

基于双模定位的荒野遇险人员报警终端的设计

马 帅^{1,2}, 鲍爱达^{1,2}, 马游春^{1,2}, 朱志斌^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了解决没有移动网络信号覆盖地区的荒野工作人员遇险救援不便的问题, 设计了一种基于 GPS (Global Position System) /北斗卫星导航系统的野外遇险人员报警定位终端; 该报警定位终端以 ARM (Acorn RISC Machine) Cortex-M4 为控制核心, 搭配两种不同颜色的 LED 报警闪烁灯和液晶显示屏, 并在报警终端上设计了功率放大器电路, 工作时报警终端上的 GPS/北斗双模芯片精确定位人员位置信息, 采用 LoRa (Long Range) 无线传输模块将荒野工作人员的安全信息发送至附近的固定基站或者基站车上, 其一旦接收到报警信息, 便可迅速作出响应, 及时对遇险人员进行救援; 同时, 在基站上使用增益为 15.5 dBi 的定向接收天线, 并设置 LoRa 无线传输模块的空中速率为 0.3 kbps, 可以使荒野工作人员的报警信息传输距离达到最远; 实验结果表明, 该报警终端具有实用性强、定位精度高、便于携带、工作稳定可靠, 传输距离长等优点。

关键词: GPS/北斗双模定位; 无线传输; 报警; 救援; 终端; 距离

Design of Alarm Terminal for Wild Workers in Distress Based on Dual Mode Positioning System

Ma Shuai^{1,2}, Bao Aida^{1,2}, Ma Youchun^{1,2}, Zhu Zhibin^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051 China;

2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To solve the problem that the rescue of wild workers without mobile network signal which in the coverage areas, an alarm positioning terminal for wild workers in distress is developed based on the GPS/BeiDou satellite navigation system. The alarm positioning terminal is presented which is used the ARM Cortex-M4 as the core. On the one hand, it has LCD screen and LED flashing light with two different colors, on the other hand, the power amplifier circuit is designed on the alarm positioning terminal. The terminal uses the GPS/BeiDou positioning module to position the information of wild workers precisely, the information of security for the wild workers is sent to the nearby fixed base station or mobile base station by the LoRa wireless transmission model. Once received the alarm information, the response is decided quickly, and the rescuing is implemented timely. At the same time, Using a receiving antenna with a gain of 15.5 dBi on the base station and setting the airspeed of the LoRa wireless transmission module to 0.3 kbps, the alarm information transmission distance of the wilderness staff can be maximized. Experimented results prove that the alarm positioning terminal has many advantages, such as the high practicability, high positioning accuracy, can be carried easily, stable and reliable working property, longer transmission distance and so on.

Keywords: GPS/BeiDou dual mode positioning system; wireless transmission; alarm; rescue; terminal; distance

0 引言

在丛林、沙漠、戈壁等处往往荒无人烟, 这些地区一般没有网络信号或者信号很差。而野外工作人员一旦在上述地区迷失了方向很容易陷入危险之中, 这时如果没有移动通信网络信号就会使搜寻救援工作变的异常困难。同时, 由于没有信号, 救援队往往会采取大量人员地毯式搜寻或

者直升机上肉眼定位的方式对遇险人员进行搜救, 这样的搜救方式效率较低, 不能在第一时间确定遇险人员的位置, 从而贻误救援时间。

卫星定位系统可以用于荒野等环境恶劣条件下工作人员的遇险定位。ATK-S1216F8-BD GPS/北斗模块自身性能非常优异, 该双模定位模块兼具 GPS 模块和北斗模块的优点。使用该模块可以将定位信息实现 GPS 系统和北斗系统的完美融合, 不但提高了定位的精准度, 同时还使定位的可靠性得到了加强, 这样就具有了独特的定位优势^[1]。

本文基于 GPS/北斗双模定位系统和数据无线传输技术, 设计了一款适合于荒野等环境恶劣条件下外出工作人员的小型报警定位装置, 该装置体积小, 便于携带, 同时, 改变基站上接收天线的增益和无线传输装置的空中速率的大小, 可有效改变报警信息的传输距离, 这为野外工作人

