

超宽带条件下运动目标的高分辨分析方法

王 剑 吴嗣亮 侯舒娟

(北京理工大学信息科学技术学院 北京 100081)

摘 要: 该文首先分析了在超宽带条件下静态雷达目标的频域响应特性, 提出了一种更符合目标散射实际情况的高分辨分析参数化方法, 该方法通过对目标回波进行 ARMA 模型状态空间近似, 提取目标的散射极点来获得散射点的散射类型和距离信息。在目标存在运动时, 目标的回波模型是由静态回波模型与一个含运动参数的多项式相位因子组成。据此, 该文提出采用循环统计量的方法来进行速度估计, 经过速度补偿消除运动影响后可获得超宽带条件下目标的散射极点的精确估计。仿真实验结果表明该方法对静止和运动目标都能够获得目标精确的一维距离信息和各散射点的散射机理类型, 对于获取超宽带条件下目标高分辨分析是十分有效的。

关键词: 超宽带雷达; 目标散射中心; 参数估计; 状态空间近似; 循环统计量

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2090-04

A High-Resolution Method for Motive Target in UWB

Wang Jian Wu Si-liang Hou Shu-juan

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper firstly studies the characteristic of the UWB radar frequency response and presents a parameterized method to extract the poles of UWB still target. This method regards the high frequency echo as an ARMA model and poles of this ARMA model express the scattering type and range of the scatter. Secondly, according the actual situation, the motive target model of UWB radar is presented. This model is composed of a still model and a polynomial phase part which is caused by the motion of target. Based this character, a cyclostationary method can be used to estimate the motion parameters of the target. After the motive target model compensated by the estimated parameters, the eigenvalues can be extracted by the state space method. Simulation shows 1-D range and scattering mechanism can be correctly obtained and proves the validity of the method.

Key word: UWB radar; Target scattering center; Parameter estimation; State-space approach; Cyclostationary

1 引言

为了获得目标的精确的特征, 现代雷达往往工作在高频区、超宽带条件下, 这种情况下目标的散射体长度 L 远远大于入射波波长 λ , 目标的回波不再是各散射点回波时延后的简单叠加, 而是表现为具有不同散射机理的散射点产生的散射波总和, 散射机理主要表现为不同散射点的散射强度各自依频率衰减/增强。因此目标的回波便会含有各个目标散射点的距离和散射点类型的信息, 如果能够提取这些参数便可以获得目标的一种含有距离与散射点类型的参数化高分辨分析。

雷达目标的参数化高分辨分析的前提是建立目标在超宽带条件下的回波模型。传统 Prony 理论以及 MUSIC 法^[1-3]所建立的散射点模型是建立在窄带条件下的, 这些理论有一个共同点就是认为目标的散射强度是常数, 这点假设在窄带和简单散射体条件下是近似成立的, 但是在宽带乃至超宽带条件下这类模型已经不能精确地描述实际情况下散射点的散射过程。本文根据超宽带条件下目标散射的实际情况, 采用

一种散射点散射幅度具有依频率衰减/增强的全极点模型描述目标散射回波, 该模型不仅含有散射点的时延参数同时也含有散射点的类型参数, 通过状态空间近似理论可得到这两类参数的精确估计, 与传统的基于参数辨识理论比较, 该方法具有计算简单、抗噪声能力强的优点。在此基础上, 本文提出了运动目标的超宽带条件下的频域回波形式, 建立了运动条件下的回波模型, 同时指出运动目标的频域回波模型是由静态回波模型与一个含运动参数的多项式相位因子组成, 通过高阶循环累计量的方法对运动目标回波模型的运动参数进行估计, 进而对运动目标回波进行运动补偿。该方法能够有效地消除目标运动对目标的高分辨分析的不利影响, 采用状态空间极点提取理论可以获得目标精确的高分辨分析。

2 静态目标回波模型的建立

在高频区超宽带条件下目标的电磁散射可以认为是各散射点局部电磁散射的合成^[4], 根据几何绕射理论(GTD)目标各散射点合成的频域回波模型可以表示为^[5]:

$$y(f) = \sum_{i=1}^M A_i f^{\zeta_i} \exp(-j2\pi f \tau_i) \quad (1)$$

式中 A_i 、 τ_i 分别是为第 i 个散射中心的散射强度和时延, ξ_i 代表散射中心类型, 表示了幅度依频率衰减/增加的性质, M 为目标的散射中心数目。如果令 $\alpha_i = -\xi_i / f \cdot \ln(f / f_1)$ (其中 f_1 为载频), 以 Δf 为频率步进间隔对模型式(1)进行等间隔采样^[6], 同时考虑到噪声的影响, 式(1)的离散形式为:

$$y(k) = \sum_{i=1}^M A_i \exp[-(\alpha_i + j2\pi\tau_i)k\Delta f] + \omega(k), k = 1, \dots, N \quad (2)$$

