

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.005

终端区及场面多点定位中 TSOA 与 TDOA 算法性能分析

官峰勋 马艳秋

(中国民航大学电子信息工程学院,天津,300300)

摘要:首先从算法原理、计算量、定位误差及模糊度等方面比较分析了多点定位中几种典型算法性能,综合比较得出 Taylor 算法定位性能最佳;其次,从模糊点数量及分布方面证明到达时间和(Time sum of arrival, TSOA)算法的定位性能要比到达时间差(Time difference of arrival, TDOA)算法差;最后,分析了基站数量、布局、目标高度、时间和测量误差及基线长度等参数,依据几何精度因子的变化状态证明了 TSOA 定位算法的性能优势。仿真结果证明,理论上 TSOA 算法的综合定位性能优于 TDOA 算法。

关键词:多点定位;到达时间和;到达时间差;算法性能

中图分类号:TN971

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)06-0818-09

TSOA and TDOA Positioning Algorithms of Multilateration in Terminal Area and Airport Surface

Gong Fengxun, Ma Yanqiu

(College of Electronic and Information Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: Firstly, the performance of the several typical positioning algorithms is analyzed in principle, computational quantity, positioning error and ambiguity, and the comparison results show that the Taylor algorithm is the best. Secondly, it is proved that the positioning performance of the time difference of arrival(TDOA) algorithm is better than the time sum of arrival(TSOA) algorithm in the quantity and distribution of the ambiguity points. Finally, changing the location parameters, such as the base station number, layout, target height, measurement error of the time sum and the length of baseline, it is proved that the location performance of the TSOA algorithm is better than that of the TDOA algorithm according to the geometric dilution of precision (GDOP). Simulation results show that the location performance of the TSOA algorithm is better than that of the TDOA algorithm.

Key words: multilateration; time sum of arrival(TSOA); time difference of arrival(TDOA); algorithm performance

国际民航组织(International civil aviation organization, ICAO)发布的先进的场面活动引导控制系统(Advanced surface movement guidance and control system, A-SMGCS)运行规范目标是充分

利用现代监视与多源信息集成技术,以期在特殊气象条件、高交通密度及复杂机场环境下提供足够的容量及安全保障。作为 A-SMGCS 的主要监视信息源的多点定位系统,由于其机载设备具备几乎无

基金项目:国家自然科学基金(U1233112, 61079008)资助项目;天津市应用基础及前沿技术研究计划(重点)(11JC2DJC25200)资助项目;中央高校科研业务费(3122014P001)资助项目。

收稿日期:2015-07-15; **修订日期:**2015-08-25

作者简介:官峰勋,男,教授。主要研究方向:通信与信息系统、民航通信导航监视及多源数据融合研究。

通信作者:官峰勋, E-mail: ffgong@cauc.edu.cn。

需更改、地面设备成本低廉及布站方便、兼容性好、数据更新率高等优点,受到国际民航界长期、普遍关注,特别是针对多点定位原理的到达时间和 (Time sum of arrival, TSOA) 算法及到达时间差 (Time difference of arrival, TDOA) 算法的研究。TSOA 和 TDOA 算法在多点定位过程中存在同步难、定位精确度难以进一步提高等缺点,但是,TSOA 算法基于椭圆的定位技术^[1],具有一定的定位优势,基于此,本文着重研究了该算法的定位性能。

1 国内外多点定位技术研究现状

多点定位是民用航空领域的称谓,在通用领域中通常称为无源定位或者被动定位,采用接收 1 090 MHz 空管应答信号实现机场场面定位,在终端区及航路则被称为广域多点定位。1974 年,美国国家交通运输系统中心 McComas 等提出利用二次雷达应答脉冲消除遮挡干扰的三边数据采集测量系统^[2],为了克服二次雷达旋转周期的不确定性,系统采用 3 个接收基站均匀布置测量到达时间,计算它们的 TDOA 构成双曲线,其交点就是飞机位置。1993 年,美国 Cardion 公司发布采用 3 个接收基站的军用产品“合作区域精密跟踪系统”。1995 年,美国联邦航空局、林肯实验室及 Cardion 公司在亚特兰大 Hartsfield 机场建立了交通防撞系统及采用模式 A 信号的三接收基站多点定位系统^[3-4]。1999 年,美国联邦航空局与 Sensis 公司签约在达拉斯/Ft Worth 机场建立新版本的支持 A 模式及 S 模式应答、5 个接收基站的的多点定位系统,其场面覆盖率达到 96.8%。在 20 世纪 80 年代末,英国 Roke Manor 研究有限公司自称开创了世界上第一个三维多点定位技术。1992 年,Roke Manor 部署了第一套广域多点定位系统,该公司与英国海军航空运输处在 92 国际雷达会议上发表了基于二次雷达信号到达时间的飞机监控技术研究报告^[2]。1997 年,英国海军航空运输处、加拿大空中交通服务商和欧洲航空安全组织采用了 Roke Manor 公司研制的多点定位系统,并与欧洲航空安全组织在 2000 年完成第三代多点定位系统产品研制。2003 年 12 月,欧洲航空安全组织颁布了 ED-117 标准,规范了应用于 A-SMGCS 的多点定位系统的最低运行性能^[5]。2010 年 9 月,欧洲航空安全组织颁布了 ED-142 标准,规范了广域多点定位系统技术性能。2010 年,美国 Era 公司 Ning Xu 等在其公司多点定位系统上利用 TSOA 算法

