

面向远海岛礁环境监测的天波超视距传输技术

李国军¹, 徐小飞¹, 叶昌荣², 张德平¹, 谭露¹, 邢亚坤¹

(1. 陆军工程大学通信士官学校应急通信重庆市重点实验室, 重庆 400035;

2. 重庆邮电大学光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对远海岛礁远离本土能源供给严重受限及环境监测缺乏低成本、高可靠的远程传输手段问题, 依托陆地广泛分布的移动通信基站, 提出一种基于广域协作接收的天波超视距接入网络传输框架, 从物理层、网络层、感知层3个方面分别解决远海岛礁环境监测天波超视距传输面临的信道衰落、链路非对称与频谱拥挤问题。典型天波信道环境下链路传输波形与多通道融合算法的仿真结果表明, 只需要通过3个接入节点的协作接收, 即可保障3 000 km范围内远海岛礁低功率电台的可靠接入, 对国家远洋船舶监测、边防交通隘口监测等也有一定的参考价值。

关键词: 天波超视距通信; 远海岛礁; 广域协作; 多通道融合; 证据理论

中图分类号: TP302

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00065

A transmission technology of environmental monitoring for ocean based on over-the-horizon skywave

LI Guojun¹, XU Xiaofei¹, YE Changrong², ZHANG Deping¹, TAN Lu¹, XING Yakun¹

1. Chongqing Key Laboratory of Emergency Communication, Communication Sergeant School, Army Engineering University, Chongqing 400035, China

2. Chongqing Key Laboratory of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: In view of the serious limitation of local resource supply for remote island and reef and the lack of low cost, high reliability long-distance transmission methods for environmental monitoring, relying on the mobile communication base stations widely distributed on the land, an over-the-horizon(OTH) skywave access network based on wide-area cooperative reception was proposed. The problems of channel fading, link asymmetry and spectrum congestion faced by remote island and reef environments monitoring for an OTH skywave transmission were solved from three aspects: physical layer, network layer and perceptive layer. The simulation results of the lower link transmission waveform and the multi-channel fusion algorithm in the typical skywave channel environment show that the reliable access of low-power transceiver in the remote island and reef within a range of 3 000 km could be guaranteed only through the cooperative reception of three access nodes. There was also some reference to monitoring of national ocean-going ships and border defence traffic pass monitoring.

Key words: sky wave stadia communication, remote island and reef, wide area collaboration, multi-channel fusion, evidence theory

收稿日期: 2018-02-07; 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61671452); 重庆市基础研究与前沿探索项目(No.cstc2015jcyjBX0078, No.cstc2016jcyjA0556); 重庆市社会民生保障项目(No.cstc2016shmszx40003); 重庆市重点产业共性关键技术创新专项(No.cstc2017zdcy-zdyfx0011)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671452), Chongqing Basic Research and Frontier Exploration Projects (No.cstc2015jcyjBX0078, No.cstc2016jcyjA0556), Chongqing Social and People's Livelihood Security Projects (No.cstc2016shmszx40003), Chongqing Key Industry Common Key Technological Innovation Projects (No.cstc2017zdcy-zdyfx0011)

1 引言

我国受台风、海浪、风暴潮、海冰等多种灾害影响,是世界上海洋灾害最严重的国家之一。远海岛礁作为国家海防的前哨,是国家海洋环境监测、海洋交通保障的战略支点^[1-2],其环境监测对海洋灾害预警、海洋交通管理、国家主权和海洋权益维护有不可替代的重要作用^[3-4]。

然而,远海岛礁位置偏僻、远离本土、交通不便,使工作人员长期驻守十分困难。当前,远海岛礁环境监测、航保设施维护主要依靠边海防军民定期巡逻完成^[5-7]。缺乏高可靠、低成本的远程自动监测手段,严重制约了远海岛礁环境监测网络的构建。基于此,本文研究一种新的基于天波超视距接入网络的远海岛礁环境监测数据链路技术,为远海岛礁环境监测提供一种低成本、高可靠的传输手段,为增强国家远海、深海数据获取能力提供有益探索^[8-9]。

2 远海岛礁环境监测技术现状

海洋环境参数的获取主要基于海洋调查船、海岛礁监测站以及海洋观测浮标 3 种平台。目前,基于调查船出海采样的海洋调查技术已难以满足海洋环境监测和预警的实时性要求,基于海岛礁监测站及浮标平台的海洋环境监测系统更有利于实现自动化、长期性观测,成为当前海洋环境监测技术研究开发的重点^[10-11]。相较于海洋浮标而言,基于海岛礁的海洋环境监测技术在能源供应、传感器设计及通信系统集成等方面优势明显。

本文重点探讨基于海岛礁的远海环境监测技术^[12-13]。目前,海洋水文气象环境参数传感器技术比较成熟,海岛礁环境监测主要的采集参数包括温度、气压、风速风向及海水温盐等。近年来,随着海洋交通运输及渔业生产的快速增长,我国远海岛礁灯塔等航保设施相继投入使用。为增强远海岛礁航保设施的运行管理能力、提供可靠的航海保障服务,航保设施状态监测已成为远海岛礁环境监测的一个重要内容。远海岛礁航保设施状态监测参数主要有灯塔状态参数、船舶自动识别系统(AIS)数据等。

由此可见,远海岛礁环境监测参数的本地获取是易于实现的,而数据的远程传输成为解决问题的关键。当前,远海岛礁环境监测数据传输主要有以

下几种手段。

1) 海底通信光缆:该方式具有传输容量大、抗扰性好等优点,但受海上客观条件限制,光缆铺设难度大,部分远海岛礁不具备海底光缆通信条件^[14]。

2) 公众移动通信网络:该方式具有传输容量大、实时性强等优点,4G 体制下通信速率高达 100 Mbit/s。然而,移动通信服务需要在移动运营商通信基站信号覆盖的区域才能获得。目前,远海岛礁通信基础设施缺乏,尚不能获得移动通信服务。

