



基于时间反演的局域空间多目标均匀恒定长时无线输能

张知原 李冰 刘仕奇 张洪林 胡斌杰 赵德双 王楚楠

**Uniform and constant long-time wireless power transmission of multi-targets in local space based on time reversal**

Zhang Zhi-Yuan Li Bing Liu Shi-Qi Zhang Hong-Lin Hu Bin-Jie Zhao De-Shuang Wang Chu-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 014101 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211231

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211231>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 基于时间反演的局域空间多目标均匀 恒定长时无线输能\*

张知原<sup>1)</sup> 李冰<sup>1)2)†</sup> 刘仕奇<sup>3)</sup> 张洪林<sup>4)</sup> 胡斌杰<sup>4)</sup>  
赵德双<sup>5)</sup> 王楚楠<sup>1)</sup>

1) (西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

2) (东南大学, 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

3) (深圳大学电子与信息工程学院, 深圳 518060)

4) (华南理工大学电子与信息学院, 广州 510641)

5) (电子科技大学物理学院, 成都 610054)

(2021年7月1日收到; 2021年10月9日收到修改稿)

在局域有限空间中, 如何保证电磁能量的多目标精准均匀恒定无线传输是亟待解决的科学难题. 本文针对此难题, 以具有时空聚焦特性的时间反演技术为基础, 提出一种自动区域选择信道匹配的恒定均匀无线输能方法. 该方法不仅能够依据多径信号的贡献率, 自适应性地补偿不同目标处的信道差异, 还可以利用距离系数动态划分时间反演镜阵元的工作范围, 降低不同目标间的相互影响. 在提高能量聚焦精度的同时, 解决微波无线输能 (microwave power transmission, MPT) 中多目标能量非均匀传输的问题, 从而实现长时间恒定的多目标均匀 MPT.

**关键词:** 时间反演镜, 自动区域选择信道匹配, 微波输能, 均匀输能

**PACS:** 41.20.Jb, 88.80.ht, 43.60.Tj

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211231

## 1 引言

随着便携式电子设备的广泛使用, 人们对于无线输能 (wireless power transmission, WPT) 的关注日益增长<sup>[1-3]</sup>. 常见的 WPT 方式包括电磁感应<sup>[4,5]</sup>、磁共振<sup>[6,7]</sup> 和微波输能<sup>[8-10]</sup> (microwave power transmission, MPT) 等. 前二者分别只适用于短距离和中距离 WPT, 而 MPT 由于可实现远距离 WPT 而成为近些年的研究热点<sup>[8-10]</sup>. 相较于其他 WPT 方式, MPT 具有传输距离远、部署灵活、接

收器尺寸小等优点, 但也存在传输效率低、能量衰减快等不足<sup>[8-10]</sup>. 为了解决这些问题, 众多学者将目光投向时间反演 (time reversal, TR) 技术.

Fink 团队<sup>[11]</sup> 于 1992 年首次提出 TR 技术的概念, 将其构成时间反演镜 (time reversal mirror, TRM) 实现了聚焦超声波场. 并于 2004 年, 率先将 TR 技术应用于电磁学领域<sup>[12]</sup>. 2014 年, Kaina 等<sup>[13]</sup> 利用 TR 技术实现了电磁波在室内复杂多径环境的聚焦. 同一时期, 电子科技大学的研究者利用 TR 技术先后完成了“L”形状瞬态场赋形<sup>[14]</sup>、复杂形状瞬态场赋形<sup>[15]</sup>、基于角谱投影的瞬态场赋

\* 毫米波国家重点实验室开放课题 (批准号: K202235)、国家自然科学基金 (批准号: 61871193)、广东省自然科学基金重点项目 (批准号: 2018B030311049) 和四川省应用基础研究项目 (批准号: 19YYJC0025) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: blijess@outlook.com

形<sup>[16]</sup>, 证明了 TR 技术的时空聚焦特性能够有效地克服复杂环境中的多径效应, 并实现任意形状的聚焦场<sup>[14–17]</sup>. 2016 年, Ibrahim 等<sup>[18]</sup>进一步探究了基于 TR 技术的脉冲信号与连续单频信号在复杂多径环境的性能, 证明脉冲信号具有更好的抗衰落性能. 然而, 上述研究中的瞬态场, 无法满足输能信号保持恒定的实际需求. 为了解决这一问题, 本文采用连续单频信号作为激励信号, 克服脉冲信号局限性的同时, 降低实际发射系统的复杂度.

除了聚焦时长的影响外, 当空间中有多个待输能目标时, 不同目标间存在“双远近效应”, 即输能非均匀问题<sup>[19]</sup>. 在智慧医疗、智能工厂以及智慧家居等场景应用中, 输能非均匀将会导致场景中部分传感器处于电压过高或过低的不健康工作状态, 长期工作将会导致传感器的损坏甚至物联网设备的故障. 此外, 输能非均匀还会导致能源不合理的低效分配, 造成电能浪费的问题<sup>[20,21]</sup>. 因此, 研究解决输能非均匀问题至关重要. 基于此, Lee 等<sup>[22]</sup>利用调整探测信号并实时反馈接收功率的方法, 实现了多目标的均匀输能. Bellizzi 等<sup>[23,24]</sup>通过 FOCO 法, 改善多目标的功率均匀性. 但大量的迭代次数与冗长的计算时间限制了上述方法的实际应用. 采用 TR 技术实现的信道匹配可以快速地相位进行补偿, 降低了系统的优化时间以及复杂度. 因此, 2018 年, 郭飞<sup>[25]</sup>利用遗传算法优化 TRM 阵元的激励电流值, 实现了“一”字均匀赋形. 同年, Bellizzi 等<sup>[26]</sup>利用附加的相位自由度, 优化 TR 信号, 实现目标区域高精度的均匀赋形. 与此同时, Bao 等<sup>[27]</sup>进一步验证了 TR 技术均匀 MPT 的潜力. 2019 年, 本团队通过对 TR 充电请求信号进行加权, 实现了室内环境下多目标的均匀输能<sup>[28]</sup>. 本文是对文献<sup>[28]</sup>的延伸, 针对局域有限空间中复杂电磁波环境下的长时间均匀 MPT 进行了研究. 该有限局域空间可以很好地模拟生命组织内部、局域育种、局域催化等应用环境. 另外, 文献<sup>[25–27]</sup>利用智能算法对 TRM 激励信号的幅值或者相位进行优化, 对减少优化时间成本和目标位置快速变化的 MPT 场景的研究还有所欠缺. 为了解决这些问题, 本文以文献<sup>[28]</sup>的方法为基础, 针对空间中多个离散的待输能目标, 利用自动区域选择信道匹配方法, 快速便捷地实现了多目标的长时间均匀恒定 MPT, 并分析了目标位置处的最大场强值与聚焦斑功率等指标, 验证了提出方法的有效性.

