

6-16-2022

## A High Spectral-efficiency Maritime Very-High-Frequency Communication Technology and Simulation

Xinyu Dou

*1.College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China,;*  
xydoudlmu@163.com

Xiaohui Chen

*1.College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Dequn Liang

*1.College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Bin Lin

*1.College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;2.Network Communication Research Centre, Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518052, China,;*  
binlin@dlnu.edu.cn

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# A High Spectral-efficiency Maritime Very-High-Frequency Communication Technology and Simulation

## Abstract

**Abstract:** Marine communications cannot follow the development route on land of developing high frequency resources and high spectral-efficiency modulation technologies in 5G and 6G high-speed communication. The data rate and spectral-efficiency of maritime communications are low and are difficult to be improved. *A high spectral-efficiency maritime very-high-frequency (VHF) communication technology based on multi-carrier time-delay overlapping modulation (MC-TDOP) is proposed.* The core is delaying the subcarriers in turn and directly overlapping them in time domain. The orthogonality between the subcarriers can be neglected, thus the spectral-efficiency can be further enhanced from the fundamental information modulations. *The results show that the proposed technology can achieve the maritime peak data rate of 307.2 kbps with only 1/5 VHF spectral bandwidth occupation.* The results are of great significance to the evolution of the future maritime information system.

## Keywords

maritime communication technology, multi-carrier time-delay overlapping modulation (MC-TDOP), communication rate, very-high-frequency(VHF), spectrum efficiency

## Recommended Citation

Xinyu Dou, Xiaohui Chen, Dequn Liang, Bin Lin. A High Spectral-efficiency Maritime Very-High-Frequency Communication Technology and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(6): 1208-1218.

## 一种高谱效海上甚高频通信技术及其仿真研究

窦欣宇<sup>1</sup>, 陈晓辉<sup>1</sup>, 梁德群<sup>1</sup>, 林彬<sup>1,2\*</sup>

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026; 2. 鹏程实验室网络通信研究中心, 广东 深圳 518052)

**摘要:** 为解决海上通信无法沿用陆上5G、6G高速通信中开发高频资源与高谱效调制技术的发展路线, 导致其速率与频谱效率性能较差, 提升缓慢的问题。提出了一种基于多载波延时重叠调制的高频谱效率海上甚高频通信技术, 将符号内的各个子载波在时域上进行依次延时并直接叠加, 使频率子信道摆脱正交性束缚, 从底层信息调制角度进一步提升频谱利用率。仿真结果表明: 该技术可在仅占据海上甚高频频谱资源1/5的情况下实现当下海上数据传输峰值为307.2 kbps的速率, 对于海上通信的发展具有重要意义。

**关键词:** 海上通信技术; 多载波延时重叠调制; 通信速率; 甚高频; 频谱利用率

中图分类号: TP391; TN92

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)06-1208-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0089

## A High Spectral-efficiency Maritime Very-High-Frequency Communication Technology and Simulation

Dou Xinyu<sup>1</sup>, Chen Xiaohui<sup>1</sup>, Liang Dequn<sup>1</sup>, Lin Bin<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Network Communication Research Centre, Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518052, China)

**Abstract:** Marine communications cannot follow the development route on land of developing high frequency resources and high spectral-efficiency modulation technologies in 5G and 6G high-speed communication. The data rate and spectral-efficiency of maritime communications are low and are difficult to be improved. A high spectral-efficiency maritime very-high-frequency (VHF) communication technology based on multi-carrier time-delay overlapping modulation (MC-TDOP) is proposed. The core is delaying the subcarriers in turn and directly overlapping them in time domain. The orthogonality between the subcarriers can be neglected, thus the spectral-efficiency can be further enhanced from the fundamental information modulations. The results show that the proposed technology can achieve the maritime peak data rate of 307.2 kbps with only 1/5 VHF spectral bandwidth occupation. The results are of great significance to the evolution of the future maritime information system.

**Keywords:** maritime communication technology; multi-carrier time-delay overlapping modulation (MC-TDOP); communication rate; very-high-frequency(VHF); spectrum efficiency

### 引言

海洋承载了全球90%以上的贸易活动, 同时

也是关乎国家安全与领土完整的重要领域。进入21世纪以来, 世界各国开始聚焦海洋领域发展,

收稿日期: 2021-01-29 修回日期: 2021-04-16

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0111600); 国家自然科学基金(62001077, 61801074, 61971083, 51939001); 中国博士后科学基金面上项目(2019M661075); 大连科技创新基金(2019J11CY015)

第一作者: 窦欣宇(1987-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新型数字调制技术、混沌保密通信技术等。E-mail: xydoudlmu@163.com

通讯作者: 林彬(1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向为海上无线通信与网络技术、大规模网络规划与优化、网络资源分配、云/雾计算、智能算法与海事时空数据挖掘等。E-mail: binlin@dmlu.edu.cn

我国也相继提出了“建设海洋强国”、“一带一路”等多项海上发展战略。同时, 海事活动已不再仅限于传统的航行管控, 而是发展为多维度交叉融合的海事生态系统, 覆盖交通、娱乐、医疗、搜救乃至国防等多种场景, 这对海上信息系统提出了更高的要求, 尤其是对海上信息传输速率的需求空前高涨。为了确保国家战略的稳步推进以及海事活动的高效运转, 海上信息化建设势在必行, 构建海上高速通信系统对于改善海上通航体验、提高海上作业效率、加速海上战略实施, 甚至维护国家海洋权益等都具有重要的现实意义和长远的战略意义。

海上宽带通信系统建设已经提上日程。2013年, 灯塔协会已正式确认, 将第一代海事通信系统——船舶自动身份识别系统 (automatic identification system, AIS) 升级为甚高频数据交换系统 (very high frequency data exchange system, VDES)<sup>[1-4]</sup>。该系统基于扩展的甚高频频段, 将原有的AIS业务扩充为AIS、特殊报文服务, 以及甚高频数据交换3种业务。根据M.1842-1标准, 该系统最高可支持100 kHz的通信带宽, 带宽内采用32个子信道进行多载波通信, 峰值速率可达307.2 kbps<sup>[5]</sup>。同时, 有学者提出将空天地一体化网络引入海洋, 形成“空天地海一体化”立体式通信网络, 借助成熟、高速的卫星通信网络与地面通信网络赋能海上通信网<sup>[6]</sup>。此外, 亦有研究指出可将现有成熟地面通信技术, 如正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术引入海上通信系统以进一步提升现有海上通信系统的数据传输速率<sup>[7-8]</sup>。然而, 迄今为止, 各个通信技术仍存在亟待解决的问题。首先, VDES的频谱利用率仍然不高, 其多载波系统的子载波频率间隔高于正交频分复用的频率间隔, 导致甚高频频谱资源无法被高效利用, 并且其峰值通信速率仍然无法满足实时视频传输对于通信速率的要求; 第二, 正交频分复用技术对于频率正交性要求较高, 导致其在面对海事卫星高速移动引发的高频偏场景时, 需要更多额外的信号处理步骤,

