

基于弹道预报的相控阵雷达监视空域研究

周颖 王雪松 冯德军 丹梅
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 该文以弹道导弹防御为背景,研究在有预警信息条件下相控阵雷达监视空域的问题。首先讨论了无先验指示信息条件下相控阵雷达监视空域,然后在分析弹道预报及其精度的基础上,给出了小窗口位置和半径的递推算法以及坐标转换公式,建立了基于弹道预报的战术相控阵雷达小窗口监视空域模型,并且与全空域搜索比较了检测性能,最后进行了仿真验证。

关键词 弹道导弹防御,相控阵雷达,监视空域,弹道预报

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1209-06

Surveillance Volume of Phased Array Radar Based on Trajectory Prediction

Zhou Ying Wang Xue-song Feng De-jun Dan Mei

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract The surveillance space of Phased Array Radar(PAR) supported by early warning system is studied in the paper under the background of Ballistic Missile Defense(BMD). Firstly, surveillance space of PAR without prior indication information is discussed. After analyzing the trajectory prediction and its precision, the recurrence algorithms for positions and radiuses, and coordinates transformation are presented, and the small-window surveillance spaces model for PAR based on trajectory prediction is established. Additionally its detection performance is compared with whole-space searching. Finally, the model is demonstrated using simulation.

Key words BMD(Ballistic Missile Defense), Phased Array Radar(PAR), Surveillance space, Trajectory prediction

1 引言

众所周知,依靠极大的功率孔径积、灵活的波束扫描以及高效的资源管理,相控阵雷达在弹道导弹防御系统中得到了广泛应用。

一般而言,监视空域是雷达搜索扫描的区域,它是距离、方位角、俯仰角以及径向速度所组成的四维空间区域^[1]。有关监视空域的研究由来已久,因为监视空域的确定以及划分是雷达进行搜索探测的前提条件。文献[1,2]分别给出了一般情形下机械扫描雷达和相控阵雷达的扫描方式及其空域。确定和划分监视空域的主要依据是雷达目标的运动特性。在弹道导弹防御系统中,战略和战术相控阵雷达的性能特点和作战使命各不相同,其监视空域有很大的差别,而且也必然不同于一般对付以飞机为主的空气动力目标情形下的监视空域。由于和作战任务关系紧密,出于保密等原因,有关弹道导弹防御系统中相控阵监视空域的研究较少见诸报道。文献

[3]针对几组标准弹道和雷达布站情况,研究了无任何先验信息下的监视空域问题。

在现代弹道导弹防御系统中,预警卫星和早期预警雷达等为相控阵雷达提供引导信息。本文重点研究了有先验指示信息的条件下的战术相控阵雷达监视空域问题,提出并分析了一种基于弹道预报的小窗口的监视空域模型。

2 无先验指示信息下的监视空域

2.1 战略相控阵雷达监视空域

搜索空域的确定和划分与作战目的、作战对象以及作战方案等密切相关,同时也取决于相控阵雷达具体体制和用途。弹道导弹防御系统中的预警探测相控阵雷达要观测的目标主要是卫星与弹道导弹,以及由它分裂出的多个弹头和诱饵,此外还包括轨道可机动的变轨弹道导弹以及可能的部分轨道武器^[4]。

极大的功率孔径积使得战略相控阵雷达的威力范围动辄几千公里,搜索警戒线是其通常采用的的监视方式。它的基本假设有两点,一是弹道式目标发射升空后,必然穿越战

2004-11-19 收到, 2005-05-08 改回
国防科技大学基础研究计划项目和国防科技大学研究生创新基金资助课题

略相控阵雷达事先设置的、由若干重叠的水平波位组成的搜索警戒线；二是目标本身的RCS足够大(通常尚未发生弹箭分离)保证穿越搜索警戒线的累积检测概率逼近1。作为典型例子，AN/FPS-115战略相控阵雷达的监视空域是由120个波位组成的水平搜索警戒线^[5]。

相对于搜索警戒线，搜索墙(Search fence)的概念具有更广泛意义。所谓搜索墙是定义一个有限的搜索区域，所有来袭目标都一定通过此搜索墙，并且全概率被检测到^[2]。如果目标RCS较小，则必须设置多道搜索警戒线(墙)来保证发现突防目标。

