

## 激光与光电子学进展

## 空间扩容通信模型的稀疏阵列优化设计

魏亚明, 薛彬\*, 蔡旺, 王栋梁, 董繁鹏

天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

**摘要** 向空间扩展维度的通信模型是进一步提升无线通信容量的重要研究方向。然而,空间维度上的正交信道构建主要还存在两方面的理论问题:一是病态问题;二是稀疏问题。针对上述两个问题,提出了一种新型空间维度扩容通信模型。该模型基于声光效应采用激光器扩展空间维度,利用优化算法设计稀疏阵列布局,采用聚类算法确定最优分布。通过仿真计算模型实例,可得其条件数为 25,经聚类分析后仅需 4 个激光接收器,便可替代原 88 个单元天线,组成接收阵列。该模型对提升无线通信容量有着重要研究意义,为搭建水下远距离大容量的轻巧一体化通信系统提供新思路,并为无线通信模型的理论发展储备基础性研究。

**关键词** 通信;空间扩容;声光效应;稀疏矩阵;聚类算法

中图分类号 TN911

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2307001

## Optimal Design of Sparse Arrays for Spatial Expansion Communication Model

Wei Yaming, Xue Bin\*, Cai Wang, Wang Dongliang, Dong Fanpeng

School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Developing improved communication models for expanding wireless communication capacity in spatial dimensions is an important research goal. However, there are two main theoretical concerns with the construction of orthogonal channels in spatial dimensions: one is ill-conditioned problem, and the other is sparseness. Addressing these two issues, we propose a new communication model for spatial-dimension expansion. Considering the acousto-optic effect, a laser is used to expand the spatial dimension; a sparse array layout is designed by an optimization algorithm; and the optimal distribution is determined by a clustering algorithm to complete the model layout design. Through the simulation calculation model example, it can be obtained that its condition number is 25. After cluster analysis, only 4 laser receivers can replace the original 88 unit antennas to form a receiving array. This model plays an important role in improving wireless communication capacity, provides a new concept for building underwater lightweight long-distance and high-capacity integrated communication systems, and contributes basic research for the theoretical development of future wireless communication models.

**Key words** communication; spatial expansion; acousto-optic effect; sparse array; clustering algorithm

## 1 引言

目前,不断增长的科技发展和大数据业务需求,对通信网络的高速率、大容量和稳定性都有更高的要求,尤其是构建海洋智慧探测平台的需求,引领科研人员对自由空间光通信和微波通信等多种通信方式做进一步研究。激光通信虽然拥有高速率和大容量的优势,但面对水下复杂环境的干扰,会出现严重的信号衰减,无法同时满足水下远距离和大容量的无线

通信需求<sup>[1]</sup>。而声波在水中的传播损失较小,20 kHz 的声波在水中的衰减也仅有 2~3 dB/km,因此声波成为水下远距离通信的最佳载体<sup>[2]</sup>。但传统无线通信需要依赖时间维度构建正交性来承载信息,这极大地限制了频段有限的水声通信发展,如何在带宽有限的情况下,设计通信模型并提高信息传输能力,成为当下的研究热点。

在传统水声通信领域,许多研究人员基于时频维度对上述问题进行深入研究。Ebihara 等<sup>[3]</sup>提出对正

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2021-11-07; 录用日期: 2021-11-15

通信作者: \*xuebin@tju.edu.cn

交频分复用(OFDM)技术的改进和衍生调制方法,可以有效地抑制传统 OFDM 在复杂水声信道中存在的峰均功率高、频率泄露等问题;中国科学院声学研究所的王海斌等<sup>[4]</sup>提出基于子带分割的多输入多输出-滤波器组多载波(MIMO-FBMC)水声通信方案,能有效提高发射信号的平均功率,降低系统的误码率;伊利诺伊大学的 Riedl<sup>[5]</sup>于 2010 年在 7.2 km 距离上利用 Turbo 均衡和递归的多普勒补偿方法实现可靠通信,通信速率可达 23 kbit/s;加利福尼亚大学的 Song 等<sup>[6]</sup>于 2011 年在 3 km 距离上实现 60 kbit/s 的可靠通信。也有学者提出可以使用声涡旋波束的轨道角动量(OAM),在单一声波束内利用 OAM 声束的正交性增加信息传输维度,显著提高数据传输速率<sup>[7]</sup>。

