第 1 卷第 4 期 雷 达 学 报 Vol.1No.4
2012 年 12 月 Journal of Radars Dec. 2012

基于复图像 OMP 分解的宽带雷达微动特征提取方法

罗 迎*① 张 群① 王国正② 管 桦① 柏又青②
①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)
②(空军工程大学理学院 西安 710051)

摘 要：针对宽带雷达中目标微动散射点发生越距离单元走动和方位欠采样条件下的微动特征提取问题，该文提出了一种基于复图像正交匹配追踪 (OMP)分解的微动特征提取新方法。该方法利用目标“距离-慢时间像”的幅度和相位信息，构造复图像空间的微多普勒信号原子集，将向量空间的 OMP 算法拓展到复图像空间，实现了距离-慢时间平面上目标微动特征的提取。仿真实验表明该方法能够有效提取微动散射点发生越距离单元走动条件下的微动特征，并且可以实现方位欠采样时的微动特征提取。

关键词：微动；微多普勒；正交匹配追踪 (OMP)；宽带雷达
中图分类号：TN957 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2012)04-0361-09
DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20065

Micro-motion Signature Extraction Method for Wideband Radar Based on Complex Image OMP Decomposition

Luo Ying① Zhang Qun① Wang Guo-zheng② Guan Hua① Bai You-qing②
①(*Institute of Information and Navigation*, *Air Force Engineering University*, *Xi'an* 710077, *China*)
②(*Institute of Science*, *Air Force Engineering University*, *Xi'an* 710051, *China*)

Abstract: In order to extract the micro-motion signatures in condition of Migration Through Range Cells (MTRC) of micro-motional scatterers and azimuthal undersampling in wideband radar, a method based on the Orthogonal Matching Pursuit (OMP) decomposition of the complex image is proposed. By making use of the amplitude and phase information of “range-slow-time image”, a set of micro-Doppler signal atoms is constructed in the complex image space. The OMP algorithm in vector space is then extend to the complex image space to obtain the micro-motion parameters. Simulations demonstrate the proposed method can extract the micro-motion signatures when MTRC of micro-motional scatterers is occurred, and can also work well when the sampling rate is lower than the Nyquist sampling rate.

Key words: Micro-motion; Micro-Doppler; Orthogonal Matching Pursuit (OMP); Wideband radar

1 引言

近年来，雷达目标的“微多普勒(micro-Doppler effect, m-D effect)”效应已成为目标特征提取与识别领域的研究热点，基于微动(Micro-motion)特征的目标识别技术被认为是雷达目标识别技术中最具发展潜力的技术之一[1]。自从 2000 年 V. C. Chen 提出微多普勒的概念以来[2]，有关微动特征提取的技术得到了较多的研究，特别是窄带雷达中微动特征提取已经得到了较为广泛的研究。时频分析是使用最为广泛的技术，如 V. C. Chen 详细分析了高分辨时频分析方法在微动特征提取中的应用[3,4]；T. Thayaparan 等人研究了自适应联合时频分析和小波变换理论用于微多普勒信息的检测和分离，并从直升机和人体回波中成功提取了微多普勒信号[5]；等等。基于微动参数估计的空间目标和地面目标识别技术也得到了较为深入的研究[6−9]；文献[10,11]还研究了基于微动特征的低分辨雷达多目标分辨技术。

随着宽带雷达信号处理技术的发展与成熟，高分辨成像雷达得到了日趋广泛的应用。在宽带雷达中，若微动点在成像期间没有发生越距离单元走动，则可以通过抽取该微动点所在距离单元信号进行分析来获得其微动特征，如在每个距离单元回波中采用 chirplet 变换[12]、EMD 分解[13]、AM-LFM 分解[14]

2012-09-12 收到，2012-11-12 改回；2012-11-22 网络优先出版
国家自然科学基金(61201369, 61172169)资助课题
*通信作者： 罗迎 luoying2002521@163.com

等方法分离微多普勒信号片段，由分离出的信号片段来重构目标的微动特征。然而，由于宽带雷达的距离高分辨能力，目标的微动通常导致散射点发生越距离单元走动，散射点回波能量分布在多个距离单元中，每个距离单元回波无法包含微动点的全部回波信号，上述方法运算复杂且难以取得较好效果。更进一步地，当目标微动速度较大时，微多普勒谱宽较大，而雷达脉冲重复频率往往不可能很高，这将导致微多普勒信号的欠采样，如雷达发射信号载频为 10 GHz、微动点旋转频率为 4 Hz、旋转半径为 6 m 时，微多普勒谱宽将达到 20 kHz，若要保证对微多普勒谱的奈奎斯特采样，将对雷达脉冲重复频率提出很高的要求。当雷达脉冲重复频率小于两倍微多普勒谱宽时，微多普勒信号将在频域出现卷绕。这也给现有微动特征提取方法带来了很大困难。

针对宽带雷达中目标微动散射点发生越距离单元走动和方位欠采样条件下的微动特征提取问题，本文提出了一种基于复图像正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)分解的宽带雷达微动特征提取方法。由于宽带雷达的距离高分辨能力，我们可通过分析目标 1 维距离像序列的变化特征来挖掘目标的微动特征，即从目标回波“距离-慢时间像”入手来获取目标微动特征。本文以典型的旋转形式微动为例，通过利用“距离-慢时间像”的幅度和相位信息，构造复图像空间的微多普勒信号原子集，将向量空间的 OMP 算法拓展到复图像空间，实现了距离-慢时间平面上旋转目标微动特征的提取。该方法能够有效提取微动散射点发生越距离单元走动条件下的微动特征，并且可以实现欠采样条件下的微动特征提取。仿真实验表明该算法具有较好的鲁棒性。

2 旋转微动目标的宽带雷达回波

线性调频(LFM)信号是宽带雷达中应用最为广泛的波形，因此我们以线性调频信号为例来推导旋转微动目标的宽带雷达回波表达式。建立如图 1 所示的雷达与目标几何模型，图中$OXYZ$为全局坐标系，$oxyz$为本地坐标系，3 个坐标轴分别与$OXYZ$的对应坐标轴平行，o点在坐标系$OXYZ$中的初始坐标为(X_o,Y_o,Z_o)。雷达位于原点O。假设目标由$oxyz$以速度$\boldsymbol{\nu}=[v_X\ \ v_Y\ \ v_Z]^{\mathrm{T}}$平动到$o'x'y'z'$，同时，目标上一个散射点$P$绕$C$点以角速度$\boldsymbol{\omega}=[\omega_x\ \ \omega_y\ \ \omega_z]^{\mathrm{T}}$旋转，$C$点在本地坐标系$oxyz$中的坐标为$(x_C,y_C,z_C)$。令$\Omega=\|\boldsymbol{\omega}\|$。