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-10-25。

作者简介: 马 帅(1995-), 男, 黑龙江七台河人, 硕士研究生, 主要从事无线通信和 MEMS 传感器的可靠性方向的研究。

鲍爱达(1980-), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电子测试仪器与系统方向的研究。

马游春(1977-), 男, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高速数据采集与存储系统方向的研究。

员的安全提供了强有力的救助保障。

1 GPS/北斗双模定位算法研究

下面介绍 GPS/北斗双模定位导航系统的定位原理与用户位置的解算过程。

设用户空间为 (x_u, y_u, z_u) , 用户时钟同系统时钟偏差的未知量为 t_u , 将单一的伪距方程表示为:

$$\rho_j = \sqrt{(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2 + (z_j - z_u)^2} + ct_u = f(x_u, y_u, z_u, t_u) \quad (1)$$

式 (1) 中, ρ_j 是伪距观测值, $j = 1, 2, 3, 4$ 。将式 (1) 进行展开并化简掉不必要的高次项^[2], 可以得到方程组如下:

$$\begin{cases} \Delta\rho_1 = a_{x1}\Delta x_u + a_{y1}\Delta y_u + a_{z1}\Delta z_u - ct_u \\ \Delta\rho_2 = a_{x2}\Delta x_u + a_{y2}\Delta y_u + a_{z2}\Delta z_u - ct_u \\ \Delta\rho_3 = a_{x3}\Delta x_u + a_{y3}\Delta y_u + a_{z3}\Delta z_u - ct_u \\ \Delta\rho_4 = a_{x4}\Delta x_u + a_{y4}\Delta y_u + a_{z4}\Delta z_u - ct_u \end{cases} \quad (2)$$

方程组 (2) 中的 a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} 表示由近似位置指向第 i 颗卫星的单位矢量的方向余弦, 其中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。

可以解得:

$$\Delta x = \mathbf{H}^{-1}\Delta\rho \quad (3)$$

由式 (1) ~ (3) 可得:

$$y = \mathbf{H}x + \epsilon \quad (4)$$

y 表示 $(m \times 1)$ 维的向量, \mathbf{H} 表示观测矩阵, ϵ 表示测量的误差向量, x 表示用户此时的状态向量。由此可以写出 GPS/北斗系统的观测方程:

$$y_{BD} = \mathbf{H}_{BD}x_{BD} + \epsilon_{BD} \quad (5)$$

$$y_{GPS} = \mathbf{H}_{GPS}x_{GPS} + \epsilon_{GPS} \quad (6)$$

整理后可得:

$$\Delta\rho = \begin{bmatrix} \Delta\rho_{1-BD} \\ \Delta\rho_{2-BD} \\ \Delta\rho_{3-BD} \\ \Delta\rho_{4-GPS} \\ \Delta\rho_{5-GPS} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_{x1}^{BD} & a_{y1}^{BD} & a_{z1}^{BD} & 1 & 0 \\ a_{x2}^{BD} & a_{y2}^{BD} & a_{z2}^{BD} & 1 & 0 \\ a_{x3}^{BD} & a_{y3}^{BD} & a_{z3}^{BD} & 1 & 0 \\ a_{x4}^{GPS} & a_{y4}^{GPS} & a_{z4}^{GPS} & 1 & 0 \\ a_{x5}^{GPS} & a_{y5}^{GPS} & a_{z5}^{GPS} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -c\Delta t_u^{BD} \\ -c\Delta t_u^{GPS} \end{bmatrix} \quad (7)$$

得到解为:

$$\Delta x = (\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\Delta\rho \quad (8)$$

要获得更高精度的解, 需要用加权最小二乘法对上述数据进行处理, 故增加一个正定对称矩阵 \mathbf{W} , 此为权系数矩阵^[3], 将式 (8) 整理后可以得到:

$$\Delta x = (\mathbf{H}^T\mathbf{W}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{W}\Delta\rho \quad (9)$$

