

多辐射源合成场对反辐射导弹的诱偏作用

周伟光^{1,2}, 罗积润¹, 王华彬³

(1. 中科院电子所, 北京 100080; 2. 中科院研究生院, 北京 100080; 3. 空军第二研究所, 北京 100085)

摘要: 本文在考虑方向图、极化方式的基础上确立了一种多辐射源合成场的仿真模型, 获得了这种模型下多辐射源合成场及坡印亭矢量空间分布公式, 并以雷达与诱饵合成场为例给出了多辐射源合成场的仿真思路、计算公式和模拟结果. 数值计算表明, 雷达和诱饵的典型布阵可以使多辐射源合成场坡印亭矢量反方向指向人为设置的陷阱区域, 从而能够对反辐射导弹有效诱偏.

关键词: 反辐射导弹; 诱饵; 方向图; 极化方式; 诱偏效果

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 06-1193-05

Modeling of Electromagnetic field combined Profile of Multiple Radiation Sources as Well as Its Decoying Effect on ARM

ZHOU Wei guang^{1,2}, LUO Ji run¹, WANG Hua bin³

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. Second Research Institute of Air Force, Beijing 100085, China)

Abstract: A theoretical model is proposed for analyzing and simulating the electromagnetic field combined profile of several radiation sources in this paper. The formulae of the electromagnetic field combined profile and Poynting Vector have been obtained under the consideration of field pattern and polarization. A typical application of several radiation sources, disturbing the tracking of Anti radiation missile (ARM) with radar and decoys, has been simulated and simulation results show that ARM may be decoyed to a trapped area through the electromagnetic field combined profile if three decoys have been distributed near the radar in an appropriate way.

Key words: anti-radiation missile; decoy; field pattern; polarization; decoying effect

1 引言

在电子对抗领域中, 多辐射源合成场有广泛的应用, 特别是在雷达诱饵技术中. 雷达诱饵技术通过多个辐射源的布阵在空间产生一个合理的合成场分布, 对反辐射导弹(ARM)进行诱偏, 实现对雷达和诱饵的双重保护. 合理布阵是以多个辐射源(雷达与诱饵)合成场的空间分布为依据的, 但各辐射源产生的辐射场数学表达复杂, 不仅要考虑定向特性, 还要考虑幅度和相位的空间分布特性以及场的极化方向, 使建立多个辐射源合成场的模型极为困难. 文献[1]从 ARM 跟踪波阵面法线方向入手研究雷达、诱饵的诱偏, 但未涉及场分布的讨论. 文献[2]基于多点源诱偏理论, 提出了一种多辐射源合成场计算模型. 模型假定各辐射源均辐射球面波, 将各辐射源的场在空间直接相加得到合成场的幅度和相位. 该模型从原理上解释了雷达、诱饵辐射的能量对 ARM 寻

的影响, 但忽略了各辐射场的方向性和极化方式. 文献[3]在计及方向图的影响后, 给出了雷达配置诱饵抗反辐射导弹的仿真结果, 但没有考虑场幅度和相位空间分布特性以及极化方式的影响.

本文在同时考虑幅度和相位空间分布、极化方式两方面影响的情况下, 确立两种典型辐射源(雷达与诱饵)辐射场的数学模型, 给出雷达与诱饵合成场的计算方法和公式, 通过合理设置理论模型的工作参数, 尝试建立一个相对完善的雷达与诱饵合成场模型.

2 雷达及诱饵空间场分布模型

2.1 雷达场分布模型

根据电磁场理论可知, 天线向空间辐射的场为外向球面波与方向图函数的乘积, 即

$$E = -j\omega\mu \frac{e^{j(\alpha - kr)}}{4\pi r} f(\theta, \varphi) \mathbf{a} \quad (1)$$

由上式可以看出,空间任意一点辐射场幅度的大小只与空间位置有关,与时间无关, $\frac{f_r(\theta, \varphi)}{r}$ 代表了幅度的空间分布特性,而其相位是距离和时间的函数,由相位因子 $e^{j(a\theta - br)}$ 来确定, a 为辐射场的极化方向,即天线辐射场的特性可以用幅度、相位及极化方向三个基本参量确定。

