

基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号空间功率合成

陈秋菊 姜秋喜 曾芳玲 宋长宝

Single frequency spatial power combining using sparse array based on time reversal of electromagnetic wave

Chen Qiu-Ju Jiang Qiu-Xi Zeng Fang-Ling Song Chang-Bao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 204101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究

[Study on composite electromagnetic scattering from the double rectangular cross-section columns above rough sea surface using hybrid method](#)

物理学报.2015, 64(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174101>

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证

[Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient meta-surface based on cruciform structure](#)

物理学报.2015, 64(16): 164102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102>

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器

[A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure](#)

物理学报.2015, 64(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101>

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究

[Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics](#)

物理学报.2015, 64(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102>

超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究

[Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators](#)

物理学报.2015, 64(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144101>

# 基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号空间功率合成

陈秋菊<sup>†</sup> 姜秋喜 曾芳玲 宋长宝

(电子工程学院, 信息处理重点实验室, 合肥 230037)

(2015年4月28日收到; 2015年5月23日收到修改稿)

基于时间反演技术, 建立了稀疏阵列单频信号相干合成的数学模型, 定义了合成效率函数概念, 推导出合成信号幅度最大时刻目标点合成效率值的统计特征与相位误差及阵元数的关系表达式, 并通过理论分析与仿真计算研究了相位误差对时间反演单频信号合成效果的影响. 分析表明, 当其他参数确定时, 假设相位误差服从一定范围的均匀分布, 且相互独立, 则峰值功率时刻的合成效率均值与阵元数无关, 仅与误差分布范围有关; 峰值功率时刻的合成效率方差与两者均相关, 且误差分布范围确定时, 阵元数越大, 峰值功率时刻的合成效率方差越小. 仿真计算结果表明, 即使存在一定的相位误差, 利用时间反演技术, 仍可实现单频信号在目标点邻域的相干合成及能量聚焦; 对相位误差的控制精度应结合需求与实现条件折中考虑. 本文的方法与结论可为研究稀疏阵列功率合成在高功率微波武器等技术中的应用提供理论依据.

**关键词:** 时间反演, 单频信号, 稀疏阵列, 空间功率合成

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.40.Ba

**DOI:** 10.7498/aps.64.204101

## 1 引言

时间反演 (time reversal, TR) 技术最早由声学领域的研究者提出<sup>[1]</sup>, 于2004年被引入到电磁学领域<sup>[2]</sup>. 该技术指将天线接收的一串电磁信号在时域上进行反转, 并重新发射出去. 时间反演电磁波具有时-空同步聚焦特性<sup>[3]</sup>, 使得该技术可以应用于无线通信、雷达成像、低能耗保密通信等多类系统, 并带来突破性进步<sup>[4]</sup>. 2006年以来, 美国田纳西州理工大学对TR-UWB通信系统性能进行了分析和实验验证<sup>[5,6]</sup>. 2007年以来, 法国巴黎第七大学Fink研究小组及法国国立应用科学研究院也对TR-UWB系统进行了实验研究<sup>[7,8]</sup>. 2007年以来, 国内电子科技大学研究小组致力于TR技术研究, 在TR-UWB通信实验系统、时间反演电磁波的实现方法等方面取得了一系列成果<sup>[9-13]</sup>. 屠惠琳等<sup>[13]</sup>基于信道理论验证了单频电磁波信号在时间反演技术条件下实现超分辨率聚焦的可行性. 本文

基于TR技术开展了其在稀疏阵列波束功率合成方面的应用研究. 传统的功率合成研究集中于紧凑型阵列, 利用相位控制在主方向实现空间功率合成, 利用平行波束在远场形成以目标方向为中心的扇形区域, 易被敌方准确测向定位, 抗反辐射导弹攻击能力较弱. 与平行波束不同的是, 交叉波束在区域内通过干涉进行合成. 稀疏阵列空间功率合成利用交叉波束的干涉合成效应实现功率倍增, 更有利于隐蔽自身, 能有效对抗反辐射武器. 国防科技大学<sup>[14]</sup>面向高功率微波武器应用, 针对二元阵交叉波束合成问题推导了干涉相长点间距规律, 但没有对阵元数更多的情况进行分析. 电子科技大学<sup>[15]</sup>分别分析了假设“目标处各天线辐射电磁波极化方向一致时”, 在相位误差精确控制或完全随机时交叉波束在目标区域处合成电场的场强分布规律, 并研究了因极化方向不同对目标区域处电场分布带来的影响. 但上述研究均未涉及多源相干信号的产生方法以及多元阵下相控误差对合成效果影响的量化研究. 本文考虑到时间反演电磁波在时-空

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: 11107769@qq.com

步聚焦方面的优越特性, 利用时间反演电磁波的相干合成效应在波束交汇区域实现功率增强, 并基于合成效率函数及有效功率点概念通过理论分析与仿真计算研究了相位误差对时间反演单频信号合成效果的影响.

