

# 单极化圆台相控阵天线的空域极化特性\*

何密,李永祯,肖顺平

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对水平或垂直极化偶极子激励的单极化圆台相控阵天线,建立了其电扫描时空域极化特性的数学模型。理论分析和仿真结果表明单极化圆台相控阵天线的空域极化比随观测角偏离法线方向的角度单调递增,随斜面倾角增大而单调递减。同时,圆台相控阵天线的方向图与阵元极化方式、波束指向角以及观测角有关。圆台面规模越大,方向图和空域极化变化越丰富。以上结论为基于圆台相控阵天线空域极化特性的极化散射矩阵测量、极化滤波和抗干扰等研究提供了理论依据,为全极化圆台相控阵天线设计、极化特性分析和极化校准等研究奠定了理论基础。

**关键词:** 空域极化特性;圆台阵;相控阵;共形阵;

**中图分类号:** TP958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0119-06

## Spatial polarization characteristics of the single-polarization truncated cone phased array antenna

HE Mi, LI Yongzhen, XIAO Shunping

(college of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** For a single-polarization-truncated-cone-phased array antenna stimulated by horizontal or vertical polarized dipoles, the spatial polarization characteristics are modeled when the array antenna electronically scans in space. The theoretical analysis and simulations show that: the spatial polarization ratio of a single-polarization-truncated-cone-phased array monotonically increases as the angles between the pointing angles or observation angles and the normal increases; the spatial polarization ratio monotonically decreases as the slope angles decrease; the patterns of a single-polarization-truncated-cone-phased array are related to the polarization of array elements, the pointing angles, and the observation angles; the larger the size of a single-polarization-truncated-cone-phased-array antenna is, the more abundant the spatial polarization information is. These conclusions offer a theoretical foundation for studies such as the polarization scattering matrix measurement, the polarization filtering, and the polarimetric anti-jamming based on the spatial polarization characteristics of the single-polarization-truncated-cone-phased array. The conclusions offer a theoretical basis for the studies such as the antenna design, the polarization characteristics analysis and the polarization calibration of the full-polarization-truncated-cone array as well.

**Key words:** spatial polarization characteristics; truncated cone array; phased-array; conformal array

近年来,对各类天线空域极化特性的研究越来越引起人们的关注<sup>[1-2]</sup>。研究单极化天线空域极化特性能够在不增加设备量的前提下有效提高雷达系统的极化测量、跟踪、识别和抗干扰的能力,具有重要的理论和现实意义。文献[2-5]中提出了基于单极化天线空域极化特性的目标极化散射矩阵测量、抗有源干扰和真假目标鉴别等算法。文献[1-5]中主要分析了机械扫描雷达的空域极化特性,文献[6-8]拓展到对二元阵和平面相控阵空域极化特性的分析。很多情形下,雷达需要附形于雷达载体,以减小空气阻力或雷达散射截面积<sup>[9-10]</sup>。目前,共形阵列天线的空域

极化特性鲜见报道,相对于平面阵列,共形阵列复杂的几何结构给空域极化特性的研究带来困难,考虑到天线空域极化特性的研究具有重要的现实意义,因此,有必要研究共形阵列天线的空域极化特性。

关于旋转轴对称的共形阵,具有方位向对称的优点,通过轮换激励阵元的一列,实现360°覆盖扫描并且保持方位向方向图不变<sup>[9-11]</sup>。圆台阵列天线是一种常见的关于旋转轴对称的共形阵,通常共形在弹头和机翼等雷达载体上。为了研究单极化的圆台相控阵列天线的空域极化特性,首先建立圆台相控阵天线空域极化特性的模

\* 收稿日期:2011-09-01

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60736006);国防科技大学优秀研究生创新资助项目(B090405)

作者简介:何密(1982—),女,四川营山人,博士,E-mail: hmcherry@126.com;

肖顺平(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: xiaosp@gmail.com

型,然后分析了水平、垂直极化偶极子激励时圆台阵列天线在不同的观测角和波束指向角下的空域极化比,并且给出了斜面倾角、波束指向角对极化比和天线增益等的影响。

### 1 圆台相控阵天线空域极化特性的建模

圆台阵列天线的结构示意图如图 1 所示。设圆台顶的半径为  $R_0$ ,高为  $H$ ,斜面倾角为  $\alpha$ ,圆台的中心位于全局坐标系的原点  $O$ 。圆台阵列由  $M \times N$  个阵元构成,其中  $M$  为行数, $N$  为列数。设圆台阵列天线的纵向阵元间隔在  $z$  轴上的投影长度为  $d_1$ ,第  $m$  层阵元在  $z$  轴上坐标为  $z_m$ ,则圆台第  $m$  层圆周的半径可表示为

