

## 主动雷达导引头地面雷达站识别技术研究

程永强<sup>①</sup> 秦玉亮<sup>①</sup> 陶永宽<sup>②</sup> 王宏强<sup>①</sup> 黎湘<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

<sup>②</sup>(解放军炮兵指挥学院 宣化 075100)

**摘要:** 该文针对主动雷达导引头对地面防空单元制导雷达站的识别问题,在天线电磁散射特性研究的基础上,提出了雷达天线的多特征融合识别算法。首先对相控阵雷达天线的电磁散射特性进行了建模和计算,然后采用多普勒波束锐化技术对目标进行2维成像以提高天线的检测概率并估计目标雷达天线的RCS序列,基于RCS序列的幅度特性与周期特性,构造了相控阵天线的4类特征,并提出了相应的识别算法及融合识别算法。仿真实验表明算法具有较高的识别概率。

**关键词:** 目标识别;反辐射导弹;主动雷达导引头;相控阵雷达;天线RCS

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2498-06

## Study on ATR Technology of Ground-Based Radar Station for Active Radar Seeker

Cheng Yong-qiang<sup>①</sup> Qin Yu-liang<sup>①</sup> Tao Yong-kuan<sup>②</sup> Wang Hong-qiang<sup>①</sup> Li Xiang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Sci. and Eng., National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(Artillery Command College, Xuanhua 075100, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of recognition to the ground-based radar station using an active radar seeker, the fusion recognition algorithms are put forward. Firstly the electromagnetic scattering model of the phased-array antenna is established. Then using Doppler Beam Sharpening (DBS) technology to improve the detection probability and to estimate targets' RCS, then based on the extracted features—the range property and the period property of RCS, four kinds of characteristics of phased-array radar antenna are constituted. Finally the recognition algorithms as well as the fusion technique for target recognition are put forward. The simulation experiment indicated the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** Automatic target recognition; Anti-radiation missile; Active radar seeker; Phased-array radar; RCS of antenna

### 1 引言

反辐射导弹是打击地空导弹阵地制导雷达、预警雷达等目标的主要硬杀伤武器。传统的被动体制反辐射导弹易受目标雷达关机、闪烁干扰、多假辐射源诱偏干扰<sup>[1]</sup>等对抗措施的影响,在其上加装一个毫米波雷达导引头,可以极大地提高了目标选择能力和抗目标雷达关机能力<sup>[2]</sup>。由于典型地面防空单元一般包括:制导雷达站、控制车、导弹发射架、电源车等,为提高反辐射导弹的作战效能,主动导引头必须具有从各类目标中选择识别雷达站的能力。由于高增益天线在某些视角范围内能够产生很大的雷达截面贡献<sup>[3]</sup>,本文试图以目标雷达天线的电磁散射特性为主要依据,提取雷达天线的有效特征,实

现主动导引头对雷达站的检测与识别。

针对雷达天线的电磁散射特性的研究,文献[3]介绍了雷达天线的电磁散射机理,文献[4-6]分别研究了平面隙缝阵列天线、柱形阵列天线、高增益圆形波导阵列天线的RCS计算方法,文献[7]利用矩量法和等效边缘电磁流法(Equivalent Edge Currents, EECs)研究了波导馈电缝隙天线阵的双站散射问题,文献[8]基于矩量法和多端口网络原理给出了高频地波雷达天线阵雷达散射截面的预估方法。以上研究工作的目的,主要是为了降低雷达RCS以满足隐身的需要。

本文针对主动雷达导引头对雷达站的检测与识别问题,首先对相控阵雷达天线的电磁散射特性进行了建模和计算,然后采用多普勒波束锐化(Doppler Beam Sharpening, DBS)技术对目标区域进行2维成像以提高强地杂波背景下的检测概率,

并估计目标雷达天线的 RCS 序列; 在深入分析其周期特性和幅度特性的基础上, 构造了相控阵天线的 4 类特征, 并提出了相应的识别算法, 同时依据各特征的优缺点, 提出了多特征融合识别的算法, 最后通过仿真实验验证了算法的有效性。

