

无源雷达系统探测与定位能力分析

黄仁全¹, 李为民², 王春阳¹, 董雯³

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学训练部, 陕西西安, 710051;
3. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西宝鸡, 721002)

摘要 针对无源雷达系统探测空域,研究了无源雷达系统单站探测远界与低界模型,并建立了组网探测空间模型。针对无源雷达系统定位能力,分析了三维空间时差定位方法,及三维空间时差定位精度。以机载电子干扰系统为探测目标,通过定量方法分别对无源雷达系统探测及定位能力进行了仿真分析。仿真分析表明:研究的相关方法与结论,对明确未来无源雷达系统需求、指导无源雷达系统的部署与使用等方面具有意义。

关键词 无源雷达系统;探测与定位能力;时差;定位精度几何稀释

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.006

中图分类号 TN925 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0025-05

Research on the Detecting and Locating Capability of the Passive Radar System

HUANG Ren-quan¹, LI Wei-min², WANG Chun-yang¹, DONG Wen²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Department of Training, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Baoji Oilfield Machinery Co. LTD, Baoji 721002, Shaanxi, China)

Abstract: As to the detecting area, the single station detecting far range and low range model is proposed, and the detecting space of the network radar is studied based on that. As to the locating capability, a 3-D space time-difference-of-arrival (TDOA) position system is introduced, and the geometric dilution of precision of the system is analyzed. Taking the jamming aircraft as the typical target of passive radar, the detecting and the locating ability of the passive radar is simulated and analyzed separately by quantitative method. The referred methods above and the conclusions are meaningful to ascertaining the future requirement and the deployment and the application of the passive radar system.

Key words: passive radar system; detecting and locating ability; time difference of arrival; geometric dilution of precision (GDOP)

现代电子战中,雷达的生存能力和工作能力面临严重挑战,降低雷达辐射信号被敌方截获的概率是目前雷达设计首要考虑因素之一,从这个意义上说,无源雷达的出现和发展也就成了必然^[1]。无源探测定位系统本身不发射电磁波,只接收目标辐射

(反射)的电磁波来获得目标信息。由于无源雷达本身并不辐射电磁波,因此利用无源探测定位系统对辐射目标进行探测与定位,具有作用距离远、隐蔽性强、可靠性高以及不易被对方发现等优点^[2]。

收稿日期:2012-06-21

基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目(9140XXXXX110)

作者简介:黄仁全(1983-),男,湖南郴州人,博士生,主要从事防空作战建模与仿真研究。
E-mail:huangrenquan@126.com

1 无源雷达系统探测空域分析

单站无源雷达系统的探测空域应该包括远界、高界、低界、方位角、高低角等,但是难以保证的主要是其远界和低界。

1.1 单站探测远界

当无源雷达探测信号来自目标自身辐射电磁信号时,无源雷达的距离方程可以表示为^[3]:

$$R_{\max} = \left(\frac{P_i G_i G_r \lambda^2 (S_{PG})}{(4\pi)^2 (S/N) P_{\min} L} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: P_i 为辐射源的脉冲功率; G_i 为辐射源天线平均旁瓣增益; G_r 为被动站接收天线增益; λ 为工作波长; S_{PG} 为被动站信号处理增益; S/N 为工作信噪比; L 为各种损耗之积; P_{\min} 为被动站接收机极限灵敏度; $P_{\min} = kTB_r N_r$, k 为波尔兹曼常数; T 为接收机等效温度,290 K; B_r 为接收机带宽; N_r 为接收机噪声系数。

1.2 单站探测低界

作为目标探测系统,无源雷达系统为满足各种应用要求,其探测低界应该低于其它功能系统对低界的需求,如武器系统杀伤区低界。考虑到大气折射后,雷达的低界与可视距离的关系为:

$$R = 130(\sqrt{H_r} + \sqrt{H_t}) \quad (2)$$

式中: R 为雷达可视距离; H_r 为雷达天线架高; $\sqrt{H_t}$ 为目标高度,即雷达低界。

1.3 组网探测空间

在实际应用中,单站无源雷达难以对目标进行定位,通常需要多站组网。假设每个接收站都可以接收目标辐射信号,此时系统可以看成由 N (N 为接收站的个数)个接收单元构成,其探测空间方程为^[4-5]:

$$D_P = \sum_{i=1}^N \frac{P_i G_i G_r \lambda^2 (S_{PG})_i}{(4\pi)^2 kTB_r N_r R_i L_i} \quad (3)$$

