



小型低频发射天线的研究进展

崔勇 吴明 宋晓 黄玉平 贾琦 陶云飞 王琛

Research progress of small low-frequency transmitting antenna

Cui Yong Wu Ming Song Xiao Huang Yu-Ping Jia Qi Tao Yun-Fei Wang Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 208401 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200792

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200792>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于驻极体材料的机械天线式低频/甚低频通信磁场传播模型

Magnetic field propagation model of low frequency/very low communication based on mechanical antenna of electret

物理学报. 2020, 69(15): 158401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200314>

基于旋转永磁体的超低频机械天线电磁特性分析

Performance analysis of spinning magnet as mechanical antenna

物理学报. 2019, 68(18): 188401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190339>

稀土永磁体及复合磁体反磁化过程和矫顽力

Magnetization reversal and coercivity in rare-earth permanent magnets and composite magnets

物理学报. 2019, 68(17): 177501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190364>

磁致伸缩/压电层叠复合材料磁电效应分析

Magnetoelectric effect analysis of magnetostrictive/piezoelectric laminated composites

物理学报. 2018, 67(7): 077702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172307>

AgNbO₃压电纳米材料压-电-化学耦合研究

Piezo-electrochemical coupling of AgNbO₃ piezoelectric nanomaterials

物理学报. 2018, 67(10): 107702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180287>

新型二维压电声子晶体板带隙可调性研究

Tunable bandgaps in novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal slab

物理学报. 2018, 67(21): 214208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180611>

综述

小型低频发射天线的研究进展*

崔勇¹⁾ 吴明¹⁾ 宋晓^{2)†} 黄玉平³⁾ 贾琦⁴⁾ 陶云飞³⁾ 王琛¹⁾

1) (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

2) (北京航空航天大学网络空间安全学院, 北京 100191)

3) (北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

4) (北京圣非凡电子系统技术开发有限公司, 北京 102209)

(2020年5月26日收到; 2020年6月19日收到修改稿)

机械天线是通过电荷或磁偶极子的机械运动产生电磁场辐射的新型低频发射天线. 新型的辐射原理使其能够打破传统天线波长对物理尺寸的约束, 从而以较小的尺寸实现低频通信, 为对潜通信、透地通信等场景提供了颠覆性的解决方案. 近年来机械天线吸引了国内外众多研究团队的关注, 是低频通信领域的研究热点. 本综述简要回顾了传统的低频发射天线发展情况, 详细介绍了机械天线不同实现方案的研究进展, 对比了各方案的辐射性能与优缺点, 并针对机械天线信号调制方法进行了探讨, 最后展望了机械天线的未来研究方向.

关键词: 机械天线, 低频通信, 磁场辐射, 驻极体, 永磁体, 压电效应

PACS: 84.40.Ba, 41.60.-m

DOI: 10.7498/aps.69.20200792

1 引言

甚低频 (very low frequency, VLF) 及更低频段电磁波的频率小于 30 kHz, 波长大于 10 km, 具有传播距离远和抗电磁脉冲干扰能力强等特点^[1], 可通过大气层实现超远距离传播; 且相较于高频波段, 低频电磁波在海水中衰减减小, 对于对潜通信具有重大意义; 其优异的穿透性能使其在透地通信和地质勘测等领域也发挥着重要作用.

由于低频信号波长较长, 为实现有效电磁辐射, 现有陆基低频发射系统规模庞大, 战时目标明显, 易遭受打击; 且即便体积庞大, 低频发射天线尺寸仍远小于其波长, 为电小天线, 辐射效率有限. 而作为顽存机动方案的车载、机载式低频天线仍具备较大且明显的可视目标, 生存能力较差, 且维护

成本高昂.

为解决现有低频通信系统存在的问题, 2017年, 美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提出了“机械天线”项目 (A Mechanically based antenna, AM-EBA)^[2], 旨在研究一种小型、轻量化、低功耗的低频发射天线. 目前, 国内外已有二十余家团队正致力于机械天线领域, 对机械天线理论模型、实现方案、优化设计以及信号调制方案等展开了多方面的研究.

本文对当前机械天线领域的研究进展进行了阶段性总结, 描述了现有机械天线的原理及其实现方案, 整理了各种机械天线方案的创新点, 并对现有方案的性能进行了对比, 为下阶段机械天线领域的研究重点进行了分析与讨论.

* “十三五”军委装备发展预研领域基金 (批准号: 61405180302)、国家自然科学基金 (批准号: 51707006) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4192033) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: songxiao@buaa.edu.cn

2 传统低频天线

2.1 大规模陆基低频发射系统

早在 1917 年, 法国就使用甚低频频段的电磁波成功进行了 30 km 外的 10 m 水深对潜通信. 二战期间甚低频通信技术取得了很大的发展, 德国在萨克森州建设了“歌利亚 (Goliath)”甚低频发信台, 如图 1(a) 所示, 该台工作频段为 15—25 kHz, 最大发信功率为 1800 kW, 采用 3 具伞状天线, 主天线塔高为 204 m, 天线阵基线长为 2.4 km, 总占地面积为 2.63 km². 二战后, “歌利亚”发信台被苏联部队接管并利用这些设备于 1952 年在下诺夫哥罗德建成红海军发信台; 各海军强国也纷纷开始建设自己的甚低频发射系统. 美国在本土、夏威夷、波多黎各、日本、英国、冰岛、土耳其和澳大利亚等地建造了能够实现全球通信的甚低频对潜通信网络. 美国位于密歇根州的甚低频发射台站如图 1(b) 所示.

尽管相较于高频电磁波, 甚低频电磁波穿透能力较强, 但现有甚低频陆基通信系统功耗下, 仍仅能实现水深 10—20 m 以内的对潜通信^[3]. 为实现更深的对潜通信, 需依靠超低频或更低频段通信系统^[4,5].

对超低频以下频段而言, 由于波长极长, 超出了电离层高度, 电磁波只能以垂直极化的横电磁波 (transverse electromagnetic wave, TEM) 传播, 然而垂直架设数十公里长的天线难以实施, 因此超低频发射天线多选择低架水平天线.

美国在“桑格文 (Sanguine)”计划与“水手 (surface ELF antenna for addressing remotely employed receivers, SEAFARER)”计划基础上发展而来的 WTF/MTF 超低频通信系统包含两个相距为 260 km 以上的发信台^[6], 分别位于威斯康星州和密歇根州, 每个发信台包含多副几十千米级别的水平发射天线. 两发信台可分别单独使用, 也可通过连接的电缆线联合使用; 仅其中一个发信台单独工作时, 可实现北冰洋、大西洋、东太平洋地中海水域范围内的深水对潜通信; 当两发信台同时工作时, 可实现全球通信.

苏联“ZEVS”超低频通信发信系统位于科拉半岛, 如图 1(c) 所示, 该系统由两根相距为 10.5 km 的天线组成, 各配有一个发信台, 由总控制台统一控制. 由于该系统只存在东西向天线, 仅能实现北冰洋、大西洋、西太平洋水域范围内的通信.

