

文章编号:1001-9014(2012)01-0029-06

# 入射波极化方向对毫米波天线罩瞄准误差的影响分析

孟洪福, 窦文斌

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:**当不同极化方向的电磁波入射时,采用射线追迹方法计算了Ka波段线极化单脉冲天线-天线罩系统中天线罩所引入的瞄准误差.给出了天线在空域扫描时天线罩引入的瞄准误差分布图,并总结了其随入射波极化方向变化的规律.结果表明,入射波极化方向改变对天线罩引入的共面瞄准误差不产生影响,对交叉面瞄准误差影响较小,而对偏离方位轴和俯仰轴的扫描位置上的瞄准误差影响较大,且整个扫描空域的瞄准误差分布图随入射波极化方向的旋转而缓慢旋转变化的.

**关键词:**毫米波;天线罩;瞄准误差;极化  
**中图分类号:**TN857.2 **文献标识码:**A

## The effects of incident wave polarization on boresight error induced by millimeter-wave radome

MENG Hong-Fu, DOU Wen-Bin

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The effects of the incident wave polarization on the boresight error induced by the radome of a Ka-band monopulse antenna-radome system were analyzed. The boresight errors in the scanning space are determined by the ray tracing method. The results indicate that the in-plane boresight errors of the radome are independent on the incident wave polarization, the cross-plane boresight errors are less dependent on it, and the boresight errors in the scanning angles away from the azimuth and elevation planes are very sensitive to the incident wave polarization. The counter maps of the boresight errors with different incident wave polarization angles were also plotted and it shows that the boresight errors are rotating slowly with the change of the incident wave polarization.

**Key words:** millimeter wave; radome; boresight error; polarization

**PACS:** 41.20.Jb

### 引言

天线罩是飞行器上的关键部件之一,经常安装在飞行器前部用于保护雷达天线.理想的罩不应该影响雷达天线的辐射性能,但实际的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,罩不仅会引起单脉冲天线和波束增益的下降,还会产生其它一些不利影响,比如,引入瞄准误差,引起去极化效应等.

罩引入的瞄准误差定义为单脉冲天线带有罩时的差波束零点指向与不带罩时差波束零点指向之间的角度差.在单脉冲雷达系统中,瞄准

误差及瞄准误差斜率对于目标的定位相当重要<sup>[1]</sup>.随着对单脉冲雷达系统精度要求的提高,相应地要求罩的性能更加优异.为了消除罩所引入的瞄准误差,通常在控制回路进行误差补偿<sup>[2]</sup>.因此,需要预先对罩进行分析,预测天线在各种扫描姿态、不同入射波极化的情况下罩引入的瞄准误差大小.

当电磁波穿过罩壁时,入射波相对于入射平面被分解为垂直极化分量和平行极化分量,这两个分量穿过罩壁时有不同的幅度衰减和相位延迟.因此,透过罩壁的电磁波的极化方式将会与入射波有所不同,这就是罩引起的去极化效

收稿日期:2010-11-16,修回日期:2011-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(60571028);毫米波国家重点实验室创新项目(Z200920)

Foundation item: Supported by National Natural Science Foundation of China(60571028); Innovation Project of State Key Laboratory of Millimeter Waves(Z200920)

作者简介:孟洪福(1981-),男,四川遂宁人,讲师,博士,主要研究领域为毫米波理论与技术等. E-mail: menghongfu@163.com.

Received date: 2010-11-16, revised date: 2011-01-10

应<sup>[3,4]</sup>. 去极化效应引起的交叉极化对天线罩引入的瞄准误差的影响在文献[5,6]中得到研究, 而 WILSON K S 等研究了入射波的极化方向变化对瞄准误差的影响<sup>[7,8]</sup>. 文献[8]给出了天线罩引入的瞄准误差随天线扫描角和入射波极化方向的变化规律: 对线极化的单脉冲天馈系统, 天线罩引入的瞄准误差主要受天线的扫描角影响, 仅在某些特定扫描位置上的瞄准误差对入射波电场的极化不是很敏感.

