

文章编号: 2095-4980(2021)03-0391-07

机场站坪区域中多点定位系统检测率的提升

曾丽丽¹, 陈梦娇¹, 徐自励², 华 伟¹

(1.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065; 2.中国民用航空总局第二研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 针对机场站坪区域内目标信号高检测率的需求, 基于S模式信号时域波形特点, 分析了传统目标检测法, 提出一种增加下降沿判决的S模式信号检测法。进一步利用遗传算法对接收性能良好的站点进行组合, 实现检测率的提升。与常用S模式信号目标检测法相比, 基于改进方法得到的接收站组合能够获得更高的系统检测率, 仅使用9个接收站可实现目标区域能计算目标位置概率不小于99.9%的要求。三维电磁传播模型仿真结果验证了所得结论的有效性。

关键词: 多点定位; S模式信号; 检测率; 接收站组合

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020680

A method to improve the detection rate of Multilateration system in airport apron

ZENG Lili¹, CHEN Mengjiao¹, XU Zili², HUA Wei¹

(1.School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;

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

Abstract: Aiming at the requirement of high detection rate of target signal in the airport apron, the traditional target detection method is analyzed, and a mode S signal detection method with increasing falling edge decision is proposed. Furthermore, Genetic Algorithm is utilized to combine the stations with good reception performance to improve the detection rate. Compared with the common mode S signal target detection method, the receiver combination based on the improved method can obtain higher system detection rate. It can meet the requirement that the target area can calculate the target position in a probability not less than 99.9% with only 9 receiving stations. The simulation results of three-dimensional electromagnetic propagation model verify the effectiveness of the conclusion.

Keywords: Multilateration(MLAT); mode S signal; detection rate; receiving site combination

多点定位(MLAT)系统主要采用分布式地面接收站, 通过机载应答机与地面接收站应答机的通信, 确定目标飞机在场内的位置信息。目前国际上多个大型机场都安装了 MLAT 系统, 如巴黎戴高乐机场、美国达拉斯国际机场、伦敦希斯罗机场等, 这 3 个机场分别配置了 18,12,15 个远端站来获取信息, 并对场面飞机目标进行定位。多点定位的信号源来自不同的电子系统, 当前主要使用的是机载应答机系统信号和 ADS-B 信号, 信号的格式主要为 S 模式。国内民航总局对 MLAT 系统性能的要求包括: 对 S 模式信号(Mode S signal)目标探测到目标和计算出目标位置的概率应不小于 99.9%, 即至少利用 3 个接收站接收目标发射的 S 模式信号时, 系统检测率应不小于 99.9%。其中, S 模式信号中的“S”是选择的意思, 能选择性地对具有对应地址的飞机进行呼叫, 只有被呼叫的飞机进行应答, 减少了飞机的同步混叠干扰。2014 年, KAKUBARI Y 等^[1]搭建了类似机场站坪区域的实验环境, 实测结果为 1.2 m 的置信度为 95%; 2015 年, J HONDA 等^[2]对仙台机场的传播环境进行评估, 多径效应会导致目标出现掉点现象。2018 年, J HONDA 等^[3]对信号量增加的机场地面进行信号量估计, 发现当机场信号量增加时, 失真信号为正常信号量的 1/4。上述文章对机场 MLAT 系统的检测率和传播环境进行评估, 均存在复杂电磁环境区域中由于多径效应的影响, 使系统检测率不足 90%的情况。为解决上述问题, 文献[4-6]分别从信号处理

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-02-04

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金资助项目(U1733109)

作者简介: 曾丽丽(1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究领域为电磁场与微波技术。email:zeng_lili@stu.scu.edu.cn.

