

双六边形环电路模拟吸波材料及其等效电路模型*

于家傲¹, 彭世蕤¹, 刘立国², 李有权¹

(1. 空军预警学院 信息对抗系, 湖北 武汉 430019; 2. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430019)

摘要:提出以双六边形环为单元结构的电路模拟吸波材料。根据单元的双频特性建立等效电路模型, 根据六边形环周期分布规律提出等效周期概念, 给出等效分布电参数的计算方法。利用该模型对双六边形环电路模拟吸波材料的结构进行参数分析, 并与 HFSS 全波分析结果进行对比, 验证该方法的准确性。加工样品和实测, 结果发现所设计吸波材料在 1.9 ~ 8.9 GHz 频段内对正入射波具有良好的吸波特性, 实测结果与等效电路模型仿真结果吻合较好, 进一步验证了该方法的有效性。

关键词:电路模拟吸波材料; 双六边形环; 等效电路模型

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2019)03-153-06

Circuit analog absorber with double hexagonal loops and its equivalent circuit model

YU Jiaao¹, PENG Shirui¹, LIU Liguo², LI Youquan¹

(1. Department of Information Warfare, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

2. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430019, China)

Abstract: A circuit analog absorber with double hexagonal loops units was proposed. An equivalent circuit model was established according to the dual-frequency characteristics of the units. The equivalent period concept was proposed by analyzing the periodic distribution of the units, and the extraction of distribution electrical parameters was given. The structural parameters were simulated and analyzed with the proposed method, the simulated results were in agreement with the results given by HFSS software, and the accuracy was verified. Finally, a sample was fabricated and measured. The measured results show good broadband absorption in 1.9 ~ 8.9 GHz for normal incidence, and the accuracy of the proposed method is verified further.

Keywords: circuit analog absorber; double hexagonal loops; equivalent circuit model

基于周期结构的电路模拟 (Circuit Analog, CA) 吸波材料通过损耗性周期结构上的反射波与金属背板上的反射波相互干涉抵消, 实现了吸波效果。该材料具有设计简单、成本低、可靠性高、吸波特性控制灵活等特点, 在射频通信领域发挥重要作用, 在武器隐身、提高天线性能及电磁兼容领域都有广泛应用^[1]。针对周期结构 CA 吸波材料的主要分析方法有近似分析方法和全波分析方法^[2-5]。其中全波分析方法计算精度高、通用性强, 但消耗的计算成本更多, 尤其在初始阶段反复调节和优化结构参数时, 这一问题更加突显。近似分析方法中的等效电路方法 (Equivalent Circuit Method, ECM) 通过分析 CA 吸波材料的谐振特性, 利用 LC 等效电路模型对其进行模拟, 具有快速方便的特点, 从电路层面较好地诠释了其吸波

机理。

在 20 世纪 80 年代, Langley 等给出了计算较复杂结构 (如环形、双环形、十字形、耶路撒冷形) 的计算公式^[4-7]。近年来, 随着全波仿真软件计算效能的提升, 全波分析结果为等效电路 LC 参数的提取提供了更多数据支撑, 特别在处理复杂多层频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) 结构时更具优势, 但其模糊了物理尺寸与分布电参数的直接关系^[8-10]。文献 [11-12] 通过采用电阻加载 FSS 结构提出了具有宽频带隐身性能的天线罩。文献 [13] 通过分析双方环 CA 吸波材料的 ECM 模型, 优化其上层 FSS 结构的阻抗虚部并与后端空气层、金属背板的阻抗虚部相匹配, 实现了具有三谐振特性的宽带吸波材料。文献 [14] 基于具有损耗特性的高介电常数基板和

* 收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61601492)

作者简介: 于家傲 (1989—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, E-mail: yujiaao123@126.com;

