

均匀线阵目标到达角估计的压缩感知方法研究

黄麟舒, 察豪, 叶慧娟, 徐慨

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了缓解表面波雷达在天线阵列小型化后角度分辨率低的问题, 采用压缩感知理论, 提出一种小型天线阵列表面波雷达目标到达角估计的方法。将到达角估计问题转化为稀疏信号表示的重建问题。建立了稀疏信号模型, 分析了应用条件, 将角度和速度空间离散化以构造字典, 设计了基于实时海态信息的测量矩阵, 设计匹配算法完成信号重构。仿真结果表明, 若满足准确重建条件, 即使在小型天线阵列的情况下, 也能以计算资源为代价改善方位分辨率。

关键词: 表面波雷达; 均匀线阵; 到达角; 压缩感知

中图分类号: TN011

文献标识码: A

Analysis on the DOA estimation of uniform circular arrays based on compressive sensing

HUANG Lin-shu, CHA Hao, YE Hui-juan, XU Kai

(Electronic Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to alleviate the serious problem of the low angle resolution after miniaturizing the antenna array of the surface wave radar, the compressed sensing method is proposed for radar antenna array angle estimation method. The sparse signals model is established, the application conditions are analyzed, and the measurement matrix is designed based on the real-time sea state information. By using the matching algorithm, the signal reconstruction is carried on. Simulation results show that if it satisfies the reconstruction condition, the azimuth resolution is improved by the method in the cost of the calculating resources.

Key words: surface wave radar; uniform circular arrays; DOA; compressive sensing

1 引言

对于高频表面波雷达的船只检测而言, 海杂波是主要背景, 而合理开发海岸资源要求天线阵列趋于小型化、发射功率低, 这些需求使解决海面航船检测问题面临着很多技术上的难题。其中如何提高角分辨率是该领域国内外的热点问题。

天线阵小型化后阵元有限, 采样样本数减少。由于大部分传统算法在低信噪比(SNR)和天线阵元较少的情况下, 雷达将很难分辨空间相距较近的信号, 即在强干扰或噪声情况下的稳定性受到极大

影响。这种分辨率损失对高相关信号尤为严重。而且当表面波雷达探测大面积海域的少量小目标时, 数据处理需耗费大量资源。在相干信号的极限情况下, MUSIC等算法甚至不再适用^[1]。压缩感知(CS, compressive sensing)理论为雷达大场景中弱目标检测的方位估计提供了新思路^[2-14]。文献[6-10]深入研究了CS理论应用于MIMO(multi-input-multi-output)雷达中的课题, 讨论了CS相比其他DOA估计方法的优劣, 实现了2种测量矩阵的设计, 对提高信噪比有一定的改善。文献[11]提出了通过随机稀疏分布阵元实现分布式MIMO雷达系统, 利用

收稿日期: 2013-11-20; 修回日期: 2014-03-21

基金项目: 江苏省科技成果转化基金资助项目(BA2011014); 湖北省自然科学基金资助项目(2012FFB06903)

Foundation Items: The Science and Technology Achievements Transformation Project of Jiangsu Province (BA2011014); The Natural Science Foundation of Hubei Province (2012FFB06903)

目标在距离—多普勒—角度空间的稀疏性, 基于少量观测数据得到目标距离—多普勒—角度信息的联合参数估计, 采用 CS 研究了信源的 DOA 估计。尽管该文是集中在通信系统的研究, 但称所提方法可直接应用于雷达。德国高频物理和雷达技术研究所的 Joachim 等较系统地讨论了 CS 在雷达系统中的脉冲压缩、雷达成像、波达角估计 (DOA, direction of arrival) 等方面的应用, 并讨论了含有随机分布阵元的圆形面阵天线 DOA 估计性能^[12]。文献[13]研究了利用稀疏信息的正则化进行雷达成像。

借鉴前述研究成果, 根据表面波超视距雷达的实际需求, 即天线阵列小型化, 数据量不大, 但要求满足一定的分辨率, 本文提出将压缩感知理论引入到表面波超视距雷达大场景弱目标的探测问题中, 基于压缩感知进行方位角估计, 将小目标检测问题转化为稀疏信号的重建问题。首先建立稀疏信号的模型, 接着离散角度—速度二维空间, 构建字典, 基于海浪的先验知识研究测量矩阵, 然后应用算法进行求解, 并给出仿真结果及分析。

2 理论基础

任何信号可由它在时间上均匀间隔的采样值重建。而接收端从接收信号中采样、处理、提取信息就是一个重建的过程。压缩感知的关键环节之一是重建, 即如何从仅有的低维数据 (样本) 中最大程度地恢复出原始的高维数据 (发射信号)。

