

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108327

# 基于外辐射源的多基一次雷达在低空布局研究<sup>\*</sup>

程 擎 胡苗苗 史晓红 范 满  
(中国民用航空飞行学院 广汉 618307)

**摘 要:** 在我国空管安全监视中,对于监视精度的把控至关重要。近年来“低慢小”飞行器引起的航空不安全事件逐渐增多,增加了空域监视的难度。为了加强对于空域的有序管理,提高对于“低慢小”航空器的监视需求,提出了一种采用外辐射源作为发射端,只建立接收站的监视方式,通过对接收站进行合理的布局,对低空空域的“低慢小”飞行器进行监控使监视精度满足机场起落航线附近的监视要求。通过对 HDOP 进行推导得到精度因子作为评价该监视方式能否达到监视精度的指标,并对不同数目、接收站故障和接收站不同高度下的情况进行仿真,仿真结果表明,4 个地面站在不同情况下的精度均小于推导的 HDOP,证明该监视方式可以满足民航对于机场附近低空空域监视精度的需要。

**关键词:** 外辐射源;多基一次雷达;定位精度;水平精度因子

**中图分类号:** TN95   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Research on low-altitude layout of multi-base primary radar based on external radiation source

Cheng Qing Hu Miaomiao Shi Xiaohong Fan Man  
(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** In my country's air traffic control security surveillance, the control of surveillance accuracy is very important. In recent years, aviation unsafe incidents caused by "low, slow and small" aircraft have gradually increased, increasing the difficulty of airspace surveillance. In order to strengthen the orderly management of the airspace and increase the monitoring requirements for "low, slow and small" aircraft, a monitoring method is proposed that uses an external radiation source as the transmitter and only establishes a receiving station. The monitoring of "low, slow and small" aircraft in low-altitude airspace enables the monitoring accuracy to meet the monitoring requirements near the airport's take-off and landing route. By deriving the HDOP, the precision factor is obtained as an index to evaluate whether the monitoring method can achieve the monitoring accuracy, and the simulation results are carried out for different numbers of receiving stations, failures of receiving stations and different heights of receiving stations. The accuracy in all cases is less than the derived HDOP, which proves that this monitoring method can meet the needs of civil aviation for the monitoring accuracy of low-altitude airspace near the airport.

**Keywords:** external radiation source; multi-base primary radar; positioning accuracy; HDOP

## 0 引 言

低空空域的逐渐开放,无人机使用范围扩大,无人机进入低空融合空域开展多样性的任务成为目前发展的趋势<sup>[1]</sup>。低空、慢速、小型飞行器的数量在过去几年里有了很大地增加,被广泛应用于航拍、娱乐、军事等领域,它们在带来产业升级的同时,也带来了安全隐患,这些“低慢小”飞行器被滥用于实施反社会、不安全甚至犯罪行为,对公共安全

和空中监视构成严重威胁<sup>[2]</sup>。尤其是“低慢小”无人机飞入机场起落航线附近,与正常的起降航空器发生冲突,导致正常航班停飞,甚至导致严重的航空事故<sup>[3]</sup>。在这种情况下,加强对“低慢小”飞行器的监控,保证空域的运行安全是新检测和跟踪挑战<sup>[4-5]</sup>。对“低慢小”无人机的探测是对无人机进行精准反制的前提和关键环节,这个环节探测缺失或薄弱,没办法实现对“低慢小”无人机的精确打击<sup>[6]</sup>。传统

收稿日期:2021-11-13

<sup>\*</sup> 基金项目:中国民用航空局安全能力建设项目(0241928/0242014/0242101)、中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项(D202103)资助

的一二次雷达探测方法似乎是一种有效的方法,为实际应用带来了希望,然而,传统雷达很难满足连续传输的要求,因为无停止射频辐射可能会引起辐射健康问题<sup>[7]</sup>。此外,另一个不容忽视的问题是连续运行发射机的高成本。广播式自动相关监视系统(ADS-B)具有其局限性,该技术通过全球导航卫星系统实现目标定位,它不能够对目标位置进行验证而且缺少对关键数据的加密与认证。而且这些监视方式对于“低慢小”目标的检测会出现检测遗漏。