## 2 雷达天线电磁散射计算与特性分析

### 2.1 天线的电磁散射机理<sup>[3]</sup>

天线是导行波和自由空间波的换能器, 它的散射机理比普通散射体要复杂得多。天线的散射包括两部分: 一部分是与散射天线负载情况无关的结构项散射场, 它是天线接匹配负载时的散射场, 其散射机理与普通散射体的散射机理相同; 另一部分则是随天线负载情况变化的模式项散射场, 它是由于负载与天线不匹配而反射的功率经天线再辐射产生的散射场, 这是天线作为一个加载散射体而特有的散射场。天线的两部分散射场经相位叠加后构成天线的总散射场。

### 2.2 相控阵天线的电磁散射模型

相控阵雷达的天线平面类似于平面隙缝阵列天线, 其结构为矩形波导宽边开缝, 如图 1, 图 2 所示。设电磁波入射方向位于  $yo z$  平面, 入射磁场平行于  $x$  方向, 沿  $x$  方向有  $M$  个全长为  $2l$  的裂缝振子, 相邻裂缝端点间距为  $\Delta x$ , 缝宽为  $w$ ; 沿  $y$  方向有  $N$  个振子, 振子间距为  $\Delta y$ 。相控阵天线的 RCS 由隙缝的模式项散射场和平板的结构项散射场两部分贡献经相位相加而成, 可分别采用矩量法和物理光学法进行计算。

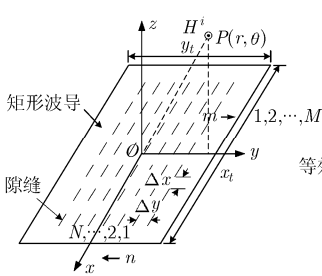


图 1 相控阵天线几何结构模型

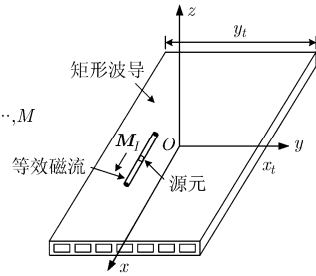


图 2 隙缝等效磁流分布

### 2.3 相控阵天线 RCS 的计算

(1)用矩量法计算隙缝阵列的模式项散射场  
在分析相控阵天线的模式项散射场时, 可近似地把平板视为无限大。当电磁波入射到天线上时, 很大一部分能量将被导体平板反射到镜面方向, 一小部分被缝隙散射到所有方向, 剩下的部分通过缝隙进入到波导中。根据场的等效原理, 设缝隙处为闭合的, 在原缝隙的内外面各引入一等效磁流

$M_I (I = (m - 1)N + n; m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N)$ , 以保证缝隙上切向电场的连续性, 设第  $I$  个缝隙上的等效磁流为

$$M_I = n \times E_s \quad (1)$$

其中  $E_s$  为缝隙上的电场。

采用伽略金(Galerkin)法, 可将等效磁流的表面积分方程转化为如下的矩阵方程(匹配方程):

$$\sum_{m'=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{k'=-k_0}^{k_0} Y(m, n, k; m', n', k') V(m', n', k') = I(m, n, k), \quad (m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N; k = -k_0, \dots, k_0) \quad (2)$$

其中  $Y(m, n, k; m', n', k')$  为分段场元  $(m, n, k)$  与分段源元  $(m', n', k')$  之间的广义导纳元素,  $I(m, n, k)$  为分段场元  $(m, n, k)$  的广义电流元素。

求解式(2)所示的匹配方程, 可得到每个隙缝振子上的磁流分布。设图 1 中  $yo z$  面上的远区观察点为  $P(r, \theta)$ , 隙缝阵列在  $P$  点处的辐射磁场可根据单个分段正弦磁流产生磁场的公式求和, 由此求得等效磁流产生的远区散射场为

$$H^s(1) = x H_x^s(1) = x \sum_{m'=1}^M \sum_{n'=1}^N \sum_{k'=-k_0}^{k_0} H_1 \quad (3)$$

式中  $H_1 = \frac{wV(m, n, k)}{j2\pi\eta_0} (c_1 + c_2 - c_3)$ ,  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 。

#### (2)用物理光学法计算平板的结构项散射场

当孔径被导电板封闭并以等效磁流  $M_I$  代替其位置时, 若导电板边长为有限大(仍远大于波长), 采用物理光学法可求得平板的结构项散射场为

$$H^s(2) = x H_x^s(2) = x H_0 \frac{\exp(-j\beta r)}{r} \frac{x_t y_t}{\lambda} \frac{\sin(\beta y_t \sin \theta)}{\beta y_t \sin \theta} \quad (4)$$

