

基于特斯拉线圈的脉冲式小型化低频天线设计

张宸熙, 张庭恺, 吴诗莹, 曾梓伦, 许建春*

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室(物理科学与技术学院), 北京 100876)

摘 要: 低频电磁波(300 kHz以下)具有穿透性强、传输损耗低等天然优势,能够在海水、土壤、建筑物等复杂损耗介质中实现稳定可靠的无线通信。然而,受电尺寸原理限制,天线的物理尺寸需与工作波长可比(通常大于十分之一波长)才能获得足够的辐射效率,因此传统低频天线往往需要上百米,难以满足现代跨介质通信应用中对设备便携性与快速部署的迫切需求。本文提出一种基于特斯拉线圈磁谐振原理并采用高压脉冲激励的小型化低频天线设计方案,在千分之一工作波长尺寸下实现远距离信号传输。该设计利用磁谐振结构使次级回路电流显著放大,并采用阻抗匹配变压器将信号源能量高效传输至高阻磁谐振线圈,从而实现磁场增强;同时,引入高压脉冲激励,使天线在相同平均功耗下获得更高的瞬时峰值磁场,且有效抑制连续大电流导致的发热问题,兼顾了辐射能力与系统可靠性。通过系统参数优化,本文制备了工作于200 kHz低频(Low Frequency, LF)、尺寸为70 cm的天线样机。实验结果表明,该天线采用高压脉冲激励时,接收端信号峰值电压达到连续波激励的2.07倍;相较于同匝数单线圈结构,磁谐振耦合结构使接收功率提升约13.8 dB,信号强度增强4.9倍,验证了脉冲激励与磁谐振协同作用对辐射场强的提升效果。在此基础上,本文开展室外远距离通信测试,该天线在800 W峰值功率驱动下,于校园复杂电磁环境中实现了400 m远距离通信,接收磁场强度达0.27 pT。面向应急通信对超便携与强穿透能力的需求,本文进一步研制了工作于30 kHz甚低频(Very Low Frequency, VLF)、整机尺寸仅10 cm × 7 cm × 4 cm的便携式天线,在20 W输入功率下,该天线成功穿透三层钢筋混凝土楼板,实现15 m跨介质可靠传输。本文所提方案通过高压脉冲激励与磁谐振放大的协同设计,在厘米至分米尺度下实现远距离空气通信与跨介质强穿透,为应急通信、地下救援及水下传感器网络等场景提供了小型化解决方案。

关键词: 低频天线;特斯拉线圈;磁谐振;跨介质通信;磁感应通信;无线传输

基金项目: 北京市自然科学基金“启研”计划(No.QY24196);北京市自然科学基金(No.JQ22010);中央高校基本科研业务费专项资金(No.2023ZCJH03);国家自然科学基金(No.U2241243, No.52372101);信息光子学与光通信国家重点实验室基金(No.IPOC2024ZT13);北京邮电大学教学改革项目(No.2024Y010)

中图分类号: TN822+.1; TN823+.15

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)06-2837-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250842

Design of a Pulsed Miniaturized Low-Frequency Antenna Based on the Tesla Coil

ZHANG Chenxi, ZHANG Tingkai, WU Shiying, ZENG Zilun, XU Jianchun*

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Physical Science and Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Low-frequency electromagnetic waves (below 300 kHz) have natural advantages such as strong penetration and low transmission loss, enabling stable and reliable wireless communication in complex lossy media including sea-water, soil, and buildings. However, limited by the electrical size constraint, the physical dimensions of an antenna need to be comparable to the operating wavelength (typically greater than one-tenth of the wavelength) to achieve sufficient radiation efficiency. Consequently, conventional low-frequency antennas often require enormous sizes of hundreds of meters, making it difficult to meet the urgent demands of modern cross-media communication applications for device portability and rapid deployment. In this work, a miniaturized low-frequency antenna design based on the Tesla coil magnetic resonance principle and high-voltage pulse excitation is proposed, achieving long-distance signal transmission at a size of one-thousandth of the operating wavelength. The design significantly amplifies the current in the secondary circuit through the magnetic resonance structure, and employs an impedance matching transformer to efficiently transfer energy from the signal source to the high-impedance magnetic resonance coil, thereby enhancing the magnetic field. Meanwhile, high-voltage pulse excitation is introduced, enabling the antenna to obtain a higher instantaneous peak magnetic field under the same av-

erage power consumption while effectively suppressing the heating problem caused by continuous high current, thus balancing radiation capability and system reliability. Through systematic parameter optimization, this paper fabricated an antenna prototype operating at 200 kHz low frequency (LF) with a size of 70 cm. Experimental results show that when the antenna is driven by high-voltage pulse excitation, the received signal peak voltage reaches 2.07 times that of continuous wave excitation. Moreover, compared with a single-coil structure with the same number of turns, the magnetic resonance coupling structure increases the received power by about 13.8 dB, corresponding to a signal strength enhancement of 4.9 times, verifying the significant improvement of the synergistic effect of pulse excitation and magnetic resonance on the radiation field strength. On this basis, an outdoor long-distance communication test was conducted. Driven by a peak power of 800 W, the antenna achieved a communication distance of 400 m in a complex campus electromagnetic environment, with a received magnetic field strength of 0.27 pT. To meet the demands of emergency communication for ultra-portability and strong penetration capability, a portable antenna operating at 30 kHz very low frequency (VLF) with overall dimensions of only 10 cm $\times$ 7 cm $\times$ 4 cm was further developed. Under an input power of 20 W, the antenna successfully achieved reliable cross-medium transmission through three reinforced concrete floors over a distance of 15 m. The proposed scheme, through the synergistic design of high-voltage pulse excitation and magnetic resonance amplification, enables both long-range communication and high-penetration cross-medium communication at centimeter-to-decimeter scales, providing a miniaturized solution for applications such as emergency communication, underground rescue, and underwater sensor networks.

