

# 超低空目标的广义布儒斯特效应

隋栋训<sup>1</sup>, 童创明<sup>1</sup>, 彭鹏<sup>1</sup>, 王童<sup>1</sup>, 梁海涛<sup>2</sup>

(1.空军工程大学防空反导学院,西安,710051 2.93861部队,陕西咸阳,713800)

**摘要** 超低空预警是当今研究的热点,而多径干扰是影响超低空目标探测的主要因素。针对多径干扰的问题,从电磁散射的角度出发,提出“广义布儒斯特效应”,以降低多径干扰的影响。运用小面元高频近似方法(PO+MEC)快速计算目标散射场并生成回波信号;在物理光学法的基础上推导了复反射系数公式;根据“四路径”建立多径回波信号模型。以此为基础,研究了多径信号的广义布儒斯特效应的产生机理,找出多径干扰最小的入射角,并研究其存在的条件。通过改变环境类型及相关参数和入射频率,得出广义布儒斯特效应的内在规律,为超低空对抗打下基础。

**关键词** 广义布儒斯特效应;多径信号;物理光学法;超低空

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.007

**中图分类号** TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0029-04

## A Study of G-Brewster of Super-low Altitude Target

SUI Dongxun<sup>1</sup>, TONG Chuangming<sup>1</sup>, PENG Peng<sup>1</sup>, WANG Tong<sup>1</sup>, LIANG Haitao<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Unit of 93861, Xianyang 713800, Shaanxi, China)

**Abstract:** Detection of super-low altitude target is a hot point in current military confrontation. Multipath Interference is a difficult problem nowadays. To solve the problem, 'G-Brewster' is put forward from electromagnetic scattering. The elements of rough surface are thought about and the best angle is found to detect the target. To get the echo, the target is meshed and PO+MEC is used to calculate the scattering field, and then the reflection coefficient is derived. On the basis, multipath echoes are gotten. The condition of the existence of G-Brewster is studied out, and the angle that strength of multipath interference is lest is found out. The discipline of G-Brewster on environment is posted. The study will lay a foundation of super-low altitude target.

**Key words:** G-Brewster; multiple path; PO; super-low altitude target

超低空突防是现代战争中常见的进攻手段,对地面防空造成了极大的威胁<sup>[1]</sup>。雷达在探测和跟踪超低空目标时,波束照射粗糙面后形成多径反射回

波,导致接收信号出现幅度和相位上的变化<sup>[2-3]</sup>,从而抑制雷达探测能力。多径干扰是解决超低空问题的关键。为了解决这一难题,文献<sup>[4]</sup>基于窄相关技

收稿日期:2015-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372033);航空科学基金资助项目(20130196005)

作者简介:隋栋训(1990-),男,山东蓬莱人,硕士生,主要从事目标与环境散射研究.E-mail: xuaneyi27@163.com

**引用格式:** 隋栋训,童创明,彭鹏,等. 超低空目标的广义布儒斯特效应[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):29-32. SUI Dongxun, TONG Chuangming, PENG Peng, et al. A Study of G-Brewster of Super-low Altitude Target[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 29-32.

术,设计出对多径信号不敏感的相关器,但存在精度过低的问题;文献[5]提出了最大似然估计法,虽能实现最优,但计算过于复杂。工程实践表明:克服多径干扰最有效的方法是降低多径强度与目标信号之比。据此,文中从电磁散射的角度出发,提出一种新的解决思路。

布儒斯特效应是指垂直极化波以特定角度照射光滑的介质平面,出现镜面反射波为零的现象<sup>[6]</sup>。多径信号产生的实质是目标与环境的二次散射,镜面反射对其强弱有重要影响。因而拓展原定义,提出“广义布儒斯特效应”,它是指垂直极化波以特定角度照射超低空目标时,镜面反射波与介质粗糙面发生全透射,形成极小多径干扰的现象。实验表明:在布儒斯特角附近入射能将环境信号强度减弱到-40 dB<sup>[7]34-41</sup>。

