

文章编号: 2095-4980(2020)05-0847-04

基于电驻极体运动的小型化低频发射天线

庄凯杰¹, 耿军平^{*1}, 马波², 吴昊博¹, 许云霄¹, 韩家伟¹, 王堃¹, 金荣洪¹, 梁仙灵¹

(1.上海交通大学 电子工程系, 上海 200240; 2.中国空间技术研究院 山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 低频电磁波具有较低的传输损耗, 但是传统的谐振式天线往往尺寸较大, 工程应用的难度很大。运流电流可以产生时变的辐射电磁场, 并且工作频率不再受传统谐振天线的尺寸限制, 这为小型化的低频发射天线提供了一种有价值的思路。通过理论计算, 研究了振动电驻极体的电磁场和等效模型, 通过仿真进行验证, 并对基于电驻极体机械运动的小型化的低频天线进行了有益的探索。研究表明, 振动的电驻极体可实现类似于微小电流元的辐射特性。

关键词: 机械天线; 电偶极子; 小型化低频天线

中图分类号: TN822^{+.1}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018363

Miniaturized low frequency transmitting antenna based on vibratory electret

ZHUANG Kaijie¹, GENG Junping^{*1}, MA Bo², WU Haobo¹, XU Yunxiao¹, HAN Jiawei¹, WANG Kun¹,
JIN Ronghong¹, LIANG Xianling¹

(1.School of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2.Shandong Institute of Space Electronic Technology, China Academy of Space Technology, Yantai Shandong 264003, China)

Abstract: Low-frequency Electro-Magnetic(EM) waves have low transmission loss, but the traditional resonant antennas have large size at these frequencies which results in difficulties in engineering application. Convection current can generate time-varying electromagnetic fields, and the operational frequency is independent of the antenna size, which gives a new method to produce low-frequency EM radiation. In this paper, the electromagnetic fields and the equivalent model of the vibratory electret are studied through theoretical calculation and simulations. Some sound explorations are conducted to realize low frequency miniature antenna based on the vibratory electret. The research results show that the vibratory electret shares the same electromagnetic characteristics with the current element.

Keywords: mechanical antenna; electric dipole; miniaturized low frequency antenna

低频电磁波传输损耗小, 在海水中较好的趋肤深度, 适用于水下通信以及远距离船舶通信^[1]。同时, 低频电磁波还被广泛应用于地下勘测和矿井通信^[2-5]。但是传统的谐振式天线尺寸庞大, 例如常见的山谷天线和平地铁塔天线, 由于目标规模大, 容易受到攻击, 且维修困难。另一方面, 这类天线频带很窄, 大大限制了低频电磁波的应用范围^[6-10]。有学者提出了机载的甚低频拖曳天线, 相较于山谷天线提升了灵活度, 但是其应用还是受限于载体, 不够便携^[11-13]。

探索小型化高性能低频天线, 尤其是新机理的低频天线一直是天线研究人员的目标^[14-15]。带电粒子的变速运动产生的辐射为低频天线的设计提供了一种新的思路。通过控制带电粒子的运动周期, 以机械运动的方式, 可以产生等效的低频辐射电磁场。

本文主要研究电驻极体的机械振动产生的辐射电磁场, 通过理论分析其电磁等效模型, 并且使用 Matlab 仿真工具进行仿真分析, 从而对基于电驻极体机械振动的小型化低频天线进行了有益的探索。

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2019-07-30

作者简介: 庄凯杰(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线理论、电磁超材料等。email: zkj811609003@sjtu.edu.cn

*通信作者: 耿军平 email: gengjunp@sjtu.edu.cn

1 电驻极体机械运动产生的电磁场

1.1 简化模型

振动电驻极体可以简化为自由空间中一对振荡电偶极子, 如图 1 所示。粒子在 xoz 平面振动, 所带的电荷量为 q , 极性相反, 距离为 L , 上下振动的角度为 β , 振动的周期为 f , r 为场点到坐标原点的距离 (令 $r \gg L$)。所有参数的单位均为国际标准单位。

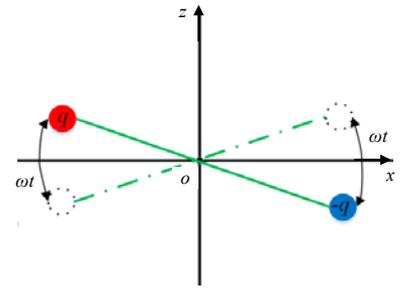


Fig.1 Simplified model of vibratory electret
图 1 振动电驻极体的简化模型

1.2 电驻极体机械运动产生的场

为了简化分析, 假定粒子振动的角度 β 极小, 此时粒子可以近似看成沿 z 轴做简谐运动, a_z 为单位向量的 z 轴分量。以正电粒子为例, 如果将 t 时刻带正电粒子的运动等效为一段长为 L 的电流, 由正电粒子的运动速度:

$$v(t) = a_z \omega \frac{L\beta}{4} \sin \omega t \quad (1)$$

可以求得等效的电流强度为:

$$|I| = \left| \frac{q}{t} \right| = \left| \frac{qv}{L} \right| = \left| q\omega \frac{\beta}{4} \sin \omega t \right| \quad (2)$$