3) 微波传输:微波传输容量大、适应性强,但只能在视距内传输,传输距离通常在 50 km 以内。进行远距离传输时,需要架设中继节点。对于远海岛礁监测而言,架设过多的中继节点不仅系统复杂、成本高,而且孤立突出的远海岛礁并没有合适的中继节点可用。

4) 北斗卫星短报文传输:这种方式可以实现超视距传输,传输距离完全覆盖我国东海、南海方向岛礁,但信息量受限,每分钟发送一次,每次发送信息只能承载 100 个左右的字节数。并且北斗卫星尚不能覆盖高纬度地区,使得在北极航道与南北极地区环境监测中应急困难^[15-17]。

5) 短波天波超视距通信:天波超视距通信工作在短波频段,利用空间电离层对高频电磁波反射的机理实现长达数千公里的超视距通信,经多次反射可实现全球覆盖^[18-20]。与北斗卫星通信相比,天波超视距通信传输容量更大、运营成本更低(建成后没有数据服务费用),不存在高纬度通信盲区问题,但天波信道时变色散、频谱重叠拥挤^[21-22]。

综合上述,远海岛礁环境监测面临的关键问题是气象水文数据及航保设施状态监测数据的超视距可靠传输^[23-25]。其中,北斗卫星短报文通信与短波天波超视距通信是两种最具实用价值的低成本传输手段,天波超视距通信在覆盖范围、传输容量、运营成本等方面较北斗卫星通信更具优势^[26]。为此,本文重点围绕远海岛礁环境监测数据天波超视距组网传输技术展开研究,旨在解决远海岛礁气象水文数据及航保设施状态监测数据的超视距可靠传输问题。

3 远海岛礁环境监测天波超视距传输方案

3.1 远海岛礁环境监测天波超视距传输链路分析

远海岛礁环境监测的数据量较小,气象水文数据与航保设施状态数据监测的周期都在 10 min 数量级,需要的天波传输速率在 100 bit/s 数量级^[27-28]。

因此，传统的窄带短波电台（带宽 3 kHz）即可满足要求。但远海岛礁与大陆相距遥远（南沙群岛至海口约 2 000 km），天波多跳传播导致信道多径衰落严重。另一方面，远海岛礁能源保障困难，短波电台不可能大功率工作，导致岛礁至陆地的线路建链成功率低、可靠性差。总体上，远海岛礁环境监测天波超视距传输面临以下几个问题。

远海天波传播信道时、频、空多域衰落，短波天波依靠电离层反射进行传播，电离层受太阳辐射影响，具有不稳定的多层结构，加之海面、陆地反射特性的差异，导致远海天波多跳传播在不同区域、不同时间、不同频率呈现出复杂时变传播的特性，信道特性时、频、空三维选择性衰落^[29-30]。严重衰落时，4 000 km 链路上多径时延超过 8 ms、扩展超过 5 Hz^[31]。

远海岛礁与陆地之间的链路非对称，由于内陆通信站点功率等级、天线尺寸不受限制，陆地至岛礁下行天波链路可以通过增大发信功率进行补偿。然而，岛礁用户受发信功率与天线路式的限制，其上行天波链路信噪比较低下行链路低 8~10 dB。如果岛礁电台工作在 100 W 中等功率，3 000 km 通信链路接收端信噪比在 -10 dB 左右。如果考虑接收地域的电磁干扰，信噪比将进一步降低。

天波频谱拥挤、重叠，天波通信频段主要位于 3~30 MHz，按照常规 3 kHz 进行信道划分，一共只有 9 000 个信道能为全世界共用^[32]。加之天波传播窗口本身的动态变化，导致传统“约定频率、约定时间、不寻找、不微调”的固定通信方程式频谱管理效率低下，使得这一极为宝贵的频谱资源存在严重的浪费。

可见，远海岛礁环境监测天波超视距传输链路设计，需要综合考虑天波信道的频率划分、传输波形的抗衰落能力以及传输链路的非对称性^[33-34]。

3.2 基于广域协作接收的远海岛礁天波超视距环境监测系统方案

3.2.1 系统基本架构

从远海岛礁电台上下行链路非对称性问题着手，借鉴蜂窝移动通信领域中利用接入网络复杂性换取用户接入简便性的思想，提出一种基于广域协作接收的远海岛礁环境监测天波超视距接入网络技术架构，将传统海事的短波天波通信“点对点”保障方式转变为“点对网”的接入网模式^[35-36]。

从物理层、网络层、感知层 3 个方面分层解决

远海岛礁环境监测天波超视距传输链路面临的信道衰落、链路非对称、频谱拥挤 3 个关键问题，如图 1 所示。以网络栅格结构的复杂性换取远海岛礁低功率电台接入的可靠性与简便性，从而实现远海岛礁环境监测数据的高可靠传输^[37]。

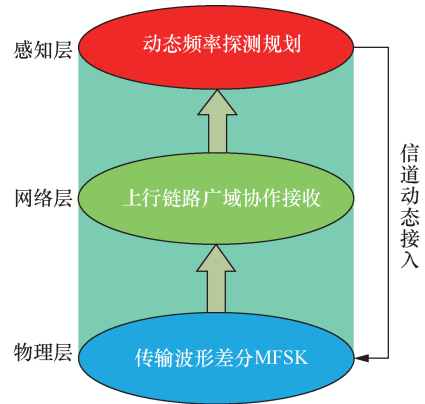


图1 远海岛礁环境监测天波超视距接入网分层架构

1) 物理层：针对远海岛礁环境监测中低速传输速率需要，采用差分多频键控波形（DMFSK），在适应远距天波链路强多径时延的情况下，通过相邻符号单音信号的频率差携带信息，有效应对远海天波信道动态的频率频移与扩展特性^[38]。同时，信号波形的恒幅特性使得电台功放可以工作在线性区域，特别适用于远海岛礁电台满功率的工作要求，有利于远海岛礁低功率电台用户的上行传输链路^[39]。

