

一种性能稳定的新单元频率选择表面^{*}

贾宏燕¹⁾²⁾ 高劲松¹⁾ 冯晓国¹⁾ 孙连春¹⁾

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 3 月 28 日收到 2008 年 5 月 18 日收到修改稿)

通过对十字孔径单元的四个端点添加 L 形的孔径, 给出了一种新单元的频率选择表面(FSS)设计, 同时通过拆分, 得到了相对应的拆分单元 FSS. 利用谱域法, 对两种 FSS 结构从理论上进行了分析, 在 TE 波入射时角度变化、大角度入射时极化变化对中心频率的影响以及通带带宽三个方面进行了研究, 并采用镀膜和光刻技术制备了两种 FSS 结构的实验样件, 在微波暗室中进行测试, 得到的实验曲线与理论仿真曲线基本一致. 结果表明 新单元的两种 FSS 结构的中心频率均能在 TE 波入射时实现角度稳定性和大角度入射时实现极化稳定性. 拆分单元 FSS 的中心频率几乎不变, 具有更宽的通带带宽.

关键词: 频率选择表面(FSS), 新单元, 极化稳定性, 角度稳定性

PACC: 7300, 7360

1. 引言

由于周期结构可以控制电磁波的传输, 近几年周期结构的物理性质和应用得到了人们的极大关注, 比如频率选择表面(FSS)^[1-4]和光子带隙材料(PBG)^[5-7]. FSS 对不同频段的入射电磁波具有选择性的反射或者透射, 被广泛应用于卫星、雷达以及现代通讯系统中.

金属屏上周期性的开孔单元构成的二维周期阵列结构, 因其能够实现对谐振频率电磁波的完全透射, 其他频段电磁波的完全反射, 通常称为带通 FSS^[8,9]. 带通 FSS 的一个重要应用是在微波波段设计隐身雷达罩^[10,11], 世界各国均十分重视对此的开发与应用. 考虑到雷达罩的表面形状以及入射到罩壁上的电磁波的极化方式, FSS 的设计必须满足对电磁波不同的入射角度和不同的极化方式均有稳定的频率响应特性, 即 FSS 的角度稳定性和极化稳定性.

FSS 的角度稳定性和极化稳定性的问题引起了人们的关注. 研究表明, 加载电介质的方式可以改善大角度入射时 FSS 的传输特性^[12]. 交叉排布的直缝

单元 FSS 可以给出电磁波正入射时的极化稳定性^[13]. 但上述方法都存在一定的缺陷: 加载电介质又往往会增加传输损耗; 工程应用中往往涉及到的入射角度, 直缝交叉排布结构在这种情况下不能实现极化稳定性.

本文给出新单元的两种 FSS 结构具有角度稳定性, 同时兼具大角度极化稳定性. 而拆分单元 FSS 结构, 能够得到更宽的通带带宽, 是一种新的展宽通带带宽的设计方法. 本文给出了理论分析和实验测试结果.

2. 新单元频率选择表面设计

通过在十字孔的四个端点处添加 L 形孔径, 我们得到了一种新的图形单元, 如图 3(a) 所示, 以此为周期单元在 X, Y 方向周期排布得到了新单元 FSS 表面, 如图 1 所示. 其中参数设置分别为周期 $D_x = 14 \text{ mm}$, $D_y = 14 \text{ mm}$; 十字臂长 $L = 8 \text{ mm}$, 臂宽 $W = 0.4 \text{ mm}$. 每个 L 孔径宽度与十字臂宽相同, 总长度为 4 mm , 顶点两侧边长 S_1 和 S_2 分别为 2 mm . 边长 S_1 与十字端点的交点为 S_1 的中点.

对新单元进行拆分后周期排布, 得到一种拆分

^{*} 中国科学院国防创新基金(批准号 JCXJJ-149), 中国科学院优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金(批准号 J076231J070)资助的课题.

