

基于压缩感知的低空风切变风速估计方法

吴仁彪* 韩雁飞 李海

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室 天津 300300)

摘要: 在机载气象雷达的低空风切变检测流程中, 风速估计精度是影响风切变检测效果的重要因素。针对脉冲数较少且信噪比较低时风速估计精度变差的问题, 该文提出一种基于压缩感知的低空风切变风速估计方法。该方法根据雷达回波信号的稀疏性, 利用多普勒矢量构建一个冗余字典以实现信号的稀疏表示, 采用观测矩阵对信号进行压缩处理, 并通过信号重构算法恢复该稀疏信号, 实现风速的精确估计。仿真实验表明: 当脉冲数较少且信噪比较低时, 该方法能够在获得精确风速估计的同时使得频谱分辨率大大提高, 即能够很好地区分在频域间隔很近的风切变与地杂波信号。

关键词: 机载气象雷达; 压缩感知; 风速估计; 低空风切变

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2512-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00121

Wind Speed Estimation for Low-attitude Wind Shear via Compressive Sensing

Wu Ren-biao Han Yan-fei Li Hai

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Among the basic steps of low-altitude wind shear detection for airborne weather radar, the wind speed estimate accuracy is the most important affecting factors. In this paper, a novel method of wind speed estimation based on compressive sensing is proposed to solve the problem of performance degradation in low signal-to-noise ratio and few pulses. According to the sparsity of radar echoes, the Doppler vector is used to design a redundant dictionary for the sparse representation of the signal. The signal compression processing is achieved by using the observation matrix, and then the reconstruction algorithm is used to recover the sparse signal and acquire the accurate estimate of the wind speed. Experimental results show that the proposed method can achieve the accurate wind speed estimation and improve the spectral resolution in low signal-to-noise ratio and few pulses, which means it can identify the wind shear and clutter spectrum even in the adjacent areas.

Key words: Airborne weather radar; Compressive Sensing (CS); Wind speed estimate; Low-attitude wind shear

1 引言

作为对航空运输安全威胁最大的天气现象之一, 低空风切变主要是指在航空器起降阶段, 在相同或不同高度(在 600 m 左右)的较短距离内, 风向或风速发生快速变化的天气现象。低空风切变发生突然并且具有持续时间短、影响强度大、危险性高等特点。在飞机起降阶段, 可操纵的高度空间受限, 若风切变强度较大就会极易引发严重的坠机事故。因此, 低空风切变探测技术的研究已成为现代航空运输领域的一个重要课题。

机载气象雷达下视探测时, 接收到的回波数据

无可避免地要受到地杂波信号的影响。一般地, 由于相对运动速度的不同, 回波信号的频谱中包括风切变信号和地杂波信号产生的两个频率谱峰, 简称其为双峰谱^[1]。依据风速估计时是否采用杂波抑制滤波器, 将常用的风速估计方法分为两大类。当功率谱为双峰谱时, 即考虑在不抑制杂波情况下的信号频谱, 常采用的方法包括基于参数化模型的谱估计方法^[1]和利用模式分析的扩展 Prony 方法^[2]; 当功率谱为单峰谱时, 即考虑没有杂波影响或抑制杂波后的信号频谱, 应用最广的估计方法是基于时域分析的脉冲对法(Pulse Pair Processing, PPP)和基于频域分析的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)法^[3]。总体来说, 由于算法简单, 运算量与硬件实现的设备量较小等优点, PPP 法在气象雷达信号处理中的应用较广, 但当信噪比较低时, 其估计

2013-01-22 收到, 2013-05-03 改回

国家自然科学基金(61071194, 60979002, 61079008)和中国民航大学基金(2011kyE06)资助课题

*通信作者: 吴仁彪 rbwu@cauc.edu.cn

性能变差。FFT 法在频域进行分析，因此能够较好地分辨非气象回波，在地杂波抑制方面要优于脉冲对法。由于 FFT 法的谱分辨率受数据长度的限制，特别是在数据长度短和低信噪比时，FFT 法和 PPP 法的风速估计性能均会变差^[4]。

压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论^[5,6]是一种充分利用信号的稀疏性或可压缩性来实现信号处理的基础理论。压缩感知技术是解决小样本参数估计的有力手段，其研究成果已应用在光学成像、图像融合、SAR 目标识别、波形信号仿真分析、探地雷达成像、雷达目标探测和目标波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计等诸多领域。

