

一种 Ka 频段双通道遥测设备的无杆标校方法研究

孔尚满, 单静, 陈建友, 赵帆
(酒泉卫星发射中心 酒泉 732750)

摘要: Ka 频段双通道遥测设备的和、差通道存在相位差, 并且随环境变化而变化, 需要在基带终端通过校相才能实现相位差的校正, 最终完成对目标的自主跟踪。在靶场中, 以往都是通过架设标校杆进行基带校相, 这种方法可以实现相位标校的目的, 但是随着遥测设备作战领域已经向深海、高原等区域拓展, 受到这些特殊位置环境等对架设标校杆的种种限制。本文重点研究了在高原环境下, 不架设标校杆, 通过偏馈天线发射信号, 实现和、差通道相位零值标定的目的。本文给出了基于偏馈天线的无杆标校原理和方法, 并通过实验验证了本文方法的有效性。

关键词: Ka 频段; 双通道; 遥测设备; 无杆标校; 偏馈

中图分类号: V556.1; TN830.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2024)01-0100-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230704001

引用格式: 孔尚满, 单静, 陈建友, 等. 一种 Ka 频段双通道遥测设备的无杆标校方法研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(1): 100-105.

The Research on Rodless Calibration Method for Ka-band Dual Channel Telemetry Equipment

KONG Shangman, DAN Jing, CHEN Jianyou, ZHAO Fan
(Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

Abstract: The sum and difference channels of Ka-band dual channel telemetry equipment have phase differences, which can vary with environmental changes. Phase correction is required at the baseband terminal to achieve phase difference correction and ultimately achieve autonomous tracking of the target. In the shooting range, baseband phase calibration was usually achieved by setting up calibration rods, which can achieve the purpose of phase calibration. However, with the expansion of telemetry equipment in the field of combat, it has expanded to areas such as deep sea and plateau. Due to the various limitations of these special location environments on setting up calibration rods, this article focuses on studying how to achieve the purpose of calibrating the phase zero value of the differential channel, without setting up calibration rods, transmit signals through biased antennas in plateau environments. This article presents the principle and method of rodless calibration based on biased antennas, and verifies the effectiveness of the proposed method through experiments.

Keywords: Ka-band; Dual channel; Telemetry equipment; rodless calibration; Biased feedback

Citation: KONG Shangman, DAN Jing, CHEN Jianyou, et al. The Research on Rodless Calibration Method for Ka-band Dual Channel Telemetry Equipment[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 100-105.

0 引言

在航天测控通信领域, 地面遥测设备是获得火箭等运载器关键飞行参数的重要组成部分。地面遥测设备分为固定和车载两种, 固定站遥测设备多为大口径、高增益、窄波束宽度的设备, 车载遥测设备多为小口径、低增益、宽波束宽度的设备。遥测设备的主要工作原理是天线反射面收

到火箭遥测发射机辐射并经大气传播后的高频信号, 经过滤波、LNA (低噪声放大) 后送至下变频器进行变频, 变频为 70 MHz 的中频信号送至基带接收和解调单元, 解调出基带信号, 通过外网通信机将基带信号送至数据处理、显示中心^[1-3]。基带信号包含若干波道, 每一波道代表不同的物理参数, 比如航天器内部温度、湿度、飞行速度、燃料仓压力等。数据处理、显示中心可以对遥测

设备送来的基带数据进行条路和显示,作为火箭实时飞行状态的判断依据^[4,5]。

遥测设备的基带单元除了解调基带信号,还会对送至基带单元的信号进行角误差解调,解调后的角误差模拟信号送至ACU(天线控制单元),ACU通过A/D卡对角误差模拟信号进行采样、处理、显示,并通过D/A转换成天线电机的电压、电流(模拟信号),驱动天线运转,实现对火箭的自动跟踪^[6,7]。