和多点定位接收机上提出了克服多径的方法,提高了系统定位性能。这些方法对 MLAT 系统的定位性能有所改善,但对一些复杂建筑环境,如 U 形站坪区域,定位效果依旧不够理想。因此,改善站坪区域定位性能是 MLAT 系统中亟待解决的问题。由于系统检测率会影响 MLAT 系统的定位性能,因此在多个接收站接收目标信号的情况下,提高单个站点目标信号检测率能有效优化系统检测率。近年来,多点定位的研究基本集中于信号的接收与处理技术^[7-10],其中文献[8]提出利用多径提供的空间分集提高到达时间(Time Of Arrival, TOA)估计;文献[10]利用上升沿检测法对 S 模式下行叠加信号进行 TOA 估计。目标信号的检测主要用以改善 TOA 估计并抑制多径效应。但随着多点定位技术的发展,对目标信号的检测,在实现上述目标的基础上,还应考虑目标信号检测对接收站的目标检测率的影响,以及对不同接收站组合的影响,以便选取接收状态良好的接收站计算目标位置,提升系统检测率,从而改善站坪区域定位性能。

本文从改进目标信号的检测方法出发,研究 S 模式信号时域波形,提出一种增加下降沿判决的 S 模式信号检测法。根据实际机场环境,基于射线追踪法(Ray Tracing, RT)建立三维电磁传播建筑模型,通过仿真验证改进方法对单个站点检测率的积极作用。使用遗传算法对接收性能良好的站点进行组合,改善多个站点布局下的系统目标检测率,仅需 9 个接收站即可满足站坪区域系统检测率为 99.9%,节约建站成本。

1 多点定位原理与信号检测分析

1.1 多点定位原理

多点定位技术基于 TOA 和各接收站位置实现目标检测和定位。计算机场场面一个目标的三维位置,至少需要 4 个接收站。设多点定位系统中的 $a(a \geq 4)$ 个接收站中第 j 个接收站的位置矢量为 $\mathbf{x}_j = (x_j, y_j, z_j)^T$, $j=0,1,2,\dots,a-1$,目标空间位置为 $\mathbf{X} = (x, y, z)^T$,则目标到各接收站与目标到参考接收站 $(x_0, y_0, z_0)^T$ 的距离差为:

$$R = c \cdot TDOA_{0,j} = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2} - \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (1)$$

式中: $TDOA_{0,j}(j \neq 0)$ 为目标发送信号到各接收站与参考接收站的时间差; c 为电波传播速度。可通过后文的电磁仿真方法及信号检测方法确认目标信号后得到 TOA,计算两站点 TOA 之差从而得到到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA),将 TDOA 与电波速度相乘,对方程进行求解可得到目标位置估计解。

对 S 模式信号前导脉冲阈值检测是 TOA 估计以及 TDOA 信息获取的重要步骤^[11]。MLAT 系统中任意一个接收站点所获取的 S 模式时域信号 $x(t)$ 为:

$$x(t) = \alpha_0 s_0(t) + \sum_{i=1}^m \beta_i s_i(t - \tau_i) + n(t) \quad (2)$$

式中: $n(t)$ 为高斯白噪声; $s_0(t)$ 和 $s_i(t)$ 分别为接收站点接收的直达信号和多径信号; α_0 和 β_i 分别为直达信号和多径信号的幅度; τ_i 为多径信号相对于直达信号的时延; m 为多径信号数量。标准 S 模式信号前导脉冲格式见图 1, $8 \mu\text{s}$ 内由 4 个固定位置子脉冲组成,脉冲宽度误差为 $0.05 \mu\text{s}$,上升沿为 $50 \sim 100 \text{ ns}$,下降沿为 $50 \sim 200 \text{ ns}$ 。前导脉冲能确认是否有 S 模式信号出现、估计信号的到达时间和根据电平确定数据阈值的作用。

常用的前导脉冲检测方法^[7]为:比基底噪声大 6 dB 或比后面的采样点低 6 dB 的采样点为前沿位置,4 个前沿位置中有 2 个以上与 S 模式协议匹配,即确认 S 模式信号出现,同时允许前沿位置错位一个采样点,然后以第一个脉冲的前沿位置为 TOA 的值,其电平为参考电平,且有效子脉冲的长度应大于 $0.3 \mu\text{s}$ 。此时设置基底噪声为 N_0 ,用 $g(k)$ 表示前沿位置是否与 S 模式匹配。

$$g(k) = \begin{cases} 1, & x(j) - N_0 > 6 \text{ dB}, n_i - 10 < j < n_i + 10, i = 1, 2, 3, 4 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

