

真实地形环境下低空雷达目标回波信号分析

陈博韬, 谢拥军, 李晓峰

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对低空雷达目标与杂波、环境难于一体化建模的问题,提出了一种分析真实地形环境中低空飞行目标的雷达回波信号的实景相干复合方法(CHIAL).以机载脉冲多普勒(PD)雷达为平台,首先将半空间并矢格林函数引入物理光学方法中,结合图形电磁学计算低空目标的雷达散射场强度,然后利用地形高程数据和地形地物分析数据,得到杂波单元的散射特性,通过相干杂波模型产生地杂波,最后将所有雷达回波送入各自的距离门,并加入噪声信号,模拟包含目标特性和杂波特性的有效回波信号.与传统复合建模方法相比,CHIAL方法的目标回波信号和杂波信号更加准确.对机载PD雷达探测低空目标的仿真实验表明,CHIAL方法在处理90 m×90 m地形高程数据时,杂波分布和信杂比与理论分析基本一致,有很强的系统工程实用价值.

关键词: 物理光学方法;地杂波;回波信号

中图分类号: TN011 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0103-05

Analysis of Echo Signals from Low Altitude Radar Targets in Actual Landform

CHEN Botao, XIE Yongjun, LI Xiaofeng

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Focusing on the difficulty in integrative modeling among the low altitude radar targets, the ground clutter and the environment, a coherent hybrid method in actual landform (CHIAL) is proposed to analyze the echo signals from radar targets in actual landform environment. Based on airborne pulsed Doppler (PD) radar, a half-space physical optics integral equation is deduced by introducing the half-space Green's function into the physical optics method. The radar cross section of conductive targets is calculated in the half space by combining the graphical- electromagnetic computing method. The scattering of the clutter cell is computed with SRTM and DFAD data, and the ground clutter is produced by using the coherent clutter model. After mixing with noise, the signals are then sent into corresponding range gates. Simulations on the efficient echo signals with the target peculiarity and clutter peculiarity show that the proposed method is more accurate than traditional hybrid modeling methods. Numerical results on airborne PD radar detecting low altitude targets show that the clutter distribution and the signal-to-clutter ratio accord with the theoretical analysis in using 90 m×90 m landform height data, and that the method is applicable in system engineering.

Keywords: physic-optics method; ground clutter; echo signal

在复杂多变的战场电磁环境中,对于高性能的雷达回波信号检测系统,环境对目标电磁散特性的影响不可忽视.雷达信号模拟主要是对雷达目标和环境回波信号进行模拟,以达到真实复现雷达回波

的目的.文献[1]采用多载波调制模式,并通过快速傅里叶变换来模拟目标和杂波信号;国内学者[2]根据几何光学理论,用 OpenGL 可视化方法计算目标的雷达散射强度(RCS)来生成目标回波,用不同类型的面散射体的后向散射系数得到干扰杂波;文献[3]用复现既含振幅又包含相位的相干视频信号的方法来模拟回波信号;文献[4]用面目标回波结合相关非高斯杂波的方法来生成回波信号.上述方法由于受到现有计算机内存和计算时间的限制,无法较好地处理半空间电大尺寸复杂目标的散射问题,而且在计算地杂波时,普遍没有考虑真实地形环境,因而雷达目标和杂波回波信号不能真实复现雷达回波信号.

本文以机载 PD 雷达为平台,提出了分析真实地形环境中半空间低空目标的雷达回波信号的实景相干复合方法(CHIAL),通过半空间物理光学法结合图形电磁学计算目标的 RCS.利用地形高程数据和地形地物分析数据,得到杂波单元的散射特性,通过相干杂波模型产生地杂波,模拟真实地形环境下包含目标特性和杂波特性的有效回波信号.

1 真实地形环境和回波信号模型

1.1 真实地形环境

在电磁散射特性研究中,依据地面上方介质形态(植被、雪或人造物)和地面本身形态(土壤、水面或路面)将地貌环境分类,每类呈现相似的雷达后向散射特性.为了根据真实地形地物对雷达目标和相关地面单元的杂波贡献进行计算,本文采用航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM)数据,并制作相对应地形地物特征分析(DFAD)数据.