本文的篇章安排如下: 第 2 节推导了基于 TR 技术输能信号的传播过程, 提出了具有自适应性的信道补偿方法以及动态划分 TRM 阵元工作状态的自动区域选择信道匹配方法; 第 3 节用 CST STUDIO SUITE 2021 软件建立了局域有限空间中多个待输能目标的 MPT 模型; 第 4 节分析模型仿真结果, 并比较了 TR 技术、信道补偿方法以及自动区域选择信道匹配方法的输能性能; 第 5 节总结全文.

## 2 均匀恒定的 MPT 方法

### 2.1 输能信号的传播

TR 技术分为两个阶段: 预处理阶段和后处理阶段. 在预处理阶段, 设输能信号为  $x(t)$ , 待输能位置共  $N$  个, TRM 阵元的个数为  $M$ . 在待输能位置处放置源天线, 用于提供待输能位置的信道信息. 当第  $n$  个源天线单独工作时, TRM 中第  $m$  个阵元接收的信号可以表示为

$$s_{nm}(t) = x(t) \otimes g_{nm}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_n, t), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{r}_m$  表示 TRM 中第  $m$  个阵元的位置,  $\mathbf{R}_n$  表示第  $n$  个待输能的位置,  $g_{nm}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_n, t)$  函数是满足约化波动方程的背景格林函数, 表示电磁波从  $\mathbf{R}_n$  处传递到  $\mathbf{r}_m$  处的传递函数, 符号“ $\otimes$ ”表示卷积运算,  $t$  为时间变量.

在后处理阶段, 对 TRM 中第  $m$  个阵元接收的信号进行 TR 处理为

$$s_{nm}^{\text{TR}}(t) = s_{nm}(T - t), \quad (2)$$

其中, 在  $T$  时刻, TRM 可视为已经完整地接收到源天线阵列发射的有用信号. 时间窗起始于 0 时刻, 终止于  $T$  时刻.

移除待输能位置处的源天线, 并将获得的多目标 TR 信号叠加, 同步馈入各自的 TRM 阵元中以回传, 待输能位置  $n$  处接收的信号为

$$y_n(t) = \sum_{m=1}^M s_m^{\text{TR}}(t) \otimes g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t), \quad (3)$$

其中,  $s_m^{\text{TR}}(t)$  为多目标 TR 信号的叠加值, 且有  $s_m^{\text{TR}}(t) = \sum_{n=1}^N s_{nm}^{\text{TR}}(t)$ . (1) 式与 (3) 式中的信道具有互易性, 因此, 从  $n$  到  $m$  的传递函数和从  $m$  到  $n$  的传递函数有如下关系:

$$g_{nm}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_n, t) = g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t). \quad (4)$$

因此, (3) 式可进一步展开为

$$y_n(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n_1=1}^N [x(T-t) \otimes g_{n_1 m}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_{n_1}, T-t)] \otimes g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t), \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{R}_{n_1}$  表示第  $n_1$  个待输能的位置. 空间中任意

$$Y_n(\omega) = \underbrace{\sum_{m=1}^M X^*(\omega) \cdot e^{j2\omega T} \cdot |G_{nm}|^2}_{\text{聚焦信号}} + \underbrace{\sum_{m=1}^M \sum_{n_1=1, n_1 \neq n}^N [X^*(\omega) \cdot e^{j2\omega T} \cdot G_{n_1 m}^*] \cdot G_{mn}}_{\text{杂散信号}}, \quad (7)$$

其中, 上标“\*”表示取复共轭操作;  $\omega, T$  为已知量. 聚焦信号与杂散信号中均含有  $e^{j2\omega T}$  项, 因此,  $e^{j2\omega T}$  不影响待输能位置的信号组成比例. 而非待输能位置的频域表达式为

$$Y_q(\omega) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [X^*(\omega) \cdot e^{j2\omega T} G_{nm}^*] \cdot G_{mq}. \quad (8)$$

可见, 待输能位置处的信号由于 TR 的自适应信道匹配滤波, 实现了所有输能信号在多径环境下的同时刻相干叠加; 而其他散射体的散射信号在回传过程中由于非相干叠加构成杂散信号, 在长时输能过程中被削弱<sup>[29,30]</sup>. 因此, 在整个输能过程中, 聚焦信号强度会远远大于杂散信号强度, 也说明同时对多个待输能目标进行 MPT 具有可行性<sup>[31,32]</sup>.

此外, 上述推导也体现了 TR 的物理过程: 1) TRM 阵列接收由待输能目标位置处发射出的充电请求信号, 该信号历经传输空间, 携带待输能目标与 TRM 之间的信道信息; 2) TRM 对接收到的信号进行 TR 处理, 即信号经历时间的逆过程, 先接收到的信号后发射, 后接收到的信号先发射; 3) TRM 回传处理后的信号到原输能空间中, 根据卷积理论, 只有原待输能目标与 TRM 之间的信道会与 TR 处理后的信道相匹配, 即产生最大值, 且最大值出现的时刻在多个待输能目标处相同, 为逻辑 0 时刻, 即相当于待输能目标发射充电请求信号过程的倒放, 在 0 时刻待输能目标处的信号最大<sup>[12,33,34]</sup>.

然而, 信号强度的损耗还与传输距离相关, 对于不同待输能位置的多径信号, 它们的传输路径和传输距离均不相同, 这也是导致出现“双远近效应”现象的主要原因. 因此, 针对这一问题, 本文提出以下方法.

非待输能位置  $q$  处的信号为

$$y_q(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n_1=1}^N [x(T-t) \otimes g_{n_1 m}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_{n_1}, T-t)] \otimes g_{mq}(\mathbf{R}_q, \mathbf{r}_m, t). \quad (6)$$

根据傅里叶变换, 时域上的 TR 操作等效于频域上的相位复共轭操作, (5) 式的频域表达式为

## 2.2 信道补偿方法

为了实现多目标的均匀恒定 MPT, 本文在文献<sup>[28]</sup>的基础上提出了一种信道补偿方法. 首先, 引入信号贡献率的概念, 信号贡献率表示某一 TRM 阵元发射的信号传输至某个待输能位置的信号幅值占该位置信号幅值的百分比, 计算公式为

$$\text{贡献率} = \frac{\text{mag}(s_{mn}^{\text{TR}}(t))}{\text{mag}(y_n(t))} \times 100\%, \quad (9)$$

其中,  $\text{mag}(\cdot)$  表示取幅值,  $s_{mn}^{\text{TR}}(t)$  表示第  $m$  个 TRM 阵元发射的 TR 信号  $s_m^{\text{TR}}(t)$  传输至第  $n$  个待输能位置时的信号. 当所有 TRM 阵元发射的 TR 信号传输至不同待输能位置的贡献率均相同时, 即可实现多目标的均匀输能. 因此, 这里引入补偿系数  $\alpha_{nm}$ ,  $\alpha_{nm}$  表示对第  $n$  个源天线发射至第  $m$  个 TRM 阵元信号的信道补偿系数. 通过对 TR 信号进行传输信道损耗补偿, 使得多径信号在不同目标处的贡献率相同, 即可实现多目标的能量均匀传输. 补偿系数  $\alpha_{nm}$  为

$$\alpha_{nm} = \frac{a}{g_{nm}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_n, t) \otimes g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t)}, \quad (10)$$

