

利用统计 CSI 的 DMA 辅助无线携能通信传输方法



Design of DMA Assisted Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Based on Statistical CSI

黄小钧/HUANG Xiaojun, 张军/ZHANG Jun

(南京邮电大学, 中国 南京 210003)
(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202403007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20240618.1833.006.html>

网络出版日期: 2024-06-20

收稿日期: 2024-04-06

摘要: 提出了一种利用统计信道状态信息 (CSI) 的动态超表面天线 (DMA) 辅助无线携能通信传输方法。考虑一个由 DMA 阵列代替传统天线阵列的基站、一个信息解码用户, 以及一个能量收集用户构成的无线携能通信系统, 将信道建模为莱斯空间相关信道, 提出了平均收集能量和发送功率约束条件下的可达遍历速率最大化问题。首先, 利用随机矩阵理论将优化问题转化为一个确定性的优化问题; 然后, 通过交替优化方法, 设计了可达速率最大化和仅利用统计 CSI 的基站发送协方差矩阵和 DMA 权值矩阵。仿真表明, 所提方法能达到通信速率和收集能量之间的最优折中。

关键词: 动态超表面天线; 无线携能通信; 统计信道状态信息; 多输入多输出

Abstract: A dynamic metasurface antenna (DMA) assisted wireless portable communication transmission method based on statistical channel state information (CSI) is proposed. A wireless portable communication system is introduced, consisting of a base station using a DMA array instead of a traditional antenna array, an information-decoding user, and an energy-harvesting user. The problem of maximizing the achievable ergodic rate under the constraints of average harvested energy and transmit power is proposed, where the channels are modeled as Rice channels. Firstly, the random matrix theory is used to transform the optimization problem into a deterministic optimization problem. Then, by applying alternating optimization methods, the transmit covariance matrix at the base station and DMA weight matrix are designed to maximize the achievable rate based on only statistical CSI. The simulation results show that the proposed method can achieve the optimal tradeoff between communication rate and harvested energy.

Keywords: DMA; simultaneous wireless information and power transfer; statistical CSI; MIMO

引用格式: 黄小钧, 张军. 利用统计 CSI 的 DMA 辅助无线携能通信传输方法[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 35-42. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403007

Citation: HUANG X J, ZHANG J. Design of DMA assisted simultaneous wireless information and power transfer based on statistical CSI [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(3): 35-42. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403007

针对 5G 移动通信系统的不足, 学术界和工业界对 6G 移动通信系统提出了更高的要求, 如超高的数据传输速率、超低功耗、全球范围覆盖以及超低硬件成本等^[1]。动态超表面天线 (DMA) 是近年来基于超材料发展的一种新型阵列天线, 由于其天然的低能耗、低成本的材料属性, 有望在基站处代替传统的天线阵列^[2]。DMA 阵列能够对发射和接收波束进行可编程控制, 并天然具备信号处理能力而不需要

专用模拟电路, 与传统天线阵列相比需要更少的射频链和模数转换器^[3]。在文献[4]中, 作者提出使用背腔 DMA 的空间复用系统, 提高了集群环境中的多输入多输出 (MIMO) 通信能力, 并进行了数字模拟仿真。但是, 通过利用瞬时信道状态信息 (CSI) 来调整 DMA 权值参数在实际通信中是不合理的。首先, 瞬时 CSI 是快速时变的, 迫使 DMA 需要频繁调整其特性以跟上信道状态变化, 从而导致显著的信令开销^[5]; 其次, DMA 通过配备智能控制器实现幅度或相位调谐, 虽然智能控制器能够在少量的能量下运行, 但当持续运行过载时仍然会导致耗电高的问题, 频繁地调整 DMA 权值

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62071247)

并不节能。与利用瞬时CSI相比,统计CSI有较长的相干周期,可以有效减少信令开销并降低功耗^[6]。

同时,随着无线通信技术的快速发展,无线通信网络中的设备对能源的消耗变得越来越大。考虑到无线电频率信号同时携带信息和能量^[7],在文献[8]中,作者研究了单输入单输出信道的无线携能通信方案,将无线信息传输和无线功率传输结合。在文献[9]中,作者进一步通信系统拓展到MIMO场景,研究了基于服务质量和能量约束的无线携能通信系统。文献[10]在无线携能通信系统中考虑MIMO窃听信道,假设基站仅知统计CSI,在收集能量约束条件下实现了系统的遍历安全速率最大化。

由于在无线携能通信系统中,传统天线阵列面临着成本高、功耗大和物理尺寸受限的问题,本文在仅知统计CSI的条件下,利用无线携能通信和DMA技术,与无线设备进行信息交互的同时为无线设备提供能量,并有效降低系统的硬件复杂度、实施成本和功率消耗,且避免了获取瞬时CSI带来的困难。本文主要的研究工作如下:

1) 假设基站仅已知统计CSI,建立DMA辅助的无线携能通信系统模型,在空间相关莱斯信道中,为了克服对信道进行蒙特卡洛平均而带来的计算复杂性,利用大系统近似理论得到信息解码用户遍历速率的确定性等价式。

2) 提出一种交替优化算法,以最大化所得确定性等价式为目标,在发送功率和收集能量约束条件下设计发送协方差矩阵,在DMA权值和收集能量约束条件下设计DMA权值矩阵。

3) 仿真结果表明,信息解码用户遍历速率的确定性等价式与蒙特卡洛结果具有很好的拟合度。所提发送协方差矩阵和DMA权值矩阵设计方法可以有效提高通信系统的速率性能。

1 系统模型与问题描述

1.1 系统模型

考虑一个DMA辅助的无线携能通信系统,如图1所示,该系统包括一个配备DMA阵列的基站、一个信息解码用户以及一个能量收集用户。其中,DMA阵列配备K条微带,每条微带配备L个超材料阵元,即基站处的DMA阵列配备 $N = K \times L$ 个超材料阵元,信息解码用户和能量收集用户分别配备n根天线和m根天线。

