# 超材料在舰船电磁环境控制中的应用探索

## 朱世勇

(海军驻温州地区军事代表室,浙江 舟山 316003)

摘要:首先阐述了国内外水面舰船电磁干扰控制技术和雷达波隐身技术的发展现状,然后介绍了近年来电磁超材料(Metamaterial)的研究进展,并对其可应用于水面舰船总体电磁环境控制方面的潜在应用进行挖掘与探索,最后对未来水面舰船的雷达波隐身性设计和电磁兼容性设计的一体化解决方案进行了展望。 关键词:水面舰船;电磁环境;电磁兼容;雷达波隐身;超材料 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.015 中图分类号: TJ04 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2018)07-0070-05

# Application of Metamaterial in Electromagnetic Environment Control of Surface Ships

ZHU Shi-yong

(Naval Military Representative Office in Wenzhou, Zhoushan 316003, China)

**ABSTRACT:** The present development status for surface ships in electromagnetic compatibility (EMC) control technique and radar wave stealth technique at home and abroad were introduced at the beginning. Then based on the research development of metamaterials (MM), the potential applications on ships' EME control technology were explored and discussed. Finally, integrated solution considering both radar wave stealth and EMC design was proposed as well.

**KEY WORDS:** surface ships; electromagnetic environment (EME); electromagnetic compatibility (EMC); radar wave stealth; metamaterials

未来战场将是多维一体的信息化战场,敌我双方将在多个领域部署大量的电子、电气设备,由此而产生的多类型、宽频谱、高密度的电磁辐射信号,将使得海战场电磁环境极为复杂。在如此恶劣的电磁环境中,以水面舰船为中心的作战模式,其首要任务是控制好本舰自身的电磁环境,以达到舰上电子设备和武器装备的自兼容,并且在总体设计时尽可能地降低本舰的雷达波散射截面积(RCS),以减小被敌方探测及被打击概率、提高生命力,才能确保舰船自身的作战性能得到最大化发挥<sup>[1-10]</sup>。

近年来,随着电子技术发展所带来的水面舰船装 备的更新换代,舰船作战平台上电子传感器的数量日 益增多,由新型舰船组成的水面舰船编队又构成了更

# 1 国内外现状

## 1.1 电磁干扰控制技术

舰船早期的电磁干扰问题主要采用传统的电磁 环境控制技术来解决<sup>[13-17]</sup>,包括优化天线布置、屏蔽、 滤波、接地以及电缆分类优化布置等。这些方法较为 简单、经济且实施效果好,至今仍是舰船总体经常采

为庞大、复杂的电磁环境。当今海上作战对新一代水 面舰艇的雷达波隐身性提出越来越高的要求<sup>[11-12]</sup>,与 此同时,新装备所带来的新的电磁兼容性问题也在陆 续出现,舰船电磁环境控制技术的发展正面临着强大 的考验,亟需追赶上舰艇装备发展的步伐。

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-05-23

作者简介:朱世勇(1974—),男,本科,主要研究方向为舰船工程。

用的电磁兼容设计方法,且各国对这些基本电磁兼容 干扰控制技术也始终没有停止过研究步伐<sup>[18-19]</sup>。

由于现代舰船上安装了数量众多的天线,虽然对 舰总体进行了电磁兼容性优化设计,但仍然可能会存 在某些电磁收发设备之间的相互干扰<sup>[20-21]</sup>。在这种情 况下,势必要对舰上的电子收发设备在工作频率、功 率、时间乃至空间上进行管理控制, 使舰上的电子、 武器系统和设备最大限度地发挥作战效能, 增强使用 的可靠性和决策的便捷性。针对不同的资源类型,电 磁兼容管理和控制方法分为频域管控、时域管控、空 域管控以及功率管控四种类型[13]。频域管控是指对工 作频率冲突又相互产生干扰的电子设备进行频谱的 合理分配,一直以来广泛采用的滤波技术就是对电子 设备进行频域管理和控制的一种手段;时域管控包括 匿影、同步(统一触发)和按照作战优先序发射限时 等手段;空域管控除了空间隔离、辐射阻隔等手段外, 还包括对特别雷达设定发射角限位;功率管控包括限 功率发射和提高接收机检测门限等手段。

