

VHF/UHF 频段小型化军用头盔共形天线设计

刘中阳¹, 吉喆¹, 张龙涛¹, 许园², 王智³

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 内蒙古电力集团 鄂尔多斯供电公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

3. 上海航天电子有限公司, 上海 200000)

摘要:针对 VHF/UHF 频段军用通信对天线小型化与宽带化的迫切需求,设计了一款基于聚酰亚胺柔性基板的头盔共形超宽带可穿戴天线。采用等体积法将椭球形头盔等效为半径 11.15 cm 的球体,据此确立了天线在 120 mm×110 mm×4 mm 物理空间内的尺寸约束。天线以平面单极子结构为原型,通过共面波导馈电,并利用控制变量法对辐射贴片长度、宽度及底部切角等关键几何参数进行了系统优化,实现了优异的阻抗匹配。基于 HFSS 平台的仿真结果表明,该天线工作频率覆盖 70~900 MHz,在全频段内满足回波损耗 $S_{11} \leq -10$ dB 且驻波比 $VSWR \leq 2$;辐射场在 E 面与 H 面均呈现良好的水平全向性。通过表面电流分布分析,揭示了电流路径随频率演变的自适应调节机制。利用圆柱弯曲模型验证了天线在头盔曲率下的共形鲁棒性。该设计兼具小尺寸、轻量化与辐射性能稳定的优势,为军用穿戴式通信设备的工程化应用提供了一种高效方案。

关键词:VHF/UHF 频段;军用头盔;共形天线;小型化;表面电流分析

中图分类号:TN828.6 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2026)02-0093-07

近年来,随着无线通信技术的持续发展,电子通信设备小型化的需求日益迫切,这也对天线在宽带化与紧凑型设计方面的平衡提出了更高要求。特别是在军事、海洋等领域广泛应用的 VHF/UHF 频段,因辐射电磁波波长较长,依据传统理论设计的天线尺寸往往过大,难以满足单兵载体有限空间的集成需求^[1-3]。头盔凭借其四周无视野遮挡,利于形成稳定全方位辐射模式的独特优势,成为该频段天线集成的理想载体。然而,头盔载体有限的物理空间与 VHF/UHF 频段超长波长之间的巨大电尺寸矛盾,始终是制约该领域技术突破的瓶颈。目前,国内外学者针对头盔共形天线开展了大量探索。第 1 类研究侧重于宽带结构的共形化适配,如利用平面单极子或迪普罗天线进行弯曲形变,虽然在 UHF 高频段实现了较好的增益性能,但面对波长达数米的 VHF 低频段,天线往往因电尺寸过小导致阻抗匹配剧烈恶化,难以实现全频段覆盖^[4-6]。第 2 类研究尝试引入加载技术以缩减天线尺寸,例如采用高介电常数基板或磁性材料加载^[7-8],但这类方案在降低频率的同时,往往伴随着增益的大幅衰减^[9-10],且增加了头盔的额外负荷,不符合单兵装备轻量化的实战要求^[11]。基于此,针对 VHF/UHF 频段设计了一款基于聚酰亚胺柔性基板的超宽带军用头盔共形天线。通过等体积建模将头盔等效为半径 11.15 cm 的球体,确立了严苛的尺寸约束,利用控制变量法对关键几何参数进行了系统优化。在 120 mm×110 mm×4 mm 的物理空间限制下,天线实现了 70~900 MHz 的频率覆盖(带宽比达 171%),并尝试在全频段内维持相对稳定的水平全向辐射特性。通过表面电流自适应调节机制的分析,本设计在小型化、宽带宽与辐射一致性之间寻求了一种可行的平衡方案,为单兵作战通信设备的轻量化设计提供了一定的参考与技术思路。

收稿日期:2026-04-02 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20260067

作者简介:刘中阳(2002—),男,硕士研究生,研究方向为机械。E-mail:2509965086@qq.com

刘中阳,吉喆,张龙涛,等.VHF/UHF 频段小型化军用头盔共形天线设计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):93-99.