其中,  $a$  为期望增益值. 补偿后第  $n$  个待输能位置处的信号为

$$y_n(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n_1=1}^N \alpha_{nm} [x(T-t) \otimes g_{n_1 m}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_{n_1}, T-t)] \otimes g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t), \quad (11)$$

其中, 补偿后每个 TRM 阵元到达待输能位置处的聚焦信号贡献率相同, 且每一个待输能目标接收到的聚焦信号幅值也相同. 因此, (11) 式可展开为

$$y_n(t) = a \cdot M \cdot x(T-t) + a \cdot \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{n_1=1, n_1 \neq n}^N x(T-t) \otimes \frac{g_{n_1 m}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_{n_1}, T-t) \otimes g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t)}{g_{nm}(\mathbf{r}_m, \mathbf{R}_n, t) \otimes g_{mn}(\mathbf{R}_n, \mathbf{r}_m, t)} \right]$$

$$= a \cdot M \cdot x(T-t) + Z_n, \tag{12}$$

其中,  $Z_n$  为第  $n$  个待输能位置处的杂散信号. 由 2.1 节可知, 杂散信号远小于聚焦信号, 因此, 信道补偿方法会改善多目标输能的均匀性. 但当待输能目标较多或不同目标相距较远时, 过大的  $Z_n$  会显著影响能量均匀聚焦效果, 进而造成聚焦精度下降、旁瓣过高等问题. 因此, 本文进一步提出自动区域选择信道匹配方法.

### 2.3 自动区域选择信道匹配方法

针对上述方法存在的问题, 基于 TR 技术以及信道补偿方法进一步提出自动区域选择信道匹配方法. 通过自动选择 TRM 阵元的输能区域, 减少  $Z_n$  对均匀输能的影响. 所提方法的基本思想如下:

- 1) 一般情况下, TRM 阵元只对距离最近的待输能目标进行输能;
- 2) 如果某个 TRM 阵元至多个待输能位置的距离相近时, 则该 TRM 阵元同时对多个目标进行输能.

依据距离系数判断 TRM 阵元的工作状态. 当空间中仅有两个待输能目标时, TRM 阵元  $m$  的距离系数  $\gamma_{m12}$  为

$$\gamma_{m12} = \frac{|l_{m1} - l_{m2}|}{d_{12}}, \tag{13}$$

其中,  $l_{m1}$  和  $l_{m2}$  分别表示 TRM 阵元  $m$  至待输能位置 1 和 2 的距离,  $d_{12}$  表示待输能位置 1 和 2 间的距离. 当  $\gamma_{m12}$  小于等于设定阈值时, 则 TRM 阵元  $m$  同时对两个目标进行输能; 当  $\gamma_{m12}$  大于设定阈值时, TRM 阵元  $m$  仅对距离近的目标进行输能. 最后, 依据每个待输能目标对应的 TRM 阵元数量, 对其输能信号进行幅度修正.

当空间中有  $n$  个待输能目标时, 首先获取距离 TRM 阵元  $m$  最近的待输能目标 1, 随后利用 (13) 式依次求得  $\gamma_{m12}, \gamma_{m13}, \dots, \gamma_{m1n}$ , 逐个判断距离系数与设定阈值的大小关系, 根据结果得到 TRM 阵元  $m$  的输能目标. 采用上述方法, 可以获取全部 TRM 阵元的输能目标, 再依据待输能目标对应的 TRM 阵元数量进行输能信号的幅度修正. 上述信号处理步骤的逻辑流程如图 1 所示.

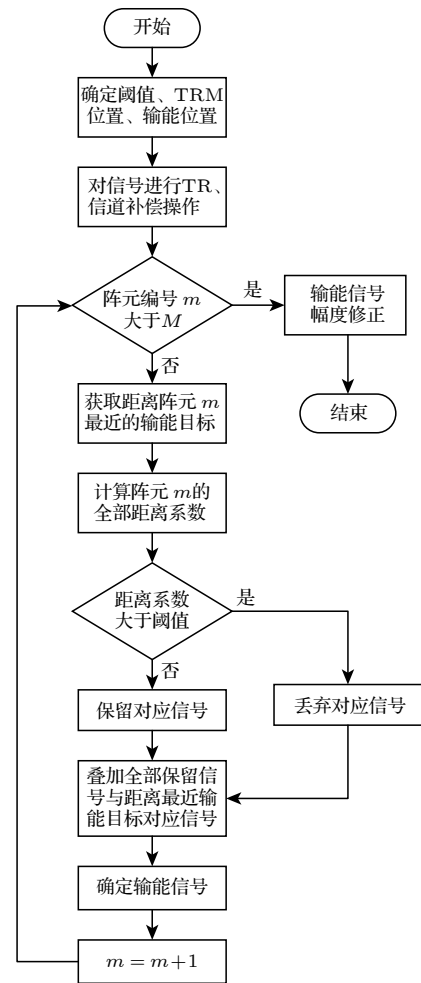


图 1 自动区域选择信道匹配方法的逻辑流程图

Fig. 1. Logic chart of automatic zone selection channel matching method.

本方法通过对 TRM 阵元输能目标进行区域选择, 从物理层面有效地降低不同待输能目标间的互耦性, 减小  $Z_n$  对均匀输能效果的影响, 从而实现具有高聚焦精度的均匀长时 MPT. 由于本方法完全是自适应判断, 时间成本较低, 因此, 在已知运动目标轨迹的前提下, 也完全适用于动目标的长时间均匀 MPT.

### 3 基于 TR 技术的长时均匀 MPT 模型

搭建 MPT 模型, 采用 CST STUDIO SUITE 2021 软件进行仿真. 为了研究本文所提方法在不

同目标数下的输能效果, 选择任意位置的两目标输能和任意位置的三目标输能进行对比. MPT 模型参数如图 2 所示. TRM 由 36 根天线构成, 阵列半径为 1220 mm (10 倍波长). 任意位置两目标输能时, 源天线的位置分别位于 1(90 mm, -90 mm) 以及 2(270 mm, -90 mm). 任意位置三目标输能时, 源天线的位置分别位于 1(-90 mm, 90 mm), 2(-90 mm, -180 mm) 以及 3(120 mm, -70 mm). 国际电信联盟规定 2.45 GHz 作为世界各国的 ISM 频段, 供工业、科学、医学领域免费应用. 因此, 模型中的源天线阵列与 TRM 阵元均采用中心频率为 2.45 GHz 的全向偶极子天线, 天线的结构如图 2(c) 所示. 激励信号同样采用频率为 2.45 GHz 的连续等幅单频振荡信号, 如图 2(d) 所示, 信号可以实现对目标长时间恒定的输能, 此处以时长 16 ns 为例.

为了更直观地分析不同方法下的 MPT 输能效率, 在后处理阶段, 约束 TRM 阵元发射的峰值功率为 36 W. 对比研究基于 TR、信道补偿以及自动区域选择信道匹配方法的多目标长时均匀输能效果, 包括平均输能效率、最大场强、输能功率、聚焦面积以及场强主副瓣比.