$$R_m = R_0 + \left(\frac{H}{2} - z_m\right) \cot(\alpha) \quad (1)$$

第  $m$  层圆周上阵元间隔为

$$d_2(m) = \frac{2\pi R_m}{N} \quad (2)$$

圆台阵列天线在阵面中部可同时形成多个波束,从而  $360^\circ$  扫描覆盖整个方位向空域。考虑到圆台阵列天线的有效孔径、遮挡效应以及系统复杂度<sup>[9-10]</sup>,同时波束通常为 3 到 4 个。为更好地分析圆台阵列天线的空域极化特性,下面给出四分之一圆台阵列形成一个波束时的相关公式推导,其他波束的推导类似。设四分之一圆台阵面关于矢量  $\mathbf{AB}$  对称, $A$  点是  $x$  轴与四分之一圆台阵面的交点, $\mathbf{AB}$  位于  $xOz$  平面内且与  $x$  轴的夹角为  $\frac{\pi}{2} - \alpha$ ,矢量  $\mathbf{AB}$  垂直于圆台阵面,是四分之一圆台阵面的法线方向,具有方向角  $(\theta = \alpha, \varphi = 0)$ 。圆台阵列交换激励阵元的一列可实现方位向的扫描并保持天线方位向的极化方向图不变,此时的方位角分辨率为  $\frac{2\pi}{N}$ ,若需要更高的方位角分辨率,每列阵元可在方位向上做小范围相描。

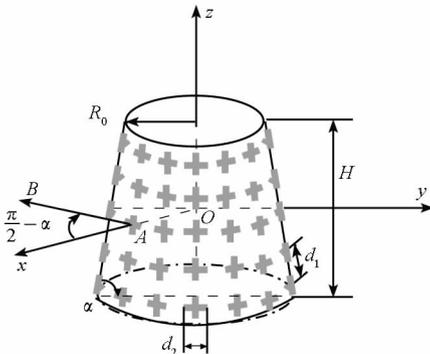


图 1 圆台相控阵天线的结构示意图  
Fig. 1 The sketch map of a truncated cone phased-array antenna

为了推导圆台阵列天线的空域极化特性,需要建立 3 个坐标系,即全局坐标系、旋转坐标系和局部坐标系,三者的示意图见图 2。全局坐标系  $O - xyz$  由单位矢量  $\mathbf{a}_x$ 、 $\mathbf{a}_y$  和  $\mathbf{a}_z$  组成,全局坐标系中某点的坐标可由笛卡尔坐标  $(x, y, z)$  表示,也可由球坐标  $(\theta, \varphi, r)$  表示。为方便描述圆台阵面上的点,需建立旋转坐标系。旋转坐标系是由单位矢量  $\mathbf{a}_{x'}$ 、 $\mathbf{a}_{y'}$  和  $\mathbf{a}_z$  组成,它是通过将全局坐标系中的  $x$  轴、 $y$  轴绕  $z$  轴旋转  $\varphi_n$  构成,其中  $\varphi_n$  为第  $n$  列阵元的方位角。设极化方向图观测点与原点  $O$  的距离为  $r$ 、方向为  $(\theta, \varphi)$ ,其局部坐标系由单位矢量  $\mathbf{a}_\varphi$ 、 $\mathbf{a}_\theta$  和  $\mathbf{a}_r$  组成,分别为  $\varphi$ 、 $\theta$  增加的方向和矢量  $\mathbf{r}$  的方向。旋转坐标系和局部坐标系的关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_\theta \\ \mathbf{a}_\varphi \\ \mathbf{a}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos(\varphi - \varphi_n) & \cos\theta\sin(\varphi - \varphi_n) & -\sin\theta \\ -\sin(\varphi - \varphi_n) & \cos(\varphi - \varphi_n) & 0 \\ \sin\theta\cos(\varphi - \varphi_n) & \sin\theta\sin(\varphi - \varphi_n) & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{x'} \\ \mathbf{a}_{y'} \\ \mathbf{a}_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