2.2 无指示信息下战术相控阵雷达监视空域

对于战术相控阵雷达，由于不能事先确定突防目标的RCS(尤其是弹头和诱饵等)而且雷达威力相对较小，简单固定式的搜索警戒线的搜索扫描方式不再适合。

一般而言，无指示信息下的搜索空域是战术相控阵雷达天线的最大扫描范围和目标来袭角度范围的几何交集。文献[2]分析了一般空气动力目标突防条件下相控阵雷达的搜索空域，其主要特点是随着高度的增大，对于探测距离的要求降低。这种监视空域安排的主要原因是空气动力目标的运动特性，即飞行高度有限。文献[6]给出了“爱国者”地空导弹武器系统中MPQ-53相控阵雷达对付一般空气动力目标的空域划分。

但是对于弹道目标，由于其具有高仰角再入的特点，相控阵雷达的搜索扫描俯仰角范围必须扩大，尤其是俯仰角上界远大于一般情形下的取值。实际上由于各种高抛弹道和压低弹道，甚至机动弹头的存在，使得再入过程中弹头目标相对于相控阵雷达的俯仰角范围进一步加大。

对于监视区域的方位角左右界限，如果能够知道来袭目标的大致方位，就可以使方位角范围最小化。反过来，如果不知道目标来袭方向而必须实施全方位或者大方位范围拦截，则必须采用多个阵面的方法，比如宙斯盾Aegis系统的SPY-1D雷达由4个阵面组成，每个阵面方位监视范围为110°。

值得指出的是，这种大空域的监视方式不适合战略相控阵雷达，因为其作用距离常常远达几千公里，相应每个波位的驻留时间长达十几，甚至几十毫秒。如果监视空域过大，波位数目过多，则搜索帧周期的长度是不能忍受的。因为过低的搜索数据率可能带来非常大的目标发现距离损耗^[7,8]，尤其是在弹道导弹高速突防的条件下。

3 基于弹道预报的小窗口监视空域

在现代典型弹道导弹防御系统中，早期预警是不可缺少的环节，其主要功能是用于早期发现来袭的弹道导弹并根据测得的运动参数实时预测弹头的落点和被打击目标，同时给己方的反导弹武器指示来袭导弹的空间位置，以便迅速做出主动防御措施，为防御提供足够的预警时间^[9]。

一般而言，预警系统与战术相控阵雷达之间的交接班有多种方式。一种是单波束方式，即预警雷达直接引导相控阵雷达波束照射目标，后者不需要进行额外的搜索工作，这要求预警系统测角误差必须小于战术相控阵雷达波束宽度的一半。另一种是小窗口方式，即预警系统根据卡尔曼预测提供相对大的角度范围，由制导雷达在小空域中完成搜索。需要指出的是，两种方式下的指示信息都是随着弹道目标的推进而时变的，而且预警系统一直跟踪目标以引导战术相控阵雷达，直到后者能够发现截获目标。

本文提出一种基于弹道预报的小窗口监视空域模型。预警系统发现并截获突防目标后，依据弹道导弹的运动特点进行弹道预报和精度分析，然后将预警信息通过作战指挥中心等传给战术相控阵雷达，后者将利用此先验信息在一组随时间变化的小窗口中进行有指示信息下的搜索。在此种方式下，预警系统不必一直跟踪已经进行弹道预报的目标，而将时间和能量资源更多用于空域监视和新目标的弹道预报，这将在很大程度上提高其多目标处理能力。

