

超导拖曳天线性能分析*

王石 王月清 邢捷

(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

摘要 常规拖曳天线通信存在噪声大、效率低及通信深度浅等缺点,从而严重影响潜艇战斗性能的发挥。为此可以使拖曳天线超导化,使超导材料的良好性能与拖曳天线性能相结合。具体分析对潜超导拖曳接收天线的信号接收和噪声抑制能力,并且与普通拖曳接收天线进行比较,得出超导拖曳接收天线信噪比特征的改善程度。

关键词 超导; 拖曳天线; 信号接收; 噪声抑制

中图分类号 TN914

1 引言

超导技术在潜艇拖曳天线中的应用成功将从根本上改善接收天线信噪比性能,这对于辐射效率极低的超低频、甚低频而言意义重大,能够实现提高潜艇深潜接收信号能力的同时,降低发射台站发射功率要求,这将促使潜艇通信技术产生突破性飞跃,大大增强潜艇作战效能,提高战斗力。

2 拖曳天线

拖曳天线是潜艇专用接收天线,是将电极对天线或磁心环天线以馈线拖在离艇尾数百米处。拖曳天线由天线、馈线、稳定部分、收放辅助设备四部分构成,如图 1 所示。

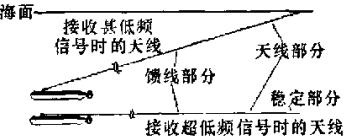


图 1 拖曳天线

3 超导技术在拖曳天线中的应用

超导拖曳环天线的设计如图 2。绕组由 n 匝超导材料制成的导线绕成,外层是静电屏蔽装置,

以降低电场干扰,在缺口处留出电流断开点,保持对地的电平衡。

4 超导拖曳天线的电参数

4.1 天线的方向图

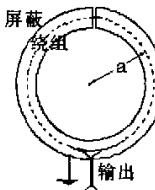


图 2 超导拖曳环天线

用于海面下接收水平磁场信号的环形天线,也是一种常用的天线,它是一个水平磁偶极子,如果天线的自谐振频率远高于最高工作频率,则这种天线的输出端开路电压与所连的磁通时间变化率的关系为:

$$u = -i\omega nBA\cos\varphi \quad (1)$$

u 为所感应的电压均方根值; ω 为磁通变化角频率; n 为天线匝数; B 为磁感应强度 (W/m^2); A 为环的有效面积 (m^2); φ 为磁矢量线与环行天线轴之间的夹角。

从天线感应电压表示式可以看出,方向函数为 $\cos\varphi$ 。

4.2 天线的有效高度

有效高度的定义:在保持实际最大辐射方向上的场强值不变的条件下,假设天线上的电流分布为均匀分布时天线的等效长度。对于环形天线,用“有效高度”这一术语并不适宜,但因历史的缘故,被一直沿用下来。

* 收稿日期:2007 年 1 月 6 日,修回日期:2007 年 2 月 4 日

作者简介:王石,男,讲师,研究方向:电磁场与电磁波、移动通信。王月清,女,博士研究生,副教授,研究方向:电磁场与电磁波。邢捷,男,硕士研究生,研究方向:水下通信。

环形接收天线的有效高度：

$$\begin{aligned} |E| &= |\eta||H| \\ |u| &= \omega\mu \frac{E}{\eta} A_n \cos\phi \end{aligned} \quad (2)$$

μ 为周围媒质磁导率； η 为媒质中的波阻抗。根据有效高度的定义：

$$h_e = \frac{\omega\mu}{\eta} A_n \quad (3)$$

当天线置于绝缘球形罩内时，由于罩外海水的影响，天线有效面积将变为 A_e 。

$$A_e = \frac{3A \exp(\gamma_2 a)}{[3 + 3a\gamma_2 + (a\gamma_2)^2]} \quad (4)$$

a 为球形天线罩的半径； $\gamma_2 = (i\sigma_2\mu\omega)^{1/2}$ ； σ_2 为海水的电导率。只有当 $a\gamma_2 \ll 1$ 时，才 $A_e \approx A$ 。

4.3 天线的阻抗

环天线的内部电阻：

$$R_o = \frac{2\pi a n^2}{\sigma_c C_w A_e} \quad (5)$$

其中 C_w 为环天线线圈的充填系数， $C_w = nA_w/A_e$ ； A_e 为线圈的正方形横截面积， $A_e = s \times s$ ； A_w 为单根导线截面积； a 为线圈的平均半径； n 为匝数； σ_c 为导线电导率。实际上这里只考虑了直流电阻。

