

文章编号: 2095-4980(2025)05-0527-05

基于种植义齿结构的介质谐振器天线

王瀚静¹, 景亚楠², 张玖钰¹, 陈智娇¹

(1.北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2.中日友好医院 口腔医学中心, 北京 100029)

摘 要: 随着小型化可植入射频天线的快速发展, 用于人体体征监测的无线感知技术迎来了新的发展机遇。基于种植义齿结构, 提出一种介质谐振器天线。该天线具有良好的仿真和实测效果, 在 3.82 GHz 具有 -15.6 dB 谐振, 辐射效率可达 97% 以上, 输入功率低于 22.8 mW 时, 比吸收率(SAR)符合人体健康安全的要求。在此基础上将该天线优化成一款内嵌金属的混合型介质谐振器天线, 其增益更高, 远场辐射方向图的定向性更强, 可加强植入口腔后的天线信号的传输链路。所提出的两款天线尺寸小, 性能优, 有望基于种植义齿技术植入人体口腔实现对口腔环境的监测。

关键词: 介质谐振器天线; 种植义齿; 可植入天线; 口腔监测

中图分类号: TN826

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023370

A dielectric resonator antenna based on implant denture structure

WANG Hanjing¹, JING Yanan², ZHANG Jiuyu¹, CHEN Zhijiao¹

(1.School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2.Stomatology Center, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China)

Abstract: With the rapid development of miniaturized implantable Radio-Frequency(RF) antennas, wireless sensing technologies for human body monitoring have ushered in new opportunities for development. Based on the structure of dental implants, a Dielectric Resonator Antenna(DRA) is proposed. This antenna exhibits good simulation and measurement results, with a resonance at -15.6 dB at 3.82 GHz, and a radiation efficiency of over 97%. When the input power is below 22.8 mW, the Specific Absorption Rate(SAR) meets the requirements for human health and safety. On this basis, the antenna is optimized into a hybrid dielectric resonator antenna with embedded metal. This optimized antenna has higher gain and stronger directivity in its far-field radiation pattern, which can enhance the signal transmission link of the antenna after it is implanted in the oral cavity. Both proposed antennas are small in size and have excellent performance, and they are expected to be implanted in the human oral cavity based on dental implant technology to monitor the oral environment.

Keywords: dielectric resonator antenna; implant denture; implantable antenna; oral monitoring

随着信息技术的高速发展, 各种医疗科技电子产品应运而生, 植入式电子技术的最新进展为改进医疗实践中的诊断和治疗程序创造了独特的机会。不同的可植入式天线^[1]与不同的设备集成可用于各种生物医学场景, 如胃肠道监测、心脏起搏器、植入式仿真眼等^[2]。口腔健康作为全身健康的重要组成部分, 人们对其重视程度日益攀升, 如何实现对口腔环境的监测成为一大难题。

如今, 愈发成熟的种植牙技术为口腔环境监测提供了一种新思路。基于种植义齿结构^[3], 可设计一款介质谐振器天线。该天线与移动终端之间可进行电力传输和信息传输, 移动终端与基站之间可进行信息传输。目前对

收稿日期: 2023-11-15; 修回日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62271067)和安全生产智能监控北京市重点实验室资助项目

引用格式: 王瀚静, 景亚楠, 张玖钰, 等. 基于种植义齿结构的介质谐振器天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(5): 527-531. DOI: 10.11805/TKYDA2023370.

Citation format: WANG Hanjing, JING Yanan, ZHANG Jiuyu, et al. A dielectric resonator antenna based on implant denture structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(5): 527-531. DOI: 10.11805/TKYDA2023370.