3.1 预报弹道及其精度

对于自由飞行段的弹道导弹，其弹道完全满足开普勒定律。一旦关机后的某参考时刻的状态确定，则其弹道也就完全确定。为简化计算，在忽略再入段大气对于落点偏差影响的情况下，可以把弹头在整个无动力飞行过程中的轨迹看作是椭圆曲线的一部分，下面直接给出椭圆弹道的工程计算模型：

$$r = \frac{P}{1 - e \cos(\beta - \beta_B)} \quad (1)$$

其中 r 是地心到弹头的矢径， $P = h^2/(fM)$ 且 f 为万有引力常数， M 为地球质量， h 为常数。 β 是从关机点(设为点 K)到任一瞬时的射程角， β_B 为最高点的射程角。 $e = \sqrt{1 - (2 - v_K)v_K \cos^2 \theta_K}$ 为偏心率， $v_K = r_K V_K^2/(fM)$ 为主动段关机点能量参数，且 r_K 和 V_K 分别是关机点的矢径和速度。

由于弹头飞行参数测量精度等限制，预报弹道不会是一条曲线，而是具有一定偏差半径的管道，管道中心是预报弹道。相应的落点预报不是一个点，而是以预报落点为中心的椭圆区域。

通常将预报偏差分为纵向偏差和横向偏差，前者指在射击平面内的偏差，而后者指实际位置点与射击平面的距离偏差，这两个偏差可以表示为^[10-12]

$$\left. \begin{aligned} \Delta L &= r \cdot \Delta \beta(r_K, V_K, \theta_K) \\ \Delta H &= \zeta \cdot r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中 $\Delta \beta$ 泰勒展开得：

$$\Delta \beta = \frac{\partial \beta}{\partial r_K} \Delta r_K + \frac{\partial \beta}{\partial V_K} \Delta V_K + \frac{\partial \beta}{\partial \theta_K} \Delta \theta_K \quad (3)$$

且有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial r_K} &= \frac{v_K + 2 \frac{R}{r_K} (1 + \text{tg}^2 \theta_K) \sin^2(\beta/2)}{v_K (r_K - R + R \cdot \text{tg} \theta_K \cdot \text{tg}(\beta/2))} \text{tg} \frac{\beta}{2} \\ \frac{\partial \beta}{\partial V_K} &= \frac{4R}{V_K} \cdot \frac{(1 + \text{tg}^2 \theta_K) \sin^2(\beta/2) \text{tg}(\beta/2)}{v_K (r_K - R + R \text{tg} \theta_K \text{tg}(\beta/2))} \\ \frac{\partial \beta}{\partial \theta_K} &= \frac{2R(1 + \text{tg}^2 \theta_K)(v_K - 2 \text{tg} \theta_K \text{tg}(\beta/2)) \sin^2(\beta/2)}{v_K (r_K - R + R \text{tg} \theta_K \text{tg}^2(\beta/2))} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

至于横向误差系数，式(5)给出了定量描述：

$$\zeta = \sin \beta \cdot V_{ZK} / (V_K \cos \theta_K) + (\cos \beta - \text{tg} \theta_K \sin \beta)(z_K / r_K) \quad (5)$$

其中 V_{ZK} 为关机点处垂直于射击平面的速度分量，而 z_K 为关机点处的与弹道平面之间的偏差。

3.2 小窗口监视空域模型

预警系统探测到突防目标后，经过算轨后提供给战术相控阵雷达系统各种预警信息，包括预报弹道及其偏差，落点预报等。战术相控阵雷达根据预警信息在相应的小窗口空域中进行监视。由于目标 RCS 等原因，战术相控阵雷达在某个小窗口内不一定能够发现突防目标。如果经过多帧搜索后仍旧无法发现目标，雷达系统应该根据预报弹道和时间的关系生成下一个小窗口，并在其中继续进行搜索以探测突防目标，如此反复直到发现目标。由于在相控阵雷达波束扫描过程中波束宽度具有展宽效应，波位编排的工作一般在所谓正弦空间坐标系，即 u - v 坐标系中进行^[13,14]，所以指示小窗口是突防目标的当前位置估计在正弦空间坐标系下的一组投影区域。

为了进一步研究各个小窗口区域的中心位置和大小，需要把突防目标的位置、速度和预报误差投影到阵面正弦空间坐标系。下面不加推导直接给出位置的坐标转换公式，然后得到速度和误差的转换公式。

