

# 基于随机共振理论的双基 ISAR 弱信号 提取及成像分析

邓冬虎<sup>1</sup>, 朱小鹏<sup>1</sup>, 张 群<sup>1,2</sup>, 罗 迎<sup>1</sup>, 李宏伟<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 复旦大学波散射与遥感信息重点实验室, 上海 200433)

**摘 要:** 在双基地逆合成孔径雷达成像系统中, 针对强背景噪声中的目标弱散射点探测和识别问题, 基于能捕获目标强散射点的假设前提, 提出了应用随机共振理论的弱散射点检测方法. 首先对作解线调后的回波信号进行快时间轴变换处理, 并对处理后的信号进行二次采样使其满足绝热近似条件; 然后应用随机共振技术检测出代表瞬时距离差的弱周期信号频率, 并通过循环检测和正负频率判断等后续处理提高系统的检测信噪比以及确定弱散射点的正确位置. 最后对随机共振性能和双基 ISAR 成像进行了仿真. 结果表明: 随机共振能大幅提高弱周期信号的输出信噪比, 应用在双基 ISAR 系统中能有效提高系统的信噪比增益和扩大雷达接收机的动态范围.

**关键词:** 逆合成孔径雷达 (ISAR); 双基地雷达 (Bistatic Radar); 随机共振 (SR); 二次采样

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1809-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.017

## Weak Signals Extraction and Imaging Analysis in Bistatic ISAR Systems Based on Stochastic Resonance

DENG Dong-hu<sup>1</sup>, ZHU Xiao-peng<sup>1</sup>, ZHANG Qun<sup>1,2</sup>, LUO Ying<sup>1</sup>, LI Hong-wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Information & Navigation, AFEU, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In the bistatic ISAR systems, in order to solve the problems of weak scatters detection and identification in strong noise background, the stochastic resonance (SR) was applied to extract the information of weak scatters. On the assumption that the strong scatters could be detected, the signals after de-chirp were disposed through transformation in fast time axis firstly, which made the signals satisfy the condition of adiabatic approximation; then the SR was used to detect the signal frequency that expressed the instantaneous range difference; after that, some processing were implemented to confirm the right positions of weak scatters and to improve the output signal-noise-ratio (SNR). Numerical simulations shows that the SR can improve the SNR largely and enlarge the dynamic bound of radar receiver.

**Key words:** inverse synthetic aperture radar; bistatic radar; stochastic resonance (SR); second sampling

## 1 引言

在逆合成孔径雷达 (ISAR, Inverse Synthetic Aperture Radar) 中, 对于低空飞行目标或舰船目标, 回波信号中会存在大量的地杂波或海杂波等背景噪声<sup>[1]</sup>, 因此如何在强噪声中实现精细成像是 ISAR 系统实用化的关键问题之一. 对于强噪背景下的目标探测和识别问题, 目前主要有多次回波相消、空时自适应处理或自适应多通道均衡等技术来对噪声进行抑制<sup>[2~4]</sup>. 其中, 回波相消技术, 是一种典型而又简单易行的噪声滤除方法, 可以有

效地滤除相干信号中的噪声分量, 但也会大幅度地降低信号功率, 对后续处理提高了要求; 空时自适应处理根据大量的训练样本来估计检测单元内的噪声分布特性, 即噪声协方差矩阵, 进而设计相应的空时滤波器, 可有效地抑制噪声. 但在实际过程中, 训练样本的平稳性难以保证, 导致基于训练样本估计的噪声特性和实际情况不一致, 并造成输出信杂比的下降, 同时该技术对系统硬件要求较高, 且在估计噪声的协方差矩阵时, 多维处理的运算量较大, 很难实时处理<sup>[4]</sup>; 多通道均衡则选取一个通道作为参考通道, 在其余的每个通道后面插入一

个自适应均衡器去补偿失配误差,待均衡通道均衡后,其总的响应和参考通道的响应是一致的,从而保证了通道间响应的一致性,可有效实现对噪声的抑制.但是,在实际的雷达系统中,为了实现适配误差的有效补偿,需要雷达间歇性的工作,并且设备的复杂度较高,限制了其实际应用.此外,这几种方法都是通过抑制噪声来探测和识别强噪声中的目标弱散射点,而没有充分利用这些噪声,即造成了回波信号能量的部分损失.如果能通过利用噪声而非抑制噪声来实现对 ISAR 目标精细特征的提取和识别,将有效提升现有 ISAR 系统的性能.在绝热近似条件下,随机共振正是一种利用噪声来检测弱信号的有效方法<sup>[5~9]</sup>.将随机共振引入 ISAR 系统中,将大大提高雷达接收机的检测信噪比和动态范围.

近年来,由于双基 ISAR 系统在探测性能、目标识别和抗干扰等方面的优势,正成为当下的研究热点<sup>[10,11]</sup>.本文就强噪声背景下的双基 ISAR 成像问题展开研究,在构建双基 ISAR 运动目标模型的基础上,基于能捕获目标强散射点的假设前提(一般情况下,对回波进行一次相消可检测出强散射点),以强散射点为参考点构造参考信号,与夹杂强噪声的目标回波信号作解线调处理,通过对处理后的信号作快时间轴的尺度变换并分析得出:解线调处理后的信号可表示成多个等效单频正弦信号与强噪声叠加的形式,而这些等效正弦信号的频率代表了弱散射点相对参考点的距离信息.此后,对变换后的信号进行二次采样使其满足应用随机共振理论的小参数类绝热近似条件并通过随机共振检测器,利用估计出的信号频率恢复目标弱散射点的位置信息,进而获得清晰目标二维像.