Keywords: low-frequency antenna; Tesla coil; magnetic resonance; cross-medium communication; magnetic induction communication; wireless transmission

Foundation Item(s): Beijing Natural Science Foundation Undergraduates ‘QiYan’ Program (No.QY24196); Beijing Natural Science Foundation (No.JQ22010); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2023ZCJH03); National Natural Science Foundation of China (No.U2241243, No.52372101); Fund of State Key Laboratory of IPOC (BUPT) (No.IPOC2024ZT13); Teaching Reform Project of BUPT (No.2024Y010)

0 引言

低频电磁波(300 kHz 以下)凭借其高穿透性与低损耗等优势,能够有效穿透土壤、岩石、海水等复杂介质层,实现稳定可靠的远距离通信,因而在地下应急通信、潜艇通信、高精度定位与授时等关键领域中具有重要的应用价值^[1-3]。然而,传统电小天线的辐射效率严重依赖于其物理尺寸,通常要求天线尺寸不小于工作波长的十分之一^[4-6]。由于低频电磁波的波长可达千米量级,导致天线实际尺寸往往超过百米,这不仅限制了其机动部署能力,也显著降低了其在狭小或恶劣环境中的适用性。特别是在矿井、隧道施工及灾后废墟搜救等场景中,空间限制与复杂电磁环境对天线部署提出极高要求,传统低频天线难以满足实际应用需求。因此,发展兼具小型化设计和高辐射效率的低频天线,已成为提升地下水通信可靠性与操作安全性的重要研究方向^[7-10]。

近年来,机械天线的提出引发了人们对低频天线小型化设计的广泛兴趣^[11]。2019年,首次提出了一种由超低损耗铌酸锂棒制成的便携式甚低频压电机机械天线,与同等尺寸的电天线相比,其辐射效率更高。基于所提出的压电机机械天线,实现了 30 m 范围的电磁场测量^[12]。此外,旋转永磁体机械天线也被证明是实现小型化的有效路径,可在 100~210 m 的更远范围内实现低频通信^[13]。为进一步提升辐射性能,

Chang 等人^[14]提出压电陶瓷/铁磁异质结构的电磁耦合机械天线,通过压电摆动永磁体显著提升天线的品质因数,其磁场辐射能力相比于现有的压电机机械天线提高 200%。尽管上述研究在原理上验证了低频天线小型化的可行性,然而,现有机机械天线方案仍普遍存在功率容量低、辐射强度不足等问题,严重制约了其在实际系统中的应用。

在小型化低频天线设计中,基于磁谐振原理的特斯拉线圈展现出显著潜力。特斯拉线圈在谐振状态时,其电感和电容之间的能量交换达到动态平衡,进而产生高功率脉冲交流电^[15]。这种高脉冲特性使其在信号发射瞬间具备强大的能量,可有效增强信号强度,并通过耦合作用将信号无线传输至接收端,从而能够克服更复杂的介质损耗,确保信号远距离传输^[16]。自 2007 年麻省理工学院团队首次验证磁谐振线圈在强耦合状态下的高效能量传输以来,这种磁谐振无线传输技术得到广泛关注^[17]。此后, Sasaki 等人^[18]利用类特斯拉线圈的谐振结构在高频段实现了 22 dB 的磁场增益与 30 cm 的传输距离; Ma 等人^[19]则通过平面型磁谐振线圈阵列在 12 cm 的工作距离下实现了 34.5% 的能量传输效率,是原始样机的 3 倍。然而,现有研究多集中于高频、短距离的能量传输系统,在低频通信领域,尤其是在有限天线尺寸下实现百米级传输距离方面,仍存在显著挑战。

针对小型化低频天线传输距离受限的问题,本文

基于特斯拉线圈结构与磁耦合谐振原理,结合高脉冲信号的辐射特性,提出了一种高性能小型化低频天线设计方案。通过对天线结构和阻抗匹配进行协同优化设计,该天线能够在千分之一工作波长的小尺寸下实现高效的磁谐振,从而在显著降低天线物理尺寸的同时保持较高的信号辐射强度。校园环境中的远距离无线通信测试表明,所研制尺寸为 70 cm 的 200 kHz 低频(Low Frequency, LF)天线在 400 m 范围内可实现有效信号传输。为了进一步验证所提出天线设计方案在应急通信场景中的有效性,研制了尺寸仅为 10 cm 的便携式天线样品,在 20 W 输入功率与 30 kHz 甚低频(Very Low Frequency, VLF)工作频率下成功实现了在多楼层复杂电磁环境中的 15 m 跨介质通信。远距离传输与跨介质通信能力的验证,充分证明了所提出的小型化天线设计方案在实际应急通信场景中具有重要的应用潜力。