文章采用射线追迹方法分析毫米波线极化单脉冲天馈系统中, 当天线在空域扫描时, 入射波的极化方向对天线罩引入的瞄准误差的影响. 验证了文献[8]中共面瞄准误差随入射波极化的变化规律. 同时, 首次给出了天线在  $120^\circ \times 120^\circ$  的空域扫描时, 天线罩引入的瞄准误差分布图, 并总结了其随入射波极化方向的变化规律, 为单脉冲雷达系统控制回路的误差补偿提供参考数据.

## 1 分析方法

天线罩引入的瞄准误差是单脉冲雷达系统的一个重要指标. 瞄准误差是带有天线罩的单脉冲天线差波束零点指向与不带天线罩时天线差波束零点指向之间的角度差. 与扫描平面共面的差波束的瞄准误差叫做共面瞄准误差(如方位差波束在方位面扫描时的瞄准误差), 而与扫描平面正交的平面内的差波束的瞄准误差为交叉面瞄准误差(如俯仰差波束在方位面内扫描时的瞄准误差). 瞄准误差是天线-天线罩系统辐射方向图中的近轴参数, 对电大尺寸天线-天线罩系统, 当天线口径大于  $10\lambda_0$  时, 采用基于几何光学的射线追迹法分析, 具有计算速度快且结果精度较高等优点<sup>[1]</sup>.

### 1.1 射线追迹法

接收模式的射线追迹方法如图 1 所示. 当入射波的极化方向与天线极化相同时, 称之为极化匹配, 否则, 称入射波极化方向与天线极化方向之间的夹角为极化角. 由远处入射的电磁波到达天线罩附近时被近似为一簇平行射线, 当射线入射到天线罩外壁时, 被分解为垂直极化分量和平行极化分量. 天线罩壁对不同极化分量有不同的幅度衰减和相位延迟, 穿过天线罩壁的各个分量在内表面重新进行矢量组合, 并最终到达天线口径面上. 与天线极化方向相同的入射波分量被天线所接收, 在天线馈电端口产生输出信号<sup>[1]</sup>:

$$V_{port} = \frac{1}{I_c} \int_S \vec{J}_a(\theta_{AZ}, \varphi_{EL}) \cdot \vec{E}_{inc} - \vec{M}_a(\theta_{AZ}, \varphi_{EL}) \cdot \vec{H}_{inc} ds, \quad (1)$$

其中,  $\vec{J}_a(\theta_{AZ}, \varphi_{EL})$ ,  $\vec{M}_a(\theta_{AZ}, \varphi_{EL})$  为天线扫描到方位角  $\theta_{AZ}$ 、俯仰角  $\varphi_{EL}$  时天线口径上的等效电磁流.  $\vec{E}_{inc}$ ,  $\vec{H}_{inc}$  为入射到天线口径面上的电磁波, 它们的求取过程及其穿过天线罩壁时的去极化效应将在下一小节讨论.  $I_c$  为有电流量纲的系数, 积分在天线口径面  $S$  上进行.

当天线为阵列天线时, 式(1)仅需要对各个阵列单元接收到的信号求和. 当单脉冲阵列天线四个分区内的  $\vec{J}_a$ ,  $\vec{M}_a$  都同相时, 天线端口得到和波束信号. 当口径上部与下部电磁流反相时, 得到俯仰差波束, 而当左右反相时, 得到方位差波束.

