

# 机载抛弃式温度剖面仪系统设计

徐海东, 胡长青, 张 平

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

**摘要:** 抛弃式温度剖面测量系统(Expendable Bathy Thermograph, XBT)是一种可在测量船航行状态下进行海洋温度剖面测量的测量仪器, 它具有实时、快速和低成本的特点, 广泛地应用于大洋科学考察和海洋物理特性研究。基于时分多址原理设计了机载抛弃式温度剖面测量系统(Airborne Expendable Bathy Thermograph, AXBT), 该系统允许 8 个 AXBT 浮标同时工作, 可以大幅度提高测量效率。给出了 AXBT 机载单元和 AXBT 浮标的硬件设计, 并根据 AXBT 浮标温度测量的特点给出了通信时隙分配方案和数据冗余编码方案。最后给出了 AXBT 系统湖上试验结果, 试验结果表明 AXBT 系统工作稳定可靠。

**关键词:** 时分多址; 机载抛弃式海水温度剖面测量系统; 浮标

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-06-0555-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.004

## System design of airborne expendable bathy thermograph

XU Hai-dong, HU Chang-qing, ZHANG Ping

(Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The Expendable Bathy Thermograph (XBT) is a measuring instrument for the temperature profile of sea water. Because of its advantage of real-time, fast measuring and low cost, XBT is widely used in ocean survey and physical property research. Based on TDMA principle, the system design of airborne Expendable Bathy Thermograph (AXBT) is reported in this paper. The hardware design of airborne receiver unit and the AXBT buoy are also reported. The time slot allocation scheme and redundant encoding of temperature data are carefully designed. The test of AXBT system on the lake indicates that the AXBT system is reliable and stable.

**Key words:** TDMA; Airborne Expendable Bathy Thermograph; buoy

## 0 引言

海洋声速剖面作为重要的海洋水文参数在海洋环境监测、开发利用和科学研究中有着特别重要的意义, 为此人们已开发设计了各种形式的海水温度剖面测量仪器。其中抛弃式温度剖面测量系统(XBT)是一种通过投弃一个温度感应探头, 在温度探头的快速下降过程中感应海水温度剖面的一次性测量设备。和温盐深测量设备(Conductivity Temperature Depth, CTD)相比, XBT 在使用过程中无需绞车, 成本低廉, 即使测量舰船在航行状态下也可快速测得海水的温度剖面, 具有良好的实时性和便捷性, 因此在海洋水文调查中得到了广泛的应用。随着直升飞机以及固定翼飞机在海洋调查中的应用日益广泛, 人们在 XBT 的基础上开发设计了机载抛弃式海水温度剖面测量系统<sup>[1-3]</sup>(AXBT)。和 XBT 相

比, AXBT 在 XBT 的基础上增加了无线电发射装置, 通过无线电将 XBT 测得的海水温度剖面数据发送到安装在飞机上的接收装置, 从而可利用飞机高速运动的特性在短时间内完成大范围的海水温度剖面调查, 效率大为提高。

本文将通信中的时分多址技术应用于 AXBT 系统设计, 在 XBT 的基础上用时分多址通信模块代替了 XBT 的有缆数据传输。同时, 由于引入了时分多址通信技术, 使得机载接收单元可以同时接收显示 8 个 AXBT 浮标的测量数据, 以适应飞机快速运动的特点。本文首先给出了 AXBT 的系统机载接收单元和 AXBT 浮标的硬件设计框图, 其次根据直升飞机的最大飞行速度以及 XBT 的测量速度确定通信系统的发射功率等关键参数。最后根据 XBT 测量的温度的数据特点给出了时序分配方案和数据编码方案和系统湖上试验结果。

## 1 AXBT 系统设计

### 1.1 AXBT 系统简介

机载抛弃式温度剖面测量系统由 AXBT 机载

收稿日期: 2011-12-02; 修回日期: 2012-02-17

基金项目: 上海市徐汇区科学技术委员会资助项目(RCT201001)

