

杂波环境下雷达目标频域响应的散射中心估计方法*

姜卫东 陈曾平 庄钊文 郭桂蓉

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 湖南, 长沙, 410073)

摘要 描述了给定幅度分布和功率谱密度多种杂波仿真方法, 给出了仿真实验结果, 及在杂波环境下雷达目标频域散射中心的数学模型, 并研究了该数学模型的求解方法, 还给出了仿真数据和飞机缩比模型测量数据的实验结果。

关键词 杂波, 高分辨雷达, 散射中心提取。

METHOD OF SCATTERING CENTER ESTIMATION BY RADAR TARGET FREQUENCY RESPONSE DATA IN CLUTTER ENVIRONMENT*

JIANG Wei-Dong CHEN Zen-Ping ZHUANG Zhao-Wen GUO Gui-Rong

(The ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The simulation methods of radar clutter with given amplitude distribution and power spectrum were described, and the simulation results of radar clutter were given. A scattering center model of frequency domain of radar target was presented under the clutter environment and its solution method was studied. Finally, the experimental results of simulation data and the measurement data of aircraft scale model were given.

Key words clutter, high-resolution radar, scattering center extracting.

引言

高分辨雷达目标识别技术已有许多研究成果^[1-2], 重点集中在雷达目标电磁特性探讨、目标特征的描述及提取、目标识别方法的研究上, 这些研究成果假设目标的背景相当简单, 几乎都用高斯白噪声表示, 事实上, 处在实际环境中的雷达目标电磁散射特性非常复杂, 不仅表现为由于目标本身结构的复杂使得目标回波散射特性的复杂, 而且还表现为目标背景散射特性的多样性和随机性, 目标背景的散射特性通常从统计角度加以描述, 其幅度统计特性一般不能用高斯白噪声表示, 研究表明^[3,4,5], 在高分辨雷达体制下, 目标背景杂波特性可以从幅度统计特性和相关特性(功率谱特性)两方面同时进行描述, 即把背景杂波描述为具有某种幅度分布(如对

数正态分布、K 分布等)的相关随机过程; 由于不同背景条件下的幅度分布和相关特性各不相同, 因此, 在某种意义上讲, 实际背景中目标的特征提取问题(如目标散射中心估计)可等价为幅度分布和相关特性不断变化的杂波背景下, 目标的特征参数估计问题, 这给我们在实际背景中的目标特征抽取带来极大的困难。

高分辨雷达目标散射中心提取并作为目标特征矢量进行雷达目标识别受到相当的重视, 文献[6]在白噪声背景下对其进行了详细的研究, 并得到了高的识别效果, 然而, 在色噪声背景下, 文献[6]的散射中心提取方法失去了意义, 通常, 色噪声背景下的参数估计方法随着色噪声幅度分布和相关特性的变化而变化, 而目标背景的多样性使得其等效的色噪声的分布和相关特性各不相同, 因此, 解决实际背景下

* 国防预研基金(编号: Y6A7)资助项目

稿件收到日期 2000-04-10, 修改稿收到日期 2000-09-04

* The project supported in part by the Preliminary Research Foundation of National Defense (No. Y6A7).

Received 2000-04-10, revised 2000-09-04

目标散射中心提取的途径应从两个方面考虑:其1,寻找一种能描述各种背景杂波统计特性和相关特性的统一方法,并寻找相应的求解算法;其2,寻找一种对杂波分布和相关特性变化不敏感的散射中心估计算法.本文主要针对后者进行研究,首先,本文回顾了各种杂波环境统计特性和相关特性,而后,在频域建立杂波背景下目标散射中心后向电磁散射的数学模型,最后给出了该模型的求解方法.仿真实验和飞机缩比模型测量数据的实验结果表明该数学模型及求解方法是有效的.

1 雷达目标背景杂波特性及其仿真

雷达目标背景杂波种类非常多,总体上可以分为:地杂波、海杂波、体杂波和其它类型杂波等,而每种杂波在不同条件下表现的特性有较大的区别(如地杂波与雷达照射波长、带宽、地的湿度、地面植被情况等密切相关),这里仅对各类杂波作概括描述^[7].

