

# 机载预警雷达电磁波传播多径效应研究

刘波<sup>1</sup>, 郑帆<sup>2</sup>, 刘宝泉<sup>3</sup>

- (1. 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076;
2. 南京科瑞达电子装备有限责任公司, 江苏南京 211100;
3. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

**摘要:** 机载预警雷达覆盖方位广、平台远离地面,和地面雷达相比,电磁波传输多径效应与地面雷达地面相比更为严重,空域覆盖特别是低空与自由空间差异大。本文依据电波传播的基本理论,研究了不同极化、不同高度、不同发射频率和不同地表类型时多径效应对机载预警雷达空域覆盖的影响,并基于电磁波反射、传输理论阐明了仿真结果中的变化规律,为机载预警雷达设计提供指导和依据。最后,给出了利用不同发射频率和不同极化,空域覆盖受多径效应影响的差异性,进行协同探测增强雷达探测性能的结论。

**关键词:** 机载预警雷达; 空域覆盖; 多径效应; 协同探测

中图分类号: TN957; TN959.73 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2022)03-0272-09

## Study on the Multipath Effect of the Radio Wave Propagation About the Early Warning Radar

LIU Bo<sup>1</sup>, ZHENG Fan<sup>2</sup>, LIU Baoquan<sup>3</sup>

- (1. *Science and Technology on Complex Aviation Systems Simulation Laboratory, Beijing 100076, China;*
2. *Nanjing Corad Electronic Equipment Co., Ltd, Nanjing 211100, China;*
3. *The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)*

**Abstract:** Because of wide coverage in azimuth and high altitude from the ground, the multipath effect of airborne radar is usually more serious than ground radar. In this paper, the effects of multipath on airborne early warning radar airspace coverage under different polarizations, different altitudes, different radio frequencies and different earth surfaces are researched by the theory of the wave propagation. Based on the simulation results, the variation laws are obtained. Finally, the differences of the radar coverages under different radio frequencies and different polarizations are presented. The result of cooperative detection shows the improved performance of radar detection.

**Key words:** airborne early warning radar; airspace coverage; multipath effect; cooperative detection

## 0 引言

在机载雷达系统设计中,雷达的空域覆盖是表征雷达性能的一个重要指标。它能清晰、形象地描述雷达在不同空域的最大作用距离,协助优化雷达的系统设计。然而,准确的仿真机载雷达的空域覆盖范围是非常困难的,机载雷达的探测距离相对较远,电磁波在远距离传输过程中受影响的因素很多,例如大气密度随高度引起的折射率变化、不同类型的天气状况、不同类型的地表对

电磁波的反射、散射等<sup>[1-3]</sup>。这些均会影响电磁波的传输从而影响雷达的空域覆盖,特别是地表面反射的影响。直达波和反射波的叠加使雷达的空域覆盖范围在空域上产生起伏,对雷达的探测影响很大。因此,研究机载雷达的多径效应,对雷达系统的设计和优化具有指导意义。

## 1 机载雷达电磁波地面散射建模

电磁波在均匀介质中沿直线传播的,然而实际地球的大气层并非均匀介质,通常可以把地球的大气层分为3个部分:对流层、平流层和电离

层<sup>[4]</sup>。对流层的高度约为0~30 km,空气的密度随高度的升高而降低,因此,电磁波在传输的过程中会产生折射(向下弯曲)现象。在本文的仿真中,采用等效地球半径(4/3 倍的地球半径)的方法研究对流层大气折射对电波传播的影响,平流层和电离层的影响暂不考虑。

电磁波在大气中传播,由于空气的密度随高度的升高而降低,所以实际的电波并非沿直线传播。为了满足电波的直线传播条件,通常采用等效地球半径的模型<sup>[4]</sup>。在建立空域覆盖范围的研究模型时,首先确定直达波,然后根据直达波计算反射波的幅值和相位,最后将这两种电波进行矢量叠加,确定电磁波能量的空间分布,进而确定雷达的空域覆盖范围。

图1给出了雷达空域覆盖范围的示意图,图中 $R_d$ 为直达波, $R_1$ 和 $R_2$ 为反射波,直达波和反射波在空间进行矢量叠加,决定了雷达的空域覆盖范围<sup>[5]</sup>。实际的雷达探测过程中,反射波不仅仅只有一条,但是经过多次反射形成的反射波能量相对较小,在研究多径效应影响时,通常只考虑反射最强的一条反射波。

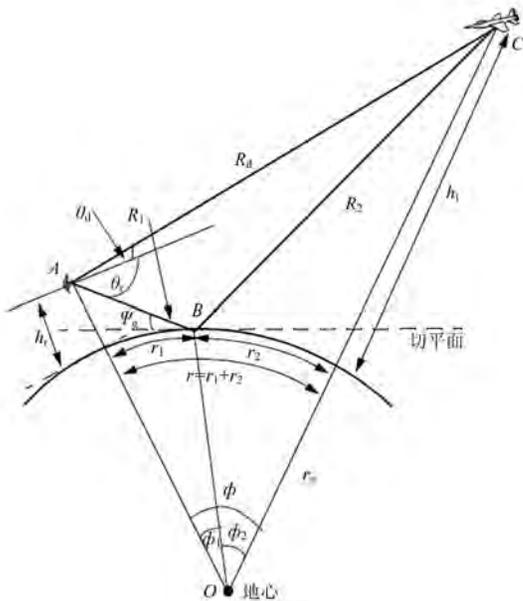


图1 机载预警雷达多径对空域覆盖的影响

研究多径效应对雷达空域覆盖范围的影响中,需要计算出反射波的幅值和相位。因此,仿真过程中两个关键参数有待确定:1)反射点的位置;2)地面的反射系数。由反射点的位置能计算出 $R_1$ 和 $R_2$ 的长度,进一步确定反射波的相位。由地面

