

# 基于北斗短报文的微带结构定位系统设计

赵志雄 曹睿星 张会新

(中北大学微纳器件与系统教育部重点实验室 太原 030051)

**摘要:**随着航空航天领域对高精度定位技术的需求不断增加,针对大型飞行试验中数据存储器无法快速回收的问题,设计了一种基于卫星定位和北斗短报文技术的定位系统。该系统在飞行器分离前启动,通过北斗 BDS 模块实时获取位置信息,分离后则利用北斗短报文向地面终端发送信号。天线的设计对信号的收发能力有很大的影响,通过对天线采用微带叠层结构和双重矩形斜角切割的贴片设计,实现双频圆极化辐射,具备良好的顶点增益、低仰角增益和优异的频段隔离性能,确保北斗信号的传输可靠性,通过试验验证,定位误差小于 5 m,短报文通信的最大丢包率为 4.41%,均符合设计要求。

**关键词:**飞行器;残骸搜寻;北斗;短报文;定位系统;微带天线

**中图分类号:** TN823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8099

## Design of microstrip structure positioning system based on Beidou short message

Zhao Zhixiong Cao Ruixing Zhang Huixin

(Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** With the increasing demand for high-precision positioning technology in the aerospace field, a positioning system based on satellite positioning and Beidou short message technology was designed to solve the problem that the data memory could not be quickly recovered in large-scale flight tests. The system is started before the aircraft is separated, and the position information is obtained in real time through the Beidou BDS module, and after separation, the Beidou short message is used to send signals to the ground terminal. The design of the antenna has a great impact on the ability to transmit and receive the signal, through the patch design of the antenna using microstrip laminated structure and double rectangular bevel cutting, the dual-frequency circular polarization radiation is realized, with good vertex gain, low elevation gain and excellent band isolation performance, to ensure the transmission reliability of the Beidou signal, through the test verification, the positioning error is less than 5 meters, and the maximum packet loss rate of short message communication is 4.41%, which meets the design requirements.

**Keywords:** aircraft; wreckage search; Beidou; short messages; positioning system; microstrip antennas

### 0 引言

大型飞行试验中,实时精确的位置数据在飞行器残骸回收过程中至关重要<sup>[1]</sup>。在飞行器残骸搜寻技术的发展过程中,相比红外定位、声波定位、雷达定位技术,采用卫星定位技术已成为当前最理想的解决方案<sup>[2]</sup>。在当前航天领域的大型飞行试验中,飞行里程往往达到上千甚至上万公里,传统定位方法的应用效果受到了一定限制,例如,

红外和声波定位在短距离内表现良好,但当距离扩大至数十或数百公里时,环境因素会显著影响定位的准确性,而雷达定位系统需要复杂的地面配置,进一步限制了其应用。因此,本文针对海上飞行试验任务中数据存储器定位困难和搜寻效率低下的问题,利用北斗短报文通信系统支持一对多的广播传输的优势,设计了一款优化的定位系统,系统由主控模块、北斗 BDS 定位模块与天线,供电管理模块、对外低频接口模块组成。

在本文设计的飞行器搭载电子设备全面国产化背景下,目前现有天线方向性较差,导致信号覆盖范围有限,在极端温度、湿度和振动等条件下性能不稳定,且还有可能反过来影响飞行器气动外形等总体设计。某些无人机在极端天气条件下(如高温、低温或高湿度)使用的天线可能因方向性差而导致信号衰减,无法与控制中心保持稳定的连接<sup>[3]</sup>,影响飞行任务的执行。为实现定位装置小型化,本文天线采用微带叠层形式进行设计,其稳定性好,可实现多频段工作,满足多频段通信需求,易实现圆极化,具有较好的信号方向性,能够有效避免干扰,适用于短报文导航定位系统<sup>[4-5]</sup>。

## 1 功能设计

定位装置中主控模块采用基于 Cortex-M4 内核的 MCU 芯片为核心通过串口与北斗模块进行通信,提取定位数据并控制向卫星发送短报文,定位系统结构如图 1 所示。北斗模块与天线是定位系统利用卫星收发短报文数据和位置信息的关键部分,在完成 RNSS 定位和 RDSS 短报文通信的同时,进行冗余性设计,整个系统集成两个北斗模块 A 与 B,每个模块都可以独立完成定位和短报文通信的任务,这意味着即使一个模块发生故障,系统仍然可以继续正常工作。

