

基于磁遮挡技术的超低频机械天线幅度调制方法*

宋忠国, 崔浩歌, 席晓莉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 机械天线是利用磁(极)性材料做机械运动来辐射低频信号的新型辐射机理, 有望解决现有低频电天线体积大、功耗高、效率低等问题。近年来机械旋转式发射天线的研究中普遍采用的频率调制在机械驱动方面存在局限性, 提出一种基于磁遮挡技术的超低频(30~300 Hz)机械天线幅度调制方法, 将辐射和调制分离并独立进行。调制器通过“打开”和“闭合”两种状态控制向外传播的总场的衰减来实现调幅; 采用三轴正交线圈接收不同极化方向的信号。分析了旋转永磁体产生的电磁场特性, 对调制进行了仿真, 搭建了实验样机验证了所提方法的可行性。实验结果表明, 信息调制无需永磁体频繁改变转速, 从而克服了旋转式发射天线频率调制面临的机械挑战。

关键词: 超低频; 机械天线; 旋转永磁体; 幅度调制

中图分类号: TN95

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201102

中文引用格式: 宋忠国, 崔浩歌, 席晓莉. 基于磁遮挡技术的超低频机械天线幅度调制方法[J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 126–130, 134.

英文引用格式: Song Zhongguo, Cui Haoge, Xi Xiaoli. Amplitude modulation method of super-low frequency mechanical antenna based on magnetic shielding technology[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(5): 126–130, 134.

Amplitude modulation method of super-low frequency mechanical antenna based on magnetic shielding technology

Song Zhongguo, Cui Haoge, Xi Xiaoli

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Mechanical antenna is a new radiation mechanism that uses magnetic(polar) materials to radiate low-frequency signals, which is expected to solve the problems of large volume, high power consumption and low efficiency of existing low-frequency electrical antennas. In recent years, frequency modulation, which is widely used in the research of mechanical rotary transmitting antenna, has limitations in mechanical drive. This paper proposes a super-low frequency(30~300 Hz) mechanical antenna amplitude modulation method based on magnetic shielding technology, which separates radiation and modulation and performs them independently. The modulator controls the attenuation of the total field propagating outward through the states "open" and "closed" to realize amplitude modulation. Three-axis orthogonal coils are used to receive signals with different polarization directions. The characteristics of electromagnetic field generated by rotating permanent magnet are analyzed, the modulation is simulated, and an experimental prototype is built to verify the feasibility of the proposed method. The experimental results show that the information modulation does not need the permanent magnet to change the rotating speed frequently, thus overcoming the mechanical challenge faced by the frequency modulation of the rotary transmitting antenna.

Key words: super-low frequency; mechanical antenna; rotating permanent magnet; amplitude modulation

0 引言

超低频(30~300 Hz)电磁信号传播距离可远至数千乃至数万公里, 海水穿透力可深达百米, 信号传播稳定可靠^[1], 在水和岩层等特殊介质中的路径损耗较小, 在对潜通信、矿井救援和军事等领域具有不可替代的作用。但是目前的低频电天线尺寸巨大, 功耗极高, 现实中

往往占地数平方公里, 高数百米, 不仅建造使用成本高昂, 更是严重限制了超低频无线通信系统的机动性和便携性^[2]。

2016年12月, 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency)的微系统办公室首次提出了“机械天线(A Mechanically Based Antenna, AMEBA)”的理念, 并决定在2017年8月正式启动该项目。“机械天线”项目旨在探索一种全新的无线低频信号发射机理, 通过特殊材料, 如永磁体或驻极体做机械运动来辐

* 基金项目: 国家自然科学基金(51707152); 中国博士后科学基金(2014-M562522XB); 陕西省自然科学基金(2016JQ4023)

