

基于压缩感知的无源雷达超分辨 DOA 估计

王海涛* 王 俊

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 波达方向(DOA)信息是目标定位过程中一个非常重要的量。但是在无源雷达中, 目标回波通常掩盖在强直达波、多径干扰以及噪声的背景之下, 因此很难对其进行 DOA 估计, 特别是在多目标的情况下。该文提出一种基于压缩感知的无源雷达超分辨 DOA 估计方法, 为了消除直达波和多径干扰以及提高目标回波的信噪比, 首先进行时域干扰相消和距离-多普勒 2 维相关处理, 最后在目标对应的距离-多普勒单元处进行方位向压缩感知稀疏重构, 以获得目标的 DOA 信息。仿真分析表明, 该文方法能够在无源雷达中进行有效的超分辨 DOA 估计。

关键词: 无源雷达; 压缩感知; 波达方向(DOA); 超分辨

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)04-0877-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00797

Super-resolution DOA Estimation in Passive Radar Based on Compressed Sensing

Wang Hai-tao Wang Jun

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The information of target's Direction Of Arriving (DOA) is very important for target location. But in passive radar, the weak target echoes are usually embedded in the background of strong direct signal, multipath and noise. So it is very difficult to estimate the DOA of target in passive radar, especially when there are multiple targets. In this paper, a method based on compressed sensing is proposed to perform high resolution DOA estimation in passive radar. In order to remove the strong direct signal and multipath and improve the SNR of targets, first the temporal interference cancellation and range-Doppler 2D correlation are utilized. Finally, the signal of targets' delay-Doppler bin is reconstructed according to DOA using reconstruction algorithm of compressed sensing. Simulation results show that the proposed method can perform the super-resolution DOA estimation in passive radar.

Key words: Passive radar; Compressed sensing; Direction Of Arriving (DOA); Super-resolution

1 引言

利用外部辐射源的无源雷达因其具有不可探测性、结构简单、造价低廉以及具有反隐身的潜力等优点, 近年来在国内外引起了广泛关注^[1]。目前研究的可以作为无源雷达机会照射源的信号包括: 调频广播信号^[2,3]、模拟/数字电视信号^[4,5]、以及无线通信信号^[6,7]等。其中, 调频广播信号由于具有高发射功率、类似图钉状的模糊函数等特性, 是目前研究的最为广泛的外部照射源信号。因此本文中, 我们也利用调频广播信号作为无源雷达的外部照射源信号。

波达方向(DOA)信息是目标定位过程中一个非

常重要的量。比如在无源雷达中, 我们可以利用目标的 DOA 和双基地距离信息实现对目标的单站定位。但是由于在无源雷达中, 微弱的目标回波通常被掩盖在强直达波、多径干扰以及噪声的背景之下, 很难实现对目标的直接测向。为了在无源雷达中实现对目标测向, 文献[2,3]提出首先利用时域干扰相消算法消除天线各个阵元接收到的直达波和多径干扰, 然后利用距离-多普勒 2 维相关处理提高目标回波的信噪比, 最后在目标对应的距离-多普勒单元处实现对其测向。但文献[2,3]的方法都只能应用于一个距离-多普勒单元包含一个目标的情况, 而当一个距离-多普勒单元包含两个或两个以上的目标信息时(比如多个飞机目标编队飞行), 则不能实现测向。