2) 网络层：采用广域多点协作接收技术，依托移动通信铁塔构建广域互联的短波接收台站，将多个短波接收台站组合成为一个虚拟接入节点，在虚拟接入节点内，配置多个物理台站对机动用户上行信号并行接收，并将接收的信息传递到融合中心站点进行信息融合，利用空间分集补偿远海天波链路的空域选择性衰落，以提高上行链路检测能力、提升入网与业务成功率。这种网络化的接入形式，有利于整合当前分散配置的短波台站资源、统一管理宝贵的短波频谱资源，避免分散使用带来的电台互扰与资源浪费，充分发挥短波天波通信的整体效能^[40]。

3) 感知层：采用宽带接收技术定时感知远海岛礁天波探测信号，动态规划远海岛礁电台工作频率，解决天波传播窗口随日夜、季节交替动态变化导致现行海事天波通信固定信道通信建链成功率低的问题。

本文提出的天波超视距接入网络充分利用陆地布设短波台站在设备资源、架设场地、能源保障等多方面的优势,通过多个收信台上行信号的广域融合实现空间分集,增强远海岛礁电台上行链路接入的成功率。同时,依托中国铁塔公司陆上广泛分布的通信基站构,能够以极低的成本构建广域分布的天波超视距接入网络,从而为远海岛礁环境监测提供一种低成本、高可靠的传输手段^[41]。

3.2.2 系统组成

远海岛礁环境监测天波超视距接入网络的设备组成主要包含 6 个部分,即接入节点、海岸发信台、远海岛礁电台、IP 承载网、融合系统及频率管理系统。其中,物理层设备主要有接入节点、海岸发信台、远海岛礁电台;网络层设备主要有 IP 承载网、融合系统;感知层设备主要是频率管理系统,系统组成如图 2 所示。

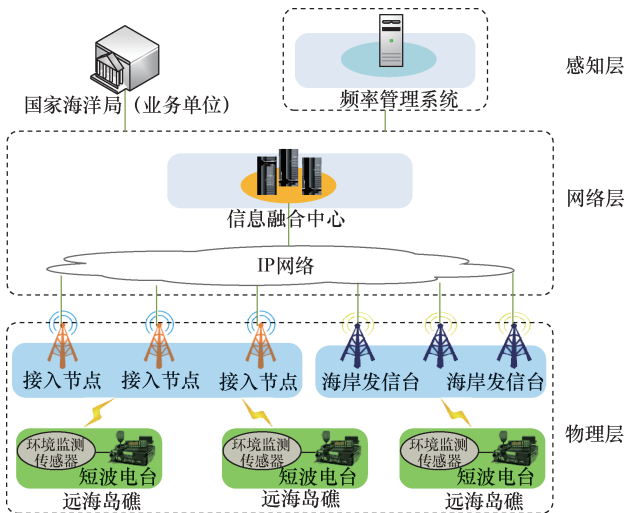


图 2 远海岛礁环境监测天波超视距接入网系统组成示意图

1) IP 承载网: 依托广泛分布的移动通信基站与光纤通信设施,无需投入任何硬件成本,即可实现融合系统、网络管理系统与接入节点的互连,提供可靠、安全的数据传输基础平台。

2) 接入节点: 包括一部短波宽带接收机与短波宽带接收天线,其中,接收机配置于移动基站机房内,天线配置于铁塔基座之上。移动基站能够为短波接收机提供良好的电源、防水、防潮保障。接入节点只完成信号接收,不具备信号发射功能,不会干扰现有移动通信系统。另一方面,天波通信频率远低于移动通信频率。

3) 海岸发信台: 在国家海洋局现有海岸电台基础上增加网络控制器,实现远程调度控制,便于不

同方向岛礁用户通信时的调度使用。远海岛礁环境监测中,主要是进行上行数据传输,下行链路目的是解决海岛礁电台唤醒与参数配置等。海岸电台通常工作于 kW 级大功率,通过调度特定方向工作的海岸电台,使得下行链路可有效覆盖我国相关海域岛礁。

4) 信息融合中心与频谱管理系统: 信息融合系统负责融合处理各接入节点上传的岛礁环境监测信息,形成完整、可靠的各岛礁环境监测态势数据。频率感知系统将探测规划的海岛礁工作频率通过调度相应海岸电台下发至各海岛礁^[42-43]。

5) 远海岛礁电台: 采用通用的海事电台即可,通过风光互补供电系统为气象水文传感器及短波电台供电。气象水文数据采集耗电量较少,主要功耗来自于短波电台。为保证各种天气条件下持续工作,电台最大发信功率为 100 W,天线采用易于安装架设的鞭状天线。

3.3 主要关键技术

3.3.1 差分多频键控调制

多进制频移键控 (MFSK, 简称多频键控) 是中低速短波天波通信最为常用的调制方式之一,这种带内频域分集的方式可有效处理远距离天波信道由于多径效应引起的频率选择性衰落。同时,连续相位 MFSK 调制波形的恒幅特性,有利于短波发射机满功率工作,功放效率高。上述特性特别适用于功率及天线受限的远海岛礁电台用户的远程数据传输^[44-45]。

为此,针对远海岛礁环境监测的中低速数据传输需求,本文基于 MFSK 调制设计远海岛礁环境监测天波超视距传输波形^[46]。为进一步处理远海天波信道由于时间选择性衰落引起的频域扩展问题,借鉴差分跳频的思想,提出一种短波带内 DMFSK, DMFSK 信号可以表示为

$$S_{DMFSK}(t) = \sum_n g(t - nT_b) \cos(\omega_c + a_n \Delta\omega)t \quad (1)$$