当 $g(k)$ 为 1 时,前沿位置与 S 模式匹配; $h(v) = \sum_{k=1}^4 g(k)$ 为前沿位置与 S 模式匹配的个数,当 $h(v) > 2$ 时,认为 S 模式信号出现。

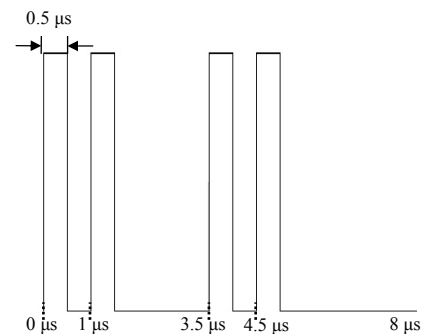


Fig.1 Format of mode S signal preamble pulse
图 1 S 模式信号前导脉冲格式

1.2 改进的 S 模式信号检测法

强多径信号与直达信号的混叠,造成参考电平和阈值抬高,在数据解码时,低于阈值的有效采样点将被忽略,此时可能出现虚假下降沿,造成有效子脉冲的误判,这是导致多点定位系统目标检测率下降的主要原因。图 2(a)和图 2(b)分别为有效子脉冲和误判子脉冲的目标信号的子脉冲情况。图 2(b)中,在 0.15 μs,0.16 μs 出现了下降沿,上升沿和下降沿之间大于阈值的持续时间小于 0.3 μs,常用的目标检测法^[7]判定此子脉冲与该位置上的标准信号子脉冲不匹配。但该图中子脉冲为有效子脉冲,判定范围应是:0.17~0.48 μs 的采样点幅值大于阈值,且持续时间大于 0.3 μs。

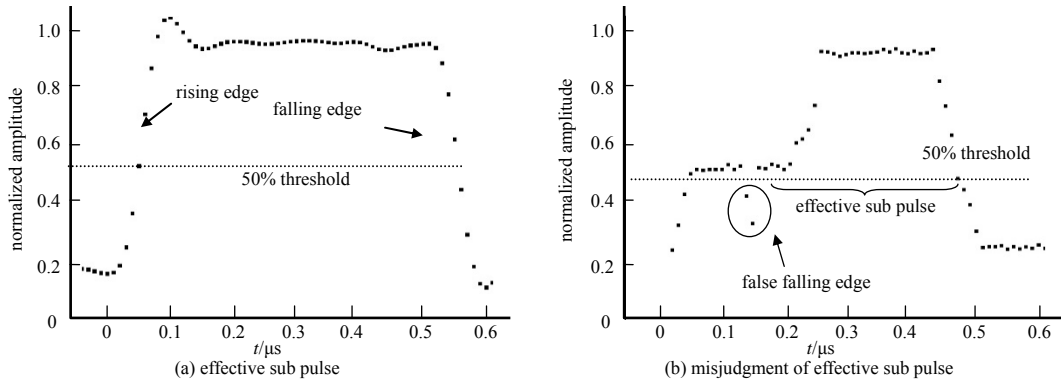


Fig.2 Schematic diagram of target signal sub pulse
图 2 目标信号子脉冲示意图

为了抑制上述情况出现,本文对常用 S 模式检测方法进行补充:对信号下降沿小于阈值的采样点设定宽度限制,当信号采样率为 100 MHz,则一个脉冲宽度(0.5 μs)中采样点数为 50 个,理想信号下降沿持续时间为 50~200 ns,小于阈值(50%)的持续时间在 25~100 ns。因此下降沿采样点幅值小于阈值的采样点数至少为 3 个,小于 3 个连续采样点则继续对子脉冲进行判定。对子脉冲出现的下降沿判定,用 $z(k)$ 表示下降沿是否持续出现:

$$z(k) = \begin{cases} 1, & x_p(n) < \text{阈值} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, n < n_i + 4, i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

