基于信道处理的时间反演幅度可调控多目标聚焦方法*

闫铁著 丁帅† 韩旭 王秉中

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 611731)

(2023 年 4 月 6 日收到; 2023 年 6 月 12 日收到修改稿)

在微波无线输能领域中, 如何实现多目标点的电磁波可调控聚焦是一个值得关注的问题. 本文提出了一种基于时间反演多径环境下的多目标电磁波聚焦的新方法. 该方法基于多个输出之间的信道相关性, 将输入和输出节点之间的信道信息进行提取、筛选、加权和重构后在单个发送端上重建反演信号, 利用时间反演的空间选择特性实现均衡的电磁波聚焦. 基于这种方法, 设计了两组在多径环境下的实验. 实验结果表明, 通过这种方法可以使弱相关模型下不同输出端口获得均衡稳定的聚焦峰, 在强相关模型下使不同输出端口的分辨效果进一步提升. 此外, 6 个额外的实验验证了所提出的方法可以在弱相关或强相关的单输入多输出信道模型下, 通过改变不同的权值灵活地调整不同接收端的输出峰值电压比.

关键词: 时间反演, 信道处理, 多目标聚焦

PACS: 41.20.Jb, 88.80.ht, 11.80.Gw **DOI:** 10.7498/aps.72.20230547

1 引 言

在无线通信[1−3] 和微波无线输能领域[4−8] 中, 如何让多个目标点具有均衡的响应或高分辨特性一直是关键问题之一. 为了解决这个问题, 人们提出了几种不同的方法, 其中最广泛使用的包括时间反演 (time-reversal, TR)[9,10] 和最优约束功率聚焦 (optimal constrained power focusing, OCPF) 方法. OCPF 是一种多目标聚焦的场塑造方法, 通过优化目标函数来确定天线阵列不同位置的馈电[7,8]. 但这种方法需要一个漫长的优化过程, 这使得它在实际应用中受到限制.

在互易信道环境中, TR 技术可以克服多径效应的影响, 实现电磁波的自适应时空同步聚焦. 由于其独特的特性, TR 在产生超短时脉冲 (ultrashort pulses, USP)[11−15]、超分辨率成像[16]、无损检测[17−19] 和安全通信[20] 等方面发挥着重要作用.

Ibrahim 等[21] 提出了一种用于室内环境的基于 TR 的无线功率传输方法, 并证明 TR 是所有多径模型下功率传输的最佳解决方案. Zhao 和 Zhu[4] 提出了一种基于时间反演镜 (time-reversal mirrors, TRM) 的场塑形方法, 该方法是先在目标点分别收集信道响应后, 再进行线性叠加. 这种方法后续被进一步优化[22], 优化后的方法只需要根据目标和激励源之间的距离调整激励. 尽管如此, 这些基于 TRM 的方法需要复杂的前向探测操作, 并依赖于多个发射天线之间的相互补偿. 早在 1999 年, 在声学领域中基于 one-bit 加权的时间反演 (one-bit time reversal, OBTR) 方法就被提出[23]. 而最近, 一种基于 OBTR 的高增益 USP 压缩器被设计出来, 该方法通过使用符号函数对接收信号进行

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: A03019023801088, ZYGX2019Z016, ZYGX2021YGLH025) 和四川省科技支撑计划 (批准号: 2022YFS0193) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: uestcding@uestc.edu.cn

加权. 尽管这种基于信号处理的 OBTR 方法可以在单输入的情况下最大限度地提高输出增益, 但它在一定程度上失去了 TR 的空间选择性, 这导致它难以应用于均衡的多输出系统.

本文提出了一种新的无线信道处理方法, 以实现在丰富路径的多径环境中对多个接收用户的均衡电磁波聚焦. 该方法是一种对信道进行编辑的操作, 需要对信道响应进行提取、筛选、加权和重构 (channel extraction, selection, weighting and reconstruction, CESWR). 它考虑到了多个输出之间的相关性, 并且通过信道的筛选和加权实现了多目标聚焦效果的可调控. 此外, 这种单一输入的方法与之前的方法相比, 在优化步骤和系统设计方面具有低复杂性、高可计算性和快速收敛的优点. 本文最终的实验验证是在一个单输入多输出的时间反演腔 (single-input multiple-output time-reversal cavity, SIMO-TRC) 系统中实现, 同时使用经典的 TR 处理和基于时间反演的 CESWR 方法 (CESWR method based on time-reversal, CESWR-TR) 处理, 最后对比分析了实验结果.

2 多目标的 TR 幅度可控聚焦原理

2.1 多目标的 TR 信道模型

根据经典的单一接收目标的 TR 方法, 若想在某一接收点实现聚焦, 则要先在发送端发送脉冲信号 $x(t)$, 并在接收端采集到接收信号 $y(t)$后, 再对该信号进行时域上的反褶操作得到$y(-t)$. 将$y(-t)$重新在发送端发出, 就能在接收端产生时空同步聚焦的效果. 这种方法适用于满足互易定理的多径环境下的无线电磁波传输场景. 其产生聚焦的原理可以通过把时域反褶后相卷积看成信道冲激响应 (channel impulse response, CIR) 的自相关函数来解释.

