

超稀疏阵列下基于波形分集的区域能量聚焦技术研究

宋 聃^{*①} 王 伟^① 熊子源^② 徐振海^②

^①(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(国防科学技术大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室 长沙 410073)

摘要: 区域能量聚焦技术是能量精确投送中的关键技术。该文以精确电子战为典型应用背景,提出一种在超稀疏阵列下实现区域能量聚焦的方法。首先对超稀疏阵列下的区域能量聚焦问题建模并转化成半定规划(SDP)问题;然后通过优化求解发射信号的自相关矩阵使整个聚焦区域内的能量最大化,同时最小化聚焦区域以外的能量;最后提出4个评估指标以评估能量聚焦效果。仿真实验表明,该方法在典型布阵下的能量聚焦效果优于现有方法,具有较强的实用性和可行性。

关键词: 区域能量聚焦; 半定规划; 波形分集; 相干合成

中图分类号: TN972

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1082-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01016

Waveform Diversity Based Regional Energy Focusing Under Ultra-sparse Array

Song Dan^① Wang Wei^① Xiong Zi-yuan^② Xu Zhen-hai^②

^①(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics & Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Regional energy focusing is a crucial technology for precision energy delivery. This paper mainly focuses on one of its typical applications: Precision Electronic Warfare (PREW), and a new regional energy focusing method under ultra-sparse array is presented. By modeling regional energy focusing under ultra-sparse array as a Semi-Definite Program (SDP), an optimization can be made for self-correlation matrix of the transmitted waveforms to provide a focal spot matched with the entire target region, meanwhile, to minimize the energy level on the surrounding interesting region. Finally, four assessment indicators are proposed to evaluate energy focusing effect. The numerical results indicate that the proposed method, with more practicability, can provide a better energy focusing performance than the existed methods under typical arrays.

Key words: Regional energy focusing; Semi-Definite Program (SDP); Waveform diversity; Coherent combining

1 引言

目前,“粗放式”电子攻击因其原理简单,易于实现,仍然作为电子战中主要的电子攻击手段,但其同时存在能量利用率低,易被敌方侦察设备截获,易对己方、友方电子设备造成误伤等一系列严重问题。为解决上述问题,美国国防高级研究计划局(DARPA)战略技术办公室(STO)在2009年首先提出了精确电子战的概念^[1]。目前,各国对精确电子战的研究尚处于起步阶段,国内外已有文献大都只是对精确电子战的概念及战略地位进行了分析,但都

未涉及到具体的技术问题^[2]。

精确电子战的基本思想是通过一个自组织稀疏阵列,利用相干原理使每一个阵元所发射的干扰信号能量集中在一个很小的目标区域内,对指定目标形成“外科手术式”的精确性干扰,同时不影响目标区域以外设备的正常工作。因此如何使干扰能量在整个目标区域上聚焦,并将目标区域以外的干扰能量控制在一个相对较低的水平是精确电子战的核心问题。本质上即区域能量聚焦技术。

区域能量聚焦技术最先应用于生物学中的超声波热疗领域^[3,4],超声波热疗需要利用超声波加热恶性肿瘤区域至43℃以上30~60 min,同时将周围健康组织区域维持在一个较低的温度上以免造成误

伤。针对该问题，传统方法是通过精确控制节点间的相位(基于相位控制方法)，使得发射能量在焦点处汇聚。但是由于需要保证超声波对人体组织有足够的穿透能力，通常所采用的载波波长较短，导致传统方法所形成的焦点较小且栅瓣现象严重，因此不足以覆盖整个目标区域。为此文献[5]提出了一种基于自适应相控阵的方法以扩大焦点面积，使其与目标区域大小相适应；文献[6,7]则通过不同的策略动态改变焦点位置，通过分时积累的方式以实现对整个目标区域的能量增强。近年来，随着波形分集技术的提出及发展，为发射波形的设计提供了更多的自由度。基于此，相关研究者提出了一种基于波形分集的方向图设计技术^[8]，该方法通过设计发射信号的自相关矩阵来获得实际需要的方向图，文献[9-13]针对不同的优化目标对该方法进行了改进，文献[14]则首次将波形分集技术应用于超声波热疗中。