## 2 时间反演电磁波单频信号合成数学模型

在空间中的目标点  $T$  处或目标点邻近区域内设置一个信标辐射源  $P$ , 如图 1, 信标发射的电磁波经环境传播后被  $N$  元稀疏天线阵列接收, 每个阵元  $A_i$  其接收机与 A/D 转换器、存储器相连. 接收到的信号经过时间反演后, 再由发射机发射, 电磁波再次经过空间传播后会在信标辐射源位置聚焦.

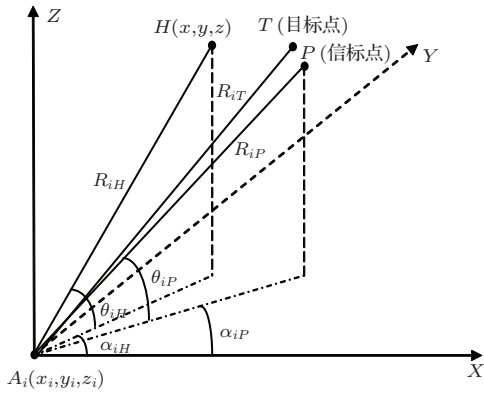


图 1 阵元、目标点及信标点的空间位置图

Fig. 1. The spatial location of nodes, target point and pilot point.

假设信标信号为单频余弦信号

$$S_0(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi_0), \quad (1)$$

式中,  $\phi_0$  为初始相位, 中心频率为  $f_0$ .

信标信号传播至第  $i$  个天线节点时 ( $i = 1, \dots, N$ ), 接收到的信号为

$$S_{ir}(t) = \frac{A}{4\pi R_{iP}^2} f_P(\theta_{Pi}, \alpha_{Pi}) f_{ir}(\theta_{iP}, \alpha_{iP}) \times \cos \left[ 2\pi f_0 \left( t - \frac{R_{iP}}{c} \right) + \phi_0 \right], \quad (2)$$

其中,  $R_{iP}$  为  $A_i$  与信标  $P$  之间的距离,  $\theta_{Pi}$  表示信标  $P$  与  $A_i$  连线与  $XOY$  平面的夹角,  $\alpha_{Pi}$  表示信标  $P$  与  $A_i$  连线在  $XOY$  平面上的投影与  $X$  轴的夹角;  $\phi_0$  为信标发射信号的初相位;  $f_P(\theta_{Pi}, \alpha_{Pi})$  为信标天线的方向性函数,  $\theta_{iP}$  表示  $A_i$  与信标  $P$  连线与  $XOY$  平面的夹角,  $\alpha_{iP}$  表示  $A_i$  与信标连线在  $XOY$  平面上的投影与  $X$  轴的夹角;  $f_{ir}(\theta_{iP}, \alpha_{iP})$

为第  $i$  个节点接收天线的方向性函数;  $c$  为光速. 为在目标点获得最大合成增益, 各节点考虑采用极化方向相同的天线. 其中,  $A_i = \frac{A}{4\pi R_{iP}^2} f_o(\theta_{Pi}, \alpha_{Pi}) f_{ir}(\theta_{iP}, \alpha_{iP})$  为与短时间 (各节点的一次数据处理时间) 无关的幅度因子, 在短时间内可视为恒定.

从  $t = 0$  时刻开始, 信标发射信号, 稀疏阵列各节点接收到信号后进行时间反演处理及放大, 调制后的输出信号电平记为  $B_i$ , 反演处理时每次存储的时间长度为  $T_{win}$ , 采样存储及反演的处理次数记为  $k$ , 则第  $i$  个节点第  $k$  次处理后输出的反演信号记为

$$S_{it}(t) = B_i \cdot \cos \left[ 2\pi f_0 \left( kT_{win} - t - \frac{R_{iP}}{c} \right) + \phi_0 \right]. \quad (3)$$

当信号传播至交汇空间中任意一点  $H$  点时,  $H$  点信号为

$$S_{iH}(t) = \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \cos \left\{ 2\pi f_0 \left[ kT_{win} - \left( t - \frac{R_{iH}}{c} \right) - \frac{R_{iP}}{c} \right] + \phi_0 \right\}. \quad (4)$$

对于目标点  $T$  及信标点  $P$  邻近区域内的  $H$  点, 三点之间的距离远小于各节点与三点间距离, 即  $R_{iH} \approx R_{iP} \approx R_{iT}$ . 则,

$$S_{iH}(t) = \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \times \cos(-2\pi f_0 t + \phi_0 + 2\pi f_0 kT_{win}). \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 在信标点处, 各节点信号可以同相相干叠加, 而对于其他区域, 尤其是信标点的邻近区域, 可以形成电磁波干涉区域.