压缩感知是近年发展起来的建立在信号稀疏表示和重建基础上的新的研究领域, 已广泛应用图像处理 and 雷达等领域。压缩感知理论指出当信号可压

2012-06-21 收到, 2012-12-17 改回

国家 863 计划项目(2010AAJ144)和教育部创新团队计划(IRT0954)资助课题

*通信作者: 王海涛 haitao267@yahoo.com.cn

缩或稀疏时,可以以远低于奈奎斯特采样定律的频率对信号进行采样,并保证能够以很高的概率精确恢复出原信号^[8-10]。

本文考虑当一个距离-多普勒单元内包含多个目标信息时,对这多个目标进行超分辨 DOA 估计。仍然如文献[2,3]的方法首先进行时域干扰相消和距离-多普勒 2 维相关处理,以消除直达波和多径干扰并提高目标回波的信噪比。但由于将天线接收信号进行距离-多普勒 2 维相关处理以后,能够用于测向的数据只有单次快拍,很难应用 MUSIC 等传统的子空间类超分辨算法(只利用单次快拍的数据,不能准确获得求解 MUSIC 等子空间方法所需要的采样协方差矩阵)。因此本文提出利用压缩感知进行超分辨 DOA 估计,通过对目标所在的距离-多普勒单元进行方位向压缩感知稀疏重构,以获得目标的 DOA 信息。利用压缩感知进行超分辨 DOA 估计,只需要利用单次快拍的信息和要求一个距离-多普勒单元内的目标在空域上是稀疏的,对信号是否相干没有要求,因此非常适合于本文中所考虑的情况。最后,对本文提出的基于压缩感知的无源雷达超分辨 DOA 估计的性能进行了仿真分析。

2 压缩感知理论

设信号 $\mathbf{x} \in C^N$ 可由一组 $N \times N$ 维的正交基 $\boldsymbol{\psi} = [\boldsymbol{\psi}_1, \dots, \boldsymbol{\psi}_N]$ 展开,即

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\psi} \mathbf{b} = \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\psi}_i b_i \quad (1)$$

其中 $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_N]^T$ 表示 $N \times 1$ 维的复系数矢量(T 表示转置), $\boldsymbol{\psi}_i$ 是正交基 $\boldsymbol{\psi}$ 中的列矢量, $\boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\psi}^H = \boldsymbol{\psi}^H \boldsymbol{\psi} = \mathbf{I}_N$, \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 维的单位矩阵, H 表示共轭转置。若满足 $\|\mathbf{b}\|_0 = q \ll N$ ($\|\mathbf{b}\|_0$ 表示矢量 \mathbf{b} 中非零元素的个数)时,信号 \mathbf{x} 被称为 q -稀疏的。矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 为稀疏基矩阵, \mathbf{b} 为信息矢量。

压缩感知理论指出任意 N 维 q 阶稀疏信号 \mathbf{x} 的稀疏表示 \mathbf{b} 可通过 \mathbf{x} 在空间的 M ($M \ll N$) 维的随机测量值进行重建。随机测量过程可以看作是对稀疏信号 \mathbf{x} 用 $M \times N$ 维的测量矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$ 进行投影,得到观测值矢量 $\mathbf{y} \in C^M$, 即

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\varphi} \mathbf{x} = \boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\psi} \mathbf{b} = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{b} \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\psi}$ 是 $M \times N$ 维的感知矩阵。当 $\boldsymbol{\gamma}$ 满足有限等距特性(Restricted Isometry Property, RIP)^[8], 可以通过求解 l_0 -范数约束最优化问题:

$$\min \|\mathbf{b}\|_0, \quad \text{s.t. } \mathbf{y} = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{b} \quad (3)$$

将信息矢量 \mathbf{b} 从欠定方程式(2)中求解出来。求解式(3)是一个 NP-hard 问题,计算复杂度很大,但是文献[8-10]指出,通过转化为求解式(4)

$$\min \|\mathbf{b}\|_1, \quad \text{s.t. } \mathbf{y} = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{b} \quad (4)$$

或者式(5)

$$\min \|\boldsymbol{\gamma} \mathbf{b} - \mathbf{y}\|_2 + \lambda \|\mathbf{b}\|_1 \quad (5)$$

所示的简单 l_1 -范数约束最优化问题,可以得到同样的解。目前求解式(4)或者式(5)所示的 l_1 -范数约束最优化问题的方法主要包括:梯度投影法^[9]、牛顿法^[10]等。