雷达发射 LFM 信号时，目标上散射点P的回波信号可表示为

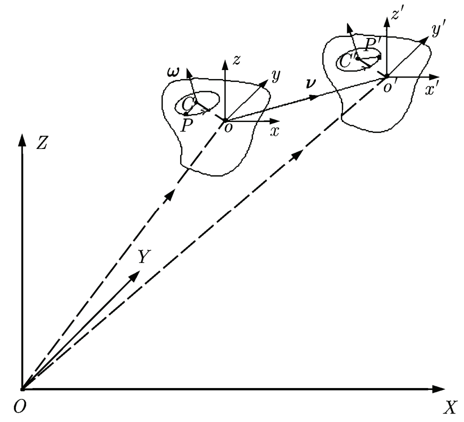


图 1 雷达与旋转微动目标的几何模型

$$s_p(t,t_{\mathrm{m}})=\sigma_P\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_p(t_{\mathrm{m}})}{T_{\mathrm{p}}}\right)\cdot\exp\left(j2\pi\left(f_{\mathrm{c}}\left(t-\tau_p(t_{\mathrm{m}})\right)+\frac{1}{2}\mu\left(t-\tau_p(t_{\mathrm{m}})\right)^2\right)\right)\tag{1}$$

其中t为快时间，t_{m}为慢时间，σ_P为P的散射系数，T_{p}为脉冲宽度，f_{c}为起始载频，μ为调频斜率，$\tau_p(t_{\mathrm{m}})=2R_P(t_{\mathrm{m}})/c$为$t_{\mathrm{m}}$时刻散射点$P$到雷达距离延时，$R_P(t_{\mathrm{m}})$为$t_{\mathrm{m}}$时刻$P$点到雷达的距离，$c$为光速。取$o$点为参考点，则参考信号可写为

$$s_0(t,t_{\mathrm{m}})=\mathrm{rect}\left(\frac{t-\tau_0(t_{\mathrm{m}})}{T_{\mathrm{p}}}\right)\cdot\exp\left(j2\pi\left(f_{\mathrm{c}}\left(t-\tau_0(t_{\mathrm{m}})\right)+\frac{1}{2}\mu\left(t-\tau_0(t_{\mathrm{m}})\right)^2\right)\right)\tag{2}$$

其中$\tau_0(t_{\mathrm{m}})=2R_0(t_{\mathrm{m}})/c$，$R_0(t_{\mathrm{m}})$为$t_{\mathrm{m}}$时刻$o$点到雷达的距离。回波信号与参考信号进行“dechirp”处理后，变换到快时间频率域并去除剩余视频相位(Residual Video Phase, RVP)后，得到[15]

$$S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}})=\sigma_P T_{\mathrm{p}}\mathrm{sinc}\left(T_{\mathrm{p}}\left(f+\frac{2\mu}{c}\Delta R(t_{\mathrm{m}})\right)\right)\cdot\exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_{\mathrm{m}})\right)\tag{3}$$

其中$\Delta R(t_{\mathrm{m}})=R_P(t_{\mathrm{m}})-R_0(t_{\mathrm{m}})$，$\lambda$为雷达发射信号波长。可以看出，$|S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}})|$的峰值位于$f=-2\mu\cdot\Delta R(t_{\mathrm{m}})/c$，此即散射点$P$的 1 维距离像，其峰值在距离像上的位置由$\Delta R(t_{\mathrm{m}})$确定。通过乘以因子$-c/(2\mu)$，$f$可被转化为点目标到参考点的径向距离$R_\Delta$。式(3)由于是关于频率(距离)和慢时间的函数，因此可称为目标回波的“距离-慢时间像”(文献[15]将其称为“谱图(Spectrogram)”)。

根据图 1 中的几何关系，可以得到

$$\begin{aligned}R_0(t_{\mathrm{m}}) &= \|\mathbf{Oo}+\boldsymbol{\nu}t_{\mathrm{m}}\| \\ &= \sqrt{(X_o+v_Xt_{\mathrm{m}})^2+(Y_o+v_Yt_{\mathrm{m}})^2+(Z_o+v_Zt_{\mathrm{m}})^2}\end{aligned} \tag{4}$$

上式用泰勒级数展开，忽略高次项后得到

$$R_0(t_{\mathrm{m}}) = R_0(0)+\frac{X_ov_X+Y_ov_Y+Z_ov_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}t_{\mathrm{m}} \tag{5}$$

令 $R_C(t_{\mathrm{m}})$ 表示慢时间 t_{m} 时刻 C' 点到雷达的距离，则有

$$\begin{aligned}&R_C(t_{\mathrm{m}}) \\ &= \|\mathbf{Oo}+\mathbf{oC}+\boldsymbol{\nu}t_{\mathrm{m}}\| \\ &= \Big((X_o+x_C+v_Xt_{\mathrm{m}})^2+(Y_o+y_C+v_Yt_{\mathrm{m}})^2 \\ &\quad +(Z_o+z_C+v_Zt_{\mathrm{m}})^2\Big)^{1/2} \\ &\approx R_C(0)+\frac{(X_o+x_C)v_X+(Y_o+y_C)v_Y+(Z_o+z_C)v_Z}{\sqrt{(X_o+x_C)^2+(Y_o+y_C)^2+(Z_o+z_C)^2}}t_{\mathrm{m}}\end{aligned} \tag{6}$$

当 P 点绕 C 点做旋转运动时，t_{m} 时刻雷达与目标的几何关系可以重画为图 2 所示，雷达位于远场的 O 点，$\mathbf{OC}'$ 的长度为 $R_C(t_{\mathrm{m}})$，$\mathbf{OP}'$ 的长度为 $R_P(t_{\mathrm{m}})$。$\boldsymbol{n}$ 为雷达视线方向(Line Of Sight, LOS)的单位向量，$\boldsymbol{n}'$ 为 $\boldsymbol{n}$ 在由 P 点旋转轨迹所张成的平面上的投影。由于 $\|\mathbf{C'P'}\| \ll \|\mathbf{OP}'\|$ 和 $\|\mathbf{C'P'}\| \ll \|\mathbf{OC}'\|$，有

$$\begin{aligned}R_P(t_{\mathrm{m}}) &= \|\mathbf{OC}'+\mathbf{C'P'}\| \approx \|\mathbf{OC}'\|+\|\mathbf{C'P}_1\| \\ &= R_C(t_{\mathrm{m}})+\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon\end{aligned} \tag{7}$$

