

雷达诱饵合成场对反辐射导弹测向系统的影响

周伟光^{①②} 罗积润^① 王华彬^③

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

^③(空军第二研究所 北京 100085)

摘要: 该文在同时考虑方向图、极化方式两方面影响的情况下, 确立雷达天线、诱饵天线辐射场的数学模型, 从四臂平面等角螺旋天线双通道幅相组合测向系统工作原理入手, 给出了雷达和诱饵合成场对反辐射导弹测向系统干扰性能的仿真思路、计算公式和模拟结果。数值计算表明, 通过合理设置雷达诱饵布阵距离、诱饵辐射功率与雷达副瓣辐射功率的相对大小及诱饵辐射场与雷达辐射场初始相位的相对关系, 可以使反辐射导弹跟踪进入雷达和诱饵之间的陷阱区域。

关键词: 反辐射导弹; 诱饵; 方向图; 极化方式; 跟踪特性

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0981-04

Effects of the Electromagnetic-Field-Combined Profile of Radar and Decoy on Direction-Finding System of Anti-Radiation Missile

Zhou Wei-guang^{①②} Luo Ji-run^① Wang Hua-bin^③

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Second Institute of Air Force, Beijing 100085, China)

Abstract: Under the consideration of field pattern and polarization, a mathematic model related to the filed radiated from the antenna of radar and decoy is presented. Based on the mechanism of two-channel direction-finding systems with four-arm spiral antenna, the simulation algorithms and formulae are introduced and the tracking characteristic of Anti-Radiation Missile (ARM) is analyzed when the system is exposed in the electromagnetic-field-combined profile of radar and decoy. Numerical results show that ARM may be decoyed to a trapped area if the power and initial phase of the radiation filed of the decoy relative to the radar are set to some appropriate values.

Key words: Anti-Radiation Missile (ARM); Decoy; Pattern; Polarization; Tracking characteristic

1 引言

在现代战争中, 反辐射导弹(ARM)对雷达的作战效能和生存能力提出了严峻的挑战。目前, 对付 ARM 主要有以下措施: 建立专门的反辐射导弹告警系统^[1]、采用先进的雷达体制^[2,3]、采用雷达诱饵技术对抗 ARM^[4,5]。其中, 雷达诱饵技术不依赖雷达本身性能提高, 是一种经济有效的对抗手段。雷达诱饵技术利用 ARM 对目标辐射源依赖性很强这一局限性, 在目标雷达周围配置诱饵, 使 ARM 测向系统接收雷达天线辐射电磁波的同时, 又会接收到诱饵天线辐射的干扰电磁波, 从而实现有效诱偏。

目前, 诱饵硬件系统设计技术比较成熟^[6,7], 但是诱偏理论的发展相对滞后, 而且诱偏效果分析方法还不够完善。文献[8]在和差单脉冲测向模型的基础上研究了单脉冲测向系统对单一辐射源及两个辐射源的测向特性, 系统地说明了普通单脉冲测向系统的工作原理。文献[9]在假设 ARM 测向系

统跟踪方向与多辐射源合成场等相位面法线方向一致的前提下, 从原理上给出了测向系统在三维空间中的测向特性。文献[10]发展和完善了文献[9]提出的理论, 建立了多辐射源对 ARM 测向系统的干扰模型。本文在考虑了各辐射场的方向性和极化方式的基础上确立了两种典型辐射源(雷达与诱饵)辐射场的数学模型, 给出了三维空间中 ARM 测向系统模型及对单一辐射源(雷达或诱饵)的测向模型, 最后尝试从单脉冲测向系统工作机理入手研究雷达、诱饵合成场对 ARM 测向系统的干扰特性。

2 坐标系统的定义

为了数学表示的方便, 需要为雷达、诱饵及 ARM 建立合适的坐标系, 即雷达坐标系($O_r X_r Y_r Z_r$)、诱饵坐标系($O_d X_d Y_d Z_d$)和弹体坐标系($O_m X_m Y_m Z_m$)。在计算 ARM 测向系统接收场的过程中, 需要引入一个参考坐标系(OXYZ)作为雷达、诱饵及 ARM 相对位置、ARM 飞行姿态、ARM 期望进攻方向的基准。通过以上分析, 本文所采用的坐标系统