1 天线设计

1.1 工作原理

为实现有限尺寸下增强辐射强度与提升传输距离的目标,发射天线包含脉冲信号源、阻抗匹配网络与基于特斯拉线圈的磁谐振线圈结构,如图 1(a)所示。高功率脉冲信号首先经过阻抗匹配变压器实现信号源与初级线圈的高效能量传递;然后,能量通过近场耦合激励处于谐振状态下的次级回路。磁谐振效应可显著放大交变电流,从而辐射出强瞬态磁场,可有效拓展通信距离。

天线的等效电路如图 1(b)所示。高功率脉冲由受到高压电源驱动的火花间隙(Spark Gap, SG)打火器产生:当 SG 两端电压达到击穿阈值时,空气电离使回路导通,初级谐振回路随之振荡并释放能量;当 SG 电压降至维持电压以下,打火器恢复绝缘,振荡停止并重新充电,从而产生周期性的高压脉冲。为了确保脉冲信号高效馈入到线圈中,采用变压器将信号源特征阻抗 Z_0 与线圈输入阻抗 Z_{in} 相匹配,其关系满足^[20]:

$$\frac{Z_0}{Z_{in}} = \frac{L_{Source}}{L_{Load}} \quad (1)$$

其中, L_{Source} 、 L_{Load} 分别为变压器源端线圈与负载端线圈的电感。初级线圈与次级线圈分别与电容串联,构成 RLC 谐振回路,其等效电路包含线圈电感 L_1 、 L_2 , 电容 C_1 、 C_2 及铜线电阻 R_1 、 R_2 。通过将初、次级回路的谐振频率调控至一致,即^[21]

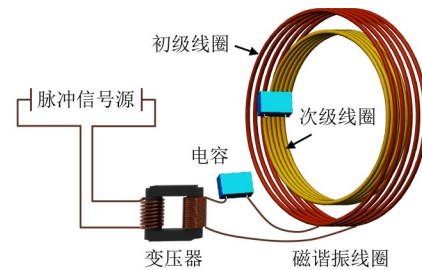
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2)$$

此时,天线可工作于谐振状态。

在这一设计中,初级和次级线圈上的电流 I_1 、 I_2 可由基尔霍夫电压定理得出^[22]:

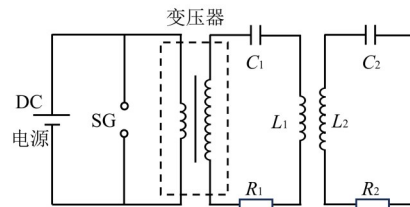
$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_{in} Z_2}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \\ I_2 = \frac{-j U_{in} \omega M}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{in} 为初级线圈的馈入电压, M 为两线圈之间的互感, Z_1 、 Z_2 为初级、次级线圈的阻抗。当天线工作在谐振频率时,线圈自阻抗表现为纯电阻 ($Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2$) 且模值达到最小,此时通过次级线圈的电流 I_2 达到最大值。由于辐射磁场强度直接正比于回路中的交变电流,因此该磁谐振结构可显著增强总体磁场辐射。进一步分析表明,次级回路电流在谐振状态下远大于初级回路电流,是磁场辐射的主要来源。



(a) 特斯拉线圈脉冲式天线示意图

(a) Schematic diagram of the Tesla coil-based pulsed antenna



(b) 等效电路图

(b) Equivalent circuit diagram

图 1 特斯拉线圈脉冲式天线

Figure 1 Tesla coil-based pulsed antenna

磁谐振结构通过使次级回路工作在谐振状态,有效提高了回路电流与辐射磁场强度,是实现小型化天线辐射增强的核心。然而,若仅采用传统连续波激励,在维持高谐振电流时,系统平均功耗显著增加,且导线可能因持续大电流而发热,产生额外的欧姆损耗,并带来安全性与可靠性的挑战。为此,引入基于 SG 打火器的高压脉冲激励作为关键补充。该方式将能量以窄脉宽、高峰值的形式注入谐振系统,其优势在于:在相同的平均输入功率下,可产生高于连续波激励下的电流峰值,从而激发更强的磁场;同时,由于能量集中在短时间内释放,导线平均发热大幅降低,系统热安全性得到改善,也更利于电池供电设备

实现长时间工作,契合便携式设计需求。

高压脉冲激励与磁谐振结构的结合,既发挥了磁谐振在高 Q 值下高效转换能量的特性,又通过脉冲供能,有效控制了系统的平均功耗问题。两者共同作用,使得天线在保持小尺寸的同时,兼具高峰值磁场输出能力与良好的实用性,从而为低频便携通信装备的开发提供可靠的解决方案。

1.2 结构优化

线圈的磁场辐射强度可依据比奥-萨伐尔定律进行计算,对于轴向场点,其表达式为^[23]

$$H = \frac{I_1 N_1 r_1^2}{2\sqrt{(r_1^2 + d^2)^3}} + \frac{I_2 N_2 r_2^2}{2\sqrt{(r_2^2 + d^2)^3}} \quad (4)$$