3 超分辨 DOA 估计

3.1 信号模型

考虑以一个 P 阵元的线阵作为无源雷达的回波天线(阵元间距为半波长),接收由调频广播电台发射的直达波、多径以及运动目标反射的回波信号。一般而言,直达波和多径是天线接收信号中占主要能量的信号,因此首先利用时域干扰相消算法(如扩展批处理相消算法(Batch Version of Extensive Cancellation Algorithm, ECA-B)^[11])消除天线各个阵元接收的直达波和多径干扰。经过时域干扰相消以后,天线各个阵元中的信号可以表示为式(6)的形式:

$$s_{\text{sur}_p}[k] = \sum_{c=1}^{N_{\text{Ta}}} B_c[k] e^{j\pi p \sin(\theta_c)} + z_p[k], \quad p = 1, \dots, P, \quad k = 1, \dots, K \quad (6)$$

式中 $B_c[k]$ 和 θ_c 分别表示第 c 个动目标回波信号的复包络和来波方向, $z_p[k]$ 表示第 p 个天线阵元中的噪声(时域干扰相消以后,可能残留小部分直达波和多径干扰,但是其对目标检测和测向的影响类似于噪声), K 表示总的的数据长度, N_{Ta} 表示目标总数。

为提高目标回波的信噪比,将各阵元时域干扰相消以后的信号与调频广播电台直达波信号 $s_d[k]$ ($s_d[k]$ 在实际中可以通过利用回波阵列天线形成一个指向调频广播电台基站方向的波束获得,也可以利用一根单独指向基站方向的窄波束天线获得)作距离-多普勒 2 维相关:

$$s_p[\tau, f_d] = \sum_{k=1}^K s_{\text{sur}_p}[k] s_d^*[k - \tau] e^{-j2\pi f_d k / K}, \quad p = 1, \dots, P \quad (7)$$

式中 $*$ 表示共轭, τ, f_d 分别表示时延和多普勒值。

假设回波天线接收的前 N_0 个目标对应为同一个距离-多普勒单元,则在这个距离-多普勒单元 (τ_1, f_{d_1} 分别表示这个单元的时延和多普勒值)内的信号可以写为式(8)的形式:

$$s_p[\tau_1, f_{d_1}] = \sum_{c=1}^{N_0} G_c[\tau_1, f_{d_1}] e^{j\pi p \sin(\theta_c)} + E_p[\tau_1, f_{d_1}] + Z_p[\tau_1, f_{d_1}], \quad p = 1, \dots, P \quad (8)$$

其中 $G_c[\tau_1, f_{d_1}] = \sum_{k=1}^K B_c[k] s_d^*[k - \tau_1] e^{-j2\pi f_{d_1} k / K}$ 表示这个距离-多普勒单元对应的第 c 个目标的主瓣的复包络； $E_p[\tau_1, f_{d_1}] = \sum_{c=N_0+1}^{N_{Ta}} \sum_{k=1}^K B_c[k] e^{j\pi p \sin(\theta_c)} s_d^*[k - \tau_1] e^{-j2\pi f_{d_1} k / K}$ 表示其他目标在这个距离-单元内的副瓣； $Z_p[\tau_1, f_{d_1}] = \sum_{k=1}^K z_p[k] s_d^*[k - \tau_1] e^{-j2\pi f_{d_1} k / K}$ 表示相关以后的噪声在这个距离-多普勒单元内对应的值。

根据文献[3]可以得到，当天线接收的各个目标的能量相当时，由于无源雷达的积累时间比较长，有比较大的积累增益(比如在基于调频广播的无源雷达中，当选择带宽为 100 kHz、积累时间为 1 s 时，对应的积累增益为 50 dB)，一个目标副瓣的能量相对于其他目标主瓣的能量将会小得多。而当天线接收的信号中存在强目标和弱目标的情况，我们可以先对强目标进行测向，然后消去强目标，最后再对弱目标测向。因此可以认为当两个目标相隔比较远，不在同一个主瓣范围之内时，他们之间的相互影响很少。从而可以将式(8)中其他目标的副瓣也可以看作是噪声，式(8)于是可以写成式(9)的形式：

$$s_p[\tau_1, f_{d_1}] = \sum_{c=1}^{N_0} G_c[\tau_1, f_{d_1}] e^{j\pi p \sin(\theta_c)} + Q_p[\tau_1, f_{d_1}], \quad p = 1, \dots, P \quad (9)$$