针对脉冲数较少且信噪比较低时，FFT 法和 PPP 法等风速估计方法的估计性能均会变差的问题，本文提出了一种基于压缩感知的低空风切变风速估计方法。该方法根据雷达回波信号的稀疏性，将压缩感知技术应用在低空风切变的风速估计问题中。首先将回波数据进行稀疏分解，然后利用一个高斯随机矩阵作为测量矩阵对信号进行压缩处理，再在压缩域中通过重构算法恢复该稀疏信号，最终通过非零值的位置获得该信号的多普勒频率估计，并利用估计值置零的方法抑制地杂波，实现风速的精确估计。仿真实验表明：当脉冲数较少且信噪比较低时，该方法能够在获得精确风速估计的同时使得频谱分辨率大大提高，即能够很好地区分在频域间隔很近的风切变信号与地杂波信号。

2 压缩感知的理论基础

压缩感知与传统的奈奎斯特采样定理不同，其信号观测值的数据量远远小于传统采样方法所需要的数据量。压缩感知的基本思想是：如果某种变换之后信号是可稀疏分解或可压缩的，则信号可投影到一个与变换基不相关的测量矩阵上，并获得远少于信号长度的测量值，最终通过求解优化问题精确地重构信号。压缩感知理论的基本流程如图 1 所示。

总体来说，压缩感知理论主要研究的内容包括：

(1) 找到一个合适的正交基，使得该信号在正交基上可以得到稀疏表示，即实现信号的稀疏分解。

利用压缩感知进行信号处理分析的基础和前提是信号必须在某个正交基上具有稀疏性，信号的稀疏性与所选择的正交基密切相关。对于某一给定信

号，合适的稀疏基是信号的稀疏度和恢复精度的有力保证。

假设信号 \mathbf{x} ($\mathbf{x} \in \mathbf{R}^N$) 的长度为 N ，稀疏基向量为 ψ_i ($i = 1, 2, \dots, N$)，对信号的变换表示为

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \psi_i \alpha_i = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\alpha} \quad (1)$$

式中， $\boldsymbol{\alpha}$ 是信号 \mathbf{x} 在 $\boldsymbol{\psi}$ 域中的表示。若 $\boldsymbol{\alpha}$ 中只有 K 个非零值 ($N \gg K$)，则可认为信号在 $\boldsymbol{\psi}$ 域是稀疏的。

(2) 设计一个与正交基不相关的低维度测量矩阵，即满足有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)^[7]。

利用测量矩阵的目的是采样得到 M 个测量值，并保证从中能够重构出原来长度为 N 的信号 \mathbf{x} 或者是与之等价的正交基下的系数向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 。测量过程是指利用 $M \times N$ 维的测量矩阵中的 M 个行向量对正交基下的系数向量进行投影，得到 M 个观测值，从而使观测对象从原始的 N 降到了 M 维，即

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\varphi} \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{x} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{x} \quad (2)$$

(3) 设计快速的重构算法以精确地恢复信号。

信号重构算法是压缩感知理论的核心部分，其难点在于如何从压缩测量的低维度数据中最大程度地恢复出原始的高维信号。总体来说，信号重构算法可分为凸松弛算法、贪婪追踪算法和组合算法等 3 大类^[8]。其中，贪婪追踪类算法在运行效率和采样效率等方面折中考虑，其运行时间和采样效率都位于另两类算法之间，并且结构简单、运算量小等特点使得该类方法的应用较广。

3 基于压缩感知的低空风切变风速估计方法

在雷达目标探测中，目标相对于背景的高度稀疏性，为压缩感知技术在雷达目标探测与识别中的应用创造了必要的条件^[9]。压缩感知技术在雷达目标识别中的应用主要包括两大类：第 1 类是利用复回波信号特征矢量的目标识别方法；第 2 类是利用雷达成像算法所得到的复图像目标识别方法。

机载气象雷达检测低空风切变的主要手段是依据风切变回波信号的频谱特征，即多普勒频率偏移特性。但在实际的探测过程中，微弱的低空风切变信号常会淹没在强杂波背景中，在风切变信号频谱与地杂波信号频谱邻近的区域，FFT 法难以有效地区分出风切变信号频谱和地杂波频谱。Malioutov 等人^[9]提出利用信号的稀疏表示实现超分辨率的频率估计为雷达信号处理提供了一个新思路。同时，由于 FFT 法的谱分辨率受到数据长度的限制，在数据长度短和信噪比较低时，FFT 法和 PPP 法的风