综合上述研究,虽然基于时频维度的拓展研究有所改善,但仍然无法满足大容量的需求;而 OAM 声束本身具有发散和偏移的问题,现阶段该技术并不能提供一个合适的解决方案<sup>[8]</sup>。实际上,针对带宽有限的通信场景,为提高信道容量,应该考虑向空间维度扩展构建正交信道以携带更多信息<sup>[9]</sup>。因为从理论来说,空间可以比时间提供更多可用的维度,意味着增加多维数据传输能力。另外,模型中的几何空间结构也决定着有效信道数,这对提高容量起到重要作用<sup>[10-11]</sup>。然而,空间维度上的正交信道构建,还存在一些理论问题没有解决。总结来说,主要是两方面的理论问题:一是病态问题;二是稀疏问题<sup>[12-14]</sup>。所谓病态问题是指如何用局部的、不足的信息量恢复出完整信息的问题;稀疏问题是指如何用散布的、带有整体性的信息量高效恢复出完整信息的问题。

本文针对上述病态问题和稀疏问题,提出一种新的空间维度扩容通信模型。该模型采用由不同孔径激光接收器组成的激光阵列,其中单个激光接收器可基于声光效应对孔径内声场进行检测重建,并借助激光对声场的非侵入式无损检测优势,使得多层激光接收器可在空间维度上层叠排布进行扩展,达到组合重建声场的目的。不同孔径的激光接收器可以相互配合补充,交错排布,发挥稀疏分布的优势。模型以条件数为优化目标,设计稀疏激光阵列,向空间维度上扩展构建更多可用正交信道,提高通信系统性能,以达到扩充信道容量的目的。

## 2 原 理

### 2.1 空间扩容模型

提出的新型空间扩容无线通信模型,如图 1 所示。发射源为换能器阵列,接收源为不同孔径的激光接收器组成的激光阵列,每个激光接收器基于声光效应<sup>[15]</sup>,对孔径内的超声声场进行重建复原,发挥光学高精度测量和装置的无干扰优势,有效减缓信道矩阵病态性<sup>[16]</sup>。另外,与传统声换能器相比,模型中激光接收器阵列具有感知测量精度高、响应频段宽的优势。由于

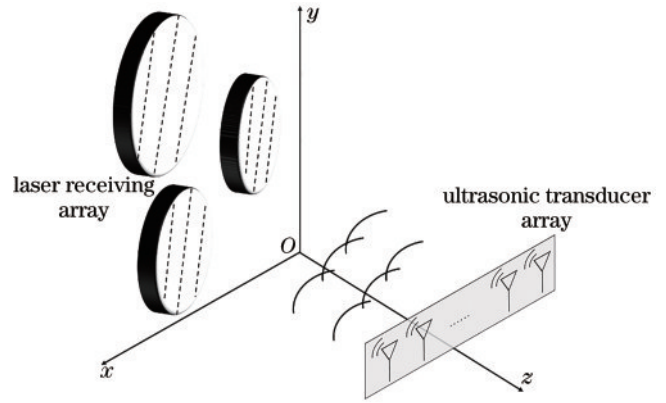


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

传统换能器基于压电效应来完成信号检测,存在障板干扰等传感机理层面问题,而激光阵列可以组合层叠,进行稀疏排布,有效地获取关键信息,从而高效地复原初始信息,并且激光阵列具有精度高、响应快和体积小特点,可以将整个接收装置集成压缩至较小的孔径尺度,有效地降低阵列的装配和调试复杂度。

将上述模型进一步推导得到数学模型,如图 2 所示。对接收源和发射源进行离散化,设接收源中每个接收天线接收到的信号为复原重建后的声场信息,假设发射源配置  $N_s$  个发射天线,位置集合  $r_{s_j}(j=1, \dots, N_s)$ ,每个发射天线复振幅为  $h_j(j=1, \dots, N_s)$ ;接收源配置  $N_R$  个接收天线,位置集合  $r_{R_v}(v=1, \dots, N_R)$ ,发射端与接收端间距  $l$ ,则第  $v(v=1, \dots, N_R)$  个接收天线所接收到的信号<sup>[17]</sup>为

$$f_v = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{N_s} \frac{\exp(ik|r_{R_v} - r_{s_j}|)}{|r_{R_v} - r_{s_j}|} h_j = \sum_{j=1}^{N_s} g_{vj} h_j, \quad (1)$$