地杂波除人造物体产生的点杂波外,呈现分布散射现象,研究地面杂波的特性是很困难的,不但要研究地面物体的地形类型(岩石、淤泥、积水等)与电磁波的频率、极化等相互作用的后向电磁散射特性,而且还要研究散射特性随季节、气候、天气等多种因素的变化特性.由于地杂波有遮蔽作用,并有偶然的强反射体,所以,地杂波的总体统计特性是非瑞利型的,对数正态分布和韦伯(Weibull)分布被广泛的应用;对无强散射体的地杂波,杂波的幅度统计模型也可以用瑞利分布表示.海杂波与地杂波性质不同,它一般是均匀的.在高分辨系统中,海面波浪的结构可能被分辨出来,海杂波回波呈现相应的尖峰,在测角低的情况下,波浪后面的部分被遮蔽,海杂波幅度呈现对数正态型分布、K-分布特性.体杂波是指雨、箔条、雪、雹以及云和雾等,通常假定雨杂波在水平层内是均匀的.箔条通常是沿一条窄的通道小块云片分布,单个箔条可以看成半波振子的散射,箔条云的总体散射与风向有关,在单极化条件下,箔条对雷达有去极化作用.由于体杂波是由大量的相互独立的点构成,因此,体杂波的起伏统计特性几乎都为瑞利型.其它类型的杂波包括鸟、昆虫以及晴朗大气的视在反射回波、有源噪声干扰和欺骗干扰等,这些杂波干扰很难从杂波的统计特性建立数学模型.

在高分辨率雷达体制下,由于回波积累等因素,使得杂波样值间具有相关特性,这种相关特性可以用杂波功率谱表示,杂波功率模型一般为高斯型或渐进高斯型^[8](如n次方谱模型).

对雷达背景杂波统计特性仿真一直受到人们的关注,并取得了一些有价值的研究成果.目前有两种具有代表性的雷达杂波仿真方法,其一是球不变随机过程法(SIRP)^[9],其基本思路是:产生一个相关的高斯随机过程,然后用具有所要求的概率密度函数的随机序列进行调制;其二是零记忆非线性变换法(ZMNL)^[10],其基本原理是:首先产生满足功率谱要求的相关高斯序列,然后进行某种非线性变换得到相应的相关非高斯随机序列,该方法的关键是求解非线性变换前后相关系数的关系.本文应用零记忆非线性变换法仿真了频谱为高斯型和n次方型、幅度分布特性为韦伯分布和K-分布杂波,并作为实验数据,关于用ZMNL方法产生相关非高斯随机序列的具体方法,文献[8,10]作了详细的讨论.

2 目标频域散射中心数学模型

在光学区,雷达目标的频域响应特性可以表示为各个散射中心的频域响应之和^[11,12],每个散射中心的频率响应可以表示为距离相位因子与频率指数 $(j2\pi \cdot f_k)^{t_i}$ 的乘积.

假设目标由M个散射中心构成,其线极化天线接收的后向散射场可表示为:

$$y(k) = \sum_{i=1}^M k_i e^{-j2\pi f_k r_i} \times (j2\pi \cdot f_k)^{t_i} \quad (1)$$

式(1)中 k_i 是第*i*个散射中心的幅度系数; r_i 为第*i*个散射中心的相对距离; t_i 为散射中心的类型, $t_i = \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$ 对理想的散射体它的取值为0.

当测量带宽不很宽时,经适当的简化^[12]可得到:

$$y(k) = \sum_{i=1}^M a_i e^{i\theta_i} \quad (2)$$

式(2)中, $s_i = -d_i + jw_i$, d_i 为散射中心的衰减因子, w_i 为模型径向散射中心位置因子,光学区雷达目标的频域响应为一典型的衰减正弦信号和模型,求解该模型的阶数、极点和幅度,可以得到目标散射中心数量、位置和散射强度信息.