### 1.2 去极化效应

对电大尺寸天线罩, 由于罩面平均曲率半径较大, 在入射点附近的局部范围可将天线罩壁近似为平面介质层<sup>[9]</sup>. 如图 2, 当电磁波以入射角  $\theta_0$  入射到介质层时, 在入射点处, 入射波  $\vec{E}_i, \vec{H}_i$  相对于入射平面被分解成垂直极化分量和平行极化分量. 垂直极化分量和平行极化分量穿过介质层的传输系数分别为<sup>[10]</sup>:

$$T_{\perp}^m = \frac{2}{\left(A + \frac{B}{Z_0^{\perp}}\right) + Z_0^{\perp} \left(C + \frac{D}{Z_0^{\perp}}\right)} e^{-jk_0 \sin \theta_0 t}$$

$$T_{\parallel}^m = \frac{2}{\left(A + \frac{B}{Z_0^{\parallel}}\right) + Z_0^{\parallel} \left(C + \frac{D}{Z_0^{\parallel}}\right)} e^{-jk_0 \sin \theta_0 t}, \quad (2)$$

其中,  $A, B, C, D$  是介质层等效传输线的传输矩阵中的系数,  $Z_0^{\perp}, Z_0^{\parallel}$  分别为垂直极化分量和平行极化分量在自由空间中的等效特征阻抗,  $t$  为横向传播距离.

在介质层后表面出射点, 将透过的垂直极化分量与平行极化分量重新进行矢量组合, 得到透射电磁波  $\vec{E}_t, \vec{H}_t$  为:

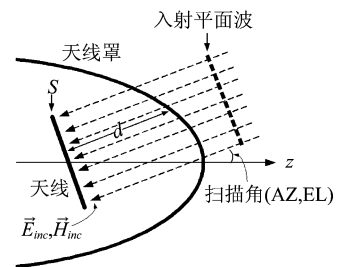


图 1 射线追迹方法分析天线罩的原理图

Fig. 1 Schematic graph of the ray tracing method

$$\begin{aligned} \vec{E}_t &= (\vec{E}_i \cdot \vec{v}_\perp^i) T_\perp^m \vec{v}_\perp^t + (\vec{E}_i \cdot \vec{v}_\parallel^i) T_\parallel^m \vec{v}_\parallel^t \\ \vec{H}_t &= (\vec{H}_i \cdot \vec{v}_\perp^i) T_\parallel^m \vec{v}_\perp^t + (\vec{H}_i \cdot \vec{v}_\parallel^i) T_\perp^m \vec{v}_\parallel^t \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\vec{v}_\perp^i, \vec{v}_\parallel^i, \vec{v}_\perp^t, \vec{v}_\parallel^t$  分别为入射波和透射波的垂直单位矢量和平行单位矢量,如图 2 所示.

那么,天线口径面上每根入射线的  $\vec{E}_{inc}, \vec{H}_{inc}$  可由透射电磁波  $\vec{E}_t, \vec{H}_t$  在罩内传播透射点与天线口径之间的距离  $d$  (如图 1) 后得到:

$$\vec{E}_{inc} = \vec{E}_t e^{-jkd} \quad \vec{H}_{inc} = \vec{H}_t e^{-jkd} \quad (4)$$

由式(2)可以看到,当穿过同一介质层时,  $T_\perp^m, T_\parallel^m$  的幅度和相位通常是不同的. 图 3 给出了 Ka 波段的电磁波穿过厚度为  $0.65\lambda_0$ , 介电常数为 3.3 的介质层时的传输系数的幅度和相位. 可见,当入射角为  $40^\circ$  时,垂直极化分量和平行极化分量的传输系数的幅度分别为 0.887 和 0.967, 而相位延迟分别为  $80.81^\circ$  和  $86.68^\circ$ .

假设 Ka 波段一个偏振面与入射面夹角为  $45^\circ$  的线极化波以  $40^\circ$  入射角入射到该介质层,那么由式(3)得到的透射电磁波可以表示为:

$$\vec{E}_t = 0.887e^{-j80.81^\circ} A \vec{v}_\perp^t + 0.967e^{-j86.68^\circ} A \vec{v}_\parallel^t \quad (5)$$

