

人工磁导体在超近反导系统中的应用*

王 泉, 谭 渊, 杨 勇, 袁乃昌

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对坦克超近程主动防护雷达系统中的收发天线隔离问题,分析了由周期结构光子晶体高阻表面形成的人工磁导体(AMC)的等效模型,给出了其反射系数与相移的关系。由于其对电磁波表现出来的吸收和产生相移的特点,提出一种利用光子晶体高阻表面代替传统隔条来提高天线隔离度的新方法。实验结果证明,该方法能使得收发天线在200MHz的带宽达到-80dB以下的隔离度,满足系统要求,并且结构简单、成本低,具有很大的应用价值。

关键词:宽带隔离;人工磁导体;超近反导

中图分类号:TP316 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2012)01-0123-04

Application of AMC on small very-near radar detecting system

WANG Quan, TAN Yuan, YANG Yong, YUAN Naichang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, china)

Abstract: To solve the isolation problem of transmitting-receiving antenna in very-near anti-missile system, this research analyzed the equivalent model of AMC, which is made of high-impedance electromagnetic surface, and shows the relationship between its reflectance and phase offset. Then a novel method was put forward to improve the isolation by the AMC and the experiments show that the method is able to make the isolation reach -80dB in a 200MHz band. So it has a good application value because of its simple structure and low cost.

Key words: wide-band isolation; AMC (Artificial Magnetic Conductor); very-near anti-missile

超近反导系统必须具有小型化、灵敏度高以及反应时间短的特点。在小型化超近程雷达探测系统中,由于收发天线相距很近,互耦很强,如果不采取有力措施,无论是空间耦合还是表面绕射的影响,收发天线之间的隔离度都将会非常差,严重的话会使得接收机饱和而无法工作。文献[1-3]等中提出利用交叉极化的方法,就是发射天线水平极化,接收天线垂直极化,这种方法确实能有效地提高收发隔离,然而其必须要求被探测目标的极化纯度足够差才行,否则,虽然收发隔离改善了,目标的回波信号强度也相应地降低了。另外,文献[4]中还提出发射天线左旋圆极化,接收天线右旋圆极化,由于左旋圆极化的连续被经过目标反射后变成了右旋圆极化,这样既能提高收发天线的隔离度,同时还可以保证回波信号的程度不被减弱。但是对于小型化雷达而言,制作圆极化天线的难度较大,而且由于圆极化可以分解为水平极化和垂直极化,因此其提高隔离度的效

果也是有限的。

由于雷达工作在伪码调制的连续波体制,因此可以利用发射天线到接收天线的多路径,通过调整其中一个路径电磁波的幅度和相位,使得最终到达接收天线的某个频带的耦合信号相互抵消形成零点,从而在此频带内得到很好的隔离效果。但是其工作带宽大约为100MHz,单靠抵消无法形成宽带的隔离,因此引入电阻加载的周期结构高阻表面材料,也称人工磁导体,能够使得入射电磁波同时表现出被吸收和相移的现象,因此被广泛应用于飞机隐身或者其他吸波材料中^[5],本文也正是利用其这种性能来提高隔离度的。

1 人工磁导体的等效电路模型

1.1 Salisbury屏的反射系数

Salisbury屏^[6-8]是一种最简单最古老的吸收体,它是一种谐振式吸收体,由损耗层和隔离层组成,对入射的电磁波有吸收作用,其反射系数可以

* 收稿日期:2011-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60871069);国家部委基金资助项目(413220404)

作者简介:王泉(1984—),男,安徽淮南人,博士研究生,E-mail:hipods@163.com;

袁乃昌(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yuannaichang@163.com

表示为

$$R_2 = \frac{(1 + R_1)(1 - \beta_1) - Y_1(1 - R_1)}{(1 + R_1)(1 + \beta_1) + Y_1(1 - R_1)} \quad (1)$$

其中 R_1 为损耗层的反射系数, β_1 为损耗层的电导纳。可以看出, 要使得 Salisbury 屏的反射系数 R_2 为零, 必须要满足以下条件:

(1) $\beta_1 = 1$: 又称为匹配条件, 意味着损耗层的电导纳和真空电导纳相等, 这可以通过选择合适的电损耗材料来实现。

(2) $R_1 = 1$: 具有这种反射特性的材料称为理想导磁面。自然界中不存在理想磁导面, 但可以通过在金属表面上制备周期结构来获得这种特性。这种具有周期结构的金属表面在某些频率上呈现理想导磁面的特性, 这便是前面提到的人工磁导体。