### 4 仿真结果及分析

当空间中存在两个待输能目标时, 取 TRM 偶极子中心所在平面为观测平面, 取以两个输能目标连线中点为中心的边长为 720 mm 的正方形为观测区域. 任取输能稳定后的 3 个时刻进行观察, 结果如图 3—图 5 所示.

从图 3—图 5 可见, 通过选取图 2(d) 所示的激励信号, 3 种方法均可实现长时 MPT, 且稳定输能时长约为 8 ns. 与基于 TR 技术的 MPT 相比, 信道补偿方法有效地减少了不同目标间最大场强的差值, 但随着输能时间的延长, 差值无规律, 且旁瓣依然较高. 但与区域选择相结合后, 均匀性在输能时长内显著提高, 且旁瓣更低, 聚焦效果更佳. 此外, 两种方法得到的平面场强关于观测平面呈对称分布.

输能时长内的各参数如表 1 所列. 采用自动区域选择信道匹配方法在最大场强差值、最大场强偏差率、功率差值、功率偏差率和最大主副瓣比上最优. 其中, 最大场强差值为 0.139 V/m, 仅为 TR 技术的 3.2%, 信道补偿方法的 29.6%; 功率差值为

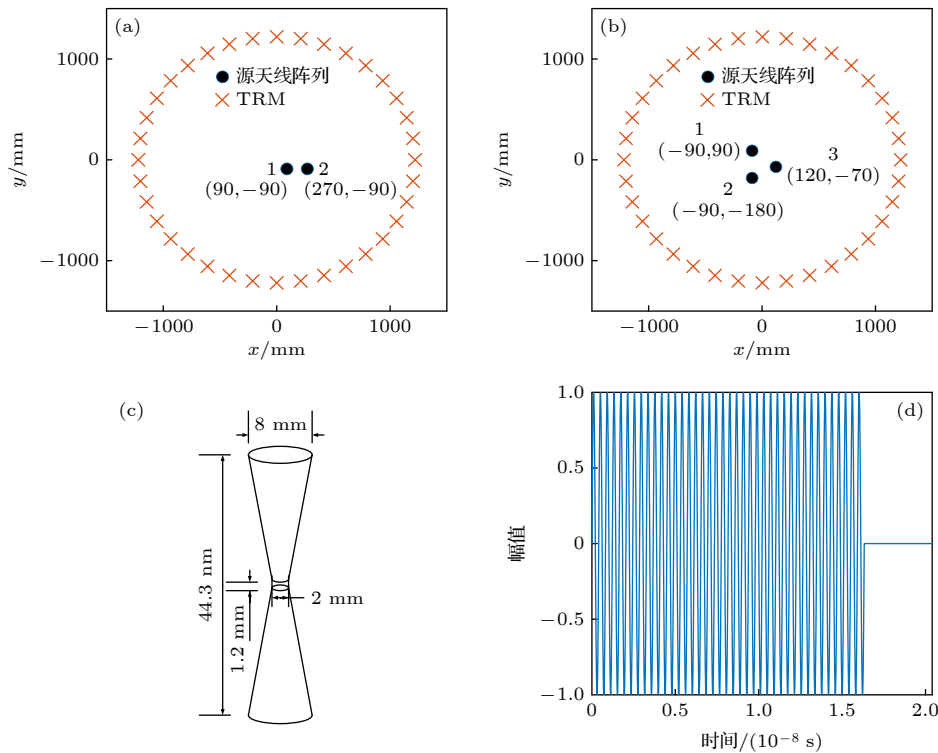


图 2 MPT 模型的相关参数 (a) 两个及 (b) 三个待输能目标的布置示意图; (c) 天线单元结构; (d) 激励信号

Fig. 2. Relevant parameters of the MPT model: Schematic diagrams of (a) two and (b) three MPT targets; (c) antenna element structure; (d) excitation signal.

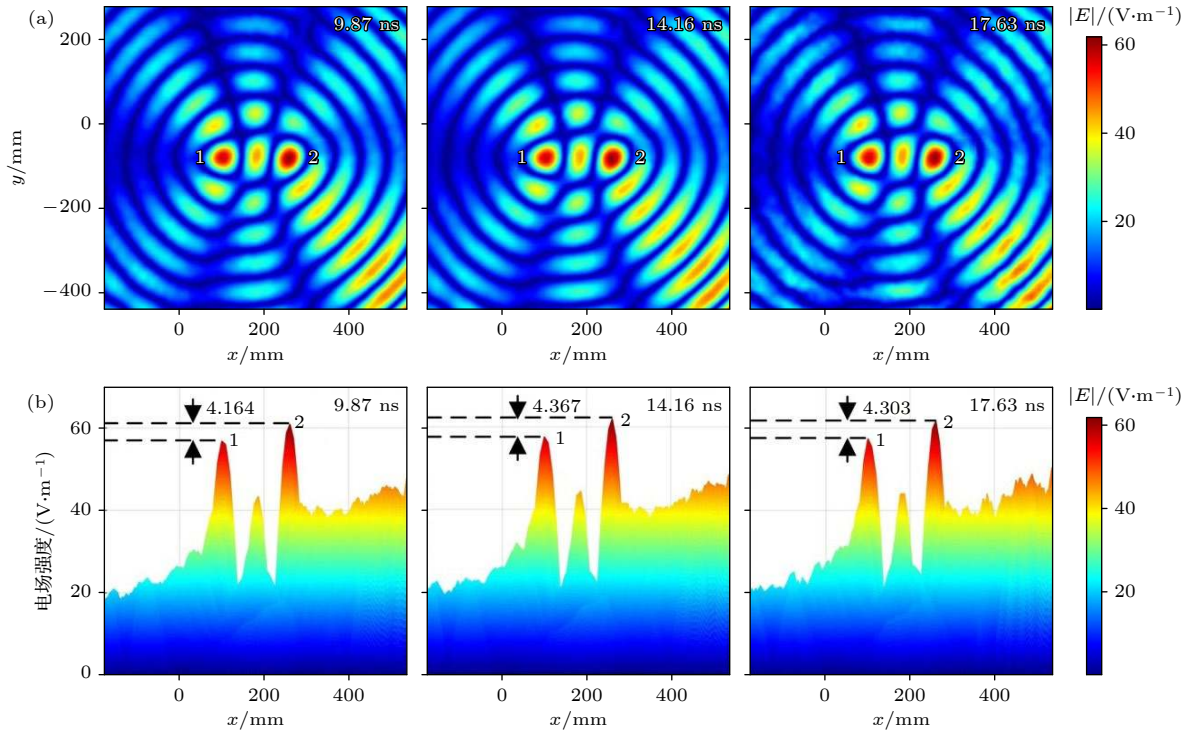


图 3 基于 TR 技术的长时 MPT 场强分布 (a)  $x-y$  平面的场强分布; (b)  $x$  方向场强分布

Fig. 3. Long-time MPT field strength distribution based on TR technique: (a) Field strength distribution diagram in the  $x-y$  plane; (b)  $x$ -direction field strength distribution.