可见, 陆基超低频通信系统体积庞大, 已建成系统尺寸均在几十千米量级, 目标明显, 易遭受打击. 因接地网络要求, 超低频发射系统对场地要求

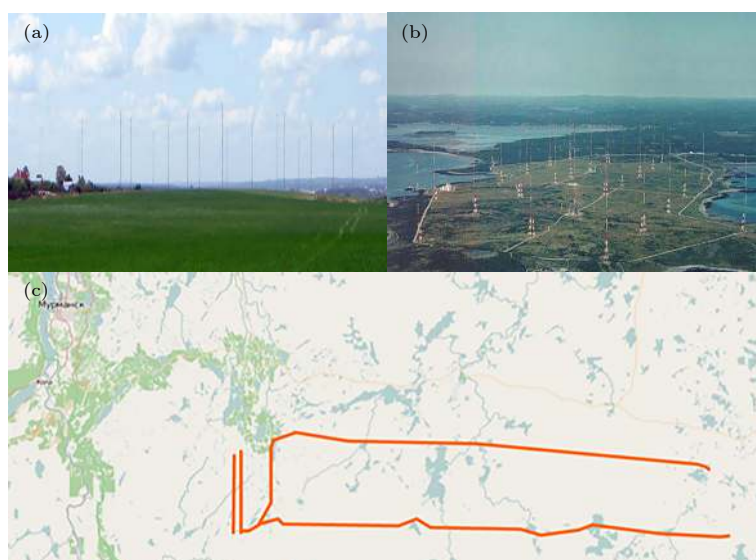
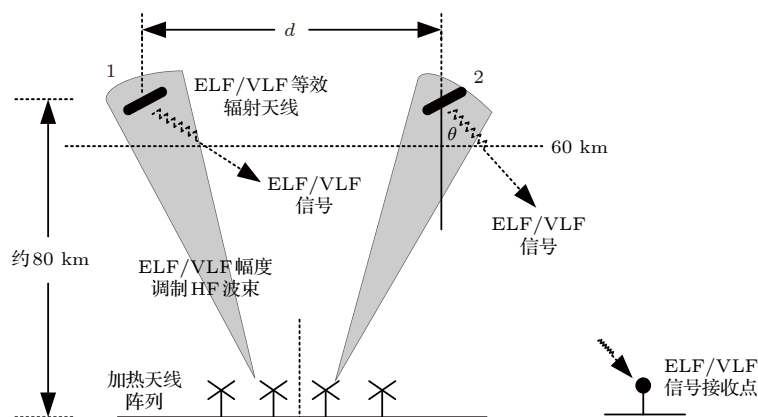


图 1 大规模陆基低频对潜通信系统 (a) 位于 Nizhny Novgorod 的“歌利亚”对潜通信天线阵列; (b) 位于美国 Upper Peninsula 的美国海军对潜低频通信基地; (c) ZEVS 低频对潜通信系统天线分布

Fig. 1. Large-scale land-based low-frequency submarine communication system: (a) Antenna array of "Golia" pair submarine communication in Nizhny Novgorod; (b) U.S. Navy's low-frequency submarine communication base on the Upper Peninsula of the United States; (c) ZEVS antenna distribution of low frequency submarine communication system.

图 2 双波束幅度调制形成两个“ELF/VLF 偶极子天线”示意图^[13]Fig. 2. Schematic diagram of dual beam amplitude modulation to form two “ELF/VLF dipole antennas”^[13].

极高, 已有发信台均建在大地电导率较低的地区, 且对地质结构、地理环境存在较高要求. 系统所需功耗极高, 处于兆瓦量级, 对供电能力也存在较大要求. 且系统辐射效率低下, 美国 WTF/MTF 超低频通信系统在 1 MW 输入总功率下仅产生 8 W 有效辐射. 现有超低频通信系统的窄带宽、低通信速率也使其实用性大打折扣, “ZEVS” 超低频通信系统对 6000 km 外的海参崴海区水下 100 m 处的潜艇仅具有 0.5 b/s 速率的通信能力, 仅能起到振铃作用.

利用大功率高频电磁波人工加热电离层来产生低频辐射是低频发射系统的另一实现方案. 在电离层中存在着大量自然电流, 如图 2 所示, 大功率高频电磁波的定向辐射可对某一区域高空的电离层进行加热, 通过控制加热的开始与停止, 可改变该区域电子碰撞频率, 电流密度也随之发生改变, 从而产生与调制信号相同频率的电流振荡, 对外辐射出对应频率的电磁波. 且由于高频发射天线体积较小, 可在一定程度上解决陆基低频发射系统地面目标庞大的问题^[7]. 早在 20 世纪上半叶, 电离层调制低频电磁波的设想已被提出, 并于 1970 年由美国科罗拉多州的加热实验证明了该方案可行性^[8,9]. 随后, 大量的理论与实验纷纷涌现, 研究表明, 电离层调制方法可产生覆盖极低频至甚低频范围的电磁波^[10–16], 世界各大国家也先后建立了 HIPAS, Arecibo, Tromsø 和 HAARP 等大功率高频电离层加热装置.

2.2 顽存机动低频发射系统

为解决陆基低频发射系统规模庞大时易遭

受打击, 且难以恢复的问题, 顽存机动式低频发射系统成为了低频通信领域一大研究热点. 一方面, 顽存机动式低频发射系统可承担陆基发射系统失效后的低频通信任务; 另一方面, 其机动性使其能够作为陆地与潜艇的中继站, 接收陆地高频信号, 在距离潜艇较近的位置进行更为高效的低频通信. 现有顽存机动低频发射系统主要包括车载、舰载、机载和星载等方案^[17].

车载、舰载式低频发射系统采用气球升举方案. 如图 3(a) 所示, 这一方案使用充满氦气等低密度惰性气体的大型高空气球带动千米长度的甚低频天线线缆升空, 线缆下端连接在车辆或舰船上, 为天线提供驱动能源与负载匹配等, 近年来也提出了空中线缆带载的方式, 提高天线辐射效率. 车辆与舰船载体可控制天线的放出与回收, 并通过载体的移动实现甚低频通信系统的机动性^[18,19].

机载式低频发射系统采用双拖曳结构, 如图 3(b) 所示, 由一长一短两天线共同组成发射系统, 其中长拖曳天线与飞机机身相连, 短拖曳天线与发射机功率放大器输出端相连^[20,21]. 与其他甚低频发射天线相同, 为保证有效辐射甚低频电磁波, 发射天线应尽可能保证垂直极化, 因此, 在双拖曳天线中, 长拖曳天线应尽可能保持垂直, 并且在发射甚低频信号时, 飞机进行盘旋动作, 以使得辐射信号具有较大的垂直分量, 便于水下潜艇接收^[22–24]. 20 世纪 60 年代, 美国提出了“塔卡木 (take charge and move out, TACAMO)” 机载甚低频对潜通信项目, 在之后的几十年内进行了多次改进, 先后研发了 EC-130 G, EC-130 Q, E-6 A 和 E-6 B 等甚低频通信中继机, 可实现 15 h 以上的机动甚低频通信.

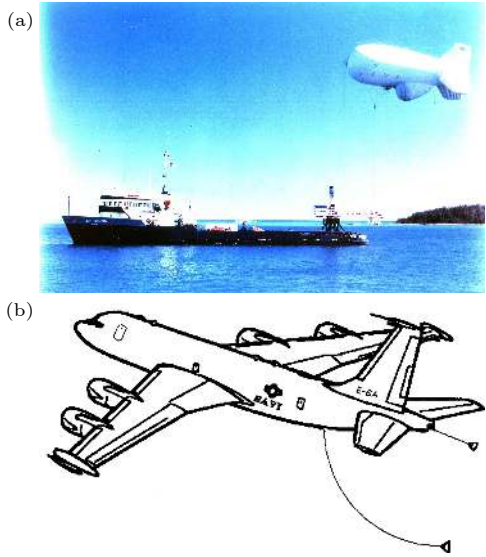


图3 顽存机动式低频天线 (a) 气球升举式; (b) 机载双拖曳式
Fig. 3. Stubborn mobile low-frequency antenna: (a) Balloon lift; (b) airborne double tow.

星载式低频发射系统将地面大规模天线转移至近地卫星轨道中, 在避免了地面系统各缺陷的同时, 利用卫星的轨道运动, 缩短了与水下接收潜艇的距离. 目前已试验的星载甚低频天线包括美国、意大利采用的细长天线与俄罗斯采用的环天线^[25,26]. 美意星载甚低频天线试验依托于亚特兰大号航天飞机完成, 最初由航天飞机发射出连接有数十千米长尼龙绳的系留卫星, 系绳垂于航天飞机下方, 由末端负载完成数据发送; 在此基础上又提出了在卫星上加装细长发射天线的方案, 工作于 200—500 km 的轨道高度上. 俄罗斯星载甚低频环形天线依托于空间站发射, 其天线尺寸较美意方案更小, 仅为百米量级, 依靠天线自旋进行展开, 使用寿命达一个月.