1.2 人工磁导体的特性分析和结构

当一个平面波垂直照射在理想导体 (PEC) 上时, 反射系数 $\Gamma = -1$, 即发生全反射, 并且反射波与入射波相比会出现 180° 的相移。理想导体的电磁对偶是理想磁导体 (PMC), 根据电磁对偶原理, 它的反射系数应该为 $\Gamma = 1$, 这意味着, 反射波的相位与入射波相比没有相位差。在传输线理论中, 这两种反射情况分别对应“短路”和“开路”。PEC 在绝大多数的情况下可以近似由导电性能优良的金属来代替, 但是到目前为止, 在自然界中还没有找到物理上存在的 PMC。

高阻电磁表面和 UC-PBG 结构 (统称为谐振型微波光子晶体) 都具有同相反射的特点, 在其等效并联 LC 电路的谐振频率上, 可以满足 PMC 的反射条件: $\Gamma = 1$ 。此时, 谐振型微波光子晶体结构可以等效看作是 PMC。虽然这种结构在物理上并不是真正意义上的理想磁导体, 但是在某一频率上会表现出与 PMC 相同的特性, 因此满足这一特性的谐振型微波光子晶体被称作人工磁导体。

反射相位随频率在 $\pm 180^\circ$ 之间变化, $\pm 90^\circ$ 之间为高阻范围。在谐振频率上, 谐振型微波光子晶体的复反射系数与 PMC 相同, 说明此时它具有与 PMC 相同的边界条件。而在谐振频率附近, 它同样可以近似满足 PMC 的边界条件, 从而形成 AMC。由于 PMC 是 PEC 的电磁对偶结构, 所以 PMC 的特性与 PEC 是对偶的。首先, 与 PEC 平行的电流和它的镜像电流是反相的, 而 PMC 的平行镜像电流与原电流是同相的, 这就允许使用 PMC 作为天线的反射面, 而这种反射面可以距离天线很近, 做出低剖面天线。第二, PEC 的表面

阻抗很低, 而 PMC 可以提供高阻表面条件。第三, 在电磁场作用下, PEC 上存在表面电流, 而 PMC 不支持表面电流。对于 PEC 来说, 界面上的切向电场 $E_t = 0$, 而切向磁场 H_t 不为零。通过电磁对偶条件, PMC 的边界条件是表面的切向磁场 $H_t = 0$, 而切向电场 E_t 不为零。由于表面电流密度可以表示为 $\mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}$, 这里, $\hat{\mathbf{n}}$ 是垂直于界面的单位矢量, 很明显, PEC 支持表面电流而 PMC 不支持。

图 1 显示了用高阻表面和贴片集中电阻构成电磁吸收结构, 金属贴片 (图 1 中的 1) 通过过孔 (图 1 中的 2) 与金属底板 (图 1 中的 5) 连接, 介质基板 (图 1 中的 4) 厚度为 h , 相对介电常数为 ϵ_r , 贴片之间有集中电阻 $2R$ (图 1 中的 3)。

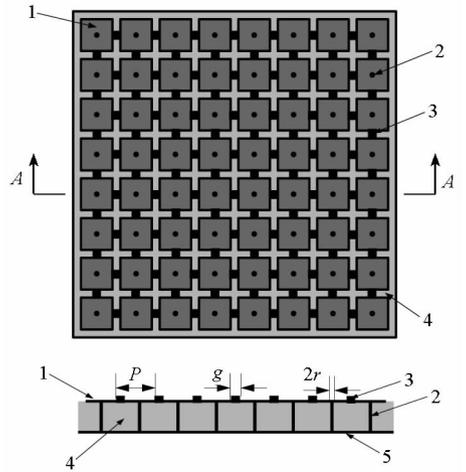


图 1 人工磁导体的结构示意图
Fig. 1 The structure of AMC

1.3 等效电路模型

图 2 是等效电路, L 、 C 为高阻表面的等效电感、电容。这种结构单层 Salisbury 屏是大致相同的, 只是用高阻表面代替了隔离层; 将高阻表面放在待屏蔽目标上, 损耗层在高阻表面上。

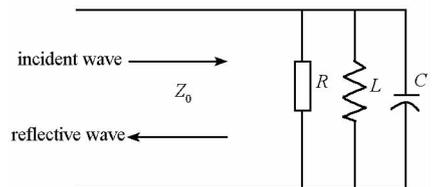


图 2 AMC 的等效电路模型
Fig. 2 The equal circuit model of AMC

不考虑高阻表面的损耗, 电磁波在高阻表面上的反射系数可以表示为

$$R_1 = \exp(j\varphi) \quad (2)$$

其中 φ 为高阻表面的反射相位。随入射波频率在 $(-\pi, \pi)$ 内连续变化。将式 (2) 代入式 (1), 为了方便计算, 取 $\beta = 1$, 损耗层与高阻表面之间