根据天线理论可知^[4],在远场条件下,大多数相控阵天线的方向图函数可通过修正辛克函数来逼近。辛克函数的第一副瓣电平约-13.26dB,而大多数雷达天线方向图的副瓣电平都低于此值,一般为-30dB以上,为了逼近实际情况,可以在辛克函数的第一零点以外的角度上都应乘以一副瓣减小因子^[5],从而使其副瓣电平与实际相近。针对笔形波束,可以假设雷达天线场强方向图具有旋转对称性,那么在任一主平面内其数学模型可表示如下:

$$f_r(\theta) = \alpha \frac{1 + \cos\theta}{2} \times \frac{\sin(k\sin\theta)}{k\sin\theta} \quad (2)$$

式中, $\alpha = \frac{10^{-r} + 1}{2} + \text{sgn}(\theta - \theta_0) \frac{10^{-r} - 1}{2}$ 为副瓣减小因子, $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$, $\theta_0 = \sin^{-1} \frac{\pi}{k}$ 为零点出现的角度, $r = 0.05(S - 13.26)$, S 为第一副瓣电平,单位用 dB 表示, $k \approx \frac{1.3916}{\sin(\theta_b/2)}$, $k\sin\theta$ 用弧度表示, θ_b 为半功率点波束宽度, $\frac{1 + \cos\theta}{2}$ 为倾斜因子。

另外,在雷达天线扫描过程中,波束指向是随时间变化的。假设某时刻雷达主瓣空间指向为 (θ_p, φ_p) , 则雷达天线方向图函数在雷达坐标系(雷达为坐标原点)中可表示为:

$$f_r(\theta, \varphi) = \alpha_p \frac{1 + \cos\theta_p}{2} \times \frac{\sin(k\sin\theta_p)}{k\sin\theta_p} \times \cos\theta_p \quad (3)$$

式中, $\theta_p = \arccos(\sin\theta \cos\varphi \sin\theta_i \cos\varphi_i + \sin\theta \sin\varphi \sin\theta_i \sin\varphi_i + \cos\theta \cos\theta_i)$

$$\alpha_p = \frac{10^{-r} + 1}{2} + \text{sgn}(\theta_p - \theta_0) \frac{10^{-r} - 1}{2}$$

基于以上模型,将雷达参数设置为:某时刻雷达波束指向与天线辐射口径垂直,主瓣宽度为 2° ,副瓣电平为-35dB,可以利用 Matlab 工具编程模拟雷达天线的场分布,仿真结果如图 1 所示。由于雷达辐射场会受到多种随机干扰,使其副瓣电平产生随机波动,所以在仿真过程中根据实际情况加入了一个 0.3dB-0.6dB 的随机数^[6]。为了验证模型及算法的有效性,给出相同条件下某雷达的实测结果,如图 2 所示。可以看出,在主瓣区域仿真结果与实验结果吻合得较好,在副瓣区域有微小差别。在离主瓣较近的副瓣区域,仿真结果的副瓣电平高于实测结果的副瓣电平,这意味着实际雷达的生存概率

