

主瓣交叉极化干扰对 SLB 系统的影响分析

杨 忠¹, 白渭雄¹, 付孝龙¹, 李伟健²

(1.空军工程大学防空反导学院,西安,710051;2.93708 部队,北京,101300)

摘要 针对旁瓣消隐(SLB)系统中主、辅天线对交叉极化信号的不同响应,提出了对具有 SLB 系统的雷达实施主瓣交叉极化干扰时会引起 SLB 系统工作,造成目标隐匿的问题。通过建立模型,分析了干扰的有效性。仿真实验证明,对主天线实施交叉极化干扰,无论是欺骗式干扰还是压制式干扰,都可以改变主、辅通道对信号的响应特性。主天线接收能量会急剧下降,辅通道的接收能量会强于主天线,从而触发 SLB 系统工作,主通道闭锁,目标隐匿。

关键词 主瓣干扰;交叉极化;旁瓣消隐;目标隐匿

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.009

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0042-05

An Analysis of Main-Lobe Cross-Polarized Interference on SLB System

YANG Zhong¹, BAI Weixiong¹, FU Xiaolong¹, LI Weijian²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Unit 93708, Beijing 101300, China)

Abstract: Aimed at the different response of the main and auxiliary antennas to the Cross-polarized interference in SLB, a new question that releasing main-lobe Cross-polarized interference to the radar system with SLB may arouse SLB system works and the target must be hidden is proposed. The model is set up and the effect of the interference is analyzed. The simulation results show that whether deceptive jamming or blanket jamming to the main antenna, main-lobe Cross-polarized interference can change the responses of signals from main and auxiliary antennas. The energy received by the main antenna decreases rapidly, and the energy received by the auxiliary antenna is stronger than that of the main antenna, thus triggering off SLB system to work. And simultaneously the main antenna channel closes and the target vanishes.

Key words: main-lobe interference; cross-polarization; SLB; target vanish

天线辐射信号除了空域、时域和频域三大特性以外,还有极化特性^[1-3]。极化特性对天线的影响不仅仅是极化失配所带来的能量损失,更严重的是会改变天线的方向特性,使天线的探测性能发生变化。对单脉冲雷达的交叉极化干扰正是利用了雷达

天线对交叉极化信号固有的跟踪偏差 $\delta\theta$, 发射交叉极化干扰信号,造成雷达天线的跟踪误差,形成角度欺骗^[4]。

但极化对不同天线系统的响应差异性所引起探测性能的变化研究却刚刚起步。如文献[5]指出

收稿日期:2015-07-20

作者简介:杨 忠(1991—),男,安徽阜阳人,硕士生,主要从事信息对抗理论与技术研究.E-mail:Yangws0577@163.com

引用格式:杨忠,白渭雄,付孝龙,等.主瓣交叉极化干扰对 SLB 系统的影响分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):42-46. YANG Zhong, BAI Weixiong, FU Xiaolong, et al. An Analysis of Main-Lobe Cross-Polarized Interference on SLB System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 42-46.

一些装备有 SLB 系统的雷达在受到交叉极化干扰时可能会启动,造成主通道关闭,目标隐匿,并给出天线增益变化示意图,但缺乏理论论证和试验验证。文献[6]分析了交叉极化干扰对目标的发现概率和错误概率的影响,文献[7]针对单极化天线的极化影响进行了仿真分析,文献[8]讨论了交叉极化干扰对反射面天线的影响,但也都仅仅局限于极化对天线的影响结果的说明,并没有深入讨论。文献[9-10]讨论了极化对天线不同阵元之间的幅相不一致性对天线性能的影响,没有对单个阵元进行说明。文献[11]在讨论交叉极化干扰对单脉冲天线的影响时,采用近似辛格函数表示天线方向图特性。本文根据前人对变极化干扰对天线性能变化的总结^[5]和部分天线性能测量数据对这一干扰样式进行分析论证,并建立模型验证干扰的可行性。

