

· 物理电子学 ·

## AMC用于传输、辐射及散射问题的研究进展

张 泳, 王秉中

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**介绍了人工磁导体用于波导传输、天线辐射和隐身材料的研究进展。通过金属导体和人工磁导体构造虚拟电/磁壁,设计了新型的平行板波导;利用人工磁导体作反射板,可实现低剖面天线系统的设计,并且通过改变极化依赖型人工地板上偶极子的取向,能够获得圆极化辐射特性;通过在人工磁导体上加载合适的电阻,可设计超薄的雷达吸波材料;利用人工磁导体反射相位特性,可设计低RCS的反射屏。

**关键词** 天线; 人工磁导体; 平行板波导; 反射屏

中图分类号 TP92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.011

## Advances on AMC for Transmission, Radiation, and Scattering

ZHANG Yong and WANG Bing-zhong

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** This article introduces the advance on artificial magnetic conductor (AMC) for waveguide transmission, antenna radiation, and stealth materials. A new type of parallel plate waveguide is introduced which combines PEC parallel plates and AMC parallel plates for virtual electric/magnetic walls. The technical merits of this new waveguide are described in detail.

**Key words** antenna; artificial magnetic conductor; parallel plate waveguide; reflection screen

人工磁导体(artificial magnetic conductor, AMC)亦称为高阻面(high impedance surface),是一种对电磁波具有磁壁效应的人工电磁周期结构。文献[1]构造了高阻抗结构表面,在带金属底板的介质基片上刻蚀一定金属结构,从而能在一定频率上显示出同相反射的特性;而普通金属板反射相位与入射相差 $180^\circ$ 。实际上,很多结构都能够表现出磁壁效应,如金属背板的介质表面,只要介质厚度满足 $1/4$ 介质波长即可得到类似的效果。AMC作为一种周期结构,需要足够数量的单元才能表现出显著的磁壁效应。金属类型AMC相对于介质类型AMC,能有效地降低工作频率,实现设计的小型化。金属类型AMC单元尺寸甚至能小于波长的 $1/10$ ,厚度也显著降低。

目前很多学者针对AMC的小型化、多频工作、宽带工作、极化可变及斜入射特性等展开了研究。文献[2]利用单元之间强耦合作用及复杂单元结构,实现AMC单元的小型化设计。文献[3]通过电容加载

实现超小尺寸AMC单元的设计。文献[4]通过遗传优化算法实现AMC单元多频工作。文献[5]通过Mushroom-AMC单元齿化边缘技术实现宽带化设计。文献[6-7]通过非对称AMC单元的设计,实现反射相位随极化变化的特性。文献[8-9]将多折线结构应用于AMC的设计,实现了不同斜入射情况下反射相位的稳定性。

利用人工磁导体的同相反射作用,可以改变已有的微波器件的设计思路和方法,从而得到一些具有特殊性能的器件和结构。根据目前已有的报道,AMC已经被广泛用于电磁波的传输<sup>[10-12]</sup>、辐射<sup>[7,13-25]</sup>及散射<sup>[23-30]</sup>问题的研究中。通过加载合适的AMC结构,能改变波导的边界条件,设计出具有特殊性能的波导结构;将AMC用做天线地板,能有效地降低天线的剖面,并对天线性能加以改善,如提高增益、改善S参数、实现多频工作等;利用AMC的高阻抗特性,加载合适的吸收电阻,可设计出超薄的雷达吸波材料;利用AMC的反射相位特性,可设计出能

收稿日期: 2009-09-22; 修回日期: 2010-03-11

基金项目: 教育部博士点基金(20060614005)

作者简介: 张 泳(1981-),男,博士生,主要从事人工智能材料在辐射、散射问题中的应用等方面的研究。

有效降低目标RCS的反射屏。本文介绍了有关AMC在电磁系统中的一些典型结构和应用。

### 1 AMC在平行板波导传输中的应用

对于普通的金属平行板波导,当两平行板之间的距离小于半波长时,仅能传输TEM波。如果利用理想电壁(PEC)和理想磁壁(PMC)分别构造PEC和PMC平行板波导传输TEM波,由于这两种平板波导的场是互补的,因而在PEC波导中传播的TEM波不能在PMC波导中传播,反之亦然。