其中 $\omega(k)$ 为加性复白噪声。显然式(2)的参数估计是一个非线性问题, 考虑式(2)的阻尼指数和信号的特点, $y(k)$ 可视为一个线性系统在雷达信号激励下的响应, 可以应用 ARMA 模型来表示^[7], 且该 ARMA 过程的极点 p_i 具有如下形式^[8,9]:

$$p_i = \exp[-(\alpha_i + j2\pi\tau_i)\Delta f] \quad (3)$$

本文称上式中的极点 p_i 为各散射点的散射极点, 他们全面描述了目标散射点的散射机理: 散射类型 α_i 时延 τ_i 。显然, 如果通过回波数据 $y(k)$ 提取目标的散射极点 p_i 便可以获得目标散射点的散射机理的精确描述, 本文将这种基于目标散射点散射机理精确描述称为目标的高分辨分析。

3 系统函数的状态空间近似与极点提取

通过第2节的分析, 可以得出高频区目标高分辨分析的主要任务是通过回波数据得到模型式(3)的极点估计。状态空间近似理论^[10]提供了一种简便的且具有噪声鲁棒性的极点估计方法, 本文采用该理论来获得目标的高分辨参数估计。

首先利用回波 $y(n)$ 建立 Hankel 阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & y(3) & \cdots & y(L) \\ y(2) & y(3) & y(4) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & y(N-L+2) & \cdots & y(N-1) \\ y(N-L+1) & y(N-L+2) & y(N-L+3) & \cdots & y(N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 L 为相关窗长度, 取 L 为小于等于 $2N/3$ 的整数。应用奇异值分解(SVD)得到 \mathbf{H} 的低秩逼近^[10]

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{U}_{\text{sn}} \mathbf{\Sigma}_{\text{sn}} \mathbf{V}_{\text{sn}}^* \quad (5)$$

其中下角标 sn, “*” 分别代表信号子空间和共轭转置运算, \mathbf{U} , \mathbf{V} 分别代表 \mathbf{H} 矩阵的左规范部分及右规范部分, 矩阵 $\mathbf{\Sigma}$ 的对角线为信号部分的奇异值。根据状态空间近似理论, 目标所表示的线性系统的状态转移矩阵 \mathbf{A} 可表示为:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{\Omega}_{-r1}^* \mathbf{\Omega}_{-r1})^{-1} \mathbf{\Omega}_{-r1}^* \mathbf{\Omega}_{-r1} \quad (6)$$

其中能观测阵 $\mathbf{\Omega} = \mathbf{U}_{\text{sn}} \mathbf{\Sigma}_{\text{sn}}^{1/2}$, 下角标 “-r1” 和 “-rl” 分别表示删除能观测矩阵 $\mathbf{\Omega}$ 的第一行与最后一行的运算。通过对矩阵 \mathbf{A} 的特征值分解得到散射极点 p_i ($i=1 \dots M$), 它的幅值和相位分别表示了该散射点的散射强度在超宽带条件下依频率变化的性质和时延:

$$\alpha_i = -\frac{\log|\lambda_i|}{\Delta f} \quad R_i = -\frac{c\phi_i}{2\pi\Delta f}, \quad i = 1, \dots, M \quad (7)$$

式(7)中符号 “| |” 代表取模, ϕ_i 代表了第 i 个特征值 λ_i 的相位。

通过以上分析, 可以看出根据状态空间近似理论可以通过高频区目标的回波数据直接获得目标的高分辨分析: 散射类型 α 和目标的距离高分辨 R_i ; 同时该方法基于信号与噪声子空间的分解理论, 因此该方法同时具有一定的抗噪声性。