#### 1.2 雷达波隐身技术

现代水面舰船的电磁环境控制不仅要保证本舰 自身的电磁兼容性,还应考虑到舰船的雷达波隐身 性。雷达波隐身设计的中心思想是减小水面舰船的 RCS 值。RCS 是指当目标被电磁波照射时在某个特 定方向上的散射场,它以入射源在目标上所形成的入 射场强大小作归一化,由此计算出的 RCS 跟入射源 与目标之间的距离无关。它是目标自身的固有电磁属 性,可用以式(1)表示:

$$\sigma = \lim_{r \to \infty} 4\pi r^2 \frac{\left| E^{\text{scat}} \right|^2}{\left| E^{\text{inc}} \right|^2} \tag{1}$$

式中: E<sup>scat</sup> 为目标散射电场; E<sup>inc</sup> 为入射源在目标上所形成的入射电场。对于不同的测量方向,可以把 RCS 分为单基站雷达 RCS 和双基站雷达 RCS。前者是众多雷达波隐身技术关注的重点,后者虽然因变量太多难以把握,但随着海洋编队作战日趋成熟化,双基站雷达 RCS 也必须加以考虑。

舰船常用的雷达波隐身技术有外形隐身和材料 隐身技术<sup>[11-12,22]</sup>。目前,世界各国设计建造的主流军 舰中都已综合运用了这两种雷达波隐身技术。英国 "勇敢"级驱逐舰的前桅采用先进技术桅杆/集成技术 桅杆(ATM/ITM);俄罗斯"守护"号轻型护卫舰的 舰体和上层建筑结构中大量使用可吸收雷达信号的 非燃玻璃钢材料,并采用"结构隐身"原理设计;美国 "朱姆沃尔特"级驱逐舰采用穿浪单体内倾船型,上层 建筑共形集成,且舰体使用多种抑制雷达波信号的材 料;"自由"号濒海战斗舰采用倾斜的舰体表面和雷达 波吸波材料。瑞典的"维斯比"级轻型护卫舰是已服役 的军舰中外形隐身与材料隐身结合运用得最完美的 作品,也是采用复合材料制造的最大的海军舰船。它 的舰体、甲板、上层建筑基本都使用碳纤维增强塑料 夹层板建造,结合外形隐身设计,再加上其上层建筑 外表均涂有雷达波吸收材料,使得该舰的雷达特征信 号得到了极大降低<sup>[23]</sup>。

# 2 异向介质/超材料

早在 20 世纪 60 年代,前苏联学者韦谢拉戈基于 经典的电磁理论,发现当某种理想材料的介电常数  $\varepsilon$ 和磁导率  $\mu$  均为负时可能具有奇特的性能。他还将这 类特殊材料命名为左手材料(LHMs,left-handed materials),而与之对应的自然界中大多数的寻常物 质则被称为右手介质(right-handed materials, RHMs)。

已故的麻省理工学院孔金瓯先生基于对超材料的较多基础研究成果之上,提倡中文翻译为"异向介质","异向"代表的是电磁波在异向介质中传播的电磁特征显著异于传统材料<sup>[24-25]</sup>。

随着国内外学术界对 Metamaterial 研究的不断深 入, Metamaterial 所涵盖的范畴逐步从微波频段拓展 到 THz、红外、光波频段,乃至声学和力学等领域, 研究 Metamaterial 的队伍不断地发展壮大。目前,国 内对 Metamaterial 的称呼除了"异向介质",还主要有 "超电磁介质"、"特异电磁介质"、"超材料"等。由于 最初大家一致认为 Metamaterial 是人造出来的电磁材 料,自然界中是不存在的,"异向介质"这个中文名比 较恰当。经过学术界对 Metamaterial 的持续深入研究, 发现一些 Metamaterial 能实现的"异向"效应与"奇异" 特性在自然界中存在的物质中也能观察得到,因此, 近年来在中国学术界越来越多地将 Metamaterial 称为 超材料<sup>[26-29]</sup>。

Metamaterial 主要特点是其等效介电常数和磁导 率张量可以通过对组成结构单元的设计进行控制以 实现任何想要拥有的参数值,可以为正、负、由负到 正、甚至为 0。通常,超材料是由微小金属谐振单元 所组,其介电常数  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega)$ 和磁导率  $\mu = \mu_0 \mu_r(\omega)$ 可用 Lorentz 色散模型来等效:

$$\phi(\omega) = 1 + \frac{\omega_{\rm p}^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}$$
(2)

式中:函数  $\phi(\omega)$ 为随频率变化的相对复介电常数  $\varepsilon_{r}(\omega)$ 或相对复磁导率  $\mu_{r}(\omega); \omega_{p}$ 为等离子体频率;  $\omega_{0}$ 为谐振频率;  $\gamma$ 为阻尼振荡频率。对于自由电荷或 者金属导体,  $\omega_{0}=0$ , Lorentz 色散模型退化为 Drude 色散模型:

$$\varepsilon_{\rm eff}\left(\omega\right) = \varepsilon \left(1 - \frac{\omega_{\rm p}^2}{\omega\left(\omega + i\gamma\right)}\right) \tag{3}$$