因为正负粒子的速度相反, 因此整个模型的等效电流如式(3)所示:

$$I = a_z q\omega \frac{\beta}{2} \sin \omega t \quad (3)$$

根据电流元的辐射公式可以直接写出该模型的磁位和电磁场表达式:

$$A = a_z I_0 \frac{\mu_0 L}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (4)$$

远场表达式:

$$\begin{aligned} E_\theta &= j \frac{\eta_0 I_0 L}{2\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \\ H_\phi &= j \frac{I_0 L}{2\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $I_0 = q\omega \frac{\beta}{2} \sin \omega t$ 。

从公式(5)可以看出, 场的强度正比于驻极体的电荷量、振动的周期、相对间距以及振动的角幅度。此外, 可以看出场的频率和驻极体机械振动的周期一致, 因此可以调节驻极体的振动频率, 实现频率调制。

采用振动的电偶极子的等效模型, 分析了其远场电磁特性, 从而解释振动的电驻极体能够产生类似于电流元的辐射特性。

1.3 振动电驻极体的远近场性能仿真

为了形象地展示振动电驻极体的辐射特性, 本文参考了市面上驻极体薄膜的表面电荷密度, 并假定工作频率 $f=10$ kHz, 驻极体带电量 $q=0.001$ mC, 驻极体间距 $L=0.01$ m, 振动的角度 $\beta=0.1$ rad。根据电动力学运动粒子电场公式, 用 Matlab 仿真工具计算了振动电驻极体电场图, 如图 2 所示。可见, 随着电场从近场区过渡到远场区, 振动电驻极体的电磁特性逐渐类似于电流元。

图 3 是利用 Matlab 仿真工具, 仿真的振动电驻极体远场方向图。可以看出, 在 xoz 平面振动的电驻极体, 其远场电场幅值与方位角无关。且在 $\theta=90^\circ$ 以及 270° 处, 电场幅值取得最大值。

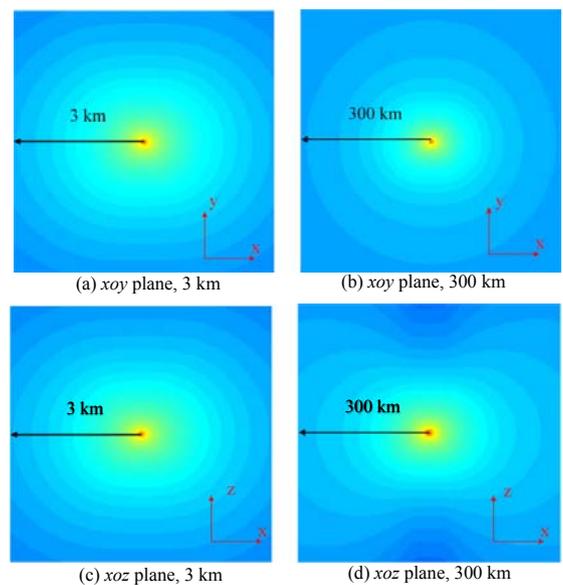


Fig.2 Electric field distribution of vibratory electret
图 2 振动电驻极体电场分布

带电粒子变加速运动辐射的电磁场反过来对带电粒子产生阻力，也就是所谓的“辐射阻尼”。因此振动电驻极体天线在辐射电磁波的同时，需要不断克服辐射阻尼做功。

现实实现中，理想电流元的辐射效率非常低，无法在工程中实现。而正如本小节讨论的那样，基于机械运动的电驻极体低频发射天线具备类似电流元的辐射特性，由于辐射能是通过机械能转化而来，不存在电路匹配的问题，因此效率会比电流元高很多。

1.4 振动电驻极体的传输距离

为了验证本文所提出的电驻极体机械天线的实用价值，本小节讨论该天线在海水中的传输距离，天线工作条件均按 1.3 节所设。假设接收机位于 x 轴上，灵敏度为 -130 dBmV/m，海水中的衰减常数 α 用式(6)等效：

$$\alpha \approx \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} = 0.004\sqrt{f} \quad (6)$$

