

文章编号:1004-9037(2014)04-0636-06

# 基于射频隐身的相控阵雷达搜索控制参量优化设计

张 杰<sup>1</sup> 汪 飞<sup>2</sup> 阮淑芬<sup>1</sup>

(1. 南京电子技术研究所, 南京, 210039; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

**摘要:**机载雷达射频隐身技术对提高飞行器生存能力具有重要意义。本文研究了机载相控阵雷达基于射频隐身的搜索控制参量优化设计。通过分析截获概率原理,给出了目标特征和雷达系统性能对驻留时间和波位间隔等搜索控制参量的影响关系,构建了目标探测性能与隐身性能约束下的优化模型。仿真获得了满足隐身要求下相控阵雷达的最优搜索控制参数。

**关键词:**射频隐身;搜索控制;目标特性;相控阵雷达

**中图分类号:**TN959

**文献标识码:**A

## Optimization Design for Search Control Parameter of Phased Array Radar Based on RF Stealth

Zhang Jie<sup>1</sup>, Wang Fei<sup>2</sup>, Ruan Shufen<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210039, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**Abstract:** RF stealth technology of airborne radar has important significance to improve the viability of the aircraft. The airborne phased search control parameter of array radar is designed. By analyzing the principle of intercept probability, the relationship between target characteristics and search performance of radar system are given, and the impact model of dwell time and beam position interval is constructed to optimize the performance under the constraints of target detection and stealth requirement. The search optimal control parameters are obtained for phased array radar to satisfy stealth requirements.

**Key words:** RF stealth; search control; target characteristic; phased array radar

## 引 言

随着现代军事科学技术的发展,特别是伴随着微电子技术和信号信息处理技术等相关学科的进步,与雷达有关的电子干扰与抗干扰已经成为了未来战场争夺的焦点之一,造成雷达的应用环境日益恶化,非常容易受到敌方侦察设备的侦察和随之而来的干扰,甚至是直接的攻击。基于针对战场各方面环境复杂化的现状,对机载雷达射频隐身能力提出了更为迫切的需求<sup>[1-3]</sup>。

作为新一代体制代表的相控阵雷达系统,不仅要有远的探测距离和高的灵敏度,而且还必须有射频隐身和强的抗干扰能力,在保障雷达基本探测性

能的前提下,有效增强雷达对抗敌方侦察干扰的能力,以取得在未来战场的主动权。为此,现代雷达设计中通常通过采取降低天线旁瓣、频率捷变、复杂的波形设计等措施降低雷达的可观察性,采用灵活的功率管理来提高雷达的射频隐身性能,从而提高雷达在战场环境下的反侦察能力和自身生存能力。

在侦收对抗领域通常采用截获概率表征雷达系统的射频隐身性能。截获概率越大则雷达信号被敌方利用的可能性越大。因此,在雷达作战使用过程中,降低雷达信号被截获的概率成为考虑的重要因素<sup>[3]</sup>。文献[4]从信道化接收机、超外差接收机和非相干匹配接收机等无源探测系统的工作特性出发,提出了雷达信号实现低截获概率(Low

probability of intercept, LPI) 的相关方法。文献[5]将雷达与电子对抗系统综合研究,分析了影响雷达 LPI 性能的各个因素。文献[6]提出了一种定量评价雷达 LPI 性能表征参量的方法,并对雷达如何实现 LPI 效果给出了途径与方法。

相控阵雷达采用电扫描体制,具备波束空间快速扫描以及波形快速捷变的能力等特点,使相控阵雷达可通过合理配置工作参数使系统工作性能达到最优<sup>[7-13]</sup>。与传统机械扫描雷达相比,相控阵雷达在实现雷达探测 LPI 效果上具备较大优势。

本文从目标探测性能与隐身性能约束下的目标探测最优化问题出发,通过分析搜索扫描的主要控制参数,包括驻留时间和波位间隔对搜索性能的影响,给出隐身性能约束下搜索参数的优化模型,通过对该优化模型的求解得出满足隐身要求下相控阵雷达的最优搜索控制状态。