自然界存在的等离子体其介电常数就是用 Drude 色散模型来表示。通过设计 Metamaterial 微小金属谐

振单元结构可以制造出与等离子体相类似的电磁特性,因此,Metamaterial也可以作为实现等离子体隐身的一种有效途径。Metamaterial的极度色散使其在不同的频段内表现出不同的电磁特性:在某些频段内其介电常数和磁导率同时为负,可发生逆斯涅尔折射(Reversed Snell Refraction)效应和逆切伦科夫辐射(Reversed Cerenkov Radiation)等;利用异向介质能放大倏逝波的特点,可以制成"超级透镜(Superlens)";利用其折射率≈0 区域的特性可以制成高指向性天线;因为异向介质的电磁参数是各向异性的,可随空间变化,且某些分量取值可在正负很宽的范围内调整,较为契合雷达波隐身往往需求的典型参数需求,因而又被视为完美隐身技术的代表。

## 3 应用探索

#### 3.1 抑制天线旁瓣

舰船上大功率辐射源的旁瓣一般难以得到有效 抑制,从而对同一舰船平台上其他的敏感电磁接收设 备产生影响,是总体电磁兼容系统面临的难题。基于 Metamaterial 可调控电磁波的能力,文献[20]提出了 一种通过喇叭内部加载超材料透镜的方法实现了角 锥喇叭天线的旁瓣抑制。超材料透镜不仅能调控电磁 波的相位,而且可以调控喇叭天线口径幅度分布,在 不增加天线尺寸的情况下,使得喇叭天线两个主面均 拥有较低的副瓣,同时喇叭天线保持良好的宽带匹配 性能。如果对可控波束的天线<sup>[30-31]</sup>采用超材料来替代 传统的波导缝隙,即可将振元的尺寸缩减为原先的 1/4。

Metamaterial 应用在舰船天线上可以提高水面舰 船现有天线器件的指向性能,以减少舰船平台天线间 的电磁干扰程度,提升总体电磁兼容性。

#### 3.2 增大天线隔离度

舰船桅杆及上层建筑表面积有限,共面布置的平 面阵天线无法彻底拉开距离,以至于有可能会相隔很 近,而舰船集成桅杆/集成上层建筑外壁通常为金属。 由于外壁表面存在表面波效应,电磁能量可以在两平 面阵天线之间形成耦合,从而导致电磁干扰现象。对 于安装于上层建筑表面无法彻底拉开距离的共面天 线阵,可以利用 Metamaterial 抑制阵面天线之间的表 面波传播,减小发射天线端口的边缘绕射效应,即增 强天线间隔离度<sup>[32-33]</sup>。

## 3.3 吸收电磁波

吸波材料是通过将电磁波转换为热能或其他形式的能量来实现电磁吸收。在衡量 Metamaterial 吸波性能的时候,需要同时兼顾 Metamaterial 的衰减特性和阻抗匹配特性。前者要求尽量提高 Metamaterial 等

效电磁参数的虚部损耗,而后者则是通过设计某些特殊的边界条件来使入射电磁波在 Metamaterial 表面的反射尽可能地小。当界面的反射被完全消除,就有可能实现 100%完美吸波。舰船总体设计时,在某些特定的环境下引入 Metamaterial 吸收电磁波,既可以消除设备间的相互电磁干扰,对总体兼容性有利,又能降低舰船 RCS,为总体实现雷达波高效隐身。

从 2008 年至今, 陆续有研究小组提出了 X 波段 的 Metamaterial 吸收体, 其吸收率在很宽的角度范围 内均能达到 80%以上, 且能实现超薄吸收<sup>[26,28]</sup>。针对 水面舰船重点关注频段设计出适装性和吸波性优越 的 Metamaterial, 可在不影响舰船其他总体性能的前 提下大大缩减 RCS 值, 并可在舰船上存在有害辐射 的部位有效吸收电磁波以消除舰船自干扰。因此具有 吸波功能的 Metamaterial 在水面舰船的电磁兼容及雷 达波隐身方面都具有广阔的应用前景。