射低频电磁波^[3-4]。在 AMEBA 项目的牵头下,多个国家的高校与科研机构开始对机械天线进行初步的探索。Akron 大学的 MADANAYAKE A 等人首先提出并分析了电机控制永久极化偶极子做低频机械旋转的辐射方案,并将偶极子设计为细长圆柱体以达到最小的转动惯量^[5]。针对永磁体做高速旋转在机械驱动上的挑战,科罗拉多大学的 GOLKOWSKI M 等人提出在静态永磁体前端增加带有开口的导磁材料(磁快门),驱动其旋转循环遮蔽静磁场来产生时变电磁场^[6]。在甚低频(3 kHz~30 kHz)频段,美国 SLAC 国家加速器实验室的 KEMP M A 等人提出了一种基于压电铌酸锂材料进行机械振动的辐射机理^[7],其逆向利用压电效应,往压电材料中嵌入特定频率的交流电使其反复伸缩形变,形成振荡向外辐射电磁波,经实验测试,其辐射效率和带宽比同尺寸的电小天线提高了 300 倍和 83 倍以上。

国内相关机构也很快对机械天线展开了研究。西安电子科技大学的弓树宏等人基于安培电流模型对旋转永磁体进行了理论建模,并仿真验证了其近场分布特点^[8];大连交通大学的王晓煜等人分析了超低频旋转永磁体在空间的辐射功率与实验影响因素的关系,为超低频天线尺寸评估和优化提供了借鉴^[9];国防科技大学的周强等人研究了旋转永磁体的辐射机理,提出了采用铷铁硼永磁体作为辐射源和旋转伺服驱动系统的机械天线技术实现方案^[10]。

然而,在信号调制方面,上述所有辐射方案中提及的调制方法均为频率调制,针对旋转永磁体或驻极体的辐射方式,在调制过程中需要频繁改变辐射源的转速^[11]。例如在文献[9]中,对旋转永磁体进行频率调制时需要将转速在 3 600 rad/min(60 Hz)和 12 000 rad/min(200 Hz)之间频繁切换,这对驱动电机的性能要求大大增加。由于目前市场上的高速电机输出扭矩有限,频繁地变速会使电机长期工作于过载状态,从而导致电机发热,有损设备的使用寿命,更是降低了信号持续发射的可靠性。而磁(极)性材料的磁化(极化)强度一经固定,在工作中不可能实时改变辐射强度,所以从辐射场源角度出发的幅度调制也不适用^[12]。

受启发于文献[5]与文献[13]中利用旋转磁快门循环遮蔽静磁场的辐射机理,本文借鉴其思路,将其用于幅度调制,设计了一种基于磁遮挡技术的超低频机械天线幅度调制方法,将辐射和调制分离并独立进行,调制过程中永磁体不需要改变转速,并且采用三轴正交线圈进行信号的任意空间位置的接收。对调制方法进行了数值仿真,搭建了实验样机进行了通信实验,验证了所提方法的可行性,弥补了现有机械天线调制方面的不足。

1 机械天线的电磁理论

机械天线是基于旋转的磁偶极子。磁偶极子静止时,其磁矩 P_m 为:

$$P_m = MV \quad (1)$$

式中, M 和 V 分别是永磁体的剩磁和体积。当磁偶极子以坐标原点为中心,在 xOz 平面以角速度沿顺时针方向匀速旋转,其磁矩等效于两个正交且相位差 90°的磁偶极子磁矩的叠加:

$$P_m = MV(\cos(\omega t)\hat{x} - \sin(\omega t)\hat{z}) \quad (2)$$

将式(2)转换到球坐标系为:

$$\dot{P}_m = MV((\sin\theta\cos\varphi + j\cos\theta)\hat{r} + (\cos\theta\cos\varphi - j\sin\theta)\hat{\theta} - (\sin\varphi)\hat{\phi}) \quad (3)$$

将式(3)代入矢量磁位的一般式^[14],得到旋转磁偶极子的 \dot{A} 为:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \frac{1+jkr}{4\pi r^3} \dot{P}_m \times \mathbf{r} \cdot e^{-jkr} \\ &= -\frac{MV}{4\pi} (jk + \frac{1}{r}) \frac{e^{-jkr}}{r} ((\cos\theta\cos\varphi - j\sin\theta)\hat{\phi} + (\sin\varphi)\hat{\theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