同时其覆盖范围较小; 最后, “空天地海一体化”网络虽可改善海上通信现状, 但卫星通信价格昂贵、地面通信系统覆盖距离有限, 导致船舶在远洋仍然只能依靠低速甚高频通信系统。综上所述, 海上甚高频通信系统速率不高的痛点迄今为止仍未得到解决, 海上甚高频通信速率瓶颈限制了“空天地海一体化”网络的进一步推进, 因此急需研究一种新的可高效利用海上甚高频频谱资源的海上通信技术。

本文提出一种基于多载波延时重叠调制的海上甚高频高速通信技术, 并针对该技术在海上通信信道中的性能展开数值仿真研究与分析讨论。

## 1 多载波延时重叠调制技术原理

### 1.1 技术原理

本课题组前期已针对多载波延时重叠调制技术 (multi-carrier time-delay overlapping modulation, MC-TDOP) 开展研究<sup>[9-12]</sup>, 其核心思想为: 将一个通信符号内的多个子载波 (如正弦波) 在时域上进行一定量的延时, 并在对各个子载波进行幅度调制之后直接叠加形成通信符号, 通信符号的结构示意图如图1所示。可看出, 与现有的典型多载波通信技术的最大不同之处在于, 在MC-TDOP符号内, 各个子载波在时域上均相对于符号起点存在一定量的延时。

该通信符号的数学表达式为

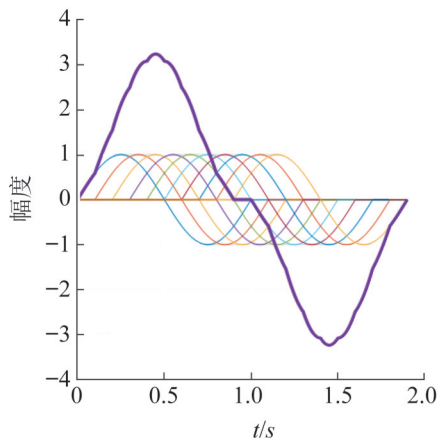
$$S(t) = \sum_{i=1}^N a_i s_i(t - \tau_i) \quad (1)$$

式中:  $a_i$  为第  $i$  个子载波的调制幅度, 由待传输的二进制信息映射得到;  $\tau_i$  为第  $i$  个子载波相对于符号起点的延时。

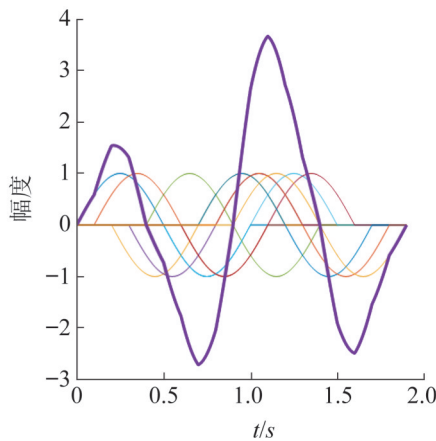
式(2)为符号内第  $i$  个子载波, 其形式可以为正弦波、余弦波、三角波等:

$$s_i(t) = \begin{cases} \sin(\omega_i t), & t \in T_i \\ 0, & t \in T_i \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  个子载波的持续时间, 成为“有效期”, 如图1所示;  $\omega_i$  为第  $i$  个子载波的角频率。



(a) 未调制MC-TDOP符号



(b) 已调制MC-TDOP符号

图1 MC-TDOP 符号构造示意图  
Fig. 1 Symbol of the MC-TDOP

由于各个子载波在时域上存在延时，导致这种调制技术无法采用快速傅里叶变换进行解调，但这种调制技术可采用相干运算的方式对所有调制幅度进行提取。以背对背通信为例，描述 MC-TDOP 的具体的解调方案。

系统接收端接收到的信号为

$$r(t) = \sum_{i=1}^N a_i s(t - \tau_i) = a_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \sin(\omega_2(t - \tau_2)) + \dots + a_N \sin(\omega_N(t - \tau_N)) \quad (3)$$

这里忽略了信道中的噪声。

在接收端用第一个子载波与接收信号进行相干运算：

$$G_1 = \int_0^T r(t) \cdot \sin(\omega_1 t) = \int_0^T a_1 \sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_1 t) + \int_0^T a_2 \sin(\omega_2(t - \tau_2)) \cdot \sin(\omega_1 t) + \dots + \int_0^T a_N \sin(\omega_N(t - \tau_N)) \cdot \sin(\omega_1 t) = r_{11} a_1 + r_{12} a_2 + \dots + r_{1N} a_N \quad (4)$$

式中： $T$  为 MC-TDOP 通信符号的持续时间； $r_{11} = \int_0^T \sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_1 t)$ ； $r_{12} = \int_0^T \sin(\omega_2(t - \tau_2)) \cdot \sin(\omega_1 t)$ ，以此类推。可看出，对于 MC-TDOP 系统，一次相干运算无法得到所有的调制幅度，而是得到一个关于所有调制幅度的线性方程。

同样地，用第 2 个子载波与接收信号进行相干运算，如式(5)所示，运算结果的形式与式(4)相似，为关于所有调制幅度的线性方程。

$$G_2 = \int_0^T r(t) \cdot \sin(\omega_2(t - \tau_2)) = \int_0^T a_1 \sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_2(t - \tau_2)) + \int_0^T a_2 \sin(\omega_2(t - \tau_2)) \cdot \sin(\omega_2(t - \tau_2)) + \dots + \int_0^T a_N \sin(\omega_N(t - \tau_N)) \cdot \sin(\omega_2(t - \tau_2)) = r_{21} a_1 + r_{22} a_2 + \dots + r_{2N} a_N \quad (5)$$

以此类推，在接收端用所有子载波与接收信号进行相干运算，可得到线性方程组

$$\mathbf{R}\mathbf{A} = \mathbf{G} \quad (6)$$

其中， $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & r_{NN} \end{bmatrix}$ ， $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ ，

