

基于RSS辅助的多平台时差定位方法

刘安斐¹, 丁阳¹, 窦晓晶¹, 高嵩²

(1. 北京卫星导航中心, 北京, 100094; 2. 海格神舟通信有限公司, 北京, 100000)

摘要: 以基于轻型无人机平台的空基定位系统实施干扰查找为应用背景, 对多平台到达时差定位 (Time difference of arrival, TDOA) 实现机理进行了深入分析。针对 TDOA 定位前无人机群快速抵达最佳定位区域, 进而实现有效定位的问题, 提出了一种基于接收信号强度 (Received signal strength, RSS) 定位辅助信息的 TDOA 定位方法, 详细描述了定位流程和关键场景。通过方法可行性论证和定位性能分析得出: 该方法可在定位流程自动化实施顺利的前提下, 使系统最长定位耗时控制在无人机的一个续航周期内。

关键词: 时差定位; RSS 定位; 无源定位; 干扰查找

中图分类号: TN973.1 **文献标志码:** A

Multi-platform TDOA Location Method Based on RSS

LIU Anfei¹, DING Yang¹, DOU Xiaojing¹, GAO Song²

(1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing, 100094, China; 2. Haige Shenzhou Communication Co. Ltd, Beijing, 100000, China)

Abstract: Under the application background of interference search in space-based positioning system based on light Unmanned aerial vehicle (UAV)-platform, the implementation mechanism of multi-platform time difference positioning (TDOA) is analyzed in detail. In order to solve the problem of UAV group arriving at the optimal positioning area quickly before TDOA location, and then realizing effective positioning, a TDOA positioning solution based on received signal strength (RSS) positioning auxiliary information is proposed, and the whole positioning process and key scenarios are described in detail. Through the feasibility demonstration of the method and the analysis of the positioning performance, it is concluded that this method can make the maximum time of the whole positioning process controlled within a continuation cycle of the unmanned machine, under the premise of the smooth implementation of the automation of the positioning process.

Key words: time difference of arrival (TDOA); location based on received signal strength; passive location; interference search

引言

在无线电监测系统应用中, 相比于基于到达角度定位 (Angle of arrival, AOA) 等传统无源定位技术, 到达时差定位 (Time difference of arrival, TDOA) 具有精度高、稳定性强、系统实现复杂度低、易组网和对环境要求低等优点, 非常适用于无人机载平台, 而利用多架低成本无人机构成多站无源定位系

统,可有效改善地面干扰测向系统在市区和其他复杂环境中多径、非视距传播条件下测向精度急剧恶化等问题。目前,国内外对基于TDOA的无源定位技术及其应用有深入而广泛的研究,但相关技术创新多集中于定位解算算法的优化和定位精度影响因素分析及提升研究^[1-4],系统应用也多讨论的是一定布站条件下的系统性能评估与验证,采用多移动站TDOA进行干扰查找的应用较少^[5-10]。然而,根据多站TDOA的定位原理和不同布站阵型对定位精度影响分析结论,在实际应用时,布站应尽量保证目标源在站点的包围圈内,才能获得较好的定位精度^[11]。在利用无人机集群进行干扰源查找定位时,主要包括无人机集群从起飞点飞达最终布站区域(包含目标源的布站区)、时差测量及定位解算等3个过程。其中,时差测量及信息传输时延和定位计算过程耗时均为秒级,因此,如何使无人机群从起飞点快速飞至目标布站区对缩短定位时间至关重要。

本文针对TDOA定位前无人机群快速抵达最佳定位区域,进而实现有效定位的问题,提出了一种基于接收信号强度(Received signal strength, RSS)定位辅助信息的TDOA定位方法,利用RSS定位来引导无人机群完成TDOA有效布阵区域抵达,无需进行其它额外硬件部署,只需添加RSS定位解算和相应的无人机群目标位置生成代码,即可实现无人机群从起飞点至目标布站区域的快速抵达。

1 多平台TDOA

TDOA无源定位通过测量无线电信号到达不同监测节点的时间差,来对无线电信号发射源进行定位。其定位原理示意如图1所示。根据平面解析几何原理,至两定点的距离差绝对值为常数的动点轨迹是双曲线,当有两个监测节点均收到目标信号时,由到达时间差即可推算出到达两个监测节点的距离差值。该距离差可以确定一对双曲线,而目标源即在该双曲线上。若3个或以上监测节点均能监测到该目标源发射的信号,则可确定多条双曲线,求解多条双曲线的交点即可得到目标源的位置坐标。以一个主节点和 $n(n \geq 3)$ 个辅节点构成的三维无源TDOA系统为例,设目标位置为 $(x, y, z)^T$,各节点空间位置为 $(x_j, y_j, z_j)^T, j=0, 1, 2, \dots, n, j=0$ 表示主节点, $j=1, 2, \dots, n$ 表示辅节点, r_j 表示目标与节点 j 之间的距离, Δr_i 表示目标到节点 i 与目标到主节点之间的距离差,多平台时差定位模型表示为

$$\begin{cases} r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \\ r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 & i = 1, 2, \dots, n \\ \Delta r_i = r_i - r_0 = c\Delta t_i = c(t_i - t_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, c 为电波传播速度, Δt_i 为目标信号到达节点 $i(t_i)$ 与到达主节点(t_0)的时间差测量值,则该关系式确定的非线性方程组的最终解在几何空间中即代表目标位置 $(x, y, z)^T$ 。对应的定位精度分析表明多平台TDOA定位的最终定位精度与节点位置误差(无人机自机定位误差)、时差测量精度和目标辐射源与各监测节点的几何位置有关^[12-16]。

当目标与传感器间的距离相对于传感器间的基线长度很大时,在目标所在区域中双曲线位置线将趋于平行,噪声或者很小的测量误差都会产生相当大的定位误差。图2为不同布站阵型下的定位误差可视化分布图,从图2中可以看出:被定目标越靠近几何中心,布站形式对定位精度的影响越小,越往外发散,定位精度越差。

2 RSS定位原理

目前被广泛应用于室内定位的RSS定位技术^[17],是依据信号强度随传播距离的变化规律实现定位

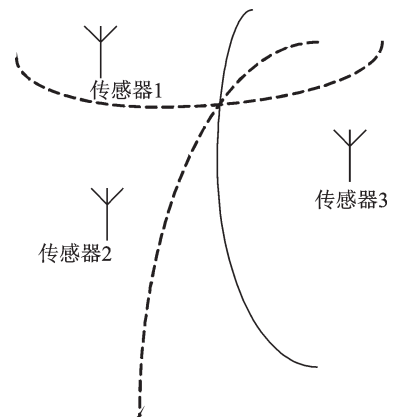


图1 TDOA定位原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of TDOA positioning principle