于牙齿天线的研究多为贴片天线,侧重于对天线结构进行改良^[4]。介质谐振器天线作为一种较为新兴的天线,由于对其研究时间较短,研究不充分,未发现在牙齿天线上有所运用。但此类天线具有诸多优点^[5],如体积小,重量轻,辐射效率高,损耗小,易于馈电,材料的相对介电常数选择范围较大等。因此,本文设计了一种介质谐振器天线,具有良好的仿真和实测效果。仿真结果表明该天线在 3.82 GHz 具有 -15.6 dB 谐振,辐射效率可达 97% 以上,输入功率不超过 22.8 mW 时,比吸收率(SAR)符合人体健康安全的要求。在此基础上优化,得到一款内嵌金属的混合型天线,实现了增益的提升和辐射方向图的优化,天线的辐射最大方向指向口腔外侧,在口腔环境中更容易接收和发送信号,仿真结果表明这种天线可正常工作。

1 牙齿天线设计

1.1 材料及馈电方式的选择

在对天线材料进行选择时,需考虑天线的尺寸、增益、带宽、电磁波损耗、生物相容性、生物隔离性、天线的工作频率、在人体口腔中的电磁波穿透深度、辐射方向以及工作时对人体造成的辐射是否符合规范,是否会对人体健康产生影响。钼酸铋($\text{Bi}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$)可在 620 °C 烧结成陶瓷,介电系数为 38,品质因数为 12 500,谐振频率温度系数为 $31 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,具有优良的微波介电性能,且耐磨性好,适用于牙齿天线设计,因此本文选择陶瓷类材料钼酸铋作为天线的选材。

介质谐振器天线的优点之一是馈电方式灵活多样,包括微带线直接馈电、同轴探针馈电、微带-缝隙耦合馈电以及共面波导馈电等,或是这几种馈电方式的自由组合。相较于其他馈电方式,采用同轴探针馈电方式设计的天线尺寸更小,适用于牙齿天线设计,因此本文天线采用同轴探针馈电方式。

1.2 牙齿天线模型结构

基于圆柱形介质谐振器模型,逐步对模型进行优化,使其贴合牙齿形状。天线采用立方体与圆柱体相嵌套的结构,整体为立方体而四角为 4 个圆柱与之相切。参照图 1 的磨牙结构图,牙齿顶部凹槽多为十字凹槽,侧面凹槽切面大致与三角形相似,末端为突出或凹陷四面体结构,据此将天线表面牙齿化设计。天线采用同轴探针馈电,接地板下方设置金属圆柱体模拟种植牙种植体,并将底部植入骨介质,得到的天线模型如图 2 所示。



Fig.1 Implant denture structure diagram
图1 种植义齿结构图

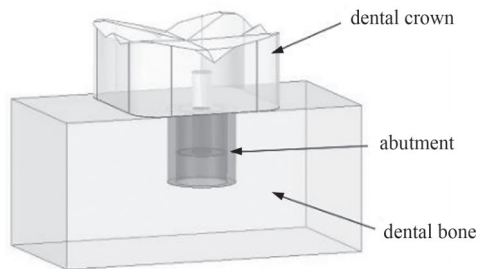


Fig.2 Model of dielectric resonator antenna
图2 介质谐振器天线模型

1.3 仿真结果与分析

采用 HFSS 仿真软件,对介质谐振器天线模型进行仿真求解。主要对仿真结果中的 S_{11} 参数、增益、辐射效率、比吸收率、辐射方向图和交叉极化图进行分析。

仿真得到的 S_{11} 参数如图 3(a) 所示,在 3.82 GHz 发生谐振, S_{11} 的最小值为 -15.6 dB,谐振效果良好。增益如图 3(b) 所示,在谐振频率处增益为 0.6 dB,其增益可进一步优化提升。图 4 为辐射效率的仿真结果,在谐振点 3.82 GHz 处,辐射效率可达 97% 以上,该天线具有较高的辐射效率。

比吸收率指的是进入人体被吸收的电磁波功率与吸收部分组织质量的比值,可反映牙齿介质谐振器天线辐射的射频能量对人体健康影响的安全性。根据 IEEE 标准规定,任意 1 g 人体组织的最大 SAR 值不能大于 1.6 W/kg,或任意 10 g 人体组织的最大 SAR 值不能大于 2.0 W/kg。不同的国家可选用不同的标准,美国、韩国和印度采用前者,欧洲、日本和中国采用后者。图 5 为天线在植入骨介质中的比吸收率分布图。仿真结果表明,输入功率为 1 W,天线工作在 3.82 GHz 时,1 g 组织最大的 SAR 值为 70 W/kg,超过了 1.6 W/kg。为满足标准,必须降低天线的输入功率,该天线的输入功率被限制在 22.8 mW 以下,可符合人体健康的要求,安全性得到保障。