当环境噪声为高斯白噪声时并假定其信道为平坦衰落, 其 TR 等效信道的冲激响应 $h_{\text{eq}}(t)$可以表示为[24]

$$h_{\text{eq}}(t)=\sum_{l=1}^{L}\alpha_l^2\delta(t)+\sum_{l=1}^{L}\sum_{,k=1,k\neq l}^{L}\alpha_l\alpha_k\delta\left(-t-\tau_l\right)\times\delta\left(t-\tau_k\right)+\sigma^2\delta(t), \tag{1}$$

其中 $\delta(t)$表示狄拉克冲激函数; l表示某一条电磁场传播路径; L表示总的多径数目; a_l和τ_l表示第l条路径下的电磁场的响应对应的幅度和时延; σ^2为高斯白噪声的功率谱密度; $*$表示卷积运算.

而对于图 1 所描述的多目标的 TR 方法, 不同的接收天线 Rx1 和 Rx2 具有不同的信道脉冲响应$h_1(t)$和$h_2(t)$. 由于 TR 本身具有空间聚焦特性, 因此, 空间位置的稍微偏移可能会产生多个信道响应之间的相关性的突变. 为了衡量这一空间特性, 本文使用皮尔逊相关系数计算不同信道之间的相关性, 其方法如下:

$$\rho_{h_1,h_2}=\frac{\text{cov}\left(h_1,h_2\right)}{\sqrt{\text{Var}\left(h_1\right)\text{Var}\left(h_2\right)}}, \tag{2}$$

其中$\text{cov}(\cdot)$表示两个信道响应之间的协方差; $\text{Var}(\cdot)$表示每个信道响应的方差; ρ_{h_1,h_2}计算得出的是两个信道响应的相关系数.

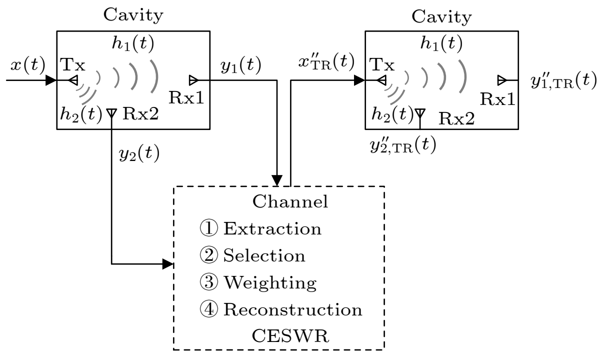

图 1 基于 CESWR 方法的 TR 方法示意图
Fig. 1. Schematic of the principle of proposed SIMO-TRC system based on the TR using CESWR method.

2.2 TR 信道的提取、筛选、加权和重构

在信道提取步骤中应用 CLEAN 算法[25], 该算法最早在天文学研究领域中被提出, 用于消除图像的噪声, 后来在超宽带通信中发挥了关键的作用. 由于 TR 在前向探测过程中也使用宽带脉冲信号, 如调制的高斯脉冲信号, 所以在 CESWR 方法中, 使用 CLEAN 算法提取得到的 $h_1(t)$和$h_2(t)$具有很小的误差.

信道的筛选过程的判断条件基于某一时延下两个 CIR 之间的差值$|h_1\left(t_0\right)-h_2\left(t_0\right)|$, 其中 t_0 表示 CIR 的某一时延. 将这一差值计算的结果与预先设置的判断阈值p对比, 若$|h_1\left(t_0\right)-h_2\left(t_0\right)|<p$, 说明两个信道在对应的时延具有相似的响应; 相反, 若$|h_1\left(t_0\right)-h_2\left(t_0\right)|>p$, 则说明两个信道在对应的时延的产生了不同的响应. 根据这种筛选方法, 可以将原本的两个 CIR 筛选出相似部分$h_0(t)$, 和各自的特征部分$h'_1(t)$和$h'_2(t)$.

在信道加权的步骤中, 为了得到最终的新等效信道 $h''(t)$, 将筛选后的各个部分按照下面的表达式进行加权:

$$h''(t)=h_0(t)+\alpha h_1'(t)+\beta h_2'(t), \tag{3}$$

其中 α 和 β 表示对应 CIR 特征部分的加权系数. 这个过程可以看作是对 TR 的反演过程中两个 CIR 的特征部分的各自占比的调整, 而相似部分的系数保持不变. 这样可以有效地降低系数调整的复杂度, 同时确保在整个调整过程中, 两个接收端都能观察到 TR 的聚焦信号.

在 CESWR-TR 方法的最后一步, 也就是对 TR 反演信号 $x''_{\mathrm{TR}}(t)$ 的重构:

$$x''_{\mathrm{TR}}(t)=x(-t)*h''(-\mathrm{t}). \tag{4}$$

发送的 TR 反演信号经过两个不同的信道到达接收端, 并分别得到对应的 TR 聚焦信号 $y''_{1,\mathrm{TR}}(t)$ 和 $y''_{2,\mathrm{TR}}(t)$, 以 $y''_{1,\mathrm{TR}}(t)$ 为例, 它具有如下形式:

$$\begin{aligned} y''_{1,\mathrm{TR}}(t)&=x(-t)*h''(-t)*h_1(t)\\ &=x(-t)*[h_0(-t)+\alpha h_1'(-t)\\ &\quad+\beta h_2'(-t)]*h_1(t)\\ &=x(-t)*[\underbrace{h_0(-t)*h_1(t)}_{1)}+\underbrace{\alpha h_1'(-t)*h_1(t)}_{2)}\\ &\quad+\underbrace{\beta h_2'(-t)*h_1(t)}_{3)}], \end{aligned} \tag{5}$$

其中 1) 项表示相似部分的聚焦特性; 2) 项表示加权后的接收端 1 与信道 1 的特征部分的互相关函数, 而 3) 项表示加权后的接收端 1 与信道 2 的特征部分的互相关函数. 由于 $h_1(t)$ 和 $h_2'(t)$ 之间的相关性很弱, 其相关函数 3) 项不会出现明显的峰值电压 (TR 后不会出现聚焦峰). 对于 $y''_{2,\mathrm{TR}}(t)$, 其结果也是类似的.