外辐射源雷达是传统雷达探测的一种潜在的替代方案,它利用现有的电视信号或者广播信号作为机会的发射机。首先,电视信号信号频带宽,抗干扰能力强,发射功率很强,足以检测无人机,信号是全方位辐射,便于低空目标检测。其次,信号是免费的,不需要额外的发射机,成本低。Liu 等<sup>[8]</sup>采用数字电视的无源双基地雷达并成功地检测和跟踪了滥用的无人机。说明该雷达系统对低空无人机空中交通管理具有实用性和发展前景。刘玉春<sup>[9]</sup>对窄带外辐射源信号的无源雷达在三维空间的成像方法进行分析,并在分时转动模型的基础上提出了 OMP 算法,通过仿真实验证明该算法成像系统的效果很好。龚道银等<sup>[10]</sup>充分利用 FM 信号建立多发单收的外辐射源雷达,并把短时傅里叶变换的频谱认知技术应用在上面,通过实验进行验证,可以提升对于目标检测的性能。万显荣<sup>[11]</sup>针对使用数字电视信号的外辐射源雷达对无人机的微多普勒效应进行了研究。程擎<sup>[12]</sup>通过采用多发多收的多基一次监视雷达模型来进行布局,并验证了布局模型能满足精度要求。代言君<sup>[13]</sup>采用多发多收的多基一次雷达监视结构,并对不同布局下的几何精度因子进行研究,仿真证明间隔布局下更优。

本文提出的一种在外辐射源的基础上通过建立多个一次雷达的地面接收站的监视方式,并对接受站的数量,故障等情况进行实验分析,并通过实验证明监视精度可以达到对“低慢小”目标进行有效的监视,作为现有监视方式的一种很好的补充。

### 1 模型建立

基于电视台的外辐射源雷达定位技术采用数字电视信号做辐射源,利用目标回波信号及雷达照射源直达波信号获得时间差、目标方向角等测量值,来实现待检测目标的空间坐标位置<sup>[14]</sup>。利用现有的电视台作为发射端在广汉机场附近建立接收站获得目标的位置信息。通过对距离进行测量能够得到多个椭圆,而得到的这些椭圆的交点就是目标的位置,当有 3 个接收站时,目标的位置如图 1 所示。

采用到达时间(TOA)定位,通过测量信号从发射站到每一个接收站的时间来进行距离的测量,建立方程组,得到目标的位置。假设发射站的坐标是  $T_i(x_i, y_i, z_i)$ , 接收站的坐标是  $R_j(x_j, y_j, z_j), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ , 需要进行测量的目标的位置为  $X(x, y, z)$ 。  $R_{ii}$  代表第  $i$  个发射站到目标的距离。  $R_{ij}$  代表第  $j$  发射站到目标的距离。

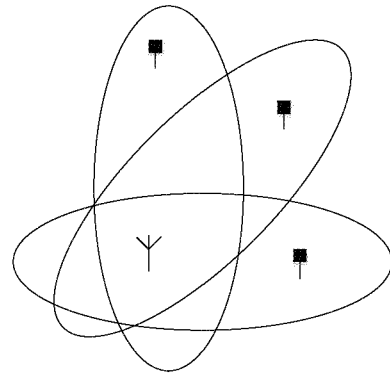


图 1 定位方式

$\rho_{ij}$  是其距离和。列出方程组:

$$\begin{cases} R_{ii} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \\ R_{ij} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} \\ \rho_{ij} = R_{ii} + R_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

设  $f_{i,j}(x, y, z) = R_{ii} + R_{ij}$ , 发射站和接收站的距离测量矩阵:

$$\mathbf{F}(x, y, z) = \begin{bmatrix} f_{1,1}(x, y, z) \\ f_{1,2}(x, y, z) \\ \vdots \\ f_{1,j}(x, y, z) \\ f_{2,1}(x, y, z) \\ f_{2,2}(x, y, z) \\ \vdots \\ f_{i,j}(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用最小二乘线性估计法对  $\mathbf{F}$  进行估计,得到雅克比矩阵  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{H} = \left( \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)_{\mathbf{X} = \mathbf{X}_{est}} \quad (3)$$

得到定位误差协方差矩阵是:

$$\mathbf{R} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

几何精度因子 PDOP:

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_r} \quad (6)$$

根据式(5)推导得到雷达的位置误差是:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{r_{1,1}^2 + r_{2,2}^2 + r_{3,3}^2} = \sigma_r * PDOP \quad (7)$$

根据式(7)可以看出雷达的定位精度和距离测量误差

$\sigma_r = \sqrt{\left( \frac{c}{2 * B * k * \sqrt{2SNR}} \right)^2 + \sigma_{f_{loss}}^2}$  和位置几何精度因子 PDOP 有关。

式(7)中距离测量误差是:

$$\sigma_r = \sqrt{\left(\frac{c}{2 * B * k * \sqrt{2SNR}}\right)^2 + \sigma_{floor}^2} \quad (8)$$

式中:  $c$  表示光速,  $B$  表示信号带宽,  $k$  表示相关处理系数,  $SNR$  表示信噪比,  $\sigma_{floor}$  是地面站误差。根据文献[15]中对于距离测量误差  $\sigma_r$  经典的取值为:  $B=1$  MHz,  $k=1$ ,  $SNR=7$  dB,  $\sigma_{floor}=30$ , 可以计算得到  $\sigma_r=54.45$  m。

同理, 水平方向的定位精度为:

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{r_{1.1}^2 + r_{2.2}^2} = \sigma_r * HDOP \quad (9)$$

根据式(9)可以看出, 基于外辐射源的多基一次雷达的位置误差与距离测量误差  $\sigma_r$  和水平精度因子 HDOP 有关。

## 2 接收站布局

### 2.1 精度要求分析

根据无人机的性能进行分析, “低慢小”航空器最大起飞重量小于 25 kg、飞行时速小于 180 km、雷达反射面积小于  $2 \text{ m}^2$ , 如图 2 所示。当积累时间在 1 s 时, 外辐射源的分辨能力最好<sup>[15]</sup>。根据性能指标分析, 纵向测距误差为 50 m, 根据“低慢小”目标的雷达反射截面积小于  $2 \text{ m}^2$  进行分析, 横向测量距离误差为 1.6 m, 根据横纵测量距离误差求得  $\sigma_H=50.03$  m, 根据式(9)计算得到 HDOP 为 0.9 则满足对于“低慢小”目标的监视, 下面对与接收站布局的精度讨论将以此作为标准。