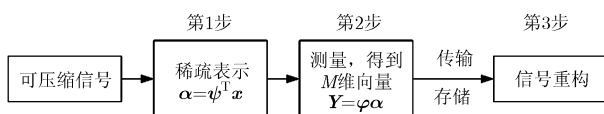


图 1 压缩感知理论的基本流程图

速估计性能均会变差。针对上述问题,本文提出一种基于压缩感知的低空风切变风速估计方法。首先,利用多普勒矢量构建一个冗余字典,并用过完备原子库中的原子实现信号的稀疏表示;其次,选择高斯随机矩阵作为测量矩阵对信号进行压缩;再次,通过信号重构算法估计回波信号的多普勒频率;最后,在分析风切变信号频谱与地杂波频谱特点的基础上,通过零多普勒频率附近的估计值置零的方法,实现地杂波抑制,并获得精确的低空风切变风速估计。

3.1 基于压缩感知的多普勒频率估计

机载气象雷达回波信号在频域仅有有限个峰值(具有稀疏性)为压缩感知技术的应用奠定了先决条件,故考虑利用多普勒矢量构建冗余字典,从而实现信号的稀疏表示。基于压缩感知的目标多普勒频率估计方法利用雷达目标在多普勒域的稀疏性,通过估计稀疏域非零值的位置,能够在有限的相干积累时间内实现高分辨率的多普勒频率估计,即实现风切变信号的风速估计。

设检测低空风切变所用的相干积累脉冲数为 N_r ,脉冲重复频率为 F_r ,将多普勒频率范围($0 \sim F_r$)等分成 N 个离散的频率点 f_1, f_2, \dots, f_N 。

频点 f_i 的多普勒矢量可以表示为^[10]

$$\mathbf{a}(f_i) = \exp \left\{ j \frac{2\pi}{F_r} [0, 1, \dots, N_r - 1]^T f_i \right\} \quad (3)$$

由各频点处的多普勒矢量构成的矩阵可写成

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(f_1), \mathbf{a}(f_2), \dots, \mathbf{a}(f_N)]$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j2\pi \frac{f_1}{F_r}} & e^{j2\pi \frac{f_2}{F_r}} & \dots & e^{j2\pi \frac{f_N}{F_r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi(N_r-1)\frac{f_1}{F_r}} & e^{j2\pi(N_r-1)\frac{f_2}{F_r}} & \dots & e^{j2\pi(N_r-1)\frac{f_N}{F_r}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

低空风切变由大量的微粒组成,属于分布式的气象目标。考虑强地杂波环境下的目标回波信号,将每个点散射体近似等效为理想的球体,计算每个散射单体的雷达回波,通过相干叠加生成每个距离单元的回波信号。因此,整个波束扫描范围内所有散射点回波的叠加即为雷达回波^[11],可表示为

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum s_i(t) + c(t) + n(t) \\ &= \sum A_i(t) \exp(-j\varphi_i(t)) + c(t) + n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $A_i(t)$ 表示第 i 个散射点的回波幅度; $\varphi_i(t)$ 表示第 i 个散射点的回波相位; $c(t)$ 表示地杂波信号, $n(t)$ 表示干扰噪声信号。将回波数据中的风切变信号和

地杂波信号等效为信号 $S(t)$,即 $S(t) = s(t) + c(t)$ 。雷达回波信号的矩阵形式为

$$\mathbf{x} = \mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (6)$$

由各频点处的多普勒矢量构成的矩阵 \mathbf{A} 即为对信号进行压缩处理的冗余字典(也可称为过完备库),其中 \mathbf{A} 的每一列都是过完备库中的原子。利用过完备库中的原子代替传统的正交基,并找到具有最佳线性组合的 m 项原子来表示目标信号,即可实现在过完备库下的信号稀疏表示。因此,接收到的目标信号 \mathbf{S} 可表示为 \mathbf{A} 中原子的线性组合,即

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n} \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{\alpha}$ 表示信号在频率域的复幅度,且 $\boldsymbol{\alpha}$ 中只有 K 个非零分量($K \ll N$),即 $\boldsymbol{\alpha}$ 是稀疏的,实现了接收数据的稀疏表示。