式中  $x_t$  和  $y_t$  分别为平板沿  $x$  和  $y$  方向的总长。

#### (3)天线的总散射场

分别采用矩量法和物理光学法计算天线的模式项散射场和结构项散射场, 二者矢量叠加得到总散射场为

$$H^s = x [H_x^s(1) + H_x^s(2)] \quad (5)$$

根据雷达截面的理论定义式(6)即可求得天线的 RCS。

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (6)$$

### 2.4 相控阵天线 RCS 特性分析

利用上述方法对天线的 RCS 进行计算, 并对计算结果进行分析(参见“仿真实验与结果分析”节), 有以下结论:

(1)幅度特性 相控阵天线的 RCS 峰值通常可

以达到 30–40 dBsm, 且具有很强的方向性, 在垂直于平板入射方向上 RCS 最大, 随着观察视线偏离该方向, 天线的 RCS 迅速下降, 同时包络具有较平滑的变化(增大或减小)趋势。

(2) 周期特性 平板的散射具有较规则的振荡特征, 近似为 sinc 函数, 其振荡周期约为  $(90\lambda/(\pi y_t))^\circ$ , 其中  $\lambda$  为入射波波长,  $y_t$  为平板的横向尺寸。

### 3 雷达天线特征提取与识别

#### 3.1 RCS 序列的估计

导引头在对目标进行搜索、检测和识别过程中, 一般可通过线性调频脉冲压缩技术获得距离的高分辨。而对于方位向, 由于导引头天线波束较宽, 分辨率很差。多普勒波束锐化 (Doppler Beam Sharpening, DBS) 技术利用运动平台上的雷达照射区内不同方向目标的回波具有不同的多普勒信息而达到波束锐化的目的, 是一种非聚焦合成孔径雷达, 计算负荷较低。故在主动雷达导引头中, 为了实现目标的分辨及检测, 同时考虑实时性的要求, 往往采用 DBS 技术提高导引头方位向分辨率<sup>[9]</sup>。

为去除检测结果中的自然虚警和从各类目标中鉴别出打击的目标, 需从 DBS 图像中提取目标特征以进行分类。在导弹运动过程中, 由于导弹与目标的视角随导弹位置而变化, 不同视角对应目标不同角度的 RCS 值。对于导弹发射架和地面雷达天线等尺寸小于或与分辨单元大小相当的目标, 可以通过对目标区域进行连续成像, 从图像序列中提取目标雷达散射截面随视角的变化特征进行识别。

#### 3.2 相控阵天线特征提取与识别

基于上述对相控阵天线 RCS 特性的分析结论, 建立用于雷达天线识别的特征提取与识别算法如下:

(1) RCS 序列平滑性特征及其识别算法 从估计得到的 RCS 序列中提取其包络序列, 采用指数基函数和非线性最小二乘方法, 对包络序列进行拟合, 求取拟合参数, 计算拟合适当度  $Q$  和平均峰值方差  $E$ , 用以衡量 RCS 序列的平滑性。天线目标较其它目标, 平滑性较好, 因此  $Q$  更接近 1,  $E$  越接近 0。依此可识别天线目标。

(2) RCS 序列峰值特征及其识别算法 相控阵雷达天线 RCS 峰值通常可高达 30–40 dBsm, 而其它目标较小。据此, 设置双重门限, 首先记录导弹飞行过程中各目标 RCS 超过第 1 门限的次数, 然后将该次数与第 2 门限比较进行雷达站的识别。

(3) RCS 序列周期性特征及其识别算法 为了提取周期性特征, 对 RCS 序列进行快速傅里叶变换

(FFT)。由于估计的 RCS 序列长度有限, 相当于加了一个矩形窗函数, 故所有目标 RCS 序列的 FFT 变换都有一个 sinc 冲击, 天线目标由于其周期性还具有两个明显的峰值。而非天线目标其余部分较平坦。基于此, 可以根据峰值的个数识别雷达站。

(4) RCS 序列周期性强弱特征及其识别算法 定义各目标 RCS 序列的相邻峰值与谷值横坐标的间距为 RCS 序列的周期, 对其进行直方图统计, 采用方差准则作为周期性强弱的度量, 天线目标相比与其它目标, 周期性较强, 因而方差较小。设一适当的阈值, 即可识别雷达站。