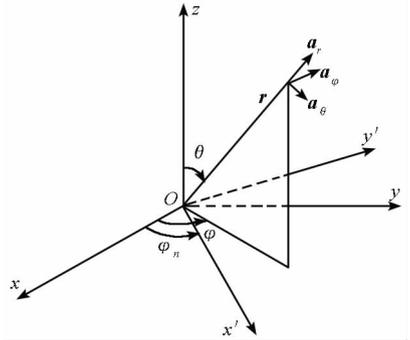


图 2 3 个坐标系关系

Fig. 2 Three coordinate systems

圆台阵列表面的每个阵元可由水平极化偶极子(h)或者垂直极化偶极子(v)组成。水平极化偶极子沿圆周的切线方向(即  $\mathbf{a}_\varphi$  方向)放置,取方位角  $\varphi$  增加的方向为正;垂直极化偶极子沿斜边方向放置,取沿斜边向上的方向为正。由于圆台阵面共形的特点,垂直极化偶极子的激励电流同时具有  $\mathbf{a}_z$  方向和  $\mathbf{a}_{x'}$  方向的分量。第  $mn$  个阵元偶极子  $q$  ( $q = x', y'$  或  $z$ ) 的电场为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{E}_{mn}^q(r) = -\frac{k^2 e^{-jkr} I_{mn}}{4\pi\epsilon r} \mathbf{a}_r \times \mathbf{a}_r \times \mathbf{M}_{mn}^q \quad (4)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数, $\lambda$  为波长, $r$  为观察点距原点的距离, $\epsilon = 8.85 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$  为自由空间的介电常数, $I_{mn} = a_{mn} e^{j\beta_{mn}}$  是第  $mn$  个阵元的激励电流,幅度为  $a_{mn}$ ,相位为  $\beta_{mn}$ , $\mathbf{M}_{mn}^q$  为偶极子  $q$  电流的激励方向矢量。令  $\mathbf{M}_{mn}^{q'} \triangleq \mathbf{a}_r \times \mathbf{a}_r \times \mathbf{M}_{mn}^q$ ,当  $\mathbf{M}_{mn}^q = \mathbf{a}_{x'}$ , $\mathbf{M}_{mn}^q = \mathbf{a}_{y'}$  和  $\mathbf{M}_{mn}^q = \mathbf{a}_z$  时,分别有

$$\begin{aligned} \mathbf{M}'_{mn} &= \mathbf{a}_{x'} [1 - \sin^2 \theta \cos^2(\varphi - \varphi_n)] - \\ & [\mathbf{a}_{y'} \sin \theta \sin(\varphi - \varphi_n) + \mathbf{a}_z \cos \theta] \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}'_{mn} &= \mathbf{a}_{y'} [1 - \sin^2 \theta \sin^2(\varphi - \varphi_n)] - \\ & [\mathbf{a}_{x'} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) + \mathbf{a}_z \cos \theta] \sin \theta \sin(\varphi - \varphi_n) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}'_{mn} &= \mathbf{a}_z \sin^2 \theta - \\ & [\mathbf{a}_{x'} \cos(\varphi - \varphi_n) + \mathbf{a}_{y'} \sin(\varphi - \varphi_n)] \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (5.3)$$

观测点到圆台阵面上第  $mn$  个阵元与到原点的相位差为

$$k(z_m \cos \theta + R_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)) \quad (6)$$

若波束指向角为  $(\theta_0, \varphi_0)$ , 则第  $mn$  个阵元所需的相移为

$$-k(z_m \cos \theta_0 + R_m \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_n)) \quad (7)$$

假设每个阵元都是理想阵元, 仅均匀向外辐射, 并且阵元间的耦合已被消除。若记

$$\begin{aligned} A_{mn} &= -\frac{k^2 e^{-jkr} I_{mn}}{4\pi\epsilon r} \cdot \\ & e^{jk[z_m(\cos\theta - \cos\theta_0) + R_m[\sin\theta\cos(\varphi - \varphi_n) - \sin\theta_0\cos(\varphi_0 - \varphi_n)]]} \end{aligned} \quad (8)$$

则阵元均为水平极化偶极子(记为  $h$ )的圆台相控阵天线的辐射场为

$$\mathbf{E}^h = \sum_{mn} A_{mn} \mathbf{M}'_{mn} \quad (9)$$

阵元均为垂直极化偶极子(记为  $v$ )的圆台相控阵天线的辐射场为

$$\mathbf{E}^v = \sum_{mn} A_{mn} (\mathbf{M}'_{mn} \cos \alpha + \mathbf{M}'_{mn} \sin \alpha) \quad (10)$$

天线远场的共极化分量和交叉极化分量常采用 Ludwig 定义<sup>[11]</sup>。局部水平、垂直极化基  $\mathbf{e}_h$  和  $\mathbf{e}_v$  分别为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} \mathbf{e}_h = \mathbf{a}_\varphi \\ \mathbf{e}_v = -\mathbf{a}_\theta \end{cases} \quad (11)$$

第  $mn$  个阵元为水平极化偶极子的方向矢量在  $\mathbf{e}_h$  和  $\mathbf{e}_v$  上的投影矢量为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}'_{mn} \cdot \mathbf{e}_h \\ \mathbf{M}'_{mn} \cdot \mathbf{e}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi - \varphi_n) \\ -\sin(\varphi - \varphi_n) \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

第  $mn$  个阵元为垂直极化偶极子的方向矢量在  $\mathbf{e}_h$  和  $\mathbf{e}_v$  上的投影矢量为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}'_{mn} \cdot \mathbf{e}_h \\ \mathbf{M}'_{mn} \cdot \mathbf{e}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\varphi - \varphi_n) \cos \alpha \\ \cos(\varphi - \varphi_n) \sin \theta \cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