## 2 双基 ISAR 回波信号分析

建立如图 1 所示的双基 ISAR 运动目标模型,并假设发射雷达与接收雷达之间时间严格同步.在该模型中,将发射雷达与接收雷达之间的连线定义为基线  $L$ ,以基线中心  $O$  为坐标原点,基线为  $x$  轴建立直角坐标系.图 1 中的虚线椭圆表示雷达所照射的目标区域,目标以速度  $v$  沿  $x$  轴方向运动.其中  $O'$  表示雷达所能捕获的目标区域强散射点,初始坐标为  $(X_{O'}, R_0)$ .以该强散射点为参考点,并假设成像过程中收发雷达对其进行精确跟踪,点  $P$  是目标上的一弱散射点.那么,接收到的目标整体回波信号  $S_{\text{echo}}(t', t_m)$  为:

$$\begin{aligned} S_{\text{echo}}(t', t_m) &= \sum_i S_i(t', t_m) + n(t', t_m) \\ &= \sum_i S_i(t', t_m) + \sqrt{2 \cdot D} g(t', t_m) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $S_i(t', t_m)$  表示第  $i$  个散射点的回波信号,  $(t', t_m)$  分别表示径向距离维的快时间变量和方位向的慢时间

变量,  $g(t', t_m)$  是均值为 0, 方差为 1 的高斯白噪声,  $D$  是噪声  $n(t', t_m)$  的强度.

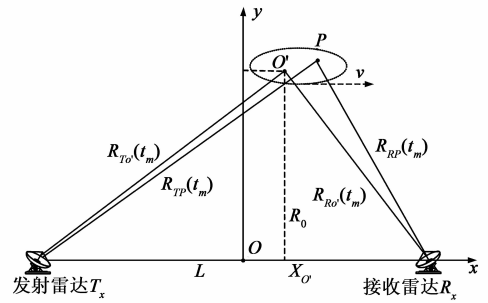


图1 双基ISAR成像模型

基于能捕获强散射点  $O'$  的假设前提,以该点为参考点构造参考信号  $S_{\text{ref}}(t', t_m)$ ,与回波信号作混频处理后,结果为:

$$\begin{aligned} S(t', t_m) &= S_{\text{echo}}(t', t_m) \cdot S_{\text{ref}}^*(t', t_m) \\ &= \sum_i S_i(t', t_m) \cdot S_{\text{ref}}^*(t', t_m) \\ &\quad + n(t', t_m) \cdot S_{\text{ref}}^*(t', t_m) \end{aligned} \quad (2)$$

需要特别提出的是所构造的参考信号为小功率信号.因为若参考信号的功率太强,同样会淹没弱散射点信号,这样将无法从式(2)中提取弱散射点信息.因此式(2)可简化为:

$$S(t', t_m) \approx \sum_i S_i(t', t_m) \cdot S_{\text{ref}}^*(t', t_m) + n(t', t_m) \quad (3)$$

假设发射信号为线性调频信号(LFM, Linear-Frequency-Modulation),则解线调后的信号为:

$$\begin{aligned} S(t', t_m) &= \sum_i \rho_i \cdot \text{rect}\left(\frac{t' - R_i(t_m)/c}{T}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi\mu}{c} \Delta R_i(t_m) t' - j\theta_i(t_m)\right) \\ &\quad + n(t', t_m) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\theta_i(t_m) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_i(t_m) - \frac{\pi\mu}{c^2} \Delta R_i(t_m) (R_i(t_m) + R_{\text{ref}}(t_m))$ ,  $\rho_i$  为  $i$  点的散射强度,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形窗函数,  $T$  为脉冲宽度,  $\mu$  为调频率,  $R_i(t_m)$ 、 $R_{\text{ref}}(t_m)$  分别为  $i$  点和参考点到收发雷达的瞬时距离和,而  $\Delta R_i(t_m) = R_i(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m)$  则表示  $i$  点和参考点的瞬时距离差.

令  $\bar{t} = t'\mu/c$ ,在径向距离维的快时间轴上作变量代换,并取式(4)的实部  $S_{\text{real}}$  为:

$$\begin{aligned} S_{\text{real}}(\bar{t}, t_m) &= \sum_i \rho_i \cdot \text{rect}\left(\frac{\bar{t}c/\mu - R_i(t_m)/c}{T}\right) \\ &\quad \cdot \cos(2\pi f_i(t_m)\bar{t} + \theta_i(t_m)) + \sqrt{2 \cdot D} g(\bar{t}, t_m) \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $f_i(t_m) = \Delta R_i(t_m)$ .从式中可以看出:在快时间域上,散射点  $i$  的回波信号可理解成一频率为  $f_i(t_m)$ ,相位为  $\theta_i(t_m)$  的时域带限正弦信号和噪声叠加的结果.而目标整体的回波信号则表现为多个单频正弦信号和噪

声的叠加.但除强散射点外,其余散射点的散射强度  $\rho_i$  比噪声强度  $D$  小得多,因此,如何从强噪背景下提取弱散射点的相对距离信息  $\Delta R_i(t_m)$  就转化为如何从式(5)所表示的弱信号叠加强噪声的复合信号中提取正弦信号频率的问题.下文就详细讨论如何采用基于二次采样的随机共振理论提取式(5)中的单频正弦信号频率  $f_i(t_m)$ .