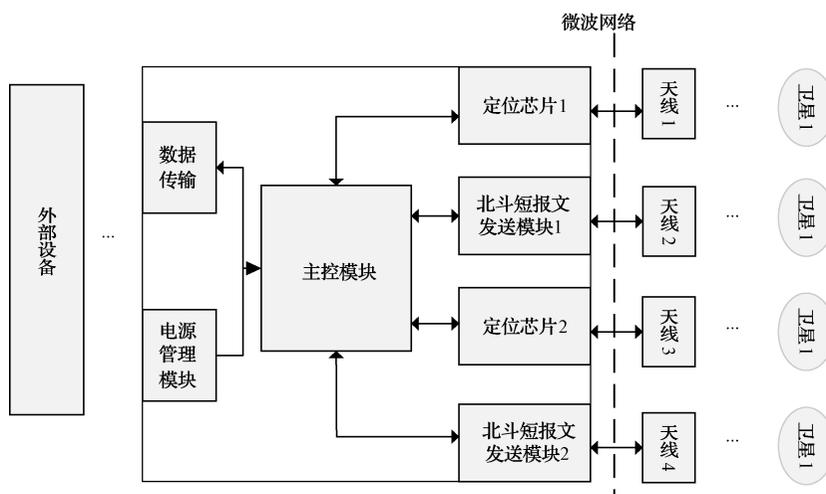


图1 定位系统结构

Fig. 1 Positioning system structure

根据对设计方案进行分析,定位系统选择使用北斗 BDM910-J 模块。该模块尺寸仅为 58.3 mm×54 mm×12 mm,与外部相连的接口只有如下 3 个:接口 1 用于接收 BDS B1 与 GPS L1 导航电文(RNSS);接口 2 用于将组帧的短报文信号 RDSS 发给 BDS(TX);接口 3 用于接收 BDS RDSS 业务信号(RX)<sup>[6]</sup>。主控模块通过双 USART 串口与北斗模块 RNSS 通信获取定位数据,这些实时的定位信息经 DMA 传输至预先设定格式的 BUFFER 中,主控模块按顺序从 BUFFER 中读取数据,将提取到的定位信息编为符合北斗短报文规范的帧,发送至北斗模块的 RDSS 部分,在满足短报文发送条件时,北斗模块将其转发至卫星,卫星发送此信息(\$TXXX),地面接收终端接收传至上位机进行处理。上位机可通过相应的串口对 RDSS/RNSS 功能进行软件版本的升级,增强了模块的可扩展性。此外,BDM910-J 模块还具有如下两路 LNA(低噪声功率放大器):一路 LNA 为 S 频点,对 RDSS 卫星信号进行滤波和低噪声放大;另一路 LNA 为 BD2 B1/GPS L1 频点,可以根据天线类型自主配置电路,提高了模块的灵活性和适应性。

为了有效减少卫星信号遭受的干扰,定位装置采用了 BDS/GPS 融合的双模定位技术,相比其构成的单一定位模式,可以展现出更高的抗干扰能力和更优的定位精度:在缺乏显著障碍物遮挡的环境中,该技术能确保定位误差限制在 5 m 以内,理论上在最优的环境下可以达到 2 m,真正实现“车道级导航”。模块内部的双模模块支持 3 种工作模式:单 BD2 B1 工作模式;单 GPS L1 工作模式;BD2 B1/GPS L1 双模工作模式。在单模工作模式下,系统由 BDS 模块或者 GPS 模块单独定位;在双模工作模式下,定位系统由 BDS 模块与 GPS 模块共同进行融合定位。北斗模块的 RDSS 部分主要包括 4 部分电路:LNA 电路、基带处理电路、Trans-ceiver(无线电收发)电路以及 PA 电路。功能框图如图 2 所示。

北斗模块的 RNSS 电路部分主要包括 LNA 电路和 RNSS/GPS 电路。天线接收到信号后,通过 LNA 部分传输给定位系统主控模块,功能框图如图 3 所示。

