



## 2 天线方向图仿真模型及仿真

设4个馈源的位置如图2所示,天线轴线方向(即等信号轴)为 $x$ 轴正方向<sup>[4]</sup>,目标在天线坐标系中 $XOY$ 平面上的投影点为 $A$ ,相应的方位角、俯仰角分别为 $\beta, \varepsilon$ ,各馈源波束指向与天线轴线的夹角均为 $\alpha$ (设 $\alpha = 1^\circ$ )。

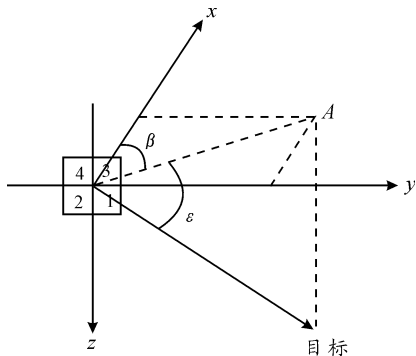


图2 四馈源与目标相对位置

设4个馈源对应的方向图近似为辛格函数:

$$F(\theta) = |\text{sinc}(2\pi\theta/\theta_0)| \quad (1)$$

式中 $\theta_0$ 为零功率点波束宽度。根据实际情况,近似认为4个馈源均从原点发送电磁波,4个馈源的波束指向在上图坐标系中的单位矢量分别为

$$\begin{aligned} \vec{e}_1 &= [\cos\alpha, \sin\alpha/\sqrt{2}, \sin\alpha/\sqrt{2}]^T \\ \vec{e}_2 &= [\cos\alpha, -\sin\alpha/\sqrt{2}, \sin\alpha/\sqrt{2}]^T \\ \vec{e}_3 &= [\cos\alpha, \sin\alpha/\sqrt{2}, -\sin\alpha/\sqrt{2}]^T \\ \vec{e}_4 &= [\cos\alpha, -\sin\alpha/\sqrt{2}, -\sin\alpha/\sqrt{2}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

雷达一目标方向在天线坐标系中的单位矢量为

$$\vec{e}_T = [\cos\beta\cos\varepsilon, \sin\beta\cos\varepsilon, \sin\varepsilon] \quad (3)$$

因此可得雷达一目标方向相对于第 $i$ 个馈源波束指向的角偏差为

$$\theta_i = \arccos(\vec{e}_T \cdot \vec{e}_i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

相对于第 $i$ 个馈源,其增益为

$$G_i(\theta_i) = |\text{sinc}(2\pi\arccos(\vec{e}_T \cdot \vec{e}_i)/\theta_0)| \quad (5)$$

由此可知,给出某一时刻方位角和俯仰角就可得到该时刻4个馈源的增益。然后根据4个馈源的增益求得和通道增益为

$$G_\Sigma(\beta, \varepsilon) = G_1(\theta_1) + G_2(\theta_2) + G_3(\theta_3) + G_4(\theta_4) \quad (6)$$

方位差通道增益为

$$G_\beta(\beta, \varepsilon) = G_1(\theta_1) + G_3(\theta_3) - G_2(\theta_2) - G_4(\theta_4) \quad (7)$$

俯仰差通道增益为

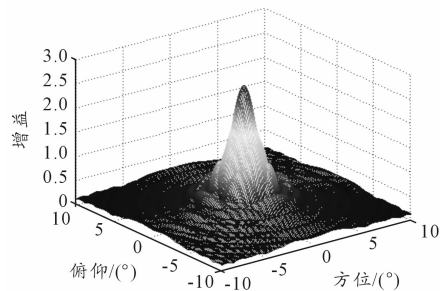
$$G_\varepsilon(\beta, \varepsilon) = G_1(\theta_1) + G_2(\theta_2) - G_3(\theta_3) - G_4(\theta_4) \quad (8)$$

设平板缝隙天线直径为840 mm,雷达波长为3 cm,则零功率点波束宽度为<sup>[5]</sup>

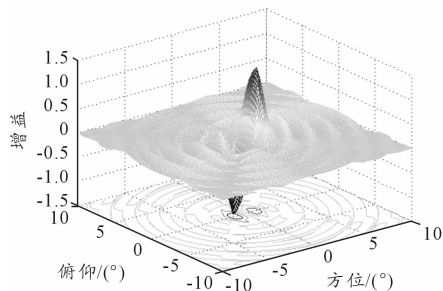
$$\theta_0 = 2 \frac{\lambda}{d} \text{rad} = 2 \cdot \frac{30}{840} \cdot \frac{180}{\pi} = 4.0926^\circ$$

由仿真得到和通道、方位角通道及俯仰角通道的天线方向图分别如图3所示,其中图(a)所示为和通道增益天

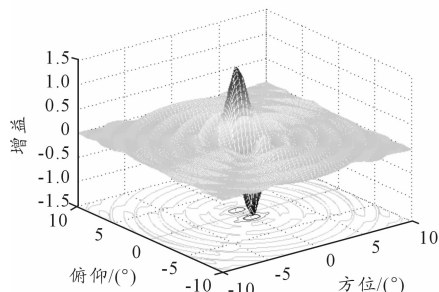
线方向图,在俯仰和方位角为 $0^\circ$ 时增益最大;图(b)和图(c)所示的方位差通道增益及俯仰差通道增益分别关于方位角 $0^\circ$ 、俯仰角 $0^\circ$ 成反对称分布。