其中 P_1 点是 P' 点在雷达视线方向上的投影，ε 为 $\boldsymbol{n}$ 与 $\boldsymbol{\omega}$ 之间的夹角，θ 为初相。因此可得

$$\begin{aligned}\Delta R(t_{\mathrm{m}}) &= R_P(t_{\mathrm{m}})-R_0(t_{\mathrm{m}}) = R_C(0) \\ &\quad +\frac{(X_o+x_C)v_X+(Y_o+y_C)v_Y+(Z_o+z_C)v_Z}{\sqrt{(X_o+x_C)^2+(Y_o+y_C)^2+(Z_o+z_C)^2}}t_{\mathrm{m}} \\ &\quad +\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon-R_0(0) \\ &\quad -\frac{X_ov_X+Y_ov_Y+Z_ov_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}t_{\mathrm{m}} \\ &\approx (R_C(0)-R_0(0))+\frac{x_Cv_X+y_Cv_Y+z_Cv_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}t_{\mathrm{m}} \\ &\quad +\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon\end{aligned} \tag{8}$$

将上式代入式(3)，可得

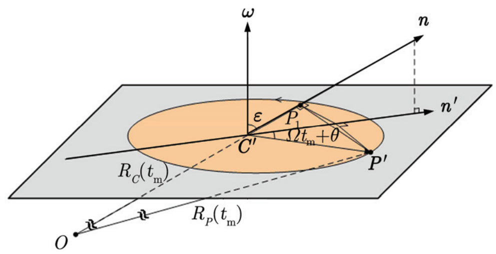


图 2 雷达与旋转微动目标的几何简化模型

$$\begin{aligned}S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}}) &= \sigma_PT_{\mathrm{p}}\mathrm{sinc}\Bigg(T_{\mathrm{p}}\Bigg(f+\frac{2\mu}{c}\Bigg(R_C(0)-R_0(0) \\ &\quad +\frac{x_Cv_X+y_Cv_Y+z_Cv_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}t_{\mathrm{m}} \\ &\quad +\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon\Bigg)\Bigg)\Bigg) \\ &\quad \cdot\exp\Bigg(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Bigg(R_C(0)-R_0(0) \\ &\quad +\frac{x_Cv_X+y_Cv_Y+z_Cv_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}t_{\mathrm{m}} \\ &\quad +\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon\Bigg)\Bigg)\end{aligned} \tag{9}$$

从式(8)可以看出，$\Delta R(t_m)$ 由 3 项组成：第 1 项 $R_C(0)-R_0(0)$ 为常量；第 2 项是关于 t_m 的 1 次项，是由目标主体相对雷达的运动引起的，事实上，该项是 ISAR 成像中实现方位向成像的关键；最后 1 项是微多普勒项。通常，当雷达位于远场时，第 2 项的值很小，若假设目标主体散射点在成像过程中不发生越距离单元走动，则第 2 项的值小于距离分辨单元，因此式(9)可以近似为

$$\begin{aligned}S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}}) &= \sigma_PT_{\mathrm{p}}\mathrm{sinc}\Bigg(T_{\mathrm{p}}\Bigg(f+\frac{2\mu}{c}\Bigg(R_C(0)-R_0(0) \\ &\quad +\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon\Bigg)\Bigg)\Bigg) \\ &\quad \cdot\exp\Bigg(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Bigg(R_C(0)-R_0(0) \\ &\quad +\frac{x_Cv_X+y_Cv_Y+z_Cv_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}t_{\mathrm{m}} \\ &\quad +\|\mathbf{C'P'}\|\cos(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta)\sin\varepsilon\Bigg)\Bigg)\end{aligned} \tag{10}$$

分析式(10)可知，目标回波距离-慢时间像的相位即包括了由目标微动引起的余弦项，还包括了由目标主体相对雷达运动引起的关于 t_{m} 的 1 次项。对于某个给定的 f，对式(10)的相位关于 t_{m} 求导并除以 2π，即得到信号的瞬时频率

$$f_{\mathrm{d}}(t_{\mathrm{m}})=-\frac{2}{\lambda}\cdot\frac{x_C v_X+y_C v_Y+z_C v_Z}{\sqrt{X_o^2+Y_o^2+Z_o^2}}+\frac{2\Omega\left\|\mathbf{C}'\mathbf{P}'\right\|\sin\varepsilon}{\lambda}\sin(\Omega t_{\mathrm{m}}+\theta) \tag{11}$$

上式右边第 1 项为目标主体的多普勒频率，第 2 项则为微动点的微多普勒频率。令

$$\hat{d}=R_C(0)-R_0(0)\,,\ \hat{r}=\left\|\mathbf{C}'\mathbf{P}'\right\|\sin\varepsilon\,,$$
$$\hat{\Omega}=\Omega\,,\ \hat{\theta}=\theta\,,\ \hat{f}=\frac{x_C v_X+y_C v_Y+z_C v_Z}{\sqrt{{X_o}^2+{Y_o}^2+{Z_o}^2}} \tag{12}$$

则式(11)可以重写为

$$S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}})=\sigma_P T_{\mathrm{p}}\mathrm{sinc}\left(T_{\mathrm{p}}\left(f+\frac{2\mu}{c}\left(\hat{d}+\hat{r}\cos\left(\hat{\Omega}t_{\mathrm{m}}+\hat{\theta}\right)\right)\right)\right)\cdot\exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(\hat{f}t_{\mathrm{m}}+\hat{d}+\hat{r}\cos\left(\hat{\Omega}t_{\mathrm{m}}+\hat{\theta}\right)\right)\right) \tag{13}$$

式(13)即为线性调频信号宽带雷达中旋转微动的回波表达式。可以看出，式(13)的模值$\left|S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}})\right|$将在距离-慢时间平面上呈现为基线为$\hat{d}$、频率为$\hat{\Omega}$、振幅为$\hat{r}$、初相为$\hat{\theta}$的余弦曲线，这表明微动点在多个距离单元之间发生了走动；相位则由参数$\left(\hat{d},\hat{r},\hat{\Omega},\hat{\theta},\hat{f}\right)$确定。