此外, CESWR-TR 方法能够通过构建反演过程的 TR 信号来实现 SIMO-TRC 系统输出峰值电压的线性调整. 若 p 相同, 则经过对两个接收端各自的 CIR 筛选后, 得到的 h_0, h_1' 和 h_2' 相同. 此时, 对于同一个等效重构信道 h'', 可以用下面矩阵的形式表示:

$$\left[(h_1')^{\top}(h_2')^{\top}\right]\left[\begin{array}{c}\alpha\\ \beta\end{array}\right]=(h'')^{\top}, \tag{6}$$

其中不难得出 $[(h_1')^{\top}(h_2')^{\top}]$ 中两列互相独立, 为列满秩矩阵, 所以 (6) 式只有唯一非零解. 也就是说, 此时 α 和 β 也唯一. 对于不相同的筛选精度 p, 如 p_m 和 p_n, 假设 $p_m<p_n$, 其对应的筛选结果分别为: $h_{0,\,m}$, $h'_{1,\,m}$ 和 $h'_{2,\,m}$ 以及 $h_{0,\,n}$, $h'_{1,\,n}$ 和 $h'_{2,\,n}$. 由于筛选精度 $p_m<p_n$, 所以筛选后的相似部分 $h_{0,\,m}$ 的整体数目小于 $h_{0,\,n}$, 换言之, 理论上一定存在某一时延 k, 此时两个 CIR 的差值的绝对值恰好处于 p_m 和 p_n 之间, 即

$$p_m<|h_1(k)-h_2(k)|<p_n. \tag{7}$$

若想要此时的峰值电压比相等, 即 h''_m 与 h''_n 相同, 设此时的加权系数分别为 α_m, β_m 和 α_n, β_n. 根据我们的筛选规则, 在保留相似部分时选取接收端 Rx2 的 CIR, 即 $h_2(k)$, 可得到如下关系:

$$\begin{aligned} h''{}_m(k)&=\alpha_m h'_{1,m}(k)+\beta_m h'_{2,m}(k)\,,\\ h''_n(k)&=h_{0,n}(k)=h_2(k). \end{aligned} \tag{8}$$

又因为 $h''_m(k)$ 和 $h''_n(k)$ 相等, 所以可以得出:

$$\alpha_m h'_{1,m}(k)+\beta_m h'_{2,m}(k)=h_{0,n}(k)=h_2(k). \tag{9}$$

又因为 $h'_{2,\,m}(k)$ 和 $h_2(k)$ 都是对应 h_2 中的同一时延, 所以相等. 因此取足够多的满足 (7) 式条件的时延 k, 可得到化简变形后的线性方程组的矩阵形式:

$$\left[\left(h'_{1,m}(k)\right)^{\top}\left(h'_{2,m}(k)\right)^{\top}\right]\left[\begin{array}{c}\alpha_m\\ (\beta_m-1)\end{array}\right]=0. \tag{10}$$

其系数矩阵为列满秩矩阵, 因此对应的齐次方程组仅有零解, 即

$$\alpha_m=0,\quad \beta_m=1. \tag{11}$$

另取某一时延 j, 若其满足:

$$|h_1(j)-h_2(j)|>p_n. \tag{12}$$

即该时延下两个 CIR 均被归类为各自的特征部分, 类似可以得出:

$$\alpha_m h'_{1,m}(j)+\beta_m h'_{2,m}(j)=\alpha_n h'_{1,n}(j)+\beta_n h'_{2,n}(j). \tag{13}$$

任意选取多个满足上面关系的时延 j, 则可以得出线性方程组. 值得注意的是 (13) 式中 $h'_{1,\,m}(j)$ 和 $h'_{1,\,n}(j)$, 以及 $h'_{2,\,m}(j)$ 和 $h'_{2,\,n}(j)$ 对应相等, 因为它们都是从同一个 CIR 的同一个时延中分离得到. 则此时可以写出变换后的矩阵形式:

$$\begin{aligned} &(\alpha_n-\alpha_m)\,h'_{1,n}(j)+(\beta_n-\beta_m)\,h'_{2,n}(j)=0,\\ &\left[\left(h'_{1,n}(j)\right)^{\top}\left(h'_{2,n}(j)\right)^{\top}\right]\left[\begin{array}{c}(\alpha_n-\alpha_m)\\ (\beta_n-\beta_m)\end{array}\right]=0. \end{aligned} \tag{14}$$

上式中系数矩阵为列满秩矩阵, 则该齐次方程组仅有零解, 即得到:

$$\alpha_m=\alpha_n,\ \beta_m=\beta_n. \tag{15}$$

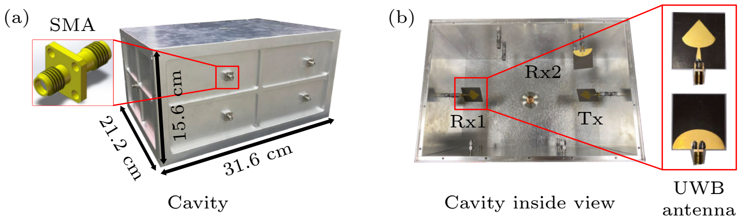

图 2 腔体和 UWB 单极子天线实物 (a) TRC 的结构和尺寸大小; (b) 腔体内部结构和实验使用的超宽带天线

Fig. 2. Cavity and UWB monopole antenna: (a) Structure dimensions and appearance of the cavity; (b) position of the antenna inside the cavity and the ultrawideband monopole antenna used in the experiment.