## 1 截获概率原理

无源侦收系统要实现雷达信号的有效截获,必须在时域、空域、频域、能量以及极化方式等五维空间上同时与雷达信号匹配。其中,由于无源侦收系统要面对各种类型的辐射源,一般采用圆极化天线,这里认为极化上始终匹配或匹配损失有限。因此,截获概率是时、空、频、能量等多维变量的函数,可以表示为一个在多维空间中的几何概率问题,可以采用窗口函数模型描述,如图 1 所示。

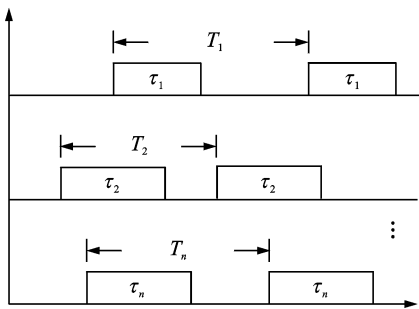


图 1 多域窗口重合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-domain window overlap

多域重合分析中将每一维截获转换为一个窗口函数  $(T_i, \tau_i)$ , 其中  $T_i$  为第  $i$  维截获的平均搜索周期,比如一定空域上的天线平均扫描周期等;  $\tau_i$  为第  $i$  维截获的平均窗口宽度,比如天线的平均照射驻留时间等。 $n$  为多维空间中的搜索维数,截获表现为某一时刻上  $n$  个窗口的重合,其统计概率可采用泊松分布来描述<sup>[3]</sup>

$$P(k; l) = \frac{l^k}{k!} \cdot e^{-l} \quad (1)$$

式中:  $l$  为试验的次数,  $k$  为截获次数。

截获概率是至少一次以上的截获发生的概率,即

$$P_i = 1 - P(0; l) = 1 - e^{-l} \quad (2)$$

其中,  $l$  可有如下近似

$$l = A_F \cdot D_1 \cdot \frac{\min(T_{OT}, T_1)}{T_1} \quad (3)$$

式中:  $A_F$  为天线波束的覆盖区域;  $D_1$  为每平方公里区域上的截获接收机密度。

辐射源波束照射截获接收机位置的概率可由雷达波束覆盖区域和每单位面积上的截获接收机密度的乘积来近似,有

$$A_F \cdot D_1 \quad (4)$$

式中:  $A_F$  为天线波束的覆盖区域面积;  $D_1$  为截获接收机密度。

当辐射源开机时,截获接收机判断辐射源位置的概率对应于  $T_{OT}$  或  $T_1$  两者取小,并由  $T_1$  归一化。通常,  $T_{OT}$  远小于  $T_1$ , 所以,该概率近似为由  $f_R$  归一化  $T_{OT}$ , 即

$$\frac{\min(T_{OT}, T_1)}{T_1} \approx \frac{T_{OT}}{T_1}, T_{OT} \leq T_1 \quad (5)$$

此外,考虑到截获接收机探测到发射机波束能量的检测概率  $p_D$ , 截获接收机调谐对准雷达工作频率的概率  $p_F$ , 则截获概率模型可表示为

$$p_1 = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( A_F \cdot D_1 \cdot \frac{\min(T_{OT}, T_1)}{T_1} \right) \right] \right\} \cdot p_F \cdot p_D \quad (6)$$

式中:  $T_1$  表示截获搜索时间;  $T_{OT}$  为雷达辐射时间;  $p_F$  表示截获接收机调谐对准雷达工作频率的概率;  $p_D$  为在截获接收机侦收方向和频率调谐均对准雷达辐射情况下检测发现雷达的概率。

如果设定的探测区域需要多个波束覆盖,可以采用累积截获概率

$$P_{icum} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - p_{I_k}) \quad (7)$$