### 3.4 雷达波隐身罩

目前,水面舰船雷达波隐身的技术途径采用以外 形隐身为主,材料隐身和屏蔽技术为辅,总体隐身和 设备隐身并重的思路和方法,尽量减小舰船的雷达波 散射截面积(RCS)。在总体外形隐身做到极致的情 况下,作为外形隐身措施的补充,未来雷达波隐身的 发展趋势将越来越多地求诸于类似 Metamaterial 的 新型电磁材料。例如针对局部"亮点",在适当部位及 区域应用隐身涂料和材料(雷达波隐身材料),以 弥补由于部分武器、舾装设备未采取隐身设计而带 来的不足。

如果希望借助光学变换的思路来设计"隐身衣", 往往必须设计较为复杂的各向异性电磁参数。对超薄 隐形地毯使用准保角变换设计,即可显著降低介质的 复杂程度,相应的代价则是厚度增加,而超表面<sup>[18,20]</sup> 的出现则为设计超薄隐形地毯提供了全新的机遇。 "皮肤"电磁隐形衣在水面舰船总体隐身性设计上的 突出优点是其超薄特性,具有适装性,可用于对舰船 上局部 RCS 亮点进行压制,达到隐身效果。其最大 的缺点是定向性,即只能对特定入射方向的电磁波实 现电磁隐形。当入射方向发生变化时,隐形效果显著 下降。随着动态可控电磁单元的发展,能够根据入射 方向动态调整相位分布的新型皮肤隐形装置,也并非 可望而不可及。

#### 3.5 选频透波天线罩

通常,敌方与我方的雷达作用频率并不相同,如 果利用这一点,可以结合以频率选择表面(FSS)技术<sup>[35-38]</sup>实现天线带外的雷达隐身。一般来说,频率选择表面天线罩在天线带内(即工作频带内)的透波性能影响很小;而在带外时,辅以赋形等隐身设计,即可将带外电磁波反射其他方向,显著减小入射方向的

#### 回波。

将 Metamaterial 设计制造为舰船上雷达和通信天 线选频透波天线罩的材料,不但能提高舰船总体的雷 达波隐身性能,还可控制天线阵列的方向性,对舰船 总体电磁兼容性和雷达波隐身性均大有益处。

## 4 结语

科学技术的不断发展以及新型电磁材料的研制 和开发推动着新一代水面舰船的电磁环境控制技术 向全新的领域逐步拓展。舰船雷达波隐身是舰船综合 隐身技术中的重要一环,由于同时是对舰船的电磁环 境进行总体控制,因此雷达波隐身性的设计与电磁兼 容性设计可能会产生冲突,需要优化设计统筹解决。 未来解决舰船隐身性与电磁兼容性的终极方法是全 射频集成技术,但从现阶段的技术储备来看,还不足 以完全实现全射频集成。综合集成上层建筑是实现全 射频集成的必经之路, 它将射频集成技术与封装式桅 杆集成安装技术相结合,可在较大程度上缩减 RCS, 增强水面舰船的隐身性。在此过程中, 文中提到的 Metamaterial 应用将起到推波助澜的作用。只要能够 从顶层统筹考虑水面舰船的电磁兼容性和雷达波隐 身性,有效解决由集成上层建筑衍生出的新的电磁干 扰问题,恰到好处地应用 Metamaterial 等新材料技术, 我国水面舰船的电磁环境控制技术水平将跃升一个 新台阶、达到前所未有的高度。

#### 参考文献:

- FANG C. The Simulation and Analysis of Quantum Radar Cross Section for Three-Dimensional Convex Targets[J]. IEEE Photonics J., 2018, 10(1): 1-8.
- [2] FANG C, TAN H, LIU Q F, et al. The Calculation and Analysis of the Bistatic Quantum Radar Cross Section for the Typical 2D Plate[J]. IEEE Photonics J, 2018, 10(2): 1-14.
- [3] FANG C. Multistep Cylindrical Structure Analysis at Normal Incidence Based on Water-Substrate Broadband Metamaterial Absorbers [J]. Z Naturforsch A, 2018, 10(10): 4-6.
- [4] FANG C, LIU Q, ZHAO X N. Integrated Model of Electromagnetic Scattering for Two Dimensional Fractal Sea Surface[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(22): 4217-4224.
- [5] FANG C H, ZHENG S Q, TAN H, et al. Mode-Tuned Reverberation Chamber and Gtem Cell Methodologies[J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2008(2): 103-114.
- [6] FANG C H, ZHAO X N, LIU Q. An Improved Physical Optics Method for the Computation of Radar Cross Section of Electrically Large Objects[J]. 2008 Asia-Pacific

Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008: 722-725.

