doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.003

一种轻小型 S 波段卫星中继通信机的设计与实现

饶 浩[1,2], 梁显锋[1], 张津舟[3], 安军社[1]
(1.中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100190;
3.华为科技有限公司(北京), 北京 100085)

摘 要: 针对远海无人值守浮标与岸基站间的实时、可靠和高速率通信需求, 研制了一种轻小型 S 波段卫星中继通信机。通过采用高集成度的零中频接收单元和 25 W 高效率 GaN 功放发射单元, 实现了对岸站遥控指令(2 kbps)的接收和浮标载荷数据(2 Mbps)的实时回传。通过提高收发隔离度和实时解算接收信噪比, 确保了海上卫星通信的高可靠性。通过射频前端和信号处理单元等硬件的一体化设计, 实现了整机的轻小型化(尺寸约为 192 mm × 134 mm × 92 mm, 质量小于 2.0 kg)和低功耗(低于 80 W)。四级海况下的海上试验表明, S 波段中继通信机能够满足复杂海况条件下远海浮标的实时高速率双向通信需求, 大回路数据通信误码率 P_e<10^{-5}。

关键词: 浮标; S 波段链路; 卫星中继通信机; 零中频
中图分类号: TN927 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-2029(2019)04-0015-06

卫星通信因其通信距离远、覆盖面积大、数据容量大、灵活性高、不受地理位置和自然环境限制等优点, 被世界各国广泛应用于深远海浮标与岸基站之间的实时数据传输[1-4]。例如, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的监测浮标采用 Argos 卫星 VHF 波段或铱星 L 波段链路资源, 可完成浮标与岸基站之间数据速率最大为 9.6 kbps 的实时通信任务[5]。各国海洋维权执法浮标通过国际海事卫星(Inmarsat) BGAN (宽带全球区域网, Broadband Global Area Network)商用业务 L 波段卫星中继通信终端实现与岸基站之间最大 464 kbps 数据传输[6]任务, 这也是目前国内大容量远海观测浮标数据回传所能达到的最高通信速率。

随着海洋环境监测以及远海装备的快速发展, 浮标载荷的功能和任务越来越多样化, 相应装备获得的数据量也越来越大[7], 特别是部分装备获取的图像数据需要实时回传到岸基站处理。这些海上远程实时通信任务的数据速率需求已经超过了第四代国际海事卫星所能提供的数百 kbps 的链路通信能力。例如, 高清视频压缩后的数据速率约为 2 Mbps, 而现有的海上浮标端卫星中继通信设备难以满足视频图像数 Mbps 的高码率数据传输需求。目前, 我国已有在轨中继卫星网络 S 波段链路资源支持最大 4 MHz 带宽的数据通信, 可用于海上远程高速率数据传输任务[8]。

因此, 利用我国中继卫星资源, 中国科学院国家空间科学中心研发了一种轻小型 S 波段卫星中继通信机, 用于接收卫星转发的扩频 BPSK 调制、2 kbps 码率的遥控指令信息(前向链路); 并向卫星发送来自浮标的 2 Mbps 码率、QPSK 调制的实时图像监测数据, 由卫星中继到岸基站(返向链路)。现代化小型浮标平台受能源和资源的限制, 对通信功能单元的体积、重量及功耗均有严格要求。因此, S 波段中继通信机采用集成化的零中频接收机结构和高效率 GaN 功率放大器, 实现了整机的轻小型化和低功耗设计, 并使收发链路单元满足了卫星双向 S 波段卫星中继通信链路的要求。同时, S 波段中继通信机还利用快速伪码捕获算法实时解算接收到

收稿日期: 2019-04-10
基金项目: 中国科学院科技创新重点部署项目资助(KGFZD-125-15-012-2)
作者简介: 饶浩(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间通信数字信号处理。E-mail:raohao5208@foxmail.com