3 复图像 OMP 分解算法

在信号处理中，信号的分解与重构具有十分重要的意义。近年来，随着信号处理理论的发展，信号的非正交分解得到了广泛的重视。Mallat 和 Zhang 首先与 1993 年提出了“匹配追踪(Matching Pursuit, MP)”的思想[16]，通过将信号分解到一组过完备的非正交基上，从而得到信号的一个稀疏表达，实现对信号特征的高效提取。在 MP 算法基础上，Y. C. Pati 等人进一步提出了“正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)”的思想[17]，通过将字典中的原子按施密特正交化方法进行正交化处理，然后再用类似 MP 算法的方法实现信号的迭代分解，这使得该算法能够以比 MP 更快的速度收敛[18]。由于分解效率高且又简单易行，OMP 算法近年来在信号处理特别是稀疏信号处理中得到了广泛应用。因此，本文拟采用 OMP 算法来提取目标微动特征。

由 OMP 算法原理可知，字典中的原子应按照待分解信号的内在特性来构造。根据微动目标的回波表达式(13)，在对回波进行离散化后，假设在快时间频域上有 N_{A} 个采样点，在慢时间域共发射了 N_{B} 个脉冲，则离散化后的距离-慢时间回波信号为 $N_{\mathrm{A}}\times N_{\mathrm{B}}$ 的矩阵：

$$\boldsymbol{S}=\left[S_{\mathrm{d}}(f,t_{\mathrm{m}})\right] \tag{14}$$

可见微动点的距离-慢时间像由$\left(\hat{d},\hat{r},\hat{\Omega},\hat{\theta},\hat{f}\right)$确定。因此，为了提取回波信号中的微多普勒信号参数，可以通过设定$\left(\hat{d},\hat{r},\hat{\Omega},\hat{\theta},\hat{f}\right)$的不同取值来构造原子集$\left\{A^{(l)}(f,t_{\mathrm{m}})\right\}$，其中上标$(l)$表示原子在原子集中的序号。原子集中的第$l$个原子可表示为

$$\boldsymbol{A}^{(l)}=\left[A^{(l)}(f,t_{\mathrm{m}})\right]=\mathrm{sinc}\left(T_{\mathrm{p}}\left(f+\frac{2\mu}{c}\left(\hat{d}_l+\hat{r}_l\cos\left(\hat{\Omega}_l t_{\mathrm{m}}+\hat{\theta}_l\right)\right)\right)\right)\cdot\exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(\hat{f}_l t_{\mathrm{m}}+\hat{d}_l+\hat{r}_l\cos\left(\hat{\Omega}_l t_{\mathrm{m}}+\hat{\theta}_l\right)\right)\right) \tag{15}$$

并对原子集里的每个原子进行能量单位化：$\boldsymbol{A}^{(l)}\leftarrow\boldsymbol{A}^{(l)}/\left\|\boldsymbol{A}^{(l)}\right\|_F$，其中$\|\cdot\|_F$表示矩阵的 Frobenius 范数。

显然，不同于通常的向量信号分解，式(15)定义的原子集中的原子均为复图像，因此需要将C^N空间的 OMP 算法拓展到$C^{N_{\mathrm{A}}\times N_{\mathrm{B}}}$空间。定义$C^{N_{\mathrm{A}}\times N_{\mathrm{B}}}$空间中的内积运算如下：

$$\langle\boldsymbol{U},\boldsymbol{V}\rangle=\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{A}}}\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{B}}}u_{a,b}v_{a,b}^{*}=\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{U}\boldsymbol{V}^{\mathrm{H}}\right) \tag{16}$$

其中$\boldsymbol{U}$和$\boldsymbol{V}$均为$N_{\mathrm{A}}\times N_{\mathrm{B}}$的矩阵，上标“H”表示共轭转置。显然有如下结论：

$$\langle\boldsymbol{U},\boldsymbol{U}\rangle=\sum_{a=1}^{N_{\mathrm{A}}}\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{B}}}u_{a,b}u_{a,b}^{*}=\|\boldsymbol{U}\|_F^2 \tag{17}$$

在$C^{N_{\mathrm{A}}\times N_{\mathrm{B}}}$空间中利用 OMP 算法提取距离-慢时间平面上的微多普勒信号参数的步骤如下：

Step 0 初始化：余量$\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}0}=\boldsymbol{S}$，最大投影位置记录向量$\varsigma_0=[\,]$，匹配原子集合$\boldsymbol{H}_0=\varnothing$，信号能量阈值$\delta>0$，迭代次数计数器$g=1$，最大迭代次数$G$；

Step 1 计算$\left\{\left\langle\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}g-1},\boldsymbol{A}^{(l')}\right\rangle;\boldsymbol{A}^{(l')}\in\left\{\boldsymbol{A}^{(l)}\right\}\setminus\boldsymbol{H}_{g-1}\right\}$；

Step 2 寻找$\boldsymbol{A}^{(g')}\in\left\{\boldsymbol{A}^{(l)}\right\}\setminus\boldsymbol{H}_{g-1}$使得

$$\left|\left\langle\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}g-1},\boldsymbol{A}^{(g')}\right\rangle\right|\geq\alpha\sup_{l'}\left|\left\langle\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}g-1},\boldsymbol{A}^{(l')}\right\rangle\right| \tag{18}$$

其中$\boldsymbol{A}^{(l')}\in\left\{\boldsymbol{A}^{(l)}\right\}\setminus\boldsymbol{H}_{g-1}$，$0<\alpha\leq 1$；

Step 3 若$\left|\left\langle\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}g-1},\boldsymbol{A}^{(g')}\right\rangle\right|<\delta$，停止迭代；

Step 4 记录$\boldsymbol{A}^{(g')}$在原子集$\left\{\boldsymbol{A}^{(l)}\right\}$中的序号：$\varsigma_g=\left[\varsigma_{g-1}\quad g'\right]$；令$\boldsymbol{h}_g=\boldsymbol{A}^{(g')}$，$\boldsymbol{H}_g=\boldsymbol{H}_{g-1}\cup\left\{\boldsymbol{h}_g\right\}$；