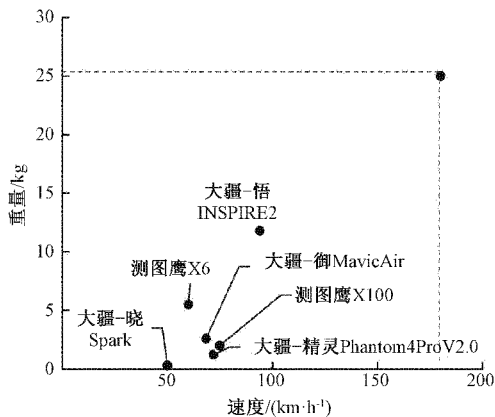


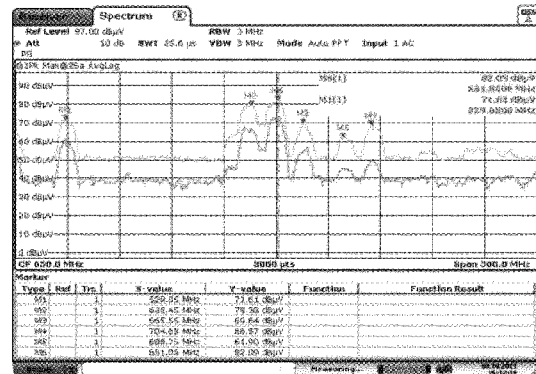
图 2 “低慢小”无人机性能

### 2.2 实验仿真

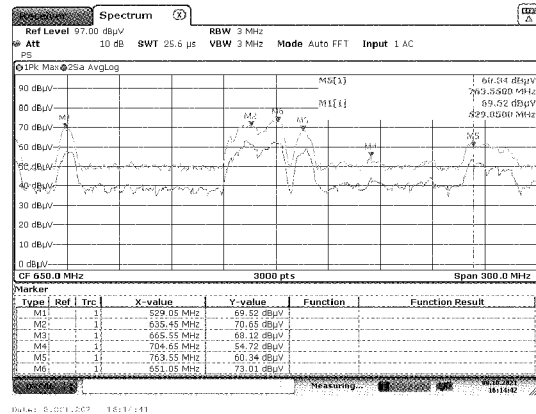
#### 1) 接收站数量不同时

外辐射源现在常用的是地面广播、电视信号等实现对于目标探测定位<sup>[16]</sup>。对于外辐射源信号的使用主要有数字地面电视信号(DVB-T/DTTB/CMMB)、数字地面音频广播信号(DAB/DRM)、移动通信信(CDMA/GSM)等<sup>[17]</sup>。将电视台作为外辐射源, 电视台的数字电视地面广播信(DVB-T)频率在 470~862 MHz, 信号的距离分辨率和速度分辨率好, 信号强度高, 覆盖面广, 采用该信号作为发射信号可以覆盖到广汉机场。一次雷达探测距离远, 精度高, 且多基一次雷达去做接收站达截面 RCS 增加, 大大提高了

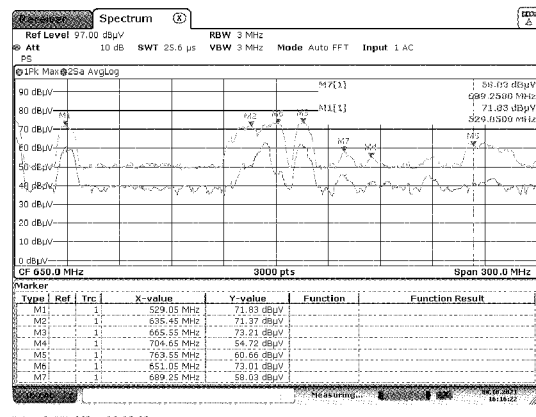
目标检测的概率。如下是对于广汉机场周围可用的外辐射源情况广汉、德阳、成都方向的电视台的进行频谱分析, 如图 3 所示。图 3 实验结果证明频谱起伏较大的地方, 它们的信号较强, 可以用来作为发射端的信号。从整体情况分析, M2、M6 周围信号起伏较大, 可以证明这两个信号可以用作发射信号, 经过调查 635 MHz 左右为广汉电视台的频率, 并且距离广汉机场较近, 因此我们选取广汉电视台作为发射端。从地形方面看, 电视台到机场这段范围的地形平坦, 如图 4 所示, 平均海拔约 470 m, 没有复杂障碍物遮



(a) 广汉电视台方向



(b) 德阳电视台方向



(c) 成都电视台方向

图 3 电台频率测量

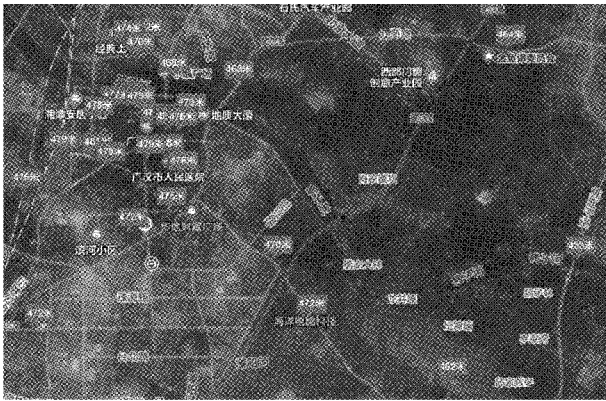


图 4 广汉地形图

挡,不会出现信号遮蔽。因此选取了距离较近的广汉电视台作为发射端,在广汉机场附近建立接收站,对“低慢小”目标进行准确监控,从而减少对飞机正常运行的影响。

广汉机场坐标为 E104. 337837 N30. 952057,广汉广播电视台的坐标为 E104. 290294 N30. 996419。可知电视台距离机场约 7 km。考虑在机场附近无人机对飞机起落时的影响,选择监控范围 5 km×5 km 的仿真区域。根据式(1)可以推导,至少需要 3 组数据才可以顺利测出目标的位置,即除电视台外还需要 3 个接收站点才能定位唯一的一点。以广汉机场为例,选取广汉广播电视台作为发射端,对不同布局下的水平精度因子进行仿真分析。假设接收站数量为 3 个时,电视广播站的位置为(-7, 0),接收站的位置分别是(2.5, 0)、(-1.25, -2.2)、(-1.25, 2.2)。发射端与接收端的相对位置如图 5 所示。根据 HDOP 理论,利用 MATLAB 仿真的 HDOP 图如图 6 所示,在仿真区域内,只要 HDOP<0.9 就可以满足监视需求,由仿真结果可以看