环天线的外部电阻：

当环天线浸没于海水中时，由于损耗增加而引入外部电阻：

$$R_e = \frac{8n^2}{3\sigma a} \left(\frac{a}{\delta} \right)^4 \quad (6)$$

上式中， σ 为海水电导率， δ 为电磁波在海水中的集肤深度， a 为线圈平均半径， n 为匝数。

$$\frac{R_e}{R_o} = \frac{4A_e a^2 C_w}{3\pi \delta^2 \delta^2} \quad (7)$$

其中 δ 是电磁波在导线上的集肤深度。

如果用环形天线罩将天线封闭起来，与海水隔开，则外部电阻 R_e 为：

$$R_e = \frac{2n^2 A^2}{3\pi\sigma b \delta^4} \quad (8)$$

其中 b 是天线罩的半径， $b \ll \delta$ 。

环形天线当具有很高的阻抗，或者对地不平衡的状态下工作时，需要采用屏蔽技术，而超导拖曳环天线的电导率为无穷大，天线的电阻可以做得很小，这样天线的加工制作上将更简单，应用上更方便。

4.4 超导拖曳天线的品质因数

匹配网络的目的是为天线提供最大功率传输，为了达到这一点，网络必须消除电路的电抗分量，实际上，匹配网络具有一定特性损耗，但可以通过使网络超导将这些损耗减少到最少程度。在一项目研

究中，通过一个开端传输线超导谐振腔匹配一个环形天线，起一个电容性电抗元件的作用，效果很好。所以我们也可采取超导措施在甚低频和超低频段使天线达到匹配。

系统的品质因数：

$$Q = wL / (R_s + R_L + R_r) \quad (9)$$

式中 R_s 是匹配网络的电阻， R_L 是环形天线的损耗电阻， R_r 是环形天线的接收电阻。

超导拖曳环天线的匹配网络的电阻和损耗电阻都可以做到很小，从以上可以看出：超导拖曳环天线的总的电阻将会小于常规天线很多，而且天线辐射电阻基本不变的情况下，天线超导化后的损耗电阻大大降低，所以超导拖曳环天线在保证效率的前提下，天线的 Q 值会高于常规天线。

同时，如果出于带宽的需要，我们可通过温度控制，很容易降低 Q 值。

4.5 超导拖曳天线的效率

天线的特性一般用等效的集中电参数来描述。由于有效的电路分析工具可用于天线，所以这是方便的，外部电路部分方便地并入系统中，就拖曳环天线而论，只有两个方面需要考虑，即电阻和电抗。

在进行天线设计时，如想获得最大效率，电抗是一种不需要的量，因此需要消除或有效地抑制其对天线产生的效应。

如果接收天线存在损耗（同发射天线一样，包括感应损耗、介质损耗和热损耗），天线的输入电阻包括两部分：辐射电阻和损耗电阻，损耗电阻是天线中的传导电流所遇到的电阻叠加，同时还有一定的电阻伴随着用来抑制电抗的匹配或耦合网络进入系统。辐射电阻则带来需要的电阻，它由进入天线周围空间的能量辐射进入天线所必须的。

通常产生高的辐射电阻与损耗电阻比率，这做起来简单，但对于常规拖曳天线尺寸较大。天线的接收性能是天线的外形尺寸，波长和频率的函数。拖曳环形天线的辐射电阻由下式给出：

$$R_r = 3 \cdot 12 \cdot (10^4) \cdot (A_L / \lambda^2)^2 \quad (10)$$

在该式中， A_L 是回路区面积， λ 是波长，辐射电阻只与天线的尺寸有关。

拖曳环形天线的损耗电阻由下式给出：

$$R_L = (\chi f \mu / \sigma_c)^{1/2} \gamma / \gamma_0 \quad (11)$$

在该式中 μ 是磁导率， σ_c 是电导率，拖曳是 γ 环形天线半径， γ_0 是线路半径。

当回路中感生电流 I 时，天线消耗的功率：

$$P = I^2 R_R + I^2 R_L \quad (12)$$

式(12) 中的第一项代表天线的接收功率，第

二项代表天线的功率损耗。所以,拖曳环形天线在室温条件下的效率为

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{R_s}{R_s + R_t} \\ &= \frac{3.12(10^4)(A_L/\lambda^2)^2}{(x\mu/\sigma_e)^{1/2}\gamma/\gamma_0 + 3.12(10^4)(A_L/\lambda^2)^2}\end{aligned}\quad (13)$$

