

戴幻尧, 王建路, 周波, 等. 天线罩对抛物面单脉冲天线极化特性的影响机理和仿真分析[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 604-610. DOI: 10.13443/j.cjors.2015071301

DAI H Y, WANG J L, ZHOU B, et al. Simulation and analysis of radome influence on monopulse antenna polarization characteristic[J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(3): 604-610. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2015071301

天线罩对抛物面单脉冲天线极化特性的 影响机理和仿真分析

戴幻尧¹ 王建路¹ 周波¹ 莫翠琼² 王正² 张学成³

(1. 电子信息系统复杂电磁环境国家重点实验室, 洛阳 471003; 2. 电子工程学院, 合肥 230037;
3. 总装驻上海地区军代室, 上海 201109)

摘 要 单脉冲定向技术是目前最准确的电子定向技术之一, 被广泛应用于微波毫米波跟踪、监视、通信、测量、天文观测等系统. 为了保护雷达天线免受环境的影响, 许多单脉冲天线都采用天线罩, 这会对单脉冲天线方向图的极化结构产生影响, 另外, 有意的电子欺骗干扰如交叉极化干扰会对定向性能产生较大影响. 文章以雷达导引头普遍采用的 X 波段抛物反射面幅度比较单脉冲天线为对象, 分析了抛物面结构、初级馈源特性、天线罩引起交叉极化分量的机理, 建立了典型物理参数下的计算模型, 在 Ludwig 第三定义下对加入天线罩前后单脉冲天线交叉极化特性进行仿真, 综合考虑了天线几何形状、偏置结构、天线扫描等因素对极化特性的影响. 结果表明: 多种因素会引起单脉冲天线显著的去极化效应, 复杂的方向图极化结构使得单脉冲雷达导引头的定向精度敏感于电波极化方式, 这为进一步开展交叉极化对抗单脉冲跟踪技术研究提供了重要理论基础.

关键词 单脉冲; 天线罩; 去极化效应; 交叉极化干扰

中图分类号 TN95

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)03-0604-07

DOI 10.13443/j.cjors.2015071301

Simulation and analysis of radome influence on monopulse antenna polarization characteristic

DAI Huanyao¹ WANG Jianlu¹ ZHOU Bo¹ MO Cuiqiong²
WANG Zheng² ZHANG Xuecheng³

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and
Information System, Luoyang 471003, China; 2. Electronic Engineering Institution, Hefei 230037, China;
3. Military Representative office in Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract Monopulse antenna is one of the most exact electronic directional technologies now, and it is extensively used in microwave and millimeter wave tracking, surveillance, communication, measurement and astronomical system. However, in order to protect the radar antenna from environmental influence, lots of monopulse antennas all use radome, which seriously affects on antenna polarization characteristic. In addition, intentional electronic deception jamming such as cross polarization jamming has great impact on the directional performance of monopulse radar. Taking the commonly used amplitude compari-

收稿日期: 2015-07-13

资助项目: 国家自然科学基金(61201236)

联系人: 戴幻尧 E-mail: leoneast@163.com

son monopulse antenna of X band radar seeker as the object, the mechanism of structure, characteristics, primary source of paraboloid radome which induces cross polarization is studied. Calculation model with typical physical parameters is established. The cross polarization characteristics of monopulse antenna with radome under Ludwig III definition is simulated. Some key factors such as antenna geometry structure, offset angle, antenna scanning is considered. Simulation results show that, many factors may cause the significant depolarization effect, while the complex polarization pattern structure make orientation accuracy of radar seek sensitive to the polarization of waves. This study provides an important theoretical basis for ECM and ECCM technology studies in monopulse tracking area.

