

文章编号 1004-924X(2009)08-1958-06

单层带通 FSS 的带内传输损耗机理

梅东牧,吕明云,蒙志君,武哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100083)

摘要:阐述了平面波在无限平面单层频率选择表面(FSS)中的带内损耗机理并区分出失配损耗和介质损耗,基于模式分析法研究了诸多因素对损耗特性的影响。研究表明,介质有耗时,TE波大入射角下损耗最大;阵列分布或单元缝隙影响带宽的条件下,介质损耗与带宽总是呈相反的趋势;单侧介质加载的带内传输损耗主要是失配损耗还是介质损耗取决于介质厚度和加载方式。介质厚度为 $\lambda/4$ 时失配损耗最大, $\lambda/2$ 时介质损耗最大;而且相同厚度下介质覆盖比衬底时的失配损耗小。对称加载时则主要为介质损耗,且损耗低于单侧加载。

关键词:频率选择表面(FSS);传输特性;介质损耗;介质加载

中图分类号:TN015;TN974 文献标识码:A

Mechanism of in-band transmission loss in single-layer bandpass FSS

MEI Dong-mu, LÜ Ming-yun, MENG Zhi-jun, WU Zhe

(School of Aeronautic Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The essence of in-band transmission loss of plane wave in the Frequency Selective Surface (FSS) with an infinite planar single layer was illustrated by distinguishing the mismatch loss and the dielectric loss. The effects of some parameters on loss characteristics were studied based on a modal analysis approach. Research results show that the dielectric loss is higher when FSS is illuminated with TE polarization in a large incidence angle. While array parameters and aperture widths affect the bandwidth, the dielectric loss always shows the reverse tendency with the bandwidth. The in-band transmission loss of one side dielectric loading is induced mainly by a mismatch loss or by a dielectric loss that depend on the dielectric thickness and the way of dielectric loading. When the dielectric thickness is $1/4$ of wavelength, the mismatch loss reaches its maximum; when the dielectric thickness is $1/2$ of wavelength, the dielectric loss reaches its maximum. Moreover, with the same dielectric thickness, the mismatch loss of the FSS with dielectric superstratum is less than that of the FSS with a substrate. The loss of both-side symmetric loading is from dielectric loss, which is lower than that of one-side loading.

Key words: Frequency Selective Surface(FSS); transmission property; dielectric loss; dielectric loading

收稿日期:2008-08-04;修订日期:2008-10-09.

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点资助项目(No. 90305026)

1 引言

广泛应用于天线和雷达罩等领域的频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)技术一直是一个研究热点。带通 FSS 结构一般是在金属屏上加工一系列的缝隙单元,并由一层或多层介质加载,呈现出带通滤波特性,使电磁波可以在所需频段通过而屏蔽其它频段,尤其适用于雷达舱的带外隐身^[1-2]。介质加载能增加 FSS 机械强度,但其对 FSS 的传输曲线影响非常大,谐振频率和传输带宽随介电常数、介质厚度、加载方式等因素的变化规律在已有的研究成果中已非常明确^[2-5],且合适的加载能改善 FSS 的传输性能。相关文献中一般只是分析介质无损耗时的特性,即使实验结果中有明显的损耗^[3,5],亦缺乏规律性的分析;文献^[6]研究了介质损耗的影响但只是给出了与无耗介质的简单对比。另一方面,以 FSS 隐身雷达罩为代表的实例中,必须满足低损耗的工程要求,因而研究 FSS 损耗特性实际意义重大。

本文针对无限平面单层 FSS 的损耗特性和规律进行了较为深入的研究,包括介质损耗与 FSS 结构损耗的关系,入射波和阵列参数等因素对传输损耗的影响,尤其是不同介质厚度和加载方式下的损耗特性,并结合雷达罩的应用背景^[7],重点研究了大入射角状态下的各种特性。

2 模型与方法

如图 1 所示,平面波照射典型的 FSS 结构时,进入能量控制体的仅有入射波,出射能量则包括主模方向的透射波、反射波和栅瓣,如果出射能量小于入射能量,则 FSS 结构存在损耗。栅瓣带走的能量实际上也是损耗的一种。

带内传输损耗 C_{L-in} 定义为

$$C_{L-in} = 1 - C_{tmax}. \quad (1)$$

即谐振频率点除了透射能量之外的能量均为损耗,已有的研究中一般按这种方式计算传输损耗^[6]。

C_{L-in} 由以下四部分组成:

(1) FSS 金属屏电阻率导致的欧姆损耗,目前微波段的实验中一般用厚度小于 $\lambda/1000$ 的铜箔

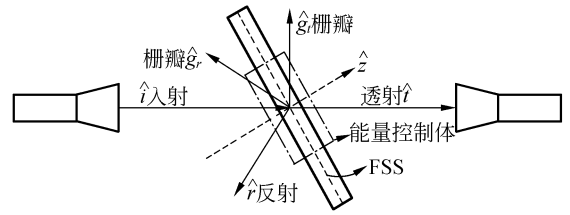


图 1 电磁波在无限平面 FSS 结构中的传播

Fig. 1 Propagation of electromagnetic wave in an infinite planar FSS structure

作为 FSS 屏,可视理想导体。红外区金属的欧姆损耗是一个必须考虑的因素^[8],但本文研究厘米波段,所以不再考虑这一损耗;

(2) 自由空间栅瓣损耗,当频率升高至一定值时,将产生偏离主模方向的栅瓣并在自由空间传播时带走能量。栅瓣的起始频率一般高于谐振频率,栅瓣不影响带内传输损耗;

(3) 失配损耗,即因介质结构不匹配而导致的带内反射损耗;

(4) 介质损耗,即介质导致的能量衰减,本质上是一种热耗。

本文重点研究的是失配损耗和介质损耗机理。

透射率、反射率、栅瓣可根据模匹配法^[9]求出的场和能量得出。结合图 1,主模方向上的入射波、反射波和透射波的时间平均 Poynting 矢量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_i = \text{Re}\{\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i\} / 2 \\ \mathbf{S}_r = \text{Re}\{\mathbf{E}_{r(0,0)} \times \mathbf{H}_{r(0,0)}\} / 2 \\ \mathbf{S}_t = \text{Re}\{\mathbf{E}_{t(0,0)} \times \mathbf{H}_{t(0,0)}\} / 2 \end{cases} \quad (2)$$

若出现栅瓣则在阵列两侧均传播,入射侧和透射侧的时间平均 Poynting 矢量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{gr} = \sum_{\substack{(p,q) \neq (0,0) \\ \text{Re}(-z \cdot \mathbf{g}_p) > 0}} \text{Re}\{\mathbf{E}_{r(p,q)} \times \mathbf{H}_{r(p,q)}\} / 2 \\ \mathbf{S}_{gt} = \sum_{\substack{(p,q) \neq (0,0) \\ \text{Re}(z \cdot \mathbf{g}_p) > 0}} \text{Re}\{\mathbf{E}_{t(p,q)} \times \mathbf{H}_{t(p,q)}\} / 2 \end{cases} \quad (3)$$

两式中电磁场的下标 (p, q) 表示 Floquet 模, (2) 式中 $(0, 0)$ 表示主模, (3) 式表示能够在自由空间传播的其他模态,即为栅瓣。

对于图 1 所示无限大平面结构,根据能流在控制体中的守恒条件^[7,10], (3) 式中的反射率、透射率和栅瓣损耗等系数分别定义为:

$$\begin{cases} C_r = (-\hat{z} \cdot \mathbf{S}_r) / (\hat{z} \cdot \mathbf{S}_i) \\ C_t = (\hat{z} \cdot \mathbf{S}_t) / (\hat{z} \cdot \mathbf{S}_i) \\ C_{L-g} = (-\hat{z} \cdot \mathbf{S}_{gr} + \hat{z} \cdot \mathbf{S}_{br}) / (\hat{z} \cdot \mathbf{S}_i) \end{cases} \quad (4)$$