显著减小了 TDOA 的估计误差^[6]。

2002 年,范平志在其《蜂窝网无线定位》著作中研究了基于 TDOA 的民航用多点定位系统应用^[7]。2005 年,中国电子科技集团公司第十四研究所率先研制成功长基线时差定位体制的被动式雷达^[8]。Lay 等提出采用 TOA/TDOA/TSOA 测量减小 NLOS 误差的定位方法^[9-10]。2006 年,刘昌忠等承担的国家自然科学基金民航联合基金项目开展了基于二次雷达应答信号的多点定位技术与系统的研究工作^[11]。2010 年,王洪等提出采用基于滑动平均滤波与偏差统计判决的多点定位接收基站优选方法^[12]。2011 年,中国民航大学宫峰勋等详细分析了基于二次雷达应答信号的多点定位技术的定位精确度、基站布局与定位性能关系等,提出了主站偏心式的高覆盖率多点定位布站方法^[13]。2013 年,中国民航局发布了中国民航行业标准 MH/T 4037 多点定位一般技术要求。目前多点定位技术已经发展到第四代,国际、国内有超过 200 家机场装备多点定位系统,以支持日益复杂场面运行动态与态势综合监控^[14-15]。

2 多点定位原理与算法分析

2.1 多点定位基本原理

基于空管应答信号的多点定位是通过处理 3 个或更多接收基站采集到的信号到达时间数据实现对目标位置估算,基本的目标空间位置方程(基于目标信号 TOA 的定位方程,也称为圆定位方程)为

$$ct_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (1)$$

式中: c 为光速; t_i 为目标信号到达接收基站时间; (x_i, y_i, z_i) 为接收基站位置; (x, y, z) 为目标位置。基于此方程的定位系统中需要目标与定位接收基站间保持精确同步,系统实现成本高、不方便。因此,提出了无需目标与接收基站同步的目标空间位置估算方法(基于目标信号 TDOA 的定位方程,也称为双曲线定位方程)

$$ct_{m,n} = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2} - \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} \quad (2)$$

式中: $t_{m,n}$ 为目标信号到达 m, n 两接收基站的时间差; (x_m, y_m, z_m) 和 (x_n, y_n, z_n) 为接收基站位置(通常令其中之一为主站); (x, y, z) 为目标位置。该算法是多点定位系统中的主流定位方程。既然 TDOA 能实现定位,理论上信号到达时间和同样可以实现目标空间位置估算(基于目标信号

TSOA 的定位方程,也称为椭圆定位方程)

$$ct_{p,q} = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + (z_p - z)^2} + \sqrt{(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + (z_q - z)^2} \quad (3)$$

式中: $t_{p,q}$ 为目标信号到达 p, q 两接收基站的时间和; (x_p, y_p, z_p) 和 (x_q, y_q, z_q) 为接收基站位置(通常令其中之一为主站,具备发射询问信号功能); (x, y, z) 为目标位置。TOA, TDOA 和 TSOA 三种定位原理如图 1 所示。图 1(b) 中 R_i 为目标到达基站 $BS_i (i=1, 2, 3)$ 的距离, MS 为目标。图 1(c) 中, “★”表示主站, “●”表示副站。

2.2 目标位置估计算法性能分析

TSOA 定位算法的应用在 2010 年前后得到广泛关注。目前多点定位算法主要采用 TOA、TDOA 算法及其混合算法, 例如美国 Sensis 公司及 ERA 公司、法国 Thales 公司及中国民航局第二研究所等多采用这些算法。经典的 TDOA 算法有

Chan 算法、Taylor 算法 Friedlander 算法、Bancroft 算法、Fang 算法、SX 算法及 SI 算法等, 此外, 现代智能优化技术开始被运用到基于时差 TDOA 的定位计算中来, 比如, 遗传算法及免疫算法等。表 1 给出了以奥地利西部蒂罗乐州 Innsbruck 机场装备的 9 个接收/发射基站的多点定位系统为仿真环境的当前各典型定位算法性能的比较。

采用定位解均方根误差(Root mean square error, RMSE)衡量表 1 所示各算法的定位性能

$$RMSE = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2} \quad (4)$$

式中, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 为目标估计位置。在奥地利西部蒂罗乐州 Innsbruck 机场装备的 9 个接收/发射基站的多点定位系统为仿真环境下, 将 Innsbruck 机场的真实离场飞行路径作为仿真原型。基于 RMSE