将DMA阵列中每个超材料阵元的增益记为 ξ_{l,k_2} ,则DMA的权值矩阵 $\mathbf{E} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 可以表示为:

$$[\mathbf{E}]_{(k_1-1)L+l,k_2} = \begin{cases} \xi_{l,k_2} \in \mathcal{D}, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $k_1, k_2 \in \{1, \dots, K\}$, $l \in \{1, \dots, L\}$, \mathcal{D} 表示DMA阵元增益可能取值的集合,典型的权值约束形式有4种:权值无限制,即 $\mathcal{D} = \mathbb{C}$;唯幅度约束,即 $\mathcal{D} = [x, y]$, $0 < x < y \in \mathbb{R}$;二值幅度约束,即 $\mathcal{D} = c \cdot \{0, 1\}$, $c \in \mathbb{R}^+$;洛伦兹相位约束,即 $\mathcal{D} = \{(j + e^{j\varphi})/2 | \varphi \in [0, 2\pi]\}$ 。信号在微带内的传播过程可以建模为具有有限脉冲响应的等效因果滤波器:

$$f_{k,l} = e^{-r_{l,k}(\alpha_k + j\beta_k)}, \quad (2)$$

其中, $k \in \{1, \dots, K\}$, $r_{l,k}$ 表示第k条微带的第l个阵元的位置, α_k 表示波导衰减系数, β_k 表示波数。等效脉冲响应的矩阵形式 $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 可以表示为:

$$[\mathbf{F}]_{(k-1)L+l, (k-1)L+l} = f_{k,l}. \quad (3)$$

在DMA中,每条微带的输出是相应微带上超材料阵元观测到的辐射的线性组合。因此,配备了DMA阵列的基站的发射信号 $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^K$ 可以表示为:

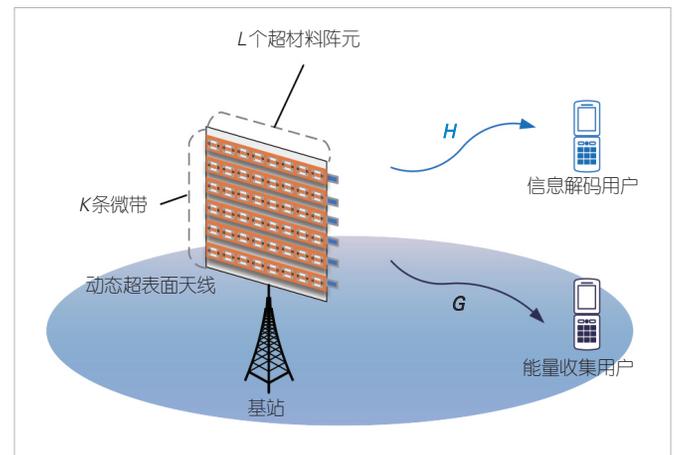
$$\mathbf{z} = \mathbf{F}\mathbf{E}\mathbf{x}. \quad (4)$$

将信道建模为莱斯衰落信道,使用Kronecker模型描述信道的空间相关性。基站到信息解码用户之间的信道 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{n \times N}$ 和基站到能量收集用户之间的信道 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{m \times N}$ 分别表示为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_H^{\frac{1}{2}} \mathbf{X}_H \mathbf{T}_H^{\frac{1}{2}} + \bar{\mathbf{H}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_G^{\frac{1}{2}} \mathbf{X}_G \mathbf{T}_G^{\frac{1}{2}} + \bar{\mathbf{G}}, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{T}_H \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 和 $\mathbf{T}_G \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示基站发射天线的空间相



▲图1 动态超表面天线(DMA)辅助的无线携能通信系统

关性矩阵, $\mathbf{R}_H \in \mathbb{C}^{m \times m}$ 和 $\mathbf{R}_G \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 表示用户接收天线的空间相关性矩阵, $\bar{\mathbf{H}} \in \mathbb{C}^{n \times N}$ 和 $\bar{\mathbf{G}} \in \mathbb{C}^{m \times N}$ 表示信道的确定性视距分量, $\mathbf{X}_H = [1/\sqrt{N} X_{H,ij}] \in \mathbb{C}^{n \times N}$ 和 $\mathbf{X}_G = [1/\sqrt{N} X_{G,ij}] \in \mathbb{C}^{m \times N}$ 表示信道的随机成分, $X_{H,ij}$ 和 $X_{G,ij}$ 是独立同分布的复随机变量, 具有零均值和单位方差。

用 κ_1 和 κ_2 表示基站和信息解码用户之间以及基站和能量收集用户之间链路的莱斯因子, Γ_1 和 Γ_2 表示两条链路的大尺度衰落系数, 对 \mathbf{R}_H 、 \mathbf{T}_H 、 $\bar{\mathbf{H}}$ 、 \mathbf{R}_G 、 \mathbf{T}_G 和 $\bar{\mathbf{G}}$ 做归一化处理:

$$\text{tr}(\mathbf{R}_H) = n, \quad \text{tr}(\mathbf{T}_H) = \frac{1}{\kappa_1 + 1} N\Gamma_1, \quad (7)$$

$$\text{tr}(\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{H}}^H) = \frac{\kappa_1}{\kappa_1 + 1} n\Gamma_1, \quad (8)$$

$$\text{tr}(\mathbf{R}_G) = m, \quad \text{tr}(\mathbf{T}_G) = \frac{1}{\kappa_2 + 1} N\Gamma_2, \quad (9)$$

$$\text{tr}(\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{G}}^H) = \frac{\kappa_2}{\kappa_2 + 1} m\Gamma_2. \quad (10)$$

因此, 信息解码用户处接收到的信号 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^n$ 可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{E}\mathbf{s} + \mathbf{w}, \quad (11)$$