针对超稀疏阵列下栅瓣效应颇为严重的特点，本文以文献[14]所述方法为基础，提出了一种在超稀疏阵列下实现区域能量聚焦的方法。文中首先对超稀疏阵列下的区域能量聚焦问题进行建模，之后将其转化为一个半定规划问题，通过合理设置半定规划问题的约束条件，可以保证在任意布阵方式下对整个目标区域进行有效地干扰，同时使对目标区域以外造成的影响最小。之后仿真对比了在端射和斜射两种情况下，本文的方法与传统基于相位控制方法在典型布阵方式及不同布阵参数下的聚焦性能。

2 区域能量聚焦模型

区域能量聚焦原理图如图1所示， M 个发射节点分别位于 $\mathbf{r}_m(m=1,2,\dots,M)$ ， $x_m(n)$ 表示第 m 个节点基带发射信号的离散采样值。若基带信号是缓变的，则位置 \mathbf{r} 处的基带合成信号可以表示为

$$\mathbf{y}(\mathbf{r}, n) = \sum_{m=1}^M \frac{g_m(\mathbf{r})}{\|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}\|} e^{j2\pi f_0 \tau_m(\mathbf{r})} x_m(n) \quad (1)$$

其中 $g_m(\mathbf{r})$ 为第 m 个发射节点在 $\mathbf{r} - \mathbf{r}_m$ 方向上的天线增益， f_0 为载波频率， $\tau_m(\mathbf{r}) = \|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}\|/c$ 为传播延时。 $1/\|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}\|$ 为电磁波的传播损耗。则 \mathbf{r} 处的能量聚焦效果可以通过该点接收信号的平均功率来描述，即

$$P(\mathbf{r}) = E\{y(\mathbf{r}, n)y^*(\mathbf{r}, n)\}, \quad \mathbf{r} \in \Omega \quad (2)$$

其中 $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ 为空间中的目标区域，区域能量聚焦技术即利用空间中超稀疏分布的发射节点通过信号相干叠加的方式使得发射能量在整个 Ω_1 区域内聚焦，同时尽量抑制 Ω_2 区域上的能量分布，通常称 Ω_1 为聚焦区， Ω_2 为保护区。

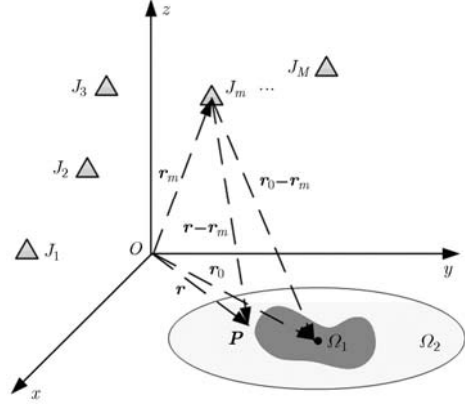


图1 区域能量聚焦原理图

3 基于波形分集的区域能量聚焦原理

定义信号矢量为 $\mathbf{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]^T$ ，并定义

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}) = \left[\frac{g_1(\mathbf{r})e^{j2\pi f_0 \tau_1(\mathbf{r})}}{\|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}\|} \quad \frac{g_2(\mathbf{r})e^{j2\pi f_0 \tau_2(\mathbf{r})}}{\|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}\|} \quad \dots \quad \frac{g_M(\mathbf{r})e^{j2\pi f_0 \tau_M(\mathbf{r})}}{\|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}\|} \right]^T \quad (3)$$

为 \mathbf{r} 处的广义导向矢量，式(1)可表示为

$$\mathbf{y}(\mathbf{r}, n) = \mathbf{a}^H(\mathbf{r})\mathbf{x}(n) \quad (4)$$

则由式(2)，空间位置 \mathbf{r} 处的合成功率率为

$$\begin{aligned} P(\mathbf{r}) &= E\{\mathbf{y}(\mathbf{r}, n)\mathbf{y}^H(\mathbf{r}, n)\} \\ &= \mathbf{a}^H(\mathbf{r})E\{\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\}\mathbf{a}(\mathbf{r}) = \mathbf{a}^H(\mathbf{r})\mathbf{R}\mathbf{a}(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 \mathbf{R} 为发射信号的自相关矩阵。式(5)说明空间中各点上的能量聚焦度是发射信号自相关矩阵的函数。波形分集方法原理即通过设计合适的发射信号自相关矩阵 \mathbf{R} ，以实现发射能量在特定区域上聚焦的目的。