### 3 基于随机共振的信号频率提取

与一般的弱信号检测方法不同,基于随机共振的弱信号检测不是通过抑制噪声而是利用噪声能量,增加周期力对非线性双稳系统的驱动,使非线性双稳系统的输出频率与输入相同.假设如图2所示的非线性双稳系统,该系统的势函数  $V(x)$  可表示为<sup>[8,12]</sup>:

$$V(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 \quad (6)$$

式中  $a, b$  为其系统参数.而  $H$  表示势垒的高度,其值为  $a^2/4b$ ,  $x(m)$  表示势阱所处的位置,其值为  $\sqrt{a/b}$ , 在此参数下该系统的阈值为  $\sqrt{4a^3/27b}$ .

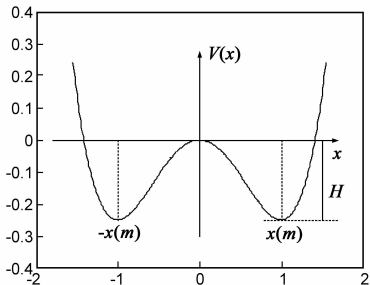


图2 非线性双稳系统的对称双势阱图( $a=b=1$ )

在绝热近似条件下,基于图2非线性双稳系统实现的随机共振可通过如下的朗之万方程(Lange-win)表示:

$$\begin{aligned} dx/dt &= V'(x) + s(t) \\ &= V'(x) + A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) + n(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $s(t)$  为输入的周期信号,  $n(t)$  为噪声.

假设有一布朗粒子在图2的双稳系统中运动,当外部驱动信号包含周期信号和噪声时,在这种情况下,若周期信号幅值  $A$  小于阈值,则仅凭信号自身是无法驱动布朗粒子越过势垒的,但由于噪声的存在,布朗粒子同样有可能越过势垒在两势阱之间运动,当信号叠加噪声驱动布朗粒子跃迁势垒的频率与信号频率同步时,系统产生随机共振现象,即系统利用噪声能量来协同周期信号驱动布朗粒子,增强系统的周期性输出.从信噪比的角度来看,输出信号将噪声能量转化为周期信号能量,与输入相比,信噪比提高了.

要注意的是:上述分析是基于绝热近似条件展开的,仅针对频率较低的周期信号有效,要求信号频率不能超过克莱默斯逃逸速率( $r_k \approx a/\sqrt{2\pi} \cdot \exp(-a^2/4D)$ )的

一半<sup>[12]</sup>.图3是逃逸速率  $r_k$  随噪声强度  $D$  和参数  $a$  的变化趋势,在图示的范围内  $r_k < 0.4$ ,理论上要求能产生随机共振的输入信号频率要小于  $0.2\text{Hz}$ .当驱动周期信号频率较高时,可通过二次采样使其满足绝热近似条件,这将在后续部分详细讨论.

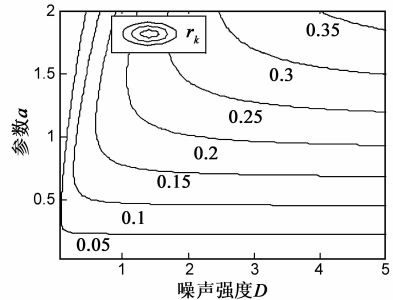


图3 逃逸速率变化

由于式(7)是一种非线性的微分方程,不存在定态解或精确的解析式,对于该方程的求解,可通过数值仿真的方法对其进行近似求解.文中采用的是精度较高的四阶龙格-库塔方程对式(7)进行近似求解<sup>[13]</sup>.

为了证明随机共振对信号频率提取的有效性,这里采用一弱周期信号与强噪声叠加的例子来进行说明.对一单脉冲,假设某一散射点  $i$  经解线调后的信号为:

$$S_{\text{real}_i}(\bar{t}) = 0.3\cos(0.04\pi * \bar{t}) + \sqrt{3}g(\bar{t}) \quad (8)$$

另外,假设信号采样频率  $f_s = 5\text{Hz}$ ,采样点数  $N = 4096$ ,双稳系统参数  $a = b = 1$ .图4给出了输入输出信号时域、频域比较图.

从输入和输出信号的频域特征来看(图4(c)和图4(d)),输出信号的频域特征更加明显,在相应频率处的峰值更高.根据计算得到输入、输出信噪比<sup>[12]</sup>分别为  $-18.23\text{dB}$ 和  $-9.82\text{dB}$ ,即信号经过随机共振后输出信噪比提高了约  $8.4\text{dB}$ .当然,信号经随机共振后信噪比提升是系统参数和信号参数匹配的结果.在信号参数与系统参数匹配的情况下,输出信噪比将始终高于输入信噪比,这在后面的仿真中将详细分析.

### 4 问题的进一步讨论

在上文的分析中提到,应用随机共振需要满足小参数类的绝热近似理论,而在雷达系统中,显然不能满足这一条件;同时,式(5)表示的是多个单频信号叠加的形式,由于噪声能量是一定的,经过随机共振器后协同各频率信号的噪声能量势必会分散,影响最终的检测性能;此外,代表瞬时距离差的频率存在正负之分,但随机共振后应用傅立叶变换是无法区分正负频率的.下面就这些问题进行详细讨论.