在谐振频率点 f_0 处分析带内传输损耗机理,其失配损耗系数为

$$C_{L-m} = C_{r(f_0)} \quad (5)$$

一般传输带内 C_{L-g} 为 0,则根据能量守恒得介质损耗系数为

$$C_{L-d} = 1 - C_{r(f_0)} - C_{t(f_0)} \quad (6)$$

带内传输损耗系数亦可由式(1)写为

$$C_{L-in} = C_{L-m} + C_{L-d} \quad (7)$$

3 结果与分析

图 2 给出了本文研究的对象,单元形式取简单的圆环形。图 2 所示介质加载中,主要研究一种介质的单侧($t_1=0$ 或 $t_1=t$)或双侧对称加载($t_1=t/2$)。基本参数默认设置如下(有变化时将说明)。

$$\begin{aligned} R_1 &= 2.7 \text{ mm}, R_2 = 3 \text{ mm}, \omega = R_2 - R_1, \\ u &= v = 10 \text{ mm}, \alpha = 90^\circ, \\ \text{TE 极化}, \varphi &= 0^\circ, \theta = 60^\circ, \\ \epsilon_r &= 4.0, \tan \delta = 0.015, t = 1 \text{ mm}, t_1 = 0 \text{ mm}. \end{aligned}$$

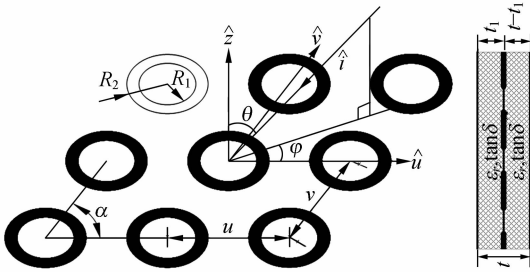


图 2 FSS 阵列参数及介质加载形式

Fig. 2 Parameters of FSS array and loading pattern of dielectric

3.1 总体特征

首先在图 3 中给出有耗介质和无耗介质单侧衬底加载的传输曲线的总体特征及式(4)~(7)中各系数的关系,表明:(1)介质损耗会导致带内透波率整体下降,谐振点 12 GHz 的透波率从 1.0 下降至 0.76 时最为剧烈,22.1 GHz 的透波率峰值从 0.32 下降至 0.16,而远离这两个峰值的频段则影响较小;(2)介质损耗对反射率的影响也主

要集中于两个谷值附近,将使反射率增大,尤其是谐振频率点的反射率不再为 0;(3)介质损耗不影响栅瓣起点(均为 16.1 GHz),但栅瓣损耗减小,峰值附近下降最大;(4) $\tan \delta=0$ 时介质损耗系数恒为 0,验证了(6)式所示的能量守恒; $\tan \delta=0.015$ 时,介质损耗主要出现在透波率较高的频段,透波率很小的频段介质损耗也趋近于零。

另外观察(5)和(6)式定义的两类损耗,图 3 中带内传输损耗系数为 $C_{L-in} = 1 - 0.76 = 0.24$,相应频率的失配损耗系数为 $C_{L-m} = C_{r-min} = 0.05$,介质损耗系数 $C_{L-d} = 0.19$,总能量是守恒的。因此,在栅瓣起点高于谐振频率的前提下,带内传输损耗由谐振频率下的失配损耗和介质损耗组成。

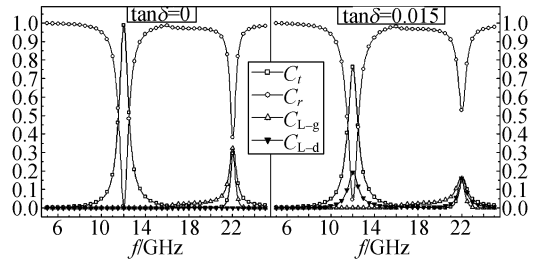


图 3 有耗介质与无耗介质加载的传输曲线对比

Fig. 3 Comparison between FSSs loading by lossy and lossless dielectric

3.2 各参数的影响

下面的算例是针对介质损耗特性所做的研究,故计算频段低于自由空间栅瓣产生的起点,结果中亦不再给出栅瓣损耗系数的曲线,即按照(6)式的定义计算介质损耗(此时亦即主模方向的传输损耗)。

3.2.1 不同极化状态和入射角

如图 4 所示,带内传输损耗与整个频带内的介质损耗均是在 TE 极化时,入射角越大。其次,损耗曲线的带宽特性与传输曲线保持一致,TE 极化带宽较小,而 TM 极化时带宽较大,损耗大小与带宽大小呈相反的趋势。第三,左图中带内损耗与右图中最大介质损耗的比较表明,TE 极化大角度时带内损耗与最大介质损耗相差最大,说明带内反射引起的失配损耗较高。而 TM 极化大角度时带内损耗与最大介质损耗几乎相等,说明失配损耗非常小,因而 TE 极化大角度时较大的介质损耗和失配损耗导致透波率非常低,是