在安装过程中,选择中航 FFB205A 型超低损耗稳相射频电缆,将北斗模块与微带天线一对一连接,增强了定位系统与卫星之间短报文收发的稳定性。

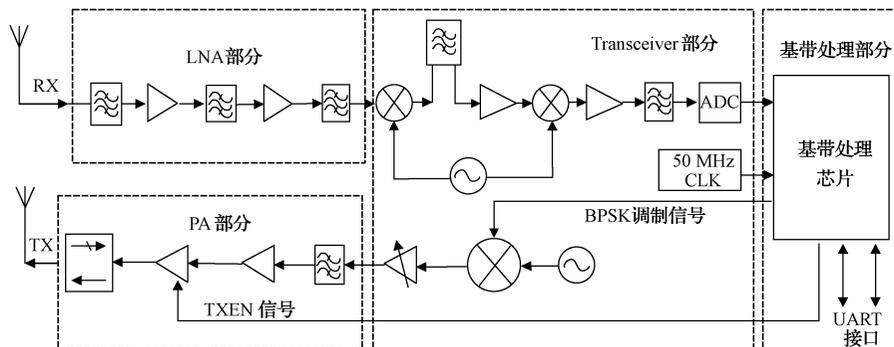


图2 北斗模块 RDSS 部分功能框图

Fig. 2 Functional block diagram of RDSS part of BDM910-J module

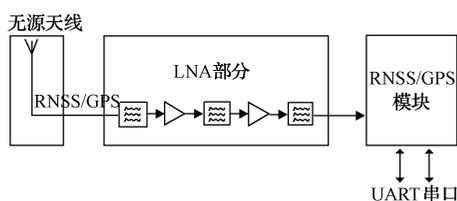


图3 BDM910-J 模块 RNSS 部分功能框图

Fig. 3 Functional block diagram of RNSS part of BDM910-J module

## 2 天线设计

微带天线由介质基板、接地板、贴加导体薄片或微带线组成,通常用微带线或者同轴线馈电,使导体贴片与接地板之间激励起射频电磁场,通过贴片与四周的接地板之间的缝隙向外辐射,基板厚度与波长相比一般很小,使其具有一维小型化的特点。在微带天线的众多优势中最重要的是它可以调整体积大小、重量轻。此外,微带天线具有高效率、低功耗的特点,可以稳定发射和接收射频信号,这样就可以提高无线通信的效率并且能够节省设备电池的电量,延长设备的使用寿命<sup>[7-9]</sup>。

定位系统与地面接收系统中,微带天线提供高性能的信号接收和发射,有效地提高定位装置的精度和灵敏度。通过更准确的定位服务,优化了GPS的定位精度。

### 2.1 天线冗余性设计

在空中高速飞行的情况下,天线与卫星间的通信仰角、极化损耗以及朝向增益均处于动态变化之中。为了满足BDM910-J模块的天线功能,本文方案的天线采取宽波束设计,每个北斗模块配合两个无源天线进行安装,单个天线覆盖范围可呈半球状。以飞行器筒状结构一圈圆周为底,模块A的天线1、3为南、北朝向,模块B的天线2、4为东、西朝向,共4组天线交叉分布。

为了实现小型化,与飞行器表面共形,一般采用多种技术,其中比较常见的有采用高介电常数介质基板、阻抗加载和缝隙加载。

#### 1) 采用高介电常数介质基板

介质基板是微带天线的重要组成,由式(1)可知,当微带天线的谐振频率 $f_0$ 一定时,介质基板的相对介电常数 $\epsilon_r$ 与微带天线的尺寸 $L$ 成反比关系( $c$ 为真空中光速)。

$$f_0 \approx \frac{c}{2L \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \quad (1)$$

采用高介电常数介质基板是微带天线小型化的基础,可以有效地缩小微带天线的体积、降低其重量和功耗,同时会改变微带天线的特性阻抗和谐振频率,需要通过调整辐射贴片尺寸和形状来进行匹配调整,以保证天线的性能,但也有可能会导致微带天线的带宽减小,因为高介电常数介质基板的损耗比低介电常数介质基板更大。

此外,高介电常数介质基板的制作成本相对较高,不适合大规模生产。

#### 2) 阻抗加载

微带天线是一种以半波长谐振的天线,具有平面结构,易与飞行器外壁结构表面共形,且具有零点电压和节点电压,当微带天线两侧开路时,中间有一个零点位线,通过加载探针或者贴片可以使微带天线缩小尺寸并实现谐振。阻抗加载需要精确的电路设计和调试,增加了设计难度和制造成本。同时,短路探针会在天线工作频段内引入损耗,降低天线的效率。因此,在使用短路探针进行加载时,需要精确控制制造加工的工艺,以保证天线性能的稳定可靠。当使用阻抗加载技术时,需要仔细考虑加载阻抗的大小和位置,以确保天线在设计要求的频段内具有良好的性能和较宽的带宽。此外,还需要注意阻抗加载所带来的附加损耗,并进行合理的折衷和优化,以实现最佳的天线性能。