最终得出 $\alpha_m = \alpha_n = 0$, $\beta_m = \beta_n = 1$, 此时对应的等效 CIR 显然相等, 并且均等于 h_2. 因此排除这种特殊情况, CESWR-TR 方法理论上不存在同一 h'' 对应多组不同参数的情况. 但是考虑到实际环境中的干扰和在进行信道提取时产生的误差, 有可能在实际环境中观测到不同参数对应接收效果的现象. 此时, 若两个接收端对峰值电压有一定数值要求, 例如在功率合成[11–15]中人们希望聚焦峰值电压增益尽可能高, 则应该选取稳定情况下峰值最高的参数.

3 实验系统及测量结果

3.1 实验系统设置和 CESWR 的操作流程

为了评估本文提出的方法, 设置了几组不同的实验进行比较. 如图 2(a) 所示, 实验中使用的腔体尺寸为 31.6 cm × 21.2 cm × 15.6 cm, 由铝制成, 四面都嵌有相同的 SMA 射频转换接头 (sub-miniature-A, SMA). 腔内接收天线的位置如图 2(b) 所示, 其中 Tx 连接到任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG) 的输出端口作为发射端. 接收端 1 和 2 (Rx1 和 Rx2) 分别连接到示波器的通道 1 和通道 3. 实验中使用的天线是超宽带 (ultra-wideband, UWB) 单极子天线, 经过实际测量, 其 $S11$ 数值在 2—8 GHz 内低于–15 dB.

图 3 给出了实验的设置和操作步骤. 任意波形发生器 AWG7122 B 被用作信号源, 用来分析波形的示波器是 DSA72004 B. AWG 和示波器的采样频率分别设置为 24 GS/s 和 50 GS/s, 具体的实验步骤如下.

1) 在计算机中生成一个带宽为 2—8 GHz 的调制高斯脉冲的波形, 并以 24 GS/s 的速率对该信号进行采样, 将获得的离散数据导入 AWG.

2) 在 Tx 端口发送脉冲信号后, 在 Rx1 和 Rx2 端口接收.

3) 使用信道提取、筛选和加权的方法后, 将接收的信号与初始发送的信号进行卷积, 最后在时域进行反褶并进行最大值归一化.

4) 在 Tx 端再次发送 TR 信号, 接收并比较 Rx1 和 Rx2 的接收信号;

5) 调整权重并再次进行实验, 直到 Rx1 和 Rx2 的接收信号具有几乎相同的聚焦峰值.

根据 TR 处理的步骤, 在 Tx 发射脉冲信号, 得到的接收信号如图 4(a) 所示, 其中 y_1 表示 Rx1 的接收信号, 其最大电压约为 30.8 mV, 而 Rx2 的接收信号 y_2 的最大电压约为 15.6 mV.

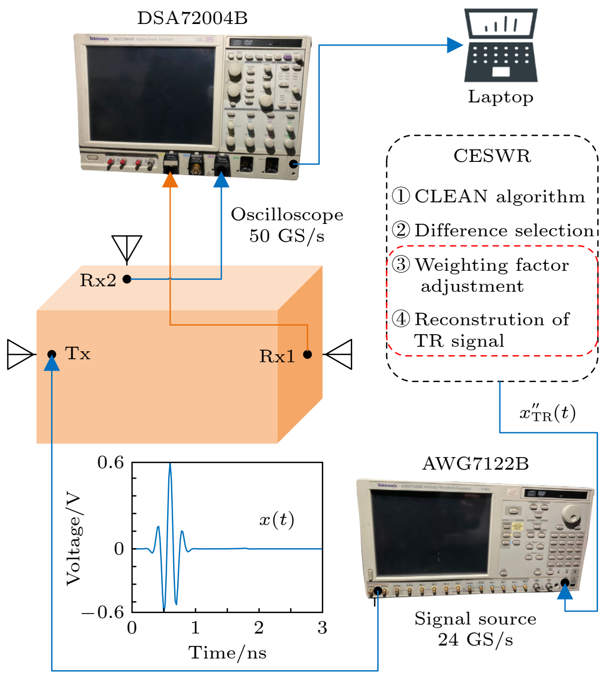

图 3 实验流程示意图, 其中 $x(t)$ 是发送的高斯脉冲信号, 峰值电压为 0.6 V; 红色框内的步骤需要进行多次

Fig. 3. Schematic of the experiment set up. $x(t)$ is the transmitted Gaussian pulse signal with peak voltage of 0.6 V; the steps in the red circle need to be operated several times.