SRTM 数据每经纬度方格提供一个文件,精度有 30 m 和 90 m 两种,分别称作 SRTM1 和 SRTM3 数据. SRTM1 的文件里面包含 $3\ 601 \times 3\ 601$ 个采样点的高度数据, SRTM3 的文件里面包含 $1\ 201 \times 1\ 201$ 个采样点的高度数据,每个 90 m 的数据点是由 9 个 30 m 的数据点算术平均得来的.相对应的 DFAD 数据,是针对 SRTM3 数据中每个 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 的单元记录下它所属的地形环境.

1.2 回波信号模型

以机载 PD 雷达为平台,考虑雷达发射信号形式,根据相干视频信号模型,目标的回波信号为

$$W(\theta, \varphi, t) = C(\theta, \varphi) \exp(j\psi(\theta, \varphi, t)) \exp(ju(t)) \quad (1)$$

式中: θ, φ 是俯仰角和方位角; t 为时间; $C(\theta, \varphi)$ 为回

波信号幅度; $\psi(\theta, \varphi, t)$ 为回波信号多普勒相位; $u(t)$ 为由雷达发射脉冲信号波形确定的相位.采用脉冲线性调频信号,其信号形式为

$$u(t) = \exp(j\pi\mu t^2) \text{rect}\left(\frac{t-il}{l}\right), i = 0, 1, \dots, N_c \quad (2)$$

式中: $\text{rect}(t)$ 是矩形函数; $\mu = B/T$, B 和 T 分别为调频带宽和脉冲时宽; $l = 1/B$; N_c 为压缩比; $T = N_c l$.

根据雷达方程,雷达接收到的回波信号幅度可表示为

$$A(\theta, \varphi) = \left(\frac{P_i \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L}\right)^{1/2} \frac{G(\alpha_T, \beta_T)}{R^2} \quad (3)$$

式中: P_i 为雷达发射信号峰值功率; λ 为雷达工作波长; σ 为目标雷达散射场强度; $G(\alpha_T, \beta_T)$ 为雷达天线电压增益, α_T, β_T 为目标在天线坐标系下的方位角和俯仰角; L 为雷达发射接收综合损耗; R 为雷达到该散射单元中心的距离.

目标回波信号的多普勒相位可表示为

$$\psi(\theta, \varphi, t) = 2\pi f_d t + u_0 \quad (4)$$

式中: f_d 为目标径向多普勒频率; u_0 为随机相位.

2 目标特性分析

2.1 半空间导体目标散射的物理光学分析方法[5]

快速准确地计算低空飞行目标的雷达散射场强度是模拟雷达目标回波信号的基础.首先,考虑位于半空间环境中的电大尺寸导体目标.在平面入射波照射下,半空间金属目标与地面经过直接或相互间的反射产生不同的散射场

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}_0) = -j\omega \mathbf{A}(\mathbf{r}_0) - \nabla \Phi(\mathbf{r}_0), \quad \mathbf{r}_0 \in S \quad (5)$$

式中: $\mathbf{r}_0$ 表示源点位置; $\mathbf{A}$ 和 Φ 表示由面电流产生的磁矢位和电标位; S 代表物体表面.半空间并矢格林函数可由矢量位和标量位表示,其中矢量位函数可以表示为[6]

$$\mathbf{G}_A = (\mathbf{x}\mathbf{x} + \mathbf{y}\mathbf{y})G_{A_{xx}} + \mathbf{z}\mathbf{x}G_{A_{zx}} + \mathbf{z}\mathbf{y}G_{A_{zy}} + \mathbf{z}\mathbf{z}G_{A_{zz}} \quad (6)$$

式中: $G_{A_{xx}}, G_{A_{zx}}, G_{A_{zy}}, G_{A_{zz}}$ 分别为张时 $\mathbf{x}\mathbf{x}, \mathbf{z}\mathbf{x}, \mathbf{z}\mathbf{y}, \mathbf{z}\mathbf{z}$ 的半空间矢量位函数. $G_{\Phi_x}, G_{\Phi_y}, G_{\Phi_z}$ 分别为 $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 方向上的半空间标量位函数,半空间矢量位和标量位函数详细的公式推导可参考文献[7].

