

缝隙阵列的时域溅射特性研究

侯海健^{1,2}, 李大伟³, 王均宏^{1,2}

(1. 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044;
3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 时域溅射, 是散射体结构不同部分产生的散射回波在远场叠加时, 其时域波形在开始部分出现的不稳定的现象. 对于低散射目标, 只有在回波叠加稳定后, 其散射电场的幅度才变得很低, 而在开始的几个电波周期内会有比较强的散射电场. 本文对缝隙阵列的时域溅射特性进行研究, 采用周期边界时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 算法对不同尺寸的缝隙阵列的时域溅射特性进行了仿真, 提取了其等效电路参数, 并采用等效电路法分析了缝隙宽度引起的并联电容对正弦波时域溅射和高斯脉冲时域散射特性的影响. 分析结果发现: 当并联电容降低的时候, 时域反射系数的包络值下降速度增加, 导致溅射现象的最大值降低. 理论结果得到了实验验证.

关键词: 时域散射; 时域有限差分算法; 频率选择性表面; 雷达散射截面

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)08-2030-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.08.032

Study on the Time Domain Sputtering Effect and Scattering of Slot Arrays of Different Sizes

HOU Hai-jian^{1,2}, LI Da-wei³, WANG Jun-hong^{1,2}

(1. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of MOE, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Time domain sputtering effect is the phenomenon that the time domain scattering waveform is large and unstable at the beginning when the scatterings from different parts of the scatterer are overlapped in the far field. For low RCS targets, the amplitudes of the total scattering decreases only after the scatterings from different parts are overlapped and stabilized. And there is a relatively strong total scattering in the beginning. In this paper, the time domain sputtering characteristics of slot arrays with different sizes are studied and simulated by finite-difference time domain algorithm. The equivalent circuit parameters are extracted by the equivalent circuit method. The effects of parallel capacitances caused by widths of the slots on sine wave time-domain sputtering and Gaussian pulse time-domain characteristics are analyzed by the equivalent circuit method. The results show that when the parallel capacitance decrease, the decrease rate of the envelope value of the time domain reflection coefficient increase, which leads to the decrease of the maximum value of the sputtering effect. The theoretical results have been verified by experiments.

Key words: time domain scattering; finite-difference time domain algorithm (FDTD); frequency selective surface (FSS); radar cross section (RCS)

1 引言

频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) 是由谐振单元按一定顺序排列而构成的单层或者多层的周期性结构, 谐振频率与其单元几何形状和排布方式

等有关, 在其谐振频率内, 会呈现全反射或者全透射的特性, 因此频率选择表面被用来设计成为雷达罩, 或者与吸波材料结合用来减小散射^[1-5]. 缝隙阵列作为频率选择表面的一种, 具有很好的带通特性, 在其谐振频带内, 具有良好的透射作用, 因此其带内具有很好的低散

射特性. 但经过研究发现, 频域定义的低 RCS 是正弦波作用于物体达到稳定后由电场幅度计算的, 而当调制正弦波刚接触到物体时, 其时域散射回波的起始部分的电场比稳定后的电场幅度值高很多, 这一现象称为时域溅射现象^[6-8]. 我们之前针对带 EBG 结构的微带天线的时域溅射效应^[8]、缝隙阵列的时域溅射效应进行了深入的研究^[6], 并且提出了用并联电容电感等效缝隙阵列单元的等效电路模型, 分析时域溅射特性的思路. 本文将重点研究这种等效电路模型中的并联电容对缝隙阵列的时域散射特性的影响, 包括对调制正弦信号和高斯脉冲信号入射情况下的时域散射特性的研究, 应用时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 算法对结构进行仿真^[9], 并通过曲线拟合提取等效电路参数, 讨论等效电路中并联电容对时域反射系数曲线的影响和对时域溅射特性的影响.

2 理论分析

2.1 缝隙阵列结构

缝隙阵列模型如图 1 所示, 单元长度 py 为 45mm, 宽度 px 为 20mm, 缝隙的宽度为 w , 长度为 d . 缝隙阵列的谐振频率与并联电容和电感有关, 并联电容和并联电感与缝隙尺寸关系近似形式^[10] 如式(1), 式(2). 本文通过调节缝隙的长度和宽度, 使得所用的缝隙阵列的谐振频率相同均为 5.36GHz. 本文中所指的谐振频率为缝隙阵的后向 RCS 幅度值最低点, 通过 FDTD 仿真软件仿真后, 由式(3) 计算得出^[6]:

$$C_s \approx \varepsilon_0 L(t+W)/W \quad (1)$$

$$L_s \approx \mu_0 LW/[\pi^2(t+W)] \quad (2)$$

$$RCS = 10 \log(4\pi \frac{|rE^s|^2}{|E^i|^2}) \quad (3)$$

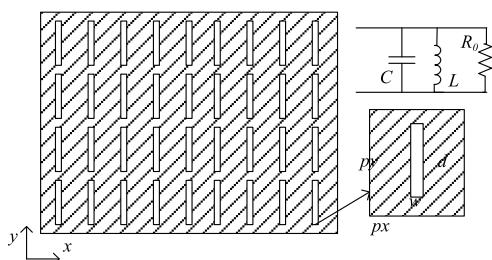


图1 缝隙阵列结构图和等效电路图

2.2 等效电路参数

图 1 所示的缝隙阵列模型中, 缝隙阵列单元等效电路可表示为电容和电感的并联, 等效电路图如图 1 所示, 单元缝隙的等效导纳为^[6]:

$$Y = Y_L + Y_C + Y_0 \quad (4)$$

其中 Y_L 等于 $1/j\omega L$, Y_C 等于 $j\omega C$, Y_0 为空气中的波导纳 $1/(120\pi)$, Z_0 为自由空间波阻抗, 则反射系数为^[6]:

$$\Gamma = \frac{Y_0 - Y}{Y_0 + Y} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)中, 可以计算出反射系数 Γ 随频率变化情况, 再通过逆傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform; IFFT), 得到反射系数 Γ 随时间的变化, 如下式^[6]:

$$\Gamma(t) = F^{-1}(\Gamma) \quad (6)$$

缝隙阵列的后向散射电场, 可以近似表示为从正向入射的电场和缝隙阵列的整体反射系数 $\Gamma(t)$ 在时域上做卷积^[6]:

$$E^s(t) = \int \Gamma(\tau) \times E^i(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

入射信号 E^i 在本文中采用分段函数表示:

$$E^i = \begin{cases} \sin(2\pi f_0 t) \times \exp(-g^2(t-t_0)^2), & (0 < t < t_0) \\ \sin(2\pi f_0 t) & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $g^2 = (4\pi)/a^2$, $t_0 = 0.8a$, $a = 2/f_{\text{gauss}}$, f_{gauss} 为 1GHz, f_{gauss} 与入射信号的上升沿有关, 随着 f_{gauss} 的升高, 入射信号的上升沿越来越陡峭, f_0 为缝隙阵列结构的谐振频率. 本文中, 缝隙阵列分布在 xy 面上, 电磁波由 z 轴方向入射, 电磁波在 $z = \text{常数}$ 的平面上, 个点空间相位相等, 以此确保入射波为平面波. 缝隙阵列的整体反射系数 $\Gamma(t)$ 可以通过式(4)~式(6) 计算得出.

当缝隙的宽度 w 为 1mm, 长度 d 为 29mm, 并且单元长度 px 为 20mm, py 为 45mm 时, 提取出电容 C 和电感 L , C 为 0.7cF, 电感 L 为 1.26nH, 谐振频率为 5.36GHz. 并联电感和并联电容是利用 FDTD 算出的反射电磁波和电路方法算出的反射电磁波进行曲线拟合得到. 在等效电路方法中, 入射电磁波并不是传统的正弦波, 而是正弦波作为入射波, 利用等效电流等效磁流积分到远场得出的波形. 通过式(4)~式(6) 计算得到的时域反射系数如图 2 中红色线所示, 可以近似看成是由曲线的包络与余弦函数的乘积构成. 图 2 中黑色线表示的是包络与谐振频率 f_0 的余弦函数乘积得到的拟合曲线, 拟合曲线和原曲线基本吻合.

由图 3 可以得到, 处于谐振频率上的电磁波 E^i 正入射到尺寸不同、但谐振频率相同的缝隙阵列上时, 后向散射电场的特性与时域反射系数的包络有关, 并联电容是通过影响时域反射系数的包络来影响后向时域散射电场的.