#### 4.1 二次采样

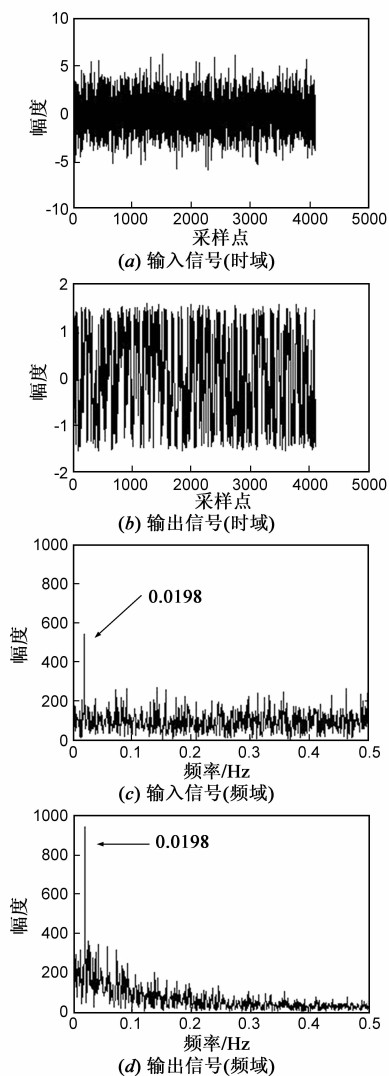


图4 双稳系统输入输出的时域、频域比较图

为使式(5)满足小参数类条件,即使其频率满足 Kramers 逃逸速率的约束条件,需要对式(5)进行二次采样.二次采样的实质就是线性的改变谱图的坐标位置,并不改变信号的真实频率.虽然 Kramers 逃逸速率是在一定的系统参数下产生随机共振的约束条件,但它只是研究非线性系统跃迁速率的理论值.而后续的仿真则表明,在一定的系统参数条件下,当信号频率接近 Kramers 逃逸速率的一半时,无论系统参数如何调整,产生随机共振的概率都会很低,其输出信噪比可提升的空间极其有限.根据笔者大量的数值仿真结果分析,在一定的系统参数范围内,当输入信号的频率  $f \leq 0.06\text{Hz}$  时,系统的输出信噪比动态增益范围较大,且可在较大的噪声强度范围内实现;而当信号频率  $f > 0.06\text{Hz}$  时,系统输出信噪比性能急剧下降,某些情况下甚至低于输入信噪比.因此,为使系统达到较高的信噪比增益性能,要求二次采样的变换尺度  $k$  满足  $k \geq \Delta R(t_m)/0.06$ ,对于 ISAR 目标,以参考点为中心,假设  $\Delta R(t_m) \leq 30\text{m}$ ,

则相应的  $k \geq 500$ .对去斜率混频信号而言,信号时宽的理论值为  $T$ ,若快时间采样点数为  $N_r$ ,则解线调后信号的采样频率  $f_s = N_r/T$ ,经时间轴变换后等效采样频率  $f'_s = f_s c/\mu$ ,则二次采样频率  $f_{s0} = f'_s/k$ .利用二次采样对式(5)进行重新采样并送入随机共振检测器,再采用文中第三部分所述方法即可检测弱周期信号.

#### 4.2 多散射点信号频率的估计

在第三节进行随机共振示例说明时采用的是单频周期信号,噪声只协同单一频率跃迁,能量相对集中.而在双基 ISAR 成像中,目标可能存在多个散射点,转换成式(5)时表示的是多个单频弱周期信号的叠加形式.由于噪声能量是一定的,在随机共振过程中协同各周期信号的噪声能量势必会分散,某些散射点信号的输出信噪比可能较低,若以输出信噪比为门限来检测各散射点,势必会降低信噪比的增益范围或遗漏散射点信息.为了克服这一问题,本文采用逐个剔除循环检测的方法来保证一定的信噪比增益.第一步,对随机共振后的信号频谱进行分析,估计出信噪比最大的信号频率  $f$ ;第二步,将原信号变换到频域,在频率  $f$  处设置阻带滤波器,采用“clean”技术在频域清除该频率并反变换到时域;第三步,将清除频率  $f$  后的信号送入随机共振系统重复第一步;当信号输出信噪比低于设置的门限值时,循环检测完成.采用此种方法,在保证一定的信噪比增益前提下,可以最大概率检测出所有散射点,并有效估计出其相应频率.

#### 4.3 瞬时距离差 $\Delta R(t_m)$ 的判断

在实际的回波信号分析中,当以强散射点为参考点时,其余各弱散射点相对参考点的位置信息是未知的,瞬时距离差  $\Delta R(t_m)$  的正负性也是未知的.由于系统采用式(5)信号的实部来进行频率检测的,检出频率将有正负两项,导致无法直接从检测出的信号频率来求出瞬时距离差  $\Delta R(t_m)$ .针对这一问题,文中采用构造复信号与原复信号相乘的方法来进行判断.假设检测出的信号频率为  $f_0$ ,构造复信号  $x(f_0)$  和  $x(-f_0)$  与原信号  $s(f)$  相乘,对相乘后信号进行频谱分析,若原信号中存在频率  $f_i = f_0$ ,则在频率  $2f_0$  处会检测到峰值;同理,若原信号中的频率  $f_i = -f_0$ ,则会与  $x(-f_0)$  相乘后在频率  $-2f_0$  出现峰值.通过此种方法便可对瞬时距离差  $\Delta R(t_m)$  的正负特性进行判断.