其中, $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^n$ 表示服从独立分布的零均值复加性高斯噪声向量, 方差为 σ , $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^k$ 表示零均值高斯向量信号, 协方差矩阵为 $\mathbf{Q} = \mathbb{E}\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\} \in \mathbb{C}^{k \times k}$, $\mathbb{E}\{\cdot\}$ 表示求期望。基站发送功率满足:

$$\text{tr}(\mathbf{Q}) \leq NP, \quad (12)$$

其中, $P > 0$ 表示基站的功率预算。

由于无线信道的广播性质, 能量收集用户可以从周围环境中的射频信号中收集能量。在一个时隙内, 能量收集用户的平均收集能量 E 表示为:

$$E = \varsigma \mathbb{E}\{\text{tr}(\mathbf{G}\mathbf{E}\mathbf{Q}\mathbf{E}^H\mathbf{G}^H)\}, \quad (13)$$

其中, $\varsigma \in (0, 1]$ 表示能量收集用户的收集效率。

因此, 基站和信息解码用户之间的可达遍历速率可以表示为:

$$R(\mathbf{Q}, \mathbf{E}) = \frac{1}{N} \mathbb{E}\{\log\det(\mathbf{I}_n + \mathbf{H}\mathbf{E}\mathbf{Q}\mathbf{E}^H\mathbf{H}^H)\}. \quad (14)$$

1.2 问题描述

在无线携能通信系统中, 通信速率和能量收集之间存在

折中。本文的目标是在能量收集用户的收集能量约束条件下, 通过优化发送协方差矩阵和 DMA 权值矩阵, 来最大化可达遍历速率。因此, 问题可以表述为:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{Q}, \mathbf{E}} R(\mathbf{Q}, \mathbf{E}) \\ & \text{s.t.} \quad \text{tr}(\mathbf{Q}) \leq NP, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0} \\ & \quad \mathbb{E}\{\text{tr}(\mathbf{G}\mathbf{E}\mathbf{Q}\mathbf{E}^H\mathbf{G}^H)\} \geq E_0 \\ & \quad [\mathbf{E}]_{(k_1-1)L+L, k_2} = \begin{cases} \xi_{k_1, l} \in \mathcal{D}, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2, \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, E_0 表示一个时隙内能量收集用户的最低平均收集能量。上述优化问题是非凸的, 优化变量 \mathbf{Q} 和 \mathbf{E} 在目标函数和约束条件中均是耦合的, 很难同时进行优化, 且由于优化目标为速率期望的形式, 需要对信道采用蒙特卡洛平均。

2 发送协方差矩阵和 DMA 权值矩阵设计

2.1 可达遍历速率的确定性等价表达式

在求解优化问题 (15) 时, 为了避免对信道的蒙特卡洛平均, 首先利用大维随机矩阵理论, 获得可达遍历速率在大系统状态下的确定性等价表达式。当天线数均趋向于无穷大, 且比值 n/N 和 m/N 保持不变时, 得到式 (14) 的确定性等价表达式:

$$\begin{aligned} \bar{R}(\mathbf{Q}, \mathbf{E}) = \frac{1}{N} \log\det & \left\{ \frac{\mathbf{I}_k + e\mathbf{E}^H\mathbf{T}_H\mathbf{E}\mathbf{Q} +}{\sigma^2} \mathbf{E}^H\bar{\mathbf{H}}^H(\mathbf{I}_n + \tilde{e}\mathbf{R}_H)^{-1}\bar{\mathbf{H}}\mathbf{E}\mathbf{Q} \right\} + \\ & \frac{1}{N} \log\det(\mathbf{I}_n + \tilde{e}\mathbf{R}_H) - \sigma^2 e\tilde{e}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中, e 和 \tilde{e} 的具体表达式为:

$$e = \frac{1}{N} \text{tr} \left(\mathbf{R}_H \left(\sigma^2(\mathbf{I}_n + \tilde{e}\mathbf{R}_H) + \bar{\mathbf{H}}\mathbf{E}\mathbf{Q}(\mathbf{I}_k + e\mathbf{E}^H\mathbf{T}_H\mathbf{E}\mathbf{Q})^{-1}\mathbf{E}^H\bar{\mathbf{H}}^H \right)^{-1} \right), \quad (17)$$

$$\tilde{e} = \frac{1}{N} \text{tr} \left(\mathbf{E}^H\mathbf{T}_H\mathbf{E}\mathbf{Q} \left(\sigma^2(\mathbf{I}_k + e\mathbf{E}^H\mathbf{T}_H\mathbf{E}\mathbf{Q}) + \mathbf{E}^H\bar{\mathbf{H}}^H(\mathbf{I}_n + \tilde{e}\mathbf{R}_H)^{-1}\bar{\mathbf{H}}\mathbf{E}\mathbf{Q} \right)^{-1} \right). \quad (18)$$

2.2 优化问题重构

不考虑常数 ς 的影响, 用 \otimes 表示克罗内克积, $\text{vec}(\cdot)$ 表示矩阵向量化, 利用矩阵运算性质, 式 (13) 的平均收集能量 E 进一步写为:

$$\begin{aligned}
 E &= \text{tr}(\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{Q}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}) + \mathbb{E}\left\{\text{tr}\left(\mathbf{X}_{\text{C}}\mathbf{T}_{\text{C}}^{\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{Q}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}^{\frac{1}{2}}\mathbf{X}_{\text{C}}^{\text{H}}\mathbf{R}_{\text{C}}\right)\right\} = \\
 &\text{tr}(\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{Q}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}) + \\
 &\mathbb{E}\left\{\text{tr}\left(\text{vec}(\mathbf{X}_{\text{C}})\right)^{\text{H}}\left(\left(\mathbf{T}_{\text{C}}^{\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{Q}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}^{\frac{1}{2}}\right) \otimes \mathbf{R}_{\text{C}}\right)\text{vec}(\mathbf{X}_{\text{C}})\right\} = \\
 &\text{tr}(\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{Q}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}) + \frac{1}{N}\text{tr}\left(\left(\mathbf{T}_{\text{C}}^{\frac{1}{2}}\bar{\mathbf{E}}\mathbf{Q}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}^{\frac{1}{2}}\right) \otimes \mathbf{R}_{\text{C}}\right) = \\
 &\text{tr}\left(\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}\bar{\mathbf{E}}\right)\mathbf{Q}\right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