作者简介: 徐海东(1976—), 男, 四川盐亭人, 副研究员, 研究方向为信号处理。

通讯作者: 徐海东, E-mail: xhd@mail.ioa.ac.cn

数据接收显存系统(简称机载接收单元)和 AXBT 浮标系统构成。一个 AXBT 机载接收单元最多可同时接收处理 8 个 AXBT 浮标数据。飞机飞临测量地点上空后,接通 AXBT 浮标的电源。AXBT 浮标接收 AXBT 机载接收单元发出的同步信号。在 AXBT 浮标完成和 AXBT 机载接收单元同步操作以后抛下。AXBT 浮标在降落伞的缓冲下大约以 10m/s 的速度下降到海面。当 AXBT 浮标接触到水面时启动降落伞释放机构释放降落伞。经过大约 30s 的姿态稳定以后,AXBT 浮标释放温度测量传感器,同时启动温度采样电路开始温度数据采集。采集到的数据通过发射机发送到机载接收单元显示存储。

### 1.2 AXBT 系统硬件设计

AXBT 机载接收单元的硬件组成框图如图 1 所示。来自天线的接收信号经过低噪声放大器放大之后送到接收机解调,恢复成基带数字信号,并通过 SPI 接口发送到微处理器单元 MCU。MCU 在同步时序电路的控制下将接收到的基带数字信号加上时间戳,通过 RS422 接口发送到 PC 机显示存储。PC 机根据数据的时间戳信息区分不同的 AXBT 浮标数据。同步时序电路包括一个模 8 计数器和一个 8bit 状态寄存器。计数器的周期为 125 ms,状态寄存器用于记录计数器每一个计数周期所代表的时隙是否已分配。在未分配的时隙,同步时序电路控制发射电路发送一个长度为 1 ms 的同步信号。AXBT 浮标接收该同步信号,根据接收到的同步信息使 AXBT 机载接收单元和 AXBT 浮标的同步电路同步运行。AXBT 机载接收单元的接收机和发射机工作在 430MHz ISM 频段的不同信道上。

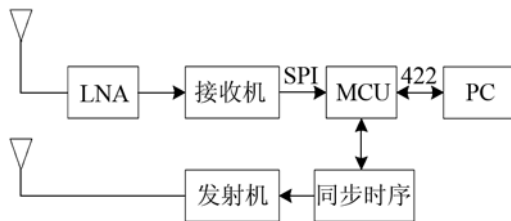


图 1 AXBT 机载接收单元硬件组成框图  
Fig.1 Block diagram of AXBT airborne receiver unit

AXBT 浮标的硬件组成框图如图 2 所示。主要由入水信号检测电路、同步时序电路、温度采样电路、降落伞释放控制电路、温度传感器释放控制电路,发射机和接收机组成。AXBT 浮标上的同步时序电路和 AXBT 机载接收单元上的同步时序电路工作模式相同,用于通信时隙同步。AXBT 浮标在接通电源以后处于同步信号接收状态,监听来自 AXBT 机载接收单元的同步信息。AXBT 浮标根据

接收到的同步信息设置同步时序电路,使其和机载接收单元的同步时序电路同步。完成同步后,AXBT 进入发射状态。入水信号检测电路检测到浮标入水以后,MCU 启动降落伞释放控制电路释放降落伞,同时系统进入 30 s 姿态稳定计时。浮标姿态趋稳后,MCU 同时开启温度采样电路和温度传感器释放控制电路释放温度传感器。在同步时序电路的控制下,AXBT 浮标将温度采样电路采集到的温度数据编码后通过发射机发送到 AXBT 机载接收单元。