的卫星信号信噪比,作为通信天线闭环跟踪卫星前向信号的参考依据,进一步提高了海上浮标远程通信的可靠性。

1 技术方案

S 波段中继通信机主要包括信号处理单元、射频前端和双路滤波器等功能单元。S 波段中继通信机原理框图如图 1 所示,各单元电路集成设计在铝合金屏蔽结构中。

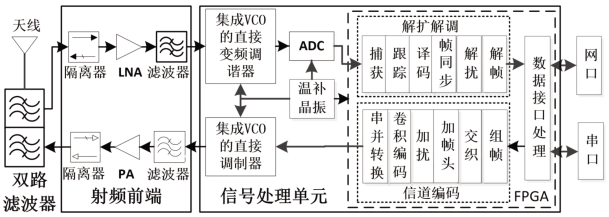


图 1 S 波段卫星中继通信机系统框图

图 1 中,信号处理单元包括直接下变频器、ADC(模数转换器)、调制器和 FPGA(现场可编程门阵列)。其中,直接下变频器可直接将前向卫星信号下变频至零中频信号;AD 芯片将模拟零中频调制信号转换为数字信号;FPGA 对数字信号进行解扩解调处理,最终通过网口将解调后的遥控数据实时发给浮标。同时,FPGA 也接收来自浮标的图像载荷数据,完成信道编码后输出 IQ 基带信号;调制器完成基带信号的正交调制后输出返向射频信号。

针对海上浮标应用,信号处理单元还需要实时解扩并计算接收到的卫星信号信噪比,提供给天线伺服机构完成对卫星信号的动态闭环跟踪,以确保双向通信的可靠性。

射频前端主要用于射频信号的滤波和放大,分为射频接收前端和射频发射前端。射频接收前端采用零中频结构,省去了中频变换过程,前端电路具有体积小、功耗低和成本低等优势。返向链路采用输出功率大、效率高、体积小、带宽大及稳定性好的 GaN 功率放大器,保证了返向链路信号传输的可靠性。

双路腔体滤波器分为接收通道滤波器和发射通道滤波器。其中,接收通道滤波器连接天线与前向链路射频前端,用于抑制前向链路中馈入的返向发射信号功率;发射通道滤波器连接返向链路射频前端和天线,用于抑制返向发射信号的边带功率。总之,双路腔体滤波器保证了射频前端的收发隔离度。

2 关键技术实现

2.1 轻小型化设计

S 波段中继通信机的外观结构如图 2 所示,整机由 2 层铝合金结构组合而成。其中,信号处理单元电路和 S 波段前向接收射频电路安装在上层结构中;下层结构集成了 S 波段功率放大器(Power Amplifier,PA)电路和 DC/DC 电源变换单元。整机结构侧面固定了一个双路腔体滤波器。双层结构设计提高了上下层之间的信号隔离度,大幅减小了高低频信号和大小信号之间的互相干扰。下层 PA 结构增加了散热齿设计,配合小型风扇使用,完成了整机的散热处理。

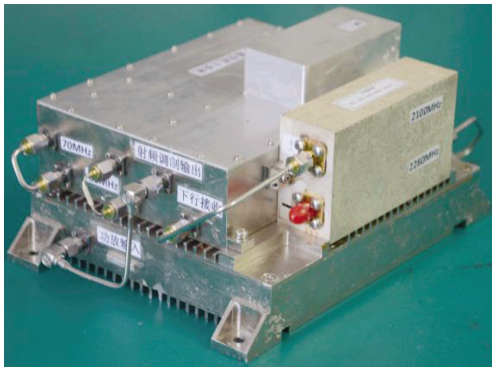


图 2 S 波段中继通信机外观图

2.1.1 信号处理单元集成化设计 信号处理单元电路主要由直接调制解调芯片、AD、FPGA 和相关外围电路组成,其电路板布局如图 3 所示。

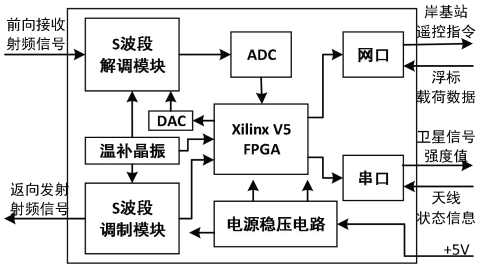


图 3 信号处理单元电路板布局设计

图 3 中,信号处理主芯片选用 Xilinx 高性能、大容量的 V5 系列 FPGA,完成前向零中频信号接收、返向浮标载荷数据编码和数据接口协议等功能。其中,前向接收包括对零中频信号的采集、解扩、解调、译码、同步、解扰和解帧等功能。返向编码包括对浮标载荷数据的组帧、交织、加扰和卷积编码等功能。数据接口协议为 UDP 网络协议和异步串口协议。直接调制解调芯片均集成有可调频率源,