此时, 式 (9) 得到的 Δx 便为 GPS/北斗双模导航定位系统得到的最终定位结果。

2 报警终端硬件构成

报警终端主要完成工作人员定位信息监测、无线数据

传输、遇险报警、定时传输数据等功能。手持终端设置了红色报警按钮和绿色平安按钮, 一旦遇到野外危险, 或者遭遇了走失情况, 荒野工作人员可以迅速按下红色报警按钮, 此时 GPS/北斗双模定位模块开始定位, 并将定位信息通过 LoRa 无线传输模块将信息发送至附近的基站或者基站车上, 基站的工作人员便可以通过手持终端发送的定位信息准确定位荒野遇险人员的位置信息, 从而能迅速启动救援措施, 保障荒野工作人员的生命安全。

同时, 手持终端还设置了定时数据传输功能, 具体实现步骤为预先启动数据无线传输模块的定时功能, 将时间设置为半小时或者一小时等合适时间, 荒野工作人员如果在设置时间到达时因为遭遇了瞬时的紧急情况没有及时按下绿色平安按钮, 定位模块会迅速的自启动, 完成信息的定位并通过 LoRa 模块发送至附近的基站或者基站车上, 基站的工作人员同样会启动救援措施, 这样更加可靠地保障了荒野工作人员的生命安全。

报警终端在硬件结构上主要由 STM32F407、LoRa 无线传输模块、GPS/北斗双模定位模块、LED (Light Emitting Diode) 状态指示灯模块、功率放大器模块以及电源模块等重要模块^[4]组成, 整个系统如图 1 所示。

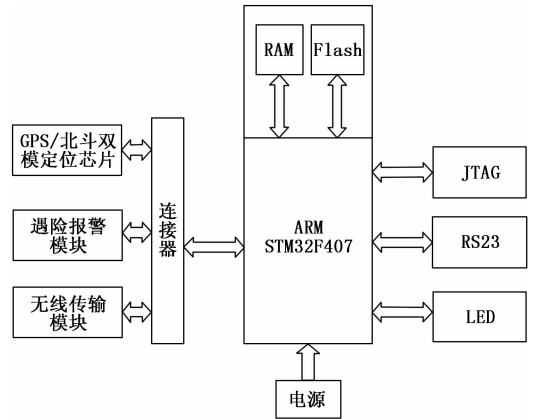


图 1 报警终端原理图

2.1 主控制器核心

报警终端的主控制器核心是 STM32F407。STM32F407 本身采用的先进的 Cortex-M4 内核具有超强的浮点运算能力, 其单精度浮点运算单元兼容 IEEE754 标准。同时, Cortex-M4 内核的 DSP (Digital Signal Processing) 处理指令进一步增强, 对于 16 位 DSP 功能: 相对 CM3 (Cortex-M3), CM4 (Cortex-M4) 只需 30%~70% 的指令周期; 对于 32 位 DSP 功能: 相对 CM3, CM4 只需 25%~60% 的指令周期。STM32F407 具有 196K 字节的内嵌 SRAM (Static Random Access Memory) 的优点^[5], 同时它还有灵活的外部存储器接口: FSMC (Flexible Static Memory Controller)。FSMC 连接到 D-Bus, 可以快速的获取数据。而连接到 I-Bus, 可以快速获取指令。当 FSMC 连接到 S-Bus 时, STM32F407 可以同时访问三条总线, 显著提高了总线访问的性能。

STM32F407 具有极致的运行速度, 它以 168 MHz 高速运行时可达到 210DMIPS (Dhrystone Million Instructions executed Per Second) 的处理能力。STM32F407 具有更高级的外设, 它新增了 USB (Universal Serial BUS) 高速 OTG (On-The-Go) 接口, 并增强了通信接口速率, 具备了更高的采样率^[6]。