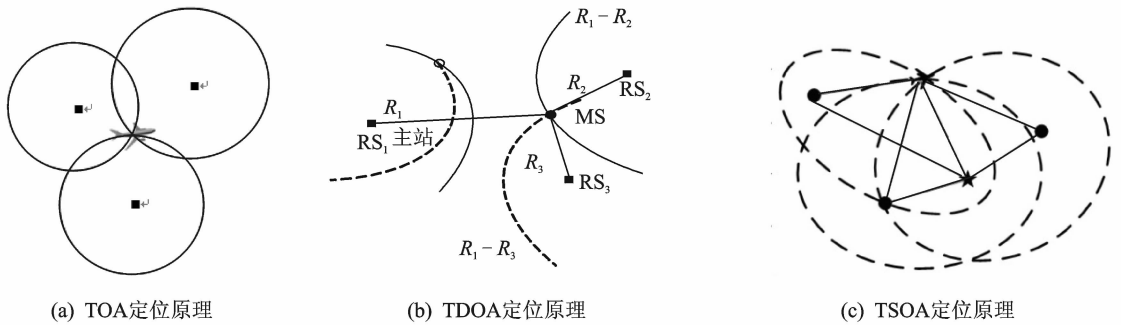


图 1 多点定位中的 TOA, TDOA 和 TSOA 定位原理

Fig. 1 Positioning principles of TOA, TDOA and TSOA of multilateration

表 1 经典多点定位算法性能比较

Tab. 1 Performance comparison of classical positioning algorithms of multilateration

求解类型	算法名称	算法原理	优点	缺点
TOA	Bancroft 算法	GPS 伪距单点定位原理	计算量小	对远、近距离的定位目标不能保证相同定位精度
	Friedlander 算法	利用加权最小二乘(Weighted least squares, WLS)和最小二乘的误差判据进行目标位置的求解	计算量小	定位误差较大
	Fang 算法	具有解析表达式的算法, 在平面内使用 3 个地面基站对目标定位	计算量小	存在解模糊问题
TDOA	Chan 算法	通过两次 WLS 运算得到最终的定位目标的位置	在高斯噪声条件下, 计算量小且定位精确度高	在非视距环境下, 定位误差较大
	SX 算法	球面相交算法		求解的过程中忽略了变量之间的相关性, 只能得到次优解, 并且, 当未知数的个数等于求解方程的数目时, 只能得到一个不确定解
	SI 算法	球面插值算法	相比迭代算法而言, 计算量小	
	Taylor 算法	利用 Taylor 级数在初值处展开(迭代性)	不断迭代得到最优解	对初始值有很大的依赖性, 计算量大

的定位性能仿真结果如图 2,3 所示。

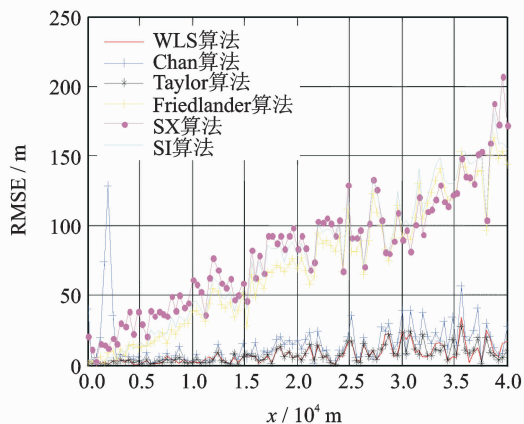


图 2 各算法 RMSE 比较

Fig. 2 RMSE comparison of each algorithm

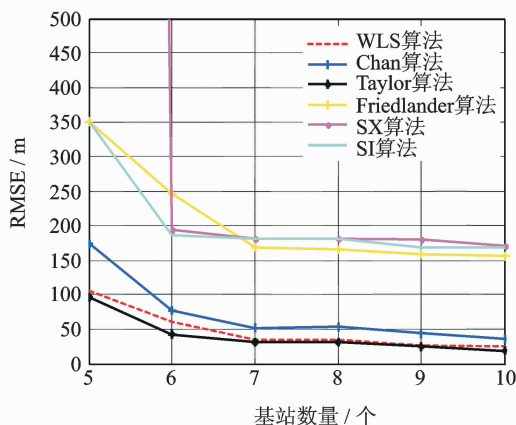


图 3 接收基站数量对 RMSE 影响比较

Fig. 3 Effect of base station quantity on RMSE

如图 2 所示 RMSE 和各定位算法的关系可看出,在 6 种典型定位算法中,Taylor 算法的定位性能最优,其次是 WLS 算法、Chan 算法、SX 算法、Friedlander 算法和 SI 算法的定位性能比较差,特别是在高度方向,即距离接收基站布局中心越远,定位误差越大。总体上,Taylor 算法和 WLS 算法定位性能最优。

