

强地杂波背景下的低空飞行目标成像¹

张 群 张 涛 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 该文中提出了在强地杂波背景下对运动目标的成像方法。在对拉伸 (stretch) 信号的处理时, 采用了前后两次回波使用同一拉伸延时量进行处理的方法, 然后使用一次相消器滤除杂波, 利用测距用的常载频信号完成精确运动参数的估计并完成运动补偿。经过理论分析和仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词 杂波, 雷达成像, 拉伸信号

中图分类号 TN951

1 引 言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 技术, 主要是距离-多普勒成像原理^[1,2]。其工作方式是将雷达固定而对运动的目标如导弹、卫星、飞机等机动目标进行成像。ISAR 信号处理的首要问题是对目标进行运动补偿, 再利用已经被补偿后的目标回波进行成像处理, 恢复目标上各散射点的反射强度分布图。

由于 ISAR 针对的目标一般为非合作目标, 目标运动状态信息是未知的, 因而对目标平动分量的补偿较为困难。对 ISAR 成像运动补偿问题的研究一直是国内外研究的热点, 已研究出许多较为有效的运动补偿方法, 大致可分为两类: 一类是参考点补偿法^[3,4], 另一类是运动参数补偿法^[5,6]。但在这些信号处理方法中, 大都是在不存在杂波的前提下进行讨论的, 虽然有些文献^[7,8]涉及到此问题, 但也仅限于强杂波背景下的目标检测, 使目标成像成为可能^[9]。对于强杂波背景下低空飞行的飞机等一类目标, 现有的一些成像方法是不适用的。如在参考点补偿方法中, 包络对齐依靠的是相邻回波的强相关性, 由于强杂波的存在, 掩盖了目标信号, 无法进行包络对齐。因而, 如何在杂波背景下对目标成像还是个问题。

ISAR 成像可以采用多种信号形式, 文献 [10] 提出了一种基于拉伸 (stretch) 信号的成像新方法。在这种方法中, 利用了测距用的常载频窄脉冲信号通过时频分析来精确地估计目标的运动参数, 而且对回波信号补偿后, 使之形成一维距离像的同时, 也同时完成了包络对齐和聚焦处理。本文利用上述成像方法, 针对强地杂波的频谱特性, 在对回波信号进行运动补偿之前, 首先利用一次相消器将杂波消除, 然后再利用上述方法所得到的精确运动参数对已消去杂波的回波信号进行补偿, 最后再对目标成像。

2 成像方法

2.1 全去斜率处理

若发射机发射的脉冲线性调频信号为

$$s_t = a(t) \exp(j2\pi(f_0 t + \mu t^2/2)) \quad (1)$$

其中 $a(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, f_0 为起始频率, T 为脉宽, μ 为调频斜率, 则点目标的宽带回波信号可表示为

$$s_r(t) = s_t(t - \tau) = a(t - \tau) \exp(j2\pi(f_0(t - \tau) + \mu(t - \tau)^2/2)) \quad (2)$$

¹ 2000-10-08 收到, 2001-03-19 定稿

其中 $\tau = 2R/c$ 为目标回波距离延时, R 为点目标距离, c 为光速. 参考信号在理想情况下可用下式表示:

$$s_l(t) = s_l(t - \tau_l) = a(t - \tau_l) \exp\left(j2\pi\left(f_0(t - \tau_l) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau_l)^2\right)\right) \quad (3)$$

式中 τ_l 是利用常载频窄脉冲信号测距所得的延时量, 当所测得点目标距离为 R_l (由于数字测距技术存在随机误差, 一般地 $R_l \neq R$) 时, 则 $\tau_l = 2R_l/c$. 经全去斜率并归一化处理, 得到

$$s(t) = s_r(t)s_l^*(t) = \exp(-j2\pi f_0 \Delta\tau_l) \exp(j\pi\mu(\tau^2 - \tau_l^2)) \exp(j2\pi\mu\Delta\tau_l n t) \quad (4)$$