如图1所示。弹体坐标系的原点取在导弹质心 O_m 上， $O_m Z_m$ 轴与弹体纵对称轴一致，指向弹头方向， $O_m Y_m$ 轴位于弹体纵对称面内，垂直于 $O_m Z_m$ 轴，指向下方， $O_m X_m$ 轴与 $O_m Y_m$ 、 $O_m Z_m$ 轴构成右手直角坐标系。图2为弹体坐标系与参考坐标系相对位置关系， $O_m X_m$ 、 $O_m Y_m$ 及 $O_m Z_m$ 轴体现了ARM的运动姿态， $O_m Z_m$ 轴的指向就是ARM的进攻方向。

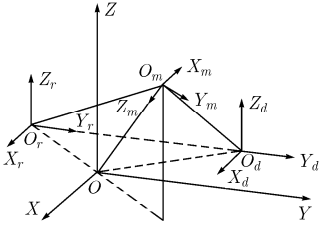


图1 坐标系统示意图

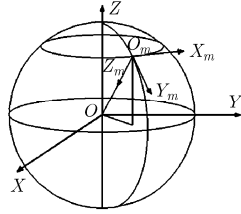


图2 弹体坐标系与参考坐标系相对位置关系

3 雷达、诱饵辐射场模型

将雷达、诱饵的辐射场分别在雷达坐标系和诱饵坐标系中表示可得

$$\mathbf{E}^{(r)} = A^{(r)} \sin(\omega t - kr^{(r)}) \mathbf{a}^{(r)} \quad (1)$$

$$\mathbf{E}^{(d)} = A^{(d)} \sin(\omega t - kr^{(d)}) \mathbf{a}^{(d)} \quad (2)$$

式中 $A^{(r)} = \omega \mu f_r(\theta^{(r)}, \varphi^{(r)}) / (4\pi r^{(r)})$ ， $A^{(d)} = \omega \mu f_d(\theta^{(d)}, \varphi^{(d)}) / 4\pi r^{(d)}$ ， $f_r(\theta^{(r)}, \varphi^{(r)})$ ， $f_d(\theta^{(d)}, \varphi^{(d)})$ 分别为雷达和诱饵天线的方向图函数， $r^{(r)}, \theta^{(r)}, \varphi^{(r)}$ 及 $r^{(d)}, \theta^{(d)}, \varphi^{(d)}$ 分别为场点位置在雷达坐标系和诱饵坐标系中的球坐标表示形式。

对于笔形波束，若主瓣空间指向为 $(\theta_i^{(r)}, \varphi_i^{(r)})$ ，则雷达天线方向图在雷达坐标系中可表示为^[11]

$$f_r(\theta^{(r)}, \varphi^{(r)}) = \alpha_p \left[(1 + \cos \theta_p) / 2 \right] \text{sinc}(k_r \sin \theta_p) \quad (3)$$

式中 $\alpha_p = (10^{-r} + 1) / 2 + \text{sgn}(\theta_p - \theta_0) (10^{-r} - 1) / 2$ ， $r = 0.05(S - 13.26)$ ， S 为第1副瓣电平，单位为dB， $\theta_0 = \sin^{-1}(\pi / k_r)$ 为第1零点出现的角度， $k_r \approx 1.3916 / \sin(\theta_b / 2)$ ， θ_b 为半功率点波束宽度， $(1 + \cos \theta_p) / 2$ 为倾斜因子， θ_p 为目标与雷达主瓣指向的夹角， $\text{sinc}(x) = \sin x / x$ 。

若雷达主瓣宽度为 2° ，副瓣电平为 -35dB ，式(3)所描述的雷达天线场分布仿真结果如图3所示。由于雷达辐射场会受到多种随机干扰，其副瓣电平会随机波动，可以根据实际情况加入了一个 $0.3\text{dB}-0.6\text{dB}$ 的随机数^[12]。通过与某雷达的实测结果比较，仿真结果可以逼近实验结果。

对于诱饵天线，其辐射场在方位平面内可达 360° 覆盖，应用中通常希望仰俯平面内能覆盖 $20^\circ-70^\circ$ 范围，因此，可以通过修正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仰俯方向上的覆盖范围，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。通过以上分析可知，诱饵天线的方向图数学模型在诱饵坐标系中可表示如下：