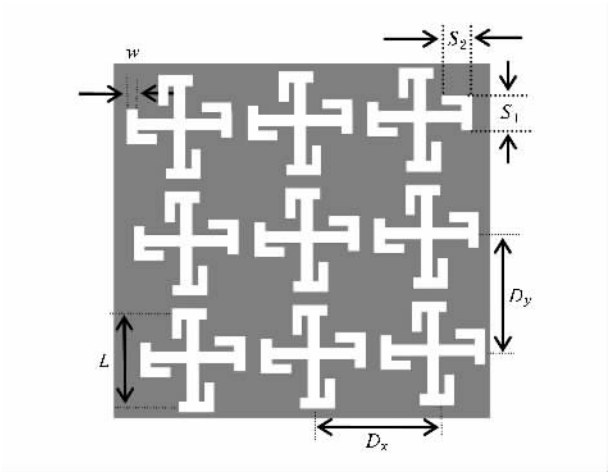


图 1 新单元 FSS

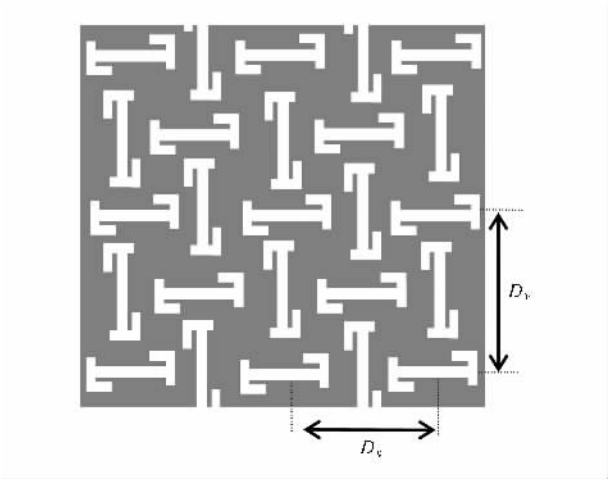


图 2 拆分单元 FSS

单元的 FSS 结构,如图 2 所示.此时,我们可以选取新的周期单元,如图 3(b)所示.两种加载单元 FSS 的参数设置相同.下面的分析中,我们称前者 FSS 结构为结构 1,后者为结构 2.两种 FSS 结构的支撑介

质衬底的厚度均为 0.0254 mm,介电常数为 3,损耗正切值为 0.008.

3. 谱域法分析过程

采用谱域法对于无穷大的自由空间孔径型 FSS 结构进行分析.利用电磁场中的二重性原理,假设 M 是周期孔径由入射场激励起的感应磁流,则 r 点到 r' 的散射场可表示为

$$H^s = -j\omega\epsilon_0 F + \frac{1}{j\omega\mu_0} \nabla (\nabla \cdot F), \quad (1)$$

此时

$$F(r) = \int G(r, r') M(r') dr' = G * M, \quad (2)$$
$$G(r, r') = \frac{e^{-jk_0 |r - r'|}}{4\pi |r - r'|},$$

K_0 是波数, $K_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$,星号代表卷积运算, G 是自由空间格林函数.切向磁场用下标 t 表示,上标 s 和 inc 分别对应散射和入射场.在 FSS 单元孔径表面利用磁场的边界条件 $H_t = H_t^s + H_t^{inc} = 0$,并应用傅里叶变化,可得到单个孔径单元的磁场积分方程的谱域表达式

$$- \begin{bmatrix} H_x^{inc}(x, y) \\ H_y^{inc}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega\mu_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \cdot \tilde{G} \begin{bmatrix} \tilde{M}_x \\ \tilde{M}_y \end{bmatrix} e^{j\alpha x} e^{j\beta y} d\alpha d\beta, \quad (3)$$

当 $k_0^2 > \alpha^2 + \beta^2$ 时,

$$\tilde{G} = \frac{-j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2 - \beta^2}} I,$$

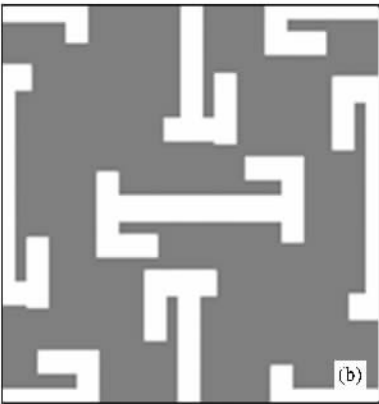


图 3 两种 FSS 结构的周期单元

其他情况下

$$\tilde{G} = \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - k_0^2}} \boldsymbol{I},$$

其中 $\boldsymbol{I}$ 为单位张量.