出,HDOP 的数值最小是 0.57,最大值是 0.65 符合要求。

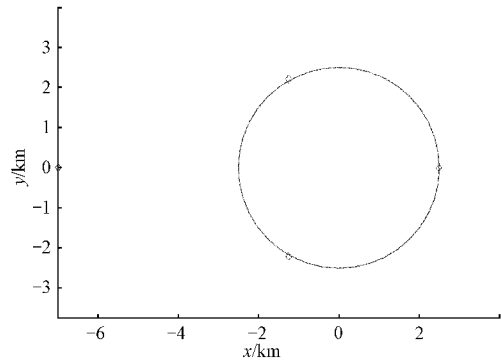


图 5 3 个接收站布局

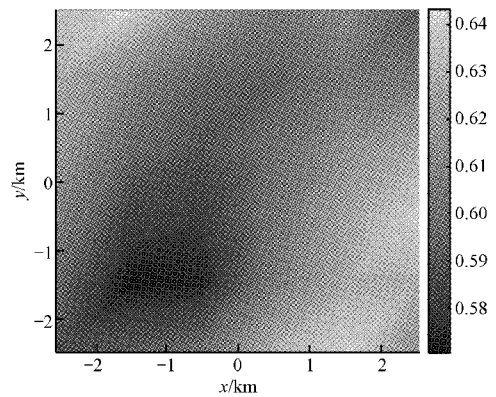


图 6 3 个接收站 HDOP 分布

当接收站数量逐渐增加时,接收站为 4、5 和 6 个时,发射站和接收站的相对位置如表 1 所示,不同接收站数量的 HDOP 分布如图 7 所示。

表 1 基站相对位置

接收站数量	外辐射源	接收站 1	接收站 2	接收站 3	接收站 4	接收站 5	接收站 6
4	(-7, 0)	(2.5, 0)	(-2.5, 0)	(0, -2.5)	(0, 2.5)		
5	(-7, 0)	(2.5, 0)	(-2.4, 0.8)	(2.4, 0.8)	(-1.5, -2)	(1.5, -2)	
6	(-7, 0)	(2.5, 0)	(0, 2.5)	(1.25, 2.2)	(1.25, -2.2)	(-1.25, 2.2)	(-1.25, -2.2)

从图 7 中可以得到,4 个接收站布局的 HDOP 范围约为 0.56~0.72,5 个接收站布局的 HDOP 范围为 0.56~0.72,6 个接收站布局的 HDOP 范围为 0.55~0.75。通过对 4、5、6 个接收站相比,4、5 和 6 个接收站时的精度都较好,满足 HDOP 的需求,但是 5 个接收站时精度较分散,结合接收站的水平精度和建设维护成本考虑,在满足精度的条件下,选取 4 个地面接收站建立。

2)接收站发生故障

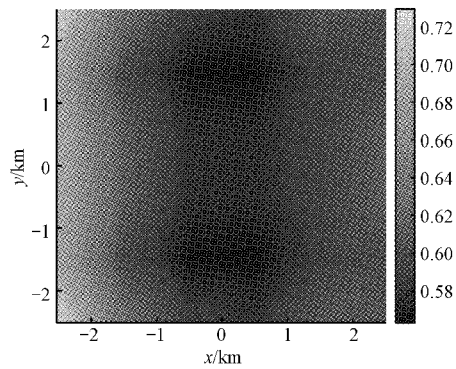
当 4 个接收站其中一个接收站发生故障时,HDOP 的变化情况如图 8 所示,范围约为 0.54~0.7,仍满足机场区域对“低慢小”航空器的监视需求。