$\mathbf{G} = [G_1, G_2, \dots, G_N]^T$ 。向量  $\mathbf{A}$  代表各个子载波的调制幅度，即待传输的信息，也就是方程组的解。矩阵  $\mathbf{R}$  亦可以在接收端通过本地子载波计算得到。因此，各个子载波的调制幅度可通过求解线性方程组的方法得到：

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G} \quad (7)$$

### 1.2 技术优势

多载波延时重叠调制技术具有比正交频分复

用技术更高的频谱利用率。由于该技术采用求解线性方程组的方式进行解调, 因此不再严格要求子载波频率之间的正交性。这意味着各个频率子信道之间的频率间隔将可以设置得更窄。图2给出了VDES频率子信道、OFDM频率子信道以及MC-TDOP技术的频率子信道分布。可看出, 根据ITU-R M. 1842-1标准, VDES系统中的各个频率子信道频率间隔为2.7 kHz, 频率子信道之间并不正交, 因此频谱利用率有待提升; 正交频分复用(OFDM)技术是当下频谱利用率最高的多载波通信技术, 若将OFDM技术应用于海上甚高频通信, 频率子信道间隔应为2.4 kHz。而从图2(c)可看出, 多载波调制技术可将频率子信道间隔进一步缩窄, 因此可以更好地利用频谱资源, 尤其对于海上通信等频谱资源极其紧张的通信场景而言, 该技术将进一步提升通信速率与频谱利用率, 从而提供更优质的服务。

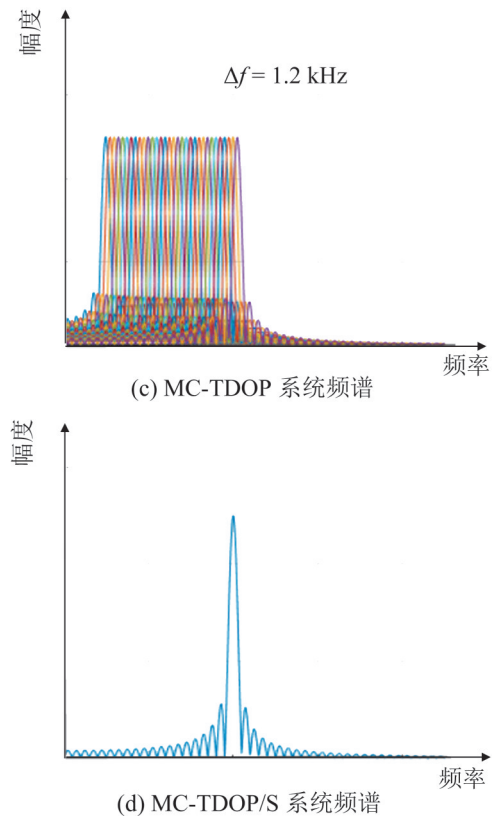
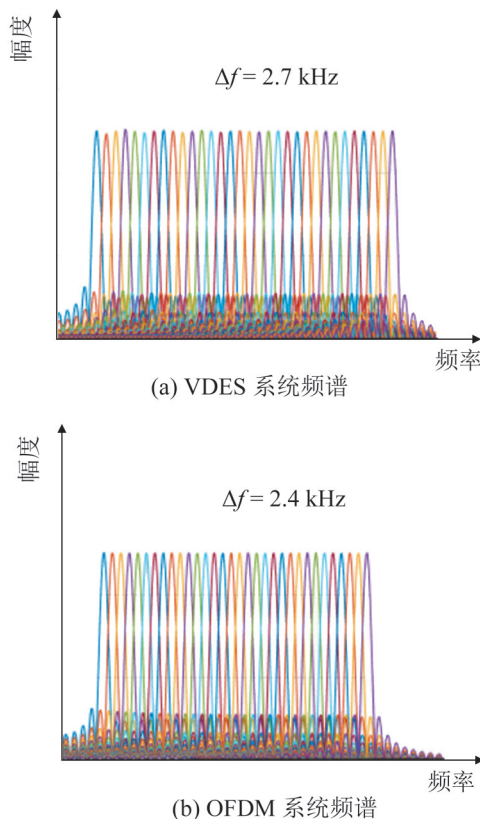


图2 多载波调制技术的频谱利用率示意图  
Fig. 2 Spectrum of multi-carrier technologies

值得一提的是, 当符号内子载波频率全相同时, 即  $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_N$  时, 系统可简称为 MC-TDOP/S, 可看作是 MC-TDOP 技术的一种特例。MC-TDOP/S 的频谱如图 2(d) 所示。可看出, 无论符号内叠加多少个子载波, 整个符号的主瓣频带宽度都与构成符号的子载波的主瓣频带宽度相同。从多载波通信的角度来看, 整个通信符号仅占用一条频率子信道。因此, 只要系统采样率允许, 符号内可以叠加任意数量的子载波并保证符号的频带宽度不变, 具有更高的单子信道频谱利用率。

### 1.3 系统误码率分析

与传统多载波技术不同, MC-TDOP 技术的解调过程属于一种“求解线性方程组”的过程, 即符号内各个子载波的调制幅度是通过求解式(4)所代表的线性方程组得到的。众所周知, 影响线性方程组数值解的重要因素是方程组的病态性。病

态性越高，方程组的数值解与真实解的偏差就越大，对于 MC-TDOP 系统而言，病态性越高，误码率越高。造成方程组病态性的因素很多，符号构造时子载波的形式和数目、调制幅度的选取、信道内的噪声以及多径干扰、接收端带通滤波器等都会导致方程组受到扰动，产生病态，进而产生误码。尤其是海上通信信道特征与陆上通信信道不同，频谱利用率很难提高，因此，在系统设计时，应充分根据海上通信信道的具体特征，选取合适的符号构造参数，以达到降低方程组病态性、提高数据传输正确率的目的。

## 2 系统数值仿真与性能分析

### 2.1 系统数值仿真参数

根据 M.1842-1 标准，海上甚高频频段的通信信道带宽可划分为 25、50、100 kHz 3 种情况，其中 100 kHz 带宽采用 32 个频率子信道进行多载波通信，各个子信道频率间隔为 2.7 kHz，采用 16QAM 调制技术，每符号携带  $32 \times 4 = 128$  bit 数据，符号速率 2 400 symbol/s，峰值数据传输速率  $128(\text{bit/symbol}) \times 2\,400(\text{symbol/s}) = 307.2 \text{ kbps}^{[5]}$ 。需要强调的是，该标准中指出，选择符号速率为 2 400 symbol/s 的原因是为了获得较长的符号持续时间，用于对抗海上通信信道的多径符号间干扰。AIS 系统则采用 4 800 symbol/s 的符号速率达到同样的目的。将新型多载波调制技术的符号速率设定为 4 800 symbol/s，并在此基础上讨论所提出的新型多载波调制技术的符号构造方法以及通信性能。所有仿真工作均基于 MATLAB 完成。