再将式(4)代入磁场计算式 $\dot{H} = (1/\mu) \nabla \times \dot{A}$ 中,简化后得到叠加磁偶极子的磁场 \dot{H} 如下:

$$\begin{aligned} \dot{H}_r &= \frac{MVk^2}{2\pi\mu} \left(\frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} (\sin\theta\cos\varphi + j\cos\theta) \\ \dot{H}_\theta &= \frac{MVk^2}{4\pi\mu} \left(1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} (\cos\theta\cos\varphi - j\sin\theta) \\ \dot{H}_\varphi &= \frac{MVk^2}{4\pi\mu} \left(1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \sin\varphi \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)代入电场计算式 $\dot{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \dot{H}$,结合 $\omega\epsilon \equiv (k/\eta)$

(η 为波阻抗),简化后得到叠加磁偶极子的电场 \dot{E} 如下:

$$\begin{cases} \dot{E}_r = 0 \\ \dot{E}_\theta = -\eta \frac{MVk^2}{4\pi\mu} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \sin\varphi \\ \dot{E}_\varphi = -\eta \frac{MVk^2}{4\pi\mu} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} (\cos\theta\cos\varphi - j\sin\theta) \end{cases} \quad (6)$$

综上所述可以得出旋转磁偶极子的电磁场衰减特性:在近场范围(kr 远小于 1)内,磁场强度与距离的 3 次方成反比,电场强度与距离的 2 次方成反比;在远场范围(kr 远大于 1)内,磁场强度和电场强度与距离的 1 次方成反比。在实际应用中,增大永磁体体积和剩磁可以产生更强的辐射场。根据文献[15]中给出的分析结果,不同距离下由圆柱形永磁体和驻极体产生的磁通密度与频率的关系可以得出,在最大磁(极)化的条件下(磁化强度 $B_r = 1.5$ T(铷铁硼),极化强度 $P = 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)永磁体比驻极体更适合作为辐射源。

2 幅度调制方法

磁场穿过导磁材料时会在其介质中产生一部分磁回路,如同部分磁场被磁介质“汇聚”一般,所以导磁材料对穿过的磁场具有一定的“衰减”能力,衰减程度与导磁材料的相对磁导率有关。利用 COMSOL 仿真永磁体周围无磁性介质和其磁场穿过磁性介质的磁场分布如图 1 所示。

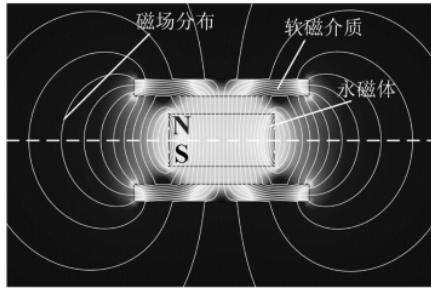
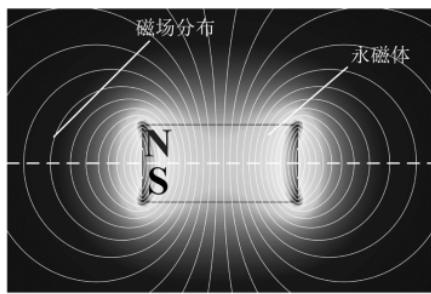


图 1 磁性介质对磁回路的影响

在文献[5]中,研究人员将永磁体固定,在其前端放置由电机驱动旋转的磁快门轮盘。这种快门轮盘被设计成具有若干个等间隔开口,绕其轴心旋转时对永磁体前方的磁场进行交替变化的“遮挡”和“开放”效果,进而形成时变电磁场。其工作原理类似于光源前的光学半透明快门。

这一方法是用于辐射方面,借鉴其思路,本文设计了一种同样由机械驱动的磁快门式的调幅装置。发射系统的示意图如图2所示。作为辐射源的永磁体固定在一个空心转轴上并与驱动电机轴相连。调制器部分由两个相对磁导率约为400的软磁材料制成的带有等间隔空隙的管壳组成,其外层部分固定在永磁体周围,内层部分通过连接轴承由另一个电机驱动旋转。调制器两部分的实际结构如图3所示,两个管壁之间的距离应当尽量小,当内层部分以特定姿态旋转时,会与外层部分形成“打开”和“闭合”两种状态,辐射场会受到两种不同程度的遮挡效果,从而影响发射信号的幅度。因此,辐射场的