单片机和 GPS/北斗双模定位模块、LoRa 无线传输模块的连接如图 2 所示。

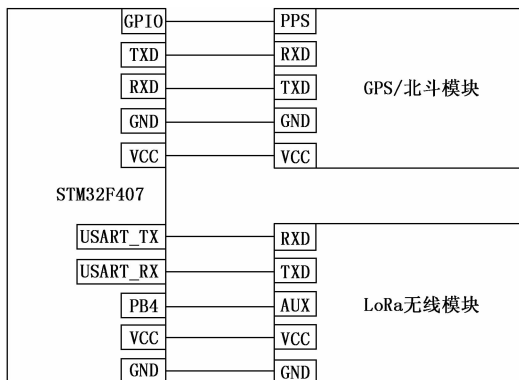


图 2 单片机与各模块连接图

2.2 GPS/北斗双模定位模块

ATK-S1216F8-BD GPS/北斗模块本身性能非常优异, 它不但体积小, 便于携带, 同时该模块的定位精度很高, 而且我们还可以通过串口对该模块进行实验参数的设置便于进行不同参数的对比实验, 使用起来很方便^[7]。

双模定位模块相比于单模定位模块, 其优点在于将两个系统精妙地融合了起来, 它可以利用卫星之间的冗余信息, 对两个系统的算法进一步改进。一方面它的精度高、容错性能更好。另一方面定位位置信息的可用性、可靠性都得到显著提升, 所以选用 ATK-S1216F8-BD GPS/北斗模块比之于选用单一的 GPS 模块或者北斗模块能更好地满足本文设计的报警终端的定位要求。

使用时, 将 GPS/北斗模块的串口连接在 STM32F407 开发板的串口 3 上面, 此时需要用跳线帽短接 P10 的 PB11 (RX) 和 GBC_TX 以及 PB10 (TX) 和 GBC_RX, 并且 GPS 的 PPS 信号接在 GBC_KEY 信号上面。同时, 我们可以通过 USMART 工具, 设置 GPS/北斗模块的刷新速率 (最大支持 20 Hz 刷新) 和时钟脉冲宽度的配置。

2.3 无线模块

E22-230T30S 是全新一代的 LoRa 无线模块, 基于 SEMTECH 公司 SX1262 射频芯片的无线串口模块 (UART), 具有多种传输方式, 工作在 (220.125~236.125 MHz) 频段 (默认 230.125 MHz), LoRa 扩频技术, TTL 电平输出, 兼容 3.3 V 与 5 V 的 I/O 口电压。LoRa 无线模块的抗干扰能力强, 功耗更低。同时 LoRa 无线模块工作参数可根据环境需要进行自主设置, 满足了不同条件下的传输需求。

该模块开发了全新的 LoRa 扩频调制技术, 带来了更远

的通讯距离, 一般情况下有效距离可达 5 km 以上, 比典型的射频传输模块 CC1101 的有效传输距离多了几倍甚至于十几倍, 模块支持 230 MHz 电力频段, 穿透绕射能力强于 433 MHz, 并且还支持自动中继组网功能, 多级中继适用于超远距离通信, 这为进一步扩大模块传输距离提供了思路^[8]。所以选用 LoRa 无线传输模块比之于之前的射频传输模块能更好地满足本文设计的报警终端对传输距离的要求。除此之外, 无线模块本身具有高效的看门狗设计, 一旦发生异常, 模块将自动重启, 且能继续按照先前的参数设置继续工作。LoRa 无线模块的电路原理如图 3 所示。