所以,当采用超导材料后,电导率 σ_e 理论上趋近于无穷大,明显可以看出,拖曳环天线的损耗电阻会非常小,相对于辐射电阻可以忽略,这样我们就可以从这方面说天线的效率接近 100%,比常规天线的效率大大提高了。

5 超导拖曳天线的噪声分析

5.1 超导拖曳天线的热噪声分析

热噪声是由于导体中电子的布朗运动而产生的,在导体中自由电子由于热能而不断运动,在运动中和其它粒子碰撞而随机地以折线路径运动,即布朗运动。在没有外界作用力的条件下,由于导体中的电子数目巨大,其随机运动又是相互统计独立的,因此由中心极限定理可知,热噪声是零均值的高斯分布。热噪声的频率范围很大,在接近 0 到 10^{12}Hz 内均匀分布。

由前面分析可知环天线的电阻:

$$R_a = \frac{2\pi a n^2}{\sigma_e C_w A_c} \quad (14)$$

C_w 为环天线线圈的充填系数, $C_w = n A_w/A_c$; A_c 为线圈的正方形横截面积, $A_c = s \times s$; A_w 为单根导线截面积; a 为线圈的平均半径; n 为匝数; σ_e 为导线电导。

环天线的热噪声,主要来源于 R_a ,因外部电阻都较小,所以:由 R_a 引起的开路热噪声电压平方谱密度为

$$S(\omega) = 4k_b T_k R_a = \frac{8\pi k_b T_a n^2}{\sigma_e C_w A_c} \quad (15)$$

当采用超导材料后,电导率 σ_e 理论上趋近于无穷大,而其它的参数基本不变,所以从上面公式明显可以看出,拖曳环形天线超导化后,我们就可以从理论上认为天线的热噪声为零。

5.2 超导拖曳天线的运动感应噪声分析

5.2.1 运动感应噪声的来源

我们常用的拖曳天线电缆,经受几个作用力,其中一个沿电缆轴向的拉力,拉力正比于长度也正比于拖曳速度的平方;另一个力是浮力,浮力正比

于长度。还受拖曳点的摆动、尾部的摆动、湍流等的作用力。如果只考虑前两个力时,电缆将成直的斜线。电缆在水中匀速运动,由于电缆有一定的刚度和水的阻尼作用,如果在拖曳点或尾部或其它部位发生振动,波沿电缆受到衰减,所以电缆上任何部分发生的振动都是局部的。所以,采取加长天线、加长稳定部分、安装振动阻尼,对减少天线振动幅度意义都不大。实验结果表明电缆在水中运动时自身所形成的湍流边界内的压力脉动,才是诱发天线横向振动的主要原因。馈线部分的长度以能避开艇周围电磁干扰为准则。

当一个力作用于电缆,产生向两端传播的机械波,这个波不是正弦波,而是一个波谱。水中的粘性摩擦力和电缆内部机械阻尼作用,使波在传播过程中受到衰减,电缆对某些波长响应强而对另一些波长响应弱,表现出滤波器的选择性。地磁能流密度平均约为 $0.5 \times 10^{-4}\text{T}$, 天线部分的振动,切割地磁场,在天线两端就会感应出电流。这就是常用的拖曳天线运动感应噪声的来源。天线作为由机械振动到产生电流的一个换能器,其响应也是有选择的,再一次表现出滤波的作用。

对波长较短的横向振动,从机械波的一个半周到另一个半周,其上感应的电流方向是相反的,相互抵消而受到削弱;而对波长较长的振动可能整个天线部分向一个方向运动,单位长度上感应的电流在整个天线上方向都是相同的,输出电流就是它们的和,所以电极对天线对长波长的振动比短波长的振动更为敏感。可以想象得到,运动感应噪声是色噪声。