由于 FSS 是二维周期结构,利用 Floquet 定理可得

$$\begin{aligned} & - \begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x,y) \\ H_y^{\text{inc}}(x,y) \end{bmatrix} \\ &= \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 D_x D_y} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \\ -\alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix} \\ &\cdot \tilde{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{mn}x} e^{j\beta_{mn}y}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\alpha_{mn} = \frac{2m\pi}{D_x} + k_x^{\text{inc}},$$

$$\beta_{mn} = \frac{2n\pi}{D_y \sin\Omega} - \frac{2m\pi}{D_x} \cot\Omega + k_y^{\text{inc}},$$

Ω 是 FSS 两个周期方向的夹角,两种结构中均取 90° .对于有介质加载的情况,只需将自由空间的格林函数换成有介质加载时的格林函数即可^[14].用矩量法求解方程(4),基函数选用 Rooftop 子域基函数,可以求出等效磁流 M ,进而可求出反射和透射

系数.

4. 数值结果与分析

4.1. FSS 结构的角

度稳定性
多数的实际应用中入射角度范围大,因此有必要研究大角度入射时 FSS 结构的频率响应特性.这里我们选取正入射 0° 和 45° 两个入射角度进行研究.图 4 和图 5 分别为结构 1 和结构 2 在 TE 波 0° 和 45° 入射时的频率响应特性曲线.

由图 4,图 5 和表 1 可以明显地看出,对于电磁波不同的入射角度,结构 1 的中心频率都稳定在 10.6 GHz,中心频率具有很好的角度稳定性.结构 2 在 0° 入射情况下,中心频率为 10.8 GHz, 45° 入射时中心频率为 10.6 GHz,与结构 1 的中心频率保持一致,与正入射时中心频率相比漂移量很小,仅为 0.2 GHz.因此结构 2 also 具有很好的角度稳定性.对于 TE 极化的入射电磁波,入射角度越大 FSS 结构的带宽越窄,结构 1, 0° 和 45° 入射情况下 -3 dB 带宽由 1.6 GHz 变窄为 0.9 GHz;结构 2 的 -3 dB 带宽由 3.2 GHz 变窄为 1.8 GHz.

表 1 不同入射角不同极化方式下两种 FSS 结构的频率响应特性

极化方式	入射角/(°)	FSS 结构 1		FSS 结构 2	
		f_0/GHz	$-3\text{ dB 带宽}/\text{GHz}$	f_0/GHz	$-3\text{ dB 带宽}/\text{GHz}$
TE	0	10.6	1.6	10.8	3.2
	45	10.6	0.9	10.6	1.8
TM	45	10.4	1.8	10.8	4