当  $R_{iH} \neq R_{iP}$  时, 将引起各节点信号到达  $H$  点时刻的差异, 且在目前的技术条件下, 难以做到所有节点完全的时间同步. 因此各节点信号到达  $H$  点的辐射滞后时间有误差, 第  $i$  个节点的辐射滞后时间误差记为  $\Delta t_i$ , 则

$$S_{iH}(t) = \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \cdot \cos[-2\pi f_0(t - \Delta t_i) + \phi_0 + 2\pi f_0 kT_{win}] = \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \cdot \cos(2\pi f_0 t - 2\pi f_0 \Delta t_i - \phi_0 - 2\pi f_0 kT_{win}). \quad (6)$$

所以, 在  $H$  点的合成信号为

$$S_H(t) = \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \times \cos(2\pi f_0 t + \Delta \phi_i), \quad (7)$$

其中  $\Delta\phi_i = -2\pi f_0\Delta t_i - \phi_0 - 2\pi f_0 k T_{win}$ . (11)

### 3 合成效率函数及目标点合成效率的误差分析

为分析辐射滞后时间误差  $\Delta t_i$  对合成信号的影响, 定义  $H$  点的合成效率函数为

$$\eta_H(t) = \left| \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \Delta\varphi_i) \times \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{4\pi R_{iH}^2} \cdot f_i(\theta_i, \alpha_i) \times \cos(2\pi f_0 t - \phi_0 - 2\pi f_0 k T_{win}) \right\}^{-1} \right|. \quad (8)$$

$\Delta\phi_i$  为随机变量, 合成效率函数  $\eta_H(t)$  为一随机过程, 即考虑辐射滞后时间的合成信号时变幅值与未考虑误差的合成信号时变幅值之比. 该函数可度量每个时刻稀疏分布阵列由于方位上的分散及相位误差的存在, 引起的合成效率值的变化.

为达到在交汇区域信号功率叠加的目的, 考虑各节点天线的波束中心对准目标点, 以增强目标点的合成效率值. 为讨论方便, 假设将信标点设于目标点, 各节点天线类型与增益特性相同, 即:  $f_1(\theta_1, \alpha_1) = f_2(\theta_2, \alpha_2) = \dots = f_N(\theta_N, \alpha_N) = G$ ; 各节点的输出功率一致, 即  $B_1 = B_2 = \dots = B_N = 1$ , 且各节点与目标点之间距离近似相等, 即  $R_{1P} \approx R_{2P} \approx \dots \approx R_{NP} = R$ , 在目标点邻域,  $R_{iH} \approx R_{iP} \approx R_{iT} = R$ . 以第一次采样存储及反演处理为例, 即  $k = 1$ .

在理想情形下,  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_N = 0$ , 所有激励信号到达  $T$  点的相位同步, 则由 (7) 式, 目标点  $T$  处合成信号为

$$S_T(t) = \frac{NG}{4\pi R^2} \cos(2\pi f_0 t - \phi_0 - 2\pi f_0 T_{win}); \quad (9)$$

如果  $\Delta t_i \neq 0$ , 则由 (7) 式, 在目标点  $T$  处, 合成信号为

$$S_T(t) = \frac{G}{4\pi R^2} \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f_0 t - 2\pi f_0 \Delta t_i - \phi_0 - 2\pi f_0 T_{win}); \quad (10)$$

目标点合成效率函数为

$$\eta_T(t) = \left| \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f_0 t - 2\pi f_0 \Delta t_i - \phi_0 - 2\pi f_0 T_{win}) \times \{N \cos(2\pi f_0 t - \phi_0 - 2\pi f_0 T_{win})\}^{-1} \right|.$$

考虑到在目标点实现功率合成的目的, 以理想情况下合成信号幅值最大时刻为例进行分析, 即  $t = T_{win} \pm \frac{K}{f_0} + \frac{\phi_0}{2\pi f_0}$  ( $K \in Z$ ) 时, 随机变量

$$\eta_{T_m} = \eta_T(t = T_{win} \pm \frac{K}{f_0} + \frac{\phi_0}{2\pi f_0}) = \left| \sum_{i=1}^N \cos(\Delta\phi_i) \right| / N, \quad \Delta\phi_i = 2\pi f_0 \Delta t_i. \quad (12)$$

