

基于旋转磁偶极子的机械天线的研究

任 艳, 林 海, 田宇泽

(华中师范大学 物理科学与技术学院, 武汉 430070)

摘要:为了突破传统的低频天线通信设备成本高昂、体系结构庞大、功率消耗过高等局限,实现具有“尺寸小,重量轻,功耗低”等特点的天线发射系统,提出了低频机械天线,即利用永磁铁或永电体材料作特定的机械运动来产生甚低频电磁辐射。文中引用电偶极子的辐射电场的结果推导出了旋转偶极子辐射场的表达式,从坡印廷定理出发分析旋转偶极子的近场和远场的辐射特性,并利用 CST 数值仿真的方法验证了理论分析的正确性。根据旋转磁偶极子辐射场的辐射特性提出了永磁铁作为辐射单元以特定的机械运动产生电磁辐射来实现低频机械天线的方式。低频机械天线的实现对未来对潜通信、导航等领域具有一定影响。

关键词:低频天线;电磁辐射;旋转偶极子;坡印廷定理

中图分类号: TN820.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7859(2020)04-0068-04

引用格式: 任 艳, 林 海, 田宇泽. 基于旋转磁偶极子的机械天线的研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(4): 68-71.

REN Yan, LIN Hai, TIAN Yuze. A Study on mechanical antenna based on rotating magnetic dipole[J]. Modern Radar, 2020, 42(4): 68-71.

A Study on Mechanical Antenna Based on Rotating Magnetic Dipole

REN Yan, LIN Hai, TIAN Yuze

(School of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to break through the limitations of traditional low-frequency antenna, such as high cost communication equipment, large system structure and high power consumption, and realize antenna transmission system with “small size, light weight, low power consumption”, a low-frequency mechanical antenna is proposed, that is magnet or permanent electric material for specific mechanical motion to produce very low frequency electromagnetic radiation. In this paper, the expression of the rotating dipole radiation field is derived by quoting the expression of the radiated electric field of the electric dipole, and analyse the radiation characteristics of the near and far fields of the rotating dipole from the Poynting theorem, and the correctness of the theoretical analysis was verified by numerical simulation. According to the radiation characteristics of the rotating magnetic dipole radiation field, the way in which the permanent magnet acts as a radiating element to generate electromagnetic radiation with specific mechanical motion to realize the low frequency mechanical antenna is proposed. The low frequency mechanical antenna has certain influence on the future of submarine communication and navigation.

Key words: low frequency antenna; electromagnetic radiation; rotating dipole; Poynting theorem

0 引 言

0.1 Hz~30 kHz 频段的电磁波在大地和电离层之间以波导方式沿着地球表面传播,具有传播稳定、大气衰减减小等特点,在水下、地下岩层等介质内具有良好的穿透性和传播性。因此,低频电磁波目前广泛应用于地质勘测、地震预报等领域,而军事上则主要用于对潜通信^[1]。其中,甚低频(VLF)通信技术最早在对潜通信、导航等领域得到应用,甚低频无线电系统是世界各国海军对潜航状态下潜艇指挥通信的主要方式。发射天线是甚低频无线电系统最重要的组成部分。由于工

作频率低,为获得可接受的电气性能,甚低频发射天线一般采用垂直单极子天线形式,由数百米高的铁塔或山体支撑,规模庞大,占地面积广。这种甚低频天线工程浩大、维修性差,而且带宽较窄、通信能力低,系统抗干扰能力弱^[2]。目前,全世界已经建立了上百个大功率甚低频发射台,成为对潜通信的主要手段,但其系统的不稳定性会限制通信信号的传播,衰减和干扰等传播效应导致信号可通率与可靠性下降,甚至传输中断^[3-5]。

为了解决传统低频天线尺寸大、功耗高、抗干扰能力弱等问题,人们对低频机械天线展开了研究。低频机械天线是利用永磁铁或永电体材料作为辐射单元以特定的运动方式运动,在空间中产生电磁扰动来产生电磁辐射的一种天线^[6]。近年来,世界多国对其展开了研究。2017年美国国防部高级研究计划局(DAR-

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目资助(NO. CCNU18GF005; NO. CCNUJCXK02)