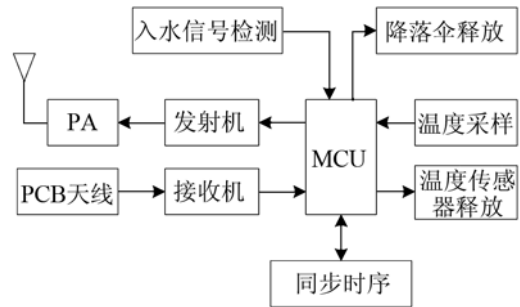


图 2 AXBT 浮标硬件组成框图  
Fig.2 Block diagram of AXBT buoy

### 1.3 通信系统参数

AXBT 温度测量探头的下降速度大约为 6 m/s。按照最大测量海水的深度为 1000m,探头的下降时间约为 167 s,再加上空投过程中 AXBT 浮标的滞空时间和入水后的姿态稳定时间(约 30 s),一个完整的测量周期大约不超过 300 s。假定 AXBT 的主要应用平台是直升机,通常直升机的飞行速度不超过 300km/h,那么在一个测量周期内,直升机的飞行距离不超过 25 km,因此要求 AXBT 系统的通信距离不小于 25 km。于是,首先根据无线电自由空间传播损耗公式,可以计算出在 430MHz 频段的自由空间传播损耗(dB)为:

$$TL = 32.4 + 20 \lg f + 20 \lg d = 32.4 + 20 \lg 430 + 20 \lg 25 = 113 \tag{1}$$

其次需要确定机载接收单元的无线电接收机的接收灵敏度。机载接收单元无线电接收机接收灵敏度的测试框图如图 3 所示,AXBT 浮标和机载接收单元分别装入金属屏蔽盒,两者通过两极射频衰减器连接,第一级射频衰减器衰减 30 dB,第二级射频衰减器为增益手动可调衰减器,衰减量为 0~80 dB。测试步骤如下:

- (1) 设置 AXBT 浮标的数据速率为 10kbps,发送有效的数据为 104Byte,最后两 Byte 数据为前面 102Byte 的无符号数累加和;
- (2) 用频谱分析仪(安捷伦 N9010A)校准 AXBT 浮标的射频输出功率为-10dBm。

(3) 按图 3 连接好 AXBT 浮标、衰减器和机载接收单元，在不同的衰减量下统计 5000 帧数据的误码率。

(4) 用误码率大于 1% 时的测试系统参数计算接收机的接收灵敏度。

测试的结果如表 1 所示，当衰减量从 87 dB 变为 88 dB 时，系统的误码率达到了 3.42%，因此可以计算出机载接收单元的接收灵敏度为 -97 dBm。

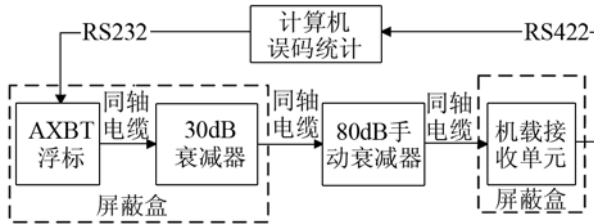


图 3 接收机灵敏度测试框图  
Fig.3 Testing of receiver sensitivity

表 1 接收灵敏度测试结果  
Table 1 Receiver sensitivity test result

衰减量/dB	发送数据	接收数据	误码率/%
86	5000	5000	0.00
87	5000	4972	0.56
88	5000	4829	3.42
89	5000	4317	13.66
90	5000	3304	33.92

最后根据自由空间传播损失，接收机灵敏度，在保留一定的因为阻挡物、多径等造成的损耗余量(本文假定为 20 dB)条件下可以计算出 AXBT 浮标所需要的发射功率  $P_a$ (单位: dBm)。

$$P_a = 113 - 97 + 20 = 36 \quad (2)$$

利用频谱分析仪测试得到 AXBT 浮标的最大输出功率为 37.8 dBm，略小于射频功放的理论值 38.5 dBm(AXBT 浮标采用三菱 7W 的功率放大器)，可以满足 25km 的通信距离的要求。

### 1.4 AXBT 通信时隙分配

AXBT 系统最多允许有 8 个 AXBT 浮标同时工作，发射机的数据率为 10kbps，有效载荷为 80%。以 1 s 为计时单位，将其平均分成 8 个时隙，每个时隙 125ms，每个 AXBT 浮标分配一个时隙发送数据。每个时隙被分成三部分，头尾各分配 7.5ms 的保护时间，防止因为 AXBT 浮标的同步时序电路的时钟累积误差导致在某一时刻两个浮标同时发送数据。每个时隙中部长度为 110 ms 用于发送测量数据。AXBT 系统的通信时隙分配如图 4 所示。

