

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005522

基于旋转永磁体的机械天线研究

刘文一^{1,2,3} 张锋^{1,2} 孙发晓^{1,2,3}(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094; 2. 电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;
3. 中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 为了克服现有低频通信系统的发射天线尺寸庞大、功耗大、辐射效率低等缺陷,提出了一种小型化、低功耗低频发射天线。该低频发射天线利用伺服交流电机驱动永磁体旋转产生超低频电磁波,上位机通过运动控制器编程软件设定伺服电机运动参数,并下发给控制器,实时控制电机运动,将二进制频移键控(2FSK)空间调制技术应用于该机械天线,从而进行信息传输。实验结果表明,该机械天线可以 20.35 cm³ 的永磁体辐射源、44 W 的低功耗实现码速率为 1 bit/s 的超低频通信。与传统低频发射天线相比,该机械天线尺寸小,功耗低,辐射效率不受 Chu-Harrington 极限限制,为超低频通信系统提供了一种新的发射天线。

关键词: 机械天线;超低频通信;小型化;低功耗化;2FSK 调制解调

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research on mechanical antenna based on rotating permanent magnet

Liu Wenyi^{1,2,3} Zhang Feng^{1,2} Sun Faxiao^{1,2,3}(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to overcome the large size, high power consumption and low radiation efficiency of the transmitting antenna in the existing low-frequency communication system, a miniaturized and low-power low-frequency transmitting antenna is proposed. The low frequency transmitting antenna uses servo AC motor to drive the permanent magnet to rotate to generate ultra-low frequency electromagnetic wave. The upper computer sets the motion parameters of the servo motor through the programming software of motion controller, and sends them to the controller to control the motor motion in real time. The spatial modulation technology of 2FSK is applied to the mechanical antenna for information transmission. The experimental results show that the mechanical antenna can achieve 1 bit/s ultra-low frequency communication with a 20.35 cm³ radiation source of permanent magnet and a low power consumption of 44 W. Compared with traditional low-frequency transmitting antennas, the mechanical antenna is small in size, low in power consumption, and radiation efficiency is not limited by the Chu-Harrington limit, providing a new technical proposal for transmitting antenna of ultra-low frequency communication systems.

Keywords: mechanical antenna; ULF communication; miniaturization; low-power consumption; 2FSK modulation and demodulation

0 引言

20世纪中期,Chu^[1]、Harrington^[2]等研究工作表明,传统天线的辐射品质因数 Q_{rad} 存在下限: $Q_{rad} > 1/(ka)^3 + 1/ka$ 。其中, $k=2\pi/\lambda$ 为波数(λ 为波长), a 为最小辐射球的半径。Chu-Harrington 极限表明 Q_{rad} 的下限与天线的电尺寸呈负相关,即电尺寸越大, Q_{rad} 的下限越小,辐射效率越高。在微波与毫米波频段,小口径的天线就能具备较

高的辐射效率^[3],可以获得较高的增益,满足高速大容量通信需求。但是频率较高的电磁波在良导体媒质中传播损耗很大。所以在水下、地下等电导率和磁导率较大的特殊环境中^[4]通信不能使用频率较高的电磁波,而是要使用频率较低电磁波,来换取较远的传播距离。在实际应用中,现有低频通信系统的发射天线均为电小天线(electrically small antenna, ESA)。根据 Chu-Harrington 极限,ESA 辐射品质因数的下限可近似写为: $Q_{rad} > 1/(ka)^3$,即电小天

收稿日期:2020-12-11

线 Q_{rad} 的下限近似与 $(ka)^3$ 成反比,因此传统天线电尺寸越小, Q_{rad} 就越大,在辐射功率一定的条件下,其近场储能越多,则辐射电阻就相对较小,辐射效率就越低。所以要想获得有效的辐射,ESA 的物理尺寸有很大的限制。而且其 Q_{rad} 值高,带宽窄,而且必须加入阻抗匹配网络才能实现阻抗匹配,这又显著增加了损耗电阻,导致低频天线辐射效率很低,而且发射天线尺寸庞大,功耗大^[5]。这些因素严重限制了低频通信系统的应用,因此急需创新低频电磁发射的新理论和新技术,以解决当前低频电磁通信面临的技术瓶颈。