式中:  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长;  $g$  为自由空间内的格林函数。

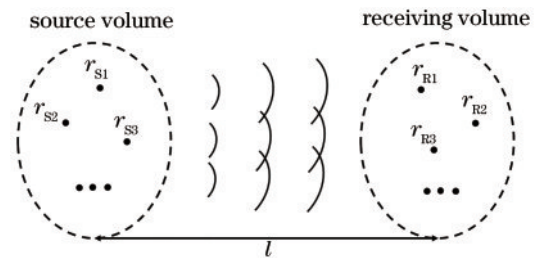


图 2 源-接收示意图

Fig. 2 Schematic diagram of source-receiving volume

$$\text{设 } \boldsymbol{\psi}_s = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{N_s} \end{bmatrix}, \boldsymbol{f}_R = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{N_R} \end{bmatrix}, \boldsymbol{G}_{SR} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1N_s} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_R 1} & g_{N_R 2} & \cdots & g_{N_R N_s} \end{bmatrix}, \text{ 则有}$$

$$\boldsymbol{f}_R = \boldsymbol{G}_{SR} \boldsymbol{\psi}_s. \quad (2)$$

在上述讨论中,矩阵  $\boldsymbol{G}_{SR}$  构建了从发射源到接收

源的映射关系,通过分析矩阵条件数,可以清晰地对该系统的信道容量进行预估,进而影响接收端检测算法复杂度和通信速率。

## 2.2 信道矩阵条件数

对  $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$  而言,其矩阵  $\mathbf{A}$  条件数定义为

$$\kappa(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\|, \quad (3)$$

式中:  $\|\mathbf{A}\|$  和  $\|\mathbf{A}^{-1}\|$  分别为矩阵  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{A}^{-1}$  的范数,可表示为

$$\|\mathbf{A}\| = \max_x (\|\mathbf{A}\mathbf{x}\| / \|\mathbf{x}\|), \quad (4)$$

$$\|\mathbf{A}^{-1}\| = 1 / \min_x (\|\mathbf{A}\mathbf{x}\| / \|\mathbf{x}\|). \quad (5)$$

对式(2)两边取范数有

$$\|\mathbf{f}_R\| = \|\mathbf{G}_{SR}\boldsymbol{\psi}_S\|. \quad (6)$$

当接收端受到扰动  $\boldsymbol{\delta}$  由  $\mathbf{f}_R$  变为  $\mathbf{f}_R + \boldsymbol{\delta}_R$ , 则相应地发送端也由  $\boldsymbol{\psi}_S$  变成  $\boldsymbol{\psi}_S + \boldsymbol{\delta}_S$ , 即

$$\mathbf{f}_R + \boldsymbol{\delta}_R = \mathbf{G}_{SR}(\boldsymbol{\psi}_S + \boldsymbol{\delta}_S). \quad (7)$$

式(7)与式(2)相减可得

$$\boldsymbol{\delta}_R = \mathbf{G}_{SR}\boldsymbol{\delta}_S. \quad (8)$$

对式(8)取范数得

$$\|\boldsymbol{\delta}_R\| = \|\mathbf{G}_{SR}\boldsymbol{\delta}_S\|. \quad (9)$$

结合式(4)可得  $\|\mathbf{G}_{SR}\| \geq \|\mathbf{G}_{SR}\boldsymbol{\delta}_S\| / \|\boldsymbol{\delta}_S\|$ , 代入式(9)则有

$$\|\mathbf{G}_{SR}\| \|\boldsymbol{\delta}_S\| \geq \|\mathbf{G}_{SR}\boldsymbol{\delta}_S\| = \|\boldsymbol{\delta}_R\|. \quad (10)$$

同理,由式(5)有  $\|\mathbf{G}_{SR}^{-1}\| \geq 1 / (\|\mathbf{G}_{SR}\boldsymbol{\psi}_S\| / \|\boldsymbol{\psi}_S\|)$ , 结合式(6)可得

$$\|\mathbf{G}_{SR}^{-1}\| \|\mathbf{f}_R\| \geq \|\boldsymbol{\psi}_S\|. \quad (11)$$

将式(10)、式(11)左右两边相乘整理可得

$$\frac{1}{\kappa(\mathbf{G}_{SR})} \frac{\|\boldsymbol{\delta}_R\|}{\|\mathbf{f}_R\|} \leq \frac{\|\boldsymbol{\delta}_S\|}{\|\boldsymbol{\psi}_S\|}, \quad (12)$$

其中由式(3)可知,  $\kappa(\mathbf{G}_{SR})$  为矩阵  $\mathbf{G}_{SR}$  的条件数。

同理可得

$$\frac{\|\boldsymbol{\delta}_S\|}{\|\boldsymbol{\psi}_S\|} \leq \kappa(\mathbf{G}_{SR}) \frac{\|\boldsymbol{\delta}_R\|}{\|\mathbf{f}_R\|}. \quad (13)$$

将式(12)、式(13)联立可得

$$\frac{1}{\kappa(\mathbf{G}_{SR})} \frac{\|\boldsymbol{\delta}_R\|}{\|\mathbf{f}_R\|} \leq \frac{\|\boldsymbol{\delta}_S\|}{\|\boldsymbol{\psi}_S\|} \leq \kappa(\mathbf{G}_{SR}) \frac{\|\boldsymbol{\delta}_R\|}{\|\mathbf{f}_R\|}. \quad (14)$$