完成射频本振的生成和信号的调制解调功能。为了隔离射频模拟电路和低频数字电路之间的干扰,调制、解调电路采用介电常数稳定的微波板材制成带有邮票孔的独立射频模块,以器件形式焊接到信号处理单元母板上。此外,信号处理单元板上的 FPGA、调制解调器以及 ADC 芯片共用一片高性能温补晶振作为参考时钟,减少了电路冗余。综上所述,集成化和可靠性设计使信号处理单元电路具有更小的尺寸和功耗。

2.1.2　零中频结构接收机　零中频接收机由于不需要中频放大、高 Q 值镜像滤波器等电路,减少了接收机的器件数量,从而降低了电路体积和成本。但是信号直接搬移到基带导致零中频接收机也有直流(DC)偏移、I/Q 不平衡、偶次谐波、闪烁噪声等固有缺陷[9]。

随着微电子技术和通信技术的快速发展,市面上已有集成 DC 偏移消除、I/Q 不平衡误差检测电路和载波泄露检测电路的商用射频解调芯片,能够满足高灵敏度的接收机设计需求。S 波段中继通信机采用高集成解调芯片 max2112,芯片集成了 LNA(低噪声放大器,Low Noise Amplifier)、RF 可变增益放大器、单片 VCO 和 N 分频频率合成器、I/Q 下变频混频器、截止频率可编程的基带低通滤波器和数控可变增益基带放大器。RF 和基带可变增益放大器相配合,能够提供大于 80 dB 的增益控制范围。在 FPGA 检波和控制程序支持下,Max2112、ADC、FPGA 和 DAC 构成一个完整的射频 AGC(自动增益控制,Automatic Gain Control)电路,能够为前向接收链路提供足够的动态范围。

前向接收射频前端采用了两级低噪声、高增益且带有限幅功能的 LNA,单片 LNA 噪声系数仅为 0.6 dB,可提供 26.0 dB 增益。前向接收链路各级增益分配和噪声系数如表 1 所示。

表 1　接收前端各级增益和噪声系数

接收射频前端	增益/dB	噪声系数/dB
双路滤波器	−1.8	1.8
一级 LNA	26.0	0.6
二级 LNA	26.0	0.6
滤波器	−2.0	2.0
AGC	80.0	17.0

级联总噪声系数 F 计算如式(1)所示[10]。

$$F=10\log\left(F_1+\frac{F_2-1}{G_1}+\frac{F_3-1}{G_1G_2}+\cdots\right) \tag{1}$$

式中:F_n 为系统各级噪声系数;G 为各级额定功率增益。根据计算结果可知,接收前端噪声系数约为 2.4 dB,增益大于 120 dB。

测试结果表明,前向接收灵敏度为−118 dBm,动态范围大于 65 dB,符合中继通信前向链路预算指标要求。

2.1.3　功率放大器　返向链路射频前端完成返向调制信号的功率放大,保证返向发射功率满足中继卫星返向接收所需的 E_b/N_0 值。PA 电路主要包括带通滤波器、前级放大器、驱动放大器、末级 PA、隔离器、加电延时控制电路,如图 4 所示。功率放大器采用多级放大器级联结构,保证了放大器全温度范围内的增益平坦度。

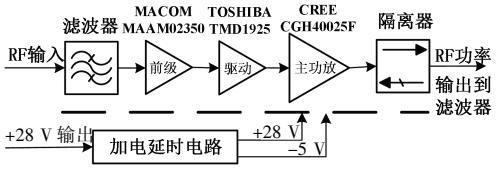


图 4　功率放大器电路结构

由图 4 可知,调制芯片与功率放大器之间的带通滤波器可以充分抑制调制信号的杂散和各次谐波,各级放大器输入、输出端均设计了 50 Ω 的微带线匹配电路。末级 PA 采用 GaN 器件,最终可将 0 dBm 返向调制信号放大为 25 W 的调制信号。PA 电路带内增益 48 dB,常温(+20 ℃)下的增益平坦度<0.8 dB,有效带宽为 10 MHz。此外,输出端隔离器能稳定输入输出端的驻波比和简化匹配电路,防止功率放大器输出端短时空载。