1 天线结构设计

1.1 天线设计尺寸的选择

头盔作为天线载体需满足头部直立稳定、无视野遮挡的特性,而平面单极子天线结构简单(由辐射贴片、馈电结构、介质基板、接地板构成),无需复杂立体组件,能天然适配头盔椭球形曲面,规避厚重结构增加头部负载,契合单兵穿戴需求。所设计的军用头盔共形天线即以平面单极子天线为基础,为保证其与头盔实现良好共形,需对其最大尺寸进行讨论。

实际中,头盔的外形并不是完美的球体,而是类似于椭球体。常见头盔的横向宽度为 22~25 cm,纵向宽度为 28~31 cm,竖向宽度为 18~22 cm。通过等体积法将头盔等效为半径为 R 的球体。

$$\begin{cases} V_{\text{椭球体}} = V_{\text{球体}} \\ \frac{4}{3}\pi abc = \frac{4}{3}\pi R^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a = 11$ cm; $b = 14$ cm; $c = 9$ cm。计算得 $R \approx 11.15$ cm,即头盔的等效球体半径为 11.15 cm。

在一个平面贴合到球面过程中,当贴片的最大边长与球面半径 R 接近时,贴合效果受到曲率的影响会显著提高。因此,平面单极子天线的最大边长不宜超过头盔的等效球体半径。对于矩形微带天线最长边为对角线,其不等式为

$$\sqrt{W^2 + L^2} < 2R \quad (2)$$

通过式(2)计算最终求得所设计的平面单极子天线的最长边不宜超过 120 mm。

所设计的军用头盔共形天线采用损耗正切角较低的柔性材料聚酰亚胺作为介质基板材料。其相对介电常数为 3.5,损耗正切角为 0.008。由于天线共形于头盔且共形后受到因为身体运动而变形的因素很小,所以共形后变形几乎可以忽略,对天线的可弯折次数要求不高。因此,只需考虑天线的最小弯折半径。这里,头盔的等效球体半径约为 11 cm,要求材料的最小可弯折半径为 11 cm。此外,考虑天线与头盔贴合效果、轻便等因素,介质基板的厚度选择 4 mm。基于此,利用电磁仿真软件 HFSS 对尺寸为 120 mm×110 mm×4 mm 采用共面波导馈电的军用头盔共形天线进行设计分析。

所设计天线的结构如图 1 所示。

1.2 天线参数的优化

天线的几何尺寸参数之间存在一定的耦合效应,为确定最优结构尺寸,采用控制变量法对关键参数进行逐一扫描分析。设计遵循“频率决定→阻抗匹配→带宽优化”的递进逻辑:首先,根据单极子天线理论,天线长度 L 直接决定最低谐振频率,是设计的首要约束参数;其次,调整贴片宽度 W 及双边宽度 W_2 以改善输入阻抗特性,实现 50 Ω 匹配;最后,通过优化底部切角 α ,进一步拓展工作带宽并改善低频段的匹配深度。图 2 展示了在这一逻辑链条下,各参数对天线回波损耗的影响规律。

由图 2(a)可知,当 $L = 100$ mm 时,天线在低频(约 250 MHz)及中高频段(500~800 MHz)的匹配深度与带宽特性均显著优于 95 mm 和 110 mm,故取 $L = 100$ mm 为最优值。

针对宽度参数 W 与 W_2 的优化(图 2(b)、图 2(c))表明, $W = 60$ mm 与 $W_2 = 10$ mm 时,回波损耗曲线最平滑,且损耗深度与带宽稳定性表现最佳。对比不同切角 α (图 2(d))可见, $\alpha = 59^\circ$ 时低频回波损耗接近 -30 dB,且全频段能量传输效率更高。综合阻抗匹配深度与带宽特性,确定最优几何参数: $L = 100$ mm, $W = 60$ mm, $W_2 = 10$ mm 及 $\alpha = 59^\circ$ 。