因此，原始优化问题 (15) 可以转换为：

$$\begin{aligned}
 &\max_{\mathbf{Q}, \bar{\mathbf{E}}} \bar{R}(\mathbf{Q}, \bar{\mathbf{E}}) \\
 &\text{s.t.} \quad \text{tr}(\mathbf{Q}) \leq NP, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0} \\
 &\quad \text{tr}\left(\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}\bar{\mathbf{E}}\right)\mathbf{Q}\right) \geq E_0 \\
 &\quad [\bar{\mathbf{E}}]_{(k_1-1)L+k_2} = \begin{cases} \xi_{k_1, l} \in \mathcal{D}, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2 \end{cases} \quad (20)
 \end{aligned}$$

上述优化问题仍然是非凸的，接下来使用交替优化算法分别设计发送协方差矩阵和DMA权值矩阵。

2.3 发送协方差矩阵设计

当DMA权值矩阵 $\bar{\mathbf{E}}$ 给定时，相应的优化 \mathbf{Q} 的子问题可以表示为：

$$\begin{aligned}
 &\max_{\mathbf{Q}} \bar{R}(\mathbf{Q}) \\
 &\text{s.t.} \quad \text{tr}(\mathbf{Q}) \leq NP, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0} \\
 &\quad \text{tr}\left(\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}\bar{\mathbf{E}}\right)\mathbf{Q}\right) \geq E_0 \quad (21)
 \end{aligned}$$

上述优化问题是非凸的，将在下面的定理1中给出问题 (21) 的解。

定理1 矩阵 $\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{B}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}$ 的奇异值分解可以表示为 $\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{B}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} = \mathbf{U}_{\text{K}}\boldsymbol{\Sigma}_{\text{K}}\mathbf{U}_{\text{K}}^{\text{H}}$ ，则问题 (21) 的最优解可以表示为：

$$\mathbf{Q}^{\text{opt}} = \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{U}_{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{K}}^{\text{opt}}\mathbf{U}_{\text{K}}^{\text{H}}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

\mathbf{B} 和 \mathbf{K} 的表达式为：

$$\mathbf{B} = e\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{H}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{1}{\sigma^2}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{H}}^{\text{H}}(\mathbf{I}_n + \bar{e}\mathbf{R}_{\text{H}})^{-1}\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{E}} \quad (23)$$

$$\mathbf{K} = -\frac{\lambda}{\nu}\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{H}}\bar{\mathbf{E}}\right) + \mathbf{I}_{\text{K}} \quad (24)$$

其中， $\lambda \geq 0$ 和 $\nu > 0$ 是满足约束条件的拉格朗日参数。奇异矩阵 $\mathbf{A}_{\text{K}}^{\text{opt}}$ 的表达式为：

$$\mathbf{A}_{\text{K}}^{\text{opt}} = \left(\frac{1}{\nu}\mathbf{I}_{\text{K}} - \boldsymbol{\Sigma}_{\text{K}}^{-1}\right)^+ \quad (25)$$

证明优化问题 (21) 的拉格朗日函数可以表示为：

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(\mathbf{Q}, \lambda, \nu, \boldsymbol{\tau}) &= \\
 &-\bar{R}(\mathbf{Q}) + \nu(\text{tr}(\mathbf{Q} - NP)) - \text{tr}(\boldsymbol{\tau}\mathbf{Q}) - \\
 &\lambda\left(\text{tr}\left(\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}\bar{\mathbf{E}}\right)\mathbf{Q}\right) - E_0\right), \quad (26)
 \end{aligned}$$

其中， $\lambda \geq 0$ ， $\nu > 0$ 和 $\boldsymbol{\tau} \geq \mathbf{0}$ 是满足约束条件的拉格朗日参数。通过将函数 $\mathcal{L}(\mathbf{Q}, \lambda, \nu, \boldsymbol{\tau})$ 对 \mathbf{Q} 进行偏导运算，得到优化问题 (21) 的KKT条件。令

$$\mathbf{B} = e\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{H}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{1}{\sigma^2}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{H}}^{\text{H}}(\mathbf{I}_n + \bar{e}\mathbf{R}_{\text{H}})^{-1}\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{E}} \quad (27)$$

则KKT条件可以表示为：

$$\begin{cases} -\frac{1}{N}(\mathbf{I}_{\text{K}} + \mathbf{B}\mathbf{Q})^{-1}\mathbf{B} + \nu\mathbf{I}_{\text{K}} - \boldsymbol{\tau} - \lambda\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}\bar{\mathbf{E}}\right) = \mathbf{0}, \\ \lambda \geq 0 \\ \text{tr}(\boldsymbol{\tau}\mathbf{Q}) = 0, \boldsymbol{\tau} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0} \\ \lambda\left(E_0 - \text{tr}\left(\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{C}}\bar{\mathbf{E}}\right)\mathbf{Q}\right)\right) = 0 \\ \nu(NP - \text{tr}(\mathbf{Q})) = 0, \nu > 0 \end{cases} \quad (28)$$

另外，我们令

$$\mathbf{K} = -\frac{\lambda}{\nu}\left(\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}^{\text{H}}\bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{E}} + \frac{m}{N}\bar{\mathbf{E}}^{\text{H}}\mathbf{T}_{\text{H}}\bar{\mathbf{E}}\right) + \mathbf{I}_{\text{K}} \quad (29)$$

则式 (28) 中KKT条件的第一行可以转换为：

$$-\frac{1}{N}\left(\mathbf{I}_{\text{K}} + \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{B}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{Q}'\right)^{-1}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{B}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}} + \nu\mathbf{I}_{\text{K}} - \boldsymbol{\tau}' = \mathbf{0} \quad (30)$$

其中， $\mathbf{Q}' = \mathbf{K}^{\frac{1}{2}}\mathbf{Q}\mathbf{K}^{\frac{1}{2}}$ ， $\boldsymbol{\tau}' = \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\boldsymbol{\tau}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}$ 。于是，式 (28) 中KKT条件可以等效于：

$$\begin{aligned}
 &\max_{\mathbf{Q}'} \log\det\left(\mathbf{I}_{\text{K}} + \mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{B}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{Q}'\right) \\
 &\text{s.t.} \quad \text{tr}(\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{Q}'\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}) \leq NP, \mathbf{Q}' \geq \mathbf{0} \quad (31)
 \end{aligned}$$