由式(14)可知,相对误差  $\|\boldsymbol{\delta}_S\| / \|\boldsymbol{\psi}_S\|$  的大小由内部因素  $\kappa(\mathbf{G}_{SR})$  和外部扰动  $\|\boldsymbol{\delta}_R\| / \|\mathbf{f}_R\|$  共同决定:当相对误差项  $\|\boldsymbol{\delta}_R\| / \|\mathbf{f}_R\|$  固定时,条件数  $\kappa(\mathbf{G}_{SR})$  越小,则求解发送端信息相对误差的下界越大;上界越小,说明矩阵条件数越小,求解信息的误差越可控。

接着对矩阵  $\mathbf{G}_{SR}$  进行奇异值分解,得到

$$\mathbf{G}_{SR} = \mathbf{V}\mathbf{D}_{\text{diag}}\mathbf{U}^H, \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{U}$  为酉矩阵;  $\mathbf{D}_{\text{diag}}$  主对角线上的元素称为奇异值  $\sigma$ , 以 2-范数计算可得条件数

$$\kappa(\mathbf{G}_{SR}) = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} \geq 1, \quad (16)$$

式中:  $\sigma_{\max}$  为最大奇异值;  $\sigma_{\min}$  为最小奇异值<sup>[18]</sup>。

通过上述公式推导及分析,可以看出条件数刻画了

信道矩阵的病态程度。条件数越高意味着信道矩阵病态越严重,等效的平行子信道之间的传输条件差别越大,信道容量降低;反之则为良态,说明奇异值大小集中,信道中各个平行子信道的传输条件均衡,拥有更多可用的正交信道,系统稳定性也越高,检测算法复杂度降低<sup>[19]</sup>。

综上所述,信道矩阵的条件数可以反映有效正交信道数,故模型以信道矩阵的条件数为优化目标。其中关键在于如何构建合适的信道矩阵,这与模型中所设计的激光阵列密切相关。因为激光接收器向空间扩展,在空间维度上进行层叠排布,以求获取更多有效的、关键的声场信息,对声场进行组合检测重建,这使得模型可以构建更为准确的信道矩阵  $\mathbf{G}_{SR}$ , 从而降低条件数,达到等效构建空间维度上的正交信道的目的。

## 2.3 稀疏阵列与 $K$ 均值聚类算法

模型中需要激光接收器对声场进行恢复重建得到声压分布,若将激光孔径内的所有重建结果均用于条件数计算分析,则会造成计算量指数级增加,降低系统可靠性。但是由于激光重建的声场具有稀疏性,从中选取部分关键数据构成稀疏阵列,有效获取散布的关键信息,用以替代全部数据。

为解决上述稀疏阵列的布局设计,采用一种新型的进化随机搜索算法进行选取优化。该算法具有搜索效率高和鲁棒性强等优势,支持对复杂搜索空间进行启发式搜索,能以较大概率找到全局最优结果,弥补传统稀疏阵列优化布阵中的不足<sup>[20-21]</sup>。

经过上述进化算法优化得到稀疏阵列,可以确定重建结果中的关键点,接着对得到的阵列进行聚类分析,确定实际激光接收器布局。模型采用  $K$  均值聚类分析算法对稀疏阵列的单元天线进行聚类,按照类别内距离最小化、类别间距离最大化的分类原则,在最小化误差函数的基础上将阵列划分为预设的  $K$  个类别<sup>[22-23]</sup>,算法流程如图 3 所示。