综上所述,基于随机共振理论的双基 ISAR 成像算法流程如下:首先利用二次采样对实测信号进行重新采样,将大参数类的高频信号转换成能产生随机共振的低频信号并送入非线性双稳系统,对估计出的信号频率按二次采样的频率压缩比恢复原信号的真实频率,通过估计输出信号的频率并判断正负特性获得弱

散射点相对参考点的瞬时距离差, 对各次回波进行检测后, 对方位向实施相参积累获得目标的二维像, 其整个算法流程可用图 5 表示。

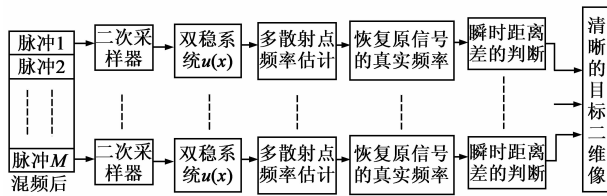


图5 基于随机共振理论的双基ISAR成像流程图

## 5 分析与仿真验证

### 5.1 输入输出信噪比仿真与分析

为确定检测双基 ISAR 回波信号中弱散射点信息的随机共振系统参数, 首先对满足 Kramers 逃逸速率条件下的各周期信号的输入输出信噪比与系统参数、噪声强度的关系进行仿真验证。由于 Kramers 逃逸速率与参数  $a$  和噪声强度  $D$  有关, 而相关文献指出, 增大  $a$  与减小  $b$  对系统输出具有类似的贡献作用, 因此这里固定  $b = 1$ , 通过改变  $a$  与  $D$  来比较系统的输入输出信噪比。结合本文 4.1 部分的分析以及图 3 的示例, 要求 Kramers 逃逸速率  $r_k > 0.15$ , 此时要求  $a \geq 0.75$ 。因此图 6 给出了当信号强度为 0.3 时, 在  $0.75 \leq a \leq 1.25$  和  $0 <$

$D < 4$  范围内, 各频率周期信号经过随机共振后, 200 次仿真后输入输出信噪比平均变化曲线。

在图 6 的输出曲线中, 需要特别说明的是: 当  $D$  趋于零时, 实际情况中信噪比应该趋于无穷大, 但图 6 中的输出信噪比却表现出较小值。这是采用绝热近似条件时在  $D$  较小的情况下的一种定性错误, 因此绝热近似条件只有在  $D$  不是太小时才适用。从图 6 的不同频率处的输出信噪比与输入信噪比较来看, 以信噪比  $-15\text{dB}$  为门限, 当

信号频率  $f \leq 0.06\text{Hz}$ , 参数  $a = 0.75$  时, 输出信噪比大于输入信噪比且大于  $-15\text{dB}$  的噪声范围约为  $0.7 < D < 3.2$ ; 当信号频率  $f = 0.07\text{Hz}$  时, 此噪声范围大幅减小, 满足要求的噪声上限约为  $D = 2.2$  (图 6(d))。这就是 4.1 节确定二次采样频率的依据。同时, 从参数  $a$  对输出信噪比的影响来看, 随着参数  $a$  的增大, 输出信噪比的峰值在向噪声强度更大的方向移动, 但峰值逐渐降低。这也是比较容易理解的: 当参数  $a$  增大时, 非线性双稳系统的阈值也在增大, 需要更大的噪声来协同信号越过阈值运动, 而同时噪声强度越大, 信噪比也就越低。另外, 在图 6 中, 当  $f \leq 0.06\text{Hz}$  时, 各图同时标出了当输出信噪比在门限之上时, 相比输入信噪比的增益。当  $a = 0.75, f = 0.01\text{Hz}$  时, 输出信噪比最高增益可达  $12.5\text{dB}$  (图 6(a) 中标出); 当信号频率增加时, 此信噪比增益逐渐降低, 但在  $f \leq 0.06\text{Hz}$  和相应的噪声强度范围 ( $0.7 < D < 3.2$ ) 内, 输出信噪比的动态增益保持在  $7\text{dB}$  以上, 因此, 应用随机共振对弱散射点进行检测可在一定的噪声强度范围内有效提高雷达接收机的动态范围。

### 5.2 双基 ISAR 弱散射点检测仿真与分析

采用图 1 所示的双基 ISAR 平面模型, 基线长度  $L = 10\text{km}$ , 不失一般性, 设目标以  $v = 300\text{m/s}$  的速度沿与