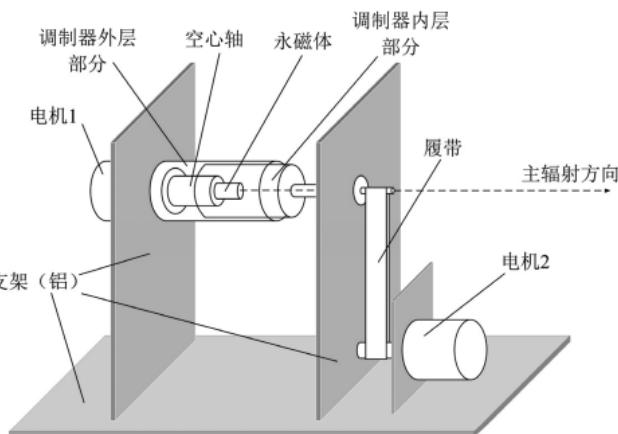


图 2 发射系统示意图

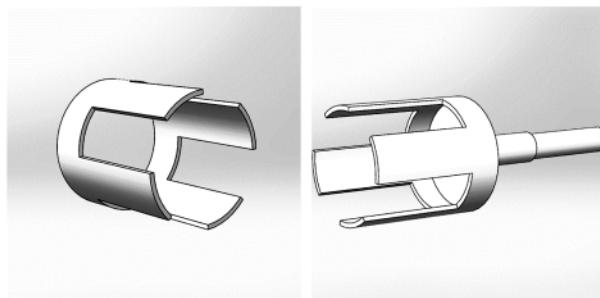
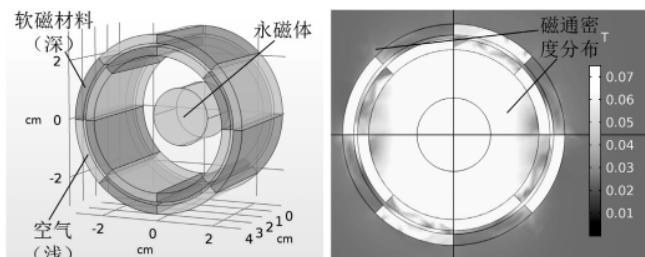


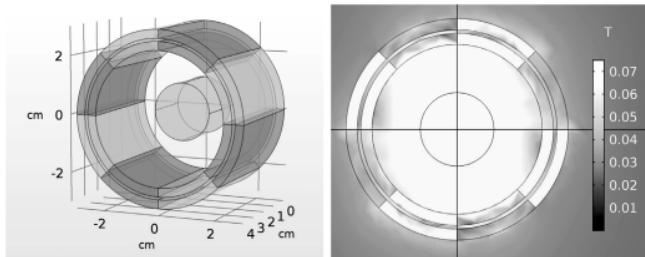
图 3 调制器外层和内层部分的实际结构

幅度调制可以通过电机驱动调制器以特定的方式旋转来实现。

调制的仿真结果如图4所示。可以观察到,当调制器处于“打开”状态时,外泄出调制器的磁通密度要多于“闭合”状态时外泄的磁通密度。根据仿真数据可知,穿过调制器的磁场在不同极化方向的分量都受到了衰减,这就说明可以采用三维磁接收天线接收信号,接收端处于空间任意位置且处于任意自旋姿态时,只需测量各个极化方向的磁场分量并求出总的模值即可实现信号的解调。



(a) 调制器“闭合”状态



(b) 调制器“打开”状态

图 4 调制的仿真结果

3 调制与解调效果实验验证

机械天线发射系统的实验样机如图5所示。圆柱形永磁体(直径2 cm、长4 cm、磁化强度约为1.2 T的钕铁硼)嵌入一个空心轴与电机相连。永磁体和调制器内层部分都由TC-E 60 2B型伺服电机驱动旋转,最大转速6 000 rpm,驱动器旋转A6型,最大输出功率为400 W;用铝合金框架固定(铝材料的相对磁导率几乎为零,对永磁体周围磁场的影响可以忽略不计)。采用履带的目的是使电机2偏离主辐射方向,即永磁体转轴方向,减少电机2对辐射信号的影响;加入履带还可以辅助减