工程应用中最值得关注的状态,这与介质雷达罩^[7]及其测试结果^[3]的规律都是一致的,所以本文的算例主要是 TE 极化 60° 入射角。

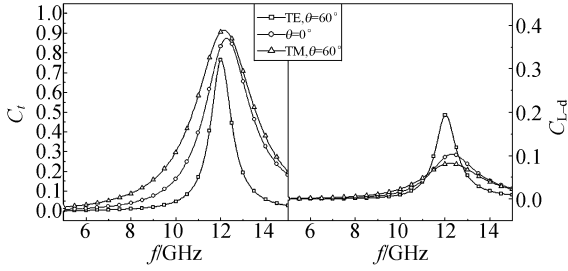


图 4 不同极化状态和入射角下的传输和损耗

Fig. 4 Transmission and loss of FSSs with different polarizations and incidence angles

3.2.2 不同的介质厚度及加载方式

如图 5、6、7 所示,分别给出了 0~10 mm 各厚度的介质单侧衬底、覆盖或对称加载等三种介质加载方式下的 FSS 传输和损耗曲线,并区分无耗介质和有耗介质。图中还给出了有耗介质无 FSS 阵列时的损耗系数用来作对比,且所有系数均对应于 f_0 所示的谐振频率。

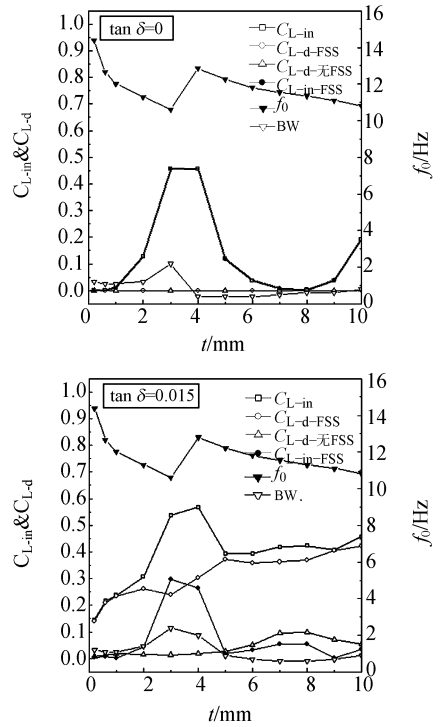


图 6 不同介质厚度下的传输和损耗, $t_1 = t$, 介质单侧覆盖

Fig. 6 Dielectric superstratum on one side, $t_1 = t$

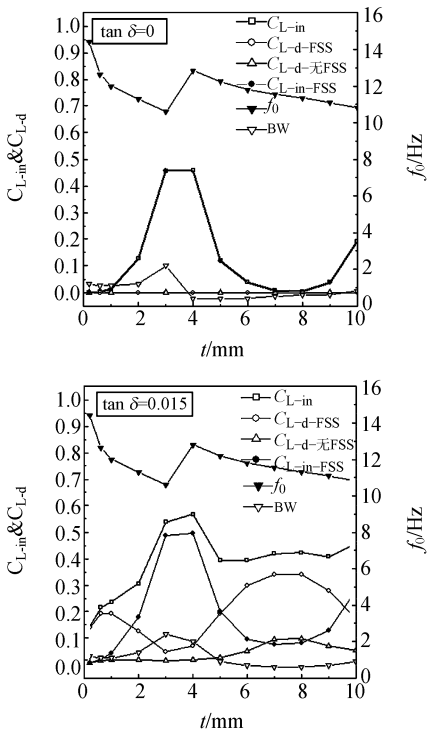


图 5 不同介质厚度下的传输和损耗, $t_1 = 0$, 介质单侧衬底

Fig. 5 Dielectric substrate on one side, $t_1 = 0$

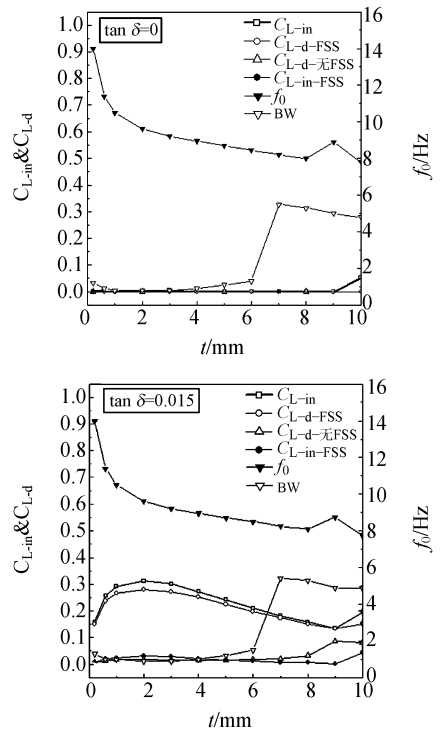


图 7 不同介质厚度下的传输和损耗, $t_1 = t/2$, 介质双侧对称加载

Fig. 7 Symmetric loading on both sides, $t_1 = t/2$

图 5 和图 6 表明, (a) 谐振频率随介质厚度的变化趋势与文献[4]一致, $\tan \delta$ 对谐振频率影响很小; (b) 无论介质有耗或无耗, 带内传输损耗 C_{L-in} 对于介质覆盖和衬底两种形式完全一致; (c) 无耗介质单侧加载时, 厚度 $t = \lambda_e/4$ 附近的区域带内传输损耗很大, 完全是由带内反射所致, 而 $t < \lambda_e/10$ 和 $t = \lambda_e/2$ 附近区域损耗很小; (d) 若为有耗介质, 则带内传输损耗整体上升, $t = \lambda_e/2$ 附近也没有下降的趋势, 但 $t = \lambda_e/4$ 的区域上升较小, 说明此时带内反射引起的失配损耗是主要损耗, 而其它厚度时带内传输损耗急剧上升, 说明此时介质损耗是主要反射机理; (e) 图 6 中的介质损耗与带内传输损耗比图 5 中更为相近, 说明介质覆盖比介质衬底失配损耗更小, 更有利于在应用中减小反射杂波。

图 7 表明, (a) 无耗介质对称加载时, 各厚度下均没有带内传输损耗, 介质有耗时, 介质损耗系数与带内传输损耗基本一致, 说明这一加载方式的损耗主要由介质所致, 失配损耗很小; (b) 总厚度 $t = \lambda_e/2$ 时传输损耗最小, 也最接近没有 FSS 时的纯介质损耗(注意此时因谐振频率不同, 半波长与图 5 或 6 中并不相同), 如果半波长恰好能对应此时的谐振频率, 则能使匹配达到最低损耗; (c) $t > \lambda_e/4$ 时, 相同的介质总厚度下, 对称加载的带内传输损耗总是远低于单侧加载。

整体上来看, FSS 结构谐振时的介质损耗总是大大高于相应频率下没有 FSS 时的纯介质损耗; 其次, FSS 结构的介质损耗与厚度并无简单的对应关系, 还和介质加载方式等其它因素有关。另外, 已有文献对带宽的研究表明^[6,11], 对称加载时 $t = \lambda_e/2$ 附近带宽最大, $t = \lambda_e/8$ 附近带宽最小, 带宽与介质损耗随厚度呈相反的变化趋势。如果是单侧加载, 也有同样的结论。但是带内传输损耗有时并不满足这一规律。例如单侧加载时 $t = \lambda_e/4$ 附近的带内传输损耗和带宽都较大, 这是由于此时失配损耗是主要的损耗机理, 只有带内传输损耗与介质损耗相近或一致时, 两者才能均与带宽保持相反的变化趋势。

3.2.3 不同的阵列周期、角度及单元缝宽的影响

图 8 中阵列周期从 10 mm 减小到 7 mm 后,

带内传输损耗和介质损耗均有明显降低; 当阵列从直角阵变为正三角阵, 或缝隙变宽后, 两种损耗亦有明显降低。即对于同一种单元, 单元分布更密、缝隙面积更大时, 传输损耗最低, 透波率更高。一般认为应当取环形单元, 尤其是能以紧密的正三角阵列分布的 Y 环形单元, 从而可获得较大的带宽, 并延缓栅瓣的出现^[2], 实际上也能降低传输损耗, 进一步说明损耗大小与带宽大小呈相反的变化趋势。