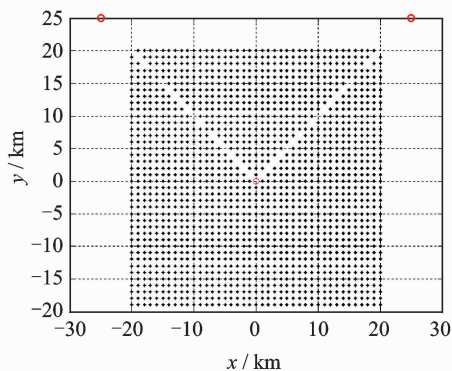
Taylor 算法是一个迭代算法,计算量较大,但在仿真过程中,一个点的计算收敛时间远远低于 1 s。该算法对初始值的依赖性很大,考虑到本文是基于飞行轨迹的仿真,每个点都需要设置一个初始值,因此在仿真过程中,将第 i 个点的位置估计值作为第 $(i+1)$ 个点的初始值。实验证明,这种假设是可行的,而且在实际情况中也具有可行性。

图 3 所示为接收基站数量对定位性能的影响。由图 3 可以看出,对于 6 种算法,基站数量越大, RMSE 越小,即定位性能越好。同时,在这 6 种定

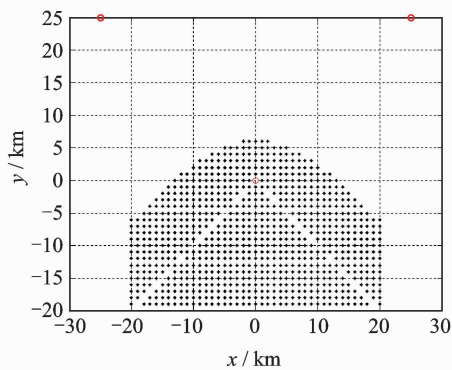
位算法中,Taylor 算法的定位误差最小,定位性能最好,并且基站数量越大,系统定位性能越好。

2.3 TSOA 算法与 TDOA 算法位置估计模糊分析

图 4,5 为 TSOD 及 TDOA 算法模糊点二维三站、三维四站分布图(相同基线和夹角),图中圆圈代表基站(即主站和各个副站),副站与主站间的基线长度都为 d ,它们之间的夹角为 α ,斑点区为模糊分布区。由图 4,5 可以看出:三维空间定位比二维平面定位更容易出现多值现象,即产生模糊点。



(a) TSOA 定位算法模糊点



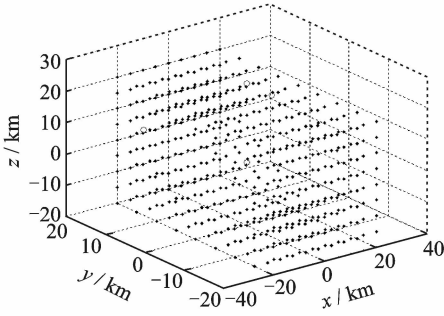
(b) TDOA 定位算法模糊点

图 4 TSOA 与 TDOA 定位算法模糊点二维平面分布
Fig. 4 Ambiguity point distributions of TSOA and TDOA positioning algorithms in 2-D

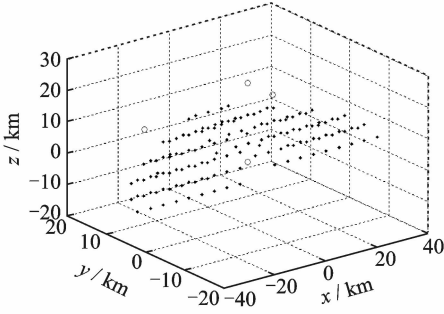
在二维平面定位中,三基站多点定位系统的模糊点分布取决于三基站的布局,基线的长度与基线的夹角大小决定该系统的模糊点分布区域,当分别改变 d 及 α 值时,得到不同模糊点分布。表 2,3 所示为 TSOA 及 TDOA 在不同条件下的模糊点分布状态。

由图 4,5 及表 2,3 可以得到:

- (1) 基线延长线附近区域及基线延长线所夹区域存在定位模糊。
- (2) 随着基线的夹角的增大,多点定位系统的模糊区域面积增大;反之,基线夹角变小,则系统的



(a) TSOA定位算法(546/1 600模糊点比例)



(b) TDOA定位算法(141/1 600模糊点比例)

图5 TSOA与TDOA定位算法模糊点三维空间分布

Fig. 5 Ambiguity point distributions of TSOA and TDOA positioning algorithms in 3-D

表2 二维三站等腰三角形布站方式模糊点分布

Tab. 2 Ambiguity point distributions with three base stations in isosceles triangle layout in 2-D

基线长度 d/km	基线夹角 $\alpha/(\text{°})$	TDOA 算法模 糊点/总点数	TSOA 算法模 糊点/总点数
35	10	47/1 600	1 600/1 600
35	90	831/1 600	1 600/1 600
35	155	1 255/1 600	1 600/1 600
40	90	766/1 600	1 600/1 600
25	90	831/1 600	1 600/1 600
5	90	1 050/1 600	1 600/1 600

表3 三维四站星型布站方式模糊点分布

Tab. 3 Ambiguity points distribution with four base stations in star layout in 3-D

基线长度 d/km	基线夹角 $\alpha/(\text{°})$	TDOA 算法模 糊点/总点数	TSOA 算法模 糊点/总点数
35	10	0/1 600	7/1 600
35	90	2/1 600	300/1 600
35	155	4/1 600	1 290/1 600
40	90	0/1 600	0/1 600
25	90	2/1 600	259/1 600
5	90	669/1 600	1 289/1 600