上述优化问题可以通过注水算法求解，通过奇异值分解 $\mathbf{K}^{-1/2}\mathbf{B}\mathbf{K}^{-1/2} = \mathbf{U}_{\text{K}}\boldsymbol{\Sigma}_{\text{K}}\mathbf{U}_{\text{K}}^{\text{H}}$ ，得到最优发送协方差矩阵 $\mathbf{Q}^{\text{opt}} = \mathbf{K}^{-1/2}\mathbf{U}_{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{K}}^{\text{opt}}\mathbf{U}_{\text{K}}^{\text{H}}\mathbf{K}^{-1/2}$ ，其中 $\mathbf{A}_{\text{K}}^{\text{opt}} = (1/\nu\mathbf{I}_{\text{K}} - \boldsymbol{\Sigma}_{\text{K}}^{-1})^+$ 。

2.4 DMA权值矩阵设计

当发送协方差矩阵 \mathbf{Q} 给定时, 相应的优化 Ξ 的子问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \max_{\Xi} \quad & \bar{R}(\Xi) \\ \text{s.t.} \quad & \text{tr} \left(\left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{G}} + \frac{m}{N} \mathbf{T}_C \right) \Xi \mathbf{Q} \Xi^H \right) \geq E_0 \\ & [\Xi]_{(k_1-1)L+L, k_2} = \begin{cases} \xi_{k_1, l} \in \mathcal{D}, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (32)$$

首先, 由定理2得到DMA权值矩阵无约束时的最优解。然后, 将设计有约束的最优DMA权值矩阵问题转换为Frobenius范数最小化问题, 使有约束的DMA权值矩阵与所求无约束最优解的距离最小。优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \min_{\Xi} \quad & \left\| \Xi - \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U} \mathbf{Q} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \right\|_F \\ \text{s.t.} \quad & [\Xi]_{(k_1-1)L+L, k_2} = \begin{cases} \xi_{k_1, l} \in \mathcal{D}, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (33)$$

上述优化问题的最优解可以表示为:

$$\begin{aligned} [\Xi^{\text{opt}}]_{(k_1-1)L+L, k_2} = & \\ \begin{cases} \arg \min_{\xi_{k_1, l} \in \mathcal{D}} \left| \xi_{k_1, l} - [\Xi^*]_{(k_1-1)L+L, k_2} \right|^2, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (34)$$

定理2 矩阵 $\mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}}$ 的特征值分解可以表示为 $\mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} = \mathbf{U}_V \Sigma_V \mathbf{U}_V^H$, 则DMA权值矩阵无约束时的最优解可以表示为:

$$\Xi^* = \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U} \mathbf{Q} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}}, \quad (35)$$

其中, 矩阵 \mathbf{U} 是对 $\mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}}$ 进行特征值分解得到的降序排列的前 K 个特征值对应的特征向量矩阵。 \mathbf{A} 和 \mathbf{V} 的表达式为:

$$\mathbf{A} = e \mathbf{T}_H + \frac{1}{\sigma^2} \bar{\mathbf{H}}^H (\mathbf{I}_n + \tilde{e} \mathbf{R}_H)^{-1} \bar{\mathbf{H}}, \quad (36)$$

$$\mathbf{V} = -\mu \left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{G}} + \frac{m}{N} \mathbf{T}_H \right). \quad (37)$$

证明DMA权值矩阵无约束时, 优化问题(32)的拉格朗日函数可以表示为:

$$\mathcal{L}(\Xi, \mu) = -\mu \left(\text{tr} \left(\left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{G}} + \frac{m}{N} \mathbf{T}_C \right) \Xi \mathbf{Q} \Xi^H \right) - E_0 \right) - \bar{R}(\Xi), \quad (38)$$

其中, $\mu \geq 0$ 是满足约束条件的拉格朗日参数。通过将函数

$\mathcal{L}(\Xi, \mu)$ 对 Ξ 进行偏导运算, 得到DMA权值矩阵无约束时优化问题(32)的KKT条件。令

$$\mathbf{A} = e \mathbf{T}_H + \frac{1}{\sigma^2} \bar{\mathbf{H}}^H (\mathbf{I}_n + \tilde{e} \mathbf{R}_H)^{-1} \bar{\mathbf{H}}, \quad (39)$$

则KKT条件可以表示为:

$$\begin{cases} -\frac{1}{N} (\mathbf{I}_K + \mathbf{A} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{A} - \mu \left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{G}} + \frac{m}{N} \mathbf{T}_C \right) = 0 \\ \mu \left(E_0 - \text{tr} \left(\left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{G}} + \frac{m}{N} \mathbf{T}_C \right) \Xi \mathbf{Q} \Xi^H \right) \right) = 0 \\ \mu \geq 0 \end{cases}, \quad (40)$$

其中, $\mathbf{C} = \Xi \mathbf{Q} \Xi^H$ 。另外, 我们令

$$\mathbf{V} = -\mu \left(\bar{\mathbf{G}}^H \bar{\mathbf{G}} + \frac{m}{N} \mathbf{T}_H \right). \quad (41)$$

则式(40)中KKT条件的第一行可以转换为:

$$-\frac{1}{N} \left(\mathbf{I}_K + \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{C}' \right)^{-1} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} = 0, \quad (42)$$

其中, $\mathbf{C}' = \mathbf{V}^{\frac{1}{2}} \mathbf{C} \mathbf{V}^{\frac{1}{2}}$ 。于是, 式(40)中KKT条件可以等效于以下优化问题:

$$\max_{\mathbf{C}'} \quad \log \det \left(\mathbf{I}_K + \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{C}' \right). \quad (43)$$