2.1 稀疏信号模型

图 1 为电波入射 M 元均匀线性阵列的示意图, 以阵列的某端点阵元为原点, 假定第一排阵元分布于 x 轴上, 第一列阵元分布于 y 轴上。沿 x 轴阵元间距为 d_1 , 沿 y 轴阵元间距为 d_2 , 设共有 P 个信源, 其中 $M > P$ 。设为相控阵, 若设发射波束为宽波束, 发射波形为完全相关波形。天线阵元数远小于以半波长等间隔分布的传统阵列, 接收波束宽度约 15° 。

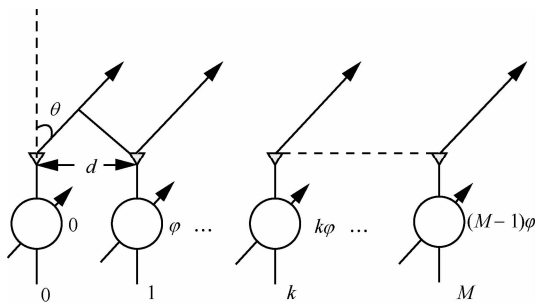


图 1 均匀直线阵电波入射示意

接收信号为窄带信号, 为平面波入射, 由于主要关心海上低空目标, 雷达电磁波沿海面传播, 这里只考虑目标的水平方位角 θ , 不考虑俯仰角。 d 为阵元间距, c 为光速。

时延 Δt 和相位的关系分别为

$$\Delta t = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (1)$$

因接收通道的波束指向即 θ , λ 为波长, 则阵内相邻通道相位补偿值 $\Delta \varphi$ 应为

$$\Delta \varphi = \omega \Delta t = \frac{2\pi f}{1} \frac{d \sin \theta}{c} = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (2)$$

设波达方向为 $\theta_1, \dots, \theta_p$, 并以阵列的第一个阵元作为基准, 各信号源在基准点的复包络分别为 $s_1(t), \dots, s_p(t)$, 则在第 m 个阵元上第 k 次快拍的采样值为

$$x(k) = A(\theta)s(k) + n(k) \quad (3)$$

雷达发射信号可描述为^[14]

$$S(t) = A\mu_1(t)\mu_2(t) \quad (4)$$

其中, $\mu_1(t)$ 是伪码截断信号或均匀矩形脉冲截断信号, 作为开关信号存在, 控制发射机和接收机的交替工作。 $\mu_2(t)$ 为锯齿波线性调频信号。

$$S_T(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \mu_1(t) \cdot \exp \left\{ j2\pi [f_0 t + f_b(t - nT_r) + \frac{k}{2}(t - nT_r)^2 + \varphi_0] \right\} \quad (5)$$

其中, $0 \leq t - nT_r < T_r$, f_0 为发射载波频率, f_b 为基带信号起始频率, A 为信号幅度, k 为调频斜率, T_r 为重复周期, φ_0 为信号起始相位。

其瞬时相位为

$$P_T(t) = 2\pi [f_0 t + f_b(t - nT_r) + \frac{k}{2}(t - nT_r)^2 + \varphi_0] \quad (6)$$

雷达回波信号描述如下。设波形长度为 L , 则 lT_s 表示脉冲的时间, 其中, $l = 0, \dots, L-1$, T 是脉冲重复间隔, 则第 m 个脉冲采集到的接收机采样样本由式(7)给出

$$\mathbf{u}_{lm} = \begin{bmatrix} u_l((m-1)T + 0T_s) \\ \vdots \\ u_l((m-1)T + (L-1)T_s) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^K \gamma_k e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \eta_l(\theta_k)} e^{j2\pi f_k(m-1)T} \mathbf{D}(f_k) \mathbf{X} \mathbf{v}(\theta_k) + \boldsymbol{\varepsilon}_{lm} \quad (7)$$

其中, $\gamma_k = \beta_k e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} 2d_k(0)}$, β_k 是复振幅;

$\mathbf{D}(f_k) = \text{diag}\{[e^{j2\pi f_k 0T_s}, \dots, e^{j2\pi f_k (L-1)T_s}]\}$ 是多普勒频移;

$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(0T_s), \dots, \mathbf{x}((L-1)T_s)]^T (LM_T)$ 表示信号;

$\mathbf{v}(\theta_k) = [e^{j2\pi\frac{2\pi}{\lambda}\eta'_1(\theta_k)}, \dots, e^{j2\pi\frac{2\pi}{\lambda}\eta'_{M_t}(\theta_k)}]^T$ 表示天线阵列方向矢量;

