

基于时频分析的双基地前向散射雷达侧影成像

张涛,张群,罗斌凤,张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

摘要: 介绍了双基地前向散射雷达侧影成像的原理,分析了该雷达回波中目标信号和杂波的时频特性,提出了利用小波分析剔除该雷达回波中杂波的方法,然后提出了利用时频分析估计目标径向运动参数的稳健的运动补偿算法,最后通过仿真证明了所提方法的有效性。

关键词: 侧影成像;小波分析;运动补偿

中图分类号: TN959.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)06-0726-04

Shadow Imaging for Bistatic Radar Based on Forward Scattering by Joint Time Frequency Analysis

ZHANG Tao, ZHANG Qun, LUO Bin-feng, ZHANG Shou-hong

(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A principle of shadow imaging for bistatic radar based on forward scattering is introduced. Joint time frequency characteristics of target signal and ground clutter are analyzed, then a method of eliminating ground clutter in bistatic radar echo by wavelet analysis is presented. A robust motion compensation method—to estimate radial motion parameters of target by time-frequency analysis is presented. Finally, the effectiveness of these methods is shown by the results of computer simulation.

Key words: shadow imaging; wavelet analysis; motion compensation

1 引言

双基地前向散射侧影成像雷达是一种利用电磁波的前向散射特性探测目标的双基地雷达,它可以对低空、陆地和海面的低可探测性目标进行检测、识别(成像)和跟踪^[1,2]。文献[3~6]说明了双基地雷达侧影成像的原理、信号处理方案和目标匀速直线运动条件下的运动补偿方法,并给出了初步的仿真结果。以上文献中所说的成像方法都是在理想情况下实现的,但是由于侧影双基地雷达所探测的目标都是处于低空或超低空区域甚至地面或海面,强杂波是必然存在的。本文在讨论侧影双基地雷达回波中目标信号和杂波的时频分布的基础上,提出了剔除杂波的方法和稳健的成像算法。

2 侧影双基地前向散射雷达的成像原理和回波信号的时频分布

2.1 侧影双基地前向散射雷达的成像原理

图1是侧影成像双基地雷达几何位置结构的示意图。将一个辐射源放在坐标系 (x, y, z) 的起点——点 O ,而同时将信号接收机放在坐标系横轴的点 $B(L, 0, 0)$ 处。设空间延展目标在基线 OB 附近直线运动,在观测时间间隔 $[- T_H/2, T_H/2]$ 内,通过目标中心的辐射点和接收点之间连线的衍射角是小角。这种条件下目标表面没有被照到的部分实际上几乎不

随时间变化。在物理光学近似法中,这些部分上的感应电流等于零,目标可以近似为不透明的屏,该屏在轮廓上与目标向平面(即与辐射方向垂直的通过目标中心——点 A 的平面)的侧影轮廓相一致。

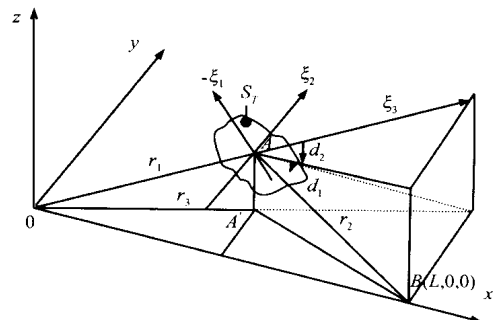


图1 双基地侧影成像雷达的几何结构示意图

根据巴比涅原理^[2],分析小的不透明屏的场衍射问题与在无限大的不透明的屏上存在的透明窗口的场衍射问题所用方法相同。因此,目标在接收点场分量的合成振幅可近似记为^[5]:

$$\dot{E}_T = \iint_T r(1, 2) \exp[ik(1n_1 + 2n_2)] d1 2 \quad (1)$$

式(1)与理论上的合成振幅相差一个通用的相位因子。式中 k

$= 2 / \dots$, (\dots) ——在目标剖面所在平面的直角坐标, $r(\dots)$ ——侧影孔径 S_T 的场分布, 其分布在侧影轮廓范围内不等于零, 在侧影轮廓范围外等于零, $n_1 = \dots / r_2$, $n_2 = \dots / r_2$, 而 \dots , \dots ——接收点 B 向目标剖面所在平面的侧影坐标, $r_2 = |AB|$. 在远场假设下, 目标附近的电波可以认为是平面波, 在等效孔径范围内的场分布可以当作是均匀的:

$$r(\dots) = \begin{cases} 1, & (\dots) \in S_T \\ 0, & (\dots) \notin S_T \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)中的方向余弦 (n_1, n_2) 的值与衍射角 (\dots) 的正弦的值分别相等, 且在坐标系 (x, y, z) 中可以表示为

$$n_1 = \sin \dots = \frac{z \sqrt{L}}{r_1 r_2}, \quad n_2 = \sin \dots = \frac{-y \sqrt{L}}{r_2 r_3} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} r_1 &= (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}, \quad r_2 = ((x - L)^2 + z^2 + y^2)^{1/2}, \\ r_3 &= (x^2 + y^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

L 为基长, (x, y, z) 为所设定的目标中心点 A 的坐标.

目标的运动方程为

$$x = x_0 + V_x t; \quad y = y_0 + V_y t; \quad z = z_0; \quad t \in [- T_H/2; T_H/2] \quad (5)$$

目标在按式(5)运动的过程中, 沿着坐标 \dots 的目标侧影的尺寸发生了某些改变, 其变化与 \dots 有关, 式中 $\dots = \arctg(y/x)$ 为目标相对于辐射点的方位角. 在 \dots 的数值小而 \dots 的值较大时, 可以认为 $\dots = \dots$. 在上述情况下, 考虑目标侧影的可变因子 \dots 和忽略沿坐标 \dots 的侧影轮廓的改变 (在小衍射角和确定的运动特征时, 该变化与沿坐标 \dots 的侧影的改变相比是高阶小的量) 后, 引入在 $\dots = \dots / 2$ 时达到的最大侧影孔径 $r(\dots)$ ($r(\dots)$ 不随时间变化):

$$(\dots) = r(\dots) \sin \dots \quad (6)$$

考虑式(1)和式(6), 变量替换后, 得到

$$\dot{E}_T(t) = \sin \dots \iint (\dots) \exp[i k (\dots + \dots \sin \dots)] d_1 d_2 \quad (7)$$

式(7)表示了运动目标前向散射场的合成振幅.

在目标侧影轮廓内, 对于每一个固定的 \dots 来说, $r(\dots)$ 在 \dots 值的受约束的范围内不等于零. 我们引入特定 \dots 时的侧影轮廓上下边沿的高度差 $h(\dots)$ 和它的中线高度 $c(\dots)$. 假定函数 $h(\dots)$ 值和 $c(\dots)$ 的值单值地决定 $r(\dots)$. 使用式(2)、(6), 对积分式(7)进行变换, 以便对 \dots 进行积分运算. 当通过 $\dot{H}(\dots)$ 表示内部积分后, 我们有^[3]

$$\begin{aligned} \dot{H}(\dots) &= \int_{c(\dots) - h(\dots)/2}^{c(\dots) + h(\dots)/2} \exp(i k \dots) d_1 \\ &= h(\dots) \exp[i k n_1 c(\dots)] \text{sinc} \left[\frac{k n_1}{2} h(\dots) \right] d_1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\text{sinc} \left[\frac{x}{x} \right] = \text{sinc} x / x$.

我们将函数 $\dot{H}(\dots)$ 称为目标侧影轮廓的剖面函数. 我们使用 $\dot{H}(\dots)$ 将 $\dot{E}_T(t)$ 记为

$$\dot{E}_T(t) = \sin \dots \dot{H}(\dots) \exp[i k \dots b(t)] d_2 \quad (9)$$

式中 $b(t) = n_2(t) \sin \dots$.