假设  $\Delta\phi_i$  服从  $(-\theta, \theta)$  内的均匀分布 ( $\theta$  为常量,  $\theta \in [0, \pi/2]$ ), 且  $\Delta\phi_i$  相互间独立. 则  $\cos(\Delta\phi_i) > 0$ ,

$$\eta_{T_m} = \sum_{i=1}^N \cos(\Delta\phi_i) / N.$$

计算随机变量  $\eta_{T_m}$  的均值  $\mu_\eta$  为

$$\begin{aligned} \mu_\eta &= E \left[ \sum_{i=1}^N \cos(\Delta\phi_i) / N \right] \\ &= \frac{1}{N} E \left[ \sum_{i=1}^N (\cos(\Delta\phi_i)) \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \cos(\Delta\phi_i) d\Delta\phi_i \\ &= \frac{1}{2\theta} (\sin(\theta) - \sin(-\theta)) \\ &= \frac{\sin \theta}{\theta}; \end{aligned} \quad (13)$$

计算  $\eta_{T_m}$  的方差  $\sigma_\eta^2$  为

$$\begin{aligned} \sigma_\eta^2 &= E[\eta_{T_m}^2] - \mu_\eta^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_i^N \sum_j^N E[\cos(\Delta\phi_i) \cos(\Delta\phi_j)] - \mu_\eta^2 \\ &= \frac{1}{2N^2} \sum_{i,i \neq j}^N \sum_{j,i \neq j}^N \left\{ \frac{1}{(2\theta)^2} \right. \\ &\quad \times \int_{-\theta}^{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \cos(\Delta\phi_i + \Delta\phi_j) d\Delta\phi_i d\Delta\phi_j \\ &\quad + \frac{1}{(2\theta)^2} \int_{-\theta}^{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \cos(\Delta\phi_i - \Delta\phi_j) \\ &\quad \times d\Delta\phi_i d\Delta\phi_j \left. \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2N(2\theta)} [\sin(2\theta) - \sin(-2\theta)] + \frac{1}{2N} - \mu_\eta^2 \\ &= \frac{1}{2N} \left[ 1 + \frac{\sin(2\theta)}{2\theta} - \frac{1}{\theta^2} (1 + \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

表1 目标点合成效率方差值 ( $\times 10^{-3}$ )  
Table 1. The  $\sigma_\eta^2$  of the spatial power combining efficiency at the target point.

	N = 5		N = 15		N = 25		N = 35	
	理论值	实验值	理论值	实验值	理论值	实验值	理论值	实验值
$\theta = \pi/2$	18.9	18.9	6.3	6.3	3.8	3.8	2.7	2.7
$\theta = 2\pi/5$	8.8	8.8	2.9	2.9	1.8	1.8	1.3	1.3
$\theta = 3\pi/20$	0.212	0.211	0.0701	0.700	0.042	0.042	0.030	0.030

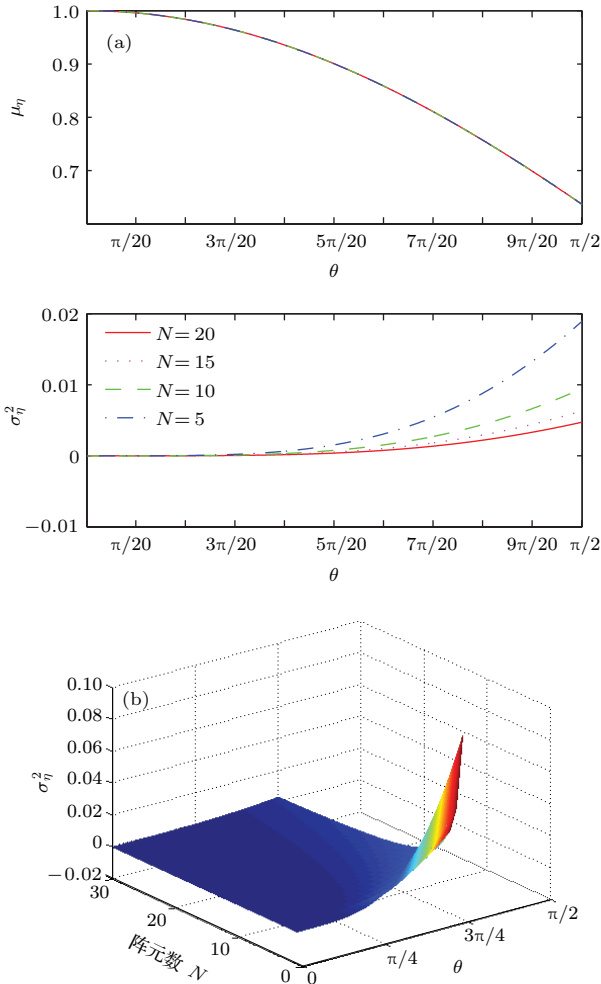


图2 均匀分布误差下目标点合成效率的统计特征变化  
(a)  $\mu_\eta$  与  $\sigma_\eta^2$  随  $\theta$  值的变化曲线; (b)  $\sigma_\eta^2$  随  $\theta$  值及  $N$  的变化曲线