由于采用物理光学近似,必须对半空间目标的遮挡和消隐进行处理.本文结合图形电磁学,采用硬件加速卡对目标和背景像素进行显示和自动消隐,然后根据像素的分辨率实现面元的自动剖分,同时

利用光照模型对目标进行着色渲染,显卡内存中为每个像素点均匀的保存颜色值(RGB)和深度值等信息。

提取单位像素的法矢量和深度值后,利用物理光学方法给散射体像素单元赋予简单明确的电流值,利用远场近似条件,引入半空间格林函数,得到半空间导体目标散射场

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = & -j\omega \iiint_v \mathbf{G}_A \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 + \frac{\mathbf{k} \cdot \hat{\mathbf{s}}}{\omega} \iiint_v \\ & \left[G_{\Phi x} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{J}(\mathbf{r}_0) + G_{\Phi y} \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{J}(\mathbf{r}_0) + G_{\Phi z} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{J}(\mathbf{r}_0) \right] d\mathbf{r}_0 \end{aligned} \tag{7}$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{r}_0)$ 是散射体表面电流; $\mathbf{k}$ 是入射波矢量; $\hat{\mathbf{s}}$ 是散射方向单位矢量。根据目标表面上各个散射部件之间的相对相位关系以及散射场的极化关系,可将雷达散射场强度表示为如下复数量

$$\sigma^{1/2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\pi^{1/2} R \frac{\mathbf{E}_s \cdot \hat{\mathbf{e}}_r}{E_o} \exp(jkR) \tag{8}$$

式中: $\sigma^{1/2}$ 表示各散射中心的复数散射场强度; R 是从雷达到该散射中心的双程距离; $\hat{\mathbf{e}}_r$ 是接收装置电极化方向的单位矢量。

2.2 数值计算

对半空间环境下典型目标进行验证,设入射波在 XOZ 平面内,频率为 10 GHz,金属平板边长为 8λ ,距离地面为 $\lambda/4$,土壤的相对介电常数为 4.0,相对磁导率为 1.0。利用上述半空间物理光学法计算半空间金属平板的单站 RCS,并将计算结果与 HF-SS 自由空间和半空间仿真结果进行比较验证,如图 1 所示。

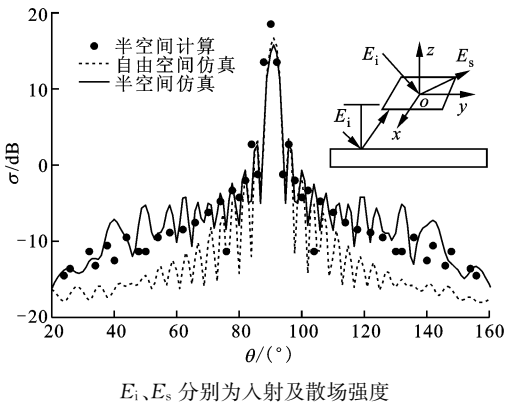


图 1 半空间金属平板的单站 RCS

从图 1 可以看出,计算结果能够较好地分布在仿真结果周围,整体趋势较为吻合,半空间目标散射结果明显平均高出自由空间 4~5 dB。这表明半空间与自由空间的目标散射特性还是存在较大差异

的。半空间物理光学方法在精度上面能够保证计算的要求,证明能够对上述电大尺寸目标进行准确计算。在此原理基础上,可将该方法进一步推广到半空间电大复杂导体目标的计算。

考虑真实地形环境,将地面等效为下半空间介质,根据雷达目标所在位置的大地坐标,利用地形地物特征分析数据,可得出它下方的地形环境,然后利用介质半空间格林函数计算出半空间中的雷达目标散射场,再依据上述的回波信号模型,就可以得到雷达目标的回波信号。