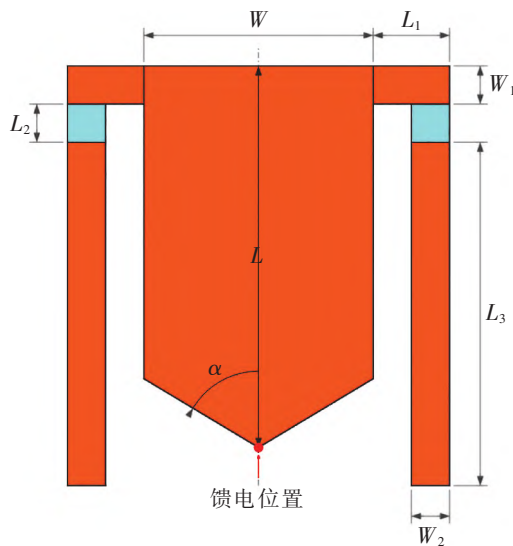


图 1 天线结构图

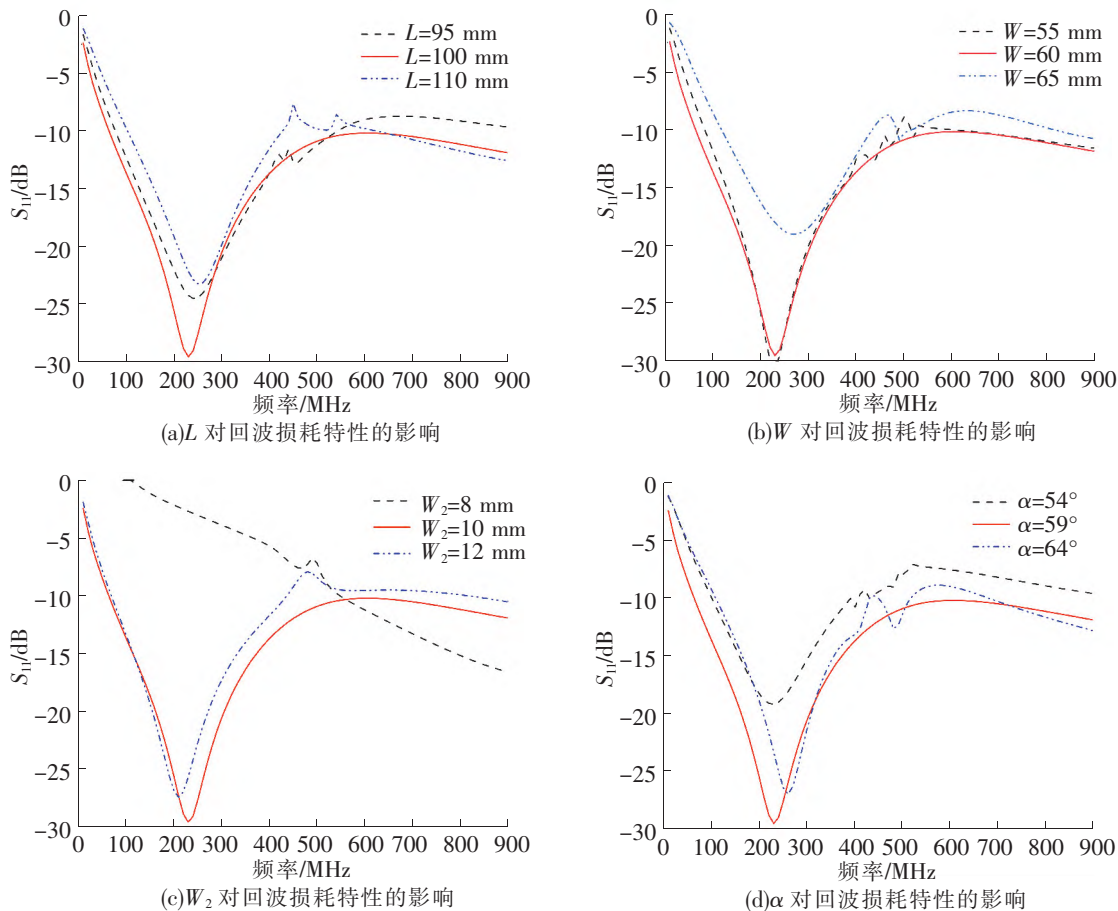


图2 关键结构参数对天线回波损耗特性的影响

同理,依据上述仿真分析结果,进一步通过 HFSS 仿真分析对 L_1 、 L_2 、 L_3 、 W_1 进行了微调。在兼顾天线辐射效率与小型化尺寸限制后,确定尺寸分别为 20、10、90、10 mm 为最佳值。