其中 $\Delta\tau_l = \tau - \tau_l$. (4) 式中的第二项是由于采用了 stretch 方法带来的相位项, 这就是所谓平方相位项. 可以看到平方相位项与 τ 和 τ_l 有较复杂的关系, 除非两者的差极小, 对它的补偿是困难的, 但是考虑到对 (4) 式作傅氏变换时, 取不同的起点, 还会造成不同的初相, 就有可能使这一平方相位项成为完全平方形式. 为此取参考信号的起点为起点, 同时作离散采样, 即令 $t = \tau_l + n\Delta t$, ($n = 0, 1, \dots, N-1, N\Delta t = T$), 代入 (4) 式, 得到^[11]

$$s(n) = \exp(-j2\pi f_0 \Delta\tau_l) \exp(j\pi\mu\Delta\tau_l^2) \exp(j2\pi\mu\Delta\tau_l n \Delta t) = \exp(j2\pi\Delta F n \Delta t) \exp(j\varphi) \quad (5)$$

$$\Delta F = \mu(\tau - \tau_l) = \mu\Delta\tau_l \quad (6)$$

$$\varphi = -2\pi\left[f_0\Delta\tau_l - \frac{\mu}{2}\Delta\tau_l^2\right] \quad (7)$$

其中 $0 \leq n \leq N-1$. $\Delta\tau_l$ 和 τ_l 为定值时, φ 为常数. 此时, 平方相位项就只与散射点距参考信号起点 τ_l 的相对距离有关了.

对 (5) 式进行 FFT 处理后, 就可得点目标的距离像函数:

$$S(m) = \exp(j\varphi)G(m - \mu\Delta\tau_l N\Delta t), \quad 0 \leq m \leq N-1 \quad (8)$$

其中

$$G(m - \mu\Delta\tau_l N\Delta t) = \exp\left[j(N-1)\left(n\Delta t\left(\mu\Delta\tau_l - \frac{m}{N\Delta t}\right)\right)\right] \cdot \frac{\sin[\pi N\Delta t(\mu\Delta\tau_l - m/(N\Delta t))]}{\sin[\pi\Delta t(\mu\Delta\tau_l - m/(N\Delta t))]} \quad (9)$$

$G(m - \mu\Delta\tau_l N\Delta t)$ 是一个 sinc 函数, 它的峰值出现在 $m = \mu\Delta\tau_l N\Delta t$ 处, 实现了纵向压缩.

2.2 一次相消

为方便起见, 我们设运动点目标为 a , 固定点目标为 b , 点目标 a 与雷达之间的径向速度为 v , 雷达发射机共发射了 $2m$ 次脉冲, 脉冲重复周期为 T_l . 利用常载频窄脉冲信号对动目标进行测距, 确定其在每个脉冲重复周期的拉伸延时量 $\tau_l(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 2m$), 对每个回波作全去斜率处理. 在对第 $i = 2k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) 个回波进行全去斜率处理时, 采用与前一个 (即第 $i = 2k-1$ ($k = 1, 2, \dots, m$)) 回波相同的参考信号, 也就是说, 这两个回波信号采用了一个相同的拉伸延时量 $\tau_l(i) = \tau_l(2k-1)$, 以保证前后两次回波信号保持相干. 又设 $\tau_a(i)$ 、 $\tau_b(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 2m$) 为散射点 a, b 的回波延时, b 是固定点, 故 $\tau_b(i) = \tau_b$ 为常数. 由 (5) 式, 我们得到经全去斜率后的第 $2k-1$ 次回波:

$$\begin{aligned} s(2k-1, n) = & \exp\{-2\pi f_0[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]\} \exp\{j\pi\mu[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]^2\} \\ & \times \exp\{j2\pi\mu[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]n\Delta t\} + \exp\{-2\pi f_0[\tau_b - \tau_l(2k-1)]\} \\ & \times \exp\{j\pi\mu[\tau_b - \tau_l(2k-1)]^2\} \exp\{j2\pi\mu[\tau_b - \tau_l(2k-1)]n\Delta t\} \end{aligned} \quad (10)$$

第 $2k$ 次回波:

$$\begin{aligned} s(2k, n) = & \exp\{-2\pi f_0[\tau_a(2k) - \tau_l(2k-1)]\} \exp\{j\pi\mu[\tau_a(2k) - \tau_l(2k-1)]^2\} \\ & \times \exp\{j2\pi\mu[\tau_a(2k) - \tau_l(2k-1)]n\Delta t\} + \exp\{-2\pi f_0[\tau_b - \tau_l(2k-1)]\} \\ & \times \exp\{j\pi\mu[\tau_b - \tau_l(2k-1)]^2\} \exp\{j2\pi\mu[\tau_b - \tau_l(2k-1)]n\Delta t\} \end{aligned} \quad (11)$$