即便目前存在着上述各类顽存机动的低频发射系统, 也无法改变低频天线需要较大体积的客观要求, 各方案均存在明显的外置天线, 仍存在遭受打击的风险. 且顽存机动方案无法长期使用, 维护成本高昂.

3 机械天线辐射方案

3.1 概述

与传统天线不同, 机械天线不依靠电子电路振荡电流来产生辐射, 而是通过机械能驱动电荷或电偶极子的运动, 进而转化为电磁能, 产生辐射场.

这一方案可使得传统天线难以利用的近场能量在天线辐射中发挥作用, 无需庞大的阻抗匹配网络, 可以实现低频通信设备的小型化^[27,28].

目前, 根据不同的实现方案, 机械天线大致可归为三类驻极体式、永磁体式、压电谐振式.

3.2 驻极体式机械天线

驻极体是一种能够储存空间电荷或电偶极子的电介质材料, 其极化特性不随外加电场的去除而完全消失, 其弛豫时间较长, 长期处于亚稳态极化状态^[29,30]. 常见的驻极体材料包括 SiO₂ 等无机驻极体材料与聚四氟乙烯 (PTFE)、全氟乙丙烯共聚物 (FEP) 等有机驻极体材料^[31]. 通过不同的极化方式, 可使驻极体内存储单一电荷或异号电荷, 当极化后的驻极体材料做简谐运动时, 其内的束缚电荷也随之运动, 从而对外产生辐射.

驻极体式机械天线的运动模式主要包括振动式与旋转式, 美国 Draper 实验室对两种运动模式下的天线性能进行了仿真研究^[32–34], 得出了旋转驻极体式机械天线具有更优异辐射效率的结论.

针对旋转驻极体式机械天线, 北京航空航天大学与美国加州大学伯克利分校进行了大量研究^[35]. 旋转驻极体式机械天线原理模型如图 4 所示, 圆盘上对称分布着分别带有单一正电荷与负电荷的驻极体材料. 当驻极体随圆盘旋转时, 两驻极体上关于圆心对称的异号电荷所形成的电流元方向相同, 所产生的磁场相互叠加^[36,37].

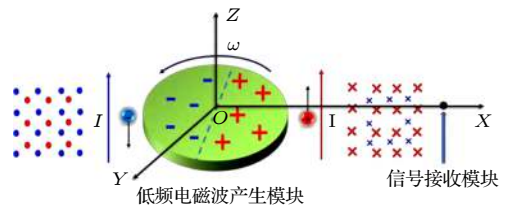


图4 旋转驻极体式机械天线原理模型^[36]
Fig. 4. Principle model of rotating electret mechanical antenna^[36].

对旋转驻极体各电流元在接收点处所产生的磁场进行积分, 可得旋转驻极体式机械天线辐射磁场强度 B :

$$B = 2 \iint dB = 2 \cdot \frac{\mu_0 \rho \omega}{4\pi r^2} \times \int_0^R R^2 dR \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta = \frac{\mu_0 \rho \omega R^3}{3\pi r^2}, \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; ρ 为驻极体电荷密度; ω 为天线旋转角速度; R 为天线半径; r 为接收点至天线的距离. 由 (1) 式可知, 旋转驻极体式机械天线的磁场强度与距离的平方成反比, 与天线转速、驻极体电荷密度成正比.

进一步, 当改变旋转圆盘上驻极体薄膜的分布情况时, 如图 5 所示, 天线所产生的辐射情况也随之改变. 仿真分析表明 [38], 随着驻极体薄膜块数的增加, 磁场频率增加, 但相同信号接收点的磁感应强度的最大值不断减小, 且磁感应强度的最大值衰减速度加快.

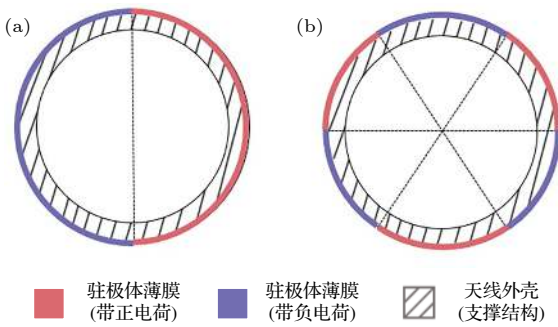


图 5 多瓣驻极体天线结构 [38] (a) 二分布驻极体天线; (b) 六分布驻极体天线
Fig. 5. Multi-block electret antenna structure [38]: (a) Two distributed electret antenna; (b) six distributed electret antenna.

3.3 永磁体式机械天线

通过电机驱动永磁体旋转, 从而产生与旋转频率相应的磁场辐射是目前常见的永磁体式机械天线方案 [39–41], 如图 6(a),(b) 所示. 永磁体可看作是无数磁偶极子的集合体, 对于旋转永磁体式机械天线的分析多是从旋转磁偶极子的理论出发 [42–44].

国防科技大学第六十三研究所对各类机械天线辐射原理进行了系统的建模分析与理论研究 [45,46], 将旋转磁偶极子天线等效为电流环模型, 其在球坐标下的辐射模型如下:

$$B = \frac{\mu_0 k^3 m_0}{4\pi} e^{-jkr} \left\{ 2 \left[\frac{j}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right] \cos \theta \hat{r} - \left[\frac{1}{kr} - \frac{j}{(kr)^2} - \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin \theta \hat{\theta} \right\}, \quad (2)$$

式中, k 为波数, m_0 为磁偶极矩.

当天线工作在近场区域时, 即 $kr \ll 1$, 旋转永磁体式机械天线辐射模型可近似为

$$B = \frac{\mu_0 m_0}{4\pi r^3} \left[2(\cos \theta + j \sin \theta \sin \phi) \hat{r} + (\sin \theta - j \cos \theta \sin \phi) \hat{\theta} - j \cos \phi \hat{\phi} \right]. \quad (3)$$

由此可得, 旋转永磁体式机械天线在近场范围内的磁场强度与距离的三次方成反比, 且磁场强度与天线转速无关.

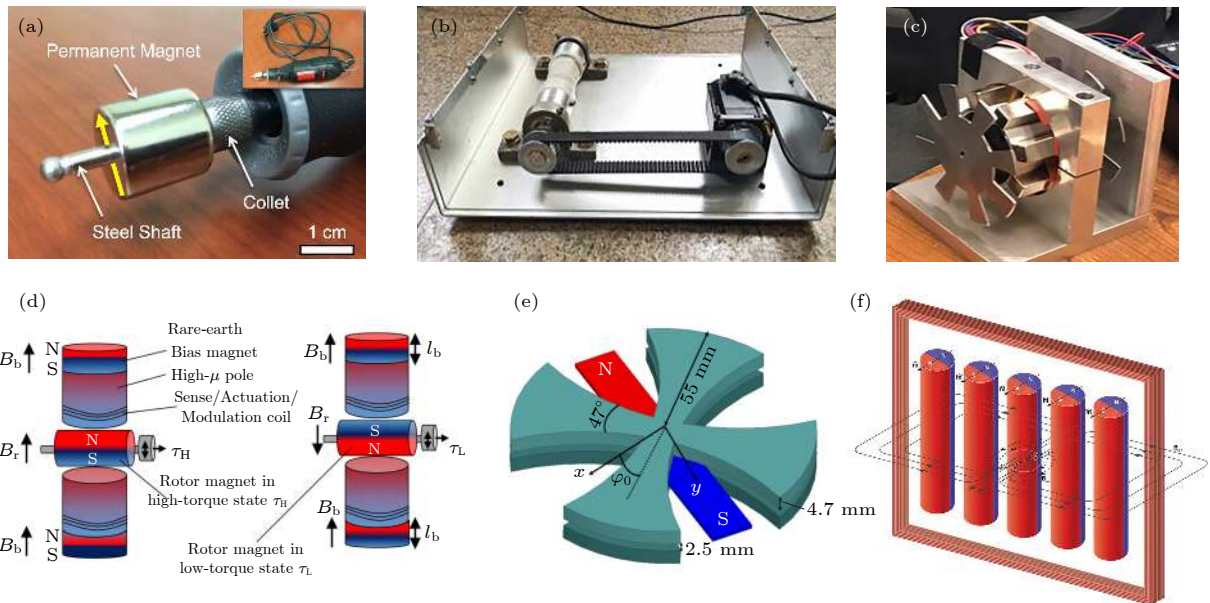


图 6 典型永磁体式机械天线 (a) 佛罗里达大学方案 [39]; (b) 西安电子科技大学方案 [40]; (c) 科罗拉多大学丹佛分校方案 [47]; (d) 犹他大学方案 [48]; (e) 密歇根大学方案 [49]; (f) 加州大学洛杉矶分校方案 [51]
Fig. 6. Typical permanent magnet type mechanical antenna: (a) University of Florida [39]; (b) Xidian University [40]; (c) University of Colorado Denver [47]; (d) University of Utah [48]; (e) University of Michigan [49]; (f) University of California, Los Angeles [51].