式中: D_P 为无源模式的检测因子,定义为检测目标信号所需的最小输出信噪比; G_r 为第 i 个被动站接收天线增益; B_r 为第 i 个被动站接收机带宽; N_r 为第 i 个被动站接收机噪声系数; L_i 为第 i 个被动站各种损耗之积(含大气衰减、极化损耗、波束对不准损耗等)。

2 无源雷达系统定位能力分析

2.1 三维空间时差定位方法

在三维空间中,至少需要4站才能对目标进行定位。假设定位系统由1个主站和3个辅站构成,

各站的空间位置为 $(x_i, y_i, z_i)^T, i=0,1,2,3$ 。其中 $i=0$ 表示主站, $i=1,2,3$ 表示辅站。目标的空间位置为 $(x, y, z)^T, r_i$ 表示目标与第 i 站之间的距离, Δr_i 表示目标到第 i 站与目标到主站之间的距离差,用方程表示为^[6-7]:

$$\begin{cases} r_0 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \\ r_i = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 \\ \Delta r_i = r_i - r_0, i=1,2,3 \end{cases} \quad (4)$$

对上式整理化简得:

$$(x_0 - x_i)x + (y_0 - y_i)y + (z_0 - z_i)z = k_i + r_0 \Delta r_i \quad (5)$$

式中 $k_i = \frac{1}{2}[\Delta r_i^2 + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) - (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)]$,
 $i=1,2,3$ 。

由式(5)表示的3个方程构成了一个非线性方程组,可采用解析法解此方程组^[7]。

2.2 三维空间时差定位精度

根据误差理论,可以对目标的时差测量定位公式求微分来获得严格推导时差测量系统的各种误差对目标定位精度的影响。对 $\Delta r_i = r_i - r_0$ 两边求微分,并化简得^[8]:

$$d(\Delta r_i) = (c_{ix} - c_{0x})dx + (c_{iy} - c_{0y})dy + (c_{iz} - c_{0z})dz + (k_0 - k_i) \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

式中: $c_{ix} = (x-x_i)/r_i$; $k_j = c_{ix}dx_j + c_{iy}dy_j + c_{iz}dz_j$,
 $j=0,1,2,3$ 。

在4站定位系统中,可得目标与站址位置相关

的系数矩阵为: $C = \begin{bmatrix} c_{1x} - c_{0x} & c_{1y} - c_{0y} & c_{1z} - c_{0z} \\ c_{2x} - c_{0x} & c_{2y} - c_{0y} & c_{2z} - c_{0z} \\ c_{3x} - c_{0x} & c_{3y} - c_{0y} & c_{3z} - c_{0z} \end{bmatrix}$ 。

令: $d\mathbf{X}_i = [k_0 - k_1, k_0 - k_2, k_0 - k_3]^T$, $d\mathbf{X} = [dx \quad dy \quad dz]^T$ 以及 $d\mathbf{V} = [d(\Delta r_1), d(\Delta r_2), d(\Delta r_3)]^T$, 则可得定位误差方程的矩阵形式为: $d\mathbf{V} = C d\mathbf{X} + d\mathbf{X}_i$, 进一步求得辐射源定位误差的估计值: $d\hat{\mathbf{X}} = (C^T C)^{-1} C^T (d\mathbf{V} - d\mathbf{X}_i)$ 。令: $(C^T C)^{-1} C^T = \mathbf{B} = [b_{ij}]_{3 \times 3}$, 并设测得误差经系统修正后是零均值的, 且站址误差各元素之间及各站址误差之间互不相关, 则可得定位误差协方差为:

$$P_{d\hat{\mathbf{X}}} = E \{ d\hat{\mathbf{X}} d\hat{\mathbf{X}}^T \} = \mathbf{B} \{ E [d\mathbf{V} d\mathbf{V}^T] + E \{ d\mathbf{X}_i d\mathbf{X}_i^T \} \} \mathbf{B}^T \quad (7)$$