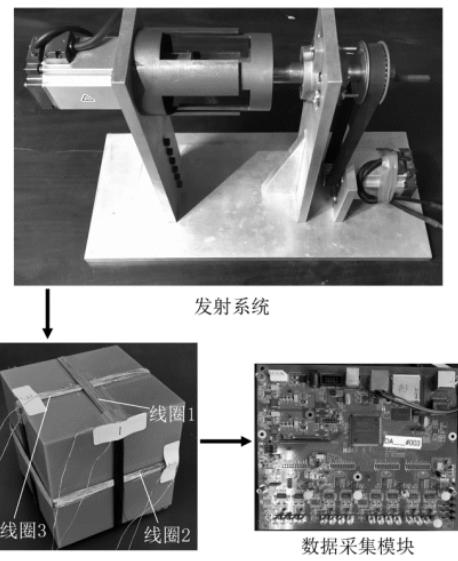


图 5 实验样机

速,使调制器的调节过程更加稳定。

辐射的磁场信号由三维正交线圈感应检测,并馈入高性能数据采集模块转换成电压信号。解调信号由三个极化方向的测量值 V_a 、 V_b 、 V_c 计算出的两种不同的总电压值 V_{total} 决定,然后根据定义的逻辑提取信号,例如高电压值代表逻辑“1”,低电压值代表逻辑“0”。总电压值计算方法为:

$$V_{total} = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \quad (7)$$

主要的实验参数如表 1 所示。在通信实验中,电机 1 驱动永磁体始终以恒定的速度旋转,同时上位机将设定的待发射信号(如“10101101”)传输至 FPGA 并控制电机 2 驱动调制器的内层部分转动,与调制器外层部分形成对应的状态。采样频率为 303 Hz,接收信号的三个极化分量时域波形如图 6 所示。

根据式(7)计算出总电压值,其时域波形波形如图 7 所示。根据图 6、图 7 可知,同一时刻不同极化方向接收

表 1 主要实验参数

辐射频率/Hz	调制频率/Hz	通信距离/m	逻辑 1	逻辑 0
30	10	5	高电平 1	低电平 0

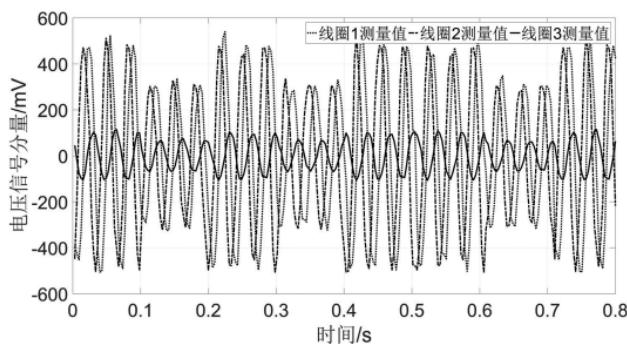


图 6 接收信号的三个极化分量时域波形

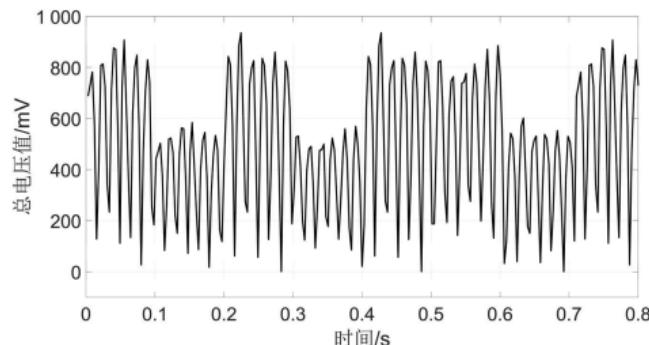


图 7 总电压值时域波形

到的信号存在相位差,使得在接收位置处的总电压幅值振荡,但由高低两种电压峰值仍然可以提取出两种逻辑电平“1”和“0”,从而解调出发射信号。最终解调时域波形如图 8 所示。由于调制器由机械驱动,受机械方面的限制,存在一定的调制转换时间(长短与电机制动性能有关)。实验结果表明,本文所提出的调制方法可以在不改变永磁体转速的条件下进行调制,并且接收信号的解调效果也不受接收端位置和姿态的影响,因此解决了频率调制不适用于机械式天线发射系统的问题,克服了机械方面的挑战。