功率放大器单元有输入信号时的功耗比没有输入信号时的功耗大 52.8 W,可知放大器转换效率可达 47%。高效率放大器在保证返向链路余量的同时,严格控制了中继通信机整机功耗,适用于锂电池供电的小型浮标平台。

2.2　收发隔离度设计

考虑到 S 波段中继通信机返向发射功率大,收发链路工作频率间隔(200 MHz)小,中继通信机设计时需保证返向信号及其调制谱边带功率在前向接收射频前端入口有较高的抑制度。否则,前向接收 LNA 输入功率容易饱和,进而导致接收射频前端的信噪比严重恶化,甚至造成前向链路通信中断。由此,除了依靠天线的交叉极化,中继通信机还需要在收发前端之间加入高品质的双路滤波器。为保证 S 波段中继通信机能正常接收前向链路信号,收发抑制度 A_{TR} 应满足式(2)的值[11]。

$$A_{TR}=L+10\log(B)+S_T-Sens-CCR \quad (2)$$

式中:L 为大功率单载波信号在接收信号频点处的相位噪声，测试知 L 的值为−150 dBc/Hz;B 为前向链路带宽,6 MHz;S_T 为返向发射信号功率,44.0 dBm;$Sens$ 为前向链路射频前端灵敏度,−118 dBm，允许灵敏度在双工工作状态下有 3 dB 的下降;CCR 为共信道抑制比,−8 dB。计算得到腔体滤波器的衰减抑制 A_{TR} 需达到 85 dB。

由矢量网络分析仪的测试结果可知,实际使用的腔体滤波器收发抑制度均大于−92.0 dB，满足上述全双工通信的隔离度要求。

S 波段中继通信机通过优化电路和结构设计,将各功能单元一体化集成在航空铝腔体内,实现了整机的轻小型化。

2.3 伪码快速捕获算法

为确保通信天线在运动的浮标平台上能闭环跟踪卫星前向信号,中继通信机需实时向天线伺服跟踪机构提供前向信号信噪比,作为跟踪卫星的依据。因此,天线捕获和跟踪卫星前向信号的过程对中继通信机的解扩速度提出了较高的要求。

在前向扩频信号解扩过程中,由于伪码相位和载波频率的不确定性,捕获过程需要完成对伪码相位和载波频率的二维搜索。二维时域串行搜索耗时长,并行频率搜索和并行伪码搜索耗时短[12],是目前常用快速捕获算法。考虑到地球同步轨道卫星的多普勒频偏较小,需要搜索的频点比伪码相位的搜索点少,因此,并行伪码搜索算法更适用于浮标 S 波段中继通信机的解扩。

基于 FFT 的并行伪码捕获流程如图 5 所示,捕获程序以一定的频率步进对所有可能的载波频点进行串行搜索。在每一个频点上,利用 FFT 运算对所有伪码相位进行并行搜索。

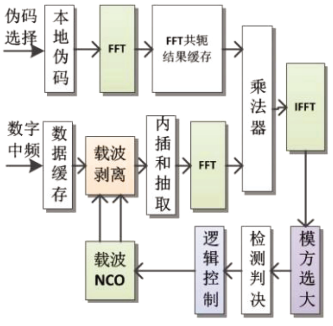


图 5 伪码快速捕获流程图

为了搜索 N 个伪码相位,时域串行搜索需要做 N 次相关,共需 N^2 次乘法。而将时域内的相关运算变换到频域内的相乘后,搜索所有伪码相位只需要做一次 FFT 变换和 FFT 逆变换，乘法数变为 $2N\log_2 N$。整个搜索过程的乘法运算次数大大减少,实现了对卫星前向信号的快速捕获。为了方便内插和抽取,运算采样数据点数 N 取 2 048。多普勒频偏搜索步进为 800 Hz,搜索频偏范围为 4 kHz。中继通信机采用 Xilinx 公司得 FPGA 高速并行处理中频信号,一次扩频信号的捕获过程最多需要 50 ms。

