

doi: 10.7690/bgzd.2025.10.022

基于 R10 码的海洋浮标 OFDM 无线通信系统

牛珑昌^{1,2}, 苑华林^{1,2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一三研究所第六研究室, 郑州 450015;

2. 河南省水下智能装备重点实验室, 郑州 450015)

摘要: 为解决传统海洋浮标无线通信系统在恶劣海况下码率固定与频繁反馈的缺陷, 提出一种基于 R10 码的正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 无线通信系统。设计适配海洋信道动态特性的 OFDM 帧结构, 并结合 R10 码码率自适应特性构建机会通信策略, 实现无需实时信道状态信息与频繁反馈的自适应传输。基于舰船-浮标信道模型, 对不同海况等级下的系统性能进行仿真验证。相较于传统海洋浮标无线通信系统, 该系统可依据信道条件动态调整码率与传输速率, 在 3 级和 5 级海况下传输效率分别提升 29.19% 和 29.54%, 每个数据源块的反馈次数仅需 1 次, 显著降低了通信暴露风险。研究结果表明: R10 码与 OFDM 的协同设计有效解决了海洋浮标通信的可靠性与隐蔽性矛盾, 为复杂海洋环境下的海洋浮标无线通信提供了技术支撑。

关键词: 海洋浮标通信; R10 码; 正交频分复用; 无线通信

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

R10 Code-Based OFDM Wireless Communication System for Ocean Buoy

Niu Longchang^{1,2}, Yuan Hualin^{1,2}

(1. No. 6 Research Laboratory of No. 713 Research Institute of CSSC, Zhengzhou 450015, China;

2. He'nan Key Laboratory of Underwater Intelligence Equipment, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In order to solve the problems of fixed code rate and frequent feedback in the traditional ocean buoy wireless communication system under bad sea conditions, an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) wireless communication system based on R10 code is proposed. An OFDM frame structure is designed to adapt to the dynamic characteristics of the ocean channel, and an opportunistic communication strategy is constructed according to the adaptive characteristics of the code rate of the R10 code, so as to realize the adaptive transmission without real-time channel state information and frequent feedback. Based on the ship-buoy channel model, the system performance under different sea conditions is simulated and verified. Compared with the traditional ocean buoy wireless communication system, the system can dynamically adjust the bit rate and transmission rate according to the channel conditions. The transmission efficiency is improved by 29.19% and 29.54% respectively under the third and fifth sea conditions, and the feedback times of each data source block are only one. Ignificantly reduce that risk of communication exposure. The research results show that the co-design of R10 code and OFDM effectively solves the contradiction between reliability and concealment of ocean buoy communication, and provides technical support for the wireless communication of ocean buoy in complex ocean environment.

Keywords: ocean buoy communication; R10 codes; OFDM; wireless communication

0 引言

海洋浮标作为海洋监测的关键节点, 在气象预报、生态研究及军事侦察等领域具有重要应用价值^[1]。目前, 其通信技术主要依赖卫星链路或传统陆地无线通信系统^[2], 但海洋浮标信道与陆地环境存在显著差异: 1) 存在海洋环境下波动海面的散射效应^[3]; 2) 海浪覆盖与复杂气象条件加剧了信号的随机衰减^[4]。上述因素使得海洋浮标信道呈现强时变性, 常因天线被海浪遮挡或浸没导致通信中断^[5], 导致系统长期处于“时断时续”的通信状态。

传统的海洋浮标在通信时为增强可靠性, 一般

采用前向纠错编码 (forward error correction, FEC), 如 Turbo 码^[6]与 Polar 码^[7], 通过额外的冗余编码增加就差能力。这样固定码率设计需依赖精确信道状态信息 (channel state information, CSI) 动态调整编码参数^[8], 在海洋浮标动态信道中难以实现; 为自动重传请求 (automatic repeat request, ARQ)^[9]机制, 通过反馈机制重传丢失数据包。尽管 ARQ 在陆地通信中广泛应用, 但其频繁反馈需求在海洋浮标高时延、高丢包场景下将显著降低传输效率, 且在军用场景中密集反馈易暴露通信节点, 降低隐蔽性。

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2024-11-25

基金项目: 河南省重点研发专项 (231111221400; 231111212100)