通信作者: 任艳 **Email:** 1225080768@qq.com

收稿日期: 2019-11-30 **修订日期:** 2020-02-22

PA)启动了“机械式天线”(AMEBA)项目,探索可以产生低于 30 kHz 载波的便携式低频无线信号发射系统。其核心目标是最大化远场区磁场强度,渴望在距离发射机 10 km 处产生 100 fT 的辐射强度,以便实现最大 150 km 距离的消息传送和 100 km 距离的语音通信。

此后,人们对机械天线进行了大量的理论和实验研究,并取得一些相应的成果。文献[7]分析了旋转电、磁偶极子的磁场特性。文献[8]利用分解振荡偶极子的方法分析了旋转电偶极子的电场和磁场以及能量特性。文献[9]提出了利用永电体作线性运动或旋转运动来产生极低频(ELF)电磁波的思想,文中通过理论计算指出旋转电偶极子的远场随运动频率线性增加,随距离以 $1/r^2$ (r 是场点到源点的距离)的关系衰减。文献[10]在计算了旋转永磁体产生的磁场强度基础上,提出了一种基于永磁体阵列的机械天线实现方案。文献[11]提出了应用于机械天线的直接天线调制理论。文献[12]将电机顶端安装永磁体后测量了匀速和变速运动信号的频谱。文献[13]在最大 100 m 范围内测量到了运动磁矩产生的极低频信号。美国 SLAC 国家加速器实验室研究人员采用一个杆状的压电材料铌酸锂作为天线,向杆施加振荡电压使其振动交替地收缩与扩张,这种机械压力触发了一个振荡电流,然后其电磁能量以甚低频(VLF)辐射的形式发射出来。从现有的文献结论中可以看出机械天线所依赖的运动电荷/磁矩产生低频电磁波的方法在理论上是正确的。但目前对于机械天线的理论研究和实现方式的研究尚在起步阶段,尚未成熟。

本文直接引用电偶极子辐射电场的结果和对偶原理推导出旋转磁偶极子的辐射场表达式,分析其近远场的辐射特性,并对其进行数值分析。计算结果表明磁偶极子的辐射场随距离增加而衰减,随频率增加而增强。由坡印廷定理计算场的平均坡印廷矢量,结果表明远区场是沿径向的辐射场,而近区场没有电磁能量辐射。由轴上场分量的结果表明,旋转磁偶极子辐射场产生圆极化电磁波。为了验证这一理论分析,本文利用 CST 时域仿真的方法对垂直交叉放置的两个小圆环天线进行了仿真,馈入相位差 $\pi/2$ 的谐变电流,即可将其看作旋转偶极子的等效模型。仿真分析验证了本文理论推导的正确性。最后,本文阐述了机械天线的实现方式。合适的铁磁/铁电体材料是实现低频机械天线的关键,可以利用永磁铁或永电体材料作为辐射单元以特定的运动方式运动在空间中产生电磁扰动,来产生电磁辐射,从而实现机械天线。

1 理论建模与分析

假设沿 z 轴关于原点对称放置的一对相距为 l 的

点电荷构成的电偶极子系统,以 y 轴为旋转轴,在 $x-o-z$ 面内以固定频率 f 旋转,即是一种机械天线,如图 1 所示。分析这个系统的电磁辐射,可以根据分解振荡偶极子的概念,将其分解成分别沿 x 轴和 z 轴随时间谐变的两个静电偶极子的叠加。利用等效电流元的方法,假设元的长度为 l ,沿 z 轴放置,电流随时间的变化表示成: $i(t) = I \cos \omega t = \text{Re}[I e^{j\omega t}]$,则可得振荡电偶极子的辐射电磁场为^[14]

$$E_r = \frac{2Ilk^3 \cos \theta}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr} \quad (1)$$

$$E_\theta = \frac{Ilk^3 \sin \theta}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr} \quad (2)$$

$$H_\phi = \frac{k^2 Il \sin \theta}{4\pi} \left[\frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (3)$$

式中: I 为电流的幅度值; ω 为角频率; ϵ_0 为真空中的电导率; E_r 、 E_θ 分别是球坐标中 r 方向、 θ 方向的电场分量; H_ϕ 是球坐标中 ϕ 方向的磁场分量; k 是波数; 电场和磁场的其他方向分量均为 0。

