

超长波磁场接收天线磁致伸缩噪声研究

张建伟^{1,2}, 谢慧³, 周经国⁴

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 海军工程大学 科研部, 武汉 430033;
3. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 4. 海军司令部 通信部, 北京 100841)

摘要: 研究了海水中超长波拖曳磁场接收天线在地磁场中产生磁致伸缩噪声的机理, 导出了计算磁场拖曳天线磁致伸缩噪声功率谱的理论公式, 分析了天线灵敏度、电缆特性、地磁场等因素对磁致伸缩噪声的影响。用理论公式对拖曳天线磁致伸缩噪声电压进行了实例计算。试验测试结果表明, 计算曲线与测量曲线基本一致, 证明了理论公式的正确性。

关键词: 水下通信; 超长波; 全向接收天线; 磁致伸缩噪声

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1009-3486(2009)02-0031-04

On magnetostriuctive noise of super low frequency H-field receiving antenna

ZHANG Jian-wei^{1,2}, XIE Hui³, ZHOU Jing-guo⁴

(1. Inst. of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Office of Research and Development, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China; 3. College of Electronic Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China; 4. Communication Dept., Navy Headquarters, Beijing 100841, China)

Abstract: An analysis was made of the mechanics of magnetostriuctive noise generated by an underwater super low frequency towed H-field receiving antenna in the geomagnetic field. The theoretical formulas were deduced for calculating the power spectrum of the magnetostriuctive noise for both the submarine towed electrode-pair antenna and magnetic field antenna. The research dealt with the various contributing factors, such as antenna sensitivity profile, cable properties, geomagnetic field. An example for calculation was given to calculate the magnetostriuctive noise voltage by using the theoretical formulas. The experimental result shows that the predicted noise voltage level agrees well with experimentally measured noise data and that the formulas are proved to be correct.

Key words: underwater communication; super low frequency (SLF); magnetic receiving antenna; magnetostriuctive noise

超长波电波在地-电离层波导内传播, 每千公里的衰减只有甚低频电波的1/10, 水下接收天线接收SLF低端可用频率时, 其收信深度可达上百米, 适于远距离水下通信^[1]。目前, 实际应用中最为有效的接收天线是电极对拖曳天线^[2]。然而, 电极对天线接收超长波信号时存在收信盲区, 在同一个电缆中加装磁场天线, 可以消除电极对天线的盲区, 理论上可以构成全向接收天线^[3]。

磁场天线的噪声源主要是热噪声、运动感应噪声、磁致伸缩噪声和巴克豪森噪声^[4]。近年来, 国内外关于磁致伸缩噪声相关方面的研究较为少见, 文献[5]对水下磁场天线的纵向振动模型及磁致伸缩噪

收稿日期: 2008-10-16; 修回日期: 2008-12-04。

基金项目: 国家863计划资助项目(2007AAJ144)。

作者简介: 张建伟(1971—), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为光电信息工程与水下通信, E-mail: Zjwzbn@163.com。

声产生机理进行了理论分析，并制作了两根长磁场天线进行过测试，但该文献明确指出：“对于纵向波的情况则更不清楚了，无法预言其影响”。文中在文献[5]的基础上，详细推导了水下磁场天线的磁致伸缩噪声功率谱的计算公式，并与其试验测试结果相对照，证明了理论公式的正确性。

1 磁致伸缩噪声的有效噪声场

湍流边界层在电缆外表面上压力的波动引起了电缆的横向振动，而在电缆上的切向力的作用也引起了电缆的纵向振动。磁场拖曳天线的铁芯处于一定的地磁场环境中，地磁场对铁芯磁化形成了电缆纵向的偏磁通密度。当电缆在纵向上发生拉伸和压缩的应变时，铁磁材料受到纵向机械压力作用，从而引起铁芯在长度上的应变，使线圈中纵向偏磁通密度发生变化，磁通链的时间变化率在线圈中感应出的噪声电压就是磁致伸缩噪声。

磁场天线的铁芯能够被地磁场或剩余磁化的轴向磁场分量偏置。设铁芯在轴向偏置磁场 H_0 中磁化后形成的磁感应强度为 B_0 ，磁场天线长度为 l 。当铁芯在轴向上发生应变 $\Delta l/l$ 时，在轴向会产生一个磁感应偏移量 ΔB ，定义铁芯单位应变能够引起的磁感应强度的变化率为铁芯的磁应变率 ϵ ，则它们之间的关系为

$$\Delta B/B_0 = \epsilon \Delta l/l。 \quad (1)$$

铁磁材料的磁应变率数值较大，如 45 号坡莫合金的应变率约为 10^4 。设天线某点 z 处的轴向位移为 $x(z, t)$ ，那么轴向长度应变为 $\partial x(z, t)/\partial z$ ，得到对应的磁通变化量为