相比于超声波热疗中的能量聚焦问题^[14]，精确电子战中的发射节点属于分布式阵列，阵元间距远大于发射波长，是超稀疏阵列，导致该环境下的栅瓣效应十分严重。其合成能量分布变化相较于其它场合更加剧烈，若同样只考虑对单点处能量分布加以限定，则会使所有感兴趣区域内的合成能量均匀分布，失去优化意义。因此在波形设计前，根据战场中接收设备的尺寸大小设置合适的聚焦分辨率，将目标区域划分为连续的聚焦单元，利用单元内的总能量来表征该单元上的能量聚焦情况，并以此对能量聚焦效果进行优化。

则以 \mathbf{r} 点为中心的聚焦单元内的总能量可表示为

$$\hat{P}(\mathbf{r}) = \int_{\mu \in \Delta(\mathbf{r})} \mathbf{a}^H(\mu)\mathbf{R}\mathbf{a}(\mu)d\mu \quad (6)$$

其中 $\Delta\Omega(\mathbf{r})$ 即以 \mathbf{r} 点为中心的聚焦单元区域。根据区域能量聚焦的要求, 则可将该问题转化成如下的优化问题:

$$\min_{t, \mathbf{R}} -t \quad (7a)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\hat{P}(\mathbf{r}_2)}{\hat{P}(\mathbf{r}_0)} \geq t, \quad \forall \mathbf{r}_2 \in \Omega_2 \quad (7b)$$

$$\hat{P}(\mathbf{r}_1) \geq 0.5 \hat{P}(\mathbf{r}_0), \quad \forall \mathbf{r}_1 \in \Omega_1 \quad (7c)$$

$$\hat{P}(\mathbf{r}_1) \leq \hat{P}(\mathbf{r}_0), \quad \forall \mathbf{r}_1 \in \Omega \quad (7d)$$

$$\mathbf{R} \geq 0 \quad (7e)$$

$$\mathbf{R}_{mm} = P_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7f)$$

其中 \mathbf{r}_0 为聚焦区域中心, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 则分别为 Ω_1 与 Ω_2 内的聚焦单元对应的中心位置。通常可以为聚焦单元总能量在中心聚焦单元总能量的 -3 dB 范围内即达到在该单元内的有效聚焦, 则式(7c)和式(7d)保证 Ω_1 内各聚焦单元均达到有效聚焦的同时使中心聚焦单元内总能量最高; 目标函数和式(7b)则可以控制 Ω_2 上各聚焦单元上的聚焦度尽可能小。式(7e)为自相关矩阵的半正定约束。式(7f)为使聚焦区内能量最大化, 各发射节点应该保持在额定功率上工作。

由于式(7b)是一个非凸约束式, 使得上述优化问题不是一个凸优化问题。对此, 首先将积分形式利用离散求和形式近似后, 可以参考文献[9]中的方法将式(7b)转化为两个凸约束式, 再利用 yalmip 等凸优化工具箱求解得到最优的自相关矩阵 \mathbf{R} 。最后只需生成以 \mathbf{R} 为自相关矩阵的一组信号即可, 其中一种可行的方法是采取 cholesky 分解的形式:

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{L}^H \mathbf{w}(n) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{R} = \mathbf{L}^H \mathbf{L}$, $\mathbf{w}(n)$ 为高斯白噪声矢量。通过将 $\mathbf{x}(n)$ 中的各个分量加载到每个发射节点上即可在空间中实现区域能量聚焦。

4 仿真实验

4.1 精确电子战仿真模型

根据精确电子战报告^[1]中的相关描述设置典型仿真模型: 布阵方式采用均匀圆阵, 设定聚焦区和保护区均为环形区域, 空间几何关系示意图如图 2 所示, 聚焦区与保护区均位于 $x-y$ 平面上, 其中 r_1 为聚焦区半径, r_2 为保护区外径, D 为阵列孔径, $\tilde{\mathbf{r}}$ 为聚焦区中心到阵面中心在 $x-y$ 平面上的投影的距离矢量, θ 为斜射角。由于合成能量一般随偏离聚焦区域中心距离的变化速率与阵面中心到焦点中心的距离间成正比关系, 为了消除垂直距离对聚焦效果评估的影响, 可设定: 垂直距离与聚焦区半径之比为 $d/r_1 = 100$, 保护区外径与聚焦区半径比为 $r_2/r_1 = 20$ 。不失一般性, 在仿真中固定载波频率