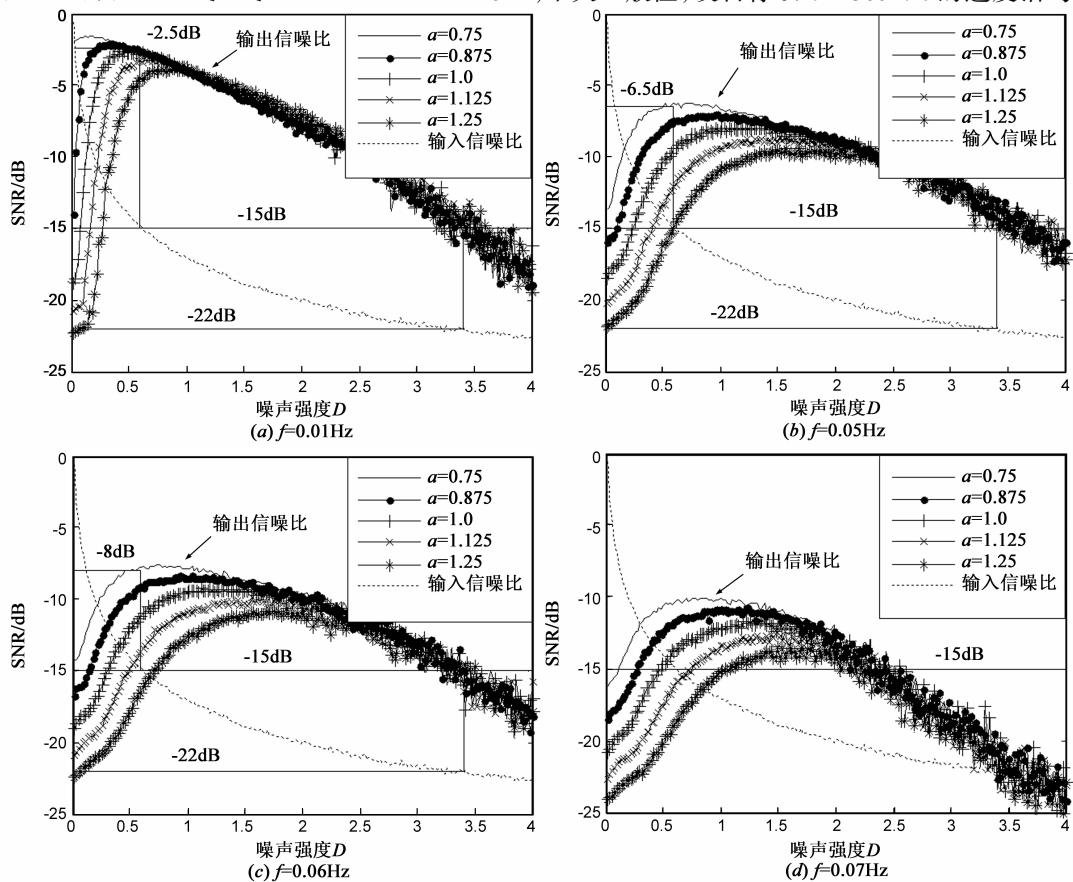


图6 不同信号频率情况下输入输出信噪比较

$x$  轴夹角为  $\pi/6$  的方向运动, 参考点的初始坐标  $(X_0, R_0) = (1, 10)$  km, 雷达发射带宽为  $B = 300$  MHz, 脉宽  $T = 3\mu\text{s}$  的 LFM 信号. 在此双基模型参数下其距离分辨率  $\rho_r \approx 0.7\text{m}$ <sup>[11]</sup>. 设快时间域采样点数为 4096, 成像时间为 1s, 方位向采样点数为 1024. 根据 5.1 部分的仿真分析, 以非线性双稳系统的参数  $a = 0.75, b = 1$ , 噪声  $D = 1.8$  的情况为例进行仿真. 目标散射点模型如图 7 所示, 除参考点外, 其余散射点散射系数设为 0.3. 同时, 图 8 给出了在上述参数下的目标一维谱图, 从图中可以看出, 除参考点的谱图清晰可见外, 其余散射点的谱图均被噪声所污染, 隐约可见(图中椭圆圈出部分). 若是直接对该谱图进行方位向的相干积累, 由于弱散射点能量很小, 方位向相干积累后散射点仍被噪声所覆盖, 得不到除参考点外的其余散射点信息.

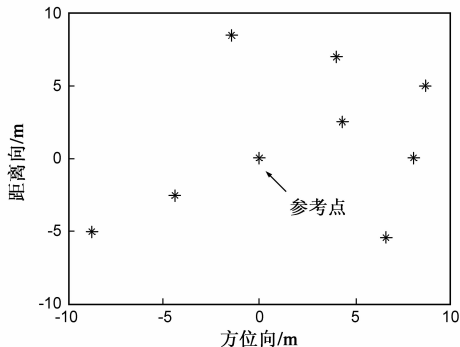


图7 目标散射点模型

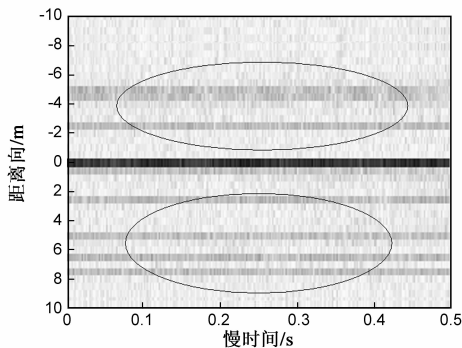


图8 未处理前目标一维谱图

在对回波信号的仿真中, 根据快时间维的采样点数和信号时宽, 对信号的等效采样率  $f_s' = N_c c / (\mu T) \approx 4\text{kHz}$ ,  $k$  值取满足要求的下限 500, 则可将二次采样频率确定为  $f_{s0} = 8\text{Hz}$ .