第一作者: 牛珑昌 (1998—), 男, 河南人, 硕士。

针对上述挑战, 喷泉码技术(如 Raptor 码^[10]), 因其动态适应性成为新兴解决方案。Raptor 码的一种系统码版本-R10 码基于喷泉码原理, 允许无限生成编码数据包, 接收端仅需接收略超原始数据量的任意子集即可解码, 无需固定码率或实时信道估计。核心优势: 1) 自适应冗余调整, 恶劣信道下自动增加冗余包以抗突发丢包, 信道良好时减少冗余以提升效率^[11]; 2) 低反馈依赖, 通过被动累积数据包替代主动重传请求, 降低暴露风险; 3) 低复杂度编解码, 适配浮标资源受限特性。结合优化的 OFDM 帧结构与 R10 码传输策略, 可无需频繁反馈或 CSI 更新, 实现码率与速率的动态匹配, 从而充分利用海洋信道突发的间歇性通信机会。

笔者设计基于 R10 的海洋浮标 OFDM 通信系统, 解决了传统技术在海洋场景下的码率固定与频繁的反馈需求问题, 为提升浮标通信的可靠性、有效性与安全性提供了理论支撑与技术路径, 对复杂海洋环境下的海洋浮标通信系统研究具有较为重要的意义。

1 R10 码原理与分析

R10 码不仅具备 Raptor 码的无码率特性, 同时还具备系统码特性, R10 码在编码时, 恰好包含了 K 个源符号, 所以当所有的源符号都被收到时, 则译码过程可以省略。R10 码在海洋浮标处于理想的信道环境下, 海洋浮标可以直接收到全部源符号, 从而无需执行译码过程, 实现码率趋近于 1 且译码开销为 0。该机制不仅能够最大化利用机会通信窗口, 而且可消除由复杂译码运算引入的时延, 为海洋浮标无线通信提供低复杂度、高实时性的传输保障。R10 码编译码过程如图 1 所示。

1.1 R10 码编码过程

如图 1 上半部分所示, R10 码编码过程需要分为 2 步进行。

1) 将 K 个长度为 1 的源符号 $X=[x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ 进行预编码生成中间符号 $C=[c_1, c_2, \dots, c_L]^T$, 其中预编码矩阵 G_{LT} 可以根据 K 值查表直接得出^[12]。将 A^{-1} 与 $X=[x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ 直接进行矩阵相乘后, 得到中间符号 $C=[c_1, c_2, \dots, c_L]^T$:

$$A^{-1}X=C. \quad (1)$$

2) 将中间符号 C 通过普通的 LT 编码生成编码符号 $E=[x_1, x_2, \dots, x_K, e_{K+1}, e_{K+2}, \dots]^T$ 。因为 R10 码是

系统码, 故其前 K 个编码符号即为源符号本身, 随后的修复符号 $E(K+1, K+2, \dots)$ 由 1) 生成的中间符号 C 和 $G_{LT}(K+1, K+2, \dots)$ 相乘得到:

$$G_{LT}(K+1, K+2, \dots)C=E(K+1, K+2, \dots). \quad (2)$$

将源符号 $X=[x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ 和修复符号 $E(K+1, K+2, \dots)=[e_{K+1}, e_{K+2}, \dots]^T$ 拼接, 即可得到 R10 码的编码符号 $E=[X, E(K+1, K+2, \dots)]^T$ 。