3 并联电容对时域溅射特性的影响

3.1 仿真结果及分析

为了研究不同尺寸、相同谐振频率的缝隙阵列反射系数的时域特性, 谐振频率 f_0 为 5.36GHz, f_{gauss} 为 1GHz 的调制电磁波入射到不同尺寸缝隙阵列结构上的

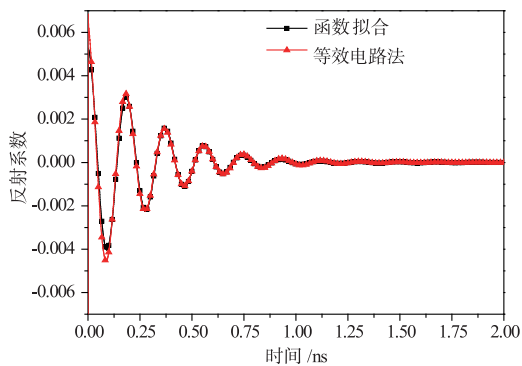


图2 反射系数的时域特性曲线

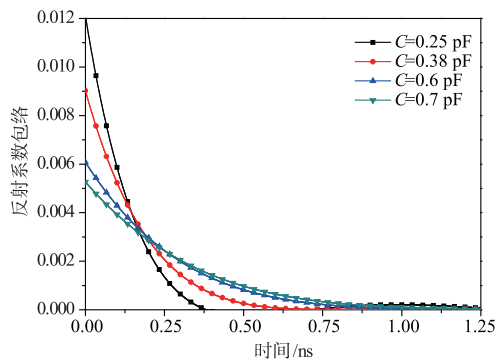


图3 不同尺寸缝隙阵列反射系数包络分布

时候,得到的反射系数时域包络分布如图3所示,时域后向散射电场如图4所示.其中不同缝隙阵列的结构参数如表格1所示,缝隙阵列的并联电容大小与缝隙的尺寸有关,并联电感的大小由并联电容和谐振频率共同决定.

表格1 不同缝隙阵列结构参数

缝隙宽度/mm	1	2	4	6
缝隙长度/mm	29	30	32	34
并联电容/pF	0.7	0.6	0.38	0.25
并联电感/nH	1.26	1.47	2.34	3.53

从时域反射系数的包络分布可以看出,随着并联电容的减小,曲线的最大值增加;并联电容的减小,反射系数的包络减小速率增加.从后向时域散射电场可以看出,随着并联电容的减小,溅射现象的最大值减小.从图4中可以看出,随着并联电容的增加,溅射现象的最大值增加,但溅射效应持续时间基本相同.这是因为溅射效应的持续时间由入射波的上升沿和反射系数减小到接近0的时间共同作用.虽然随着并联电容的增加,反射系数减小的速度降低,但是入射波的上升沿比这个时间更长,以至于在图4中的溅射效应持续时间几乎相同.

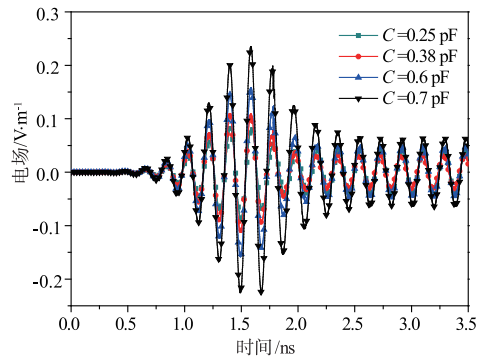


图4 不同尺寸缝隙阵列时域溅射特性曲线

3.2 测试结果及分析

时域溅射现象测试环境如图5所示,发射和接收天线为标准的增益喇叭天线,分别接在信号源和时域示波器上,缝隙阵列放在同一平面的低散射台上^[6].将中心频率为5.3GHz的调制脉冲波分别入射到上文中提到的4种缝隙阵列上时,得到后向时域散射电场如图6所示.

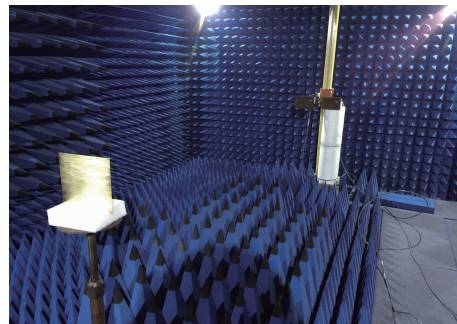


图5 时域溅射测试环境

从图6中可以看出,当并联电容 C 增加时候,溅射现象最大电场值增加,溅射效应持续时间几乎相同.当 $C=0.7\text{pF}$ 和 $C=0.25\text{pF}$ 的时候,后向溅射效应差别比较大.而 $C=0.6\text{pF}$ 和 $C=0.38\text{pF}$ 相比,后向散射电场的溅射效应差别不明显.