阵元均为  $p$  极化偶极子的圆台相控阵天线的共极化(记为 co-pol) 和交叉极化(记为 x-pol) 电场分量为

$$\begin{bmatrix} E_{\text{co-pol}}^p \\ E_{\text{x-pol}}^p \end{bmatrix} = \sum_{mn} A_{mn} \begin{bmatrix} \mathbf{M}'_{mn} \cdot \mathbf{e}_p \\ \mathbf{M}'_{mn} \cdot \mathbf{e}_o \end{bmatrix}, p \neq o \quad (14)$$

空域极化比定义为

$$R_a^p(\theta, \varphi) = \frac{E_{\text{co-pol}}^p}{E_{\text{x-pol}}^p} \quad (15)$$

从式(8)、(14)、(15)可以看出, 单极化圆台相控阵天线空域极化比与波束指向角  $(\theta_0, \varphi_0)$ 、观测角  $(\theta, \varphi)$ 、阵面行列数、阵元间隔、斜边倾角以及激励电流等有关。当观测角  $\theta = 90^\circ$  时, 由式(12)和(14)可以推出  $E_{\text{x-pol}}^h = 0$ , 从而极化比为  $-\infty$ 。由于圆台阵列阵元的方向图与单元的位置有关, 使得阵因子无法提取出来, 从而式(14)和(15)没有简洁的表达式, 但可从公式上粗略推导出单极化圆台相控阵天线空域极化比关于波束指向角、观测角、阵面行列数以及斜边倾角等变量的变化关系。从式(1)可推出,  $R_m$  关于斜面倾角  $\alpha$  单调递减, 对于阵元为水平极化偶极子的情形, 天线空域极化比是斜面倾角的单调减函数; 对于阵元为垂直极化偶极子的情形, 主极化分量关于  $\alpha$  的偏导数比上交叉极化分量关于  $\alpha$  的偏导数约为  $-\cot(\alpha)$ , 在  $\alpha$  的取值范围  $[0^\circ, 90^\circ]$ ,  $-\cot(\alpha) \leq 0$ , 因此, 空域极化比也关于  $\alpha$  单调递减。对单极化圆台相控阵天线的共极化和交叉极化分量而言, 由于阵元的加权因子  $A_{mn}$  是一致的, 粗略估计时只考虑投影矢量关于俯仰和方位观测角的偏导数, 可以推出当俯仰观测角偏离  $90^\circ$  时, 空域极化比单调递增, 当方位观测角偏离  $0^\circ$  时, 空域极化比单调递增。单极化圆台相控阵天线方向图的有效口径随观察角偏离波束指向方向而降低, 从而使得天线增益降低。圆台阵列天线的规模会导致求和结果式(14)的变化, 如果  $m$  和  $n$  越大, 求和结果的细节变化越丰富。

此外, 阵元间隔会影响天线方向图的形状, 阵元间隔过大会导致天线方向图出现栅瓣, 文献[9]中给出了线阵和平面阵出现栅瓣的条件, 然而对于共形阵的栅瓣条件没有显式表达式<sup>[11]</sup>, 文中暂不考虑阵元间隔的影响, 统一设置较小的阵元间隔。

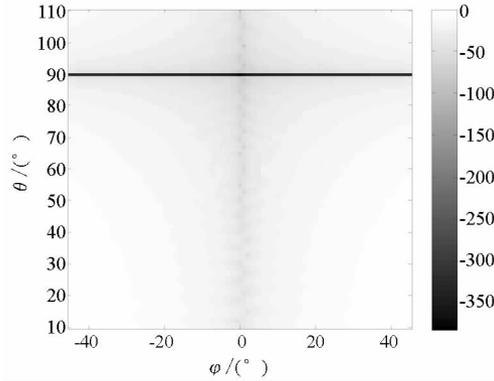
## 2 仿真分析

假设圆台相控阵天线的每个阵元等幅激励, 波长  $\lambda$  为 0.1m, 纵向阵元间隔在  $z$  轴上的投影长度为  $\frac{\lambda}{2}$ , 仿真条件为: 斜面倾角分别为  $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$  和  $90^\circ$ , 波束指向在法线方向和偏离法线方向, 阵列大小分别为  $11 \times 11$ 、 $17 \times 17$  以及

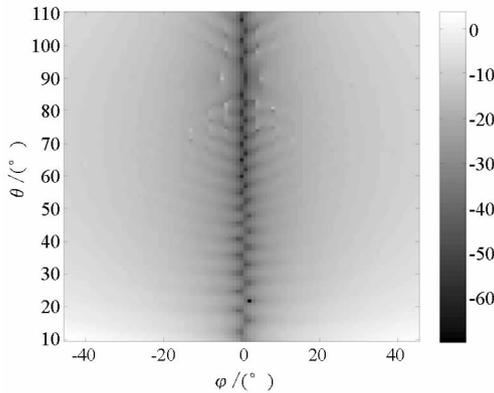
21 × 21。仿真中不同波束指向角以及俯仰和方位观测角下水平、垂直极化偶极子激励圆台阵的方向图,均以波束指向角和俯仰观测角在法线方向上时水平极化偶极子激励的方向图主瓣峰值进行归一化。