文献[12]将PMC波导和PEC波导连接,构造了新的平行板波导模型,波导的横截面如图1a所示。由于两种波导中的TEM波不能在另外的波导中传输,可在两个波导的交界面形成等效的“虚拟电/磁壁(VE/MW)”。根据该原理,研究人员设计了特殊的PMC平行板波导,由PEC和PMC波导交替放置构成,其截面如图1b所示。VEW使PMC波导的TEM波仅在PMC波导中传输,由于虚拟电壁不是理想电壁,因此有一部分场分量要穿透分界面,但场在PMC之外的区域衰减得很快。研究人员用AMC替代PMC制作了平板波导,并连接一个准TEM波波导,如图1c所示。通过测量截面的磁场,有效地验证了虚拟电壁的原理和应用。

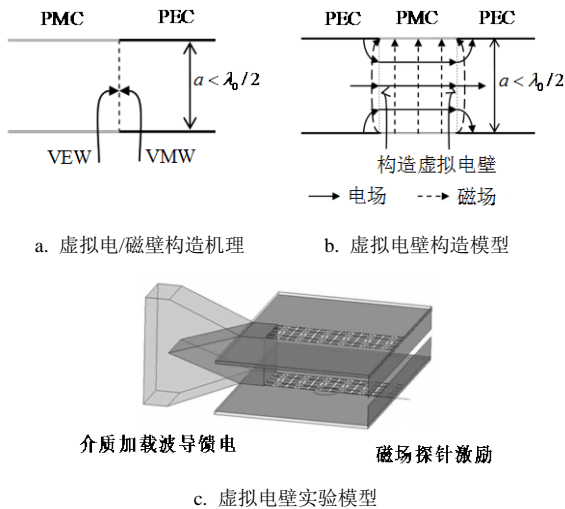


图1 AMC在平行板波导中的应用

这类波导结构的优点在于侧面不需要实际的金属边界,实现了类似金属边界的功能,能降低金属损耗带来的影响,在平面电路中有利于集成或构造矩形波导。但是,由于AMC不是理想的磁壁,工作带宽较窄,且是一种周期性结构,使得在交界面附近并不具有理想的磁壁效应,出现了较小的纵向场分量,因而传输的是准TEM波。

## 2 AMC在天线系统中的应用

### 2.1 AMC用于低剖面天线设计

金属反射面在天线系统中可用来改变天线辐射方向图,提高天线增益;但是在实际使用中,天线和反射面之间必须满足一定的空间位置的要求(一般是1/4自由空间波长),以保证金属反射面的反射波与天线辐射的电磁波同相叠加,从而达到增强辐射的目的。如果采用AMC反射面取代金属反射面,可以利用在特定频率下AMC反射面表面的反射波和天线辐射波同相叠加的特性,有效地降低天线和反射面之间的距离,实现天线的低剖面设计,并使天线的电磁特性得到一定的改善。AMC地板与电偶极子天线平行放置的结构<sup>[13]</sup>如图2a所示,该结构有效降低天线高度,改变天线的辐射方向,使天线向半空间辐射,提高增益。

在上述研究的基础上,文献[13]还研究了以下的应用: 1) 采用反射特性随极化变化的特殊AMC地板,将偶极子天线沿着人工地板的对角放置,利用不同反射分量之间的相位差,使天线能够获得圆极化的辐射特性<sup>[7]</sup>,如图2b所示。2) 利用AMC做天线地板,水平放置多个折叠单极子,通过加载开关控制不同天线的馈电,实现方向图可重构的设计<sup>[14]</sup>,如图2c所示。