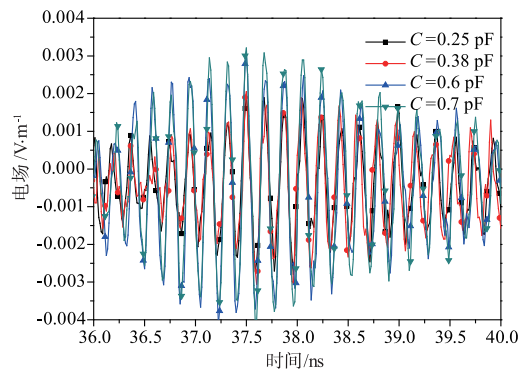


图6 不同尺寸缝隙阵列时域特性实验曲线

4 脉冲入射到缝隙阵列的时域散射特性

4.1 仿真结果及分析

当入射波为高斯脉冲信号,正向入射到缝隙阵列时:

$$E^i = \exp(-g^2(t-t_0)^2) \quad (7)$$

得到后向散射时域电场如图 7 所示,高斯信号的带宽为 26GHz. 从缝隙阵列和金属板散射出的时域信号,在前 0.15ns 的时候,有很强的散射值,散射电场的波形近似于入射信号的微分形式,0.15ns 以后,从缝隙阵列散射出来的电场有比较大的拖尾,而金属板散射出来的电场几乎没有拖尾. 当并联电容 C 从 0.7pF 减小到 0.25pF 的时候,在前 0.15ns,后向散射电场最大值稍有下降,而 0.15ns 以后,拖尾部分峰值略有增加.

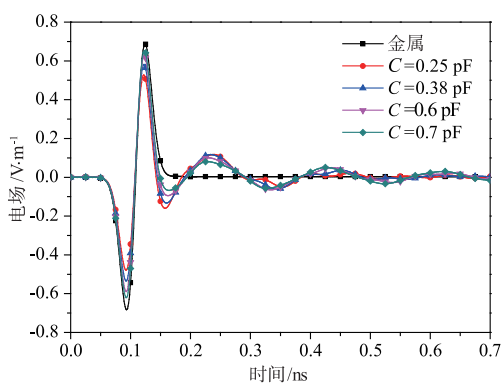


图7 不同尺寸缝隙阵列脉冲散射特性曲线

4.2 测试结果及分析

脉冲时域散射测试环境如图 8 所示,当发射和接收天线换成宽带的喇叭天线,分别接在脉冲源和时域示波器上. 信号源发射的是 2GHz 到 26GHz 的脉冲波,正向入射到上文中的缝隙阵列上. 缝隙阵列尺寸为 $w = 1\text{mm}$, $d = 29\text{mm}$ 的时候,得到的时域散射电场与无散射体时候得到时域散射电场如图 9 所示. 图中左边的坐标标尺是散射电场的场值,右边为门函数. 其中蓝色的曲线为没有放散射体的时候,环境的散射,在 2ns 到 3ns 的时候,有一个较强的散射电场,这是由于发射天线发射的能量直接耦合到接收天线上造成的. 通过观察背景的电场,可以发现在 8ns 到 11ns 时候较为平坦,因此将散射体放在这个范围所对应的位置上. 放上散射体后的时域散射电场如红色曲线所示. 在 9ns 的时候,缝隙阵列得到的时域散射电场有很大的散射电场值.

不同尺寸的缝隙阵列通过上述的方法测试后,经过如图 9 中黑色线所示门函数处理,得到时域散射电场如图 10 所示,即 $E^s(t) \times G(t)$ 得到 9.2ns 到 10.2ns 时间上的散射电场, $G(t)$ 为门函数. 本文中并没进行去噪处理,而是取噪声小的数据,直接采用. 当脉冲入射到金



图8 脉冲时域散射测试环境

属板上时,金属板上散射出来的散射电场在 9.3ns 到 9.7ns 时候,有较强的散射电场. 而缝隙阵列散射出的电场除去 9.3ns 到 9.7ns 时候的散射电场,还有比较长的拖尾. 通过对比图 7 和图 10,可以看出,实验结果与仿真结果基本吻合,在开始的 0.15ns 左右,随着并联电容 C 从 0.7pF 减小到 0.25pF,后向散射电场稍有减小. 由于环境的影响,拖尾部分的区别不太明显.