$$d\phi = B_0 \epsilon N(z) A(z) \partial x(z, t) / \partial z。 \quad (2)$$

式中： $N(z)$ 为 z 处的线圈匝数密度； $A(z)$ 为 z 处的铁芯横截面积。

将 $B_0 = \mu_r \mu_0 H_0$ 和天线灵敏度 $u(z) = \mu_r A(z) N(z)$ 同时代入式(2)，得：

$$d\phi = \epsilon \mu_0 H_0 u(z) \partial x(z, t) / \partial z。 \quad (3)$$

式中： μ_r 为铁芯相对磁导率。

由此，可得总的磁致伸缩噪声电压：

$$v(t) = \int \frac{d\phi}{dt} dz = \int \epsilon \mu_0 H_0 u(z) \frac{\partial^2 x(z, t)}{\partial z \partial t} dz; \quad (4)$$

电压的频谱形式为

$$V(\omega) = -i\omega \int \epsilon \mu_0 H_0 u(z) \frac{\partial X(z, \omega)}{\partial z} dz。 \quad (5)$$

轴向应变是以纵向机械波的形式沿电缆传播的。纵向机械波的衰减相对较小，因此产生于天线之外的干扰可以通过天线，所以 $X(z, \omega) = X(0, \omega) e^{ik_0 z}$ ，其中 k_0 是纵向机械波的复波数，式(5)可以改成：

$$V(\omega) = \omega k_0 X(0, \omega) \int \epsilon \mu_0 H_0 u(z) e^{ik_0 z} dz。 \quad (6)$$

当潜艇没有转向时， ϵ 和 H_0 是常量，对 $u(z)$ 进行傅立叶变换，得：

$$V(\omega) = \omega k_0 X(0, \omega) \epsilon \mu_0 H_0 U(-k_0)。 \quad (7)$$

式中： $U(k)$ 为 $u(z)$ 的傅立叶变换式。

磁致伸缩噪声的有效噪声场(ENF)功率谱密度 $S_e(\omega)$ 为 $V(\omega)$ 除以磁场天线有效长度 l_e 并平方，已知 $l_e = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \int \mu_r A(z) N(z) dz = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \int u(z) dz$ ^[6]，则得：

$$S_e(\omega) = (\omega \mu_0 H_0 \delta \epsilon)^2 S_X(\omega) |k_0 U(-k_0) / U(0)|^2 / 2。 \quad (8)$$

式中： $S_X(\omega)$ 为 $x(0, t)$ 的功率谱密度； δ 为超长波电波在海水中的穿透深度。

式(8)说明，要降低磁致伸缩噪声 ENF，就要选择使比值 $|U(-k_0) / U(0)|$ 尽量小的 $u(z)$ ，其中 $U(-k_0)$ 取决于 $u(z)$ 的低阶不连续点的大小， $U(0)$ 是 $u(z)$ 曲线与 z 轴所围图形的面积，因此确定 $u(z)$ 函数是减小磁致伸缩噪声的办法之一， $u(z)$ 曲线应尽可能地长和光滑。表 1 列出几种符合条件的函数 $u(z)$ ，以及对应傅立叶变换 $U(k) / U(0)$ 的近似表达式。

表 1 3 个傅立叶变换对

Tab. 1 Three Fourier transform pairs

$u(z)$	$U(k_0)/U(0)$
$u_1(z) = \begin{cases} 1 & z \leq l \\ 0 & z > l \end{cases}$	$\frac{\sin k_0 l}{k_0 l}$
$u_2(z) = \begin{cases} 1 - (z/l)^2 & z \leq l \\ 0 & z > l \end{cases}$	$-\frac{3\cos k_0 l}{(k_0 l)^2}$
$u_3(z) = \begin{cases} [1 - (z/l)^2]^2 & z \leq l \\ 0 & z > l \end{cases}$	$-\frac{15\sin k_0 l}{(k_0 l)^3}$

从表 1 可知,和直线型的灵敏度曲线天线的噪声 ENF 相比,其他各级细长光滑天线噪声至少正比于 $(k_0 l)^{-1}$;典型电缆的波数 $|k_0| = 0.15$ 、天线长度 $2l = 300$ m 时,采用抛物线天线有可能比直线型天线降低 10 dB 左右的噪声 ENF,可见采用细长光滑曲线对噪声的减小量并不是很大,因为纵波的波长要比横波的波长大。

2 磁致伸缩噪声谱分析

铁芯的轴向应变带给天线的噪声是一个主要的噪声源,必须加以控制。选择较低磁应变率的铁磁材料,显然是利于减小噪声 ENF。除此之外,还可以采用以下办法。

1) 选择合适的天线灵敏度曲线 细长光滑的灵敏度曲线是降低磁致伸缩噪声的有效途径。前面已经分析得到,使天线灵敏度曲线足够长且足够光滑,在天线两端逐渐减小天线的灵敏度,要比直线型的天线磁致伸缩噪声 ENF 小近 10 dB。由于纵向波的波长比较长,曲线两端逐渐减小的过程要超过十几米才会有效果。