其中, $g(t)$ 是高度为 1、宽度为 T_b 的门函数。

ω_c 是最小主载频, $\Delta\omega$ 是频率间隔。有 M 种取值,可以表示为

$$a_n = (a_{n-1} + x_n) \bmod M \quad (2)$$

其中, x_n 为传输的 bit 信息,有 M 种取值,可以表示为

$$x_n = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

差分 MFSK 调制的核心思想是基于天波信道在最近的两个符号之间传播特性基本一致，频域扩展对相邻符号频率差影响最小，从而利用这个频率差携带信息，解决远海天波信道的多普特性。同时利用 Walsh 码的正交特性，对原始信息进行映射编码，进一步提升远海岛礁用户上行链路的可靠性，具体实现如图 3 所示。

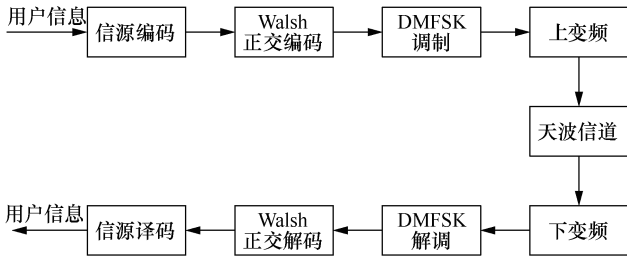


图 3 DMFSK 调制示意

3.3.2 多通道信息融合

多通道上行链路信息融合是实现广域协作接收的关键，通常有两种实现方法，即检测级融合与决策级融合。检测级融合时，各接收站点不进行判决译码，直接将接收的基带信息传递到融合中心，由中心站点进行融合判决。这种融合方式对网络的传输能力要求高，同时要求接收机有很强的抗多径干扰的能力。决策级融合时，各站点

先进行接收译码，再将数据信息传递到融合中心进行融合判决。这种方式降低了网络传输的压力，但要求数据中心需要具备融合高冲突性信息的融合处理能力。

为了减轻检测级融合面临的射频数据网络传输压力，降低宽带数据传输较高的租赁费用，本文在 D-S 证据理论框架下，提出一种新的基于多通道柔性数据融合的决策级融合算法，以解决通道间高冲突信息融合问题。算法的核心内容包括比特软值提取与多通道决策级融合两个部分，融合框架如图 4 所示。

1) 比特软值提取

从 Walsh 正交译码入手，对 DMFSK 的译码结果进行软值提取，基本流程如图 5 所示。其中，DMFSK 按帧输出的数据为 64×5 的矩阵，在经历解交织过程后，其中每一行 64 个数据对应一个 ASCII 码，这里依次对每一行的数据进行遍历^[47]。

针对单行 64 个数据，将其与哈德曼矩阵的每一列进行相关运算，可以获得长度为 128 的相关结果，其中最大的相关峰则意味着最可能的结果^[48]。这里考虑噪声的影响，选择最大的 3 个相关峰，其相关结果的取值分别为 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 对应位置的二进制值可以表征为向量 v_1 、 v_2 、 v_3 ，其中

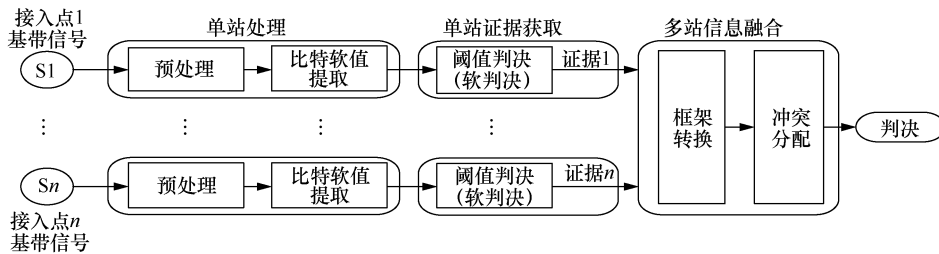


图 4 广域多点协作接收决策级柔性融合框架

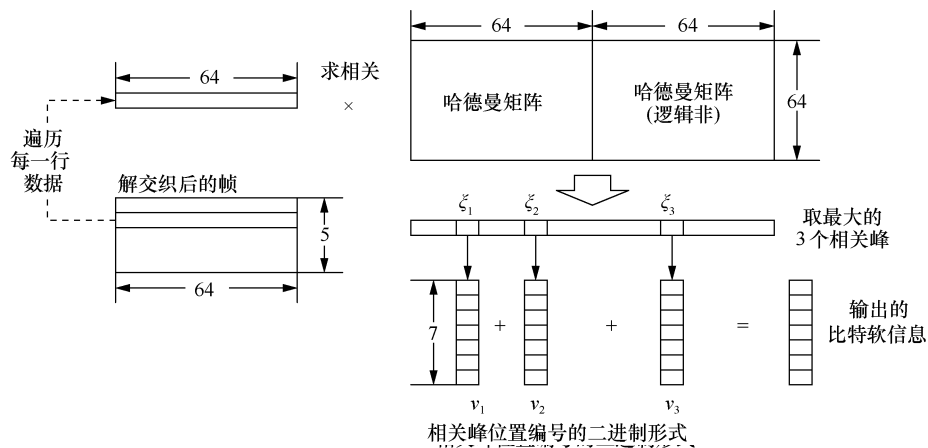


图 5 DMFSK 比特软值提取示意图

任意一个元素可以取值 0 或 1，对应的软值可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \sum_{i=1}^3 \xi_i v_i \\ \lambda_0 = \sum_{i=1}^3 \xi_i v_i \end{cases} \quad (4)$$