#### 3) 缝隙加载

缝隙加载技术是扩展微带天线带宽和增加天线工作频段的重要手段之一。在微带天线的辐射贴片上加入缝隙,通过调整缝隙的宽度、长度和形状等参数来有效地扩展天线的带宽和增加天线的工作频段,从而实现其在不同频段下的良好性能。

## 2.2 天线结构设计

在工作频率为  $f$  的矩形微带天线中,宽度  $w$  为:

$$w = \frac{c}{2f} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: $c$  为光速; $\epsilon_r$  为介质基板的相对介电常数。辐射贴片的长度通常为  $\lambda_e/2$ ,  $\lambda_e$  是介质内波长,如下:

$$\lambda_e = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_e}} \quad (3)$$

微带天线具有边缘缩短效应,所以实际上长度  $L$  为:

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (4)$$

式中: $\epsilon_e$  是等效有效介电常数; $\Delta L$  是等效辐射缝隙长度。

$$\epsilon_e = \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (6)$$

式中: $h$  为介质基板的厚度。由于在实际使用中希望天线可以兼顾带宽较小的尺寸,经综合考虑后,最终选用  $h = 3 \text{ mm}$ 、 $\epsilon_r = 9.2$  的微波陶瓷基片。天线的几何结构如图4所示,实现双频圆极化辐射<sup>[10]</sup>的方式是采用了双重矩形斜角切割的贴片设计。其中,上方贴片负责接收 GPS 信号,而下方贴片则捕捉 BDS 信号。为了保证信号的有效传输,本文利用一根同轴探针穿透下层贴片中的  $1 \text{ mm}$  直径过孔,直接对上层贴片进行馈电,与此同时,下层贴片通过与上层贴片之间的电磁耦合作用得到激活。为了确保两层贴片稳定连接,四角处使用了直径为  $1 \text{ mm}$  的金属螺丝固定于介质基板上,这样既加强了结构稳定性,又促进了信号的顺畅交互。

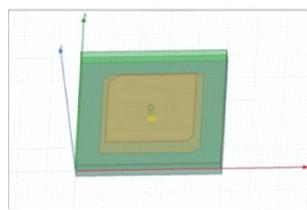


图4 天线几何结构  
Fig. 4 Antenna geometry

本文利用 HFSS 软件完成了模型构建与全波仿真分析。理论上,对称性高的天线设计往往能展现出更优越的圆极化性能。然而,仿真结果显示,完全对称的双层贴片结构因彼此间的相互干扰,导致其轴比性能存在局限性。为了解决这一问题,本文选用了矩形贴片来替代正方形贴片。此外,采用不对称的直角三角形进行边缘切割,这种设计通过精细调整贴片的长度、宽度以及这两个直角三角形切边的尺寸,来实现更佳的圆极化辐射效能,有效克服了对称结构的局限,提升了天线的整体性能。

一般来说,天线的谐振频率随贴片尺寸的增大而减小,但是也随切角尺寸的增大而增大<sup>[11-13]</sup>。本文遵循这一原则进行仿真优化,优化后天线各部分的尺寸如表1所示。

表1 天线尺寸  
Table 1 Antenna size (mm)

部位	尺寸			
上层	L1	L2	P1	P2
	34.7	34.9	2.2	2.3
下层	L3	L4	P3	P4
	30.1	29.6	2.8	3.6

按照表1的尺寸,选择厂家 Rogers 生产的 TMM10 高频层压板进行了加工及测试,实物如图5所示,图5(a)为俯视图,图5(b)为左视图,图5(c)为天线的正反面贴片设计。

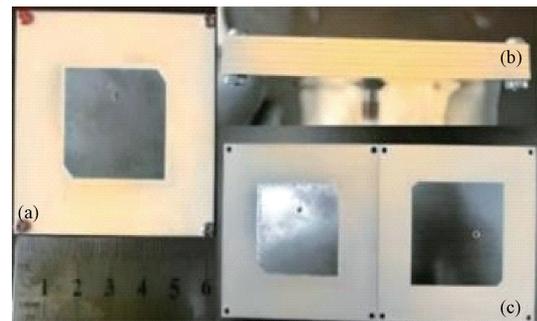


图5 天线实物  
Fig. 5 Antenna

## 2.3 微波网络设计

根据定位装置天线各端口功能,对微波网络进行了设计。微波网络由 BD1 L 频段的合成器单元、BD1 S 频段的功分器单元、B1L1 频段的合成器单元组成,为了实现4个定位装置天线两两组阵的功能,提供 BD1 L 频段的合成器单元、BD1 S 频段的功分器单元、B1L1 频段的合成器单元各2个,将3种共6个单元结构水平堆叠,形成定位装置微波网络,各单元均可以独立工作,定位装置与微波网络、天线连接关系如图6所示。