$\boldsymbol{\varepsilon}_{lm} = [\varepsilon_l((m-1)T + 0T_s), \dots, \varepsilon_l((m-1)T + (L-1)T_s)]^T$

表示误差向量;

f_k 、 λ 、 T 和 L 为已知参数, 需要估计的是每个信号 $u_m(\theta_k, n)$ 的到达角 θ_k 。

2.2 准确重建的条件

压缩感知的一个前提条件目标必须是稀疏的, 即场景中只包含少数散射中心。

虽然表面波超视距雷达观测距离范围为几十公里至 400 公里范围, 但观测的目标尺寸是小目标, 如低空飞机、舰船、导弹, 其尺寸通常为数百米, 小时只有几十米, 那么目标的散射点所处距离单元必然落入上述距离区间集合 $Ran(R)$ 的很小数据距离区间中, 如目标的散射点个数为 P , 则包含散射点的距离区间的数量 P' , 满足 $P' \leq P$, 即存在散射点的区间是有限的, 这表明表面波雷达观测目标在距离上的稀疏性。

特别地, 对于水面的舰船目标而言, 其船体主要由金属制成, 船体结构及船上建筑构成了角反射器, 使舰船成为一种极强的雷达反射体。而海浪杂波形成回波一般小于舰船形成回波, 因而可以认为雷达波束照射范围内只有少数的散射点。由于强散射点的数目远小于场景的总点数, 因而可认为多舰船目标的散射点回波满足 CS 理论约束条件, 对其进行较少次数的观测即可完成对船目标散射点的重建。这给研究基于稀疏信号表示的大场景小目标检测提供了基础。

3 信号重建过程

假设空间有若干个稀疏目标, 将目标所在的距离方向与方位方向分割成网格。雷达可以检测的目标数量应满足 $K \ll N^2$, K 为稀疏单元数目。如果满足, 则可以采用 CS 理论, 通过优化问题求解, 精确分辨出空间的多个目标。

3.1 在离散空间描述问题

将雷达场景离散化, 以便形成角度字典。沿距

离和方位方向离散化角度和速度空间, 可以把场景看成由一组位于网格上的散射点组成。如图 2 所示, 离散后的空间分别表示为角度空间 $[\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_{n_a}]$ 和速度空间 $[\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_{n_b}]$ 。按照先角度再速度的方向排列网格点, 产生网格节点表示为 $(\tilde{a}_{n_a}, \tilde{b}_{n_b})$, $n = 1, \dots, N_a N_b N_c$ 。通过这个排序, 网格点 $(\tilde{a}_{n_a}, \tilde{b}_{n_b})$ 映射到点 (a_n, b_n) , 其中, $n = (n_b - 1)n_a + n_a$ 。

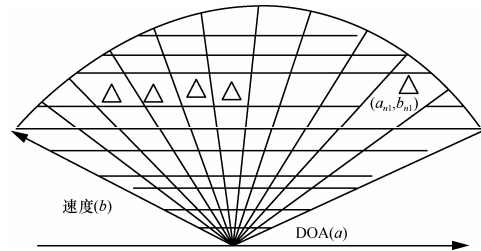


图2 离散化角度和速度空间的网格

将式(7)重写为

$$\mathbf{u}_{lm} = \sum_{n=1}^N \delta_n e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \eta^r(a_n)} e^{j2\pi b_n (m-1)T} \mathbf{D}(b_n) \mathbf{X} \mathbf{v}(a_n) + \boldsymbol{\varepsilon}_{lm} \quad (8)$$

其中, $N = N_a N_b$ 为角度和速度离散后的网格节点总数的乘积。

$$\delta_n = \begin{cases} \gamma_k, & \text{若第 } k \text{ 个目标位于 } (a_n, b_n) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

用矩阵形式表示即为

$$\mathbf{u}_m = \boldsymbol{\Psi}_m \mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon}_m \quad (9)$$

其中, $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_N]^T$, 以及

$$\boldsymbol{\Psi}_m = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \eta^r(a_1)} e^{j2\pi b_1 (m-1)T} \mathbf{D}(b_1) \mathbf{X} \mathbf{v}(a_1), \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \eta^r(a_N)} e^{j2\pi b_N (m-1)T} \mathbf{D}(b_N) \mathbf{X} \mathbf{v}(a_N)]$$

假设只有少量目标, 目标位置在角度—多普勒平面是稀疏的, \mathbf{s} 是一个稀疏矢量。如果 \mathbf{s} 中的索引有 j 的非零元素, 判定在对应的角度处存在目标。