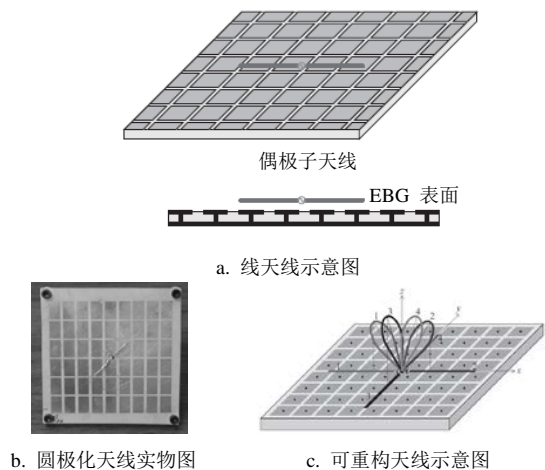


图2 AMC地板用于天线的设计

### 2.2 AMC用于高增益天线设计

Fabry-Pérot(F-P)类型的天线<sup>[16]</sup>是一种新型的高增益天线系统,通过在天线顶部加载高反射特性的覆层材料,并利用金属地板做天线的反射板,可使整个天线系统形成一个类似含激励源的平行板波导,其结构剖面如图3a中左图所示。通过电磁波在腔体内的多次反射,使电磁波通过覆层向外传播,有效地增大了天线系统的辐射口径,从而使天线的

方向性系数得到较大的提高。相比阵列天线,这种天线的馈电系统设计简单,只是剖面有所增加。

上述天线系统要求覆层与金属地板之间的距离满足半波长关系,以保证天线能具有较好的增益。如果采用AMC结构的地板<sup>[15-19]</sup>,剖面如图3a中右图所示,利用AMC同相反射特性,可将覆层和地板之间的距离减小一半,即 $1/4$ 波长。文献[17-18]利用AMC作为天线系统的反射板,普通微带天线作为源天线,有效地激励F-P天线系统,得到了较好的驻波参数和增益结果,如图3b所示。

如果将覆层和地板距离进一步压缩<sup>[22]</sup>,如图3c所示,随着距离的不断减小,使天线与覆层及地板之间的耦合增强,天线的率波瓣宽度将会增加,天线的方向性系数有所降低。辐射特性受到影响,半功率波瓣宽度将会增加,使天线的方向性系数降低。

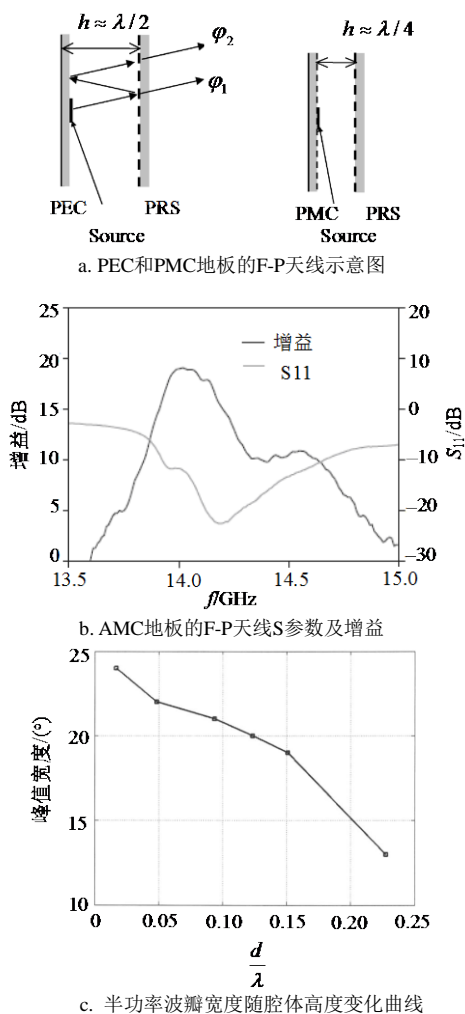


图3 AMC在F-P天线中的应用

目前,这类天线还有很多值得研究的内容,如天线辐射效率的提高、天线的圆极化设计、天线波束的偏转和可调、天线旁瓣的设计和控制等,还可以结合覆层FSS加以整体设计和研究,以期开发出性