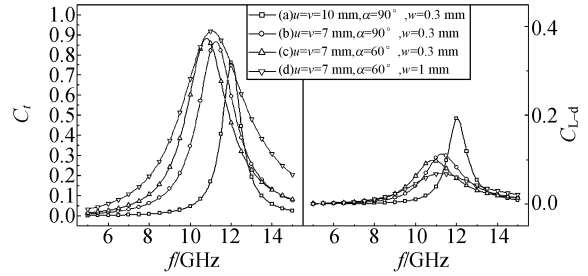


图 8 不同的阵列周期、角度及单元缝宽下的传输和损耗

Fig. 8 Transmission and loss of FSSs with different array periods, lattice angles and widths of slot

4 结 论

介质损耗和失配损耗是带内传输损耗的主要组成部分, 前者是因为材料热耗所致, 后者是介质厚度不匹配而引起的带内反射所致。

极化、入射角、阵列周期与角度、单元缝宽等各因素均对带内传输损耗和介质损耗有着重要影响, TE 波大入射角下损耗最大, 阵列分布越密或单元缝隙越宽, 则损耗越小, 均说明介质损耗总是与带宽呈相反的变化趋势。

介质厚度与加载方式对传输损耗的影响最为复杂。介质单侧覆盖或衬底时带内传输损耗完全相同, 但损耗机理有所不同。介质覆盖时带内反射带走的能量较少, 更利于减小失配损耗, 进而减小带内反射杂波。有耗介质对称加载时带内传输损耗主要由介质损耗所致, 而且相同的介质总厚度下, 对称加载的传输损耗总是低于单侧加载。

参考文献:

[1] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques

for Analyzing Frequency Selective Surfaces - a Review [C]. *Proceedings of the IEEE*, 1988, 76

(12):1593-1615.

- [2] MUNK B A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* [M]. New York: John Wiley, 2000.
- [3] LUEBBERS R J, MUNK B A. Some effects of dielectric loading on periodic slot arrays[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1978, AP-26(4): 536-542.
- [4] CALLAGHAN P, PARKER E A, LANGLEY R J. Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *IEE Proceedings-H*, 1991, 138(5): 448-454.
- [5] 王焕青,吕明云,武哲. 介质加载对频率选择表面传输特性影响的实验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(1): 27-30.
WANG H Q, LV M Y, WU ZH. Experiment on transmission properties of TE polarized plane wave incidented on frequency selective surfaces[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1099-1101. (in Chinese)
- [6] 侯新宇,王伟,佟明安,等. 介质损耗对频率选择表面传输特性的影响[J]. *电子科学学报*, 2000, 22(5): 871-874.
HOU X Y, WAN W, TONG M A, *et al.*. Influence of dielectric loss on the transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *Journal of Electronics*, 2000, 22(5): 871-874. (in Chinese)
- [7] 杜耀惟. *天线罩电信设计方法* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 64-81.
DU Y W. *Methods of Electric Design for Radomes* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993: 64-81. (in Chinese)
- [8] PRYOR J B. *On Ohmic losses in frequency selective surfaces at near-infrared wavelengths* [D]. The Ohio State University, 2003.
- [9] VARDAXOGLU J C. *Frequency Selective Surfaces* [M]. London: Research Studies Press, 1997.
- [10] KONG J A. *Electromagnetic Wave Theory* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [11] 武振波. FSS 隐身雷达罩电性能理论分析的基本问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
WU ZH B. *Research on Essential Problems of Electrical Performance Analysis for FSS Stealth Radome* [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

作者简介:



梅东牧(1974—),男,辽宁沈阳人,北京航空航天大学博士生,从事飞行器总体设计及多学科优化相关技术研究。E-mail: mdm@ase.buaa.edu.cn



吕明云(1969—),男,湖北公安人,北京航空航天大学副教授,博士,从事飞行器总体设计及隐身技术相关技术研究。E-mail: lv503@buaa.edu.cn



武哲(1957—),男,山西太原人,北京航空航天大学教授,博士生导师,国家级有突出贡献的中青年专家,主要从事飞行器总体设计技术、隐身技术及相关领域的研究。E-mail: wuzhe@buaa.edu.cn

通讯作者:



蒙志君(1982—),男,湖北监利人,北京航空航天大学博士后,从事飞行器隐身技术的研究。E-mail: mengzhijun@buaa.edu.cn