DOI: 10.11991/yykj.202203019

第50卷第1期

2023年1月

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.u.20221101.1549.002.html

无线传感器网络中基于可重构天线的谐波上行链路调制器

孙雪曼', 吴杰', 高静', 崔铠韬', 刘长军2, 邹杰'

中国民用航空局第二研究所,四川成都 610041
 四川大学 电子信息学院,四川成都 610064

摘 要:在民用航空器电台检查中,无线传感器网络的能源供给问题亟待解决。本文提出了一种基于可重构宽带缝隙天线的新型上行链路调制器结构,实现了低功耗谐波上行通信,降低了信息发射功耗。该结构充分利用整流器产生的二次谐波 作为上行载波,通过上行基带信号对可重构宽带缝隙天线进行动态偏置,实现对载波的幅度调制。上行链路调制器的工作 频率为 2.45 GHz,在-20 dBm 的射频输入功率下,仅采用 10 μA 的调制电流进行通信,减少了节点的信息发射功耗,并且基 带信号的调制几乎不影响整流器的转换效率,展示了该调制器的成功应用。该结构具有低成本、低功耗、易集成等优点,在 民航无线传感器网络中具有良好的工程应用前景。

A harmonic uplink transponder based on the re-configurable antenna in wireless sensor networks

SUN Xueman¹, WU Jie¹, GAO Jing¹, CUI Kaitao¹, LIU Changjun², ZOU Jie¹

The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China
 School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: In the inspection of civil aircraft radio stations, the energy supply of wireless sensor networks needs to be solved urgently. In this paper, a novel uplink transponder structure based on re-configurable wideband slot antenna is proposed, which realizes low-power harmonic uplink communication, reducing the power consumption of information transmission. The proposed transponder fully utilizes the second harmonic generated by the rectifier as the uplink carrier. It modulates this carrier in amplitude through a re-configurable broadband slot antenna that is dynamically biased by the uplink baseband signals. The operating frequency of the uplink transponder is 2.45 GHz, and at an RF input power of -20 dBm, only a modulation current of 10 μ A is used for communication, which reduces the information transmission power consumption of the WSNs node. Moreover, the modulation of the baseband signal hardly affects the conversion efficiency of the rectifier, demonstrating the successful application of the transponder. The structure has the advantages of low cost, low power consumption, easy integrating, and so on, having good engineering application prospects in WSNs.

Keywords: re-configurable antenna; second harmonic; transponder; amplitude modulation; rectifier; civil aviation aircraft; radio station inspection; WSNs

随着我国智慧民航的快速发展,与各类新兴 技术的高度融合,无线传感器网络 (wireless sensors networks, WSNs)已经在民用航空飞行器中得到了 广泛的应用^[1-2]。近年来,由于社会各类无线电业 务的发展扩大,导致空中无线电电磁环境愈加复

收稿日期:2022-03-14. 网络出版日期:2022-11-02. 作者简介:孙雪曼,女,助理研究员. 邹杰,男,副研究员. 通信作者:邹杰,E-mail: zoujie@caacsri.com. 杂恶劣^[3-4],民用航空器数量的急剧增加^[5-6],无线 电安全问题更为重要。为保障航空器的飞行安 全,无线电台检查必不可少,利用WSNs节点重量 轻、易维护和强监测能力等优势^[7],可实现信号的 无线传输^[8],减少检查工作量。但目前为止,WSNs 节点的供电主要是源于电池,从传感器到基站或 传感器节点之间传输数据所消耗的大量电力已成 为一个关键问题^[9];在不容易使用有线电力、危险 或电缆连接不可行的地区, 解决 WSNs 节点的供 电问题刻不容缓^[10]。