彭世蕤 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: pss99@21.cn.com

六边形环周期结构实现了三频点吸波效果,但没有实现宽带吸波特性。

本文研究提出了一种以双六边形环为单元的电路模拟吸波材料,并根据其双频谐振特性建立了 ECM 模型,给出了 RLC 参数计算方法。

1 双六边形环 CA 吸波材料的 ECM 模型

1.1 等效电路模型

双六边形环 CA 吸波材料由电阻加载的周期结构、空气层和金属板组成,其结构如图 1 所示。单元由外环和内环组成,分布在周期为 p 的六边形点阵上。周期单元印制于相对介电常数为 ϵ_r 、厚度为 t_1 的薄介质 FR4 板材上。外环和内环的外接圆半径分别为 d_1 、 d_2 ,线宽分别为 s_1 、 s_2 ,外环之间距离为 g_1 ,内外环间距为 g_2 ,内外环加载的电阻值分别为 R_1 、 R_2 。

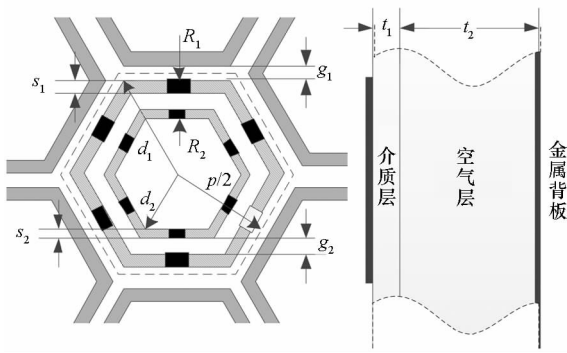


图 1 双六边形环 CA 吸波材料结构
Fig. 1 Geometry of double hexagonal loops CA absorbing material

根据双六边形环结构的双频谐振特性^[11],建立了 CA 吸波材料的 ECM 模型,如图 2 所示,其中 L_{n1} 、 L_{n2} 为 CA 吸波材料的等效电感, C_{n1} 、 C_{n2} 为等效电容, R_{n1} 、 R_{n2} 为等效电阻。 Y_0 为空气特性导纳, Y_{in} 为从正入射波方向看入的特性导纳, Y_{CA} 为电阻加载双六边形环形成的导纳, Y_d 为介质层、空气层、金属板构成反射背腔形成的导纳, $Y_1 = Y_{0\sqrt{\epsilon_r}}$ 为介质层形成的导纳。

$$Y_{in} = Y_{CA} + Y_d \quad (1)$$

式中,

$$Y_{CA} = \left(j\omega L_{n1} + \frac{1}{j\omega C_{n1}} + R_{n1} \right)^{-1} + \left(j\omega L_{n2} + \frac{1}{j\omega C_{n2}} + R_{n2} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$Y_d = j \frac{Y_1 [Y_1 \tan(\beta_2 t_2) - Y_0 \cot(\beta_1 t_1)]}{Y_1 + Y_0 \cot(\beta_1 t_1) \tan(\beta_2 t_2)} \quad (3)$$

$\beta_1 = 2\pi/\lambda$ 和 $\beta_2 = 2\pi\sqrt{\epsilon_r}/\lambda$ 分别为空气层和介质层中的波数。

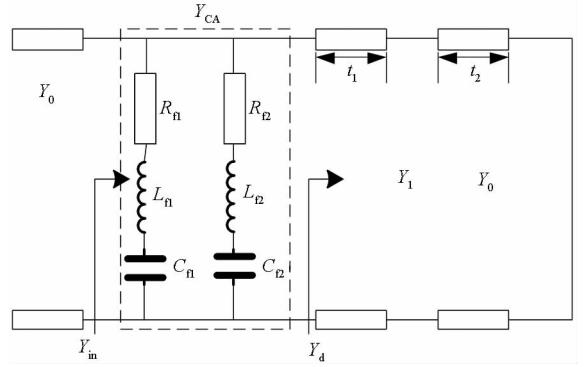


图 2 双六边形环 CA 吸波材料等效电路模型
Fig. 2 ECM model of double hexagon loops CA absorbing material

1.2 等效分布周期

文献[7]中给出了双方环 FSS 的 LC 参数的提取方法,但由于六边形环周期分布比方环周期分布更为密集,用该方法无法建立适合双六边形环 CA 吸波材料的 ECM 模型。因此通过二维 Fourier 变换比较两种点阵在谱域上的特点,进而提出等效周期概念来改进所提 CA 吸波材料的 LC 参数计算方法。

