

强地杂波背景下的步进频率信号雷达成像方法¹

罗斌凤 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 该文主要研究了步进频率信号体制下雷达对低空飞行目标在强地杂波背景下的成像处理方法。对步进频率信号形式稍加改变以适应成像前的预处理要求。对回波先采用一次相消处理滤除杂波, 然后进行运动补偿后再成像处理。仿真结果表明该成像方法有效。

关键词 杂波, 雷达成像, 步进频率信号, 距离像

中图分类号 TN951

1 引 言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像技术就是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, 主要是依据距离-多普勒成像原理^[1,2]。ISAR 信号处理的关键是对目标进行运动补偿。

由于 ISAR 针对的目标一般为非合作目标, 其运动状态信息未知, 因而使得对成像影响很大的目标平动分量的补偿较困难。对 ISAR 成像运动补偿问题的研究一直是国内外研究的热点, 在无杂波或杂波小的前提下, 已研究出许多较为有效的运动补偿方法^[3-6]。它们大致可分为参考点补偿和运动参数补偿两类。对于强杂波背景应用条件, 多数文献^[7-9]仅限于目标检测, 因为对于强杂波背景下如实际中存在的低空飞行的飞机、导弹等一类目标, 现有的一些成像方法不适用。例如在成像中采用参考点补偿方法, 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, 因而也就无法成像。

文献 [10] 是最早涉及研究强杂波背景下低空飞行目标成像问题的, 它采用的是一种基于拉伸 (stretch) 信号的成像方法^[11]。该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, 并保证滤除杂波后的回波不会影响后面的运动参数补偿效果。通过对测距用的常载频窄脉冲信号的时频分析来精确地估计目标的运动参数, 然后对已消去杂波的回波信号进行补偿, 同时也完成了包络对齐和聚焦处理, 形成一维距离像, 最后再对目标三维成像。

拉伸信号和步进频率信号是 ISAR 成像中常用的两种高分辨率信号。本文主要研究步进频率信号体制下对低空飞行目标在强地杂波背景下的成像处理方法。为利于杂波消除, 对步进频率信号形式做了一些改变; 介绍了一次相消处理和合成距离像的方法并做了相关的推导; 分析了一次相消处理对合成距离像的影响; 最后给出了仿真结果和结论。

2 步进频率信号形式

通常发射的步进频率信号脉冲的载频是均匀步进的, 接收到这组脉冲的回波信号后, 接收机用与之对应的本振信号混频, 然后进行后续处理来获得目标的高分辨距离像。要在杂波背景下对运动目标成像, 必须首先把回波中的杂波滤掉, 解决这个问题的基本的方法可使用一次相消处理^[12]。为此, 将步进频率信号形式稍加改变, 目的是能够利用一次相消原理滤除杂波。

¹ 2001-11-30 收到, 2002-06-17 改回

如图 1 所示, 雷达发射一串窄带宽脉冲组, 共 M 组, 每组两个脉冲, 脉宽为 T_1 , 每组中的两脉冲载频是相同的, 相邻的两组的载频有一个固定的步进值 Δf , 脉冲组的重复周期为 T .

发射的第 i 组中的两个脉冲可分别表示为

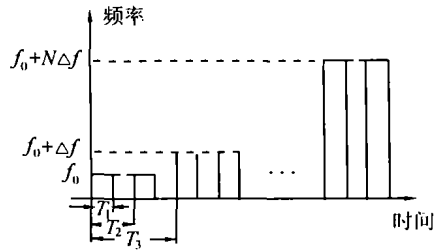


图 1 步进频率信号格式示意图

$$x_{i1}(t) = \exp(j(2\pi(f_0 + i\Delta f)t)), \quad iT \leq t \leq iT + T_1 \quad (1)$$

$$x_{i2}(t) = \exp(j(2\pi(f_0 + i\Delta f)t)), \quad iT + T_2 \leq t \leq iT + T_2 + T_1 \quad (2)$$