### 2.1 空域极化比随俯仰和方位观测角的变化具有一定规律

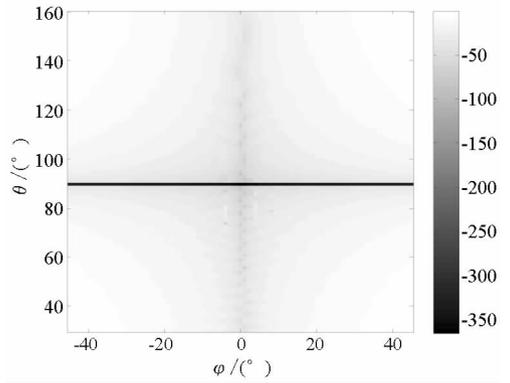
波束指向角无论在法线方向还是偏离法线方向时,空域极化比随俯仰和方位观测角的变化规律一致:水平极化偶极子激励时,俯仰向上空域极化比在  $\theta = 90^\circ$  时最小,随着天顶角偏离  $\theta = 90^\circ$  而增大,方位向上  $\varphi = 0^\circ$  附近时空域极化比最小,随着方位角偏离  $\varphi = 0^\circ$ ,极化比增大;垂直极化偶极子激励时,当方位角大于方位向主瓣宽度一半时,空域极化比随着天顶角偏离波束指向角而增大,方位向上  $\varphi = 0^\circ$  附近空域极化比最小,随着方位角偏离  $\varphi = 0^\circ$  空域极化比增大。以 21 × 21 规模的圆台阵、斜面倾角为  $60^\circ$ 、波束指向角在法线方向和  $(100^\circ, 0^\circ)$  为例,如图 3 所示,可以看出空域极化比的变化规律如上所述。



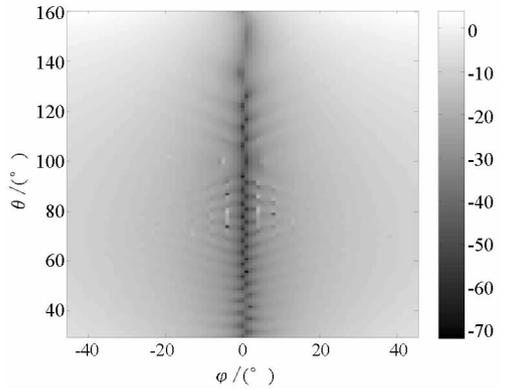
(a) 水平极化偶极子激励且波束指向在法线方向



(b) 垂直极化偶极子激励且波束指向在法线方向



(c) 水平极化偶极子激励且波束指向角为  $(100^\circ, 0^\circ)$



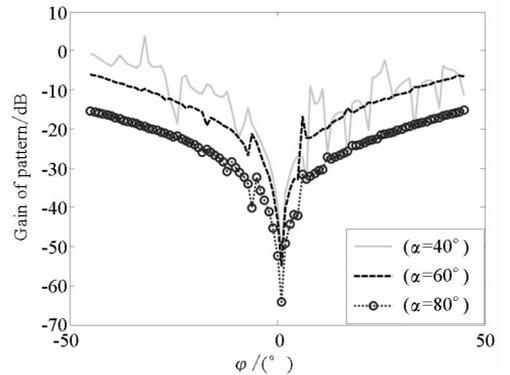
(d) 垂直极化偶极子激励且波束指向角为  $(100^\circ, 0^\circ)$

图 3 21 × 21 圆台阵的空域极化比

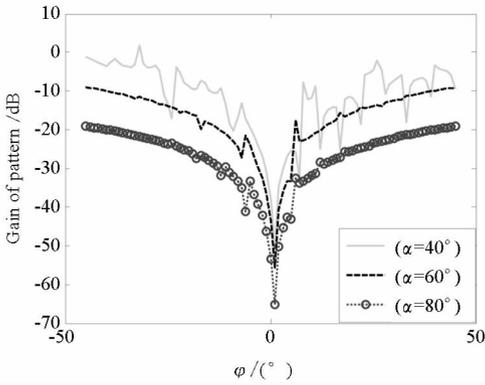
Fig. 3 The spatial polarization ratio of a quarter of truncated cone array antenna with 21 × 21 elements

### 2.2 空域极化比随斜面倾角变化的关系

空域极化比随着斜面倾角的增大而减小,极端的情形是柱形阵和锥形阵,柱形阵的空域极化比小于锥形阵,圆台阵的空域极化比大小介于两者之间。以 21 × 21 规模的圆台阵为例,当斜面倾角变化时,法线方向上空域极化比的变化规律如图 4 所示。