周期为 p_{sq} 的方形点阵函数为

$$n_{sq}(x, y) = \sum_u \sum_v [\delta(x - p_{sq}u) + \delta(y - p_{sq}v)] \quad (4)$$

式中: u, v 为整数,则 $n_{sq}(x, y)$ 的二维 Fourier 级数和表示如式(5)所示,其中 s 为单个周期的积分域。

$$n_{sq}(u, v) = \frac{1}{p_{sq}^2} \sum_u \sum_v c_{uv} \exp\left(j2\pi u \frac{x}{p} + j2\pi v \frac{y}{p}\right) \quad (5)$$

$$c_{uv} = \iint_s n(x, y) \exp\left(-j2\pi u \frac{x}{p} - j2\pi v \frac{y}{p}\right) ds \quad (6)$$

双六边形环分布规律是周期为 p_{hex} 的正三角形点阵,可表示为

$$n_{hex}(x, y) = \sum_{u'} \sum_{v'} \left[\delta\left(x - \frac{\sqrt{3}}{2} p_{hex} u'\right) + \delta\left(y - \frac{1}{2} p_{hex} v'\right) \right] \quad (7)$$

式中: u', v' 为整数,且 $u' + v' = 2n, n$ 也为整数。其二维 Fourier 级数和表示为

$$n_{hex}(u', v') = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{1}{p_{hex}^2} \sum_{u'} \sum_{v'} c_{u'v'} \exp\left(j2\pi u' \frac{x}{\sqrt{3}p} + j2\pi v' \frac{y}{p}\right) \quad (8)$$

$$c_{u'v'} = \iint_{s'} n_{\text{hex}}(x, y) \exp\left(-j2\pi u' \frac{x}{\sqrt{3}p} - j2\pi v' \frac{y}{p}\right) ds \quad (9)$$

比较式(5)和式(8),点阵分布函数通过 Fourier 级数变换,方形点阵和六边形点阵函数在谱域上存在一个明显的比例系数关系,而其他项皆为表示周期性的级数形式。因此,提出一种等效周期参数 p_{eff} ,并定义其值为

$$\frac{1}{p_{\text{eff}}^2} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{1}{p_{\text{hex}}^2} \quad (10)$$

$$p_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p_{\text{hex}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p \quad (11)$$

1.3 RLC 参数计算

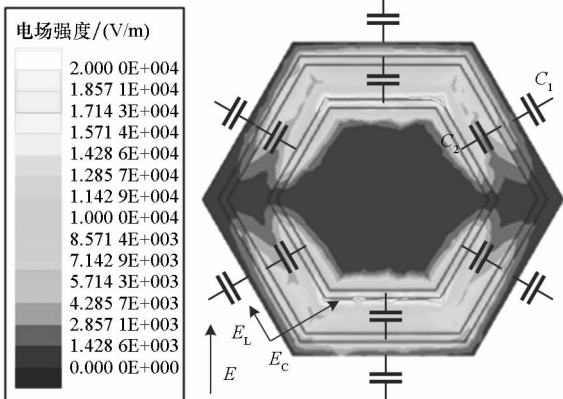
为进一步分析其等效电容电感的分布特性,仿真分析了正入射波条件下双六边形环 CA 吸波材料的分布电参数,其中电场和等效的分布电容如图 3(a)所示,面电流和等效的分布电感如图 3(b)所示, E 为入射波电场方向。入射波电场平行于环线的分量 E_L ,在六边形环线上形成了等效电感 L_1, L_2 ;入射波电场垂直于环线的分量 E_C ,在六边形环线之间形成了等效电容 C_1, C_2 。可以看出,双六边形环分布结构在环与环之间激发了较强的电场分布,可近似作为等效电容分布;在环上激发了较强的电流分布,可近似作为等效电感分布。

因此,引入等效周期参数 p_{eff} ,修正 LC 参数的计算方法,即可得到适合双六边形环 CA 吸波结构的 ECM 模型相关参数,其计算公式为

$$L_{\text{fl}} = L_1 = \frac{1}{Y_0 \omega} \frac{d_1}{p_{\text{eff}}} F(p_{\text{eff}}, s_1, \lambda) \quad (12)$$