构造一个 $M \times N$ 维的高斯随机矩阵,并对每一列进行归一化得到测量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 。因此,压缩后 $M \times 1$ 维的测量值 \mathbf{y} 可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \boldsymbol{\Phi}\mathbf{x} \\ &= \boldsymbol{\Phi}\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\Phi}\mathbf{n} \\ &= \boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{w} \end{aligned} \quad (8)$$

式中,等效的测量矩阵 $\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{A}$,等效的噪声分量 $\mathbf{w} = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{n}$ 。通过求解式(9),得到信号的复幅度估计值 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$,并通过估计 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 中非零值的位置即可得到信号的频率估计^[12]。

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \|\boldsymbol{\alpha}\|_1, \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{y} - \boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\alpha}\| < \varepsilon \quad (9)$$

正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)是一种常用的贪婪追踪类算法。Needell等人^[13]在OMP算法的基础上提出了正则化正交匹配追踪算法(Regularized Orthogonal Matching Pursuit, ROMP),鉴于ROMP算法具有优异的信号重构性能,并对所有稀疏信号和所有满足RIP条件的矩阵都可以准确重构的特点,本文采用ROMP算法重构信号得到复幅度估计值 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 。ROMP算法的基本思想是:挑选多个原子作为候选集,并按照正则化原则从中挑选出部分原子,即实现利用正则化原则筛选信号支撑点。在此基础上,将挑选的原子索引值并入最终的支撑集以实现原子的快速、有效地选择。

3.2 算法流程

基于压缩感知的低空风切变风速估计方法,首先利用多普勒矢量构建一个冗余字典,实现雷达回波信号的稀疏表示;然后选择高斯随机矩阵作为压缩矩阵对信号进行压缩;最终在压缩域中通过ROMP重构算法恢复该稀疏信号,复幅度估计值 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 中非零值的位置即为信号的频率估计。针对某一距

离单元的回波数据，算法实现的基本步骤包括：

步骤 1 利用多普勒矢量，构建冗余字典 \mathbf{A} ；

步骤 2 构造一个 $M \times N$ 维的高斯随机矩阵，并对每一列进行归一化得到测量矩阵 Φ ；

步骤 3 利用式(8)，得到 $M \times 1$ 维的测量值 \mathbf{y} ；

步骤 4 初始化余量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$ ，估计信号的稀疏度为 K ，索引值集合 $\Lambda = \emptyset$ ，候选集 $\mathbf{J} = \emptyset$ ，迭代次数 $t = 1$ ；

步骤 5 利用相关原则筛选原子，并计算余量 \mathbf{r} 与测量矩阵 Ψ 中各个原子之间内积的绝对值，利用式(10)来计算相关系数 \mathbf{u} ，寻找 \mathbf{u} 中 K 个最大值所对应的索引值，将其存入候选集 \mathbf{J} 中。

$$\mathbf{u} = \left\{ u_j \mid u_j = \left| \langle \mathbf{r}, \Psi_j \rangle \right|, j = 1, 2, \dots, N \right\} \quad (10)$$

步骤 6 将候选集 \mathbf{J} 中索引值对应原子的相关系数拆分成若干组进行正则化处理，选择能量最大的一组，将其相关系数对应的原子索引值存入 \mathbf{J}_0 中，并且该集中原子的相关系数必须满足式(11)：

$$|\mathbf{u}(i)| \leq 2|\mathbf{u}(j)|, \quad i, j \in \mathbf{J} \quad (11)$$

步骤 7 更新支撑集 Φ_Λ ，其中 $\Lambda = \Lambda \cup \mathbf{J}_0$ ；

步骤 8 采用最小二乘法进行信号逼近，并更新余量；

$$\left. \begin{aligned} \hat{\alpha} &= \arg \min \|\mathbf{y} - \Phi_\Lambda \alpha\|_2 \\ \mathbf{r}_{\text{new}} &= \mathbf{y} - \Phi_\Lambda \hat{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

步骤 9 若原子数 $|\Lambda| \geq 2K$ ，则停止迭代；否则令 $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{\text{new}}$ ， $t = t + 1$ ，转到步骤 5。