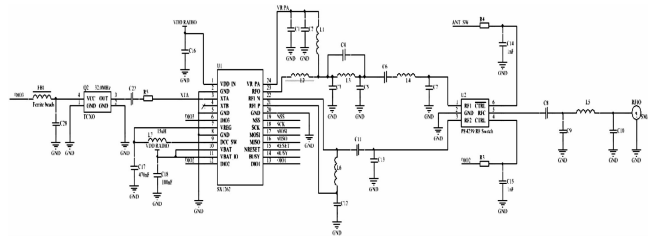


图 3 LoRa 无线模块的电路原理图

2.4 功率放大器模块

在无线通信中, 功率放大器的作用非常重要, 提高了功率放大器件的输出功率与效率, 才能保证稳定高效地输出无线信号。

本文设计的报警终端选用 Toshiba 公司的 2SK3078A 功率晶体管作为无线传输模块的功率放大器芯片^[9], 在调制器产生无线信号后, 接下来就由功率放大器将信号放大到足够功率, 经过匹配网络, 再由 LoRa 无线传输模块将信号发射出去。功率放大器电路如图 4 所示。

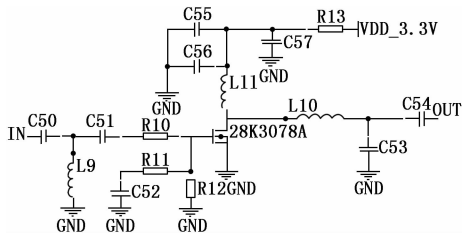


图 4 基于 2SK3078A 的功率放大器电路

3 软件设计

软件是整个系统极其重要的组成部分。设计手持终端和基站以及基站车上接收部分的硬件结构后, 就要根据系统的功能进行相应的软件部分的设计。编写程序时主要根据 C 语言进行编写, C 语言容易阅读并且页面的交互性较强, 故程序语言选择 C 语言。

野外的工作人员在迷失方向等危险情况下可以按下按键报警, 或者遇到紧急情况由无线模块的定时功能自启动报警, 在上述情况下电源开始供电, GPS/北斗双模定位模块、STM32F407、LoRa 无线模块、功率放大模块同时开始工作, GPS/北斗双模定位模块迅速定位工作人员的位置信息, 在 STM32F407 的控制下将定位信息通过 LoRa 无线模

块传输到基站或者基站车上。基站或者基站车上的人员通过大功率的接收天线接收报警终端的位置信息, 并在上位机上用串口助手解析出来, 显示在屏幕上。用 C 语言将上述功能进行细分, 并逐步地编写每一条指令, 手持终端软件工作流程如图 5 所示。

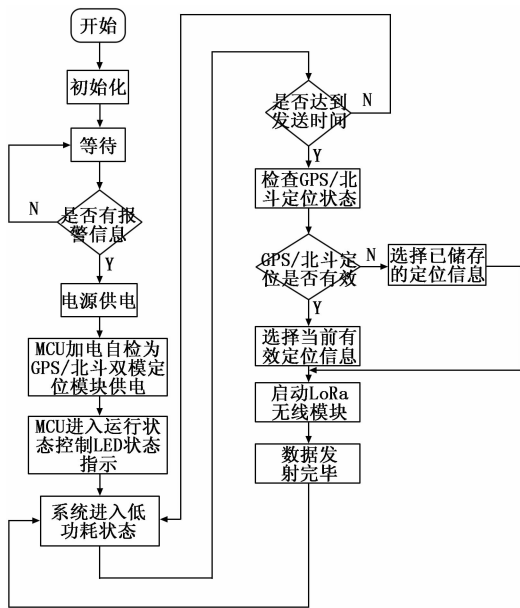


图 5 手持终端软件工作流程

编写 GPS/北斗双模定位模块内部代码是软件设计部分的核心, 而实现上述代码的关键是用 C 语言实现 SkyTraF8—BD 模组常用的 3 个配置: 串口波特率配置、PPS 输出脉冲宽度设置、输出频率设置。串口波特率设置, 通过函数 SkyTra_Cfg_Prt 实现, 该函数可以设置模块的波特率。PPS 输出脉冲宽度设置, 通过函数 SkyTra_Cfg_Tp 实现, 可以设置脉冲宽度 (1 μs~100 ms)。输出频率设置, 通过函数 SkyTraq_Cfg_Rate 实现, 该函数可以设置模块的测量输出频率, 最快可以达到 20 Hz 的测量输出频率。最后 SkyTraq_Send_Date 函数, 用于发送一批设置好的数据给串口 3, 完成对 GPS 模块的配置。