### 2.2 海上通信信道模型

海上状况良好时，海上通信收发机之间的信道可认为是加性高斯白噪声信道。然而，当海面因海风存在起伏，且收发机亦因海浪存在上下振动时，电磁波信号除了受到高斯白噪声的影响之

外，还经历了如镜面反射与漫反射等反射造成的多径时延，如图 3 所示。镜面反射路径可以认为只有一条，但漫反射点由于海面风浪与海上气候对海平面的影响而随机分布于镜面反射点周围，形成“有效反射区域”，因此必须确定漫反射在有效区域内对信号传输造成的时延范围<sup>[13-15]</sup>。根据 M.1842-1 标准，100 kHz 海上信道环境中的反射主要包含在符号的前 10.4 μs 中，但也有极端情况的反射发生在 50 μs 处。文献[8]给出了岸基天线高 80 m、船载天线高 25 m、且海情级为 4 级时的最大时延为 46.284 8 μs。因此，分别分析 2 种海上通信信道，即单径加性高斯白噪声信道以及包括镜面反射与漫反射路径的海上多径信道下的 MC-TDOP 通信技术的性能。反射路径设置为 3 路：漫反射路径 2 路，造成的时延分别取最大值 50 μs 和最小值 10 μs；镜面反射 1 路，其造成的传播时延可忽略不计。

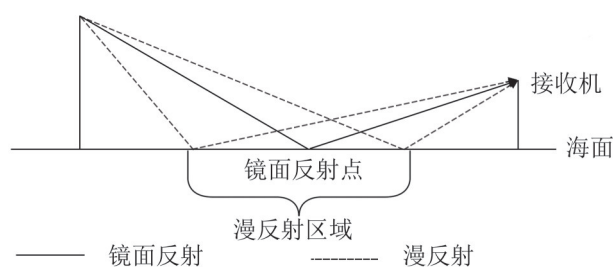


图 3 海上无线通信信道示意图  
Fig. 3 Scheme of wireless communication channel of maritime environment

仿真流程如下：

- step 1: 产生随机二进制比特流，作为待传输的信息比特；
- step 2: 根据格雷码编码规则，以及 MC-TDOP 各个子载波携带的比特数，对二进制比特流进行编码，将二进制比特流转换为模拟调制幅度；
- step 3: 根据图 1 和式(1)完成信号调制与 MC-TDOP 符号形成；
- step 4: 所形成的 MC-TDOP 符号经过海上通信信道；

step 5: 根据式(7)对调制幅度进行解调, 并再次根据格雷码编码规则将解调后的模拟幅度转换为二进制比特;

step 6: 与 step 1 的二进制比特流进行比较, 计算误码率。

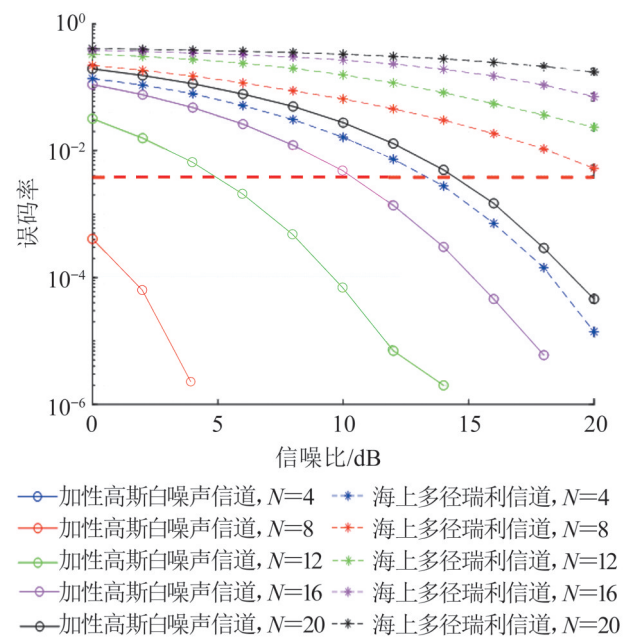
## 2.3 通信性能分析

### 2.3.1 海上MC-TDOP通信性能

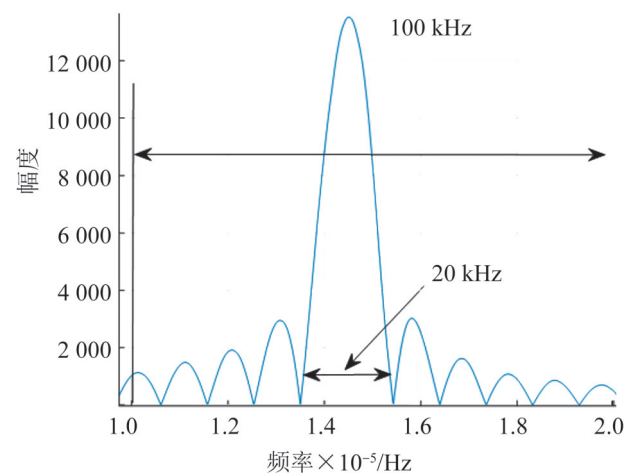
以 MC-TDOP/S 为例, 系统分析海上 MC-TDOP 技术的频谱利用率与通信速率。根据 1.3 节所述, 决定 MC-TDOP 技术通信速率与频谱利用率的参数包括符号内子载波数以及各个子载波携带的比特数。因此, 首先对上述 2 个参数对系统通信速率以及通信性能的影响展开研究。图 4 给出了在子载波携带 2 bit 情况下, 不同子载波数目的 MC-TDOP/S 在加性高斯白噪声信道以及海上多径信道下的通信性能曲线, 子载波形式为如图 1 所示的单周期正弦波。图 4 中红色横虚线代表前向纠错编码(forward error correction, FEC)的误码率阈值  $3.8 \times 10^{-3}$ 。可看出, 在海面状况良好, 即海上通信信道呈现加性高斯白噪声信道特性时, MC-TDOP/S 技术的通信性能较好, 如图 4(a)中的实线所示。例如, 在信噪比 20 dB 情况下, 符号内子载波数目  $N=20$  时, MC-TDOP/S 技术误码率低于  $10^{-4}$ , 达到采用 FEC 的条件。此时, MC-TDOP/S 的符号速率为  $20 \times 2 = 40$  bit/symbol, 通信速率为

$$40 \text{ bit/symbol} \times 4800 \text{ symbols/s} = 192 \text{ kbps} \quad (8)$$