合理利用谐波能量有望解决 WSNs 节点的供 电问题。文献 [11] 利用双音信号的幅度比调制方 法,将信息信号和电源信号以相同的频率放置, 进一步减小了传感器的尺寸和所使用的带宽,并 实现了向传感器提供恒定的直流功率;文献 [12] 通过小型的雷达装置和安装在昆虫上的无源射频 标签组成了便携式低功耗的谐波雷达;文献 [13] 设计了一款带有谐波增强耦合器的能量收集接收 机,实现了精确的定位检测并有助于波束的形 成;文献 [14] 基于倍频器和环形槽天线系统设计 了适用于互联网设备的谐波转发器;文献 [15] 利 用整流电路集成上行无线链路,形成整流发射的 集成结构,实现低功耗无线携能通信。

本文充分利用了整流器的非线性特性,通过 控制可重构宽带缝隙天线上的 PIN 二极管对二次 谐波进行幅度调制,实现低功耗谐波上行通信。

1 上行链路调制器原理

1.1 可重构缝隙天线原理

本文的研究内容是基于 PIN 二极管的开关特 性对宽带天线开缝实现的。由于天线辐射主要是 由天线表面流经的电流产生的,通过改变天线的 电尺寸会导致面电流分布发生变化,从而改变电 流的流经路径,影响天线的特性参数。

频率可重构天线的基本思想就是通过射频开 关(PIN 二极管等)来改变天线的结构。当开关闭 合时,贴片上的表面电流可以直接通过开关流过 缝隙,此时电流平均流经路径较短;而当开关断 开时,表面电流必须绕过缝隙流动,这样电流流 过的路径变长。在2种不同的开关状态下会产生 不同的电流分布,因此谐振频率在2种状态下将 发生明显的偏移。

1.2 上行链路调制器原理

如图 1 所示,本文提出的新型上行链路调制 器系统是由工作于 f₀ 的整流电路、包含 f₀ 和 2f₀ 的 可重构宽带缝隙天线和无线传感器组成。



当基站发射的正弦信号 f₀ 被可重构宽带缝隙 天线接收后,会传输至整流器(f₀)进行整流并输 出直流给无线传感器,而传感器采集的数据将用 于二次谐波的幅度调制。

2 系统设计及实验测量

2.1 可重构宽带缝隙天线

技

如图 2 所示,利用 Ansoft HFSS 18 软件进行了 仿真分析。宽带天线利用微带馈入梯形辐射贴片 及部分地结构实现宽带性能。



图2 宽带天线及 2.45 和 4.9 GHz 处天线表面的电流分布

图 3 使用 Origin 2018 给出了宽带天线的|S₁₁| 仿真结果,在 2.1~5.8 GHz 内, 2.45 和 4.9 GHz 处的 性能良好, |S₁₁| <-15 dB。



图3 3 种天线的|S₁₁|仿真结果

如图 4 所示,选择在合适的位置开槽以实现 对二次谐波的控制,同时又不影响基频电流。图 2 和图 4 还分别给出了天线开槽前后 2.45 GHz 和 4.9 GHz 处的电流分布。可以看出,在该位置开槽 既没有对基频电流造成影响,又成功控制了二次 谐波。



实验采用 F4B2 的介质基板,介电常数 2.65, 损耗正切 0.005,厚度为 1 mm。图 5 使用 AutoCAD 2013 绘图软件标注了可重构缝隙天线的结构尺 寸,单位为 mm。天线的可重构性可以通过安装 短路桥在如图 5 所示的位置来实现。开槽后,天 线切换为窄带模式,高频处性能较差;放置短路 桥后,天线的槽长度减少,电流路径增加,天线恢 复宽带模式。加入金属短路桥前后 3 种天线的 [*S*₁₁]仿真对比结果如图 3 所示,频率范围从 1 GHz 变化到 6 GHz。可以看出,在基频 *f*₀ 处的|*S*₁₁]一直 低于-20 dB,而对于二次谐波 2*f*₀,开槽时天线的 |*S*₁₁]>-2 dB,加入短路桥后,|*S*₁₁]<-18 dB,恢复了天 线的宽带性能。