的反射系数可以计算出反射波的幅值。

### 1.1 散射点位置建模

如果雷达和目标的距离比较近,地面可以近似看成平面,利用镜像原理可以比较容易求出反射点的位置。但是,在机载条件下,雷达探测距离较远,此时地球表面曲率对反射的影响就凸显出来,如图1所示。镜像原理在此处依然适用,但是反射面为反射点的切平面。根据文献[2],散射点的位置由如下的三次方程求解得到:

$$2r_1^3 - 3rr_1^2 + [r^2 - 2r_e(h_r + h_t)]r_1 + 2r_e h_r r = 0 \quad (1)$$

式中, $h_r$ 为雷达到地面的高度, $h_t$ 为目标位置点到地面的高度, $r_e$ 为地球的等效半径, $r$ 为雷达和目标之间对应地球表面的弧长, $r_1$ 为雷达和反射点之间对应地球表面的弧长。

散射点位置可以解出为

$$r_1 = r/2 - p \sin(\xi/3) \quad (2)$$

式中, $r = r_1 + r_2$ ,  $p = (2/\sqrt{3})\sqrt{r_e(h_r + h_t) + (r/2)^2}$ ,  $\xi = \sin^{-1}[2r_e r(h_t - h_r)/p^3]$ 。

根据弧长 $r_1$ 和 $r_2$ 确定对应地心角 $\Phi_1$ 和 $\Phi_2$ 。由图中的三角关系可以计算出反射波的路径长度 $R_1$ , $R_2$ 和直达波路径长度 $R_d$ :

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{r_e^2 + (r_e + h_r)^2 - 2r_e(r_e + h_r)\cos\Phi_1} \\ R_2 = \sqrt{r_e^2 + (r_e + h_t)^2 - 2r_e(r_e + h_t)\cos\Phi_2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{h_r^2 + 4r_e(r_e + h_r)\sin^2(\frac{\Phi_1}{2})} \\ R_2 = \sqrt{h_t^2 + 4r_e(r_e + h_t)\sin^2(\frac{\Phi_2}{2})} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_d = \sqrt{(h_r - h_t)^2 + 4(r_e + h_t)(r_e + h_r)\sin^2(\frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2})} \quad (5)$$

因此,两条路径的路径差为

$$\Delta R = R_1 + R_2 - R_d \quad (6)$$

此时,两条路径之间的相位差为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta R \quad (7)$$

### 1.2 地面散射系数建模

散射波幅值的大小由反射系数确定。机载条

件下地球表面的散射不仅需要考虑到镜向反射,同时还需要考虑粗糙表面的散射和地球曲率引起的扩散,因此总散射系数可以表示为

$$\Gamma_t = \Gamma_{(H,V)} \times S_r \times D \quad (8)$$

式中:  $\Gamma_{(H,V)}$  是平面的镜向反射系数,反射系数和电磁波的极化有关,H 为水平极化,V 为垂直极化; $D$  是扩散因子,由于此时的反射面是凸起的球面,根据射线光学<sup>[6]</sup>,电磁波将被发射,发散的程度跟地球的半径和入射的擦地角等因素相关; $S_r$  是粗糙面对平面反射的影响系数,由地面的随机起伏导致的漫反射,跟电磁波的波长和地面的起伏强度等因素相关,为了计算出地面的散射系数,需要分别计算这三个部分。

平面的镜向反射系数如下所示,式(9)为水平极化的镜向反射系数,式(10)为垂直极化的镜向反射系数<sup>[6]</sup>。

$$\Gamma_H = \frac{\sin\Psi_g - \sqrt{\epsilon - (\cos\Psi_g)^2}}{\sin\Psi_g + \sqrt{\epsilon - (\cos\Psi_g)^2}} \quad (9)$$

$$\Gamma_V = \frac{\epsilon \sin\Psi_g - \sqrt{\epsilon - (\cos\Psi_g)^2}}{\epsilon \sin\Psi_g + \sqrt{\epsilon - (\cos\Psi_g)^2}} \quad (10)$$

式中,  $\Psi_g$  为擦地角,  $\epsilon$  为地面的介电常数。

实际的地球表面是随机粗糙面,如图 2 所示。图中给出了平面和不同程度粗糙面反射、散射差异的示意图。反射面的粗糙程度越大,散射越强。粗糙面对反射系数的影响用参数  $S_r$  表示<sup>[7]</sup>:

$$S_r = \exp\left(-2\left(\frac{2\pi\sigma \sin\Psi_g}{\lambda}\right)^2\right) \quad (11)$$

式中:  $\sigma$  为粗糙面的均方根高度,表明地球表面的起伏程度;  $\Psi_g$  为擦地角;  $\lambda$  为入射电磁波的波长,波长越短,地面散射越大。

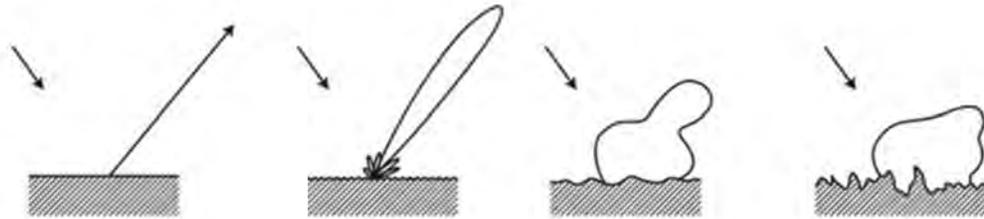


图 2 镜面反射和粗糙面反射差异示意图

由于地球表面是球形的,电磁波在发生反射的同时也会由于曲率而出现发散的现象,如图 3 所示。发散因子  $D$  的表达式如下所示<sup>[7]</sup>:

$$D = \sqrt{\frac{r r_e \sin\Psi_g}{[(2r_1 r_2 / \cos\Psi_g) + r r_e \sin\Psi_g] (1 + h_r / r_e) (1 + h_t / r_e)}} \quad (12)$$