将这 3 个函数都加入 USMART 控制, 方便开发和测试。需要注意的是, main 函数初始化硬件之后, 通过 SkyTraq_Cfg_Rate 函数判断模块是否在位, 如果不在位, 就要尝试去设置合适的模块波特率, 直到检测到模块在位为止^[10]。最后, 等待串口 3 接收 GPS/北斗数据。每次接收到 GPS/北斗模块发送过来的数据, 就将数据通过串口 1 发送给 LoRa 无线模块。至此, 手持终端软件设计部分的 GPS/北斗双模定位模块内部代码的编写原则和设计流程介绍完毕。

4 实验结果

手持报警终端的硬件和软件程序配置完成后, 就需要实地验证其功能。为了更贴近荒野工作的环境, 我们安排两名测试人员拿着手持终端在中北大学二龙山里面进行走

动, 同时, 再安排两名测试人员驾驶基站车行驶在中北大学到太原南路的公路上。

基站车上的接收天线有两根, 一根为全向玻璃钢天线, 其增益为 8.5 dBi; 另一根为定向天线, 其增益为 15.5 dBi。图 6 和图 7 分别为组装好的全向玻璃钢天线和定向天线。



图 6 全向玻璃钢天线



图 7 定向天线

设置 LoRa 无线模块不同的空中速率, 可以取 6 个空中速率, 分别为 15.6 kbps、9.6 kbps、4.8 kbps、2.4 kbps、1.2 kbps 和 0.3 kbps。在无线模块不同空中速率的情况下, 基站车上的两根天线接收手持终端报警信息的距离如表 1 所示。

表 1 不同空中速率下两根天线的接收距离

空中速率/ kbps	全向天线接收距离/ km	定向天线接收距离/ km
0.3	11.2	19.6
1.2	10.3	18
2.4	9	15.9
4.8	8.5	14.3
9.6	7.3	11.8
15.6	6	9

由表 1 可知, 在无线模块的空中速率一定的情况下, 增益较大的定向天线接收报警信息的距离要比全向天线的要远。而在无线模块的空中速率由大变小的过程中, 不论是全向天线还是定向天线, 它们接收报警信息的距离均逐渐变远。虽然需要更远的接收距离, 但是 LoRa 无线模块空中速率的大小与报警信息的时间延迟成反比, 也就是说空中速率越大, 基站车天线接收报警信息的距离越近, 它接收信息的时间延迟越小; 而空中速率越小, 基站车天线接收报警信息的距离越远, 它接收信息的时间延迟则越大。所以工作人员在荒野进行作业的情况下, 需要根据实际情况来设置 LoRa 无线模块的空中速率, 以及选择合适增益的接收天线, 从而确保手持终端和基站或者基站车之间的精准通信。

通过测试可得手持终端工作电压是 3.3~5.0 V, 可工作于 -40~+85℃, LoRa 无线模块收发频段是 220.125/236.125 MHz, 首次定位时间温启动下是 27 s, 热启动是 1 s, 冷启动则是 29 s, 定位精度小于 2.5 米, 导航数据格式是 NMEA0183。

山林中的测试人员发出报警信息后，基站车上的测试人员接收到的报警信息包含了人员位置信息，需要对 GPS/北斗双模系统中的卫星消息进行解析。以“GNGGA, 095528.000, 2318.1133, N, 11319.7210, E”消息为例，可以知道野外遇险人员，地理位置为“北纬 23.181133°东经 113.197210°”，UTC (universal time coordinated) 时间为 9 时 55 分 28 秒，如要换算成北京时间需加 8 小时。中北大学二龙山测试人员位置信息解析后的结果显示如图 8 所示。