Keywords monopulse; antenna radome; depolarization effect; cross-polarization jamming

引言

随着导弹、火箭、人造卫星和宇航技术的发展,对跟踪雷达的跟踪速度、跟踪精度、跟踪距离和抗干扰能力都提出了越来越高的要求^[1]. 由于采用同时比较波瓣法的单脉冲雷达在技术上的先进性及精度上的优势,使得单脉冲跟踪已逐步取代圆锥扫描跟踪而获得了广泛的应用^[2]. 天线罩是导弹、飞机等飞行器上的关键部件之一,常安装在飞行器前部用于保护雷达天线. 理想的天线罩不应该影响雷达天线的辐射性能,但实际的天线罩不可避免地会引起天线辐射方向图的畸变. 对单脉冲雷达系统,天线罩不仅会引起单脉冲天线波束增益的下降,还会产生其它一些不利影响,例如瞄准误差和去极化效应等. 其中,由天线罩引起的去极化效应是影响雷达定向性能的关键原因之一,文献[3-4]就研究了不同极化信号以一定角度入射时引起的定向误差,但是缺乏定性和定量的分析,难以得到足够的实验结论支撑单脉冲定向精度与各种耦合因素的依赖关系. 因此有必要深入研究和分析天线罩对单脉冲雷达天线引起的去极化效应机理以及影响程度. 交叉极化干扰是一种新型的精确电子攻击技术. 以美国为代表的军事强国的主流电子战装备都具备极化对抗能力,例如 Northrop Grumman 公司的“猎鹰利刃”干扰机,雷声公司的 APECS-II 舰载电子战系统以单脉冲主动雷达导引头为作战对象,具有全新的噪声/欺骗自适应交叉极化干扰样式,能同时对付 16 个目标;美军的 F-16 CD/Block60 具备极化干扰能力. 该技术巧妙地利用单脉冲雷达天线本身固有的方向图特性,对某种极化信号存在固有的角度跟踪偏差,若干扰机能够发射与雷达极化正交的干扰信号到达雷达天线,并引起雷达天线的交叉极化响应,就能形成较大的角度跟踪误差. 极化干扰的效能主要取决于雷达发射极化参数的快速测量与跟踪能力、干扰信号

极化和雷达发射极化的正交水平,以及干扰信号功率在入射方向上与目标信号功率比较的占优势程度. 本文以雷达导引头普遍采用的 X 波段抛物反射面幅度比较单脉冲天线为对象,综合考虑初级馈源、抛物面以及天线罩对极化特性影响,天线罩对于雷达天线极化特性影响进行建模和仿真计算,通过分析天线罩引起交叉极化分量的成因,为进一步研究和论证交叉极化干扰技术的可行性提供重要支撑.

1 单脉冲天线的极化特性

根据比较回波信号的幅度和相位进而获得信号到达角信息,单脉冲雷达分为幅度单脉冲、相位单脉冲和幅相单脉冲三大类. 无论是幅度还是相位单脉冲,为了确定目标在某一平面的角度(方位、俯仰),都要求同时产生两个或多个形状相同的波束. 单脉冲雷达导引头采用的天线主要有三种类型:透镜、反射器和阵列,每一大类还可分成不同的子类. 这里主要讨论常用的反射面天线.

抛物面天线系统的几何形状引起交叉极化的主要因素是馈源及反射面的曲率. 具体的,考虑一个馈源天线,假设沿 k 轴线极化,且指向反射器顶点,并分别具有 E 面和 H 面方向图 $C_E(\theta_0)$ 和 $C_H(\theta_0)$. 由图 1 所示几何结构,一般馈源产生的口径场可以求得为^[5]

$$\mathbf{E}_a = V_0 \frac{e^{-j2f}}{r_0} \{ -\mathbf{x}[C_E(\theta_0)\cos^2\phi_0 + C_H(\theta_0)\sin^2\phi_0] + y[C_E(\theta_0) - C_H(\theta_0)]\sin\phi_0\cos\phi_0 \}. \quad (1)$$