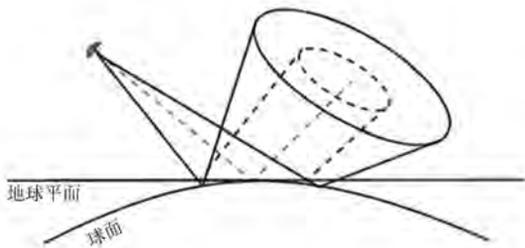


图 3 电波传播发射示意图

地球表面的总反射系数  $\Gamma_t$  由上述三个参数确定后,可以计算出反射波的幅值。由直达波和反射波的矢量叠加,可以计算出多径效应对雷达空域覆盖范围的影响。通常采用方向图传播因子  $F$

表示多径效应的影响。 $F$  的表达式为

$$F = \left| \frac{E_d}{E_d + E_i} \right| = \left| 1 + \Gamma_t \exp(j \frac{\Delta R}{k}) \right| \quad (13)$$

式中,  $E_d$  为直达波的电场,  $E_i$  为反射波的电场。

雷达探测距离受反射波的影响可以修正为<sup>[7]</sup>

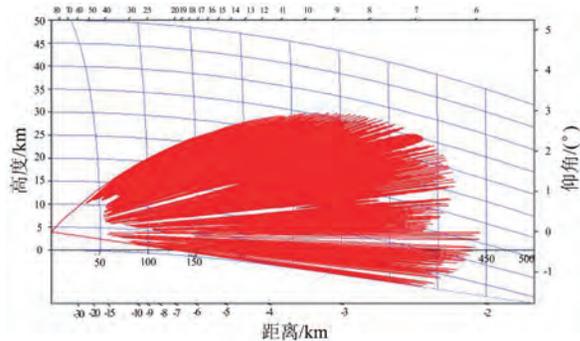
$$R_{\max} = \left[ \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi k T_0 B_n F_n D_0} F^4 \right]^{1/4} \quad (14)$$

## 2 不同变量多径效应分析

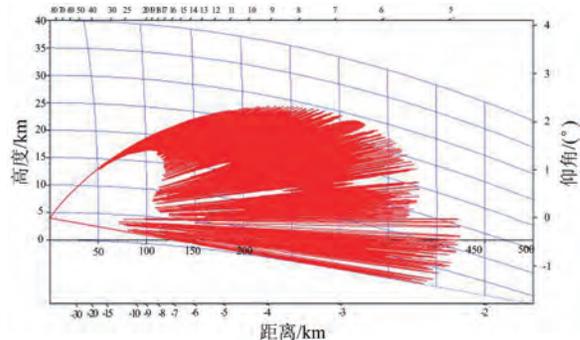
### 2.1 雷达不同海拔高度的多径效应分析

图 4~图 6 仿真了发射频率为 500 MHz 时不同高度、不同极化的雷达空域覆盖。仿真时设置地面的海拔高度均为 1000 m,机载雷达的海拔高度分别为 4000 m、5000 m 和 6000 m。天线的俯仰向波束宽度为  $10^\circ$ ,地球表面的起伏均方根高度为 1 m。考虑多径效应时,两种极化的空域覆盖结果如图所示。其中,HH 极化为电磁波的电场方向平行于水平面,VV 极化为电磁波的电场方向垂

直于水平面。

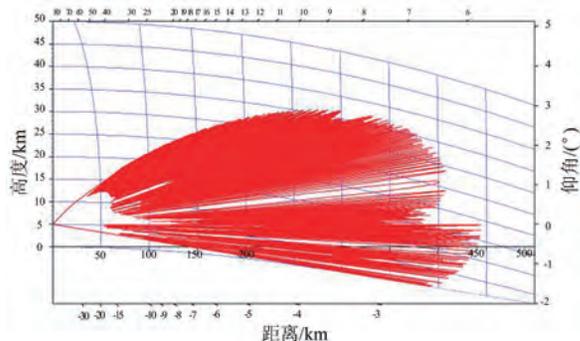


(a) HH 极化

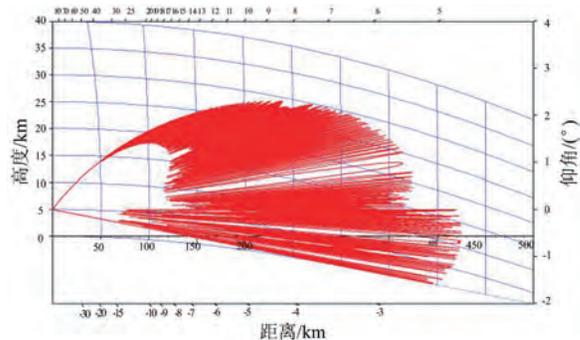


(b) VV 极化

图4 机载雷达海拔高度4000 m



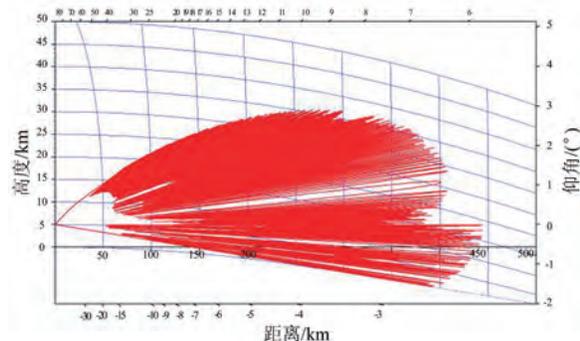
(a) HH 极化



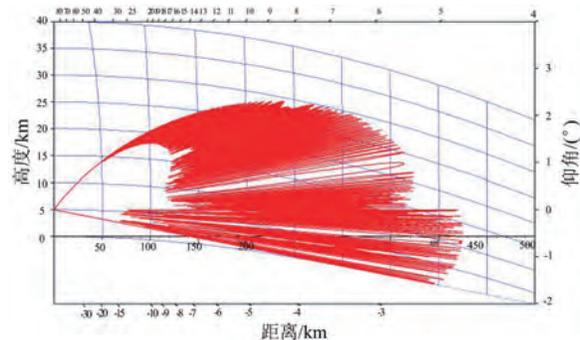
(b) VV 极化

图5 机载雷达海拔高度5000 m

由仿真结果可以看出,受多径效应的影响,雷



(a) HH 极化



(b) VV 极化

图6 机载雷达海拔高度6000 m

达的空域覆盖在不同高度范围呈现增强和减弱。这种效应与直达波和反射波的相位差有关,当相位差为半波长的偶数倍时,干涉相长,雷达的探测距离增大;当相位差为半波长的奇数倍时,干涉相消,雷达的探测距离减小。当相位差为其他值时,雷达的探测距离介于最大和最小值之间<sup>[8-9]</sup>。所以,雷达的空域覆盖范围在空间分布中呈现强、弱起伏分布。