在永磁体式机械天线的研究中,美国科罗拉多大学丹佛分校选择了另一种方案——在多个固定且独立的永磁体附近旋转软磁材料,使永磁体所产生的磁场发生畸变,从而产生所需的磁信号^[47],如图6(c)所示.这一方案减轻了常规旋转永磁体方案中高辐射强度与大质量的永磁体对电机产生的高负载之间的矛盾,能够方便地通过增加永磁体数量来提高辐射强度.

为进一步提高旋转永磁体式机械天线的辐射强度,美国犹他大学在旋转永磁体径向位置设置了两个磁极,用以增加永磁体磁偶极矩;在轴向位置也设置了两个磁极,实现对磁偶极矩的调整^[48],如图6(d)所示.

与旋转驻极体机械天线中通过改变不同极性驻极体薄膜分布情况从而实现信号倍频的方案类似,美国密歇根大学提出了一种特殊结构的旋转永磁体天线方案,以牺牲较少的辐射功率为代价,实现了辐射信号的倍频^[49,50].如图6(e)所示,该方案将永磁体放置于两对正交的蝴蝶结型高磁导率材料中间,通过改变永磁体与正交蝴蝶结型结构的初始相对位置,实现相位的调制;当永磁体经正交蝴蝶结各间隙旋转时,一个周期的信号近似改变为多个周期,但同时信号幅值相应倍减.

在常规单一旋转永磁体天线的基础上,美国加州大学洛杉矶分校实现了旋转永磁体式机械天线的阵列化^[51-56].如图6(f)所示,该方案不再使用电

机带动永磁体的旋转,而是通过摆阵中多个永磁体磁场的相互影响使各磁体对齐,而后通过外部线圈激发的交流磁场激发磁摆阵的运动,为磁摆阵的辐射提供能量.这一方案使用多个小型永磁体代替了单一大型永磁体,降低了机械能密度,提高了电磁能密度;此外,使用线圈激磁驱动磁体摆动的方式解除了常规方案中电机的限制,使天线能够拥有较大的频率调节范围;将机械驱动转变为电驱动,为信号调制带来了较大便利.

3.4 压电谐振

区别于上述两种旋转式机械天线,压电谐振式机械天线以压电材料所产生的振动作为磁场辐射的主要来源.目前压电谐振式机械天线存在两种实现思路:一种是同时使用压电材料的正、逆两种压电效应来产生辐射的压电式机械天线;另一种是利用压电材料与磁致伸缩材料相结合的磁电异质结构所具备的磁电效应来产生辐射的磁电式机械天线.

压电式机械天线以压电晶体和压电陶瓷等压电材料为主要核心单元,如图7所示,通过外加交变电场对压电材料施加激励,使压电材料产生随外加激励变化的形变,带动压电材料表面束缚电荷与内部偶极矩的运动,形成偶极电流,从而对外产生辐射.

天线辐射场强由最大可达电流及其分布决定,对于压电式机械天线而言,其最大电流与电荷密度

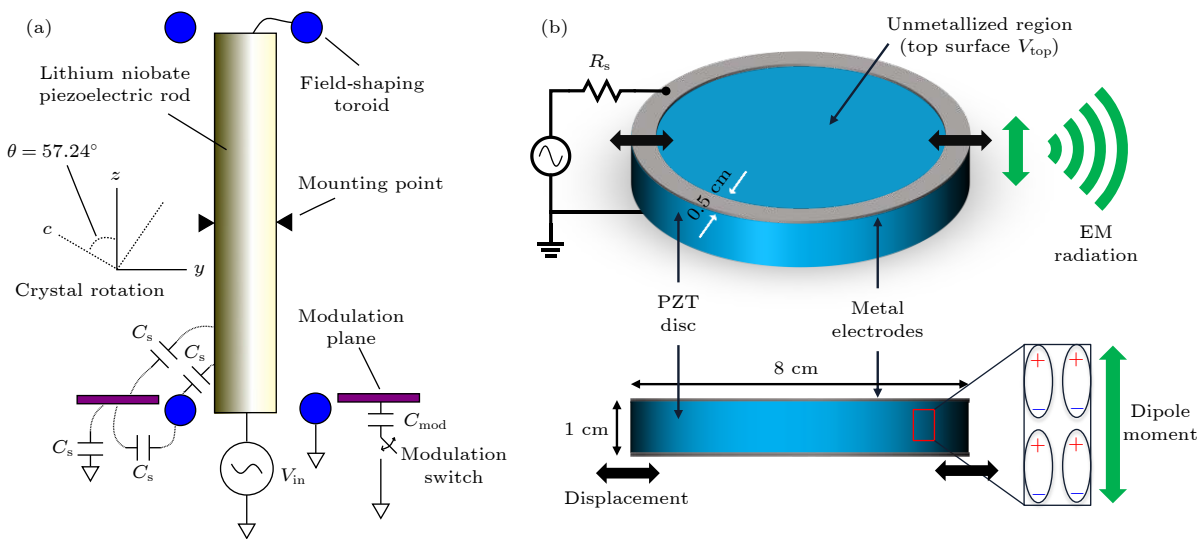


图7 压电式机械天线结构模型 (a) 斯坦福大学方案^[57]; (b) 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校方案^[58]

Fig. 7. Structural model of piezoelectric mechanical antenna: (a) SLAC National Accelerator Laboratory^[57]; (b) University of Illinois at Urbana-champaign^[58].

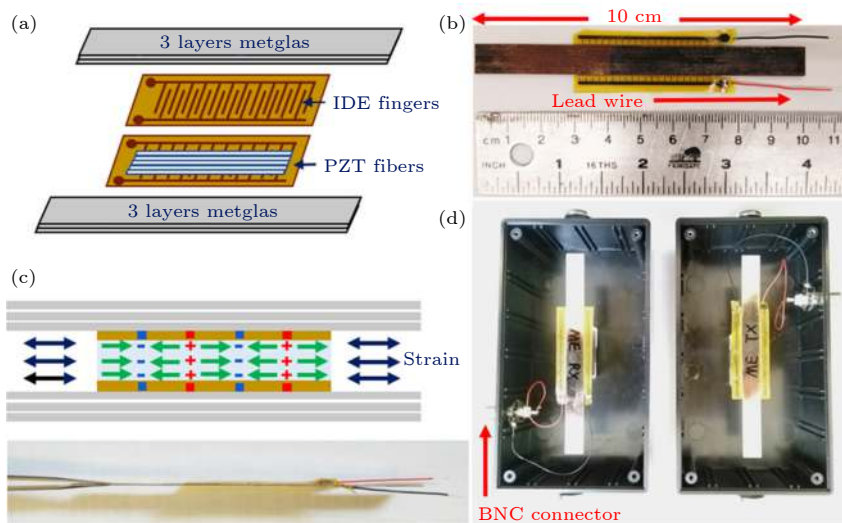


图 8 磁电式机械天线结构模型^[59] (a) 磁电天线结构; (b) 磁电天线俯视图; (c) 磁电天线侧视图; (d) 发射天线与接收天线
 Fig. 8. Structural model of piezoelectric mechanical antenna^[59]: (a) Schematic of the ME antenna; (b) top view of a fabricated ME antenna prototype; (c) side view of the schematic and fabricated ME antenna; (d) one pair of ME transmitter and receiver packed in plastic boxes.