因此可以进一步推导出三维时差定位的定位精度^[9]:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (b_{1i} b_{1j} + b_{2i} b_{2j} + b_{3i} b_{3j}) \sigma_{ij} \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{ij} = \begin{cases} \sigma_{\Delta r_i}^2 + 2\sigma_i^2 & , (i=j) \\ \eta_{ij} \sigma_{\Delta r_i} \sigma_{\Delta r_j} + \sigma_i^2 & , (i \neq j) \end{cases}, (i, j=1, 2, 3)$;

$\sigma_{\Delta r_i}^2$ 为第 i 站与主站之间距离差测量误差的标准差;
 η_{ij} 为 Δr_i 与 Δr_j 之间的相关系数。

3 仿真分析

3.1 探测能力仿真

通过上述分析,可根据式(1)研究无源雷达系统对空中目标的探测能力。依据国外无源雷达探测系统相关介绍,假设某型无源雷达系统相关性能参数为: $G_r = 10 \text{ dB}$, $S/N = 15 \text{ dB}$, $S_{PG} = 0 \text{ dB}$, $L = 10 \text{ dB}$, $P_{\min} = -103.46 \text{ dBW}$, $H_r = 25 \text{ m}$ 。因此,求得 $B_r N = 1.13 \times 10^{10} (1/s)$, 假设接收机噪声系数 $N = 10 \text{ dB}$, 因此接收机带宽 B_r 不超过 1.13 GHz 。

根据目前机载干扰吊舱目标特性分析,其加载吊舱功率一般为 kW 级别,频率覆盖范围为 $0.064 \sim 20 \text{ GHz}$ 。在此分别选则 200 MHz (VHF)、 3 GHz (S 波段)和 5 GHz (C 波段)3 种频率,作为机载电子干扰吊舱干扰上述目标的典型工作频率。针对上述 3 种不同的频率,假设其主瓣增益 G_r 分别为 10 dB 、 20 dB 和 25 dB , 探讨无源雷达系统对上述目标的探测能力。

3.1.1 吊舱功率 P_i 与最大距离 R_{\max}

当机载吊舱功率从 $0.5 \sim 5 \text{ kW}$ 变化时,假设进入无源雷达接收机的为目标主瓣增益(即分别为 10 dB 、 20 dB 和 25 dB),在不考虑地球曲率情况下,根据式(1)无源雷达系统对目标的探测能力见图 1。

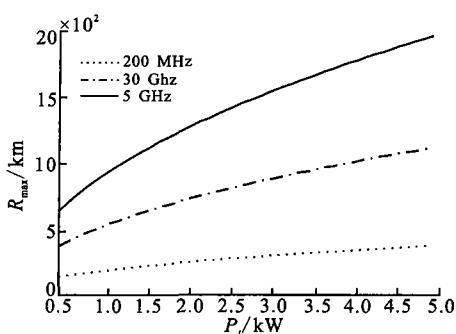


图 1 吊舱功率与最大探测距离关系

Fig. 1 The P_i and the R_{\max}

3.1.2 目标增益 G_r 与最大距离 R_{\max}

假设机载吊舱功率 P_i 分别取 1 kW 、 1.5 kW 和 2 kW , 增益分别从 $-5 \sim 25 \text{ dB}$ 变化时,无源雷达探测能力见图 2。由图 2 分析可知,随着增益的不断增大,无源雷达最大探测距离也不断增加。当波束增益 G_r 小于 0 dB 时,无源雷达发现目标能力有限。