在实际背景中,雷达天线接收的回波信号是目标的后向电磁散射、背景杂波和噪声的叠加,而杂波一般为非高斯相关随机过程,因此,设杂波背景下雷达目标频域散射模型可表示为:

$$y(k) = \sum_{i=1}^M a_i e^{i\theta_i} + e(k) \quad (3)$$

式(3)中, $e(k)$ 表示杂波和噪声,因此提取杂波背景下目标强散射中心的问题可等效为求解式(3)模型的阶数、极点和幅度问题.

3 杂波背景下目标散射中心提取方法

对式(3)数学模型, 设测量数据 $k=0, 1, \dots, (K-1)$, 我们感兴趣的是在 $e(k)$ 的幅度分布和相关特性未知条件下估计 $\{a, d, w\}_{i=1}^M$, 引入 RELAX 方法^[13,14]求解式(3).

令: $y = [y(0), y(1), \dots, y(K-1)]^T$, $\varphi = [1, e^{j(K-1)}, \dots, e^{j(K-1)}]^T$, $(\cdot)^T$ 表示转秩. 采用非线性最小均方估计准则对式(3) $\{a, d, w\}_{i=1}^M$ 进行估计, 则有:

$$C_1(\{a, d, w\}_{i=1}^M) = \|y - \sum_{i=1}^M a_i \varphi_i\|^2, \quad (4)$$

对其中第 i 个极点和幅度求解, 设:

$$y_i = y - \sum_{j=1, j \neq i}^M \hat{a}_j \hat{\varphi}_j, \quad (5)$$

式(5)中, $\{\hat{a}_j, \hat{d}_j, \hat{w}_j\}_{j=1, j \neq i}^M$ 假设为已经估计出的参数, 则式(4)变为:

$$C_2(a, d, w_i) = \|y_i - a_i \varphi_i\|^2, \quad (6)$$

对式(6)最小化, 则可得到 a_i 的估计值 \hat{a}_i :

$$\hat{a}_i = (\varphi_i^H \varphi_i)^{-1} \varphi_i^H y_i = \varphi_i^H y_i / a, \quad (7)$$

$(\cdot)^H$ 表示复共轭转秩, a 为:

$$a = \begin{cases} K, & d_i = 0 \\ \frac{1 - \exp(-2Kd_i)}{1 - \exp(-2d_i)}, & d_i \neq 0 \end{cases}$$

将式(7)代入(6)式得:

$$C_2(d_i, w_i) = \|y_i - \varphi_i \hat{a}_i\|^2 = \|y_i^H y_i - y_i^H \varphi_i \hat{a}_i\|^2, \quad (8)$$

$$\text{令: } C_3(d_i, w_i) = (\varphi_i^H y_i)^H (\varphi_i^H y_i) / a, \quad (9)$$

使式(8)最小和使式(9)最大是等价的. 由式(9)容易得到式(10)的估计结果:

$$\{\hat{d}_i, \hat{w}_i\} = \arg \max_{d_i, w_i} \{|\varphi_i^H \tilde{y}_i|^2 / a\}, \quad (10)$$

其中 $\tilde{y}_i = [y_i(0), y_i(1)e^{-d_i}, \dots, y_i(N-1)e^{-d_i(N-1)}]^T$,

$$\varphi_i = [1, e^{jw_i}, \dots, e^{jw_i(N-1)}]^T,$$

因此, 当固定 d_i 时, w_i 的估计值 $\hat{w}_i(d_i)$ 为式(10)取最大值对应的频率点. 而式(10)的计算可以通过高效的 FFT 完成, 即对 \tilde{y}_i 进行 FFT 变换后取模乘 a 寻找最大值, 其相应的频率点值为 w_i 的估计值. 而 d_i 的估计值 \hat{d}_i 可由式(11)确定:

$$\hat{d}_i = \arg \max_{d_i} \{|\varphi_i^H [w_i(d_i)] \times \tilde{y}_i(d_i)|^2 / a(d_i)\}, \quad (11)$$

显然, 当 w_i 给定时, 对 d_i 的估计为典型的一维峰值搜索问题, 经过适当的预处理, 同样可以用 FFT 变换来估计 d_i . 然而, w_i 和 d_i 的估计是相互以对方为条件的, 这实质是二维搜索问题, 会带来巨大的计算量. 我们注意到矢量 \tilde{y}_i 仅在矢量 y_i 上加一衰减因子, 对上二矢量进行 FFT 变换, 信号对应的频率位置不变, 这告诉我们可以用 y_i 代替式(13)的 \tilde{y}_i 进行频率估计. 因此, 对 w_i 和 d_i 估计的计算量近似为二次 FFT 变换和二次寻找最大值.