Fig. 2. (a) the relations of  $\mu_\eta$  to  $\theta$  and  $\sigma_\eta^2$  to  $\theta$ ; (b) the relations of  $\sigma_\eta^2$  to  $\theta$  and  $N$ .

图2给出了当  $\Delta\phi_i$  服从  $(-\theta, \theta)$  内的均匀分布 ( $\theta$  为常量,  $\theta \in [0, \pi/2]$ ) 时, 目标点在该时刻的合成效率统计特征值的变化. 图2(a) 上半部分是节点数  $N$  取 5, 10, 15, 20 时, 当前时刻目标点合成效率均值随  $\theta$  值变化; 下半部分分别是节点数  $N$  取 5, 10, 15, 20 时, 当前时刻目标点合成效率方差随  $\theta$  值的变化. 可以看出, 此刻目标点合成效率的均值与阵元数  $N$  无关, 仅与相位误差的变化范围, 即

$\theta$  值有关. 当已知对目标点合成效率均值的要求时, 可相应得出对相位误差的控制要求, 以指导工程实践. 例如要求  $\mu_\eta \geq 0.9003$ , 则  $\theta$  值需满足  $0 \leq \theta \leq \pi/4$ .

而目标点合成效率的方差不仅与  $\theta$  值有关, 还与阵元数  $N$  有关: 当  $N$  一定时,  $\theta$  值越小, 目标点合成效率方差越小; 当  $\theta \in [0, 3\pi/20]$  时, 即使在五元阵情况下, 目标点合成效率的方差值也仅为  $0.212 \times 10^{-3}$ ; 当  $\theta$  值一定时, 方差随着阵元数增大而减小; 当阵元数达到 20 时, 即使  $\theta = \pi/2$ , 目标点合成效率的方差值也仅有  $4.7 \times 10^{-3}$ . 图2(b) 为目标点合成效率的方差随  $\theta$  值及  $N$  的变化关系. 为了验证 (13) 与 (14) 式, 我们基于 (12) 式进行了典型参数下的蒙特卡罗实验, 对 10000 次实验的结果进行了统计分析, 得到目标点合成效率均值与方差的实验值, 这些参数下目标点合成效率的方差理论值与实验值见表1. 实验结果验证了两式的正确性. 由以上分析可知, 在工程实践中, 除尽可能提高相控精度外, 还可以通过增加阵列的阵元数来减小目标点合成效率的方差, 降低相位误差的影响.

#### 4 信号功率合成的仿真计算

研究多源稀疏阵列空间交叉波束的功率合成, 感兴趣的评价指标除了目标点合成效率外, 还有信号叠加到超过一定阈值的有效功率点分布的情况. 但由于阵元多, 叠加情形复杂, 除目标点外, 所有节点信号完全同相的叠加点可能并不存在, 因此, 在信号传播某一时刻, 根据目标点  $T$  点及其邻近区域内任意  $H$  点的功率关系, 将满足  $P_H/P_T \geq \gamma_0$  的点视为有效功率点, 其中  $P_H$  为  $H$  点当前时刻合成功率,  $P_T$  按 (6) 式取最佳合成时的功率值.  $\gamma_0$  的取值根据实际需要确定, 将满足上述不等式的点标定出来构成多源交叉区域内的有效功率点. 本文基于 (7) 式及有效功率点概念, 通过实验仿真了某稀疏阵列下时间反演电磁波在二维空间的峰值功率时刻的功率合成效果.