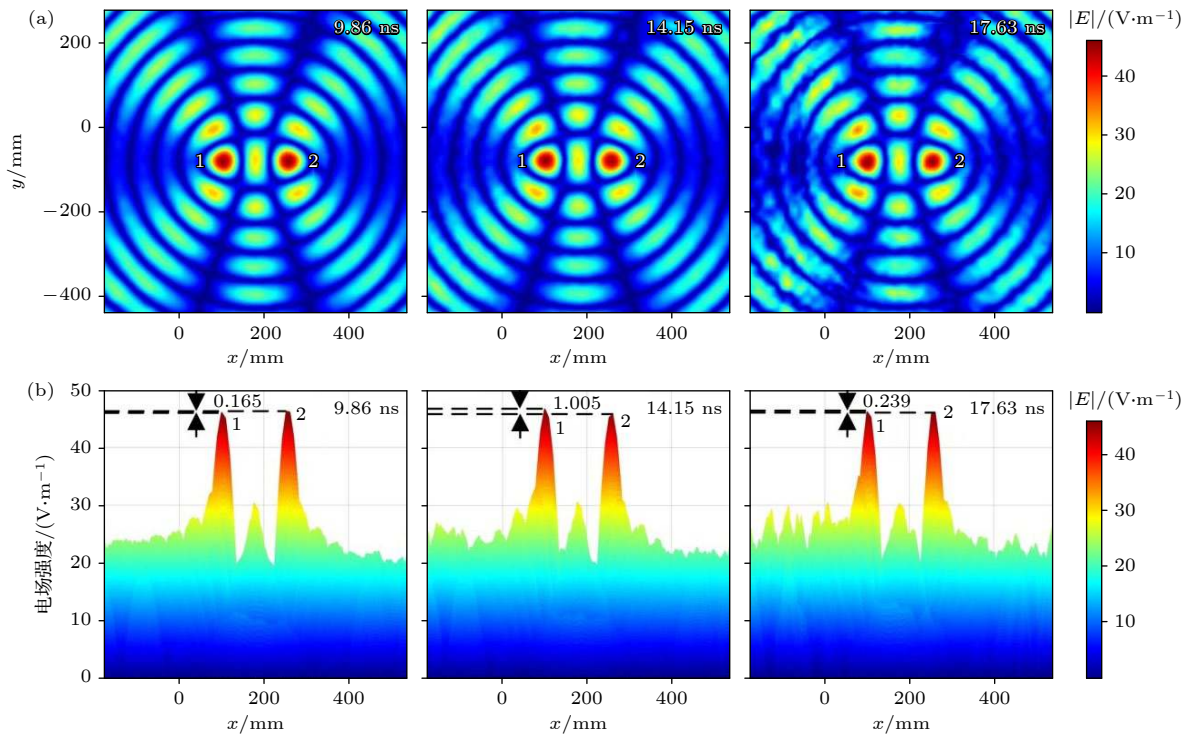


图 4 基于信道补偿方法的长时 MPT 场强分布 (a)  $x-y$  平面的场强分布; (b)  $x$  方向场强分布

Fig. 4. Long-time MPT field strength distribution based on channel compensation method: (a) Field strength distribution diagram in the  $x-y$  plane; (b)  $x$ -direction field strength distribution.

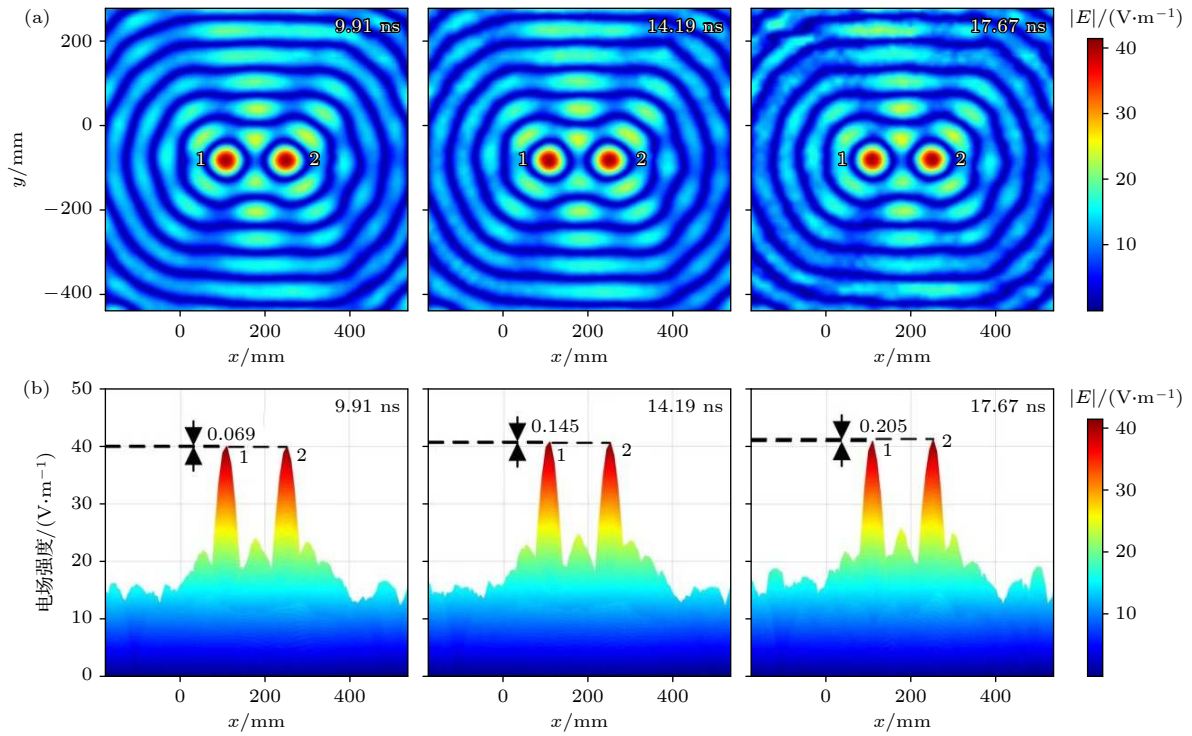


图 5 基于自动区域选择信道匹配方法的长时 MPT 场强分布 (a)  $x$ - $y$  平面的场强分布; (b)  $x$  方向场强分布  
 Fig. 5. Long-time MPT field strength distribution based on automatic zone selection channel matching method: (a) Field strength distribution diagram in the  $x$ - $y$  plane; (b)  $x$ -direction field strength distribution.

表 1 不同方法在输能时长内各参数均值  
 Table 1. Average value of each parameter under MPT of different methods.

	直接发射	TR	信道补偿	自动区域选择信道匹配
最大场强差值/( $V \cdot m^{-1}$ )	无聚焦	4.278	0.470	0.139
最大场强偏差率	无聚焦	7.46%	1.02%	0.34%
功率差值/mW	无聚焦	2.7	0.225	0.1
功率偏差率	无聚焦	15.92%	2.08%	1.21%
平均输能效率	0.120‰	0.509‰	0.310‰	0.326‰
面积差值/ $mm^2$	无聚焦	227	48.333	102.667
最大主副瓣比/dB	无聚焦	2.666	3.499	4.703

0.1 mW, 仅为 TR 技术的 3.7%, 信道补偿方法的 44.5%; 最大主副瓣比达到 4.703 dB, 说明本文所提方法能实现高精度的均匀输能, 同时有效抑制旁瓣场强水平.