本文运用物理光学法结合等效电磁流(Physical Optics - Method of Equivalent Currents, PO-MEC)<sup>[8]</sup>研究超低空目标散射特性,推导粗糙面复反射系数,生成目标和多径信号。在此基础上,研究广义布儒斯特效应不同环境类型、粗糙面参数、入射频率对广义布儒斯特效应造成的影响,并得出其存在条件。

## 1 回波信号模拟

在研究多径问题时,一般用4条主要路径的信号来模拟超低空目标的多径回波,见图1。路径1是指雷达照射目标的后向散射;路径2是指照射目标后经粗糙面反射回雷达;路径3是经粗糙面反射到达目标再散射回雷达;路径4是经粗糙面反射到目标,之后再经粗糙面反射而回。

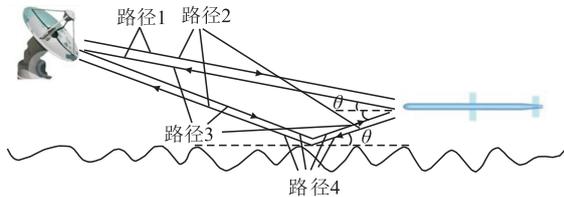


图1 目标多径回波示意图

Fig.1 Multipath echoes of target

在传统的回波模拟中,通常采用的是基于散射中心的近似计算,该模型将目标视为若干强散射中心的叠加。但对于电大目标而言,散射中心较多,当处于复杂运动时,散射中心不断变化,使结果与实际相差很大。因此,引入电磁散射理论来计算各路径的后向散射场,以此生成回波,即<sup>[9]228-249</sup>:

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{E}_1(t) + \mathbf{E}_2(t) + \mathbf{E}_3(t) + \mathbf{E}_4(t) = \mathbf{E}_{01}(t) + \rho \mathbf{E}_{02}(t) + \rho \mathbf{E}_{03}(t) + \rho^2 \mathbf{E}_{04}(t) \quad (1)$$

通过电磁计算得到的回波模型能够精确地反映目标信息,几乎适用于各种外形和复杂运动的目标。采用高频近似方法,并推导高阶反射系数,实时高效的得到超低空目标与时变粗糙面的信息。

## 2 电磁散射计算方法

### 2.1 物理光学法(PO)

PO通过计算目标表面的感应电流,代替原有目标,由Stratton-Chu方程计算散射场,方程自动满足边界条件和辐射条件:

$$\mathbf{E}^s = \frac{1}{4\pi} \int_S [(\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E}^T) \times \nabla' \varphi_0 + j\omega\mu(\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^T) \varphi_0 + (\hat{\mathbf{n}}' \cdot \mathbf{E}^T) \varphi_0] dS' \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}'$ 为表面点 $\mathbf{r}'$ 处的单位法向矢量; $\mathbf{E}^T$ 表示 $\mathbf{r}'$ 处的总电场强度矢量; $\varphi_0$ 为自由空间格林函数,即:

$$\varphi_0 = \frac{\exp(-jk_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (3)$$

在远场情况下, $\nabla' \varphi_0 \approx -jk_0 \mathbf{s} \varphi_0$ , $\mathbf{s}$ 为指向散射方向的单位矢量。

### 2.2 理想导体三角面元散射计算的PO

对于复杂的目标,可以采用三角面元来模拟,将电磁散射中的面积分转化为各面元的面积分,之后转化为线积分,由解析式计算得到。这种方法在保证计算效率的同时,也提高了复杂目标电磁散射的计算精度。

对于远场条件下,表面场的贡献是横向的,在散射方向上没有分量,即:

$$\hat{\mathbf{n}}' \cdot \mathbf{E}^T = 0 \quad (4)$$

在导体表面存在如下关系:

$$\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{E}^T = 0, \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^T = 2\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^i \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)中可得:

$$\mathbf{E} \approx \frac{jk_0}{4\pi} \varphi_0 \{ \mathbf{s} \times [\mathbf{s} \times (\hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}^i)] \} \Delta S \mathbf{I} \quad (6)$$