#### 3.3 融合识别

上述 4 种特征及其识别算法具有不同的优缺点:

(1) 周期性强弱特征识别算法对目标 RCS 序列周期的估计精度依赖较大, 当估计精度较低时, 识别率较低;

(2) 平滑性特征及其识别算法对 RCS 序列幅度的估计精度要求较高, 当估计精度较低时, 非线性最小二乘拟合的结果较差, 该特征的识别率较低;

(3) 当弹目视线从目标天线法线的一侧过渡到另一侧时, 估计的 RCS 序列中间位置将出现峰值, 两侧逐渐减小。此时平滑性特征不再明显, 而峰值特征较大, 具有很高的识别率。

4 种特征中, 由于天线目标在某些弹目视线下峰值特征非常明显, 故若能满足基于峰值特征的识别算法阈值条件, 即可给出最终识别结果。而基于周期性特征的识别算法也具有较好的稳健性, 其识别结果可以采用较高的权重。

对于识别结果的实时更新, 仿真实验表明, 采用 30 幅子图估计目标 RCS 序列用于识别, 可以得到较稳健的识别结果。因此可以在导引头对目标区域进行连续扫描成像, 获取 30 幅图像后即开始进行目标识别, 之后每新增 3 幅图像更新一次识别结果, 这样可以防止其中某次识别出现较大误差的情况, 从而使识别更加可靠。

## 4 仿真实验与结果分析

#### 4.1 DBS 成像与目标 RCS 序列估计结果

仿真中雷达载频  $f_0 = 35$  GHz, 带宽  $BW = 40$  MHz, 脉宽  $PW = 1.5$   $\mu$ s, 主波束宽度  $\theta = 3^\circ$ , 波束锐化比  $N = 64$ , 目标信杂比  $SCR = -5$  dB。仿真中设置 3 个目标, 分别模拟防空单元制导雷达天线、电源车等姿态敏感目标, 为了验证 RCS 估计结果的正确性, 还假设了一个 RCS 恒为 5dBsm 的测试目标。由成像结果中距离和多普勒频率可以实现

对目标的定位,由各目标在 DBS 图像中的谱峰幅度可以估计出各目标的 RCS。图 3 为采用 60 幅成像结果对仿真中 3 个目标 RCS 序列的估计结果。从图可以看出,对假设目标的 RCS 估计是比较准确的,说明本文提出的算法对雷达天线的 RCS 估计也应该是准确的。

#### 4.2 4 种目标特征提取与识别算法仿真结果

(1)周期性特征及其识别算法仿真 对图 3 的 RCS 序列作 FFT 处理,结果如图 4 所示。设定一阈值,对大于此阈值的幅度进行峰值搜索,天线目标的 FFT 将会有 3 个较明显的峰值,而非天线目标峰值个数为 1。因此,根据 FFT 峰值个数可以进行雷达站的识别。

(2)周期性强弱特征及其识别算法仿真 直接提取图 3 中各目标 RCS 序列的周期,对其进行直方

图统计,结果如图 5 所示。其中图 5(a)为雷达站,图 5(b)为电源车。标注中 var 数值为目标 RCS 周期的方差值,可以看出雷达站周期性较强,具有较小的方差,非天线目标周期性较弱,方差较大。据此可以对雷达站进行识别。

(3)平滑性特征及其识别算法 提取图 3 中目标 RCS 序列的包络序列,采用非线性最小二乘方法,对包络序列进行拟合,其拟合结果如图 6 所示。从仿真结果可以看出,天线目标相比其它目标具有较大的拟合适当度  $Q$  和较小的平均峰值方差  $E$ ,由  $Q$  和  $E$  值与门限比较可以识别天线目标。