Ka频段双通道遥测设备的和、差通道两路信号,由于传输信号物理路径的不同,使得进入基带单元时的相位有差异。由于解调角误差信号时要求、差信号相位一致,因此需要知道进入基带前信号的和、差信号相位差,并将其填入到基带硬件程序里,用于消除二者之间的相位差,这样才能解调出正确的角误差信号用于跟踪^[8-10]。对于实际执行任务的Ka频段双通道遥测设备,相位差易受环境因素影响,夏天和冬天的相位差不同,甚至早上和中午的相位差都有较大区别。因此,Ka频段双通道遥测设备的相位差无法在设备完成研制交付前就标定完成并保持固定,而是要在执行任务前进行实际标定,才能满足多种环境下的稳定跟踪。对双通道遥测设备的相位差进行标定,也称为校相,即校准相位差^[11,12]。

传统的架设标校杆的方法虽然可以实现基带校相,但是随着当前车载遥外测设备转场频次越来越高、参试场地条件复杂不方便架设标杆校、高原环境架设标杆校对岗位人员体力要求较大等情况的增多,需要考虑一种新型的校相方法^[13]。无人机校相和基于角误差变化的无杆标校是两个好的思路方法,可以大大节约时间和体力。

本文首先介绍了Ka频段遥测设备组成,接下来分析了和、差双通道校相原理,然后给出了通过偏馈天线基带角误差变化来实现无杆校相的原理和方法步骤,最后通过实际校相算例验证本文提出的校相方法的有效性。

1 Ka频段遥测设备组成

根据国际统一划分标准,Ka频段的范围是26.5 GHz~40 GHz,相比传统的航天遥测使用的S频段(2.2 GHz~2.4 GHz),Ka频段的频率明显更高。相比S频段,Ka频段遥测设备具有同等口径下天线增益更大、克服黑障、加密性好、适合同

时遥外测等优点,因此越来越受到青睐。Ka频段双通道遥测设备的组成包括天馈分系统、高频接收分系统、基带分系统、通信分系统、监控分系统、时频分系统、检前回分系统、测试标校分系统等,分系统较多,设备功能比较齐全,相比较单通道S频段遥测设备更加复杂^[14]。

图1为遥测信号从天线接收到基带解调信号传输原理示意图。从图中可以看到,Ka频段遥测设备天线收到火箭遥测发射机辐射经空气传播后到达设备的Ka频段射频信号(包括左和、右和、左差、右差四路信号),经天线馈源里的发阻滤波器滤波后送至LNA进行低噪声放大处理,同时进行耦合分路并将每一路下变频成S频段信号,每一路信号分别送至第二次下变频单元,进行变中频处理和信号放大,得到的70 MHz的中频信号送至接收中频开关矩阵。接收中频开关矩阵将和路信号送至遥测解调基带单元,而后进行接收、解调,解调出的基带信号通过外网通信机送至数据处理、显示中心,中频开关矩阵将和路信号和差路信号均送至跟踪基带单元,解调出角误差信号,通过串口线送至ACU,并最终实现天线对火箭的自动跟踪。

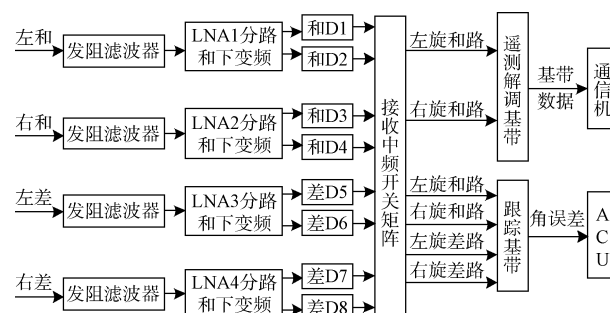


图1 Ka频段双通道遥测设备信号传输原理图

Fig. 1 Signal transmission schematic of Ka-band dual channel telemetry equipment

从图1可以看到,双通道遥测设备的和、差信号传输,走的是不同的信道链路,且中间经过了诸如滤波器、低噪放等诸多会导致相位漂移的器件。此外,Ka频段信号由于频率高波长小导致相位差与线缆长度敏感,因此和、差路信号传输的线缆长度相差一点,其相位差也会差得较大。综上所述,导致进入跟踪基带的和、差信号具有一定的相位差,且会随着环境因素的变化、频点的变化和组合而有所不同,因此需要研究一种