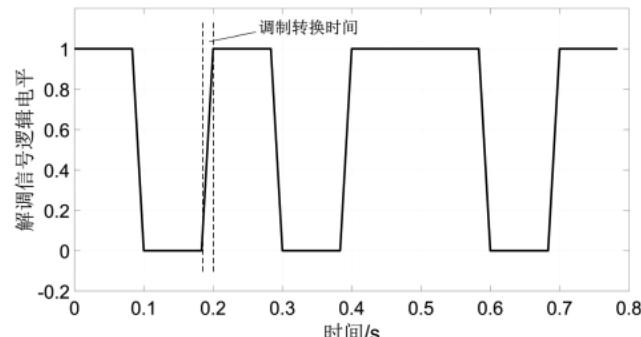


图 8 解调结果时域波形

4 结论

本文介绍了一种基于磁遮挡技术的机械天线幅度调制方法,解决了频率调制在机械驱动方面的限制性问题,并通过搭建实验平台验证了该方法的可行性,通信实验结果完整可靠,为以后的机械天线研究和工程实验提供了可行的信息调制方法。

根据仿真结果可知,可以通过增加永磁体的剩磁和体积来增大辐射强度,而一味增加体积,磁体的质量和转动惯量也会增大,可能对驱动有较高的要求。所以,在以后的机械天线研究中,寻求密度小、永久磁(极)化强度高的新型材料作为辐射源会是改进机械天线发射系统的有效途径。

参考文献

- [1] 张沪生.超低频脉冲梯度磁场诱导癌细胞凋亡[J].现代生物医学进展,2004,4(1):14-15.

- [2] HANSEN P.Developments in high power longwave radio : A brief history[C].Antennas and Propagation(APSURSI), 2016 IEEE International Symposium ,2016.
- [3] OWENS K.DARPA proposes portable antenna for under-water drone communication.Defence Systems ,2017.
- [4] 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.
- [5] MADANAYAKE A ,CHOI S ,TAREK M.Energy-efficient ULF/VLF transmitters based on mechanically-rotating dipoles[C].Engineering Research Conference(MERCon) ,2017.
- [6] GOLKOWSKI M ,PARK J ,BITTLE J ,et al.Novel mechanical magnetic shutter antenna for ELF/VLF radiation[C]. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting ,

>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

(下转第 134 页)

(上接第 125 页)

1.96 GHz 和 2.37 GHz~2.59 GHz。设计的双频整流器在双频输入功率为 7.5 dBm 时的最大 RF-DC 转换效率为 53%, 直流电压为 1.73 V。将设计的双频段能量采集系统放在路由器和被拨打的手机附近, 可点亮一个 LED 灯实现其能量采集功能。因此, 该系统可采集环境中的 GSM-1800 和 WiFi 能量。

参考文献

- [1] ATZORI L ,IERA A ,MORABITO G.The Internet of Things : a survey[J].Computer Networks ,2010 ,54(15) :2787–2805.
- [2] GUBBI J ,BUYYA R ,MARUSIC S ,et al.Internet of Things (IoT):a vision ,architectural elements ,and future directions[J]. Future Generation Computer Systems ,2013 ,29(7) :1645–1660.
- [3] PINUELA M ,MITCHESON P D ,LUCYSZYN S.Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques , 2013 ,61(7) :2715–2726.
- [4] JIE A M ,NASIMUDDIN ,KARIM M F ,et al.A wide-angle circularly polarized tapered-slit-patch antenna with a compact rectifier for energy-harvesting systems[J].IEEE Antennas and Propagation Magazine ,2019 ,61(2) :94–111.
- [5] PALAZZI V ,HESTER J ,BITO J ,et al.A novel ultra-lightweight multiband rectenna on paper for RF energy harvesting in the next generation LTE bands[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques ,2018 ,66(1) :366–379.
- [6] QASIM A ,YANG J ,TARIQ C H ,et al.A compact rectenna system with high conversion efficiency for wireless energy harvesting[J].IEEE Access ,2018 ,6 :35857–35866.
- [7] SHEN S ,ZHANG Y ,CHIU C Y ,et al.An ambient RF energy harvesting system where the number of antenna ports is dependent on frequency[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques ,2019 ,67(9) :3821–3832.