式中:  $P_{icum}$  表示整个波束探测区域发生截获的累积概率;  $K$  为探测区域波束的数目;  $p_{I_k}$  为发生一次截获的截获概率。

分析上述截获概率与累积截获概率的计算模型可知,雷达扫描照射探测区域的波束越多,辐射驻留时间越长,越有可能出现截获搜索时间与雷达辐射时间匹配的情况,则被截获的概率将越大。

## 2 相控阵雷达最优驻留时间分析

相控阵雷达隐身搜索扫描最优化的目的是在系统射频隐身要求所限定的辐射资源条件下,通过选取雷达系统的工作参数使得系统搜索性能最优

化。本节从运动目标探测性能与隐身性能约束下的目标探测最优化问题出发,通过分析搜索扫描主要的控制参数,包括驻留时间和波位间隔对搜索性能的影响,给出隐身性能约束下搜索参数的优化模型,通过对该优化模型的求解得出满足隐身要求下相控阵雷达的最优搜索控制。

基于截获概率原理并结合相控阵雷达扫描工作的特征分析可知,雷达扫描一定的区域所耗费的驻留时间和照射次数是影响截获概率的两个重要因素,即相控阵天线波位间隔大,扫描一定区域的照射次数就少,但天线扫描的损耗就多;反之,波位间隔小,扫描一定区域的照射次数和时间就多,虽然天线扫描的损耗则会降低,但被截获的可能性会增大。

本节研究相控阵雷达波束驻留时间对探测威力性能与隐身性能的影响关系,给出两者共同约束下的最优化模型,得到满足隐身要求下的最优工作状态。

首先,从雷达探测威力性能分析可知,当相控阵体制雷达处于搜索模式时,设它应完成的搜索空域的立体角为  $\Omega$  球面度,雷达天线波束宽度的立体角为  $\Delta\Omega$ ,发射天线波束在每一个波束位置的驻留时间为  $T_{OT}$ ,则搜索完整空域所需的时间  $t_s$  为

$$t_s = \frac{\Omega}{\Delta\Omega} T_{OT} \quad (8)$$

考虑天线增益  $G_t$  可用波束宽度的立体角  $\Delta\Omega$  表示为

$$G_t = \frac{4\pi}{\Delta\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega} \cdot \frac{t_s}{T_{OT}} \quad (9)$$

将上述关系式与雷达威力性能关系式合并推导,可得

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 L_s k T_e B \left(\frac{S}{N}\right)} = \frac{P_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 L_s k T_e B \left(\frac{S}{N}\right)} \cdot \frac{4\pi}{\Omega} \cdot \frac{t_s}{T_{OT}} = \frac{P_t A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e B \left(\frac{S}{N}\right)} \cdot \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{t_s}{T_{OT}} \quad (10)$$

式中:  $P_t$  为雷达发射功率;  $G_t$  为雷达发射天线增益;  $\sigma$  为目标散射截面积;  $A_r$  为雷达接收天线有效孔径;  $L_s$  为雷达系统损耗;  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  为波尔兹曼常数;  $B$  为信号带宽;  $T_e = T_A + (L_r \cdot NF - 1) T_0$  为接收系统等效噪声温度,其中,  $T_A$  为天线噪声温度,  $T_0$  为室温,  $L_r$  为接收天线及馈线损耗,  $NF$  为雷达接收机噪声系数;  $(S/N)$  为信号噪声比。

因为  $T_{OT} = n_s T_r$ , 即在一个波束指向上需要使用  $n_s P_t$  的信号总功率,或波束驻留时间内的信号能量  $E_{OT} = P_t \cdot \tau \cdot n_s$ ,  $\tau$  为脉冲宽度。因此,为了检测目标,需要的辐射能量为  $E_{OT}$ , 又有

$$\frac{P_t \cdot n_s}{B \cdot T_{OT}} = \frac{P_t \cdot n_s}{B \cdot \tau} \cdot \frac{\tau}{n_s \cdot T_r} = \frac{P_{av}}{B \cdot \tau} = \frac{P_{av}}{D} \quad (11)$$