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

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

图4以 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， OA 为最大辐射方向， B, B', C, C', D, D' 辐射强度均低于 A 点 1dB 。可以看出， q 值越小，越接近半球覆盖。

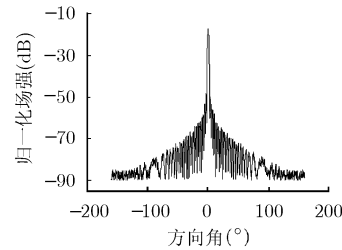


图3 雷达主平面仿真方向图

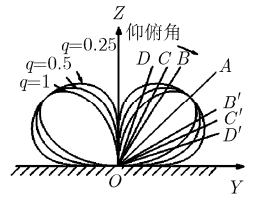


图4 诱饵主平面方向图

4 ARM 测向系统模型

由于ARM测向系统一般为单脉冲测向系统，为了突出单脉冲测向这一主要物理过程，可以采用四臂平面等角螺旋天线双通道幅相组合测向系统模型来模拟ARM在雷达、诱饵合成场中的跟踪过程。

四臂平面等角螺旋天线双通道幅相组合测向系统是利利用单个脉冲，由一部天线提供辐射源的方位角和俯仰角信息。在弹体坐标系中和、差信号可分别表示为^[13]

$$\left. \begin{aligned} F_{\Sigma} &= f_{\Sigma}(\theta^{(m)}) \exp \left[j \ln(f/f_0) / a \pm j \varphi^{(m)} \right] \\ F_{\Delta} &= g_{\Delta}(\theta^{(m)}) \exp \left[j 2 \ln(f/f_0) / a \pm j 2 \varphi^{(m)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $\theta^{(m)}$ ， $\varphi^{(m)}$ 分别为辐射源的俯仰角和方位角， $f_{\Sigma}(\theta^{(m)})$ 和 $g_{\Delta}(\theta^{(m)})$ 分别为天线和模、差模方向图^[14,15]， f 为频率， f_0 为参考频率， a 为四臂螺旋天线的螺旋率。

接收机把从天线及波束形成网络送来的和、差信号组合成两路输出。一路为差模与和模的幅度比 $\|F_{\Delta} / F_{\Sigma}\| = g_{\Delta}(\theta^{(m)}) / f_{\Sigma}(\theta^{(m)})$ ，与辐射源俯仰角 $\theta^{(m)}$ 为单值对应关系；另一路为差模与和模的相位差 $\phi = \ln(f/f_0) / a + \varphi^{(m)}$ ，相位差 ϕ 正比于辐射源方位角 $\varphi^{(m)}$ 。

5 雷达诱饵合成场对ARM测向系统的干扰性能

本文以ARM测向系统的视场中只有一部雷达和一部诱饵为例，研究雷达诱饵合成场对ARM测向系统的影响。假设ARM在参考坐标系中的球坐标为 $(r_m, \theta_m, \varphi_m)$ ，雷达和诱饵在参考坐标系中的坐标分别为 (x_r, y_r, z_r) 和 (x_d, y_d, z_d) ，ARM、雷达、诱饵的相对位置关系及ARM的飞行姿态如图1所示。由参考坐标系与雷达坐标系的转换关系可以得到

ARM 在雷达坐标系中的坐标 $(x_m^{(r)}, y_m^{(r)}, z_m^{(r)})$, 变换为球坐标后代入式(1), 式(3)和式(5)中可得到雷达在 ARM 所在位置处的辐射场 $\mathbf{E}_{(r)}$ 。类似可得到诱饵在 ARM 所在位置处的辐射场 $\mathbf{E}_{(d)}$ 。ARM 测向系统和波束与差波束接收到的场为

$$\mathbf{E}_{\Sigma} = F_{\Sigma}(\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)})\mathbf{E}_{(r)} + F_{\Sigma}(\theta_d^{(m)}, \varphi_d^{(m)})\mathbf{E}_{(d)} \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_{\Delta} = F_{\Delta}(\theta_r^{(m)}, \varphi_r^{(m)})\mathbf{E}_{(r)} + F_{\Delta}(\theta_d^{(m)}, \varphi_d^{(m)})\mathbf{E}_{(d)} \quad (7)$$