Step 5 求解满足下式的$\boldsymbol{x}=[x_i],i=1,2,\cdots,g$：

$$\min\left\|\boldsymbol{S}-\sum_{i=1}^{g}x_i\boldsymbol{h}_i\right\|_F^2 \tag{19}$$

根据最小二乘法，可得(证明见附录 A)：

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}\langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_1\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_1\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_1\rangle\\ \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_2\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_2\rangle\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_g\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_g\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_g\rangle\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_1\rangle\\ \langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_2\rangle\\ \vdots\\ \langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_g\rangle\end{bmatrix} \tag{20}$$

Step 6　更新余量：$\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}_g}=\boldsymbol{S}-\sum_{i=1}^{g}x_i\boldsymbol{h}_i$，该余量与 $\boldsymbol{H}_g$ 中的原子均保持正交(证明见附录 B)；

Step 7　令 $g\leftarrow g+1$，若 $g\le G$，重复 Step 1 到 Step 7；若 $g>G$，停止迭代。

经过 G 次迭代后，信号 $\boldsymbol{S}$ 被分解为如下表达式：

$$\boldsymbol{S}=\sum_{i=1}^{G}x_i\boldsymbol{h}_i+\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}_g} \tag{21}$$

x_i 即为各分量 $\boldsymbol{h}_i$ 的系数。

当 $N_{\mathrm{A}}=1$ 时，上述算法退化为 $C^{N_{\mathrm{B}}}$ 空间中的常规 OMP 算法。

从原子集中原子的构造方法可以看出，每个原子由幅度与相位两部分构成，在 PRF 低于微多普勒信号奈奎斯特采样频率时，尽管微多普勒信号和原子的相位均会产生卷绕，但幅度信息并不受欠采样的影响，因此该算法在理论上适用于欠采样条件下的微多普勒信号分析与特征提取。但由于距离分辨率的限制，当距离-慢时间平面上的余弦曲线振幅 $\hat{r}$ 小于距离分辨单元时，原子幅度中的 2 维 sinc 函数基本不随 t_{m} 的变化而变化，从而失去了在欠采样条件下准确提取微多普勒信号特征的能力。不过，当 $\hat{r}$ 小于距离分辨单元时，微多普勒信号谱宽较小，如雷达发射信号载频为 10 GHz、带宽 500 MHz、微动点旋转频率为 4 Hz、$\hat{r}$ 为 0.1 m 时，微多普勒谱宽大约为 335 Hz，一般雷达的 PRF 都可以满足过采样要求。

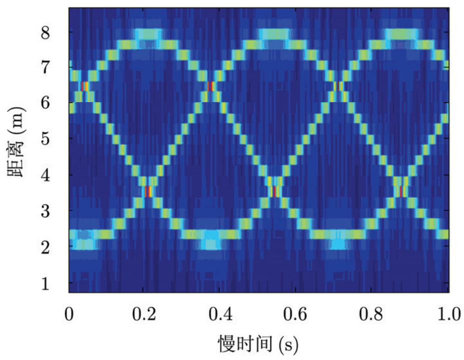
由于在构造原子集时采用了 5 个变量，这将导致原子集里的原子数量很大。当目标主体为平稳运动时，目标主体相对雷达转动引起的多普勒频移可以被估计[19]，因此变量 $(\hat{d},\hat{r},\hat{\Omega},\hat{\theta},\hat{f})$ 中 $\hat{f}$ 的取值基本可以确定，从而将 5 个变量减为 4 个变量，达到降低运算量的目的。

4　仿真验证与性能分析

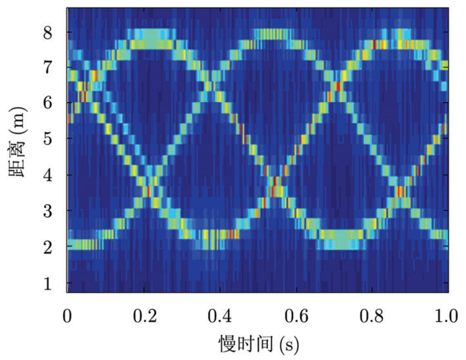
4.1 算法有效性验证

仿真参数设置如下：雷达位于坐标原点，发射信号载频为 10 GHz，脉宽 $T_{\mathrm{p}}=4\ \mu\mathrm{s}$，带宽为 500 MHz，距离分辨率为 0.3 m。脉冲重复频率 PRF=1000 Hz。目标参考点的初始坐标为(30 km, 0 km, 0 km)，目标运动速度向量为 $[0\ 300\ 0]^{\mathrm{T}}$ m/s，目标由 3 个旋转散射点构成，当以参考点坐标作为目标本地坐标系的原点时，旋转中心在本地坐标系中的坐标为(5 m, 5 m, 5 m)，旋转角速度向量为 $\boldsymbol{\omega}=[0\ 0\ 2\pi]^{\mathrm{T}}$ rad/s，角速度大小 $\Omega=2\pi$ rad/s，旋转半径为 2.8284 m。计算可得微多普勒谱的带宽大约为 2369.6 Hz，可见脉冲重复频率低于奈奎斯特采样率。图 3(a)给出了目标回波的距离-慢时间像，由于微动散射点的越距离单元走动，图中可以清晰看到 3 条余弦曲线。

采用本节所提算法提取目标回波距离-慢时间像上的微多普勒信号，设最大迭代次数 $G=7$，得到结果如表 1 所示。从表中数据可以看出，随着迭代次数的增加，分解得到的信号能量逐渐降低。该算法成功提取出了 3 个散射点对应的微动特征，$\hat{d}$ 的取值为 5.0 m，$\hat{r}$ 的取值位于 2.7 m 和 3.0 m 之间，$\hat{\Omega}/(2\pi)$ 的取值为 1.0 Hz，均与理论值接近。除了第 7 组参数外，$\hat{f}$ 的取值均为 0.05 Hz，也与理论值接近。将表 1 中的信号分解结果重新组合成一个新的距离-慢时间像如图 3(b)所示，可见与图 3(a)所示的原始距离-慢时间像十分吻合。这验证了所提算法的有效性。