3)接收站高度不同

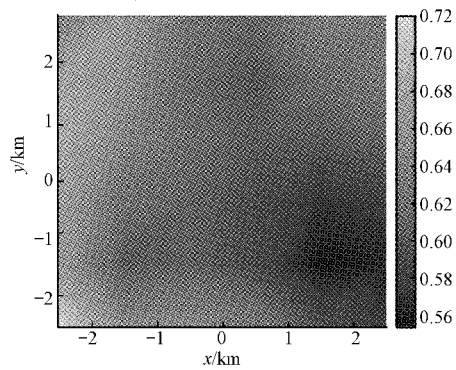
当 4 个接收站点不在同一个高度时,HDOP 的分布如图 9 所示。有一个被抬高 1 km 后,区域的 HDOP 变化范围最小值为 0.55,最大值为 0.75。接收站点被抬高后 HDOP 仍然满足监视要求,但是在抬高的站点附近 HDOP 的变化范围较大,接收站的高度不一样会对 HDOP 的稳定性有不利的影响。当 HDOP 的数值较大时,可以通过对接收站点位置高度进行调整来增加监视的精度。

4)三维精度分析

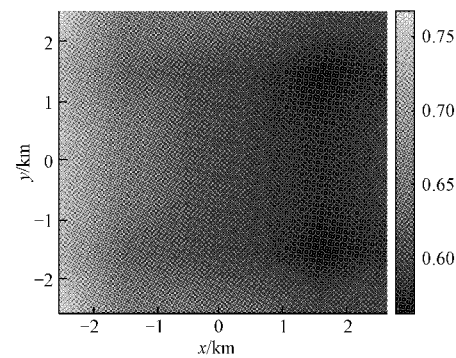
在水平方向的精度满足要求,还要考虑在三维空间精度是否满足要求。“低慢小”航空器的飞行高度受到法律



(a) 4接收站HDOP分布



(b) 5接收站HDOP分布



(c) 6接收站布局及HDOP分布

图 7 接收站 HDOP 分布

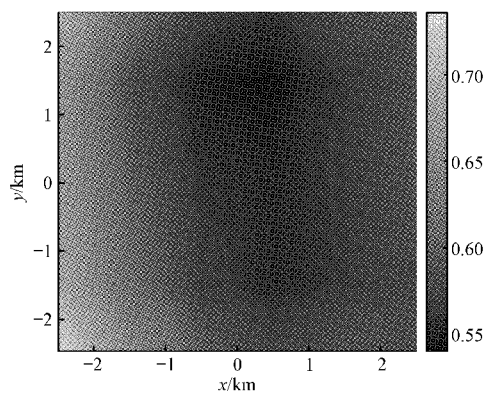


图 8 接收站发生故障时 HDOP

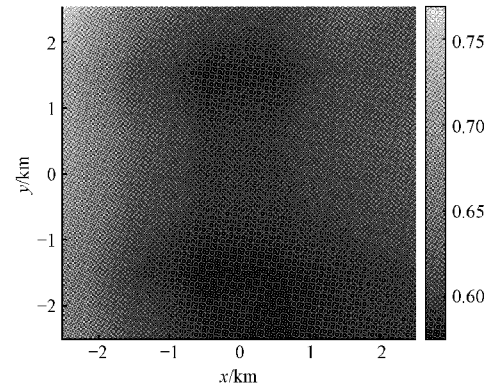
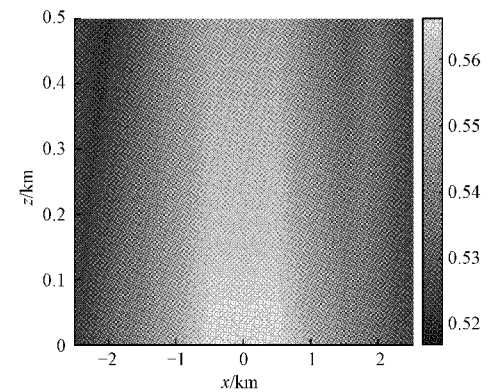
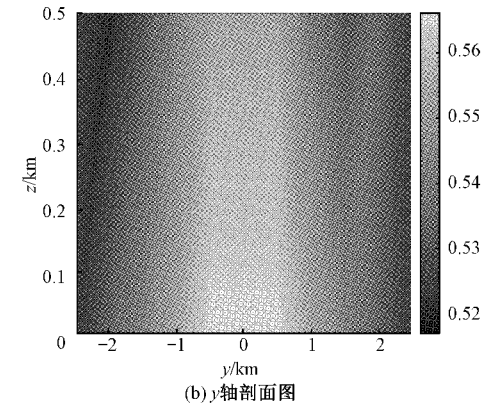