有关, 电荷密度越大, 辐射场强越大, 电荷密度达到一定程度时天线周围的电场强度将达到空气的击穿极限. 而电场强度与电荷密度成正比, 与压电材料的相对介电常数成反比, 因此, 对于相对介电常数较小的压电材料来说, 其所产生的辐射强度上限较低. 为提高辐射强度, 美国斯坦福大学 SLAC 国家加速实验室选择将钕酸锂晶体辐射单元置于真空腔室内来解决空气击穿极限的问题^[57], 而伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校选择了相对介电常数较大的 PZT 压电材料作为辐射主体, 从而提高电荷密度^[58].

磁电式机械天线结合了压电效应与磁致伸缩效应. 美国东北大学与弗吉尼亚理工大学研究的磁电式机械天线结构如图 8 所示^[59,60], 呈磁致伸缩层-压电层-磁致伸缩层三明治结构, 中间的压电层在电极所施加的激励下发生压电效应, 产生与交变激励信号相同频率的振动, 带动上下两层磁致伸缩层振动, 从而产生磁场辐射. 在振动传递过程中, 振动频率不变, 因此天线对外辐射磁信号的频率即为压电材料振动频率.

以压电效应作为振动源, 不仅可驱动磁致伸缩材料产生磁场, 也可驱动驻极体、永磁体等材料作为振动式机械天线. 中国船舶重工集团公司第七二二研究所压电材料为振动源, 研发了一种机械振动放大装置, 驱动平行板电容器振动, 从而产生电磁辐射^[61], 如图 9 所示.

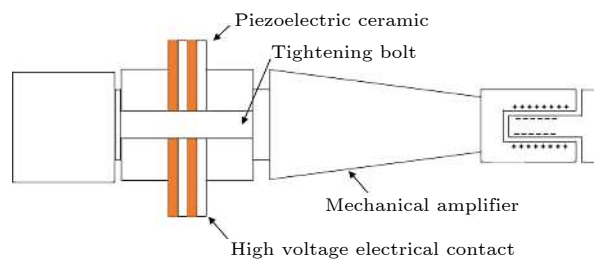


图 9 中国船舶重工集团七二二所机械天线结构模型^[61]
 Fig. 9. Mechanical antenna structure model of 722 nd Research Institute of CSIC^[61].

4 机械天线调制方案

机械运动产生辐射的原理, 使机械天线天然契合于直接调制的方式. 目前机械天线研究中, 广泛采用的信号调制方式有频移键控 (frequency-shift keying, FSK) 和振幅键控 (amplitude Shift Keying, ASK) 等, 通过直接改变天线本身的辐射情况实现信号的调制, 如图 10 所示.

对于旋转驻极体与旋转永磁体式机械天线, 辐射频率与旋转频率相对应. 通过改变电机旋转频率, 以电机高低转速的切换实现数据信号“0”和“1”的切换, 即为 2FSK 调制方式. 进一步, 以多个不同的频率表示多位数据, 可实现多进制 FSK 调制^[62]. 目前大多采用频率调制方案进行旋转式机械天线的调制, 但该方案要求频繁改变电机转速, 对电机性能存在较大考验, 难以实现较高通信速率的信号调制.

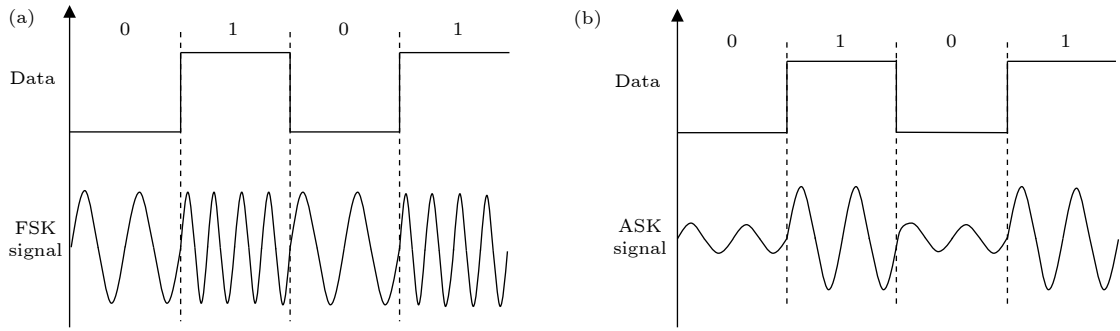


图 10 常见调制方案示意图 (a) 频率调制示意图; (b) 幅度调制示意图

Fig. 10. Schematic diagram of common modulation schemes: (a) FSK; (b) ASK.

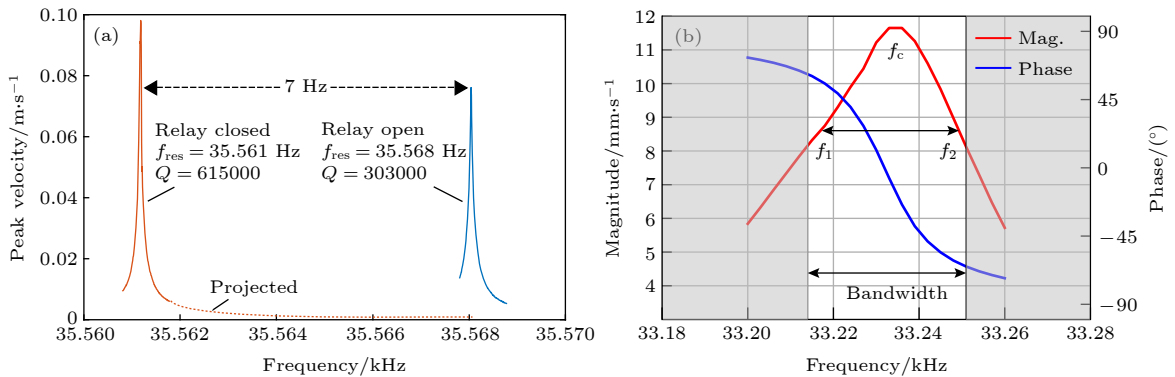


图 11 压电谐振式机械天线频率调制示意图 (a) 美国斯坦福大学频率调制方案^[57]; (b) 美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校频率调制方案^[58]

Fig. 11. Schematic diagram of frequency modulation of piezoelectric resonant mechanical antenna: (a) SLAC National Accelerator Laboratory^[57]; (b) University of Illinois at Urbana-champaign^[58].

不同于旋转式机械天线对于转动机构的依赖, 压电谐振式机械天线由电信号驱动, 对电信号进行调制限制较小. 美国斯坦福大学 SLAC 实验室通过改变外接电容的有无使压电晶体存在两个谐振峰值, 以两峰值对应频率为信号的“0”和“1”, 改变激励信号频率, 使天线辐射信号实现“0”和“1”转换; 但谐振峰值频率的改变也伴随着振幅的改变, 为保证信号接收顺利, 两信号幅度需保持在较小差距内, 因而使得两信号的频率差距存在限制, 即绝对带宽较窄, 如图 11(a) 所示. 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校取压电材料频率响应曲线峰值两侧振幅相同两点为“0”和“1”信号对应点, 在辐射强度可接受的前提下较为方便地实现 2FSK 调制. 压电式机械天线的频率调制方案也受到压电材料品质因数的限制, 当调制速度过高时, 压电材料在不同谐振频率之间的高速切换将达到极限, 会导致谐振器边缘速度失衡, 解调后信号失真, 如图 11(b) 所示.

除频率调制以外, 幅度调制是机械天线领域另一种广泛采用的调制方案. 通过人为控制天线附近

的磁环境, 可使天线对外辐射幅度呈现规律性变化. 在旋转永磁体式机械天线的研究中, 美国威斯康星大学麦迪逊分校通过外加磁屏蔽的方式^[63,64], 借助屏蔽线圈电流的有无, 改变永磁体附近屏蔽机构磁阻, 实现磁场幅度的调制, 该方案无需改变旋转频率, 摆脱了辐射频率对电机性能的依赖, 实现了旋转永磁体式机械天线较高频率的信号调制, 如图 12 所示.