(a) 目标回波距离-慢时间像



(b) 由复图像OMP分解结果重构的距离-慢时间像

图 3 算法有效性验证

表 1 目标回波的复图像 OMP 分解结果

迭代次数	$\widehat{d}$ (m)	$\widehat{r}$ (m)	$\widehat{\Omega}/(2\pi)$ (Hz)	$\widehat{\theta}$ (rad)	$\widehat{f}$ (Hz)	系数 $\boldsymbol{x}$
1	5.0	2.8	1.0	0.8	0.05	1067.1
2	5.0	2.9	1.0	2.9	0.05	905.0
3	5.0	2.7	1.0	4.9	0.05	866.5
4	5.0	2.8	1.0	2.8	0.05	579.4
5	5.0	2.9	1.0	0.8	0.05	480.1
6	5.0	3.0	1.0	4.9	0.05	399.8
7	5.0	2.7	1.0	0.7	−0.05	107.3

4.2 鲁棒性分析

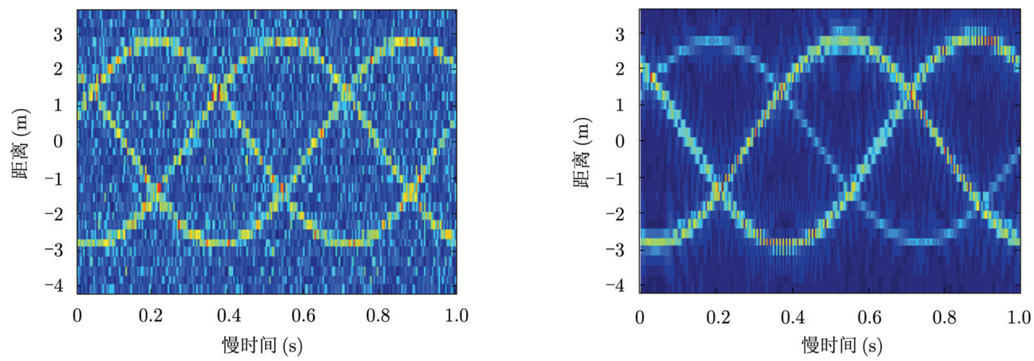
设雷达位于坐标原点，发射信号载频为 10 GHz，脉宽 $T_p = 4$ μs，带宽为 500 MHz，距离分辨率为 0.3 m。脉冲重复频率 PRF=1000 Hz。目标中心在雷达坐标系中的初始位置为(300, 0, 0) km，目标运动速度为 $[0\ 7800\ 0]^{\mathrm{T}}$ m/s。设目标由 3 个旋转散射点构成，旋转中心为目标中心，旋转角速度向量为 $\boldsymbol{\omega} = [0\ 0\ 2\pi]^{\mathrm{T}}$ rad/s，角速度大小 $\Omega = 2\pi$ rad/s，旋转半径为 2.8284 m。取目标中心为参考点。回波中加入高斯白噪声。

图 4(a)给出了 SNR=－10 dB 时的目标回波距离-慢时间像，图 4(b)给出了当设最大迭代次数 $G = 7$ 时，利用本节所提算法提取到的微多普勒信号分量重构出的距离-慢时间像，可见算法准确地提取到了 3 个散射点对应的微动特征，其具体参数见表 2。

表 2 SNR = −10 dB 时目标回波的复图像 OMP 分解结果

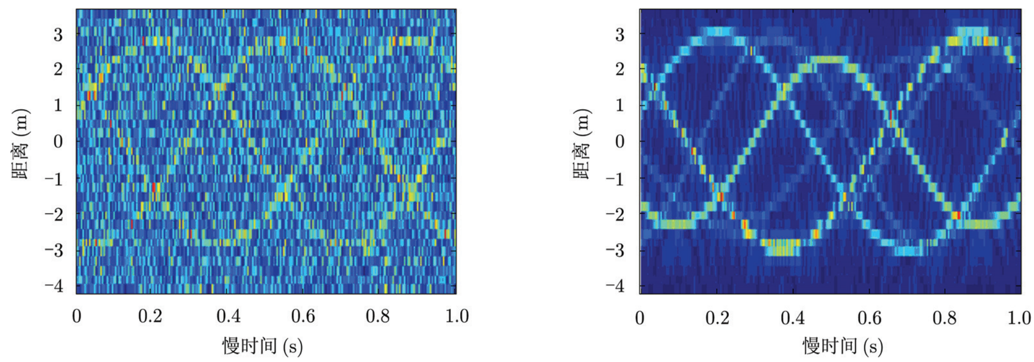
迭代次数	$\widehat{d}$ (m)	$\widehat{r}$ (m)	$\widehat{\Omega}/(2\pi)$ (Hz)	$\widehat{\theta}$ (rad)	$\widehat{f}$ (Hz)	系数 $\boldsymbol{x}$
1	0	2.6	1.0	2.9	0	625.3
2	0	2.9	1.0	2.9	0	542.7
3	0	2.9	1.0	0.8	0	504.1
4	0	2.9	1.0	0.7	0	467.6
5	0	2.8	1.1	5.2	0	433.2
6	0	2.8	1.0	5.3	0	366.2
7	0	2.8	1.0	2.9	0	312.3

图 5(a)给出了 SNR=−15 dB 时的目标回波距离-慢时间谱图，图 5(b)给出了利用本节所提算法提取到的微多普勒信号分量重构出的距离-慢时间谱



(a) 目标回波距离-慢时间像 (b) 由复图像OMP分解结果重构的距离-慢时间像

图 4 鲁棒性分析(SNR = −10 dB)



(a) 目标回波距离-慢时间像 (b) 由复图像OMP分解结果重构的距离-慢时间像

图 5 鲁棒性分析(SNR = −15 dB)

图，其具体参数见表 3。由于噪声功率较高，算法除了提取到了 3 个散射点对应的微多普勒信号分量外，同时还提取到了由噪声引起的虚假微多普勒信号分量。同时可以看出，信号能量系数随着迭代次数的增加出现了起伏，这是由于噪声的存在导致的，但残余信号能量总体趋势还是减小的。

表 3　SNR = −15 dB 时目标回波的复图像 OMP 分解结果

迭代次数	$\hat{d}$ (m)	$\hat{r}$ (m)	$\hat{\Omega}/(2\pi)$ (Hz)	$\hat{\theta}$ (rad)	$\hat{f}$ (Hz)	系数 $\boldsymbol{x}$
1	0	3.0	1.0	0.8	0	698.8
2	0	2.9	0.8	3.5	0	641.8
3	0	2.3	0.8	2.4	0	739.9
4	0	2.9	1.1	0.9	0	736.9
5	0	3.0	1.0	5.0	0	641.3
6	0	2.4	1.0	1.7	0	668.7
7	0	2.9	1.0	0.8	0	578.9