方法，能够实现对 Ka 频段内不同频点的左、右旋信号均能快速校相，满足任务需要。

2 和、差双通道校相原理

如图 2 所示， ϕ 为天线电轴与目标 P 所构成的平面与水平面的夹角^[10]。双通道遥测设备和、差信号可以定义如下^[15]：

$$s_{\Sigma}(t) = \cos(\omega t) \tag{1}$$

$$s_{\Delta}(t) = k_A \cos(\omega t + \phi) + k_E \sin(\omega t + \phi) \tag{2}$$

其中， $s_{\Sigma}(t)$ 为和信号， $s_{\Delta}(t)$ 为差信号， ω 为接收信号的角频率， k_A 为方位差信号的增益， k_E 为俯仰差信号的增益， $k_A \cos(\omega t + \phi_A)$ 为方位差信号， $k_E \sin(\omega t + \phi_E)$ 为俯仰差信号。

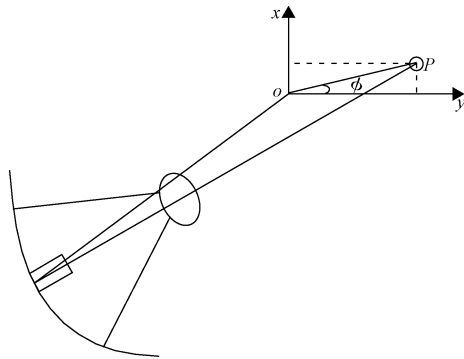


图 2 天线电轴和目标的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of antenna axis and target

跟踪基带单元接收中频开关矩阵送来的和、差路信号。和路信号经过数字锁相环提取相干载波，经过能量检测单元得到和路信号的 AGC（自动增益控制）控制信号，并送至差路，完成差路信号的 AGC 控制。和路信号锁定后，经过移相器，产生差路鉴相器参考信号，方位参考信号和俯仰参考分别如公式（3）、公式（4）所示：

$$s_{\Delta A}(t) = k_A \cos(\omega t + \phi_A) \tag{3}$$

$$s_{\Delta E}(t) = k_E \sin(\omega t + \phi_E) \tag{4}$$

使用参考信号，经过鉴相和滤波后即可得到方位角误差和俯仰角误差。本文快速校正的目的，就是通过计算，得到 ϕ_A 、 ϕ_E 、 k_A 、 k_E 四个参数。如果天线方位、俯仰轴垂直性较好，移相值则几乎相等。如果垂直性不太好，则移相值会有明显的差别。因此，考虑到一般情况，本文将分别计算四个参数，以获得最佳的校相结果。

3 基于偏馈天线的无杆标校原理和方法

无杆标校的基本原理是：发射基带产生中频模拟源信号，经过上变频后得到射频信号，经过偏馈天线发射出去，接收基带接收下行信号，俯仰角误差与方位角误差的反正切的变化，反映了基带相位零值的变化，因此通过保持在接收基带上填入相同不变的相位零值和增益系数，会导致角误差的变化，最终角误差的变化可以反推当前的相位零值，最终实现无杆条件下的标校工作。

无杆标校的基本步骤如图 3 所示。具体如下：

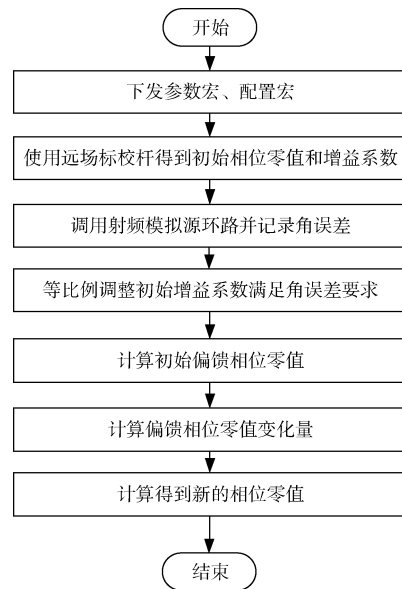


图 3 无杆标校方法流程

Fig.3 Process of rodless calibration method

① 下参数宏、配置宏，或者直接下任务宏。参数宏主要包括了校相的点频、基带的旋向、码率带宽，配置宏主要包括使用的下行通道和本振的顺序，任务宏是参数宏和配置宏的组合。无杆标校针对的是一个固定不变的频率和旋向，基于此基础可以通过角误差的变化来反推相位零值的变化。