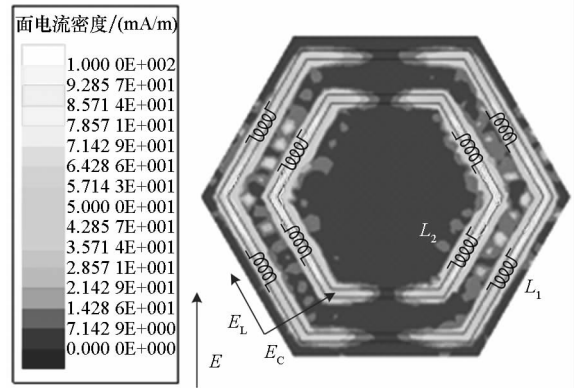
$$L_{\text{r2}} = L_2 = \frac{1}{Y_0 \omega} \frac{d_2}{p_{\text{eff}}} F(p_{\text{eff}}, s_2, \lambda) \quad (13)$$

$$C_{\text{fl}} = C_1 \quad (14)$$



(a) 电场及等效电容分布

(a) Electric field distribution and distributed capacitance



(b) 面电流及等效电感分布

(b) Surface current distribution and distributed inductor

图3 正入射波激励下的分布电参数

Fig. 3 Distributed parameters excited by normal incidence

$$C_{\text{r2}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (15)$$

$$R_{\text{fl}} = R_1 p_{\text{eff}} / d_1 \quad (16)$$

$$R_{\text{r2}} = R_2 p_{\text{eff}} / d_2 \quad (17)$$

其中,

$$C_1 = \frac{Y_0}{\omega} \frac{8d_1}{p_{\text{eff}}} \varepsilon_{\text{eff}} F(p_{\text{eff}}, g_1, \lambda) \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{Y_0}{\omega} \frac{8d_2}{p_{\text{eff}}} \varepsilon_{\text{eff}} F(p_{\text{eff}}, g_2, \lambda) \quad (19)$$

$$F(p_{\text{eff}}, g, \lambda) = \frac{p_{\text{eff}}}{\lambda} \cos\theta \left[\ln\left(\csc \frac{\pi g}{2p_{\text{eff}}}\right) + G(p_{\text{eff}}, g, \lambda) \right] \quad (20)$$

当入射波频率为 f_0 时, $\omega = 2\pi f_0$, $\lambda = c/f_0$; θ 为电磁波的入射角; $G(p_{\text{eff}}, g, \lambda)$ 是修正函数^[9];薄介质层的等效介电常数^[10]为

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_r + (\varepsilon_r - 1) \left[\frac{-1}{\exp^N(x)} \right] \quad (21)$$

考虑双金属环周期结构的影响,取 $x = 0.1$, $N = 2$ 。

在所提模型中 Y_d 的虚部和 Y_{CA} 的虚部特性曲线如图 4 所示,当 Y_{CA} 的虚部与 Y_d 的虚部相加为近似 0 时,材料整体呈现较强的吸波特性。通过设计双六边形环的结构尺寸和空气层的厚度可以使 Y_{CA} 与 Y_d 在较宽的频段内实现虚部匹配,从而产生宽带吸波特性。

2 仿真及实测结果比较

设置双六边形环 CA 吸波材料的主要尺寸参数值为 $p = 15\sqrt{3}$ mm, $d_1 = 13.5$ mm, $s_1 = 0.5$ mm, $d_2 = 7$ mm, $s_2 = 0.5$ mm, $\varepsilon_r = 2.2$, $t_1 = 0.5$ mm, $t_2 = 12.7$ mm。对六边形环尺寸、分布周期、空气层厚度、加载的集总电阻值进行参数分析。同时使用 HFSS 软件对该结构进行全波分析,验证不同参数