3 地杂波

3.1 相干杂波信号模型

相干杂波模型利用了杂波的相位,包含了有关雷达环境的全部信息,它能仿真实际雷达要进行的整个检测过程,是雷达信号级仿真所必须的。假设杂波是均匀的,即来自不同散射单元的反向散射信号是统计独立的,在空间上没有相干性,在这种假设下,能把杂波信号的计算简化为对每个散射单元回波信号的相干叠加。采用距离环地面散射单元划分法^[8],在整个雷达照射区域内,把地表分成多个 $\Delta R \times \Delta \varphi$ 的栅格单元,其中 ΔR 为距离环宽度, $\Delta \varphi$ 为方位角间隔。

相干杂波为所有杂波散射单元回波信号的相干叠加,首先需要确定一个散射单元的回波信号。一个散射单元作为一个点散射体,与目标信号的处理相同,回波信号的形式与式(1)~式(4)相同。

杂波散射单元的雷达散射场强度为

$$\sigma_{\text{clutter}} = \sigma_0 \Delta S \tag{9}$$

式中: σ_0 为服从高斯谱的对数正态分布的随机数,且均值为 σ_m , σ_m 为单位面积的雷达散射场强度; ΔS 为杂波散射单元的面积。

Ulaby^[9]归纳了 9 种地形环境分类:土壤和岩石表面;树林;草地;灌木丛;短植被;路面;城市地区;干雪;湿雪。通过数据统计,对每种分类的雷达散射场强度建立以下经验模型

$$\sigma_{\text{mean}} = P_1 + P_2 \exp(P_3 \gamma) + P_4 \cos(P_5 \gamma + P_6) \tag{10}$$

式中: $P_1 \sim P_6$ 为每种环境分类的散射统计参数; γ 为局部入射角(rad)。

在计算每个小单元时,根据地形数据,需要获得精确的局部入射角 θ ,并且得到 DFAD 中其对应的环境。这需要进行坐标转换,计算每个杂波单元的经纬度。

3.2 真实地形处理

考虑真实地形所产生的杂波,利用 SRTM 数据,进行真实地形处理.在计算每个杂波小单元时,雷达到小单元的斜距 R 、俯仰角 θ 及方位角 φ 都是确定的,而雷达的经、纬度及高程(即雷达大地坐标)均能实时获得,这样可求得杂波小单元以雷达为参考点的大地直角坐标^[10].由雷达的大地坐标可得其地心直角坐标,再经过坐标旋转和平移变换求出杂波单元的地心直角坐标,最后由杂波单元地心直角坐标可以求得其经、纬度.从 SRTM 数据中可得出杂波单元所在经纬度位置的高度 h_i ,进而从 DFAD 数据中得出地形种类.

将以地面坐标为参考的数据转换到机载雷达的球坐标系中,设地面任意一个节点 i 的位置矢量为

$$\mathbf{R}_i = x_i\mathbf{x} + y_i\mathbf{y} + z_i\mathbf{z} \quad (11)$$

式中: $z_i = h_i - H$, h_i 为地形高度, H 为雷达高度; x_i 、 y_i 由雷达投影相对节点位置决定.散射单元中心的擦地角为

$$\beta = \arcsin\left(\frac{H}{R} - \frac{2R}{R_e}\right) \quad (12)$$

式中: R_e 是地球平均半径.在计算每个散射单元时,分别将散射单元的高度代入.在计算过程中,根据 PD 雷达距离分辨率和多普勒分辨率划分的杂波散射单元的范围小于 SRTM3 数据中 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 的单元,当散射单元恰好处于 SRTM3 数据不同单元中时,如图 2 中所示,取 SRTM3 数据不同单元的算数平均值.