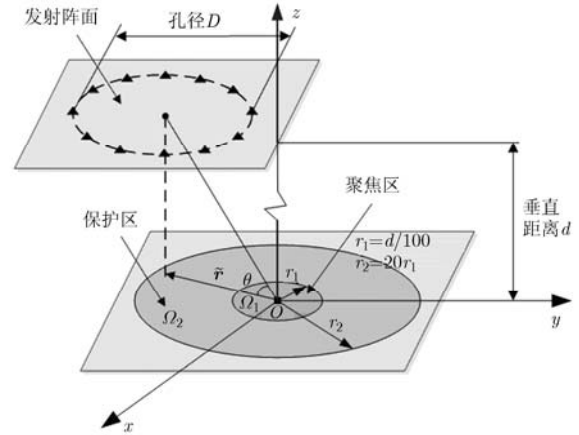


图 2 空间几何关系示意图

$f_0 = 1$ GHz, 阵元数 $M = 12$, 垂直距离 $d = 2.5$ km, 此时 r_1, r_2 的典型取值分别为 25 m, 500 m, 聚焦单元取 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的矩形单元, 各干扰节点均采用波束宽度为 10° 的 sinc 型方向图。

4.2 能量聚焦效果评估

精确电子战的目标是极大化聚焦区内的有效干扰覆盖范围, 同时极小化保护区的误干扰覆盖范围, 即极大化有效干扰率与极小化误干扰率。与通常意义上的有效干扰是使接收机前端达到饱和状态所不同的是, 此处的有效干扰是使服务质量(QoS)下降, 即使接收机输出信噪比降低。反映在能量聚焦上, 若假设干扰信号能够完全进入接收机, 则可认为当聚焦单元内的总能量高于一定门限则对该单元产生了有效干扰。定义聚焦单元内的总能量与聚焦区中心的能量之比为归一化能量 $\bar{P}(\mathbf{r})$, 即

$$\bar{P}(\mathbf{r}) = \hat{P}(\mathbf{r}) / \hat{P}(\mathbf{r}_0) \quad (9)$$

其中 $\hat{P}(\mathbf{r}_0)$ 为聚焦区中心所在聚焦单元内的总能量。基于归一化能量, 则可分别定义以下 4 个指标反映能量聚焦性能, 定义如下:

(1)有效干扰率: 在聚焦区内, 归一化能量超过 -3 dB 的面积与聚焦区面积之比;

(2)误干扰率: 在保护区内, 归一化能量超过 -5 dB 的面积与保护区面积之比;

(3)3 dB 能量聚焦半径比: 从聚焦中心出发, 在 x 轴向上归一化能量第 1 次减少到 -3 dB 的聚焦单元的中心位置距聚焦区中心的距离与聚焦区半径之比;

(4)最大误干扰能量: 保护区内所有聚焦单元中的最大总能量。

4.3 仿真结果

以图 2 所示仿真环境为基准, 分别在正面端射和斜射下, 对基于波形分集方法和传统基于相位控制方法在采用不同布阵参数时的能量聚焦效果进行仿真评估比较。

基于相位控制的能量聚焦方法实质上是通过针对不同节点进行相位补偿，以使得聚焦区域中心 \mathbf{r}_0 处达到同相叠加的目的，因此各个节点的权矢量为

$$\mathbf{w} = [e^{j2\pi f_0 \tau_1(\mathbf{r}_0)}, e^{j2\pi f_0 \tau_2(\mathbf{r}_0)}, \dots, e^{j2\pi f_0 \tau_M(\mathbf{r}_0)}]^\text{T} \quad (10)$$

相应地，位置 \mathbf{r} 处的合成能量可以表示为

$$P(\mathbf{r}) = |\mathbf{a}^\text{H}(\mathbf{r})\mathbf{w}|^2 \quad (11)$$

4.3.1 正面端射情况 设定 $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{0}$ ，即发射阵面位于聚焦区的正上方，图 3(a), 3(b)分别为当 $D/\lambda = 20$ dB，其余阵列参数均采用 4.1 节提及的典型配置时两种方法的能量聚焦效果图。从图 3 中可以看出，此时基于相位控制方法的实际能量聚焦区域远小于聚焦区范围，而基于波形分集方法则可以实现对聚焦区的全覆盖，但同时也会使保护区内部分区域的能量增强。