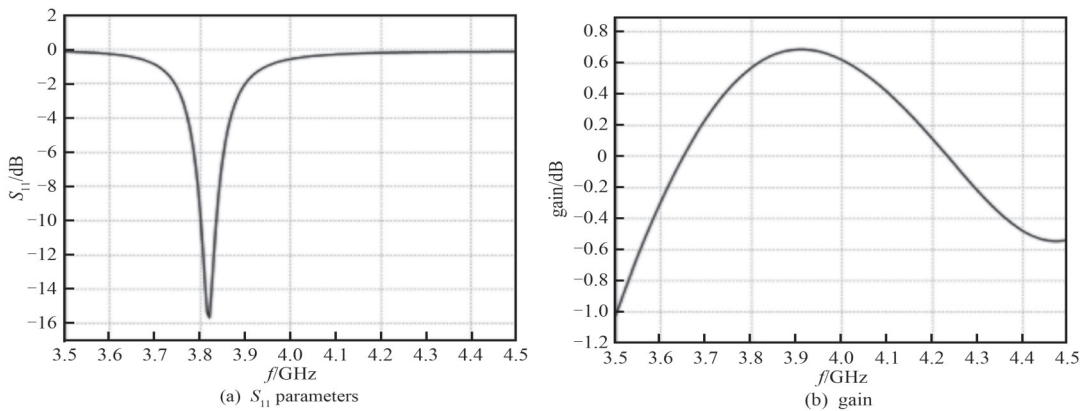


Fig.3 S_{11} parameters and gain
图 3 S_{11} 参数和增益

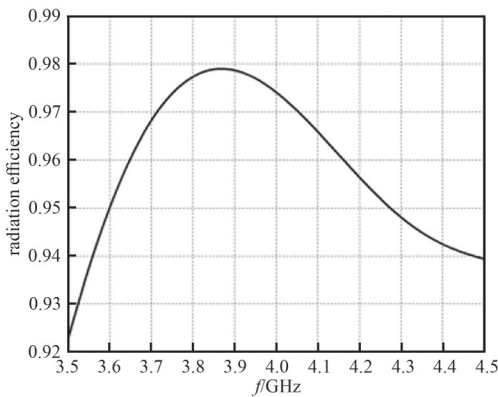


Fig.4 Radiation efficiency
图 4 辐射效率

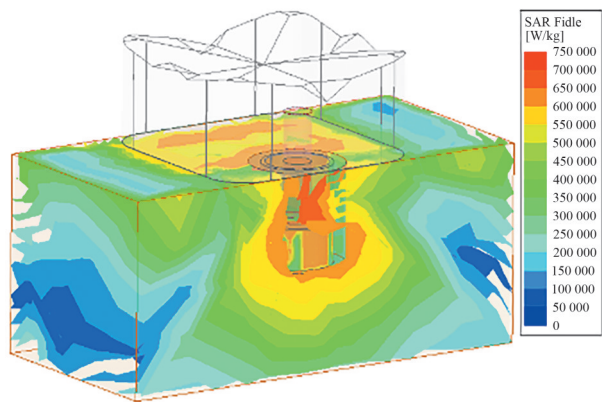


Fig.5 SAR distribution of antenna in implanted bone media
图 5 天线在植入骨介质中的比吸收率分布

天线的辐射方向图和交叉极化图如图 6 所示。从仿真结果看，辐射方向图具有较大的后瓣，辐射方向主要指向 Z 轴方向，植入口腔后增益最大在头顶或下颌，不容易接收和发送信号，天线的辐射方向图可进一步优化。