图5 加入金属短路桥后的可重构天线

图 3 还给出了 3 种状态下的可重构宽带缝 隙天线的|S₁₁|测量结果, 基频处|S₁₁|<-15 dB, 加入 短路桥后, 2f₀处的|S₁₁|从-3 dB 变化到了-18 dB, 与 仿真结果基本吻合, 实现了对天线二次谐波的 控制。

2.2 宽带天线可调谐的实现

利用 PIN 二极管替代金属短路桥实现天线的 可调谐, 图 6 使用 Auto CAD 2013 绘图软件给出 了带有二极管和偏置电路的可重构宽带缝隙天线 的原理图。图 7 为可重构天线实物。如图 7 所 示,实验采用 F4B2 的介质基板,介电常数 2.65, 损 耗正切 0.005, 厚度为 1 mm。可重构天线利用金 属化过孔提供二极管所需偏置,实现二极管的同 步通断作用。通过改变 PIN 二极管的状态,使天 线的物理尺寸变化,实现宽带和窄带 2 种不同的 效果。







图7 可重构天线实物

2.3 整流电路的实现

如图 8 所示,整流电路采用介电常数为 3.66, 正切损耗为 0.002,高度为 0.762 mm 的 Rogers 4350B 介质板,工作频率为 2.45 GHz。整流器使用 λ/6 短 路枝节来抵消 HSMS-285B 二极管的虚部阻抗,输 出采用电感和电容并联的低通滤波器过滤射频信号。



3 结构实现和实验结果

3.1 可重构天线实测与分析

二次谐波测量系统如图 9 所示,发射端利用 射频信号源发射 2f。谐波信号, PIN 二极管的偏置 由直流源提供;接收端使用 20 dB 耦合器来检测 输出的二次谐波功率水平并同时观察接收频谱的 变化。



• 24 •

图9 二次谐波测量系统

基于上述测量系统,不同射频输入环境下,二次谐波能量 P_{2_0} 随偏置电流的变化如图 10 所示。可以看出 3 种情况下,曲线的走势基本一致,偏置电流在 0~20 μ A 内, P_{2_0} 与偏置电流成正比。



图10 偏置电流与二次谐波能量

0、20、100 和 1000 μA 偏置电流下天线的 |S₁₁ 测量结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,随着 偏置电流的增大,天线恢复其宽带性能。





图 12 给出了在 3 种状态下, 2.45 GHz 和 4.9 GHz 处的天线实测方向图。可以看出基频方向图都呈 现良好的全向辐射特性。对于二次谐波 2f, PIN 关闭时, 天线呈现窄带特性, 二次谐波处方向图变 差; PIN 导通时, 方向图与宽带天线方向图基本保 持一致。PIN 通断状态下天线的实测增益如图 13 所示。2 种状态下, 天线在 2.45 GHz 处的增益都 在 1.7 dBi 附近; 而在 4.9 GHz 处, PIN 导通时天线 增益为 4.2 dBi, PIN 关闭时, 天线增益降至了 3.6 dBi。



图12 3种状态下天线的实测方向图:包括 XZ 面和 YZ 面





3.2 上行通信测试系统实测与分析

基于该调制器的上行通信实验测量系统如图 14 所示。基频信号由射频信号源提供,多功能信号 源会对调制器产生的二次谐波进行动态偏置。改 变射频信号源的输入功率和频率,通过测量负载 上的直流电压,得到调制器结构的整流效率,并 利用定向耦合器检测接收到的上行谐波信号。



图14 基于可重构宽带缝隙天线的上行通信测量系统

为减少功率损耗,调制时采用 0 μA 和 10 μA 的偏置电流。图 15 给出了不同射频输入功率下, 偏置电流对微波整流效率的影响。可以看出,相 同输入功率下,改变直流偏置对整流效率基本没 有影响。