1 SLB 系统与主瓣交叉极化干扰原理分析

1.1 SLB 系统

旁瓣消隐系统是对付旁瓣干扰的常用辅助天线系统,其具体原理见文献[12-13]。SLB 系统的关键就是主路与辅路的接收功率关系的比较:主路强,则主通道选通,信号进行后续处理;辅路强,则主通道闭锁,对信号进行屏蔽。

1.2 主瓣交叉极化干扰对 SLB 系统的影响分析

主瓣交叉极化干扰,是指使用交叉极化信号在雷达主瓣方位实施干扰^[11,14]。天线波束宽度的不同,会引起对交叉极化信号的不同响应特性^[15-18]:波束越宽,交叉极化隔离度越小,接收交叉极化信号时的增益越高。这里借助成都英联科技有限责任公司对产品对这一特性做以验证。型号为 LB-10180 的喇叭天线为宽波束天线,型号为 LB-159-20-A、LB-90-25-A 和 LB-62-20-A 的喇叭天线为窄波束天线,其交叉极化隔离度见图 1。

图 1(a)在 4.9~12.4 GHz 的范围内其 3dB 波束宽度的典型值为 46°,而图 1(b)和(c)在其各自的频段范围内 3 dB 波束宽度的典型值为 18°。比较后可以清楚地看到,宽波束天线的交叉隔离度小于窄波束天线,且在 9.5~12.4 GHz 的频段中可达到 15 dB 左右,验证了波束宽度对交叉极化信号响应特性的影响。而在 12.4~18 GHz 的频段中,由于(a)的 3 dB 波束宽度在 13°~40°之间剧烈变化,所以与 3 dB 波束宽度的典型值为 18°的图 1(d)的交叉极化隔离度相差较小。