2 仿真结果分析

基于 HFSS 软件分别对 E 面和 H 面方向图、驻波比曲线、表面电流分布等主要指标进行了仿真分析。

2.1 驻波比 (VSWR) 曲线分析

分析了该天线的驻波比,如图 3 所示,天线的 VSWR 在 70 MHz 以上频段均低于 2,与 S_{11} 的覆盖趋势高度一致;在 70~88 MHz 低频段,VSWR 稳定在 1.2~1.8 之间,如 80 MHz 时 VSWR 约为 1.3,接近理想匹配(VSWR=1),说明该频段内天线与馈线的阻抗一致性极佳;在 225~900 MHz 高频段,VSWR 表现更优,整体处于 1.1~1.6 之间,其中 200~300 MHz 频段(战场应急通信常用频段)的 VSWR 低至 1.05~1.2,几乎达到理想匹配状态,这种低驻波特性可有效减少信号在馈线中的传输损耗(损耗 ≤ 0.3 dB),显著提升通信距离。

2.2 辐射方向图与增益特性分析

为了验证共形天线在头盔载体上的宽带辐射性能,利用 HFSS 全波仿真软件提取了天线在典型频点(100、450、900 MHz)下的 3D 与 2D 辐射方向图。

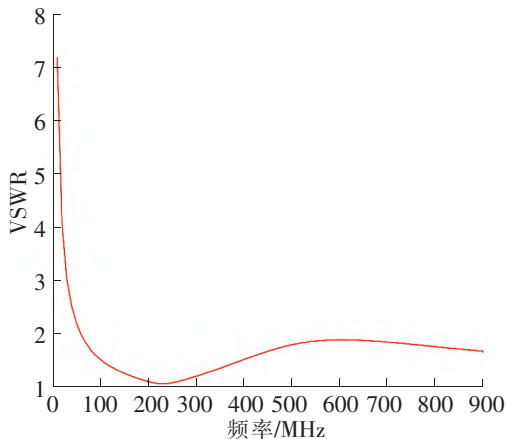


图3 驻波比曲线

2.2.1 3D 辐射能量分布演变分析

图 4 展示了该共形天线在全频段内辐射能量分布的演变过程。首先,在 100 MHz 低频段(图 4(a)),由于天线电尺寸相对较小,其辐射特性表现出显著的类单极子全向分布特征,波瓣形态饱满且能量分布均匀,此时约 -4.46 dB 的峰值增益为低频段信号的广域覆盖提供了物理保障。随频率提升至 450 MHz (图 4(b)),工作波长的缩短使得天线辐射效率逐步改善,增益提升至约 4.5 dB,辐射能量开始呈现出向水平面汇聚的趋势。当工作频率达到 900 MHz 时(图 4(c)),受头盔载体平台在短波长下的反射叠加效应以及天线有效电长度增加的双重驱动,峰值增益进一步优化至约 6.58 dB。在此频点下,辐射场强在垂直方向发生了明显的压缩与重构,这种能量分布的聚集效应显著增强了空间指向性,有助于在复杂电磁环境下提升信号的传输距离与穿透效能。该演变规律客观反映了天线在维持水平全向性的基础上,利用载体环境实现了能量从“空间广覆盖”向“水平面高增益”的梯度优化,较好地契合了单兵通信中对不同距离段传输特性的差异化需求。