## 2.4 电性能仿真

为覆盖天线所需频点实现相应的功能,比如天线是否能够在特定频点和多频点上有效地传输和接收无线信号;是否具备良好的辐射性能,从而实现频率选择性,以适应不同的通信标准;天线设计结构是否在特定频点上提高了增益,改善了辐射效率,从而增强信号覆盖范围和质量。进行了电性能仿真,如图7、8所示。

图7中,纵轴电压驻波比(VSWR)是天线性能的重要指标,反映了馈线上的反射和传输效率,该天线在工作频点驻波比  $\nabla m$  均小于 1.5,表明,更多的信号能被有效辐

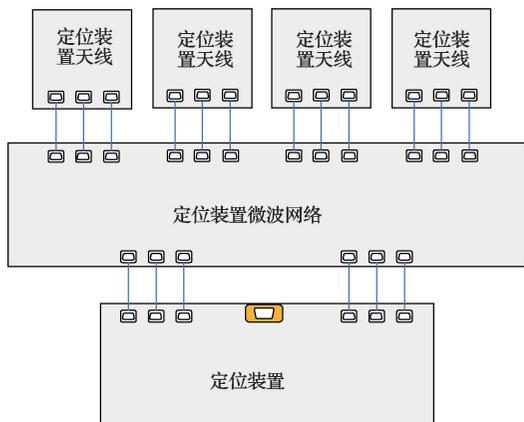


图6 定位装置与微波网络、天线连接关系  
Fig. 6 Relationship between the positioning device, the microwave network, and the antenna

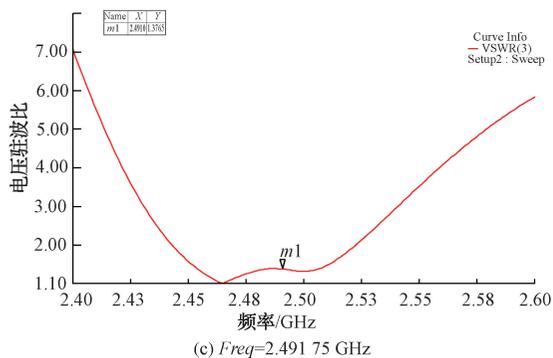
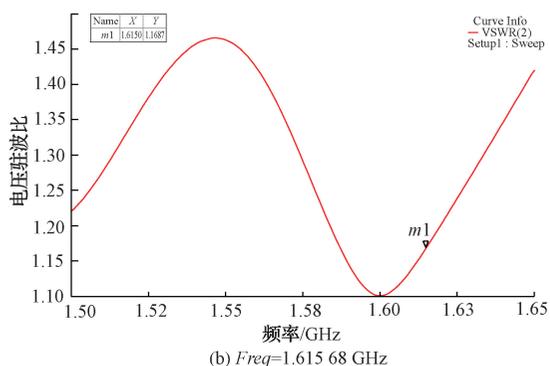
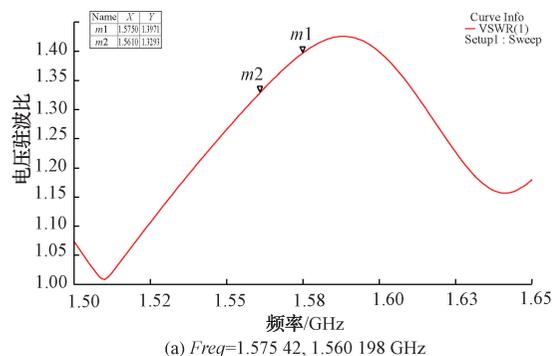
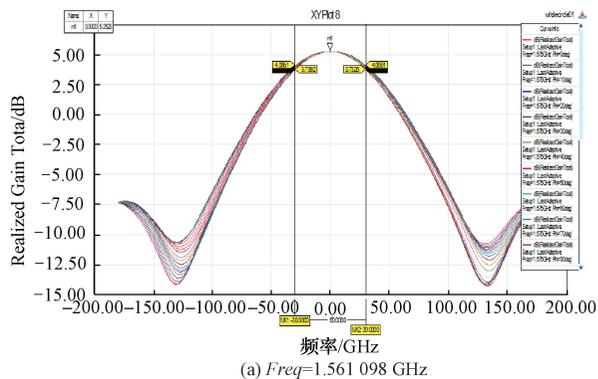
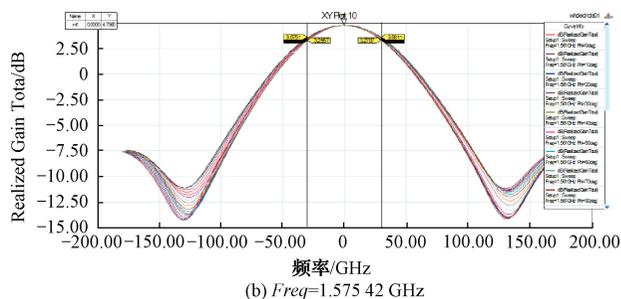