其中， $\lambda_i = [\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots, \lambda_{i,7}]$ ， $i = 0, 1$ 。

2) 多信道决策级柔性信息融合

在传统的维特比译码方法中，通过对比所有状态（分支）的累积距离，从而判决获得唯一的最优结果。在多路上行信号接收判决过程中，每路信号特比译码的结果区别很大，结果之间相互矛盾，很难直接获得合理的最终判决结果。本文引入基于 DSmT (dezert-smarandache theory) 理论的决策级信息融合方法，采用冲突信息重分配方式进行融合决策。利用获得的软信息，假设特定单个信息位的软值为 (λ_0, λ_1) ，分别表示该位为 0 和 1 的软信息，通过归一化，可以构建该信息位的基本信任分配函数 (BBA)

$$m_k(X) = \begin{cases} \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1}, X = 0 \\ \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1}, X = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中， $k=1,2, \dots, s$ 表示当前 BBA 来自于第 k 个接入点 (通道)，总共有 s 个接入点同时接收到该信息并参与融合。在此基础上，引入 DSmT 不确定性信息柔性融合方法和第六号按比例冲突重分配准则 (PCR6) 对不同台站的信息进行融合。以 $k=2$ 为例，多通道融合与冲突重分配过程可以简单描述为图 6 所示。

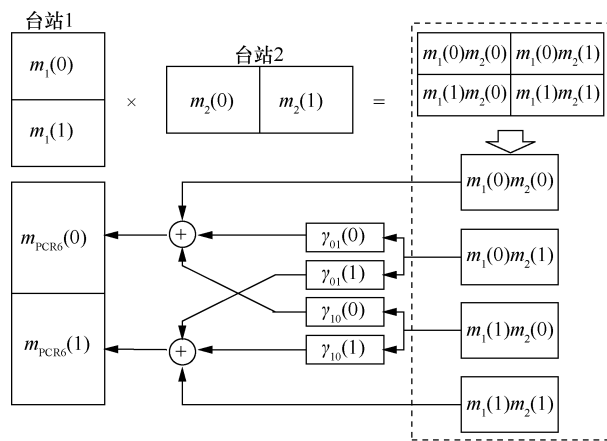


图 6 多通道柔性融合冲突重分配示意图

其中， $m_1(0)m_2(1)$ 和 $m_1(1)m_2(0)$ 为冲突信质，根据 PCR6 规则，需要进行重分配。其中，重分配系数可以表示为

$$\gamma_{AB}(A) = \frac{m_1(A)}{m_1(A) + m_2(A)} \quad (6)$$

$$\gamma_{AB}(B) = \frac{m_1(B)}{m_1(A) + m_2(B)} \quad (7)$$

当参与的基站数 $k>2$ 时，最小可分配信质的数量从 $2^2 = 4$ 增加到 2^k ，其过程可以描述如下

$$m_{\text{PCR6}}(X) = \prod_{i=1}^s m_i(X) + \sum_{i=1}^s m_i(X)^2 \sum_{\substack{\bigcap_{k=1}^{s-1} Y_{\sigma_i(k)} \cap X = \emptyset \\ (Y_{\sigma_i(1)}, \dots, Y_{\sigma_i(s-1)}) \in (2^{\otimes s})^{s-1}}} \left[\frac{\sum_{j=1}^{s-1} m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)})}{m_i(X) + \sum_{j=1}^{s-1} m_{\sigma_i(j)}(Y_{\sigma_i(j)})} \right] \quad (8)$$

其中， $\sigma_i = \begin{cases} j, j < i \\ j+1, j \geq i \end{cases}$

当最终 $m_{\text{PCRS}}(0) > m_{\text{PCRS}}(1)$ 时，则认为解码结果为 0。反之，则认为输出结果为 1。

4 系统仿真试验

本文设计的远海岛礁环境监测天波超视距接入系统，主要是解决远海岛礁电台上行信号弱的问题，而陆地海岸电台可大功率工作，加之强方向性天线，下行链路可有效覆盖远海岛礁区域。频率管理系统通过感知天波传播窗口为远海岛礁电台规划合适的工作频率。考虑到天波传播窗口逐月缓慢变化，可以通过上一个月的探测数据为下一个月提供频率规划参考，根据实际情况制定出全天各时段的工作频率。

为此，假定远海岛礁电台工作频率位于天波传播窗口内，重点对远海岛礁上行信号波形与多通道融合处理进行仿真分析，为物理层波形设计、网络层接入站点位置及数量的选择提供理论依据。

4.1 远海岛礁电台上行信号单通道仿真分析

针对远海岛礁环境监测数据的传输要求，DMFSK 波形设计参数为：符号速率 62.5 波特，空口信息速率 312.5 bit/s，信道带宽 2 000 Hz。考虑到市场现有海事电台带宽通常在 2.4 kHz 左右，上述波形满足其传输要求。

以每 5 个字节为一帧，每次连续传输 100 帧，仿真测试高斯 (Gaussian) 信道及 CCIR 推荐的 3 种典型远距离天波信道环境下的帧错误率。下面给出了 -20~ -9 dB 信噪比环境下，DMFSK 误码性能曲线如图 7 所示。