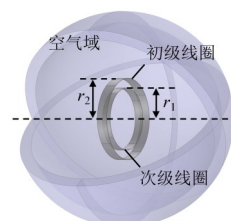
其中, N_1 、 N_2 分别为初级、次级线圈的匝数, r_1 、 r_2 分别为初级、次级线圈的半径, d 为沿线圈轴向的测试距离。当测量距离远大于天线尺寸(即 $d \gg r_1, r_2$) 时,上式可简化为 $H \propto 1/d^3$, 天线磁场强度随距离呈三次方衰减关系。由式(4)可知,线圈结构是决定天线辐射性能的关键参数,为将上述理论模型转化为可实现的高性能天线,需对半径与匝数参数进行协同优化。本文采用多物理场仿真软件 COMSOL 建立天线模型,在满足小型化约束的前提下,以最大化特定距离处的磁场强度为目标,系统优化线圈几何结构。

天线的三维仿真模型如图 2(a) 所示,由共面且同圆心的初级线圈与次级线圈构成。为精确计算远场辐射,将模型置于半径为 5 m 的球形空气域中,并在其外缘设置了 1 m 厚的无限元域,以模拟自由空间的无反射边界条件。以目标工作频率 200 kHz (LF) 为例展开仿真分析:首先设定初、次级线圈的半径 (r_1, r_2) 与匝数 (N_1, N_2) 等几何参数,随后通过调节串联电容值 (C_1, C_2) 使双回路的谐振频率均精确调谐至 200 kHz,最后在轴向距离 5 m 处计算磁场强度幅值,以此作为评估天线辐射性能的关键指标。

为满足发射天线便于灵活部署与转移的应用需求,天线总体尺寸被限制在 70 cm 以内。如图 2(b) 所示,当初级与次级线圈半径均设置为该尺寸约束下的最大值 35 cm 时,其磁耦合程度达到最优,辐射磁场强度最强。在确定几何尺寸后,进一步分析线圈匝数的影响。由式(4)可知,增大匝数可有效增强辐射磁场,且次级线圈匝数 N_2 对磁场辐射的影响更加显著。然而,匝数的增加也会导致天线输入阻抗升高,如图 2(c) 所示,这将在实际应用中为线圈与低阻抗源的匹配带来困难并引入更多损耗。最终,选择 $N_1 = 10, N_2 = 35$ 作为优化设计值,在实现高辐射场强的同时,保证了相对较低的输入阻抗,便于后续阻抗匹配网络的设计。

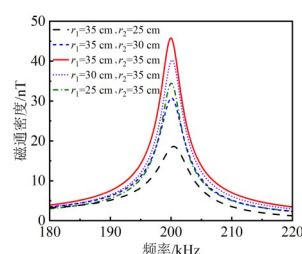
进一步验证所提出的双线圈结构在受限尺寸下的性能优势,在同等尺寸下(半径 35 cm)对磁谐振双

线圈与单线圈进行辐射磁场强度对比。如图 2(d) 所示,在相同功率激励条件下,优化后的双线圈结构所产生的磁场强度(45.4 nT)为单线圈磁场强度(10.1 nT)的 4.5 倍。结果表明,双线圈结构有效利用磁谐振耦合机制,在有限尺寸限制下,有效提升天线的辐射性能。



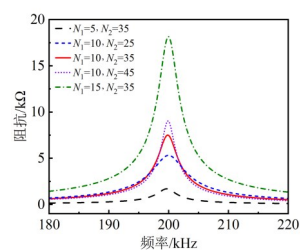
(a) 仿真模型

(a) Simulation model



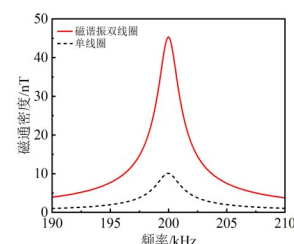
(b) 不同半径的磁通密度曲线

(b) Magnetic flux density curves for different radii



(c) 不同匝数的阻抗曲线

(c) Impedance curves for different numbers of turns



(d) 线圈结构辐射仿真对比

(d) Radiation simulation comparison of coil structures

图2 仿真建模与参数优化

Figure 2 Simulation modeling and parameter optimization

2 实验结果与分析

2.1 测试系统设置

根据仿真优化方案,研制了如图 3(a) 所示的天

线原型样机。线圈的结构参数如表 1 所示,其谐振频率通过串联调谐电容精确设置为 200 kHz。在元件选择上,为承受谐振时的高压工况,电容均选用耐压值不低于 3 000 V 的高压薄膜电容。次级线圈采用利兹线绕制,以有效抑制高频趋肤效应,从而减少由趋肤效应带来的导线内阻,提升回路品质因数。经阻抗分析仪实测,该磁谐振线圈结构在 200 kHz 时阻抗约为 7 000 Ω ,为将其与输出电阻仅为 2 Ω 的信号源进行高效匹配,将阻抗匹配变压器的源端线圈与负载端线圈匝数分别设置为 3 和 180,以保证输入功率最大化。最终,由高功率脉冲信号源、阻抗匹配变压器与磁谐振线圈共同构成测试系统的发射端。通过阻抗分析仪测量线圈的自感、电阻等参数,得到磁谐振线圈在 200 kHz 谐振频率处的品质因数 $Q = 875$,对应的 -3 dB 带宽为 0.23 kHz。该高 Q 值反映了谐振系统具有较低的能量损耗和较强的磁场放大能力,而 0.23 kHz 的带宽足以支持低速应急通信的基本需求。