2017 年美国国防高级研究计划局(DARPA)提出了一种基于“机械能转化为电磁能”的新型天线技术^[6-7],并把这类天线称为“机械天线”(mechanical antenna)。其辐射原理是机械驱动驻极体或永磁体机械振动或者旋转,在其周围空间产生交变的电磁波。因为其辐射机理与传统天线技术完全不同,所以机械天线 Q_{rad} 值的下限不受 Chu-Harrington 极限对天线尺寸的限制,而且机械天线不存在高电抗问题,可省去阻抗匹配网络及由此带来的匹配损耗,进一步提高辐射效率,这就有望在低频段以较小的天线尺寸实现较高的辐射效率。

Bickford 等^[8]提出一种基本机械天线概念模型,该模型通过转速为 167 Hz 的电机驱动驻极体旋转,并测量其产生的时变磁场,证明了微型机械天线的可行性。实验也证明了在相同的尺寸条件下,机械天线在远场的辐射效率高于传统电小天线。对于 1 kHz 以下的频率,其空间尺寸约为 1 m,理论上可以比传统的短偶极子和线圈发射器的性能超出 8 个数量级^[9]。Gołkowski 等^[10]提出一种基于固定永磁体的机械天线,通过旋转由软磁性材料制成的百叶窗来调制静磁场,该百叶窗在固定永磁体前面,具有多个开口,如果所需辐射电磁波的角频率为 ω ,开口数量为 N ,可把需要的电机旋转速度由 ω 降低至 ω/N 。Srinivas 等^[11-12]提出一种用于超低频(ULF)电磁波传输的磁摆阵列机械天线。摆可以很容易地形成一个阵列,而不需要保持轴向对称;该阵列固有品质因子很高,大大提高了近场 ULF 通信系统的传输效率。实验结果表明,该摆阵比裸线圈的效率高出 7 dB。Kemp 等^[13]提出了一种振动式的机械天线,其振动原理是利用杆状铈酸锂晶体及其逆压电效应产生的超声谐振,经实验测试和对比分析,和现有技术相同电尺寸的传统天线相比,其辐射效率和传输带宽可分别提高 300 倍和 83 倍以上。Barani 等^[14]研究了机械天线在超低频频段工作的倍频和调相方法。本文研究了基于旋转永磁体的机械天线的辐射特性,并探讨了辐射体的优化方法,以及实现二进制频移键控(binary frequency shift keying, 2FSK)调制解调应用于机械天线。

1 机械天线模型与辐射特性

1.1 辐射模型

永磁体的磁矩决定式为:

• 144 •

$$m = (B_r/\mu_0)V \tag{1}$$

式中: B_r 为永磁体的剩磁强度; V 为永磁体的体积; μ_0 为真空的磁导率。永磁体在其周围产生的静态磁场由其磁矩决定,与其形状无关。静态磁偶极子在其周围产生的静态磁场仅由其磁偶极矩决定,所以根据磁偶极矩和磁矩的关系 $q_m l = \mu_0 m$,可以得到永磁体和磁偶极矩的等效关系:

$$q_m l = B_r V \tag{2}$$

式中: q_m 为等效磁偶极子的电荷。因此永磁体在其周围产生的静态磁场可等效为一个磁偶极子产生的静态磁场,如图 1 所示,磁偶极子的磁偶极矩由永磁体的体积、剩磁强度决定。因此同服电机驱动永磁体旋转可等效为旋转的磁偶极子。可以通过严格的数学证明旋转的磁偶极子在其周围产生的时变电磁场可以等效为两个正交的、时变的且有 90° 相位差的磁流元产生的时变电磁场,如图 2 所示。等效得到的磁流与旋转磁偶极子的关系为:

$$I_m^x = j\omega q_m e^{j(\omega t + \theta_0)} \tag{3}$$

$$I_m^y = j\omega q_m e^{j(\omega t + \theta_0 - \pi/2)}$$

式中: I_m^x, I_m^y 分别为沿着 x 轴与 y 轴的等效磁流; ω 为磁偶极子的旋转角速度; θ_0 为磁偶极子的初始旋转角。

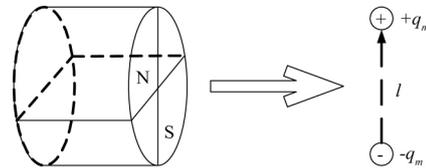


图 1 永磁体和磁偶极子的等效

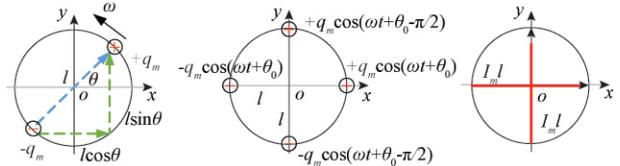


图 2 旋转磁偶极子和正交磁流源的等效过程

1.2 辐射特性研究

当永磁体的 NS 极在 xoy 平面内绕 z 轴逆时针旋转时,在其周围产生的时变电磁场在球坐标系下的表达式为^[15]:

$$E = -\frac{jk\omega B_r V}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) (\theta e^{-j\varphi} + \varphi \cos\theta e^{-j(\varphi + \frac{\pi}{2})}) e^{-jkr} \tag{4}$$

$$H = \frac{\omega^2 \epsilon B_r V}{4\pi r} \left[\begin{matrix} r \sin\theta \left(\frac{2j}{kr} + \frac{2}{k^2 r^2}\right) e^{-j\varphi} + \\ \theta \cos\theta \left(1 - \frac{j}{kr} - \frac{1}{k^2 r^2}\right) e^{-j\varphi} + \\ \varphi \left(1 - \frac{j}{kr} - \frac{1}{k^2 r^2}\right) e^{-j(\varphi + \frac{\pi}{2})} \end{matrix} \right] e^{-jkr} \tag{5}$$

式中: r, θ, φ 为球坐标系下的坐标变量。 ϵ 为自由空间介电

常数。在远场区 $kr \gg 1$, 所以 $(1/kr)^3 \ll (1/kr)^2 \ll 1/kr$, 将高次项忽略, 保留 $1/kr$ 项。为表达简洁, 将表达式中永磁体的剩余磁场强度 B_r 和体积 V 根据式(1)表示为磁矩 m 代入, 可得远区辐射场表达式为:

$$\mathbf{E} = -\frac{jk\omega\mu m}{4\pi r}(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\varphi}j\cos\theta)e^{-j(kr+\varphi)} \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\omega^2\varepsilon\mu m}{4\pi r}[\boldsymbol{\theta}\cos\theta - j\boldsymbol{\varphi}]e^{-j(kr+\varphi)} \quad (7)$$

经验证, 式(8)和(9)满足:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r\left(\frac{\mathbf{r} \times \mathbf{E}}{\eta} - \mathbf{H}\right) = 0 \quad (8)$$

式中: η 为自由空间波阻抗。可见远区场满足电磁场的辐射条件^[16], 说明永磁体的旋转可以有效地辐射电磁能。

由坡印廷矢量的计算表达式:

$$\mathbf{S}_c = \frac{1}{2}\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \quad (9)$$

可求得远区辐射场的坡印廷矢量为:

$$\mathbf{S}_c = \frac{1}{2} \frac{k\varepsilon\omega^3(\mu m)^2}{(4\pi r)^2}(1 + \cos^2\theta)\mathbf{r} \quad (10)$$

可以看出只有实部, 虚部为 0, 故机械天线在远区只有实功率, 无虚功率。分别绘制功率流密度 \mathbf{S}_c 的三维方向图和场矢量的三维方向图($\sqrt{\mathbf{S}_c}$ 的三维方向图), 如图 3 所示, 可以看出两者均在旋转轴方向上最大, 但是两者的形状不同。

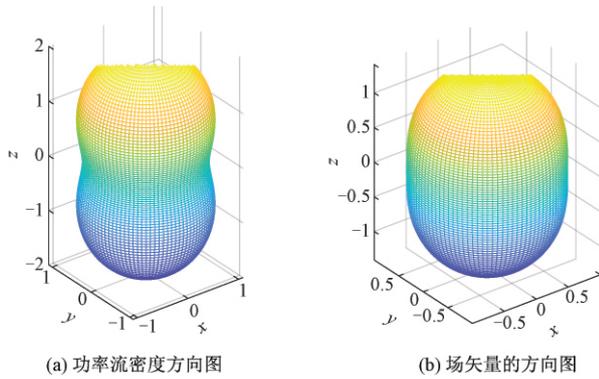


图 3 三维方向图对比

在最大辐射方向 z 轴正方向上, 将 $\theta = 0$ 代入式(6)和(7)可得:

$$\mathbf{E} = -\frac{jk\omega\mu m}{4\pi r}(\boldsymbol{\theta}e^{-j\varphi} + \boldsymbol{\varphi}e^{-j(\varphi+\frac{\pi}{2})})e^{-jkr} \quad (11)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\omega^2\varepsilon\mu m}{4\pi r}[\boldsymbol{\theta}e^{-j\varphi} + \boldsymbol{\varphi}e^{-j(\varphi+\frac{\pi}{2})}]e^{-jkr}$$

可见电场 \mathbf{E} 有两个相互垂直的分量 \mathbf{E}_θ 和 \mathbf{E}_φ 且这两个分量模相同、 θ 方向的分量相位超前 $\pi/2$, 所以在 z 轴正方向为右旋圆极化波。磁场 \mathbf{H} 有两个相互垂直的分量 \mathbf{H}_θ 和 \mathbf{H}_φ 且这两个分量模相同、 θ 方向的分量相位超前 $\pi/2$, 极化方向与用电场描述一致。

在最大辐射方向 z 轴负方向上, 将 $\theta = \pi$ 代入式(6)

和(7), 同理可得在 z 轴负方向上为左旋圆极化波。

在 xoy 平面(旋转平面)内, 将 $\theta = \pi/2$ 代入式(6)和(7)可得:

$$\mathbf{E} = -\frac{jk\omega\mu m}{4\pi r}e^{-j(kr+\varphi)}\boldsymbol{\theta} \quad (12)$$

$$\mathbf{H} = \frac{-j\omega^2\varepsilon\mu m}{4\pi r}e^{-j(kr+\varphi)}\boldsymbol{\varphi}$$

可见电场 \mathbf{E} 只有 θ 分量, 磁场 \mathbf{H} 只有 φ 分量, 所以在旋转平面内为线极化波。

由以上分析可知, 当永磁体在 xoy 平面内绕 z 轴逆时针旋转时, 远区辐射场在旋转轴方向最大, 在旋转平面内最小。由式(10)可知, 最大辐射方向功率流密度是旋转平面内功率流密度的 2 倍。在 $\theta=0$ 方向辐射右旋圆极化波, 在 $0 < \theta < \pi/2$ 方向辐射右旋椭圆极化波, 在 $\theta = \pi/2$ 平面内辐射线极化波, 在 $\pi/2 < \theta < \pi$ 方向辐射左旋椭圆极化波, 在 $\theta = \pi$ 方向辐射左旋圆极化波。辐射波的极化旋向由永磁体的旋转方向确定, 如果永磁体顺时针旋转, 以上结论旋向均为对应的反方向。

2 辐射源的优化

由旋转永磁体的辐射场式(4)和(5)可知, 永磁体的磁矩 m 越大, 辐射场越强, NdFeB 永磁体是目前磁性最强的永磁材料, 其剩磁强度 B_r 可达 1.2 T 以上。故机械天线的辐射源材料选择 NdFeB 永磁体最佳。

永磁体旋转由伺服电机驱动, 利用旋转进行能量转化^[17]。因此机械天线的能量转化为“电能-机械能-电磁能”。在能量转化过程中要为辐射源高速旋转提供动能, 以及克服转动动态变化带来的惯性做功, 这部分能量没有转化为传输信息的磁能。因此对辐射源的尺寸参数进行优化, 减少能量的损失, 提高能量的转化效率至关重要。

由刚体的定轴转动定律:

$$\mathbf{M} = I \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

可知在伺服电机提供的扭矩 \mathbf{M} 一定的条件下, 永磁体转动惯量 I 越大, 其所获得的角加速度 $d\omega/dt$ 越小, 转动动态变化时, 克服惯性做功损失的能量越多。而且永磁体以角速度 ω 转动时, 其获得的动能为:

$$E_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (14)$$

转动惯量 I 越大, 需要电机提供的动能越大, 则能量转化为电磁能越少, 能量的有效利用效率越低。因此需要优化的方向为在磁矩 m 一定的情况下, 使转动惯量 I 尽可能小, 或者转动惯量 I 一定的条件下, 磁矩 m 要尽可能大。