经过混频并分别在时刻 $iT + 2R_0/c$ 和 $iT + T_2 + 2R_0/c$ 采样, 对于以径向速度 V 相对于雷达匀速运动的单点目标, 这两个脉冲的连续 M 个回波的复采样序列分别表示为

$$m_1(i) = \exp\{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)[(2R_0/c)(1 + 2V/c) + (2V/c)iT]\} \quad (3)$$

$$m_2(i) = \exp\{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)[(2R_0/c)(1 + 2V/c) + (2V/c)iT + (2V/c)T_2]\} \quad (4)$$

其中 $i = 0, 1, \dots, M - 1$.

3 一次相消及合成距离像

取 $m(i) = m_1(i) - m_2(i)$, $f_d = 2V/c$, 则

$$m(i) = \exp\{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)[(2R_0/c) + (2V/c)iT + (2V/c)(2R_0/c)]\} A(V, i) \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} A(V, i) &= 1 - \exp[-j2\pi(f_0 + i\Delta f) \cdot (2V/c) \cdot T_2] \\ &= 1 - \exp(jC(V)) \cdot \exp(jD(V) \cdot i) \end{aligned} \quad (6)$$

$$C(V) = -2\pi f_0(2V/c)T_2 = 2\pi f_0 \cdot f_d T_2, \quad D(V) = -2\pi \Delta f \cdot f_d T_2$$

可以看出, $A(V, i)$ 与时间 t 无关. 当 $V = 0$ 时, 即当固定点目标时, $A(V, i) = 0$, $m(i) = 0$. 也就是说由固定点目标形成的杂波分量对 $m(i)$ 不起作用, 这就达到了一次相消的目的. 对于运动目标 $V \neq 0$, 将 $A(V, i)$ 展开, 得到

$$A(V, i) = 1 - \exp(jC(V)) - j \exp(jC(V)) \cdot D(V) \cdot i + (1/2) \exp(jC(V)) \cdot D(V)^2 \cdot i^2 + \dots \quad (7)$$

对目标回波完成运动补偿处理, 即对序列 $m(i)$ 乘以补偿因子

$$\xi(i) = \exp[j2\pi(f_0 + i\Delta f)2Vt/c] \quad (8)$$

忽略常数项与极小量后, 得到补偿后的序列:

$$m'(i) = m(i) \cdot \xi(i) = \exp[-j2\pi(f_0 + i\Delta f)(2R_0/c)] A(V, i) \quad (9)$$

讨论序列 $m'(i)$ 合成距离像的结果: 对由 $m'(i) (i = 0, 1, 2, \dots, M-1)$ 构成的序列进行 IDFT 处理, 其结果为 $\text{IDFT}(A(V, i))$ 与 $\exp[-j2\pi(f_0 + i\Delta f)(2R_0/c)]$ 构成序列的 IDFT 结果的卷积。 $\exp[-j2\pi(f_0 + i\Delta f)(2R_0/c)]$ 所构序列相位呈线性变化, 经 IDFT 处理后合成脉冲输出的模为

$$|H_l| = \left| \frac{\sin[\pi(l - 2MR_0\Delta f/c)]}{M \sin[\frac{\pi}{M}(l - 2MR_0\Delta f/c)]} \right|, \quad l = 0, 1, \dots, M-1 \quad (10)$$

可以看出, 上式峰值出现在 $l = 2M\Delta f \cdot R_0/c$ 。又由 (7) 式得

$$\begin{aligned} \text{IDFT}(A(V, i)) &= (1 - \exp(jC(V))) \cdot \delta(l) \\ &+ \text{IDFT}[-j \exp(C(V)) \cdot D(V) \cdot i + (1/2) \exp(jC(V)) \cdot D(V)^2 \cdot i^2] \quad (11) \end{aligned}$$

当 $D(V)$ 很小, 上式起作用的是第一项 $(1 - \exp(jC(V))) \cdot \delta(l)$; 而第二项可以忽略, 即对合成的距离像影响小。