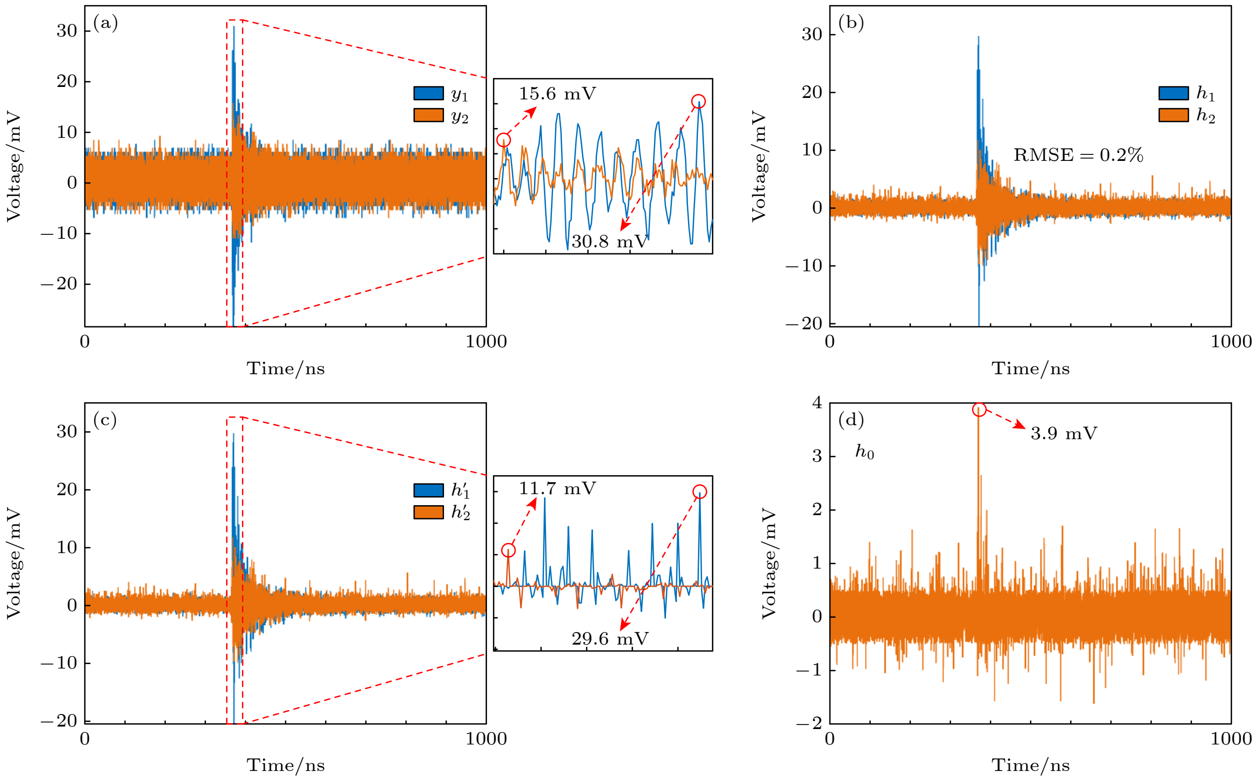

图 4 信道提取和筛选后的结果 (a) Rx1 的接收信号和 Rx2 的接收信号; (b) 信道提取结果 (RMSE = 0.2%); (c) 信道筛选后 Rx1 和 Rx2 各自的特征部分; (d) 信道筛选后的相似部分

Fig. 4. Receive signals after transmitting the pulse and processing results: (a) Receive signals of Rx1 plotted in blue and Rx2 plotted in yellow; (b) channel extraction results (RMSE = 0.2%); (c) characteristic parts after channel selecting; (d) the similar part after channel selecting.

3.2 信道提取和筛选结果

按照 CESWR 的步骤, 对得到的接收信号应用 CLEAN 算法提取信道冲激响应, 得到的结果如图 4(b) 所示. 将提取的信道与发送脉冲卷积后与原始接收信号进行比较, 得出两个 CLEAN 算法提取得到的 CIR 的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 约为 0.2%, 具有较高的可靠性. 此外, 根据结果计算出两个 CIR 之间的互相关系数只有约 0.018, 这表明两个接收天线之间的相关性很弱, 满足弱相关信道的条件.

在下一步的信道筛选中, 判决阈值和筛选得到的结果之间没有明显的线性关系, 这是由于两个天线的信道响应之间的相似性很小, 因为每个时刻的信道响应的差别不具有规律性. 为此, 通过尝试多组判决的阈值, 根据筛选得到的相似部分的冲激数目, 选择判断阈值设置为 5×10^{-4} V 的结果, 具体结果见图 4(c) 和图 4(d). 图 4(c) 中的 h_1 和 h_2 表示 Rx1 和 Rx2 通道的特征部分. 它们的最大电压分别为 29.6 mV 和 11.7 mV. 在图 4(d) 中, 由于所选的相似部分并不完全相同 (最大差异约为 5×10^{-4} V), 本文选择保留 h_2 的相似部分, 其最大电压为 3.9 mV.