当信噪比进一步降低到 – 20 dB 时，复图像 OMP 算法已经无法提取到回波信号的微多普勒特征。

以上仿真表明，该算法具有较为良好的抗噪性能。

5　结束语

本文提出了一种基于复图像 OMP 分解的宽带雷达微动特征提取新方法。在推导微动目标宽带信号回波表达式的基础上，利用目标回波距离-慢时间像的幅度和相位信息，将向量空间的 OMP 算法拓展到复图像空间，实现了距离-慢时间平面上旋转目标微动特征的提取。该方法不仅能够提取微动散射点发生越距离单元走动条件下的微动特征，并且可以实现欠采样条件下的微动特征提取。仿真实验表明该方法具有良好的鲁棒性。尽管本文是以线性调频信号为例来推导算法的实施过程，但对于其他形式的宽带雷达信号如非线性调频信号、相位编码信号等，也可以采取类似的思想建立原子集以实现信号的分解。需要说明的是，由于在构造原子集时涉及的变量较多，因此原子集中原子数量通常很大，这使得算法的计算量较大。但随着硬件计算速度的不断增加和并行运算技术的发展，有望在将来实现算法的实时处理。

附录 A

$\boldsymbol{S}$ 可进一步表示为

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,N_\mathrm{B}} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,N_\mathrm{B}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N_\mathrm{A},1} & s_{N_\mathrm{A},2} & \cdots & s_{N_\mathrm{A},N_\mathrm{B}} \end{bmatrix}$$

将 $\boldsymbol{S}$ 中的元素按如下方式排成一列，得到长度为 $N_\mathrm{A}\times N_\mathrm{B}$ 的向量：

$$\boldsymbol{s}'=\big[s_{1,1},s_{1,2},\cdots,s_{1,N_\mathrm{B}},s_{2,1},s_{2,2},\cdots,s_{2,N_\mathrm{B}},\cdots,\\ s_{N_\mathrm{A},1},s_{N_\mathrm{A},2},\cdots s_{N_\mathrm{A},N_\mathrm{B}}\big]^\mathrm{T}$$

同样地，$\boldsymbol{h}_i$ 也可表示为

$$\boldsymbol{h}_i=\begin{bmatrix} h_{i1,1} & h_{i1,2} & \cdots & h_{i1,N_\mathrm{B}} \\ h_{i2,1} & h_{i2,2} & \cdots & h_{i2,N_\mathrm{B}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{iN_\mathrm{A},1} & h_{iN_\mathrm{A},2} & \cdots & h_{iN_\mathrm{A},N_\mathrm{B}} \end{bmatrix}$$

将 $\boldsymbol{h}_i$ 中的元素按如下方式排成一列，得到长度为 $N_\mathrm{A}\times N_\mathrm{B}$ 的向量：

$$\boldsymbol{h}_i'=\big[h_{i1,1},h_{i1,2},\cdots,h_{i1,N_\mathrm{B}},h_{i2,1},h_{i2,2},\cdots,h_{i2,N_\mathrm{B}},\cdots,\\ h_{iN_\mathrm{A},1},h_{iN_\mathrm{A},2},\cdots h_{iN_\mathrm{A},N_\mathrm{B}}\big]^\mathrm{T}$$

并令 $\boldsymbol{H}_g'=\left[\boldsymbol{h}_1',\boldsymbol{h}_2',\cdots,\boldsymbol{h}_g'\right]$。因此Step 5中的最优化问题等价为如下问题：

$$\boldsymbol{x}=\arg\min_{\boldsymbol{x}}\left\|\boldsymbol{s}'-\boldsymbol{H}_g'\boldsymbol{x}\right\|_2^2$$

根据最小二乘法，可得

$$\boldsymbol{x}=\left(\boldsymbol{H}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{H}_g'\right)^{-1}\boldsymbol{H}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{s}'$$

其中

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{H}_g'&=\left[\boldsymbol{h}_1',\boldsymbol{h}_2',\cdots,\boldsymbol{h}_g'\right]^\mathrm{H}\left[\boldsymbol{h}_1',\boldsymbol{h}_2',\cdots,\boldsymbol{h}_g'\right]\\ &=\begin{bmatrix} \boldsymbol{h}_1'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_1' & \boldsymbol{h}_1'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_2' & \cdots & \boldsymbol{h}_1'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_g' \\ \boldsymbol{h}_2'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_1' & \boldsymbol{h}_2'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_2' & \cdots & \boldsymbol{h}_2'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_g' \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{h}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_1' & \boldsymbol{h}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_2' & \cdots & \boldsymbol{h}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{h}_g' \end{bmatrix}\\ &=\begin{bmatrix} \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_1\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_1\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_1\rangle \\ \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_2\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_2\rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_g\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_g\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_g\rangle \end{bmatrix}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{s}'&=\left[\boldsymbol{h}_1',\boldsymbol{h}_2',\cdots,\boldsymbol{h}_g'\right]^\mathrm{H}\boldsymbol{s}'=\left[\boldsymbol{h}_1'^\mathrm{H}\boldsymbol{s}',\boldsymbol{h}_2'^\mathrm{H}\boldsymbol{s}',\cdots,\boldsymbol{h}_g'^\mathrm{H}\boldsymbol{s}'\right]^\mathrm{T}\\ &=\left[\langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_1\rangle,\langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_2\rangle,\cdots,\langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_g\rangle\right]^\mathrm{T}\end{aligned}$$

因此有

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_1\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_1\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_1\rangle \\ \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_2\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_2\rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_g\rangle & \langle\boldsymbol{h}_2,\boldsymbol{h}_g\rangle & \cdots & \langle\boldsymbol{h}_g,\boldsymbol{h}_g\rangle \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} \langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_1\rangle \\ \langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_2\rangle \\ \vdots \\ \langle\boldsymbol{S},\boldsymbol{h}_g\rangle \end{bmatrix}$$

附录 B

要证明余量 $\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}_g}=\boldsymbol{S}-\sum_{i=1}^{g}x_i\boldsymbol{h}_i$ 与 $\boldsymbol{H}_g$ 中的原子均保持正交，即证明：

$$\left\langle \boldsymbol{S}-\sum_{i=1}^{g}x_i\boldsymbol{h}_i,\boldsymbol{h}_i\right\rangle=0\text{ ， }i=1,2,\cdots,g$$