如图 3(b)所示,接收端由环形天线、锁相放大器与频谱分析仪组成,用以精确测量辐射磁场信号。其中,环形天线具备超宽带特性,可确保在低频范围内有效接收信号。锁相放大器通过生成与发射天线工作频率完全同步的参考信号,采用相干检测技术,能够从强烈的环境噪声中提取出微弱的时域目标信号。频谱分析仪则用于观测信号的频域特性,辅助验证发射天线的工作中心频率及谐波成分,确保其工作于设计的谐振模式。

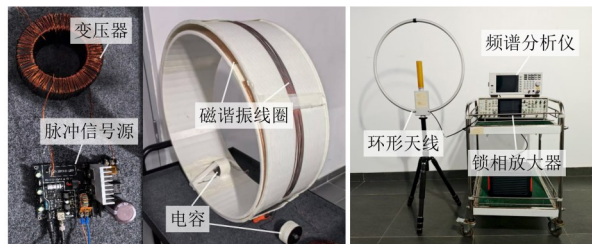


图 3 测试系统设置
Figure 3 Test system setup

表 1 线圈结构参数

Table 1 Coil structure parameters

线圈类型	匝数	线径/mm	匝间距/mm	线圈半径/mm	电容/nF
初级线圈	10	1.5	3	350	4.4
次级线圈	35	8.0	0.1	330	0.7

2.2 近区磁场测试

在上述天线设计中,高脉冲信号与磁谐振线圈结构是决定所提出天线辐射性能的关键,为验证天线设

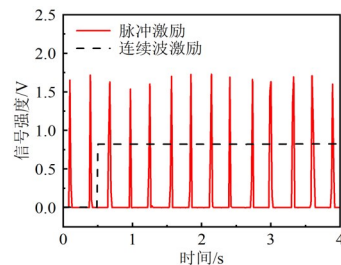
计方案的有效性,对所得天线设计的近区实际性能进行测试。

如图 4(a)所示,在固定输入功率的条件下,对比了 200 kHz 工作频率时脉冲激励与连续波激励下的接收信号幅值。实验测得,高功率脉冲信号的峰值电压可达 1.7 V,其幅值达到相同输入功率下连续波信号(0.82 V)的 2.07 倍。这一显著的增益效应主要归因于脉冲激励方式可将能量在极短时间内集中释放,结合磁谐振回路的高 Q 值特性,从而在次级线圈上激发出极高的瞬态振荡电流。该结果验证了所采用的高脉冲特性对于提升天线瞬态辐射场强的有效性。

如图 4(b)所示,通过对比所提出的双线圈结构与同匝数单线圈的频谱响应曲线,可以清晰地评估磁谐振机制对辐射性能的增强效果。实验结果表明,引入磁谐振耦合结构能够显著提升天线的信号辐射强度。在谐振频率点处,接收功率由单线圈的 -5.6 dBm 提高至 8.2 dBm,增益达 13.8 dB,相应信号强度提升约 4.9 倍,与前述仿真中双线圈辐射磁场强度为单线圈 4.5 倍的结论相一致,符合理论预期。该性能提升主要源于谐振结构所带来的磁场叠加与电流放大。初级回路能量通过磁谐振耦合高效传递至次级回路,并在谐振状态下激发出更强的感应电流,从而大幅增强辐射磁场。

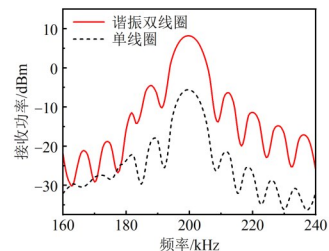
2.3 远距离与跨介质通信测试

为验证天线在真实室外场景下信号传输的可行



(a) 激励方式时域信号对比

(a) Time-domain signal comparison of excitation methods



(b) 天线结构频域信号对比

(b) Frequency-domain signal comparison of antenna structures

图 4 天线时域与频域信号测试

Figure 4 Time-domain and frequency-domain signal test

性,采用通断键控(On-Off Keying, OOK)调制的重复通断脉冲信号进行传输实验。该调制方式作为幅移键控的最简形式,通过控制载波的有无来表征二进制信息。实验中采用的波形为窄脉宽、高峰值的脉冲信号,该脉冲本身即作为载波存在,在每一个脉冲持续期内,有脉冲则对应载波输出,发送二进制“1”,无脉冲则对应无载波输出,发送二进制“0”。实验中将脉冲信号以固定周期重复发射,即发送连续“1111”序列,以直观地评估在复杂噪声基底环境下,信号是否能够被稳定接收、达到可识别的信噪比。