信号重构后得到的复幅度估计值 $\hat{\alpha}$ ，只存在零值和非零值两种状态。其中，非零值的位置即对应风切变信号和地杂波信号的速度估计。由于风切变信号和地杂波信号的相对速度不同，接收的雷达回波信号频谱为双峰谱，强杂波主要集中在零多普勒频率附近，风切变信号的多普勒频率沿距离呈现出反“S”特性。利用该频谱特征，本文将位于零多普勒频率附近的估计值置零，实现抑制地杂波的目的。同时，杂波抑制后 $\hat{\alpha}$ 中最大的非零值的位置即为风切变信号的风速估计结果。设 k 表示当前的距离单元数，且 $1 \leq k \leq K$ ， K 表示机载气象雷达回波的最大距离单元数。依据距离单元数判断风速估计是否完成，算法实现的流程图如图 2 所示。

4 仿真结果及分析

4.1 超分辨率的频率估计结果

参照实际装机使用的 WXR-2100 型机载气象雷达，基本的仿真参数设定如下：飞机高度 600 m，飞机速度 75 m/s，雷达发射功率 100 W，波束宽度 3.5° ，波束下视角 2.75° ，脉冲重复频率 7000 Hz，

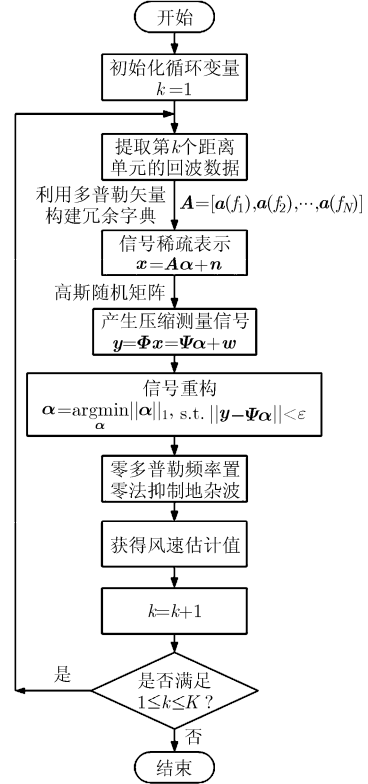


图 2 基于压缩感知的风速估计方法的流程图

发射脉宽 $1 \mu\text{s}$ ，天线增益 30 dB，相干脉冲数 128，杂噪比 30 dB，信噪比 5 dB。设脉冲数减少时的信号为顺序选取原始信号的前 64 个脉冲回波，以第 49 号距离单元(约 7.35 km)的回波数据为例，分别利用 FFT 方法与 CS 方法估计的信号频谱如图 3 所示。

图 3 中虚线和实心点曲线分别表示 FFT 方法与 CS 方法估计的信号频谱，由仿真结果可见：当相干处理的脉冲数较少时，频域能量积累不足且频谱展宽严重，在风切变信号频谱与地杂波信号频谱相近的区域，FFT 方法的估计结果已无法区分风切变信号，但 CS 方法仍能够清楚地表征原始信号的多普勒中心频率的频谱特征，即可获得风切变信号与地杂波信号的双峰谱。将估计结果与原始的风切变信号频谱和原始的地杂波信号频谱对比，可以发现频谱中的双峰位置与原始信号一致，更加证实了基于压缩感知的多普勒频率估计方法的有效性。

从计算量的角度分析，基于傅里叶分析的方法的运算量为 $O(N_r \log_2(N_r))$ ，该类方法运算速度最快，但不具备超分辨率的性能；Pisarenko 和 MUSIC 等超分辨率谱估计方法的运算量为 $O(N_r^3)$ ；基于压缩感知的多普勒频率估计方法的运算量为 $O(N_r MK)$ ，该方法不但具有超分辨率的性能，并且其计算量相比于 Pisarenko 和 MUSIC 等超分辨率谱估计方法具有明显的优势。

4.2 风速估计结果

在回波信号频谱特征分析的基础上, 利用强杂波主要集中在零多普勒频率附近的频谱分布特性, 将位于零多普勒频率附近的多普勒估计值置零, 从而实现抑制地杂波的目的。该方法避免了复杂的滤波器设计环节, 能够简单有效地实现杂波抑制。杂波抑制后的回波信号频谱分布如图4所示。

首先, 利用传统的固定凹口滤波器和自适应频域置零方法抑制地杂波; 其次, 采用PPP法对杂波抑制后的回波数据进行风速估计; 最后将该估计结果与利用本文方法得到的风速估计结果进行对比分析。脉冲数 $N_r = 64$ 和 $N_r = 32$ 的速度估计对比分析结果分别如图5和图6所示。