4 运动目标的高分辨分析获得

4.1 动目标回波模型

假设刚体目标具有 M 个强散射中心, 且目标与雷达之间无相对转动, 考虑速度和加速度的影响, 可以得到运动目标的频域离散回波模型:

$$s(k) = \sum_{i=1}^M E_i \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}(k-1)\Delta f\right\} \cdot \left\{R_i + v(k-1)T_s + \frac{1}{2}a[(k-1)T_s]^2\right\} \quad (8)$$

其中 v 为目标的径向速度; a 为加速度, T_s 为离散频点间时间间隔。式(8)可进一步表为

$$y_a(n) = s(n) \exp\left\{j\sum_{l=2}^3 \beta_l n^l\right\} \quad (9)$$

其中 $\beta_0 = 0$, $\beta_1 = 0$, 且 $s(n) = \sum_{i=1}^M A_i \exp\{(\alpha_i + j2\pi R_i/c)n\Delta f\}$ 。

$$\beta_2 = 4\pi\Delta f v T_s / c \quad (10)$$

$$\beta_3 = 2\pi\Delta f a T_s^2 / c \quad (11)$$

接收信号的一般形式为:

$$y(n) = y_a(n) + v(n) \quad (12)$$

$v(n)$ 为零均值, 且方差为 δ^2 的复白噪声。由于式(9)所表示的回波信号含有高次相位项, 如果采用第3节中所述的状态空间高分辨方法, 那么必须对回波信号进行高次相位的补偿。补偿因子具有式(13)的形式, $\hat{\beta}_l$ 为相应的速度与加速度因子的估计值。

$$\exp\left\{-j\sum_{l=2}^3 \hat{\beta}_l n^l\right\} \quad (13)$$

4.2 运动补偿因子

通过第3节的分析可以知道, $s(n)$ 可以用 ARMA 平稳过程所描述, 考虑到 $v(n)$ 为零均值、方差为 σ^2 的复白噪声, 参数 β_3 与 β_2 可以利用高阶循环统计量通过以下步骤得到估计^[11]:

(1) 计算 $y(n)$ 的四阶时变矩 $M_{4y}(\mu; \tau, \tau, 2\tau)$ 在 μ 平面的峰值, 获得加速度因子 β_3 的估计值:

$$\hat{\beta}_3 = \frac{1}{6\tau^2} \arg \max |M_{4y}(\mu; \tau, \tau, 2\tau)| \quad (14)$$

式中的 τ 为单位滞后量。

(2) 构造加速度补偿因子 $\exp\{-j\hat{\beta}_3 n^3\}$, 与回波 $y(n)$ 进

行加速度解调，获得解调后的数据 $y_a'(n)$ ：

$$y_a'(n) = s(n) \exp\{j\beta_2 n^2\} \quad (15)$$

利用公式

$$\hat{\beta}_2 = \frac{1}{2\tau} \arg \max_{\mu} |M_{2y_a'}(\mu; \tau, \tau)| \quad (16)$$

获得速度因子 β_2 的估计值。

在获得 β_3, β_2 的估计值后，按照式(13)的形式构造运动补偿因子，对回波进行补偿，获得 $s(n)$ ，重新应用第3节的高分辨处理方法便可获得运动情况下目标距离高分辨参数估计。

5 仿真实验

采用回波模型表达式(2)，选择仿真实验参数：频率采样步进间隔 $\Delta f=10\text{MHz}$ ，频域采样点数 $N=128$ ，相邻两频点时间间隔 $T_s=0.0001\text{s}$ 。设目标具有两个强散射点：频率衰减系数 $\alpha_1=-0.1 \times 10^{-9}, \alpha_2=-0.3 \times 10^{-9}$ ，两散射点距参考点时延 $\tau_1=2\text{ns}, \tau_2=6\text{ns}$ ，散射点强度 A_1, A_2 均为1。

首先考虑在静止情况下的极点估计。信噪比为-2dB下的实验结果如图1所示，可以看出通过状态空间近似方法，目标的回波的极点被精确的提取出来。图2所示在相同条件下，100次Monte Carlo仿真结果，从图中可以看到，目标静止时，状态空间技术所估计的极点均分布在真实值附近。假设运动参数为：速度300m/s，加速度10m/s²，计算可得 $\beta_2=0.0126, \beta_3=2.095 \times 10^{-8}$ 。图3表示该情况下的仿真结果，从图中可以看到极点估计已经远离了真实极点，仿真结果说明状态空间技术在运动条件下已经不能够获得目标散射点的精确参数估计，必须进行针对高次相位的运动补偿。