从 (10), (11) 式不难看出, 两式右边的第二项是完全相同的, 于是经过一次相消后, 我们得到:

$$\begin{aligned} S(k, n) = & s(2k, n) - s(2k-1, n) = \exp\{-j2\pi f_0[\tau_a(2k) - \tau_l(2k-1)]\} \\ & \times \exp\{j\pi\mu[\tau_a(2k) - \tau_l(2k-1)]^2\} \exp\{j2\pi\mu[\tau_a(2k) - \tau_l(2k-1)]n\Delta t\} \\ & - \exp\{-j2\pi f_0[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]\} \exp\{j\pi\mu[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]^2\} \\ & \times \exp\{j2\pi\mu[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]n\Delta t\} \end{aligned} \quad (12)$$

整理并化简上式, 不难看出, 经过以上处理, 作为地杂波的固定点回波信号已完全消去, 剩下的是运动目标回波相减后相邻重复周期振幅变化的部分输出^[12], 其包络为一多普勒频率的正弦信号:

$$\begin{aligned} & \sin\{-2\pi f_0[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)] + \pi\mu[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)]^2 \\ & \quad + 2\pi\mu[\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1) + f_d T_1]\} \\ & = \sin[-2\pi f_0 \Delta \tilde{\tau}_l(2k) + \pi\mu \Delta \tilde{\tau}_l(2k)^2 + 2\pi\mu(\Delta \tilde{\tau}_l(2k) + f_d T_1)n\Delta t] \end{aligned} \quad (13)$$

其振幅为

$$|2 \sin\{\pi\mu[2(\tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)) + f_d T_1]\}| = |2 \sin\{\pi\mu[2\Delta \tilde{\tau}_l(2k)] + f_d T_1\}| \quad (14)$$

其中 $\Delta \tilde{\tau}_l(2k) = \tau_a(2k-1) - \tau_l(2k-1)$, $f_d = 2v/c$ 为多普勒频率, c 为光速。图 1 实线、带“o”线分别表示运动点 a 经过全去斜率后的相邻两次回波, 由于目标是运动的, ; 图 2 是固定点 b 经过全去斜率后的相邻两次回波, 可以看到, 这两次回波是完全重合的; 图 3 是一次相消后的结果, 与图 1 中信号相比, 相消后的结果因受多普勒频率的调制, 信号幅度大大降低, 相位增加了一个与多普勒频率成正比的因子, 但这些变化并不影响成像结果; 信号幅度的变化是明显的, 为了更好地说明相位的变化, 我们用图 4 给出了相消前后信号相位的变化情况。

2.3 运动补偿

按照文献 [10] 方法对一次相消后的信号 $S(k, n)$ 进行运动补偿。

(1) 在采集宽带信号样本的同时, 也应采集延时的基带常载频窄脉冲信号和各周期的延时量 $\tau_l(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 2m$);

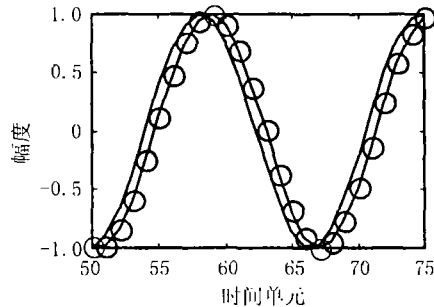


图 1 动目标拉伸处理后的相邻两次回波

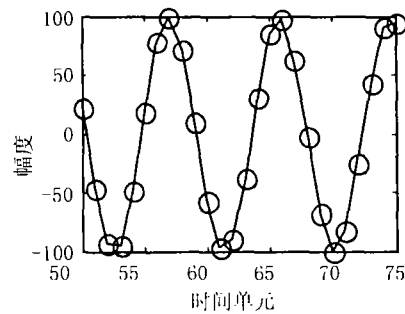


图 2 固定目标拉伸处理后的相邻两次回波

- (2) 利用 (1) 所得的延时量通过平滑拟合来获得粗略的运动参数: 起始距离, 速度、加速度, 为防止多普勒模糊, 先用这些运动参数对常载频信号进行一次粗补偿;
- (3) 利用时频分析 (如 SFFT, Wigner 分布), 完成粗参数估计;
- (4) 获得粗运动参数后, 再适当地降低重频, 从而获得粗略的一维横像, 再经适当的拟合算法并使该一维横像的中心为零, 这时所得出的运动参数将更加精确, 且聚了焦;
- (5) 利用上面获得的运动参数即可完成一维像形成和二维像处理。