实验场地选取校内主干道,该环境不可避免地存在车辆移动、建筑物遮挡以及地下金属管网等典型城市电磁干扰因素,能够较好地模拟真实城市环境的传播特性。发射端天线持续工作于 200 kHz,接收端通过锁相放大器对信号进行捕捉与分析。如图 5(a)所示,在脉冲信号源最大允许工作功率(800 W)的驱动下,所研制的天线样机可在 400 m 距离处实现信号的稳定、有效接收,信号强度为 8 μV ,根据接收天线参数换算可得测量点处磁场强度为 0.27 pT。通过高灵敏度锁相放大器对接收信号进行捕捉与分析,证实了在此距离下仍能保持良好的信噪比。为进一步验证天线磁场强度随距离的变化规律,图 5(b)给出了实测磁场强度与理论衰减曲线的对比结果。根据式(4),在空气介质中磁场强度应满足 $H \propto 1/d^3$ 的衰减规律(如图 5 中实线所示)。实验测量点的磁场强度数据与理论曲线吻合良好,证实了本天线的辐射物理特性,为后续在不同介质中的传输性能预测提供了可靠的实验依据,充分验证了本天线设计方案在真实复杂环境下实现百米级可靠通信的能力。

上述实验在空气介质中验证了本天线在 200 kHz 频段的远距离通信能力。由于低频电磁波在导电介质中具有天然的穿透优势,该频段应用中常涉及水下通信场景,因此有必要对天线在导电介质中的传输特性进行讨论。根据电磁场理论,导电介质中趋肤深度 $\delta = [2/(\omega\mu\sigma)]^{1/2}$ 决定了电磁波的衰减速率。以常见淡水水下通信场景为例,其电导率 $\sigma = 10 \sim 100 \mu\text{S/cm}$,对于 200 kHz 频段,计算可得趋肤深度 $\delta \approx 11.3 \sim 35.6 \text{ m}$,表明该频段具备数十米尺度的水下通信潜力。为定量评估水下通信能力,基于上述实验验证的天线模型,采用 COMSOL 建立其导电介质($\sigma = 10 \sim 100 \mu\text{S/cm}$, $\varepsilon_r = 80$, $\mu_r = 1$)的电磁仿真模型模拟水下环境,并设置空气介质($\sigma = 0 \mu\text{S/cm}$, $\varepsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$)进行对比。如图 6 所示,在相同距离(100 m)处,空气介质中的磁通密度为 9.94 pT,而电导率 $\sigma = 50 \mu\text{S/cm}$ 的介质中磁通密度为 0.27 pT,衰减约 31.3 dB。为了获得与空气中 400 m 距离处相同的信噪比,需在更近的 100 m 距离

内实现通信,或进一步提升接收系统的灵敏度。该分析通过理论与仿真评估了水下通信潜力,真实水下环境传输实验将在后续工作中开展实测验证。

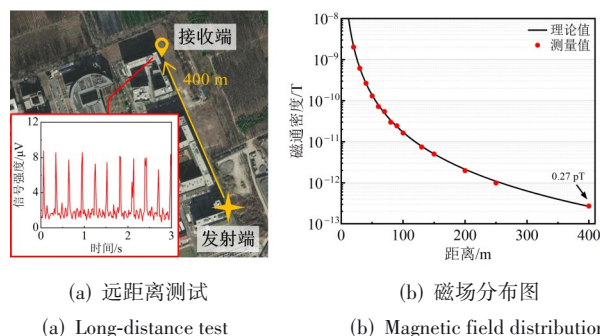


图 5 远距离传输测试及磁场分布图

Figure 5 Long-distance transmission test and magnetic field distribution

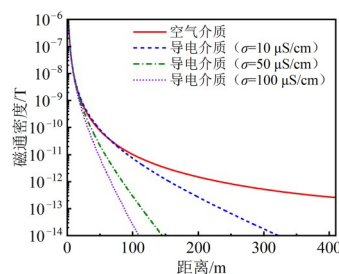


图 6 不同电导率介质下磁场分布图

Figure 6 Magnetic field distribution in media with different conductivity values

低频信号在导电介质中传输时,频率越低,穿透能力越强。这一规律不仅适用于水下环境,也同样适用于建筑结构中广泛存在的钢筋混凝土介质。现代建筑内部的钢筋网络构成了复杂的导电屏障,对无线信号形成严重衰减。因此,为实现对这类高导电障碍物的有效穿透,需进一步降低工作频率以提升穿透深度。面向应急通信等对部署灵活性要求极高的应用场景,进一步研制了工作于 30 kHz (VLF)、尺寸仅为 $10 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ 的便携式天线,如图 7(a)所示,并对其在复杂环境中的跨介质通信能力开展实验验证。该便携式天线同样采取磁谐振与脉冲激励相结合的设计,其磁谐振线圈在 30 kHz 谐振频率处的实测品质因数 $Q = 32.5$,对应的 -3 dB 带宽为 0.92 kHz;馈电电路部分则使用微型高压元件,将脉冲信号源与阻抗匹配变压器集成在 $10 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的箱体中,在保证高穿透性的同时显著提高了天线的便携性。

在本实验中,在 20 W 输入功率的驱动下,发射端持续重复发射 30 kHz 的 OOK 调制通断脉冲信号,将便携式天线置于楼宇底层,于跨越三层钢筋混凝土楼板、直线距离 15 m 处布置接收装置,场景构型如图 7(b)所示,有效模拟了救援环境中常见的强遮挡、多介质