3.3 经典 TR 操作和 CESWR 操作的结果

此外, 为了验证 CESWR 方法的可行性, 分别进行了经典的 TR 操作和 CESWR-TR 操作. 对于 SIMO 系统的经典 TR, 两个接收机的 TR 发射信号应该同时发送, 即

$$x_{\mathrm{TR}}(t)=x(-t)*\{h_1(-t)+h_2(-t)\}.$$

在两个接收端收到的 $y_{1,\mathrm{TR}}$ 和 $y_{2,\mathrm{TR}}$ 信号如图 5(a) 所示. 为了分析两根天线之间峰值电压的差异, 峰值电压比定义为

$$R_{\mathrm{PV}}=\frac{\max\left(y_2'\right)}{\max\left(y_1'\right)}. \tag{16}$$

图 5(a) 显示了经典 TR 的结果. Rx1 的接收信号 $y_{1,\mathrm{TR}}$ 的峰值约为 40.4 mV, Rx2 的接收信号 $y_{2,\mathrm{TR}}$ 的峰值约为 16.4 mV, 对应的峰值电压比约为 0.41. 在初始步骤中, 接收信号 y_1 和 y_2 的峰值电

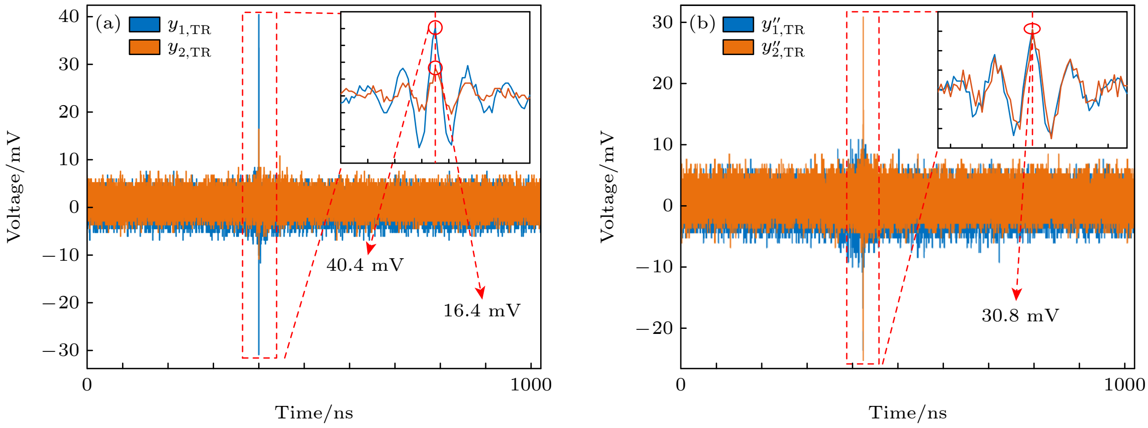

图 5 (a) 经典 TR 操作的接收信号; (b) 基于 CESWR 的 TR 操作的接收信号

Fig. 5. (a) Received signals of classical TR; (b) received signals of TR using CESWR method.

压比约为 0.51, 这意味着经典 TR 放大了 SIMO 系统不同接受目标之间的差异性.

使用 CESWR 的 TR 信号是根据 (5) 式加权后重构的. 由于相似部分的系数固定为 1, 而相似部分的平均电压与各自特征部分的平均电压相比很小, 所以选择的α和β应满足$0 < \alpha, \ \beta < 1$, 以使两个接收端的 TR 接收信号的峰值电压相等. 经过几组实验, 当$\alpha = 0.2$和$\beta = 0.5$时, 两个天线的接收信号的峰值几乎相同, 结果如图 5(b) 所示. 使用 CESWR 后 TR 操作的两个接收端峰值电压比约为 1.00, 两个接收信号的聚焦的峰值电压之差小于8×10^{-6} mV.

此外, 表 1 列出了 6 组对应于α和β不同值的峰值比. 当α或β固定时, 改变另一个系数, 相应的接收天线接收到的信号的峰值电压也随之改变, 可以看出, 这种调控在一定范围内是灵活的. 当$\alpha = 1$和$\beta = 1$时, 特征部分的系数与相似部分的系数相同, 峰值电压比为 0.367. 这表明 CESWR 方法不仅可以使两个天线的响应更加相似, 而且可以使它们之间的差异更加明显.

表 1 不同的加权系数对应的峰值电压比

Table 1. Peak voltage ratio of different coefficiesnts.

峰值电压比	α	β
1.000	0.20	0.50
1.381	0.15	0.50
0.696	0.25	0.50
0.766	0.20	0.40
1.262	0.20	0.60
0.367	1.00	1.00

3.4 强相关信道模型下 CESWR-TR 方法的实验结果

为了表明上述方法具有普遍性, 在强相关信道模型下进行了实验, 并对实验结果进行了分析. 如图 6 所示, 当两个接收端在空间上的距离十分近时 ($d \approx \lambda_c/20$, λ_c表示宽带信号的中心频率的波长), 其接收信号之间的相关性也更强. 在实验中, 发送端使用的信号仍为 2—8 GHz 的调制高斯脉冲. 实验得到的接收信号y_1和y_2的峰值电压比为 1.0519. 对接收端的接收信号提取 CIR 后, 计算得出两个接收端的 CIR 相关性系数为 0.1633, 显著高于弱相关情况下的 0.018, 可以认为其满足强相关性的条件. 由于在该条件下, 两个接收端原本的接收信号的峰值电压已经十分接近, 其峰值电压比接近 1, 所以对于均衡传输的需求而言不需要进行调整, 也无法体现 CESWR-TR 的效果. 并且结合实际应用, 在两个接收端十分接近的情况下, 高分辨率的特性在各种微波应用中显得十分重要, 包括多目标通信和微波输能等场景. 因此下面将通过实验对强相关下的高分辨率特性进行仿真, 探究 CESWTR-TR 方法相对于经典 TR 操作的提升, 以及其上限.