图5(a)表示脉冲数为64时, 全距离单元的风速估计结果。约在 $0 \sim 2$ km 和 $11 \sim 15$ km 处不存在风切变信号, 即只包含噪声和杂波信号, 可以认为杂波抑制后的估计值为噪声速度。图5(b)的局部图可有助于重点观察存在风切变信号区域(约 $3 \sim 11$ km 处)的风速估计结果。同理, 图6(a)表示脉冲数为32时, 全距离单元的风速估计结果。图6(b)为其风切变信号风速估计的局部图。对比图中传统的固定凹口滤波器和自适应频域置零方法等抑制杂波后的速

度估计结果, 由仿真结果可见:

(1)当脉冲数减少到 $N_r = 64$ 时, 利用传统的固定凹口滤波器和自适应频域置零方法抑制杂波后的速度估计精度均有明显下降。相比之下, 基于压缩感知的速度估计与原始的速度分布最为接近, 估计误差较小。

(2)当脉冲数减少到 $N_r = 32$ 时, 由于时域数据减少, 频域能量积累不足且频谱展宽严重, 自适应频域置零方法抑制杂波后的速度估计已完全失真。固定凹口滤波器方法在风切变信号与杂波频谱邻近的区域, 速度估计产生了较大的波动。此时的估计误差也是由于谱宽估计较大, 造成滤波器凹口增大, 致使有用的目标信号在杂波抑制时被白化造成的。基于压缩感知的低空风切变风速估计方法对相干处理的脉冲数不敏感, 当脉冲数减少到 $N_r = 32$ 时, 该方法仍能获得高精度的风速估计, 明显优于上述两种方法。