传输条件。测试结果表明,即便在此类恶劣通信环境中,接收端仍可清晰稳定地捕捉来自便携发射端的通信信号,成功实现了跨介质可靠信息传输,体现了其在应急通信、地下救援等应用场景中的实用价值。

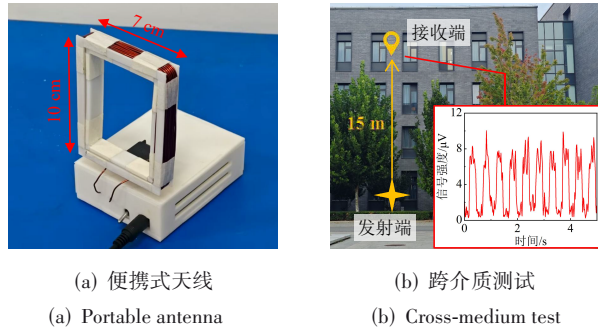


图7 便携式天线及其跨介质测试
Figure 7 Portable antenna and cross-medium communication test

为清晰展现本工作在小型化方面的优势,表2将所提出的特斯拉线圈脉冲式低频天线与目前报道的低频天线方案进行了综合对比。基于物理运动或电致伸缩效应的机械天线虽具有高效率、体积小等优势,但其辐射能力受限于材料与驱动方式,难以实现百米级远距离通信;传统环天线为实现有效辐射,通常需较大环路面积或依赖中继线圈,限制了其便携性与实际部署灵活性。而本设计天线在仅70 cm的尺寸下,于复杂校园环境实测获得了400 m的信号传输距离,在保持尺寸仅为千分之一波长的同时,展现出优于传统环天线的辐射性能。相较于尺寸约10 cm的机械天线,本工作在相近尺寸下,实现了对三层钢筋混凝土楼板的穿透,并达到15 m的有效传输距离。值得注意的是,小型化设计往往以牺牲辐射能力为代价,而本工作通过高压脉冲激励与磁谐振放大的协同设计,优化平衡这两方面的综合性能。

表2 小型化低频天线性能对比

Table 2 Performance comparison of miniaturized low-frequency antennas

天线类型	工作频率/kHz	天线尺寸	传输距离	方案
永磁体机械天线	0.03	15 cm × 4 cm	2.5 m(1.7 μT)	文献[24]
压电机械天线	35	9.4 cm × 1.6 cm	30 m	文献[12]
磁电机械天线	11.32	10 cm × 8 mm	5 m(10 pT)	文献[25]
环天线(中继线圈)	125	22 cm	40 m	文献[26]
环天线	325	14 cm	20 cm	文献[19]
环天线	10~30	2 m	340 m(0.8 pT)	文献[20]
特斯拉线圈脉冲式低频天线	200	70 cm	400 m(0.27 pT)	本工作(远距离)
特斯拉线圈脉冲式低频天线	30	10 cm	15 m(0.27 pT)	本工作(便携式)

3 结束语

本文提出了一种基于特斯拉线圈磁谐振原理并采用高压脉冲激励的小型化低频天线设计方案。通过优化天线结构参数并采用阻抗匹配变压器,天线在千分之一工作波长尺寸下实现了高效磁谐振,在显著缩减物理尺寸的同时保持较高的辐射强度。外场测试表明,所研制尺寸为70 cm的200 kHz(LF)天线在校园环境中可实现400 m远距离通信;面向应急通信应用开发的10 cm便携式天线,在20 W输入功率与30 kHz(VLF)工作频率下成功实现了跨越三层楼板的15 m跨介质可靠传输。实验结果验证了该天线设计方案在复杂环境下兼具远距离通信与优异便携性的能力,在应急通信及地下救援场景中具有重要的应用价值。

参考文献

[1] Forget A, Rangraz P, Bousquet J F. A model of the magneto-inductive link with relays to cross the air-water interface[J].

IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(5): 4549-4563.

[2] Wang Xiaoyu, Yang Xijie, Li Ziyi, et al. Research on radiation field and driving based on super-low frequency mechanical antenna array[J]. iScience, 2023, 26(5): 106741.

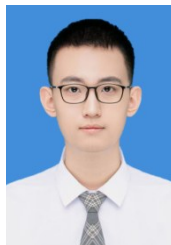
[3] 杨巨涛, 李清亮, 郝书吉, 等. 电离层中ELF辐射源向下传播衰减理论分析[J]. 电子学报, 2020, 48(12): 2319-2325. Yang Jutao, Li Qingliang, Hao Shuji, et al. Theoretical analysis of downward propagation attenuation of ELF radiation in ionosphere[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(12): 2319-2325. (in Chinese)

[4] 王晓煜, 张雯厚, 孙丽慧, 等. 超低频机械天线通信模型及信号接收线圈研究[J]. 电子学报, 2021, 49(4): 824-832. Wang Xiaoyu, Zhang Wenhui, Sun Lihui, et al. Research on super-low frequency mechanical antenna model and experimental study of magnetic sensor coil[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(4): 824-832. (in Chinese)