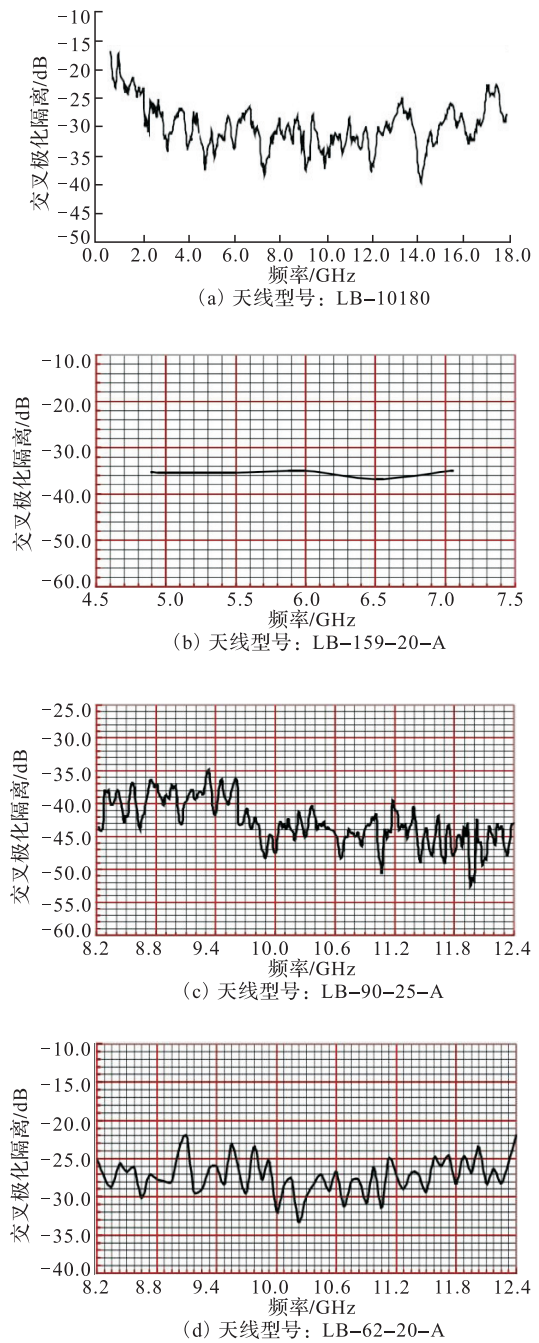


图 1 不同天线的交叉极化隔离度

Fig.1 Cross polar/isolation of different antenna

文献[5]指出,在对具有 SLB 系统的雷达主天线实施交叉极化干扰时,其辅助天线同时能接收到交叉极化干扰信号。由于交叉极化干扰信号的作用,会使得主天线的交叉极化波瓣图在天线的视轴方向有一个零点;但辅助天线的交叉极化波瓣图在这个方向上不是零点。故在这个方向上,辅通道接收的信号能量比主通道强,这与前面的验证结论相统一。此时,SLB 系统启动,主通道闭锁,目标隐匿。天线方向图见图 2。

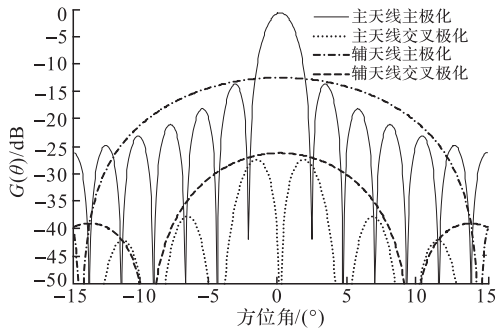


图2 SLB系统中主辅天线的极化方向图

Fig.2 Polarization radiation pattern of the main and auxiliary antennas in SLB

大多数天线在设计之初并没有考虑到天线对交叉极化信号相应特性的变化^[19],因此并不具有对抗交叉极化干扰的能力。下面就建立模型对此进行仿真验证^[20]。

2 模型建立

为讨论方便,设主天线发射水平极化信号,其 Jones 极化矢量为 $\mathbf{h}_t = \begin{bmatrix} 1 \\ \epsilon \end{bmatrix}$, 则发射信号为:

$$e_s(t) = \sqrt{\frac{P_t G_t}{4\pi}} e^{j2\pi f_0 t} \mathbf{h}_t s(t) \quad (1)$$

则在雷达接收机前端,目标的后向散射波为:

$$e_s(t - \tau_s) = \sqrt{\frac{P_t G_t^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^4(t)}} e^{j2\pi(f_0 - f_{ds})(t - \tau_s)} \mathbf{S} \mathbf{h}_t s(t) \quad (2)$$

所以,主天线接收目标回波:

$$\begin{aligned} V_{rs} &= \mathbf{h}_t^T e_s(t - \tau_s) + n_s(t) = \\ & \sqrt{\frac{P_t G_t^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^4(t)}} \cdot e^{j2\pi(f_0 - f_{ds})(t - \tau_s)} \cdot \\ & \mathbf{h}_t^T \mathbf{S} \mathbf{h}_t s(t) + n_s(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ϵ 为受天线隔离度导致的交叉极化分量; $s(t)$

为调制信号; $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$ 为目标的极化散射

矩阵; $n_s(t) \sim N(0, \sigma_s^2)$ 为主天线的接收机机内噪声。

取辅助天线的 Jones 极化矢量为:

$$\mathbf{h}_m = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 \\ \sin\theta_0 \cdot e^{j\varphi_0} \end{bmatrix}, \text{ 则辅助天线接收的目标回}$$

波为:

$$V_{ms} = \mathbf{h}_m^T e_s(t - \tau_s) + n_m(t) =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{P_t G_t G_m \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^4(t)}} e^{j2\pi(f_0 - f_{ds})(t - \tau_s)} \cdot \\ & \mathbf{h}_m^T \mathbf{S} \mathbf{h}_t s(t) + n_m(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $n_m(t) \sim N(0, \sigma_m^2)$ 为辅助天线的接收机机内噪声。

取干扰信号的 Jones 极化矢量为 $\mathbf{h}_j = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \cdot e^{j\varphi} \end{bmatrix}$, 则干扰信号为:

$$e_j(t) = \sqrt{\frac{P_j G_j}{4\pi}} \mathbf{h}_j J(t) \quad (5)$$

则主天线接收干扰信号:

$$\begin{aligned} V_{rj} &= \mathbf{h}_t^T e_j(t - \tau_j) + n_s(t) = \\ & \sqrt{\frac{P_j G_j G_t \lambda^2}{(4\pi)^3 R_j^2(t)}} \mathbf{h}_t^T \mathbf{h}_j J(t - \tau_j) + n_s(t) \end{aligned} \quad (6)$$