该速率远大于 16QAM 在一个子信道中的频谱利用率。同时, 当符号内  $N=4$  时, MC-TDOP/S 具有很强的抗噪声能力, 在低信噪比情况(如 0 dB)下仍可达到低于  $10^{-6}$  的误码率。此时的通信速率为  $(4 \times 2) \text{ bit/symbol} \times 4800 \text{ symbol/s} = 38.4 \text{ kbps}$ 。当海上通信信道受风浪等因素影响而表现为多径信道时, MC-TDOP/S 的通信性能开始降低, 仅当  $N=4$  时的 MC-TDOP/S 在信噪比 20 dB 下的误码率低于  $10^{-4}$ , 其他情况下的误码率均超过了 FEC 阈值。



(a) MC-TDOP/S 通信性能



(b) MC-TDOP/S 符号频谱

图 4 子载波携带 2 bit 时的 MC-TDOP/S 通信性能  
Fig. 4 Performance of the MC-TDOP/S when the subcarrier carries 2 bit

根据 MC-TDOP 的技术原理, MC-TDOP/S 符号由同频率正弦波经过时域延时并直接叠加而成, 因此通信符号的频谱与子载波的频谱相同。从图 4 (b) 可看出, 根据选取的系统仿真参数, MC-TDOP/S 频谱的主瓣宽度约为 20 kHz, 为 VDES 系统最大频带宽度—100 kHz 的 1/5, 因此该技术的频谱利用率要高于 VDES 所采用的多载波调制技术。



由于 MC-TDOP 技术的误码性能主要取决于方程组的病态性，而方程组的病态性与子载波形式紧密相关，因此若继续提升 MC-TDOP 的误码性能，就要改变子载波形式。在图 4 所描述的通信系统中，子载波形式为单周期正弦波，那么改变子载波形式的途径有 2 个：①改变子载波的周期；②将正弦波改为余弦波。首先，图 5 给出了不同子载波周期下的 MC-TDOP 在海上多径信道下的误码性能，子载波形式为正弦波。在图 5 中，除了子载波周期有区别外，其余系统参数均与图 4 相同。从图 5 可看出，当子载波周期数增加时，MC-TDOP 的性能开始提升，对于符号内  $N=8, 12, 16$  的情况，MC-TDOP/S 在海上多径信道中的误码率都已低于  $3.8 \times 10^{-3}$  (20 dB 信噪比)，且子载波周期数越高，MC-TDOP/S 系统的误码率越低。值得一提的是，对于符号内  $N=20$  的情况，子载波周期

数等于 20 时，误码率开始升高，在 0~20 dB 信噪比范围内，误码率均高于其他子载波周期数。可见子载波周期数存在最优值。图 6 给出了在 20 dB 信噪比下不同子载波周期的 MC-TDOP/S 在海上多径信道下的误码率。可看出，当子载波周期为 1，即子载波为单周期正弦波时，MC-TDOP/S 系统的误码率较高，尤其是当符号内  $N > 20$  的情况， $N$  越大，误码率越高。子载波周期被提高后，系统误码率迅速下降。可看出，对于所有的  $N$  值，最优子载波周期数普遍分布于 [10, 20] 区间内。在此区间内，即使当符号内  $N=32$  时，系统误码率仍维持在  $10^{-4}$  附近，低于 FEC 阈值。此时的通信速率为

$$(32 \times 2) \text{ bit/symbol} \times 4800 \text{ symbol/s} = 307.2 \text{ kbps} \quad (9)$$

已达到 VDES 峰值速率，具有极高的频谱利用率。因此，提高子载波周期数可作为提升 MC-TDOP/S 系统通信速率的有效方法之一。

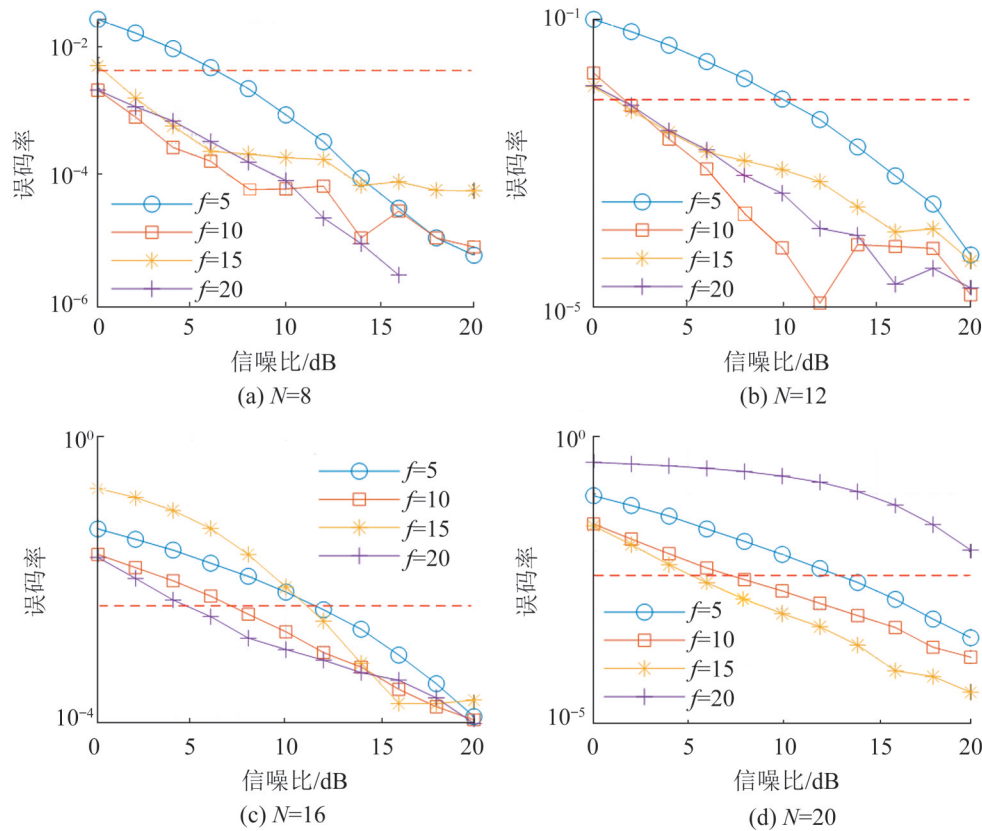
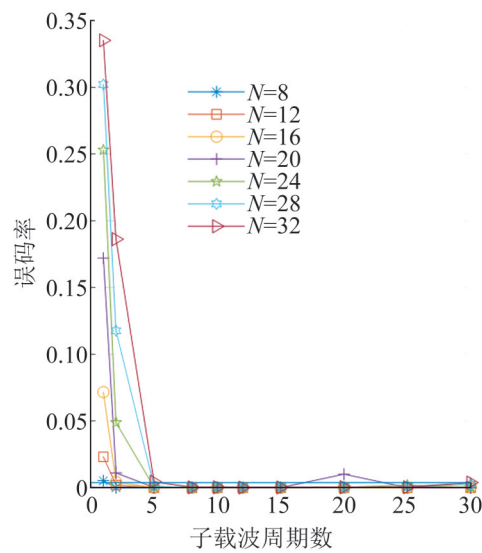
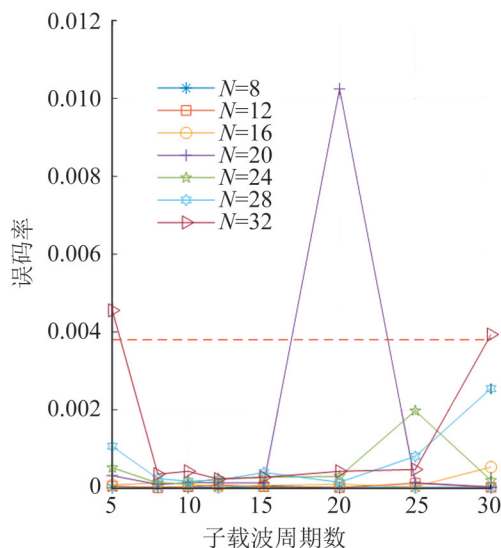