有可能会略高于仿真得到的雷达生存概率。

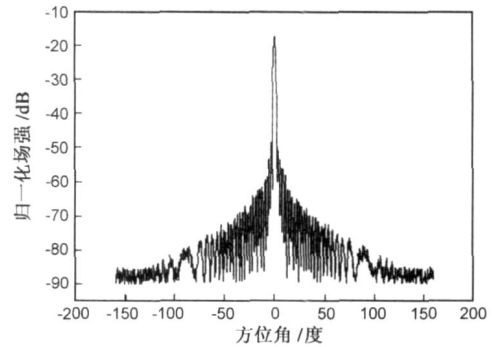


图 1 雷达主平面仿真方向图

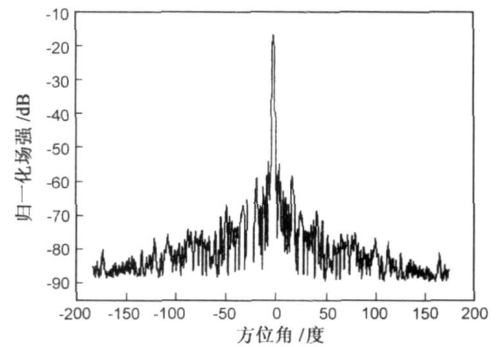


图 2 雷达主平面实测方向图

2.2 诱饵场分布模型

理想的诱饵天线波束应为全向半球状,这种天线很难实现。在工程应用中,变形偶极子天线是一种常用的诱饵天线,它通过加反射板使能量向上半空间集中,从而近似实现半球状波束。由于自由空间中偶极子天线 E 面方向图为正弦函数,其辐射场具有旋转对称性且上下对称,反射板的存在会使其附近辐射场逐渐减小并最终接近零,所以可用正弦函数与余弦函数的乘积来逼近诱饵天线的方向图。为了在仿真过程中能够灵活控制诱饵天线在俯仰方向上的覆盖范围,引入天顶角控制因子 q ,使得可以通过调整 q 值来逼近不同覆盖范围的诱饵天线。若假设诱饵辐射功率(功率增益积)与雷达平均副瓣辐射功率(功率增益积)相等,将诱饵辐射功率对雷达主瓣辐射功率归一化后,可引入诱饵电平最大值 d_m ,用来调整诱饵辐射功率与雷达主瓣辐射功率的相对大小。由以上分析可得诱饵天线方向图数学模型如下:

$$f_d(\theta) = d_m (\sin\theta \cos\theta)^{q/2} \quad (4)$$

式中, $d_m = 10^{-S/20}$, S 为副瓣电平,单位用 dB 表示, q 值的取值范围为 0.25 到 1。

图 3 以天顶角控制因子 q 为参变量给出了由式(4)描述的变形偶极子天线主平面方向图簇,其中, OA 为最大辐射方向, B, B', C, C', D, D' 辐射强度均低于 A 点 1dB,若以 $\angle BOB', \angle COC', \angle DOD'$ 来表征诱饵天线方向图的仰俯覆盖范围,可以看出, q 值越小,越接近半

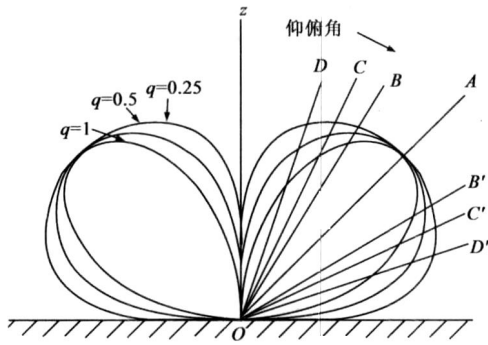


图 3 诱饵主平面方向图

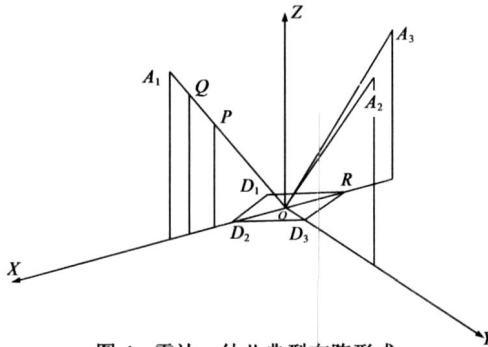


图 4 雷达、幼儿典型布阵形式

球覆盖. 在数值计算中, 可以通过控制 q 值来模拟任意仰俯覆盖范围的诱饵天线方向图. 为了研究方便, 假设诱饵极化方式与雷达相同.

3 雷达与诱饵合成场模型

由于辐射场具有矢量特性, 求解不同位置处各辐射源的合成场较为复杂. 本文提出按如下思路求解合成场: 首先为各辐射源建立各自的坐标系, 各坐标系的坐标原点可以不同, 但各坐标系的坐标轴必须相互平行, 然后将其在各自的坐标系中表示, 并将各辐射场在各自直角坐标系下分解为 x 、 y 、 z 方向上的三个分量, 最后通过坐标转换将各辐射源的场在同一坐标系中表示并叠加, 从而得到最终的合成场分布. 下面以雷达周围配置一部诱饵为例说明求解合成场的方法.