辅助天线接收干扰信号:

$$\begin{aligned} V_{mj} &= \mathbf{h}_m^T e_j(t - \tau_j) + n_m(t) = \\ & \sqrt{\frac{P_j G_j G_m \lambda^2}{(4\pi)^3 R_j^2(t)}} \mathbf{h}_m^T \mathbf{h}_j J(t - \tau_j) + n_m(t) \end{aligned} \quad (7)$$

由式(3)、(4)、(6)和(7)可知,SLB系统的触发条件为:

$$V_{rs}^2 + V_{rj}^2 \underset{B}{\overset{K}{\geq}} V_{ms}^2 + V_{mj}^2 \quad (8)$$

式中: K 为主通道选通; B 为主通道闭锁。

3 干扰效果分析

针对自卫式干扰情况,此时有 $R_t(t) = R_j(t)$, 设置仿真条件:取 $P_t = 60 \text{ kW}$, $G_t = 30 \text{ dB}$, $G_m = 15 \text{ dB}$, $f_0 = 3.5 \text{ GHz}$, $P_j = 200 \text{ W}$, $G_j = 10 \text{ dB}$,

\mathbf{S} 取典型值 $\begin{bmatrix} 1 & 0.3j \\ 0.3j & 0.9 \end{bmatrix}$ 。

定义干扰极化度:

$$\xi = \mathbf{h}_t^T \cdot \mathbf{h}_j \quad (9)$$

式中: \mathbf{h}_t 表示接收天线的 Jones 极化矢量,则 $\xi \in [0, 1]$, $\xi = 0$ 表示交叉极化干扰, $\xi = 1$ 表示同极化干扰。 ξ_r 为主天线干扰极化度, ξ_m 为辅天线干扰极化度。

3.1 转发式干扰

干扰信号为转发信号,所以式(5)中变为:

$J(t - \tau_s - \Delta t) = e^{j2\pi(f_0 - f_{ds})(t - \tau_s - \Delta t)} \cdot s(t)$, Δt 为转发时延。此时,主辅天线接收能量变化见图3。

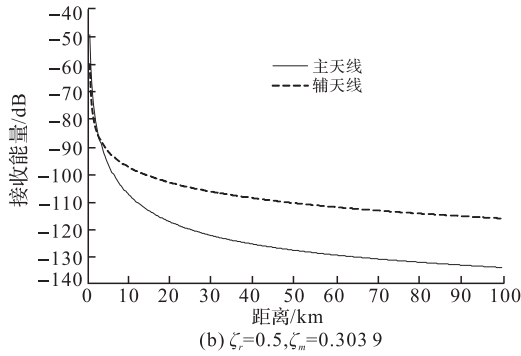
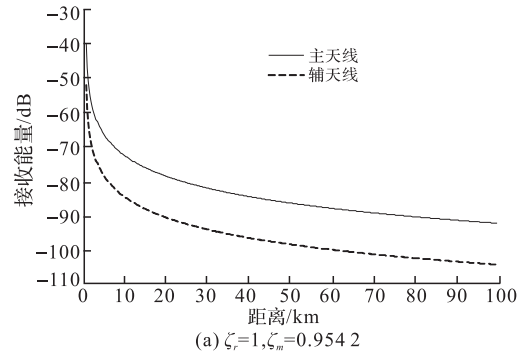


图 3 转发式干扰下主辅天线接收能量变化

Fig.3 Receive energy of the main and auxiliary antennas under repeater jamming environment