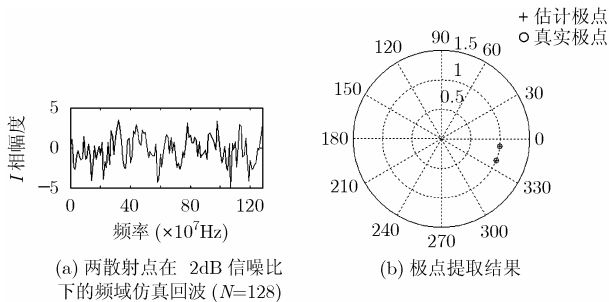


图1 静止目标回波与极点估计

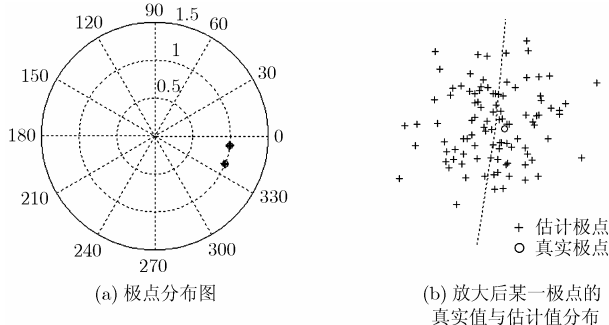


图2 静止目标回波与极点估计

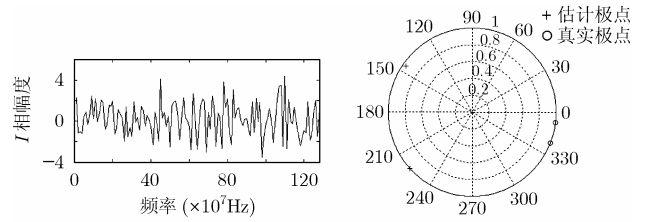


图3 运动目标回波与极点估计

假设运动参数分别为 $\beta_2=0.0126, \beta_3=0.018$ ，单位滞后量 $\tau=1$ ，信噪比 $\text{SNR}=2\text{dB}$ ，采用第4节的高阶时变矩理论对目标运动参数估计(采用4096点FFT)：首先获得加速度因子的估计值 $\hat{\beta}_3=0.0180$ ，其 μ 平面参数的峰值分布如图4(a)所示，应用该估计值构造加速度补偿因子对回波进行加速度解调；接下来对解调后的数据利用二阶时变矩获得速度估计 $\hat{\beta}_2=0.0127$ ，构造速度补偿因子，获得运动解调后的回波数据，图5(b)表示了利用解调数据得到的散射极点估计结果。从图5中可以看到由于运动参数估计的误差，在解调后的数据在后段存在一定的误差，但是极点估计结果与图3比较有了质的改善。

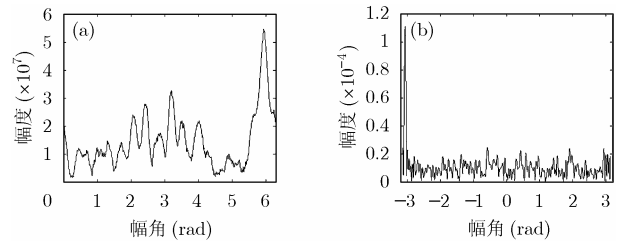


图4 运动参数估计结果的 μ 平面参数的峰值分布：a.加速度，b.速度

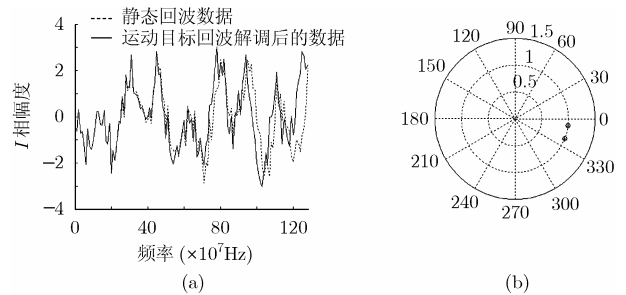


图5 运动补偿的结果及散射极点估计

在实际情况由于加速度因子具有式(11)的形式，往往具有很小的数量级。为了获得足够的分辨率，针对本文所采用的仿真参数，在对加速度因子进行估计时要求 $N_{\text{FFT}}=4.5 \times 10^8$ 。可以看到如果要求对加速度进行精确估计则将消耗很大的运算量；同时由于 β_3 具有相当小的数量级，对后续的距离高分辨参数估计中的影响十分微小，可以忽略，这在下面的仿真中可以得到验证。采用图3回波中采用的仿真参数，忽略加速度因子 β_3 的影响，可直接得到速度因子的估计值 $\hat{\beta}_2=0.0127$ 构造而成的补偿因子 $\exp\{-j\hat{\beta}_2 n^2\}$ 对回波数据进行运动解调，解调后的回波数据 $s(n)$ 如图6所示，图7则是采用状态空间高分辨方法从解调后的数据 $s(n)$ 提取到的目标散射极点。