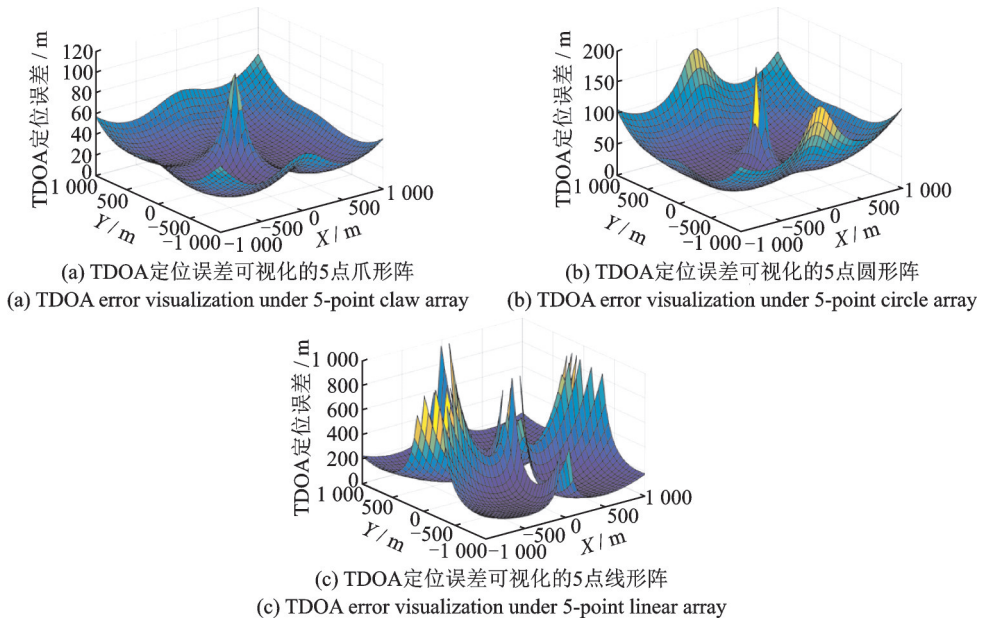


图2 不同布站形式下的定位误差分布图

Fig.2 Location error distribution under different station placements

的一类方法,其定位核心是根据多个参考节点接收同一目标源的信号强度来实现目标位置的确定。传统的基于几何测量法的RSS定位技术^[18-19]首先需要测出各监测节点接收到目标的信号强度RSS,然后根据信号传输衰减模型逆向推算出各节点与目标间的传播距离 d ,进而估算待定位信号源的相对地理位置。由于该方法是在已知信号衰减模型参数的前提下进行目标函数的确立和求解的,但干扰源定位应用中,用户无法获知目标源的发射功率 P_t ,需采用差圆定位法^[20]来消除参数 P_t ,具体原理如下。

假设两个参考节点收到目标发出的信号强度分别为 P_{ri} 和 P_{rj} ,信号强度衰减在自由空间环境中的经验模型为

$$P_i - P_r(d) = 32.44 + 10k \lg d + 10k \lg f \tag{2}$$

则有

$$P_{rj} - P_{ri} = 10k \lg \left(\frac{d_i}{d_j} \right) \tag{3}$$

令 $\frac{d_i}{d_j} = W$,则 $W = 10^{\frac{P_{rj} - P_{ri}}{10k}}$ 。若目标点位置为 (x, y) ,两个参考节点的位置分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) ,则有

$$W = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{\sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}} \tag{4}$$

当 $W = 1$ 时, (x, y) 的轨迹是以两参考节点为端点的线段的中垂线。当 $W \neq 1$ 时, (x, y) 的轨迹是一个圆,如图3所示,圆心坐标为

$$(x_0, y_0) = \left(\frac{x_i - W^2 x_j}{1 - W^2}, \frac{y_i - W^2 y_j}{1 - W^2} \right) \tag{5}$$

半径为

$$R = \frac{A [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]}{|1 - W^2|}, A = \frac{d_i}{d_j} \tag{6}$$

实际应用时,通常设定阈值 θ (θ 为一固定常数),当 $|P_{ri} - P_{rj}| \leq \theta$ 时,用两参考节点的中垂线方程代替圆方程。即

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 & |P_{ri} - P_{rj}| > \theta \\ (y_i - y_j)(x - x_i) = (x_i - x_j)(y - y_j) & |P_{ri} - P_{rj}| \leq \theta \end{cases} \quad (7)$$

依据式(7),一对RSS差决定一个方程式,因此通常需要 $k(k \geq 4)$ 个监测节点的RSS数据才能通过方程组求解得到干扰源的位置坐标。

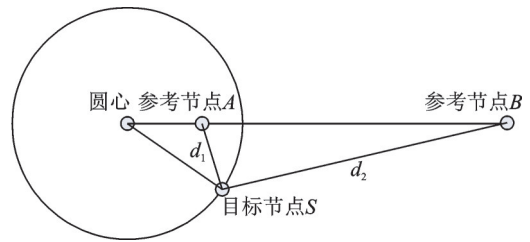


图3 差圆法示意图

Fig.3 Schematic diagram of difference circle method

3 基于RSS的多平台TDOA时差定位

3.1 基于RSS定位的TDOA时差定位流程

基于RSS的多平台TDOA时差定位的核心思想为:在TDOA定位前,先进行RSS辅助定位和阵型移动,使无人机定位阵型的最佳定位区域尽快覆盖干扰源较大概率分布区域。根据前述TDOA定位原理分析可知,TDOA参考基站阵型的不同,其定位性能存在差异,且每种阵型对应的最佳定位区域也不同,图4分别给出了5节点情况下4种不同阵型的最佳定位区域示意图。其中,最佳定位区域定义为定位区域中,定位精度高于阵型内平均定位精度的区域,即图4中的红色区域。