当前时间	2019-07-05	10:12:26
用户 ID	001	
用户位置	112.51004	东经
	37.93834	北纬
设备连接状态	已连接	

图 8 手持终端定位结果

5 结束语

利用 GPS/北斗双模定位模块、LoRa 无线模块和 STM32F407，设计了一种实用性强、可靠性高的荒野工作人员遇险报警系统，并设计了手持终端和基站或者基站车上的天线接收系统，当荒野工作人员在野外迷失或者遇险时，利用手持终端能够及时通知基站或者基站车上的搜救人员，搜救人员依靠上位机显示的定位信息迅速作出响应，能够立刻对荒野工作人员进行救援。

测试结果表明，该系统设计合理、定位精准、操作方

便，同时，还可以通过改变手持终端的无线模块上空中速率的大小，以及选择不同增益的接收天线，可以有效改变报警信息到基站或者基站车上的距离。总之，本文设计的荒野工作人员遇险报警系统能够有效降低野外工作人员的失踪风险，确保一定距离内荒野工作人员的生命财产安全。

参考文献:

[1] 张 龙. 北斗/GPS 双模定位中的关键技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.

[2] 莫维宇. 基于超声波码分多址的室内定位系统的研究与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[3] 郭 昊. 北斗-GPS 双模卫星定位解算方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

[4] 高 婷, 陈洪武, 张 帅. 基于北斗定位的落水人员报警终端的设计 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (10): 3470-3474.

[5] 王敏霞. 体扫描三维显示系统的关键技术研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2013.

[6] 程 都. 基于 ARM Cortex-M4 的数据采集系统的设计与研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.

[7] 李雄雄. 基于多节点协同定位频谱感知实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[8] 张 敏, 周治平. 基于 LoRa 的远程监测系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (7): 95-98.

[9] 戴金锐. 导航定位数据无线传输系统的研究与设计 [D]. 济南: 山东大学, 2017.

[10] 李伟成, 彭 松, 郭 亮, 等. 基于 STM32 系列开发板的一种高性能 GPS 模块应用开发与研究 [J]. 电子技术, 2015, 44 (11): 11-14.

[11] 肖 遥, 蔚保国, 翟江鹏. 全空域球面数字多波束天线波束控制方法研究 [J]. 无线电工程, 2017, 47 (3): 39-42.

[12] Chen X H, Qu S W. Planar lens antenna based on low-pass frequency selective surfaces [D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

[13] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334 (6054): 333-337.

[14] 陈宏伟, 张广求, 雷 雪, 等. 低旁瓣波束扫描反射阵天线设计 [J]. 信息工程大学学报, 2015, 16 (2): 162-171.

[15] Nayeri P, Yang F, Eleherbeni A Z. Beam-scanning reflect array antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015: 32-47.

[16] An W X, Xu S H, Yang F, et al. A double-layer transmit array antenna using Malta crosses with vias [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2016, 64 (3): 1120-1125.

[17] 韩文清, 蒋卫祥. 新型人工电磁材料平板透镜及其应用 [D]. 南京: 东南大学, 2016.

[18] Li M, Behdad N. Wideband true-time-delay microwave lenses based on Metallo-Dielectric and All-Dielectric Lowpass Frequency Selective Surfaces [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2013, 61 (8): 4109-4119.

(上接第 223 页)

[5] Jiang M, Chen Z N, Zhang Y, et al. Metamaterial-based thin planar lens antenna for spatial beamforming and multibeam massive MIMO [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2017, 65 (2): 464-472.

[6] 何 飞, 陈 星. 高增益金属透镜天线设计 [J]. 无线电工程, 2017, 47 (6): 61-64.

[7] Lee J. J. Dielectric lens shaping and coma-correction zoning [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1983, 31 (1): 216-220.

[8] 牛德鹏, 张光甫. 平面龙伯透镜天线设计 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.

[9] La T V, Nguyen N T, Casaletti M, et al. Design of medium-size dielectric bifocal lenses for wide-angle beam scanning antennas [A]. 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) [C]. 2011: 3287-3291.

[10] Ann L P. A dielectric bifocal lens for multibeam antenna application [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1988, 36 (5): 599-606.