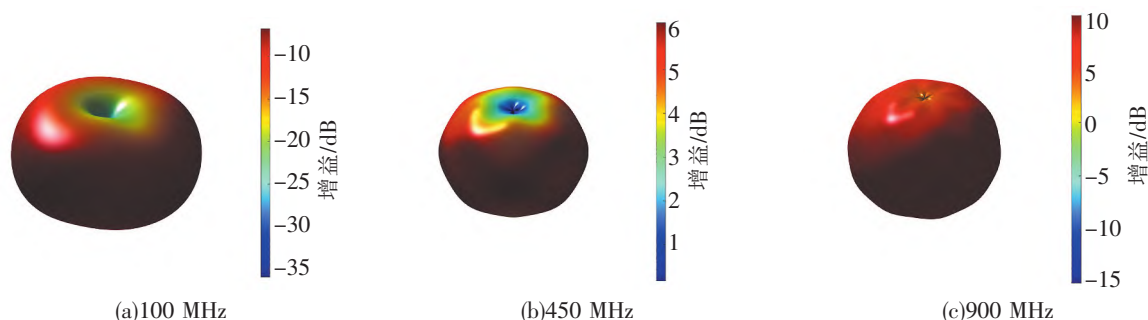


图 4 全频段 3D 辐射方向图演变趋势

2.2.2 2D 极坐标定量验证

图 5 给出了天线在 E 面与 H 面的 2D 极坐标对比曲线,旨在通过定量数据进一步验证其辐射性能的稳定性与全向一致性。在 H 面方向图中,跨度达 100~900 MHz 的三频点曲线均展现出极高的圆润度,全频段内增益起伏基本维持在 0.8 dB 以内。这一特性对于军用头盔天线至关重要,它客观证实了共形贴合设计并未破坏天线在水平面上的辐射优势,确保了单兵在动态作战环境下无论头盔朝向如何均能维持相对稳定的通信增益,有效缓解了信号盲区问题。与此同时, E 面曲线则精确记录了随频率升高波瓣宽度逐渐窄化并向水平辐射面汇聚的轨迹。E 面方向图在整个全频段内呈现良好的双向辐射对称性,其最大辐射方向的增益非对称度 ≤ 1.2 dB。随着频率的提升,辐射能量由于受载体环境约束及天线电尺寸增加的影响,在垂直面内呈现出明显的收缩趋势,其波瓣形态的变化与 3D 分布图中能量密度的增强表现出高度的物理自洽性。该天线具有优秀的垂直线极化纯度。在全频段主辐射方向上,天线的交叉极化抑制比均大于 17 dB。这种“低频广覆盖、高频增益提升”的 2D 辐射特性,较好地平衡了单兵系统近程态势感知与中远程协同通信的差异化需求。