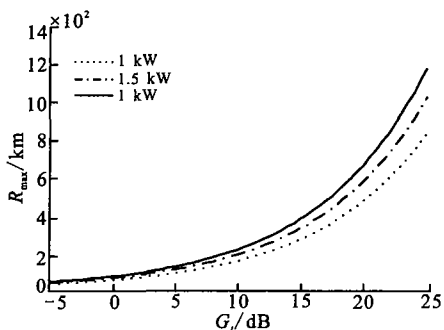


图 2 目标增益与最大探测距离关系

Fig. 2 The G_r and the R_{\max}

3.1.3 吊舱频率 f_i 与最大距离 R_{\max}

假设按功率 $P_i = 2 \text{ kW}$, 频率 $f_i = 5 \text{ GHz}$ 计算,其雷达最大探测距离 R_{\max} 为 1257 km , 即当机载吊舱工作频率 $f_i > 5 \text{ GHz}$ 时, $R_{\max} > 1257 \text{ km}$ 。机载电子干扰吊舱频率范围一般在 $0.060 \sim 20 \text{ GHz}$, 重点分析频率 $f_i < 5 \text{ GHz}$ 的情况,吊舱频率 f_i 与无源雷达最大距离 R_{\max} 之间的线性关系如图 3 所示。在同一机载吊舱中,随着工作频率的增加,无源雷达系统对目标的探测距离不断增加。

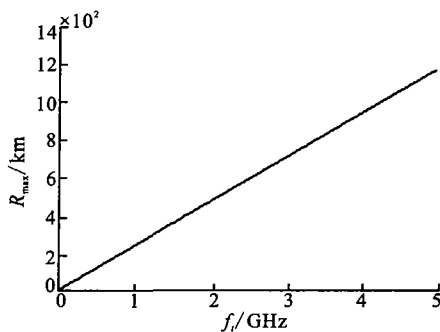


图 3 吊舱频率与最大探测距离关系

Fig. 3 The f_i and the R_{\max}

3.1.4 无源雷达探测低界 R

根据式(2),无源雷达探测低界 R 与雷达天线架高 H_r 和目标飞行高度 H_i 具有密切联系,图 4 为天线架高 $H_r = 25 \text{ m}$, 目标飞行高度 $H_i \in [0.1, 10] \text{ km}$ 时,探测低界 R 变化曲线。

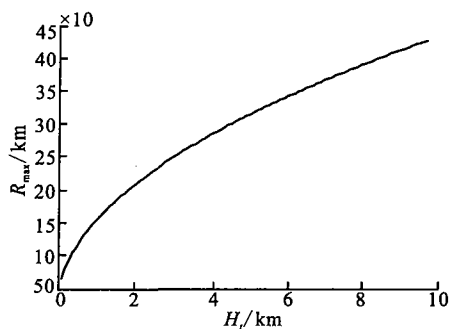


图 4 目标飞行高度与无源雷达探测低界关系

Fig. 4 The H_i and the R

3.1.5 无源雷达组网探测空间

若 4 站 3 时差定位系统采用 Y 型布站,其主站、辅站布站如下: $R_0=(0,0,0)$ km、 $R_1=(30,0,0)$ km、 $R_2=(0,30,0)$ km 和 $R_3=(-21.2,-21.2,0)$ km,基线长为 30 km。取机载干扰吊舱功率 P_i 为 2 kW,工作频率 f_i 为 5 GHz,无源雷达探测到的目标天线增益为 15 dB,则根据式(1)和式(3)可计算得到无源雷达系统对目标的探测距离 $R_{max}=397.6$ km,其探测空域见图 5~6。