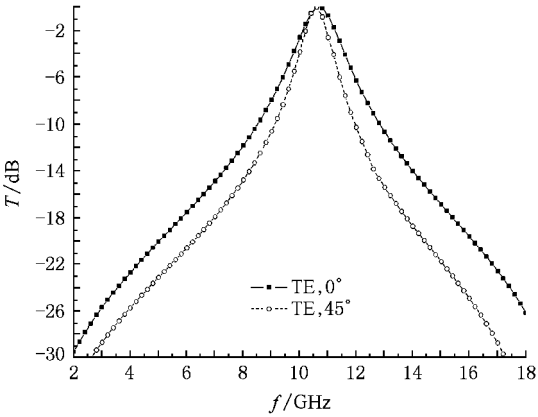


图 4 不同入射角度结构 1 的频率响应特性

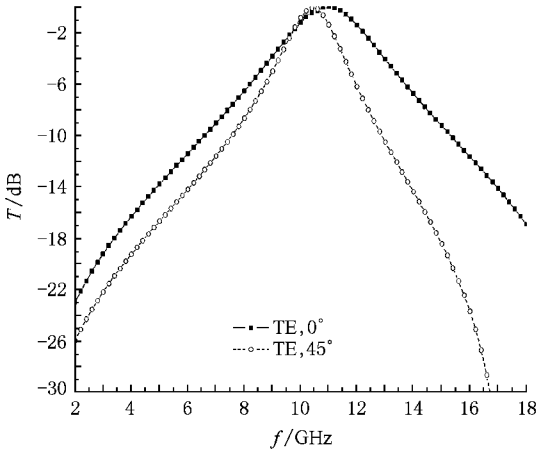


图 5 不同入射角度结构 2 的频率响应特性

4.2. FSS 结构的极化稳定性

在 FSS 的实际工程应用中,很多情况下入射波源的极化方式是未知的,因此有必要对两种 FSS 结构的极化稳定性进行研究.当图形单元为 90°旋转对称单元时,电磁波正入射的情况下,对 TE 与 TM 波的频率响应特性是相同的.两种结构中的单元均为 90°旋转对称单元,因此,正入射情况下两种结构均具有极化稳定特性.FSS 的应用往往涉及曲面,比如隐身雷达罩的设计,此时的入射角度范围很大,在这种情况下我们必须考虑大角度入射情况下结构的极化稳定性.

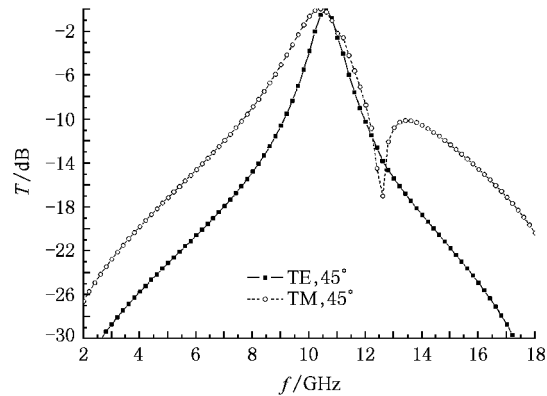


图 6 45°入射结构 1 对不同极化方式的频率响应特性

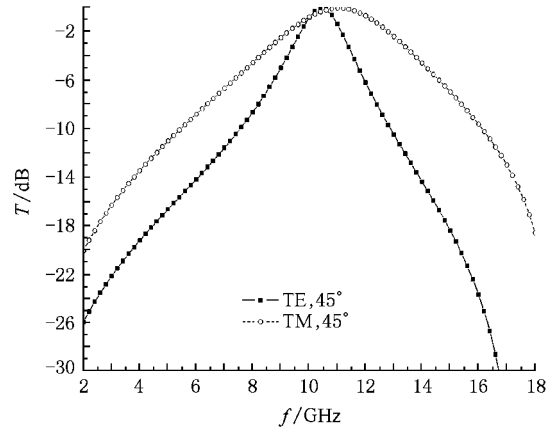


图 7 45°入射结构 2 对不同极化方式的频率响应特性

图 6 和图 7 分别为两个结构在 45°入射时,不同极化方式下的频率响应特性.由两图和表 1 中的数据,我们可以看出,结构 1 在 45°入射时对于 TE 和 TM 两种不同的极化方式,中心频率分别为 10.6 GHz 和 10.4 GHz,中心频率的漂移量仅为 0.2 GHz,大角度入射情况下结构 1 具有很好的极化稳定性能.结

构 2 在 45°入射时对于 TE 和 TM 两种不同的极化方式,中心频率分别为 10.6 GHz 和 10.8 GHz,中心频率的漂移量仅为 0.2 GHz,大角度入射情况下结构 2 同样具有很好的极化稳定性能.