式中:  $P_{av}$  为发射平均功率;  $D = B\tau$  为发射信号的时宽带宽积,或称之为脉冲压缩比。由此

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e B \left(\frac{S}{N}\right)} \cdot \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{t_s}{T_{OT}} = \frac{P_t n_s A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e B \left(\frac{S}{N}\right)} \cdot \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{t_s}{T_{OT}} \cdot \frac{1}{n_s} = \frac{P_{av} A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e \left(\frac{S}{N}\right)} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{n_s} \cdot \frac{t_s}{\Omega} \quad (12)$$

令  $\left(\frac{S}{N}\right) \cdot D \cdot n_s = \frac{E}{N_0}$ , 表示  $n_s$  个脉冲信号能量与噪声能量之比,则

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{av} A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e \left(\frac{E}{N_0}\right)} \cdot \frac{t_s}{\Omega} \quad (13)$$

由此,雷达搜索模式时的威力性能在理论上与  $P_{av} A_r$  及搜索时间  $t_s$  成正比,与信号噪声能量之比  $(E/N_0)$  及搜索空域  $\Omega$  的成反比。为关联雷达搜索模式下威力性能与驻留时间等控制参数,将搜索空域的立体角  $\Omega$  表示为方位搜索空域  $\varphi_c$  与仰角搜索空域  $\theta_c$  的乘积,即  $\Omega = \varphi_c \cdot \theta_c$ 。设天线波束在方位与仰角上的半功率点宽度分别  $\Delta\varphi_{0.5}$  和  $\Delta\theta_{0.5}$ , 则

$$t_s = n_\varphi \cdot n_\theta \cdot n_s \cdot T_r \quad (14)$$

式中:  $n_\varphi$  与  $n_\theta$  为天线波束在方位和俯仰方向的数目,可表示为

$$n_\varphi = \frac{\varphi_c}{\Delta\varphi_{0.5}} \quad (15)$$

$$n_\theta = \frac{\theta_c}{\Delta\theta_{0.5}} \quad (16)$$

由此,可得

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{av} A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e \left(\frac{E}{N_0}\right)} \cdot \frac{t_s}{\Omega} = \frac{P_{av} A_r \sigma}{(4\pi) L_s k T_e \left(\frac{E}{N_0}\right)} \cdot \frac{n_\varphi \cdot n_\theta}{\varphi_c \cdot \theta_c} \cdot (n_s \cdot T_r) \quad (17)$$

可见,雷达的威力性能与波束驻留时间  $(n_s \cdot T_r)$  直接相关,即威力的四次方与  $(n_s \cdot T_r)$  成正比,驻留时间越长,威力越大。

而从最优化检测的角度分析,长的驻留时间可以获得窄带多普勒滤波分辨,实现更远的探测距离;但受限于目标的机动特征,驻留时间不能过长,以满足多普勒滤波分辨单元内的目标回波积累。图 2 为最大驻留时间与目标机动加速度之间的关系。

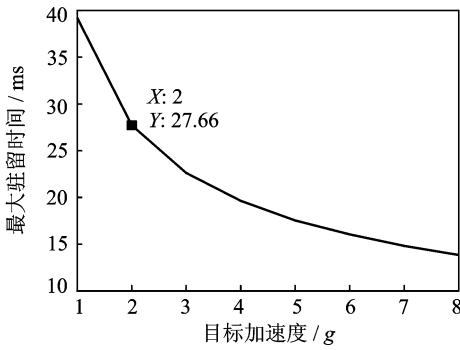


图 2 雷达目标最短驻留时间与目标加速度的关系  
Fig. 2 Relationship between radar target shortest dwell time and the target acceleration