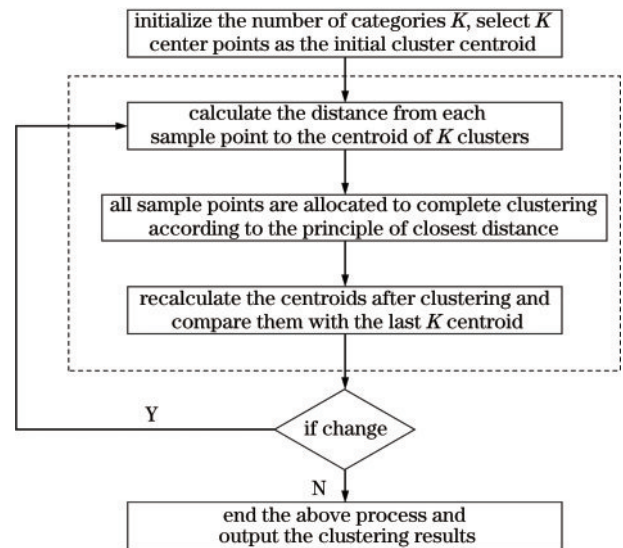


图 3  $K$  均值聚类算法流程图

Fig. 3  $K$ -means clustering algorithm flow chart

### 3 稀疏阵列分布设计优化

#### 3.1 均匀与稀疏阵列对比仿真

图 4 为均匀分布和稀疏分布示意图,发射阵列均匀配置 5 个发射天线(左侧圆点,  $r_{S1}, \dots, r_{S5}$ ), 间距  $\lambda$  (设  $\lambda$  为 1), 接收端与发射阵列相隔  $10\lambda$ 。接收端分别均匀分布 5 个天线(右侧圆点,  $r_{R1}, \dots, r_{R5}$ ), 稀疏分布 5 个天线(右侧方点,  $r'_{R1}, \dots, r'_{R5}$ )。其中均匀分布间距  $\lambda$ , 总长  $4\lambda$ ; 稀疏分布  $r'_{R1}, \dots, r'_{R5}$  分别间距  $2\lambda, 2\lambda, 4\lambda, 2\lambda$ , 总长  $10\lambda$ ;  $r_{R2}$  与  $r'_{R3}$  重合。

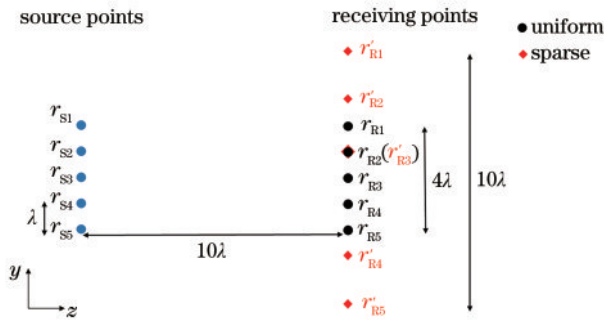


图 4 5-5 均匀分布与稀疏分布示意图

Fig. 4 5-5 schematic diagram of uniform distribution and sparse distribution

将均匀分布和稀疏分布的两者进行对比, 分别计算上述两种阵列分布情况下的奇异值  $\sigma$ , 同时计算最大奇异值  $\sigma_{\max}$  与各奇异值  $\sigma_n$  之比, 其中比值最大的即为条件数  $\kappa$ , 其计算结果如图 5 所示。由图 5(b) 可得均匀分布

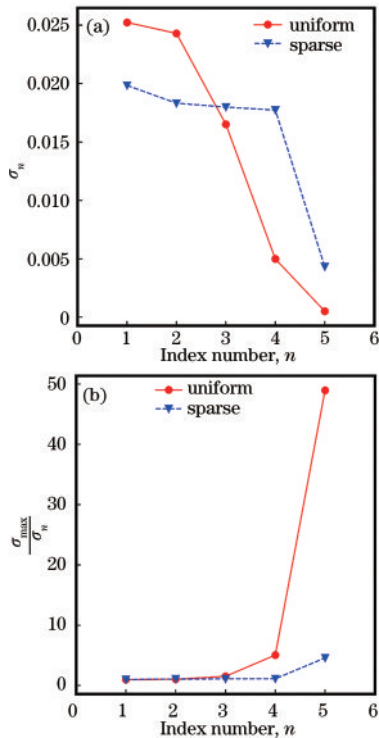


图 5 仿真实验结果。(a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$

Fig. 5 Simulated experimental results. (a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$

阵列的条件数为 48.97, 稀疏分布阵列的条件数为 4.58, 前者远远大于后者。由此可知在接收阵列拥有相同天线数目的条件下, 稀疏阵列所得到的奇异值明显更加均衡, 其条件数也远远优于均匀分布阵列。

#### 3.2 稀疏阵列优化模型仿真

所用模型的发射源在  $4\lambda \times 4\lambda$  的孔径范围内, 间距  $\lambda$  配置  $5 \times 5$  二维超声换能器阵列, 接收源在  $80\lambda \times 80\lambda$  的孔径范围内布局激光接收器, 发射阵列和接收阵列间距为  $128\lambda$  (设  $\lambda$  为 1), 如图 6 所示。首先将  $80\lambda \times 80\lambda$  的孔径进行离散化, 图中右侧每个方点代表单元天线, 间距  $\lambda$ 。选取多个网格点组合作为接收源的稀疏阵列, 并计算其对应的条件数, 利用进化随机搜索算法迭代优化上述过程, 直到条件数趋于稳定得到最优值。