RSS定位解算原理与TDOA类似,且RSS定位结果仅作为快速引导无人机群到达TDOA有效定

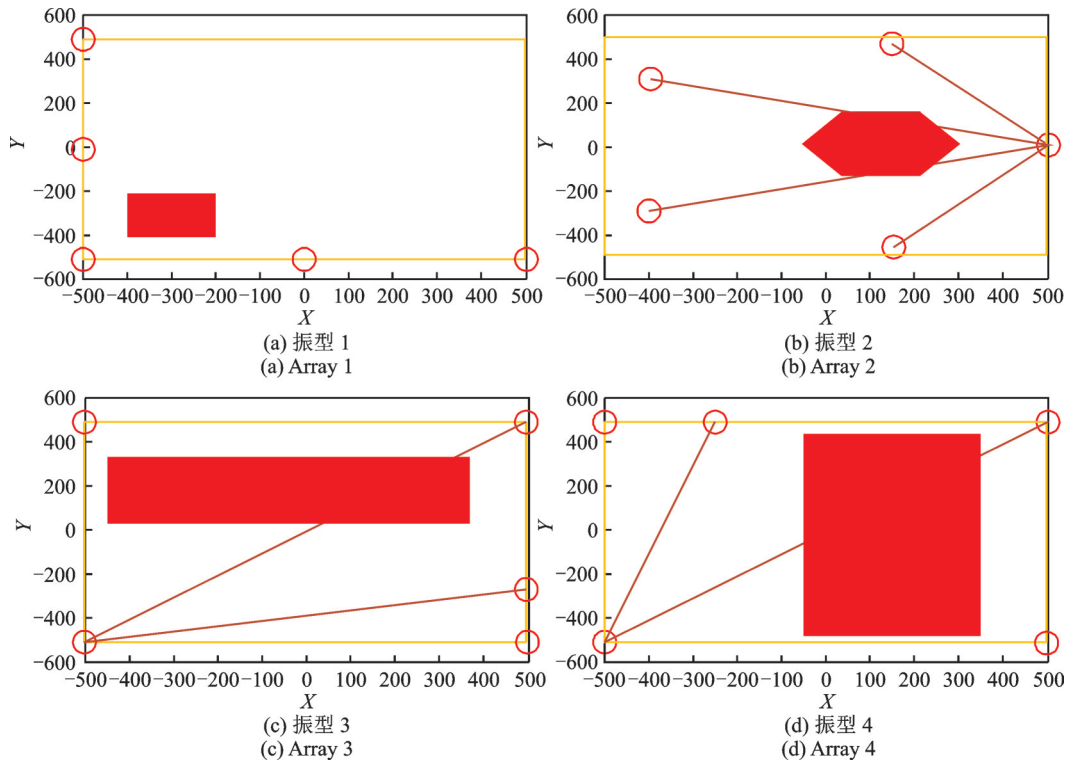


图4 不同阵型下5节点TDOA最佳定位区域示意

Fig.4 The best positioning region of five nodes TDOA under different positioning formations

位区域的依据,其结果对最终定位精度无影响,系统最终定位精度取决于TDOA的定位精度。基于RSS定位的TDOA时差定位流程如图5所示。为简化无人机群协同飞行的复杂性,可事先通过仿真选取对应TDOA定位性能较优的无人机群阵型。在进行首次RSS定位前,辅机升空时即以主机为中心进行阵型分布,悬停接收干扰信号完成首次RSS定位,并依据其定位结果保持阵型进行飞行编队位置整体平移,反复多次,直到RSS定位结果处于阵型对应的TDOA有效定位区域内之后,启动时差测量,完成TDOA定位解算,获取干扰源精确定位结果。

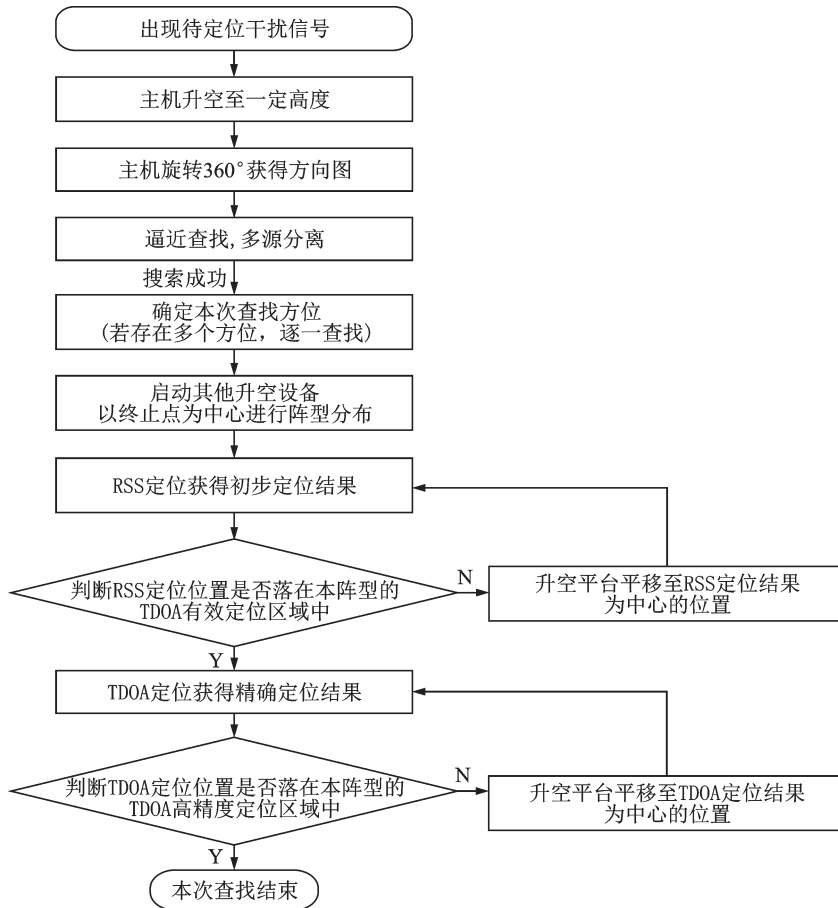


图5 基于RSS定位的TDOA时差定位流程

Fig.5 Positioning flow of TDOA based on RSS

3.2 基于RSS的多平台TDOA时差定位场景

以5节点无人机群的RSS+TDOA定位为例,对其基于爪型阵分布的定位场景的具体分析过程如下:

(1)定位任务开始时,真实目标位置在定位阵型之外;此时启动RSS定位,获取目标位置概率位置。首次RSS定位后,因为法线方向发散的原因,定位区域误差较大,目标可能概率区域较大(图6)。

(2)无人机群按照图7所示(图7中为简化示意只画了3个节点),快速平移至目标区域附近,平移的目标是使该阵型对应的最佳定位区域的中心与RSS定位估计点重合,在进行无人机群航迹控制时,可根据固定阵型的最佳定位区域中心与阵型中的各节点位置关系和RSS定位估计点位置坐标推算出各