为减小空气摩擦, 选择圆柱形的辐射源最佳, 经推导, 圆柱形永磁体绕中心轴旋转时转动惯量为:

$$I = \frac{\pi}{2}\rho hR^4 \quad (15)$$

式中: ρ 为永磁体密度; h 和 R 分别为圆柱体的高和底面半

径。由式(1)可以导出圆柱形永磁体磁矩可表示为:

$$m = \frac{B_r}{\mu_0} \pi h R^2 \tag{16}$$

给定一种永磁材料,其剩磁强度 B_r 和密度 ρ 是确定的,因此转动惯量 I 和磁矩 m 都可以看作关于 h 和 R 的二元函数,可在同一直角坐标系中作出两函数的二维等高线。

机械天线辐射源选取的材料为钕铁硼永磁体,标号 N38,标称剩磁强度 $B_r=1.2\text{ T}$,密度 $\rho=7.5\times 10^3\text{ kg/m}^3$,作出二维等高线如图 4 所示,任给一半径 R ,则在该半径所在的垂直线上两等高线的交点即为给定底面半径 R 所对应的最优高度 h (如图 4 中点 A 所示)。同样任给一高度 h ,在该高度所在的水平线上两等高线的交点即为给定高度 h 对应的最优底面半径 R 。

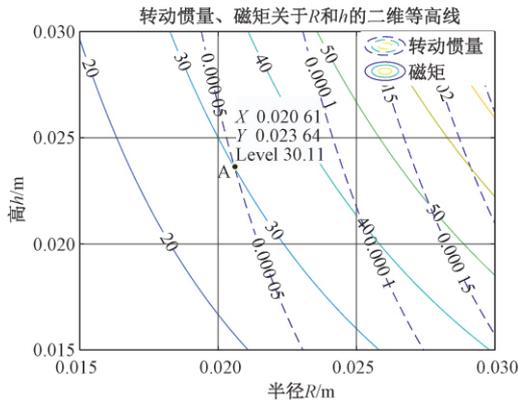


图 4 永磁体尺寸优化方法

3 机械天线 2FSK 调制解调及实验验证

3.1 机械天线 2FSK 调制解调原理

传统通信系统的 2FSK 调制一般是通过调制器控制正弦载波的频率随二进制数字基带信号在 f_{c1} 和 f_{c2} 两个频率点上变化,而机械天线产生信号的频率由永磁体的转速决定,因此机械天线通过改变旋转永磁体的运动状态,即可实现信息的调制。所以可设定两种转速(频率),将这两种运动状态分别映射为二进制信息的“1”和“0”。利用伺服电机对永磁体转速实时控制即可实现 2FSK 调制。机械天线 2FSK 调制原理框图及调制过程的信号时域波形如图 5 和 6 所示。

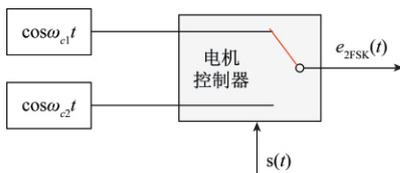


图 5 机械天线 2FSK 调制原理

由机械天线的场分布式(5)可知,对于同一个永磁体,转速提高产生的磁场信号不仅频率会提高,而且信号的强度也会提高,所以载波频率高的信号强度比载波低的信号强度

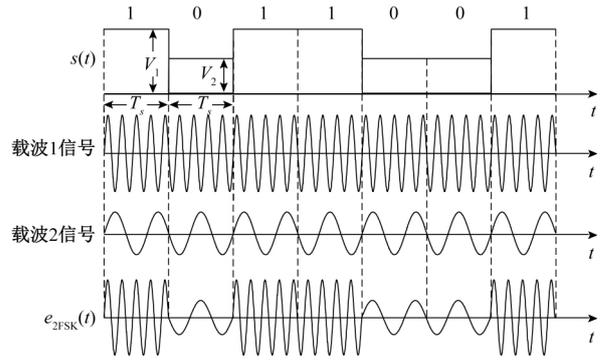


图 6 机械天线 2FSK 调制过程信号波形

大。因此图 6 中 2FSK 调制信号频率高的载波幅度也较大,这与传统通信系统的 2FSK 调制信号波形不同。在高信噪比下,机械天线 2FSK 调制信号可采用包络检波法解调,其解调原理和解调过程的时域波形如图 7 和 8 所示。