式中: $\Delta S$ 为面元面积; $\mathbf{I} = \frac{1}{\Delta S} \int_S \exp[jk_0 \mathbf{r}' \cdot (\mathbf{s} - \hat{\mathbf{i}})] dS'$ ;  $\hat{\mathbf{i}}$ 为指向入射方向的单位矢量。

### 2.3 等效电磁流(MEC)

对于复杂目标而言,边缘处存在绕射场,此时PO无法得到准确的结果。采用MEC计算,此时边缘绕射场可以通过线积分计算棱边 $C$ 散射场,其远区边缘绕射场可表示为:

$$\mathbf{E}^d = \frac{jk_0}{4\pi} \varphi_0 \int_C [\eta_0 \mathbf{s} \times \mathbf{s} \times \mathbf{J} + \mathbf{s} \times \mathbf{M}] \exp(jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{r}') dl \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{J} = I_e \mathbf{t}$  和  $\mathbf{M} = I_m \mathbf{t}$  分别是等效边缘电流和磁流;  $\mathbf{t}$  是  $C$  的切向单位矢量;  $d\mathbf{l}$  是沿  $C$  的弧长增量。

## 2.4 复反射系数推导

为了计算粗糙面对多径回波的影响,需要推导粗糙面的反射系数,一般的反射系数往往是基于低阶小斜率近似方法得到的,虽然计算较简单,但忽略了粗糙面的一些要素。因而,在小斜率近似方法的基础上重新推导,并进行合理取舍,最后对粗糙面的入射能量进行归一化,推导出粗糙面的反射系数。

$$\rho = \frac{1}{L_x L_y} R_p^{\text{PO}} \frac{2(\mathbf{q}_0 \mathbf{q}_1)^{1/2}}{(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q}_1)} \int \exp[-j(\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_1) \mathbf{r} + j(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q}_1) \zeta(\mathbf{r})] dx dy \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{p}_0$ ,  $\mathbf{q}_0$ ,  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{q}_1$  分别代表入射波矢和反射波矢的垂直和水平分量。当入射角等于散射角,  $\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_1$ 。

$$\rho = \frac{1}{L_x L_y} R_p^{\text{PO}} \int \exp[j2K \cos \theta_i \zeta(\mathbf{r})] dx dy \quad (9)$$

$$R_p^{\text{mPO}} = R_{p00} + m_k^2 [R_{p02} + R_{p20} + (R_{h00} + R_{v00}) \cot^2 \theta] + \dots \quad (10)$$

式中:  $\zeta(\mathbf{r})$  表示粗糙面高度;  $m_k$  表示均方根斜率;

$$R_{p00} = \frac{1}{m! n!} \left( \frac{\partial^{m+n}}{\partial Z_x^m \partial Z_y^n} R_p \right); Z_x, Z_y \text{ 代表粗糙面 } x, y \text{ 方向的斜率; } K \text{ 为入射波波数。}$$

对于垂直极化而言,可得:

$$R_{v00} = \frac{\eta_1 \cos \theta_i - \eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (11)$$

$$R_{v10} = \frac{\eta_1 \sin \theta_i (1 - R_{v00}) - \eta_2 \frac{k_1 \cos \theta_i}{k_2 \cos \theta_t} \sin \theta_t (1 + R_{v00})}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (12)$$

$$R_{v02} = \frac{\eta_2 (1 - k_1^2/k_2^2) (1 + R_{v00})}{2(\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t) \cos \theta_t} \quad (13)$$

$$R_{v20} = \frac{R_{v02}}{\cos^2 \theta_t} - R_{v10} \frac{\eta_1 \sin \theta_i + \eta_2 \frac{k_1 \cos \theta_i}{k_2 \cos \theta_t} \sin \theta_t}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (14)$$