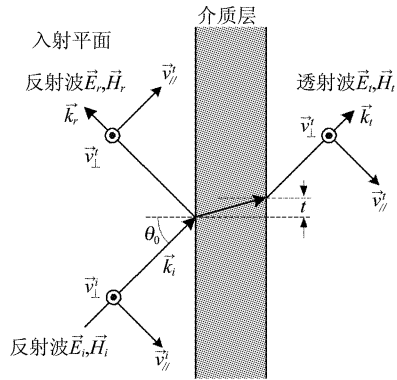


图 2 电磁波在入射平面内的各个矢量  
Fig. 2 Vectors of the wave in the plane of incidence

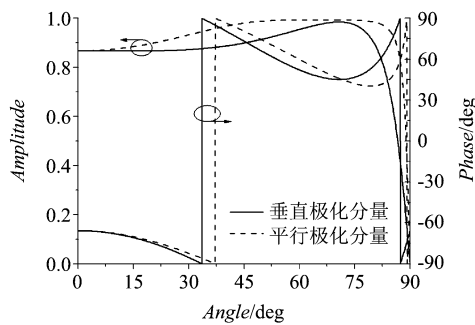


图 3 Ka 波段厚度为  $0.65\lambda_0$  的介质层的传输系数  
Fig. 3 Transmittances of a dielectric layer with the thickness of  $0.65\lambda_0$  at Ka band

其中,  $A = \vec{E}_i \cdot \vec{v}_\perp^i = \vec{E}_i \cdot \vec{v}_\parallel^t$ .

可见,入射的线极化波被介质层去极化为椭圆极化波,如图 4 所示.

当入射来波极化方向变化时,由式(3)分解所得的垂直极化分量和平行极化分量也将变化,因此天线罩引起的去极化效应也随之变化.此时,由式(1)接收的与天线极化方向相同的入射波分量也将变化,从而影响天线端口的输出信号.对差波束,就造成瞄准误差的变化.

## 2 计算结果

本文分析的 Ka 波段天线-天线罩结构如图 5 所示. 天线罩外形为正切卵形,底部直径为  $30\lambda_0$ , 高度为  $88\lambda_0$ , 天线是水平极化的单脉冲阵列天线,直径为  $20\lambda_0$ , 天线可绕万向节在方位面和俯仰面内同时转到,转动范围为  $-60^\circ$  到  $+60^\circ$ , 即天线的扫描空域为  $120^\circ \times 120^\circ$ . 本文关心入射波与天线之间的极化角小于  $60^\circ$  时天线罩引入的瞄准误差大小,当极化角更大时,天线能接收到的信号已很小,此时雷达的探测能力很弱.

### 2.1 方位差波束瞄准误差

当入射波极化角分别为  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ , 天线在  $120^\circ \times 120^\circ$  空域扫描时,天线方位差波束在扫描空

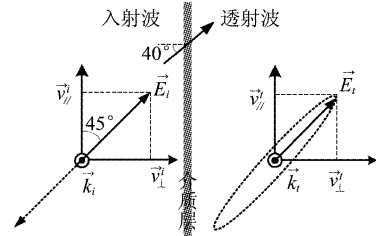


图 4 线极化入射波经过介质层后去极化为椭圆极化波  
Fig. 4 A linear polarized wave depolarized to be an elliptical polarized wave

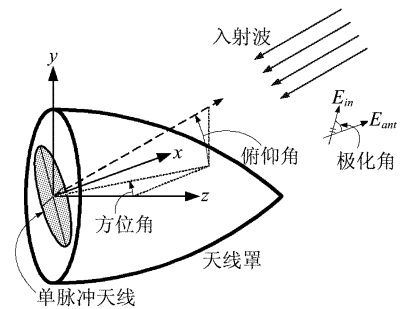


图 5 天线、天线罩与入射波的几何关系  
Fig. 5 Geometrical relations of the radome, antenna and incident wave

域内的瞄准误差等高线分布如图 6 所示. 可见, 当入射波极化方向与接收天线极化匹配时, 最大的瞄准误差出现在方位轴上, 约为 8 分, 此时扫描空域的瞄准误差在方位面内成奇对称分布, 而在俯仰面内成偶对称分布. 当入射波极化角为  $30^\circ$  时, 很明显瞄准误差分布图不再关于方位面或俯仰面对称, 此时最大瞄准误差增大到 9 分左右. 第二四象限的瞄准误差减小, 而第一三象限的瞄准误差增大, 此时的瞄准误差分布图可以由极化匹配时天线罩瞄准误差分布图旋转一定角度得到. 当入射波极化角增大到  $60^\circ$  时, 瞄准误差分布图继续旋转, 此时最大瞄准误差出现在第一三象限, 达到了 12 分.