能更完善的低剖面、高增益天线系统。

### 3 AMC在散射方面的应用

#### 3.1 AMC在雷达吸波材料设计中的应用

基于Salisbury屏的雷达吸波材料(RAM-radar absorbing material)是一种谐振式雷达吸波材料,它利用材料表面阻抗与自由空间波阻抗在特定频率下匹配的特性,通过在材料上加电阻,达到吸收电磁波的目的。这类结构具有设计思路简单、易于实现等优点,但是材料一般厚度较大,不能满足隐身材料轻薄的要求。文献[23]利用AMC反射面在中心频率附近的高阻抗特性代替传统的Salisbury屏,并在AMC单元之间通过加载电阻吸收电磁波,从而实现隐身材料的设计,其结构如图4a~4b所示。RAM有效地降低了材料的厚度,可实现超薄的设计。但是由于RAM属于谐振式结构材料,AMC同相反射的工作频率很窄,使RAM能有效地吸收电磁波的频带很窄,其反射特性如图4c所示。

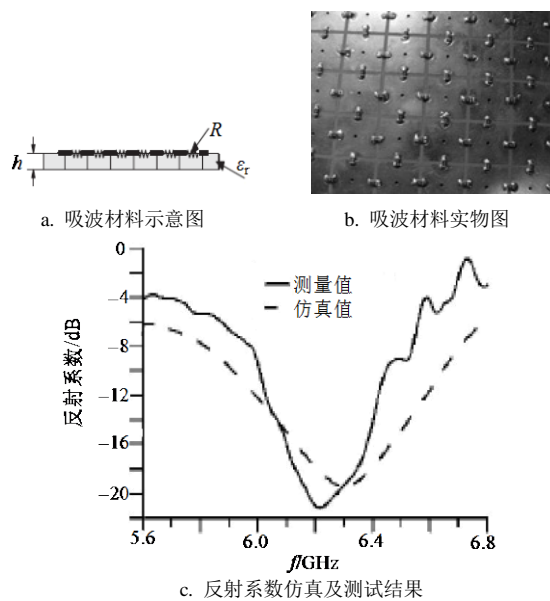


图4 基于AMC的雷达吸波材料的设计

#### 3.2 AMC在低RCS反射屏设计中的应用

##### 3.2.1 AMC-PEC反射屏

文献[27-28]利用AMC和PEC反射面之间相位相差 $180^\circ$ 的特性,使能量在AMC和PEC的交界面附近相互抵消,有效地将能量导引到别的方向,可实现降低目标RCS的目的。该结构利用AMC和PEC反射面棋盘式错落放置而构成,如图5a所示。在电磁波正入射情况下,反射屏的三维RCS方向如图5b所示,能量将主要沿着对角线方向传播。该结构可有效地降低目标的单站RCS,不同频率下单站RCS的降低

结果如图5c所示。这种低RCS的反射屏结构超薄，设计思路简单，可以利用阵列天线原理加以分析。但是由于AMC零相位反射的带宽有限，PEC的反射相位固定，使反射屏的工作带宽受到限制。

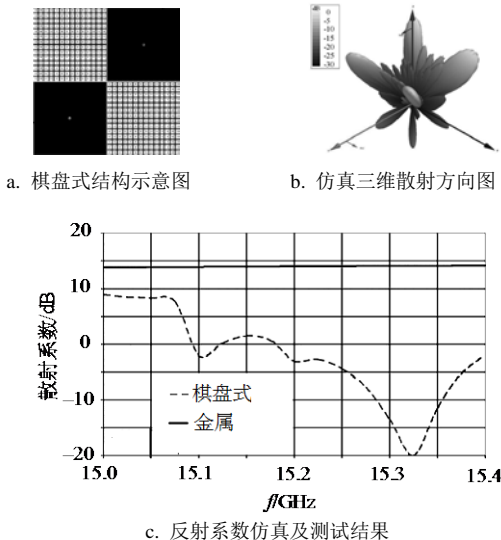


图5 AMC-PEC反射屏的设计及散射特性

### 3.2.2 双AMC反射屏的设计

对于AMC-PEC反射屏的设计，由于PEC的反射相位固定，因此反射屏的有效工作带宽受到AMC的限制。为了展览反射屏的工作带宽，文献[29]利用另外一种AMC反射面替代PEC部分，即在新的设计中，采用两种不同反射相位特性的AMC相结合的方式，其结构如图6a所示。这种结构也是利用不同结构之间的相位差特性，使能量相互抵消，从而实现降低单站RCS的目的。这种结构的特点是可以通过AMC的优化设计，实现AMC之间相位差的设计，展览有效相位差的带宽，从而能在较宽的频带内实现单站RCS的降低，结果如图6b所示。