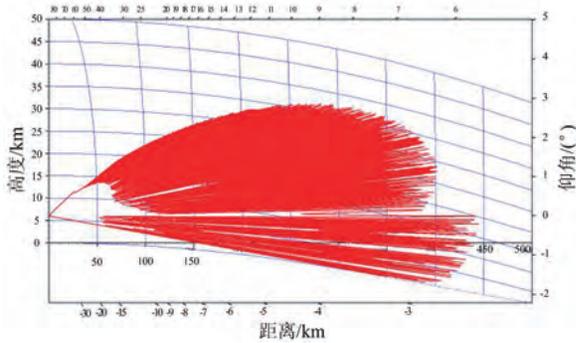
比较不同极化雷达的空域覆盖时,发现 HH 极化雷达的最大探测距离大于 VV 极化雷达,主要原因是雷达的最大探测距离由直达波和反射波相干叠加所决定。根据式(9)和式(10),HH 极化的镜向反射系数大于 VV 极化的镜像反射系数,所以,叠加后 HH 极化电波的总能量大于 VV 极化。另一方面,VV 极化的多径效应相对于 HH 极化小,测高性能较好。

当机载雷达处于不同海拔高度时,雷达空域覆盖的高度随海拔高度的升高而减小。原因是随着雷达高度的升高,直达波和反射波叠加时,反射波的传输距离增大,传输路径损耗也随之增加,探测距离将有所减小。多径效应的影响另一个表现是空域覆盖的空间起伏上,雷达的海拔高度越高,

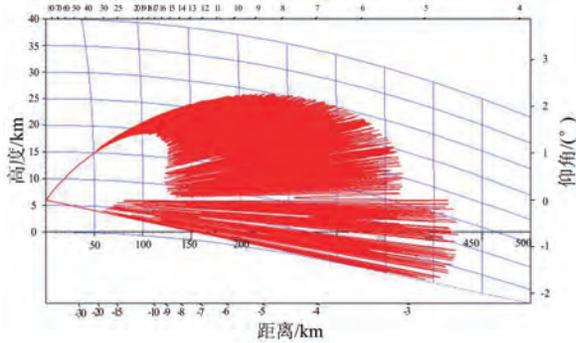
空域覆盖的起伏特性越明显(多径效应的影响越大)。主要原因是当雷达的海拔高度增大,波束照射到地面的面积也增大,将会有更多的反射波与直达波矢量叠加影响雷达的空域覆盖。

### 2.2 雷达不同发射频率的多径效应分析

图 7~图 9 仿真了雷达发射频率分别为 500 MHz(P 波段)、1.2 GHz(L 波段)和 3 GHz(S 波段)时雷达 HH 极化和 VV 极化的空域覆盖范围。仿真时,假定雷达天线阵面的物理口径一致,天线阵子按照半波长的间隔排布。P 波段的波束宽度为  $10^\circ$ ,根据理论公式折算出 L 波段和 S 波段的的天线阵面波束宽度分别为  $4.2^\circ$ 和  $1.7^\circ$ 。地面的海拔