发射坐标系 $C_e : (x_e, y_e, z_e)$ 以地面发射台中心为坐标原点，以发射点的铅垂线为 y_e 轴且指向地球外， x_e 轴在发射点水平面上，指向发射目标点， z_e 轴与 x_e 轴、 y_e 轴构成右手系。描述弹道曲线的极坐标系 (r, f) 到发射坐标系 $C_e : (x_e, y_e, z_e)$ 之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z \left(\frac{\pi}{2} - f_0 \right) \begin{bmatrix} -r \cdot \cos f \\ r \cdot \sin f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 f_0 是发射点的极角， R 为地球平均半径， $\mathbf{R}_Z(\cdot)$ 表示坐标系围绕 Z 轴按右手规则旋转的变换矩阵，下面的旋转矩阵类似。

从发射坐标系 $C_e : (x_e, y_e, z_e)$ 经地心坐标系到雷达站直角坐标系 $C_r : (x_r, y_r, z_r)$ 的坐标转换为

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(-90^\circ) \mathbf{R}_X(\varphi_R) \mathbf{R}_Z(\lambda_R - 90^\circ) \cdot \left(\mathbf{R}_Z(90^\circ - \lambda_E) \mathbf{R}_X(-\varphi_E) \mathbf{R}_Y(90^\circ + \alpha_E) \cdot \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{eo} - x_{ro} \\ y_{eo} - y_{ro} \\ z_{eo} - z_{ro} \end{bmatrix} \right) \stackrel{\Delta}{=} \mathbf{M}_P \left(\mathbf{M}_Q \cdot \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{eo} - x_{ro} \\ y_{eo} - y_{ro} \\ z_{eo} - z_{ro} \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

其中发射点天文经纬度 (λ_E, φ_E) ，雷达站天文经纬度 (λ_R, φ_R) ，发射天文方位角 α_E 。 (x_{eo}, y_{eo}, z_{eo}) 为发射点在地心坐标系下的坐标， (x_{ro}, y_{ro}, z_{ro}) 为雷达站在地心坐标系下的坐标。

修正球坐标系用来指定雷达扫描范围，其原点为雷达站，雷达阵面法线在水平面的投影作为方位角零度，顺时针为正，逆时针为负，有效取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ，以水平面作为俯仰角的零度，向上为正，有效取值范围 $[0, \pi/2]$ 。从雷达站直角坐标系 $C_r : (x_r, y_r, z_r)$ 到修正球坐标系 $C_m : (R_m, Az_m, El_m)$ 的转换关系为

$$\begin{bmatrix} R_m \\ Az_m \\ El_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2} \\ \arcsin \frac{z_r}{\sqrt{x_r^2 + z_r^2}} \\ \arctg \frac{y_r}{\sqrt{x_r^2 + z_r^2}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 φ_0 是雷达阵面法线在雷达站球坐标系中的方位角。

从修正球坐标系 $C_m : (R_m, Az_m, El_m)$ 到正弦空间坐标系 $C_s : (R_s, \alpha_s, \beta_s)$ 的转换为

$$\left. \begin{aligned} R_s &= R_m \\ \alpha_s &= \cos(El_m) \sin(Az_m) \\ \beta_s &= \sin(El_m) \cos(\theta_T) - \cos(El_m) \cos(Az_m) \sin(\theta_T) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 θ_T 指雷达阵面的倾角。

式(6)一式(9)给出了位置变换的坐标转换公式，对于误差转换略去推导可以得到下式：

$$\begin{aligned} \text{Cov}(C_s) &= \mathbf{J}_s \cdot \text{Cov}(C_m) \cdot \mathbf{J}_s' \\ &= \mathbf{J}_s \mathbf{J}_m \cdot \text{Cov}(C_r) \cdot \mathbf{J}_m' \mathbf{J}_s' \\ &= (\mathbf{J}_s \mathbf{J}_m \mathbf{M}) \cdot \text{Cov}(C_e) \cdot (\mathbf{J}_s \mathbf{J}_m \mathbf{M})' \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos El \cos Az & -\sin El \sin Az \\ 0 & \cos El \sin Az \sin \theta_T \cos \theta_T & \cos El + \sin El \cos Az \sin \theta_T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_p \mathbf{M}_Q$$

$$\mathbf{J}_m = \begin{bmatrix} x/\sqrt{\Delta} & y/\sqrt{\Delta} & z/\sqrt{\Delta} \\ -xz & 0 & |x| \\ |x|(x^2+z^2) & & x^2+z^2 \\ -xy & \sqrt{x^2+z^2} & -yz \\ \Delta\sqrt{x^2+z^2} & \Delta & \Delta\sqrt{x^2+z^2} \end{bmatrix}$$