图15 不同偏置电流下的射频整流效率

图 16 给出了-20 dBm 发射功率下,接收到的 2f₆频谱。利用零偏压和 10 μA 偏压对应 50 kHz 方波信号的低电平和高电平,当发送方波信号后, 整流器产生的二次谐波被调制,并出现±50 kHz 的 边带,功率为-99.24 dBm,相对噪声为-130 dBm。 也就是说,基于可重构宽带缝隙天线的上行链路 通信系统成功实现了低功耗谐波上行通信和 RF-DC 转换的同时进行。



图16 频谱分析仪接收到的 50 kHz 调制方波

4 结论

本文提出在可重构宽带缝隙天线中集成谐波 上行无线链路功能,实现射频整流和上行通信的 同时进行。

1)基于可重构宽带缝隙天线,提出一种射频 整流与通信发射集成的新型谐波上行链路调制器 结构。在相同输入功率下,改变偏置电压进行信 号调制,几乎对整流转换效率没有影响,展示了 该结构在无线传感器网络中的成功应用。

2)利用整流产生的二次谐波作为上行信号, 无需其他有源发射组件;通信时采用低于 10 μA 的调制电流,减少了信息发射功耗。

3)在-20 dBm 射频输入功率下,利用频谱分 析仪接收到了 2f₆载波功率电平和 50 kHz 边带调 制信号,实现了 RF-DC 转换和低功率上行通信的 同时进行。

参考文献:

- KUZNETSOV S V. Analysis of on-board wireless sensor network as an alternative to traditional wired network[J]. Civil aviation high technologies, 2020, 23(1): 49–58.
- [2] 穆腾飞, 李忠剑, 戴喜妹. 飞机结构健康监测技术 [J]. 民 用飞机设计与研究, 2020(3): 35-41.
- [3] 杨正媛. 调频广播互调信号对民航地空通信干扰的典型 案例分析 [J]. 中国无线电, 2021(11): 53-54,61.
- [4] 谢文泽. 民用航空机场导航信号干扰因素及应对策略 [J]. 科技风, 2022(10): 61-63.
- [5] 杨建丽. 民航无线电干扰分析和防范 [J]. 电子测试, 2020(13): 134-135,89.
- [6] 孙立超, 韩立. 适航审定运行管理系统国籍登记标志分 配规则 [J]. 中国民用航空, 2021(6): 68-69.
- [7] YEDAVALLI R K, BELAPURKAR R K. Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems[J]. Journal of control theory and applications, 2011, 9(1): 28–33.
- [8] LI Xiaoya, KONG Xiangwei. Aircraft sensor fault diagnosis method based on residual antagonism transfer learning [C]//2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design. Guangzhou: IEEE Consumer Electronics Society, 2021: 469–472.
- [9] ZHAO QIAN, NAKAMOTO Y, HUSSIN Z. Energyefficient protocol for extending battery life in wireless sensor networks[C]//2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington: IEEE Computer Society, 2013: 268–273.
- [10] JEREMIAH C, CHUKWUEMEKA A. Wireless power transmission: as an emerging technology[C]//International Conference on Communication, Control, Computing and Electronic Engineering. Khartoum: IEEE, 2017: 1–6.
- [11] RAJABI M, PAN N, CLAESSENS S, et al. Modulation techniques for simultaneous wireless information and power transfer with an integrated rectifier-receiver[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2018, 66(5): 2373-2385.
- [12] PSYCHOUDAKIS D, MOULDER W, CHI-CHIH C, et al. A portable low-power harmonic radar system and conformal tag for insect tracking[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2008, 7: 444–447.