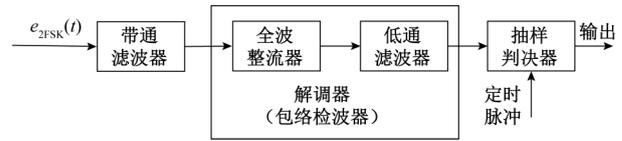


图 7 解调原理

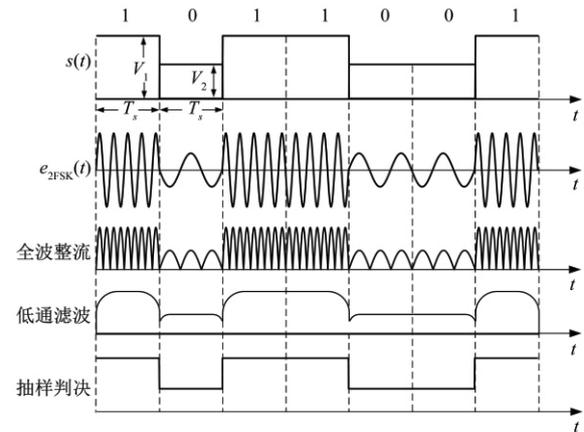
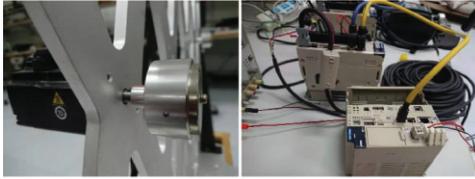


图 8 机械天线 2FSK 调制信号解调过程波形

3.2 实验验证机械天线 2FSK 调制解调

为验证上述理论分析提出的机械天线 2FSK 调制解调理论,研制了一套机械天线样机,设计实验进行验证。研制的机械天线样机如图 9 所示,磁铁参数为:钕铁硼永磁体,标号 N38,标称剩磁强度 1.2 T,直径 36 mm,高 20 mm,径向充磁。电机为安川伺服交流电机 SGM7J-01AFC6S,标称功率 100 W,最高转速 6 000 r/min,控制精度可到 nm 级,扭矩为 0.318 N·m。驱动器为其提供 AC220V 电源和控制信号,上位机通过安川运动控制器编程软件 MPE720 设定运动参数,下发给驱动器,实时控制电机运动。不妨设定转速为 3 600 r/min(理论值 60 Hz)代表“1”码,转速为 4 800 r/min(理论值 80 Hz)代表“0”码。加减速时间均为

50 ms, 匀速时间为 1 000 ms, 发送的任意二进制序列不妨设置为 1100 1011 0010 0011。



(a) 伺服电机及辐射源 (b) 电机运动控制器

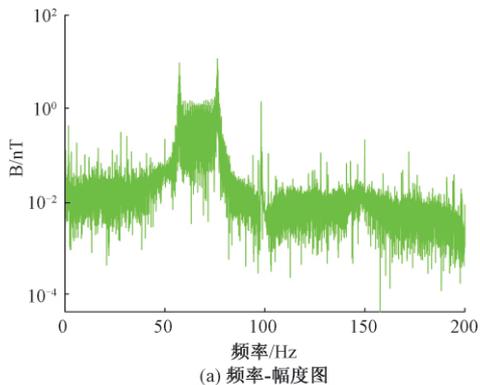
图9 机械天线发射系统样机

在距机械天线样机 4.2 m 处用转换系数为 8 mV/nT 的感应式磁场传感器接收磁信号。利用 NI 采样器对接收到的信号进行数字化存储, 采样率为 3 Ksps, 采样时间为 60 s, 如图 10 所示。接收到的磁场信号经处理后得到其频谱图, 如图 11 所示。