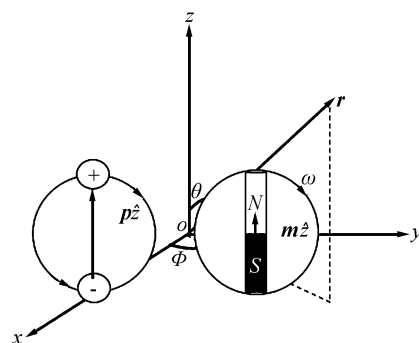


图1 坐标系及物理模型示意图

图1中 p 表示电偶极矩。 m 表示磁偶极矩,根据电磁场的对偶原理,作代换 $E_e \leftrightarrow -H_m$, $H_e \leftrightarrow E_m$, $\epsilon_0 \leftrightarrow \mu_0$, $I_e \leftrightarrow I_m$, $q_e \leftrightarrow q_m$ 即可得到旋转磁偶极子的场。因此根据沿 z 轴放置的电偶极子的场可得沿 z 轴放置的磁偶极子的辐射场为

$$E_\phi = \frac{k^2 I_m l \sin \theta}{4\pi} \left[\frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (4)$$

$$H_r = \frac{2I_m l k^3 \cos \theta}{4\pi\omega\mu_0} \left[\frac{j}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (5)$$

$$H_\theta = \frac{I_m l k^3 \sin \theta}{4\pi\omega\mu_0} \left[\frac{j}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{kr} \right] e^{-jkr} \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率; E_ϕ 为球坐标中电场在 ϕ 方向的分量; H_r 、 H_θ 分别是球坐标中磁场在 r 方向、 θ 方向的分量。根据沿 z 轴放置的磁偶极子辐射场的计算方法,利用坐标变换可以计算出沿 x 轴放置的磁偶极子的辐射电磁场,再结合分解振荡偶极子的方法可以得到旋转磁偶极子的辐射场。旋转磁偶极子在空间

任意一点的辐射场等于分别沿 z 轴和 x 轴振荡的磁偶极子的场的叠加。

$$H_r = \frac{2I_m l k^3}{4\pi\omega\mu_0} (\cos\theta + \cos\theta') \left[\frac{j}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (7)$$

$$H_\theta = \frac{I_m l k^3 \sin\theta}{4\pi\omega\mu_0} \left[\frac{j}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{kr} \right] e^{-jkr} \quad (8)$$

$$H_\phi = \frac{I_m l k^3 \sin\theta'}{4\pi\omega\mu_0} \left[\frac{j}{(kr)^3} - \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{kr} \right] e^{-jkr} \quad (9)$$

其中, $\sin\theta' = \tan\theta\cos\phi$, $\cos\theta' = \sqrt{1-\sin^2\theta'}$ 。在近场区域即 $kr \ll 1$ 时, 场的表达式中主要是 $1/kr$ 的高次幂项起作用, 其余的项可以忽略。又因为磁偶极子的磁流与磁偶极矩的关系为 $I_m l = j\omega p_m = j\omega\mu_0 m$, 因此, 在近场区域, 旋转磁偶极子的磁场与 r^3 成反。在远场区域即 $kr \gg 1$, 场的表达式中主要是 $1/kr$ 的项起作用, 其余的项可以忽略。因此, 旋转磁偶极子的远区电磁场都与 r 成反比, 与 ω^2 成正比。

根据旋转磁偶极子的辐射场近场区的表达式和平均坡印廷矢量的计算公式可得辐射近场区域内的平均坡印廷矢量 $\mathbf{s} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = 0$, 因此在近场区域, 旋转磁偶极子没有电磁能量向外辐射; 在远场区域旋转磁偶极子的平均坡印廷矢量是恒大于零, 说明远场区域有辐射能量产生且向外输出, 远区场是辐射场, 而且电磁波是沿径向辐射的圆极化波。从旋转电/磁偶极子的远区辐射场与距离和旋转频率的关系分析可以看出: 相同频率下, 磁偶极子产生的电磁辐射更强。因此, 用旋转磁偶极子体系做机械天线的产生机制更容易获得较强的电磁辐射。

2 仿真与分析

在现有的时频电磁仿真软件中无法仿真运动的物体, 只能采用等效磁矩的方法来进行仿真分析。等效的电偶极子模型是在几何长度远小于波长的线元上载有等幅同相的电流。同样地, 磁偶极子又称磁流元, 它的实际模型就是一个周长远小于波长的小电流圆环, 且环上载有等幅同相的时谐电流。