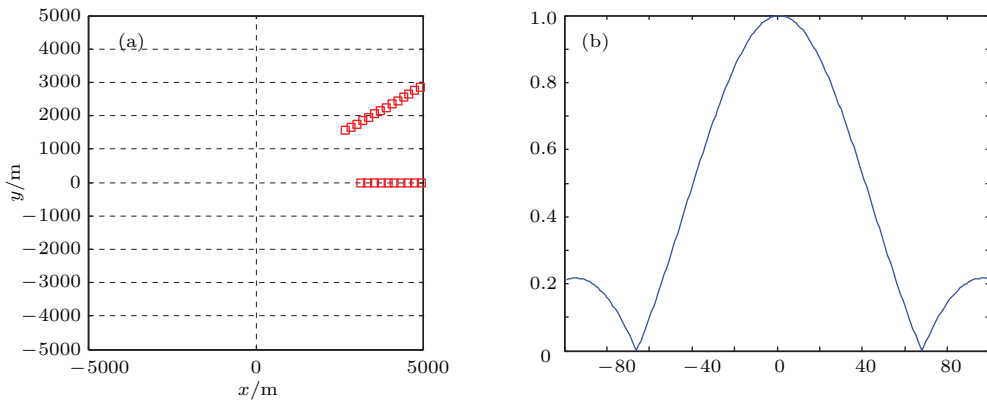


图3 (a) 阵元分布示意图; (b) 阵元天线方向性函数图

Fig. 3. (a) Sketch map of the array; (b) antenna directionality function.

仿真条件: 信号频率为1 GHz, 该阵列分布如图3(a), 阵元数为20; 各节点天线波束宽度为40°, 天线方向图如图3(b); 仿真栅格尺度为0.01 m; 功率合成分布的观察区域为以目标点(原点)为中心, 1000 m边长的正方形区域(X轴[-500 m, 500 m], Y轴[-500 m, 500 m]);  $\gamma_0 = 1/3$ .

各次实验观察区域内信号合成功率分布及有效功率点分布见图4. 图4(a)和图4(b)分别为该阵型在 $\Delta\phi_i = 0$ 时信号合成功率分布及有效功率点分布, 其中有效功率点分布图中低于有效功率阈值的点均进行了置零处理; 图4(c)和图4(d)分别为该阵型在 $\Delta\phi_i$ 服从 $(-3\pi/20, 3\pi/20)$ 内的均匀分布时信号合成功率分布及有效功率点分布; 图4(e)和图4(f)分别为该阵型在 $\Delta\phi_i$ 服从 $(-2\pi/5, 2\pi/5)$ 内的均匀分布时信号合成功率分布及有效功率点分布; 图4(g)和图4(h)分别为该阵型在 $\Delta\phi_i$ 服从 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内的均匀分布时信号合成功率分布及有效功率点分布.

由实验结果可知, 在该阵型中, 各阵元频率、极化及天线类型一致时, 经过时间反演的单频电磁波进行功率合成, 其相位误差不仅会影响目标点合成效率, 也会影响功率合成区域中有效功率点聚集.  $\theta$ 越小, 其有效功率点的功率越大, 有效功率点数越多, 有效功率点间平均间距越小;  $\theta$ 越大, 其有效功率点的功率越小, 有效功率点数越少, 有效功率点间平均间距越大. 但即使存在一定相位误差, 有效功率点仍能表现出一定的聚集特性. 因此在实践中, 可以根据实际需求和硬件条件折中权衡, 进行误差的合理控制. 该结论可以为高功率微波武器技术, 电子干扰等实际应用提供重要参考.

### 5 结 论

本文基于TR技术, 建立了多元稀疏阵列时间反演电磁波单频信号合成数学模型, 定义了合成效率函数概念, 并进行了典型时刻目标点合成效率值统计特征的误差分析. 分析表明, 当其他参数确定时, 如果相位误差 $\Delta\phi_i$ 服从 $(-\theta, \theta)$ 内的均匀分布( $\theta$ 为常量,  $\theta \in [0, \pi/2]$ ), 且 $\Delta\phi_i$ 相互间独立, 则该时刻目标点合成效率均值与阵元数无关, 仅与 $\theta$ 值有关,  $\theta$ 值越大, 目标点合成效率均值越小; 而方差与阵元数 $N$ 及 $\theta$ 值均有关, 当 $N$ 一定时,  $\theta$ 值越大, 方差越大; 当 $\theta$ 值一定时,  $N$ 越大, 方差越小; 当阵元数达到20时, 即使在 $\theta = \pi/2$ 的情况下, 目标点合成效率的方差值也仅有 $4.7 \times 10^{-3}$ . 因此在工程应用中, 可以考虑采用大量小功率节点进行合成, 既可以降低相位误差对目标点合成效率的影响, 又有利于分散布阵. 本文还进行了在一定相位误差下, 某稀疏阵列的功率合成效应特征的仿真试验分析, 结果表明, 各阵元频率、极化及天线类型一致时, 该阵型经过时间反演的单频电磁波在一定区域内功率合成时,  $\theta$ 值也会影响功率合成区域中有效功率点聚集程度.  $\theta$ 值越小, 其有效功率点的合成功率越大, 分布越集中;  $\theta$ 值越大, 其有效功率点的合成功率越小, 分布越分散. 但实验结果也表明, 即使存在一定的相位误差, 有效功率点仍能表现出一定的聚集特性. 基于时间反演电磁波的稀疏阵列功率合成效果还与信号频率、信号形式、阵列阵型等复杂影响因素有关, 有待继续研究. 以上方法及结论可为进一步研究基于TR技术的多点源稀疏阵列空间功率合成打下基础, 进而为研究稀疏阵列相干信号功率合成在高功率微波武器等技术中的应用以及工程实践提供理论依据.