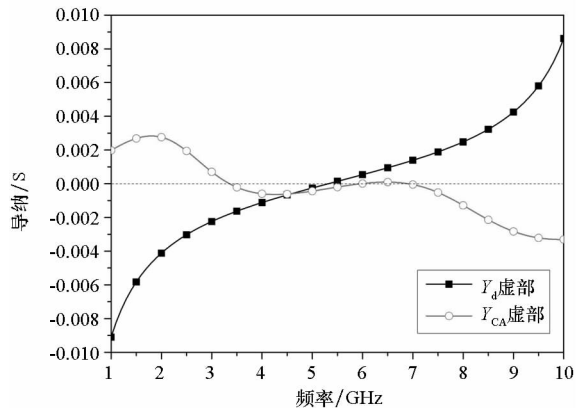


图 4 Y_d 、 Y_{CA} 虚部仿真曲线

Fig. 4 Simulation of the imag of Y_d and Y_{CA}

条件下 ECM 模型的有效性。为了便于与实测结果相对比,仿真中采用 ECM 的反射系数平方 $|Γ|^2$ 作为衡量其吸波性能指标。

2.1 六边形环尺寸 d_1 和 d_2

六边形环外环尺寸 d_1 取 12 mm、14 mm,内环尺寸 d_2 取 6 mm、8 mm,通过计算得到 ECM 模型中等效电容、电感见表 1,仿真结果与全波分析软件 HFSS 全波分析结果进行比较,如图 5 所示。可以看出,内外环尺寸对吸波带宽和吸波性能具有较明显的影响,其中内环尺寸主要影响高频吸波特性,外环尺寸主要影响低频吸波特性。ECM 仿真结果与 HFSS 全波分析结果吻合较好,有效地反映了相应参数变化对吸波性能的影响。

表 1 不同 d_1 、 d_2 尺寸下 ECM 模型中等效电容电感

Tab. 1 Equivalent capacitance and inductor in ECM model with different sizes of d_1 and d_2

尺寸参数/mm		等效电容/pF		等效电感/ μ H	
d_1	d_2	C_{n1}	C_{n2}	L_{n1}	L_{n2}
12	6	0.161	0.040	7.983	3.992
14	6	0.400	0.043	9.314	3.992
12	8	0.161	0.063	7.983	5.322
14	8	0.400	0.073	9.314	5.322

2.2 六边形环分布周期 p

六边形环周期 p 分别取 $14\sqrt{3}$ mm、 $15\sqrt{3}$ mm、 $16\sqrt{3}$ mm。计算得到 ECM 模型中的 RLC 参数见表 2,仿真结果与 HFSS 全波分析结果比较,如图 6 所示。可以看出,ECM 仿真结果与 HFSS 全波分析结果相吻合,当 p 变大时,吸波材料在低频处的吸波性能变好,但总体吸波频段变窄。

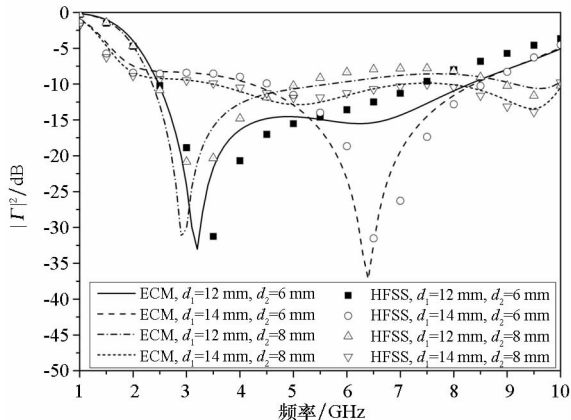


图 5 尺寸参数 d_1 、 d_2 对吸波性能的影响

Fig. 5 Absorbing property with different d_1 、 d_2

表 2 不同分布周期 p 下 ECM 中等效电容电感

Tab. 2 Equivalent capacitance and inductor in ECM model with different distribution period of p

p /mm	等效电容/pF		等效电感/ μ H	
	C_{n1}	C_{n2}	L_{n1}	L_{n2}
$14\sqrt{3}$	0.498	0.605	8.751	4.537
$15\sqrt{3}$	0.310	0.056	8.982	4.657
$16\sqrt{3}$	0.230	0.052	9.207	4.774