(4)峰值特征及其识别算法 当导弹对目标的视线近似垂直天线平面时,雷达天线会产生很大的雷达截面贡献,此时可以根据其峰值幅度来识别目标。

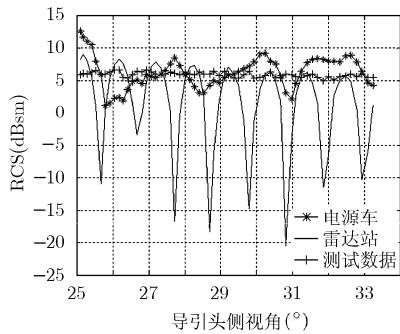


图 3 目标 RCS 序列估计结果

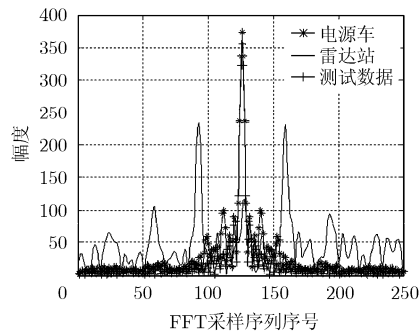


图 4 目标 RCS 序列估计的 FFT

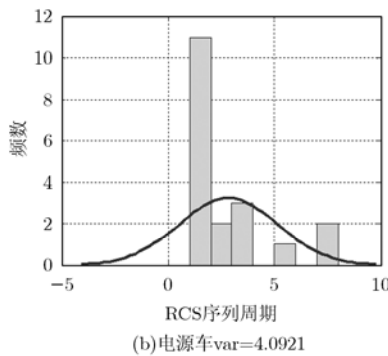
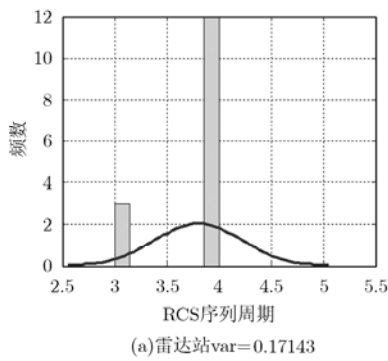


图 5 目标 RCS 序列周期值的直方图统计结果

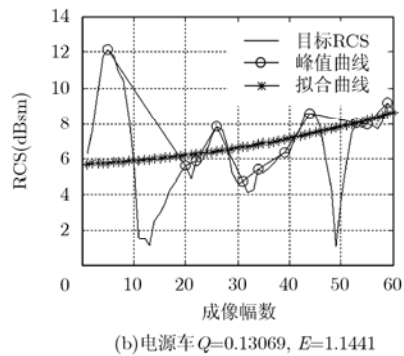
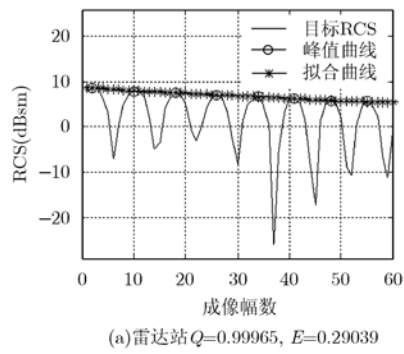


图 6 RCS 包络序列的最小二乘拟合结果

### 4.3 融合目标识别算法仿真与性能分析

本实验对融合目标识别算法和识别结果的实时更新及最可靠识别目标的选择进行了仿真。仿真中共设置 4 个目标，雷达目标和假目标各有两个，其中 2, 3 号目标为真目标，1, 4 号目标为假目标，且 2 号目标视角近似垂直于天线轴线，RCS 取到峰值。

表 1-表 4 分别为采用 4 种识别算法的识别结果，其中目标数为 4，识别结果共更新了 11 次。识别结果中“白色”代表该方法识别结果为假，“黑色”代表识别结果为真。由识别结果可以看出，4 种算法均具有很好的识别效果，其中周期性强弱特征识别算法和平滑性特征识别算法对 2 号目标不适用，此时基于峰值特征的识别算法可以对其进行很好的识别。周期性特征识别算法对 2, 3 目标的识别效果都较好，说明其受 RCS 序列估计的周期性影响较小，识别结果较稳定。故在对 4 种特征识别结果进行决策层融合识别时，周期性特征和峰值特征选用较大的权重，各取 1/3；周期性强弱特征和平滑性特征选用较小权重，各取 1/6。为了对识别结果求和的方便，保持各特征权重的比例，将前两种特征结果加权为 2，后两种特征加权为 1，然后进行求和。

表 5 为 4 种特征融合后的识别结果，其中的数

表 1 4 个目标周期性特征识别结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											

表 2 4 个目标周期性强弱特征识别结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											

表 3 4 个目标平滑性特征识别结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											

表 4 4 个目标峰值特征识别结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4											

表 5 4 个目标融合识别结果

目标编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4
3	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