图7 天线仿真驻波

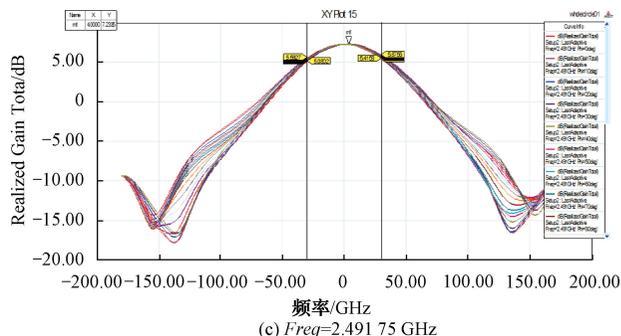
Fig. 7 Antenna simulates standing waves



(a)  $Freq=1.561098$  GHz



(b)  $Freq=1.57542$  GHz



(c)  $Freq=2.49175$  GHz

图8 天线仿真二维方向图

Fig. 8 2D pattern of antenna simulation

射,减少能量了损失;宽带性能良好,有助于支持多个频率或通信标准;微带结构改进了辐射效率,良好的匹配有助于提高天线的辐射效率,增强信号质量和覆盖范围。图8中二维方向图在 $0^\circ \pm 70^\circ$ 波束宽度范围内增益 $\nabla m$ 不小于 $-5$  dB,意味着在此角度范围内,天线的辐射性能是良好的,满足设计要求。

### 3 性能验证

#### 3.1 定位性能测试

定位精度是评估定位装置能否准确指示设备落点坐标的重要指标<sup>[14]</sup>,需要进行反复的测试。具体而言,本文在校园内以及校外沿途各个标志性地点进行了测试,并将测试结果与 WGS-84 坐标系实际值进行了参考。如表2所示,北斗模块的定位距离误差 $<6.8$  m,能够满足实际应用的需要。

#### 3.2 短报文通信性能测试

在对北斗短报文通信性能测试的过程中,要将地面接

表 2 定位精度测试结果

Table 2 Positioning accuracy test results

测试地点	实际坐标纬度 (北纬)/(°)	实际坐标经度 (东经)/(°)	测试坐标纬度 (北纬)/(°)	测试坐标经度 (东经)/(°)	误差/m
1	38.009 175	112.436 48	38.009 173	112.436 471 2	4.8
2	37.987 264	112.463 03	37.987 240	112.463 050 3	6.8
3	37.965 310	112.518 16	37.965 314	112.518 143 6	5.7
4	37.979 360	112.520 02	37.979 367	112.519 991 8	4.2
5	38.030 492	112.627 66	38.030 479	112.627 609 9	5.5
6	38.061 416	112.656 79	38.061 380	112.656 835 5	4.1
7	38.165 756	112.347 78	38.165 756	112.347 772 5	1.6

收终端的天线放在无明显遮挡的地方。选取其中几分钟的测试结果,短报文信息包如图 9 所示,其中图 9(a)表示前半部分信息,图 9(b)则包含了后半部分信息。两个北斗模块交替发送短报文,每个模块平均发送间隔在 35 s 以内。选取第一行数据为例,5 Bytes 的纬度和经度经十六进制(双精度)转浮点数不够的字节补 00 之后,结果为 38.014 229 1 与 112.442 980 1;4 Bytes 的高度经十六进制(单精度)转浮点数之后,结果为 845.768 m;状态码“D0”用二进制表示为“11010000”,装置目前状态为模块 A、B 均定位。

在船上将地面接收终端调整为接收短报文的状态,驶入预定海域进行等待,在定位装置与飞行器成功分离且地面接收终端收到短报文后,立即对其进行坐标提取并将其输入船载卫星地图进行导航<sup>[16-17]</sup>,迅速在落区将其打捞并回收,如图 10 所示。