由图 2 可见,对于不同机动性能的目标,为满足多普勒分辨单元内的回波积累检测,最大积累时间通常约为 15~40 ms。

其次,从截获概率的模型分析可知,驻留时间越长,雷达辐射被截获的概率越大。比较分析可见,雷达探测性能与低截获性能对于驻留时间而言是一对矛盾,需要在两种之间进行折中优化。

通过控制减少驻留时间  $T_{OT}$ ,当  $\frac{T_{OT}}{T_I}$  显著小于 1 时,则低截获概率模型可以有如下近似

$$p_1 \approx \left( A_F \cdot D_I \cdot \frac{T_{OT}}{T_I} \right) \cdot p_D \cdot p_F = A_F \cdot D_I \cdot \frac{T_{OT}}{T_I} \tag{18}$$

设雷达波束的目标驻留时间为  $T_{OT}$ ,脉冲重复频率为  $f_R$ ,波束驻留时间内的脉冲数为  $n = T_{OT} \cdot f_R$ ,则雷达方程可表示为

$$R_{Rmax}^4 = \frac{P_{Rt} \cdot G_{Rt} \cdot G_{Rr} \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot T_{OT} \cdot f_R}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot B_{Rr} \cdot NF_R \cdot L_R \cdot SNR_{Rmin}} \tag{19}$$

式中:  $P_{Rt}$  为雷达的发射功率,  $G_{Rt}$  为雷达天线的发射增益,  $G_{Rr}$  为雷达天线的接收增益,  $\sigma$  为目标的雷达散射截面(RCS),  $\lambda$  为雷达工作波长,  $k$  为波尔兹曼常数(  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $T_0$  为标准噪声温度(290 K),  $B_{Rr}$  为雷达接收机带宽,  $NF_R$  为噪声系数,  $L_R$  为雷达系统损耗,  $SNR_{Rmin}$  为雷达最小可检测信噪比。

从驻留时间上进行分析,当选定的雷达发射功

率为  $P_{Rt}$ ,满足探测性能所需的驻留时间为  $T_{OT} \geq \frac{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot B_{Rr} \cdot NF_R \cdot L_R \cdot SNR_{Rmin} \cdot R^4}{P_{Rt} \cdot G_{Rt} \cdot G_{Rr} \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot f_R}$  (20)

为满足低截获概率的要求,雷达波束的目标驻留时间还受限于

$$T_{OT} \leq \frac{p_i \cdot T_I}{A_F \cdot D_I} \tag{21}$$

联立上述关系式,可得截获概率约束下的临界截获距离为

$$R_{CR}^4 = \frac{P_{Rt} \cdot G_{Rt} \cdot G_{Rr} \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot f_R}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot B_{Rr} \cdot NF_R \cdot L_R \cdot SNR_{Rmin}} \cdot \frac{p_i T_I}{A_F D_I} \tag{22}$$

通过综合分析相控阵雷达波束驻留时间对探测威力性能与隐身性能的影响条件,可构建如下的优化模型

$$\begin{aligned} \min_{T_{OT}} \quad & p_1 \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} R < R_{max} \\ T_{OT} \in [t_{ot,min}, t_{ot,max}] \end{cases} \end{aligned} \tag{23}$$

式中:  $p_1$  为相控阵波束单次驻留下的截获概率,要求使其最小化;  $R_{max}$  为相控阵雷达的最大威力性能,设为 150 km;  $[t_{ot,min}, t_{ot,max}]$  为驻留时间的可行区域,一般为 15~40 ms。

设隐身对抗中的雷达系统与侦收系统主要参数如表 1 所示。

表 1 雷达系统仿真主要参数

Table 1 The main simulation parameters of the radar system

参数	取值
工作波段	X
天线增益/dB	30
侦收方向天线增益/dB	30
最大威力性能/km	150
检测因子/dB	10
探测方位范围/(°)	±60
探测俯仰范围	1 线
占空比/%	25