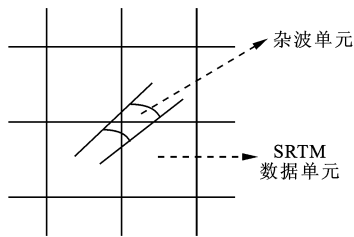


图2 地形数据单元与杂波单元的关系

4 仿真和结果分析

某机载 PD 雷达,仿真主要参数设为:载机经度为 118° ,纬度为 24.6° ,高度为 $7\,500\text{ m}$;载机速度为 150 m/s ;雷达目标经度为 119° ,纬度为 25.7° ,高度为 20 m ;目标速度为 400 m/s ;雷达发射功率为 $1\,000\text{ kW}$;雷达工作波长为 0.75 m ;发射信号形式为脉冲线性调频信号;发射信号脉冲宽度为 $13\text{ }\mu\text{s}$;压缩后脉冲宽度为 220 ns ;载机偏航角为 10° ;载机倾斜角为 0° ;载机滚动角为 5° ;天线偏航角为 0° ;天线

倾斜角为 0° ;天线最大电压增益为 32 dB ;半功率点波束宽度为 6.5° .由参数设置可得出距离门是 33 m ,而目标与雷达的实际距离应该是 $109\,882\text{ m}$,脉冲重复频率(PRF)决定了观测距离和多普勒频率的模糊程度,为了给出高、中 PRF 对仿真结果的影响,并且和文献[11]中的结果作比较,分别选择在 PRF 为 12 kHz 和 1 kHz 的条件下进行仿真.当 PRF 为 1 kHz 时,距离是不模糊的,而多普勒频率是模糊的;当 PRF 为 12 kHz 时,距离是模糊的,而多普勒频率是不模糊的.

根据雷达目标的实际参数指标进行精确建模.对目标进行三角剖分,利用程序提取模型的有效信息,对每个三角面元的顶点矢量和法矢量进行判断计算,用半空间物理光学方法得到低空雷达目标的雷达散射场强度准确计算结果.图 3 给出了某导弹的模型,图 4 给出了该导弹的单站 RCS 计算结果.

将目标回波信号与杂波回波信号都送入各自的距离门,并加入高斯噪声信号.仿真输出的是接收机接收期间的时(接收脉冲周期数)和距离二维的 I、Q 通道数据.对纵向数据进行快速傅里叶变换,并求其幅度,即得到距离-多普勒频率二维杂波图.

图 5 是 PRF 为 1 kHz 条件下的距离门-多普勒频率二维功率图,其中主瓣杂波中心频率是 286 Hz ,最大不模糊距离是 150 km ,根据目标与雷达的实际距离分析,目标应该落在第 3 329 个距离门,但是由于此情况下频率存在严重模糊,使得目标淹没在杂波之中.图 6 是 PRF 为 12 kHz 条件下的功率图,其中主瓣杂波中心频率仍是 286 Hz ,可以明显观察到目标落在第 290 个距离门,其计算的距离为 $299 \times 33 = 9\,867\text{ m}$.由于此情况下最大不模糊距离是 $12\,500\text{ m}$,实际中从雷达上观察的目标距离应为 $9\,882\text{ m}$,它是目标与雷达的实际距离对最大不模糊距离 $12\,500\text{ m}$ 取模.主瓣杂波高于目标 30 dB ,与理论分析基本相符.仿真结果表明,在真实地形环境下目标特性与杂波特性结合良好.