为了研究特定运动的永磁铁产生的辐射场, 本文构建了如图 2 所示的物理模型。图 2a) 是永磁体实际模型, 其以对称轴为旋转转轴以一定频率在空间中作旋转运动, 要获得与永磁体等大小的磁偶极矩, 可将其等效为图 2b) 所示的两个垂直交叉放置的电流环天线。电流环中的电流大小计算公式

$$m = \frac{B_r V}{\mu_0} \quad (10)$$

式中: B_r 是剩余磁感应强度; V 表示永磁体的体积, 其中 V 取 15 cm^3 , 电流环半径取 100 m 。通过计算, 仿真中的两线圈分别馈入大小为 200 A , 相位差为 $\pi/2$ 的谐变电流, 在 CST 环境下进行时域仿真得到一系列的等效电流环天线的辐射场的仿真结果。由于仿真的天线的尺寸越大, 消耗就越大, 在现有的仿真环境下无法仿真较大尺寸的天线, 甚低频段的仿真无法做到, 因此只仿真了 50 kHz 、 100 kHz 、 150 kHz 、 200 kHz 频率下电流环天线的辐射场。

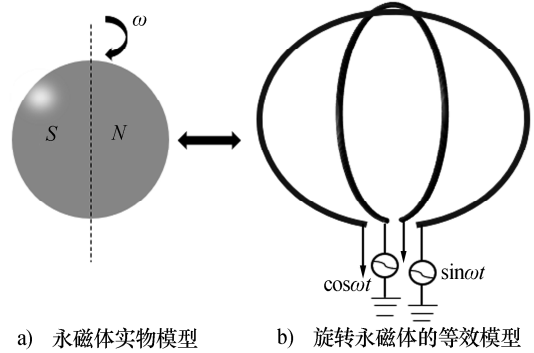


图 2 旋转磁偶极子物理模型与等效电流模型

通过仿真结果分析, 图 3 给出了磁场强度随距离变化的关系图, 通过非线性曲线拟合, 结果表明, 电流环天线的近场磁场强度与 r^3 成反比; 图 4 是不同位置处随时间变化的磁场强度, 分别选取 200 m 、 400 m 、 800 m 处的磁场强度随时间的变化进行分析, 结果表明本文设计的等效电流环天线在空间产生了随时间周期变化的电磁辐射, 距离辐射源越近的区域, 磁场强度随距离衰减越迅速; 图 5 是各个轴上的场强的比较, 选取 400 m 处, 100 kHz 频率下的磁场进行分析, 结果表明场强在 y 轴上的分量为 0, 在 x 轴、 z 轴上的分量大小相等, 相位差 $\pi/2$, 电磁波是圆极化波; 图 6 是分别选取 200 m 处、 900 m 处磁场强度随频率的变化规律进行分析, 通过非线性曲线拟合, 结果表明磁场近场强度与频率的平方成正比; 图 7 是在 100 kHz 频率下, 对磁场强度随距离变化的理论计算结果和仿真结果的进行对比, 结果表明它们在数值有些微差别, 但在量级上是一致的, 且变化趋势保持一致。