西安理工大学选择极化调制作为机械天线调制方案, 这一方案的实现原理与幅度调制相似^[65]. 通过外加一个与永磁体同轴不同步旋转的特殊形状调制器的方式, 改变天线周围部分环境的磁阻, 使天线与调制器相对应方向上的磁场产生较大衰减, 与调制器垂直方向上磁场基本不变. 永磁体保持固定旋转频率不变, 随着调制器根据数据信号改变旋转位置, 接收端接收到不同极化方向的磁信号. 这一方案同样避免了电机转速的高频切换, 但外加调制器使得其机械结构较为复杂, 系统体积较大.

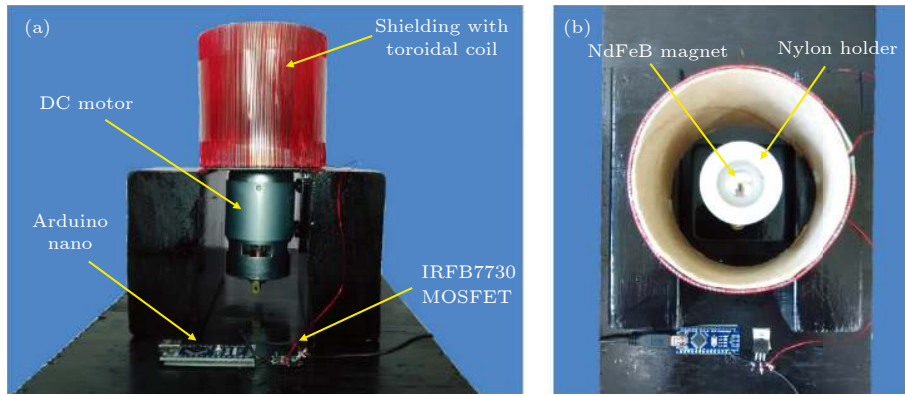


图 12 美国威斯康星大学麦迪逊分校幅度调制方案^[64]

Fig. 12. Amplitude modulation scheme of the University of Wisconsin-Madison^[64].

表 1 各团队机械天线性能对比

Table 1. Performance comparison of mechanical antennas of various teams.

天线方案	团队名称	材料	尺寸 /cm	频率范围	磁场强度	参考文献
驻极体式机械天线	北京航空航天大学美国加州大学伯克利分校	FEP	5.0	0—200 Hz		[35]
永磁体式机械天线	美国佛罗里达大学	N42钕铁硼	1.6	100—500 Hz	800 fT (100 m)	[39]
	美国威斯康星大学麦迪逊分校	N42钕铁硼	1.9	30 Hz	10 μT (0.3 m)	[64]
	美国科罗拉多大学丹佛分校	钕铁硼 钢		0—1.6 kHz	50 pT (5 m)	[47]
	美国犹他大学	钕铁硼	135.0		47 μT (50 m)	[48]
	西安电子科技大学	钕铁硼	15.0	30 Hz	1 nT (0.6 m)	[40]
永磁体阵列	美国加州大学洛杉矶分校	N55钕铁硼	13.0	1031 Hz		[51]
压电谐振式机械天线	美国斯坦福大学SLAC实验室	LiNbO ₃	9.4	35.5 kHz		[57]
	美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校	PZT	8.0	33.2 kHz	40 fT (6 m)	[58]
	美国弗吉尼亚理工大学	PZT Metglas	10.0	30 kHz	1 nT (0.9 m)	[60]
磁电式	美国波士顿东北大学	PZT Metglas	10.0	23.95 kHz	0.1 nT (120 m)	[59]

5 机械天线方案对比

对各机械天线典型方案及其性能进行了汇总,如表 1 所列. 由于各团队所采用的实现方案存在差别,其天线所适用的频带范围与所能达到的辐射强度各有不同.

总的来说,目前机械天线仍处在实验室研究阶段,各团队通过较小体积天线的实验初步实现了百米范围的低频通信,验证了机械天线的可行性.

就辐射强度而言,永磁体式机械天线借助于钕铁硼永磁材料较高的剩磁等磁性能,在近场范围内所产生的磁场强度相较其他方案具有先天优势,可以使用较小尺寸的核心单元产生较大强度的磁场辐射. 而对于驻极体式机械天线而言,其辐射强度

与驻极体电荷密度息息相关,目前单层驻极体电荷密度理论最大值为 $3.4 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$,在这一电荷密度下,驻极体天线所产生的磁场辐射较同体积永磁体天线仍有较大差距.

但由于驻极体式与永磁体式机械天线辐射模型的差别,驻极体式机械天线在近场范围内关于距离的衰减速度较慢,因此,若驻极体天线能够提高辐射强度,在有效传播距离上更具优势. 在单层驻极体电荷密度难以提高的情况下,通过改进驻极体材料结构、改进驻极体极化方式与使用叠层技术等方案,可提高其辐射强度;且驻极体式机械天线的辐射强度与其辐射频率成正比,在较高频段内,驻极体式机械天线的辐射强度将进一步提高. 而目前钕铁硼等第三代稀土永磁材料的性能已接近其理论极限^[66–69],永磁性能发展陷入瓶颈,难以实现大

幅提高. 而压电谐振式机械天线受限于材料加工工艺, 已有压电材料难以制作较大尺寸天线, 因而有效辐射面积有限, 难以通过增大体积的方式提高辐射强度.

频率与带宽方面, 三种方案各有优势. 驻极体式机械天线与永磁体式机械天线受限于电机等驱动机构的性能, 适合工作在超低频范围内, 尽管目前对倍频技术已有部分研究, 但需牺牲一定的辐射强度. 对压电谐振式机械天线而言, 为实现最大振幅, 压电材料均工作在其固有频率附近, 而目前研究中所使用的常规压电材料固有频率均在几十千赫兹量级, 因此, 压电谐振式机械天线的辐射信号处在甚低频范围内. 驻极体、永磁体与压电谐振式机械天线三者中, 因永磁体式机械天线辐射强度与频率无关, 因此在频率调制中, 永磁体式机械天线绝对带宽最宽, 驻极体式机械天线次之; 而压电谐振式机械天线受限于材料谐振特性, 绝对带宽最窄.

工作稳定性方面, 现有永磁体式机械天线方案多使用烧结钕铁硼为核心单元, 其工作温度一般不超过 80 °C, 若需要更高剩磁而使用高牌号烧结钕铁硼, 工作温度将进一步降低^[70–72]; 而常见驻极体材料如 PTFE 和 FEP 等, 工作温度可达到上百度^[73,74], 因此, 驻极体式机械天线更适用于严苛复杂的工作环境.

此外, 就应用前景而言, 驻极体材料的柔性、可弯折特性有利于天线的结构、外形设计, 可根据不同的方向性、增益等天线性能指标设计不同的驻极体天线. 这一性质为研发以驻极体天线为基础的柔性共形天线提供了可能^[75,76], 使驻极体天线能够植入可穿戴设备和飞行器等, 在单兵作战、航空航天等领域发挥重要作用.

6 总结与讨论

本文介绍了小型低频机械天线的各实现方案与研究进展. 各团队对于机械天线的研究已取得了一定成果, 理论与实验均论证了该方案的可行性, 小型化的甚低频、特低频乃至超低频通信系统将发挥重要作用. 然而, 现有研究水平下, 因受限于天线体积、功耗、驱动装置等因素, 机械天线的辐射强度有限, 加之小型化高灵敏度的极弱磁场接收技术问题尚未得到解决, 仅工作在百米或更近范围内的机械天线应用场景有限. 下阶段, 针对远距离低

频通信场景, 如何在牺牲一定小型轻便性的条件下提高辐射强度, 将成为研究的重点. 此外, 针对现有超低频通信系统通信速率低下的问题, 采取怎样的信息加载、信号调制方式, 也将是机械天线领域值得关注的问题.

