低重频 PD 雷达的临界散射截面计算方法

马东立 罗 勋 裴 旭

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出了低脉冲重复频率 PD(Pulse Doppler)雷达探测飞行器目标的临界散射截面的计算方法. 针对低重频 PD 雷达对目标的发现概率计算过程中所遇到的问题,采用临界仰角法处理雷达的未知参数,将之合并为雷达系统特征常数. 将低重频 PD 雷达的旁瓣杂波合理等效为白噪声,处理目标频移落在旁瓣杂波区的情况. 采用等效杂波散射截面积叠加旁瓣杂波中目标临界散射截面处理目标频移落在主瓣杂波区的问题,并考虑偏置相位中心天线(DPCA)技术对目标频移落在主瓣杂波中时临界散射截面的影响,使计算结果更合理,从而完善低脉冲重复频率 PD 雷达在全频域中临界散射截面的计算方法. 该方法可应用于计算目标突防时的发现概率. 最后以 E-2C 预警机为例计算某目标突防过程中的临界散射截面.

关 键 词: 临界散射截面; 低脉冲重复频率; 杂波; 偏置相位中心天线

中图分类号: V 218

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1011-04

Calculation method of critical radar cross section of low pulse repetition frequency PD radar

Ma Dongli Luo Xun Pei Xu

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A solution to the problem of calculation on critical radar cross section (RCS) of low pulse repetition frequency (LPRF) PD radar was given. The critical elevation method was adopted to deal with the unknown radar parameters, and combine those parameters into a radar character constant. When the target's signal located in sidelobe clutters area, the problem was dealt with by treating the sidelobe clutters of LPRF PD radar as noise. While the target's signal located in main beam clutters area, the problem was dealt with by adding the equivalent clutters RCS into the critical RCS of sidelobe, the displaced phased center antenna(DPCA) technology's effect on critical RCS was considered too. All of which complete the critical RCS calculating method in the whole spectrum of LPRF PD radar, and the method could be used to solve the problem on detection probability of target. At last, an example of E-2C detecting a target was given.

Key words: critical radar cross section; low pulse repetition frequency; clutters; displaced phased center antenna

在研究飞行器突防问题时,雷达对飞行器发现概率的计算很有意义. 文献[1]建立了在雷达仰视及俯视照射时飞行器隐身性能计算的临界仰角法,并建立了飞行器对雷达隐身性能计算系统. 可以将雷达方程中与传播路径无关的参数分离出来,归并成一个总的参数,成为雷达系统特征常数. 再利用雷达的作用距离和一般的传播情况计算出该常数的大小,这样就能简化雷达方程,利用少量雷达参数估算出雷达的探测性能.

但是文献[1]中的方法不适用于处理低脉冲重复频率 PD(Pulse Doppler)雷达对目标的发现概率的计算,因为高脉冲重复频率(HPRF, High Pulse Repetition Frequency)PD 雷达没有速度模糊,在频域上包含不被地面杂波覆盖的区域,即无

收稿日期: 2005-11-24

作者简介: 马东立(1966-), 男,山东郓城人, 教授, madonglibuaa@126.com.

杂波区,以及旁瓣杂波区(包含主瓣杂波和高度杂波).脉冲重复频率(PRF, Pulse Repetition Frequency)越大,无杂波区也越大;旁瓣杂波区相对较小,主瓣杂波所占谱宽更小,计算中一般将其忽略,这是合理的.而低脉冲重复频率(LPRF, Low Pulse Repetition Frequency)PD雷达则完全不同.由于脉冲重复频率较低,旁瓣杂波在频域上多重叠加,覆盖了整个频域,而主瓣杂波在频域上占据的谱宽也相对较大,功率也比较高,可能会遮挡目标的回波.所以在处理LPRF PD雷达在杂波中的距离性能时必须对主瓣杂波的影响加以考虑,而不能简单忽略.本文将着重解决这一问题并给出LPRF PD雷达在全频域中临界散射截面的计算方法.

1 无杂波区临界散射截面计算

临界散射截面 σ_{cr} 是指在某特定条件下雷达所能发现目标的最小RCS(Radar Cross Section),即目标RCS低于该值,雷达不能发现目标.