节点目标位置坐标。

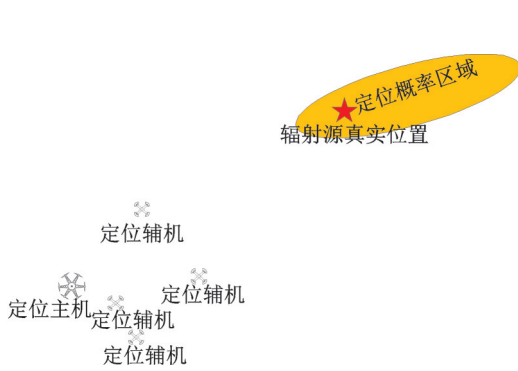


图6 RSS初步定位效果示意

Fig.6 Schematic description of RSS initial positioning effect

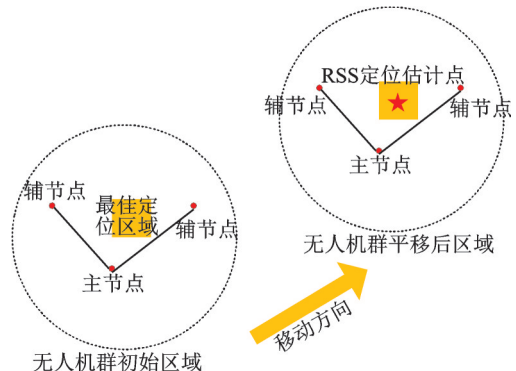


图7 移动过程示意

Fig.7 Schematic description of movement process

(3)无人机群第1次整体移动完毕后,再次启动RSS定位,可能结果如图8所示,由于阵型已覆盖RSS概率定位区域,取得较为可信的概率区域(如果依旧在阵型外面,可重复步骤(2)的移动过程,直到图8中类似结果)。

(4)经过两次RSS定位后,可获得较高精度,若未达到支撑干扰排查需要的定位精度,则需要再次微调阵型,使其达到图9所示效果。此时,TDOA最佳定位区域已覆盖RSS定位概率区域,可保证TDOA定位达到理论上的较高精度。

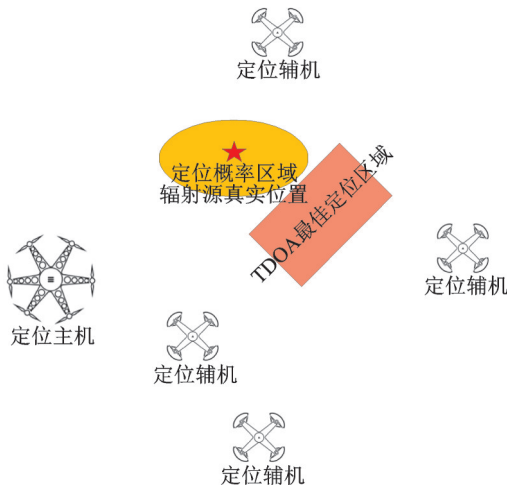


图8 再次RSS定位结果效果示意

Fig.8 Schematic result of the second RSS

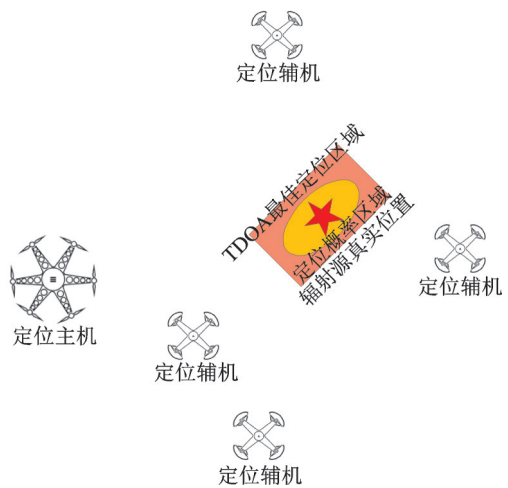


图9 RSS最终定位结果示意

Fig.9 The final location result of RSS

(5)RSS定位达到目标区域后,启动TDOA定位。若单次TDOA定位结果未进入当前阵型的最佳定位区域,可仿照步骤(2)一(4),对阵型位置进行平移微调,使阵型对应的最佳定位区域的中心与TDOA初次定位估计点重合。通常,最多经过1次移动,即可保证TDOA定位结果进入理论上的最佳定位区域,从而保证最终定位精度。

4 RSS+TDOA 定位可行性及效能分析

4.1 RSS+TDOA 定位可行性论证

4.1.1 RSS定位结果辅助TDOA定位可行性理论分析

作为TDOA定位前置步骤,RSS定位的解算是基于到达强度的精确测量进行的,但在实际应用环境中,信号强度的测量误差往往较大。电平估计误差与信噪比的关系计算方法为(以下公式中的电平与信噪比均已换算至分贝单位下而非十进制)

$$\Delta P_r = \text{SNR}_{\text{mean}} - 10\lg(10^{\frac{\text{SNR}_{\text{mean}}}{10}} - 1) \quad (8)$$

对于检测门限(信噪比5 dB)附近的信号,误差可达1.6 dB,对应的相对误差范围约为 $-31\% \sim +45\%$ 。根据自由空间传播模型(式(2)),换算到距离比例上的测量相对误差范围 $\frac{\Delta d}{d}$ 约为 $-17\% \sim +20\%$ ($\frac{\Delta d}{d} = 10^{\frac{\Delta P_r}{10k}} - 1, k=2$),由此带来的最大定位解算误差相对参考点距离(相对误差)约为40%(几何精度(Geometric dilution of precision, GDOP)值取2)。若无人机阵型基线取1 000 m,则接收强度测量误差引起的RSS定位误差最大可达数百米;如果RSS的定位产生最大误差时,RSS定位估计结果仍落在TDOA的最佳定位区域范围内,才可保证依据RSS定位结果进行无人机群整体平移后能够达到其TDOA的有效定位区域,即可证明RSS定位能够满足TDOA定位最佳区域抵达的引导需求。

4.1.2 RSS定位结果辅助TDOA定位可行性仿真验证

为验证利用RSS定位结果辅助无人机群逼近完成TDOA有效定位方法的可行性,本文对特定阵型下的RSS定位和TDOA定位进行仿真,主要针对两个问题:

(1)通过优选阵型下的TDOA仿真,验证TDOA有效定位区域是否覆盖RSS定位最大误差范围,以确认在RSS最大定位误差情况下,RSS定位仍可引导无人机群平移至TDOA有效定位区实施最终定位。