模糊区域面积变小。

(3)基线越长,各辅站的模糊区随之向外延伸;反之,基线越短,则各辅站的模糊区也随之内移,系统的模糊区域面积增大。

(4)定位基站数量为3时,TSOA及TDOA定位算法中都会出现定位模糊,且TSOA定位算法无模糊性能较差。而定位基站数量为4时,TDOA定位算法中几乎不存在模糊定位,基本可以实现无模糊定位,但TSOA定位算法中仍存在模糊定位,依此预测通过增加TSOA定位算法中的基站数量,可提高无模糊性,实现无模糊定位。

(5)相同情况下,TSOA定位算法中的模糊区域要比TDOA算法大,无模糊性能不及TDOA算法。

3 多点定位误差评估方法分析

多点定位系统的监视性能包括精确度、可用性、完好性、连续性、延迟性、更新率和覆盖率等,不同的性能概念反映了对监视系统的不同需求。对监视系统的需求具有明确的层次性,对于精确度都不能满足需求的系统,用户是不会再提出其他性能需求的。在实际场面定位应用中,主要的几种定位精确度评价指标有定位解均方差、RMSE、克拉美-劳下界、几何精度因子(Geometric dilution of precision, GDOP)和圆/球误差概率等。其中,应用于机场场面的多点定位系统需重点考虑几何因素对定位精确度的影响,故多选择GDOP值作为其评价指标。GDOP具有的性質为:

(1)GDOP是测量误差到位置解算误差的几何放大因子。

(2)GDOP只与移动目标和接收基站间的相对几何布局有关,与所选坐标系无关。

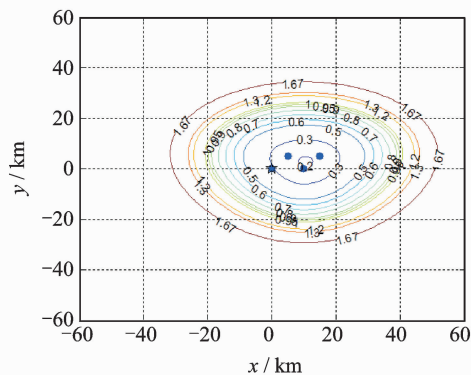
(3)利用矩阵为工具,采用最佳估计原理,理论上可以证明GDOP随接收基站的数目的增加而减小,同时在规则几何图形中心处达到最小值。

对TSOA及TDOA两种定位算法在不同布站方式、不同基站数量、不同目标高度、不同距离和测量误差方差和不同基线长度情况下进行仿真比较如下。

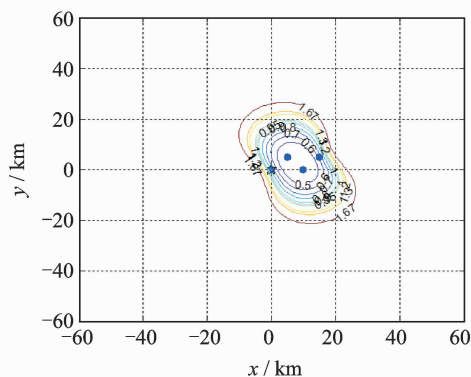
3.1 不同布站方式的GDOP参数变化

仿真分析采用四接收基站、平行四边形布置的定位模式,监测区域为 $60\text{ km} \times 60\text{ km}$,默认目标飞行高度选为 10 km 。此时,多点定位系统GDOP参数变化如图6所示。

采用四接收基站、星型布置的定位模式,监测区域为 $60\text{ km} \times 60\text{ km}$,默认目标飞行高度选为



(a) TSOA定位算法GDOP



(b) TDOA定位算法GDOP

图 6 四基站平行四边形布置下的 GDOP 参数变化状态
Fig. 6 GDOP status of multilateration with four base stations in parallel quadrilateral layout

10 km。此时,多点定位系统 GDOP 参数变化如图 7 所示。

3.2 不同接收基站数量下的 GDOP 参数变化

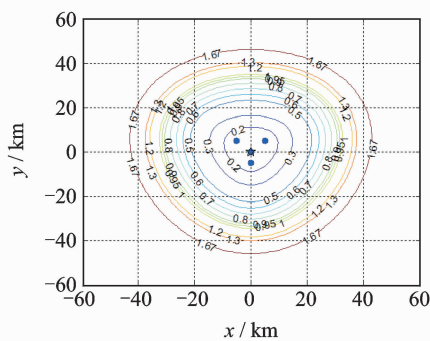
采用四、六接收基站定位模式,监测区域为 60 km×60 km,默认目标飞行高度选为 10 km。此时,四接收基站的的多点定位系统 GDOP 参数变化如图 7 所示,六接收基站的的多点定位系统 GDOP 参数变化如图 8 所示。