图 4 给出了在正面端射情况下，两种方法的性能评估指标随孔径电尺寸 D/λ 的变化曲线。可以看出，基于相位控制方法所形成的焦点面积随着 D/λ 的增大而一直减小，因此当 3 dB 能量聚焦半径比大于 1 时，其误干扰率随着 D/λ 的增大得到改善；但是当 3 dB 能量聚焦半径比小于 1 时，其有效干扰率随着 D/λ 的增大而恶化。因此传统的基于相位控制方法只有在 D/λ 处于一定范围内，才能实现对聚焦区的有效干扰；而基于波形分集方法由于受到式 (7c)，式(7d)约束条件的限制，所形成的焦点始终大于聚焦区，这可以从图 4(c)中基于波形分集的 3 dB 能量聚焦半径比始终大于 1 得出。因此，基于波形分集方法可以在任意孔径电尺寸下保证对聚焦区的有效干扰。此外，在使基于相位控制方法的 3 dB 能量聚焦半径比大于 1 的孔径电尺寸下，两种方法的能量聚焦效果完全相同，说明在此条件下，基于相位控制方法发射自相关矩阵正是式(7)优化问题的最优解；但若继续增大 D/λ ，该自相关矩阵不再满足约束条件，此时基于波形分集方法需要以牺牲误

干扰率为代价来扩大所形成的焦点面积，以保证对聚焦区的全覆盖。因此，基于相位控制方法实际上是基于波形分集方法在满足约束条件下的特例。同时还可以看出，基于相位控制方法与基于波形优化方法均存在相同的最优孔径电尺寸配置，即使基于相位控制方法的 3 dB 能量聚焦半径比等于 1 的孔径电尺寸，且二者的最优聚焦性能相同。

4.3.2 斜射情况 对于发射阵面中心非正对聚焦区中心的情况，假设此时 $\tilde{\mathbf{r}} = (\Delta d, \Delta d)^\text{T}$ ，图 5 为 $D/\lambda = 20$ dB 时，两种方法的评估指标随 Δd 的变化曲线。可以看出，当 $\Delta d \ll d$ 时，二者的性能指标对 Δd 的变化均不敏感；而当 $\Delta d/d > 0$ dB 时，继续增大 Δd ，二者的误干扰率迅速增加，且基于相位控制方法的有效干扰率逐步上升至 100%。说明两种方法所形成的焦点面积随着 Δd 的增加而增大，这是由于随着 Δd 的增加，阵面到聚集区中心的距离增加，而焦点面积与该距离间成正比关系；同时，当阵面逐渐偏离正对位置时所形成的聚焦区域会在阵面中心和聚焦区中心连线方向上拉伸，且拉伸幅度与斜射角 θ 成反比。

通过以上原理分析及实验结果，可得出以下几点结论：

(1)图 4 表明，布置干扰节点时存在“最佳”稀疏度，此时可实现聚焦区的全覆盖，保护区误干扰最小；同时可以看出“最佳”稀疏度即为相位控制法的“临界失效”点。

(2)图 5 可以看出，当斜射角 $\theta > 35^\circ$ (即 $\Delta d/d < 0$ dB)时，两种方法的聚焦效果基本与正面端射时的聚焦效果相同，而该条件在大部分实际作战环境中是可以满足的。