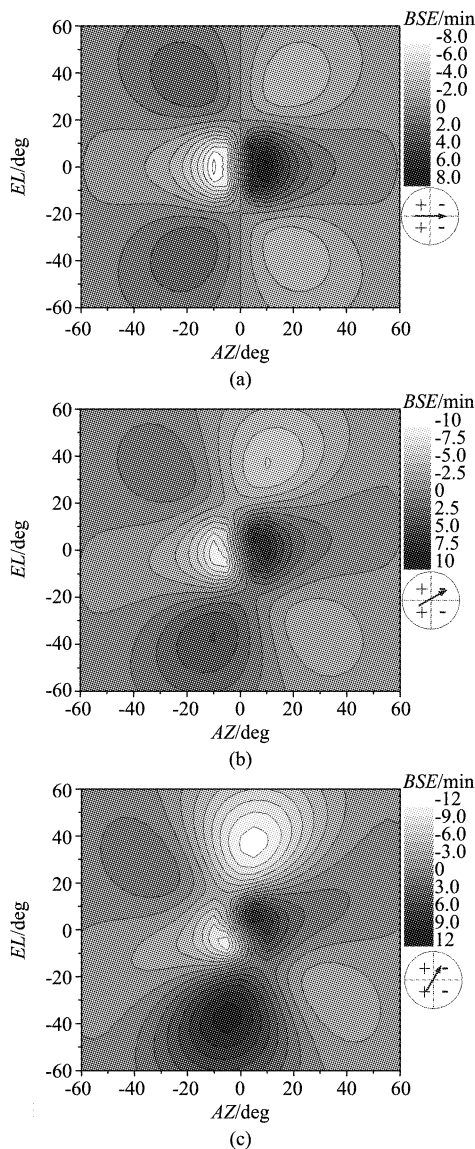


图 6 不同极化波入射时天线罩方位差波束瞄准误差等高线分布图 (a)  $0^\circ$  (b)  $30^\circ$  (c)  $60^\circ$

Fig. 6 Boresight errors of the AZ differential pattern with different incident wave polarization (a)  $0^\circ$  (b)  $30^\circ$  (c)  $60^\circ$

将图 6(a~c) 方位差波束瞄准误差分布图中  $EL=0, AZ>0$  的轴线上的数据提取, 即可得到不同极化波入射时方位差波束的共面瞄准误差, 如图 7 所示. 结果表明, 方位差波束的共面瞄准误差不随入射波极化方向的变化而变化, 与参考文献[8]中的结论一致.

## 2.2 俯仰差波束瞄准误差

当不同极化的电磁波入射时, 俯仰差波束的瞄准误差如图 8 所示. 可见, 当入射波极化与接收天线极化匹配时, 俯仰差波束瞄准误差最大值出现在远离方位轴和俯仰轴的扫描位置上, 最大值约为 6 分, 且瞄准误差分布图在方位面内成偶对称分布, 在俯仰面内成奇对称分布. 由图 8(b)(c) 可以看到, 当入射波极化方向逆时针变化时, 瞄准误差分布图也逆时针缓慢旋转, 与方位差波束瞄准误差变化规律一致, 但俯仰差波束瞄准误差在第二四象限逐渐增大, 而在第一三象限逐渐减小, 与方位差波束瞄准误差变换规律相反.