3.3 不同目标高度下的 GDOP 参数变化

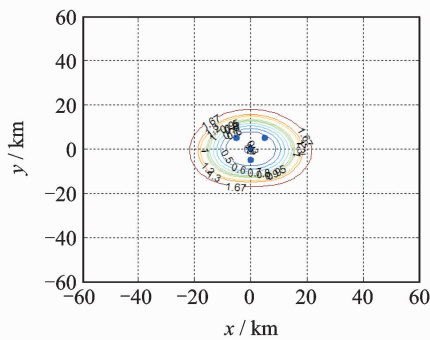
采用四个接收基站定位模式,监测区域为 60 km×60 km,目标飞行高度分别选为 10 km 和 5 km。此时,四接收基站、目标 10 km 高度的多点定位系统 GDOP 参数变化如图 7 所示,四接收基站、目标 5 km 高度的多点定位系统 GDOP 参数变化图 9 所示。

3.4 不同时间和的测量误差方差下的 GDOP 参数变化

采用四个接收基站星形定位模式,监测区域为 60 km×60 km,目标飞行高度为 10 km。此时,四接收基站、距离和的测量误差方差分别为 0.2,

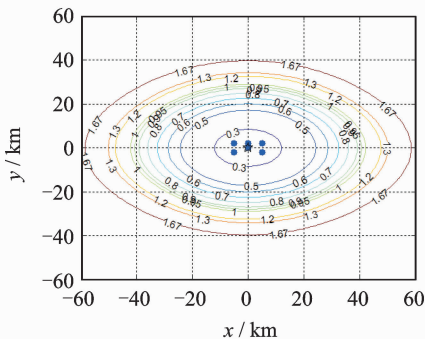


(a) TSOA定位算法GDOP

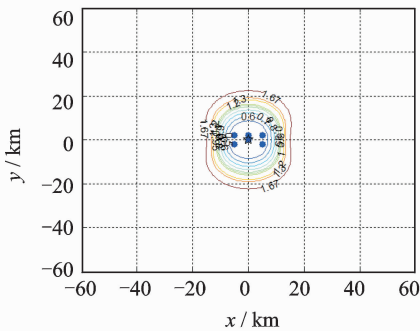


(b) TDOA定位算法GDOP

图 7 四基站星形布置下的 GDOP 参数变化状态
Fig. 7 GDOP status of multilateration with four base stations in star layout

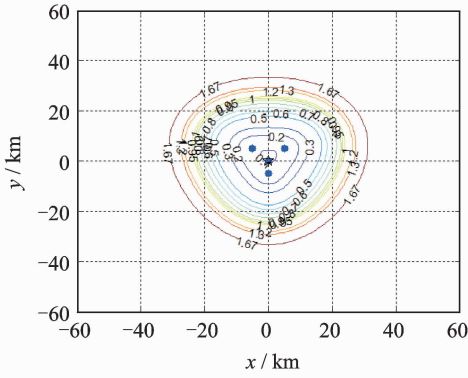


(a) TSOA定位算法GDOP

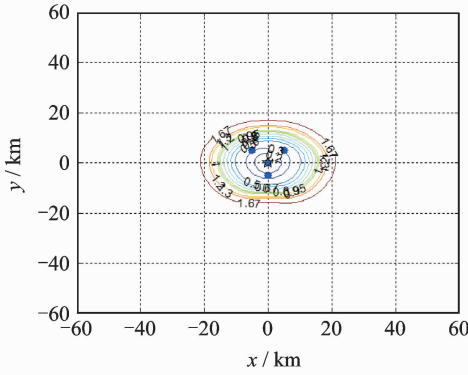


(b) TDOA定位算法GDOP

图 8 六基站四边形布置下的 GDOP 参数变化状态
Fig. 8 GDOP status of multilateration with six base stations in quadrilateral layout



(a) TSOA定位算法GDOP



(b) TDOA定位算法GDOP

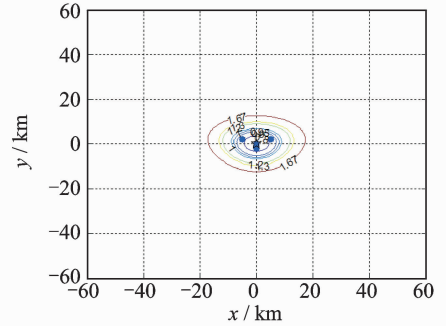
图9 四基站目标高度5 km时的GDOP参数变化状态
Fig.9 GDOP status of multilateration with four base stations and target height 5 km

0.06时多点定位系统GDOP参数变化如图10,11所示。

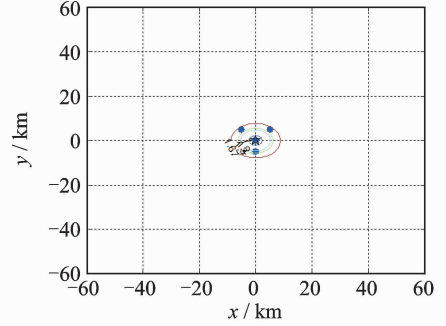
3.5 不同基线长度下的GDOP参数变化分析

采用四个接收基站星形定位模式,监测区域为60 km×60 km,目标飞行高度为10 km,基线长度分别为5 km和13 km。此时,四接收基站多点定位系统GDOP参数变化如图12,13所示。