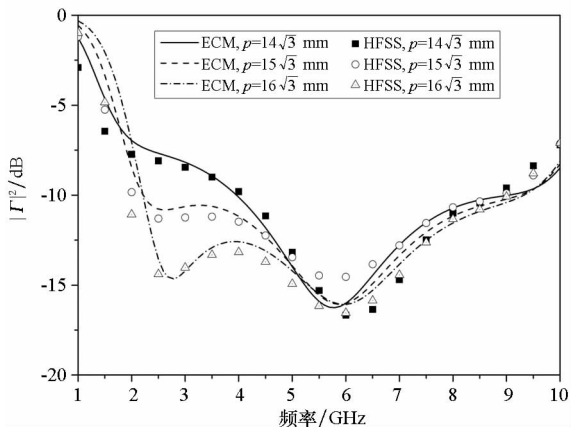


图 6 分布周期 p 对吸波性能的影响

Fig. 6 Absorbing property with different p

2.3 空气层厚度 t_2

空气层厚度 t_2 分别取 10 mm、12 mm、14 mm、16 mm。由于六边形环结构未改变,则 LC 参数不随 t_2 变化,其值分别为 $C_{n1} = 0.310$ pF, $C_{n2} = 0.056$ pF, $L_{n1} = 8.982$ μ H, $L_{n2} = 4.657$ μ H。所提模型仿真结果与 HFSS 全波分析结果相吻合,如图 7 所示,随着 t_2 值的增加,吸波段向低频移动,且吸波频段变窄。

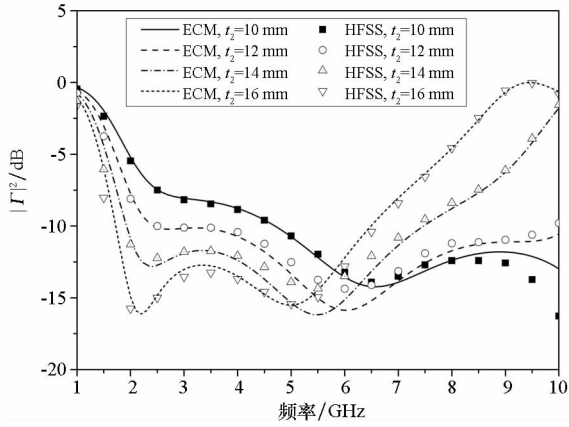


图7 空气层厚度 t_2 对吸波性能的影响

Fig. 7 Absorbing property with different t_2

2.4 加载电阻值 R_1 和 R_2

集总电阻值 R_1 取 160 Ω 、200 Ω , R_2 取 80 Ω 、120 Ω 。所提模型的仿真结果与 HFSS 全波分析结果如图 8 所示,由于金属环结构和点阵分布规律不变,ECM 中的 LC 参数不随 R_1 、 R_2 改变,所提模型的仿真结果与 HFSS 全波分析结果相一致。当电阻值 R_1 、 R_2 减小时,虽然吸波频段展宽但性能变差;当电阻值 R_1 、 R_2 增加时,吸波频段变窄,吸波性能提高。当频率较高时,集总电阻中的寄生电容变大,从而影响其在高频范围计算准确性。

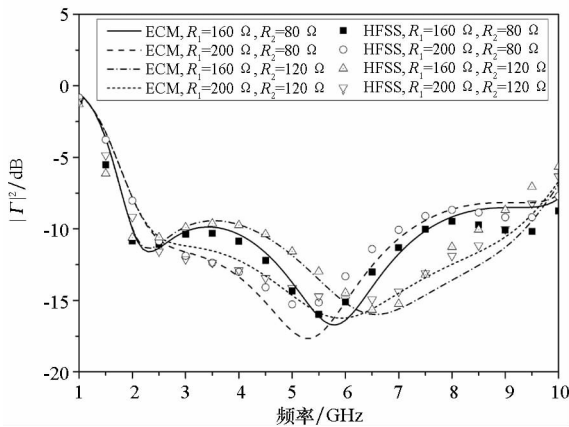


图8 集总电阻阻值对吸波性能的影响

Fig. 8 Absorbing property with different resistor

3 样品加工与测试

选择尺寸为 300 mm \times 300 mm 的 FR4 介质基板、介电常数为 2.2、损耗正切 $\tan\sigma = 0.003$ 加工了实物样品,如图 9 所示。印制有限周期的双六边形环结构板材,其在 x 轴方向交错排列 13 个单元,在 y 轴方向排列 11 个单元。