- 20186.
- [7] KEMP M A ,FRANZI M ,HAASE A ,et al.A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter[J]. Nature Communication ,2019 .
- [8] GONG S ,LIU Y ,LIU Y.A rotating-magnet based mechanical antenna(RMBMA) for ELF–ULF wireless communication[J]. PIER M ,2018 ,72 :125–133.
- [9] 王晓煜 ,张雯厚 ,周鑫 ,等.旋转磁偶极子式超低频发射天线辐射特性研究[J].兵工学报 ,2020 ,41(10) :2055–2062.
- [10] 周强 ,施伟 ,刘斌 ,等.一种基于旋转磁偶极子的机械式低频天线[C].2018 对潜通信技术学术交流会论文集 ,2020.

- [8] WANG M ,FAN Y ,YANG L ,et al.Compact dual-band rectenna for RF energy harvest based on a tree-like antenna[J].Microwaves ,Antennas & Propagation ,IET ,2019 ,13(9) :1350–1357.
- [9] SHEN S ,CHIU C Y ,MURCH R D.A broadband L-probe microstrip patch rectenna for ambient RF energy harvesting[C]. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science.Meeting ,2017.
- [10] 徐力翔 ,游彬 ,华富春.双频段环境能量采集电路设计[J]. 电子技术应用 ,2018 ,44(9) :54–57.
- [11] LIU Z ,ZHONG Z ,GUO Y X.High-efficiency triple-band ambient RF energy harvesting for wireless body sensor network[C].2014 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series RF Wireless Technologies for Biomedical Healthcare Appl(IMWS-Bio) ,2014.
- [12] 徐冉 ,林先其 ,樊勇.X 波段圆极化大功率整流天线研究[J].空间电子技术 ,2020 ,17(2) :51–56.
- [13] HUANG M ,LIN Y L ,OU J H ,et al.Single- and dual-band RF rectifiers with extended input power range using automatic impedance transforming[J].IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques ,2019 ,67(5) :1974–1984.
- [14] ERKMEN F ,ALMONEEF T S ,RAMAHI O M.Scalable electromagnetic energy harvesting using frequency-selective surfaces[J].IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques ,2018 ,66(5) :2433–2441.

(收稿日期 :2020–10–12)

作者简介 :

俞梦缘(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 射频能量采集系统的设计与实现。
温翾(1974-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 射频电路与系统。
游彬(1974-), 通信作者, 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 微波器件研究, E-mail : youbin@hdu.edu.cn。