通过改变基站布局、基站数量等并对比GDOP变化的方式,本文对基于TSOA和TDOA算法的定位系统的定位性能进行了分析,改变的参数包括目标高度、距离和测量误差方差、基站数量及基线长度等。如图6~13所示的GDOP参数变化可知,在影响因素方面,采用TSOA算法的定位性能变化趋势与采用TDOA算法的定位性能变化趋势基本类似。从各图所示GDOP参数变化的整体趋势上可以发现,目标越靠近接收基站构成的几何形状内部,定位精确度越高;接收基站采用星型、正方形布局的定位误差小于2 m的覆盖范围值更大一些。由如图6~13所示GDOP参数变化还可得到,从局部分析,接收基站为星型布局是一种较



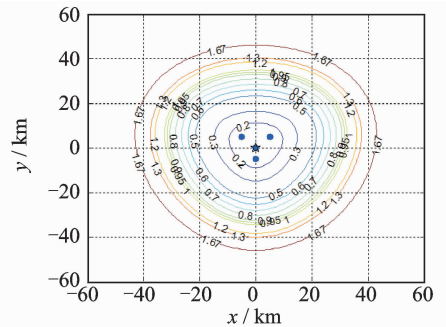
(a) TSOA定位算法GDOP



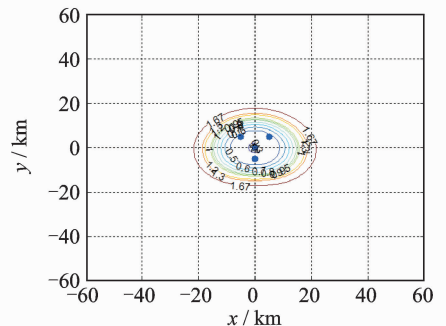
(b) TDOA定位算法GDOP

图10 四基站、到达时间和测量误差方差0.2时的GDOP参数变化状态

Fig.10 GDOP status of multilateration with four base stations and variance of TSOA measurement error 0.2



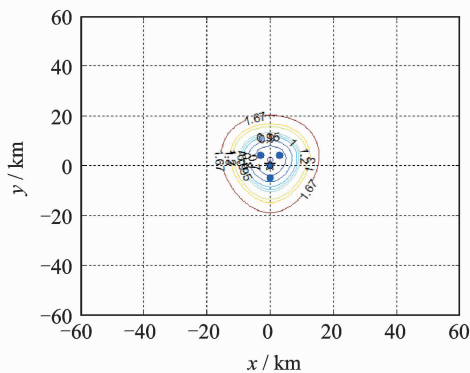
(a) TSOA定位算法GDOP



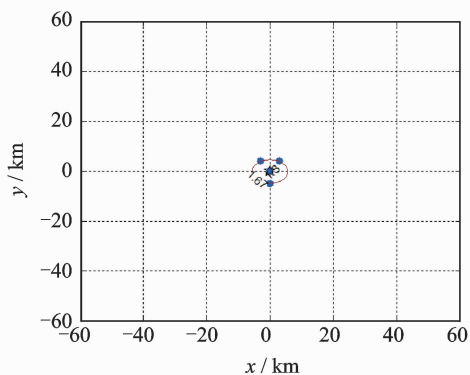
(b) TDOA定位算法GDOP

图11 四基站、到达时间和测量误差方差0.04时的GDOP参数变化状态

Fig.11 GDOP status of multilateration with four base stations and variance of TSOA measurement error 0.04



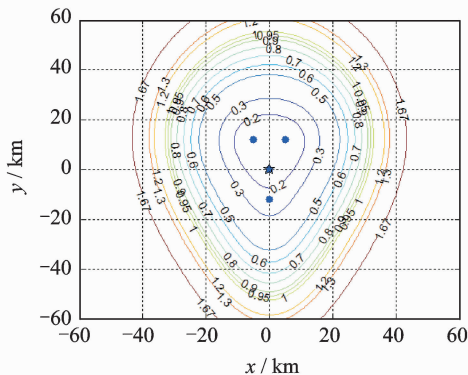
(a) TSOA定位算法GDOP



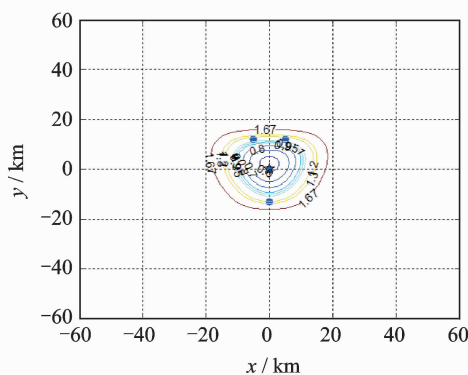
(b) TDOA定位算法GDOP

图 12 四基站、基线长度为 5 km 时的 GDOP 参数变化状态

Fig. 12 GDOP status of multilateration with four bases tations and length of baseline 5 km