令 $\mathbf{V}^{-1/2} \mathbf{A} \mathbf{V}^{-1/2} = \mathbf{U}_V \Sigma_V \mathbf{U}_V^H$, 将得到的降序排列的前 K 个特征值对应的特征向量矩阵记为 \mathbf{U} , 则DMA权值矩阵无约束时的最优解为 $\Xi^* = \mathbf{V}^{-1/2} \mathbf{U} \mathbf{Q} \mathbf{V}^{-1/2}$ 。

2.5 发送协方差矩阵和DMA权值矩阵的联合设计

发送协方差矩阵和DMA权值矩阵的完整交替优化算法如算法1所示:

算法1: 交替优化算法

初始化: $\mathbf{Q}^{(0)} = \mathbf{I}_K, \Xi^{(0)} = \Xi^{\text{ran}}, e^{(0)} = \tilde{e}^{(0)} = 1, \varepsilon = 10^{-4}$

(1) 循环

(2) 过程1: 给定 Ξ , 求解最优解 \mathbf{Q}^{opt}

(3) 根据式(23)和式(24), 计算 $\mathbf{B}^{(t+1)}$ 和 $\mathbf{K}^{(t+1)}$

(4) 根据式(22)计算 $\mathbf{Q}^{(t+1)}$, 并且根据基站发送功率约束 $\text{tr} \mathbf{Q} \leq MP$ 和能量收集用户的收集能量约束条件 $E \{ \text{tr}(\mathbf{G} \Xi \mathbf{Q} \Xi^H \mathbf{G}^H) \} \geq E_0$, 确定合适的 $\nu^{(t+1)}$ 和 $\lambda^{(t+1)}$

(5) 根据式(17)和式(18)计算 $e^{(t+1)}$ 和 $\tilde{e}^{(t+1)}$

(6) 根据式(16)计算 $\bar{R}(\mathbf{Q}^{(t+1)}, \Xi)$

(7) 更新 $t = t + 1$, 直到 $|\bar{R}(\mathbf{Q}^{(t+1)}, \Xi) - \bar{R}(\mathbf{Q}^{(t)}, \Xi)| \leq \varepsilon$

- (8) 获得 $Q^{opt} = Q^{(t+1)}$
- (9) 过程2: 给定 Q , 求解最优解 Ξ^{opt}
- (10) 根据式(36)和式(37), 计算 $A^{(t+1)}$ 和 $V^{(t+1)}$
- (11) 根据式(35)计算无约束的 $\Xi^{*(t+1)}$, 并且能量收集用户的收集能量约束条件 $E\{\text{tr}(G\Xi Q \Xi^H G^H)\} \geq E_0$, 确定合适的 $\mu^{(t+1)}$
- (12) 根据式(34)计算 $\Xi^{(t+1)}$
- (13) 根据式(17)和式(18)计算 $e^{(t+1)}$ 和 $\bar{e}^{(t+1)}$
- (14) 根据式(16)计算 $\bar{R}(Q, \Xi^{(t+1)})$
- (15) 更新 $t: t = t + 1$, 直到 $|\bar{R}(Q, \Xi^{(t+1)}) - \bar{R}(Q, \Xi^{(t)})| \leq \varepsilon$
- (16) 获得 $\Xi^{opt} = \Xi^{(t+1)}$
- (17) 直到 $|\bar{R}(Q^{opt}, \Xi^{opt}) - \bar{R}(Q^{(t)}, \Xi^{(t)})| \leq \varepsilon$, 结束循环

3 仿真结果分析

本节将通过仿真结果来验证我们所提出算法的有效性, 仿真参数设置如表1所示。DMA阵元增益可能取值的集合设置为 $\mathcal{D} = \mathbb{C}$, 大尺度衰落系数设置为 $\Gamma_i = \Gamma_0 d_i^{-\tau}$, $i = 1, 2$, 信道的视距分量设置为全1矩阵, R_H 和 R_C 设置为单位阵, T_H 和 T_C 的表达式为:

$$[T_H \text{ 或 } T_C]_{x,y} = \int_{-180^\circ}^{180^\circ} \frac{d\phi}{\sqrt{2\pi\delta^2}} e^{2\pi j d_i(x-y)\sin(\frac{\pi\phi}{180}) - \frac{(\phi-\eta)^2}{2\delta^2}} \quad (44)$$

图2展示了不同优化方案下遍历速率的确定性等价式(标记)与10 000次的蒙特卡洛模拟仿真结果(实线)。设置基站处的DMA超材料阵元数 $N = 16$, 微带条数 $K = 4$, 每条微带上超材料阵元数 $L = 4$, 信息解码用户处的天线数 $n = 16$, 能量收集用户处的天线数 $m = 12$, E_0 一个时隙内能量收集用户的最低平均收集能量 $E_0 = 0.1 \text{ W}$ 。从图中可以看出, 所得确定性等价式具有良好的近似效果。为避免对信道采用蒙特卡洛平均以降低计算复杂度, 后续仿真皆展示遍历速率的确定性等价式结果。初始发送协方差矩阵 $Q^{(0)}$ 设置为单位阵, 初始DMA权值矩阵 $\Xi^{(0)}$ 设置为随机生成且满足DMA结构约束的矩阵。可以观察到, 联合优化发送协方差

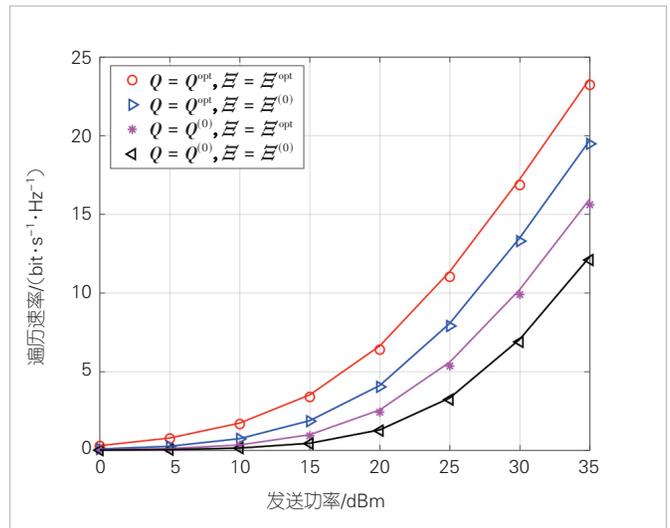
▼表1 仿真参数设置

参数	数值
大尺度衰落归一化系数 Γ_0	10^{-4}
传播环境的路径损失指数 τ	4
基站到信息解码用户的距离 d_1, d_2	10 m
相对天线间距(单位为波长) d_s	1
平均角度 η_H	40°
平均角度 η_C	-10°
角度分布均方根 δ_H, δ_C	9°