当 w_i 和 d_i 的估计结果 \hat{w}_i 和 \hat{d}_i 获得后, a_i 的估计 \hat{a}_i 可由式(7)确定.

由以上推导, RELAX 算法的步骤如下:

Step1 令 $M=1$, 由矢量 y 根据式(10)、(11)和式(7)获得 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}$.

Step2 令 $M=2$, 由式(5)和 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}$ 计算矢量 y_2 , 根据式(10)、(11)和式(7)获得估计的结果 $\{\hat{d}_2, \hat{w}_2, \hat{a}_2\}$, 而后, 由估计出的 $\{\hat{d}_2, \hat{w}_2, \hat{a}_2\}$ 计算 y_1 , 并由 y_1 重新计算 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}$; 重复 Step2 的估计过程, 直到满足收敛条件.

Step3 令 $M=3$, 由 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}_{i=1}^2$ 计算 y_3 , 由 y_3 获得 $\{\hat{d}_3, \hat{w}_3, \hat{a}_3\}$, 由 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}_{i=2}^3$ 重新计算 y_1 , 并重新估计 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}$, 由 $\{\hat{d}_1, \hat{w}_1, \hat{a}_1\}_{i=1,3}$ 重新计算 y_2 , 并重新估计 $\{\hat{d}_2, \hat{w}_2, \hat{a}_2\}$; 重复 Step3 步骤, 直到满足收敛条件.

Step4 令 $M=M+1$, 类似 Step3 方式估计参数.

Step5 重复 Step4 过程, 直到 M 为要求的估计阶数.

对于收敛条件的确定, 这里采用代价函数 $C_1(\{a_i, d_i, w_i\}_{i=1}^M)$ 的绝对变化量准则, 即相邻两次代价差的绝对值小于给定的 ϵ (如 $\epsilon=10^{-2}$) 时认为满足收敛条件. 而信号阶数估计问题, 这里可以借鉴文献^[15,16]的方法.

从大量的实验表明, RELAX 算法的收敛速度是极快的, 一般在 2、3 步内算法即可收敛.

4 部分实验结果

仿真实验 1: 由于雷达杂波种类多, 且每种杂波随参数的变化而变化, 杂波呈现的特性也有较大的区别, 因此, 实验仅给出 K 分布和韦伯分布杂波的模拟结果. 由于用 ZMNL 方法模拟非高斯相关序列.

首先必须获得相关特性满足要求且幅度分布为高斯分布的序列,因此,实验首先模拟相关高斯序列.

图1产生的相关高斯杂波序列是采用高斯白噪声序列通过线性系统(AR模型)方法产生的,AR模型的阶数和系数是根据高斯色噪声的功率谱要求由Burg算法估计的.设仿真的相关高斯杂波功率谱为高斯型(其它类型功率谱有同样的效果),仿真的相关高斯杂波序列长度 $N=256$ 点,其中心频率 $f_0=0\text{Hz}$,3dB带宽为 $f_{3\text{dB}}=20\text{Hz}$,频率采样间隔为 $4 \times f_{3\text{dB}}/N$.相关高斯杂波仿真结果如图1,图1(a)和图1(b)的结果为首先进行10次独立仿真,并分别进行功率谱估计和幅度分布估计,而后把10次功率

谱估计和幅度估计的结果进行统计平均.图1(a)仿真高斯杂波的功率谱估计采用6阶AR模型表示.

图2仿真的结果的带数 $\nu=1.4, a=1.0$,长度 $N=256$ 的相关K分布杂波序列,功率谱为高斯型,功率谱其它参数与图1功率谱参数相同.