3.2 构造字典

在构造字典矩阵的时候, 应充分考虑小目标信号的参数特性。已知 f_{i0} 和 k_i 为参数, θ_j 为需要估计的 DOA 参数, 取值是 $\theta_j = [-90^\circ, 90^\circ]$ ($j = 1, 2, \dots, J$), J 为角度参数搜索个数, 原子参数由参数 θ_j 单独决定, θ_j 按照需要的搜索精度均匀地取值。

若 \mathbf{x} 表示的离散信号在正交基 $\boldsymbol{\Psi}$ 上的变换系数是稀疏的, 则信号可表示为

$$\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{x} \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{\Psi}(N \times N)$ 构造成字典, \mathbf{x} 为 $N \times 1$ 维的离散信号。 $\boldsymbol{\alpha}$ 表示信号在字典基上的系数, 为 $N \times 1$ 向量, 如式(12)所示

$$\boldsymbol{\alpha}_j = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j2\pi(f_{ic0} + kn/N)d \sin \theta_j / c} \\ \dots \\ e^{-j2\pi(f_{ic0} + k_j n / N)(L-1)d \sin \theta_j / c} \end{bmatrix} \mathbf{x}_j(n) \quad (11)$$

所谓信号是稀疏的, 这里可简单理解为向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 的非零个数应小于 \mathbf{x} 的非零个数。通过 CS 理论, 可对第 L 个天线阵元构造基矩阵

$$\boldsymbol{\Psi}_l = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \eta_l^r(\alpha_1)} \mathbf{X}v(\alpha_1), \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \eta_l^r(\alpha_N)} \mathbf{X}v(\alpha_N)] \quad (12)$$

由于在字典构建过程中, 使用每个点的散射特性作为一个矢量, 因此, 求解出的信号的稀疏表示 \mathbf{s} 和每个点的散射强度一一对应。

3.3 基于实时海态信息的测量矩阵设计

测量第 l 个天线阵元接收到的信号的线性投影为

$$\mathbf{r}_l = \boldsymbol{\Phi}_l \mathbf{u}_l = \boldsymbol{\Phi}_l \boldsymbol{\Psi}_l \mathbf{s} + \tilde{\mathbf{e}}_l \quad (13)$$

其中, $\boldsymbol{\Phi}_l$ 是 $M \times L$ (测量数目必须比目标数目大 $M < L$) 矩阵, 要求和 $\boldsymbol{\Psi}_l$ 相干性极弱, 一般取零均值随机高斯矩阵。将 N_r 个接收天线的输出放入到矢量 \mathbf{r} 中, 可得

$$\mathbf{r} = \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s} + \mathbf{e}, 1 \leq N_r \leq M_r \quad (14)$$

基于式(13), 易得 $\boldsymbol{\Theta}$ 的结构。式(14)和式(7)形式相同, \mathbf{s} 对应的非零元素对应 K 个强散射点的复强度。

然而, 这种测量矩阵仅仅对于目标限制在小的距离单元且当第一个回波返回时即开始同步采样的情形才有效。如果海浪变化很大, 则此测量矩阵性能剧烈下降。需要根据当时环境和目标的情况合理设计测量矩阵, 以增大信杂比或信干比, 提高抑制杂波和干扰的能力^[15]。这里提出根据实际的海杂波情况设计测量矩阵。

依据表面波雷达所得到接近实时的实际海浪信息, 即从回波数据中反演提取海浪的第 i 个分量信号的参数估计如下。

回波数据第 i 个分量的幅度

$$A_i = \text{med}\{|S(\omega)|\} / N \quad (15)$$

回波数据第 i 个分量的相位

$$\varphi_i = \text{phase}\{\text{med}\{|S(\omega)|\}\} \quad (16)$$

$$\omega_i = \arg \text{med}\{|S(\omega)|\} \quad (17)$$

则海杂波分量可以表示为复数形式

$$C_i(n) = A_i e^{j\omega_i(n-1)T_s + j\varphi_i}, n = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

将该复数向量和前一时刻的洋流到达角 $\hat{\theta}_c$ 估计向量一同作为先验知识, 构造新的测量矩阵为

$$\boldsymbol{\Phi}_{rev} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{W}^H \quad (19)$$

其中, $\boldsymbol{\Phi}$ 是 $M \times L$ ($M < L$) 的零均值随机高斯矩阵, \mathbf{W}^H 是一个 $(M + \tilde{M}) \times L$ 确知矩阵, 满足 $\text{diag}\{\mathbf{W}^H \mathbf{W}\} = [c_i]^T$, 其中对角线元素 $c_i(n), n = 1, 2, \dots, N$ 对应各海杂波的复数分量。这样的测量矩阵设计基于如下考虑: 一是提高接收机的 CS 方法的检测性能; 二是测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_{rev}$ 仍然具有随机特性。