隔实际为 0,则式(1)中表征隔离层归一化导纳的 $Y=1$,可得

$$R_2 = \frac{-(1 - R_1)}{2(1 + R_1) + (1 - R_1)} \quad (3)$$

易求得

$$\frac{1}{R_2} = -1 - j \frac{2}{\tan(\varphi/2)} \quad (4)$$

则此 Salisbury 屏的功率反射系数为

$$R_p = |R_2|^2 = \frac{\tan^2(\varphi/2)}{4 + \tan^2(\varphi/2)} \quad (5)$$

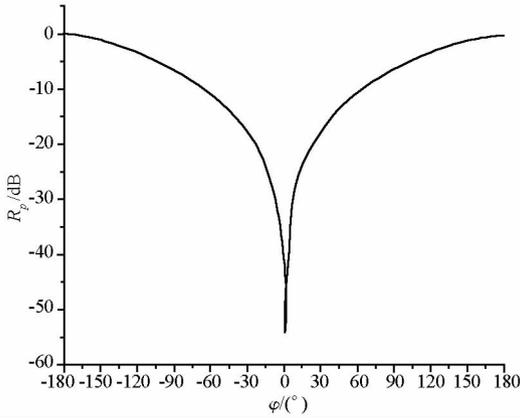


图 3 功率反射系数随高阻表面反射相位的变化

Fig. 3 The relationship between φ and R_p

R_p 随 φ 的变化曲线如图 3 所示。图 3 表明,在 $\varphi=0$ 处有强烈的吸收;随 $|\varphi|$ 增大,吸收性能降低。由于高阻表面的反射相位 φ 是入射电磁波频率 ω 的非线性函数,可以预测,如果能够在 一个频带内实现小的反射相位,则在该频带内可以实现对电磁波的有效吸收。

2 人工磁导体在雷达天线隔离中的运用

采用金属隔条在天线隔离中被认为是一种传统方法,然而由于其表面波的存在,许多雷达设计者们试图通过减小这种表面绕射波来增强隔离度,文献[9]中提出了利用光子晶体的高阻表面特性来减少表面波的传播,从而达到隔离的目的。但是,从光子晶体高阻表面的等效电路可以看出,它只是电容和电感的并联谐振,而没有吸收性元件电阻。因此也不能实现宽带的隔离效果。因此,如何在 不影响天线方向图的情况下同时减少空间耦合和吸收表面波传播是彻底解决隔离度问题的关键。

由上节的分析以及式(5)可以知道,由人工磁导体构成的 Salisbury 屏在改变电磁波相位的同时吸收电磁波,由此我们可以将其用于雷达系统的收发天线之间,如图 4 所示。发射天线辐射的电磁波可以有 多条路径耦合到接收天线,其中主

要的两个路径可以理解成空间辐射波和金属表面电流引起的绕射波,通过调整表面路径的电磁波幅度和相位使得在接收机产生对消零点。最主要的是 AMC 材料在设计频带内表现出来对电磁波的强烈吸收,使得耦合至接收机的电磁波大大减少,从而达到提高隔离度的目的。

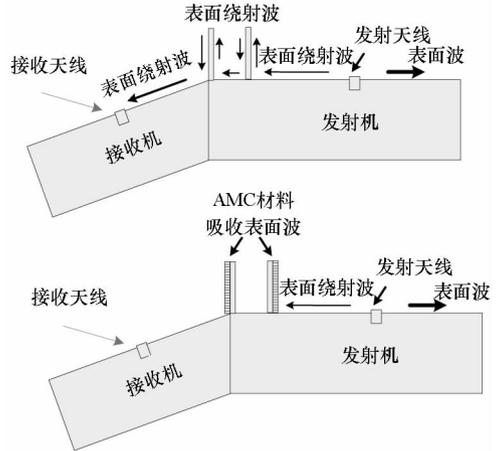


图 4 基于 AMC 结构隔离器示意图

Fig. 4 The principle of isolation

3 实验结果

实际加工的人工磁导体和其在暗室测量的安装位置如图 5 所示。首先将信号发生器连接至发射天线的馈电端口,并将接收天线的馈电端口连接到频谱仪;打开信号发生器的射频通道,由于是在微波暗室中进行测量,电磁波的空间反射可以忽略不计,因此从频谱仪上得到的信号可以认为是从发射天线耦合至接收天线的;然后分别比较加装人工磁导体和不加装人工磁导体的结果如图 6 所示。其具体参数为:介质基板的厚度为 2mm,相对介电常数为 2.65,周期结构单元边长是 3.94mm,单元之间缝隙宽度为 0.5mm,过孔半径为 0.4mm,加载电阻值为 650Ω。