参考文献

- [1] Luo Z Y, Liu C H, Huang Y C, Wang C 2009 *Ship Electron. Eng.* **29** 148 (in Chinese) [罗卓颖, 刘翠海, 黄玉成, 王崇 2009 *舰船电子工程* **29** 148]
- [2] Ding H 2017 *Commilit* **4** 71 (in Chinese) [丁宏 2017 *现代军事* **4** 71]
- [3] Wang Y F, Zhou M, Song Z H 2014 *Commun. Technol.* **47** 589 (in Chinese) [王毅凡, 周密, 宋志慧 2014 *通信技术* **47** 589]
- [4] Shi W, Ye X F, Hu D M 2011 *Digital Technol. Appl.* **7** 12 (in Chinese) [史伟, 野学范, 胡冬梅 2011 *数字技术与应用* **7** 12]
- [5] Zuo W, Kan R C, Ren X C 2014 *Ship Electron. Eng.* **34** 151 (in Chinese) [左卫, 阚荣才, 任席闯 2014 *舰船电子工程* **34** 151]
- [6] Lu J X 2013 *Extreme Low Frequency and Super Low Frequency Radio Technology* (Harbin: Harbin Engineering University press) p22 (in Chinese) [陆建勋 2013 *极低频与超低频无线电技术* (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第22页]
- [7] Xia M Y, Chen Z Y 1995 *J. Electron.* **2** 125 (in Chinese) [夏明耀, 陈志雨 1995 *电子科学学刊* **2** 125]
- [8] Li F 2014 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [李斐 2014 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [9] Zhou C, Wang X, Liu M R, Ni B B, Zhao Z Y 2018 *Chin. J. Geophys.* **61** 4323 (in Chinese) [周晨, 王翔, 刘默然, 倪彬彬, 赵正予 2018 *地球物理学报* **61** 4323]
- [10] Cohen M B, Moore R C, Golkowski M, Lehtinen N G 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **117** A12
- [11] Kuo S, Snyder A, Kossey P, Chang C L, Labenski J 2012 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **117** A3
- [12] Chang S S, Ni B B, Zhao Z Y, Wang F, Li J X, Zhao J J, Gu X D, Zhou C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069401 (in Chinese) [常珊珊, 倪彬彬, 赵正予, 汪枫, 李金星, 赵晶晶, 顾旭东, 周晨 2014 *物理学报* **63** 069401]
- [13] Hao S J, Li Q L, Yang J T, Wu Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 229402 (in Chinese) [郝书吉, 李清亮, 杨巨涛, 吴振森 2013 *物理学报* **62** 229402]
- [14] Xu T, Xu B, Wu J, Hu Y, Xu Z 2014 *Chin. J. Polar Res.* **26** 316 (in Chinese) [徐彤, 徐彬, 吴健, 胡艳莉, 许正文 2014 *极地研究* **26** 316]
- [15] Yang J T, Li Q L, Wang J G, Hao S J, Pan W Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 019401 (in Chinese) [杨巨涛, 李清亮, 王建国, 郝书吉, 潘威炎 2017 *物理学报* **66** 019401]
- [16] Cohen M B 2010 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)
- [17] Liu C H, Wang W Q 2011 *Telecommun. Eng.* **51** 187 (in Chinese) [刘翠海, 王文清 2011 *电讯技术* **51** 187]
- [18] Koons H, Dazey M 1983 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **31** 243
- [19] Dong J, Luo J X 2015 *Ship Electron. Eng.* **35** 159 (in Chinese) [董见, 罗建新 2015 *舰船电子工程* **35** 159]
- [20] Wei L, Liu C 2007 *Mod. Electron. Tech.* **1** 14 (in Chinese) [魏

- 亮, 柳超 2007 现代电子技术 1 14]
- [21] Wu D 2009 *Ship Electron. Eng.* **29** 68 (in Chinese) [吴笛 2009 舰船电子工程 **29** 68]
- [22] Jia Q 2014 *M. S. Thesis* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [贾琦 2014 硕士学位论文 (北京: 中国科学院大学(工程管理与信息技术学院))]
- [23] Zheng X H, Hou Z Q, Li J X 2011 *J. Naval Aeronaut. Astronaut. Univ.* **26** 628 (in Chinese) [郑小洪, 侯志强, 李冀鑫 2011 海军航空工程学院学报 **26** 628]
- [24] Fan W S, Zhang S T, Han X F 2015 *Chin. J. Radio Sci.* **30** 114 (in Chinese) [樊文生, 张世田, 韩道非 2015 电波科学学报 **30** 114]
- [25] Li K 1997 *Proceedings of 1997 Asia-Pacific Microwave Conference Hong Kong*, Dec. 2–5, 1997 p1233 DOI: 10.1109/APMC.1997.656537
- [26] Li K 1998 *GNSS World Chin.* **1** 59 (in Chinese) [李凯 1998 全球定位系统 **1** 59]
- [27] McLean J S 1996 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **44** 672
- [28] Thiele G A, Detweiler P L, Penno R P 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 1263
- [29] Xia Z F, Chen G J, Xiao H M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2464 (in Chinese) [夏钟福, 陈钢进, 肖慧明 2006 物理学报 **55** 2464]
- [30] Wedel A, Danz R, Xia Z F, Qiu X L, Zhang Y W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 389 (in Chinese) [Wedel A, Danz R, 夏钟福, 邱勋林, 张治文 2002 物理学报 **51** 389]
- [31] Erhard D P, Lovera D, von Salis-Soglio C, Giesa R, Altstadt V, Schmidt H W (Muller A H E, Schmidt H W Ed.) 2010 *Complex Macromolecular Systems Ii* (Berlin: Springer-Verlag Berlin) pp155–207
- [32] Bickford J A 2019 *US Patent* US10177452 B2 [2019-01-08]
- [33] Bickford J A, Duwel A E, Weinberg M S, McNabb R S, Freeman D K, Ward P A 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 2209
- [34] Bickford J A, McNabb R S, Ward P A, et al. 2017 2017 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* San Diego, CA, USA July 9–14, 2017 p1475
- [35] Cui Y, Wang C, Wei M 2019 2019 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* Atlanta, GA, USA, July 7–12, 2019 p1383
- [36] Cui Y, Wang C, Song X, Liang B W 2019 *Acta Automatica Sin.* **45** 1 (in Chinese) [崔勇, 王琛, 宋晓, 梁博文 2019 自动化学报 **45** 1]
- [37] Cui Y, Wang C, Song X, Yuan H W, Liu Y Y 2020 *CN Patent* CN109004948B [2020-07-28] (in Chinese) [崔勇, 王琛, 宋晓, 袁海文, 刘颖异 2020 中国专利 CN109004948B [2020-07-28]
- [38] Liang B W, Cui Y, Song X, Li L Y, Wang C 2019 *Int. J. Model. Simul. Sci. Comput.* **10** 1950036
- [39] Burch H C, Garraud A, Mitchell M F, Moore R C, Arnold D P 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 6265
- [40] Cao J, Liu Y, Gong S H 2019 2019 *International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)* Nanjing, China, Nov. 8–10, 2019 p140
- [41] Gong S H, Liu Y, Liu Y 2018 *Prog. Electromagn. Res. M* **72** 125
- [42] Madanayake A, Choi S, Tarek M, Dharmasena S, Mandal S, Glickstein J, Schirlioglu A 2017 2017 *3rd International Moratuwa Engineering Research Conference* Moratuwa, Sri Lanka, May 29–31, 2017 p230
- [43] Ding C Q, Song H Y 2019 *Ship Electron. Eng.* **39** 166 (in Chinese) [丁春全, 宋海洋 2019 舰船电子工程 **39** 166]
- [44] Manteghi M 2017 2017 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* San Diego, CA, USA, July 9–14, 2017 p1997
- [45] Shi W, Zhou Q, Liu B 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 188401 (in Chinese) [施伟, 周强, 刘斌 2019 物理学报 **68** 188401]
- [46] Zhou Q, Yuan F Q, Shi W, Hao Z Y, Zheng H, Liu B, He P F 2020 *Sci. Sin. Technologica* **50** 69 (in Chinese) [周强, 姚富强, 施伟, 郝振洋, 郑欢, 刘斌, 何攀峰 2020 中国科学:技术科学 **50** 69]
- [47] Golkowski M, Park J, Bittle J, Babaiahgari B, Rorrer R A L, Celinski Z 2018 2018 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* Boston, MA, USA, July 8–13, 2018 p65
- [48] Fawole O C, Tabib-Azar M 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 6927
- [49] Barani N, Sarabandi K 2019 2019 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* Atlanta, GA, USA, July 7–12, 2019 p2169
- [50] Barani N, Sarabandi K 2018 2018 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* Boston, MA, USA, July 8–13, 2018 p95
- [51] Prasad M N S, Tok R U, Fereidoony F, Wang Y E, Zhu R, Propst A, Bland S 2019 *Sci. Rep.* **9** 13220
- [52] Mysore Nagaraja S P, Tok R U, Zhu R, Bland S, Propst A, Wang Y E 2019 *J. Phys. Conf. Ser.* **1407** 012049
- [53] Prasad M N S, Huang Y, Wang Y E 2017 *IEEE 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science* Montreal, QC, Canada, Aug. 19–26, 2017 p1
- [54] Prasad M N S, Selvin S, Tok R U, Huang Y K, Wang Y X 2018 2018 *IEEE Radio & Wireless Symposium* Anaheim, CA, USA, Jan. 15–18, 2018 p171
- [55] Prasad M N S, Tok R U, Wang Y E 2018 2018 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* Boston, MA, USA, July 8–13, 2018 p71
- [56] Selvin S, Prasad M N S, Huang Y K, Wang E 2017 2017 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* San Diego, CA, USA, July 9–14, 2017 p1477
- [57] Kemp M A, Franzi M, Haase A, Jongewaard E, Whittaker M T, Kirkpatrick M, Sparr R 2019 *Nat. Commun.* **10** 1715
- [58] Hassanien A E, Breen M, Li M H, Gong S 2019 arXiv: 1906.07797[physics.app-ph]
- [59] Dong C Z, He Y F, Li M H, Tu C, Chu Z Q, Liang X F, Chen H H, Wei Y Y, Zaebimashi M, Wang X J, Lin H, Gao Y, Sun N X 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 398
- [60] Xu J, Leung C M, Zhuang X, Li J, Bhardwaj S, Volakis J, Viehland D 2019 *Sensors* **19** 853
- [61] Zheng H, Zhao J B, Xiang B, Xiong Q P, Deng F S 2018