参考 GJB 2038A - 2011,在正入射条件下,测量相同尺寸的 CA 吸波材料与金属背板的雷达反

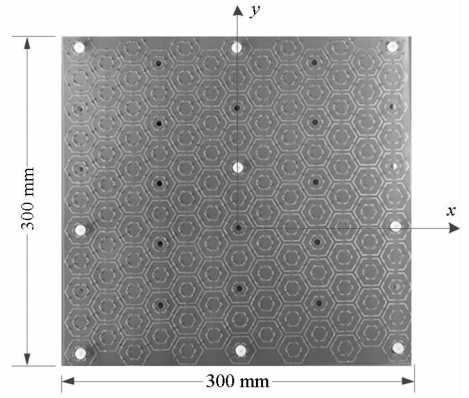


图9 双六边形环 CA 吸波材料样品

Fig. 9 Sample of double hexagonal loops CA absorbing material

射截面积之比来衡量其吸波性能。ECM 模型、HFSS 全波分析和实物测量得到的结果如图 10 所示,所设计材料在 1.9 ~ 8.9 GHz 频段内对正入射波具有 -10 dB 的吸波特性,仿真结果和实测结果的误差主要由有限周期的周期截断造成。

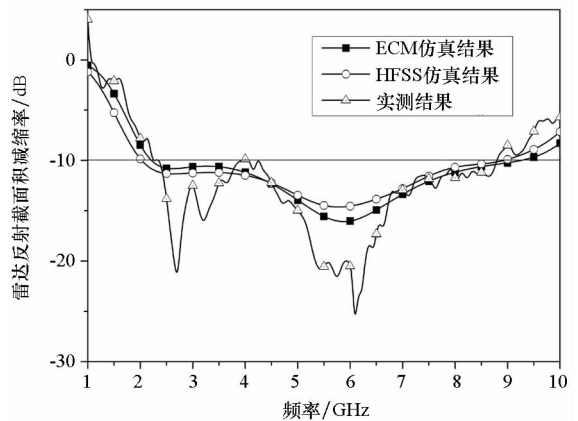


图10 ECM、HFSS 仿真与实测结果比较

Fig. 10 Comparisons between ECM, HFSS simulation results and measured results

4 结论

本文提出了一种以双六边形环为单元的 CA 吸波材料和其对应的 ECM 模型;提出了等效周期参数 p_{eff} ,给出了 ECM 模型中 RLC 参数计算方法;参数分析了结构尺寸对所提 CA 吸波材料性能的影响。仿真结果与 HFSS 全波分析结果相一致,验证了该方法的适用性和准确性。最后,设计了一款宽带 CA 吸波材料样品并进行测量,其在 1.9 ~ 8.9 GHz 频段内对正入射波具有 -10 dB 的宽带吸波特性,实测结果与仿真结果吻合较好,进一步验证了所提方法的有效性。所提方法对宽带雷达吸波材料具有参考意义。

参考文献 (References)

