

# 基于动态 RCS 模型的天波雷达发现概率计算方法

贾 晶, 盛 文, 卢 雷, 刘诗华

(空军预警学院,湖北武汉,430019)

**摘要** 针对现有方法影响因素考虑不全导致计算结果与实际情况有较大偏差的问题,提出了一种改进的天波雷达飞机目标发现概率计算方法。归纳了不同电离层状态对天波雷达探测距离的影响。考虑目标在给定航路飞行过程中的雷达截面积随姿态变化,建立了目标动态雷达截面积计算模型。在此基础上,利用瞬时发现概率模型和综合发现概率模型求得天波雷达飞机目标发现概率。实例计算结果表明:电离层 Es 全遮蔽状态导致目标发现概率下降了 0.273,不同航路和飞行姿态条件下目标发现概率差异较大,最大差值达 0.253。

**关键词** 天波超视距雷达;发现概率;电离层状态;目标雷达截面积

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.06.006

**中图分类号** TN958.93 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)06-0028-04

## A Calculation Method of the Detection Probability for Sky-wave over the Horizon Radar Based on Dynamic RCS Model

JIA Jing, SHENG Wen, LU Lei, LIU Shi-hua

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** In view of the problem that in the existing methods some effect factors are ill considered which lead up to the calculation results deviating from the fact, an improved calculation method of detection probability of aircraft for sky-wave radar is put forward, and the impact of different ionosphere states on detection distance of sky-wave radar is concluded. Taking the variety of target RCS with gesture during flight through given track into account, a calculation model of target dynamic RCS is established. On this basis, the detection probability of aircraft for sky-wave radar can be gotten by using the models of instantaneous detection probability and the comprehensive detection probability. The results show that ionosphere state of Es blanket leads to a decrease in target detection probability by 0.273. And the values of target detection probability are in great difference under the conditions of the different tracks and gestures, and the maximal different value reaches to 0.253. The feasibility and the validity of the method are verified by using living examples.

**Key words:** sky-wave over-the-horizon radar; detection probability; ionosphere state; target RCS

天波雷达对飞机目标的发现概率是其作战效能 评估的核心指标。目前,微波视距雷达的目标发现

收稿日期:2014-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102168)

作者简介:贾 晶(1985-),男,四川南充人,博士生,主要从事雷达装备效能评估与作战运用研究.E-mail:lidingshan\_23@163.com

**引用格式:** 贾晶,盛文,卢雷,等. 基于动态 RCS 模型的天波雷达发现概率计算方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(6):28-31. JIA Jing, SHENG Wen, LU Lei, et al. An calculation method of the detection probability for sky-wave over the horizon radar based on dynamic RCS model[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(6): 28-31.

概率计算方法已经比较成熟,主要分为实测数据法和理论公式法。实测数据法<sup>[1]</sup>精确度很高,但普适性和可重现性差。理论公式法可分为2类:一种是将目标雷达截面积(RCS)视为定值的静态法<sup>[2]</sup>,计算简便,但忽略了目标 RCS 起伏变化特性,计算结果存在较大误差;另一种是动态法<sup>[3-4]</sup>,通过实时解算给定飞行航路上目标的姿态角,再结合目标 RCS 模型,计算出变动的目标 RCS 值,克服了静态法的缺点。但是,针对天波雷达的发现概率计算方法研究却鲜有报道,直接应用传统方法并不适合。文献<sup>[5]</sup>中的方法基于静态法的计算思路,因而具有静态法类似的缺点,忽略了电离层不规则变化的影响,导致计算结果难以反映实际情况。本文提出了一种改进的天波雷达飞机目标发现概率计算方法。

## 1 电离层状态对天波雷达探测距离的影响

天波雷达利用高频电磁波经过电离层折射下视探测传播机理和目标与地表面后向返回散射传播原理,实现地海面至“反射”电波处的电离层之间运动目标的探测<sup>[6]</sup>。电离层具有明显的时空变化特性,这导致天波雷达有时不能完全覆盖设计的1 000~3 000 km 距离范围。根据文献<sup>[7]</sup>和<sup>[8]</sup>,不同电离层状态对天波雷达探测距离的影响见表1。

表1 电离层状态对探测距离的影响

Tab.1 Impact of ionosphere state on detection distance

电离层状态	实际有效探测距离范围/km
正常电离层	1 000~3 000
Es 层全遮蔽	1 000~2 000
夜间临界频率较低	1 300~2 500
突然电离层骚扰	0
D 层吸收增大	1 000~1 800

## 2 天波雷达飞机目标发现概率计算

本文根据动态法计算思路,在给定电离层状态、某一飞行航路条件下,通过坐标变换实时的计算天波雷达对飞机的各次探测时刻的雷达-目标视线角,进而求得对应的目标动态 RCS 值;然后利用瞬时发现概率模型和综合发现概率模型计算出天波雷达对飞机目标的发现概率。