(3)波形分集方法本质上是通过对发射自相关矩阵的设计来动态改变发射能量在目标区域上的分布，并以时间积累的方式达到聚焦区内平均能量增

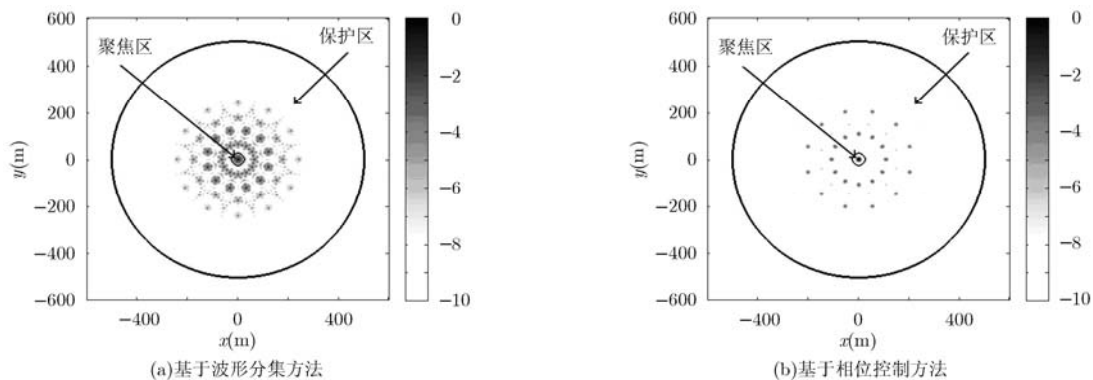


图 3 均匀圆阵下能量聚焦效果图

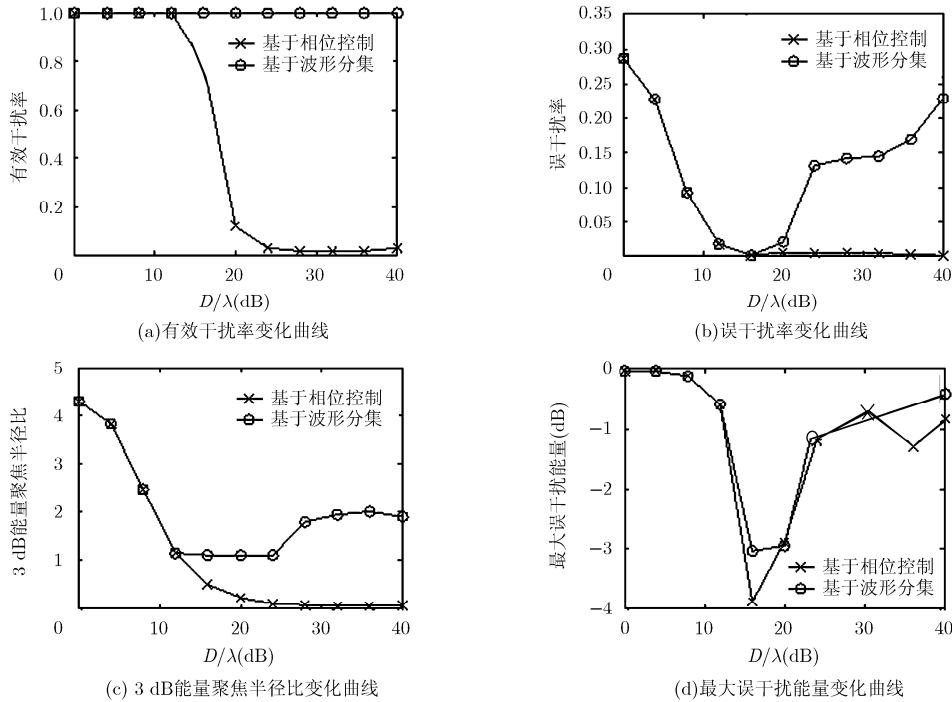


图 4 均匀圆阵下两种方法的评估指标随 D/λ 的变化曲线

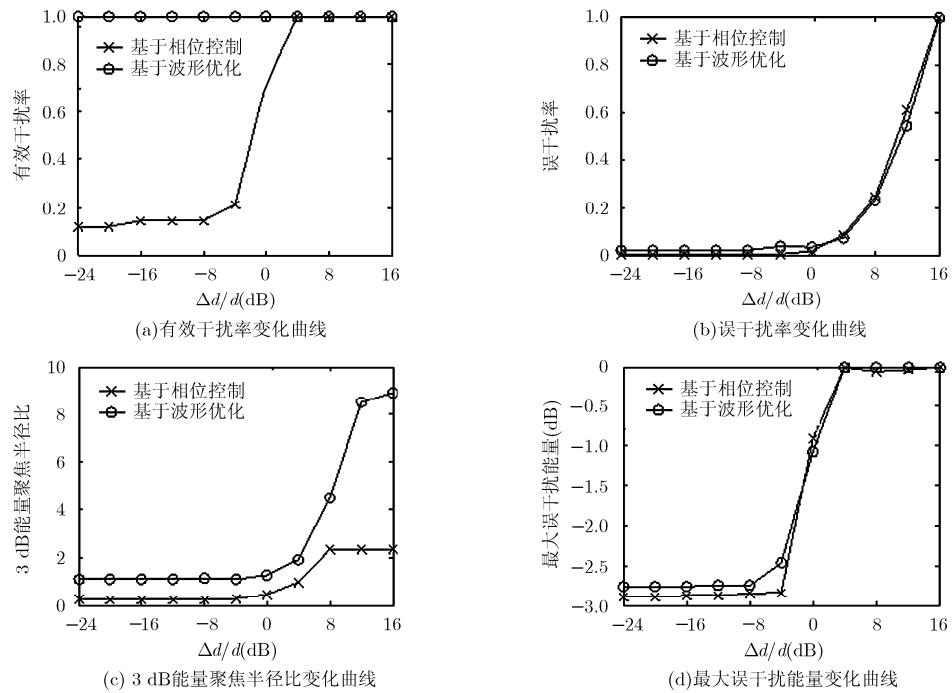


图 5 均匀圆阵下两种方法的评估指标随 $\Delta d/d$ 的变化曲线

强,保护区内平均能量减小的目的。从这点上来说,传统的相位控制法(含动态扫描)实际上是波形分集法在某种发射自相关矩阵情况下的特例,所以波形分集法的性能不会差于相位控制法。