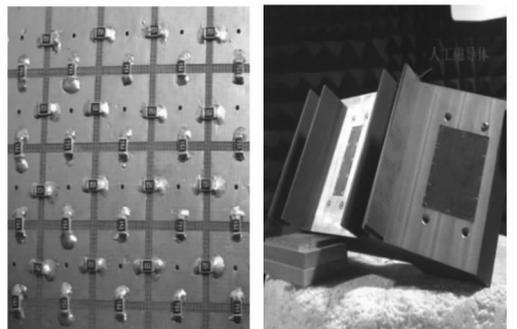


图 5 人工磁导体及其安装位置

Fig. 5 The photo of AMC and its location

图 6 所示的两条测量曲线分别代表加载相同高度金属隔板对隔离度的影响和加载人工磁导体

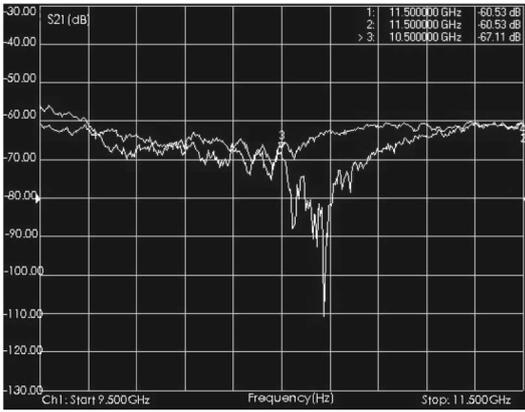


图 6 等高度金属隔条和人工磁导体对隔离度影响对比

Fig. 6 Comparison of isolation between two different structures

对隔离度的影响。明显可以看出,在没有形成对消零点的频带,由于金属隔板的遮挡作用,其隔离效果基本相仿。但是在设计形成强烈吸收和对消零点的频带,该方法能在 200MHz 所需频带内改善隔离度 15~20dB。

4 结 论

本文详细分析人工磁导体的等效电路模型,并将其运用在小型化雷达系统的收发天线之间,提出了一种加载人工磁导体来强烈吸收表面波的新型天线隔离方法,实验结果表明,该方法能在特定频带内对多路径耦合的电磁波形成强烈吸收,达到很好的隔离效果,并且该方法结果简单,成本低,因此在工程应用上具有非常广阔的前景。

参考文献 (References)

[1] Chung Y K, Jeon S S, Dal A, et al. High isolation dual-polarized patch antenna using integrated defected ground

structure [J]. IEEE Microwave and Wireless Components letters, 2004, 14(1): 4-6.

- [2] Hesselbarth J. Dual-linear polarised antenna module with enhanced transmit-receive isolation [J]. Electronics Letters, 2007, 43(4): 25-26.
- [3] 梁仙灵,钟顺时,汪伟. 高隔离度双极化微带天线直线阵的设计[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 554-556.
LIANG Xianling, ZHONG Shunshi, WANG Wei. Design of high isolated dual-polarized microstrip line array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 554-556. (in Chinese)
- [4] Liang C H, Liu Z L, Zhang Y. New theory of isolation between antennas[C]// IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC technologies for Wireless Communications Proceedings, 2005, 0-7803-9128: 285-288.
- [5] Harmutl H F. On the effects of absorbing materials on electromagnetic waves with large relative band width[J]. IEEE Trans. EMC, 1983.
- [6] 郑秋容. 微波光子晶体带隙特性及其在天线中的应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
ZHENG Qiu rong. Bandgap characteristic of microwave photonic crystal and its application in antenna[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] Sievenpiper D, Zhang L J, Romulo F, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, 1999, 47: 2059-2074.
- [8] McCormack M T, Fante R L. Reflection properties of the salisbury screen[J]. IEEE trans. on Antenna and Propagation, 1988, 36: 1443-1454.
- [9] 吕波,郑秋容,袁乃昌. 一种改善雷达收发隔离的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1595-1597.
LV Bo, ZHENG Qiu rong, YUAN Naichang. Novel method to improve radar transmit-receive isolation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(8): 1595-1597. (in Chinese)