式(1)中,由于 E 面和 H 面主方向图 $C_E(\theta_0)$ 和 $C_H(\theta_0)$ 的不平衡,引起了交叉极化(也即 y 极化场分量),该口径交叉极化引起了远场交叉极化. 对式(1)的口径分布积分以求得辐射. 考虑 x 极化短电偶极子,它具有 $C_E = \cos\theta_0$ 和 $C_H = 1$,此时:

$$\mathbf{E}_a = V_0 \frac{e^{-j2f}}{r_0} \{ -\mathbf{x}[\cos\theta_0\cos^2\phi_0 + \sin^2\phi_0] -$$

$$y[1 - \cos \theta_0] \sin \phi_0 \cos \phi_0\}. \quad (2)$$

式(2)括号中的表达式可以简化为E面($\phi_0 = 0^\circ$)的 $-x \cos \theta_0$ 和H面($\phi_0 = 90^\circ$)的 $-x$. 因此,口径场极化是平行于主平面中的短振子的,而在反射过程中,口径场和反射场关系反转. 对于非主平面,场分量出现了正交于馈源场(即 y 分量)的交叉极化. 反射器的反射也有这种交叉极化.

根据 A. C. Ludwig 曾对天线交叉极化的完整描述,以三种参考极化作为主极化,得出了交叉极化的三种定义^[6]. 其中,第三定义常用于描述惠更斯源产生的极化波,交叉极化是相同的惠更斯源在孔径面上旋转 90° 后产生的极化波. 该定义最接近于天线方向图测量的实际情况,能在通常测量天线方向图的条件上测出. 按照这个定义,当被测天线和信标天线最大射束方向互相对准时,令两天线的极化互相平行,然后转动被测天线所测得的方向图即为主极化方向图 E_p ;当两天线最大射束方向互相对准时,令其极化互相垂直,然后转动被测天线所测得的方向图即为交叉极化方向图 E_q ,表达式如下:

$$E_p(\theta, \varphi) = E_\theta(\theta, \varphi) \sin \varphi u_\theta + E_\varphi(\theta, \varphi) \cos \varphi u_\varphi; \quad (3)$$

$$E_q(\theta, \varphi) = E_\theta(\theta, \varphi) \cos \varphi u_\theta - E_\varphi(\theta, \varphi) \sin \varphi u_\varphi. \quad (4)$$

式中, E_θ 和 E_φ 分别为 u_θ 和 u_φ 方向的电场分量. 利用第三定义,当参考源作 90° 旋转后,任何方向上测得的共极化场和交叉极化场也互换. 而以往对于交叉极化的研究和计算通常是在直角坐标系或者球坐标系的主轴方向,它们分别只适用于线极化波和电偶极子产生的极化波,而对于一般情况下的交叉极化,这两种定义都不够严谨,也不能完全描述清楚,因此这个最符合实际情况的第三定义被广泛采用. 根据此定义就推导出:抛物面天线即使投影口面场只有主极化分量而没有交叉极化分量,其辐射场也会产生交叉极化分量.

另外,当焦距比 F/D 增加时,最大馈电角减小,因此式(2)的第二项减小,导致交叉极化的降低. 反过来,焦距比 F/D 变小时,交叉极化增大. 在雷达导引头普遍采用单脉冲天线设计中,天线尺寸、焦距比、最大馈电角等因素要与实际配套系统指标符合进行设计,综合折衷考虑.

2 天线罩的去极化效应

2.1 天线罩模型

天线罩通常位于导弹、飞机等飞行器的最前部,

是三维复杂曲面薄壁结构,具有流线外形,似鼻锥形抛物面,孔深径小,结构大且复杂. 考虑常用的典型正切卵形罩,其几何结构如图1所示^[8].

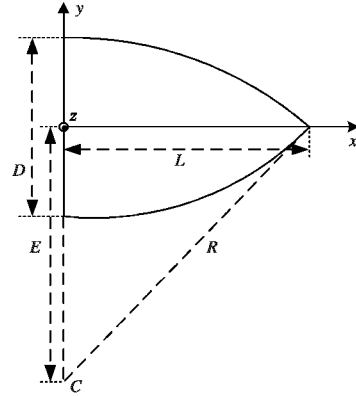


图1 正切卵形天线罩几何结构示意图

其横截面母线满足关系式:

$$(y + E)^2 + x^2 = R^2, \quad 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq D/2. \quad (5)$$