下面的目标是根据构造的字典 $\boldsymbol{\Psi}$ 和观测矢量 \mathbf{u} , 求出其稀疏表示 \mathbf{s} , 这可以通过求解 (7) 所示优化问题来解决, 可利用 Dantzig 选择器解此凸问题^[16], 以恢复出 \mathbf{s} 。

$$\hat{\mathbf{s}} = \min \|\mathbf{s}\|_1 \text{ s.t. } \|\boldsymbol{\Theta}^H (\mathbf{r} - \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s})\|_\infty < \mu \quad (20)$$

通过选择式中门限 $\mu = (1 + t^{-1}) \sqrt{2 \log N \sigma^2}$, t 是正标量, 求解式(20)即能高概率地恢复出稀疏矢量 \mathbf{s} 。故雷达 DOA 估计问题可归结为 L1 范数凸优化问题。式(20)即利用 CS 进行 DOA 估计的目标函数。

所以, 对 \mathbf{s} 按照二维的顺序排列, 就可以得到目标的角度—散射强度关系, 从而得到角度估计值。

3.4 匹配追踪算法

由于回波信号等于发射波与环境反射率函数的卷积, 故如何从回波信号中恢复出发射信号, 是重建算法要解决的主要问题。

目前, 国内外研究基于稀疏信息的算法有基追踪法、匹配追踪法、梯度投影法等。本文采用正交匹配追踪法, 其本质是 L1 范数最优化问题。该算法由 Mallat 和 Zhang^[2]引入, 其原理是每次从冗余字典中挑选一个向量, 并迭代地进行下去, 最终得到信号的逼近。该方法与统计学中使用的投影追踪算法和形状增益矢量量化有密切的联系。

将信号 \mathbf{x} 映射到由一部分原子构成的空间上, 由于字典的过完备性, 系数的选择不唯一。先从原始信号开始, 将当前的残差信号向所有的原子投影, 选择内积的绝对值最大者作为当前的入选原子: 从当前的

残差信号中扣除其自身在当前入选原子上的投影, 将剩余信号作为新的残差, 并重复上述过程直至满足准则。从实现过程看, 在每一步中都寻找与当前的残差信号最匹配的原子, 属于贪婪算法。需注意的是某一步选择错误则需要多步进行修正^[2]。

该算法利用一个不断修正的公式从 $\langle R^m f, \phi_p \rangle$ 计算出 $\langle R^{m+1} f, \phi_p \rangle$ 。具有 ε 相对精度的匹配追踪算法按如下的步骤进行。

1) 初始化: 设迭代次数 $m=0$, 并计算 D 中的 $\{\langle f, \phi_p \rangle\}_{p \in \Gamma}$;

2) 最佳匹配: 寻找 $\phi_p \in D$, 使 $\left| \langle R^m f, \phi_{p_m} \rangle \right| = \max_{p \in \Gamma} \left| \langle R^m f, \phi_p \rangle \right|$;

3) 修正: 对所有满足 $\langle \phi_{p_m}, \phi_p \rangle \neq 0$ 的 $\phi_p \in D$ $\langle R^{m+1} f, \phi_p \rangle = \langle R^m f, \phi_p \rangle - \langle R^m f, \phi_{p_m} \rangle \langle \phi_{p_m}, \phi_p \rangle$;

4) 停止规则: 若

$$\|R^{m+1} f\|^2 = \|R^m f\|^2 - \left| \langle R^m f, \phi_{p_m} \rangle \right|^2 \leq \varepsilon^2 \|f\|^2$$

则停止; 否则置 $m = m+1$, 转到步骤 2)。

4 仿真结果和分析

为验证所提方法在均匀线阵 DOA 方面的有效性, 设计仿真实验, 并给出实验结果。第 1 个实验, 采用所提方法仿真了包含 3 个目标的 DOA 估计, 得到信杂比和 DOA 估计精度的关系。第 2 个实验研究了在采用所提方法的条件下, 天线阵元数目、阵元间距与 DOA 估计性能之间的关系。为进一步比较所提方法与传统方法的性能差异, 在第 3 个实验中, 分别采用所提方法和其他方法进行目标 DOA 估计, 在不同快拍数条件下仿真实验并进行比较研究。