式中 $Q_p[\tau_1, f_{d_1}] = E_p[\tau_1, f_{d_1}] + Z_p[\tau_1, f_{d_1}]$ ，将式(9)写成矢量形式为

$$\mathbf{s}[\tau_1, f_{d_1}] = \begin{bmatrix} e^{j\pi \sin(\theta_1)} & \dots & e^{j\pi \sin(\theta_{N_0})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{jP\pi \sin(\theta_1)} & \dots & e^{jP\pi \sin(\theta_{N_0})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1[\tau_1, f_{d_1}] \\ \vdots \\ G_{N_0}[\tau_1, f_{d_1}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1[\tau_1, f_{d_1}] \\ \vdots \\ Q_P[\tau_1, f_{d_1}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{s}[\tau_1, f_{d_1}]$ 是一个 $P \times 1$ 维的复矢量。从式(10)可以看出经过距离-多普勒 2 维相关处理，回波天线接收的 K 次快拍的数据被变换到某个距离-多普勒单元以后，只有单次快拍，因此很难应用 MUSIC 等传统的子空间类超分辨算法。但每个距离-多普勒单元中的数据可以看作是此单元对应的目标和噪声的线性组合(干扰已经被消除)。因此当回波天线阵元数足够大使得某个距离-多普勒单元的目标满足空间稀疏性(根据文献[12]，当回波天线阵元数 P 与某个距离-多普勒单元目标个数 N_0 满足关系： $P \geq uN_0 \ln(N/N_0)$ 时，即认为这个单元中的目标在空间上是稀疏的。式中 u 为常数，不同的重构算法取不

同的值，当利用文献[10]中的重构算法时， u 取为 1， N 表示感知矩阵 γ 列向量的维数)，便可以通过对这个单元的数据进行基于压缩感知的方位向稀疏重构，以获得各个目标的 DOA 信息。

3.2 基于压缩感知的方位向稀疏重构

要对目标进行超分辨 DOA 估计，首先需要检测到目标并获得其的距离-多普勒信息。可以如文献[2,3]，通过对各个阵元经过时域干扰相消和 2 维相关以后获得的距离-多普勒平面直接进行恒虚警检测，但是这样能够检测到的目标距离比较近。也可以按照一般的利用阵列天线的无源雷达目标检测过程，如文献[13]，依次经过波束形成，时域干扰相消，2 维相关以后再进一步恒虚警检测，这样能够探测到目标的距离相对比较远但是计算量会比较大。因此在实际处理过程中，我们需要根据实际情况合理的选择目标检测方案。

当检测到目标并获得其的距离-多普勒信息以后，我们便可以对目标所在的距离-多普勒单元进行方位向稀疏重构，以进行超分辨 DOA 估计。由第 2 节的压缩感知理论可以知道，压缩感知稀疏重构实际上可以转化为求解一个 l_1 -范数约束最优化问题，本文采用文献[10]中式(5)所示的 l_1 -范数约束最优化模型，从而基于压缩感知的方位向稀疏重构就是求解式(11)的最小优化问题：

$$\min_{\mathbf{w}} \left\| \gamma \mathbf{w} - \mathbf{s}[\tau_1, f_{d_1}] \right\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|_1 \quad (11)$$

式中 λ 是一个常数； γ 为 $P \times N$ 维的感知矩阵 ($P \ll N$)，其列矢量由阵列天线各个方向的导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_n)$ 组成， θ_n 为在对整个角度观测区间 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 进行 N 点均匀采样时，第 n 个采样值对应的角度， $\mathbf{a}(\theta_n) = [e^{j\pi \sin(\theta_n)}, \dots, e^{jP\pi \sin(\theta_n)}]^T$ ； \mathbf{w} 是一个 N 维的列矢量，表示需要求解的各个方向信号的复幅度。利用文献[10]的方法求解式(11)，具体的求解步骤，读者可以参考文献[10]。