将雷达、诱饵的辐射场分别在雷达坐标系(以雷达所在位置为原点)和诱饵坐标系(以诱饵所在位置为原点)中表示可得

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{(r)} = A^{(r)} \sin(\alpha - kr^{(r)}) \mathbf{a}^{(r)} \\ \mathbf{H}^{(r)} = \frac{1}{\eta} \mathbf{E}^{(r)} \mathbf{a}_r^{(r)} \times \mathbf{a}^{(r)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{(d)} = A^{(d)} \sin(\alpha - kr^{(d)}) \mathbf{a}^{(d)} \\ \mathbf{H}^{(d)} = \frac{1}{\eta} \mathbf{E}^{(d)} \mathbf{a}_r^{(d)} \times \mathbf{a}^{(d)} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $A^{(r)} = \omega \mu \frac{f_r(\theta^{(r)}, \varphi^{(r)})}{4\pi r^{(r)}}$, $A^{(d)} = \omega \mu \frac{f_d(\theta^{(d)}, \varphi^{(d)})}{4\pi r^{(d)}}$.

由式(5)、(6), 可得雷达与诱饵辐射场的坡印亭矢量分

别为 $S^{(r)} = \frac{1}{\eta} \|\mathbf{E}^{(r)}\|^2 \mathbf{a}_r^{(r)}$ 和 $S^{(d)} = \frac{1}{\eta} \|\mathbf{E}^{(d)}\|^2 \mathbf{a}_r^{(d)}$. 根据球坐标系到直角坐标系的变换公式, 可得雷达、诱饵合成场的坡印亭矢量为:

$$\begin{aligned} S = \frac{1}{\eta} \left\{ \right. & \left[\|\mathbf{E}^{(r)}\|^2 \sin^2 \theta^{(r)} \cos \phi^{(r)} + \|\mathbf{E}^{(d)}\|^2 \sin^2 \theta^{(d)} \cos \phi^{(d)} \right] \mathbf{a}_x \\ & + \left[\|\mathbf{E}^{(r)}\|^2 \sin^2 \theta^{(r)} \sin \phi^{(r)} + \|\mathbf{E}^{(d)}\|^2 \sin^2 \theta^{(d)} \sin \phi^{(d)} \right] \mathbf{a}_y \\ & \left. + \left[\|\mathbf{E}^{(r)}\|^2 \cos^2 \theta^{(r)} + \|\mathbf{E}^{(d)}\|^2 \cos^2 \theta^{(d)} \right] \mathbf{a}_z \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

假设诱饵在雷达坐标系中的坐标为 (x_d, y_d, z_d) , 则可以根据雷达坐标系与诱饵坐标系的坐标转化关系给出 $(r^{(r)}, \theta^{(r)}, \varphi^{(r)})$ 与 $(r^{(d)}, \theta^{(d)}, \varphi^{(d)})$ 的关系, 从而将雷达与诱饵的合成场及合成场的坡印亭矢量在雷达坐标系中统一表示出来.

4 雷达与诱饵合成场的仿真及分析

基于以上模型和算法, 可以利用 Matlab 对雷达、诱饵合成场进行仿真. 在仿真过程中, 诱饵电平与雷达平均副瓣电平相同, 选为 -50dB. 雷达、诱饵相对位置设置为: $RD1 = RD3 = 385\text{m}$, $D1D2 = D2D3 = D1D3 = 335\text{m}$, 其中, $R, D1, D2$ 和 $D3$ 分别表示雷达及三部诱饵. 事实上, 雷达与诱饵合成场在较远区域以球面波形式向外辐射, 此时, ARM 通常会跟踪雷达与诱饵中间区域 O 点附近的能量中心, 为了研究方便, 可以将 O 选为坐标原点, 布阵形式如图 4 所示. 在图 4 中, OA_1, OA_2 和 OA_3 分别在 xOz 正半平面、 yOz 平面、 xOz 负半平面内, 与 z 轴的夹角均为 30° . 假设某时刻雷达天线主瓣指向 $(Q, \pi/4)$, 括弧中的坐标分别表示方位角和仰俯角, 图 5 给出了同一角位置不同距离上空间各点坡印亭矢量方向的仿真结果.