### 2.1 目标动态 RCS 计算

为了便于描述飞机目标与雷达视线之间的关系,定义参考坐标系见图1:①机体坐标系:以飞机质心为坐标原点  $O_T$ ,  $X_T$  轴平行于机身轴线指向前方,  $Z_T$

轴位于目标对称平面内,垂直于  $X_T$  轴指向上方,  $Y_T$  轴垂直于目标对称平面,其指向由右手法则确定;②浮动地面坐标系;坐标原点同上;  $O_f$ ,  $X_f$  指向东方,  $Y_f$  指向北方,  $Z_f$  沿当地铅垂线指向上方。

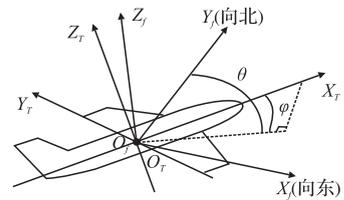


图1 机体坐标系和浮动地面坐标系

Fig.1 Airplane coordinate and floating ground coordinate

设某雷达探测时刻飞机在已知飞行航路中的地理坐标和运动矢量为  $(L_T, B_T, H_T, v, \theta, \varphi)$ , 其中  $L_T, B_T, H_T$  为飞机的经度、纬度和高度,  $v$  为飞行速度,  $\theta$  为飞行航向角,  $\varphi$  是飞行俯仰角。  $\theta$  为  $OX_T$  轴在  $O_f X_f Y_f$  平面的投影与  $O_f Y_f$  轴的夹角,  $\varphi$  为  $OX_T$  轴与  $O_f X_f Y_f$  平面的夹角, 天波雷达站的地理坐标为  $(L_R, B_R, H_R)$ 。为求解雷达-目标视线角, 首先根据雷达和目标的地理坐标, 运用大地问题解算公式求得反射点(即雷达射线路径中点)的地理坐标  $(L_{fs}, B_{fs}, H_{fs})$ , 其中  $H_{fs}$  为电离层距地面高度。再将飞机目标地理坐标变换到地心直角坐标:

$$\begin{cases} x_0 = (N + H_T) \cos B_T \cos L_T \\ y_0 = (N + H_T) \cos B_T \sin L_T \\ z_0 = [N(1 - e^2) + H_T] \sin B_T \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N$  为目标点的地球卯酉圈曲率半径;  $e$  为大地椭球第一偏心率。将反射点地理坐标代入式(1)也可得到其地心直角坐标  $(x_{fs}, y_{fs}, z_{fs})$ 。然后, 将反射点与目标点的地心直角坐标差值进行坐标变换, 求得反射点在机体坐标系中的坐标  $(x_j, y_j, z_j)$ :

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \mathbf{T}_R \begin{bmatrix} x_{fs} - x_0 \\ y_{fs} - y_0 \\ z_{fs} - z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{T}_R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \sin(-\theta) & 0 \\ -\sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-B_T) & \sin(-B_T) \\ 0 & -\sin(-B_T) & \cos(-B_T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos L_T & 0 & -\sin L_T \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin L_T & 0 & \cos L_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

最后, 利用三角公式将反射点在机体坐标系中的直角坐标变换为极坐标, 便可获得当前时刻反射点在机体坐标系中的方位角  $\theta_j$  和俯仰角  $\varphi_j$ , 这2个角度即为所求的雷达-目标视线角, 从而可求得目标相对雷达的径向速度:

$$v_r = \pm v \cos\theta_j \cos\varphi_j \quad (4)$$

然后再在利用全波三维电磁仿真软件 XFDTD 建立的目标全空域静态 RCS 数据中查找与其逐一对应的 RCS 值,即可解算出目标的动态 RCS 值。

## 2.2 瞬时发现概率计算模型

天波雷达在外噪声背景下检测飞机目标,回波信噪比方程为<sup>[9]</sup>:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{av}} G_t G_r \sigma_i \lambda^2 T_c}{(4\pi)^3 R_p^4 P_n L_s L_p} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{av}}$  为平均发射功率;  $G_t$  为发射天线增益;  $G_r$  为接收天线增益;  $\sigma_i$  为目标 RCS;  $\lambda$  为雷达工作波长;  $T_c$  为相干积累时间;  $R_p$  为雷达射线距离;  $P_n$  为外界噪声功率谱密度;  $L_s$  为雷达系统损耗;  $L_p$  为电离层吸收损耗。除目标 RCS 值外,其他参数的确定和解算方法见文献[7]。