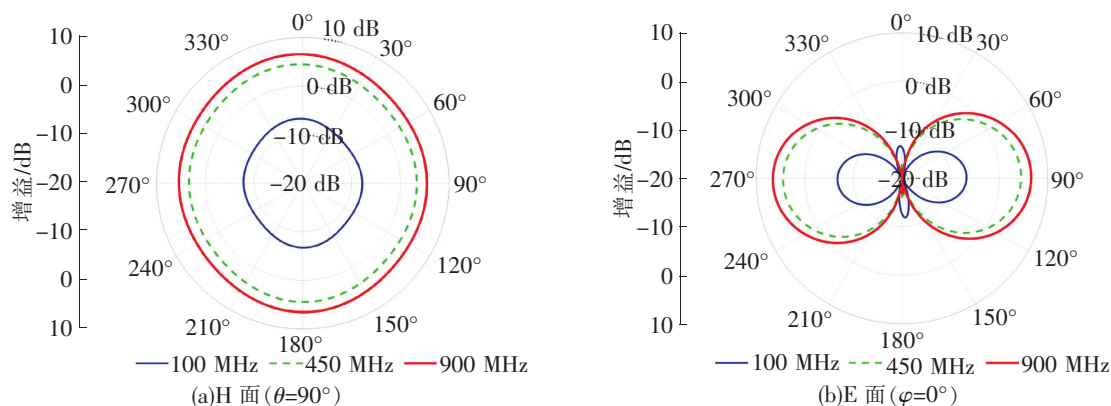


图 5 2D 极坐标方向图对比

2.3 表面电流分布分析

利用 HFSS 提取了天线在 100、450、900 MHz 处的表面电流分布,用于分析该共形结构在超宽频带内的辐射性能,结果如图 6 所示。在 100 MHz 低频处(图 6(a)),电流主要沿天线两侧的折叠支臂流动,并在馈电区与辐射贴片的过渡位置形成连续分布。这种折叠结构实质上延长了电流的物理路径,补偿了天线在低频段的电尺寸不足,使其在小电尺寸下仍能实现有效谐振。随着频率提升至 450 MHz(图 6(b)),谐振模式发生演变,强电流区域开始向天线中部收缩,两侧支臂末端的电流强度明显下降。这说明天线的有效辐射区域随波长的减小而自动内移,维持了较好的阻抗匹配。当频率达到 900 MHz 高频段时(图 6(c)),电流呈现出显著的局部化特征,主要汇聚在馈电端口尖端及邻近的缝隙边缘,具有典型的缝隙耦合辐射特征。通过这种电流路径随频率自适应调节的机制,该天线解决了不同频段下谐振模式的切换问题,从而在紧凑的物理空间内实现了对 VHF/UHF 频段的超宽带覆盖。

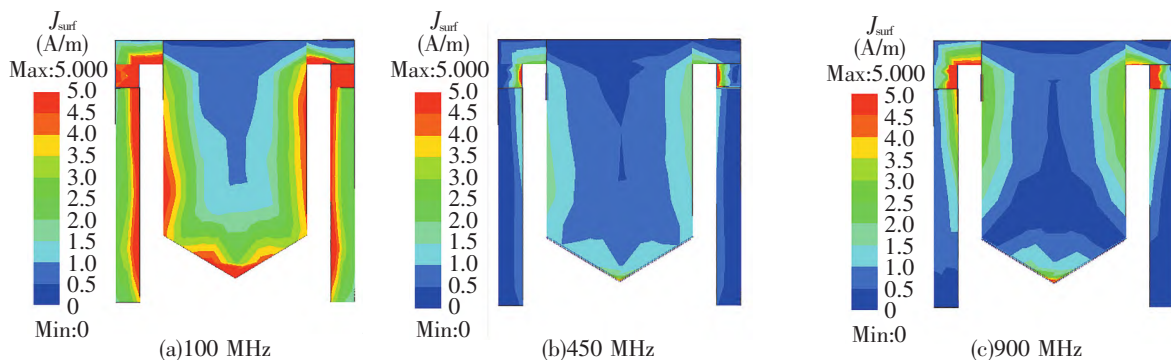


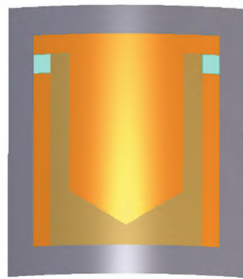
图 6 天线在不同频点处的表面电流分布

2.4 天线弯曲特性分析

考虑到实际应用场景中,该微带天线需紧密贴合于军用头盔侧面,而头盔表面近似为曲率半径为 11.15 cm 的导电复合材料曲面。为了验证天线在共形弯曲状态下的阻抗匹配特性与辐射性能稳定性,构建了标准的圆柱弯曲共形测试模型进行仿真验证。弯曲测试的几何建模如图 7 所示。图 7(a)为测试模型的立体结构示意图,天线及其柔性聚酰亚胺基板紧密贴合在半径为 11.15 cm 的铝合金金属圆柱面上,该金属底面用于模拟头盔外壳的电磁边界条件。图 7(b)为模型的截面示意图,直观展示了天线随基板发生的物理形变。



(a) 弯曲测试模型的立体结构示意图



(b) 弯曲测试模型的截面示意图

图 7 天线弯曲共形测试模型

基于上述模型,利用 HFSS 仿真软件对弯曲状态下的天线性能进行了全波分析,并与平直状态下的回波损耗进行了对比,仿真对比结果如图 8 所示。对比结果表明,尽管共形弯曲对天线的输入阻抗产生了一定扰动,但天线的设计具有足够的设计余量和共形鲁棒性。在 70~900 MHz 的全频段范围内,天线基本能满足 $S_{11} \leq -10$ dB 的指标要求。这说明该天线结构具有良好的共形稳定性,在弯曲状态下仍能保持优异的辐射性能,满足单兵头盔穿戴的实际通信需求。

最后,将设计的军用头盔共形天线与其他文献中天线的参数进行对比,对比结果如表 1 所示。所设计的军用头盔共形天线相较于文献[4],尺寸更小且带宽更优;