从图 8(a~c) 中可以提取出俯仰差波束的交叉面瞄准误差(图中  $EL=0, AZ>0$  的数据), 如图 9 所示. 可见, 交叉面瞄准误差是随入射波极化方向的变化而变化的. 但从图 6、图 8 可以看到, 偏离两扫描轴线的各个象限内的瞄准误差随入射波极化方向的改变更为明显, 且整体分布图随入射波极化的旋转而缓慢旋转.

## 2.3 结果分析

图 7、图 9 中, 当天线仅方位轴扫描时, 天线罩结构关于方位面保持上下对称, 且天线罩上下对称部位的去极化效应正好相反. 因此, 当不同极化的电磁波入射时, 天线罩上下对称部位引入的交叉极化分量大小相等而方向相反. 方位差波束的两个波瓣

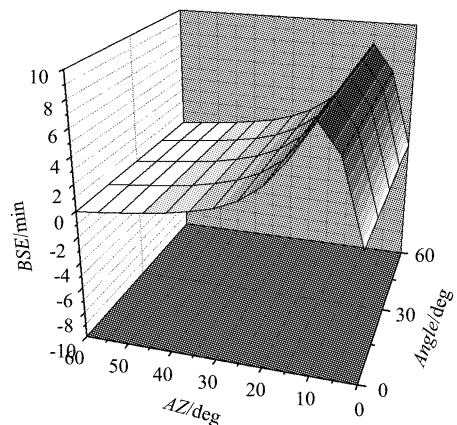


图 7 不同极化波入射时方位差波束的共面瞄准误差

Fig. 7 In-plane boresight error versus the polarization angle

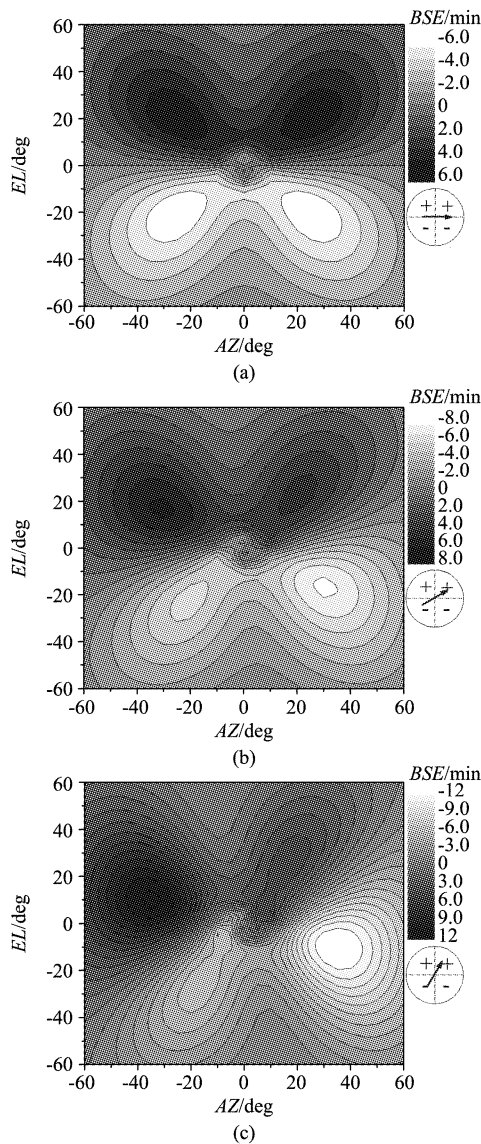


图8 不同极化波入射时天线罩俯仰差波束瞄准误差等高线分布图(a)0° (b)30° (c)60°

Fig. 8 Boresight errors of the EL differential pattern with different incident wave polarization (a)0° (b)30° (c)60°