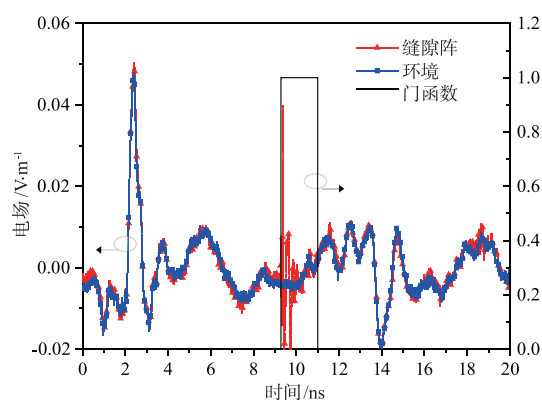


图9 缝隙阵列时域散射与环境时域散射曲线对比

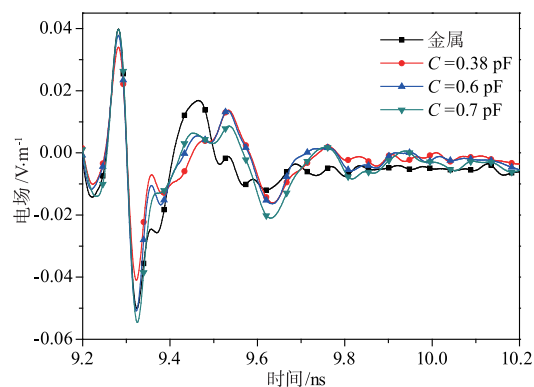


图10 不同尺寸缝隙阵列和同尺寸金属板时域散射曲线

5 总结

本文采用周期边界 FDTD 方法和等效电路模型建立了缝隙尺寸与并联电容之间的关系,研究了不同缝

隙尺寸(并联电容)的阵列在调制正弦信号和高斯脉冲信号入射下的时域溅射特性.当并联电容降低的时候,时域反射曲线的包络值下降速率变大,时域溅射现象的最大值随着并联电容降低而降低;当高斯脉冲入射时,缝隙阵列的后向散射不同于金属板的散射,有比较长的拖尾,这部分携带了缝隙尺寸的信息.

参考文献

- [1] Yang Deqing, Guo Fengjun. Ship appearance optimal design on RCS reduction using response surface method and genetic algorithms[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (English Edition), 2008, 13(3): 336 - 342.
- [2] F Costa, A Monorchio. A frequency selective radome with wideband absorbing properties[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 2740 - 2747.
- [3] Wang Pingyou, Tang Pu, Luo Wuqiong, He Ziyuan, Li Lutong, He Senhang. Design of dual-band frequency selective surface for antenna RCS reduction[A]. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)[C]. Shanghai, 2016. 4116 - 4119.
- [4] Huang C, Ji C, Wu X, Song J, Luo X. Combining FSS and EBG surfaces for high-efficiency transmission and low-scattering properties[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(3): 1628 - 1632.
- [5] Genovesi S, Costa F, Monorchio A. Low-profile array with reduced radar cross section by using hybrid frequency selective surfaces[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2012, 60(5): 2327 - 2335.
- [6] Hou Haijian, Wang Junhong. Time-domain electromagnetic sputtering effect of slot array at resonant frequency[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3777 - 3781.
- [7] Hou Haijian, Zhang Yuanyuan, Wang Junhong. Study on the time domain electromagnetic sputtering effect of the slot array with dielectric substrate[A]. 2016 11th International Symposium on Antenna, Propagation and EM Theory (ISAPE)[C]. Guilin, 2016.
- [8] Hou Haijian, Li Daiwei, Chen Meie, Wang Junhong. Time domain sputtering characteristics of the microstrip antenna with EBG structure[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(5): 580 - 856.
- [9] 葛德彪, 闫玉波. 时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [10] Xingying Huo, Junhong Wang, Dawei Li, Zhan Zhang, Meie Chen, Zheng Li. Research on the propagation constant of the periodically slotted rectangular waveguide by equivalent circuit method[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(2): 426 - 429.

作者简介



侯海健 女, 1989 年出生, 北京人, 北京交通大学电磁场与微波技术实验室在读博士生, 主要研究方向为周期性结构非正弦波时域散射机理研究.

E-mail: 12111005@bjtu.edu.cn



李大伟 男, 1988 年出生, 内蒙古赤峰人, 工程师, 工学博士, 中国运载火箭技术研究院, 主要研究方向为天线与电波传播、电磁兼容、电气系统总体设计.

E-mail: davidool@126.com



王均宏 男, 1965 年出生, 江苏人, 北京交通大学教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 2008 年获得国家杰出青年基金, 主要研究方向为无线通信射频链路基础理论与关键技术、天线理论与技术、漏泄波导、微波毫米波非均匀传输线及无源器件、电磁辐射与散射、瞬态电磁场理论与技术等.