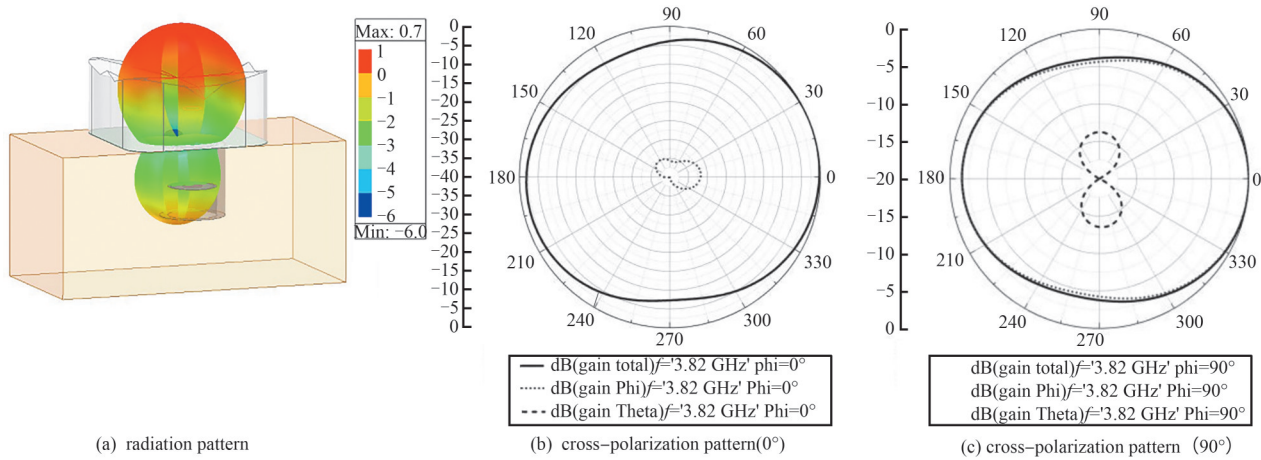


Fig.6 Radiation pattern and cross-polarization pattern
图 6 辐射方向图和交叉极化图

1.4 牙齿天线优化与优化结果

对天线模型加以改造，天线的增益可进一步提升，其辐射方向图也可进一步优化，改变其辐射方向，使其

在口腔环境内更容易接收和发送信号。对模型进行优化,在介质谐振器天线内部加一个金属圆环^[6],优化后的模型如图7所示。除金属圆环外,其余填充物使用原有介电常数38的陶瓷材料。对优化后的模型仿真 S 参数、增益、辐射效率、辐射方向图和交叉极化图进行分析。

添加了金属圆环后,天线的谐振频率明显升高,谐振点在8 GHz左右。将金属圆环内缩可降低谐振频率,但由于天线尺寸限制,其作用比较小。最终优化模型的 S_{11} 参数如图8(a)所示,谐振频率为8.09 GHz, S_{11} 参数可达-19.77 dB。优化后天线的增益如图8(b)所示,天线的增益得到了有效提升,在谐振点处可达3.66 dB。

图9为天线的辐射效率,优化后天线成混合结构模型,相较于单纯的介质谐振器天线,在工作点处辐射效率有所降低,但依旧可达85%以上。辐射方向图和交叉极化图如图10所示,相比于1.3中介质谐振器天线的辐射方向图,方向性更强,辐射最大方向指向口腔外侧,在口腔环境中工作时,可在口腔外侧更方便地检测天线信号,使信号的接收和发送更加容易。从交叉极化图来看,虽然天线模型更为复杂,但其工作性能仍有保障。