(a) TSOA定位算法GDOP



(b) TDOA定位算法GDOP

图 13 四基站、基线长度为 13 km 时的 GDOP 参数变化状态

Fig. 13 GDOP status of multilateration with four base stations and length of baseline 13 km

好的布站方案。在接收基站为星型布局的多点定位仿真环境中,其他条件基本保证相同的情况下,首先,目标高度越高,采用 TSOA 算法的多点定位系统的覆盖范围越大;其次,时间和测量误差方差越小、目标高度越高,TSOA 算法的定位覆盖范围越大;第三,接收基站数量越多、目标高度越高,TSOA 定位系统覆盖范围越大;最后,基线长度越长、目标高度越高,TSOA 算法的定位覆盖范围越大。

4 结 论

接收基站状态参数不同的情况下,采用 TSOA 算法和 TDOA 算法的多点定位系统在定位性能存在差异。

(1)在定位模糊点方面,采用 TSOA 算法的多点定位系统模糊点远多于采用 TDOA 算法的多点定位系统。

(2)在系统定位的 RMSE 方面,接收基站数目、布局等的不同都会对采用 TSOA 算法和

TDOA 算法的定位系统的 RMSE 产生较大影响,但是总体上采用 TSOA 算法的定位系统的 RMSE 更好。

(3)在其他条件基本相同,接收基站布局、数量、目标高度、时间和测量误差方差和基线长度等分别改变的情况下,采用 TSOA 算法和 TDOA 算法的定位系统的定位性能均有所改善,但是采用 TSOA 算法的多点定位系统性能总是优于采用 TDOA 算法的定位系统。因此,理论上可以认为,采用 TSOA 算法的多点定位系统是实现场面目标定位性能比较好的选择,特别是采用 TSOA 与 TDOA 混合定位,能够克服 TSOA 算法模糊点较多的缺点。

参考文献:

[1] Lee H B. A novel procedure for assessing the accuracy of hyperbolic multilateration systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1975,AES-11(1): 2-15.

- [2] Rickard D C, Sherry D J, Taylor S J. The development of a prototype aircraft height monitoring unit utilizing an SSR-based difference in time of arrival technique[C]//IEEE International Conference on Radar 92. Brighton, UK; IET, 1992; 250-253.
- [3] Wood M L. Multilateration system development history and performance at Dallas/Ft worth airport [C]// Digital Avionics Systems Conference, the 19th DASC. Philadelphia, PA, USA; IEEE Xplore, 2000; 2E1/1-2E1/8.
- [4] Petrochilos N, Galati G, Piracci E. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 965-982.
- [5] Karagiannis M, Chatzigiannakis I, Rolim J. Multilateration: Methods for clustering intersection points for wireless sensor networks localization with distance estimation error [J]. arXiv: 1203. 3704v1 [cs. NI], 2012.
- [6] Xu N, Cassell R, Evers C, et al. Performance assessment of multilateration systems—A solution to nextgen surveillance [C]// 2010 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference. Herndon, VA, USA; IEEE, 2010; D2-1-D2-8.
- [7] 范平志. 蜂窝网无线定位[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [8] 刘月华. 被动雷达的搜索工作方式设计[J]. 现代雷达, 2005, 27(5): 16-18.
Liu Yuehua. Searching work method design of passive radar[J]. Modern Radar, 2005, 27(5): 16-18.
- [9] Lay K T, Chao W K. Mobile positioning based on TOA/TSOA/TDOA measurements with NLOS error reduction [C]//Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Hongkong, China; IEEE, 2005; 545-548.
- [10] Chao W K, Lay K T. Mobile positioning and tracking based on TOA/TSOA/TDOA /AOA with NLOS-reduced distance measurements [J]. IEICE Transactions on Communications, 2007, E90-B(12): 3643-3653.
- [11] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚, 等. S模式前导脉冲检测方法[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(4): 487-489.
Wang Hong, Liu Changzhong, Wang Xuegan, et al. Method to detect mode S preamble[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(4): 487-489.
- [12] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚, 等. 一种多点定位的目标位置精确解算方法[J]. 航空学报, 2010, 32(7): 1269-1274.
Wang Hong, Liu Changzhong, Wang Xuegang, et al. An accurate target localization method for multilateration [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 32(7): 1269-1274.
- [13] 宫峰勋, 雷艳萍, 马艳秋. 主站偏心的场面监视系统及性能分析[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2011, 38(2): 173-179.
Gong Fengxun, Lei Yanping, Ma Yanqiu. Surface surveillance system of main station off-center and performance analysis [J]. Journal of Xidian University: Natural Science Edition, 2011, 38(2): 173-179.
- [14] Zhao G, Wang D, Fattouche M. Time sum of arrival based BLUE for mobile target positioning [J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(1): 165-167.
- [15] Zheng Xiaoneng, Hua Jingyu, Zheng Zhilong, et al. Wireless localization based on the time sum of arrival and Taylor expansion[C]//19th IEEE International Conference on Networks (ICON). Singapore; IEEE, 2013; 1-4.