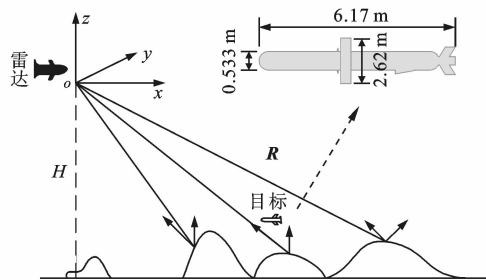


图3 某导弹模型

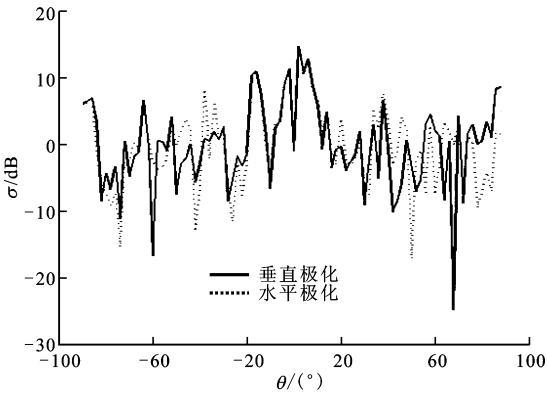


图4 某导弹雷达目标的单站 RCS 计算结果

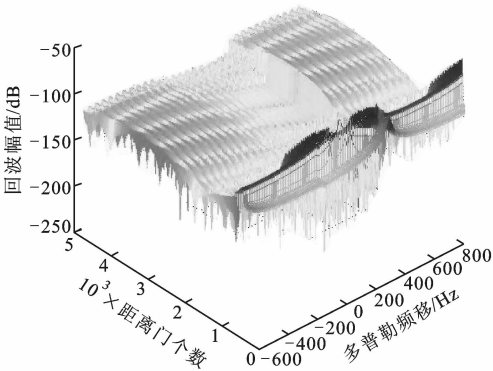


图5 PRF 为 1 kHz 时距离门-多普勒频率二维功率图

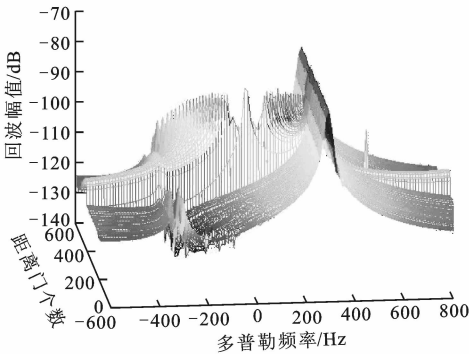


图6 PRF 为 12 kHz 时距离门-多普勒频率二维功率图

5 结 论

以机载脉冲多普勒雷达为平台,提出了分析真实地形环境中半空间低空目标的雷达回波信号的CHIAL方法.用半空间物理光学法,快速有效地计算了半空间复杂目标的雷达散射场强度.引入DFAD和SRTM数据,按照真实地形环境产生地杂波,模拟了包含目标特性和杂波特性的有效回波信号,仿真给出了典型情况下回波信号的距离门-多普勒频率二维功率图,数值结果证明了该方法的有效性和准确性.

参考文献:

[1] PRASAD N, SHAMEEM V, DESAI U B, et al. Improvement in target detection performance of pulse coded Doppler radar based on multicarrier modulation with fast Fourier transform [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2004, 151(1): 11-17.

[2] 叶红霞, 汪文秉, 金亚秋. 预警雷达信号模拟的研究 [J]. 现代雷达, 2004, 26(6): 1-3.

YE Hongxia, WANG Wenbing, JIN Yaqiu. A study on early-warning radar signal simulation [J]. Modern Radar, 2004, 26(6): 1-3.

[3] 胡居荣, 曹宁, 鹿浩. 雷达杂波视频信号实时仿真与系统实现 [J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(6): 74-95.

HU Jurong, CAO Ning, LU Hao. Real-time simulation and system realization for radar clutter video signal [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2007, 30(6): 74-95.

[4] 梁志恒, 潘明海. 毫米波导引头目标回波和杂波模拟方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12): 2723-2726.

LIANG Zhiheng, PAN Minghai. Method of target and clutter signal simulation for MMW seeker [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(12): 2723-2726.

[5] LI Xiaofeng, XIE Yongjun, WANG Peng, et al. High-frequency method for scattering from electrically large conductive targets in half-space [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6(1): 259-262.

[6] MICHALSKI K A, ZHENG D. Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media, part I: theory [J]. IEEE Trans Antennas Propagate, 1990, 38(3): 335-344.

[7] YANG J J, CHOW Y L, FANG D G. Fast solution of mixed-potential time-domain integral equations for half-space environments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(2): 269-279.

[8] BROWNING D J, SUMMER J E. Computer modeling of ground clutter in airborne radar [J]. IEE Conf Radar, 1974, 44(5): 389-396.

[9] ULABYI F T, DOBSON M C. Hand book of radar scattering statistics for terrain [M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 1989.

[10] 武汉测绘学院控制测量教研室. 控制测量学 [M]. 北京: 测绘出版社, 1988.

[11] SKOLNIK M I. 雷达手册 [M]. 王军, 林强, 米慈中, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.

(编辑 刘杨)