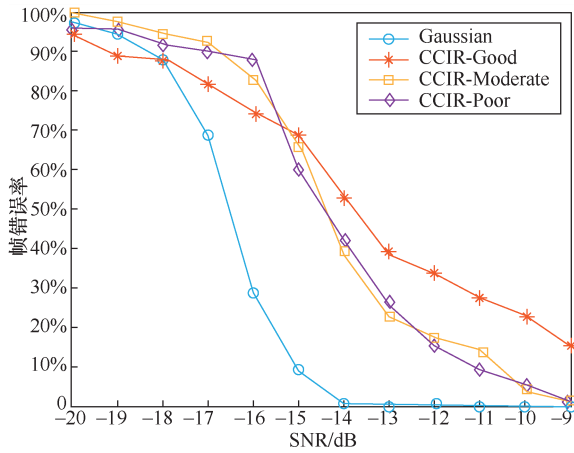


图 7 DMFSK 波形单通道传输性能仿真

可见，在 Gaussian 噪声环境下，本文提出的 DMFSK 波形能够在 -13 dB 信噪比下实现无误码传输。由于没有考虑多径及扩展衰落，Gaussian 信道的传输性能最好。CCIR-Poor 和 CCIR-Moderate 信道传输性能较为接近，在 -10 dB 信噪比下帧错误率约为 5%。

值得注意的是，CCIR-Good 信道环境下高信噪比性能反而差于 CCIR-Moderate 和 CCIR-Poor。这是由于该信道频域扩展较小，波形幅度衰落更为缓慢，衰落周期较周期帧更长，造成部分帧传输期间幅度的严重衰落，从而影响误码性能。

上述仿真表明，本文设计的 DMFSK 波形在常规的 CCIR-Poor 信道下，满足 3 000 km 距离上远海岛礁 100 W 电台 95% 的传输可靠性。但这一结果并没有考虑接入节点本地的短波频段电磁干扰，为进一步增强接入的可靠性，还需进行多通道融合接收。

4.2 远海岛礁电台上行信号多通道融合仿真分析

为便于对比分析，仿真测试过程中远海岛礁上行信号波形、帧格式、测试帧数量均保持不变。不同接入节点采用相同的信道参数配置及同样情况下的信噪比，对连续 100 帧传输数据进行误帧率统计分析。图 8~图 11 为高斯信道及 CCIR 推荐的 3 种典型天波信道下多通道融合接收的误码性能曲线。