(2)通过RSS仿真分析,要使后续TDOA的解算精度达到系统定位要求,所需RSS定位的最大次数。

本文首先在干扰源发射功率、自机定位误差、时间同步误差等TDOA定位精度影响因素均取典型值(10 W, 5 m, 20 ns)的情况下,进行无人机群阵型和节点个数优选仿真,并在选定最佳阵型5点爪型阵(图10)的基础上,分别针对各TDOA定位独立误差源(基线长度、干扰强度、时间同步误差和节点自机定位精度)对精度的影响趋势以及不同目标源发射功率下的RSS定位精度进行了仿真,TDOA仿真最佳阵型如图11所示。其中,为简化计算,仿真时,RSS解算采用等间隔离散点搜索法。干扰信号到达功率通过信源功率和链路衰减计算得到,叠加噪声后再进行能量检测,其中叠加噪声采用最大导航信号带宽(20 MHz)的热噪声(-92 dBm),信号频率取典型导航信号频率1.5 GHz。其他仿真参数如表1。

根据TDOA定位各独立误差源的影响仿真分析可得:在定位精度要求30 m(最终可步行查找干扰源)的应用背景下,定位基线为1 000 m时,定位达标区域分布最合理,且区域内最大定位误差最小。干扰在可被正常检测的功率取值范围内,其发射功率对定位误差影响可忽略。自机定位误差和时间同步误差均与定位精度呈类正比例线性关系,与达标区域面积则近似反比例关系。基线长度为1 000 m,干扰强度为10 W,自机定位误差5 m和时间同步误差20 ns采用市场常规指标下TDOA定位精度分布图如图12所示。

由图12可以看出:TDOA有效定位区域覆盖半径至少在600 m,和RSS最大定位误差处于同一数量级,且完全可容纳RSS最大定位误差,因此可验证:RSS定位能够满足TDOA有效区域抵达的引导需求。

针对验证的第2个问题,采用在定位精度最恶劣(发射功率最低 $P_t=1$ W)的情况进行定位次数分析。图13是以无人机群阵型中心为原点,X,Y轴方向均为 $[-10$ km, 10 km]范围内的多次RSS定位误

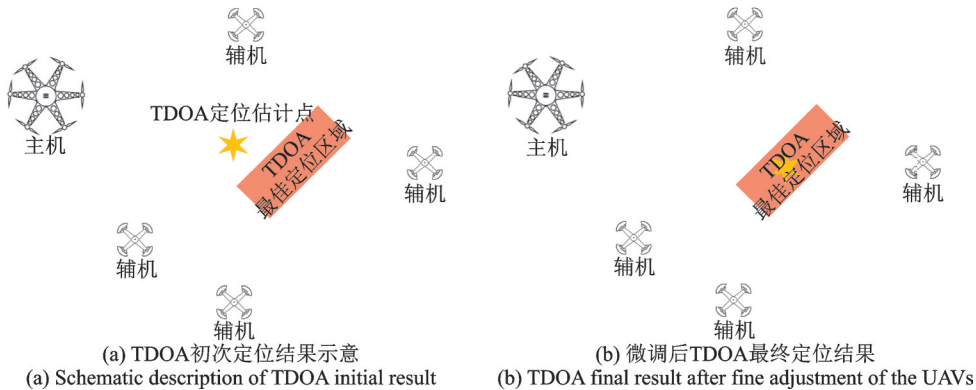


图10 TDOA调整定位示意

Fig.10 TDOA adjustment positioning schematic

表1 RSS/TDOA定位仿真参数

Table 1 Simulation parameters of RSS/TDOA

参数名称	RSS仿真参数取值	TDOA仿真参数取值
阵型大小(基线长度)/m	1 000	100,200,500,1 000,2 000
干扰源发射功率/W	1,2,5,1,20	1,2,5,1,20
自机定位误差/m		0:1:10
时间同步误差/ns		0:5:40
覆盖范围/(km×km)	2×2	2×2
仿真点间隔/m	500	50
阵型	5点爪形阵	5点爪形阵

差的均值结果。图13中,绿色标注的点构成的圆形区域即为以原点为圆心的半径为10 km的圆边缘。根据绿色标注点的定位误差值可知,以无人机群为中心10 km半径范围内的RSS定位精度约在4 km以内,即若在距离干扰源10 km范围内做第1次RSS定位,定位精度将控制在4 km以内。当无人机群抵近第1次RSS定位估算点进行第2次RSS定位前,干扰源应在距离无人机群中心4 km范围内,对应为图13中黄色标注点围成的圆形区域。同前,根据黄色点对应定位误差值分布情况可知,当距离干扰源4 km内做第2次RSS定位后,定位精度将控制在180 m以内,对应的是图13中橙色区域,可以看出此时进行第3次RSS定位,定位精度可达几十米量级。

上述仿真时信号的测量误差来源方面仅考虑了20 MHz的热噪声,而实际应用中干扰信号强度的测量可能面临更多的误差因素,从上述仿真结果分析,以距离干扰源10 km范围开始进行RSS定位,3次RSS之后可达数十米量级,即便考虑实际误差因素引起的强度测量误差,RSS定位后误差也可控制在数百米量级,符合TDOA定位最佳区域抵达要求。若系统作用半径按5 km估算,TDOA定位启动前,3次RSS定位足够满足后续要求,因此,RSS定位最大次数为3。

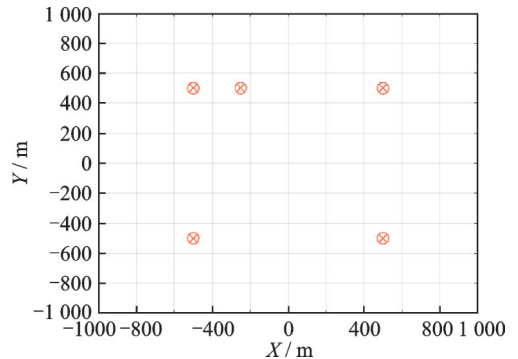


图11 TDOA仿真最佳阵型(5点爪形阵)
Fig.11 TDOA simulation under the best formation(5-point claw array)