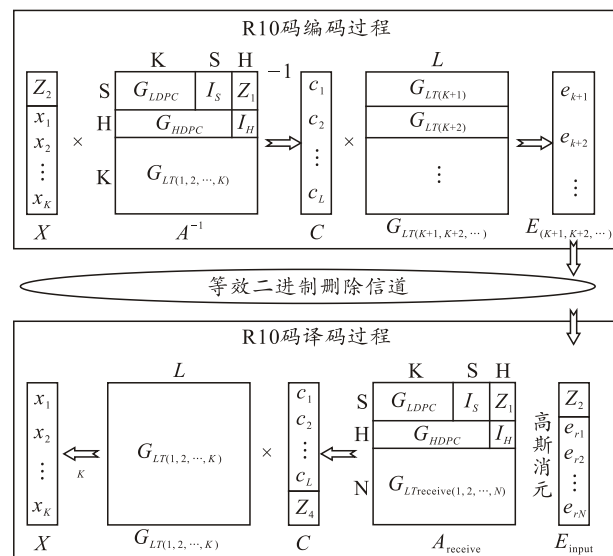


图 1 R10 码编译码过程

1.2 R10 码译码过程

如图 1 下半部分所示, 与编码相对应, R10 码的译码过程也需要 2 步进行。

1) 对接收符号 $E_r=[e_{r1}, e_{r2}, \dots, e_{rN}]^T$ 进行预编解码, 译出中间符号 C 。具体流程是通过接收符号的编码符号 ID (encode symbol ID, ESI) 构造译码矩阵 $A_{receive}$, 然后将其与输入符号 E_{input} 进行高斯消元处理。如果 $A_{receive}$ 的列满秩, 则 $A_{receive}$ 可以转化为单位矩阵, 同时 E_{input} 的前 L 行也会转化为中间符号 C 。

2) 再采用 LT 码的译码方法对中间符号 C 译码, 即完成了 R10 译码。图 1 中的 $G_{LT}(1, 2, \dots, K)$ 指的是 G_{LT} 的 1 至 K 行, 其与中间符号 C 相乘便可译码出源符号 $X=[x_1, x_2, \dots, x_K]^T$:

$$X=G_{LT}(1, 2, \dots, K)C. \quad (3)$$

从 R10 的编译码原理可以得出: 其通过特殊的编译码矩阵设计, 无需对是否收到编码符合进行反馈, 仅需收到略大于 K 个编码符合时, 即可完成译码, R10 的码率自适应和低反馈需求特性使其非常

适合用于恶劣的高动态海洋浮标通信环境。

2 海洋浮标 OFDM 系统参数和基于 R10 码的突发传输帧设计

2.1 海洋浮标 OFDM 系统设计

基于文献[13]提供的近海无线信道物理层特征数据,通过综合权衡海洋浮标 OFDM 系统在传输稳定性与频谱效率方面的双重需求,最终确定的主要技术指标如表 1 所示。该方案在信道建模与系统优化之间实现了科学平衡,既保证了复杂海况下的通信质量,又提升了数据传输效率。

本系统采用 4 096 点 IFFT/FFT 实现正交频分复用,通过选择性映射策略分配 2 048 个子载波作为信息承载单元,其余未激活子载波配置为虚载波。这种频谱成型技术不仅提升了频带利用率,同时通过预留保护频带有效降低了子载波间干扰(ICI)。针对海洋信道多径传播特性,动态调整循环前缀参数使其满足 $T_{CP} \geq 2\tau_{RMS}$ 的设计准则,并将保护间隔控制在符号周期的 12.5% ($T_{CP}=1/8 T_{sym}$)。该参数配置方案通过建立时域保护与频带利用的协同机制,在消除符号间干扰(ISI)与维持系统吞吐量之间实

现了工程最优解。

表 1 海洋浮标 OFDM 系统参数设计

OFDM 系统参数	符号	数值
采样频率/MHz	f_s	40
信道编码码率	R_c	1/2
傅里叶变换点数	N_{FFT}	409 6
数据子载波数量	$N_{carrier}$	204 8
循环前缀时间长度/ μs	T_{CP}	12.8
循环前缀点数	N_{CP}	512
OFDM 符号时间长度/ μs	T_{sym}	102.4
OFDM 符号点数	N_{sym}	409 6
子载波间隔/KHz	Δf	9.77
突发传输帧时间长度/ms	T_r	5
信号带宽/MHz	B	20

此外,在海洋浮标 OFDM 通信系统设计中,子载波间隔 $\Delta f=9.77$ kHz 与突发帧长度 $T_r=5$ ms 分别满足 $\Delta f < B_c=48$ kHz(海洋浮标信道相干带宽)及 $T_r < T_c=6.9$ ms(海洋浮标信道相干时间),从而确保信号在时域和频域均呈现平坦慢衰落特性,避免了频率选择性衰落与快时变信道干扰