当 $z(k)$ 为 1 时,出现下降沿。 $h(v) = \sum_{k=1}^4 [g(k) + z(k)] / 2$ 为前沿位置与 S 模式匹配的个数:当 $h(v)$ 为大于 2 的偶数,且上升沿和下降沿之间的脉冲长度大于 0.3 μs,认为 S 模式信号出现。改进后的检测法与常用检测法相比,检测一个目标点时,其程序计算时间从 0.021 419 s 变为 0.022 924 s,仅增加了 0.001 505 s 的计算时间。改进后的检测法实施步骤为:a) 脉冲前沿位置阈值检测;b) 脉冲宽度限制;c) 真假下降沿判断;d) 位置匹配,允许前导脉冲位置发生 1 个采样点偏移,三点匹配则确认;e) 标记有效信号的 TOA,为计算位置信息做准备。

1.3 数量统计模型

当检测到场面上离散的目标 S 模式信号后,需统计可被准确计算的目标位置数量,故本文提出数量统计模型。设场面上目标数量为 T_{x_num} ,单个接收站能检测的目标数量为:

$$\varphi(x_i) = \sum_{\phi=1}^{T_{x_num}} f(\phi) \quad (5)$$

其占总目标数量的比例,即单个站点目标检测率为:

$$P_{Tx} = \frac{\varphi(x_i)}{T_{x_num}} \times 100\% \quad (6)$$

目标信号能被 3 个以上接收站点检测,则能计算出目标位置,满足此条件的目标数量为 $number$ 。则目标信号能被计算出位置的概率,即系统检测率为:

$$P_{sys} = \frac{number}{T_{x_num}} \times 100\% \quad (7)$$

经上述分析, S 模式信号的检测对机场场面系统检测率的提高至关重要。

2 站坪建模

由于站坪区域中电磁环境复杂,对 MLAT 系统的定位性能影响较大,故使用电磁仿真软件 Wireless InSite 对电大尺寸物体进行建模,Wireless InSite 是以射线跟踪算法^[12](RT)为核心,基于场景实际特征运作的仿真软件,用于各种无线电波传播分析预测,支持大范围地理区域场景的仿真分析。由此,根据机场站坪区域的建筑模型,建立与文献[13]相同的 3D 模型,见图 3。本文机场站坪模型参数设置与文献[13]相同:机场航站楼材质相对介电常数为 15,电导率为 0.05 S/m,航站楼长为 1 060 m,宽为 750 m,标高为 15.7 m,距航站楼 465 m 处为高 96.5 m 的塔台建筑。根据实际多点定位系统站点布局,站坪区域的多点定位接收站一般架设在高 6.3 m 的廊桥上,则可能的接收站数量即为站坪内廊桥数量。接收天线位于廊桥顶部上方 5.7 m 处,本文可能的接收站位置坐标见表 1,其中 20 号站位于塔台上。

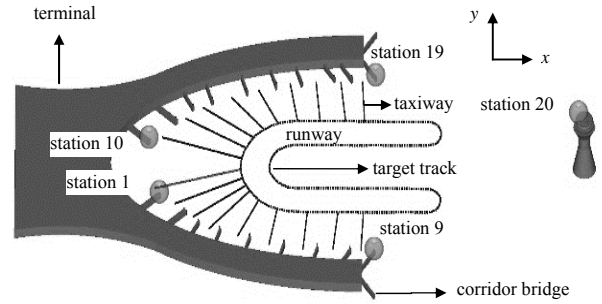


Fig.3 Simulation model of airport apron area
图 3 机场站坪区域仿真模型

为了更好地对机场场面多点定位系统的监视性能进行定量分析,将飞机 U 型跑道和跑道周围直线滑行道离散为多个网格,每间隔 5 m 设置一个目标点,目标信号数量为 1 073。发射天线的发射功率设为 30 dBm,水平方向增益为 5 dBi,天线辐射方向图如图 3 所示。