3 仿真结果

在仿真中我们目标散射点模型如图 5 所示, 目标背景有大量地杂波, 信杂比为 -40dB , 为方便起见, 设目标与雷达同面, 目标位于雷达正北方方向 50km , 目标以 300m/s 的速度飞行, 飞行直线与雷达视线夹角为 45° , 数据采样时间为 5.91s , 其间目标飞行距离为 1773m ; 这里发射的是窄 stretch 信号, 波长为 3cm , 调频带宽为 400MHz , 脉冲重复频率为 650Hz , 雷达工作频率为 10GHz , 脉宽 $30\mu\text{s}$ 。利用常载频窄脉冲信号所测目标的平均速度和加速度分别为 210.110m/s 、 0.738m/s^2 , 图 6 为背景中没有任何杂波情况的目标成像结果; 在背景中存在强地杂波, 而且没有经过一次相消处理滤除杂波就进行运动补偿和成像处理的结果如图 7 所示, 这时根本无法看到目标; 图 8 为经过本文所述的一次相消处理, 然后进行运动补偿、成像处理后的结果, 此时杂波已经滤掉, 目标清晰可见, 但由于一次相消的缘故, 目标上的一些点被对消掉了。

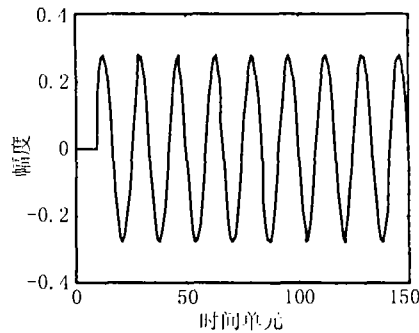


图 3 一次相消处理后的信号

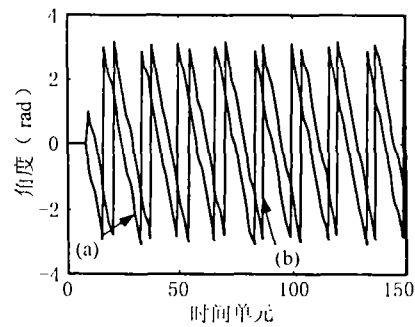


图 4 相消前后信号的比较
(a) 相消前的相位, (b) 相消后的相位

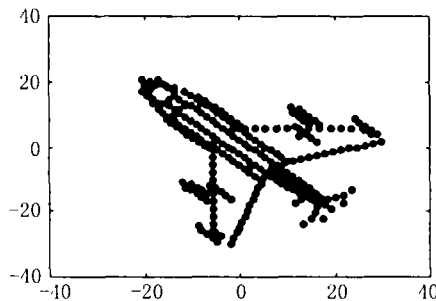


图 5 目标散射点模型

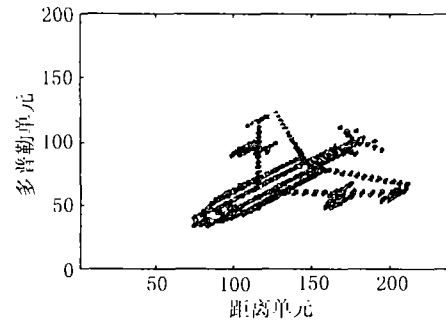


图 6 背景没有杂波的目标成像

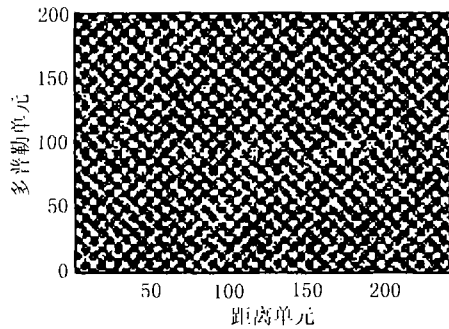


图 7 杂波背景下的目标成像

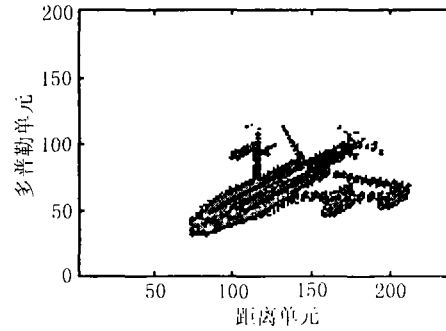


图 8 消去杂波后的目标成像

4 结 论

在杂波背景下对运动目标成像，寻求一种切实有效的解决方案一直是困扰人们的难题。如何解决这一问题，迄今为止，在国内外还没有看到公开发表的文献。在文献 [10] 中提出的成像新方法中，其运动补偿方法有别于其他方法，即利用测距用的常载频信号完成精确运动参数的估计，这使得利用一次相消器滤掉杂波后进行运动补偿成为可能，也就为杂波背景下运动目标的成像提供了一种有效的途径。本文分析了拉伸信号的处理方法及一次相消处理结果，给出了在强地杂波背景下运动目标的成像算法和仿真实验结果，说明这种强地杂波背景下运动目标成像是有效的。另外需要说明的是：文中的仿真结果是在目标与模拟杂波均属理想情况下得到的，在实际情况中所得到的成像结果必定与此处结果有所差异。

参 考 文 献

- [1] D. L. Mensa, High Resolution Radar Imaging, London, Artech House, 1982, 9-34.
- [2] W. M. Brown, R. j. Fredericks, Rang-Doppler imaging with motion through resolution cells, IEEE Trans. on AES, 1969, AES-5(1), 98-102.
- [3] C. C. Chen, H. C. Andrews, Target-motion-induced radar imaging, IEEE, Trans. on AES, 1980, AES-16(1), 2-14.
- [4] 王根原, 保铮, 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法, 电子学报, 1998, 26(6), 5-8.