2.2 基于 R10 码的突发传输帧设计

结合 R10 码译码特性及 OFDM 系统参数所设计的突发传输帧如图 2 所示。

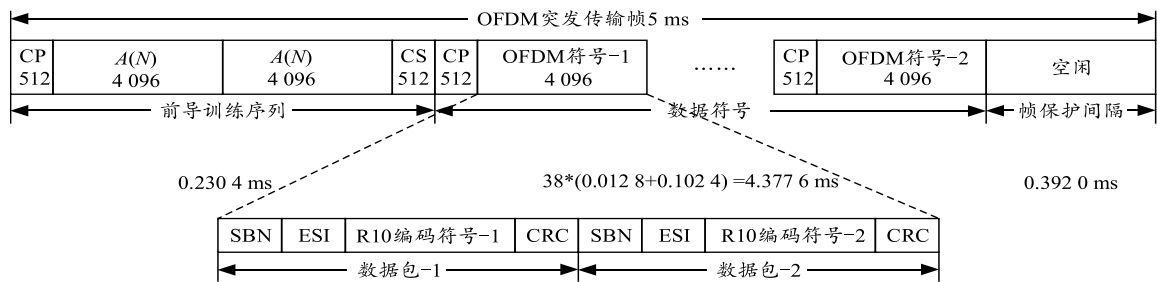


图 2 基于 R10 码的突发传输帧设计

本系统的突发帧结构采用分层设计,由同步导频段、有效数据段及保护间隔 3 个功能模块构成,总帧周期严格限定为 5 ms。同步头配置采用 CAZAC 序列正交结构,其核心功能在于实现符号定时恢复与载波频偏校正,同时通过插值算法完成多径信道传递函数估计,为数据段的相干解调提供必要的参考基准。保护间隔通过设置恰当的时域空白区,有效抑制了相邻突发帧间的波形交叠现象。CAZAC 序列是一种恒定幅值零自相关序列,具备时频双域恒包络与零旁瓣特性,尤其在低信噪比条件下仍能维持较强的多径干扰抑制能力。有效数据载荷段采用 38 组具备循环前缀的调制单元构成,每组时频资源格承载 2 048 位原始信息比特。基于该帧结构优化配置,通过资源分配策略计算可得系统理论信道

容量达 15.565 Mbps。帧尾配置的时域隔离带通过建立信号空白缓冲区机制,在连续帧传输场景下可消除接收端处理时延引发的帧间串扰,确保数据块的时空正交性。

对于每个 OFDM 符号而言,因为可以包含 2 048 bit 信源数据,同时折衷考虑传输可靠性和有效性的情况下,数据包长度设计为 1 024 bit,所以每个 OFDM 符号可以包含 2 个数据包。其中每个数据包由 R10 码编码符号、源块编号(source block number, SBN)、ESI 和循环冗余校验码(cyclic redundancy check, CRC)。

3 基于 R10 码的 OFDM 传输方案

笔者通过深度整合 R10 编码的码率自适应特性、系统码结构优势及低信令开销特征,协同已建

立的 OFDM 波形参数与预定义的突发帧格式,创新性构建了基于喷泉码原理的海洋浮标动态链路适配机制。该传输架构通过无速率编码的渐进译码特性与物理层参数的智能匹配,在非对称反馈信道条件下实现了频谱效率与传输可靠性的动态均衡,具体流程如图 3 所示。

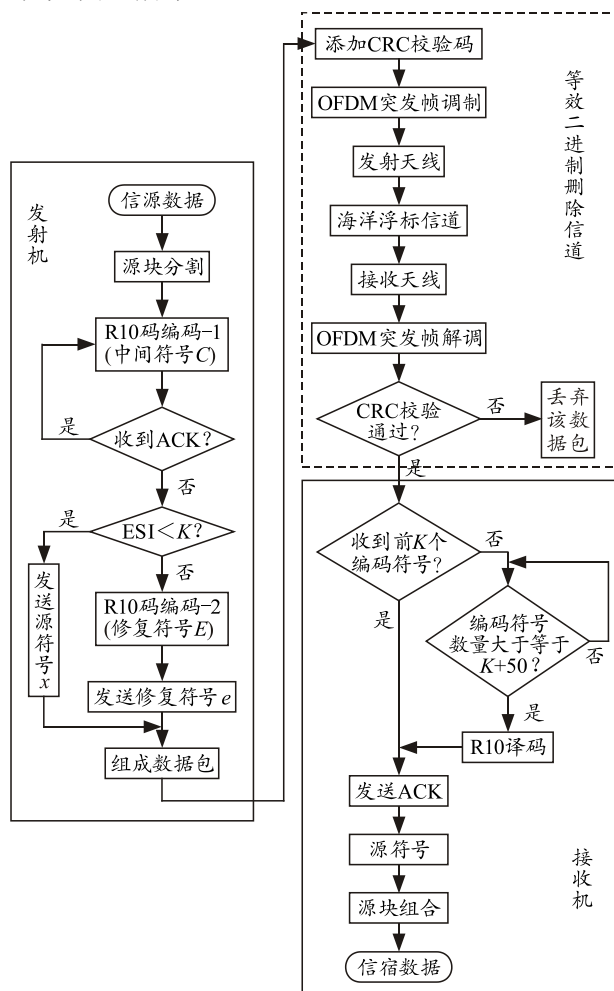


图 3 基于 R10 码传输方案

本传输方案实施流程包括以下 4 个阶段:

1) 数据预处理阶段: 基于 R10 编码参数对信源进行逻辑数据单元划分, 在收发两端预配置 R10 编译码矩阵映射关系。该分布式存储机制确保编解码器可快速调用生成矩阵与校验矩阵。

2) 动态编码阶段: 对数据单元执行预编码运算生成中间符号集 C , 在未获得该数据块确认应答 (ACK) 前持续构造冗余编码符号。根据 R10 系统性编码规则, 当符号标识符 $ID \in [1, K]$ 时直接透传源符号, 显著降低编码复杂度。

3) 信道适配传输阶段: 编码符号经 SBN/ESI 结构化封装与 CRC 校验后, 通过优化设计的 OFDM 传输协议栈进行物理层映射。CRC 校验机制将时变

海洋信道转化为近似二进制擦除信道模型, 与 R10 码的纠删特性形成匹配传输。

4) 译码反馈阶段: 接收端进入完整性验证阶段, 当检测到 ESI 索引连续覆盖 $1 \sim K$ 区间时, 判定为理想信道无需译码直接反馈 ACK; 否则启动累积接收机制, 在获取 $N=K+50$ 个符号后触发 R10 迭代译码, 并完成确认反馈闭环。

另外, 设置每个源块译码所需的编码符号数量 $N=K+50$ 的原因是, 通过 R10 码译码失效概率公式^[14], 计算可知此时可以保证译码失败概率几乎为 0, R10 码译码失效概率:

$$P_f(n, k) = \begin{cases} 1 & n < k \\ 0.85 \times 0.567^{n-k} & n \geq k \end{cases} \quad (4)$$

通过上述分析可知: R10 码在不需信道状态信息的情况下可自适应地调整编码码率, 前提是需得到成功译码的 ACK 信息, 随后停止该部分数据编码, 并开始后面部分数据编码故理论上此 ACK 数据仅需要包含 1 bit 信息即可。

4 仿真与分析

本节将在不同海况等级下, 仿真对比并分析本文中系统和基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 的系统性能。在物理层参数配置方面, 传统方案采用正交相移键控调制与 1/2 码率前向纠错编码, 其理论频谱效率与本文中系统具有可比性。其链路层基于自动请求重传 (ARQ) 机制构建差错控制体系, 通过逐包应答反馈实现传输可靠性保障。该方案要求接收端对每个成功解码的数据单元生成确认信号, 发送端持续执行选择性重传操作直至接收端完成全量数据恢复。整个传输过程受限于严格的全序确认逻辑, 导致系统吞吐量受信道误码率波动影响显著。

4.1 仿真环境

在系统仿真时, 小尺度衰落信道模型采用适用于海洋浮标传输特性的双径散射功率模型, 浮标接收机接收到的信号:

$$\tilde{V} = V_1 e^{j\phi_1} + V_2 e^{j\phi_2} + X + jY \quad (5)$$

式中: V_1 和 V_2 分别为直射路径和反射路径的信号幅值; ϕ_1 和 ϕ_2 分别为直射路径和反射路径的信号相位; X 为散射径信号的实部分量; Y 为散射径信号的虚部分量。

不同海况等级的大尺度的随机衰减模型则结合海洋浮标虽海浪的波动特性, 综合考虑海浪波动模

型和海浪高度对信号衰减的影响后进行建立。海浪波动模型：

$$h(t)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nA_i\sin[k_i\cos\theta_i+k_i\sin\theta_i-2\pi f_it(t+t_i)]+au_i\sin(\pi/j)。$$

(6)

式中： α 为小波幅系数； u 为 $0\sim 1$ 之间的随机数； j 为粗糙系数； n 为成分波数； A 为波幅； k 为波数； f 为波频； A 、 k 、 f 均可根据海况等级表计算得出。