图 10 设备打捞

Fig. 10 Equipment salvage

[H1]	[2024-03-17]	时间	[1]	[2]	接收方	发送方
[H1]	[2024-03-17]	15:52:26	[1]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 87	60 06 46 84 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:53:01	[2]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 88	60 0F 31 8A 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:53:34	[2]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 88	60 06 46 84 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:54:06	[1]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 87	60 0F 31 8A 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:54:42	[1]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 87	60 06 46 84 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:55:17	[2]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 88	60 0F 31 8A 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:55:50	[2]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 88	60 06 46 84 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:56:25	[1]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 87	60 0F 31 8A 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:56:58	[1]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 87	60 06 46 84 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:57:32	[2]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 88	60 0F 31 8A 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:58:06	[2]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 88	60 06 46 84 00 00 01
[H1]	[2024-03-17]	15:58:40	[1]	24 54 58 58 58 00 4D	0F 31 87	60 0F 31 8A 00 00 01

(a)

纬度	经度	高度	状态码	电压
42 D2 01 43 40	C9 59 1C 5C 40	27 71 53 44 7D 16	D0 8C	6B 6B 5B D7 01 43 40
5C D2 01 43 40	AE 59 1C 5C 40	F2 B2 53 44 7D 38	D0 8C	6B 6B 58 D7 01 43 40
59 D2 01 43 40	A0 59 1C 5C 40	2F E5 53 44 7D 5E	D0 8C	6B 6B 13 D6 01 43 40
56 D2 01 43 40	96 59 1C 5C 40	FC 01 54 44 7D 84	D0 8C	6B 6B 17 D6 01 43 40
71 D2 01 43 40	8C 59 1C 5C 40	5C 0F 54 44 7D A6	D0 8C	6B 6B 09 D6 01 43 40
95 D2 01 43 40	79 59 1C 5C 40	58 19 54 44 7D CC	D0 8C	6A 6A 06 D6 01 43 40
C6 D2 01 43 40	55 59 1C 5C 40	F3 55 54 44 7D EE	D0 8C	6A 6A 01 D6 01 43 40
D9 D2 01 43 40	35 59 1C 5C 40	DD BC 54 44 7E 14	D0 8C	6A 6A FF D5 01 43 40
2C D2 01 43 40	F6 59 1C 5C 40	26 29 55 44 7E 36	D0 8C	6A 6A FD D5 01 43 40
37 D2 01 43 40	E2 59 1C 5C 40	5F 7A 55 44 7E 5C	D0 8C	6A 6A DF D5 01 43 40
00 D2 01 43 40	44 59 1C 5C 40	CF 67 55 44 7E 82	D0 8C	6A 6A CF D5 01 43 40

(b)

图 9 短报文信息

Fig. 9 Short message information

本文对定位装置每次测试的时长和地点都不相同<sup>[15]</sup>,全面的评估了整机短报文通信的性能。测试表明,在不同的环境下,短报文通信成功率有略微的差异,但整体达到了 95.07%,满足设计目标,北斗短报文通信可靠性得到了充分的验证。

### 3.3 飞行试验

在海上设备回收定位系统研制工作一切准备就绪后,最终在我国黄海某海域参加了某项飞行试验。工作人员

## 4 结论

为满足飞行器定位装置回收方案设计需求,进行了总体方案设计,并对方案的天线冗余性、对使用北斗模块定位系统的天线与结构进行了设计,首先从微带天线的小型化设计入手,确定了天线尺寸,采用双重矩形斜角切割的贴片设计,完成 GPS 信号接收和 BDS 信号捕捉,提高了天线增益从而提升通信成功率。电性能仿真结果满足定位需求。在复杂环境飞行试验中,可为搜寻人员提供准确位置信息,实现设备及时有效的回收。

### 参考文献

- [1] 李艳, 罗钧旻. 航天器遥测数据可信度分析与研究[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(6): 7-8, 49. LI Y, LUO J M. Credibility analysis and research of spacecraft telemetry data [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2008, 27(6): 7-8, 49.
- [2] 杨淙喜, 翁艳云, 高雅, 等. 基于北斗星间链路及短报文的海上安全信息播发方案设计[J]. 世界海运, 2023, 46(7): 8-13.