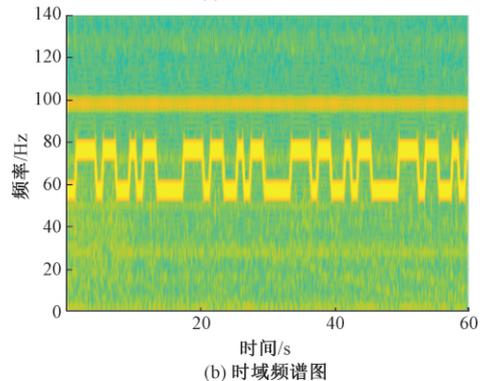


(a) 感应式磁场传感器 (b) NI采集器

图10 磁场信号接收采集设备



(a) 频率-幅度图

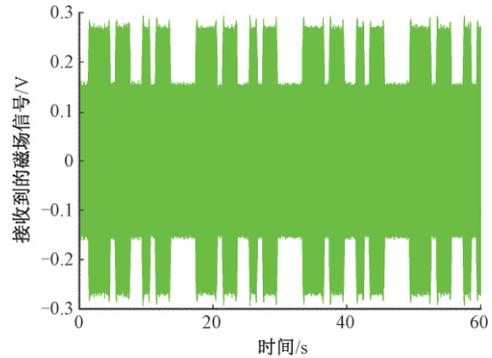


(b) 时域频谱图

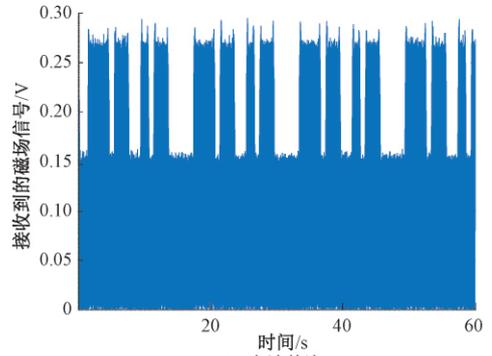
图11 接收信号的频谱图

利用包络检波法对调制信号进行解调, 恢复发送的二进制信息码流。由于信号频率很低, 接收机直接完成信号

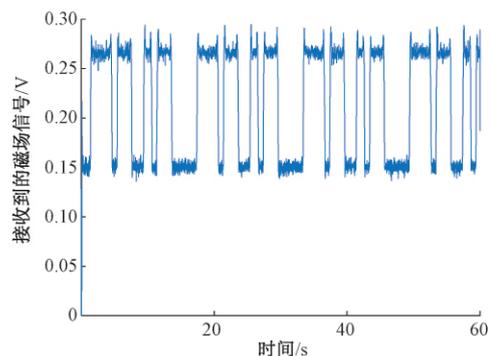
采样后, 信号的解调由上位机程序实现, 用 MATLAB 仿真完成上述解调过程, 结果如图 12 所示, 其中图 12(a)为将接收到的信号经过梳状滤波和带通滤波后的信号波形, 之后经过全波整流得到如图 12(b)所示的信号波形, 再经过低通滤波得到的信号波形如图 12(c)所示, 最后设置一个阈值, 抽样判决即可恢复所发送的二进制序列。



(a) 梳状滤波和带通滤波后的波形



(b) 全波整流



(c) 低通滤波

图12 信号解调过程

由实验结果图 11 可知, 接收信号的频谱符合 2FSK 信号的频谱特征, 其时频特性表明信号具有两个不同的载频。图 12(a)为接收信号经过梳状滤波和带通滤波后得到的 2FSK 调制信号, 且频率较高的信号幅度比频率较低的信号幅度大, 该实测得到的机械天线 2FSK 波形与前述理论分析一致。图 12 的解调结果验证了利用机械天线发射调制信号及采用包络检波法解调该信号的可行性。

样机所用永磁体体积为 20.35 cm³, 磁矩为 19.43 A·m²,

对于体积与该永磁体体积相同的普通线圈,为了达到相同的磁矩,对于半径为 0.1 mm 的单层线圈,所需的馈电电流为 95 A。导线无法承受这么大的电流。因此,基于旋转永磁体的机械天线与传统天线相比具有明显的小型化优势,非常适合在复杂环境中作为低频磁通信和导航系统的发射天线。