式中: D 为天线罩的底部直径; L 为天线罩的高度; R 为母线圆弧的半径; E 为母线圆弧的半径与天线罩底部半径的差值,这几个控制参数之间的关系为下式:

$$\begin{cases} E = (4L^2 - D^2)/4D, \\ R = (4L^2 + D^2)/4D, \\ D = 2(R - E), \\ L = (R^2 - E^2)^{1/2}. \end{cases} \quad (6)$$

2.2 介质平板模型

对于电大尺寸天线罩,由于罩面平均曲率半径较大,在局部范围可将天线罩壁看作近似的介质平板层,如图2所示. 当电磁波以入射角 θ_0 入射到介质层时,在入射点处,入射波相对于入射平面被分解成垂直极化分量和水平极化分量. 这样电磁波与天线罩壁的相互作用可近似为平面波与介质平板之间的作用,天线罩壁传输特性与反射特性可用传输线理论分析. 其中,反射系数,垂直极化分量和水平极化分量穿过介质层的透射系数,可由多层介质平板级联 ABCD 传输矩阵计算^[9]:

$$\begin{bmatrix} T_\perp & \Gamma_\perp \\ T_\parallel & \Gamma_\parallel \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_\perp^i}{E_\perp^r} & \frac{E_\perp^i}{E_\perp^t} \\ \frac{E_\parallel^i}{E_\parallel^r} & \frac{E_\parallel^i}{E_\parallel^t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_0} & \frac{B_0}{A_0} \\ \frac{1}{C_0} & \frac{D_0}{C_0} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

假设共有 N 层介质,那么式(7)中:

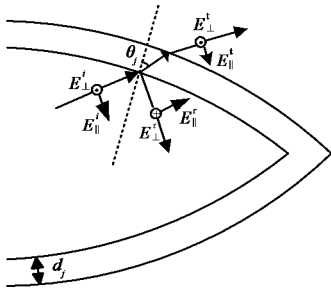


图2 水平极化和垂直极化分量在介质平板中传播示意图

$$\begin{cases} A_j = \frac{e^{\psi_j}}{2} [A_{j+1}(1 + Y_{j+1}) + B_{j+1}(1 - Y_{j+1})], \\ A_{N+1} = 1; \\ B_j = \frac{e^{-\psi_j}}{2} [A_{j+1}(1 - Y_{j+1}) + B_{j+1}(1 + Y_{j+1})], \\ B_{N+1} = 0; \\ C_j = \frac{e^{\psi_j}}{2} [C_{j+1}(1 + Z_{j+1}) + D_{j+1}(1 - Z_{j+1})], \\ C_{N+1} = 1; \\ D_j = \frac{e^{-\psi_j}}{2} [C_{j+1}(1 - Z_{j+1}) + D_{j+1}(1 + Z_{j+1})], \\ D_{N+1} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$Y_{j+1} = \frac{\cos \theta_{j+1}}{\cos \theta_j} \sqrt{\frac{\epsilon_{j+1}(1 - j \tan \delta_{j+1})}{\epsilon_j(1 - j \tan \delta_j)}},$$

$$Z_{j+1} = \frac{\cos \theta_{j+1}}{\cos \theta_j} \sqrt{\frac{\epsilon_j(1 - j \tan \delta_j)}{\epsilon_{j+1}(1 - j \tan \delta_{j+1})}};$$

ϵ_j 为第 j 层介电常数; μ_j 为第 j 层磁导率; $\tan \delta_j$ 为第 j 层损耗角正切. 设第 j 层介质平板上的折射角 θ_j 可根据斯涅耳定理^[8] 确定, 这样对于低损耗材料 ($\tan \delta_j \ll 0.1$) 就可以得到:

$$\cos \theta_{j+1} \cong \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_j \epsilon_j}{\mu_{j+1} \epsilon_{j+1}} \right) \sin^2 \theta_j}. \quad (9)$$

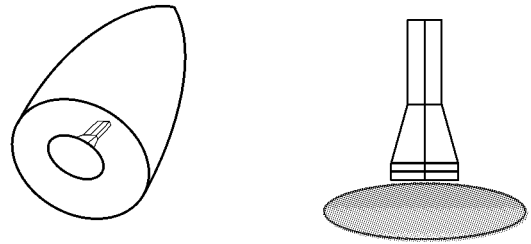
式(8)中, ψ_j 表示相位角, $\psi_j = d_j \gamma_j / \cos \theta_j$, d_j 是第 j 层介质的厚度, γ_j 为第 j 层媒质的传播常数, $\gamma_j = \pm \sqrt{j\omega\mu_j(\sigma_j + j\omega\epsilon_j)}$, θ_j 为第 j 层介质平板上的折射角.