表 1 可能的接收站坐标

Table 1 Possible station coordinates

name	coordinate/m	name	coordinate/m	name	coordinate/m	name	coordinate/m
station 1	(-427,-81,12)	station 6	(-164,-204,12)	station 11	(-393,109,12)	station 16	(-130,206,12)
station 2	(-374,-122,12)	station 7	(-94,-213,12)	station 12	(-358,142,12)	station 17	(-62,218,12)
station 3	(-344,-150,12)	station 8	(-25,-217,12)	station 13	(-317,158,12)	station 18	(-24,216,12)
station 4	(-299,-169,12)	station 9	(25,-221,12)	station 14	(-245,184,12)	station 19	(25,221,12)
station 5	(-236,-187,12)	station 10	(-449,59,12)	station 15	(-182,198,12)	station 20	(453,6,100)

3 仿真与讨论

首先分析信号在机场站坪区域中的传播路径,根据接收到的 S 模式时域波形,使用 2 种检测法进行检测,验证改进的目标信号检测法的有效性;统计 4 个接收站的系统检测率,验证了改进目标检测法能提升单个站点的目标检测率;使用改进的目标检测法进行接收站组合时,接收状态良好的站点组合发生变化,增加了覆盖范围;通过增加接收站的可能位置,可以更少的有效站点数量,满足民航总局的性能要求。

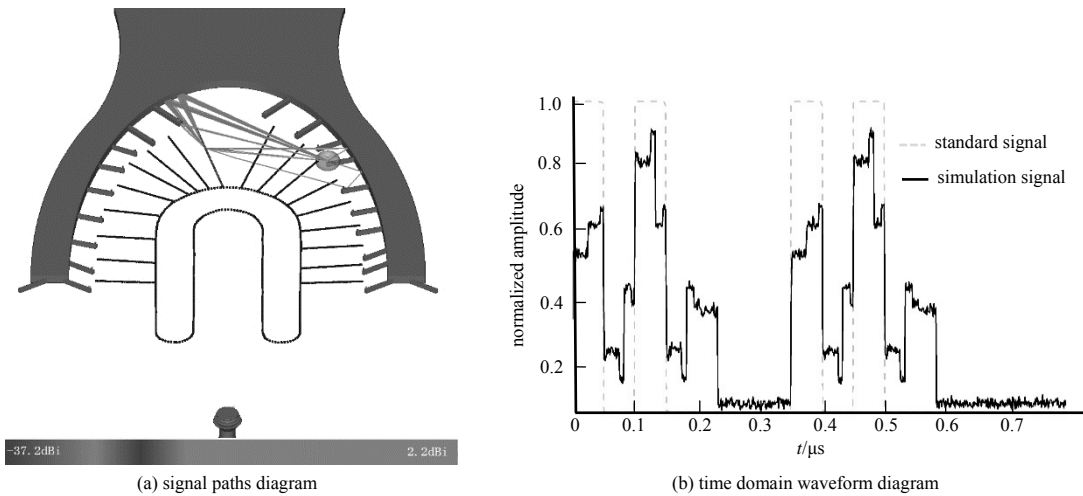


Fig.4 Apron area signal paths diagram (a) and time domain waveform diagram (b)

图 4 站坪区域信号路径图(a)与时域波形图(b)

U 型跑道目标点通过机载应答机发射 1 090 MHz 的 S 模式信号,直达信号和多径信号经过自由空间传播到廊桥接收机上,其信号传播路径及接收信号的时域波形见图 4。图 4 中射线表示经由射线追踪获取的发射点至接收

站点之间的传输路径，每条传播路径在接收点处的非相干叠加总接收功率表示为：

$$P_r = \sum_{I=1}^N P_I \tag{8}$$

式中： N 为传播路径数量； P_I 为第 I 条路径的接收功率。利用时域叠加获得各个接收站站点接收信号的时域波形，其中 13 号站点获取到滑行道上某一点发射信号的时域波形见图 4。该发射目标和接收站均位于 U 型站坪内部，多径效应明显，发射信号到达 13 号站的波形混叠严重，使用常规目标检测法对接收信号检测失败。但此时信号子脉冲匹配数大于 3，且子脉冲幅值大于阈值的持续时间在 $0.3 \mu\text{s}$ 以上，符合目标应答机发射的 S 模式信号前导脉冲检测要求，故采用改进的目标信号检测法能够进行目标信号检测，有效避免对接收信号的误判。