磁场信号的频率达到稳定之前,有一段过渡时间,这一过渡时间与传统近场磁感应通信系统产生信号相似。对于传统近场磁感应通信系统,过渡时间由发射天线的品质因数决定。对于机械天线通信系统,过渡时间与电机扭矩及永磁体转动惯量有关。电机加减速过程中会引入额外的频率分量,进而影响信息传输速率的上限。因此通过增加永磁体体积增大磁矩的同时,会增加永磁体的转动惯量,进而影响信息传输速率的上限。未来将研究利用小体积永磁体阵列的方式增大发射磁矩。

4 结 论

本文提出一种基于旋转永磁体的机械天线,首先给出该天线的辐射模型,利用电磁场的辐射条件验证了永磁体旋转可以有效的辐射电磁波。然后研究了该天线的远场辐射特性,在旋转方向上辐射功率流密度最大,且该方向辐射圆极化波;在旋转平面内辐射功率流密度最小,且该方向辐射线极化波。并给出一种辐射源尺寸优化方法,以提高能量的有效利用率。创新性地采用空域直接天线调制技术产生 2FSK 信号,并将包络检波法应用于 2FSK 信号的解调。利用研制的机械天线样机开展了实验,结果证明了该天线在小型化、低功耗方面具有明显的优势。

利用增大辐射源体积的方法来增大磁矩会引入较大的转动惯量,影响通信速率的上限和能量的有效利用率,后续研究考虑利用小体积辐射源阵列来增大磁矩。

参考文献

- [1] CHU L J. Physical limitations of omni-directional antennas [J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, 19(12):1163-1175.
- [2] HARRINGTON R F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency [J]. *Res Nat Bur Stand*, 1960, 64: 1-12.
- [3] 朱文强,张爱军. 一种小型化超高频段 RFID 读写器天线设计 [J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(11):142-146.
- [4] 孙成芹,胡永建,李显义,等. 井下无线感应传输装置 HFSS 仿真设计 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(4):96-101.
- [5] 王洪民,阚翎. 大功率低频、超低频放大器实现途径及特点 [J]. *电子测量技术*, 2011, 34(9):18-22.
- [6] NATHAN S, JOHN B, NADER B, et al. A mechanically based magneto-inductive transmitter with electrically modulated reluctance [J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(6):e0199934.
- [7] 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.

- [8] BICKFORD J A, MCNABB R S, WARD P A, et al. Low frequency mechanical antennas: Electrically short transmitters from mechanically-actuated dielectrics [J]. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, 2017: 1475-1476.
- [9] BICKFORD J A, DUWEL A E, WEINBERG M S, et al. Performance of electrically small conventional and mechanical antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2209-2223.
- [10] GOŁKOWSKI M, PARK J, BITTLE J, et al. Novel mechanical magnetic shutter antenna for ELF/VLF radiation [J]. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018: 65-66.
- [11] SRINIVAS P M N, TOK R U, WANG Y E. Magnetic pendulum arrays for ULF transmission [J]. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018: 71-72.
- [12] SRINIVAS P M N, TOK R U, WANG Y E, et al. Magnetic pendulum arrays for efficient ULF transmission [J]. *Scientific Reports*, 2019, DOI: 10.1038/s41598-019-49341-4.
- [13] KEMP M A, FRANZI M, HAASE A, et al. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter [J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 1715.
- [14] BARANI N, SARABANDI K. A frequency multiplier and phase modulation approach for mechanical antennas operating at super low frequency (SLF) band [J]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 2019: 2169-2170.
- [15] GONG S, LIU Y, LIU Y. A rotating-magnet based mechanical antenna (RMBMA) for ELF-ULF wireless communication [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2018, 72: 125-133.
- [16] 王一平. 工程电动力学 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2007: 66-67.
- [17] 芮小博,张宇,曾周末. 旋转运动能量收集及其实现 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9):1-11.

作者简介

刘文一, 硕士研究生, 主要研究方向为基于运动永磁体的天线技术。

E-mail: wenyi.lau@outlook.com

张锋(通信作者), 博士, 副研究员, 主要研究方向为新型电小天线技术、磁感应通信与定位技术等。

E-mail: zhangfeng002723@aircas.ac.cn

孙发晓, 硕士研究生, 主要研究方向为基于运动永磁体的低频通信技术研究。

E-mail: sunfaxiao19@mails.ucas.ac.cn