② 使用远场标校杆上的 Ka 信标喇叭进行快速校相，得到方位相位 ϕ_{A0} 、俯仰相位 ϕ_{E0} 、方位增益系数 K_{A0} 、俯仰增益系数 K_{E0} 。

③ 将天线朝天即俯仰角 90 度，设置工作环路为 Ka 调频射频模拟源环路。此环路的基本信号流程是 Ka 调频基带调制的中频信号通过发射矩阵到叉臂机箱，然后上变频，送至主天线边缘的一个

偏馈天线发射出去,然后主天线正常接收此信号到基带解调。

如果是扩频基带,则使用扩频射频模拟源环路,如果是引导基带,则使用Ka调频射频模拟源环路。需要注意的是,叉臂机箱的上变频本振取的是Ka调频基带的参数,因此如果是扩频基带和引导基带,需要将Ka调频基带的电频设置成需要的扩频电频或者引导电频。

④采集记录当前Ka调频射频模拟环路下,Ka调频基带的方位角误差电压 $\Delta\mu A$ 和俯仰角误差电压 $\Delta\mu E$ 。

由于本文方法是通过角误差的变化来反映校相值的变化,因此需要考虑到下次采集角误差时,角误差电压不能特别小或者特别大。因此,需要等比例调整当前基带的方位增益系数 K_{A0} 、俯仰增益系数 K_{E0} ,并重新置入基带,使得调整后的方位角误差电压 $\Delta\mu A_0$ 、俯仰角误差电压 $\Delta\mu E_0$ 满足以下公式:

$$2V \leq \Delta\mu A_0 \leq 3.5V \quad (5)$$

$$2V \leq \Delta\mu E_0 \leq 3.5V \quad (6)$$

设调整后的方位增益系数为 K_{A00} 、俯仰增益系数为 K_{E00} 。此时,方位角误差电压 $\Delta\mu A_0$ 、俯仰角误差电压 $\Delta\mu E_0$,记录到序号为0的行中作为初始值。

⑤计算得到初始状态下偏馈初始相位零值 θ_0 ,公式如下:

$$\theta_0 = \arctan(\Delta\mu A_0 / \Delta\mu E_0); \quad (7)$$

⑥在过一段时间后,相位可能会发生偏移,此时需要重新计算相位零值。首先将初始的方位相位零值 ϕ_{A0} 、俯仰相位零值 ϕ_{E0} 、方位增益系数为 K_{A00} 、俯仰增益系数为 K_{E00} 设置到基带中,然后重复步骤③至步骤⑤,得到新的偏馈相位零值 θ_1 。需要注意的是,此时没有等比例调整增益系数的步骤,等比例调整系数只有在得到初始角误差电压时才会使用。

⑦计算偏馈相位零值的变化量 $\Delta\theta$,公式如下:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0; \quad (8)$$

⑧计算得到新的方位相位零值 Φ_{A1} 、俯仰相位零值 Φ_{E1} ,公式如下:

$$\Phi_{A1} = \Phi_{A0} + \Delta\theta \quad (9)$$

$$\Phi_{E1} = \Phi_{E0} + \Delta\theta \quad (10)$$

校相的增益系数一般不会产生明显的变化,

因此在无杆标校方法中,新的方位增益系数 K_{A1} 、俯仰增益系数 K_{E1} 保持不变,即如下所示:

$$K_{A1} = K_{A0}; K_{E1} = K_{E0}; \quad (11)$$

同理,Ka调频基带右旋、扩频基带、引导基带均为Ka频段双通道校相,其无杆标校方法步骤与上述步骤①-⑧相似,不再重复介绍。

无杆标校方法的优点是不需要架设标校杆,标校效率高,但前提条件是需要针对任务点频的左、右旋使用有杆标校得到初始相位零值和增益系数。初始相位零值和增益系数一经得到,后续转场执行任务不需要重新标校,可以一直作为本文方法的初始相位零值和增益系数。

无杆标校的缺点是由于没有架设标校杆,在使用无杆标校方法得到新的相位零值后,无法验证自跟踪的有效性。但是,通过大量实验验证本文无杆标校方法的有效性,后续不需要通过自跟踪验证标校结果。