4 性能分析

本节进行性能分析，设回波天线阵列由 10 个全向阵元的等距线阵组成(阵元间距为半波长)，同时假设阵列天线各个阵元接收到的直达波和多径干扰首先已经通过时域干扰相消算法消除，因此在本节的仿真过程中，我们考虑回波天线各个阵元的信号中仅包含两个位于同距离-多普勒单元的目标回波以及噪声，并且假设目标的距离-多普勒信息已经通过检测过程获得。在距离-多普勒 2 维相关过程中，数据长度 K 取 200000 点(采样率为 200 kHz)，参考信号 $s_d[k]$ 的信噪比为 40 dB。需要指出的是当某个距离-多普勒单元包含 3 个或者 3 个以上的目标时，

如果回波天线阵元数足够大使得目标在空间上是稀疏的(比如当一个距离-多普勒单元包含 3 个目标, 如果设 $N = 180, u = 1$, 为满足空间稀疏性, 则需要的回波天线阵元数至少为 13), 利用本文的算法也可以进行 DOA 估计。但是当考虑 3 个或者 3 个以上的目标包含于同一个距离-多普勒单元时, 性能分析比较复杂, 因此本文我们只进行两个目标的 DOA 超分辨估计性能分析。

首先设定这两个目标回波的 DOA 分别为 -0.1° 和 -5.8° , 信噪比皆为 -26 dB(本文中目标回波的信噪比指的是时域干扰相消和距离-多普勒 2 维相关处理前, 回波天线接收的原始数据信噪比), 噪声为高斯白噪声。如第 3 节所述, 将各阵元中的信号首先进行距离-多普勒 2 维相关, 再在目标对应的距离-多普勒单元处进行方位向压缩感知稀疏重构。重构过程中我们取 N 为 180, 重构以后得到各个方向的幅度如图 1 所示。从图中可以看出经过重构以后, 能够对两个目标进行有效分辨, 并且测量得到的两个目标的方向分别为 0° 和 -6° (两个最大尖峰所在的位置), 与真实目标来波方向基本符合。

为了进一步分析本文方法的性能, 我们进行了如下实验:

实验 1 仍然设定两个目标回波的信噪比都为 -26 dB, 并保持第 1 个目标 DOA 为 -0.1° , 但第 2 个目标 DOA 取不同值时进行试验。每种情况分别进行 200 次独立蒙特卡洛实验, 得到重构以后能够

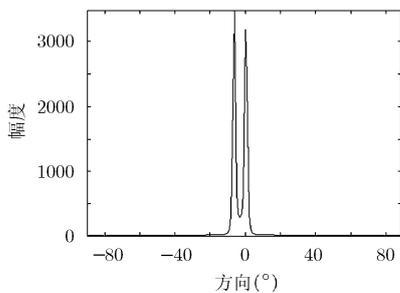


图 1 方位向重构结果

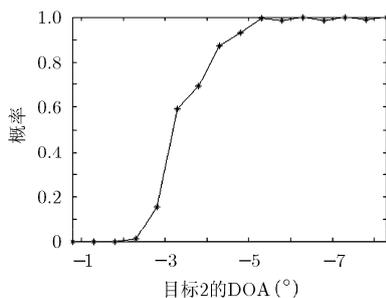


图 2 重构以后正确估计两个目标 DOA 的概率与第 2 个目标 DOA 的关系

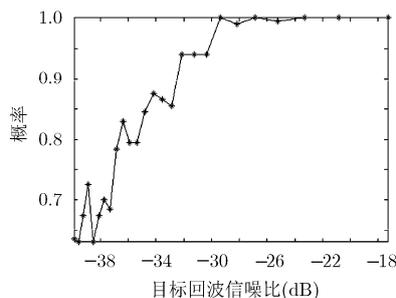


图 3 重构以后正确估计两个目标 DOA 的概率与目标回波信噪比的关系

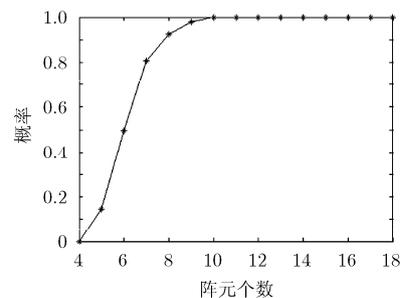


图 4 重构以后正确估计两个目标 DOA 的概率与天线阵元个数的关系

正确估计两个目标 DOA 的概率与第 2 个目标 DOA 的关系如图 2 所示。从图中可以看出, 当第 2 个目标 DOA 小于 -5.3° (也即两个目标 DOA 相差大于 5.2°) 时, 重构后能正确估计两个目标的概率大于 0.99。这里我们设定重构以后能够正确估计出目标 DOA 是指能够将两个目标进行有效分辨, 并且两个最大尖峰值所在的位置与目标真实的 DOA 相差小于 $\pm 1^\circ$ 。