从 ARM 到雷达的矢量 \mathbf{O}_{mr} 在参考坐标系中表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{O}_{mr} = & (x_r - r_m \sin \theta_m \cos \varphi_m)\mathbf{a}_x + (y_r - r_m \sin \theta_m \sin \varphi_m)\mathbf{a}_y \\ & + (z_r - r_m \cos \theta_m)\mathbf{a}_z \end{aligned} \quad (8)$$

将 \mathbf{O}_{mr} 投影到弹体坐标系的 $O_m X_m$, $O_m Y_m$ 及 $O_m Z_m$ 轴后可得雷达在弹体坐标系中的坐标 $(x_r^{(m)}, y_r^{(m)}, z_r^{(m)})$, 变换为球坐标后可求出 $\theta_r^{(m)}$ 和 $\varphi_r^{(m)}$, 同理可得 $\theta_d^{(m)}$ 和 $\varphi_d^{(m)}$ 。差模与和模幅度比及相位差分别为: $g_{\Delta}(\theta^{(m)}) / f_{\Sigma}(\theta^{(m)}) = \|\mathbf{E}_{\Delta} / \mathbf{E}_{\Sigma}\|$, $\varphi^{(m)} = \phi_{\Delta} - \phi_{\Sigma}$ 。沿 ARM 期望进攻方向 $(\theta^{(m)}, \varphi^{(m)})$ 作一条直线, 此直线与地面交于一点, 此交点称为 ARM 期望落地点。通过比较期望落地点与雷达及诱饵的距离, 可以衡量 ARM 期望进攻方向与雷达及诱饵的相对位置关系。本文通过改变诱饵工作参数、布阵距离及 ARM 进攻方向等来研究雷达、诱饵合成场对 ARM 测向系统的干扰特性。

图 5 给出了诱饵辐射功率及相位对测向特性的影响, 在仿真过程中, 雷达第 1 副瓣电平 -35dB, 雷达主瓣方位角和仰俯角分别为 0° 和 45° , 雷达诱饵相距 300m, ARM 的进攻方位角和仰俯角分别为 45° 和 30° , 指向雷达诱饵的中间区域, ARM 与参考坐标系原点相距 5000m。在图 5(a)和 5(b), 5(c)和 5(d)中, 天顶角控制因子分别为 $q = 1$, $q = 0.25$ 。图 5(a), 5(c)为期望落地点和辐射源之间的距离与诱饵电平的关系, 此时雷达诱饵的相位均固定为 0° 。图 5(b), 5(d)为最佳诱偏功率条件下期望落地点和辐射源之间的距离与诱饵相位的关系, 对应的诱饵电平分别为 -60dB 和 -70dB。

由图 5(a), 5(c)可见, ARM 期望落地点与雷达的距离随着诱饵辐射功率的减小而减小, 而与诱饵的距离随着诱饵辐射功率的减小而增加。对于 $q = 1$ 的情况, 当诱饵电平取到 -55~-65dB 时, ARM 期望落地点在雷达诱饵的中间区域, 此时诱饵的辐射功率为最佳诱偏功率。对于 $q = 0.25$ 的情况, 同样存在最佳诱偏功率, 使 ARM 期望落地点在雷达诱饵的中间区域。 q 值越小, 最佳诱偏功率越小。计算表明, 当 q 值达到 0.5 以后, 最佳诱偏功率逐渐趋于一个稳定值, 大约为 -70dB。由图 5(b)、5(d)可见, 当诱饵辐射功率为最佳诱偏功率时, ARM 期望落地点与雷达和诱饵的距离随着诱饵的初始相位不同而不同, 但不论相位取何值, ARM 期望落地点与雷达和诱饵的距离都大于 100m, 而 ARM 的毁伤半径一般小于 50m, 因此雷达和诱饵均处于安全范围之内。当诱饵的初始相位选在 120° - 180° 时, 期望落地点与雷达及诱饵的距离均超过 250m, 此时诱饵辐射场的相位可称为最佳诱偏相位。由此可知, 在工程应用中, 诱饵电平及其辐射场覆盖范围应作为影响诱偏效果的主要因素来考虑。