X(m)\Y(m)	-1000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
-1000	64	55	47	41	38	37	39	43	48	52	54	53	49	43	38	35	35	36	38	43	48
-900	57	48	41	35	31	29	30	31	34	38	41	42	39	34	30	28	28	29	32	37	43
-800	50	42	35	29	25	23	22	23	25	28	33	35	32	27	24	23	23	25	28	33	39
-700	44	36	29	23	19	17	16	17	19	22	27	29	27	22	20	19	19	21	25	30	36
-600	39	31	24	19	15	13	12	13	15	18	23	26	23	19	17	16	17	19	23	28	35
-500	36	28	21	16	13	11	11	13	16	22	24	21	17	15	14	15	18	22	27	34	
-400	35	26	19	14	11	10	9	10	12	16	22	24	19	15	14	13	15	17	21	27	35
-300	35	26	19	14	11	10	10	11	13	18	26	26	19	15	13	13	14	17	21	27	36
-200	37	27	20	15	13	11	11	12	16	23	34	29	20	15	13	13	15	17	22	28	37
-100	38	29	22	18	15	14	14	16	22	36	54	33	21	16	14	14	15	18	23	30	39
0	40	31	25	21	18	17	18	22	32	68	80	35	22	17	15	15	16	19	24	31	41
100	41	33	27	23	21	21	22	27	40	64	53	32	22	18	16	16	18	20	25	32	45
200	41	33	28	24	22	21	22	26	32	38	35	27	21	18	17	17	18	21	26	33	43
300	39	32	27	23	20	19	20	22	25	28	27	24	20	18	17	17	19	22	27	34	44
400	38	31	25	21	19	18	18	19	22	24	24	23	20	18	18	18	20	23	28	35	44
500	37	30	25	21	19	18	18	19	21	23	24	23	21	20	19	19	21	25	30	37	46
600	38	31	26	23	20	19	19	21	23	25	26	25	24	22	22	22	24	28	33	40	48
700	40	34	29	26	23	23	23	24	26	28	29	29	28	27	26	27	29	32	37	44	53
800	44	38	33	30	28	27	28	30	32	34	36	36	35	33	33	33	35	38	43	50	58
900	50	44	39	36	35	34	35	37	40	43	45	46	44	43	42	42	43	46	51	57	66
1000	57	51	47	44	43	43	45	48	52	56	59	59	58	56	54	53	54	56	60	67	75

图 12 TDOA 定位精度分布图

Fig.12 TDOA positioning accuracy distribution diagram

X°\Y°	-10km°	-9km°	-8km°	-7km°	-6km°	-5km°	-4km°	-3km°	-2km°	-1km°	0°	1km°	2km°	3km°	4km°	5km°	6km°	7km°	8km°	9km°	10km°
-10km°	7976°	6489°	5771°	5400°	5765°	4805°	4009°	3311°	3611°	3309°	3975°	3741°	3444°	3905°	3309°	4219°	5008°	5532°	6121°	6361°	8065°
-9km°	8188°	6477°	5477°	5062°	4248°	3226°	3305°	3088°	3229°	3030°	3108°	3114°	2787°	2928°	2433°	3370°	4073°	4029°	4927°	5689°	7123°
-8km°	6664°	5210°	5250°	4876°	3308°	2726°	2259°	1734°	1988°	1748°	1530°	1748°	2134°	1705°	1349°	1548°	3047°	3799°	3822°	5040°	5167°
-7km°	5984°	4630°	3609°	3579°	2833°	1772°	1382°	1620°	908°	1473°	825°	843°	892°	1442°	1570°	1232°	2810°	2797°	3041°	4170°	5273°
-6km°	6542°	5630°	3728°	1458°	2090°	1047°	1129°	788°	712°	681°	296°	676°	346°	389°	466°	623°	786°	1716°	2903°	4031°	3951°
-5km°	5707°	4696°	3091°	2429°	1847°	489°	727°	320°	239°	225°	189°	204°	236°	296°	331°	468°	983°	1212°	2038°	3799°	4141°
-4km°	5127°	4163°	3117°	2354°	1124°	396°	267°	199°	172°	159°	147°	148°	172°	200°	261°	296°	513°	683°	1591°	3275°	4662°
-3km°	4865°	4027°	2405°	1598°	1001°	272°	202°	170°	133°	112°	111°	117°	133°	164°	189°	261°	380°	693°	1206°	2762°	3383°
-2km°	4550°	4013°	2930°	1345°	348°	229°	164°	135°	97°	50°	104°	28°	62°	124°	165°	210°	315°	488°	678°	2139°	2768°
-1km°	4757°	3903°	2342°	1611°	328°	184°	153°	106°	13°	109°	0°	0°	9°	94°	138°	190°	293°	453°	1041°	2046°	2868°
0°	5205°	4158°	2585°	1067°	270°	196°	136°	88°	86°	22°	0°	0°	86°	114°	147°	173°	264°	446°	1040°	1359°	2255°
1km°	5053°	3580°	2334°	1254°	325°	193°	160°	111°	16°	121°	30°	71°	27°	108°	151°	194°	289°	447°	733°	1885°	3474°
2km°	4177°	3669°	2552°	887°	700°	238°	162°	136°	95°	36°	135°	82°	101°	125°	161°	232°	327°	938°	809°	2216°	2960°
3km°	4977°	3922°	2923°	542°	398°	629°	219°	170°	138°	107°	133°	125°	154°	151°	197°	270°	400°	650°	1944°	2650°	3687°
4km°	5633°	4005°	2686°	1299°	1334°	380°	623°	224°	194°	164°	173°	164°	174°	209°	270°	725°	506°	705°	1670°	2828°	3637°
5km°	5481°	4394°	2614°	1750°	1024°	859°	407°	324°	274°	251°	221°	219°	245°	290°	364°	536°	733°	1242°	2299°	3403°	3706°
6km°	5592°	5124°	3214°	1946°	2051°	1281°	878°	459°	744°	391°	666°	368°	728°	476°	897°	667°	1733°	2196°	2543°	3233°	4107°
7km°	6089°	5452°	4221°	3585°	2683°	1751°	1752°	1656°	1161°	1500°	1096°	854°	875°	638°	1786°	1762°	1748°	2681°	3284°	3654°	5760°
8km°	6364°	6643°	5823°	3965°	3466°	3205°	3247°	1734°	2698°	2382°	2357°	1586°	1817°	2243°	1823°	2655°	2708°	3169°	3640°	5261°	6139°
9km°	7639°	6013°	5647°	5417°	4227°	4207°	4020	2605°	3371°	3280°	3264°	3406°	3375°	3734°	3444°	4286	3691°	4657°	5754°	5992°	6963°
10km°	8928°	7678°	7128°	5613°	6025°	4736°	4678°	4265°	3343°	4271°	4097°	3912°	3994°	3953°	4944°	4714°	4644°	5315°	6508°	6189°	7685°

图 13 干扰源发射功率为 1 W 时 RSS 定位精度分布图

Fig.13 Positioning accuracy distribution of RSS with the transmitting power 1 W

然而实际情况下,即使通过 RSS 辅助定位和阵型移动,使无人机定位阵型的最佳定位区域覆盖了 RSS 的定位结果,对应的初次 TDOA 定位结果仍有一定概率不能进入阵型最佳定位区域,此时则需要对阵型进行微调后实施二次定位(如图 10),来保证 TDOA 的最终定位精度。