1) 仿真实验 1: 信杂比和 DOA 估计精度的关系

仿真条件为发射阵元 30 个, 接收阵元 8 个, 迭代次数为 3, 场景中设置 3 个目标, 它们所处的方位角分别为 -5° 、 4° 和 7° , 其对应的散射幅值为 5、3 和 4。信杂比变化范围从 +20 dB 至 -40 dB。利用 CS 方法进行角度估计, 并经过 500 次蒙特卡罗仿真得到 MSE 均方根误差如图 3 所示。

$MSE = \frac{\sqrt{\sum (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2}}{N}$, N 为角度的数目, $\hat{\theta}$ 和 θ 分别为估计的和真实的角度。

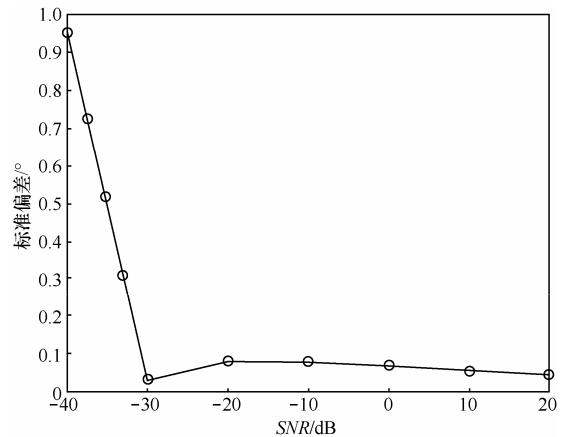


图 3 信噪比和估计标准偏差之间的关系

如图 3 所示, 采用 CS 方法时, 信杂比和角度估计精度存在一定关系, 但并非简单的线性关系。由图看到, 当信杂比从 +20 dB 至 -30 dB 变化时, 角度估计标准偏差值在 10% 以内, 然而, 当信杂比继续下降至 -40 dB 后, 角度估计标准偏差急剧加大。说明用 CS 方法估计 DOA 时, 信杂比存在着下限, 低于此下限时, 估计标准偏差异常增大。当高于此限时, 随着信杂比的增大, 估计标准偏差回归且变化趋缓。

2) 仿真实验 2: 阵元参数和估计精度的关系

根据理论知当天线阵列的发射阵元减少时, 到达角估计精度将下降。为了验证所提方法在小型天线阵列条件下的 DOA 估计的性能, 在天线阵列为小阵元数 (例如 8 个) 的情况下, 改变发射或接收天线阵元之间的间距, 仿真结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 所示, 当接收阵元仅有 8 根时, 发射阵元间距 dt 为四分之一波长 $\lambda/4$ 、接收阵元间距 dr 为半波长 $\lambda/2$ 时, 实际的 DOA 和采用 CS 方法得到 DOA 结果。结果显示估计值和实际值存在误差。如图 5 所示, 保持阵元数不变, 增大发射阵元间距为半波长, 而接收阵元的间距由 $\lambda/2$ 减少为 $\lambda/4$, 仿真结果显示, 相比图 4, DOA 估计的精度提高。从实验结果可知, 利用 CS 方法估计到达角, 在接收天线阵元数减少、阵元间距较小的情况下, 提高 DOA 估计精度的代价是加大发射阵元的间距。

3) 仿真实验 3: 采用不同方法进行目标 DOA 估计

将所提的方法与 3 种常用方位角估计方法 CAPON、MUSIC、ESPRIT 分别进行仿真实验, 并将仿真结果进行比较。仿真参数如下: 信号中心频谱为 5 MHz; 接收天线阵元个数为 8 个; 阵元间隔为半波长 $\lambda/2$ 。场景中设置 3 个目标, 它们所处方

位角分别为：0°，10°和 20°，其对应的散射幅值为 0.8、0.6 和 1。接收波信杂比为 15 dB。CS 的采样频率为 800 Hz。方位采样数为 Nyquist 频率采样数（230 kHz）的 0.013 3 倍。前 3 种方法的快拍数均取为 1 000，CS 方法的快拍数是 64。

结果稍差，但是采用的样本数要比其他 3 种方法少得多，所需数据量不大。这对于小型天线阵列而言是非常重要的优势。而且该方法不要求发射信号具有不相干特性，符合表面波雷达的发射波形特点。