对于相同的入射角度, TM 比 TE 极化能够给出更宽的带宽, 45°入射时,结构 1 在 -3 dB 透过率处的带宽,由 TE 极化的 0.9 GHz 变宽为 TM 极化方式下的 1.8 GHz.结构 2 在 -3 dB 透过率处的带宽,由 TE 极化的 1.8 GHz 变宽为 TM 极化方式下的 4 GHz.

4.3. 两种结构的对比分析

新单元的两种 FSS 结构同时具有很好的角度和极化稳定性能,同时,通过对比分析可以发现两者具有不同的通带带宽.

由表 1 可以看出,与结构 1 相比较 -3 dB 的带宽在 TE 波正入射情况下由原来的 1.6 GHz 增大为 3.2 GHz, TE 波 45°入射时由原来的 0.9 GHz 增大为 1.8 GHz, TM 波 45°入射时由原来的 1.8 GHz 增大为 4 GHz.结构 2 表现出更宽的通带特性.

新单元的拆分几乎没有引起中心频率的变化,只是结构 2 与结构 1 相比,具有更宽的通带带宽.因此,在工程应用中可以根据实际需求选择不同的设计结构.

5. 实验测试

采用镀膜和光刻技术制备了两种 FSS 结构的实验样件,大小为 500 mm × 500 mm,可以认为是无限大周期的 FSS^[15].在微波暗室中对实验样件进行角度稳定性和极化稳定性的实验测试,以验证理论计算结果.测试频段为 8—12 GHz,扫描步长为 0.1 GHz.

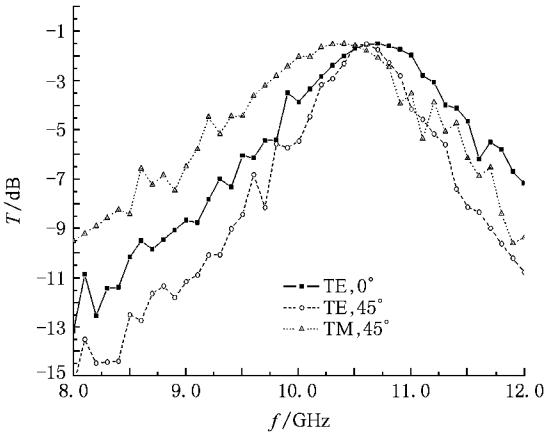


图 8 结构 1 的频率响应测试值

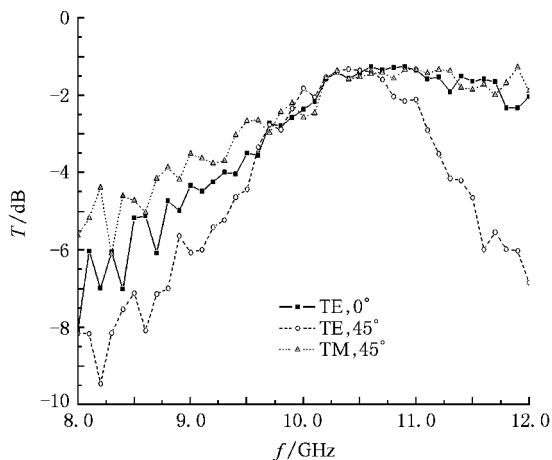


图9 结构2的频率响应测试值

测试时,可以通过转动转台改变电磁波的入射角度,得到 FSS 实验样件在不同入射角度时透过率曲线.电磁波取不同极化方式,测试 FSS 结构的极化稳定性.大角度入射 TE 波与 TM 波的转换,必须通过天线旋转 90° 来实现,以 FSS 屏表面的中垂线为轴线,通过旋转 FSS 屏 90° 的方法,仅能实现正入射时电磁波极化方式的转变.图 8 和图 9 为两种 FSS 结

构实验样件测试结果.

结构 1 的测试结果中,对于 TE 入射电磁波不同的入射角度下,中心频率为 10.6 GHz,在大角度 TM 极化时中心频率为 10.4 GHz,与计算结果完全一致.结构 2 的测试结果 TE 入射电磁波 0° 和 45° 入射时中心频率分别为 10.6 GHz 和 10.4 GHz,大角度 TM 极化时中心频率为 10.7 GHz,漂移量均不超过 0.2 GHz,与理论计算值基本一致.