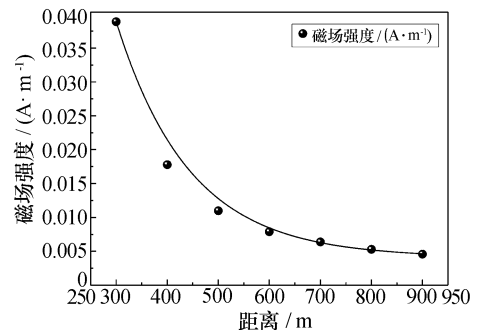


图 3 磁场强度随距离的变化

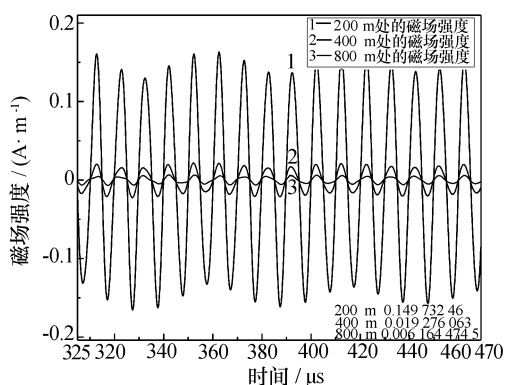


图4 不同位置处随时间变化的场强

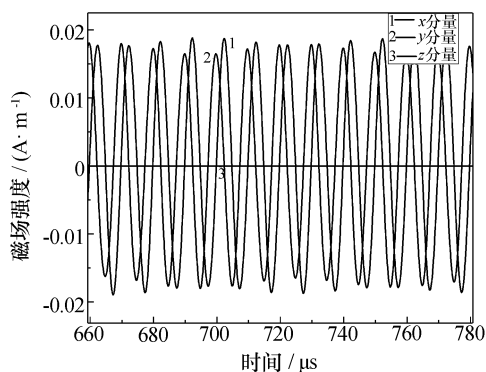


图5 轴上场的比较

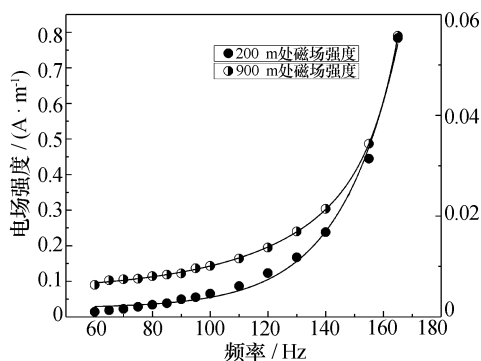


图6 不同位置处磁场强度随频率的变化

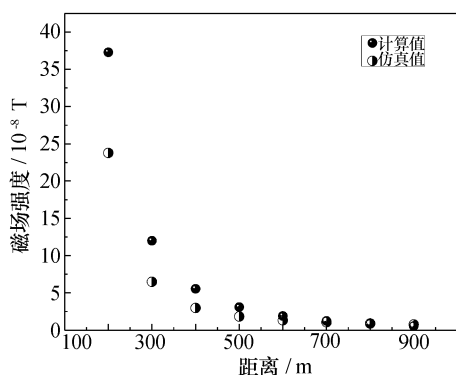


图7 计算值与仿真值的比较

综上所述,仿真分析的结果与理论推导的公式所表达出来场的规律一致,这表明本文通过旋转偶极子的理

论建模与仿真分析所给出的机械天线的理论机理是可行的。我们可以采用高电磁能积的永磁铁或永电体材料作为辐射单元以特定的运动方式运动,在空间中产生电磁扰动,从而产生电磁辐射,以实现机械天线。本文对旋转电/磁偶极子建立了简化的物理模型,仿真计算分析了其相应的辐射近远场的辐射特性,从原理上证明了机械天线产生 VLF/ULF 电磁波的可行性。

3 结束语

本文对旋转偶极子的辐射场的理论推导和仿真分析进行了研究,理论计算和仿真分析结果表明利用永磁铁或永电体材料作为辐射单元以特定的运动方式在空间运动来产生电磁辐射,这样的机械天线的实现方式可行。产生的电磁波可以远距离传输信息,且传播稳定,衰减较小。场的近区无电磁能量辐射,远区有沿径向传播的辐射场,它随距离的增加而衰减,随频率的增加而增强,且产生的是圆极化电磁波。本文的研究对机械天线的应用发展有一定的影响,有利于推进机械天线的广泛应用。低频机械天线的实现有望彻底解决现有长波通信设备的不足,实现高性能的便携式甚低频频段发射系统,将在整个无线通信领域掀起新的热潮。

参考文献

- [1] 刘 勇, 孙景芳. 0.1 Hz ~ 30 kHz 频段电波特性及应用研究[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(增刊1): 36-41.
LIU Yong, SUN Jingfang. Study on the characteristics and application of radio waves in 0.1 Hz ~ 30 kHz band[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(s1): 36-41.
- [2] CHEN Y, YANG G, NI B, et al. Development of ground-based ELF/VLF receiver system in Wuhan and its first results[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(9): 1871-1880.
- [3] 靳致文. VLF/SLF 波传播及其在对潜通信与导航中的应用[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 57-61.
JIN Zhiwen. VLF/SLF wave propagation and its application in subsurface communication and navigation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(2): 57-61.
- [4] 李光明, 温 东. 甚低频对潜通信信号场强预测[J]. 电讯技术, 2008, 48(2): 29-32.
LI Guangming, WEN Dong. Prediction of subsurface communication signal field intensity by VLF[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(2): 29-32.
- [5] XIN Z, CHAO L. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(1): 1-5.
- [6] 丁 宏. DARPA 机械天线项目或掀起军事通信革命[J]. 现代军事, 2017(4): 71-73.