图 9 接收站高度不同时 HDOP

的制约和执行任务的限制,高度通常不会超过 500 m,在此选取区域  $5 \times 5 \times 0.5$  的范围进行仿真,在 4 个接收站的情况下,三维仿真结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,纵轴的剖面图 HDOP 最大值为 0.57,横轴的剖面图 HDOP 最大值 0.57,满足三维监视需求。



(a) x轴剖面图



(b) y轴剖面图

图 10 三维 HDOP 分析

### 3 结 论

本文对基于外辐射源的多基一次雷达布局对区域的 HDOP 进行研究,通过在不同的数目、接收站故障和高度不同时对 HDOP 进行仿真,并结合经济型和性能进行分析,结果表明当接收站数量为 4 个时最优且都能够满足机

场起落航线附近区域的监视需求,且在三维空间也满足要求。本文提出的基于外辐射源的多基一次雷达的监视方式,利用电视广播站作为发射端,可以作为现有雷达监视手段的很好的补充,对空域实施监视,保证空域的安全有序的运行。此外接收站时的布局数量的选取和布局的方式具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 张宏宏,甘旭升,李双峰,等. 复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1):257-266.
- [2] RITCHIE M, FIORANELLI F, BORRION H. Micro UAV crime prevention: Can we help Princess Leia? [M]. Crime Prevention in the 21st Century, Springer, Cham, 2017: 359-376.
- [3] 屈旭涛,庄东晔,谢海斌. “低慢小”无人机探测方法[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(2):128-135.
- [4] KRÁTKÝ M, FUXA L. Mini UAVs detection by radar [C]. International Conference on Military Technologies(ICMT) 2015, IEEE, 2015: 1-5.
- [5] HARMANNY R I A, DE WIT J J M, CABIC G P. Radar micro-doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram [C]. 2014 11th European Radar Conference, IEEE, 2014: 165-168.
- [6] 张静,张科,王靖宇,等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1):1-8, 34.
- [7] DROZDOWICZ J, WIELGO M, SAMCZYNSKI P, et al. 35 GHz FMCW drone detection system [C]. 2016 17th International Radar Symposium (IRS), IEEE, 2016: 1-4.
- [8] LIU Y, WAN X, TANG H, et al. Digital television based passive bistatic radar system for drone detection[C]. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), IEEE, 2017: 1493-1497.
- [9] 刘玉春. 窄带无源雷达 OMP 三维成像算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7):131-138.
- [10] 龚道银,王峰,周易. 基于波形认知的调频广播外辐射源雷达技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(11):23-27.
- [11] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 109-123.
- [12] 程擎. 多基一次监视雷达在空管中的精度分析与仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10):98-101.
- [13] 代言君. 民航多基一次监视雷达部署研究[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院, 2017.
- [14] 万显荣,易建新,程丰,等. 单频网分布式外辐射源雷达技术[J]. 雷达学报, 2014, 3(6):623-631.
- [15] 余顺春. 数字电视外辐射源雷达弱目标检测方法研究[D]. 陕西:西安电子科技大学, 2020.
- [16] 李航,杨峰,金威. 外辐射源雷达制导系统性能分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(13):19-22.
- [17] 钟利冬,卢琨,陈绪元. 基于外辐射源的高频天波雷达信号分析与选择[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 126-130.

### 作者简介

程擎, 硕士, 教授, 主要研究方向为通信导航监视等。

E-mail: deglechq@163.com

胡苗苗, 研究生, 主要研究方向为通信导航监视等。

E-mail: 1761424935@qq.com

史晓红, 博士, 副教授, 主要研究方向为有机半导体材料。

E-mail: 874683433@qq.com

范满, 研究生, 主要研究方向为通信导航监视、图像识别等。

E-mail: 1412900482@qq.com