考虑到在观测时间间隔内目标的速度恒定和衍射角小, 而且由于坐标 z 恒定和条件 $z \ll x, y \ll x, y \ll L - x$ 满足, 由式(3)、(5)可得^[5]

$$\begin{aligned} n_1(t) &= \sin \dots(t) \cong n_1(0) = \text{const.}, \\ b(t) &= n_2 \sin \dots = b(0) t \end{aligned} \quad (10)$$

式中

$$n_1(0) = z_0 x_0 / ((x_0^2 + z_0^2) ((x_0 - L)^2 + z_0^2) x_0)^{1/2} \quad (11)$$

$$b(0) = \left. \frac{db(t)}{dt} \right|_{t=0} = - \dots \sin^2 \dots / ((x_0/L)^2 + z_0^2) x_0^3)^{1/2} \quad (12)$$

将式(10)引入式(9), 式(9)可以以傅立叶变换的形式记为

$$\dot{E}_T(t) \cong \int \dot{H}(\dots) \exp[i k \dots b(0) t] d_2 \quad (13)$$

这时, 目标侧影轮廓的合成剖面函数可以借助于逆傅立叶变换的形式表示

$$\dot{H}(\dots) = \frac{k b(0)}{2} \int \frac{\dot{E}_T(t)}{\sin \dots} \exp[- i k \dots b(0) t] dt \quad (14)$$

由以上分析可知: 侧影双基地雷达的侧影像是由目标相对于雷达转动引起的多普勒像维与目标垂直高度维的二维像, 其与目标的单基地雷达回波形成的多普勒像(横向像)相似, 但存在本质区别. 其区别在于目标的向后散射的系数相差较大, 其多普勒分辨单元的能量与对应的目标反射截面积没有必然的比例关系; 而对于双基地雷达的侧影像来说, 由于其是基于遮挡效应, 即目标前向散射系数相同, 即侧影像中多普勒分辨单元的能量与对应多普勒分辨单元的目标前向散射面积存在正比例关系, 所以侧影像对应于目标轮廓上下边沿的高度差, 因此侧影像近似地表示了目标的外形轮廓, 该特征与目标的物理形状有一一对应关系, 通过建立匹配模板, 双基地雷达的侧影像可以用于目标识别.

2.2 目标回波的时频分布与杂波的时频分布

目标处于侧影双基地雷达的基线附近时, 由双基地平面上速度矢量关系

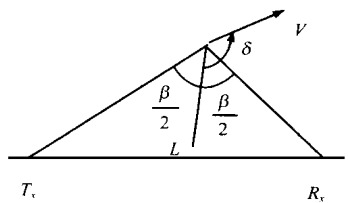


图 2 双基地平面上速度矢量关系图

图(图 2)可知, 目标引起的多普勒频移为^[1]

$$f_m(t) = \frac{2(V + at)}{2} \cos \dots(t) \cos \frac{c(t)}{2} \quad (15)$$

式中 V, a 分别为目标的运动速度和加速度在双基地平面的侧影分量, \dots 为雷达载频波长, $\frac{c(t)}{2}$ 为双基角的平分角, $\dots(t)$ 为视线角. 当目标穿过基线时, $\frac{c(t)}{2} = \frac{c}{2} + \rho t$, $\cos \dots(t)$ 的变化可以忽略, $t \in [- \frac{T_h}{2}, \frac{T_h}{2}]$, ρ 为角变化率. 式(15)可以化简为近似等式

$$f_m(t) \approx \frac{2V}{2} \cos \dots(t) \begin{cases} \rho t - \frac{3 \rho^2 t^2}{6} \\ - \frac{at}{2} \cos \dots(t) \left(\rho t - \frac{3 \rho^2 t^2}{6} \right) \end{cases}, \quad t \in [- \frac{T_h}{2}, \frac{T_h}{2}] \quad (16)$$

$t = 0$ 时, 目标穿过基线. 当 $\frac{3 \rho^2 t^2}{6}$ 可以忽略时, 由式(16)可以看

出:当 $t \left[-\frac{T_L}{2}, \frac{T_L}{2} \right]$ 时,目标运动引起的多普勒频移随时间由大变小,然后由小变大,且当目标处于基线上时即 $t=0$,目标运动引起的多普勒频移为零.对于目标信号的幅度而言,由式(1)可以推断,目标信号的幅度近似关于时间零点对称,其外形近似成 $Sa(x) = \sin(x)/x$, m 与目标垂直于基线的速度分量 v_v 有关, v_v 越大, $Sa(x) = \sin(x)/x$ 的主瓣越窄.