图 5 不同子载波周期下的 MC-TDOP/S 系统误码率曲线  
Fig. 5 BER curves of MC-TDOP/S with different periods of subcarriers



(a) 原图



(b) 局部放大

图6 20 dB信噪比下不同子载波周期下的MC-TDOP/S系统误码率

Fig. 6 BER of MC-TDOP/S with different period of subcarriers under 20 dB SNR

将子载波形式由单周期正弦波改为单周期余弦波时, MC-TDOP/S系统的通信性能如图7所示。可看出, 余弦波形式的MC-TDOP/S的抗噪声性能以及抗多径干扰的性能要优于正弦波形式。在加性高斯白噪声信道中,  $N=4, 8, 12$ 时在信噪比0~20 dB时的误码率均小于 $10^{-6}$ ;  $N=16$ 和20时, 当信噪比高于4 dB时, 误码率也低于 $10^{-6}$ 。对于海上多径信道情形, 余弦波形式的MC-TDOP/S的

通信质量在高信噪比时优于正弦波形式, 对于所有的 $N$ 在20 dB信噪比时的误码率均低于FEC阈值。由此可见, 将正弦波改为余弦波, 是另一种提高MC-TDOP/S系统性能的手段。

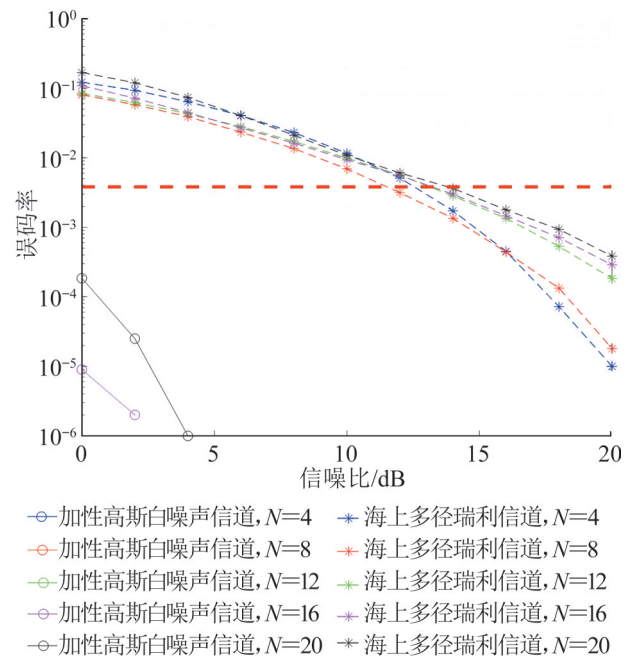


图7 子载波携带2 bit时的MC-TDOP/S通信性能

Fig. 7 Performance of the MC-TDOP/S when the subcarrier carries 2 bit

同样地, 图8给出了子载波为余弦波形式时, 不同的子载波周期数对各种MC-TDOP/S系统误码率的影响。可看出, 与图6不同, 余弦波形式的MC-TDOP/S在子载波周期数较低时, 所有 $N$ 值下的MC-TDOP/S均可以得到较低的误码率。这再一次验证了余弦波形式的MC-TDOP/S符号具有很强的抗噪声性能。在子载波周期数较高时, 对于 $N$ 值较高的情况, 如 $N=28$ 和32时, 误码率会有明显的上升。因此, 对于余弦波形式的MC-TDOP/S, 为得到较低的误码率, 可将子载波周期数取在区间[0, 5]之内。同时, 当子载波周期等于20时, 除 $N=20$ 之外, 其他取值下系统仍能达到较低的误码率。

### 2.3.2 海上MC-TDOP通信速率

MC-TDOP技术最显著的特征之一就是较高的

频谱利用率以及通信速率。将最高速率的标准选取为采用蒙特卡罗算法仿真  $10^6$  个 bit，且不采用纠错编码情况下达到误码率低于  $3.8 \times 10^{-3}$  时所能达到的最高速率。

图 9 分别给出了子载波携带 3 bit 和 4 bit 情况下，不同子载波数目以及不同子载波周期下的 MC-TDOP/S 通信性能曲线。可看出，对于子载波携带 3 bit 和 4 bit 的情况，正弦波与余弦波形式的 MC-TDOP/S 系统的通信性能非常接近，最靠近 FEC 阈值的最大符号内  $N$  值均为 16。因此，MC-TDOP/S 在海上多径信道下的最高数据传输速率为

$$(16 \times 4) \text{ bit/symbol} \times 4800 \text{ symbol/s} = 307.2 \text{ kbps} \quad (10)$$