以  $t_m = 0.5\text{s}$  时刻的目标回波为例进行仿真说明, 图 9 为对该时刻回波信号作二次采样, 进行随机共振前后信号的频域分布. 比较图 9 中的两图可以看出, 虽然输入信号为多单频的叠加信号, 但与单个周期信号类似, 随机共振后相应频率出的信号都被增强输出. 同时由于目标本身尺寸较小, 经尺度变换后, 瞬时距离差  $\Delta R(t_m)$  表现为较小的信号频率信息, 其详细的随机共

振前后检测参数见表 1.

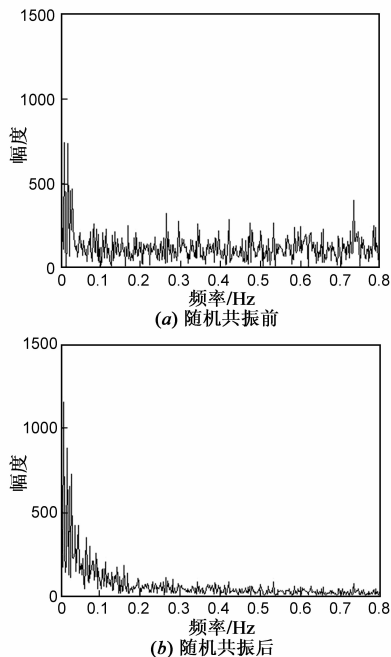


图9 随机共振前后信号的频域比较

表 1 应用随机共振提取参数表

瞬时距离差 (m)	二次采样后频率值 (Hz)	随机共振提取值 (Hz)	换算距离值 (m)	随机共振前后输入输出 SNR (dB)			
				输入	循环检测前输出	循环检测后输出	信噪比增益
5.0839	0.0102	0.0098	4.9	-13.93	-4.42	-4.42	9.51
10.1705	0.0203	0.0195	9.75	-15.94	-8.89	-6.22	9.72
-5.0811	-0.0102	0.0098	4.9	-13.93	-4.42	-4.42	9.51
-10.1594	-0.0203	0.0195	9.75	-15.94	-8.89	-6.22	9.72
14.8544	0.0297	0.0293	14.65	-24.49	-11.92	-8.76	15.73
-8.7501	-0.0175	0.0176	8.8	-18.58	-9.77	-7.50	11.08
13.019	0.026	0.0254	12.7	-22.19	-11.87	-7.56	14.63
1.2184	0.0024	0.002	1	-17.91	-11.06	-6.87	11.04

在仿真过程中, 记录  $t_m = 0.5\text{s}$  时刻的瞬时距离差值(表 1 第一列)并对其进行二次采样, 应用随机共振后能对信号频率进行正确提取, 提取值与真实值之间的误差是由采样频率的采样间隔误差造成的. 按提取频率值换算成相应的距离差后, 虽然与所记录的瞬时距离差存在一定的误差, 但误差小于距离分辨率  $\rho_r$ , 对判断弱散射点相对参考点的真实距离不产生影响. 正如 4.3 节部分分析的, 在提取频率值后, 需要对频率的正负特性进行判断, 以确定当瞬时距离差相同时散射点相对参考点的真实位置. 同时, 表 1 给出了在随机共振前后各信号的输入输出信噪比比较. 由于在瞬时距离 5.08m 和 10.17m 处同时存在两个散射点, 因此此频率处的输出信噪比相对其余散射点要高, 而相对输入信噪比, 随机共振后输出信噪比有大幅增益, 增益最大处达到 12.5dB. 同时, 在 4.2 的分析中提到, 当输入为多信

号叠加时,噪声协同弱周期信号的能量会出现分散现象,为避免能量分散对检测信号产生的影响,4.2 节中提到采用循环检测的方法对所有散射点进行检测,表 1 也给出了循环检测后对各频率检测所达到的输出信噪比,与循环检测前比较,循环检测后又可将信噪比增益提升 2~4dB. 由于这里仅以单次回波为例进行说明,信噪比变换范围较大,而结合图 6 的仿真结果来看,应用随机共振对弱散射点进行检测,在一定的噪声强度范围内,可将雷达接收机的接收增益提高约 7dB(以图 6(c)最差情况为标准).

通过随机共振得出成像过程中的瞬时距离差后,再通过 4.3 节所述的正负频率判断方法正确定义瞬时距离差的正负,此后对各次回波进行随机共振检测弱散射点相对距离信息并对相应的距离单元进行能量增强,可得到图 10 所示的增强后的目标谱图,对此谱图作方位向的相干积累后,方位向的能量积累将会达到与参考点相当的量级,此时就能较好的抑制噪声,使弱散射点清晰可见. 对增强的谱图作相干积累后的目标像见图 11. 需要注意的是,表 1 中估计的是瞬时距离差,即  $\Delta R_p(t_m) = R_p(t_m) - R_{ref}(t_m)$ ,而在图 8、图 10 和图 11 中,距离向的定标与瞬时距离差存在 2 倍的关系,特此说明.