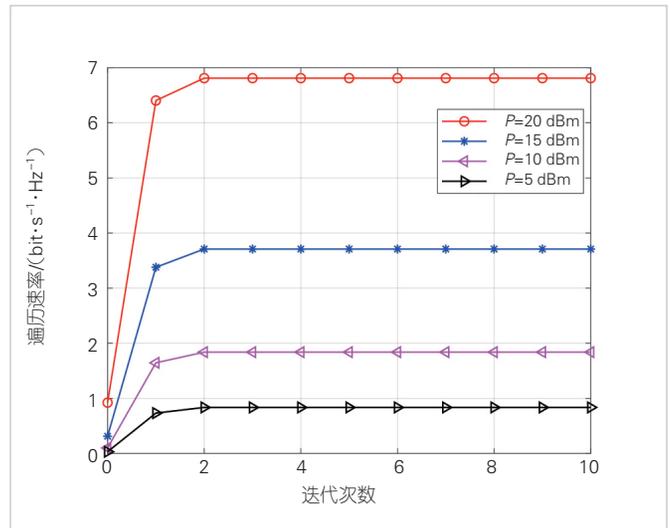
矩阵 Q 和DMA权值矩阵 Ξ 可以显著提升遍历速率, 且仅优化 Q 和 Ξ 也可以在一定程度上改善系统。

图3显示了所提交替优化算法的收敛性。设置基站处的DMA超材料阵元数 $N = 16$, 微带条数 $K = 4$, 每条微带上超材料阵元数 $L = 4$, 信息解码用户处的天线数 $n = 16$, 能量收集用户处的天线数 $m = 12$, 一个时隙内能量收集用户的最低平均收集能量 $E_0 = 0.1 \text{ W}$ 。图中4条曲线分别展示了不同发送功率下所提交替优化算法的收敛情况, 可以看到, 所提出的迭代算法收敛速度较快。

图4比较了在基站侧分别配备DMA阵列和传统天线阵列时的系统遍历速率性能。设置基站处的传统天线数 $N' = 16$, DMA超材料阵元数 $N = 16$, 微带条数 $K = 4$, 每条微带上超材料阵元数 $L = 4$, 信息解码用户处的天线数 $n = 16$,



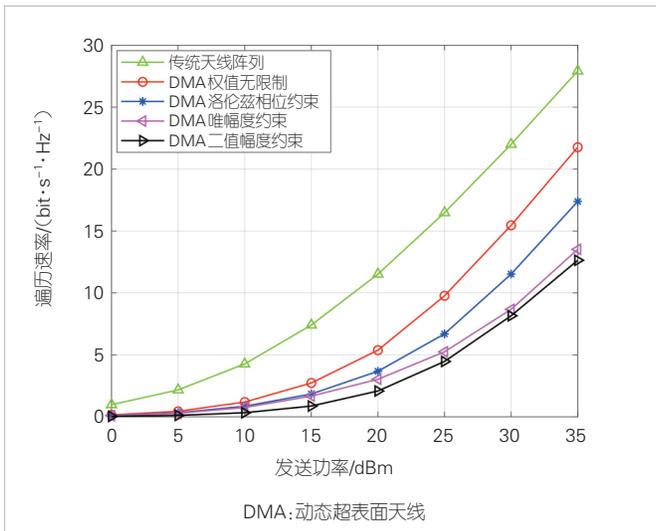
▲图2 遍历速率的确定性等价式与蒙特卡洛模拟仿真结果



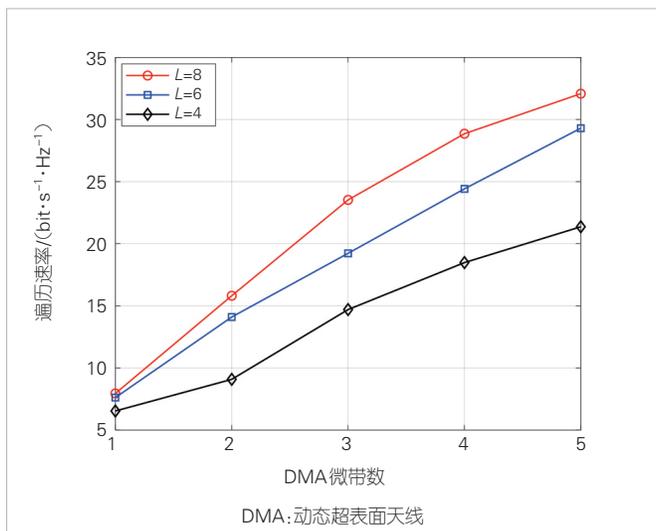
▲图3 所提交替优化算法的收敛性

能量收集用户处的天线数 $m = 12$ ，一个时隙内能量收集用户的最低平均收集能量 $E_0 = 0.1 \text{ W}$ 。DMA 典型的4种权值约束形式设置为：1) $\mathcal{D} = \mathbb{C}$ ；2) $\mathcal{D} = [0.001, 2]$ ；3) $\mathcal{D} = \{0, 0.1\}$ ；4) $\mathcal{D} = \{(j + e^{j\varphi})/2 | \varphi \in [0, 2\pi]\}$ 。可以看到，DMA 辅助的系统遍历速率略低于传统天线辅助的系统，这是由于DMA 阵列的使用大大减少了所需射频链数量。在图4的参数配置下（传统天线阵列需要16个射频链，DMA 阵列需要4个射频链），由于使用DMA 阵列，成本和复杂度较高的射频链数减少了75%。此外，与唯幅度约束和二值幅度约束相比，洛伦兹相位约束是在复平面上搜索，其得到的遍历速率更高，仅次于权值无限制下的遍历速率。