图3仿真结果为 $p=1.2, q=2$,长度 $N=256$ 的相关韦伯分布杂波序列,杂波功率谱为高斯型,其它功率谱参数与图1功率谱参数相同.

对功率谱为n次方型的杂波仿真结果这里不再一一给出,由于散射中心模型为频域模型,因此,对仿真的杂波要进行FFT变换到频域.

仿真实验2:用仿真实验1的实验结果用RELAX方

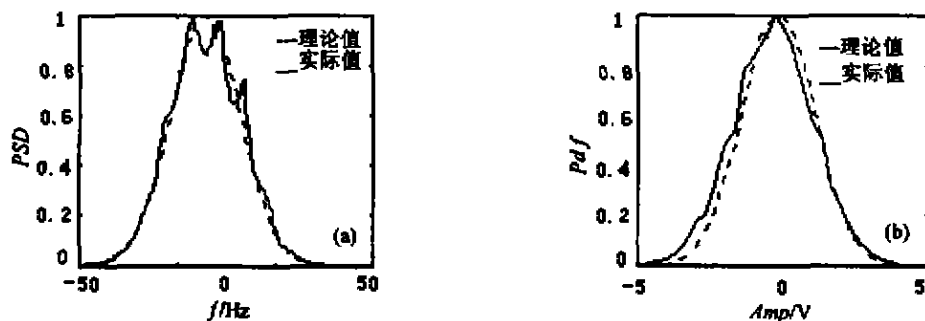


图1 相关高斯杂波仿真实验结果 (a)高斯杂波功率谱图 (b)高斯杂波幅度分布图
 Fig. 1 The simulated result of correlated Gauss clutter
 (a) the PSD of Gauss clutter (b) the amplitude Pdf of Gauss clutter

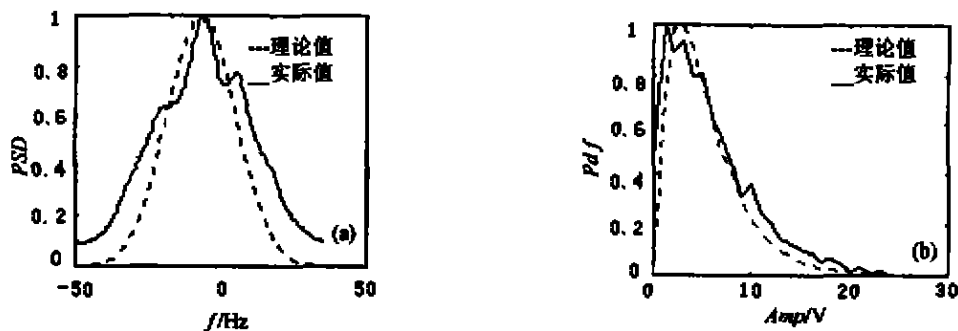


图2 相关K分布杂波仿真的实验结果 (a)K分布杂波功率谱图 (b)K分布杂波幅度分布图
 Fig. 2 The simulated result of correlated K-distribution clutter
 (a) the PSD of K-distribution clutter (b) the amplitude Pdf of K-distribution clutter

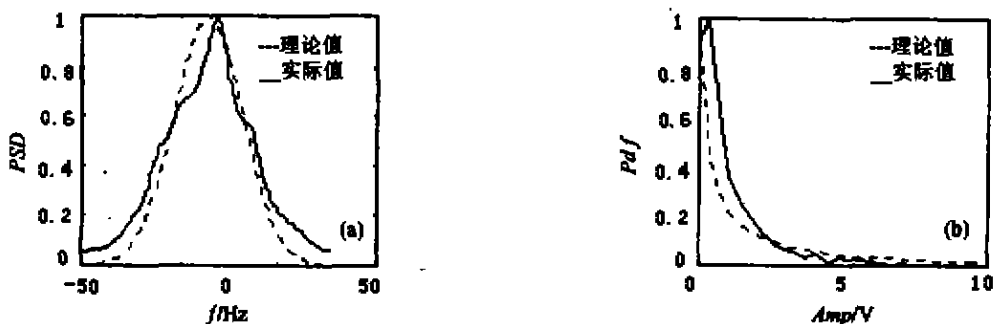


图3 相关韦伯分布杂波仿真实验结果 (a)韦伯分布杂波功率谱图 (b)韦伯分布杂波幅度分布图
 Fig. 3 The simulated result of correlated Weibull distribution clutter
 (a) the PSD of Weibull distribution clutter (b) the amplitude Pdf of Weibull distribution clutter