4 仿真实验

使用某Ka频段车载双通道遥测设备作为实验平台,对本文方法的有效性进行验证。首先使用Ka调频基带左旋进行实验,选取了3个频点,分别使用远场标校杆和使用无杆标校方法进行校相,得到的结果如表1所示。通过表1可知,无杆标校得到的相位零值和使用有杆方法得到的相位零值相差不大,最大差值在 2° 以内,完全能够满足基带自跟踪要求。通过检查交叉耦合,均小于1/7,也可以说明无杆标校结果的可用性。表2为Ka调频基带右旋选取3个频点的对比结果,与左旋结果一致,均能够说明无杆标校结果满足校相要求。因此,通过实验验证了本文无杆标校方法的有效性。

表1 左旋不同频点有杆和无杆校相结果

Table 1 Left rotation phase calibration results of rod and rodless at different frequency points 单位: ($^\circ$)

频点	旋向	ϕ_A	ϕ_E	k_A	k_E	τ_{E+}	τ_{E-}	τ_{A+}	τ_{A-}
f1 ~ 26 G	有杆	73.2	251.2	7.813	8.024	1/86	1/221	1/9	1/10
	无杆	72.4	250.4	7.813	8.024	1/75	1/125	1/12	1/13
f2 ~ 27 G	有杆	12.1	200.3	2.437	2.142	1/23	1/10	1/15	1/18
	无杆	11.2	199.4	2.437	2.142	1/36	1/20	1/32	1/30
f3 ~ 28 G	有杆	180.4	1.1	3.121	2.867	1/38	1/12	1/34	1/17
	无杆	182.0	2.7	3.121	2.867	1/45	1/14	1/32	1/15

表 2 右旋不同频点有杆和无杆校相结果

Table 2 Right rotation phase calibration results of rod and rodless at different frequency points 单位: (°)

频点	旋向	ϕ_A	ϕ_E	k_A	k_E	τ_{E+}	τ_{E-}	τ_{A+}	τ_{A-}
f1 ~ 26G	有杆	19.2	21.1	2.185	2.345	1/23	1/390	1/23	1/23
	无杆	19.5	21.4	2.185	2.345	1/23	1/390	1/23	1/23
f2 ~ 27G	有杆	283.5	279.0	1.613	2.166	1/11	1/9	1/44	1/66
	无杆	285.0	280.5	1.613	2.166	1/11	1/9	1/44	1/66
f3 ~ 28G	有杆	76.8	72.2	1.733	2.02	1/21	1/17	1/18	1/86
	无杆	75.9	71.3	1.733	2.02	1/21	1/17	1/18	1/86

5 结束语

本文提出了一种 Ka 频段双通道遥测设备的无杆标校方法。首先介绍了 Ka 频段遥测设备组成以及基于和、差双通道的校相原理, 并给出了基于偏馈天线基带角误差的无杆标校具体算法。最后通过实验验证了本文方法的有效性, 无杆标校结果和有杆标校结果相近, 且满足遥测设备的交叉耦合指标。此外, 需要强调的三点是: 一是无杆标校无法进行自跟踪验证, 因此不同遥测设备用户在工程实践中需要通过大量试验验证方法的有效性, 并且建议在时间充足的情况下采用无人机进行验证; 二是无杆标校除了基带校相, 还能完成距离校零, 本文不再介绍; 三是无杆标校是基于有杆标校的结果和初始角误差作为基础的, 但此初始值不需要每次进行重新标校, 而且设备又区分 Ka 调频基带、扩频基带、引导基带的左、右旋信号, 因此需要作为初始值进行规范管理, 以免造成混淆引起无杆标校结果的错误。