海水中的路径损耗为 $20\alpha D \lg e$ 。其中 D 为接收机与天线的距离； e 为自然常数。

从图 4 中可以看出，得益于甚低频电磁波在海水中的低衰减，在接收机灵敏度大于 -130 dBmV/m 的条件下，本文所提出的振动电驻极体，大约可以在海水中传输 50 m。而在真空中这个距离可以延长至上百公里。

2 结论

本文分析了基于机械运动的电驻极体低频发射天线的电磁场特征。与传统的谐振式天线不同，本文提出天线的工作频率由机械运动的周期决定，且不需要满足谐振的尺寸要求。因此，这种新形式的天线在低频时拥有极小的电尺寸，具有很大的应用价值。

参考文献：

[1] 郑强,杨日杰. 电磁波在海水中的传播特性研究[J]. 电声学术, 2013,37(2):33-35. (ZHENG Qiang,YANG Rijie. Propagation properties of electromagnetic wave in sea water[J]. Audio Engineering, 2013,37(2):33-35.)

[2] 操龙兵,朱建铭. 矿井中低频通信系统中接收天线的设计[J]. 工矿自动化, 1998(1):26-27. (CAO Longbing,ZHU Jianming. Design of receiving antenna in medium and low frequency communication system of mine[J]. Industry and Mine Automation, 1998(1):26-27.)

[3] 王元新. 基于地下 SLF/ELF 辐射源的地面及电离层电磁场特性的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013. (WANG Yuanxin. Study on the characteristics of ground and ionospheric electromagnetic field excited by underground SLF/ELF radiator[D]. Shanghai,China:Shanghai Jiaotong University, 2013.)

[4] 贾雨龙,李凤霞,陶晋宜,等. 矿层无线透地系统中甚低频电磁波的传播特性[J]. 工矿自动化, 2015,41(9):31-33. (JIA Yulong,LI Fengxia,TAO Jinyi,et al. Transmission characteristics of very low frequency electromagnetic wave of mine-seam wireless through-the-earth communication system[J]. Industry and Mine Automation, 2015,41(9):31-33.)

[5] 刘亚军,刘锋,杨德斌,等. 地下远距离通信系统传播信号监测仿真[J]. 计算机仿真, 2016,33(10):148-152. (LIU Yajun, LIU Feng,YANG Debin,et al. Simulation of signal propagation for the long-distance underground communication systems[J]. Computer Simulation, 2016,33(10):148-152.)

[6] 沃特. 甚低频无线电工程[M]. 北京:国防工业出版社, 1973:87-122. (WATT A D. VLF radio engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1973:87-122.)

[7] 王晓蓓,柳超. 甚低频十三塔天线的特点与分析[J]. 舰船电子工程, 2009,29(11):87-89. (WANG Xiaobei,LIU Chao. Characteristics and analysis of VLF trideco antenna[J]. Ship Electronic Engineering, 2009,29(11):87-89.)

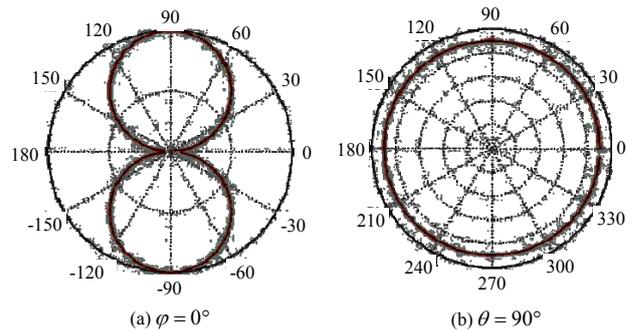


Fig.3 Normalized electric field pattern simulated by Matlab when $\varphi = 0^\circ$ and $\theta = 90^\circ$

图 3 $\varphi = 0^\circ$ 及 $\theta = 90^\circ$ 时 Matlab 仿真的电场归一化方向图

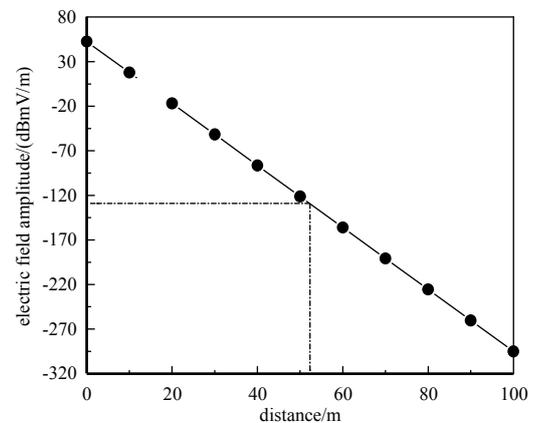


Fig.4 Attenuation diagram of vibratory electret's electric field amplitude in sea water