法提取信号极点和幅度信息. 定义信噪比为:

$$SNR = 10\log_{10}(P_S/P_N), \quad (12)$$

式(12)中 P_S 和 P_N 分别为信号和噪声的能量. 仿真实验信号为:

$$s(k) = a_1 e^{p_1 k} + a_2 e^{p_2 k} + a_3 e^{p_3 k} + a_4 e^{p_4 k}, \quad (13)$$

式(13)中 $p_1 = -0.01 - j0.08\pi$, $p_2 = -0.02 + j0.12\pi$, $p_3 = -0.03 + j0.16\pi$, $p_4 = -0.04 + j0.20\pi$, $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1$.

实验添加杂波的功率谱是高斯型和 n 次方型的 K 分布和韦伯分布杂波.

图 4 表示信号加上功率谱为高斯型、幅度为韦伯分布的杂波的实验结果, 图 4(a)和图 4(b)实验 $SNR=4.9\text{dB}$ 时的实验结果, 图 4(c)为算法剩余能量 $(C_1(\{a, d, w\}_{m=1}^M))$ 与实验叠加在信号上杂波能量的比较. 由图 4(b)实验结果可知, 该算法在较低信噪比条件下可以准确恢复信号, 由图 4(c)可见, 无论在强杂波能量还是在弱杂波能量下, 算法提取信号后的剩余能量与杂波能量非常近似, 这表明信号被准确提取, 剩余能量中包含信号成份极少.

表 1 为杂波是韦伯分布, 在不同信噪比条件下

提取信号的极点, 表 1 中极点的虚部要乘上 π .

由表 1 可知, 信噪比的变化对极点的衰减因子影响较大, 对频率影响较小. 采用 K 分布作上述实验, 可以得到类似的结果, 用功率谱为 n 次方型的杂波, 其它类型杂波(对数正态分布等)的实验结果与上述实验结果类似.

实验 3: 为采用数据为 Ka 波段阶跃变频雷达, 带宽为 1GHz, 跳频步长为 4MHz, 每方位角测量 250 点, 方位角间隔 1° . 对飞机鼻锥方向 $0^\circ-30^\circ$ 方位角变换范围内的测量数据进行实验. 目标为某飞机的缩比模型, 目标的特征尺寸为 1.0m.

定义误差系数为由提取的极点和幅度恢复的波形与原始信号之差模的平方除以信号的能量

$$P_{\text{det}} = \left(\sum_{k=0}^{K-1} |s(k) - \hat{s}(k)|^2 \right) / \sum_{k=0}^{K-1} |s(k)|^2, \quad (17)$$

式(17)中, $s(k)$ 表示无杂波时目标后向电磁散射, $\hat{s}(k)$ 表示在杂波条件下根据提取的极点和幅度系数恢复的数据, 因此, P_{det} 表示恢复波形与原始波形的近似程度. 图 5 实验加的杂波为高斯型频谱、幅度为 K -分布杂波, 实验的 $SNR=3.88\text{dB}$, 提取目标极点(散射中心)阶数为 12 阶, 信号能量 $P_S=132.2$,