从上述分析过程可以看出, 天线罩作为介质平板层, 由于对入射到其上电磁波的水平极化分量和垂直极化分量的反射系数和透射系数不同, 导致两个极化分量通过天线罩时, 产生了不同的振幅衰减和相位延迟, 从而使得通过天线罩后的两个极化分量再合成的电磁波与原来的极化状态不同, 产生去

极化效应. 对于介质平板模型的天线罩来说, 其影响电磁波垂直极化和水平极化分量传播的因素主要与天线罩的介质材料参数有关, 本文主要考虑三个关键参数: 介电常数 ϵ_j , 损耗角正切 $\tan \delta_j$, 介质板厚度 d_j .

3 仿真分析

为了获得天线罩对抛物反射面天线极化特性影响的先验知识, 本文建立 X 波段天线-天线罩仿真模型, 其结构示意图如图 3(a) 所示. 天线罩外形为正切卵形, 底部直径 D 为 $18\lambda_0$, 高度 L 为 $45\lambda_0$, $\lambda_0 = 3$ cm. 另外, 天线罩的材料特性, 包括相对介电常数 $\epsilon = 11$ 、厚度 $d = 1$ cm、损耗角正切 $\tan \delta_j = 0.03$. 如图 3(b) 所示抛物反射面天线, 馈源为四个矩形喇叭组合而成. 下面分别对加罩前后反射面的极化方向图进行仿真.



(a) 天线罩中的单脉冲天线 (b) 抛物反射面单脉冲天线

图3 带天线罩的抛物面单脉冲天线

3.1 未加罩的抛物反射面单脉冲天线

对于本文仿真的抛物反射面天线, 由于反射面的加入, 如前面抛物面天线极化特性分析中所述, 其极化特性与多个因素有关, 这里对不同焦径比、馈源位置等多种情况下的主极化和交叉极化特性进行了仿真. 仿真了焦径比 F/D 分别为 0.5、0.8、1.2 时反射面单脉冲天线 E 面和波束的主极化、交叉极化方向图.

仿真结果表明, 由于反射面的加入, 和波束方向图主瓣波束宽度变窄, 3 dB 波束宽度约为 6.14° . 交叉极化水平增加了 10 多个 dB, 对比不同焦径比时的交叉极化分量, 随着焦径比的增加, 交叉极化分量变小. 可以看出, 抛物反射面单脉冲天线交叉极化分量较大的原因与反射面有很大关系. 另外, 除了馈源本身的特性, 馈源的位置也是影响交叉极化特性的重要因素, 图 4 仿真了当焦径比固定为 0.8 时, 馈源偏置角为 5° 、 15° 和 20° 三种情况时的主极化和交叉极化方向图.