(a) 和通道增益



(b) 方位差通道增益



(c) 俯仰差通道增益

图3 各通道天线方向图

## 3 角误差的测量

以方位误差角的测量为例,即设定俯仰角 $\varepsilon = 0^\circ$ ,目标的方位误差角为 $\Delta\beta$ ,则和通道信号振幅为

$$E_\Sigma(\Delta\beta) = k G_\Sigma(\Delta\beta, 0) G_\Sigma(\Delta\beta, 0) \quad (9)$$

式中: $k$ 为比例系数,它与雷达系数、目标距离、目标参数等有关; $G_\Sigma(\Delta\beta, 0)$ 为俯仰角为零时的和波束天线方向图函数。

差通道信号振幅为

$$E_\Delta(\Delta\beta) = k G_\Sigma(\Delta\beta, 0) G_\Delta(\Delta\beta, 0) \quad (10)$$

式中: $k$ 值、 $G_\Sigma(\Delta\beta, 0)$ 同上; $G_\Delta(\Delta\beta, 0)$ 为俯仰角为零时的差波束天线方向图函数。

如图4所示,对于振幅和差式单脉冲测角,在一定的方位误差角范围内,差通道信号振幅与和通道信号振幅之比与方位误差角成比例,设该比例系数为定向斜率,其表达

式为

$$\frac{E_{\Delta}(\Delta\beta)}{E_{\Sigma}(\Delta\beta)} = \frac{G_{\Delta}(\Delta\beta,0)}{G_{\Sigma}(\Delta\beta,0)} = \mu\Delta\beta \quad (11)$$

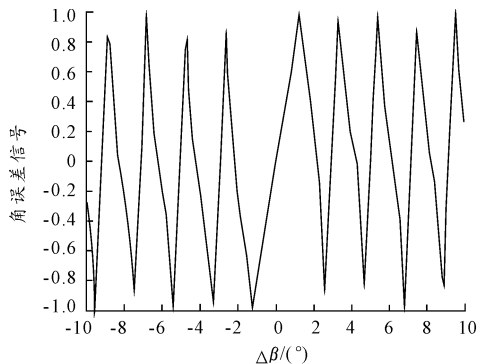


图4 方位误差角变化曲线

由图4可知,方位角误差在 $-0.8 \sim 0.8^\circ$ 与差通道信号振幅和通道振幅的比值成线性关系。

为了求得该定向斜率 $\mu$ ,取该范围内的17个数据: $(-0.8, -0.5792), (-0.7, -0.4968), (-0.6, -0.4188), (-0.5, -0.3443), (-0.4, -0.2724), (-0.3, -0.2027), (-0.2, -0.1343), (-0.1, -0.0669), (0, 0), (0.1, 0.0669), (0.2, 0.1343), (0.3, 0.2027), (0.4, 0.2724), (0.5, 0.3443), (0.6, 0.4188), (0.7, 0.4968), (0.8, 0.5792)$ 。这里采用最小二乘法直线拟合的方法<sup>[6]</sup>,方程并求解后得直线

$$y = \bar{y} + \alpha_1(x - \bar{x}) \quad (12)$$

$$\text{其中: } n=17; \bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n); \bar{y} = \frac{1}{n}(y_1 + y_2 + \dots + y_n); \alpha_1 = \frac{(x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n) - n\bar{x}\bar{y}}{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) - n\bar{x}^2}。$$

代入数据可得 $\bar{x} = 0, \bar{y} = 0, \alpha_1 = 0.7048$ , 则 $\alpha_1 =$

$0.7048x$ , 即定向斜率 $\mu = \alpha_1 = 0.7048$ 。

这样当俯仰角为零时,方位角误差在 $-0.8 \sim 0.8^\circ$ ,只要知道差通道信号振幅与和通道振幅的比值就可求得方位误差角的大小,俯仰误差角的求解与之同理。此时目标即时的角度即为天线轴线的指向角度与误差角的和值。

## 4 结束语

由于现代空战中,机载火控雷达需要实时地获取目标的角度信息。根据这一问题,建立了机载雷达天线图模型并进行了仿真,提出应用最小二乘法直线拟合的方法,提高了测角精度,为快速调整天线轴线以对目标实施快速角度跟踪提供了可能。

## 参考文献:

- [1] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [2] 弋稳. 雷达接收机技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 贾德,韦传安,林幼权. 机载雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [4] 王雪松,肖顺平. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [5] George W. Stimson. 机载雷达导论[M]. 2版. 吴汉平,等译. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 叶其孝,沈永欢. 实用数学手册[M]. 2版. 北京:科学出版社,2006.

(责任编辑 陈松)

(上接第31页)

## 4 结束语

将RPCA算法引入飞控系统故障诊断应用中,仿真结果表明该算法能够检测出作动器卡死故障,对故障也有准确的定位,具有一定的理论意义。而且实际应用中可以利用飞控系统大量历史数据建立相对主元模型,可以提高故障检测的准确性。

## 参考文献:

- [1] 陆宁云,王福利,高福荣,等. 间歇过程的统计建模与在线检测[J]. 自动化学报,2006,32(3):400-410.
- [2] 王静. 飞控系统故障诊断技术研究及软件开发[D].

西安:西北工业大学,2007.

- [3] 王天真. 智能融合数据挖掘方法及其应用[D]. 上海:上海海事大学,2006.
- [4] 文成林,胡静,王天真,等. 相对主元分析及其在数据压缩和故障诊断中的应用研究[J]. 自动化学报,2008,34(9):1128-1139.
- [5] 胡静. 相对主元分析理论及其应用研究[D]. 郑州:河南大学,2008.
- [6] Jolliffe I T. Principal Component Analysis[M]. Berlin: spinger-Verlag,2002:10-77.
- [7] 杨伟. 容错飞行控制系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.

(责任编辑 周江川)