自动区域选择信道匹配方法在平均输能效率以及面积差值上表现良好. 其中, 平均输能效率指每个聚焦斑功率的平均值占发射功率的比值. 文献 [35] 推导证明 TRM 阵列回传 TR 信号时, 能量在目标位置处聚焦. 自动区域选择信道匹配方法以 TR 技术为基础, 在对回传信号进行信道补偿的同时, 自动选择 TRM 阵元的输能区域. 本质上, 信道补偿增强远距离 TRM 阵元的辐射功率, 导致输能效率

有所下降; 自动区域选择则降低不同目标间的互耦性, 提升各区域内的输能效率. 因此, 本文所提方法在输能效率上优于信道补偿方法; 而面积差值指不同聚焦区域面积的差值, 其从聚焦斑尺寸的维度, 对输能均匀性量化表征. 相较于 TR 方法, 信道补偿以及自动区域选择信道匹配方法能提供更精准的输能..

自动区域选择信道匹配方法在两目标输能中表现出不错的性能, 为进一步探究其鲁棒性与应用范围, 增加待输能目标至 3 个. 当对超过两位置目标输能时, 观测平面与两目标相同, 取以坐标系原点为中心的边长为 720 mm 的正方形为观测区域.

任取输能稳定后的 3 个时刻进行观察, 结果如图 6—图 8 所示.

从图 6—图 8 可见, 通过选取与两目标相同的激励信号, 3 种方法均可实现长时 MPT, 且稳定输能时长约为 8ns. 由于 3 目标距离 TRM 阵列中心

相近, 不同目标的最大场强值相差不大. 在此情况下, 信道补偿方法不能进一步提升输能的均匀性; 而自动区域选择信道匹配方法则有效地改善了长时均匀输能的效果, 说明相较于 TR 技术与信道补偿方法, 本文所提方法具有不错的鲁棒性与实用性.

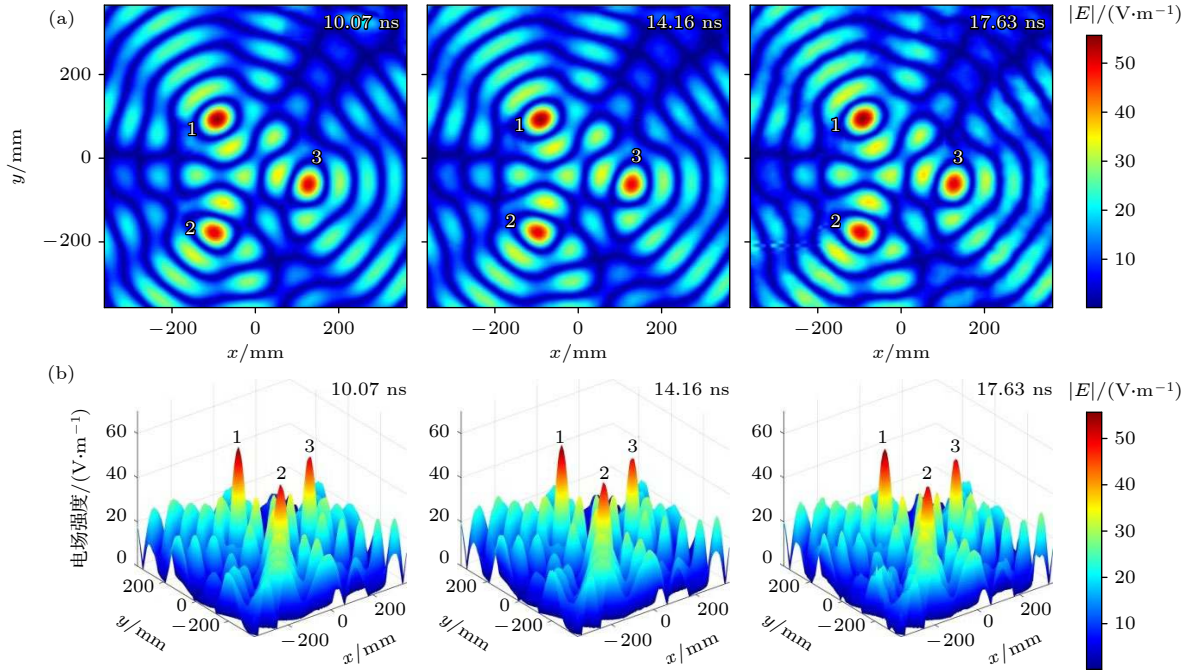


图 6 基于 TR 技术的长时 MPT 场强分布 (a)  $x$ - $y$  平面的场强分布; (b) 立体场强分布

Fig. 6. Long-time MPT field strength distribution based on TR technique: (a) Field strength distribution diagram in the  $x$ - $y$  plane; (b) three-dimensional field strength distribution.

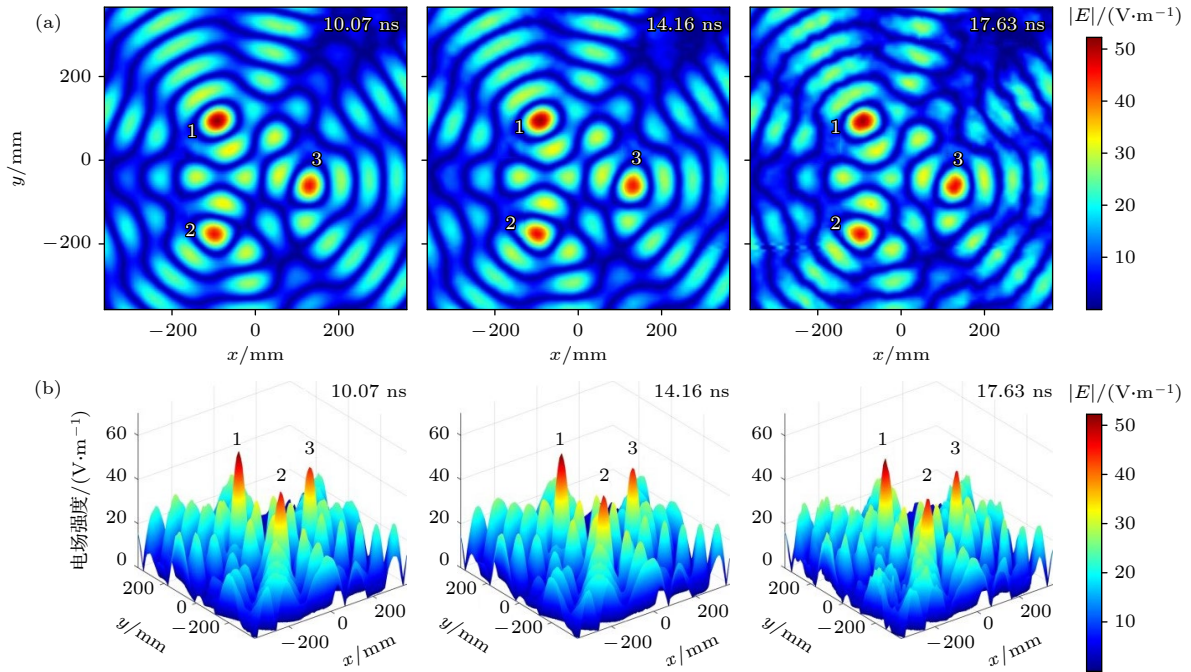


图 7 基于信道补偿方法的长时 MPT 场强分布 (a)  $x$ - $y$  平面的场强分布; (b) 立体场强分布

Fig. 7. Long-time MPT field strength distribution based on channel compensation method: (a) Field strength distribution diagram in the  $x$ - $y$  plane; (b) three-dimensional field strength distribution.