大尺度的随机衰减模型利用反正切函数与海浪高度建立关系，模型为：

$$S(t)=SNR_{\max}\tanh[\pi h(t)/h_{\max}]。$$

(7)

式中： SNR_{\max} 为信号信噪比最大值， h_{\max} 为海浪高度最大值。

4.2 仿真结果及分析

分别在 3 级海况和 5 级海况环境下，仿真基于 R10 码的海洋浮标 OFDM 系统和基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 系统性能，设定源块包含 1 000 个数据包，仿真 10 s，在忽略反馈时延的条件下，吞吐率和传输速率 R 仿真结果如图 4 所示。

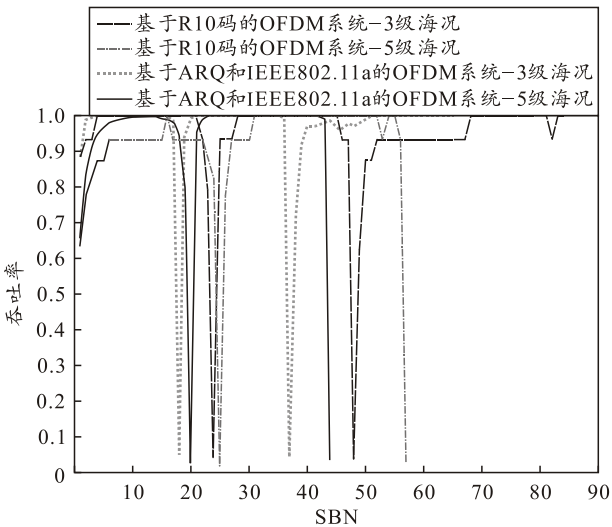


图 4 吞吐率仿真结果

由图 4 的仿真结果可以得到：本方案在 3 级海洋环境下完成 65 个数据块的有效传输，5 级海况条件下维持 44 个数据块的可靠通信。经统计测算，系统有效信息率分别为 8.82 Mbps (3 级海况) 和 5.98 Mbps (5 级海况)。实验观测结果表明：海水周期性淹没导致的信噪比劣化现象引发信道呈现高概率符号擦除特性，此时冗余数据重传频次增加迫使 R10 编码器进入低码率工作状态，系统有效吞吐量随信道恶化呈现显著梯度下降。

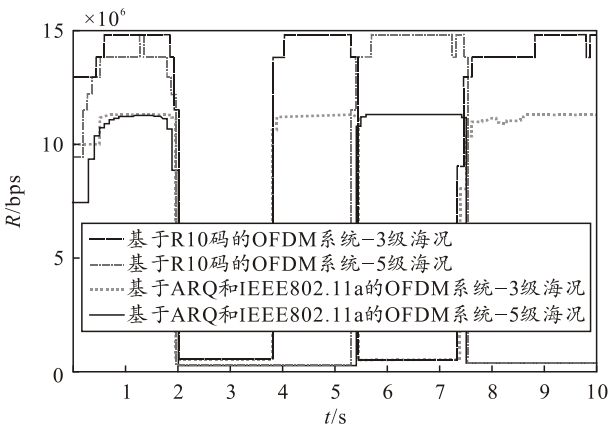


图 5 传输速率 R 仿真结果

由图 5 的仿真结果可以得到：本文中系统的时变传输效能曲线具有显著的自适应特征：在 3 级海况的[2.62, 4.56] s 与[6.20, 8.03] s 时间窗口，以及 5 级海况的[0.01, 2.50] s 与[4.60, 7.98] s 时段，信道冲激响应恶化导致有效吞吐量骤降至基线水平以下；而当信道条件改善时，数据传输效能可快速恢复至峰值区段。实验数据表明：本系统通过基于 R10 码的通信系统设计，实现了码率配置策略与物理层传输参数的实时动态适配，形成对海洋信道时变特性的闭环响应机制。

本文中系统和基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 系统性能指标对比如表 2 所示。

表 2 海洋浮标通信系统性能指标对比

通信系统	仿真结果			
	海况等级	传输速率/Mbps	平均吞吐量/%	反馈次数
基于 R10 码的海洋浮标 OFDM 系统	3	8.82	94.5	1
基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 系统	3	6.83	95.6	1 000
基于 R10 码的海洋浮标 OFDM 系统	5	5.98	93.6	1
基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 系统	5	4.62	94.3	1 000