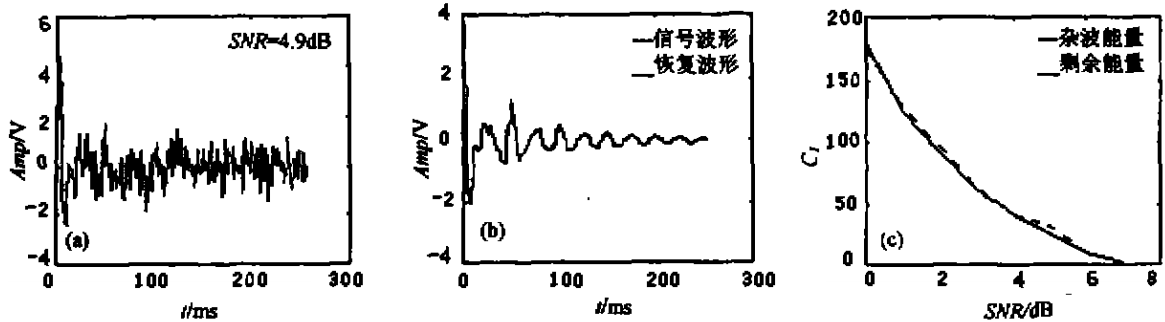


图 4 仿真信号实验结果
 (a) 信号加杂波波形 (b) 信号波形与恢复波形 (c) 杂波能量与剩余能量
 Fig. 4 The experimental result of simulated signal (a) the wave of signal with clutter
 (b) the signal wave and restored wave (c) the clutter power and residual power

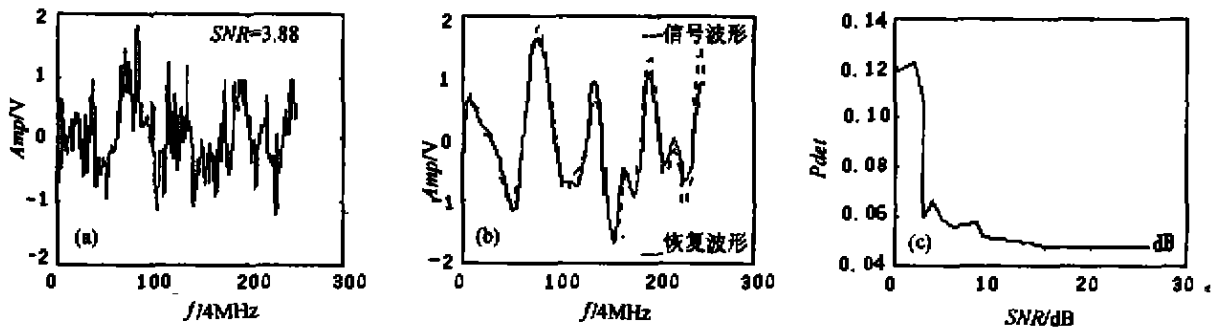


图 5 飞机模型回波实验结果
 (a) 目标回波加杂波波形 (b) 目标波形与恢复波形 (c) 误差系数图
 Fig. 5 The experimental result of aircraft model received signal (a) the received signal of target with clutter
 (b) target signal wave and restored wave (c) the graph of error coefficient

表 1 不同信噪比下提取信号的极点
Table 1 The result of extracted poles in different SNR

SNR	P1	P2	P3	P4
20dB	-0.101+j0.0802	-0.0205+j0.1197	-0.0278+j0.1604	-0.0422+j0.2001
10dB	-0.0120+j0.0806	-0.0227+j0.1204	-0.0302+j0.1605	-0.0384+j0.2002
5dB	-0.0118+j0.0810	-0.0240+j0.1208	-0.0350+j0.1606	-0.0362+j0.2003
0dB	-0.0142+j0.0814	-0.0288+j0.1211	-0.0421+j0.1589	-0.0310+j0.2011

噪声能量 $P_N=54.1, C_1=57.0$.

图 5(b)表明,在信噪比较低的杂波背景下,对信号的恢复是令人满意的,它从另一方面表明,杂波背景下目标的散射中心提取是可信的.图 5(c)为不同 SNR 条件下,目标误差系数 P_{det} 随 SNR 变化情况,由图 5(c)可知,当 SNR 大于 5dB 时, P_{det} 小于 6%,即恢复的波形与实际波形几乎相同.

通过大量的实验表明,该算法有如下特点:

(1) 算法首先估计信号能量最大的极点,根据极点所对应的能量大小依次估计,这与我们从频域提取目标的“强散射中心”的思路是一致的,即算法提取的极点就代表目标的强散射中心.