且 $\Delta = x^2 + y^2 + z^2$, $\text{Cov}(\cdot)$ 代表相应坐标系下的协方差矩阵, $\text{Cov}(C_e) = \text{diag}(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2)$, 其中

$$\sigma_x^2 = \left[\frac{P(\cos f_0 \cos f + \sin f_0 \sin f + e \cos f_0)}{(1 + e \cos f)^2} \right]^2 \sigma_\beta^2$$

$$\sigma_y^2 = \left[\frac{P(\sin f_0 \cos f - \cos f_0 \sin f + e \sin f_0)}{(1 + e \cos f)^2} \right]^2 \sigma_\beta^2$$

$$\sigma_z^2 = \Delta H^2$$

速度转换公式只需要对式(6)一式(9)求导即可得到, 由于篇幅所限这里不再赘述。下面推导多个小窗口监视空域的中心位置和大小递推算法。

如果目标尚未出现或者已经穿越某小窗口区域, 在其中进行搜索是没有任何价值的。所以第 i 个小窗口监视空域的生存期是目标在此窗口中出现的时间区间 $T_i = [t_{ib}, t_{if}]$, 其中 t_{ib} 和 t_{if} 分别是目标进入和离开第 i 个小窗口监视空域的时刻。可见窗口大小的选择是关键环节, 过大或者过小都将降低搜索效率。

假设弹头目标在第 i 个小窗口中穿越时被相控阵雷达照射 N_i 次, 则它在此小窗口中的检测概率为

$$P_{Di} = 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P_{ij}) \quad (11)$$

其中 P_{ij} 是第 j 次被照射时的检测概率。令正弦空间坐标系下的波位密度为 ρ (单位面积内的波位数目), 每个波位的驻留时间为 D , 则相控阵雷达对第 i 个小窗口的搜索帧周期^[8]为

$$T_{Si} = \pi D \rho r_i^2 \quad (12)$$

故而有

$$N_i = T_i / T_{Si} = k_i / (\sqrt{\pi} D \rho r_i) \quad (13)$$

其中 T_i 是目标穿越第 i 个小窗口所耗费的时间(这也是第 i 个小窗口的生存期), 系数 k_i 表示目标穿越第 i 个小窗口的路径 L_i 与小窗口半径 r_i 之间的比值, \bar{v} 是目标在正弦空间坐标系下此窗口内的平均运动速度。

经过共 N 个小窗口空域的搜索后, 总的检测概率 P_D 为

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{Di}) = 1 - \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P_{ij}) = 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P_{ij}) \quad (14)$$

令在正弦坐标系下第 i 个小窗口是半径为 r_i ($i=1, 2, \dots$) 比较式(14)和式(20)可以看出, 由于 M_a 数目很大, 当两

的圆形区域, 因此可以建立近似关系

$$T \cdot \bar{v} = \sum_{i=1}^N k_i r_i \quad (15)$$

其中 T 是目标穿越 N 个小窗口空域所花费的总时间。

联立式(13)一式(15)可以看出, 在总时间 T 和其他参数一定的情况下, 小窗口半径 r_i 越小, 则 N 和 N_i 越大, 所以检测概率 P_D 越大。在极限情况下, 当半径 r_i 小到等于波束宽度的一半时, 小窗口模型变成了上文提到的单波束引导方式。

但是小窗口半径 r_i 并不是越小越好, 它受到两个因素的制约。一个是预报精度制约。如果预报精度不能满足要求, 一味减小 r_i 将导致相控阵雷达被误导而不能发现目标。另外一个因素是为防止切换时发生漏检, 小窗口监视空域之间应该进行适当冗余重叠。过多的小窗口和频繁的切换也将导致搜索效率的下降。为留有余量取 r_i 为

$$r_i = m \cdot 3 \sqrt{\sigma_\alpha^2(t_{wi}) + \sigma_\beta^2(t_{wi})} \quad (16)$$