- YANG S X, WENG Y Y, GAO Y, et al. Design of maritime security information broadcasting scheme based on BeiDou inter-satellite link and short message[J]. *World Shipping*, 2023, 46(7):8-13.
- [3] 李壮. 某型无人机视距C波段下行链路失锁故障分析[J]. *中国科技信息*, 2024(11): 41-42.
- LI ZH. Analysis of line-of-sight C-band downlink lock-out fault of a certain type of UAV[J]. *China Science and Technology Information*, 2024(11): 41-42.
- [4] 高诗尧. 弹载黑匣子落点定位技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- GAO SH Y. Research on location technology of missile-borne black box landing point [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [5] 戴亚男, 伍捍东, 程光伟. 圆极化介质谐振天线设计与实现[J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(12): 105-108.
- DAI Y N, WU H D, CHENG G W. Design and implementation of circularly polarized dielectric resonant antenna[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(12): 105-108.
- [6] 马文忠, 李林欢, 江丽丽. 基于载波相位差分的北斗/GPS双模定位系统研究[J]. *测绘工程*, 2015, 24(9): 25-30, 33.
- MA W ZH, LI L H, JIANG L L. Research on BeiDou/GPS dual-mode positioning system based on carrier phase difference [J]. *Surveying and Mapping Engineering*, 2015, 24(9): 25-30, 33.
- [7] 薛亮. 各国载人航天器返回地球着陆点的选择[J]. *上海人大月刊*, 2022(6): 52-53.
- XUE L. The choice of manned spacecraft to return to the earth landing site of various countries[J]. *Shanghai People's Congress Monthly*, 2022(6): 52-53.
- [8] 周凯, 刘志平, 毛艳飞, 等. 贴片天线传感器平面二维应变测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1): 136-143.
- ZHOU K, LIU ZH P, MAO Y F, et al. Research on plane two-dimensional strain measurement method for patch antenna sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 136-143.
- [9] 桂小英, 裴进明, 裴睿. 层叠北斗双频微带天线圆极化比较研究[J]. *微波学报*, 2012(S3): 103-105.
- GUI X Y, PEI J M, PEI R. Comparative study on circular polarization of stacked BeiDou dual-band microstrip antenna[J]. *Journal of Microwave*, 2012(S3): 103-105.
- [10] 金魁, 詹大伟, 杨阳, 等. 小型化高增益微带差分天线设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(6): 911-916.
- JIN K, ZHAN D W, YANG Y, et al. Design of miniaturized high-gain microstrip differential antenna[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 47(6): 911-916.
- [11] 邓卓林, 尹文禄, 杜奋, 等. 宽轴比波束双频带北斗导航天线设计[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(2): 245-251.
- DENG ZH L, YIN W L, DU F, et al. Design of wide-axis-ratio beam dual-band Beidou navigation antenna[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(2): 245-251.
- [12] 于家傲, 姜永金, 李有权, 等. 小型化北斗导航圆极化天线[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(7): 79-81.
- YU J AO, JIANG Y J, LI Y Q, et al. Miniaturized Beidou navigation circularly polarized antenna [J]. *Modern Electronics*, 2014, 37(7): 79-81.
- [13] 尹思杰. 基于特征模理论的圆极化贴片天线研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.
- YIN S J. Research on circularly polarized patch antenna based on eigenmode theory [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.
- [14] 汪义, 周悦, 郭威, 等. 基于北斗定位与通信的全海深ARV回收控制系统设计[J]. *测控技术*, 2018, 37(4): 120-124, 134.
- WANG Y, ZHUO Y, GUO W, et al. Design of ARV recovery control system based on Beidou positioning and communication[J]. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(4): 120-124, 134.
- [15] 孙鑫. 飞天之路: 从神舟一号到神舟十五号[J]. *炎黄春秋*, 2023(1): 67-71.
- SUN X. The road to heaven: From Shenzhou 1 to Shenzhou 15[J]. *Yanhuang Chunqiu*, 2023(1): 67-71.
- [16] 熊伟涛. 海战场联合搜救辅助决策方法及应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- XIONG W T. Research on decision-making method and application of joint search and rescue in naval battlefield [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [17] MIKRIN E A, MIKHAILOV M V, ORLOVSKII I V, et al. Circumlunar spacecraft navigation using the measurements from global navigation satellite systems GLONASS, GPS, Galileo and Beidou[J]. *Gorskopiya i Navigatsiya*, 2019, 27(3): 3-17.

作者简介

赵志雄, 硕士研究生, 主要研究方向为电子电路系统测量技术。

E-mail: 18234069859@163.com

曹睿星(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为电

子测量技术及测试仪器。

E-mail: 997334485@qq.com

张会新, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为抗高过载大容量高速固态存储测试技术、特殊环境下集成测量仪器。

E-mail: zhanghx@nuc.edu.cn