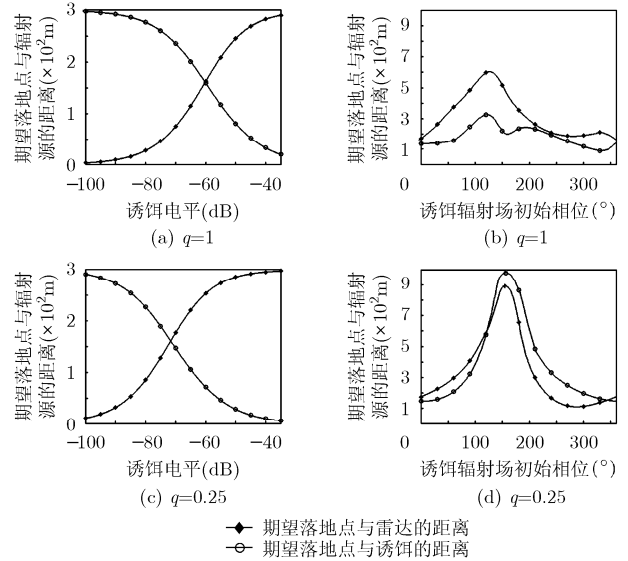


图 5 期望落地点与诱饵辐射场功率及初始相位的关系

图 6 以 ARM 进攻方向的方位角为参变量给出了布阵距离对测向特性的影响。在仿真过程中, 除进攻方向方位角以外, 其余仿真参数和图 5(a)相同。曲线 1, 曲线 2 和曲线 3 分别表示 ARM 的进攻方向方位角为 -45° , 0° 和 45° 。当雷达诱饵的距离小于 150m 时, ARM 期望落地点与雷达、诱饵的距离较近。由图 6(a)可以看出, 当雷达诱饵的距离大于 200m 时, ARM 期望落地点与雷达的距离基本上都大于 50m。由图 6(b)可以看出, 对于 ARM 进攻方向方位角为 0° 的情况, ARM 期望落地点与诱饵的距离基本上都大于 50m。对于 ARM 进攻方向方位角为 -45° 的情况, 当雷达诱饵的距离小于 350m 时, ARM 期望落地点与诱饵的距离大于 50m, 当雷达诱饵的距离为 400m 到 450m 时, ARM 期望落地点与诱饵的距离可能小于 50m。对于 ARM 进攻方向方位角为 45° 的情况, 当雷达诱饵的距离小于 250m 时, ARM 期望落地点与诱饵的距离可能小于 50m, 当雷达诱饵的距离大于 250m 后, ARM 期望落地点与诱饵的距离大于 50m, 且随着雷达诱饵距离的增加而增加。由此可知, 要使 ARM 期望落地点与雷达、诱饵的距离都大于 50m, 雷达诱饵布阵距离可选在 280-350m 范围内。

图 7 给出了 ARM 与参考坐标系原点距离对 ARM 期望落地点的影响。仿真过程中, ARM 与参考坐标系原点的距

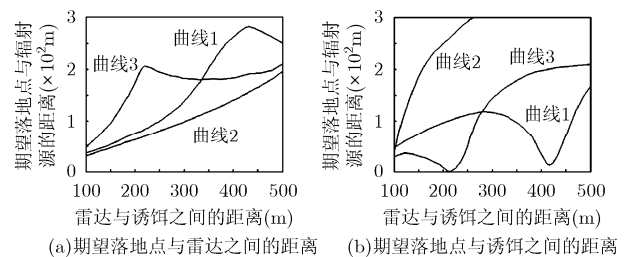


图 6 测向特性与雷达诱饵布阵距离的关系

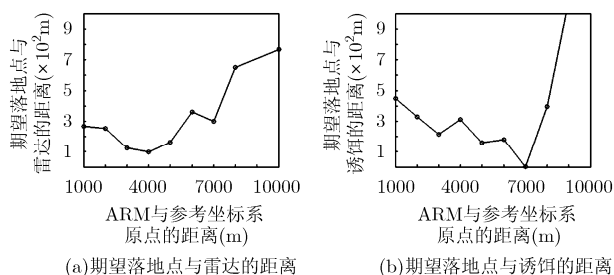


图7 ARM与参考坐标系原点距离对ARM期望落地点的影响

离设置为1000m,其余仿真条件与图5(a)相同。由图7可以看出,当ARM与参考坐标系原点距离在1000m左右时,ARM期望落地点与雷达和诱饵的距离都大于200m,由于此时ARM离地面已经很近,进攻方向不可能发生大的调整,因此雷达和诱饵均处在安全范围之内。