表1 信噪比为2dB下的100次Monte Carlo仿真的参数估计平均值

散射中心	$\hat{\tau}$ (ns)	与真值的误差(绝对值)	$\hat{\alpha}(\times 10^{-9})$	与真值的误差(绝对值)	\hat{A}	与真值的误差
1	2.0983	0.0983	-0.1090	0.0090	0.955	0.045
2	6.1045	0.1045	-0.2840	0.0160	0.967	0.033

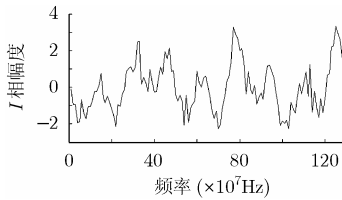


图6 速度解调后的回波结果
($N=128$, $SNR=2$)

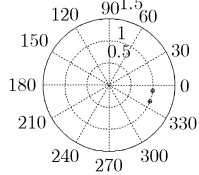


图7 状态空间近似极点
估计计极(o为估点,
+为真实极点)

在信噪比为2dB下进行100次Monte Carlo仿真, 实验所得的估计值的平均值如表1所示。通过实验结果可以看出, 状态空间极点提取方法不仅对噪声具有良好的抑制作用, 而且可以获得超宽带条件下目标散射点高分辨分析。

6 结束语

本文在建立频域超宽带条件下的目标回波模型的基础上, 提出了一种利用状态空间近似理论提取静止目标的散射点参数, 获得了静止目标的高分辨分析的方法。并且在此基础上建立了运动目标频域回波模型, 跟据该模型提出了利用高阶统计量构造运动补偿因子来获得运动目标的高分辨分析的方法。仿真结果证明该理论不仅对噪声具有良好的鲁棒性, 而且计算简单, 对静止和运动目标都能够获得目标精确的一维距离信息和各散射点的散射机理, 是超宽带条件下获取目标高分辨分析的一种有效方法。

参 考 文 献

[1] 沈凤麟, 陈和晏. 生物医学随机信号处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999, 1: 285-286.
 [2] Van Blariuam M L and Mittra R. A technique for extracting the poles and residues of a system directly from its transient response[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1975, 23(6): 777-781.
 [3] Shaw A K and Naishadham K. ARMA-based time-signature estimator for analyzing resonant structure by the FDTD

method[J]. *IEEE Trans. on AP*, 2001, 49(3): 327-339.
 [4] 黄培康, 等. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 3: 230-246.
 [5] Poter L, et al. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1995, 42(10): 1058-1067.
 [6] 姜文利, 等. 高频区雷达目标散射模型及其参数估计. 电子学报, 1998, 26(3): 70-74.
 [7] Cuomo K M, Pion J E, and Mayhan J T. Ultrawide-band coherent processing[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1999, 47 (6): 1094-1107.
 [8] Naishadham K, and Piou J E. State-space spectral estimation of characteristic electromagnetic responses in wideband data[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005: 406-409.
 [9] Moghaddar A, Ogawa Y, and Walton E K. Estimating the time-delay and frequency decay parameter of scattering components using a modified MUSIC algorithm[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1994, 42(10): 1412-1418.
 [10] Rao B D, and Aru K S. Model Based Processing of Signals: A State Space Approach[J]. *IEEE Trans. on SP*, 1992, 80(2): 283-309.
 [11] Shamsunder S, Giannakis G B, and Friedlander B. Estimating random amplitude polynomial phase signals: a cyclostationary approach[J]. *IEEE Trans. on SP*, 1995, 43(2): 492-505.

王 剑: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达信号处理和分布式雷达信号融合。
 吴嗣亮: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理和雷达系统等。
 侯舒娟: 女, 1977年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达信号处理和图像的特征提取。