已经达到当下 VDES 标准中所规定的峰值速率。然而，MC-TDOP/S 的频谱主瓣所占据的频带宽度仅为 20 kHz，相当于 VDES 最大带宽 100 kHz 的

1/5，因此，MC-TDOP/S 具有极高的频谱利用率，若在 100 kHz 内复用多路 MC-TDOP/S 信号，可将海上甚高频频段的通信速率成倍提升。

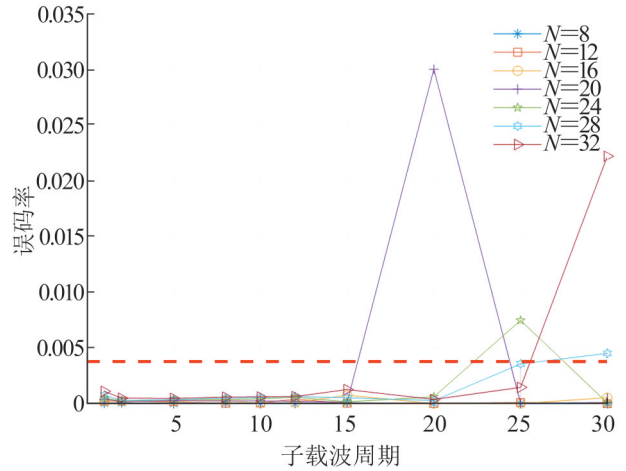


图 8 不同子载波周期下的 MC-TDOP/S 系统误码率(20 dB 信噪比)  
Fig. 8 BER of MC-TDOP/S with different period of subcarriers under 20 dB SNR

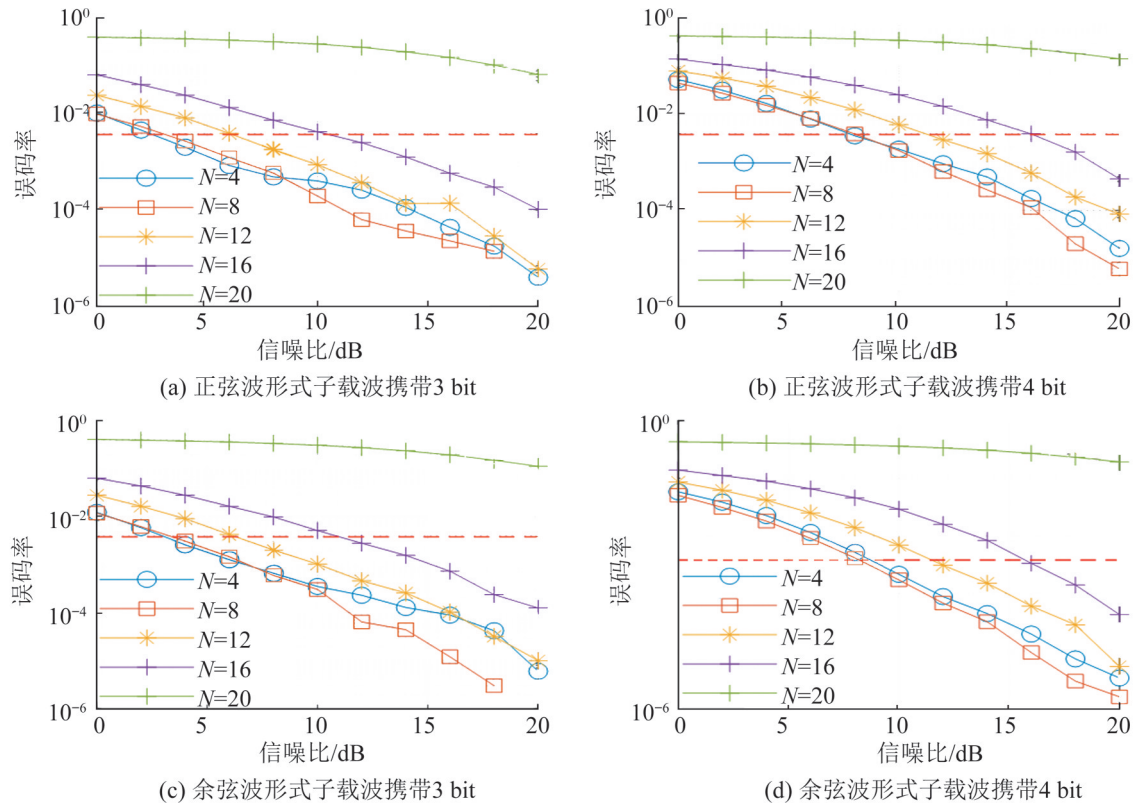


图 9 MC-TDOP/S 通信性能曲线  
Fig. 9 Performance of MC-TDOP/S

图10给出了MC-TDOP/S与现有海上通信技术的通信性能对比结果。3种通信技术中的子载波均携带2 bit信息,符号速率相同。可看出,MC-TDOP/S技术的通信性能与VDES系统所采用的16QAM相当。然而,由于其占据的频带宽度仅为VDES的1/5,因此再一次说明了MC-TDOP/S技术具有较高的频谱利用率。

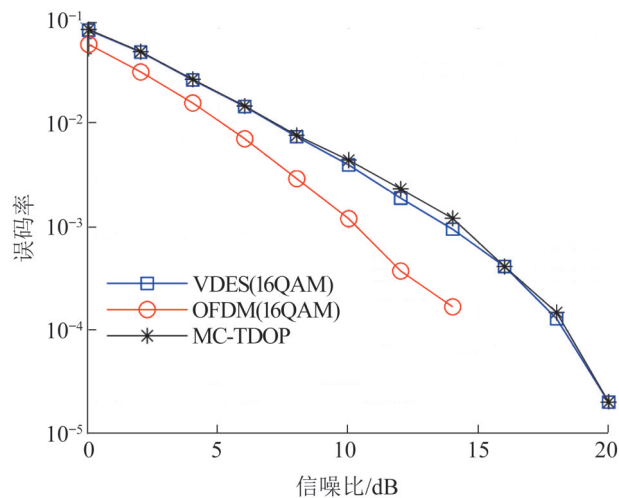


图10 MC-TDOP/S与其他通信技术的性能对比  
Fig. 10 Performance comparison between MC-TDOP/S and other competitive technologies