雷达一次扫描判定目标存在的概率称为瞬时发现概率。假定飞机目标服从 Swerling-1 起伏模型,在给定虚警概率  $P_{fa}$  情况下目标的检测概率计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$P_{d0} = \begin{cases} e^{-V_T/(1+\text{SNR})}, n_p = 1 \\ 1 - \Gamma_1(V_T, n_p - 1) + (1 + 1/C), n_p < 1 \\ \Gamma_1(V_T/(1 + 1/C), n_p - 1) e^{-V_T/(1+C)}, n_p > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$C = n_p \text{SNR}$$

式中: SNR 为式(5)确定的输入信噪比值;  $n_p$  为非相干积累点数;  $\Gamma_1(\cdot)$  为不完全伽马函数,  $V_T$  为虚警概率决定的门限电压值,具体计算方法见文献[10]。针对天波雷达,将式(6)作为瞬时发现概率不够完整,还应考虑电离层不规则变化和径向速度的影响。当电离层处于非正常状态时,某时刻目标处于天波雷达设计威力范围内但不在电离层状态支持的探测距离范围,则认为此时目标不被发现,瞬时发现概率为 0; 当目标径向速度  $v_r$  为 0 时,天波雷达无法检测目标,则认为此时瞬时发现概率为 0。瞬时发现概率的完整表达式为:

$$P_d = \begin{cases} P_{d0}, & R_1 \leq R_p \leq R_2 \text{ 且 } v_r \neq 0 \\ 0, & R_p < R_1 \text{ 或 } R_p > R_2 \text{ 或 } v_r = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  为当前电离层状态支持天波雷达有效探测距离的上限和下限;  $R_p$  为天波雷达射线距离。

## 2.3 综合发现概率计算模型

当飞机目标按照某一航路在天波雷达威力范围内飞行时,天波雷达会多次扫描探测到该目标,而每次探测由于距离、方位、目标 RCS 的不同,瞬时发现概率也不相同。因而,瞬时发现概率不能反映天波雷达对飞机在整个飞行过程中的发现概率,必须综合起来考虑。针对平均计算具有无偏好的反映总体特征的特点,本文将各瞬时发现概率累加后的平均概率定义为综合发现概率,计算为:

$$P_D = \frac{\sum_{i=1}^M P_{di}}{M} \quad (8)$$

式中  $P_{di}$  为式(7)求得的雷达对目标第  $i$  次探测的瞬时发现概率,  $M$  为探测次数。此  $P_D$  值也就是给定条件下天波雷达的飞机目标发现概率。

## 3 实例计算

作战想定设定: 实战任务发生在 2011 年 6 月 10 日 10 时,天波雷达站地理位置为  $(L_R, B_R, H_R)$ ,参考文献[5],取探测能量为 110 dB,系统损耗  $L_s$  为 10 dB; 飞机目标为一架 F-15 战斗机,巡航速度 250 m/s,模拟的 3 条飞行航路见图 2,航路 1 飞机作匀速直线飞行,航路 2 飞机先匀速直线飞行再做水平转弯机动然后保持匀速直线飞行,航路 3 先爬升机动再匀速飞行然后做水平转弯机动,各条航路的采样时间间隔均为 5 s,总采样时长均为 1 000 s。按文献[7]解算可得到  $\lambda = 20$  m,  $P_n = -167$  dB/Hz,  $L_p = 26.76$  dB。

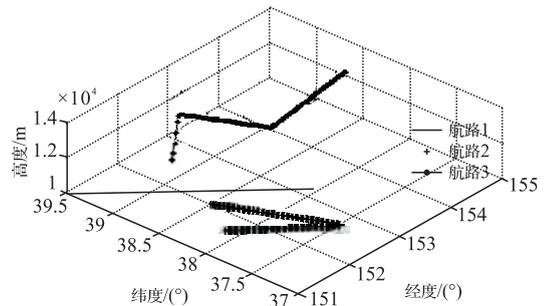


图 2 飞行航路图

Fig.2 Flying track picture

### 3.1 电离层状态对发现概率的影响

以航路 1 为例,飞机匀速直线飞行,在正常电离层状态和 Es 层全遮蔽状态下分别计算得到的目标发现概率为 0.775 和 0.502,对应的各采样时间的瞬时发现概率见图 3。

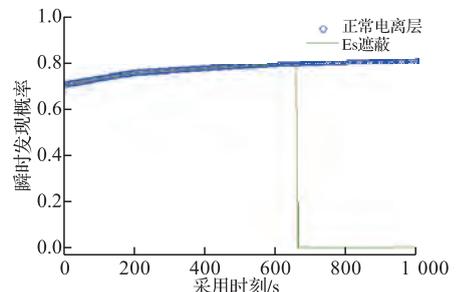


图 3 不同电离层状态下瞬时发现概率仿真结果  
Fig.3 Simulation result of instantaneous detection probability under different ionosphere state