5.2.2 运动感应噪声的谱密度

环形拖曳天线的灵敏度,要求沿线各点虽不能做到均匀也要尽可能平滑,灵敏度分布曲线要逐渐平滑地下降到达两端为零。图 3 是一个实际的拖曳环天线灵敏度分布曲线。

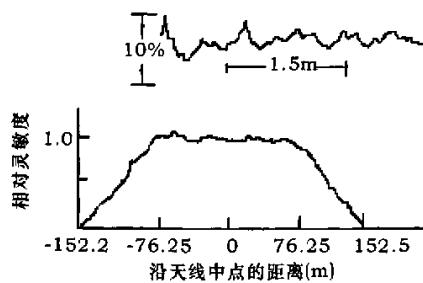


图 3 一实验拖曳环天线灵敏度分布曲线

从图可以看出,天线由于灵敏度不同,感应出

运动噪声,拖曳环天线的运动感应噪声谱密度可表示为

$$S_e(\omega) = C \frac{k_i^3 Q_i V^5}{d^2 \omega^5} \frac{\langle |U(k_i)|^2 \rangle}{|U(0)|^2} \quad (V^2/m^2/Hz) \quad (16)$$

其中 a :电缆半径; V :拖曳速度; k_i :电缆上横向机械波的波数; Q_i :横向机械波在电缆上传播的 Q 因数; $U(k_i)$:从灵敏度曲线导出的“天线方向图”的傅里叶变换; $\langle \rangle$:表示关于指定量 k_i 的闭函数的局部平均。

6 结束语

通过以上对超导拖曳天线的性能参数进行分析,我们可以看出:超导材料导电率大,还存在约瑟夫逊效应(电流从零递增到某一值时仍不产生电压);而常规拖曳天线通信的噪声大,效率低,通信深度浅。我们能够把超导材料的两个特性很好的

(上接第 49 页)

交战序列群抵御多重袭击的能力进行了评估,包括使用陆基拦截器与美国海军巡洋舰及驱逐舰载的“标准”-3 导弹进行协同作战的能力。

参加弹道导弹实战联盟的包括作战试验机构、美国北方司令部、美军太平洋司令部及美国战略司令部。这次试验为各军种的作战人员,尤其是美国陆军第 94 军团和导弹防御司令部,提供了使用精确的战术、技术和规程以保卫美国本土的重要机会。

试验系统包括 AN/TPY-2 雷达、陆基中段防御及联合预警雷达、C2BMC、“宙斯盾”弹道导弹防御系统,以及天基红外系统(新型卫星预警系统,目前正在研制中)。试验利用导弹防御系统训练器(MDSE)联接和控制弹道导弹防御系统的各个单元。在全国范围内的半实物实验室还进行了资源部署的实战构型试验和补充。

地面试验向计划办公室提供硬件与软件系统状态的详细信息,降低了通过拓展飞行试验计划提供这些性能数据的成本和计划需求,在新的导弹防御能力开发中起到了重要作用。地面试验能够模拟真实的威胁环境,同时引入地理分布式作战传感器与武器系统。作战系统通过各自作战通信联接

与拖曳天线相结合,使天线超导化后,性能有飞跃式的提高。

首先是超导拖曳天线比常规拖曳天线的效率提高很多,其次是超导拖曳天线比常规拖曳天线的噪声降低很多。所以,拖曳天线超导化后,天线的性噪比有了很大的改善,天线对微弱信号的接收能力增强,使天线的接收深度增加,对发射台站的功率要求降低。

参 考 文 献

- [1] 赵建生. 超导天线研究 [DB/OL]. www.zynet.com, 2005, 5
- [2] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播. 海军工程大学电子工程学院, 2002, 7
- [3] 田蔚. 材料物理性能 [M]. 北京航空航天大学出版社, 2004, 11

实时相应,使每个独立的 BMDS 系统在没有目标和拦截器发射的情况下处于实战环境。

4 结束语

随着战术激光、微波、粒子束、动能等新概念武器系统的不断研制和开发,美国的导弹防御系统和防御手段将更趋完善,在未来现代化战争或局部战争中,导弹防御系统必将扮演着极其重要的角色^[5]。

参 考 文 献

- [1] 徐世录, 侯振宁. 弹道导弹防御系统的现状与发展 [J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2004, (1): 34~39
- [2] 刘清合, 伍永军, 朱正中. 舰艇编队无源干扰防御反舰导弹的仿真研究 [J]. 舰船电子工程, 2006, 27(3): 151~153
- [3] 赵江, 徐世录. 反巡航导弹的现状与发展趋势 [J]. 飞航导弹, 2005, (5): 54~57
- [4] 孙伟. 美国加强空间优势和导弹防御系统 [J]. 国际航空, 2005, (2): 30~32
- [5] 温德义. 美国部署导弹防御计划新动向 [J]. 国防科技工业, 2006, (4): 60~61

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>