文献[30]设计了基于双AMC的风扇式结构的反射屏，其基本结构单元如图6c所示。这种结构增加了不同AMC之间的交界面，使能量在更小的范围内相互抵消，更多地向其他方向传播。由图6d可以看出，相比棋盘式结构的能量主要沿4个对角方向传播，风扇式结构的能量能向更多的方向传播，从而进一步降低目标的RCS。但是由于AMC是周期性结构，在中心和边际处，AMC单元的数目都有所减少，因此反射相位特性受到很大的影响，这种风扇式反射屏的有效工作带宽较窄。

在有关低RCS反射屏的研究中，都是基于电磁波正入射情况下的无耗或者低损耗系统，完全通过电磁结构之间相互作用的特性，有效地降低了目标

的RCS。目前，许多学者都在对电磁波斜入射情况下反射屏的散射特性，以及有耗介质和有耗金属的反射屏进行研究。

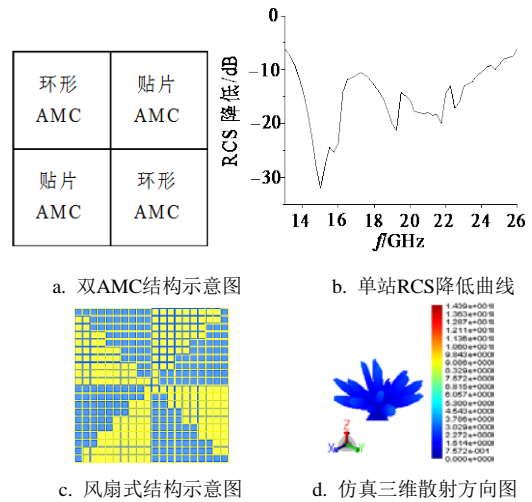


图6 双AMC反射屏的设计及散射特性

## 4 结论

本文就AMC在电磁传输、辐射及散射方面的应用做了较为全面的介绍。AMC所具有的磁壁效应，为微波器件和系统的设计及应用提供了一些新的思路和方法，有效地利用AMC的特性能够设计出一些新型的器件，改善电磁系统的性能。

随着对AMC研究的进一步深入，如有源及无源加载技术、电磁优化方法等应用于AMC设计中，可实现AMC的小型化、可调谐设计。将来，AMC将在传输、辐射及散射方面得到更广泛的应用。

### 参考文献

- [1] SIEVENPIPER D, ZHANG L, BROAS R F J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [2] VARDAXOGLU J C, GOUSETIS G, FERESIDIS A P. Miniaturisation schemes for metallodielectric electromagnetic bandgap structures[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2003, 1(1): 234-239.
- [3] LIU H, FORD K L, LANGLEY R J. Miniaturised artificial magnetic conductor design using lumped reactive components[J]. Electronics Letters, 2009, 45(6): 294-295.
- [4] KERN D J, WERNER D H, MONORCHIO A. The design synthesis of multiband artificial magnetic conductors using high impedance frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1): 8-17.
- [5] 闫敦豹, 高强, 付云起, 等. 改进的宽带人工磁导体结构[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 586-589.