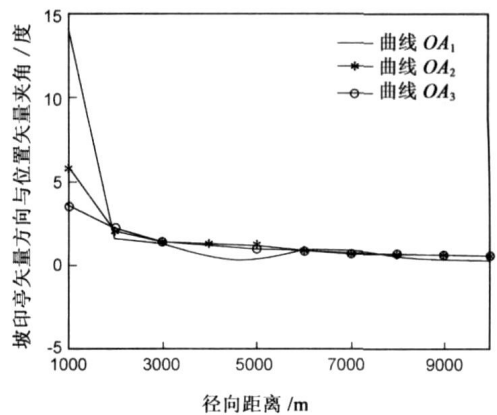


图 5 坡印亭矢量与位置矢量夹角随径向距离

在图 5 中, 曲线 OA_1 表示 OA_1 方向上雷达、诱饵合成场坡印亭矢量与位置矢量 OA_1 的夹角随径向距离的变化, 曲线 OA_2 和 OA_3 与 OA_1 一样表示合成场坡印亭矢量与位置矢量夹角随径向距离的变化. 由于 ARM 期望的进攻方向与合成场坡印亭矢量方向的反方向一致^[7,8] 因此可以用雷达与诱饵合成场坡印亭矢量方向

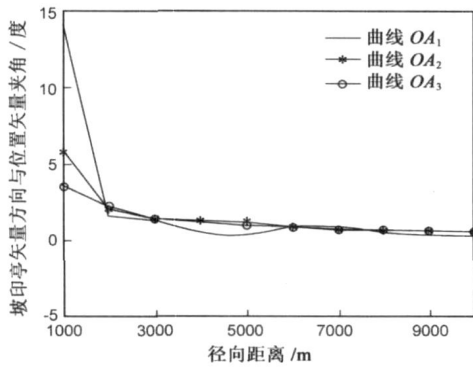


图 5 坡印亭矢量与位置矢量夹角随径向距离与位置矢量的夹角来反映 ARM 期望跟踪方向偏离能量中心(坐标原点 O) 的程度. 由曲线 OA_1 可以看出, 在 OA_1 方向上距离坐标原点 2000m 以外的地方, 合成场坡印亭矢量与位置矢量夹角小于 2° , 将各点沿着坡印亭矢量方向的反方向作一条直线, 此直线会与地面交于一点, 通过计算, 各交点与坐标原点 O 的距离均小于 100m. 由于各诱饵与坐标原点 O 的最小距离为 167m, 雷达与坐标原点 O 的距离为 347m, 而典型 ARM 的毁伤半径小于 30m, 因此, 雷达和诱饵均处于安全区域内. 对曲线 OA_2 、曲线 OA_3 进行类似分析, 可得到相同的结论. 对于 OA_1 方向上与坐标原点相距 1000m 的 P 点, 其合成场坡印亭矢量方向与位置矢量夹角为 14.35° , 从平均的角度来讲, 雷达与诱饵合成场坡印亭矢量方向近似与主瓣指向一致, ARM 期望的进攻方向近似指向雷达, 但由于此时 ARM 距离地面已很近, 无法实现大角度偏转, 雷达仍处在安全区域内.

此外, ARM 能否正确跟踪目标会受到雷达与诱饵辐射场相位的影响. 若某时刻雷达在 P 点辐射场的相位近似为 $n\pi$ (n 为整数), 雷达对合成场没有贡献(见式(5)、式(6)), ARM 期望的进攻方向近似指向诱饵合成场能量中心. 图 6 给出了某时刻 OA_1 连线上各点坡印亭矢量方向与位置矢量夹角, 可以看出, 若此时 ARM 位于 P 点, 则 ARM 期望的进攻方向近似指向合成场能量中心. 因此, 只有当雷达天线主瓣恰好指向 ARM, 且雷达

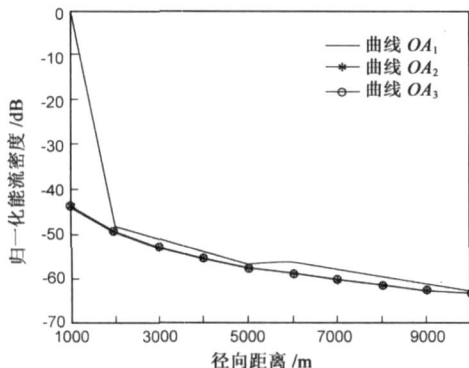


图 7 能流密度随径向距离变化特性

天线在 ARM 所在位置处的辐射场相位不至于使辐射场降低很多时, ARM 期望的进攻方向才可能指向雷达, 实际上出现这种情况的概率很小.