由于 AXBT 浮标的工作时间一般不超过 5min，由图 4 可以看出，相邻两个发射时隙具有 15 ms 的保护时间，因此 AXBT 浮标的时钟的相对精度要高

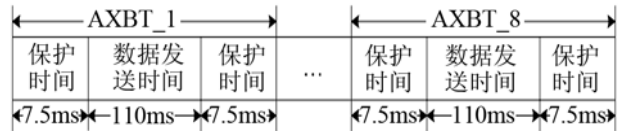


图 4 AXBT 通信时隙分配  
Fig.4 Communication time slots of AXBT buoy

于  $5 \times 10^{-5}$ 。在实际应用中可以选用精度为  $10^{-6}$  量级的晶振就可以满足 AXBT 同步要求。

### 1.5 数据编码

AXBT 浮标测量海水温度/深度剖面，温度随深度是一个缓慢变化的过程，因此只需要对温度的变化量进行编码传输，可以减小数据量提高数据传输效率。相邻两个采样点的温度变化量以  $0.01^\circ\text{C}$  为单位进行量化，量化的结果用 8bit 有符号整数表示，可以表示的温度变化范围为  $\pm 1.27^\circ\text{C}$ 。AXBT 浮标的温度采样电路的采样率为 10 Hz，按照这种数据编码，每秒钟可允许的温度变化范围为  $\pm 12.7^\circ\text{C}$ ，需要发送的温度数据量为 10Byte。

AXBT 浮标的温度传感器在海水中的下降规律通过经验公式  $H(t) = At + Bt^2$  计算得到。其中参数  $A$  和  $B$  通过试验拟合得到。由此可见，温度采样信号的序号实际上和深度是一一对应的关系，因此对于深度数据只要传送采样序号即可。

按每个时隙 110 ms，8 kbps 的有效载荷计算，AXBT 浮标在每个时隙可以发送 110Byte 数据。为了充分利用 AXBT 通信系统的带宽，数据编码采用冗余编码的方式进行编码，即在每个时隙发送的数据总是由最新采集到的 10 s 的温度数据总计 100 Byte，2 Byte 的采样序号和 2 Byte 的校验和组成，总共 104 Byte。AXBT 浮标发送的数据组成如图 5 所示。采样序号  $n$  的初始值为零，只有当 AXBT 浮标的温度传感器释放以后才开始计数。当采样序号  $n$  为零时，AXBT 浮标将温度采样电路采样得到的温度数据以 Q(16,9)的格式发送到机载接收单元，AXBT 温度数据编码发射软件流程如图 6 所示。