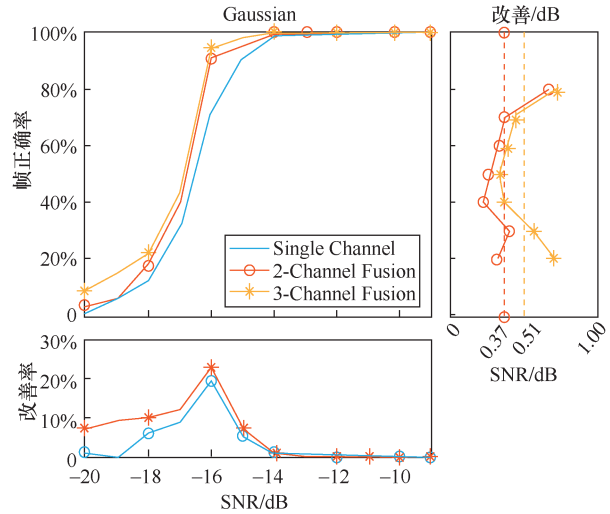


图 8 DMFSK 波形 Gaussian 信道融合传输性能仿真

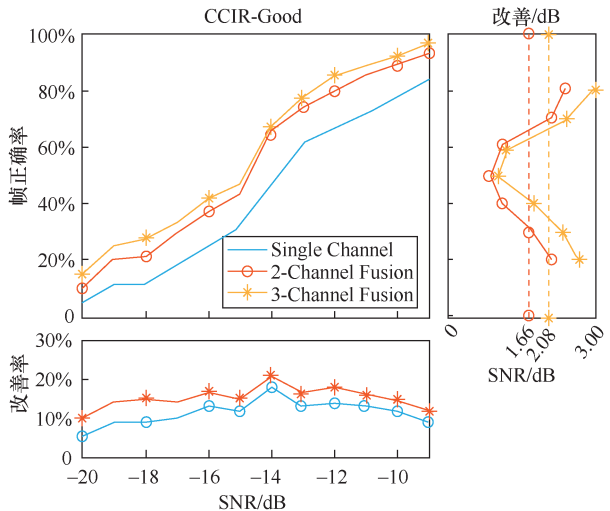


图 9 DMFSK 波形 CCIR-Good 信道融合传输性能仿真

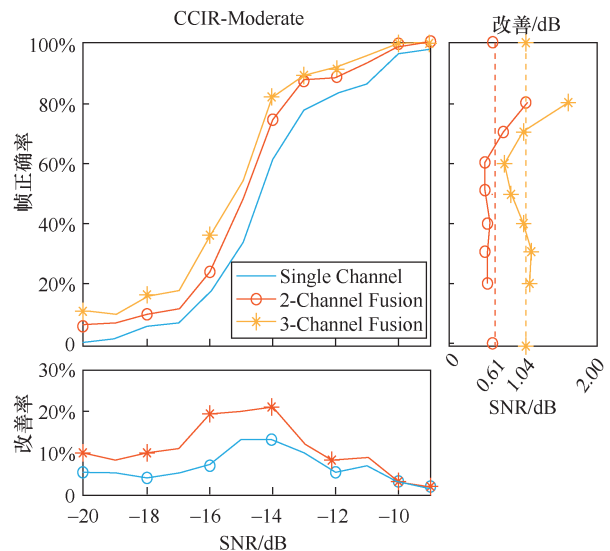


图 10 DMFSK 波形 CCIR-Moderate 信道融合传输性能仿真

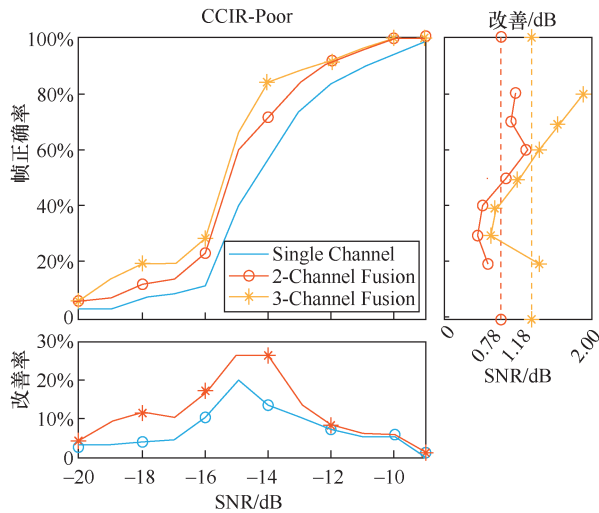


图 11 DMFSK 波形 CCIR-Poor 信道融合传输性能仿真

总体上，在不同的信道特性、不同的信噪比情况下，多通道融合接收性能较单通道均有提升。其中 CCIR-Good 信道下，多通道融合接收性能提升最为明显，3 个接入节点融合接收的性能提升最高可达 3 dB。在 CCIR-Moderate 和 CCIR-Poor 信道下的融合接收性能提升较为接近。

从仿真结果看，2 个接入节点的融合性能与 3 个接入节点的融合性能比较接近，如果进一步增加融合的节点数量，性能会有进一步提升，但是提升的效率会显著下降。3 个接入节点的融合接收性能，在常规的 CCIR-Poor 信道下，能够在 -10 dB 信噪比情况下达到 100% 的传输正确率。因此，本文设计的传输波形与融合方法，仅需要选取 3 个接入节点即可满足远海岛礁 100 W 电台 3 000 km 传输链路的可靠接入。

需要注意的是，上述仿真结果是在假定所有接入节点均有相同信噪比情况下获得的。如果各接入节点本地信噪比存在差异，则融合性能提升将更为显著。因此，接入节点之间的距离应尽可能远，以增加接入节点间信噪比的差异性。此外，为了保留一定的信噪比余量，可以考虑在靠近岛礁的陆地位置构建接入节点，进一步减少远海岛礁上行信号的传输损耗。事实上，南沙岛礁距离海南三亚只有 1 500 km，远小于本文设计的 3 000 km 传输链路。

5 结束语

本文针对远海岛礁能源受限、缺乏高可靠、低成本环境监测技术的问题，提出了一种天波超视距

接入网络技术框架，设计了链路传输波形与多通道融合算法，在典型天波信道环境下仿真分析了远海岛礁低功率电台的远程接入能力、分析论证了接入网络节点位置及数量的要求。仿真结果表明，只需选取 3 个接入节点，即可保障 3 000 km 范围内远海岛礁低功率电台的可靠接入。本文提出的天波超视距接入网络完全依托中国铁塔公司陆上广泛分布的通信基站构造接入节点、现有海岸电台直接作为发射节点，建设运营成本极低，对研究构建低成本、高可靠的远海岛礁环境监测网络提供理论与技术基础，对国家远洋船舶监测、边防交通隘口监测等也有一定的参考价值^[49]。

参考文献:

- [1] ZHANG Q, WANG Y, HAN H D, et al. Research progress of Internet of things in marine environmental monitoring[J]. Marine Technology, 2012, 31(3):86-89.
- [2] BERGADÀ P, ALSINA-PAGÈS R M, PIJOAN J L, et al. Digital transmission techniques for a long haul HF link: DSSS versus OFDM[J]. Radio Science, 2015, 49(7):518-530.
- [3] LU B, HE H J, LIU J. Research on marine environment monitoring technology based on wireless sensor network[J]. Shandong Science, 2011, 24(4):41-44.
- [4] LU J X. The influence of cyber operation on the future development of military communication[J]. Ship Science and Technology, 2012, 1:3-5.
- [5] ZHAO J. A brief talk on the data transmission of ocean island and reef navigation and maintenance[J]. Pearl River Water Transport, 2018(6): 108-109.
- [6] ZHOU B. China to strengthen protection of Nansha islands, reefs and sea areas[J]. Guangdong Shipbuilding, 2015, 34(4):87.
- [7] ZHAO H. China's white paper on military strategic national defense[J]. Information Office of the State Council, 2015, 5.
- [8] National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Commerce. The vision and action to promote the construction of the silk road economic belt and the maritime silk road in twenty-first century[S]. 2015.
- [9] MARK J B, CORNELIS H S, ROEL S. Near vertical incidence skywave propagation: elevation angles and optimum antenna height for horizontal dipole antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 2(2):156-167.
- [10] HUANG Q L, HUANG Y. Discussion on video surveillance system of island and reef waters based on wireless network[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2017(4):37-39.
- [11] JU M G, LIU S L. Technical analysis of shortwave global communication system in US air force[J]. Communication Technology, 2013, 46(7):96-98.
- [12] ZHANG Q. Design and implementation of sensor network system for island parameter monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [13] ZHAN J, LIU H L, ZHANG J. Research on wireless sensor network