6. 结 论

入射波的极化方式和入射角度一直是影响 FSS 传输特性的两个重要因素.本文设计了一种新单元 FSS 的两种不同结构.计算结果表明 给出的两种设计结构有很好的频响特性,能够对不同的入射角度和不同角度下不同的极化方式给出稳定的中心频率.同时拆分加载单元 FSS 结构能够给出更宽的传输通带.给出的设计可以满足对不同带宽的要求,并可以应用在很多入射波的极化方式未知或者涉及曲面大角度入射的情况,如无线电通讯以及隐身雷达罩领域,以实现更好的传输特性.

- [1] Jia H Y, Feng X G, Gao J S 2007 *Optics and Precision Engineering* **15** 978 (in Chinese) [贾宏燕、冯晓国、高劲松 2007 光学精密工程 **15** 978]
- [2] He B, Sun L C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 599
- [3] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Meng Q W 2007 *Chinese Optics Letters* **5** 715
- [4] He B, Cong Y L 2006 *Optics and Precision Engineering* **14** 704 (in Chinese) [何 斌、丛玉良 2006 光学精密工程 **14** 704]
- [5] Du X Y, Zheng W H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 571 (in Chinese) [杜晓宇、郑婉华 2008 物理学报 **57** 571]
- [6] Wu B, Wang Q K 2007 *Optics and Precision Engineering* **15** 1208 (in Chinese) [吴 斌、王庆康 2007 光学精密工程 **15** 1208]
- [7] Zhuang F, Shen J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 541 (in Chinese) [庄 飞、沈建其 2007 物理学报 **56** 541]
- [8] Li X Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3193 (in Chinese) [李小秋 2008

物理学报 **57** 3193]

- [9] Lu J 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 219 (in Chinese) [卢 俊 2005 光学精密工程 **13** 219]
- [10] Sun L C 2002 *Electromagnetic Countermeasure* **2** 1 (in Chinese) [孙连春 2002 电子对抗 **2** 1]
- [11] Pelton E L, Munk B A 1974 *IEEE trans. on Antennas Propagat.* **32** 799
- [12] Munk B A 2000 *Frequency selective surface :theory and design* (New York :Wiley)
- [13] Ditti S K, Das S 2005 *Microwave and Optical Technology Letters* **44** 249
- [14] Wu T K 1995 *Frequency selective surface and grid array* (New York : Wiley)
- [15] Chen G R 2000 *Journal of Engineering and Electronics* **11** 11



A novel element of frequency selective surface with stable performance^{*}

Jia Hong-Yan¹⁾²⁾ Gao Jin-Song¹⁾ Feng Xiao-Guo¹⁾ Sun Lian-Chun¹⁾

1) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*Graduate School of Chinese University of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 28 March 2008 ; revised manuscript received 18 May 2008)

Abstract

Frequency selective surface (FSS) composed of a novel element is presented in this paper. The novel element is designed by adding L-shaped slots to the cross aperture at its four ends. By disconnecting the novel element, a corresponding disconnected element FSS is designed. Based on the spectral-domain approach, two FSS structures with the novel element are calculated and analyzed theoretically. The influence on the center frequency for changing angles of TE incidence, polarization of large angle incident waves and the pass band width in the operating frequency band are researched. With filming technology and lithography, two FSS samples are made. The tests are made in the microwave darkroom. The measured curve shows good agreement with the calculated curve. It is shown that the resonant frequency of both FSS structures are angle independent for TE incident waves or polarization independent for large angle incidence. Meanwhile, our disconnected element FSS structure has wider pass band with little change of the resonance frequency.

Keywords : frequency selective surface (FSS), novel element, polarization independence, independence of incident angles

PACC : 7300, 7360

^{*} Project supported by the National Defense Innovation Foundation of CAS (Grant No. CXJJ-149) and the Specialized Research Foundation for the Gainer of Outstanding Doctoral Thesis and Presidential Scholarship of CAS (Grant No. 076231J070).