在侧影双基地雷达回波中,杂波主要由强的地杂波组成,地杂波是窄带平稳随机过程,因此,在目标距离基线较远时,目标信号的能量微弱,杂波的能量相对较强,但是目标信号的频谱和杂波的频谱相差较远,可以通过频域滤波滤除杂波,但目标距离基线较近时,目标信号的能量增大,但是目标信号的多普勒频率与杂波信号的频谱相近或者重叠,通过多普勒滤波虽然可以滤除杂波,但是会出现较大的能量损失,使得侧影像失真较大.

3 基于小波分析的杂波抑制

根据杂波信号(窄带平稳随机过程)和目标信号(时变信号)的时频特性,可以利用时频分析的方法剔除杂波.一般的时频分析方法如短时谱, WVD^[7,8]对于双基地侧影成像雷达回波不能取得的抑制杂波效果,而小波分析作为崭新的时频分析工具,可以把一个信号分解为不同频段上的信号,同时小波分析具有可逆性,即可以由不同频段上的信号恢复成原信号.所以通过杂波信号强的相关性和目标信号在不同频段中的时域特性,可以利用小波分析剔除侧影双基地雷达回波信号中的杂波,其步骤可分为:

步骤 1:利用短时谱估计目标信号的频率随时间变化的规律和杂波信号的谱宽,然后根据目标信号的频率变化和杂波谱宽计算小波分解的级数 N 和目标信号和杂波所在的频段.

步骤 2:对回波信号 $s(t)$ 进行小波分解,产生小波系数 d_1, \dots, d_N, s_N , 其中 d_1, \dots, d_N 表示多分辨分解的高频分量和次高频分量, s_N 表示多分辨分解的低频分量. d_1, \dots, d_N 中主要为信号分量及少量杂波分量, s_N 中主要由杂波分量和信号分量.

步骤 3:剔除 s_N 中的杂波分量.该频段属于低频段的信号,包括主要的杂波能量和大部分信号能量.其中杂波信号为窄带低频分量,幅度缓慢变化;目标信号只在时间域很小的一段时间内存在,且能量较大,信号幅度与 $Sa(x) = \sin(x)/x$ 函数的主瓣相近,因此该频段的信号在波形上可以看作:在 $t=0$ 附近一个具有 $Sa(x) = \sin(x)/x$ 函数的主瓣形状的信号叠加在一个缓变信号上,将该信号记为 $s_{N0}(t)$.因此剔除杂波的方法为:将 $t=0$ 附近信号幅度具有 $Sa(x) = \sin(x)/x$ 的部分挖去,然后由其两边的信号进行内插或曲线拟合的方法恢复信号,将恢复后的信号记为 $s_{N1}(t)$,最后该频段中的目标信号可由 $s_N(t) = s_{N0}(t) - s_{N1}(t)$ 恢复.

步骤 3:剔除 d_1, \dots, d_N 中的杂波.由于在回波中,信杂比通常都比较低,因此旁瓣杂波的能量依然较大,回波信号频段越靠近主瓣杂波所在的频段,杂波信号能量越大,目标信号在

时域上近似关于 $t=0$ 对称间断出现,且是快变分量,而杂波信号在时域上依然是缓变分量.可以利用通过曲线拟合求差进一步剔除杂波,形成 d_1, d_2, \dots, d_N .

步骤 4:利用剔除杂波后的多分辨信号 $d_1, d_2, \dots, d_N, s_N$ 恢复目标信号 $S(t)$.由于在剔除杂波的过程中,采取了软门限,避免了信号恢复后出现的寄生振荡.

4 利用时频分析估计目标径向运动参数并成像

利用第 3 节中的方法滤除杂波后,再利用时频分析的方法估计出目标在双基地平面的侧影分量的大小,进而补偿目标回波,最后形成目标的剖面侧影像.因此,双基地雷达侧影成像的运动补偿算法和步骤如下:

5 仿真分析

设雷达接收机与发射机之间的连线(基线) $L = 50\text{km}$;目标高于双基地平面 100m ,目标航迹与基线的夹角为 80° ,目标的速度为 200m/s ,加速度为 0m/s^2 ,以目标穿越基线为时间零点,记录 8 秒的数据,共 4096 个采样点;信杂比 $S/C = -20\text{dB}$.