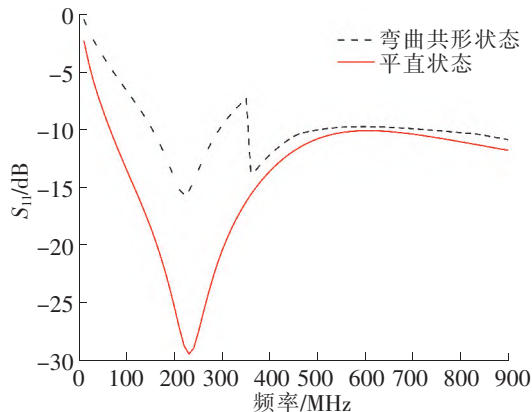


图 8 弯曲共形状态与平直状态对比图

文献[10]的尺寸略大,但带宽较窄;文献[11]带宽较宽,但尺寸较大。综上,所设计的天线兼具小尺寸与较宽频带的优势,具有良好的应用前景。

表 1 本文设计天线与其他文献中天线的参数对比

文献	尺寸	带宽/%	最低频率/MHz	辐射特性
文献[4]	230 mm×35 mm×0.8 mm	88	170	全向性不佳
文献 [11]	282 mm×242 mm×8.75 mm	153	420	全向
文献 [10]	126 mm×108 mm×1.6 mm	129	350	全向性不佳
本文	120 mm×110 mm×4 mm	171	70	稳定全向

3 结语

针对 VHF/UHF 频段军用通信需求,设计了一款基于聚酰亚胺柔性基板的军用头盔共形天线。通过等体积建模将椭球形头盔等效为半径 11.15 cm 的球体,采用平面单极子结构与共面波导馈电方式,优化形成 120 mm×110 mm×4 mm 的军用头盔共形天线结构。由仿真结果可以看出在 70~900 MHz 频段内实现稳定覆盖,在该频段内回波损耗≤-10 dB,驻波比≤2,水平全向辐射特性显著(E 面增益非对称度≤1.2 dB,H 面波瓣起伏≤0.8 dB)。

该设计通过柔性基板选型与结构优化,为解决传统头盔天线“尺寸-性能-共形性”的三角制约问题提供了一些可行思路。聚酰亚胺材料的低介电常数与低损耗特性,为宽频带信号传输提供了可靠保障,其柔性特质确保天线随头盔形变时的性能稳定性。与现有研究相比,本设计在全向辐射一致性与阻抗匹配带宽方面的突破,为单兵作战通信提供了轻量化、高可靠性的解决方案,尤其适用于复杂战场环境下的班组协同与应急通信需求。受限于柔性基板的精密加工工艺与全暗室测试条件,本文重点开展了天线的理论设计与高保真共形仿真验证。考虑到 HFSS 全波仿真算法在处理共形结构时的计算精度较高,目前的仿真结果已能充分论证该设计方案的可行性与优越性。在后续的研究工作中,将进一步开展天线实物的加工制作,并结合模拟人头模型进行复杂电磁环境下的实测验证,以期为工程化应用提供更翔实的数据支撑。

参 考 文 献

[1]李建,晚雷天,鲜承伟,等. 单兵通信系统头盔天线研究进展[J]. 电子与信息学报,2023,45(7):2375-2385.
[2]李同,吴海洲. 车载全空域相控阵波束形成研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(3):100-105.
[3]韩长喜,邓大松,陈卓,等. 国外共形天线技术发展与应用研究[J]. 战术导弹技术,2025(3):121-132.
[4]Zhang Qianyun, Gao Yue. Compact low-profile UWB antenna with characteristic mode analysis for UHF TV white space devices[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(10): 1629-1635.
[5]穆虹志. 多频 MIMO 平面单极子天线设计及去耦技术研究[D]. 济南:齐鲁工业大学,2024:58-62.
[6]毛雨,张涛,孙红鹏,等. UHF/VHF 频段单极子贴片天线的设计[J]. 飞机设计,2023,43(3):55-58.
[7]张晨皓. VHF/UHF 宽带小型化天线研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2021:38-40.
[8]刘金金. 柔性可穿戴宽带天线研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021:28-31.
[9]郑博仁,冯全源,郑宗良. 一种基于聚酰亚胺的超宽带紧凑型柔性天线[J]. 应用科技,2021,48(3):51-56.
[10]Wang Feng, Bin Feng, Sun Qiuqin, et al. A novel UHF minkowski fractal antenna for partial discharge detection[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(8): 1812-1819.
[11]Ajith K K,Bhattacharya A. A novel compact super-wideband bowtie antenna for 420 MHz to 5.5 GHz operation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66:3830-3836.