PD雷达当其主波束中心线在切地线上方时,可认为其在无杂波区检测,由文献[1]可得,此时的雷达作用距离方程为

$$R_{\max}^{(n)}=\left[\frac{P_{av}G^2\sigma\lambda^2F^4}{(4\pi)^3kT_sB_n(S/N)_{\min}L_sL_a}D_{av}\right]^{\frac{1}{4}} \tag{1}$$

式中,$R_{\max}^{(n)}$ 是白噪声背景下雷达最大作用距离,上标n代表白噪声背景;F 是方向图传播因子;L_a 为大气损耗因子.

由于军用雷达的许多参数未知,所以把上式中与雷达射线传播路径无关的参数分离出来,合并为一个参数 C_{s1},这是一个仅与雷达本身特性有关的参数,得

$$C_{s1}=\frac{P_{av}G^2\lambda^2}{(4\pi)^3kT_sB_n(S/N)_{\min}L_s}D_{av}$$

将 C_{s1} 代入式(1),得到

$$C_{s1}=\frac{\left(R_{\max}^{(n)}\right)}{\sigma\left(F^4/L_a\right)_{\max}}$$

于是

$$\sigma_{cr}^{(n)}=\frac{R^4L_a}{C_{s1}F^4} \tag{2}$$

$\sigma_{cr}^{(n)}$ 代表在无杂波区白噪声背景下目标的临界散射截面.

2 旁瓣杂波中的临界散射截面计算

当PD雷达的主波束中心线位于切地线以下时,雷达进入了杂波区检测目标.

由文献[2]知,旁瓣杂波在频域上多重叠加,效果在整个频域上是均匀分布的,而且个别的尖峰在滤波后不会存在,因此可以按白噪声的分布规律对待,实际上由文献[2]中的结论可知,在载机高度超过10 km,即使在 $\gamma=-10$ dB 的强地面散射区,旁瓣杂波基本上都低于接收机噪声,因此可以用处理白噪声的方法将白噪声与旁瓣杂波结合起来统一考虑.

由文献[1],下式为PD雷达在旁瓣杂波中的作用距离方程

$$R_{\max}^{(c+n)}=\left[\frac{P_{av}G^2\sigma\lambda^2F^4}{(4\pi)^3(C+kT_sB_n)(S/N)_{\min}L_sL_a}D_{av}\right]^{\frac{1}{4}} \tag{3}$$

式中,$R_{\max}^{(c+n)}$ 是旁瓣杂波与白噪声背景下雷达最大作用距离,上标c+n代表背景为旁瓣杂波与白噪声;C 为杂波功率,它与旁瓣杂波功率密度 $\bar{C}_{sl}$ 和带宽 B_n 成正比[3],即

$$C=\bar{C}_{sl}B_n$$

$$\bar{C}_{sl}=\frac{P_{av}\lambda^3\gamma\,\bar{T}_e^2\sin^2\psi}{2(4\pi)^3V_RH^2L_{sl}\tau T}G_{sl}^2\frac{\pi}{2}$$

与处理式(1)一样,将式(3)中的与雷达射线传播路径无关的参数分离出来,合并为雷达第二系统特征常数 C_{s2}

$$\bar{C}_{s2}=\frac{P_{av}\lambda^3\,\bar{T}_e^2}{2(4\pi)^3L_{sl}\tau T\cdot KT_sB_n}G_{sl}^2\frac{\pi}{2}$$

将上式代入式(2)中,得到

$$\sigma_{cr}^{(c+n)}=\frac{R^4L_a}{C_{sl}F^4}\left(1+\frac{C}{kT_sB_n}\right)=\frac{R^4L_a}{C_{sl}F^4}\left(1+\frac{C_{s2}\gamma\sin^2\psi}{V_R\,H_a^2}\right)$$

临界散射截面即为

$$\sigma_{cr}^{(c+n)}=\sigma_{cr}^{(n)}\left(1+\frac{C_{s2}\gamma\sin^2\psi}{V_R\,H_a^2}\right) \tag{4}$$

上式中 ψ 为雷达照射与目标信号有相同多普勒频移的地物杂波源的方向与载机速度矢量的夹角.