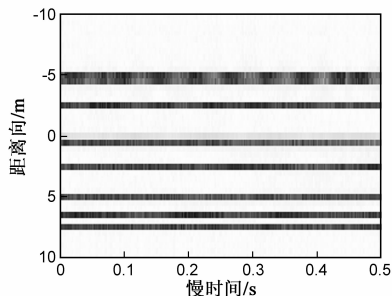


图 10 增强后目标谱图

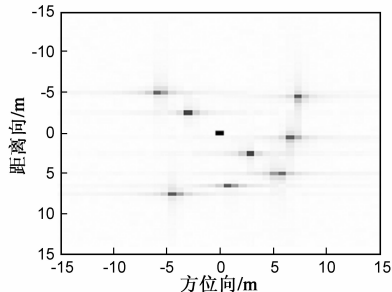


图 11 目标二维像

## 6 结论

本文就应用随机共振检测双基地 ISAR 目标中的弱散射点问题展开研究,对回波信号的处理使其满足应用随机共振的绝热近似条件,并对实际应用中产生的一些具体问题展开详细讨论,根据雷达模型确定双稳系统的参数,使随机共振输出达到最大的信噪比增

益.从文中的仿真来看,随机共振确能提高输出信噪比,应用到双基 ISAR 系统时,在一定的噪声强度范围内,可有效扩大雷达接收机的动态范围,提升雷达对目标精细特征探测和识别的能力.

## 参考文献

- [1] Lan G Cuming, Frank Hwong. 合成孔径雷达成像-算法与实现[M]. 洪文,胡东辉,译. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] 冯坤菊,王春阳,段垣丽,等. 机载双基地 STAP 的 OP-DW 预处理算法及其性能研究[J]. 电子学报,2011,39(3):700-704.  
Feng Kun-ju, Wang Chun-yang, Duan Yuan-li, et al. Research on the OP-DW algorithm of bistatic radar and its performance [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 700-704. (in Chinese)
- [3] 张绪锦,朱兆达,邓海涛,等. 一种适用于双通道星载 SAR 的动目标检测技术[J]. 电子学报,2007,35(9):1794-1798.  
Zhang Xu-jin, Zhu Zhao-da, Deng Hai-tao, et al. A moving target detection method for dual-aperture spaceborne SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1794-1798. (in Chinese)
- [4] 孙珂,张颖,李刚,等. 基于稀疏恢复的直接数据域 STAP 算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(7):972-976.  
Sun Ke, Zhang Hao, Li Gang, et al. Direct data domain STAP algorithm using sparse recovery [J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2011, 51(7): 972-976. (in Chinese)
- [5] 张雷,宋爱国. 随机共振在信号处理中应用研究的回顾与展望[J]. 电子学报,2009,37(4):811-818.  
Zhang Lei, Song Ai-guo. Development and prospect of stochastic resonance in signal processing [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 811-818. (in Chinese)
- [6] Hao Chen, Pramod K, Steven M Kay, et al. Theory of the stochastic resonance effect in signal detection: part 1-fixed detectors [J]. IEEE Trans on Signal Pro, 2007, 55(7): 3172-3184.
- [7] Hao Chen, Pramod K, Steven M Kay, et al, Theory of the stochastic resonance effect in signal detection: part 2-variable detectors [J]. IEEE Trans on Signal Pro, 2008, 56(10): 5031-5041.
- [8] 冷永刚,王太勇. 二次采样用于随机共振从强噪声中提取弱信号的数值研究[J]. 物理学报,2003,52(10):2432-2437.  
Leng Yong-gang, Wang Tai-yong. Numerical research of twice sampling stochastic resonance for the detection of a weak signal submerged in a heavy noise [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(10): 2432-2437. (in Chinese)
- [9] 叶青华,黄海宁,张春华. 用于微弱信号检测的随机共振

系统设计[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 216 - 220.

Ye Qing-hua, Huang Hai-ning, Zhang Chun-hua. Design of stochastic resonance systems in weak signal detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 216 - 220. (in Chinese)

- [10] Chen V C, Lipps R. Bi-static ISAR range-Doppler imaging and resolution analysis[A]. IEEE Radar Conference [C]. Pasadena CA: IEEE Press, 2009. 1 - 3.
- [11] 朱小鹏, 张群, 朱仁飞, 等. 双站 ISAR 越距离单元徙动分析与校正[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9): 1827 - 1832.  
Zhu Xiao-peng, Zhang Qun, Zhu Ren-fei, et al. Study on correction algorithm of migration through resolution cell in Bi-static ISAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(9): 1827 - 1832. (in Chinese)
- [12] 胡岗. 随机力与非线性系统[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994.  
Hu Gang. Stochastic Forces and Nonlinear Systems [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Education Publishing, 1994. (in Chinese)
- [13] 杨祥龙, 汪乐宇. 一种强噪声背景下弱信号检测的非线性方法[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(6): 811 - 815.  
Yang Xiang-long, Wang Le-yu. A new detection method of weak signals in strong background-noise level[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(6): 811 - 815. (in Chinese)

## 作者简介



邓冬虎 男, 1986 年 12 月出生, 河南洛阳, 博士生. 2009 年 12 月在空军工程大学电讯工程学院获得硕士学位, 研究方向为雷达信号处理.

E-mail: dengdonghu@163.com



朱小鹏 男, 1982 年 5 月出生, 江苏镇江, 博士. 2011 年 12 月在空军工程大学电讯工程学院获得博士学位. 研究方向为双多基地雷达成像.

E-mail: zxpkongjun@126.com



张群 男, 1964 年 11 月出生, 陕西合阳, 现为空军工程大学信息与导航学院教授、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 100 余篇, 其中 SCI、EI 检索 60 余篇次. 研究方向: 雷达信号处理、雷达成像和电子对抗.

E-mail: zhangqunnus@gmail.com