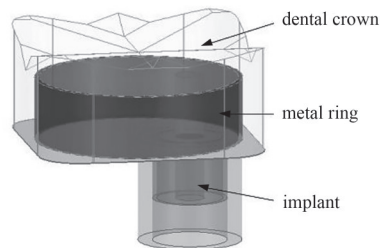


Fig.7 Optimized antenna model
图7 优化天线模型

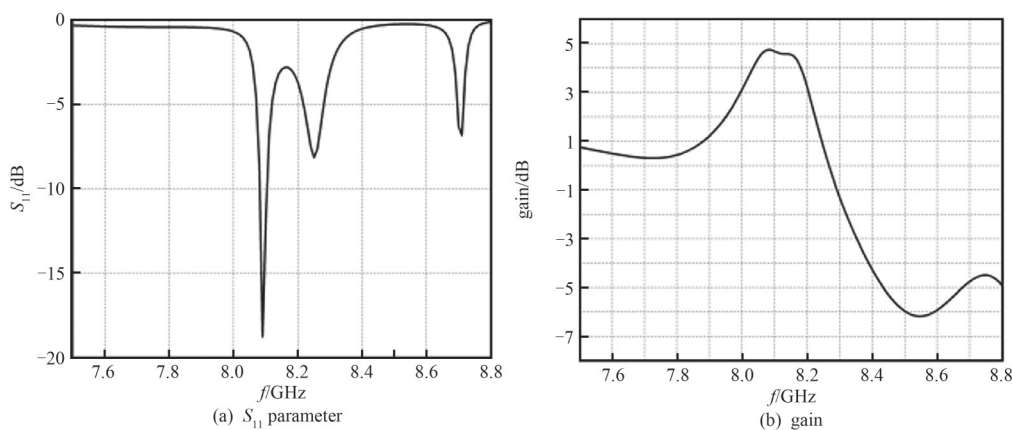


Fig.8 S_{11} parameters and gain of the optimized model
图8 优化模型的 S_{11} 参数和增益

2 牙齿天线加工测试

采用1.1中的天线选材对初始的牙齿介质谐振器天线进行加工,加工后的牙齿模型如图11(a)所示。对天线进行测试,得到天线的 S_{11} 参数测试结果如图12所示。天线可正常发生谐振,谐振频率为3.85 GHz,比仿真结果高0.03 GHz,产生误差的原因可能是天线接地面使用的铜皮纸与天线之间有一层胶用来固定,从而产生了谐振点的偏移。通过加工测试,可以看出本文设计的牙齿介质谐振器天线可正常工作,未来有望基于种植义齿技术植入口腔对口腔环境进行监测。

3 结论

本文设计了一款基于种植义齿结构的介质谐振器天线,对该天线进行仿真、加工及测试,测试结果与仿真结果吻合良好。结合天线工作场景需求,进一步对其优化,通过在介质谐振腔内嵌金属圆环提升了天线的增益,并使远场方向图更加符合预期。天线的选材与馈电方式均满足口腔工作要求,可用于植入式义齿。相较于现有的贴片式牙齿天线,有效减小了天线体积。