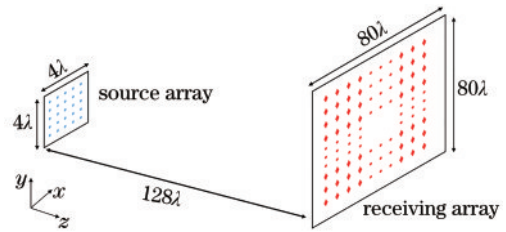


图 6 二维阵列示意图

Fig. 6 Schematic diagram of two-dimensional array

在离散后的网格点中选取 121 个单元天线, 经过种群规模为 100、最大进化代数 10 的进化搜索算法进行优化选择得到相应的稀疏阵列, 计算对应的奇异值  $\sigma$  和  $\sigma_{\max}/\sigma_n$ , 并和相同天线数量组成的  $11 \times 11$  均匀阵列进行比较, 其结果如图 7 所示。由图 7 可知, 优化选

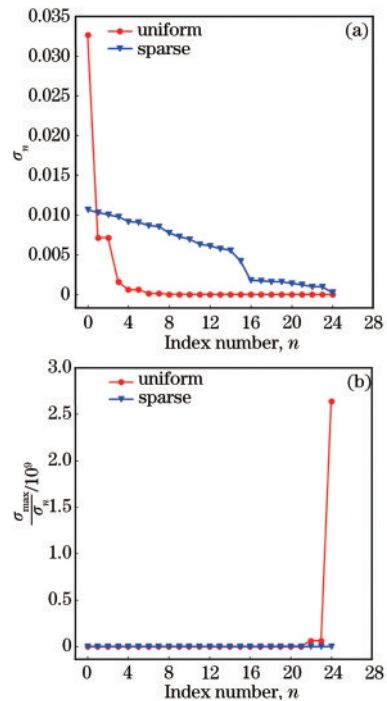


图 7 二维仿真实验结果图。(a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$

Fig. 7 Two-dimensional simulation experiment results. (a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$

择后的稀疏阵列的奇异值更加均衡,其条件数为 62, 远远优于均匀阵列,说明该进化算法在稀疏阵列的优化布局中十分有效。

保持种群规模不变,将最大进化代数分别设置为 100、200、300、500、700,继续优化阵列分布,奇异值及相应计算结果分别如图 8(a)和图 8(b)所示。由图 8(b)中可知,在最大进化代数参数从 100 增加到 300 时,目标函数有较大的变化,条件数下降明显,当进化代数达到 500、700 时,目标函数基本持平,条件数由 26.3894 降为 26.0211,奇异值分布变化趋于稳定。

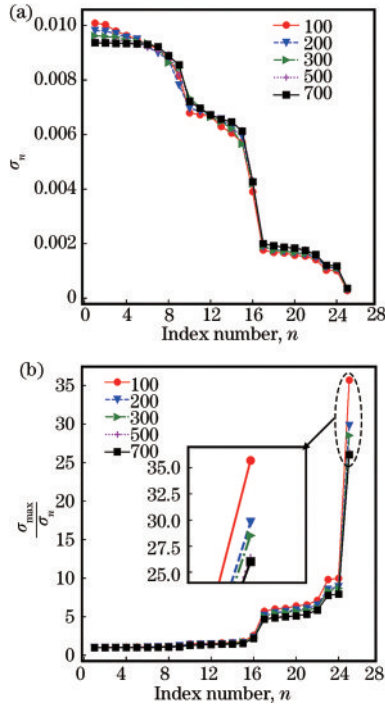


图 8 不同最大进化代数的计算结果。(a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$   
Fig. 8 Calculation results of different maximum evolutionary algebras. (a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$

此时保持进化代数为 700,将种群规模分别调整为 200、300、400 进行计算,其结果如图 9 所示。由图 9 中可知,在进化代数达到一定程度后,增加种群规模对优化结果的影响较小,随着种群规模从 100 增加到 200、300 时,条件数仅从 26.0211 分别降为 25.4814、25.4072,而当种群规模增加到 400 时,条件数反而增加到 25.4505。

### 3.3 冗余点分析

在上述计算过程中种群规模从 300 增加到 400 时,条件数反而增加。通过分析单元天线数量的分布,发现:种群规模为 300 时,优化后的实际有效单元天线有 88 个,冗余点(也称重复点,指重复选择某个空间位置上的单元天线)共计 33 个;当种群规模增加到 400 时,有效单元天线仅有 83 个,冗余点有 38 个。其他参数进化选择后的稀疏阵列中有效点和冗余点分布如图 10 所示,表 1 给出了进化选择后的条件数、有效点数量和