4.2 定位性能比较

利用 RSS 定位信息进行 TDOA 定位辅助是 TDOA 定位时无人机群从起飞点快速飞至目标布站区的针对性解决方案,该方法对系统指标的贡献主要体现在缩短定位时间上,因此,对于 RSS+TDOA 定位方法的效能评估主要是对定位时间进行考察和评估。

4.2.1 RSS+TDOA 定位时间估算

典型的无先验信息的空基干扰源定位(如图 5)主要包括主无人机升空查找(包括调整高度和旋转)、主无人机移动逼近、辅机升空并移动组成阵型、无人机群 RSS 定位和无人机群 TDOA 定位等 5 个步骤。若系统覆盖半径为 5 km,无人机升空高度范围为[200 m, 500 m],无人机最大垂直移动速度为 5 m/s,最大水平移动速度为 20 m/s,系统定位各步骤所耗时间具体分析如下:

(1) 主无人机升空查找

主无人机升空查找时,每个高度停留需要旋转 360° ,对东、西、南、北、东南、西北等8个方向进行检测查找。若升空高度以100 m为步进,则最多需要停留4次($h=200/300/400/500$ m),高度调整时间需要40~100 s,而无人机姿态调整时间不超过2 s,则每个高度下旋转和停留检测时间不超过16 s。因此,主无人机升空查找步骤最短耗时为 $40+16=56$ s,最长耗时为 $100+16\times 4=164$ s,典型时间取两者平均为110 s。

(2) 主无人机移动逼近

主无人机移动逼近过程无需悬停,是一个连续逼近过程。由于无人机飞行路线不是理想的直线飞行路线,主机利用比幅测向引导飞行时,移动逼近的路线最差情况下可近似为一个直径为系统覆盖半径 R 的半圆弧(如图14),对应移动逼近最长路径约为7.9 km,因此,主无人机移动逼近步骤最短耗时5 s(初始位置即为最佳位置,移动一点立即触发停止),最长耗时约为 $7\ 900/20=395$ s,典型时间取两者平均为200 s。

(3) 辅机移动并组成阵型

若阵型各节点距离中心最远约500 m,则辅机移动并组成阵型的最短耗时为 $200/5+500/20=65$ s,最长耗时为 $500/5+5\ 000/20=350$ s,典型时间取两者平均207 s。

(4) 无人机群RSS定位

RSS定位本身采集信号所需时间并不多(采集+解算可控制在5 s内),该过程主要时间消耗在两次RSS之间的阵型平移上。考虑到RSS定位次数最多为3次,移动距离总共最大为5 km。因此,无人机群RSS定位的最短耗时为5 s,最长耗时为 $5\times 3+5\ 000/20=265$ s,典型时间取两者平均为135 s。

(5) 无人机群TDOA定位

同RSS定位类似,TDOA定位本身采集信号和定位解算所耗时间可控制在5 s内,不考虑微调情况(概率很低),无人机群TDOA定位的耗时为5 s。

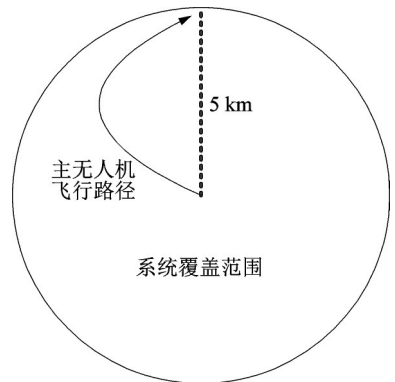


图14 主无人机移动逼近路线示意

Fig.14 Schematic moving route of the main UAV

表2 定位过程耗时统计

Table 2 Time consuming statistics of positioning process

耗时过程	最短耗时/s	最长耗时/s	典型耗时/s
主无人机升空查找	56	164	110
主无人机移动逼近	5	395	200
从无人机移动并组成阵型	65	350	207
无人机群RSS定位	5	265	135
无人机群TDOA定位	5	5	5
合计	136	1179	657

综上所述,在定位流程完全自动化的前提下,系统定位全流程最短耗时136 s,最长耗时1 179 s,典型耗时约为657 s,系统最长定位时间可控制在无人机一个续航周期(20 min)以内,典型值可以做到11 min左右。

4.2.2 其他干扰查找方法比较分析

目前,无线电测向交叉定位是电子侦察领域实际应用最为广泛的一种方法,本文以该方法为参照进行效能对比。以干扰源位于发现地点5 km范围内为前提,从4.1.2节的TDOA仿真结果来看,本文方

法在目标到达 TDOA 阵型有效定位区内启动 TDOA 定位,可确保 20 min 内市场常规参数下的 TDOA 定位误差控制在 50 m 以内(见图 12,在仿真基础上考虑其他实际误差因素),再依据其定位结果进行步行逼近查找的时间可控制在 10 min 内,从而保证整个干扰查找过程在 30 min 内完成。而采用地面移动监测车(大作用范围下交叉测向的常用方法)进行多点交叉测向+步行逼近的方法,按驱车 1 次行进 2 km 再测向,采用二次测向结果交叉定位的模式,单前后两次移动监测车天线升降并完成稳定测向和驱车耗时至少需 20 min,若测向精度取目前较优水平 2° ,5 km 范围内对应测向定位误差可达 170 m,采用上述相同的手持逼近手段进行人工查找的时间将为 TDOA 方法的 3 倍,且在移动车进行交叉测向的过程中,一般至少需要 3~5 次测向,再加上行进过程中路径和有效测向点的选择会耗费大量的时间,通常一次外出测向需耗时 1~2 h,甚至几天,若干扰具有随机出现且持续时间较短的特点,还会出现查找失败的可能。因此,在可自动化实现的前提下,本文方法优势明显。

5 结束语

本文针对利用多站 TDOA 无源定位进行干扰查找时,如何使多个移动站快速逼近目标并有效进行 TDOA 定位等问题,采用 RSS 定位结果辅助引导目标最佳定位区快速抵达的方法,解决了干扰查找实际应用中因目标距离受扰点位置不明,干扰查找系统如何迅速逼近、实施有效定位,进而缩短整体定位时间的问题。文中描述了基于 RSS 的多平台 TDOA 时差定位流程和关键定位场景,并以基于轻型无人机平台的空基定位系统实施干扰查找为应用背景,对该方法的定位可行性及其对系统定位时间的贡献进行了详细分析论证。结果表明在定位流程自动化实施顺利的前提下,系统整个定位流程的最长耗时可控制在无人机一个续航周期(20 min)内。该方法和对应实现流程可为目前无线电监测和定位系统实现及其干扰查找应用提供一种有效思路和实践试探。