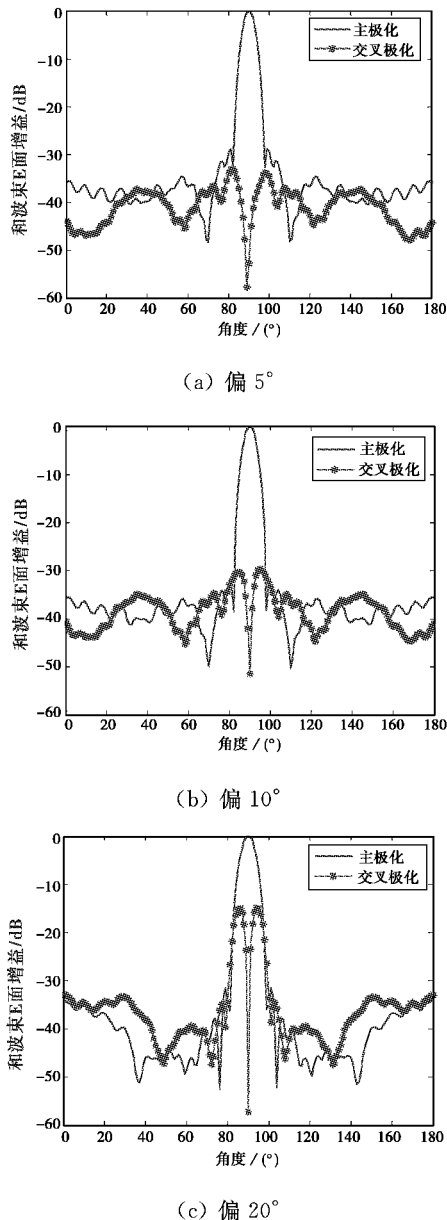
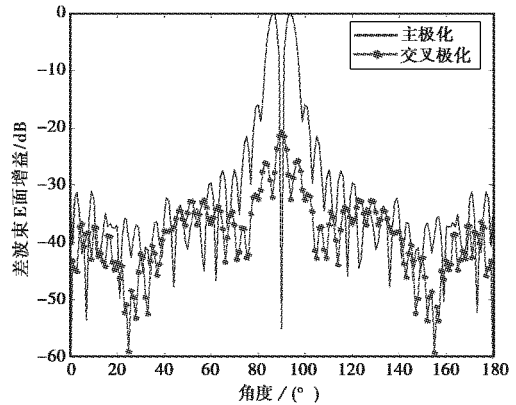


图4 不同馈源偏置角时的抛物面方向图

从图4可以明显看到,焦径比一定时,当馈源偏置角增大,交叉极化分量就会有明显增大,这是因为馈源偏置后,恶化了馈源E面和H面方向图的平衡性,使得交叉极化严重.另外,从图4还可看出,对于和波束的主极化方向图在中心方向具有最大增益,而交叉极化在中心方向有一个零点,具有与差波束方向图类似的结构.图5给出了馈源偏置角度为 10° 时,差波束的主极化和交叉极化方向图.可以看出偏置为 10° 时,不考虑天线罩的影响,和波束的交叉极化抑制比约为 -30 dB,差波束的交叉极化抑制比约为 20 dB,在中心方向具有最大增益.根据图4和图5给出的方向图极化结构,以及单脉冲定向原理,单

脉冲系统差信号与和信号的复包络比确定了角度误差信号,因此归一化后的主极化单脉冲的复比输出和交叉极化的单脉冲复比输出不仅数值不同,并且极性不同.增加天线罩后引入的交叉极化分量会更大,下面将给出天线罩以及天线扫描对极化特性的影响程度.

图5 偏置角 10° 时差波束的主极化和交叉极化方向图

3.2 加天线罩后的抛物反射面单脉冲天线

按照图4(a)给出的仿真示意图,为了确定去极化效应与介质材料特性的依赖关系,本节主要针对不同介电常数、损耗角正切以及不同厚度时的极化特性进行仿真.设定焦径比都为 0.8 ,相同厚度和相同介电常数,而损耗角正切分别为 0.0005 、 0.03 与 0.3 时,对加罩抛物面单脉冲天线的极化特性进行了仿真,仿真结果表明,加天线罩后交叉极化方向在中心方向的零点显著上升,交叉极化分量明显增大.从三种不同损耗角正切时的方向图看,随着损耗角正切的增大,交叉极化分量水平也随着变大,其中损耗角正切从 0.0005 到 0.03 变化越大,交叉极化分量变化越明显,另外,随着损耗角正切的增加,主瓣第一零点逐渐下降.

3.3 加天线罩后指向角为 10° 的情形

为了确定加天线罩后去极化效应与天线扫描的依赖关系,仿真了加天线罩后指向角为 10° 时不同损耗角正切的单脉冲天线方向图,如图6所示.从图6可以看出,当天线指向偏移 10° 时,交叉极化抑制比明显降低,由原来 -50 dB的水平下降到 -30 dB以上的量级,最大时降低至 -20 dB的水平.在相同的天线指向下,不同损耗角正切情况下极化变化的规律和指向角没有偏移时基本一致.