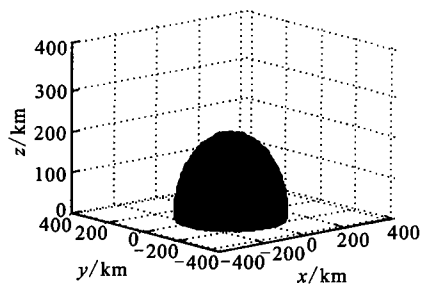


图 5 无源雷达探测空间范围

Fig. 5 The detecting space of the network rada

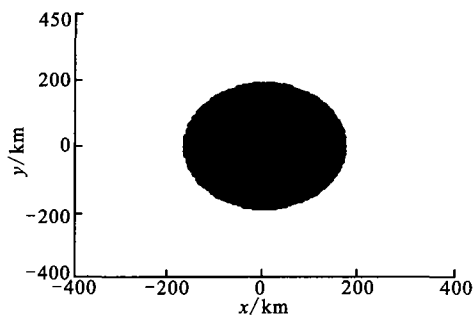


图 6 目标高度为 10 km 时探测空域截面

Fig. 6 The section at the altitude 10 km

3.2 定位能力仿真

无源时差系统的定位精度受到目标和该系统的相对几何关系制约,尤其受到各接收站之间的构形制约。在上述仿真布站情况下,假设站址误差为 1 m,时差测量误差的标准差为 20 ns;目标高度为 10 km,目标位置: x 方向 ± 400 km, y 方向 ± 400 km。

在上述标准 Y 型布站情况下,无源雷达组网后 GDOP 的仿真结果见图 7。当延长某一布站基线 $R_3=(-40,-40,0)$ km 时仿真结果见图 8。通过图 7 和图 8 对比分析,适当增加某一方向的基线长度时,定位精度其基线反方向和其它基线方向有较大提高,而在其它基线的反方向定位精度变化不大。

影响定位精度的关键因素之一是站址误差,当站址误差为 10 m 时,其 GDOP 仿真结果见图 9。图 10 是站址误差分别为 1 m、5 m 和 10 m 时,在 X 轴 ($y=0$) 方向上的定位精度随距离变化曲线。

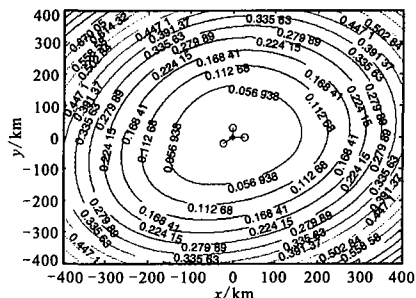


图 7 标准 Y 型布站 GDOP

Fig. 7 The GDOP of Y deployment

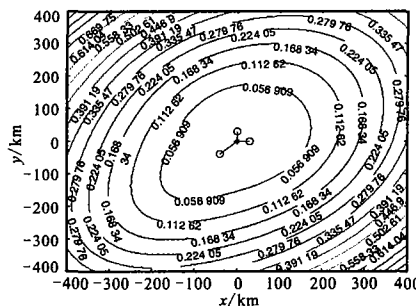


图 8 Y 型布站延长基线 GDOP

Fig. 8 The GDOP of extending the Y deployment base-line

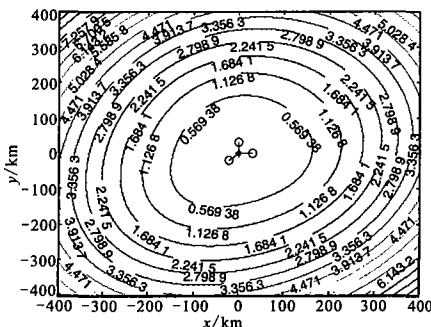


图 9 选址误差为 10 m 的 GDOP

Fig. 9 The GDOP of address error is 10 m

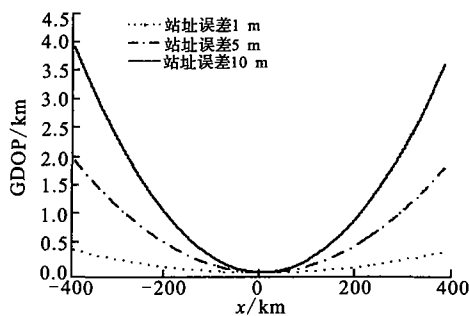


图 10 选址误差与 X 方向 GDOP

Fig. 10 The X axis GDOP of address error

影响定位精度的另一关键因素是时差测量误差标准差,当时差测量误差标准差为 50 ns 时,其 GDOP 仿真结果见图 11。图 12 是时差测量误差标准差分别为 20 ns、30 ns 和 50 ns 时,在 X 轴方向上的定位精度随距离变化曲线。