其中 σ_α 和 σ_β 表示正弦空间坐标系下当前时刻 t_{wi} 的两个角度误差, 而 $m \geq 1$ 为考虑小窗口之间适度冗余而放大的因子, 可见窗口大小直接决定于弹道预报精度随时间的变化。

此外第 i 个小窗口的圆心位置 $(\alpha_{i0}, \beta_{i0})$ 由预报弹道的对应时刻 t_{wi} 所决定, 而 t_{wi} 可由递推法得到:

$$t_{wi} = t_{w(i-1)} + m(r_{i-1}/\bar{v}_{i-1} + r_i/\bar{v}_i) \quad (17)$$

其中 t_{wi} 和 r_i 、 \bar{v}_i 均是未知量, 它们之间的关系可以利用正弦空间坐标系下的数据进行拟合来约束, 即有:

$$t_{wi} = t_{w(i-1)} + m(r_{i-1}/\bar{v}_{i-1} + A(t_{wi})) \quad (18)$$

其中 $A(t_{wi})$ 是多项式拟合式。

综上所述, 联立式(16)和式(18)就构成了小窗口监视空域的中心位置和半径大小的递推公式。首先解方程式(18)得到第 i 个小窗口的中心时刻 t_{wi} , 然后利用预报弹道与时间的对应关系得到小窗口中心位置 $(\alpha_{i0}, \beta_{i0})$, 并且把时刻 t_{wi} 对应的误差代入式(16)即得到此小窗口的半径大小 r_i 。

3.3 检测性能比较

为了说明基于弹道预报的小窗口模型对于检测性能的提升作用, 下面与无指示信息下的全空域的搜索性能进行比较。

设全空域的波位数目为 M_a , 每个波位的驻留时间与小窗口模型相同(设为 D), 则全空域的搜索帧周期为 $T_s = M_a D$, 在时间 T 内目标被照射的次数为

$$N_a = T / (M_a D) \quad (19)$$

所以在时间 T 内的检测概率为

$$P_{aD} = 1 - \prod_{i=1}^{N_a} (1 - P_{ai}) \quad (20)$$

种方法对应的搜索时间 T 相同时, $N_a \ll \sum_{i=1}^N N_i$, 因此 $P_D \gg P_{ad}$ 。因此相控阵雷达可以充分利用预报信息, 在对应时间内依次在生成的小窗口内搜索目标, 直到探测到突防目标, 这样可以大幅度提高系统的监视性能。

4 仿真

如图 1, 弹道导弹发射点经纬度为 $(0^\circ, 0^\circ)$, 雷达站 A 的经纬度为 $(2^\circ, 17^\circ)$ 且阵面法线方位角为 230° 。弹道导弹关机点参数如下: $V_K=4000\text{m/s}$, 距地面高度 100km , $z_K=200\text{m}$ 。仅考虑雷达测量误差, $\Delta\theta_K=0.00029\text{rad}$, 测距误差 $\Delta r_K=10\text{m}$, 测速误差 $\Delta V_K=8\text{m/s}$, 此外假设 $V_{ZK}=10\text{m/s}$ 。

相控阵雷达参数如下: 水平扫描范围 $[-45^\circ, 45^\circ]$, 俯仰扫描范围 $[0^\circ, 60^\circ]$, 不展宽情况下 3dB 波束宽度为 2° , 阵面法线与水平面的夹角 22.5° 。