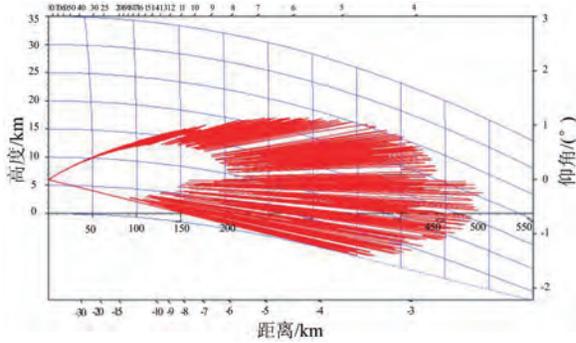


(a) HH 极化

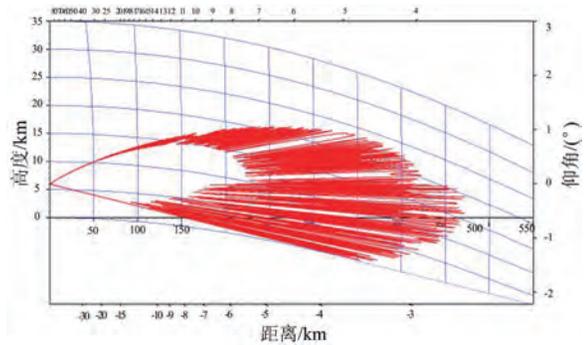


(b) VV 极化

图 7 机载雷达发射频率 500 MHz

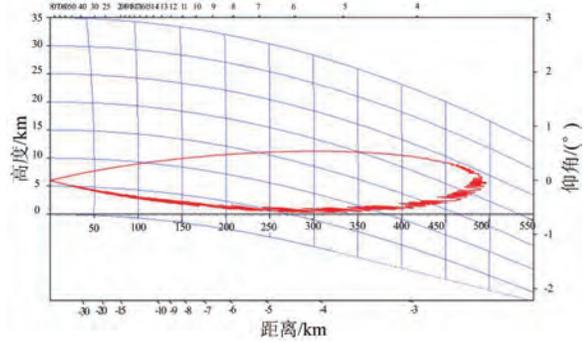


(a) HH 极化

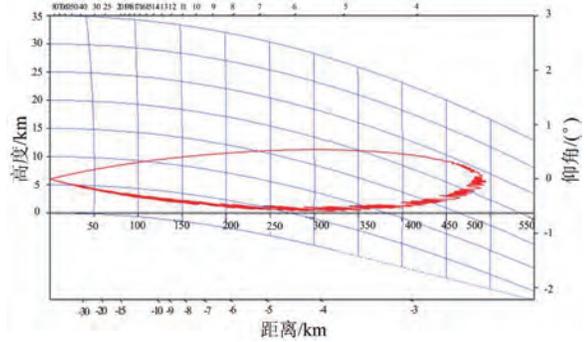


(b) VV 极化

图 8 机载雷达发射频率 1.2 GHz



(a) HH 极化



(b) VV 极化

图 9 机载雷达发射频率 3.0 GHz

高度均为 1 000 m,起伏的均方根高度为 1 m。机载雷达的海拔高度均为 6 000 m。

由上述仿真结果,可以发现随着发射频率的增大,雷达多径效应对空域覆盖范围的影响逐渐减小。当发射频率为 3 GHz 时,多径对雷达空域覆盖的影响已经很小,如图所示,主要是两方面的原因:

- 1) 雷达的发射频率增大后,首先波束宽度变窄,被反射的波束范围也相对较小,形成的反射波较少。所以,多径效应对空域覆盖范围的影响随之减少。
- 2) 当雷达的发射频率增大(波长变小)时,地

球的粗糙面散射增强,镜面反射减小(公式(11))。多径效应中镜面反射是影响雷达空域覆盖的主要因素,所以,多径效应对空域覆盖范围的影响也随之减少。

同时,由仿真结果可以看出随着雷达发射频率的增大,雷达的最大探测距离也随之增加(对于某 RCS 确定的目标,如  $20 \text{ m}^2$  目标),主要是天线波束变窄,天线的增益变大。

进一步,对地基雷达的空域覆盖范围进行仿真并与机载雷达进行比较。仿真时地面的海拔高度设置为  $1000 \text{ m}$ ,雷达一般会放置在地势较高的阵地,假设雷达与地面的高度为  $50 \text{ m}$ ,雷达仰角设置为  $2^\circ$ ,波束的  $3 \text{ dB}$  宽带为  $1.7^\circ$ (与上图机载雷达发射频率  $3.0 \text{ GHz}$  波形参数相当),仿真结果如图 10 所示。

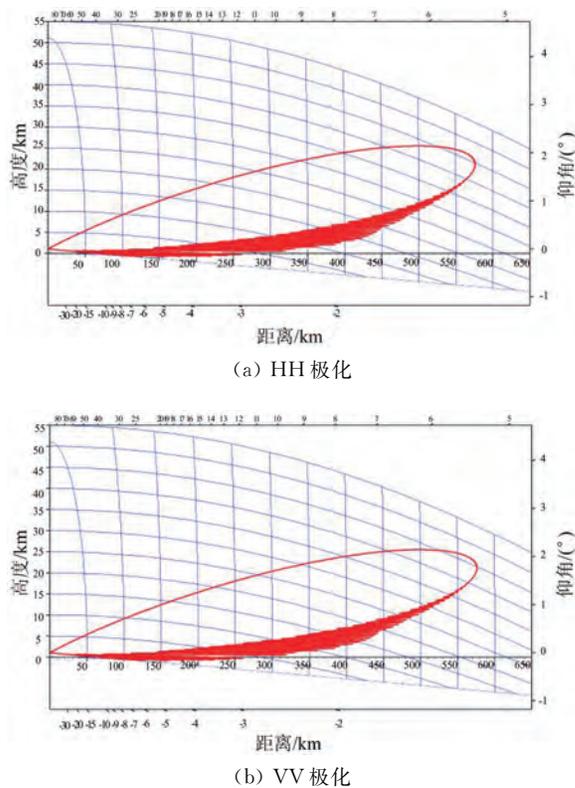
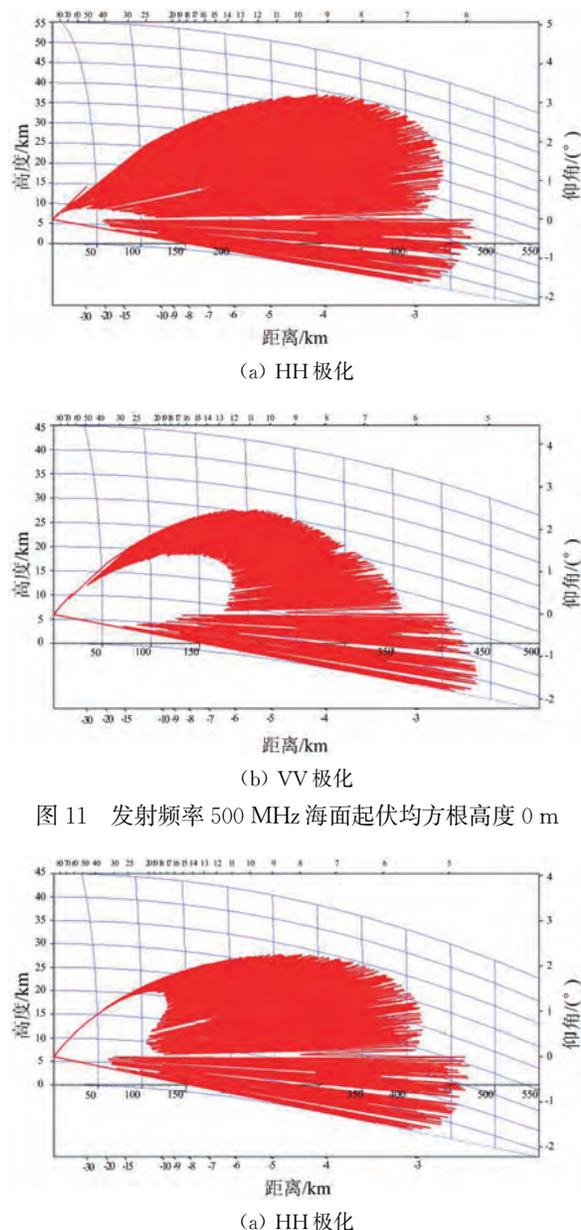