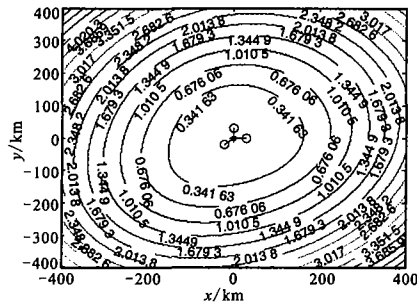


图 11 时差测量误差标准差 50 ns 的 GDOP

Fig. 11 The GDOP of time standard deviation is 50 ns

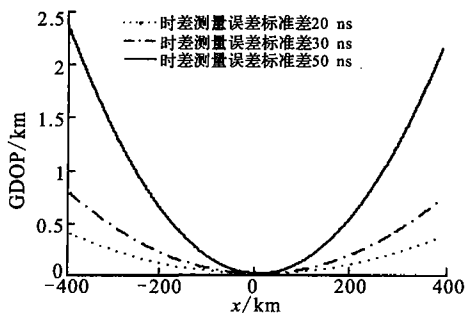


图 12 时差测量误差标准差与 X 方向 GDOP

Fig. 12 The X axis GDOP of time standard deviation

4 结语

无源雷达系统能对多种空中辐射源进行接收和信号参数测量,对空中目标辐射源进行监视和侦察,获取情报,进而还能引导杀伤武器对威胁目标进行攻击。因此,无源雷达系统将在信息化战争尤其是防空作战中具有广泛的用途,将有源和无源雷达技术紧密结合,必将大幅提高防空体系电子战能力。

参考文献(References):

- [1] 单洪春. 无源探测雷达发展初探[J]. 航天电子对抗, 2003(3): 22-25.
SHAN Hongchun. The passive radar detection development [J]. Aerospace electric warfare, 2003(3): 22-25. (in Chinese)
- [2] Poisel Richard A. Electronic warfare target location methods[M]. New York: Artech house, 2005.
- [3] 顾尔顺. 被动探测技术在防空导弹体系中的作用及其实现方法[C]//防空导弹体系论文集. 北京: 现代防御技术编辑部, 2003: 235-279.

GU Ershun. The passive detection technology used in air defence missile system and the achieving methods [C]//The air defence missile system. Beijing: Modern defence technology editorial department, 2003: 235-279. (in Chinese)

- [4] Mellen G, Pachter M, Raquet J. Closed-form solution for determining emitter location using time difference of arrival measurement[J]. IEEE transactions on aerospace and electric system, 2003, 39(3): 1056-1058.
- [5] 姜秋喜. 网络雷达对抗系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
JIANG Qiuxi. The network radar counterwork theory [M]. Beijing: National defense industry press, 2010. (in Chinese)
- [6] Zong hua, Xiao Yuqin, Zhou Yiyu, et al. Single observer passive location and tracking algorithms using frequency and spatial measurements [J]. Systems engineering and electronics, 2004, 26(5): 613-616.
- [7] 黄剑伟. 无源定位技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2009.
HUANG Jianwei. Study on passive location technology[D]. Xi'an: Xidian university, 2009. (in Chinese)
- [8] 张航瑜. 无源定位跟踪技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
ZANG Hangyu. Study on passive location tracking technology[D]. Xi'an: Xidian university, 2011. (in Chinese)
- [9] Ho K C, W Xu. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurement[J]. IEEE transactions on signal processing, 2004, 52(9): 2453-2463.

本刊相关链接文献:

- [1] 田海林, 冯存前, 章捷, 等. MIMO 雷达多目标角度估计的空间平滑改进算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(2): 39-41.
- [2] 毛艺帆, 王睿, 张金成. 基于空天信息的异类传感器模糊航迹关联算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(5): 35-37.

(编辑: 田新华)