(a) 水平极化偶极子激励



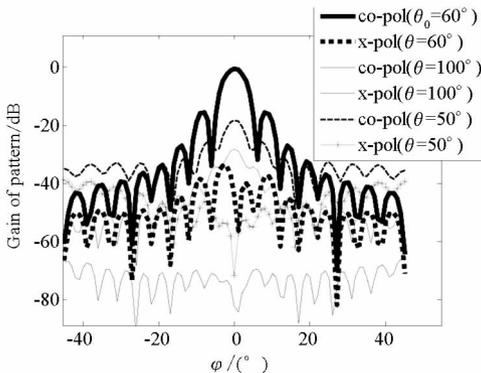
(b)垂直极化偶极子激励

图4 不同斜面倾角下波束指向在法线方向时的空域极化比

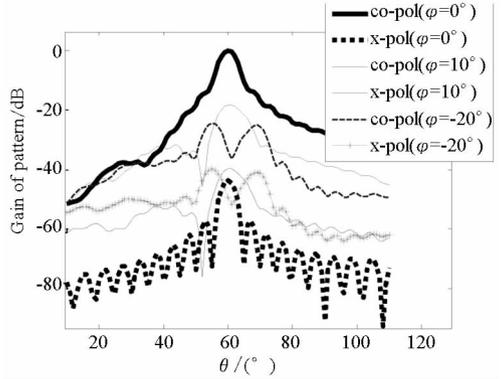
Fig. 4 The spatial polarization ratio with different slope angles when the beam points along the normal direction

### 2.3 方向图与俯仰和方位观测角的关系

水平与垂直极化偶极子激励的主极化方向图随着俯仰观测角偏离波束指向方向,波束的增益降低,远离  $\varphi = 0^\circ$  的方位向电平严重抬升,波束指向角偏离法线方向越大,越容易导致波纹效应产生<sup>[11]</sup>。在圆台阵列天线的主瓣内,水平、垂直极化偶极子激励的主极化方向图随着方位观测角偏离波束指向方向,天线的增益降低,远离  $\varphi = 0^\circ$  的方位向电平严重抬升,当方位观测角大于圆台阵列天线的主瓣宽度一半时,由于圆台阵列的非平面几何结构将导致方向图出现波纹效应,如果减小阵元间隔或者增大斜面倾角,波纹效应会减轻<sup>[11]</sup>。以斜面倾角为  $60^\circ$  的  $21 \times 21$  规模的圆台阵为例,如图5和图6所示,当波束指向分别在法线方向和  $(100^\circ, 0^\circ)$ ,俯仰和方位观测角变化时,空域极化比的变化规律如上所述,图5(b)中  $\varphi = -20^\circ$  时,方向图出现波纹效应,图6(b)中  $\varphi = 10^\circ$  时出现波纹效应。

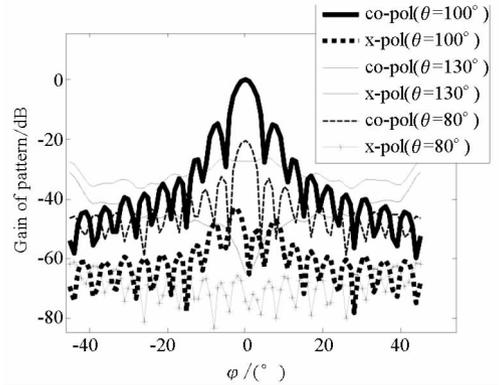


(a)水平极化偶极子激励不同俯仰角上

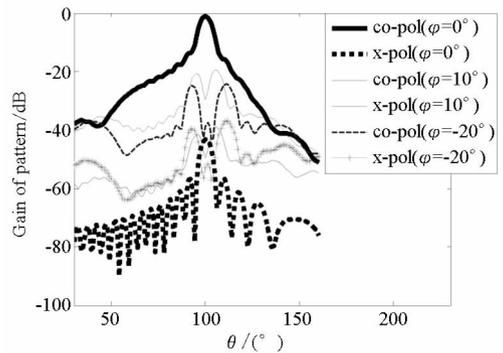


(b)垂直极化偶极子激励不同方位角上

图5  $21 \times 21$  圆台阵波束指向在法线方向的方向图  
Fig. 5 The patterns of a quarter of truncated cone array antenna with  $21 \times 21$  elements when the beam points along the normal direction



(a)水平极化偶极子激励不同俯仰角上



(b)垂直极化偶极子激励不同方位角上

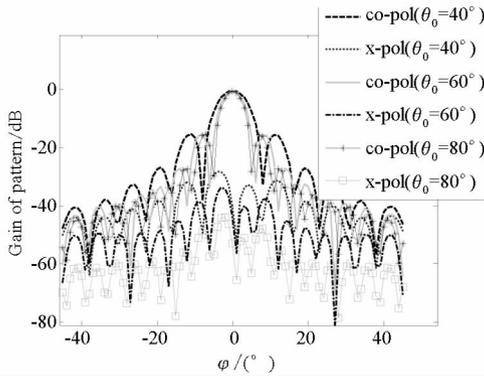
图6 波束指向角为  $(100^\circ, 0^\circ)$  时  $21 \times 21$  圆台阵在不同方位角上的方向图