完成捕获后,最大伪码相关值与不同频率伪码相关值累加平均后的平均相关值的比值,可得到接收到的卫星信号信噪比,能够反映接收到卫星信号强度。伺服机构的 ARM 控制器根据该强度值驱动伺服机构调整天线指向,完成对卫星信号的捕获和跟踪处理。

3 性能指标和试验结果

如表 2 所示,与 BGAN 商用业务 L 频段中继通信机 Explorer 527[13]相比,S 波段中继通信机在大幅提高通信速率的情况下,具有轻小型化的特点。由于 S 波段中继通信机的发射功率远大于 Explorer 527,导致总功耗也偏大,总功放转换小效率来看,S 波段中继通信机完成了低功耗设计。同时,S 波段中

表 2 中继通信机的整机特性比较

整机参数	Explorer 527	S 波段中继通信机
发送速率/kbps	448	2 000
发射功率/W	17.5(含天线增益)	25(不含天线增益)
功耗/W	70.0	79.2
重量/kg	3.00	1.95
体积/mm³	483×301×44	192×134×92

表 3 中继通信机收发性能指标

	参数		测试结果
发射	单载波相位噪声	10 Hz (/dBc)	−62.91
		100 Hz (/dBc)	−83.13
		1 kHz (/dBc)	−82.87
		10 kHz (/dBc)	−85.32
		100 kHz (/dBc)	−102.67
		1 MHz (/dBc)	−139.73
	调制信号质量	误差矢量幅度/%rms	6.24
		相位不平衡度/(°)	3.56
		幅度不平衡度/%rms	2.94
	射频输出功率/dBm		43.61
接收	接收灵敏度/dBm		−118.0
	接收动态范围/dB		>65.0

继通信机的发射和接收链路单元性能优异，如表 3 所示。其中发射链路单元发射功率大,调制信号质量高(如图 6 所示),是保证返向 2 Mbps 速率通信的必要条件。同时,在双路滤波器的努力下,接收灵敏度可达-118 dBm。

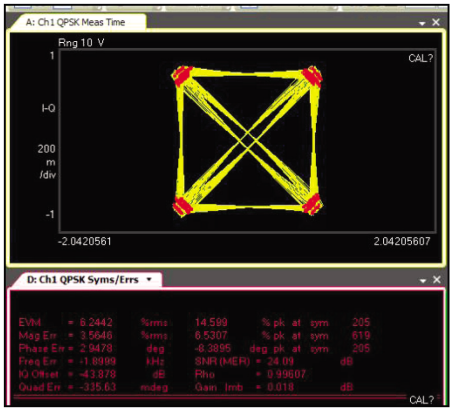


图 6　功率放大器输出的调制信号质量

在四级海况条件下的海上试验中,S 波段中继通信机能在上电 1 min 内锁定卫星前向信号，接收信噪比在 18 dB 附近波动,远大于误码率为 10^{-5} 时所需的 5 dB 门限值。根据前向信号信噪比,浮标端卫星通信天线完成了对卫星信号的动态闭环跟踪,保证了双向通信链路的联通性。此外,岸基站接收到返向链路信号 E_b/N_0 在 12.7 ~14.0 dB 之间变化,远大于误码率为 10^{-5} 时所需的 8 dB 门限值。岸基站实测返向链路误码率变化如图 7 所示。