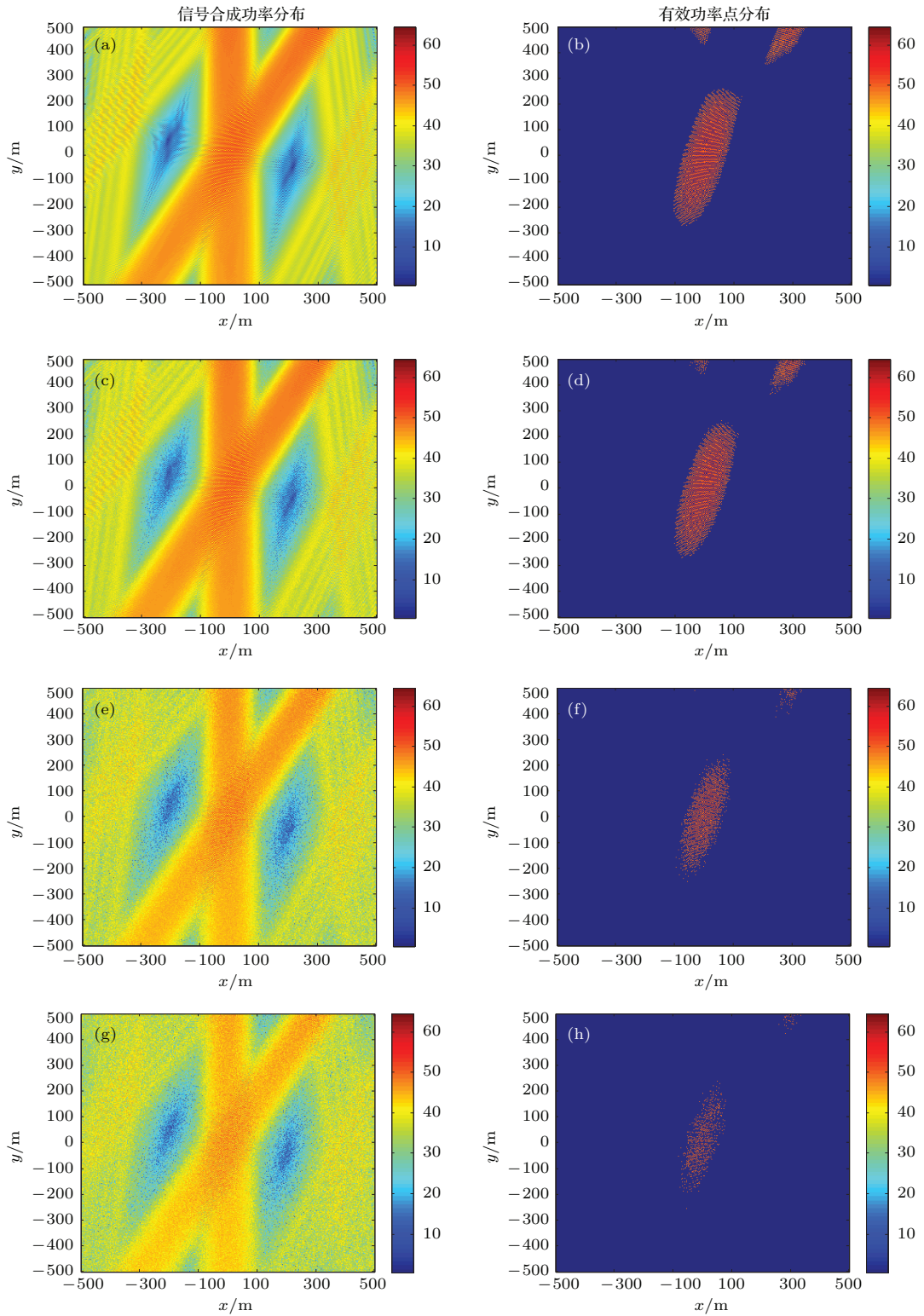


图4 目标点邻域功率合成效果图 (a)  $\theta = 0$ , 信号合成功率分布图; (b)  $\theta = 0$ , 有效功率点分布图; (c)  $\theta = 3\pi/20$ , 信号合成功率分布图; (d)  $\theta = 3\pi/20$ , 有效功率点分布图; (e)  $\theta = 2\pi/5$ , 信号合成功率分布图; (f)  $\theta = 2\pi/5$ , 有效功率点分布图; (g)  $\theta = \pi/2$ , 信号合成功率分布图; (h)  $\theta = \pi/2$ , 有效功率点分布图