2) 减小天线轴向的磁场 H_0 即使天线与地磁场垂直也仍有可能会在铁芯中有剩余磁化强度的存在,减小铁芯中的轴向磁场要通过退磁电路来控制。但这会带来以下问题:由于在天线电缆中增加了退磁电路,从而增加了天线电缆的浮力负担,同时也引入了退磁电流噪声,使天线结构更加复杂化。所以在可能的情况下要尽力避免。

3) 利用能释放应变的铁芯构造 在分析噪声原理时,实际上假设了铁芯中的铁磁材料的应变和铁芯本身的应变相等。真正引发磁应变的原因是铁芯中纯铁磁材料本身长度上的应变。可以采取特定的铁磁材料结构,使得铁芯发生应变时铁磁材料并不发生或发生较小的应变量。能够证明,磁带绕在轴向圆柱上时存在某个零应变角,这个角度是磁芯材料泊松比的函数,不管是在压力还是在拉力作用下铁磁材料的总长度都是恒定或者应变很小的^[7]。利用这种螺旋式的铁芯结构来设计磁场天线,可以有效地降低磁致伸缩噪声 ENF。但是,铁芯螺旋后会使铁芯的磁导率 μ_c 大大下降,同时加大了铁芯的重量。

4) 控制电缆的机械属性 增大电缆的密度和电缆直径,可以改善电缆波数和品质因数结构,但是由于电缆浮力受限而不可能有太大的变化;电缆半径也受限于回收时的体积限制,在减小磁致伸缩噪声 ENF 中的作用有限。

3 仿真计算

用带有应变规和加速计的拖曳电缆可以对运动感应噪声进行测量。测量方法及条件可以参考文献[5],测量结果如图 1、2 所示。图中的测量曲线由文献[5]给出,其中图 1 是使用应变规测量的纵向应变频谱 $S_x(\omega)$;图 2 是对于美国林肯实验室的 15 m 长磁场天线所作的有关磁致伸缩噪声电压实际测量值以及按照式(8)推导可得的公式推导值。

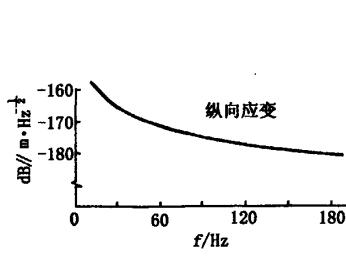


图 1 在 12 kn 航速上,测得的拖曳缆纵向应变曲线

Fig. 1 Measured longitudinal strain curve at 12 kn

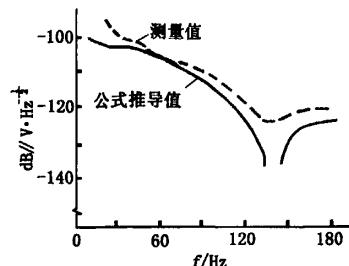


图 2 在 12 kn 航速上,直接测得的噪声电压与由公式推导出的噪声电压比较图

Fig. 2 Directly-measured noise voltages compared with derived data at 12 kn

根据式(8),可得到磁致伸缩噪声电压谱

$$S_V(\omega) = l_e^2 S_x(\omega) = (\alpha \mu_0 H_0 \delta \epsilon l_e)^2 |k_0 U(-k_0)/U(0)|^2 S_x(\omega)/2. \quad (9)$$

式中的变量可由以下步骤获得。

步骤 1 由文献[5]可知,15 m 长磁场天线满足:

$$32 = 10 \log_{10} (90 \pi \mu_0 H_0 \delta \epsilon l_e / 100), \quad (10)$$

由此可求得 $\mu_0 H_0 \delta \epsilon l_e$ 。

步骤 2 由图 1 得到纵向应变频谱 $S_x(\omega)$, 又由 $S_x(\omega) = |k_0|^2 S_x(\omega)$ 可求得 $S_x(\omega)$ 。

步骤 3 由表 1 中的抛物线曲线 $u_2(z)$ 表达式可得出 $U(k_0)/U(0)$ 。

至此,求得式(9)所有未知参量,画出图 2 中公式推导值曲线。

由于应变规的校准完全是由它们从电缆轴的标称偏移推算出的,通常它们的灵敏度比这一过程要低,这是因为安装时所需的实际改进使得电缆局部变硬。考虑到这些差别,图 2 中的公式推导值与测量值之间的一致性就相符合了。