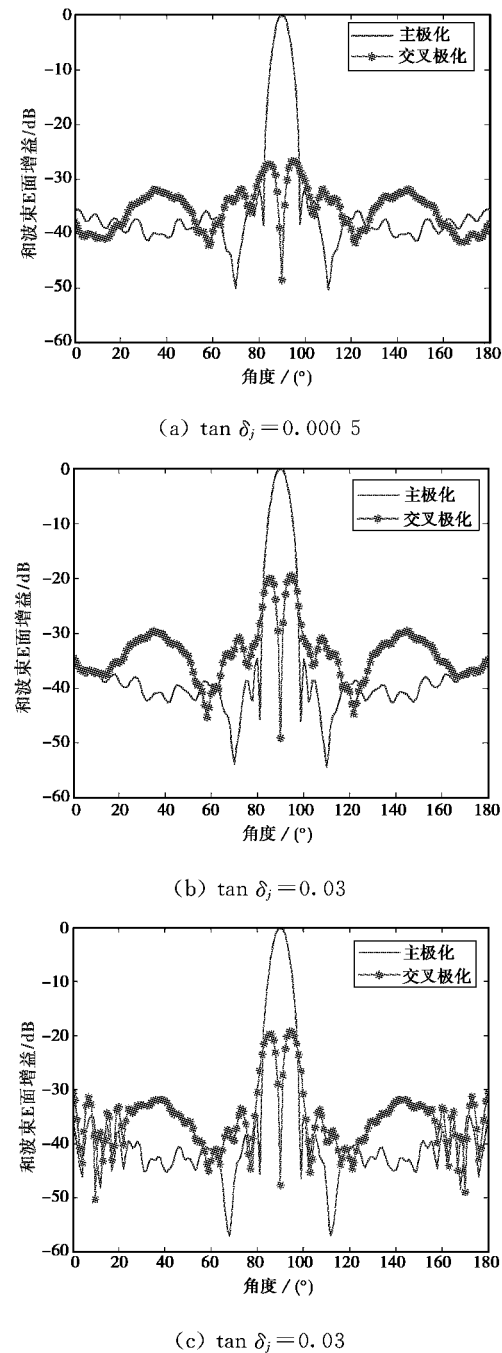


图 6 加罩后指向角 10°时不同损耗角正切的抛物面单脉冲方向图

3.4 不同介电常数和厚度天线罩的情形

为了确定天线罩不同介电常数对单脉冲天线极化特性的影响,进行了大量仿真,比较了不同介电常数和不同天线罩厚度的情形下极化特性的变化情况,统计结果的典型值如表 1 所示。

可以看出,由于不同的材料特性,天线罩对入射波具有不均匀的插入相位延迟和传输系数,使得加罩后的天线方向图出现了结构变化,进而对极化特性产生了一定影响,但是和天线指向偏移的情况相

比,天线材料的影响可以作为次因,在天线罩的作用下天线扫描对单脉冲天线去极化特性产生的影响较大。

表 1 不同材料特性的交叉极化抑制比

指向角/(°)	材料特性	1	2	3
0	损耗角正切变化	-47	-39	-37
	介电常数变化	-39	-39	-39
	厚度变化	-39	-40	-40
10	损耗角正切变化	-28	-20	-19
	介电常数变化	-20	-22	-23
	厚度变化	-22	-22	-23

3.5 结果分析

通过上面仿真结果可以得出单脉冲天线交叉极化成因:

- 1) 几何形状、反射面和辐射器不够完善
抛物面口径内的场分布会因为不够完善引起交叉极化,两者交叉极化的相位正好相反.当馈源的辐射器偏置时,加剧了这种不平衡性,偏置角越大,交叉极化分量越大。
- 2) 天线罩材料,壁厚
天线罩加工的不对称、材料的不均匀、以及天线罩的壁厚等都会对单脉冲天线的交叉极化性能产生影响.即便是完全对称的天线罩,也会在非主平面内因为上下半部对称点处垂直极化和平行极化分量不同而使交叉极化严重。
- 3) 天线指向角变化
电磁波水平极化和垂直极化分量在介质平板中的传播过程中,对于不同指向角水平极化和垂直极化分量的入射角不同,天线罩对不同入射角所产生的去极化效应也不同,因此,对于活动式雷达导引头天线,天线罩内的天线要通过扫描保持和目标电波的入射方向一致,引起天线指向相对罩发生变化,这会引起显著的去极化效应。