海上试验结果表明，四级海况条件下,S 波段中继通信机实现了海上浮标与岸基站之间的远程双向实时数据传输,双向链路余量充足,误码率 $P_e<10^{-5}$。

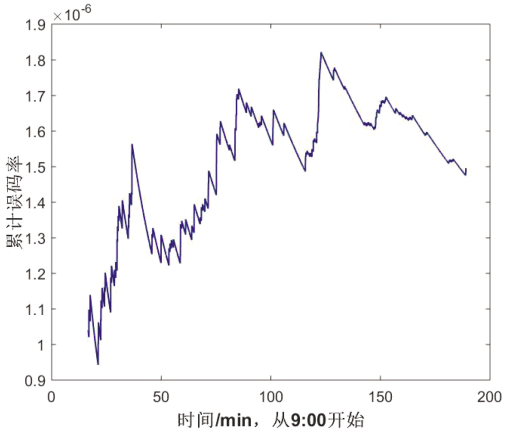


图 7　返向链路误码率

4　结 语

利用我国现有的卫星资源,S 波段中继通信机完成了海上浮标与岸基站之间高码率双向实时数据通信试验，持续向岸基站上传了 2 h 的浮标载荷图像数据。S 波段中继通信机采用零中频接收、软件无线电信号处理和直接发射调制的方案，方案简洁,具有小型化、低功耗、高可靠性、易调试和适应性强的特点。海上试验过程中,卫星双向通信链路稳定可靠,测试工作验证了大系统在复杂海洋环境下的高速率实时数据传输能力,S 波段中继通信机的关键性能参数满足海上小型浮标视频图像实时传输的应用需求。

参考文献:

[1] Zhang S W, Yang W C, Xin Y Z, et al. Prototype system design of mooring buoy for seafloor observation and construction of its communication link[J]. Journal of Coastal Research, 2018,83: 41–49.

[2] Maxwell D, Mcarthur S, Hansen W, et al. US deep–sea tsunameter network fully operational[C]// OCEANS 2008, Vols 1–4: 427–436.

[3] Proud R, Kocak D M, Browning P. AIS–based mobile satellite service expands opportunities for affordable global ocean observing and monitoring[C]// OCEANS 2016 MTS,IEEE, Monterey, California, 2016.

[4] Soebroto A A, Sunaryo, Suhartanto E. A tsunami early warning system for the coastal area modeling [C]// 4th AIP Conference Proceedings, 2015, 5(2):1658.

[5] Meinig C, Stalin S, I. Nakamura A, et al. Real–time deep–ocean tsunami measuring, monitoring, and reporting system: the NOAA DART II description and disclosure[R].US: NOAA,2005.

[6] 李子木.海事卫星系统发展及应用[J]. 无线电工程, 2009, 39(10): 8–10+15.

[7] 周立, 张阳, 张一,等. 无人时代的海洋测绘技术展望[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 85–91.

[8] Toral M, Heffernan P, NganY, et al. Payload on–orbit performance verification of TDRS HIJ [C]//22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit. Monterey, California, 2004, 3257:1–8.

[9] 邓元策, 陈巧艳, 马路, 等. 基于商业零中频芯片的 BPSK/QPSK 解调器设计[J]. 电视技术, 2015, 39(01): 54–59.
[10] 曹志刚. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
[11] Luzzatto A, Haridim M. Wireless transceiver design: mastering the design of modern wireless equipment and systems [M]. John Wiley & Sons, 2016.
[12] 樊昌信. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
[13] 小记. 车载型海事卫星移动宽带 BGAN 产品——Thrane & Thrane EXPLORER 527[J]. 卫星与网络, 2007(10): 56–57.

Design and Implementation of a Light and Small S–Band Satellite Relay Transceiver

RAO Hao[1,2], LIANG Xian–feng[1], ZHANG Jin–zhou[3], AN Jun–she[1]

1. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China;*
3. *Huawei Technologies Co., Ltd, Beijing* 100085, *China*

Abstract: A S–band satellite–relay transceiver of light and miniaturization mode is designed and implemented to meet the requirements of real–time reliable and high–speed communication between unmanned buoys on the sea and shore–based station. The receiving of remote control instruction (2 kbps) and the real–time return of buoy load data (2 Mbps) are realized by using highly integrated zero–IF receiving unit and high efficiency GaN power amplifier transmitting unit with a power of 25 W. The high reliability of marine satellite communication is ensured by improving the isolation between transmitter and receiver and calculating the received SNR (signal to noise ratio) in a real–time manner. Through the integrated design of hardware such as RF front–end and signal processing unit, the miniaturization (the size is about 192 mm × 134 mm × 92 mm, the mass is less than 2.0 kg) and low power consumption (less than 80 W) of the transceiver are realized. The sea trials under four–stage sea conditions show that the S –band relay transceiver can meet the real –time, high –speed bidirectional communication requirements of the offshore buoy under complex sea conditions, and the BER (bit error rate) of large loop data communication (P_e) is less than 10^{-5}.

Key words: buoys; S–band link; satellite–relay transceiver; zero–IF