可见,正常电离层状态时,天波雷达能对飞机整个飞行过程进行有效探测,目标发现概率较高;Es全遮蔽状态时,根据表1,此时电离层无法支持天波雷达探测2000 km以外的目标,因而从采样时刻660 s以后,目标的瞬时发现概率均为0,目标的发现概率显著降低。

### 3.2 目标 RCS 对发现概率的影响

设定电离层处于正常状态,计算得到航路1~3的目标发现概率分别为0.775、0.928和0.675。仿真得到的各航路瞬时发现概率见图4。可见,由于航路和飞机的姿态不同,目标的RCS起伏较大,如航路3在水平转弯机动时,算得RCS的最大值为27 dB,最小值为15 dB,变化值达12 dB。这导致各航路的瞬时发现概率在各采样时刻有较大起伏,各航路目标发现概率因而也差异较大。另外,若将各航路目标RCS作为固定值,取文献[7]中的25 dBsm,那么航路1~3计算得到的目标发现概率分别为0.968、0.9657和0.961,都大于本文的计算结果且差值较大,无法体现真实情况。因而,发现概率计算不能忽略目标RCS变化。

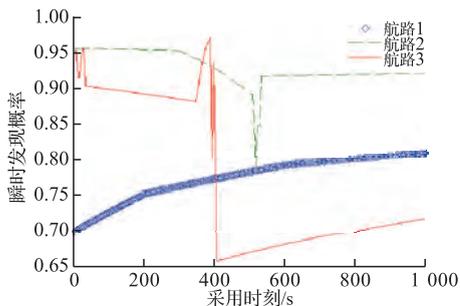


图4 各航路瞬时发现概率仿真结果

Fig.4 Simulation result of instantaneous detection probability for every track

## 4 结语

本文提出了一种改进的天波雷达飞机目标发现概率计算方法。建立了目标动态RCS计算模型,实现了飞行过程中目标RCS的动态计算,克服了传统方法中将目标RCS作为固定值带来的计算误差。归纳了各种电离层状态对天波雷达探测距离的影响,并将其作为瞬时发现概率计算的约束条件,有效避免了计算结果过于理想而不能反映实际情况。给出了信噪比、发现概率等计算模型和计算步骤,仿真计算验证了方法的可行性和有效性。该方法可用于有具体作战背景的天波雷达任务规划和作战效能评估,从而为指挥人员提供决策依据。

## 参考文献(References):

- [1] 熊兵,吴思励,周焰.一种改进的雷达探测概率计算方法[J].火力与指挥控制,2010,35(1):39-41,45.  
XIONG Bing, WU Sili, ZHOU Yan. An improved computation method of radar detection probability[J]. Fire control & command control, 2010,35(1):39-41,45.(in Chinese)
- [2] 孟慧军,袁修久.基于三维纹理的雷达探测概率直接体可视化[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(1):42-46.  
MENG Huijun, YUAN Xiujiu. Directive volume rendering of radar detection probability based on 3D texture[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition, 2012, 13(1):42-46.(in Chinese)
- [3] 王旭,宋笔锋,郭晓辉.飞行器被雷达发现概率的计算方法研究[J].系统工程理论与实践,2006,35(6):130-134.  
WANG Xu, SONG Bifeng, GUO Xiaohui. Research on the approach for calculating the probability of detecting an aircraft by radar system[J]. Systems engineering-theory & practice, 2006,35(6):130-134.(in Chinese)
- [4] 丰富宝,丁建江.雷达组网探测巡航导弹能力建模与仿真[J].火控雷达技术,2009,38(4):13-17.  
FENG Fubao, DING Jian jiang. Modeling and simulation of radar netting detectability for ccruise missiles[J]. Fire control radar technology, 2009,38(4):13-17.(in Chinese)
- [5] 司家才,焦培南.超视距雷达探测概率[J].电波科学学报,1992,7(1):38-43.  
SI Jiakai, JIAO Peinan. The over the horizon backscatter radar detection probability[J]. Chinese journal of radio science, 1992, 7(1):38-43.(in Chinese)
- [6] Michael Kolawole. Radar system peak detection and tracking [M]. Boston: Newnes, 2002.
- [7] 李宗强,柳文.低纬地区天波雷达系统时间可用度研究[J].电波科学学报,2002,17(3):264-268.  
LI Zongqiang, LIU Wen. Analysis of time availability of sky-wave over-the-horizon radar[J]. Chinese journal of radio science, 2002,17(3):264-268.(in Chinese)
- [8] LIU Bin-yi. HF over-the-horizon radar system performance analysis [R]. Monterey: Naval postgraduate school, 2007.
- [9] Merrill Skolnik. Radar handbook [M]. New York: McGraw-hill, 2008.
- [10] Mahafza R, Elsherbeni Z. MATLAB simulation for radar system design [M]. UK: CRC press, 2004.

(编辑:徐敏)