图 4 为图 3(b)中交叉点的局部放大图。

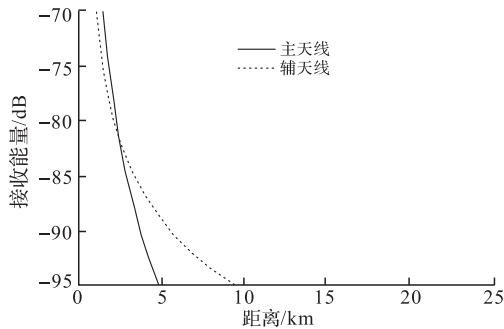


图 4 图 3(b)的局部放大图

Fig.4 Detail view of figure 3(b)

可见,在同极化条件下,主瓣干扰是无法触发 SLB 系统工作的;但在交叉极化条件下,天线在 2 km 以外将受到 SLB 系统的干扰,主通道将一直处于闭锁状态,目标实现隐匿。

3.2 压制式干扰

干扰信号为杂乱噪声干扰,目的是遮盖或淹没有用信号,阻碍雷达分辨和检测目标信息,所以 $J(t)$ 为随机噪声。

图 5 为压制式干扰下主辅天线接收能量变化。

仿真实验证明,对主天线实施交叉极化干扰,无论是欺骗式干扰还是压制式干扰,都可以改变主、辅通道对信号响应特性。主天线接收能量会急剧下降,辅通道的接收能量会强于主天线,从而触发 SLB 系统工作,主通道闭锁,目标隐匿。

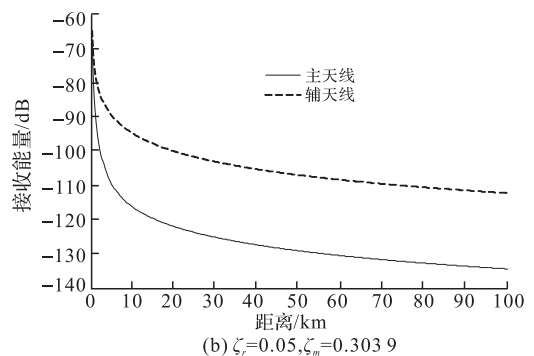
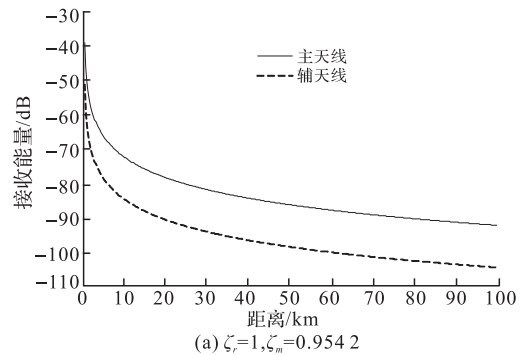


图 5 压制干扰下主辅天线接收能量变化

Fig.5 Receive energy of the main and auxiliary antennas under blanket jamming environment

4 结语

电子战中的干扰与对抗就是立足于对方武器系统的弱点进行攻击,同时完善己方武器系统建设。本文围绕 SLB 系统无法对抗主瓣交叉极化干扰这一设计缺陷,进行仿真验证,证明了干扰的可行性,对相关武器系统的研究和应用指出了问题,有助于系统的升级和改进。

参考文献(References):

[1] RUDGE A W, ADATIA N A. New Class of Primary-Feed Antenna for Use With offset Parabolic Reflector Antenna[J]. Electronics Letters, 1975, 11(24): 597-599.

[2] RUDGE A W, ADATIA N A. Offset Parabolic Reflector Antenna: A Review[J]. Proceedings of IEEE, 1978, 66(12): 1592-1605.

[3] LUDWIG A C. The Definition of Cross Polarization [J]. IEEE Trans Antenna and Propagation, 1973, 21(1): 116-119.