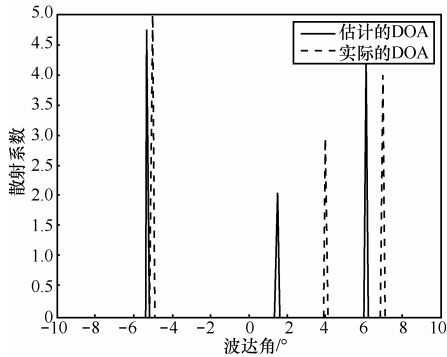


图 4 利用压缩感知估计到达角， $dr = \lambda/4$ ， $dr = \lambda/2$

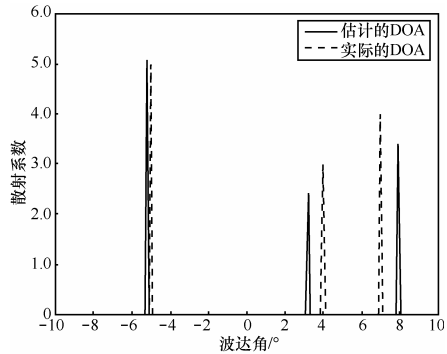


图 5 利用压缩感知估计到达角， $dr = \lambda/2$ ， $dr = \lambda/4$

图 6 给出了分别采用 Capon、MUSIC、ESPRIT 和 CS 方法进行 DOA 估计的归一化空间谱。

图 6(a)和图 6(b)给出了 MUSIC 和 Capon 方法的结果，但 2 种方法都要求发射信号为非相干信号，而表面波雷达发射波形不能满足此要求，因此在发射相干波形时两算法将失效，且此 2 种方法对采样样本数据量要求较高。

由图 6(c)看到，ESPRIT 方法的仿真结果。该方法虽然对信号正交性没有限制，但需构造信号协方差矩阵和特征值分解，算法精度低，计算复杂度高。由图可知其估计精度不如图 6(a)和图 6(b)。

在天线阵列小型化的情况下，天线阵元减少，阵元间距减小，将使采样样本数变少，数据量缩短。在此前提下，既要采用复杂度不高的算法，又要保持和传统方法匹配的估计精度，变得十分困难。由图 6(d)看到，此时 CS 方法得到的信号反射系数的方位精确度较 MUSIC 或 Capon（图 6(a)或图 6(b)）的

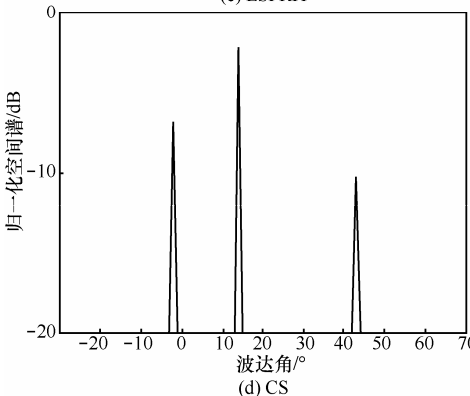
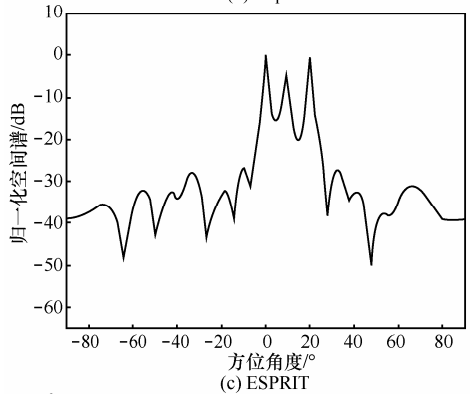
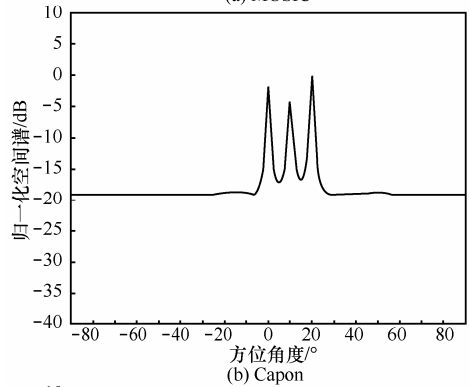
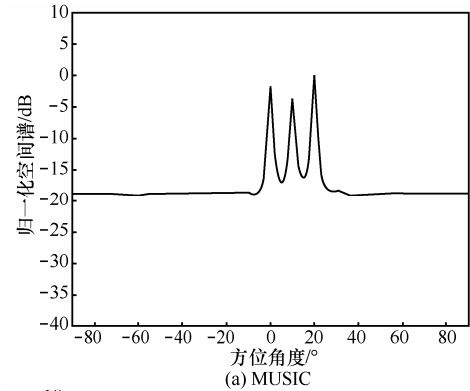


图 6 不同方法进行 DOA 估计的性能

图 6(d)估计精度并不高,分析主要是式(20)描述的凸优化问题门限 μ 影响了 CS 方法估计精度,关于如何优化门限选择,将另撰文陈述。综上,以上研究和实验结果给出了小型天线阵列下提高方位分辨率的另一种途径,即可利用压缩感知方法提高小型天线阵列的角度分辨率,其代价是耗费计算资源,即计算量较大。但随着并行计算技术迅速发展,这个问题将得到缓解,使之易于工程实现。