在实验过程中, 设置筛选精度p为1×10^{-3} mV, 筛选仍然使用相同的规则, 得到相似部分h_0、特征部分h'_1和h'_2. 通过调整加权系数α和β来使峰值电压比得到近似的调节上限. 作为高分辨效果的对比, 同样进行了经典单目标 TR 操作, 经过多次改变加权系数, 结果见表 2.

从表 2 可以看出, 当$\alpha = 0$, $\beta = 1$时, 表示针对接收端 Rx2 的经典单目标 TR, 此时峰值电压比

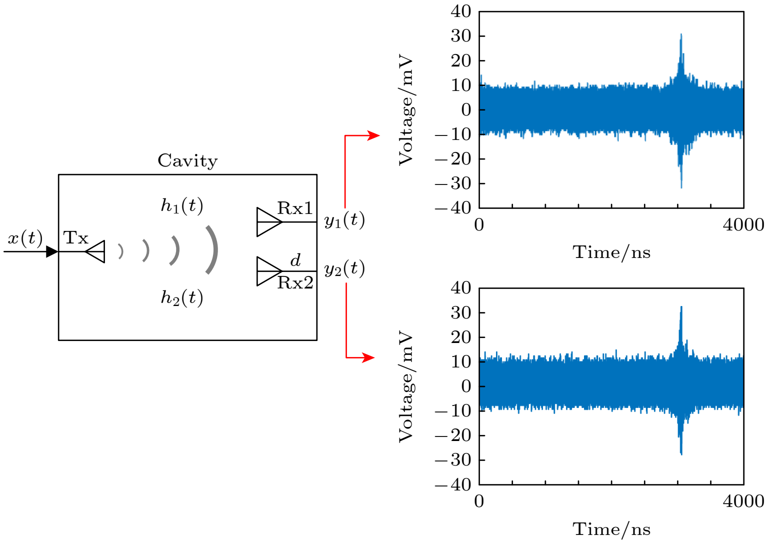

图 6 强相关实验示意图 (d 表示两个接受天线之间的距离)

Fig. 6. Schematic diagram of the tight correlation experiment (d represents the distance between the two receiving antennas).

约为 3.741; 当$\alpha=1$, $\beta=0$时, 表示针对接收端 Rx1 的经典单目标 TR, 此时峰值电压比约为 0.466. 进一步调整加权系数, 使分辨效果更明显, 即峰值电压比更大或更小. 从表 2 可以看出, 当 CESWR-TR 中的加权系数足够大时, 峰值电压比接近上限, 继续增大系数的改变不明显. 此时对应的峰值电压比具有上限约为 3.816, 下限约为 0.418. 因此, 在强相关模型下, CESWR-TR 方法相比于经典 TR 操作能够进一步提升分辨率, 同时这一实验结果也说明本文提出的 CESWR-TR 方法并非能够实现全范围内的峰值电压比调节, 其理论上受到电磁波衍射极限、TR 腔聚焦场分布[26] 的限制.

表 2 强相关实验峰值电压比和加权系数结果对比

Table 2. Comparison of peak voltage ratio and coefficients in tight-correlation experiments.

峰值电压比	α	β
3.741	0	1.00
0.466	1.00	0
3.812	0.10	0.90
3.816	0.08	0.92
0.423	0.90	0.10
0.418	0.92	0.08

4 结 论

本文提出了一种对信道进行处理后重建发射信号的 TR 方法, 用于实现多目标的均匀电磁传播. 现有的多目标电磁聚焦方法由于其优化困难或系统复杂, 无法满足多径模型下的实际要求, 因此本文单输入场景下的 CESWR 方法, 通过对信道特征部分的加权, 可以实现多径模型下的等峰值电压输出. 在实验环节, 分别设计了一个弱相关和强相关的 SIMO-TRC 系统, 均进行了经典的 TR 和使用 CESWR 的 TR 方法. 比较结果表明, 在弱相关情况下, 基于信道处理的 TR 方法能够将两个原始峰值电压比为 0.51 的输出转变成一个峰值电压比为 1.00 的输出, 且差值小于8×10^{-6} mV, 同时保持了系统的简便性. 而在强相关情况下, CESWR-TR 方法能够实现将两个原本响应相似的接收端之间的分辨率进一步提升, 能够将峰值电压比分别从 3.741 调整到 3.816, 从 0.466 调整到 0.418. 此外, 为了进一步讨论 CESWR 方法对输出的调整是否灵活, 进行了 6 组不同的实验, 结果表明其能够灵活调整两个输出端的峰值电压比. 该方法有望在无线通信和无线输能系统中得到应用.