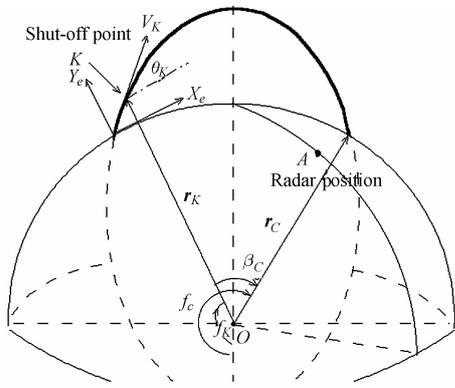


图 1 典型战情想定
Fig.1 Typical scenario

图 2 给出了在原始的极坐标下弹道导弹的预报轨迹和纵向及横向误差。图 3 则给出了它们投影到雷达阵面正弦空间坐标系的结果, 在距离雷达远处, 弹道导弹的轨迹畸变程度高, 而在近处的畸变相对较小。图 3 中弹道预报的误差管道投影由 $(3\sigma_\alpha, 3\sigma_\beta)$ 决定, 与图 2(b) 一致, 它们的误差都随时间逐渐变大。

图 3 给出一组相互有一定重叠的小空域监视区域, 它们的直径略大于误差管道投影宽度, 且随着预报误差变大而相应变大。图 3 中的波位总数目为 1160, 但落入各个小窗口的波位数目相对少得多。此外由于相控阵雷达扫描范围的限制, 弹道投影在某些区域可能超出扫描范围, 此时相控阵雷达阵面方位角的调整必须满足一定条件, 忽略开始难以发现

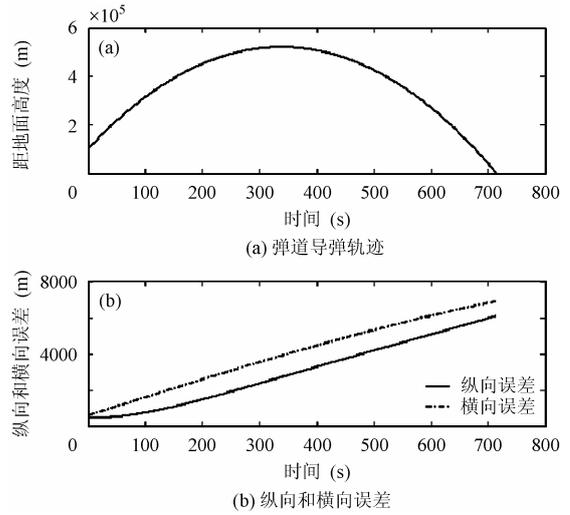


图 2 弹道导弹轨迹和误差(原始极坐标系)
Fig.2 Ballistic missile trajectory and its errors (original polar coordinate)

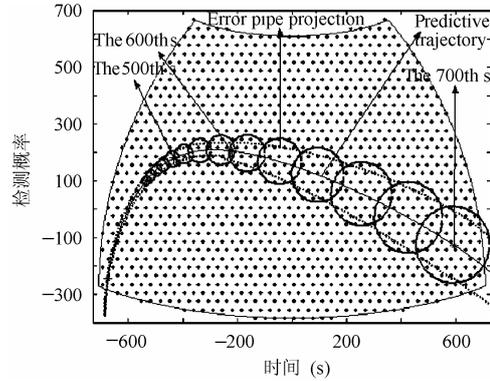


图 3 正弦空间坐标系下的小窗口监视空域
Fig.3 Small window surveillance spaces in sine coordinate

目标的阶段和最后已经来不及拦截的阶段, 以确保中间过程能够有效覆盖弹道曲线投影。

表 1 给出了图 3 中各个小窗口的生存期, 第 1 行是小窗口编号, 第 2 行和第 3 行分别是对应小窗口生存期的开始时刻和结束时刻。比较图 3 可以看出, 虽然小窗口的半径一直是递增的, 但是由于正弦空间坐标系下的目标速度一直维持较小的值, 直到比较靠近雷达处而变得较大。所以小窗口的生存期从第 1 个窗口的 20.0s 逐步增大, 在第 7 个窗口时达到最大的 31.5s , 然后又减小直到最后第 15 窗口的 12.0s 生存期。

图 4 给出了全空域与小窗口空域之间检测概率的对比。

表 1 小窗口生存期 (单位: s)

Tab. 1 Existent period of small windows

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
390.0	410.0	431.0	454.3	480.5	509.6	540.8	572.3	601.3	626.5	647.4	665.0	680.1	693.3
410.0	431.0	454.3	480.5	509.6	540.8	572.3	601.3	626.5	647.4	665.0	680.1	693.3	705.3