从不同作用距离下的截获概率随驻留时间的变化关系示意图可知,在一定的距离下,随着目标驻留时间的减少,截获概率呈下降变化,距离越大,这种变化越明显。因此,在一定的距离条件下,功率控制无法满足低截获的需求时,通过减缩驻留时间实现截获概率的下降控制。实际应用中,综合系统探测性能需求和最大可辐射的功率能力,选择驻

留时间为 15~20 ms。

表 2 侦收对抗系统仿真主要参数

Table 2 The main simulation parameters of the interception system

参数	取值
天线增益/dB	0
视频带宽/MHz	50
噪声系数/dB	4
接收处理损耗/dB	3
传输损耗/dB	3
最小可检测因子/dB	17
截获接收机密度/km <sup>2</sup>	0.001
截获接收机帧时间/s	1
侦收系统灵敏度/dBm	-70

仿真结果如图 3 所示。

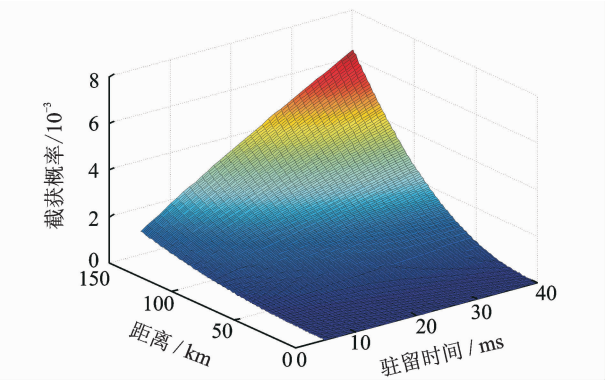


图 3 不同作用距离下的截获概率随驻留时间的变化关系  
Fig. 3 Changes in the relationship between the probability of intercept and dwell time for different distances

3 相控阵雷达最优搜索波位间隔分析

同样地,由相控阵雷达的基本原理可知,如果增大每个波束的波位间隔,就会降低波束的平均增益,导致损失,由此就需要增大每个波位上的发射能量才能达到一定的检测性能,但是它带来的好处是减少了搜索完一帧所需的照射次数和时间;另一方面如果减小波位之间的间隔,将相当于增大了每个波位上波束的增益,那么要达到特定的检测性能时所需要的发射能量相对减少,但是需要更多的波位来覆盖特定的空域,即增加搜索完整个空域所花费的次数和时间。波位间隔的示例如图 4 所示。

对于给定的引导搜索空域要搜索一帧所需的波束数目与波束排列方式有关,并和覆盖范围内的平均增益损失之间进行折中。波束排列方式中波束间间隔越大,搜索指定空域所需的波束数目越

少,但平均波束增益损失越多。

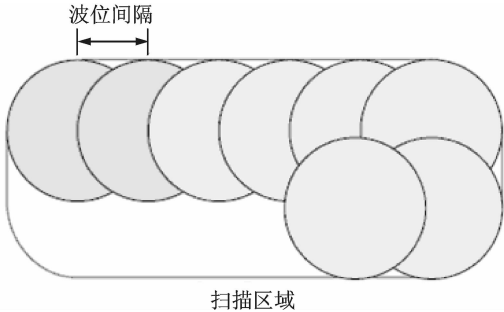


图 4 雷达扫描波位排布示意图

Fig. 4 Demonstration of radar beam scanning interval

设相控阵雷达的天线增益在相邻波位间或在半功率点间的值是其偏离角度的余弦函数,即

$$G=G_0\cos(2\pi\theta/(3\theta_B))\tag{24}$$

式中:  $G_0$  为波束所指方向的天线增益的最大值;  $\theta$  为偏离增益最大方向的角度,其变化范围是在相邻两个波位交汇点之间;  $\theta_B$  为半功率波束宽度,则在相邻两个波位间的天线的平均增益为