$\sin^2\psi$ 的取值为其积分平均值,即1/2,也就是认为杂波频谱密度分布是均匀的,只要信号强度相同,无论目标的频移落在旁瓣杂波频谱的哪个位置,其检测性能就相同.考虑到文献[2]中的结论,这个假设是合理的.因此

$$C_{s2}=\left(\frac{C_{sl}F^4\sigma}{\left(R_{\max}^{(c+n)}\right)^4L_a}-1\right)\frac{2V_R\,H_a^2}{\gamma}$$

式(4)即为

$$\sigma_{\mathrm{cr}}^{(\mathrm{c+n})}=\sigma_{\mathrm{cr}}^{(\mathrm{n})}\left(1+\frac{C_{s2}\gamma}{2V_{\mathrm{R}}H_{\mathrm{a}}^{2}}\right)\tag{5}$$

$\sigma_{\mathrm{cr}}^{(\mathrm{c+n})}$ 是在旁瓣杂波和纯噪声环境中的临界散射截面.

这样就按照处理无杂波区目标的方法来计算低重频 PD 雷达在旁瓣杂波区内检测目标时的 σ_{cr}.

3　主瓣杂波中的临界散射截面计算

3.1　主瓣杂波中临界散射截面的计算

由杂波功率,噪声功率以及雷达接收功率之间的关系,经一系列推导变形可得到在主瓣杂波中低重频雷达探测飞行器目标的临界散射截面的计算公式

$$\sigma_{\mathrm{cr}}^{(C+\mathrm{n})}=\sigma_{\mathrm{cr}}^{(\mathrm{n})}+\frac{\sigma_{\mathrm{c}}}{F^{4}}\left(\frac{S}{C+N}\right)_{\min}\tag{6}$$

式中,$\sigma_{\mathrm{cr}}^{(C+\mathrm{n})}$ 是在杂波和纯噪声环境中的临界散射截面;σ_{c} 为杂波散射截面,用下式计算[4]

$$\sigma_{\mathrm{c}}=\sigma^{o}A$$

其中 σ^{o} 为单位表面积上的杂波散射截面,称为杂波系数. σ^{o} 的取值可以参考一些已公布的曲线或表格,常用的简化模型可以参考文献[5]中的杂波模型.

A 为雷达波束所照射到的表面面积,即杂波源的面积. 杂波源的面积由下式给出[4]:

$$A=R(c\tau/2)\phi_{\mathrm{b}}\sec\psi\qquad(\psi<\psi_{1})$$

$$A=\frac{\pi R^{2}}{4}\phi_{\mathrm{b}}\theta_{\mathrm{b}}\csc\psi\qquad(\psi\geqslant\psi_{1})$$

ψ_{1} 由下式给出[4]:

$$\psi_{1}=\arctan\left(\frac{\pi R\theta_{\mathrm{b}}}{2c\tau}\right)$$

由文献[2]可知,对于 PD 雷达,归一化的主瓣杂波功率谱形为

$$S_{\mathrm{MLC}}(f_{\mathrm{c}})=\exp\{-1.385\cdot[(\lambda f_{\mathrm{c}}-2V_{\mathrm{a}}\cos\varphi\sin\theta)/(V_{\mathrm{a}}\cos\varphi\sin\theta\cdot\theta_{\mathrm{a}})]^{2}\}$$

式中,f_{c} 为单元杂波的多普勒频率;θ_{a} 为主瓣波束宽度;V_{a} 为载机速度;φ 为擦地角;θ 为方位角. $S_{\mathrm{MLC}}(f_{\mathrm{c}})$ 意义相当于主瓣杂波在频率 f_{c} 处功率与全频域上功率的比值.

由 RCS 定义可知,目标反射功率与其散射截面积成正比,所以杂波在频率 f_{c} 处的散射截面积为

$$\sigma_{\mathrm{c}}^{f}=S_{\mathrm{MLC}}(f_{\mathrm{c}})\cdot\sigma_{\mathrm{c}}$$

由于主瓣杂波的功率很大,而且对于低脉冲重复频率 PD 雷达来说,主瓣杂波有可能遮挡目标. 一般 PD 雷达都采用了一些杂波抑制技术,比较典型的有偏置相位中心天线(DPCA, Displaced Phased Center Antenna)技术等手段来减小杂波的影响,使得信杂比提高,信号即使落在主瓣杂波内雷达也有一定检测能力.