3.1 两种目标检测法的效果比较

系统接收站分别为机场站坪区域 9 号站、10 号站、19 号站和塔台上的 20 号站。由图 3 可知，塔台位于 $+x$ 方向，此时系统接收到的信号多为直达信号与来自 $-x$ 方向的反射和绕射信号的叠加，同时信号强度随反射次数和距离的增多而减少，因此除少量 $-x$ 方向靠近航站楼的目标信号受多径干扰较强外，20 号站能检测目标区域的大部分信号。位于 U 型跑道深处的 10 号站与航站楼的距离较近，来自后方航站楼的反射、绕射信号与直达信号的功率差与时间差均相对较小，信号的叠加使 10 号站的目标检测率下降。同理，来自靠近站点一侧航站楼的多径信号与直达信号叠加，会使 9 号站和 19 号站的单站检测率下降。利用常用目标检测法对目标信号进行检测，站点的检测情况如表 2 所示。由表中数据可知，位于塔台上的 20 号站塔台高度超过其他建筑，检测率达 90% 以上，分别比 9、10 和 19 号站的目标检测率高出 24.5%、64.3% 和 26.65%。利用改进的目标检测法，对 4 个站点接收到的目标信号进行判定，检测结果如表 2 所示，4 个站点的检测率明显提高，特别是位于建筑环境更加封闭的 10 号站，检测率提升了 3 倍，由此验证了改进目标检测法的有效性。

表 2 接收站为菱形组合时各接收站的目标检测率

receiving station	number of targets detected without improvement	detection rate without improvement/%	number of targets detected with improvement	detection rate with improvement/%
station 9	734	68.41	804	74.93
station 10	307	28.61	851	79.31
station 19	711	66.26	805	75.02
station 20	997	92.91	1 037	96.65

使用当前接收站组合时，改进后的系统检测率为 86.77% (相较于未改进的目标检测法，提升了约 26.47%)，图 5(a) 中右侧颜色柱相对应的数字表示几何精确度稀释因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP)，GDOP 为均方根位置误差与均方根测距误差的比值，若要求定位精确度高，则 GDOP 越小越好。图 5(b) 中右侧颜色柱相对应的数字表示目标点能被接收点检测的个数，同时目标轨迹对应图 3 的轨迹图。大部分目标轨迹所处位置的 GDOP 小于 2。分析目标信号的检测情况，图 5(b) 中 A 区域的目标检测站数仍有部分未超过 3 个，且检测站数为 1 的目标大都位于该区域；B 区域中 U 形跑道上的目标检测情况也不理想；更加开阔的 C 区域，目标的检测站数在 3 以上最多。可解码目标的轨迹分布散乱无特点，尽管此时的定位精确度较高，但使用 4 个接收站的站坪区域的系统检测率较低，系统无法对全部目标位置信号进行解码。