由表 2 可知：在基于 R10 码的海洋浮标通信系统可依据信道条件动态调整码率与传输速率的情况下，相比于基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 传统通信系统，3 级和 5 级海况下传输效率分别提升了 29.19%和 29.54%。

另外在反馈次数方面，对每个源块的反馈次数本文中系统只需要 1 次，而 ARQ 机制需要对每个源块进行反馈，也就是反馈 1 000 次，相比之下本文中系统的反馈次数降低了 1 000 倍，这也是其最

大优势。

5 结束语

经不同海况等级环境下的仿真验证证明：在恶劣的海洋环境下，该系统可自适应地根据信道环境变化调整码率和传输速率，有效捕获海洋浮标突发性优质信道窗口。相比于传统的基于 ARQ 机制+IEEE802.11a 的 OFDM 系统，不仅传输速率提高了将近 30%，而且显著地减少了可靠通信所需要的反馈次数，减小了海洋浮标通信时暴露的风险。

参考文献：

- [1] MORÓN-LÓPEZ J, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M C, CARREÑO F, et al. Implementation of Smart Buoys and Satellite-Based Systems for the Remote Monitoring of Harmful Algae Bloom in Inland Waters[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(5): 6990–6997.
- [2] BABIĆ A, OREČ M, MIŠKOVIĆ N. Developing the Concept of Multifunctional Smart Buoys[C]//OCEANS 2021: San Diego–Porto. IEEE, 2021: 1–6.
- [3] CHEN W, LI C Z, YU J Y, et al. A Survey of Maritime Communications: From the Wireless Channel Measurements and Modeling Perspective[J]. Regional Studies in Marine Science, 2021, 48: 102031.
- [4] WANG J, ZHOU H F, LI Y, et al. Wireless Channel Models for Maritime Communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 68070–68088.
- [5] 华黎明. 浮标通信系统增稳平台控制算法与系统实现[D]. 海口：海南大学, 2020.
- [6] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding: Turbo-codes[C]//Proceedings of ICC'93-IEEE International Conference on Communications. IEEE, 1993, 2: 1064–1070.
- [7] ARIKAN E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051–3073.
- [8] CHEN X J, DONG P, ZHANG Y Y, et al. Design of Adaptive Redundant Coding Concurrent Multipath Transmission Scheme in High-speed Mobile Environment[C]//2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2021, 5: 2176–2179.
- [9] HONG T C, KANG K S, KU B J, et al. HARQ-ARQ Interaction Method for LTE-based Mobile Satellite Communication System[C]// Australian Computer-human Interaction Conference on Designing Futures: the Future of Design. ACM, 2014: 377–392.
- [10] BYERS J W, LUBY M, MITZENMACHER M, et al. A Digital Fountain Approach to Reliable Distribution of Bulk Data[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28(4): 56–67.
- [11] SHIRVANIMOGHADDAM M, LI Y, VUCETIC B. Adaptive Analog Fountain for Wireless Channels[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2013: 2783–2788.
- [12] 刘畅. 面向多媒体传输的 Raptor 编译码器设计与实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2020.
- [13] RAPPAPORT T S. Wireless Communications: Principles and Practice (The Book End)[J]. Microwave Journal, 2002, 45(12): 128–129.
- [14] STOCKHAMMER T, SHOKROLLAHI A, WATSON M, et al. Application layer Forward Error Correction for Mobile Multimedia Broadcasting[M]. Boca Raton: Auerbach Publications, 2008.
- [10] SUMMERS T. Distributionally robust sampling-based motion planning under uncertainty[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 6518–6523.
- [11] RENGANATHAN V, SHAMES I, SUMMERS T H. Towards integrated perception and motion planning with distributionally robust risk constraints[C]//Proceedings of the IFAC World Congress. Berlin, 2020.
- [12] GRAVELL B, ESFAHANI P M, SUMMERS T. Robust control design for linear systems via multiplicative noise[C]//Proceedings of the IFAC World Congress, Germany, Berlin, 2020.
- [13] ANDERSSON J A E, GILLIS J, HORN G, et al. CasADi-A software framework for nonlinear optimization and optimal control[J]. Mathematical Programming Computation, 2019, 11(1): 1–36.

(上接第 80 页)