反射系数的高阶项通常很小,可以简化为:

$$R_p = R_{p00} + m_k^2 (R_{p02} + R_{p20}) \quad (15)$$

通过统计分析,可得反射系数相干分量:

$$\rho_c = E(\rho) = R_p \exp(-2(Kh \cos \theta_i)^2) \quad (16)$$

式中:  $h$  为粗糙面均方根高度。该结果与经验公式基本相同,只是在原本的非涅尔反射系数加入了修正因子  $m_k^2 (R_{p02} + R_{p20})$ 。

## 3 仿真分析

### 3.1 复反射系数有效性验证

为了验证修正的复反射系数的有效性,设入射频率  $f = 1 \text{ GHz}$ ,粗糙面  $h = 0.3\lambda$ ,均方根斜率  $m_k = 0.05\lambda$ ,介电常数  $\epsilon_r = 3$ ,将结果与矩量法对比,见图2。

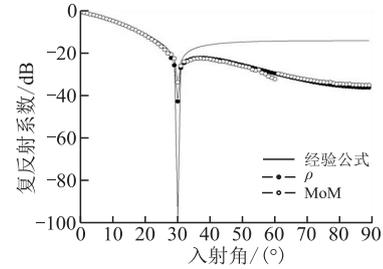


图2 复反射系数对比图

Fig.2 Comparison of the reflection coefficients

从图2中可以看出,如果不加入修正因子,在布儒斯特角的位置会出现一个-100 dB的极小值,这与实际结果是不相符的。另外,当入射角在大于30°的时候,原结果偏高,加入修正因子后,复反射系数基本与矩量法结果吻合。

### 3.2 广义布儒斯特效应分析

广义布儒斯特效应的本质,是目标-环境耦合散射问题,目标越低,耦合越强,只有在超低空时,耦合散射效应才会比较明显。从环境类型、粗糙面均方根高度、入射频率等要素入手,分析广义布儒斯特效应的规律。

以垂直极化波入射,入射频率为1 GHz,目标为战斧式巡航导弹,高度为10 m,粗糙面  $h = 0.1\lambda$ ,  $m_k = 0.05\lambda$ 。由环境介电常数公式得,海洋  $\epsilon_r = 70 - 108j$ ,土壤  $\epsilon_r = 30 - 2.7j$ ,沙漠  $\epsilon_r = 3 - 0.0002j$ 。此时,不同环境的多径与目标信号之比见图3。

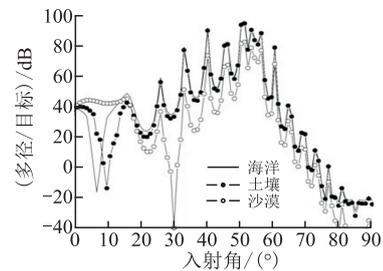


图3 不同环境的广义布儒斯特效应

Fig.3 The G-Brewster of different environments

从图3中可以看出,海洋和土壤环境在10°左右,沙漠在30°,多径信号与目标信号之比出现剧烈下降,与周围角度相比降低了60~80 dB,这就是“广义布儒斯特效应”。利用该效应有利于克服多径干扰,识别目标。不同环境出现的广义布儒斯特角不同,随着相

对介电常数的模值的减小,该角度增大。

以海洋面为例,以 1 GHz 的垂直极化波入射,导弹高度为 10 m,海洋面  $m_k = 0.05\lambda$ , 改变粗糙面均方根高度  $h$ , 结果见图 4。

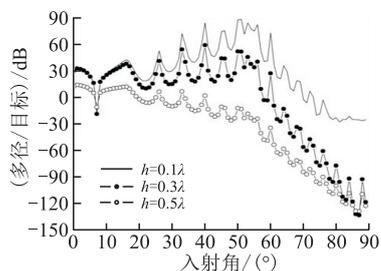


图 4 不同均方根高度的广义布儒斯特效应

Fig.4 The G-Brewster of different height

可以发现,  $h$  的改变并未使海洋面的广义布儒斯特角较大偏移。但是随着  $h$  的增加,其他角度多径与目标信号比下降,当达到  $h = 0.5\lambda$  时,广义布儒斯特效应变得不明显。