参考文献

- [1] 徐联炳. 新一代 S 频段车载自跟踪遥测站[J]. 遥测遥控, 1995, 16(3): 21-31.
XU Lianbing. New generation S-band vehicle self-tracking telemetry station[J]. TELEMETRY & TELECOMNTYOL, 1995, 16(3): 21-31.
- [2] 胡磊. 关于靶场遥测频段问题的研究[J]. 电子测试, 2019(19): 53-58.
HU Lei. Research on the problem of the range[J]. Electronic testing, 2019(19): 53-58.
- [3] 曾杰民. Ka 频段测控天线跟踪关键技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] 成红艳, 王广成, 张向林. 基于遥测信息关联特性重现航天器飞行过程技术探讨[J]. 导弹试验技术, 2010(1): 52-55.
CHENG Hongyan, WANG Guangcheng, ZHANG Xianglin. Discussion on the reproduction of spacecraft flight process based on telemetry information correlation characteristics[J]. Missile Test Technology, 2010(1): 52-55.
- [5] 胡金辉, 沈怡飏, 范蕾懿, 等. 基于同步遥测信号处理的实时仿真模型设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 167-170.
HU Jinhui, SHEN Yiyi, FAN Leiyi, et al. Design of a real-time simulation model based on synchronous telemetry signal processing[J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(10): 167-170.
- [6] 高全辉, 李秉常. 新一代自跟踪遥测地面站[J]. 遥测遥控, 1997, 18(6): 1-7.
GAO Quanhui, Li Bingchang. New generation self tracking telemetry ground station[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 1997, 18(6): 1-7.
- [7] 张跃飞, 赵翔宇, 苏坦. 信号饱和对遥测设备自跟踪影响的研究及应用[J]. 无线电工程, 2020, 50(1): 57-60.
ZHANG Yuefei, Zhao Xiangyu, Su Tan. Research and application of signal saturation on self tracking of telemetry equipment[J]. Radio Engineering, 2020, 50(1): 57-60.
- [8] 张冰, 乔建江, 金立斌. 基于单通道单脉冲跟踪接收机的快速校相技术[J]. 河北省科学院学报, 2016, 33(2): 63-67.
ZHANG Bing, QIAO Jianjiang, JIN Libin. Fast phase calibration technology based on single channel single pulse tracking receiver[J]. Journal of Hebei Academy of Sciences, 2016, 33(2): 563-67.
- [9] 张龙岗, 李天宝. 调频遥测基带低信噪比条件下角误差解调方法研究[C]//中国电子学会遥感遥测技术分会, 2014.
- [10] 庄传刚, 刘莉, 李彬. 车载测控系统标校过程中校相新方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2234-2236.
ZHUANG Chuangang, LIU Li, LI Bin. Research on a new method for phase calibration in the calibration process of on-board measurement and control systems[J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(7): 2234-2236.
- [11] 成亚勇, 李玉瑄. 双通道角跟踪体制实时校相算法研究[J]. 无线电工程, 2009(5): 35-36, 67.

- CHENG Yayong, LI Yuxuan. Research on real-time phase correction algorithm for dual channel angle tracking system[J] Radio Engineering, 2009(5): 35-36, 67.
- [12] 赵德阳, 田雨雷, 闫春, 等. 12米三轴天线S跟踪模式下的Ka频段校相技术研究[J]. 黑龙江科技信息, 2021(22): 5-6.
- ZHAO Deyang, TIAN Yulei, YAN Chun, et al. Research on Ka frequency band phase correction technology under tracking mode of a 12 meter three axis antenna[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2021(22): 5-6.
- [13] 洪宇, 吴宗清, 门涛, 等. Ka频段大口径测控天线无人机校相方法设计与验证[J]. 宇航学报, 2021, 42(6): 783.
- HONG Yu, WU Zongqing, MEN Tao, et al. Design and verification of phase calibration method for Ka band large aperture measurement and control antenna unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42 (6): 783.
- [14] 王中果, 徐常志, 田志新, 等. 站点分集对低轨遥感卫星Ka频段星地数传链路的影响分析[J]. 航天器工程, 2015, 24(5): 79-85.
- WANG Zhongguo, XU Changzhi, TIAN Zhixin, et al. Analysis of the impact of site diversity on the Ka band satellite earth data transmission link of low earth orbit remote sensing satellites[J] Spacecraft Engineering, 2015, 24(5): 79-85.
- [15] 岳西平. 一种双通道星载AIS接收机研究[J]. 空间电子技术, 2020(5): 44-48.
- YUE Xiping. Research on a dual channel onboard AIS receiver[J] Space Electronics Technology, 2020(5): 44-48.

[作者简介]

- 孔尚满 1989年生, 学士, 工程师。
单静 1988年生, 硕士, 工程师。
陈建友 1989年生, 硕士, 工程师。
赵帆 1974年生, 学士, 工程师。

(本文编辑: 潘三英)