### 2.3.3 海上MC-TDOP能量效率

传统多载波通信系统除了对频率子信道之间的正交性要求较高之外,还会面对另外一个问题,即通信信号的峰均功率比(peak to average power ratio, PAPR)。在OFDM系统中,必须对较高的PAPR进行处理,否则信号的高峰值将会造成接收机设计上的困难,同时也会导致接收机性能浪费。分别对OFDM以及MC-TSOP/S符号内子载波数目对符号峰均功率比的影响进行了研究,结果如图11所示。可看出,MC-TSOP/S技术具有比OFDM系统更高的能量效率,这是由于MC-TSOP/S通信符号在形成过程中对多个不同时延的子载波进行了直接叠加,使符号持续时间之中的某些时间段出现了信号幅度的抵消。因此,MC-TSOP/S通信符号的总功率将更小。

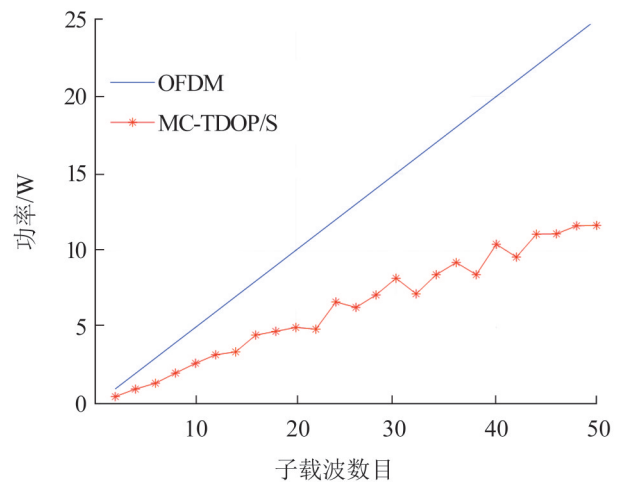


图11 MC-TSOP/S符号能量效率  
Fig. 11 Power efficiency of MC-TDOP/S

## 3 结论

本论文提出了一种基于多载波延时-重叠调制(MC-TDOP)的海上高速甚高频通信技术,并根据海上通信信道特性对该技术的通信性能进行了理论分析和数值仿真研究。结果表明,该技术具有较高的频谱利用率,在仅占用现有VDES频带的1/5的情况下即可实现VDES多路子载波的通信速率峰值307.2 kbps。同时,该技术具有较高的能量效率。后续研究将针对进一步提升通信速率的方法展开研究,并对这种新型通信技术在实际海上信道中的性能进行现场实验。本论文的研究成果,将对海上甚高频通信系统乃至其他任何无线通信系统的升级提供新的思想与技术方案。

### 参考文献:

- [1] 熊雅颖. 海事通信技术新进展—VDES系统[J]. 卫星应用, 2016(2): 35-40.  
Xiong Yaying. New Development of Maritime Communication Technology VDES System[J]. Satellite Application, 2016(2): 35-40.
- [2] Lazaro F, Raulefs R, Wang W, et al. VHF Data Exchange System (VDES): an Enabling Technology for Maritime Communications[J]. CEAS Space Journal(S1868-2052), 2019, 11: 55-63.
- [3] 姚治萱. VDES通信技术应用及其发展趋势[J]. 世界海运, 2019, 42(2): 34-38.  
Yao Zhixuan. Application and Development Trend of

- VDES Communication Technology[J]. World Shipping, 2019, 42(2): 34-38.
- [4] 巩海方. 谈甚高频数字交换系统(VDES)[J]. 中国海事, 2016, 3: 53-55.
- Gong Haifang. Discussion ov VHF Data Exchange System [J]. China Maritime Safety, 2016, 3: 53-55.
- [5] 国际电联无线电通信部门. 在《无线电规则》附录18水上移动业务频道交换数据和电子邮件的VHF无线电系统和设备的特性 ITU-R M.1842-1 建议书[S]. 2009.
- ITU-R. Characteristics of VHF Radio Systems and EQUIPment for the EXCHANGe of Data and Electronic Mail in the Maritime Mobile Service RR Appendix 18 Channels ITU-R M.1842-1 [S]. 2009.
- [6] 胡旭, 林彬, 王珍. 基于VDES的空天地海通信网络架构与关键技术[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 2-8.
- Hu Xu, Lin Bin, Wang Zhen. VDES-Based Space, Air, Ground and Sea Integrated Communication Networks: Architecture and Key Technologies [J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 2-8.
- [7] 陈亮, 金永兴, 汤可成, 等. 海上甚高频宽带数据传输技术研究[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(10): 2065-2069.
- Chen Liang, Jin Yongxing, Tang Kecheng, et al. Broadband Data Transmission in Maritime VHF[J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(10): 2065-2069.
- [8] 陈亮, 金永兴, 胡勤友, 等. 海上甚高频数据通信系统中的多径时延[J]. 上海海事大学学报, 2016, 37(4): 55-58.
- Chen Liang, Jin Yongxing, Hu Qinyou, et al. Multipath Time Delay in Maritime VHF Data Exchange System [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2016, 37(4): 55-58.
- [9] 曹祈生. 基于非正交思想的数字通信调制方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- Cao Qisheng. Research on Modulation Methods in Digital Communications Based on Non-Orthogonal Ideas [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009.
- [10] 贺明妍. 时移非正交多载波调制技术的性能分析及其应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- He Mingyan. Research on Performance Analysis and Application of Time-Shift Non-Orthogonal Multi-Carrier Modulation Technology [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [11] 梁德群. 一种基于时频脉冲成形的时延多载波调制解调方法: 201711278898.9[P]. 2018-05-29.
- Liang Dequn. A Time-Frequency Pulse-Shaping Based Time-Delay Multi-Carriers Modulation and Demodulation: 201711278898.9[P]. 2018-05-29.
- [12] 马磊. TS\_NMT无线试验平台的构建及试验研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- Ma Lei. The TS\_NMT Wireless Test Platform Construction and Experiment Research [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [13] 刘媛美. VDES信道建模技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- Liu Yuanmei. Research on VDES Channel Modeling Technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [14] 沈亮. 面向海上无线通信的信道估计算法研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- Shen Liang. Research and Implementation of Channel Estimation Algorithms for Maritime Wireless Communication Systems [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [15] 史经展, 宗鹏. 关于海上通信多径衰落的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(12): 152-163.
- Shi Jingzhan, Zong Peng. Simulation Research on Multipath Fading of Maritime Communication [J]. Computer Simulation, 2015, 32(12): 152-163.