$$\begin{aligned}\overline{G}&=\int_{-\frac{\Delta\theta}{2}}^{\frac{\Delta\theta}{2}}\frac{1}{\Delta\theta}\cdot G_0\cdot\cos\left(\frac{2\pi\theta}{(3\theta_B)}\right)d\theta=\\&\int_0^{\frac{\Delta\theta}{2}}\frac{2}{\Delta\theta}\cdot G_0\cdot\cos\left(\frac{2\pi\theta}{(3\theta_B)}\right)d\theta=\\&\frac{2}{\Delta\theta}\cdot G_0\cdot\frac{3\theta_B}{2\pi}\cdot\sin\left(\frac{2\pi\theta}{(3\theta_B)}\right)\bigg|_{\theta=0}^{\theta=\frac{\Delta\theta}{2}}=\\&\frac{3G_0\theta_B}{\pi\Delta\theta}\cdot\sin\left(\frac{\pi\Delta\theta}{3\theta_B}\right)\end{aligned}\tag{25}$$

式中  $\Delta\theta$  为波位间隔。

设  $k_\theta=\frac{\Delta\theta}{\theta_B}$ , 有如下关系式

$$\overline{G}=\frac{3G_0}{\pi k_\theta}\cdot\sin\left(\frac{\pi k_\theta}{3}\right)\tag{26}$$

波位间隔对相控阵天线损失的影响如图 5 所示。

可构建如下的优化模型

$$\begin{aligned}\max_{\Delta\phi}\quad & R_c \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} P_{icum}\leqslant P_{icum,\max} \\ \Phi=[\phi_2,\phi_1] \\ T_{OT}\leqslant T_{OT,\max} \end{cases}\end{aligned}\tag{27}$$

式中:  $R_c$  为低截获概率限制下的雷达低截获临界探测距离(即该距离时雷达辐射被截获的概率为被截获的限值,如式(22)中的  $R_{CR}$ ),要求使其最大化;  $\Delta\phi$  为待优化求解的波位间隔;  $P_{icum,\max}$  为累积截获概率的限值,设为 0.01;  $\Phi=[\phi_2,\phi_1]$  为搜索扫描的区域,设为  $\pm 60^\circ$ ;  $T_{OT,\max}$  为波束最大驻留时间,设为 20 ms。

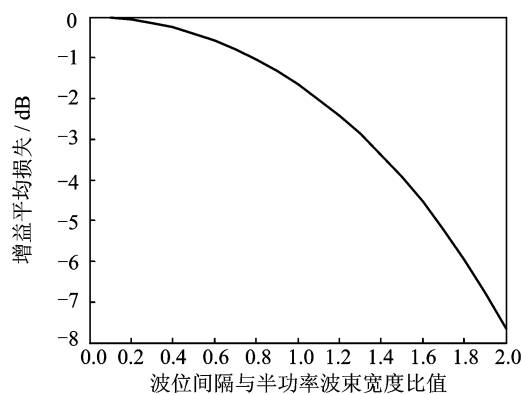


图 5 波位间隔对相控阵天线损失的影响

Fig. 5 Impact on the phased array antenna losses for different beam spacing

隐身对抗中的雷达系统与侦收系统主要参数如表 1 和表 2 所示,仿真分析结果如图 6 所示。

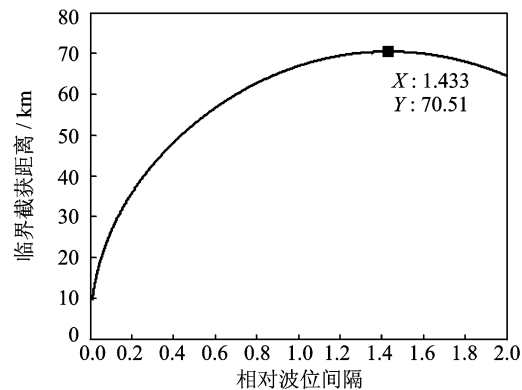


图 6 波位间隔与临界截获概率关系示例

Fig. 6 Demonstration of the relationship between beam interval and critical interception probability