图5展示了遍历速率与DMA 微带数 K 和每条微带上超材料阵元数 L 的关系。设置信息解码用户处的天线数 $n = 16$ ，



▲图4 DMA 辅助系统与传统天线辅助系统的遍历速率比较



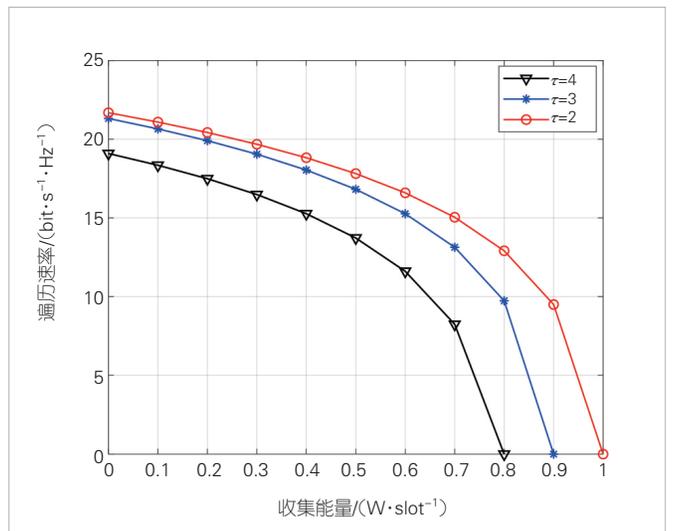
▲图5 不同超材料阵元数下遍历速率与DMA 微带数的关系

能量收集用户处的天线数 $m = 12$ ，一个时隙内能量收集用户的最低平均收集能量 $E_0 = 0.1 \text{ W}$ ，发送功率 $P = 30 \text{ dBm}$ 。可以观察到，随着DMA 微带数的增加，遍历速率增加。此外，随着每条微带上超材料阵元数的增加，遍历速率也随之增加。但是，与增加DMA 微带数量相比，增加每条微带上超材料阵元数量更具有实际意义。一方面，增加DMA 微带数会导致射频链数量的增加，而增加廉价的超材料阵元并不会带来较多的额外成本；另一方面，作为一种基于超材料发展的新型阵列天线，DMA 的天线结构更加紧凑，这就意味着在相同的物理尺寸上，DMA 可以在每条微带上集成更多的超材料阵元。

图6给出了不同路径损失指数 τ 下遍历速率与收集能量 E_0 之间的变化关系。设置基站处的DMA 超材料阵元数 $N = 16$ ，微带条数 $K = 4$ ，每条微带上超材料阵元数 $L = 4$ ，信息解码用户处的天线数 $n = 16$ ，能量收集用户处的天线数 $m = 12$ ，发送功率 $P = 30 \text{ dBm}$ 。可以看出，随着所要求收集能量的增加，信息解码用户侧的遍历速率降低，实现了无线携能通信系统中通信速率和能量收集的折中。

4 结束语

本文研究了DMA 辅助无线携能通信系统中的传输设计方法。利用无线携能通信技术实现无线设备的并行化信息交互与能量供应，同时使用DMA 阵列有效解决无线携能通信中传统天线阵列成本高、功耗大和物理尺寸受限的问题，实现优势互补。引入大系统近似理论，得到信息解码用户遍历速率的确定性等价式。以最大化该确定性等价式为目标，提出了一种交替优化算法。在满足能量收集用户的能量需求条



▲图6 不同路径损失指数下遍历速率与收集能量的关系

件下,利用统计CSI,分别设计发送协方差矩阵和DMA权值矩阵。仿真结果表明,所提设计方法可以有效提高通信系统的速率性能。

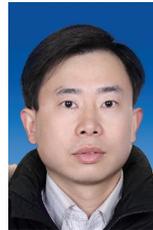
参考文献

- [1] 李建东,牛淳隆,赵晨曦,等.基于多时隙业务联合整形的低能耗资源调度方法[J].中兴通讯技术,2023,29(6):23-28. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306005
- [2] SMITH D R, YURDUSEVEN O, MANCERA L P, et al. Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna [EB/OL]. [2024-04-06]. <https://arxiv.org/abs/1711.01448>
- [3] WANG H Q, SHLEZINGER N, ELDAR Y C, et al. Dynamic metasurface antennas for MIMO-OFDM receivers with bit-limited ADCs [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(4): 2643-2659. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3040761
- [4] YOO I, IMANI M F, SLEASMAN T, et al. Enhancing capacity of spatial multiplexing systems using reconfigurable cavity-backed metasurface antennas in clustered MIMO channels [J]. IEEE transactions on communications, 2019, 67(2): 1070-1084. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2876899
- [5] WANG J, MATTHAIU M, JIN S, et al. Precoder design for multiuser MISO systems exploiting statistical and outdated CSIT [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(11): 4551-4564. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.091813.120874
- [6] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(8): 8238-8242. DOI: 10.1109/TVT.2019.2923997
- [7] 庞海舰,陈健锋,张广驰,等.智能反射面辅助的无线信息与能量传输研究综述[J].中兴通讯技术,2022,28(3):27-35. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203005
- [8] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2008: 1612-1616. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4595260
- [9] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(5): 1989-2001. DOI: 10.1109/TWC.2013.031813.120224
- [10] ZHANG J, YUEN C, WEN C K, et al. Large system secrecy rate analysis for SWIPT MIMO wiretap channels [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2016, 11(1): 74-85. DOI: 10.1109/TIFS.2015.2477050

作者简介



黄小钧,南京邮电大学在读硕士研究生;主要研究领域为移动与无线通信、可重构超表面等。



张军,南京邮电大学教授;研究领域为超大规模MIMO、无人机通信、人工智能通信、毫米波通信、RIS辅助通信、物理层安全等;先后主持和参加基金项目10余项;已发表论文150余篇。