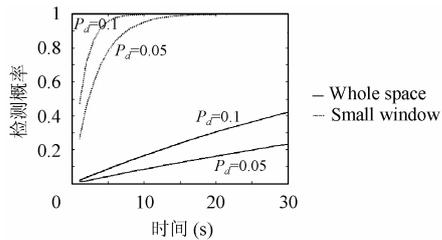


图4 全空域与小窗口的检测概率比较

Fig.4 Detection probabilities between whole space and small window space

设波位驻留周期为 5ms, 假定每次照射的检测概率 P_d 为 0.05 或 0.1。一般而言, 相控阵雷达不会在某个时间段内把所有时间资源都用在某个小窗口中, 否则极高的数据率不但浪费资源而且带来处理问题, 但是为了说明问题仍旧作如此假设。另外为了简化问题假设所有窗口大小相同且等于图 3 中半径最大的小窗口区域。这两个假设都在一定程度上限制了小窗口模型的检测性能, 但从图 4 中可以看出, 小窗口条件下的检测概率仍然远大于全空域情形。

所以, 在保证小窗口监视空域足够高的搜索数据率的情形下, 相控阵雷达可以同时兼顾其他目标, 或者对整个空域进行例行搜索以探测可能存在的其他目标, 并且通过在不同的监视空域选取不同的信号波形来分配时间资源和能量资源以实现相控阵雷达搜索过程的最优化。

5 结束语

相控阵雷达监视空域的确定是其搜索的前提条件。对于战术相控阵雷达或跟踪制导相控阵雷达, 预警系统通常为提供指示信息。本文提出了基于弹道预报的小窗口监视空域模型, 这不但能够充分利用预警信息提高战术相控阵雷达的搜索效率, 而且能够减轻预警系统负担, 提高其多目标处理能力。本文中的弹道预报等采用了较简单方法, 但提出的小窗口监视空域模型适用于其他更精确的预报方法和精度分析。

参考文献

[1] Barton D K. Modern Radar System Analysis[M]. Norwood:

Artech House, 1989: 315 – 319.

- [2] Billetter D R. Multifunction Array Radar[M]. Norwood: Artech House, 1989: 71 – 77.
- [3] 陈明辉. 弹道导弹防御相控阵雷达欺骗干扰效果仿真与评估研究[D]. [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学研究生院., 2003.
- [4] 张光义, 王德纯. 弹道导弹防御系统中的预警探测雷达[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(5): 39 – 47.
- [5] Environmental impact statement-operation of the PAVE PAWS Radar System at Otis Airforce Base. 1979, AD-A069200: A-3.
- [6] 库勃里亚诺夫. 电子战系统导论[M]. 南京: 信息产业部第十四研究所, 1999: 509 – 510.
- [7] Billam E R. Design and performance considerations in modern phased array radar[A]. IEE Radar Conf, London, 1982: 15 – 19.
- [8] Billam E R. The problem of time in phased array radar[A]. IEE Radar Conf, Edinburgh, 1997: 563 – 567.
- [9] 张钧屏, 方艾里, 万志龙. 对地观测与对空监视[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 97 – 98.
- [10] 温羨岍, 刘谭军. 地地战术弹道导弹(TBM)弹道及落点预报[J]. 现代防御技术, 1997(1): 1 – 10.
- [11] 王正明, 易东云. 测量数据建模与参数估计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996: 370 – 378.
- [12] 张毅, 杨辉耀, 李俊莉. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 207 – 216.
- [13] 周颖, 王雪松, 王国玉. 相控阵雷达最优波位编排的边界约束算法研究[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 997 – 1000.
- [14] P.J. 卡里拉斯. 电扫描雷达系统设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 132 – 133.

周颖: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为雷达电子战仿真与评估、目标识别, 发表论文 20 余篇。

王雪松: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新体制雷达信号处理、雷达电子战仿真与评估, 发表论文 130 余篇。

冯德军: 男, 1972年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、目标识别, 发表论文 20 余篇。

丹梅: 女, 1974年生, 讲师, 研究方向为雷达电子战仿真与评估, 发表论文 10 余篇。