上式等价于

$$\left\langle \boldsymbol{s}'-\boldsymbol{H}'_g\boldsymbol{x},\boldsymbol{h}'_i\right\rangle=0\text{ ， }i=1,2,\cdots,g$$

由 $\boldsymbol{x}=\left(\boldsymbol{H}'^{\mathrm{H}}_g\boldsymbol{H}'_g\right)^{-1}\boldsymbol{H}'^{\mathrm{H}}_g\boldsymbol{s}'$，可以得到

$$\begin{aligned}&\left(\boldsymbol{s}'-\boldsymbol{H}'_g\boldsymbol{x}\right)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}'_g\\&=\left[\boldsymbol{s}'-\boldsymbol{H}'_g\left(\boldsymbol{H}'^{\mathrm{H}}_g\boldsymbol{H}'_g\right)^{-1}\boldsymbol{H}'^{\mathrm{H}}_g\boldsymbol{s}'\right]^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}'_g\\&=\boldsymbol{s}'^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}'_g-\boldsymbol{s}'^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}'_g\left[\left(\boldsymbol{H}'^{\mathrm{H}}_g\boldsymbol{H}'_g\right)^{-1}\right]^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}'^{\mathrm{H}}_g\boldsymbol{H}'_g=0\end{aligned}$$

由于 $\boldsymbol{H}'_g=\left[\boldsymbol{h}'_1,\boldsymbol{h}'_2,\cdots,\boldsymbol{h}'_g\right]$，因此有

$$\left\langle \boldsymbol{s}'-\boldsymbol{H}'_g\boldsymbol{x},\boldsymbol{h}'_i\right\rangle=\left[\left(\boldsymbol{s}'-\boldsymbol{H}'_g\boldsymbol{x}\right)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}'_i\right]^{*}=0$$

参 考 文 献

[1] 张群, 罗迎, 何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(2): 22–26.
Zhang Qun, Luo Ying, and He Jin. Review of researches on micro-Doppler effect of radar targets[J]. *Journal of Air Force Engineering University* (*Natural Science Edition*), 2011, 12(2): 22–26.

[2] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform[C]. Proceedings of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Pocono Manor, PA, USA, 2000: 463–466.

[3] Chen V C, Li F, Ho S S, *et al*.. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2–21.

[4] Chen V C and Li F. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proceedings of Radar Sonar & Navigation*, 2003, 150(4): 271–276.

[5] Thayaparan T, Abrol S, Riseborough E, *et al*.. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2007, 1(4): 289–299.

[6] 关永胜, 左群声, 刘宏伟, 等. 空间进动目标微动参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2427–2432.
Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, Liu Hong-wei, *et al*.. Micro-motion parameters estimation of space precession targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2427–2432.

[7] Gao Hongwei, Xie Lianggui, Wen Shuliang, *et al*.. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1969–1982.

[8] Ghaleb A, Vignaud L, and Nicolas J M. Micro-Doppler analysis of wheels and pedestrians in ISAR imaging[J]. *IET Signal Processing*, 2008, 2(3): 301–311.

[9] 黄健, 李欣, 黄晓涛, 等. 基于微多普勒特征的坦克目标参数估计与身份识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1050–1055.
Huang Jian, Li Xin, Huang Xiao-tao, *et al*.. Micro-Doppler features based parameter estimation and identification of tank[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1050–1055.

[10] 关永胜, 左群声, 刘宏伟. 高噪声环境下微动多目标分辨[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2630–2635.
Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, and Liu Hong-wei. Micro-motion targets resolution in a high noise environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2630–2635.

[11] 黄小红, 贺夏, 辛玉林, 等. 基于时频特征的低分辨雷达微动多目标分辨方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2342–2347.
Huang Xiao-hong, He Xia, Xin Yu-lin, *et al*.. Resolving multiple targets with micro-motions based on time-frequency feature with low-resolution radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2342–2347.

[12] 金光虎, 高勋章, 黎湘, 等. 基于 chirplet 的弹道目标逆合成孔径雷达回波分解[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2353–2358.
Jin Guang-hu, Gao Xun-zhang, Li Xiang, *et al*.. Inverse synthetic aperture radar echo decomposition of ballistic target based on chirplet[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2353–2358.

[13] Bai Xueru, Xing Mengdao, Zhou Feng, *et al*.. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3514–3523.

[14] 贺思三, 周剑雄, 赵会宁, 等. 基于 AM-LFM 分解的微动信号提取[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 554–558.
He Si-san, Zhou Jian-xiong, Zhao Hui-ning, *et al*.. Micro-Doppler signal extraction based on AM-LFM decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 554–558.

[15] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, *et al*.. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough Transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291–299.

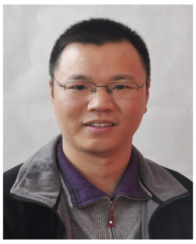
[16] Mallat S G and Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397–3415.

[17] Pati Y C, Rezaiifar R, and Krishnaprasad P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]. Proceedings of 27th Annual Asilomar Conference of Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 1993, Vol. 1: 40–44.

[18] Tropp J A and Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666.

[19] 李玺, 顾红, 刘国岁. ISAR 成像中转角估计的新方法[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 44–47.
Li Xi, Gu Hong, and Liu Guo-sui. A method for estimating the rotation angle of the ISAR image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 44–47.

作 者 简 介



罗　迎(1984–)，男，助教/博士研究生，在《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》、《IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems》、《Sci China Inf Sci》、《电子学报》等国内外学术期刊和会议录上发表和录用论文 50 余篇。主要研究方向为雷达成像与目标识别。
E-mail: luoying2002521@163.com

张　群(1964–)，男，教授，博士生导师，IEEE Senior Member，中国电子学会无线电定位技术分会委员。发表学术论文 150 余篇，其中 SCI、EI 检索 70 余篇次。主要研究方向为雷达成像、目标识别、信息对抗等。
E-mail: zhangqunnus@gmail.com

王国正(1960–)，男，教授，研究方向为应用数学及其在雷达信号处理中的应用。
E-mail: wgz1210@163.com

管　桦(1962–)，男，副教授，研究方向为雷达成像与目标识别。
E-mail: guanxh@sina.com

柏又青(1959–)，女，副教授，研究方向为应用数学及其在雷达信号处理中的应用。
E-mail: yqbai_59@hotmail.com