扫码下载电子文档

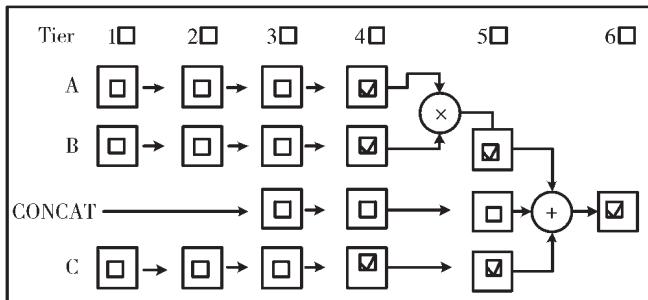


图 7 DSP48 乘法累加器流水线处理示意

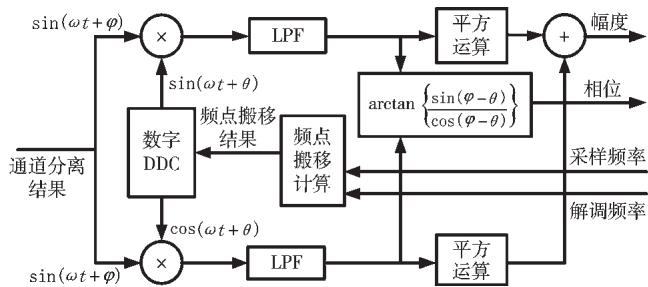


图 8 单信道信号解调原理框图

3 结论

L 波段宽带射频数字化接收解调极大提高了接收机的通用性和可靠性，并可获取更加准确的数字相位信息。通过改变 FPGA 解调软件配置，可轻松改变频带内各频点的接收和解调，真正实现了 L 波段软件无线电设计。由于 L 波段射频数字化接收机完全以软件化方式修改接收频点和解调方式，极大降低接收机的开发成本和研制周期，具有较强的实用意义。需要注意的是，增加接收机前端接收带宽会降低系统的解调灵敏度，因此在工程开发时应结合实际可能的应用范围，减少滤波器接收频率带宽，以提高接收机的性能。

参考文献

- [1] 栗欣, 许希斌. 软件无线电原理与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [2] 张朋强, 雷光. 基于射频数字化技术的航天测控体系架
（上接第 130 页）
- [11] 崔勇, 吴明, 宋晓, 等. 小型低频发射天线的研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(20): 171–183.
- [12] 张多佳. 超低频率机械天线机理及调制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [13] 范进良, 唐良雨, 朱伟敏. 5Hz–1000Hz 甚低频宽带发射声源[J]. 声学技术, 2013, 32(S1): 287–288.
- [14] 王增和, 丁卫平, 李平辉. 电磁场与波[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [15] ZHANG J S, SONG Z G, ZHANG D J, et al. Amplitude modulation method of the mechanically rotating-based antenna[J]. Electronics Letters, 2020, 56(7): 321–323.

- [3] 龚仕仙, 魏玺章, 黎湘. 宽带数字信道化接收机综述[J]. 电子学报, 2013, 41(5): 949–959.
- [4] 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.
- [5] 鲁长来, 倪文飞, 夏丹. 基于软件无线电的射频直采数字接收机研究[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(3): 51–55.
- [6] 伍小保, 王冰. 米波雷达射频数字化接收机抗干扰设计[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(2): 214–218.
- [7] 方艳梅, 刘永清. 数字信号处理——原理、算法与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [8] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [9] 刘明鑫, 尹亮, 汪学刚, 等. 基于射频采样宽带数字阵列雷达波束形成[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(4): 394–398.
- [10] 董晖, 姜秋喜, 毕大平. 基于带通采样的数字下变频技术[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(4): 35–38.
- [11] 陈伟宁, 秦士. 多相滤波器的原理及其实现[J]. 清华大学学报, 2001, 41(1): 9–11.
- [12] 陈俊, 汪学刚. 高效实时的抽取滤波器的 FPGA 实现[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 755–758.
- [13] LogiCORE IP FIR Compiler v7.1. Xilinx datasheet[J], 2014.4.
- [14] LogiCORE IP DSP48 Macro v2.1. Xilinx datasheet[J], 2011.3.
- [15] 杜勇. 数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

(收稿日期: 2020-10-13)

作者简介:

唐博(1987-), 通信作者, 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 二次雷达信号处理、通信导航设备关键算法、二次雷达系统和逻辑设计, E-mail: woshi.tangbo@163.com。

李璐(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 二次雷达系统设计和软件设计。



扫码下载电子文档

(收稿日期: 2020-11-11)

作者简介:

宋忠国(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 卫星导航技术、阵列抗干扰技术、地磁匹配导航及高精度地磁定轨等。

崔浩歌(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 超低频机械天线发射系统及信号调制方法。

席晓莉(1967-), 通信作者, 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 电波传播与天线设计、电磁场数值计算、电磁超材料及电磁参数诊断技术、无线导航与抗干扰技术、地磁信号探测及干扰抑制技术、地磁匹配导航与定轨技术等, E-mail: xixiaoli@xaut.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所