推导值曲线和测量值曲线之间相当紧密的吻合,有力地证实了磁致伸缩噪声公式推导的正确性。

4 结 论

由试验测试结果可知,水下磁场天线的磁致伸缩噪声功率谱的表达式是正确的。通过对表达式的分析可知,设计水下拖曳磁场接收天线时,天线的灵敏度曲线对运动感应噪声起着至关重要的作用。减小磁场天线的磁致伸缩噪声可以考虑以下办法:选择的天线灵敏曲线应足够长且足够光滑,天线两端逐渐减小;采用退磁电路减小天线轴向的磁场;利用能释放应变的铁芯构造以及控制电缆的机械属性,增大电缆的密度和电缆直径。

参考文献(References):

- [1] 谢慧,高俊,柳超.超低频拖曳全向接收天线运动感应噪声研究 [J].电波科学学报,2007,22(5):861—866.
XIE Hui, GAO Jun, LIU Chao. Analysis of motion-induced noise of super low frequency towed omni-directional receive antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(5):861—866. (in Chinese)
- [2] RIVERA D F. Submarine towed communication antennas: Past, present and future [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004, 46(1):23—36.
- [3] KAPLAN B Z, SUISSA U. Treatment of extremely low frequency magnetic and electric field sensors via the rules of electromagnetic duality [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1998, 34(4):2 298—2 305.

(下转第 82 页)

测一个量子态发送,可以计算, $I_{AE}=0.292\ 9$, $I_{AB}=0.018\ 4$ 。显然,采用单一基窃听要比广义测量窃听获取的信息量要多,并且对 Alice 与 Bob 之间的互信息影响相对较小。可见,对于 Eve 来说,单一固定基窃听是一种比较优越的窃听方法。

4 结 论

利用概率论和信息论对单一基窃听方式下 B92 协议的安全性进行了研究,得出了最佳窃听角度和信源概率分布之间的关系及 Eve 和 Bob 从 Alice 处可能获得的信息量。与广义量子测量窃听相比,单一基窃听方法所引起的误码率比较小,从 Alice 处获得的信息量相对较高,且对 Alice 和 Bob 之间的平均互信息影响相对较小。以上结论对合法通信者的安全通信和对窃听者的检测制定标准具有一定参考价值。

参 考 文 献 (References) :

- [1] SHOR P W. Algorithms for quantum computation:Discrete logarithms and factoring [C]// Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1994.
- [2] BENNETT C H. Quantum information and computation [J]. Physics Today, 1995,48(10):24—30.
- [3] 马瑞霖. 量子密码通信 [M]. 北京:科学出版社,2006.
- [4] BENNETT C H, BRASSARD G, MERMIN N D. Quantum cryptography without bell's theorem [J]. Phys. Rev. Lett., 1992,68(5):557—559.
- [5] BENNETT C H. Quantum cryptography using any two non-orthogonal states [J]. Phys. Rev. Lett., 1992, 68 (21):3 121—3 124.
- [6] BUSCH P, PEKKA L, MITTELSTAEDT P. The Quantum Theory of Measurement [M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [7] EKERT A K, HUTTNER B, PALMA G M, et al. Eavesdropping on quantum-cryptographical systems [J]. Phys. Rev. A, 1994,50(2):1 047—1 056.
- [8] 张 涌,邓仕兰,毛 敏,等. 只用两个偏振态的量子密码术方案 [J]. 华东师范大学学报,1998,6(2):40—43.
ZHANG Yong, DENG Shi-lan, MAO Min, et al. A new quantum cryptography protocol using only two photon polarization states [J]. Journal of East China Normal University, 1998,6(2):40—43. (in Chinese)
- [9] 曾贵华,王新梅,诸鸿文. 量子密码中 BB84 的信息论研究 [J]. 通信学报,2000,21(6):295—298.
ZENG Gui-hua, WANG Xin-mei, ZHU Hong-wen. Information investigation for BB84 protocol in quantum cryptography [J]. Journal of China Institute of Communications, 2000,21(6):295—298. (in Chinese)

(上接第 34 页)

- [4] 陈卫东,王永斌,屈晓旭. 超低频拖曳磁场天线设计中的热噪声研究 [J]. 海军工程大学学报,2004,16(2):51—55.
CHEN Wei-dong, WANG Yong-bin, QU Xiao-xu. Thermal noise on design of extremely low frequency trailing H-field antenna [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2004,16(2):51—55. (in Chinese)
- [5] BURROWS M L. On the Design of a Towed ELF H-field Antenna [R]. Massachusetts: Lincoln Laboratory, MIT, 1972.
- [6] 陈卫东. 超低频拖曳磁场天线研究 [D]. 武汉:海军工程大学,2004.
- [7] MANNING J E. Vibration and strain-induced noise from the ELF flexible antenna [R]. Massachusetts: Lincoln Laboratory, MIT, 1971.

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>