取导弹高度为 10 m,海洋面  $h = 0.1\lambda$ ,  $m_k = 0.05\lambda$ , 以不同频率的垂直极化波入射,结果见图 5。

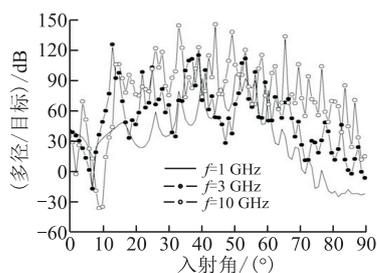


图 5 不同入射频率的广义布儒斯特效应

Fig.5 The G-Brewster of different frequency

随着入射频率的升高,目标散射对角度变化变得敏感。因而,图 5 中多径信号与目标信号之比起伏剧烈,但是依然存在广义布儒斯特效应。随着频率的升高,对应的角度也略有增大,频率增大 10 倍,角度变化在  $3^\circ$  左右。

## 4 结语

广义布儒斯特效应的本质是入射波垂直极化条件下,从特定角度入射,目标与环境的耦合作用最小。从实验结果中可以得到几条结论:广义布儒斯特角随着入射频率和相对介电常数的模值增大而减小,并且受到粗糙面的参数影响;当均方根高度增大时,广义布儒斯特效应减弱甚至消失。针对这一问题的研究,能使雷达有效的克服多径干扰,在解决超低空对抗问题中,发挥了重要的作用。

## 参考文献(References):

[1] 蒙文,韩万鹏,李云霞,等.适用于无人机超低空飞行的

脉冲激光测高系统[J].空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(5),70-74.

MENG Wen, HAN Wanpeng, LI Yunxia, et al. Pulse Laser Altimeter Applicable to Low-flying UAV[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2010, 11(5), 70-74. (in Chinese)

[2] Gupta A S, Williams A. Mitigating. The Effect of Multipath Interference in Shallow Water Acoustic Channels [C]//Ocean Electronics (SYMPOL). 2013: 1-4.

[3] Chang J, Prucnal P R. A Novel Analog Photonic Method for Broadband Multipath Interference Cancellation[J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(7): 377-379.

[4] 刘禹圻,胡修林,冉一航,等.一种基于窄相关的 BOC 信号的多径减弱方法[J].宇航学报,2010, 31(10), 2367-2373.

LIU Yuqi, HU Xiulin, RAN Yihang, et al. A Multipath Mitigation Method for BOC Modulated Signal Based on Narrow Correlator[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 2367-2373. (in Chinese)

[5] 陈珂,归庆明,岳利群.一种基于多相关器的 GPS 多径估计方法[J].宇航学报,2012,33(9),1241-1247.

CHEN Ke, GUI Qingming, YUE Liqun. A Multicorrelator Based GPS Multipath Estimation Method[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(9), 1241-1247. (in Chinese)

[6] Watanabe Takuma, Yamada Hiroyoshi, Arii Motofumi. Model Experiment of Permittivity Retrieval Method for Forested Area by Using Brewster's Angle[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2012: 1477-1480.

[7] 徐振海,肖顺平,熊子源.阵列雷达低角跟踪技术[M].北京:科学出版社,2014.

XU Zhenhai, XIAO Shunping, XIONG Ziyuan. Low Angle Tracking Techniques for Array Radars[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

[8] Corbel C, Bourlier C, Pinel N. Rough Surface RCS Measurements and Simulations Using the Physical Optics Approximation[J]. Antennas and Propagation, 2013, 61(10): 5155-5165.

[9] 郭立新,张民,吴振森.随机粗糙面与目标复合电磁散射的基本理论和方法[M].北京:科学出版社,2014.

GUO Lixin, ZHANG Min, WU Zhensen. Theory and Method on Electromagnetic Scattering of Target and Rough Surface[J]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)