Fig. 6 The patterns of a quarter of truncated cone array antenna with  $21 \times 21$  elements when the beam points along the direction  $(100^\circ, 0^\circ)$

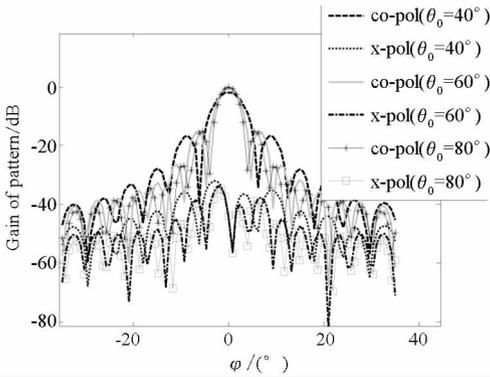
### 2.4 方向图与波束指向角的关系

对于水平极化偶极子激励的情形,主瓣最大增益不随波束指向角的变化而变化,当波束指向角(天顶角)增大时,主瓣变窄,旁瓣降低。对于垂直极化偶极子激励的情形,当波束指向偏离法

线方向时天线的增益降低,当波束指向角(天顶角)增大时,主瓣变窄,旁瓣升高。以斜面倾角为  $60^\circ$  的  $21 \times 21$  规模的圆台阵为例,图 7 给出在不同的波束指向角(天顶角)上,水平与垂直极化偶极子分别激励的共极化和交叉极化方向图。



(a) 水平极化偶极子



(b) 垂直极化偶极子

图 7 不同波束指向角上  $21 \times 21$  圆台阵激励的方向图

Fig. 7 The patterns with different pointing angles of a quarter of truncated cone array antenna with  $21 \times 21$  elements

### 2.5 方向图、空域极化比与阵面规模的关系

取相同的阵元间隔时,阵面规模越大,方向图的主瓣越窄,而且所包含的旁瓣信息越丰富。相对应的空域极化比,阵面规模越大,所含的信息量越丰富。以阵元规模为  $11 \times 11$  的圆台阵为例,斜面倾角为  $60^\circ$ ,波束指向在法线方向上,其他仿真参数不变,图 8 给出垂直极化偶极子激励的空域极化比,对比图 3(b)可以看出,图 8 中的空域极化比正好是图 3(b)中间部分信息的放大。

### 3 结论

本文主要分析了单极化圆台相控阵天线这一较常用的共形阵列天线的空域极化特性,圆台相控阵天线的方向图跟阵元极化方式、波束指向角

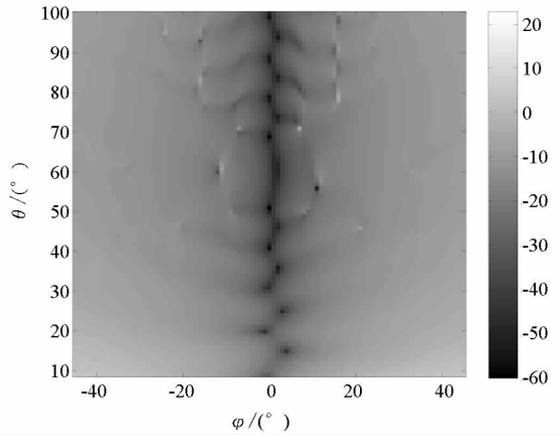


图 8 规模为  $11 \times 11$  的圆台阵列天线空域极化比  
Fig. 8 The spatial polarization ratio of a quarter of truncated cone array antenna with  $11 \times 11$  elements

以及观测角有关。空域极化比随着斜面倾角的增大而降低。水平极化偶极子激励时,俯仰向上空域极化比在天顶角  $\theta = 90^\circ$  时最小,空域极化比随着观测角偏离法线方向而增大;垂直极化偶极子激励时,空域极化比随着观测角偏离法线方向而增大。圆台阵面规模越大,空域极化比信息越丰富。

本文的研究成果对进一步利用单极化圆台阵列天线空域极化特性进行散射矩阵测量、极化滤波和抗干扰等研究具有一定理论指导意义,同时对全极化圆台相控阵天线的设计、极化特性和极化校准也奠定了一定理论基础。今后可以考虑圆台阵元间的耦合效应以及阵列锥削、加权等因素的影响,实际中诸如共形阵复杂的馈电网络以及阵列表面涂覆介质等内容都需要进一步深入研究。