- [5] S. Simmons, R. Evans, Maximum likelihood autofocus of radar images, IEEE International Radar Conference, Virginia, 1995, 410-415.
- [6] T. J. Abatzoglou, G. O. Gheen, Rang, radial velocity, and acceleration MLE using Radar LFM pulse train, IEEE Trans. on AES, 1998, AES-34(4), 1070-1084.
- [7] A. Farina, F. A. Studer, Detection with high resolution radar: great promise, big challenge, Microwave Journal, 1991, 34(5), 263-273.
- [8] N. C. Currie, R. D. Hayes, R. N. Trebits, Millimeter-Wave Radar Clutter, London: Artech House, 1992, 67-92.
- [9] D. R. Wehner, High-Resolution Radar, London: Artech House, 1995, 400-469.
- [10] 张群, 张涛, 张守宏, 一种 ISAR 成像运动补偿新方法, 信号处理, 1999, 15(增刊), 299-302.
- [11] 张庆文, 保铮, 采用窄 Stretch 信号的 ISAR 成像与运动补偿, 西安电子科技大学学报, 1992, 19(1), 8-15.

- [12] 丁鹭飞, 耿富录, 雷达原理, 西安, 西安电子科技大学出版社, 1997, 256-295.

LOW-ALTITUDE TARGET IMAGING IN STRONG GROUND CLUTTER

Zhang Qun Zhang Tao Zhang Shouhong

(*Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract The imaging method on low-altitude target in strong ground clutter is presented. The identical amount of stretching time-delay with the adjoined echoes is applied in the signal stretching process, and then the ground clutter is filtered through the one-order canceller. Furthermore the target's motion parameters can be accurately estimated by the narrow pulse signals on the constant carrier, so the motion compensation can be achieved. After the theoretical analysis, the validity is proven by simulation results finally.

Key words Clutter, Radar imaging, Stretch signal

张 群: 男, 1964 年生, 博士, 研究兴趣为: 雷达成像, 阵列信号处理, 杂波抑制等.

张 涛: 男, 1971 年生, 博士, 研究兴趣为: 雷达成像, 阵列信号处理, 计算机辅助设计与测试.

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域: 雷达信号处理.