(2) 实验表明,算法剩余能量 $C_1(\{a, d, w\}_{-1}^M)$ 与杂波能量近似,而与 SNR 无关,这表明剩余能量中信号成份很少.

(3) 算法对杂波的种类不敏感,表明对各种杂波环境有广泛的适应性;算法提取极点的频率与 SNR 不敏感,表明算法可以在低 NSR 条件下,较精确估计目标散射中心位置信息.

近年来,以目标散射中心作为特征矢量进行雷达目标识别作了许多研究,但对在低 SNR 条件下提取散射中心,及在杂波环境下提取散射中心等问题很少研究,而后者的研究直接决定了散射中心提取的有效性、准确性.本文仿真了多种雷达背景杂波,给出杂波背景下目标频域散射数学模型,并用 RELAX 算法研究了该模型的求解方法,仿真实验和飞机目标缩比模型测量数据实验表明在多种杂波背景下,该方法能有效的提取目标散射中心,在较低 SNR 条件下,该方法还能较准确的提取散射中心.

REFERENCES

- [1]Steadly W M, Moses R L. High resolution exponential modeling of fully polarized radar returns. *IEEE Trans. on A. E. S.*, 1991, 27(3): 459-468
- [2]Li H J, Rang S H. Using range profile as feature vectors to identify airspace objects. *IEEE Trans. on A. P.*, 1993, 41(3): 261-268
- [3]Rangaswamy M, Weiner D. Computer generation of correlated non-Gaussian radar clutter'. *IEEE Trans. on A. E. S.*, 1995, 31(1): 106-115
- [4]Raghavan R S. A model for estimating parameters of K-distributed clutter. *IEEE Trans. on A. E. S.*, 1991, 27(2): 238-246
- [5]Anastassopoulos V, Lampropoulos G A, Drosopoulos A. High resolution radar clutter statistics. *IEEE Trans. on A. E. S.*, 1999, 35(1): 43-49
- [6]CHEN Zen-Ping. Radar target classification and application by means of structural features, *Dissertation for PH. D. degree* (陈曾平. 雷达目标结构特征识别的理论与应用,国防科技大学博士论文),1994
- [7]Mitchell R. L. *Radar Signal Simulation*. London: Artech House, INC, 1976, 25-55 (Mitchell R. L. 著,陈训达译,雷达系统模拟.北京:科学出版社),1982,46-54
- [8]WANG Ying, MAO Er-Ke, HAN Yue-Qiu. Modeling and simulation of correlated K-distributed clutter, *Signal Proceeding*(王盈,毛二可,韩月秋.相关 K 分布杂波的建模与仿真,信号处理),1997, 13(2): 141-146
- [9]Liu B, Munson D C. Generation of a random sequence giving a jointly specified marginal distribution and auto covariance. *IEEE Trans. on A. S. S. P.*, 1982, 30(2): 973-983
- [10]James L. Correlated K-distribution clutter generation for radar detection and track's. *IEEE Trans. on A. E. S.*, 1995, 31(2): 568-580
- [11]Hurst M P, Mittra R. Scattering center analysis prony's method. *IEEE Trans. on A. P.*, 1987, 35(3): 986-988
- [12]Moses R L, Carriere R. Parametric modeling of radar targets using canonical scattering centers. Report 719269-13. Dec. . 1988, *ESL, The Ohio State University*.
- [13]Li J, Stoica P. Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction. *IEEE Trans. on S. P.*, 1996, 44(2): 281-295
- [14]Liu Z S, Li J, Stoica P. Relax-based estimation of damped sinusoidal signal parameters. *Signal Proceeding*, 1997, 62: 311-321
- [15]Wax M, Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria. *IEEE Trans. on A. S. S. P.*, 1985, 33(2): 387-392
- [16]Wax M, Ziskind I. Detection of the number of coherent signals by MDL principle'. *IEEE Trans. A. S. S. P.*, 1989, 37(8): 1190-1196