5 结论

本文以精确电子战为应用背景研究了超稀疏阵

列下的区域能量聚焦问题,提出了一种基于波形分集的区域能量聚焦方法。该方法通过设计发射信号自相关矩阵,实现发射能量在整个聚焦区上聚焦的同时,尽量减小保护区上的能量分布。该结果在本质上是动态改变焦点位置,在时域上进行积累的方式实现的,因此传统的基于相位控制的方法是该方法的一种特例。结合仿真结果表明,波形分集

方法的聚焦性能在各种典型布阵下的聚焦性能都要优于传统方法。同时在仿真中给出了该方法的能量聚焦效果随各主要布阵参数的变化情况, 可以为之后的阵型优化设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Announcement B A. Precision Electronic Warfare (PREW), DARPA-BAA 09-65[R]. Strategic Technology Office (STO) of the US Defense Advanced Research Projects Agency, 2009.
- [2] 蒋盘林. 精准电子战技术发展初探[J]. 通信对抗, 2010, 112(4): 3-6.
Jiang Pan-lin. Study of development of precision EW technologies[J]. *Communication Countermeasures*, 2010, 112(4): 3-6.
- [3] Diederich C J and Hynynen K. Ultrasound technology for hyperthermia[J]. *Ultrasound Medicine and Biology*, 1999, 25(8): 871-887.
- [4] Bakker J F, Paulides M M, *et al.* An ultrasound cylindrical phased array for deep heating in the breast: theoretical design using heterogeneous models[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, 54(10): 3201-3215.
- [5] Fenn A J, Sathiaselan V, King G A, *et al.* Improved localization of energy deposition in adaptive phased-array hyperthermia treatment of cancer[J]. *Lincoln Laboratory*, 1996, 9(2): 187-195.
- [6] Ho C, Ju K, Cheng T, *et al.* Thermal therapy for breast tumors by using a cylindrical ultrasound phased array with multifocus pattern scanning: a preliminary numerical study[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, 52(15): 4585-4599.
- [7] Malinen M, Huttunen T, Kaipio J, *et al.* Scanning path optimization for ultrasound surgery[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2005, 50(15): 3473-3490.
- [8] Stoica P, Li J, and Xie Y. On probing signal design for MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(8): 4151-4161.
- [9] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 最小化旁瓣的 MIMO 雷达发射方向图优化算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2954-2958.
Yang Xiao-chao, Liu Hong-wei, Wang Yong, *et al.* Minimum sidelobe transmit pattern optimization algorithm for MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2954-2958.
- [10] 汤永浩, 马晓峰, 盛卫星, 等. 集中式 MIMO 雷达部分相关波形设计与处理[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(6): 1471-1476.
Tang Yong-hao, Ma Xiao-feng, Sheng Wei-xing, *et al.* Partially correlation waveforms design and processing for co-located MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1471-1476.
- [11] Gong Peng-cheng, Shao Zhen-hai, Tu Guang-peng, *et al.* Transmit beampattern design based on convex optimization for MIMO radar systems[J]. *Signal Processing*, 2014, 94: 195-201.
- [12] Hua Guang and Abeysekera S S. MIMO radar transmit beampattern design with ripple and transition band control[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(11): 2963-2974.
- [13] Oliveri G, Caramanica F, Migliore M D, *et al.* Synthesis of nonuniform MIMO arrays through combinatorial sets[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11(4): 728-731.
- [14] Guo Bin and Li Jian. Waveform diversity based ultrasound system for hyperthermia treatment of breast cancer[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2008, 55(2): 822-826.
- 宋 聘: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理、综合电子战信息战技术。
- 王 伟: 男, 1970 年生, 教授, 主要研究方向为电子信息系统仿真与评估技术。
- 熊子源: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、空时自适应处理。