(下转第 76 页)

- on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 2740-2747.
- [2] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] CHEN Q, CHEN L, BAI J, et al. Design of absorptive frequency selective surface with good transmission at high frequency[J]. Electronics Letters, 2015, 51(12): 885-886.
- [4] 李 权, 庞永强, 沈理浩, 等. 一种低吸高透型频率选择表面设计与制备[J]. 微波学报, 2018, 34(5): 26-30.
- LI Quan, PANG Yongqiang, SHEN Lihao, et al. Design and fabrication of a frequency selective surface with lower-frequency absorption and higher-frequency transmission[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(5): 26-30.
- [5] 金 林, 刘小飞, 李 斌, 等. 微波新技术在现代相控阵雷达中的应用与发展[J]. 微波学报, 2013, 29(5): 8-16.
- JIN Lin, LIU Xiaofei, LI Bin, et al. Application and development of new microwave technology in modern phased array radar[J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(5): 8-16.
- [6] SHANG Y, SHEN Z, XIAO S. Frequency-selective rasorber based on square-loop and cross-dipole arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(11): 5581-5589.
- [7] SHEN Y, ZHANG J, PANG Y, et al. Broadband reflection-less metamaterials with customizable absorption-transmission-integrated performance[J]. Applied Physics A, 2017, 123(8): 530.
- [8] CHEN Q, YANG S, BAI J, et al. Design of absorptive/transmissive frequency-selective surface based on parallel resonance[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4897-4902.
- [9] CHEN Q, SANG D, GUO M, et al. Miniaturized frequency-selective rasorber with a wide transmission band using circular spiral resonator[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1045-1052.
- [10] CHEN Q, SANG D, GUO M, et al. Frequency-selective rasorber with interabsorption band transparent window and interdigital resonator[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(8): 4105-4114.
- [11] SHEN Z, WANG J, LI B. 3-D frequency selective rasorber: concept, analysis, and design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(10): 3087-3096.
- [12] OMAR A A, SHEN Z, HUANG H. Absorptive frequency-selective reflection and transmission structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(11): 6173-6178.
- [13] YU Y, SHEN Z, DENG T, et al. 3-D frequency-selective rasorber with wide upper absorption band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8): 4363-4367.

段 坤 男,1996 年生,硕士研究生。研究方向为频率选择表面和天线罩技术。

唐守柱 男,1973 年生,研究员级高级工程师。研究方向为天线罩技术和射频隐身技术。

(上接第 71 页)

- DING Hong. DARPA's mechanical antenna project could revolutionize military communications[J]. Modern Military, 2017(4): 71-73.
- [7] MADANAYAKE A, CHOI S, TAREK M, et al. Energy-efficient ULF/VLF transmitters based on mechanically-rotating dipoles[C]// IEEE Moratuwa Engineering Research Conference. Moratuwa: IEEE Press, 2017: 230-235.
- [8] ERREDE P S. Fall semester: lect. notes 13.75[R]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
- [9] BICKFORD J, MCNABB R, WARD P, et al. Low frequency mechanical antennas[C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Phuket, Thailand: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [10] SRINIVAS P M N, et al. Directly modulated spinning magnet arrays for ULF communications[C]// Radio and Wireless Symposium (RWS). Anaheim, CA: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [11] SKYLER S, et al. Spinning magnet antenna for VLF transmitting[C]// 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego, CA: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [12] MAJID M. A navigation and positining system for unmanned underwater vehicles based on a mechanical antenna[C]// Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017 IEEE International Symposium on. IEEE, 2017: 1-2.
- [13] ARNOLD D, BURCH H, MITCHELL M, et al. Spinning magnets: an unconventional method for compact generation of elf radio signals[C]// 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego, CA: IEEE Press, 2017: 1-2.

任 艳 女,1994 年生,硕士研究生。研究方向为低频机械天线辐射机理及其应用,人工电磁超材料。

林 海 男,1978 年生,副教授。研究方向为计算电磁学、无线通信天线产品与微波器件设计。