[5] Hua Man, Li Wen, Ni Binbin, et al. Very-Low-Frequency

- transmitters bifurcate energetic electron belt in near-earth space[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4847.
- [6] Xu Jianchun, Li Zhao, Pan Xuchao, et al. Ultra-wideband electrostrictive mechanical antenna[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(8): 2210868.
- [7] Yang Silei, Geng Junping, Zhou Han, et al. Long-range EM communication underwater with ultracompact ELF magneto-mechanical antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(3): 2082-2097.
- [8] 扶逸凡, 徐国凯, 朱祥维, 等. 基于压电晶体的声波激励小型化低频天线技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(11): 3935-3944.
- Fu Yifan, Xu Guokai, Zhu Xiangwei, et al. Research on acoustically excited miniaturized antenna technology based on piezoelectric crystal in low-frequency[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(11): 3935-3944. (in Chinese)
- [9] Zeng Zilun, Wu Jingqi, Zhang Chenxi, et al. Low-frequency metamaterial antenna based on magnetic field coupling effect[J]. *Science China Technological Sciences*, 2025, 68(4): 1420204.
- [10] Chu Zhaoqiang, Jiang Shizhan, Ren Yuzhu, et al. Enlarged modulation rate for narrowband magnetoelectric mechanical antennas through predistortion waveform design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(7): 4409-4420.
- [11] Chu Zhaoqiang, Mao Zhineng, Song Kaixin, et al. A multilayered magnetoelectric transmitter with suppressed nonlinearity for portable VLF communication[J]. *Research*, 2023, 6: 208.
- [12] Kemp M A, Franzi M, Haase A, et al. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1715.
- [13] Burch H C, Garraud A, Mitchell M F, et al. Experimental generation of ELF radio signals using a rotating magnet[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6265-6272.
- [14] Chang Jianglei, He Zhuangzhuang, Xu Shupeng, et al. A high- Q electric-mechano-magnetic coupled resonator for ELF/SLF cross-medium magnetic communication[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(13): 2309159.
- [15] Jin Xin, Chen Xiyu, Qi Chen, et al. Modeling and construction of single-wire power transmission based on multilayer tesla coil[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(5): 6682-6695.
- [16] 蒋欣宇, 燕有杰, 王彬文, 等. 基于约束多目标优化算法的高功率脉冲阵列天线辐射特性重构[J]. *电子学报*, 2025, 53(12): 4656-4664.
- Jiang Xinyu, Yan Youjie, Wang Binwen, et al. Reconfiguration of radiation characteristics of high-power pulsed array antenna based on constrained multi-objective optimization algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(12): 4656-4664. (in Chinese)
- [17] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. *Science*, 2007, 317(5834): 83-86.
- [18] Sasaki A I, Ouellette O, Beaudry-Marchand M, et al. Analysis and experimental study of magnetic-field amplification by a double coil[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 3216-3226.
- [19] Ma Hongshuai, Liu Ruikang, Zhang Juan, et al. Laminated miniaturized low-frequency metamaterial block for near-field wireless power transmission applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(5): 4283-4297.
- [20] Wu Jingqi, Zeng Zilun, Wang Liwei, et al. Isolation transformer based very low frequency antenna with enhanced radiation characteristics[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(3): 2408770.
- [21] Zhong Wenxing, Lee C K, Ron Hui S Y. General analysis on the use of Tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(1): 261-270.
- [22] Zhong Wenxing, Lee C K, Hui S Y. Wireless power domino-resonator systems with noncoaxial axes and circular structures[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4750-4762.
- [23] Muzzammil M, Ahmed N, Qiao Gang, et al. Fundamentals and advancements of magnetic-field communication for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7555-7570.
- [24] Liu Yu, Gong Shuhong, Liu Qian, et al. A mechanical transmitter for undersea magnetic induction communication[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6391-6400.
- [25] Wu Hanzhou, Jiang Tao, Liu Zhen, et al. Magneto-mechano-electric antenna for portable VLF transmission[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(7): 2300096.
- [26] Ahmed N, Radchenko A, Pommerenke D, et al. Design and evaluation of low-cost and energy-efficient magneto-inductive sensor nodes for wireless sensor networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(2): 1135-1144.

作者简介



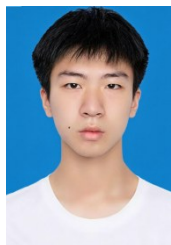
张宸熙 男,2004年10月出生于安徽省蚌埠市。现为北京邮电大学本科生,应用物理学专业。主要研究方向为天线和电磁波理论。

E-mail: zhangchenxi@bupt.edu.cn



曾梓伦 男,2001年3月出生于云南省弥勒市。北京邮电大学物理科学与技术学院博士研究生。主要研究方向为电磁超材料与低频天线。

E-mail: zzlzz@bupt.edu.cn



张庭恺 男,2005年1月出生于山东省临沂市。现为北京邮电大学本科生,电子科学与技术专业。主要研究方向为天线和电磁波理论。

E-mail: 2023210712@bupt.edu.cn



许建春 男,1991年3月出生于福建省福州市。北京邮电大学物理科学与技术学院副教授、博士生导师。主要研究方向包括超材料、轨道角动量天线、机械天线和宽带天线。

E-mail: jianchun_xu@bupt.edu.cn



吴诗莹 女,2004年12月出生于四川省成都市。现为北京邮电大学本科生,信息工程专业。主要研究方向为天线和电磁波理论。

E-mail: wushiying@bupt.edu.cn