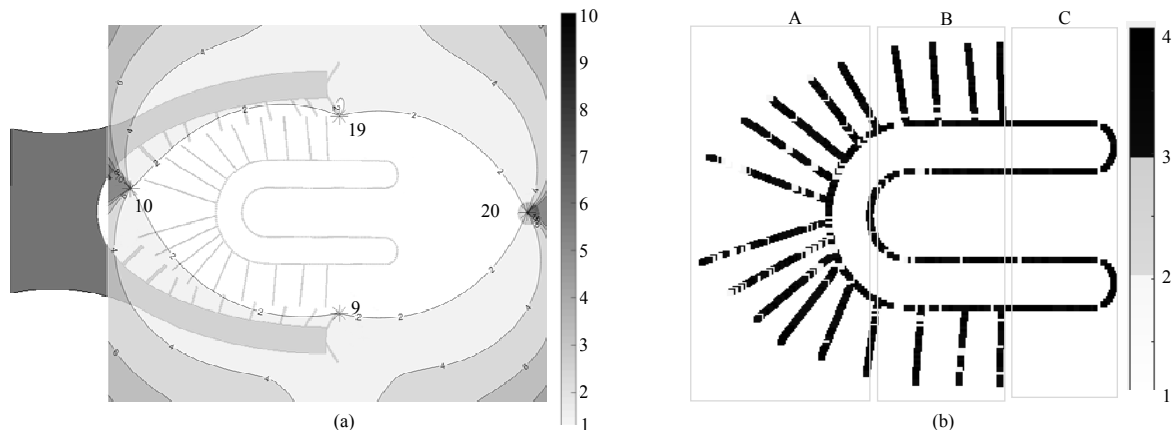


Fig.5 Distribution of GDOP of diamond (a) and target detection rate (b)
图 5 菱形 GDOP 分布(a)和目标检测率分布(b)

3.2 提升最佳接收站组合效率

使用遍历法选择接收状态良好的站点,在 20 个站点中选择 4 个接收状态良好的站点进行组合,需遍历 4845 种组合才能选出系统检测率最高的布站方式。当增加一个站点,遍历组合则增加到 15 504 种。遍历和遗传算法(GA)的计算成本见图 6。显然,随着站点数的增加,减少计算成本是必需的,因此本文采用遗传算法^[13-14]降低计算复杂度,其计算流程为:

1) 初始化:对可能的接收站位置进行实数编码,随机生成 N 个初始种群;设置最大迭代次数、收敛条件和初始种群最佳适应度函数;

2) 适应度计算:根据 1.3 节的数量统计模型计算接收站组合系统检测率,系统检测率和 GDOP 决定适应度函数,与 1)中最佳适应度函数进行比较,保留适应度更高的种群作为最优种群;

3) 是否满足收敛条件或达到最大迭代次数,若满足,停止循环;否则,进行遗传操作;

4) 遗传操作:选择操作选用轮盘赌注;设置系统交叉概率为单个站点检测率进行交叉操作;为避免陷入局部最优、陷入早熟,对每个站点都进行随机变异操作判断;

5) 再一次计算适应度函数,与最优种群进行比较,保留适应度更高的种群,返回流程 3)。

3.3 增加接收站数量进行目标检测

随着接收站点数量的增加,能利用的冗余信息增多,目标信号被其中任一接收站检测的概率增加,单个站点目标检测率增加,将接收状态良好的站点组合,系统检测率即可得到提升。在文中所示站坪区域,接收站点数量不同时系统检测率见表 3。基于常用的目标检测法,系统检测率达到 99.9%时,需要接收站数量为 12 个,此时的硬件成本以及硬件误差都会增加。而在使用改进目标检测法检测目标信号时,只需使用 9 个接收站,系统检测率即可达到 100%,满足民航总局发布的能计算出目标位置的概率不小于 99.9%的性能要求。

表 3 接收站数量变化时的系统检测率

receiving station numbers	number of targets detected without improvement	system detection rate without improvement/%	number of targets detected with improvement	system detection rate with improvement/%
4	647	60.3	931	86.77
5	844	78.66	1 004	93.57
6	944	88.98	1 047	97.58
7	1 010	94.13	1 063	99.07
8	1 041	97.02	1 071	99.81
9	1 059	98.7	1 073	100
10	1 069	99.63	-	-
11	1 071	99.81	-	-
12	1 073	100	-	-

4 结论

针对复杂电磁环境下目标信号检测率低的问题,本文首先分析了 S 模式信号时域波形特点,基于常用的目标检测法,提出增加信号下降沿判决的检测法;通过建立三维机场电磁环境,利用改进目标检测法分析仿真得到的 S 模式信号,验证了改进方法提升单个站点检测率的有效性;最后利用遗传算法组合接收状态良好的站点,在满足 GDOP 小于 2,保证覆盖率的前提下,使用 9 个接收站时即可达到民航总局提出的性能要求,与常用的目标检测法相比节约了 3 个站点。本文为不同机场站坪区域的定位性能提升提供参考。

参考文献:

- [1] NAGANAWA J, MIYAZAKI H, TAJIMA H. Localization accuracy model incorporating signal detection performance for wide area multilateration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(4):1957-1971.

