

# 角锥喇叭相位中心的移动参考点计算法

王建, 谢渊, 李欣

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**为了找到角锥喇叭天线在主瓣某一范围内使场的相位保持相对恒定的等效相位中心, 提出了一种确定角锥喇叭天线等效相位中心的分析方法。该方法通过采用角锥喇叭的简化模型对角锥喇叭天线远区辐射场进行分析, 利用该移动参考点法计算和分析了角锥喇叭E面和H面的相位中心和等相位面宽度, 得出了角锥喇叭的相位中心、等相位面宽度与等相位面的相位偏差之间的关系。

**关键词** 等相位面; 相位中心; 角锥喇叭; 移动参考点法

**中图分类号** TN820.17 **文献标识码** A

## Calculation of Phase Center for the Pyramidal Horn with the Method of Moving Reference Point

WANG Jian, XIE Yuan, and LI Xin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** In order to determine the position of equivalent phase centers of pyramidal horn antenna, which keep the phase of the antenna's field relative invariable in some range of the antenna's main lobe, an approach to analyze the equivalent phase centers of pyramidal horn antenna is presented in this paper. Through analyzing the far field of the pyramidal horn using its simplified model, the E and H plane phase centers and their equiphase surface width of the pyramidal horn are analyzed and calculated by using the method of moving reference point, and the relationship of deviation of equiphase surface between the phase center and equiphase surface width is achieved.

**Key words** equiphase surface; phase center; pyramidal horn; the method of moving reference point

随着通信、雷达、人造卫星和宇航技术的发展, 对天线的跟踪、定位的精确度的要求也越来越高, 而喇叭天线的相位中心问题无论在其相位测量应用、形成波束侦收应用、作为干涉仪阵列单元还是作为抛物面天线的馈源使用都很重要。文献[1-4]在如何确定天线相位中心问题上都是采用求天线远场最大辐射方向上相位面曲率中心的方法来确定天线的相位中心, 并对具体的天线结构, 如圆口径<sup>[2]</sup>、矩形口径的角锥喇叭得到一个计算相位中心的解析表达式; 文献[5]将喇叭天线视作口径天线, 分别应用二阶导数法和两点法分析了喇叭天线的相位中心; 文献[6]采用高斯波束模式法对喇叭天线的相位中心进行了分析, 其中文献[3]的结果表达式较为经典, 国内天线方面的相关书籍都引用了其结果<sup>[7-8]</sup>; 文献[9-10]对对数周期天线的相位中心进行了研究。本文采用移动参考点法计算和分析角锥喇叭相位中心及等相位面宽度。

## 1 天线的相位中心

对任意天线其远区辐射场的某个分量可表示为:

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{u}} E_u(\theta, \varphi) e^{j\psi(\theta, \varphi)} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (1)$$

式中  $E_u(\theta, \varphi)$  为幅度方向图函数;  $\psi(\theta, \varphi)$  为相位方向图函数;  $k = 2\pi/\lambda$ 。相位中心定义为: 在天线上或邻近若有一参考点, 在给定频率下使  $\psi(\theta, \varphi) = \text{常数}$ , 则这个使  $\psi(\theta, \varphi)$  为常数的参考点称为天线的相位中心。对绝大多数天线来说没有这样一个相位中心。但是, 许多天线可以找到一个在主瓣某一范围内使场的相位保持相对恒定的参考点, 这个参考点称为“等效相位中心”。有的天线可能在两个主面内有各自的相位中心, 喇叭天线就是这种情况。因此, 通常可在两个主面内分别确定它们的相位中心。

等效相位中心的计算可以采用移动参考点法, 如图1所示。一般喇叭天线的远区辐射场是以口径面上中心点为参考点得到的, 根据理论计算和实践证明, 角锥喇叭辐射场的某个主面的相位中心是在天线轴线上喇叭口径内的某点上。对喇叭天线来说, 式(1)可看作是以口径面上中点  $o$  为参考点得到的远场表达式, 如果式(1)中的  $\psi(\theta, \varphi)$  不为常数, 则必须移动参考点到  $o'$  点, 则式(1)变为:

$$\mathbf{E} = \hat{\mathbf{u}} \frac{e^{-jkR}}{R} E_u(\theta, \varphi) e^{j[\psi(\theta, \varphi) + k\Delta_z \cos\theta]} \quad (2)$$