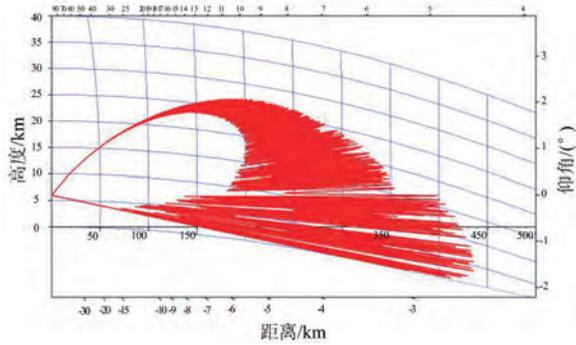
图 10 地基雷达发射频率  $3.0 \text{ GHz}$

根据仿真结果可知,雷达的空域覆盖范围与机载雷达的变化规律基本一致,HH 极化的多径效应要强于 VV 极化;与机载雷达有所不同的是,多径效应对空域覆盖范围的影响主要针对空域的下半部分,如图 10 所示。主要是因为地基雷达离地面的距离很近,反射波的擦地角将会很小,所以,多径反射波中的大部分只能影响空域的下半部分。

### 2.3 海面不同高度起伏的多径效应分析

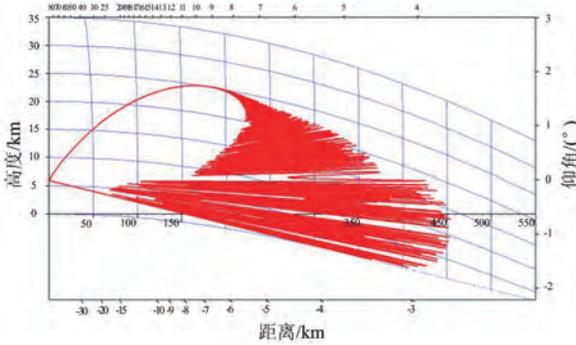
图 11~图 19 仿真了机载雷达在海面时空域覆盖范围随雷达发射频率和海面高度起伏的变化规律。图 11~图 13 仿真了雷达发射频率为  $500 \text{ MHz}$ ,海面起伏均方根高度分别为  $0 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m}$  和  $5 \text{ m}$  时的空域覆盖范围。与地面相比,海面的空域覆盖范围受电磁波极化影响更大,HH 极化时,上半空域雷达的最大作用距离明显大于 VV 极化,主要原因是海面的介电常数大于地面,同时存在较大的虚部。介电常数模值影响反射系数的模值,虚部影响反射相位。同时,VV 极化的反射系数受介电常数的影响大于



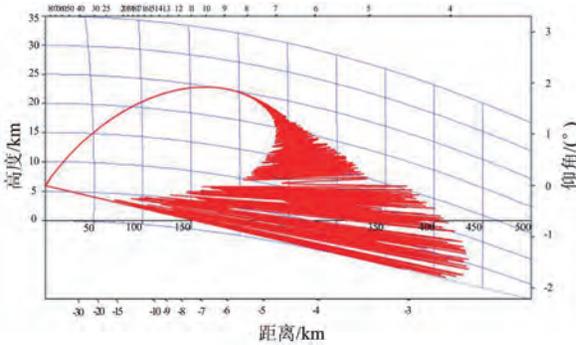


(b) VV 极化

图 12 发射频率 500 MHz 海面起伏均方根高度 2 m



(a) HH 极化



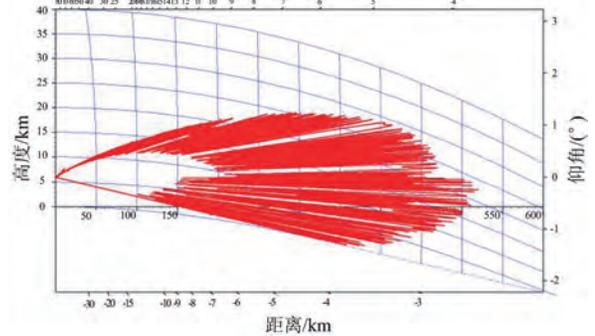
(b) VV 极化

图 13 发射频率 500 MHz 海面起伏均方根高度 5 m

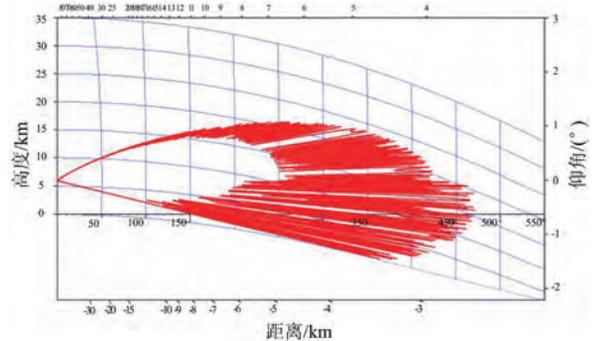
HH 极化(式(9)和式(10)所示)。所以两种极化的空域覆盖范围具有差异并且海面的差异大于地面<sup>[10]</sup>。

海面起伏均方根高度对应不同的海浪起伏,均方根高度越大,表示海面的海浪也越大,此时海面对电磁波的散射增强,平面的镜向反射减弱<sup>[11]</sup>。如图 13 所示,在空域覆盖的上半部分,当海面的均方根高度为 5 m 时空域覆盖范围没有起伏,说明此时雷达反射波中大部分被散射,与直达波叠加的反射波很小。而在雷达空域覆盖的下半部分,由于反射波的擦地角减小,散射特性减弱(式(11)),空域覆盖范围又出现了起伏特性。