Design of Miniaturized Military Helmet Conformal
Antennas for VHF/UHF Bands

LIU Zhongyang¹, JI Zhe¹, ZHANG Longtao¹, XU Yuan², WANG Zhi³

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Ordos Power Supply Company, Inner Mongolia Power Group, Ordos 017000, China;

3. Shanghai Aerospace Electronics Co. Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: To meet the urgent demands for miniaturization and broadband performance in VHF/UHF military communications, a helmet-conformal ultra-wideband wearable antenna based on a polyimide flexible substrate was designed. The ellipsoidal helmet was equated to a sphere with a radius of 11.15 cm using the equal volume method, and based on this, a physical size constraint of $120\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ was established. The antenna originated from a planar monopole structure and was fed by a coplanar waveguide. Through the systematic optimization of key geometric parameters including the patch length, width, and bottom corner angle using the control variable method, excellent impedance matching was achieved. Simulation results based on the HFSS platform indicate that the antenna operates across the 70~900 MHz band, maintaining return loss $S_{11} \leq -10\text{ dB}$ and $\text{VSWR} \leq 2$ throughout the entire range. The radiation patterns exhibit stable horizontal omnidirectionality in both E and H planes. Surface current distribution analysis reveals the adaptive mechanism of the current path evolving with frequency. Furthermore, a cylindrical bending model verifies the conformal robustness of the antenna under helmet curvature. This design balances small size, light weight, and radiation stability, providing an efficient engineering solution for military wearable communication devices.

Key words: VHF/UHF bands; military helmet; conformal antenna; miniaturization; surface current analysis

~~~~~  
(上接第 14 页)

**Abstract:** To address the engineering challenges of traditional large-cantilever concrete bent caps, including excessive self-weight, difficulties in transportation and lifting, and the difficulty in achieving integral prefabricated assembly, a lightweight prefabricated large-cantilever bent cap structure with corrugated steel webs has been proposed in previous study, and a full-scale static loading test in the elastic stage has been completed. In this study, an ABAQUS finite element model of the large-cantilever bent cap structure with corrugated steel webs was established, and its accuracy was validated against the experimental results. On this basis, a parametric analysis was conducted to evaluate the effects of concrete strength, prestressing tendon reinforcement level, and corrugated steel web thickness on the flexural bearing capacity and mechanical performance of the structure. Additionally, the flexural bearing capacity was verified using current design code methods. The research results indicate that under the ultimate state, the structure exhibits a typical tension-controlled flexural failure mode with good ductility. Increasing the concrete strength provides limited enhancement to the peak bearing capacity. When the concrete strength grade increases from C50 to C60, the peak bearing capacity increases by 2.9%, and when it increases from C60 to C70, the capacity only increases by 1.9%. The diameter of the prestressing tendon is the dominant factor controlling the bearing capacity. Increasing the tendon diameter from 12.7 mm to 17.8 mm results in a significant 14.7% enhancement in the peak bearing capacity. Under the premise of satisfying local stability, the web thickness has a minor influence on the ultimate flexural bearing capacity, indicating that the flexural and shear mechanical mechanisms of the structure are relatively independent in the ultimate state. A comparison between the code-based verification results and the finite element analysis results demonstrates that the flexural bearing capacity of this type of structure possesses an average safety factor of approximately 1.34, indicating that the calculation results are conservative and reliable.

**Key words:** lightweight prefabricated bent caps; large-cantilever bent caps; corrugated steel web; flexural bearing capacity; full-scale test; numerical simulation model