参考文献

[1] Wang B, Wu Y, Han F, Yang Y H, Liu K R 2011 *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **29** 1698

[2] Han F, Yang Y H, Wang B, Wu Y, Liu K R 2012 *IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM 2011* Houston, TX, USA, December 5–9, 2011 p1

[3] Nguyen H T, Andersen J B, Pedersen G F, Kyritsi P, Eggers P C 2006 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **5** 2242

[4] Zhao D, Zhu M 2006 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 1739

[5] Bellizzi G G, Bevacqua M T, Crocco L, Isernia T 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 4380

[6] Li B, Liu S, Zhang H L, Hu B J, Zhao D, Huang Y 2019 *IEEE Access* **7** 114897

[7] Bellizzi G G, Iero D A, Crocco L, Isernia T 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 360

[8] Iero D A, Crocco L, Isernia T 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 814

[9] Lerosey G, De Rosny J, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904

[10] Carminati R, Pierrat R, De Rosny J, Fink M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3107

[11] Hong S K, Lathrop E, Mendez V M, Kim J 2015 *Prog. Electromagn. Res.* **153** 113

[12] Hong S, Park H 2018 *Electron. Lett.* **54** 768

[13] Drikas Z B, Addissie B D, Mendez V M, Raman S 2020 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **68** 3355

[14] Li B, Zhang Q, Zhao D, Yang Y 2022 *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)* Beijing, China, September 1–4, 2022 p356

[15] Drikas Z B, Addissie B D, Mendez V M, Raman S 2021 *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* **32** 177

[16] Wang K, Shao W, Ou H, Wang B Z 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 2828

[17] Razzaghi R, Lugrin G, Manesh H, Romero C, Paolone M, Rachidi F 2013 *IEEE Trans. Power Delivery* **28** 1663

[18] Codino A, Wang Z, Razzaghi R, Paolone M, Rachidi F 2017 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **59** 1601

[19] Sun J, Yang Q, Cui H, Ran J, Liu H 2021 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **63** 1921

[20] Ding S, Fang Y, Zhu J F, Yang Y, Wang B Z 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 1386

[21] Ibrahim R, Voyer D, Bréard A, Huillery J, Vollaire C, Allard B, Zaatar Y 2016 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **64** 2159

[22] Zhang Z Y, Li B, Liu S Q, Zhang H L, Hu B J, Zhao D S, Wang C N 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 014101 (in Chinese) [张知原, 李冰, 刘仕奇, 张洪林, 胡斌杰, 赵德双, 王楚楠 2022 物理学报 **71** 014101]

[23] Derode A, Tourin A, Fink M 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 6343

[24] Lu X C, Qiu Y, Tian J, Wang H B, Jiang L, Chen X 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 024101 (in Chinese) [陆希成, 邱扬, 田锦, 汪海波, 江凌, 陈鑫 2022 物理学报 **71** 024101]

[25] Cramer R M, Scholtz R A, Win M Z 2002 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **50** 561

[26] Lerosey G, De Rosny J, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1120

Channel processing-based time-reversal method for multi-target tunable focusing*

Yan Yi-Zhu Ding Shuai† Han Xu Wang Bing-Zhong

(*Institute of Applied Physics*, *University of Electronic Science and Technology of China*, *Chengdu* 611731, *China*)

(Received 6 April 2023; revised manuscript received 12 June 2023)

Abstract

Achieving tunable focus of electromagnetic field energy at multiple target points is a critical challenge in the wireless power transfer (WPT) domain. In order to solve this problem, some techniques such as optimal constrained power focusing (OCPF) and time reversal (TR) have been proposed. The former presents limited practical applicability while the latter is noteworthy for its adaptive spatiotemporal synchronous focusing characteristics. However, the time reversal mirror (TRM) method necessitates intricate pretesting and has highly complex systems. In this study, we introduce a novel channel processing method, named channel extraction, selection, weighting, and reconstruction (CESWR), to attain balanced power distribution for multiple users, featuring low complexity, high computability, and rapid convergence. Unlike the traditional TR approach, our proposed method, based on channel correlation considerations, filters the channel impulse response (CIR) for multiple targets, dividing them into distinct characteristic and similar components for each target. This method ensures focused generation at both receiving ends while facilitating high-precision regulation of the peak voltage of the received signal. Furthermore, this study implements a rigorous examination of the linearity intrinsic to the proposed method, explicating a singular correspondence between the tuning of theoretical weights and the resultant outcomes. In order to verify the efficacy of this method, we construct a single-input multiple-output time-reversal cavity (SIMO-TRC) system. Subsequent experiments conducted for both loosely and tightly correlated models, provide invaluable insights. Evidently, in the loosely correlated model, the CESWR method exhibits proficiency in attaining a peak voltage ratio (PVR) of nearly 1.00 at the two receivers, with a minuscule numerical discrepancy of merely 8×10^{-6} mV. In stark contrast, under the tightly correlated model, the CESWR method demonstrates an enhanced ability to differentiate between two targets, thus offering a noticeable improvement over the classic single-target TR method.

Keywords: time-reversal, channel processing, multi-target focusing

PACS: 41.20.Jb, 88.80.ht, 11.80.Gw **DOI:** 10.7498/aps.72.20230547

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant Nos. A03019023801088, ZYGX2019Z016, ZYGX2021YGLH025) and the Science and Technology Support Program of Sichuan Province, China (Grant No. 2022YFS0193).

† Corresponding author. E-mail: uestcding@uestc.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

基于信道处理的时间反演幅度可调控多目标聚焦方法

闫轶著　丁帅　韩旭　王秉中

Channel processing-based time-reversal method for multi-target tunable focusing

Yan Yi-Zhu　Ding Shuai　Han Xu　Wang Bing-Zhong

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 72, 164101 (2023)　DOI: 10.7498/aps.72.20230547

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.72.20230547

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