5 结束语

针对脉冲数较少且信噪比较低时风速估计精度变差的问题, 本文提出了一种基于压缩感知的低空风切变风速估计方法。在基本的压缩感知理论概述

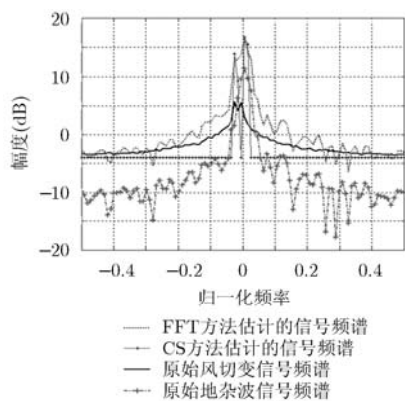


图3 FFT法与CS法估计信号的频谱对比图

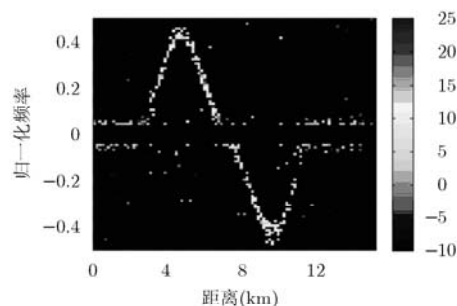


图4 杂波抑制后回波信号频谱分布图

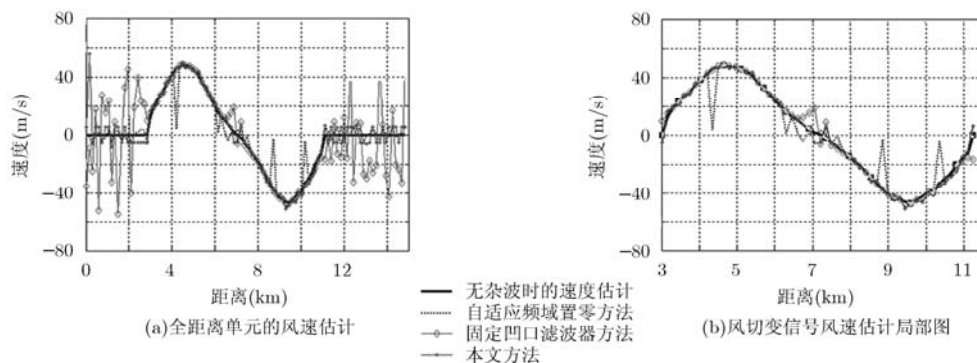


图5 脉冲数为64的速度估计结果

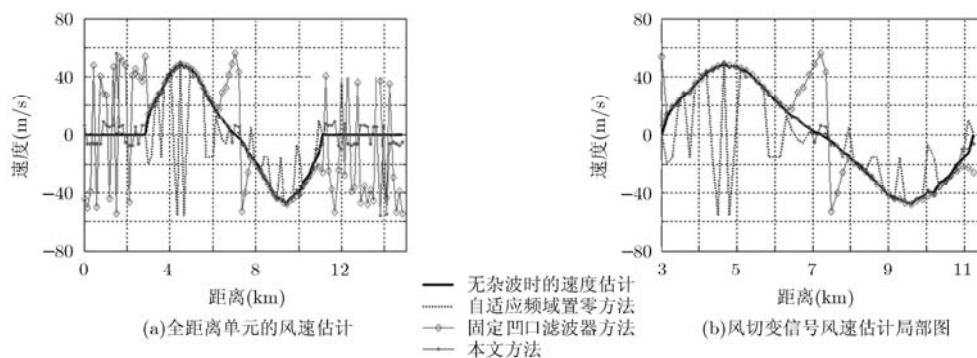


图 6 脉冲数为 32 的速度估计结果

的基础上, 该方法从回波信号的稀疏表示、测量矩阵构造、ROMP 信号重构算法和估计值置零抑制杂波等方面展开。仿真实验结果表明: 当脉冲数较少且信噪比较低时, 基于压缩感知的低空风切变风速估计方法能够在获得精确的风速估计结果的同时使得频谱分辨率大大提高, 即能够很好地区分在频域间隔很近的风切变与地杂波信号。

参 考 文 献

- [1] Moscardini C, Berizzi F, Martorella M, *et al.* Signal spectral modeling for airborne radar in the presence of windshear phenomena[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(7): 796-805.
- [2] 白建, 李勇, 高霞, 等. 基于 Prony 模型的低空风切变快速检测算法[J]. *计算机测量与控制*, 2009, 17(10): 1889-1891.
Bai Jian, Li Yong, Gao Xia, *et al.* Low-level wind shear detection algorithm based on Prony model[J]. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(10): 1889-1891.
- [3] Britt C L, Harrah S D, and Crittenden L H. Microburst hazard detection performance of the NASA experimental windshear radar system[C]. AIAA Aircraft Design, Systems and Operations Meeting, Monterey, 1993: 1-13.
- [4] Kunkel M W. Spectrum modal analysis for the detection of low-altitude wind shear with airborne Doppler radar[R]. NASA Contractor Report 4457, 1992.
- [5] 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 Guang-ming, Liu Dan-hua, Gao Da-hua, *et al.* Advances in theory and application of compressed sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [6] 金坚, 谷源涛, 梅顺良. 压缩采样技术及其应用[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(2): 470-475.
Jin Jian, Gu Yuan-tao, and Mei Shun-liang. An introduction to compressive sampling and its applications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 470-475.
- [7] 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.
- [8] 张弓, 杨萌, 张劲东, 等. 压缩感知在雷达目标探测与识别中的研究进展[J]. *数据采集与处理*, 2012, 27(1): 1-12.
Zhang Gong, Yang Meng, Zhang Jin-dong, *et al.* Advances in theory and application of compressed sensing in radar target detection and recognition[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(1): 1-12.
- [9] Malioutov D, Cetin M, and Willsky A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(8): 3010-3022.
- [10] 刘寅, 吴顺君, 张怀根, 等. 一种快速的基于压缩感知的多普勒高分辨方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(2): 82-87.
Liu Yin, Wu Shun-jun, Zhang Huai-gen, *et al.* Low complexity compressed sensing based Doppler high resolution algorithm[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2011, 38(2): 82-87.
- [11] Cheong B L, Palmer R D, and Xue M. A time series weather radar simulator based on high-resolution atmospheric models[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(2): 230-243.
- [12] 刘兆霆, 何劲, 刘中. 基于压缩感知的高分辨率频率估计[J]. *信号处理*, 2009, 25(8): 1252-1256.
Liu Zhao-ting, He Jin, and Liu Zhong. High resolution frequency estimation with compressed sensing[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(8): 1252-1256.
- [13] Needell D and Vershynin R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(2): 310-316.

吴仁彪: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理、现代谱分析及其在雷达、卫星导航和空中交通管理方向的应用等。

韩雁飞: 女, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为机载气象雷达信号处理。

李海: 男, 1976 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理、空时自适应信号处理等。