参考文献:

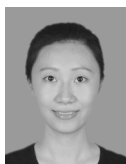
- [1] 吴福平,邓皓,何建华.影响多站时差定位精度的关键因素分析[J].航空科学技术,2018,29(5):32-37.
WU Fuping, DENG Hao, HE Jianhua. Key factors analysis of multi-stations TDOA passive location precision[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(5): 32-37.
- [2] 高向颖,赵拥军,刘智鑫,等.考虑站址误差的稳健 TDOA 定位算法[J].信号处理,2020,36(8):1196-1204.
GAO Xiangying, ZHAO Yongjun, LIU Zhixin, et al. Robust source localization using TDOA with receiver location errors[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(8): 1196-1204.
- [3] 夏伟.多站无源时差定位系统布站方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2019:28-54.
XIA Wei. Stations distribution study of passive time difference localization system using multiple sensors[D]. Xi'an: Xidian University, 2019: 28-54.
- [4] 邢翠柳,陈建民.多站无源时差定位精度分析[J].无线电工程,2012,42(2):32-34.
XING Cuiliu, CHEN Jianmin. Analysis on positioning accuracy of TDOA passive location by multi-station[J]. Radio Engineering, 2012, 42(2): 32-34.
- [5] 杜盈,陈峻.基于 TDOA 的网络化定位系统自适应站点优选算法[J].无线电通信技术,2020,46(1):116-120.
DU Ying, CHEN Jun. Adaptive station optimization algorithm for networked passive location system based on TDOA[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(1): 116-120.
- [6] 闫千里,万鹏武,卢光跃,等.非视距环境下 RSS 和 TDOA 联合的信源被动定位[J].西安电子科技大学学报,2019,46(3):180-187.
YAN Qianli, WAN Pengwu, LU Guangyue, et al. Passive localization of the signal source based on RSS and TDOA combination in non-line-of-sight environment[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(3): 180-187.
- [7] 马卫东,李遵义,汤晓溪.多站无源时差定位解算算法分析与系统实现[C]//2015 年全国遥感遥测遥控学术年会.石家庄:[s.n.],2015:238-244.
MA Weidong, LI Zunyi, TANG Xiaoxi. Algorithm analysis and system implementation of multi station passive TDOA location[C]//2015 National Symposium on Remote Sensing, Telemetry and Remote Control. Shijiazhuang: [s.n.], 2015: 238-244.
- [8] 李婧,龚晓峰,张焱,等.时间差无源定位的工程应用[J].现代电子技术,2009,32(11):45-48.

- LI Jing, GONG Xiaofeng, ZHANG Ye, et al. Project application of TDOA passive location[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, 32(11): 45-48.
- [9] 王宇,王志雄,李维聪. 无源多站时差定位技术研究及在频谱监测中的应用[J]. *山西电子技术*, 2011, 1: 62-63.
WANG Yu, WANG Zhixiong, LI Weichong. Research of passive multi-station TDOA location and its applications in radio detection[J]. *Sanxi Electronic Technology*, 2011, 1: 62-63.
- [10] 李雪梅. 基于长基线的TDOA技术应用[J]. *中国无线电*, 2018, 4: 46-47.
LI Xuemei. Application of TDOA technology based on long baseline[J]. *China Radio*, 2011, 1: 62-63.
- [11] RICHARD A P. 电子战目标定位方法[M]. 北京:电子工业出版社, 2008: 152-157.
RICHARD A P. RICHARD A P. Electronic warfare target location methods[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 152-157.
- [12] 徐弘良. 对TDOA无线定位技术的研究与展望[J]. *上海信息化*, 2013, 5: 60-63.
XU Hongliang. Research and prospect of TDOA wireless location technology[J]. *Shanghai Informatization*, 2013, 5: 60-63.
- [13] 杨林,周一宇,孙仲康,等. TDOA被动定位方法及精度分析[J]. *国防科技大学学报*, 1998, 20(2): 49-53.
YANG lin, ZHOU Yiyu, SUN Zhongkang, et al. TDOA passive location and accuracy analysis[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1998, 20(2): 49-53.
- [14] 刘磊,姚剑,谢学锋,等. TDOA无源定位系统的原理与影响因素分析[J]. *无线通信技术*, 2017, 26(4): 42-46.
LIU Lei, YAO Jian, XIE Xuefeng, et al. Principle and influencing factors analysis of TDOA passive location system[J]. *Wireless Communication Technology*, 2017, 26(4): 42-46.
- [15] 敖伟. 无源定位方法及其精度研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
AO Wei. Research on passive location method and its accuracy[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [16] 杨丽丽,孙晓闻. 无人机载多站无源定位系统精度分析[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2014, 9(4): 348-352.
YANG Lili, SUN Xiaowen. Precision analysis of airborne passive location of multi-stations[J]. *Journal of CAEIT*, 2014, 9(4): 348-352.
- [17] 刘栩楠,石荣,何彬彬,等. 基于RSS信息的测向交叉虚假定位点排除方法[J]. *电子信息对抗技术*, 2020, 35(4): 28-33.
LIU Xunan, SHI Rrong, HE Binbin, et al. A false direction-finding cross location points elimination method based on RSS information[J]. *Electroni Information Warfare Technology*, 2020, 35(4): 28-33.
- [18] 马帼嵘. 基于RSS的无线传感器网络无源被动定位研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
MA Guorong. The implement and research of RSS based source passive localization algorithm WAN[D]. Xi'an: XiDian University, 2014.
- [19] 赵永翔. 基于无线局域网的室内定位系统研究[D]. 武汉:武汉大学, 2010.
ZHAO Yongxiang. The indoor positioning system research based on wireless LANs[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [20] 刘广怡. 基于RSSI的传感器网络定位技术研究及实现[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2009.
LIU Guangyi. Research and realization of the RSSI-based positioning technology for WSN[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009.

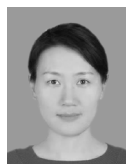
作者简介:



刘安斐(1982-),女,高级工程师,研究方向:卫星导航 & 卫星通信, E-mail: liu_anfei@163.com。



丁阳(1989-),女,工程师,研究方向:卫星导航。



窦晓晶(1983-),女,工程师,研究方向:卫星导航。



高嵩(1983-),男,高级工程师,研究方向:通信侦察与对抗。