在图 7 中, 曲线 OA_1 、曲线 OA_2 及曲线 OA_3 分别表示 OA_1 、 OA_2 及 OA_3 方向上雷达与诱饵合成场的坡印亭矢量大小(能流密度)随径向距离的变化. 由图 7 可以看出, 雷达与诱饵合成场的能流密度随径向距离增加而减小. 由于雷达主瓣的影响, 使 OA_1 方向上各点能流密度均大于 OA_2 及 OA_3 方向上对应距离处各点能流密度.

综上所述, 在图 4 所示典型布阵形式下, 若 ARM 不能捕捉到雷达主瓣, 从统计平均的意义上讲, 其合成场会将 ARM 诱偏到能量中心附近的陷阱区域. 若 ARM 恰好捕捉到雷达主瓣, 通过合理配置雷达及诱饵的相位, 也可以将 ARM 诱偏到能量中心附近的陷阱区域或偏离雷达及诱饵的其它区域.

5 结论

本文以一种相控阵雷达及变形偶极子诱饵天线为例, 通过一种典型的布阵形式, 讨论雷达与诱饵合成场对 ARM 的诱偏作用. 仿真结果表明, 对于给定的布阵形式, 在反辐射导弹方向可以控制调整的距离范围内, 沿雷达与诱饵合成场坡印亭矢量方向的反方向作一条直线, 此直线和地面的交点与能量中心的距离均小于 100m, 亦即雷达和诱饵都在导弹作用的有效距离之外. 由此可知, 若导弹以一定的仰角(例如 $20^\circ \sim 70^\circ$) 攻击雷达或诱饵, 则合成场可能将其诱偏到雷达与诱饵中间的陷阱区域. 本文提出的多辐射源合成场模型可以作为研究雷达与诱饵诱偏 ARM 的理论基础, 算法及仿真结果也能作为电子对抗中多辐射源合成场工程应用的参考依据.

参考文献:

[1] Zhen Shi, Yan Li, et al. Modeling of guidance signal of anti-radiation missile in the case of multiple sources [A]. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. Luo Yang, China: MAIC, 2006. 2264- 2268.

[2] 司锡才. 反辐射导弹防御技术导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1997. 40- 127.

Si Xi cai. Introduction to defense technology for anti-radiation missile [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1997. 40- 120. (in Chinese)

[3] 贾玉贵, 张莉, 等. 对空情报雷达配置诱饵抗反辐射导弹的仿真[A]. 第八届全国雷达学术年会论文集[C]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2002. 134- 138.

Jia Yu gui, Zhang Li, et al. Simulation of air surveillance radar equipping decoys for resisting ARM[A]. Proceedings of the 8th National Conference on Radar [C]. Hefei, China: University of

- Science and Technology of China Press, 2002. 134– 138. (in Chinese)
- [4] R C Hansen. Microwave scanning antennas (Volume II)[M]. New York, London: Academic Press, 1966. 1– 69.
- [5] Lamont V Blake. Radar rang performance analysis[M]. Norwood: Academic Press, 1986. 367– 379.
- [6] 王国玉, 汪连栋, 等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 83– 87.
Wang Guo yu, Wang Lian dong, et al. Mathematical simulation and evaluation of radar electronic warfare systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 83– 87. (in Chinese)
- [7] Schreider L, Begaud X, Soiron M. Broadband archimedean spiral antenna above a loaded electromagnetic band gap substrate [J]. Microwaves, Antennas & Propagation, IET, 2007. 1(1): 212– 216.
- [8] Hsi-Tseng Chou. Characteristics of spiral antennas in the estimation of Direction of Arrival[A]. Antennas and Propagation Society international Symposium 2006, IEEE[C]. Albuquerque, NM: APS, 2006. 3689– 3692.

作者简介:

周伟光 男, 1981 年生于内蒙古自治区, 博士生, 主要研究兴趣为电子对抗.

E mail: zhouweiguang@tom.com

罗积润 男, 1957 年生于江西省, 博导, 研究员, 主要从事高功率毫米波源技术与应用.

E mail: luojirun@mail.ie.ac.cn

王华彬 男, 主要从事雷达整体研究, 主持完成多项重大项目.