由仿真结果可见,在所设定的对抗场景下,为兼顾雷达低截获性能与探测性能,即在 1% 的累积截获概率约束下,使得雷达探测距离最大化的最佳波位间隔为 1.433 倍的波束 3 dB 宽度。此时,如表 1 和表 2 所示的对抗场景条件,雷达能够在约 70 km 的距离上实现低截获概率的射频隐身对抗,相比于常规 0.8 倍的 3 dB 波位间隔,临界截获距离改善约 10 km。

4 结束语

本文基于截获概率的原理,从目标探测性能与隐身性能约束下的目标探测最优化问题出发,通过分析驻留时间和波位间隔等扫描控制参数对搜索性能影响的优化模型,经过仿真求解得出了满足隐身要求下相控阵雷达的最优搜索控制状态。目标的运动、辐射信号的宽带特征等也是对系统综合性能有重要影响的因素,后续工作可作进一步研究。

参考文献:

[1] Schleher D C. LPI radar: fact or fiction [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(5): 3-6.

[2] Phillip E P. Detecting and classifying low probability of radar[M]. Boston: Artech House, 2004.

[3] David L J. Introduction to RF stealth [M]. Raleigh NC:SciTech Publishing Inc, 2004.

[4] Stove A G,Hume A L,Baker C J. Low probability of intercept radar strategies [J]. IEE Proceeding Radar Sonar Navigation, 2004,151(5):249-260.

[5] 杨红兵,周建江,汪飞. 飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J]. 航空学报,2010,31(10):2040-2045. Yang Hongbing, Zhou Jianjiang, Wang Fei, et al. Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors [J]. ACTA Aeronautica ET Astronautics Sinica, 2010, 31(10): 2040-2045.

[6] 胡卫东,郁文贤,卢建斌. 相控阵雷达资源管理的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2010:51-57.

[7] 张贞凯,周建江,汪飞. 基于射频隐身的相控阵雷达功率控制算法[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(11):2044-2048. Zhang Zhenkai, Zhou Jianjiang, Wang Fei, et al. Novel algorithm of power control based on radio frequency stealth [J]. Systems Engineering and Electronics,2012,34(11): 2044-2048.

[8] Nadav Levanon. Radar signal [M]. New Jersey:John Wiley & Sons Inc, 2004.

[9] 张光义. 相控阵雷达技术 [M]. 北京:电子工业出版社,2007.

[10] 王德纯. 宽带、超宽带雷达对抗与反对抗性能分析[J]. 电子工程信息,2003, 5: 13-15. Wang Dechun. Performance of wideband and ultra-wideband radar countermeasure and counter-countermeasure [J]. Electronic Engineering Information, 2003,5: 13-15.

[11] Xu Yinghe. A quiet guard-LPI radar [C]//Proceeding of the 8<sup>th</sup> CIE Radar Conference. Hefei:[s. n.], 2002:93-99.

[12] Stimson G W. Introduction to airborne radar [M]. Raleigh NC:SciTech Publishing Inc, 1998.

[13] 白航,赵拥军,胡德秀. 基于 Choi-Williams 时频图像特征的雷达辐射源识别 [J]. 数据采集与处理,2012, 27(4): 480-485. Bai Hang, Zhao Yongjun, Hu Dexiu. Radar emitter recognition based on the image feature of Choi-Williams time-frequency distribution [J]. Journal of Data Acquisition and Processing,2012,27(4): 480-485.

作者简介:张杰(1978-),男,高级工程师,研究方向:雷达系统、射频隐身技术等,E-mail: zjh1978@sohu.com. 汪飞(1976-),男,副教授,研究方向:雷达信号处理;阮淑芬(1961-)女,高级工程师,研究方向:机载雷达系统。