(下转第32页)

技

度学习的文档组件提取方法 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

- [3] BARALAS P, ADAM S, CHATELAIN C, et al. A typed and handwritten text block segmentation system for heterogeneous and complex documents [C]//2014 11th, IAPR International Workshop on Document Analysis Systems. Tours: IEEE, 2014: 46–50.
- [4] 刘春磊,陈天恩,王聪,等.小样本目标检测研究综述
 [EB/OL].(2022-8-12)[2022-09-15].http://kns.cnki.net/kcms/ detail/11.5602.tp.20220811.1539.006.html.
- [5] DHAENE S, ROSSEEL Y. Resampling based bias correction for small sample SEM[J]. Structural equation modeling:a multidisciplinary journal, 2022, 29(5): 1–17.
- [6] 陈永祺, 顾茜, 林郁. 基于 PP-PicoDet 的半自动标注烟丝 异物检测研究 [EB/OL]. (2022-8-24) [2022-09-15]. http:// kns.cnki.net/kcms/detail/11.2985.TS.20220824.1458.008.html.
- [7] WAGDY M, AMIN K, IBRAHIM M. Detection and correction of multi-warping document image[J]. International journal of image and graphics, 2022, 22(4): 2250034.
- [8] 郑云亮. 基于改进 YOLOv5 网络的侧扫声纳图像目标检 测方法 [J]. 海洋测绘, 2022, 42(4): 18-21, 26.
- [9] 吴兴蛟. 基于域内与域间知识的文档布局分析算法研究:

基于显式边缘嵌入网络的文档图像布局分析 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.

- [10] QIN Zheng, LI Zeming, ZHANG Zhaoning, et al. ThunderNet: towards real-time generic object detection on mobile devices[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer VIsion. Seoul: ICCV, 2019: 6718–6727.
- [11] LEE S H, CHEN H C. U-SSD: improved SSD based on UNet architecture for end-to-end table detection in document Images[J]. Applied sciences, 2021, 11(23): 11446.
- [12] DONG Xuanyi, ZHENG Liang, MA Fan, et al. Fewexample object detection with model communication[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2018, 41(7): 1641–1654.
- [13] 崔磊, 徐毅恒, 吕腾超, 等. 文档智能: 数据集、模型和应用 [J]. 中文信息学报, 2022, 36(6): 1-19.
- [14] 李柯泉, 陈燕, 刘佳晨, 等. 基于深度学习的目标检测算 法综述 [J]. 计算机工程, 2022, 48(7): 1-12.
- [15] ZHAO Yu. Image retrieval model analysis of digital library based on texture characteristics[J]. Advances in mathematical physics, 2021(3): 1–10.

本文引用格式:

周家丰,杨蕾. 应用轻量模型的半自动标注试卷版面拆解研究 [J]. 应用科技, 2023, 50(1): 26–32. ZHOU Jiafeng, YANG Lei. Research on the disassembling of semi-automatic labeling test paper layout using lightweight models[J]. Applied science and technology, 2023, 50(1): 26–32.

(上接第25页)

- [13] CHUN-JUNG P, SHENG-FAN Y, AN-CHING H, et al. Harmonic enhanced location detection technique for energy harvesting receiver with resonator coupling design[C]//2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference. Taipei: IEEE, 2017: 1–3.
- [14] PALAZZ V, ALIMENTI F, KALIALAKIS C, et al.

Highly integrable paper-based harmonic transponder for low-power and long-range IoT applications[J]. IEEE antennas wireless propagation letter, 2017, 16: 3196–3199.

[15] 孙雪曼, 武鹏德, 刘长军. 一种低功耗无线携能通信中整 流电路集成上行链路的研究 [J]. 应用科技, 2021, 48(5): 60-63, 69.

本文引用格式:

孙雪曼, 吴杰, 高静, 等. 无线传感器网络中基于可重构天线的谐波上行链路调制器 [J]. 应用科技, 2023, 50(1): 21–25, 32. SUN Xueman, WU Jie, GAO Jing, et al. A harmonic uplink transponder based on the re-configurable antenna in wireless sensor networks[J]. Applied science and technology, 2023, 50(1): 21–25, 32.