- [1] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design [M]. USA: John Wiley & Sons, 2005: 1–46.
- [2] Joozdani M Z, Amirhosseini M K, Abdolali A. Wideband radar cross-section reduction of patch array antenna with miniaturised hexagonal loop frequency selective surface [J]. Electronics Letters, 2016, 52(9): 767–768.
- [3] Ruvio G, Leone G, Mattiello F. Analysis and characterization of finite-size curved frequency selective surfaces [J]. Studies in Engineering & Technology, 2015, 2(1): 9–21.
- [4] Costa F, Monorchio A, Manara G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(5): 1551–1558.
- [5] Langley R J, Parker E A. Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit [J]. Electronics Letters, 1983, 19(17): 675–677.
- [6] Mittra R, Pelletti C, Tsitsas N L, et al. A new technique for efficient and accurate analysis of FSSs, EBGs and metamaterials [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2012, 54(4): 1108–1116.
- [7] Silva M W B, Kretly L C. An efficient method based on equivalent-circuit modeling for analysis of frequency selective surfaces [C]//Proceedings of the Microwave & Optoelectronics Conference, 2013.
- [8] 王秀芝, 高劲松, 徐念喜. 利用等效电路模型快速分析加载载集总元件的微型化频率选择表面 [J]. 物理学报, 2013, 62(20): 421–425.
- [9] Han Y, Che W Q, Christopoulos C, et al. A fast and efficient design method for circuit analog absorbers consisting of resistive square-loop arrays [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(3): 747–757.
- [10] Costa F, Monorchio A, Manara G. Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(4): 35–48.
- [11] Yang J, Shen Z X. A thin and broadband absorber using double-square loops [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6(11): 388–391.
- [12] Luo X F, Teo P T, Qing A, et al. Design of double-square-loop frequency-selective surfaces using differential evolution strategy coupled with equivalent-circuit model [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005, 44(2): 159–162.
- [13] Shang Y P, Shen Z X, Xiao S Q. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(12): 6022–6029.
- [14] Sudhendra C, Ramkumar M A, Rao K A R K. Design, analysis, and implementation of space cloth based on hexagonal resistor grid network of planar resistors [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017, 27(11): 986–988.
- [9] WANG Xiuzhi, GAO Jinsong, XU Nianxi. Quick analysis of miniaturized-element frequency selective surface that loaded with lumped elements by using an equivalent circuit model [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 421–425. (in Chinese)
- [10] Costa F, Monorchio A, Manara G. Efficient analysis of frequency-selective surfaces by a simple equivalent-circuit model [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(4): 35–48.
- [11] Yang J, Shen Z X. A thin and broadband absorber using double-square loops [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6(11): 388–391.
- [12] Luo X F, Teo P T, Qing A, et al. Design of double-square-loop frequency-selective surfaces using differential evolution strategy coupled with equivalent-circuit model [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005, 44(2): 159–162.
- [13] Shang Y P, Shen Z X, Xiao S Q. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(12): 6022–6029.
- [14] Sudhendra C, Ramkumar M A, Rao K A R K. Design, analysis, and implementation of space cloth based on hexagonal resistor grid network of planar resistors [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017, 27(11): 986–988.
- (上接第 6 页)
- [6] Blair W D, Brandt-Pearce M. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2011, 37(4): 452–469.
- [7] Blair W D. Monopulse processing for tracking unresolved targets [M]. Dahlgren Division Naval Surface Warfare Center, 1997.
- [8] Glass J D, Blair W D. Detection of unresolved Rayleigh targets using adjacent bins [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2016.
- [9] Sinha A, Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2002, 38(1): 183–203.
- [10] Stoica P, Nehorai A. Performance study of conditional and unconditional direction of arrival estimation [J]. IEEE Transaction on Acoustics Speech and Signal Processing, 1990, 38(10): 1783–1795.
- [11] White W D. Double null technique for low angle tracking [J]. Microwave Journal, 1976(19): 35–38.
- [12] 徐振海, 熊子源, 宋聃, 等. 阵列雷达双零点单脉冲低角跟踪算法 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(1): 130–135.
- [13] XU Zhenhai, XIONG Ziyuan, SONG Dan, et al. Double-null monopulse low-angle tracking algorithm with array radar [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(1): 130–135. (in Chinese)
- [13] Wu J N, Xu Z H, Xiong Z Y, et al. Resolution of multiple unresolved targets via dual monopulse with array radar [C]//Proceedings of European Radar Conference, 2014.
- [14] Haykin S S, Litva J, Shepherd T J. Radar array processing [M]. Germany: Springer-Verlag, 1993: 73–74.
- [15] Nickel U. Application of superresolution for radar: example, problems and solutions [C]//Proceedings of 21st European Signal Processing Conference, 2015.
- [16] Nickel U. Overview of generalized monopulse estimation [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2006, 21(6): 27–56.
- [17] Nickel U. Superresolution using an active antenna array [C]//Proceedings of the International Conference, 1982: 87–91.
- [18] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 159–161.
- [19] WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, et al. Theory and algorithm of spatial spectrum estimation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 159–161. (in Chinese)
- [19] 粟塔山. 最优化计算原理与算法程序设计 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003: 55–59.
- [19] SU Tashan. Principle and algorithm program design of optimization calculation [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003: 55–59. (in Chinese)