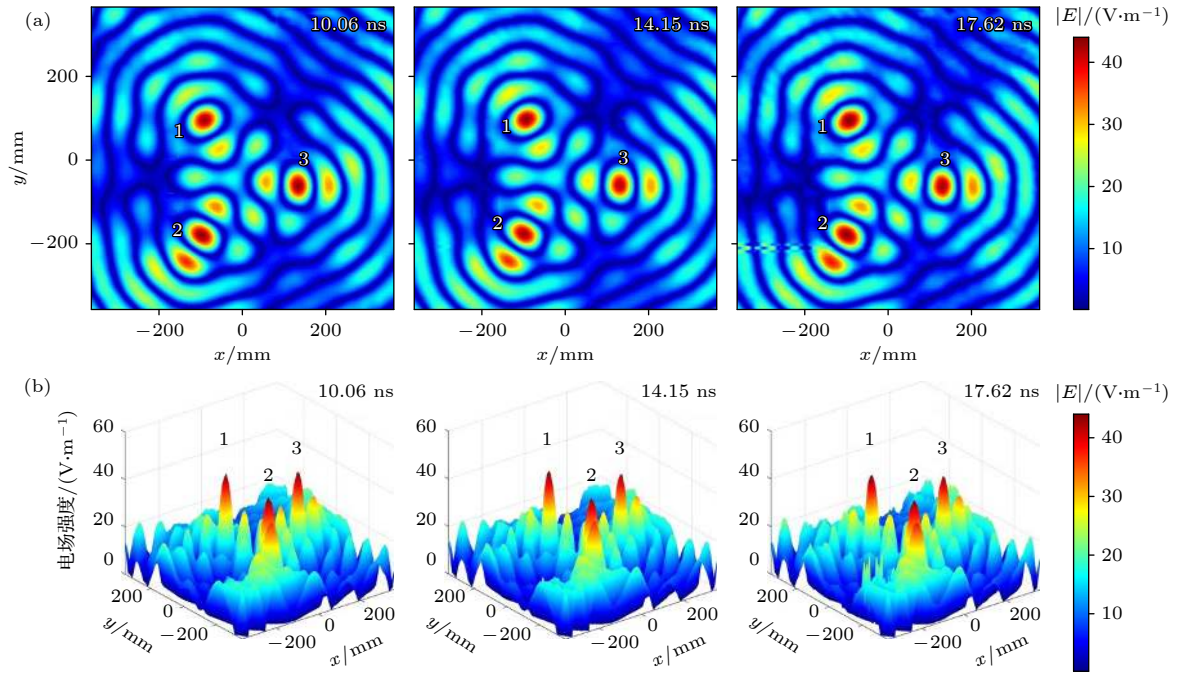


图 8 基于自动区域选择信道匹配方法的长时 MPT 场强分布 (a)  $x$ - $y$  平面的场强分布; (b) 立体场强分布  
 Fig. 8. Long-time MPT field strength distribution based on automatic zone selection channel matching method: (a) Field strength distribution diagram in the  $x$ - $y$  plane; (b) three-dimensional field strength distribution.

表 2 不同方法在输能时长内各参数均值  
 Table 2. Average value of each parameter under MPT of different methods.

	直接发射	TR	信道补偿	自动区域选择信道匹配
平均最大场强差值/( $V \cdot m^{-1}$ )	无聚焦	3.268	4.655	0.510
平均最大场强偏差率	无聚焦	6.34%	10.18%	1.14%
平均功率差值/mW	无聚焦	1.573	2.251	0.330
平均功率偏差率	无聚焦	11.19%	18.73%	3.18%
平均输能效率	0.139‰	0.412‰	0.365‰	0.664‰
平均面积差值/ $mm^2$	无聚焦	74.667	97.556	43.556
最大主副瓣比/dB	无聚焦	4.016	3.679	3.406

输能时长内的各参数如表 2 所列. 采用自动区域选择信道匹配方法在平均最大场强差值、平均最大场强偏差率、平均功率差值、平均功率偏差率、平均输能效率以及平均面积差值上最优. 其中, 平均最大场强差值为  $0.510 V/m$ , 仅为 TR 技术的 15.6%, 信道补偿方法的 10.9%; 平均功率差值为  $0.330 mW$ , 仅为 TR 技术的 21.0%, 信道补偿算法的 14.7%, 大幅提升了三目标长时 MPT 的均匀性.

随着目标数量的增加, 平均输能效率与平均面积差值得到改善. 其中, 平均输能效率为  $0.664‰$ , 较 TR 技术提升 61.2%, 较信道补偿方法提升 81.9%; 平均面积差值缩小为  $43.556 mm^2$ , 说明在三目标长时 MPT 中, 自动区域选择信道匹配方法

同样能精准输能.

随着目标数量的增加, 最大主副瓣比减小为  $3.406 dB$ , 这是目标受能角度骤减以及信道宽度变窄所致. 通过改变 TRM 阵元数或者背景环境增加信道数量可缓解此问题.

对比表 1 和表 2 可知, 信道补偿方法在多个参数上出现性能衰退, 而自动区域选择信道匹配方法则具有良好的鲁棒性, 适用于多目标的均匀输能.

综上所述, 在局域有限空间进行多目标长时 MPT 时, 自动区域选择信道匹配方法在保证输能效率的基础上, 不仅能够提供高聚焦精度的输能, 而且可以改善不同目标输能的均匀性, 显示出一定的优越性和可行性.

## 5 结 论

本文提出一种以 TR 技术与信道补偿方法为基础的自动区域选择信道匹配方法, 实现局域有限空间内多目标均匀恒定的 MPT. 首先, 本文推导 TR 输能信号的传播过程, 通过对 TR 信号的信道补偿, 多径信号贡献率趋于相同, 不同目标间的“双远近效应”得到改善. 再将信道补偿与区域选择相结合, 降低输能目标间的相互影响, 进一步提升输能的均匀性. 随后建立局域有限空间的多目标 MPT 模型, 验证理论推导结果. 仿真结果表明: 采用连续等幅单频振荡信号与自动区域选择信道匹配方法, 不仅可以精准高效长时间恒定地输能, 而且解决了 MPT 中“双远近”的问题. 在稳定输能期间, 两目标的最大场强偏差率与功率偏差率恒定在 0.34% 和 1.21% 左右; 三目标的最大场强偏差率与功率偏差率恒定在 1.14% 和 3.18% 左右. 此外, 本文所提方法完全基于自适应判断, 时间成本较低, 不仅适用于静态多目标的均匀恒定输能, 同样适用于运动轨迹已知的动态多目标的均匀恒定输能.