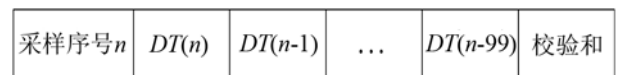


图 5 AXBT 无线数据构成  
Fig.5 Wireless data frame of AXBT buoy

## 2 试验结果

2011 年 6 月在千岛湖进行了 AXBT 系统试验。在大约 100m 的高空利用氦气球和遥控释放的方式，完成了 AXBT 浮标抛投模拟试验。机载接收单元的

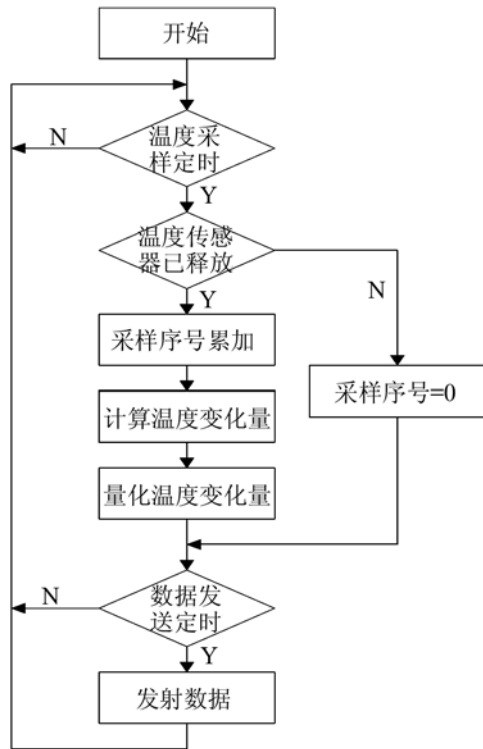


图6 AXBT 浮标无线数据编码发射软件流程图

Fig.6 Flow chart of wireless data encoding and transmitting software for AXBT buoy

天线距离水面 16m，浮标射频发射功率为 35 dBm，距离机载接收单元的无遮挡水域最大距离约为 9km，为保险起见，浮标空投试验地点选择在距离机载接收单元约 8.2km 处。在试验过程中，降落伞开伞和脱伞动作顺利进行，温度剖面数据采集和无线电数据传输正常。图 7 是 AXBT 浮标在距离机载接收机大约 8.2km 处传回的千岛湖温度剖面数据，其中，对比数据是由吊放式温深仪测量得到。图 7 的结果表明在 10 m 以下 AXBT 浮标测得的温度剖面和吊放式温深仪测得的数据基本吻合，从水面到 10 m 深度两者的数据差别较大，这是因为本次试验使用的深度计算公式是 XBT 的经验公式。和 XBT 的温度探头不同，AXBT 的温度探头入水后下降的初始速度为零，因此需要在今后的工作中根据更多的试

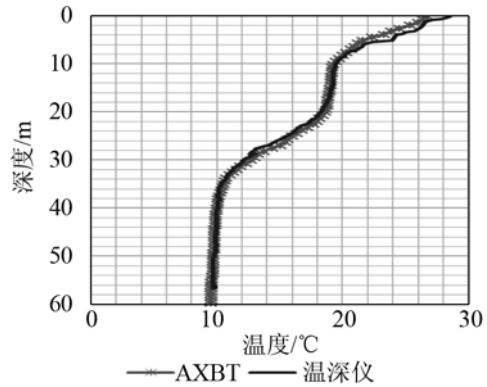


图7 AXBT 实测温度剖面

Fig.7 Temperature profile measured by AXBT

验数据拟合计算符合 AXBT 温度探头下降规律的经验公式。

### 3 结 论

本文基于时分多址原理设计了机载抛弃式温度剖面仪系统，该系统允许有 8 个 AXBT 浮标同时工作。给出了 AXBT 机载接收单元和 AXBT 浮标的硬件组成框图，时隙分配方案和数据冗余编码方案，最后给出了 AXBT 系统的湖上试验结果。试验结果表明系统工作稳定、可靠，达到了预期的目的。

#### 参 考 文 献

- [1] 井彦明, 王景青, 申秀花, 刘连君. 一种适合海洋环境温度测量的新方法[J]. 海洋技术, 2008, 27(2): 18-23.  
JING Yan-ming, WANG Jing-qing, SHEN Xiu-hua. A novel method for temperature measurement in marine environment[J]. Ocean Technology, 2008, 27(2): 18-23.
- [2] 陈雷, 贾志成, 李永军, 张立毅, 张艳. 抛弃式温盐深测量仪数据传输系统的研制[J]. 海洋技术, 2009, 28(3): 26-29.  
CHEN Lei, JIA Zhicheng, LI Yongjun, ZHANG Li-yi, ZHANG Yan. Development of Data Transmission System of Expendable CTD Profiling System[J]. Ocean Technology, 2009, 28(3): 26-29.
- [3] 井彦明, 谭世祥. 机载抛弃式温盐深浮标中的三项关键技术研究[J]. 海洋技术, 2001, 20(4): 48-53.  
Jing Yanming, Tan Shixiang. Key points study of airborne expendable CTD probe[J]. Ocean Technology, 2001, 20(4): 48-53.