图 4 振动电驻极体在海水中的电场幅值衰减图

- [8] 柳超,梁玉军,刘其中,等. 甚低频 T 形天线阵地网损耗电阻的分析与计算[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(6):1026-1030. (LIU Chao,LIANG Yujun,LIU Qizhong,et al. Analysis and calculation of ground loss resistance for a VLF T-type antenna array with the ground screen[J]. Journal of Xidian University, 2008,35(6):1026-1030.)
- [9] 俞伟,殷沐德,屈晓旭. 甚低频 T 形天线的辐射特性仿真计算[J]. 船舶设计技术交流, 2004(4):33-36. (YU Wei,YIN Mude,QU Xiaoxu. Simulation of radiation characteristics of very low frequency T-shaped antenna[J]. Chuanbo Sheji Jishu Jiaoliu, 2004(4):33-36.)
- [10] 章志广. 甚低频水平低架发射天线技术研究[D]. 北京:中国舰艇研究院, 2012. (ZHANG Zhiguang. Research on very low frequency horizontal low-stand transmitting antenna technology[D]. Beijing:China Ship Research Institute, 2012.)
- [11] 郑小洪,侯志强,李冀鑫. 甚低频拖曳天线的稳态构型设计[J]. 海军航空工程学院学报, 2011,26(6):628-632. (ZHENG Xiaohong,HOU Zhiqiang,LI Jixin. Calculation of steady state configuration of very low frequency towed antenna[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011,26(6):628-632.)
- [12] 贾忠湖,郑小洪,侯志强,等. 机载甚低频拖曳天线非线性振动分析[J]. 应用力学学报, 2012,29(5):553-558. (JIA Zhonghu,ZHENG Xiaohong,HOU Zhiqiang,et al. Nonlinear vibration analysis of airborne VLF towed antenna[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012,29(5):553-558.)
- [13] 郑小洪,侯志强,韩维,等. 甚低频拖曳天线的稳态动力学研究[J]. 机械工程学报, 2012,48(11):166-171. (ZHENG Xiaohong,HOU Zhiqiang,HAN Wei,et al. Research on the steady dynamic of VLF trailing antenna on an aircraft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(11):166-171.)
- [14] 连铎,郭庆功. 一种小型化超短波单极子天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):416-419. (LIAN Ye, GUO Qinggong. Design of a small ultra-short wave monopole antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):416-419.)
- [15] 何若愚,张洪波,苏彦,等. 月基甚低频天线技术研究[J]. 天文研究与技术, 2017,14(1):17-24. (HE Ruoyu,ZHANG Hongbo,SU Yan,et al. Low frequency antenna on the moon[J]. Astronomical Research & Technology, 2017,14(1):17-24.)

(上接第 846 页)

- [9] 吴兵,夏浩森,李武建. 一种超宽带等效采样接收机的设计与实现[J]. 雷达科学与技术, 2017,15(4):443-448. (WU Bing,XIA Haomiao,LI Wujian. Design and implementation of an ultra-wideband equivalent sampling receiver[J]. Radar Science and Technology, 2017,15(4):443-448.)
- [10] 李路. 0.4-18 GHz 超宽带接收机测试系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (LI Lu. Design and implementation of 0.4-18 GHz ultra-wideband receiver test system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology, 2016.)
- [11] 李欣. Tc-DTR 接收机的优化设计及其抗窄带干扰性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2017. (LI Xin. Optimization design of Tc-DTR receiver and its anti-narrowband interference performance[D]. Changsha,China:Hunan University, 2017.)
- [12] 葛君山. 海面多源噪声的高阶循环频谱分析研究[J]. 舰船科学技术, 2016,38(6):64-66. (GE Junshan. Research on high-order cyclic spectrum analysis of multi-source noise on sea surface[J]. Ship Science and Technology, 2016,38(6): 64-66.)
- [13] 吴思聪. 用于光互连的宽带光接收机前端模拟电路的研制[D]. 天津:天津大学, 2017. (WU Sicong. Development of front-end analog circuit for broadband optical receiver for optical interconnection[D]. Tianjin,China:Tianjin University, 2017.)
- [14] 叶廷东. 船模耐波性试验测量信号分析中的 FFT-FS 频谱细化技术研究[J]. 舰船科学技术, 2017,39(14):55-57. (YE Tingdong. Study on FFT-FS spectrum refinement technology in signal analysis of ship model wave resistance test[J]. Ship Science and Technology, 2017,39(14):55-57.)