4 结 论

根据单脉冲定向理论,主极化响应形成的测角输出和交叉极化响应产生的测角输出不仅数值不同,而且极性也不同.因此,当干扰机发射的信号有意识的保持和雷达极化正交时,就会使雷达导引头跟踪不稳定甚至丢失目标.特别是,对于活动式雷达导引头天线,为了保持与电波入射方向一致,天线指向相对罩会发生变化,这会引起显著的去极化效应,降低天线极化纯度,使得交叉极化干扰更加容易起

效. 本文针对雷达天线罩对单脉冲天线极化特性产生影响的问题, 以典型的抛物反射面幅度单脉冲天线为例, 仿真了不同情况下单脉冲天线交叉极化变化的规律, 分析了天线罩引起交叉极化分量的原因, 研究表明: 天线罩的几何结构和材料特性是影响单脉冲天线的主要因素, 并进一步证实了天线罩的引入会显著提高单脉冲天线的交叉极化分量, 不同材料特性对交叉极化性能的影响不尽相同, 计算所得的天线罩对单脉冲天线极化特性的影响规律可用作单脉冲抗干扰技术的先验数据, 并为研究利用交叉极化对抗单脉冲跟踪技术提供了重要理论基础.

参考文献

- [1] NERI F. Anti-monopulse jamming techniques[C]// SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings, Belem, Brazil, 2001:43-50.
- [2] TANG B, LI H M, SHENG X Q. Jamming recognition method based on the full polarisation scattering matrix of chaff clouds[J]. IET microwaves, antennas and propagation, 2012, 6(13):1451-1460.
- [3] KARPOV A, KNYAZEVA S, SHABUNIN S. A new technique for sandwich antenna radomes analysis[C]// 2014, Antennas and Propagation Conference Loughborough December 23, 2014: 325-328.
- [4] ARPIN F, OLLEVIER T. Cross-polarisation tracking errors of a radome covered monopulse radar[J]. Microwave and optical technology letters, 2007, 49(10): 2354-2360.
- [5] XIN X Y, JIA N, ZHENG L, et al. Power-law in pedestrian crossing flow under the interference of vehicles at an un-signalized midblock crosswalk[J]. Physica a Statistical mechanics and its applications, 2014, 406(10): 287-297.
- [6] LUDWIG A C. The definition of cross polarization[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1973, 21(1):117-120.
- [7] 戴幻尧, 罗佳, 李永祯, 等. 抛物面天线空域极化特性与分析[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1):126-131.
DAI H Y, LUO J, LI Y Z, et al. Study on the characteristics of spatial instantaneous polarization of parabolic reflection antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(1):126-131. (in Chinese)
- [8] DAI H Y, LI Y Z, WANG X S. A new target scattering matrix measurement algorithm based on polarization characteristics of sum and difference beam[J]. Journal of electronics & information technology, 2010, 32(4):6-12.
- [9] MARKIN E. Jamming detection in providing for radar jamming immunity[C]//IEEE EUROCON 2009, St. -Petersburg, May 18-23, 2009: 1565-1567.

作者简介



戴幻尧 (1982—), 男, 吉林人, 中国洛阳电子装备试验中心助理研究员, 博士, 研究方向为雷达新型干扰、抗干扰技术与信号处理.

王建路 (1984—), 男, 河北人, 中国洛阳电子装备试验中心助理研究员, 研究方向为雷达系统模拟及目标特性分析.

周波 (1982—), 男, 河南人, 中国洛阳电子装备试验中心助理研究员, 研究方向为电磁场与微波技术、认知雷达、认知无线电技术等.