3.2　DPCA 技术的影响

DPCA 技术是一种传统的雷达杂波抑制技术,已经被现役机载雷达广泛采用. 它使得通过杂波对消器完全对消杂波成为可能. 但要注意的是,这个方法需要与 PRF、飞机速度、天线转速和视角精确同步.

由文献[6]可知,在最简单的二单元 DPCA 中,最佳抑制杂波条件是

$$H_{s,t}(f_{\mathrm{d}},\cos\psi)=1-\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\left(\frac{d}{\lambda}\cos\psi-f_{\mathrm{d}}T\right)}=0$$

其中

$$f_{\mathrm{d}}=\frac{2V_{\mathrm{a}}}{\lambda}\cos\theta\cos\psi$$

即

$$d=2V_{\mathrm{a}}T$$

当 DPCA 最佳抑制条件 $d=2V_{\mathrm{a}}T$ 不满足时,滤波器凹口线的斜率发生变化,不能有效滤除杂波. 因此杂波抑制性能对误差非常敏感,可以较好地滤除主杂波,但无法抑制旁瓣杂波.

考虑主瓣杂波影响时,由于 DPCA 最佳抑制条件十分苛刻,脉冲重复频率、载机速度等条件的变化都会导致最佳抑制杂波条件的不满足,可以根据 $2V_{\mathrm{a}}T$ 变化范围求出偏离最佳条件的一个区间,然后根据此偏差求出此时 DPCA 的对消比 e_{DPCA}.

由于目标 RCS 之比等于目标的回波功率之比,即

$$\frac{\hat{\sigma}_{\mathrm{c}}}{\sigma_{\mathrm{c}}^{f}}=\frac{\hat{P}}{P_{\mathrm{c}}^{f}}=e_{\mathrm{DPCA}}$$

可得 $\hat{\sigma}_{\mathrm{c}}=e_{\mathrm{DPCA}}\cdot\sigma_{\mathrm{c}}^{f}$

于是,对临界散射截面积的修正为

$$\sigma_{\mathrm{cr}}^{(C+\mathrm{n})}=\sigma_{\mathrm{cr}}^{(\mathrm{n})}+\frac{\hat{\sigma}_{\mathrm{c}}}{F^{4}}\left(\frac{S}{C+N}\right)_{\min}\tag{7}$$

3.3　目标信号检测性质的判断

低脉冲重复频率 PD 雷达探测目标时,由于双方的位置、飞行速度的大小和方向的影响,目标信号的频移可能落在旁瓣杂波加噪声区,也可能落在主瓣杂波区,这 2 个区的距离性能不同,所采用的处理方法也不同,这就要对目标频移的位置进行判断.

目标回波的频移设为 f_{t}[2]

$$f_{\mathrm{t}}=\frac{2V_{\mathrm{r}}}{\lambda}\cos\theta\cos\psi$$

主瓣杂波的展宽 ΔF_{dm} 是由于主瓣宽度内杂波速度分布产生的,可由下式确定[2]

$$F_{\mathrm{dm}} \in \left[\frac{2V_{\mathrm{a}}}{\lambda}\cos\psi\cos\left(\theta-\frac{\theta_{\mathrm{a}}}{2}\right),\ \frac{2V_{\mathrm{a}}}{\lambda}\cos\psi\cos\left(\theta+\frac{\theta_{\mathrm{a}}}{2}\right)\right]$$

如果目标频移 f_{t} 落在主瓣杂波的范围内,则采用在主瓣中检测的算法,如果不在主瓣杂波的范围中,则采用旁瓣杂波中的算法.

4 算 例

以 E-2C 预警机为例,其机载雷达 AN/APS 145 主要参数见表 1、表 2.