图 14~图 16 仿真了 L 波段的空域覆盖结果,此时雷达的波束宽度为  $4.2^\circ$ 。由于波束宽度较小,雷达照射到海面的范围也比较小,被反射的电

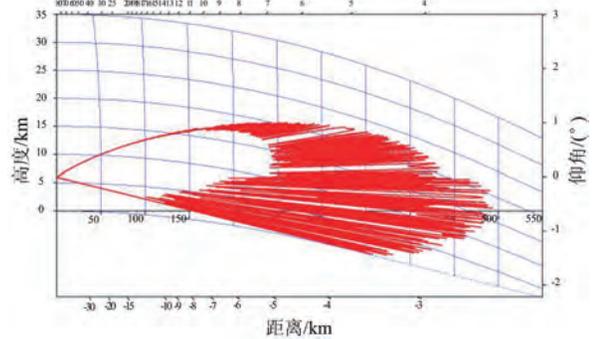


(a) HH 极化

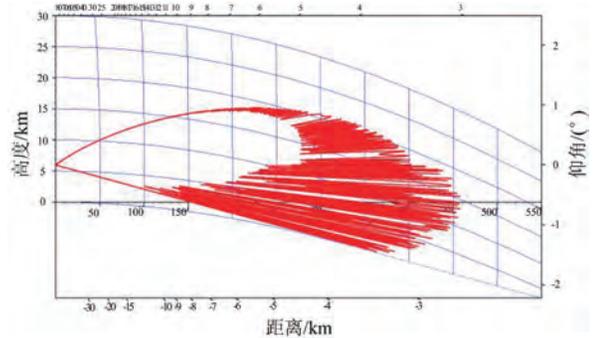


(b) VV 极化

图 14 发射频率 1.2 GHz 海面起伏均方根高度 0 m

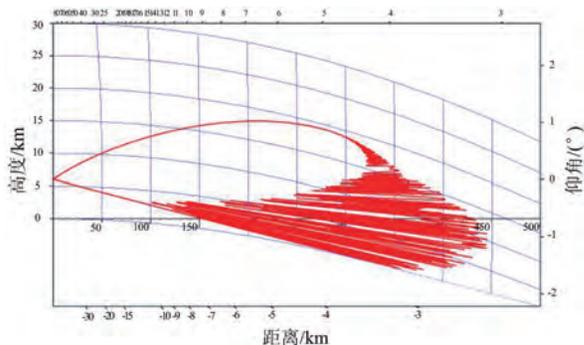


(a) HH 极化

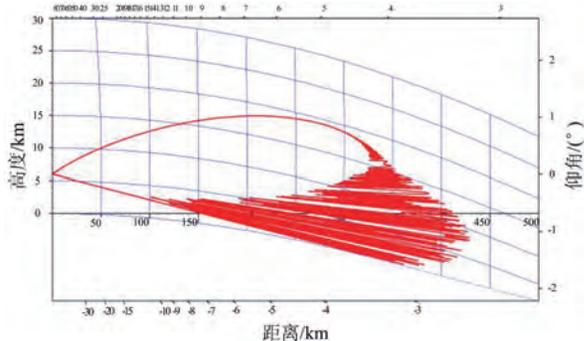


(b) VV 极化

图 15 发射频率 1.2 GHz 海面起伏均方根高度 2 m



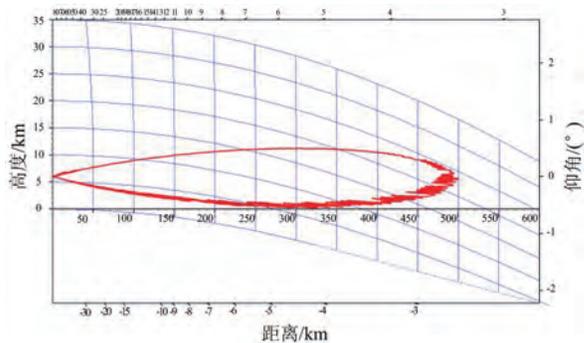
(a) HH 极化



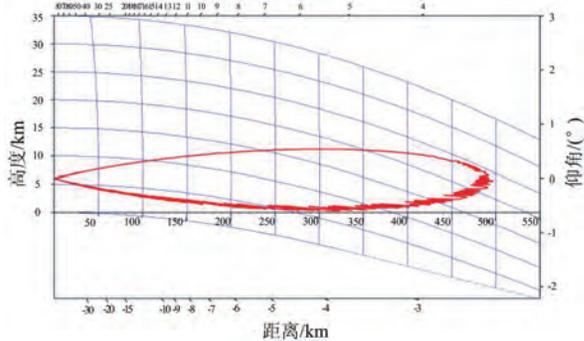
(b) VV 极化

图 16 发射频率 1.2 GHz 海面起伏均方根高度 5 m 磁波也较少,因此不同极化条件下空域覆盖范围的差异性比 P 波段的小。海面起伏均方根高度对空域覆盖范围的影响与 P 波段的规律基本一致。