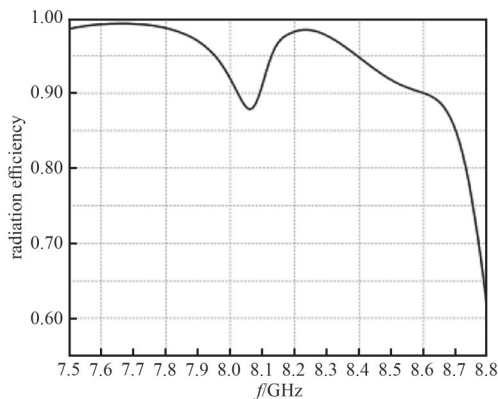


Fig.9 Radiation efficiency of the optimized model
图9 优化模型的辐射效率

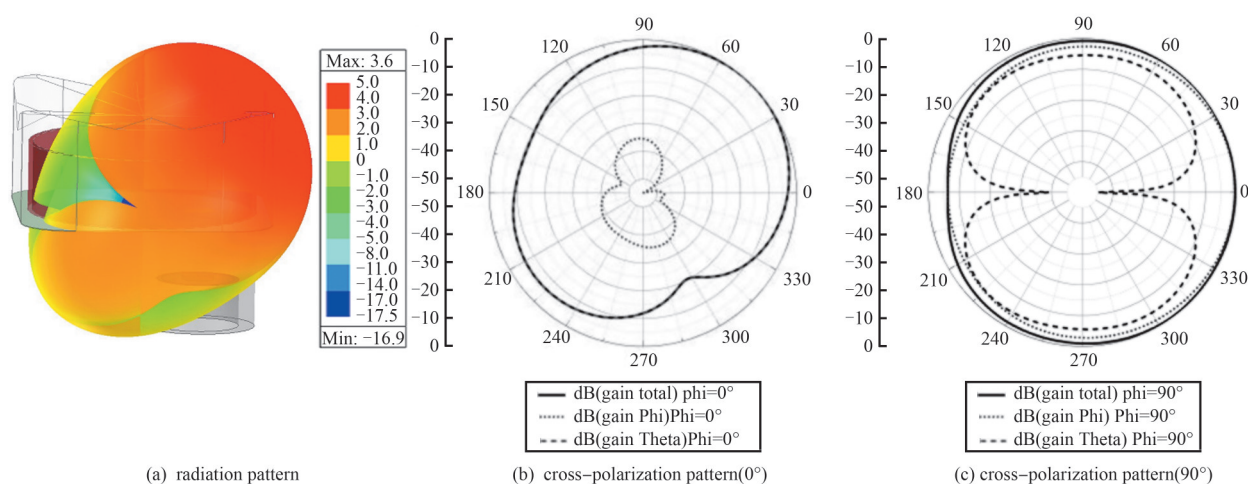


Fig.10 Radiation pattern and cross-polarization pattern of the optimized model

图 10 优化模型的辐射方向图和交叉极化图

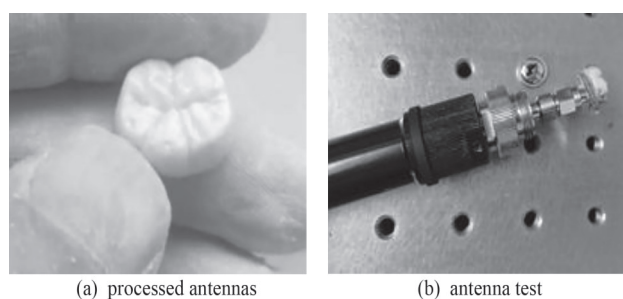
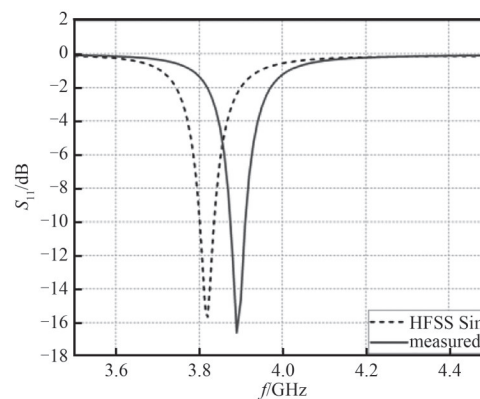


Fig.11 Processed antennas and antenna test

图 11 天线的加工实物图与测试图

Fig.12 Simulated and measured S_{11} parameters of the antenna图 12 天线的仿真和实测 S_{11} 参数图

参考文献：

- [1] 李洪飞,张莹,陈娅莉,等. 一种应用于ISM频段的共面波导型可植入式天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(7):702-707. (LI Hongfei,ZHANG Ying,CHEN Yali,et al. A CPW-fed implantable antenna operating at ISM band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(7):702-707.) DOI:10.11805/TKYDA2020284.
- [2] KHAN A N,CHA Y O,GIDDENS H,et al. Recent advances in organ specific wireless bioelectronic devices:perspective on biotelemetry and power transfer using antenna systems[J]. Engineering, 2022(11):27-41. DOI:10.1016/j.eng.2021.10.019.
- [3] 贺玉,付强,余汉文,等. 活动义齿种植术与固定义齿在口腔修复中的应用效果对比[J]. 医药前沿, 2016,6(2):70-71. (HE Yu,FU Qiang,YU Hanwen,et al. Comparison of the application effects of removable denture implantation and fixed denture in oral restoration[J]. Journal of Frontiers of Medicine, 2016,6(2):70-71.) DOI:10.3969/j.issn.2095-1752.2016.02.053.
- [4] CUI Wenjie,LIU Ruipeng,WANG Lu,et al. Design of wideband implantable antenna for wireless capsule endoscope system[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(12): 2706-2710. DOI: 10.1109/LAWP. 2019. 2949630.

(下转第 539 页)