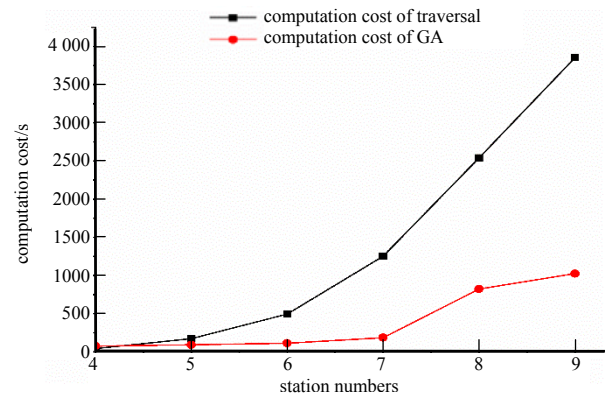


Fig.6 Computation cost of traversal and GA

图 6 遍历和遗传算法的计算成本

- [2] HONDA J,KAKUBARI Y,KOGA T. DOP simulation considering LOS/NLOS for aircraft positioning on airport surface[C]// 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar(APSAR). Singapore:IEEE, 2015:773-776.
- [3] HONDA J,KAKUBARI Y,OTSUYAMA T. Estimation of 1090 MHz signal environment on airport surface by using multilateration system[C]// 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium(ACES). Denver,CO,USA:IEEE, 2018:1-2.
- [4] LIN Yunsong,PENG Liangfu. A position self-calibration method in multilateration[C]// 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service(CPGPS). Harbin,China:IEEE, 2017:101-107.
- [5] BERNHART S,LEITGEB E,HOFBAUER G A,et al. Rising edge detection used as TOA estimator for mode S signals with multipath propagation[C]// 25th International Conference on Software. Split,Croatia:IEEE, 2017:1-6.
- [6] XU Zili,HE Donglin,LI Jing,et al. Correction method for TOA measurement of target signal based on Kalman filter[C]// 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology,Electronic and Automation Control Conference(IAEAC). Chongqing, China:IEEE, 2017:230-235.
- [7] 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):486-489. (WANG Hong,LIU Changzhong,WANG Xuegang,et al. Methods to detect mode S preamble[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010,39(4):486-489.)
- [8] ADITYA S,MOLISCH A F,BEHAIRY H M. A survey on the impact of multipath on wideband Time-Of-Arrival-based localization[J]. Proceedings of the IEEE, 2018,106(7):1183-1203.
- [9] 宫峰勋,张万红,马艳秋. 基于二次判决的差分匹配滤波器时间戳估计[J]. 中国民航大学学报, 2018,36(1):11-14. (GONG Fengxun,ZHANG Wanhong,MA Yanqiu. Timestamp estimation of differential matching filter based on quadratic decision[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018,36(1):11-14.)
- [10] BERNHART S,LEITGEB E H,FEICHTER G A. Rising edge detection used as TOA estimator for mode S signals with multipath propagation[C]// 2017 25th International Conference on Software,Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Split,Croatia:IEEE, 2017:1-6.
- [11] NIJSURE Y A,KADDOUM G,GAGNON G,et al. Adaptive air-to-ground secure communication system based on ADS-B and wide-area multilateration[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016,65(5):3150-3165.
- [12] 姜官男,华伟,郭建华,等. 一种利用定向天线改善多点定位系统检测率的方法[J]. 电讯技术, 2019,59(7):817-822. (JIANG Guannan,HUA Wei,GUO Jianhua,et al. A method for improving detection rate of multilateration system by directional antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2019,59(7):817-822.)
- [13] 王小磊,罗喜伶. 基于遗传算法的机场场面目标冲突解脱方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):304-308. (WANG Xiaolei,LUO Xiling. Conflict resolution in airport surface based on genetic algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):304-308.)
- [14] 逯志宇,王大鸣,王建辉,等. 基于多种群并行遗传算法的融合定位[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):195-200. (LU Zhiyu,WANG Daming,WANG Jianhui,et al. Fusion location based on parallel genetic algorithm of multi-population[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):195-200.)