6 结束语

本文从雷达、诱饵辐射场模型及ARM测向系统模型出发,研究了雷达、诱饵合成场对ARM测向系统测向特性的影响。仿真结果表明,若天顶角覆盖因子 q 为1,当雷达诱饵之间的距离选在300m~350m范围内,诱饵电平选在-55~-65dB,诱饵的初始相位选在120°~180°时,ARM期望的进攻方向偏离雷达、诱饵最远,期望落地点与雷达和诱饵的距离均在50m以上。当天顶角覆盖因子为0.25~0.5,而其它条件相同的情况下,诱饵电平选在-60~-70dB时就可以对ARM测向系统造成同样的干扰效果。因此,对于工作参数已经确定的雷达,通过合理控制诱饵的工作参数及雷达诱饵之间的布阵距离,可以使ARM跟踪上雷达及诱饵以外的某一点,而雷达及诱饵均处于安全范围之内。

参考文献

- [1] Wang Fan, He Rui-long, and Sha Xiang. Anti-ARM technique: feature analysis of ARM warning radar [C]. 2001 CIE International Conference on Radar, Beijing, China, 15-18 Oct. 2001: 293-296.
- [2] Liu Guo-sui, Gu Hong, and Su Wei-min, *et al.*. The analysis and design of modern low probability of intercept radar [C]. 2001 CIE International Conference on Radar, Beijing, China, 15-18 Oct. 2001: 120-124.
- [3] Gross F B and Chen K. Comparison of detectability of traditional pulsed and spread spectrum radar waveforms in classic passive receivers [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(2): 746-751.
- [4] Li Xia, Yuan Zhi-wei, and Yang Bo. Design of anti-radar missile decoy system arrange project and decoying effect analysis [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(3): 439-445.
- [5] Zhao Yi-Nan, Jin Ming, and Wang Jun, *et al.*. A practical method against passive centroid jamming in monopulse radar [C]. 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 1-3.
- [6] Wang Fan, He Rui-long, and Sha Xiang. Anti-ARM technique: distributed general-purpose Decoy series (DGPD) [C]. 2001 CIE international Conference on Radar, Beijing, China, 15-18 Oct. 2001: 306-309.
- [7] 张凯. 有源雷达诱饵分析与设计. [硕士论文], 西北工业大学, 2006.
- Zhang Kai. Analysis and Design of Active Decoy [D]. [Masteral Dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [8] Vakin S A and Shustov L N. Principles of Jamming and Electronic Reconnaissance [M]. USA: Clearinghouse, 1969: 57-255.
- [9] 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: 119-135.
- Si Xi-cai. Introduction to Defense Technology for Anti-Radiation Missile [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1997: 119-135.
- [10] Zhen Shi and Yan Li. Modeling of guidance signal of anti-radiation missile in the case of multiple sources [C]. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luo Yang, China, July 25-28, 2006: 2264-2268.
- [11] Blake V L. Radar Range-Performance Analysis [M]. Norwood: Artch House, 1986: 367-379.
- [12] 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 and Wang Lian-dong, *et al.*. Mathematical Simulation and Evaluation of Radar Electronic Warfare Systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 83-87.
- [13] 司锡才, 赵建民. 宽频带反辐射导弹导引头技术基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1996: 57-77.
- Si Xi-cai, *et al.*. Foundation of Passive Radar Seeker for Wide-Band Anti-Radiation Missile [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1996: 57-77.
- [14] Cheo B R S, Rumsey V H, and Welch W J. A solution to the frequency-independent antenna problem [J]. *IRE Trans. on Antennas and Propagation*, 1961, AP-9(6): 527-534.
- [15] Mosko J A. An introduction to two-channel direction-finding systems [J]. *Microwave Journal*, 1984, 27(2): 91-106.

周伟光: 男, 1981年生, 博士生, 研究兴趣为电子对抗。

罗积润: 男, 1957年生, 博士生导师, 研究员, 主要从事高功率毫米波源技术与应用。