### 参考文献 (References)

[1] 罗佳,王雪松,李永祯,等. 天线空域极化特性的表征及分析[J]. 电波科学学报,2008, 23(4): 620-628.  
LUO Jia, WANG Xuesong, LI Yongzhen, et al. Spatial polarization characteristics for antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 620-628. (in Chinese)

[2] 罗佳. 天线空域极化特性及应用[D]. 长沙:国防科技大学,2008.  
LUO Jia. Application and analysis of spatial polarization characteristics for antenna[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)

- STBC cooperation scheme for the multi-antenna relay [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(2): 334 - 339. (in Chinese)
- [3] Laneman J, Wornell G. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions Inform Theory, 2003, 49(10): 2415 - 2425.
- [4] Dharmawansa P, McKay M R, Mallik R K. Dual hop MIMO relaying with orthogonal space-time block codes [C]// IEEE International Conference on Communication 2009, Dresden, June 2009:1 - 5.
- [5] He J, Kam P Y. Adaptive cooperative space-time block coding with amplify-and-forward strategy [C]// IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2008, Singapore, May 2008: 1236 - 1240.
- [6] He J, Kam P Y. Cooperative space-time block coding with amplify-and-forward strategy: exact bit error probability and adaptive forwarding schemes [J]. Physical Communication, 2008, 1(3): 209 - 220.
- [7] Jang J, Lee K B, Lee Y H. Transmit power and bit allocations for OFDM systems in a fading channel [C]// IEEE GLOBECOM 2003, Dec 2003: 858 - 862.
- [8] Li Y, Wang W B, Kong J, et al. Power allocation and subcarrier pairing in OFDM-based relaying system [C]// IEEE International Conference on Communication 2008, May 2008: 2602 - 2606.
- [9] Shen Z H, Wang X X, Zhang H T. Power allocation and subcarrier pairing for OFDM based AF cooperative diversity systems [C]// IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2009, Barcelona, April 2009: 1 - 5.
- [10] Hammerstrom I, Wittneben A. On the optimal power allocation for Nonregenerative OFDM relay links [C]// IEEE International Conference on Communication 2006. Istanbul, June 2006: 4463 - 4468.
- [11] Wang L J, Zhao H T, Tang Y, et al. The joint relay selection with power allocation for outage-optimization in OFDM-based cooperative relaying [C]// IEEE ICCASM 2010, Tai Yuan, China, Oct 2010: 557 - 561.
- (上接第 124 页)
- [3] 李金梁, 罗佳, 常宇亮, 等. 基于天线空域极化特性的虚拟极化接收技术[J]. 电波科学学报, 2009, 24(3): 389 - 393.
- LI Jinliang, LUO Jia, CHANG Yuliang, et al. Virtual polarization receiver based on the spatial polarization characteristics of antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(3): 389 - 393. (in Chinese)
- [4] 罗佳, 王雪松, 李永祯, 等. 雷达目标极化散射矩阵测量的新方法研究[J]. 信号处理, 2009, 25(6): 868 - 873.
- LUO Jia, WANG Xuesong, LI Yongzhen, et al. A novel polarimetric scattering matrix measurement method [J]. Signal Processing, 2009, 25(6): 868 - 873. (in Chinese)
- [5] 戴幻尧, 李永祯, 王雪松, 等. 基于和差波束极化特性的目标极化散射矩阵测量方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 6 - 12.
- DAI Huanyao, LI Yongzhen, WANG Xuesong, et al. 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. (in Chinese)
- [6] Dai H Y, Wang X S, Li Y Z, et al. Spatial polarization characteristics and scattering matrix measurement of orthogonal polarization binary array radar[J]. Science in China (Series F), 2010, 53(12): 2687 - 2695.
- [7] 刘勇, 李永祯, 王雪松, 等. 有源压制干扰背景下的雷达目标空域极化检测方法[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 445 - 450.
- LIU Yong, LI Yongzhen, WANG Xuesong, et al. Radar target spatial polarization detection under active suppressive jamming background[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(3): 445 - 450. (in Chinese)
- [8] 戴幻尧, 李永祯, 陈志杰, 等. 电扫偶极子相控阵天线的空域极化特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 84 - 89.
- DAI Huanyao, LI Yongzhen, CHEN Zhijie, et al. Spatial polarization characteristics of electronically scanning dipole phased arrays antenna [J]. Journal of National University of Defence Technology, 2010, 32(1): 84 - 89. (in Chinese)
- [9] 张光义. 相控阵雷达系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- ZHANG Guangyi. Phased-array radar system [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [10] Robert J M. Phased array antenna handbook [M]. 2nd ed. Artech House, 2005.
- [11] Josefsson L, Persson P. Conformal array antenna theory and design [M]. IEEE Press, 2006.
- [12] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media [M]. IEEE Press, 1997.
- [13] Ludwig A C. The definition of cross polarization [J]. IEEE Tran. on AP, 1973: 116 - 119.