都同时包含天线罩上下部分引入的交叉极化分量,在波瓣内求和时已将交叉极化分量抵消,因此入射波极化对天线罩引入的共面瞄准误差并不产生影响,如图7。而俯仰差波束的两个波瓣分别只包含天线罩上部或下部引入的交叉极化分量,且两波瓣相减得差信号,因此在俯仰差波束信号中引入两倍的交叉极化分量影响,入射波极化对交叉面瞄准误差将会有影响,如图9。而在偏离扫描轴线的四个象限内,由于天线罩关于天线方位轴和俯仰轴都不再对称,天线罩不同部位去极化效应引入的交叉极化分量也无法抵消,且比天线仅在方位轴或俯仰轴上扫描时更大,因此入射波极化对偏离方位轴和俯仰轴

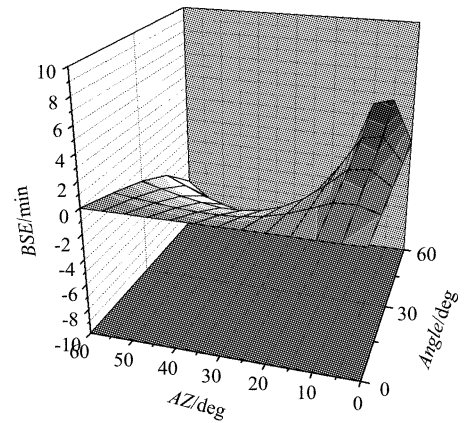


图9 不同极化波入射时俯仰差波束的交叉面瞄准误差

Fig. 9 Cross-plane boresight error versus the polarization angle

的扫描位置的瞄准误差的影响更明显,如图6、图8。

### 3 结论

文章分析了天线罩引起的去极化效应,并采用射线追迹方法计算了不同极化方向的电磁波入射时,Ka波段单脉冲天线-天线罩系统中,在天线扫描空域内天线罩所引入的瞄准误差。研究结果表明:天线罩引入的共面瞄准误差不随入射波极化方向变化而变化;交叉面瞄准误差一定程度受人射波极化方向影响;但是在偏离方位轴和俯仰轴的扫描位置上,入射波极化方向对瞄准误差的影响相当严重,且扫描空域的瞄准误差分布图随入射波极化方向的旋转而缓慢旋转。计算所得的不同入射波极化时的瞄准误差数据及其变化规律可用作单脉冲雷达补偿回路的先验数据,以提高雷达控制回路的响应速度和雷达系统的跟踪精度。

### REFERENCES

- [1] BURKS D G, GRAF E R, FAHEY M D, A High Frequency Analysis of Radome-Induced Radar Pointing Error[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1982, **30**(9):947-955.
- [2] AN Xiang-Yu, DONG Chao-Yang, WANG Qing, Compensation Method Based on EKF for Solving Radome Error Slope[J]. *Journal of System Simulation* (安相宇,董朝阳,王青.一种基于EKF技术的天线罩瞄准误差补偿方法. *系统仿真学报*), 2008, **20**(15):4099-4013.
- [3] TEMPLE M A, Radome Depolarization Effects on Monopulse Receiver Tracking Performance[R]. *Air Force Institute of Technology*, 1993.
- [4] TEMPLE M A, PYATI V P. Radome depolarization and phase front distortion effects on boresight error prediction [C]. *IEEE National Radar Conference*, 1994:177-182.
- [5] 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.

- [6] YANG Hui, HOU Rui. An Analysis of Radome CBSE[J]. *Journal of Microwaves* (杨晖, 侯瑞. 天线罩交叉瞄准误差成因分析. *微波学报*), 2006, **22**: 82 - 85.
- [7] WILSON K S. Polarization Sensitivity of Monopulse Radar Boresight Error Induced by Large, Ogive Radomes[R]. *Air Force Institute of Technology*, 1994.
- [8] WILSON K S, PYATI V P. Dependence of Monopulse Radar Boresight Error on Incident E-Field Polarization[C]. *IEEE International Radar Conference*, 2002: 568 - 572.
- [9] MENG Hong-Fu, DOU Wen-Bin, YIN Kai. Analysis of Antenna-Radome System at Millimeter Wave Band[C]. *Global Symposium on Millimeter Waves Proceeding*, 2008, (1): 380 - 383.
- [10] MENG Hong-Fu, DOU Wen-Bin, CHEN Tian-Tian, et al. Analysis of Radome Using Aperture Integration-Surface Integration Method With Modified Transmission Coefficient[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, **30**(2): 199 - 210.