式中  $\Delta_z$  就是要确定的相位中心。

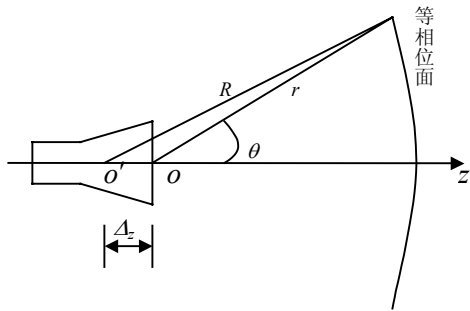


图1 移动参考点示意图

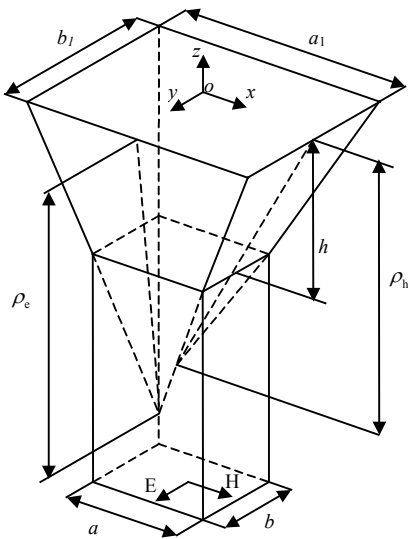


图2 角锥喇叭的结构示意图

## 2 移动参考点法计算角锥喇叭的相位中心

角锥喇叭的结构示意图如图2所示。

由于角锥喇叭的口径场的计算较难, 本文采用简化模型的口径场, 由此口径场求得的远场与实验结果吻合很好。而角锥喇叭的远区电场分量为:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\sin\varphi(1 + \cos\theta)I_1 I_2] \quad (3)$$

$$E_\varphi(\theta, \varphi) = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\cos\varphi(1 + \cos\theta)I_1 I_2] \quad (4)$$

其中

$$I_1(\theta, \varphi) = \int_{-a_1/2}^{a_1/2} \cos\left(\frac{\pi}{a}x'\right) e^{-jk[x'^2/(2\rho_c) - x'\sin\theta\cos\varphi]} dx' \quad (5)$$

$$I_2(\theta, \varphi) = \int_{-b_1/2}^{b_1/2} e^{-jk[y'^2/(2\rho_c) - y'\sin\theta\sin\varphi]} dy' \quad (6)$$

式中  $I_1(\theta, \varphi)$ 、 $I_2(\theta, \varphi)$  是与  $\theta$ 、 $\varphi$  喇叭尺寸有关的函数。对于式(3)和式(4)可以写成通式:

$$E(\theta, \varphi) = \frac{e^{-jkr}}{r} |E(\theta, \varphi)| e^{j\psi(\theta)} \quad (7)$$

式中  $\psi(\theta) = \arctan \frac{\text{Im}(I_1(\theta, \varphi)I_2(\theta, \varphi))}{\text{Re}(I_1(\theta, \varphi)I_2(\theta, \varphi))}$ 。则E面和H面的远区辐射场分别为:

$$E_E(\theta) = E_\theta(\theta, \varphi) \Big|_{\varphi=\frac{\pi}{2}} \quad (8)$$

$$E_H(\theta) = E_\varphi(\theta, \varphi) \Big|_{\varphi=0} \quad (9)$$

若以相位中心为参考点, 在远区  $r \approx R$ , 波程差  $r - R = -\Delta_z \hat{z} \hat{r} = -\Delta_z \cos\theta$ , 则:

$$E_E(\theta) = \frac{e^{-jkR}}{R} |E_\theta(\theta)| e^{j\psi_E(\theta)} e^{-jk(r-R)} = \frac{e^{-jkr}}{R} |E_\theta(\theta)| e^{j[\psi_E(\theta) + k\Delta_z \cos\theta]} \quad (10)$$

$$\psi'_E(\theta) = \psi_E(\theta) + k\Delta_z \cos\theta \quad (11)$$

寻找E面相位中心的方法:

(1) 对给定频率和相位偏差(相位偏差是指某方向上的远场相位与最大辐射方向上远场相位之差), 当  $\Delta_z = 0$ ,  $\theta = 0$  时, 得  $\psi'_E(0) = \alpha_0$ , 记录  $\alpha_0$  并保存。确定可能存在相位中心的范围( $z_{\min} < \Delta_z < z_{\max}$ ), 并将这个范围等分为  $N$  段, 则步长  $t = (z_{\max} - z_{\min})/N$ , 一般  $t$  越小精确度越高。

(2) 改变  $\Delta_z$  ( $\Delta_z = z_{\min} + it, i \in (1, 2, \dots, N)$ ), 然后寻找  $\theta$  ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ), 使  $\psi'(\theta) - \alpha_0 \leq \beta$ ,  $\beta$  为远区辐射场等相位面的相位偏差。若满足条件, 则记录该  $\Delta_z$  处所对应的最大等相位面半宽度  $\theta_1$ 。

(3) 重复(2), 得到满足条件的最大等相位面半宽度  $\theta_2$ , 并比较  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 记录比较大的  $\Delta_z$  及其对应的  $\theta$ 。直到在  $z_{\min} < \Delta_z < z_{\max}$  内找到使  $\psi'(\theta) - \alpha_0 \leq \beta$  的最大相角  $\theta_{\max}$ 。则相位中心就在  $Z$  轴上偏离口径面向内最大相角  $\theta_{\max}$  所对应的  $\Delta_z$  处。

(4) 改变  $\beta$ , 重复步骤(2)和(3), 得到不同  $\beta$  所对应的  $\theta_{\max}$  及其  $\Delta_z$ 。

H面相位中心的寻找方法同上。

文献[3]中,喇叭天线的相位中心定义为:远区辐射场的等相位面与通过天线轴线的平面相交的曲线的曲率中心。通过求远区辐射场等相位面与主平面(即H平面和E平面)的交线的曲率中心,近似地看成喇叭在该平面的相位中心,并给出了H面相位中心 $\Delta z_h$ 和E面相位中心 $\Delta z_e$ 的计算公式。但是,该方法只对相位中心进行了分析而没有对等相位面宽度进行分析。

### 3 计算结果

为研究角锥喇叭的相位中心位置、等相位面宽度与等相位面相位偏差之间的关系,在等相位面相位偏差下,分别对不同频率点,给出用移动参考点

法得到的相位中心位置、等相位面宽度,并与文献[3]的方法所得到的数据进行对比。取角锥喇叭的参数与文献[8]中的相同,即:波导宽边 $a=15.8\text{ mm}$ ,波导窄边 $b=7.9\text{ mm}$ ,喇叭宽边 $a_1=90\text{ mm}$ ,喇叭窄边 $b_1=70\text{ mm}$ ,喇叭长度 $h=200\text{ mm}$ ,频率 $f=13\text{ GHz}/15\text{ GHz}$ ,等相位面相位偏差 $\beta$ 取 $(1\times 10^{-5})^\circ\sim 1^\circ$ ,相角 $\theta$ 的扫描范围为 $-90^\circ\sim 90^\circ$ , $\Delta_l$ 的步长为 $d=0.001\text{ mm}$ , $c=2.997\ 76\times 10^8\text{ m/s}$ 。图3为相位中心位置与等相位面相位偏差的关系曲线。图4为等相位面宽度与等相位面相位偏差的关系曲线,表1为图3和图4中E面和H面的一些关键点及采用文献[3]的方法所得到的相位中心位置。