YAN Dun-bao, GAO Qiang, FU Yun-qi, et al. Novel



- improvement of broad band AMC structure[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 586-589.
- [6] YANG F, RAHMAT S Y. Polarization-dependent electromagnetic band gap (PDEBG) structures: design and applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2004, 41(6): 439-444.
- [7] YANG F, RAHMAT S Y. A low profile single dipole antenna radiating circularly polarized waves[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(9): 3083-3086.
- [8] SIMOVSKI C R, MAAGT P, TRETYAKOV S A, et al. Angular stabilisation of resonant frequency of artificial magnetic conductors for TE-incidence[J]. Electronics Letters, 2004, 40(2): 92-93.
- [9] SIMOVSKI C R, MAAGT P, MELCHAKOVA I V. High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(3): 908-914.
- [10] YANG F R, MA K P, QIAN Y X, et al. A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic band-gap (UC-PBG) structure[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory Technology, 1999, 47(11): 2092-2098.
- [11] CHANG C C, QIAN Y X, ITOH T. Analysis and applications of uniplanar compact photonic bandgap structures[J]. Electromagnetics Research, 2003, 4: 211-235.
- [12] LI D C, BOONE F, BOZZI M, et al. Concept of virtual electric/magnetic walls and its realization with artificial magnetic conductor technique[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(11): 743-745.
- [13] YANG F, RAHMAT S Y. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(10): 2691-2703.
- [14] YANG F, RAHMAT S Y. Bent monopole antennas on EBG ground plane with reconfigurable radiation patterns[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Los Angeles, USA: IEEE, 2004: 1819-1822.
- [15] ZHANG Y, HAGEN J V, YOUNIS M. Planar artificial magnetic conductors and patch antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(10): 2704-2712.
- [16] FERESIDIS A P, VARDAXOGLU J C. High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces[J]. IEE Proceeding Microwave, Antennas and Propagation, 2001, 148(6): 345-350.
- [17] WANG S, FERESIDIS A P, GOUSSETIS G, et al. Low-profile resonant cavity antenna with artificial magnetic conductor ground plane[J]. Electronics Letters, 2004, 40(7): 405-406.
- [18] FERESIDIS A P, GOUSSETIS G, WANG S, et al. Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1): 209-215.
- [19] GALLINA I, DELLA V A, GALDI V, et al. Aperiodic-tiling-based mushroom type high-impedance surfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008: 54-57.
- [20] FOROOZESH A, SHAFAI L. Effects of artificial magnetic conductors in the design of low-profile high-gain planar antennas with high-permittivity dielectric superstrate[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009: 10-13.
- [21] PIRHADI A, HAKKAK M, KESHMIRI F, et al. Design of compact dual band high directive electromagnetic bandgap (EBG) resonator antenna using artificial magnetic conductor[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(6): 1682-1690.
- [22] OURIR A, LUSTRAC A, LOURTIOZ J M. All-metamaterial-based subwavelength cavities ( $\lambda/60$ ) for ultrathin directive antennas[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88: 084103.
- [23] GAO Qiang, YIN Yan, YAN Dun-bao, et al. Application of metamaterials to ultra-thin radar-absorbing material design[J]. Electronics Letters, 2005, 41(17): 936-937.
- [24] SIMMS S, FUSCO V. Tunable thin radar absorber using artificial magnetic ground plane with variable backplane[J]. Electronics Letters, 2006, 42(21): 1197-1198.
- [25] LI You-quan, FU Yun-qi, YUAN Nai-chang. Characteristics estimation for high impedance surfaces based ultra-thin radar absorber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(7): 1175-1178.
- [26] COSTA F, MOMORCHIO A, MANARA G. Ultra-thin absorbers by using high impedance surfaces with resistive frequency selective surfaces[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu, USA: IEEE, 2007: 861-864.
- [27] IRUARTE J C, PAQUAY M, EDERRA I, et al. Combination of AMC and PEC cells for RCS applications[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu, USA: IEEE, 2007: 866-868.
- [28] PAQUAY M, IRUARTE J C, EDERRA I, et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(12): 3630-3638.
- [29] ZHANG Yong, MITTRA R, WANG Bing-zhong, et al. AMCs for ultra-thin and broadband RAM design[J]. Electronics Letters, 2009, 45(10): 484-485.
- [30] ZHANG Yong, MITTRA R, WANG Bing-zhong. A novel design for low-RCS screens using a combination of dual-amc patches[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Charleston, USA: IEEE, 2009.