(上接 28 页)

阵动态阻抗极大值的提升是低能氢等离子体修饰抑制了光电二极管的缺陷辅助隧穿电流引起的. 又由于缺陷辅助隧穿电流与缺陷辅助中心的密度直接相关, 因而可进一步推测低能氢等离子体修饰有效修复了离子注入 n 区的注入诱导物理损伤, 从而减小了产生缺陷辅助隧穿电流的缺陷辅助中心的密度<sup>[9]</sup>.

在反向偏压大于动态阻抗极大值所处的偏压时, 经过低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光电器件动态阻抗比没有经过修饰处理的明显增大. 这表明低能氢等离子体修饰能有效抑制 HgCdTe 长波光电器件的带带隧穿电流. 而且, 由于 HgCdTe 长波光电器件列阵的带带隧穿电流与光电二极管 p-n 结的能带结构直接相关<sup>[9]</sup>, 可以推断 HgCdTe 长波光电器件列阵的低能氢等离子体修饰, 将光电二极管的 p-n 结向离开注入损伤区的方向实现推进, 从而优化了光电二极管的 p-n 结的能带结构, 进而减小了带带隧穿电流.

## 5 结论

开展了 n<sup>+</sup>-on-p 型 HgCdTe 长波光电器件列阵氢等离子体修饰的研究. 基于采用 MBE 技术生长的 HgCdTe/CdTe 薄膜材料, 通过注入窗口的光刻与选择性腐蚀、阻挡层的生长、B<sup>+</sup> 注入、低能氢等离子体修饰、金属化和钢柱列阵的制备等工艺, 得到了氢等离子体修饰的 HgCdTe 长波光电器件列阵. 实验发现低能氢等离子体修饰的 HgCdTe 红外长波光电器件列阵动态阻抗极大值提高了 1 ~ 2 倍, 并在反向较大偏压下动态阻抗得到更为明显的提升. 这表明低能氢等离子体修饰可以抑制 HgCdTe 光电二

极管暗电流中的带带直接隧穿电流和缺陷辅助隧穿电流, 从而能提高长波红外焦平面探测器的探测性能.

**致谢** 本工作得到了于梅芳、马伟平、朱建妹、陈兴国、祝海彬、刘丹、吴云、曹菊英、王建新、陈昱、邢雯、陈洪雷和曹妩媚等的支持, 作者在此一并表示衷心的感谢.

## REFERENCES

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 2009, **105**(09): 091101 - 1.
- [2] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[J]. *SPIE*, 2009, **7388**: 73880J - 1.
- [3] Ye Zhen-Hua, Yin Wen-Ting, Huang Jian, et al. 128 × 128 SW/MW TWO-COLOR HgCdTe IRFPAs[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 尹文婷, 黄建, 等. 128 × 128 短波/中波双色红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6): 415 - 418.
- [4] Ye Zhen-hua, Wu Jun, Hu Xiao-ning, et al. Spectral Study of HgCdTe two-color Detector Arrays[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 周文洪, 胡晓宁, 等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(1): 4 - 7.
- [5] EBE H, Tanaka M, Miyamoto Y. Dependency Of p-n Junction Depth On Ion Species Implanted in HgCdTe. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6): 854 - 857.
- [6] Ye Zhen-hua, Hu Xiao-ning, Zhang Hai-Yan, et al. Study of dark current for Mercury Cadmium Telluride long-wavelength photodiode detector with the different structures[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 86 - 90.
- [7] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, et al. Dark Currents in Long Wavelength Infrared HgCdTe Gated Photodiodes[J]. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2004, **33**(6): 621 - 629.