表1 一些关键点及文献[3]的相位中心位置

	$\beta/(^\circ)$	13 GHz				15 GHz			
		E面		H面		E面		H面	
		$\Delta z_e/\text{mm}$	$\theta/(^\circ)$	$\Delta z_h/\text{mm}$	$\theta/(^\circ)$	$\Delta z_e/\text{mm}$	$\theta/(^\circ)$	$\Delta z_h/\text{mm}$	$\theta/(^\circ)$
本文方法	1.000 000	32.277	24.8	35.077	27.6	39.883	20.2	39.900	20.0
的相位中心	0.500 000	29.033	21.8	32.381	24.0	37.976	18.4	39.787	18.4
和等相位面	0.100 000	24.951	15.6	28.836	16.8	32.867	13.0	37.964	14.2
夹角	0.010 000	22.811	9.2	26.995	9.8	30.284	7.6	35.695	8.2
	0.001 000	22.132	5.2	26.416	5.6	29.510	4.4	35.028	4.8
	0.000 100	21.938	3.0	26.237	3.2	29.273	2.6	34.783	2.6
	0.000 010	21.880	1.8	26.180	1.8	29.183	1.4	34.731	1.6
	0.000 001	21.858	1.0	26.164	1.0	29.162	0.8	34.712	1.0
文献[3]的相位中心		21.851		26.159		29.157		34.702	

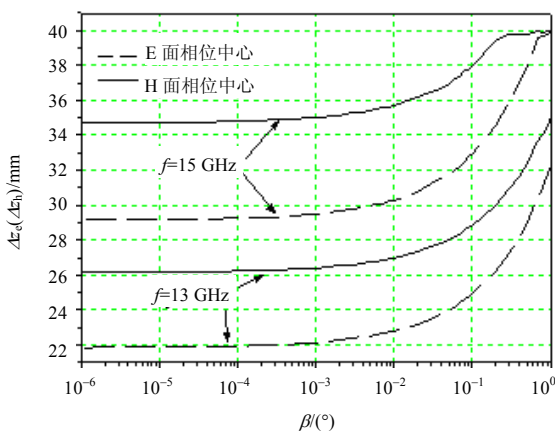


图3 相位中心位置与相位偏差的关系曲线

由图3和图4以及表1可见,角锥喇叭的相位中心偏离在喇叭口径内,且E面和H面的相位中心位置不同,并随相位偏差和频率的增大而增大,且当 $\beta$ 减小时,相位中心和等相位面宽度也随之减小,相位

中心的值趋近于用文献[3]曲率中心所计算得到的相位中心,但是此时等相位面宽度很小。

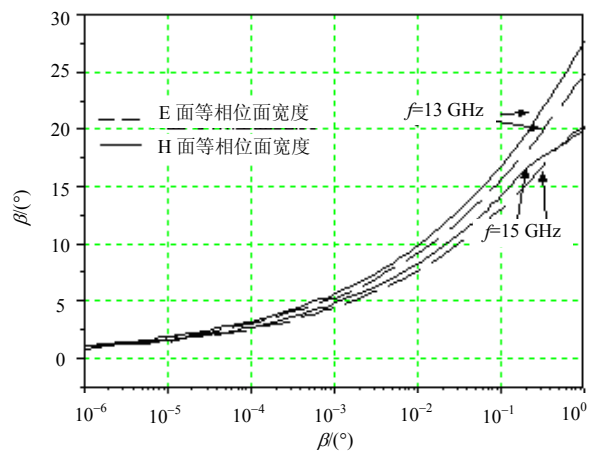


图4 等相位面宽度与相位偏差的关系曲线

(下转第555页)

准确的避免碰撞的决策咨询, TCAS系统必须在本机与入侵飞机到达最接近点(CPA)之前进行预测。根据本机与入侵飞机在空中的相对几何位置, 计算出本机和入侵飞机在当前时刻和今后的  $\tau$  时刻之间的飞行轨迹, 然后根据预测的飞行轨迹来判断两架飞机是否会相撞, 从而确定本机应该采取的机动飞行措施。总之, 在CAS逻辑中, 两机飞行到最接近点CPA的时间、HMD和VMD是刻画空中碰撞的主要参数, 采用它们能准确地描述TCAS系统的防撞机制。

### 参 考 文 献

- [1] WILLIAMSON T, SPENCER N A. Development and operation of the traffic alert and collision avoidance system (TCAS)[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(11): 1735-1744.
- [2] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Introduction to TCAS II version 7 [EB/OL]. [2000-05-11]. <http://www.arinc.com>.
- [3] LOVE W D. Preview of TCAS II version 7[EB/OL]. [2000-05-11]. <http://www.mitre.org>.
- [4] SHIRAKAWA M, SUMIYA Y, OZEKI S. A numerical evaluation method of the revised ACAS algorithms using smoothed spline interpolation[C]//IEEE Aerospace Conference.