表 1 预警机参数

工作频率/MHz	脉冲重复频率/Hz	波束宽度/(°)	脉冲宽度/μs	天线转速/(r·min^{-1})	飞行高度/m	飞行速度/(km·h^{-1})
400	300	7×20	13	5	9 100	500

表 2 目标参数及海情

速度/*Ma*	高度/m	RCS/m^2	海情状况
0.6	50	10	3

σ° 目前没有统一的计算式,多从试验数据中由统计规律拟合出来,图 1 为 σ° 与擦地角的关系[5]. 由图可知,当飞行器由远而近飞行时,雷达主瓣擦地角也逐渐变大,杂波系数 σ° 也逐渐变大. 图中在擦地角约为 4°及 50°左右有明显转折,这是低擦地角区,平缓区和高擦地角区的分界点,各个区的 σ° 数值变化快慢不同所造成.

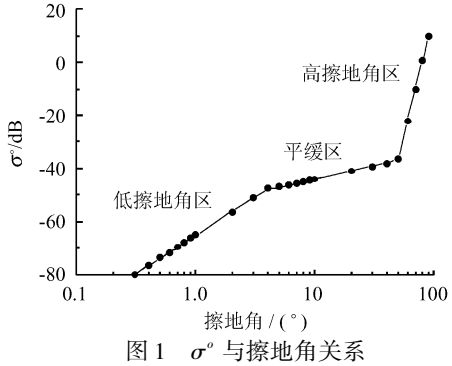


图 1 σ° 与擦地角关系

图 2 是目标信号落在旁瓣杂波区检测和落在主瓣杂波中检测的对比. 由图中可知,目标在旁瓣杂波区检测时,当擦地角逐渐变大,即目标向预警机逼近时,目标的临界散射截面逐渐变小;而当目标在主瓣中检测时,由式(7)可知,目标的临界散射截面与 σ°,A 及 e_{DPCA} 密切相关,在擦地角逐渐变大时,σ° 变大,A 变小,在擦地角约为 2°时,σ_{cr} 达到最小值,角度再增大时,式(7)中第二项比重明显增加,在 4°时由于 σ° 变的平缓 σ_{cr} 也开始平缓增加. 由图可知,主瓣杂波对目标临界散射截面在近距离时影响最大.

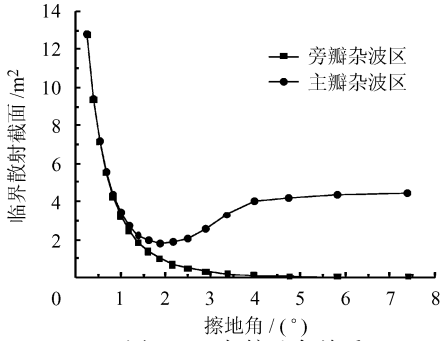


图 2 σ_{cr} 与擦地角关系

图 3 是同在主瓣杂波内检测,分别经 *DPCA* 消减与未消减处理的 σ_{cr}. 由图可知,在很远距离上(擦地角大于 2°时)目标临界散射截面已经非常大,也就是目标在主瓣中时根本不能被检测出来了,这是与实际相符的.

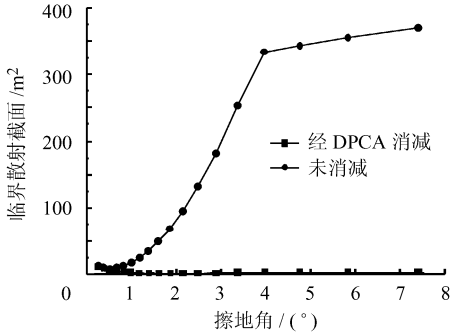


图 3 σ_{cr} 与擦地角的关系

5 结 束 语

在文献[1]的研究基础上,考虑偏置相位中心天线(DPCA)技术对目标频移落在主瓣杂波中时临界散射截面的影响,建立了低重频 PD 雷达探测目标的临界散射截面的计算方法. 计算结果表明 DPCA 技术对于低脉冲重复频率雷达探测效能影响巨大,是计算低脉冲重复频率雷达探测低空飞行器目标的发现概率中必须考虑的因素.

参考文献 (References)

[1] 张考,张云飞,马东立,等. 飞行器对雷达隐身性能计算与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1997:98-100
Zhang Kao, Zhang Yunfei, Ma Dongli. Aircraft RCS performance calculation and analysis against radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997:98-100(in Chinese)

(下转第 1050 页)