位结果作为参考定位结果。

本文分别采用 GPS 单独定位、RFID 单独定位、基于全选 RFID 观测值的组合定位方法以及基于优选 RFID 观测值的组合定位方法对实验数据进行了分析处理。在实际应用中, RFID 的观测误差并不容易实时获得, 因此采用经验值  $\sigma_R$  为 5m 作为 RFID 观测误差标准偏差。

实验中 RFID 标签被安装在典型城市环境的道路两旁, 实验场地周围的树木和房屋对 GPS 卫星信号形成了遮挡, 且多路径误差较大, 部分观测历元的可见卫星数小于 4 颗, 在可检测 RFID 标签的观测时间段内的定位可用性仅为 78.95% (定义观测值数量小于 4 时为定位不可用)。表 2 给出了在 RFID 标签可检测时间段内不同组合方法的定位结果统计比较, 由于 RFID 定位方法不涉及用户钟差解算, 因此表中仅给出 PDOP 值的比较。

从表 2 中可以看出, 由于 GPS 卫星信号受到了严重遮挡, 此时采用单一的 GPS 系统进行定位出现了较大的定位误差, 已无法获得正确的定位结果。单一的 RFID 定位方法可保持系统连续定位, 但是由于该区域环境较复杂, 动态物体较多, 导致 RSS 测距精度受到了一定的影响, 因此径向定位误差也达到了 10m 左右。

在基于全选 RFID 观测值的 GPS/RFID 组合定位中, 采用 GPS/RFID 联合观测量明显改善了信号受遮挡区域的 PDOP 值, 因此定位精度较之 GPS 或 RFID 单独定位都有所提高。但是在未对观测值进行加权的条件下, 部分观测精度较差的 RFID 观测值仍会增大定位误差; 在对 GPS 和全选 RFID 观测值进行加权的条件下, 可有效提高定位精度, 但当可检测的 RFID 观测值较多时, 全选 RFID 观测值会使观测方程维数增大, 从而会引入较高的计算复杂度。对于非加权的基于优选 RFID 观测值的组合定位方法, 尽管未对观测方程进行加权, 但实际上在优选 RFID 观测值的过程中综合考虑了 RFID 观测误差对 PDOP 和定位误差的影响, 因此可达到与加权全选 RFID 观测值组合定位方法精度相当的定位结果; 加权的基于

## 优选 RFID 观测值的组合定位方法在对 GPS 和

表 2 不同组合定位方法结果比较

Tab.2 Comparison of positioning results with different integration methods

定位方法	X 方向 误差(m)	Y 方向 误差(m)	Z 方向 误差(m)	径向 误差(m)	最小 PDOP	最大 PDOP	平均 PDOP	定位可 用性 <sup>①</sup>	平均观测 方程维数
GPS	1194	142	696	1389	3.27	N/A	N/A	78.95%	4
RFID	5.44	4.28	7.47	10.18	3.45	25.36	7.88	100%	5
未加权全选	4.26	3.27	5.00	7.34	1.01	1.66	1.14	100%	9
加权全选	2.63	1.51	1.84	3.55	1.01	1.66	1.14	100%	9
非加权优选	1.96	1.64	2.36	3.48	1.32	2.16	1.60	100%	5
加权优选	1.89	1.56	2.06	3.21	1.32	2.16	1.60	100%	5

①指 RFID 标签可检测时间段内的定位可用性

RFID 观测值进行定权的情况下对 RFID 观测值进行优选,改善了 PDOP 值,并提高了定位精度,同时又不会引入过多的观测方程,有效地降低了系统的计算复杂度。

## 4 结 论

针对 GPS/RFID 组合定位系统中全选 RFID 观测值所带来的计算复杂度过大等问题,本文提出了一种在加权观测条件下基于优选 RFID 观测值的 GPS/RFID 组合定位方法,并与单一 GPS 定位方法、RFID 定位方法以及基于全选 RFID 观测值的组合定位方法进行了比较。实测实验结果表明,所提出的方法可有效提高 GPS 信号受遮挡或无信号条件下的定位可用性,可用于实现从弱信号或无信号到有信号条件下定位的无缝链接。相比单一的 GPS 或 RFID 定位系统,该方法可有效改善参与定位的卫星或 RFID 观测值的 GDOP 值,提高了定位精度;较之基于全选 RFID 观测值的组合定位方法,该方法不需要同时检测大量的 RFID 标签,不会引入过多的观测方程,大大降低了系统的计算复杂度,简单易于实现,可用于低成本 GPS/RFID 组合定位系统中。本文研究结论可为车载或行人 GPS/RFID 组合定位系统提供相应的理论依据。

## 参考文献 (References)

- [1] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, 2006.
- [2] Pahlavan K, Li X R, Mäkelä J P. Indoor geolocation science and technology [J]. IEEE Communication Magazine, February

2002: 112 - 118.

- [3] Retscher G. Multi-sensor fusion using a Kalman filter and knowledge-based systems [C]// Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division, Savannah, Georgia, USA, 2009:728 - 735.
- [4] Fu Q, Retscher G. Another look indoors-GPS + RFID [J]. GPS World, 2009, 20(3):40 - 43.
- [5] Finkenzeller K. RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards and identification[M]. 2nd ed. Chichester, Hoboken, NJ, USA, 2003.
- [6] Ni L M, Liu Y, Lau Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID [J]. Wireless Networks, 2004, 10: 701 - 710.
- [7] Fu Q. Active RFID for positioning using trilateration and location fingerprinting based on RSSI [C]// Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah, Georgia, USA, 2008:845 - 852.
- [8] Zhu M. Novel positioning algorithms for RFID-assisted 2D MEMS INS systems [C]// Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah, Georgia, USA, 2008:80 - 87.
- [9] Rappaport T S. Wireless communications: principles and practice [M]. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, USA, 1996:641.
- [10] 丛丽, Abidat A I, 谈展中. 卫星导航几何因子的分析和仿真[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2204 - 2208.  
CONG Li, Abidat A I, TAN Zhanzhong. Analysis and simulation of the GDOP of satellite navigation [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2204 - 2208. (in Chinese)
- [11] Spilker J J. Satellite constellation and geometric dilution of precision, global positioning system: theory and applications [M]. Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 1996: 177 - 208.