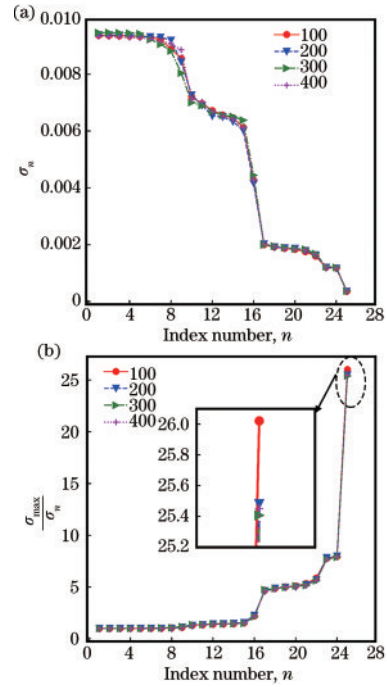


图 9 不同种群规模的计算结果。(a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$   
Fig. 9 Calculation results of different population sizes. (a)  $\sigma_n$ ; (b)  $\sigma_{\max}/\sigma_n$

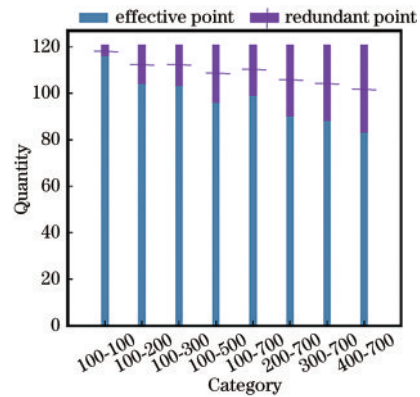


图 10 有效点-冗余点分析  
Fig. 10 Effective points-redundant points analysis

表 1 不同参数的优化结果  
Table 1 Optimization results of different parameters

Population size	Maximum evolutionary algebra	Condition number	Number of effective points	Running time /s
100	100	35.7069	116	14
100	200	29.7880	104	28
100	300	28.5230	103	46
100	500	26.3894	96	70
100	700	26.0211	99	99
200	700	25.4814	90	198
300	700	25.4072	88	297
400	700	25.4505	83	397

程序运行所需时间。

综合表 1 中数据,在进行稀疏阵列的优化设计时,为得到全局最优目标函数值,需要保证一定数量的有效单元天线,同时也需要考虑程序运行时间,避免不必要的计算资源浪费。通过上述分析可知,种群规模为 300、最大进化代数为 700,优化选择后拥有最优条件数 25.4072,将该条件数对应的天线组合作为最优稀疏阵列,即激光对声场重建结果的关键点。最优稀疏阵列的二维平面分布示意图如图 11 所示,图中方点表示单元天线。

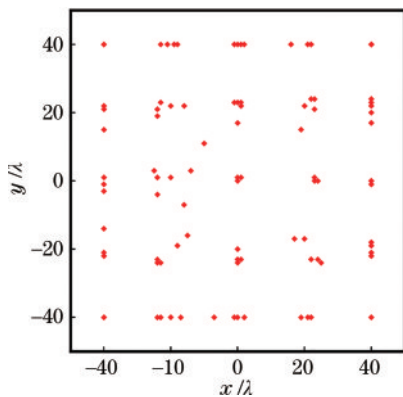


图 11 稀疏阵列分布平面示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sparse array distribution plane

### 3.4 聚类分析

对上述经优化选择后的稀疏阵列进行聚类分析,根据聚类结果确定最终激光接收器的空间位置。初始聚类类别数目  $K$  为 4,随机选择 4 个中心点作为初始质心,进行迭代聚类计算,直至聚类分配结果不再发生变化,得到实际激光接收器空间位置分布,其聚类结果如图 12 所示。由图 12 可知,原优化后稀疏阵列的单元天线经过聚类后,可以通过 4 个不同孔径的激光接收器进行替换分布,无需布置大量的换能器,降低系统复杂度。

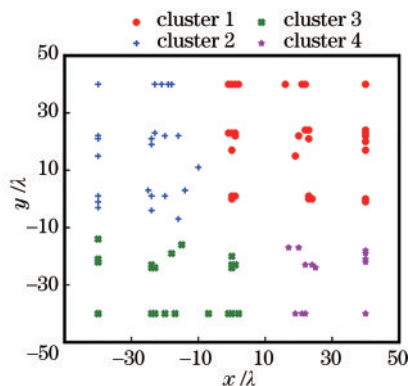


图 12 稀疏阵列聚类分布示意图

Fig. 12 Schematic diagram of sparse array clustering distribution

## 4 结 论

该空间扩容通信模型的创新性在于激光接收器

的维度扩展,单个激光接收器可基于声光效应对声场进行重建,代替传统换能器阵列;基于激光对声场的非接触无干扰的感知优势,可采用多层激光器进行接收重建,向空间维度进一步扩展缓解病态问题。结合不同孔径激光器的稀疏放置方式,可接收更多关键的、带有整体的信息,从而高效快速地复原初始完整信息。该空间扩容模型利用激光空间维度扩展和稀疏优化布局,拥有更大的等效接收孔径和更优的目标条件数,通过空间维度构建更多可用的正交信道以达到扩充信道容量的目的,为智慧海洋探测提供了大容量无线通信的模型理论基础研究。