[4] 曹星江, 杨沛. 交叉极化对单脉冲雷达角度欺骗干扰仿真分析[J]. 电子科技, 2013, 26(10): 131-144. CAO Xingjiang, YANG Pei. Simulation and Analysis of Cross-Polarization Monopulse Radar Angle Deception Jamming [J]. Electronic Sci&Tech, 2013, 26(10): 131-144. (in Chinese)

- [5] LEROY B, BRUNT Van. 应用电子对抗[M]. 西北电讯工程学院 204 室, 译. 北京: 解放军出版社, 1985.
LEROY B, BRUNT Van. Applied ECM[M]. Translated by Section 204 of Xidian University. Beijing: The People's Liberation Army Press, 1985. (in Chinese)
- [6] FOGLIA G, MARCANTONI D, MAIO A De, et al. ECM Counteracting SLB: Analysis and Effectiveness Evaluation[C]// Proceedings of IEEE Radar Conference, London, 2008.
- [7] MORA-NAVARRO K M, LEON-COLON L V, COLOM-USTARIZ J G, et al. Polarization Effects on a Single Polarized off-the-grid X-band Radar [C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Melbourne, 2013: 2216-2218.
- [8] JAMNEJAD V. A Study of Cross Polarization Effects in Reflector Antenna Arrays [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2010: 1-10.
- [9] 倪晋麟, 郑学誉, 何东元. 单元交叉极化对自适应阵列性能的影响[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(1): 97-101.
NI Jinlin, ZHENG Xueyu, HE Dongyuan. The Effects of Element Cross-Polarization on Adaptive Array Performance[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(1): 97-101. (in Chinese)
- [10] 束咸荣, 董玉良, 王华. 天线的交叉极化比[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 344-346.
SHU Xianrong, DONG Yuliang, WANG Hua. Cross Polarization Ratio for Antenna[J]. Journal of CAEIT, 2010, 5(4): 344-346. (in Chinese)
- [11] 李永祯, 肖顺平, 王雪松, 等. 雷达极化抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 242-254.
LI Yongzhen, XIAO Shunping, WANG Xuesong, et al. Radar Polarization Anti-Jamming Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 242-254. (in Chinese)
- [12] MAISEL L. Performance of Sidelobe Blanking Systems[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1968, 4(2): 174-180.
- [13] MAIO A De, FIORINI M, FARINA A, et al. Performance Analysis of Sidelobe Blanking System in Presence of Mutual Coupling[C]// Proceedings of the LET International Radar Conference on Radar System 2007, Edinburgh, Scotland, October 2007: 151-155.
- [14] HUAN T Tran. Polarization Comparison Between On-axis and Off-axis Dual Reflector Telescopes: Zemax and Grasp8 Simulations [J]. New Astronomy Reviews, 2003(47): 1091-1096.
- [15] YANG Shing Lung Steven, LEE Kai Fong, KISHK Ahmed K, et al. Cross Polarization Studies of Rectangular Patch Antenna [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(8): 2099-2103.
- [16] SHARMA S B, PUJARA Dhaval, CHAKRABARTY S B, et al. Cross-Polarization Cancellation in an Offset Parabolic Reflector Antenna Using a Corrugated Matched Feed[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8): 861-864.
- [17] 何密, 罗佳, 李永祯, 等. 基于单偏馈抛物面天线空域极化特性的最佳波束宽度研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2): 376-380.
HE Mi, LUO Jia, LI Yongzhen, et al. Study of Optimum Beam Width Based on Spatial Polarization Characteristics of Single-Offset-Parabolic Antenna [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(2): 376-380. (in Chinese)
- [18] 孙伟, 吕文俊, 徐立勤. 机械结构对阵列天线交叉极化特性影响的研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(4): 411-415.
SUN Wei, LÜ Wenjun, XU Liqin. Study of Mechanical Structure's Effect on Antenna Array's Cross-Polarization Performance [J]. Journal of CAEIT, 2008, 3(4): 411-415. (in Chinese)
- [19] 宁勇. 对相控阵雷达旁瓣干扰方法研究[J]. 电子对抗, 2009(6): 1-7.
NING Yong. Sidelobe Jamming Against the Phased-Array Radar [J]. Electronic Warfare, 2009(6): 1-7. (in Chinese)
- [20] 饶彬, 肖顺平, 王雪松, 等. 雷达极化理论可视化仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(11): 2296-2307.
RAO Bin, XIAO Shunping, WANG Xuesong, et al. Visual Simulation of Radar Polarimetry [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(11): 2296-2307. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)