5 结束语

根据岸基高频表面波超视距雷达探测海上小目标的需求,将表面波雷达天线阵列到达角估计问题转换为信号稀疏表示的重建问题,提出了一种利用压缩感知理论且基于海态先验知识的进行小型阵列目标 DOA 估计的方法。首先研究了压缩感知原理和稀疏信号的表示。对角度速度空间进行离散,构造字典。为了缓解在海杂波干扰情况下信杂比低的现象,提高系统的抗干扰性和稳定性,将海浪的幅度相位等作为先验条件,对测量矩阵进行设计。建立目标函数并利用算法求解,进行了仿真实验。仿真结果显示,压缩感知方法以计算资源为代价,能够提取高频表面波雷达目标检测的方位角度,易于工程实现。如何设计抗干扰能力更强的测量矩阵,提高方位估计的精度,是进一步的工作。

参考文献:

- [1] 张小飞,汪飞,徐大专. 阵列信号处理的理论和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
ZHANG X F, WANG F, XU D Z. Theory and Application of Array Signal Processing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [2] STEPHANE M, 戴道清, 杨力华译. 信号处理的小波导引-稀疏方法[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
STEPHANE M, DAI D Q, YANG L H(Translator). A Wavelet Tour of Signal Processing-The Sparse Way[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.
- [3] 石光明,刘丹华,高大化等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
SHI G M, LIU D H, GAO D H, *et al.* Compressed sensing theory and research progress[J]. Acta Electronics Sinica, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [4] CANDÈS E J, ROMBERG, J TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [5] CANDÈS E J, ROMBERG J K, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(8):1207-1223.
- [6] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, *et al.* Performance of MIMO radar systems: advantages of angular diversity[A]. Signals, Systems and Computers, 2004, Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference[C]. IEEE, 2004. 305-309.
- [7] HAIMOVICH A M, BLUM R S, CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2008, 25(1): 116-129.
- [8] CLAIR F. High Frequency Direction Finding Using Structurally Integrated Antennas on a Large Airborne Platform[D]. USA: Department of Electrical and Computer Engineering Graduate School of Engineering and Management Air Force Institute of Technology Air University, 2011.
- [9] YAO Y. Colocated MIMO Radar Using Compressive Sensing[D]. USA: Drexel University,2010.
- [10] YAO Y, ATHINA P, PETROPULU H V P. MIMO radar using compressive sampling[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Process, 2010,4(1):146-163.
- [11] GURBUZ A C, MCCLELLAN J H, CEVHER V. A compressive beamforming method[A].Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2008, IEEE International Conference[C]. IEEE, 2008. 2617-2620.
- [12] 全英汇. 稀疏信号处理在雷达检测和成像中的应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
QUAN Y H. Application of Sparse Signal Processing in Radar Detection and Imaging[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2012.
- [13] 杨俊刚. 利用稀疏信息的正则化雷达成像理论与方法研究[D]. 国防科学技术大学,2013.
YANG J G. Theory and Methods of Radar Imaging Sparse Information Regularization[D]. University of Defense Technology, 2013.
- [14] 黄麟舒, 察豪, 李洪科. 小型化岸基高频地波雷达的波形选择及解调研究[J]. 测控技术,2014,33(4):23-26.
HUANG L S, CHA H, LI H K. Analysis on waveform and its demodulation for the HF ground wave radar with mini antenna array[J]. Measurement&Control Technology,2014,33(4):23-26.
- [15] 黄麟舒, 察豪. 粗糙海面蒸发波导传播和近掠入射散射分析[J]. 电波科学学报, 2012,27(3):482-487.
HUANG L S, CHA H. Ducting propagation and near-grazing incident scattering on rough sea surface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012,27(3):482-487.
- [16] CANDÈS E J, J ROMBERG, TAO T. The dantzig selector: statistical estimation when p is much larger than n [J]. The Annals of Statistics, 2007, 35(6): 2313-2351.

作者简介:



黄麟舒(1975-),女,湖南常德人,海军工程大学博士生,主要研究方向为信息系统。

察豪(1966-),男,陕西西安人,海军工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为雷达总体技术。

叶慧娟(1974-),女,黑龙江大庆人,海军工程大学副研究员,主要研究方向为武器系统。

徐慨(1965-),男,江苏淮阴人,海军工程大学副教授,主要研究方向为微波通信和卫星通信。