- Big Sky, MT, USA: IEEE, 2000.
- [5] RTCA. Minimum operational performance standards for traffic alert and collision avoidance systems II (TCAS II) airborne equipment[S]//RTCA/DO-185A, 1997.
- [6] GAZIT R Y, POWELL J D. Aircraft collision avoidance based on GPS position broadcasts[C]//15th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Atlanta, GA, USA: IEEE, 1996.
- [7] ABDUL-BAKI B, BALDWIN J, RUDEL M P. Independent validation and verification of the TCAS II collision avoidance subsystem[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(8): 3-9.
- [8] ZEITLIN A D, LOVE W D, CIEPLAK J J. Enhancements to the next generation collision avoidance system: opportunities for greater safety and efficiency[C]//AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Cambridge, MA, USA: IEEE, 1995.
- [9] RTCA. Safety analysis of proposed changes to TCAS RA reversal logic[S]. RTCA DO-298, Washington D. C., USA: RTCA, 2005.
- [10] KUCHAR J K, DRUMM A C. The traffic alert and collision avoidance system[J]. LINC Lab, 2007, 16(2): 277-295.

编辑 黄 莘

(上接第540页)

## 4 结 论

角锥喇叭存在等效相位中心, 且等效相位中心和等相位面宽度随相位偏差  $\beta$  的变化而变化, 当  $\beta \rightarrow 0$  时, 等效相位中心趋向等于用曲率中心的方法计算得到的结果, 等相位面只存在于辐射的最大指向附近; 当然  $I_E(\theta)$  是与  $\theta$ 、 $\varphi$  及喇叭尺寸有关的函数, 等效相位中心和等相位面宽度也与喇叭的几何尺寸有关系。因此, 在工程设计中, 可以根据需要来确定等效相位中心的位置。

### 参 考 文 献

- [1] HU Y Y. A method of determining phase centers and its application to electro-magnetic horns[J]. Journal-Franklin Inst, 1961, 271(1): 31-39.
- [2] UJII H, YONEYAMA T, NISHIDA S. A consideration of the phase center of aperture antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1967, 15(3): 478-480.
- [3] MUEHLER E I. The phase center of horn antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1970, 18, (5): 753-760.
- [4] BAUR K. The phase center of aperture radiators[J]. Arch Elek Ibertragung, 1955, 9: 541-546.

- [5] WAIDELICH D L. The phase centers of aperture antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1980, 28(2): 263-264.
- [6] MURPHY J A, PADMAN R. Phase centers of horn antennas using Gaussian beam mode analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(8): 1306-1310.
- [7] 林昌禄, 陈 海, 吴为公. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990.  
LIN Cang-lu, CHEN Hai, WU Wei-gong. Modern antenna design[M]. Beijing: Posts&Telecom Press, 1990.
- [8] 王世锦. 天线微波程序集[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.  
WANG Si-jin. Microwave antenna procedures assembly[M]. Beijing: Astronautics Publishing House, 1989.
- [9] 丁晓磊, 王 建, 林昌禄. 对数周期偶极子天线相位中心的分析与计算[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1375-1377.  
DING Xiao-lei, WANG Jian, LIN Cang-lu. Analysis and calculation for the phase center of the LPDA[J]. Chinese Journal of Electronics, 2003, 31(9): 1375-1377.
- [10] 金元松, 董明玉, 何绍林, 等. 对数周期偶极子天线的可变相位中心[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 323-328.  
JIN Yuan-song, DONG Ming-yu, HE Sao-lin, et al. The variable phase center of the log-periodic dipole antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(3): 323-328.

编辑 税 红