图 17~图 19 仿真了 S 波段机载雷达在海面

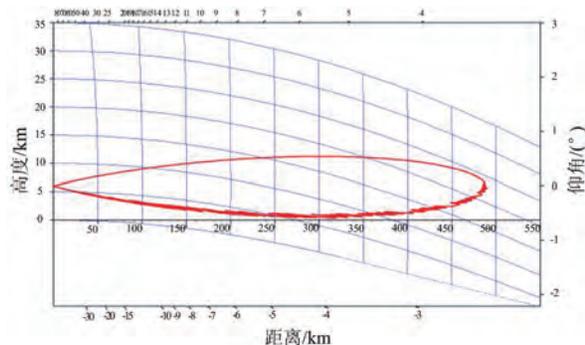


(a) HH 极化

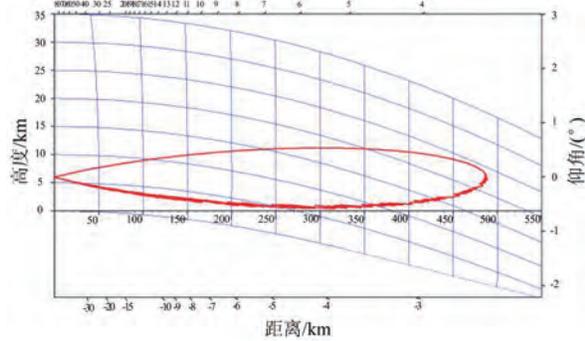


(b) VV 极化

图 17 发射频率 3.0 GHz 海面起伏均方根高度 0 m

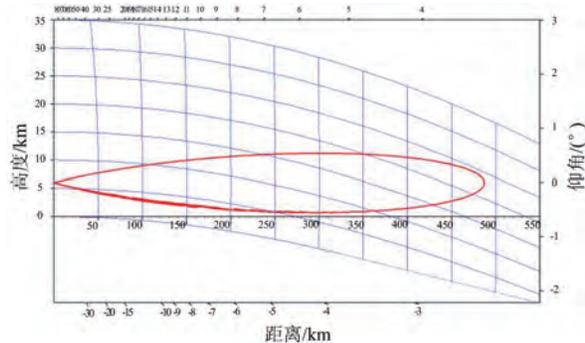


(a) HH 极化

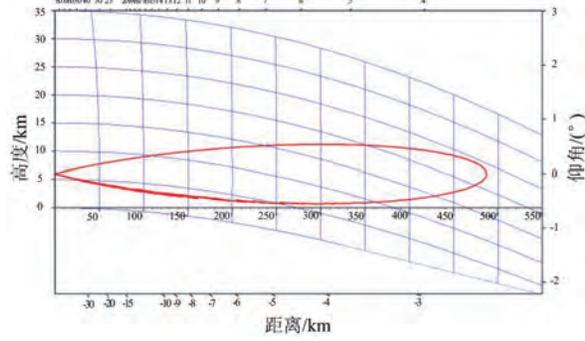


(b) VV 极化

图 18 发射频率 3.0 GHz 海面起伏均方根高度 2 m



(a) HH 极化



(b) VV 极化

图 19 发射频率 3.0 GHz 海面起伏均方根高度 5 m 上的空域覆盖范围,雷达的波束宽度为 1.7°。仿真结果与雷达在地面上空的一致,几乎没有多径效应的影响,并且海面起伏均方根高度越大,受多径效应的影响越小。

### 3 机载雷达系统设计思考

上文仿真、分析了不同发射频率、不同高度、不同极化和不同地面类型雷达空域范围受多径效应的影响。P波段空域覆盖的起伏特性最明显,L波段次之,S波段受影响很小。在设计雷达系统时,考虑到多径效应的影响可以采用两种或者多种波形相互配合,增强雷达探测性能。利用一个波形相长干涉的特性增大了雷达的探测距离,同时采用另一个波形对相消干涉的空域部分进行空域补偿。

针对雷达远距离探测的威力和测高精度的问题,由于VV极化多径效应较HH极化弱,可以根据极化间的差异特性,采用两种极化协同的方法,采用HH极化雷达进行远距离探测、采用VV极化雷达进行高精度测高,两部雷达相互协同,增强雷达的探测性能。

### 4 结束语

本文基于电波传播理论仿真了雷达空域覆盖范围受多径效应的影响,研究了雷达处于不同海拔高度、不同发射频率和不同地表类型雷达空域覆盖范围的变化规律。仿真结果和理论分析发现:HH的反射系数大于VV极化,所以HH极化时雷达最大探测距离大于VV极化。机载雷达海拔高度越大,路径损耗越大,雷达最大探测距离随海拔高度的增大而减小。机载雷达所处的海拔高度越高,雷达波束的地面投影越大,多径效应引起的空域覆盖范围的起伏特性越显著。发射频率越高,波束越窄,地面镜向反射系数越小(散射系数越大),地面反射波对直达波的影响越小。海面的介电常数远大于地面,所以不同极化之间的差异较大。海面的起伏均方根高度越大,镜向反射系数越小(散射系数越大),反射波对直达波的影响越小。最后,分析了不同发射频率受多径效应影响对空域覆盖范围的影响,采用低频和高频相互配合的方法,增强雷达的探测性能。同时,针对不

同极化雷达的差异性较大的特点,分析了采用极化间协同,提高雷达探测威力的同时增强雷达的测高精度。

#### 参考文献:

- [1] 肖景明,王元坤. 电波传播工程计算[M]. 西安:西安电子科技大学,1989.
- [2] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 5版. 北京:电子工业出版社,2014.
- [4] MAHAFZA B R. 雷达系统分析与设计[M]. 3版. 北京:电子工业出版社,2016.
- [5] 陆鹏程,江胜利,同伟. 米波雷达应对多路径效应的系统设计[J]. 雷达科学与技术,2018,16(3):256-260.  
LU Pengcheng, JIANG Shengli, TONG Wei. VHF Radar Designing Analysis Dealing with Multipath Effect[J]. Radar Science and Technology, 2018, 16(3):256-260. (in Chinese)
- [6] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学,1994.
- [7] MAHAFZA B R. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab[M]. Alabama: COLSA Corporation Huntsville, 2000.
- [8] 汪安戈,胡国平,周豪. 雷达多径效应抑制技术分析 & 展望[J]. 火力与指挥控制,2019,44(5):12-16.
- [9] 史鉴,钟文. 多路径效应对侦察测向的影响[J]. 舰船电子对抗,2019,42(3):26-29.
- [10] 李海军,王天然. 海面环境对导弹雷达多径效应的影响及仿真分析[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(1):85-89.
- [11] 邓恩民,刘冬利,隋波,等. 复合多径效应下舰载雷达探测性能分析[J]. 指挥控制与仿真,2021,43(3):40-44.

#### 作者简介:



刘波男,1974年5月出生,博士,高级工程师,中国电子学会高级会员,主要从事雷达系统论证和试验方面的研究工作。