Fig. 4. Power combining effect in the target point's neighborhood: (a) Image of power distribution in  $\theta = 0$ ; (b) image of effective points distribution in  $\theta = 0$ ; (c) image of power distribution in  $\theta = 3\pi/20$ ; (d) image of effective points distribution in  $\theta = 3\pi/20$ ; (e) image of power distribution in  $\theta = 2\pi/5$ ; (f) image of effective points distribution in  $\theta = 2\pi/5$ ; (g) image of power distribution in  $\theta = \pi/2$ ; (h) image of effective points distribution in  $\theta = \pi/2$ .

参考文献

- [1] Fink M, Prada C, Wu F 1989 *IEEE Ultrasonics Symposium* **1** 681
- [2] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 186
- [3] Carminati R, Pierrat R, Rosny J 2007 *Opt. Lett.* **32** 3107
- [4] Wang B Z, Zang R, Zhou H C 2013 *J. Microwaves* **29** 25 (in Chinese) [王秉中, 臧锐, 周洪澄 2013 微波学报 **29** 25]
- [5] Song Y, Guo N, Qiu R C 2011 *IEEE Antenn. Wirel. Pr. Lett.* **10** 796
- [6] Song Y, Guo N, Qiu R C 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 3933
- [7] Naqvi H, Zein G E, Lerosey G 2010 *IET Microwave Antennas Propag.* **4** 643
- [8] Dubois T, Crussire M, Hlard M 2010 *Proc. 4th Int. Conf. Signal Processing and Communication Systems* **1** 1
- [9] 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]
- [10] Ding S, Wang B Z, Ge G D, Wang D, Zhao D S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064101 (in Chinese) [丁帅, 王秉中, 葛广顶, 王多, 赵德双 2012 物理学报 **61** 064101]
- [11] Wang B Z, Liang M S, Ji Q S, Gang B, Zhang Z M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 048403
- [12] Chen Y M, Wang B Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 026401
- [13] Tu H L, Xiao S Q, Yang Z J, Wang B Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084102 (in Chinese) [屠惠琳, 肖绍球, 杨智杰, 王秉中 2014 物理学报 **63** 084102]
- [14] Zhang J Y 2006 *M. S. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [张嘉焱 2006 硕士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [15] Lu T 2009 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [路通 2009 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]

# Single frequency spatial power combining using sparse array based on time reversal of electromagnetic wave

Chen Qiu-Ju<sup>†</sup> Jiang Qiu-Xi Zeng Fang-Ling Song Chang-Bao

(Key Laboratory of Information Processing, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

( Received 28 April 2015; revised manuscript received 23 May 2015 )

## Abstract

Based on time-reversal (TR) technique, the model of single frequency spatial power combining using sparse array is established. The efficiency function of spatial power combining is defined. The expression for the relationship of the statistical characteristics of combining efficiency at the time of maximum amplitude with the phase error and the number of array elements is derived. The analysis shows that when other parameters are determined, if the phase errors of the array nodes are mutually independent, and obey the uniform distribution to a certain extent, the combining efficiency's mean would not be related to the number of array elements  $N$ , but related to the statistic parameter of phase error. The combining efficiency's variance is related to not only the statistic parameter of phase errors, but also  $N$ . Once the statistic parameter of phase error is fixed, the greater the value of  $N$ , the smaller the variance is. So, in the engineering application, a large number of small power nodes could be used to reduce the phase error's effect. In addition, the influence of phase error on the combining efficiency is investigated by both theoretical analysis and the numerical simulation. The results show that when the array elements work at the same frequency, polarization and antenna type, the parameter of phase error would affect the combining result. The smaller the parameter of phase error, the larger the power of the effective point is, and the more concentrative the effective points' distribution is; the greater the parameter of phase error, the smaller the power of the effective point is, and the more dispersed the effective points' distribution is. It is also seen that even though the phase error occurs, the spatial power combining can still be realized with the time reversal technique. The determination of the phase control precision is the compromise between the requirements and the possibility. The results presented in this paper are useful for developing the microwave weapons with high power and electronic warfare.

**Keywords:** time reversal technique, single-frequency signal, sparse array, spatial power combining

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.40.Ba

**DOI:** 10.7498/aps.64.204101

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: 11107769@qq.com