值代表识别的可靠度，设定一可靠度阈值可以识别出所有真实目标。对各目标的 11 次更新识别的可靠度求和，选择识别次数最多的目标作为最可靠识别目标，然后进行跟踪打击。该实验中目标 2 共识别 36 次，目标 3 共识别 42 次，故将选择 3 号目标作为最可靠识别目标。

## 5 结束语

本文针对主动雷达导引头对地面雷达站的检测与识别问题，在天线电磁散射特性研究的基础上，提出了雷达天线的多特征融合识别算法。在分析天线 RCS 序列周期特性和幅度特性的基础上，构造了相控阵雷达天线的四类特征，并提出了相应的识别算法，并通过仿真实验对算法进行了验证。

在实际环境中，由于防空单元中目标种类较多，各类目标距离较近，为了提高导引头的方位向分辨能力，本文采用 DBS 技术对目标区域进行粗成像，然后利用序列图像来估计目标 RCS 序列，而 DBS 所需的计算量较小，其实时性、有效性已得到业界认可，且本文只是通过粗成像来估计目标 RCS，不需要很高的锐化比，故其实时性完全可以保证，而各识别算法只涉及 FFT 或简单的数学运算，计算量很小，可以满足弹载要求。仿真实验表明，采用 DBS 对目标区域连续成 30 幅像所需时间约为 4.5 s，成 60 幅像所需时间约为 8.4 s。从 30 幅图像开始识别，经过 8.4 s 即可完成识别，而导弹从导引头开机到俯冲击中目标经历的时间约为几十秒，因此可以满足实际需要。

## 参考文献

- [1] 高彬, 郭庆丰, 吕善伟. 有源诱饵抗反辐射导弹技术研究. 现代雷达, 2006, 28(10): 12-15.  
Gao Bin, Guo Qing-feng, and Lü Shan-wei. Study on techniques for active decoy against ARM. *Modern Radar*, 2006, 28(10): 12-15.
- [2] 孙飞宇. 雷达杀手——AGM-88“哈姆”反辐射导弹. 兵器大观, 2007, (3): 75-82.  
Sun Fei-yu. Radar killer: AGM-88 high-speed anti-radiation missile. *Weapons Spectacle*, 2007, (3): 75-82.
- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术. 北京: 国防工业出版社, 1998: 183-186.  
Ruan Ying-zheng. Radar Cross Section and Stealth Technology. Beijing: National Defence Industry Press, 1998, 183-186.
- [4] Rengarajan S R. Scattering characteristics of a centred-inclined slot in a broad wall of a rectangular waveguide. *IEEE Proceedings, Part H: Microwaves, Antennas and Propagation*, 1990, 137(6): 343-348.
- [5] Fan G X and Jin J M. Scattering from a cylindrically conformal slotted waveguide array antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45(7): 1150-1159.
- [6] Li B, Wu B and Liang C H. A study on high gain circular waveguide array antenna using metamaterial structure. 2006 IEEE International Workshop on Antenna Technology, IWAT 2006 - Small Antennas and Novel Metamaterials, White Plains in United States, Mar 6-8 2006: 249-252.
- [7] 吴振森. 缝隙天线阵双站电磁散射的混合法. 电波科学学报, 1999, 14(1): 78-84.  
Wu Zhen-sen. The hybridization method on bistatic EM scattering from slot antennas. *Chinese Journal of Radio Science*, 1999, 14(1): 78-84.
- [8] 曹庆, 高火涛, 杨子杰. 高频地波雷达天线阵雷达散射截面的预估. 武汉大学学报(理学版), 2005, 51(3): 379-383.  
Cao Qing, Gao Huo-tao, and Yang Zi-jie. Pre-estimating array RCS of HF ground wave radar. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2005, 51(3): 379-383.
- [9] 张直中. 多普勒波束锐化理论和实践中若干问题的探讨. 现代雷达, 1991, 13(2): 1-12.  
Zhang Zhi-zhong. Doppler beam sharpening (DBS) theory and discussion for some issues in practices. *Modern Radar*, 1991, 13(2): 1-12.
- 程永强: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为精确制导、目标识别等.
- 秦玉亮: 男, 1980年生, 博士, 讲师, 研究方向为精确制导中的信号处理技术等.
- 陶永宽: 男, 1976年生, 硕士, 讲师, 研究方向为军事通信、信息处理等.
- 王宏强: 男, 1970年生, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为模式识别、多传感器数据融合、目标跟踪等.
- 黎湘: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为精确制导、信息融合、非线性信号处理等.