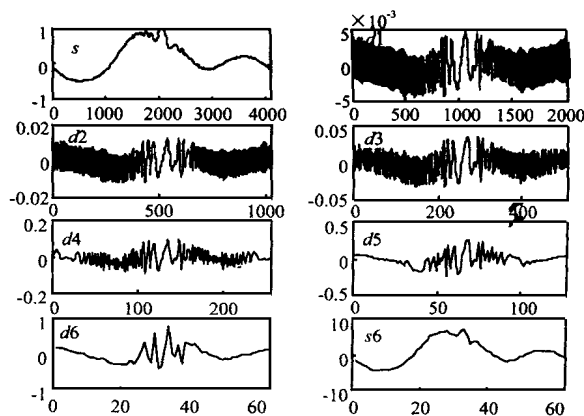


图 3 双基地侧影成像雷达回波信号的小波分解(6次分解)

图 3 是有杂波时回波信号实部的小波分解.由图 3 可以看出:图 3 中的波形与第 3 节中对目标与杂波信号的分析完全符合.图 4 是不同条件下的双基地雷达的目标侧影像,目标侧影像的位置移动是由于参数估计时存在的速度误差引起的,其对目标成像没有影响.由侧影像比较可以看出,时频分析法用于双基地雷达成像的目标运动参数估计是可行的.存

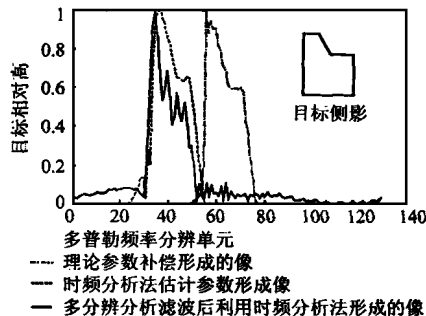


图 4 不同条件下的双基地雷达侧影像的比较

在杂波时的目标侧影像与无杂波时的目标侧影像相比存在微小的差别(较大的副瓣和主瓣中的小抖动,这些差别是由于杂波残余引起的),但是其基本轮廓与无杂波时的目标侧影像相同,说明利用小波分解滤除杂波是可行的。

6 结论

本文通过对侧影双基地雷达回波的理论分析和计算机仿真得出了以下结论:(1)回波中的杂波可以通过时频分析(小波分解的多分辨分析)的方法滤除;(2)成像的运动补偿可以通过时频分析(短时谱)估计目标的运动参数,然后进行运动补偿,最后获得目标的侧影像。

参考文献:

- [1] 杨振起,张永顺等.双(多)基地雷达系统[M].国防工业出版社,1998,3:200 - 205.
- [2] Nichola J. whills 著,张祖稷,吴曼青等译.双基地雷达[M].机电部 38 所,1992,2:107 - 110.
- [3] 李红兵.俄罗斯新型雷达动态[J].雷达与电子战,1999,1:14 - 16.
- [4] Gaser J I. Bistatic RCS of complex objects near forward scatter [J]. IEEE Trans. :V. AES-21-1985:70 - 78.
- [5] Surikov B S, Khasina E A, Chapursky V V. Correlation and spectral functions of one-dimensional radio holograms synthesized at small diffraction angles [J]. - Radiotekhnika Elektronika, 1989.
- [6] 卡布斯基.小衍射角下按照合成的一维射频全息图还原目标像[J].无线电技术与电子学,1989,XXXIII:409 - 419.(俄文翻译)
- [7] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安交通大学出版社,1998,5:57 - 76.
- [8] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].国防工业出版社,1998,9:153 - 180.

作者简介:



张 涛 男.1971 年 12 月生于陕西大荔县,博士研究生,现主要从事雷达成像、电路 CAD \ CAT、阵列信号处理等方面的研究工作. E-mail: zhtao @rsp. xidian. edu. cn



张 群 男.1964 年 11 月生于陕西河阳县,博士研究生,现主要从事雷达三维成像、阵列信号处理、杂波抑制等方面的研究工作。