- technology for complex environment monitoring[J]. *Communication Journal*, 2014, 35(10):224.
- [14] YAO F Q. Communication anti-jamming engineering and practice[J]. Electronic Industry Publishing House, 2012, 1(2):73-85.
- [15] TIAN J F, CUI Y Q. Application of beidou satellite navigation system in the construction of islands and reef in the far sea[J]. *China Harbour Construction*, 2014(7):1-3.
- [16] XU Q, LIU W, GAO F, et al. Development of tropical island and reef marine pasture in the South China sea-opportunity, present situation and prospect[J]. *Advances in Fisheries Science*, 2018, 6(2):51-58.
- [17] KONG W Q, YANG Z Y, MA S C, et al. Design of multi-parameter anchorage buoy based on beidou communication[J]. *Sensors and Microsystems*, 2016, 35(7):80-82.
- [18] WANG J L. Research and practice of HF digital communication[M]. Beijing: Science Publishing House, 2013.
- [19] HU Z Y. Modern shortwave communication[M]. Beijing: Defense Industry Publishing House, 2004.
- [20] VILELLA C, MIRALLES D, PIJOAN J L. An antarctica-to-spain HF ionospheric radio link sounding results[J]. *Radio Science*, 2016, 43(4).
- [21] PERKIOMAKI J. HF propagation prediction and ionospheric communications analysis[S]. 2015.
- [22] ZHU Y C, LU J X. Performance of dynamic spectrum anti-jamming system under partial band interference[J]. *Journal of Electronics*, 2011, 10:2331-2337.
- [23] LU Y L. Island and reef information system[J]. *Chinese Radio*, 2015(8):8-9.
- [24] CAO Y F, LAN H, HUANG Y Y. Application of multi-parameter water quality tester in marine environmental pollution emergency monitoring[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(8): 62-64.
- [25] YAN X Y, YANG B F, MA S C. Hardware design of meteorological and hydrological floating buoy collector based on MSP430[J]. *Journal of Chengdu University of Information Engineering*, 2017, 32(1):28-34
- [26] LI Q. OFDM technology and its application in shortwave communication[J]. *China New Channel*, 2017, 19(16):158-162.
- [27] CAO X, LIU Y, CAO L. Application and development of marine ecological environment monitoring sensor[J]. *Journal of Marine Technology*, 2015, 34(3):48-53.
- [28] QI S B, WU X Y. Ocean station monitoring system based on 6LoWPAN[J]. *Journal of Marine Technology*, 2017, 36(6):38-43.
- [29] ADS A G, BERGADÀ P, VILELLA C, et al. A comprehensive sounding of the ionospheric HF radio link from Antarctica to Spain[J]. *Radio Science*, 2013, 48(1):1-12.
- [30] TANG J, JI S Y. Short-term prediction method of ionospheric assimilation in HF communication frequency selection[J]. *Journal of Radio Science*, 2013, 28(3):498-504.
- [31] HERVÁS M, J L PIJOAN R M, ALSINA-PAGÈS R M, et al. Single-carrier frequency domain equalisation proposal for very long haul HF radio links[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(17):1252-1254.
- [32] YAN Z W, ZHANG L L, RAHMAN T, et al. Prediction of the HF ionospheric channel stability based on the modified ITS model[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(6): 3321-3333.
- [33] FURMAN W N, NIETO J W. Latest on-air testing of U.S. MIL-STD-188-110C appendix D wideband HF data waveforms[C]// *Let International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques*. IEEE, 2012:58-58.
- [34] ZHEN Z F, LIU Y M. State query design of dynamic frequency management system in shortwave network[J]. *Journal of Radio Science*, 2013, 28(3):467-471.
- [35] LI X. Research on topology optimization of high reliability marine wireless sensor networks[D]. Dalian: Maritime Affairs University of Dalian, 2017.
- [36] UYSAL M, HEIDARPOUR M R. Cooperative communication techniques for future-generation HF radios[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(10):56-63.
- [37] WILSON J M. A low power HF communication system[J]. University of Manchester, 2012.
- [38] XU S Z, YANG H Z, WANG H. An application of DAPSK in HF communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(7):613-615.
- [39] ZHENG W Q. Research on signal energy intensity prediction method based on chirp detection data[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [40] YANG B P, CHEN Y G. Modeling and simulation of shortwave multi-tone parallel subcarrier jump anti-jamming communication[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2011, 33(4): 1002-1006.
- [41] YOU X Y, YANG P, XU B B, et al. DFT frequency offset estimation algorithm in HF burst communication[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(4):1-5.
- [42] LU J X. Information countermeasure and intelligent wireless communication[J]. *Modern Military Communication*, 2012:1-6.
- [43] ZHAO Z G. Practice of information fusion engineering: technology and method[M]. Beijing: Defense Industry Publishing House, 2015.
- [44] PALÀ-SCHÖNWÄLDER P, BONET-DALMAU JI, LÓPEZ-RIERA A. Superregenerative reception of narrowbandFSK modulations[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers*, 2015, 62(3): 139-145.
- [45] ZENG F X, ZENG X P, ZHANG Z Y, et al. New polyphase complementary sequence sets for wireless communication systems[J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2014, 7(1): 147-156.
- [46] ZENG F X, ZHANG Z Y. Two conversion formulas of known optimal sequences[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015: 713-715.
- [47] BERGAD A P, DEUMAL M, ALSINA R M, et al. Time interleaving study for an OFDM long-haul HF radio link[C]//*The Institution of Engineering and Technology, International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques*. IET, 2009:1-4.
- [48] ZENG F, ZENG X, ZENG X, et al. Several types of sequences with optimal autocorrelation properties[J]. *Ieice Transactions on Fundamentals of Electronics Communications & Computer Sciences*, 2013, 96(1):367-372.
- [49] YAO S J. Preliminary study on strengthening the construction of air force ground-to-air communication network[J]. *Air Force Communication Academic*, 2012(4):52-54.

[作者简介]



李国军（1978-），男，博士，陆军工程大学通信士官学校副教授、硕士生导师，主要研究方向为战术无线通信与网络、信号融合检测与处理等。



张德平（1985-），男，陆军工程大学通信士官学校讲师，主要研究方向为战术无线通信、微弱信号检测与处理等。



徐小飞（1990-），男，陆军工程大学通信士官学校硕士生。



谭露（1994-），男，陆军工程大学通信士官学校硕士生。



叶昌荣（1989-），男，博士，重庆邮电大学讲师，主要研究方向为无线通信、信号融合检测与处理等。



邢亚坤（1981-），女，陆军工程大学通信士官学校讲师，主要研究方向为无线通信。