实验 2 设定两个目标的 DOA 分别为 -0.1° 和 -5.8° , 但是将两个目标的信噪比进行变动(但两者之间的信噪比保持一致)。每种情况分别进行 200 次独立蒙特卡洛实验, 得到重构以后能够正确估计两个目标 DOA 的概率与两者信噪比的关系如图 3 所示。从图中可以看出当目标回波的信噪比大于 -29 dB 时, 重构以后能正确估计两个目标的概率大于 0.99。

实验 3 设定两个目标的 DOA 分别为 -0.1° 和 -5.8° , 信噪比都为 -26 dB, 但是将天线的阵元个数进行变动。每种情况分别进行 200 次独立蒙特卡洛实验, 得到重构以后能够正确估计两个目标 DOA 的概率与天线阵元个数的关系如图 4 所示。从图中可以看出当阵元个数大于 9 时(此时目标被认为在空间上是稀疏的), 重构以后能正确估计两个目标的概率大于 0.98。

5 结论

本文提出了一种基于压缩感知的无源雷达超分辨 DOA 估计方法, 针对在无源雷达中, 目标回波一般掩盖在强直达、多径干扰以及噪声背景之中, 很难对其进行直接测向, 提出首先利用时域干扰相消算法消除各个阵元接收到的直达波和多径干扰, 然后利用距离-多普勒 2 维相关处理以提高目标回波的信噪比, 最后在目标对应的距离-多普勒单元处进行方位向压缩感知稀疏重构, 以进行目标的超分辨 DOA 估计。仿真分析表明该方法能够在无源雷达中进行有效的超分辨 DOA 估计。

参 考 文 献

- [1] Howland P E. Editorial: on passive radar systems[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 105-106.
- [2] Howland P E, Maksimimuk D, and Reitsma G. FM radio based bistatic radar[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 107-115.
- [3] Wang Jun, Wang Hai-tao, and Zhao Yong. Direction finding in frequency-modulated-based passive bistatic radar with a four-element Adcock antenna array[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(8): 807-813.
- [4] Berger C R, Demissie B, Heckenbach J, et al. Signal processing for passive radar using OFDM waveforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 226-238.
- [5] 万显荣, 岑博, 程丰, 等. 基于 CMMB 的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(10): 2489-2493.
- Wan Xian-rong, Cen Bo, Cheng Feng, et al. Ambiguity function analysis and processing of CMMB signal based passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2489-2493.
- [6] Colone F, Woodbridge K, Guo H, et al. Ambiguity function analysis of wireless LAN transmissions for passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 240-264.
- [7] Krysik P, Kulpa K, Baczyk M, et al. Ground moving vehicles velocity monitoring using a GSM based passive bistatic radar[C]. 2011 IEEE Radar Conference, Chengdu, China, October 2011: 781-784.
- [8] Candes E J, Romberg J, and Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [9] Figueiredo M A T, Nowak R D, and Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Process*, 2007, 1(4): 586-597.
- [10] Kim S J, Koh K, Lustig M, et al. An interior-point method for large-scale l_1 -regularized Least Squares[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Process*, 2007, 1(4): 606-617.
- [11] Colone F, O'hagan D W, Lombardo P, et al. A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 698-722.
- [12] Candes E J and Wakin M B. An introduction to compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [13] Sun Hong-bo, Tan D K P, and Lu Yi-long. Sea and aircraft target measurements using a GSM-based passive radar [C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, May 2008: 1827-1832.
- 王海涛: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为外辐射源雷达信号处理.
- 王 俊: 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为单多基地无源探测及定位、信号检测与参数估计、自适应信号处理.