## 参考文献

- [1] Zhu X R, Jin K, Hui Q 2021 *IEEE J. Emerging Sel. Top. Power Electron.* **9** 1147
- [2] Zeng Y, Clerckx B, Zhang R 2017 *IEEE Trans. Commun.* **65** 2264
- [3] Ni W, Ding F, Zong J, Ji W W, Liu X J 2019 *Chin. J. Power Sources* **43** 357 (in Chinese) [倪旺, 丁飞, 宗军, 纪伟伟, 刘兴江 2019 *电源技术* **43** 357]
- [4] Yin Z G, Shi L M, Fan M Y 2021 *Trans. China Electrotech. Soc.* **36** 1 (in Chinese) [殷正刚, 史黎明, 范满义 2021 *电工技术学报* **36** 1]
- [5] Pries J, Galigekere V P N, Onar O C, Su G J 2020 *IEEE Trans. Power Electron.* **35** 4500
- [6] Wang L F 2019 *Power Electron.* **53** 23 (in Chinese) [王龙飞 2019 *电力电子技术* **53** 23]
- [7] Lee J, Lee K 2020 *IEEE Trans. Power Electron.* **35** 6697
- [8] Song J J, Zhang L Q, Chen L, Zhou L, Sun L, Lan J F, Xi C H, Li J H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 108401 (in Chinese) [宋建军, 张龙强, 陈雷, 周亮, 孙雷, 兰军峰, 习楚浩, 李家豪 2021 *物理学报* **70** 108401]
- [9] Joseph S D, Huang Y, Hsu S S H, Alieldin A, Song C Y 2021 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **69** 482
- [10] Li S G, Chen Z L, Song L, Zhang L, Li T M, Feng J J, Zhou S M 2019 *J. Microw.* **35** 56 (in Chinese) [黎深根, 陈仲林, 宋磊, 张琳, 李天明, 冯进军, 周碎明 2019 *微波学报* **35** 56]
- [11] Fink M 1992 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **39** 555
- [12] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904
- [13] Kaina N, Dupré M, Lerosey G, Fink M 2014 *Sci. Rep.* **4** 6693
- [14] Zhao D S, Zhu M 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 1739
- [15] Zhao D S, Guo F 2017 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* San Diego, USA, July 9–14, 2017 p231
- [16] Guo S, Zhao D S, Wang B Z, Cao W P 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 8249
- [17] Zhou H C, Wang B Z, Ding S, Ou H Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114101 (in Chinese) [周洪澄, 王秉中, 丁帅, 欧海燕 2013 *物理学报* **62** 114101]
- [18] Ibrahim R, Voyer D, Bréard A, Huillery J, Voltaire C, Allard B, Zaatar Y 2016 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **64** 2159
- [19] Lee S, Zhang R 2017 *IEEE Trans. Signal Process.* **65** 1685
- [20] Chettri L, Bera R 2020 *IEEE Internet Things J.* **7** 16
- [21] Ayir N, Riihonen T, Allen M, Fierro M F T 2021 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **69** 1917
- [22] Lee S, Zeng Y, Zhang R 2018 *IEEE Wirel. Commun. Lett.* **7** 54
- [23] Bellizzi G G, Crocco L, Iero D A M, Isernia T 2017 *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications* Athens, Greece, March 1–3, 2017 p162
- [24] Bellizzi G G, Crocco L, Iero D A M, Isernia T 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 360
- [25] Guo F 2018 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [郭飞 2018 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [26] Bellizzi G G, Bevacqua M T, Crocco L, Isernia T 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 4380
- [27] Bao J L, Zhao D S, Cao W P, Li B, Wang B Z 2019 *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology* Guangzhou, China, May 19–22, 2019, p1
- [28] Li B, Liu S Q, Zhang H L, Hu B J, Zhao D S, Huang Y K 2019 *IEEE Access* **7** 114897
- [29] Ku M L, Han Y, Lai H Q, Chen Y, Liu K J R 2016 *IEEE Trans. Signal Process.* **64** 5819
- [30] Kim J H, Lim Y J, Nam S W 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 5750
- [31] Li B 2016 *Ph. D. Dissertation* (Guangzhou: South China University of Technology) (in Chinese) [李冰 2016 博士学位论文 (广州: 华南理工大学)]
- [32] Yuan L, Yang X S, Wang B Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 170503 (in Chinese) [院琳, 杨雪松, 王秉中 2019 *物理学报* **68** 170503]
- [33] Carminati R, Pierrat R, Rosny J D, Fink M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3107
- [34] Ding S, Wang B Z, Ge G D, Wang D, Zhao D S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104101 (in Chinese) [丁帅, 王秉中, 葛广顶, 王多, 赵德双 2011 *物理学报* **60** 104101]
- [35] Fusco V F 2006 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **54** 1352

# Uniform and constant long-time wireless power transmission of multi-targets in local space based on time reversal\*

Zhang Zhi-Yuan<sup>1)</sup> Li Bing<sup>1)2)†</sup> Liu Shi-Qi<sup>3)</sup> Zhang Hong-Lin<sup>4)</sup>

Hu Bin-Jie<sup>4)</sup> Zhao De-Shuang<sup>5)</sup> Wang Chu-Nan<sup>1)</sup>

1) (*School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*)

2) (*State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

3) (*College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

4) (*School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

5) (*School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

( Received 1 July 2021; revised manuscript received 9 October 2021 )

## Abstract

The precise, uniform and constant wireless transmission of electromagnetic power to multiple targets in a local finite space is a scientific problem to be solved urgently. Aiming at this problem, in this paper we propose an automatic zone selection channel matching method based on time reversal technique which has the spatiotemporal focusing characteristics. The proposed method can not only adaptively compensate for the channel differences at different targets based on the contribution rate of the multipath signals, but also dynamically divide the working range of the time reversal mirror elements to eliminate the mutual influences between different targets through the use of the distance coefficient. While improving the accuracy of energy focusing, the proposed method also solves the problem that non-uniform microwave power transmission (MPT) of multiple targets, and therefore achieving the constant, uniform and long-time MPT of multi-targets.

**Keywords:** time reversal mirror, automatic zone selection channel matching, microwave power transmission, uniform power transmission

**PACS:** 41.20.Jb, 88.80.ht, 43.60.Tj

**DOI:** [10.7498/aps.71.20211231](https://doi.org/10.7498/aps.71.20211231)

\* Project supported by the Fund of State Key Laboratory of Millimeter Waves, China (Grant No. K202235), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61871193), the Key Program of Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030311049), and the Applied Basic Research Program of Sichuan Province, China (Grant No. 19YYJC0025).

† Corresponding author. E-mail: [bljess@outlook.com](mailto:bljess@outlook.com)