## 参 考 文 献

- [1] 曾凤娇,杨康建,晏旭,等. 水下激光通信系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300002.  
Zeng F J, Yang K J, Yan X, et al. Research progress on underwater laser communication systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300002.
- [2] 王海斌,汪俊,台玉册,等. 水声通信技术研究进展与技术水平现状[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1441-1449.  
Wang H B, Wang J, Tai Y P, et al. Development and the state of the art in underwater acoustic communication [J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(9): 1441-1449.
- [3] Ebihara T, Mizutani K. Underwater acoustic communication with an orthogonal signal division multiplexing scheme in doubly spread channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 47-58.
- [4] Wang Y Y, Tai Y P, Wang H B, et al. The research of MIMO-FBMC in underwater acoustic communication [C]//Proceedings of the Thirteenth ACM International Conference on Underwater Networks & Systems, December 3-5, 2018, Shenzhen, China. New York: ACM Press, 2018: 1-5.
- [5] Riedl T, Singer A. MUST-READ: Multichannel sample-by-sample turbo resampling equalization and decoding[C]//2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen, June 10-14, 2013, Bergen, Norway. New York: IEEE Press, 2013.
- [6] Song H C, Hodgkiss W S. Efficient use of bandwidth for underwater acoustic communication[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(2): 905-908.
- [7] Shi C Z, Dubois M, Wang Y, et al. High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(28): 7250-7253.
- [8] 郭忠义,刘洪郡,李晶晶,等. 声涡旋信息应用研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(24): 244301.  
Guo Z Y, Liu H J, Li J J, et al. Research progress of applications of acoustic-vortex information[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(24): 244301.
- [9] Miller D A B. Spatial channels for communicating with waves between volumes[J]. Optics Letters, 1998, 23(21): 1645-1647.
- [10] Miller D A B. Establishing optimal wave communication

- channels automatically[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 3987-3994.
- [11] Piestun R, Miller D A B. Electromagnetic degrees of freedom of an optical system[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(5): 892-902.
- [12] Miller D A B. Communicating with waves between volumes: evaluating orthogonal spatial channels and limits on coupling strengths[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(11): 1681-1699.
- [13] Lee M, Neifeld M A, Ashok A. Capacity of electromagnetic communication modes in a noise-limited optical system[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1333-1342.
- [14] Zhao N B, Li X Y, Li G F, et al. Capacity limits of spatially multiplexed free-space communication[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(12): 822-826.
- [15] 薛彬, 王志洋, 张凯, 等. 基于声光效应的海水声速测量[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0404008.  
Xue B, Wang Z Y, Zhang K, et al. Seawater sound velocity measurement based on acousto-optic effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0404008.
- [16] 贾乐成, 陈世利, 曾周末. 超声声场光学检测的研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(9): 1-15.  
Jia L C, Chen S L, Zeng Z M. Research progress in optical detection of ultrasound fields: a review[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(9): 1-15.
- [17] Miller D A B. Waves, modes, communications, and optics: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(3): 679-825.
- [18] 惠梅, 王东生, 邓年茂, 等. 用矩阵条件数求解相移最佳采样方式[J]. *光子学报*, 2003, 32(4): 477-480.  
Hui M, Wang D S, Deng N M, et al. The solution of best sampling manner in phase-shifting interferometry based on matrix condition number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 477-480.
- [19] Artes H, Seethaler D, Hlawatsch F. Efficient detection algorithms for MIMO channels: a geometrical approach to approximate ML detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(11): 2808-2820.
- [20] Fogel D B. An introduction to simulated evolutionary optimization[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, 5(1): 3-14.
- [21] 张浩斌, 杜建春, 聂在平. 稀疏阵列天线综合的遗传算法优化[J]. *微波学报*, 2006, 22(6): 48-51, 62.  
Zhang H B, Du J C, Nie Z P. Thinned array synthesis using genetic algorithm[J]. *Journal of Microwaves*, 2006, 22(6): 48-51, 62.
- [22] Hung C H, Chiou H M, Yang W N. Candidate groups search for K-harmonic means data clustering[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(24): 10123-10128.
- [23] Abdeyazdan M. Data clustering based on hybrid K-harmonic means and modifier imperialist competitive algorithm[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2014, 68(2): 574-598.