- 2018 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* Boston, MA, USA, July 8–13, 2018 p751
- [62] Glickstein J S, Liang J, Choi S, Madanayake A, Mandal S 2020 *IEEE Access* **8** 2455
- [63] Strachen N, Booske J, Behdad N 2018 *PLoS One* **13** e0199934
- [64] Strachen N D, Booske J H, Behdad N 2018 2018 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium on Antennas and Propagation & Usnc/Ursi National Radio Science Meeting* Boston, MA, USA, July 8–13, 2018 p67
- [65] Zhang D J 2019 B. S. Thesis (Xi'an: Xi'an University of Technology) (in Chinese) [张多佳 2019 硕士学位论文 (西安: 西安理工大学)]
- [66] Hu B P 2014 *J. Magn. Mater. Devics* **45** 66 (in Chinese) [胡伯平 2014 磁性材料及器件 **45** 66]
- [67] Hu W Y 2012 *Mod. Electron. Tech.* **35** 151 (in Chinese) [胡文艳 2012 现代电子技术 **35** 151]
- [68] Brown D, Ma B M, Chen Z M 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **248** 432
- [69] Sugimoto S 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 11
- [70] Bai G, Gao R W, Sun Y, Han G B, Wang B 2007 *J. Magn. Magn. Mater.* **308** 20
- [71] Cao S, Yue M, Yang Y X, Zhang D, Liu W, Zhang J, Guo Z, Li W 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 07A740
- [72] Ma B M, Liu W L, Liang Y L, Scott D, Bounds C O 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 6628
- [73] Chen G J, Rao C P, Xiao H M, Huang H, Zhao Y H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 237702 (in Chinese) [陈钢进, 饶成平, 肖慧明, 黄华, 赵延海 2015 物理学报 **64** 237702]
- [74] Xiao H M, Wen Z Q, Zhang J W, Chen G J 2007 *J. Funct. Mater.* **38** 1297 (in Chinese) [肖慧明, 温中泉, 张锦文, 陈钢进 2007 功能材料 **38** 1297]
- [75] Zhao M 2013 *Elec. Inf. Warfare Technol.* **28** 69 (in Chinese) [赵满 2013 电子信息对抗技术 **28** 69]
- [76] Zhu S 2007 *J. Chin. Acad. Electron Inf. Technol.* **2** 562 (in Chinese) [朱松 2007 中国电子科学研究院学报 **2** 562]

REVIEW

Research progress of small low-frequency transmitting antenna^{*}

Cui Yong¹⁾ Wu Ming¹⁾ Song Xiao^{2)†} Huang Yu-Ping³⁾
Jia Qi⁴⁾ Tao Yun-Fei³⁾ Wang Chen¹⁾

1) (*School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*School of Cyber Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China*)

3) (*Beijing Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China*)

4) (*Beijing Shengfeifan Electronic System Technology Development Co. Ltd, Beijing 102209, China*)

(Received 26 May 2020; revised manuscript received 19 June 2020)

Abstract

Low-frequency electromagnetic waves have the characteristics of long propagation distance, strong resistance to electromagnetic pulse interference, and slow attenuation in seawater and other media. However, conventional low-frequency transmitting antennas have problems such as bulkiness, high power consumption, and low efficiency, which are not conducive to the performance of low-frequency electromagnetic waves. The mechanical antenna is a new type of low-frequency transmitting antenna that generates time-varying electromagnetic field radiation through the mechanical movement of electric charges or magnetic dipoles. The new radiation principle enables mechanical antennas to break the constraints on the physical size of electromagnetic waves in the traditional antenna field, thereby achieving low-frequency communication with a smaller size and higher efficiency, providing a subversive solution to scenarios such as submarine communication and through-the-earth communication. In recent years, mechanical antennas have attracted much attention and become a hot research topic in the field of low-frequency communication. In this paper, we briefly review the development history, development direction, and existing problems of traditional large-scale land-based low-frequency transmit antennas and persistent mobile low-frequency transmit antennas; we mention the details of the working principles and recent research progress of different mechanical antenna implementations including electret, permanent magnet and piezoelectric mechanical antennas; we compare and analyze the radiation performance, innovations, advantages and disadvantages of each specific implementation scheme; and we also discuss the characteristics of the existing frequency modulation, amplitude modulation, polarization modulation and other signal modulation methods of mechanical antennas and the application schemes of several signal modulation methods of different types of mechanical antennas; finally, we prospect the research direction of mechanical antennas in the next stage. At present, the feasibility of the mechanical antenna scheme has been verified theoretically and experimentally, but it is limited by the antenna volume, power consumption, driving device and other factors, and the radiation intensity of the mechanical antenna is limited. We believe that the research in the field of mechanical antennas in the next stage will focus on the design of antennas for achieving longer communication distances at the sacrifice of certain small and light weight indicators, and innovative signal loading and modulation methods to improve communication rates will also be worth paying attention to in the field of mechanical antennas.

Keywords: mechanical antenna, low frequency communication, magnetic field radiation, electret, permanent magnets, piezoelectric effect

PACS: 84.40.Ba, 41.60.-m

DOI: 10.7498/aps.69.20200792

^{*} Project supported by the Military Commission Equipment Development Pre-research Field Fund during the 13rd Five-Year Plan Period of China (Grant No. 61405180302), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51707006), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4192033).

[†] Corresponding author. E-mail: songxiao@buaa.edu.cn