- [7] FANG C, ZHANG Q, TAN H, et al. Computation of Shielding Effectiveness of a Rectangular Case with MLFMM between 0~5 GHz[C]// Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010 International Conference. 2010.
- [8] FANG C, ZHANG Q, XIE D G. "Simulation of Shielding Characteristic of a Typical Decay Waveguide Window for EMP[C]// Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2010 International Conference. 2010.
- [9] CHEN L, MA B, WU W J, et al. A Novel Design of Miniature Filter-antenna with Broad Stop-band Characteristic[C]// EDAPS. 2017.
- [10] 朱李良. 提高产品电磁兼容性的工艺措施[J]. 电子产 品可靠性与环境试验, 2016, 34(4): 25-28.
- [11] 徐杰. 舰船隐身技术[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(6): 6-8.
- [12] 范晓轩, 耿国桐. 雷达隐身技术在水面舰船上的应用[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(4): 140-143.
- [13] 黄龙水,张维俊. 舰船电磁兼容顶层设计思想和方法[J]. 舰船电子工程,2009, 29(4): 15-18.
- [14] 周开基, 赵刚. 电磁兼容性原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨 工程大学出版社, 2002.
- [15] 周文兵, 逯波, 张昕. 舰船通信设备电磁屏蔽研究[J]. 船电技术,2006(2): 1-4.
- [16] 宋东安,易学勤,张崎,等. 舰船接地技术与 EMI 控制[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(1): 111-113.
- [17] 邵鄂, 张军马, 何越. 电磁干扰信号频谱分析[J]. 环境 技术, 2016, 34(2): 34-37.
- [18] JIMENZ GONZALEZ V H. Electromagnetic Compatibility in Ships Design and Construction[C]// IEEE ESTS 2013. NY, USA, 2013.
- [19] MAZZOLA S. MIL-STD-461, The Basic Military EMC Specification and It's Evolution over the Years[C]// IEEE LISAT 2009. NY, USA, 2009.
- [20] PIRICH R, BASANEZ C, ANUMOLU P. Electromagnetic Environmental Effects Modeling, Simulation & Test Validation for Cosite Mitigation — An Overview[C]// IEEE LISAT 2008. NY, USA, 2008.
- [21] KLUENDER C, PILSAK T, HANNEKEN H, et al. Modern Vessels and Their Problems in EMC — Examples in Practice[C]// IEEE ISEMC 2010. NY, USA, 2010.
- [22] 柳志忠. 舰船雷达隐身技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(9): 33-36.
- [23] 吴晓光, 徐青. 世界现代轻型护卫舰[M]. 北京: 国防 工业出版社, 2009.
- [24] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction[J]. Science, 2001, 292(6): 77-79.
- [25] 陈红胜. 异向介质等效电路理论及实验的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [26] 吴小雨. 电磁超材料低散射特性研究[D]. 成都: 中国

科学院光电技术研究所, 2015.

- [27] 梅中磊, 张黎, 崔铁军. 电磁超材料研究进展[J]. 科技 导报, 2016, 34(18): 27-39.
- [28] 吴凯敏. 新型电磁超材料的微波工程应用关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [29] 齐美清. 超材料透镜和超表面对电磁波的调控及应用[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [30] HUNG C, CHIU T. Dual-band Reconfigurable Antenna Design Using Slot-line with Branch Edge[J]. IEEE Transations on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 508-516.
- [31] BABA A A, HASHMI R M, ESSELLE K P. Wideband Gain Enhancement of Slot Antenna Using Superstructure with Optimised Axial Permittivity Variation[J]. Elecronics Letters, 2016, 52(4): 266-268.
- [32] 郭经纬, 武晓琴, 刘妍, 等. 超材料在微波频段的研究 进展与展望[J]. 电子科学技术, 2017, 4(4): 129-136.
- [33] 牛凯坤, 徐辉, 朱东, 等. 电磁超材料与增益材料研究 现状与进展[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2017,

41(4): 24-33.

- [34] WU B, CHEN H, KONG J, et al. Surface Wave Suppression in Antenna Systems Using Magnetic Metamaterial[J]. Journal of Applied Physic, 2007, 101(11): 114913.
- [35] 程响响.用磁性异向介质抑制共面天线间的表面波[J]. 电波科学学报,2014,29(6):1140-1146.
- [36] LIN B, LI F, ZHENG Q, et al. Design and Simulation of a Miniature Thick-Screen Frequency Selective Surface Radome[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8): 1065-1068.
- [37] Chen H, Hou X, Deng L. Design of Frequency-Selective Surfaces Radome for a Planar Slotted Waveguide Antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8): 1231-1233.
- [38] ZHOU H, QU S, LIN B, et al. Filter-Antenna Consisting of Conical FSS Radome and Monopole Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 3040-3045.