图 2 是在没有 $A(V, i)$ 的干扰、以及速度 $V = 900\text{m/s}$ 和 $V = 300\text{m/s}$ 时分别构成序列 $m'(i)$ 合成的距离像。雷达参数为: 载频 $f_0 = 35\text{GHz}$, 脉冲宽度 $T_1 = 0.2\mu\text{s}$, $T_2 = 0.4\mu\text{s}$,

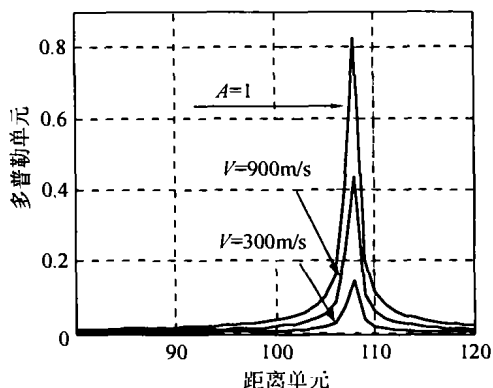


图 2 因子 $A(V, i)$ 对合成距离像的影响

$T = 1\mu\text{s}$, 频率步进值 $\Delta f = 5\text{MHz}$, 初始时刻点目标距雷达 7.9km 。可见, 因子 $A(V, i)$ 对合成距离像的影响只体现在距离像的幅度上, 但各峰值的位置几乎没有变化, 说明 $A(V, i)$ 不会使目标合成像产生距离移动, 这就保证能够成像, 但由于运动目标距离像的幅度有所减小, 像的清晰程度将受到影响。也正是引入 $A(V, i)$ 并保证速度为 0 时其数值为 0, 达到了消除杂波的目的。

4 仿 真

4.1 ISAR 成像仿真

图 3 是散射点模型, 目标背景有大量地杂波, 信杂比为 -40dB , 雷达参数为载频 $f_0 = 35\text{GHz}$, 共发射 64 族, 每族 64 个脉冲, 步进频率 $\Delta f = 4.6875\text{MHz}$, 脉冲重复频率为 15kHz 。初始时刻目标与雷达之间的距离为 8km , 雷达视线为 y 轴, 目标的几何旋转中心在初始时刻处于坐标原点。假设目标相对于雷达视线作匀速转动, 转速为 0.035rad/s , 同时目标以速度 $V = 200\text{m/s}$, 加速度 $a = 48\text{m/s}^2$ 沿雷达视线方向运动。图 4 为背景没有杂波时的 ISAR 像仿真结果; 图 5 是存在强地杂波且未经一次相消处理直接运动补偿后的成像结果, 无法看到目标像; 图 6 为经过本文所述的一次相消处理后的成像结果。

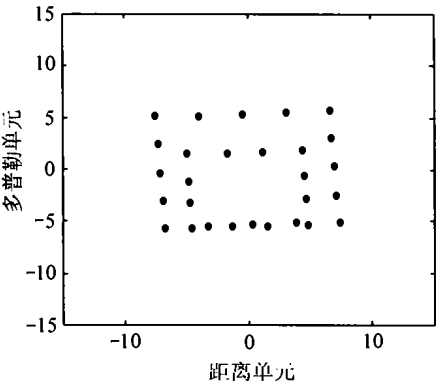


图 3 目标散射点模型

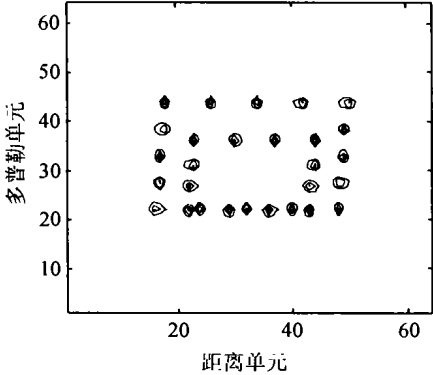


图 4 背景没有杂波的目标成像

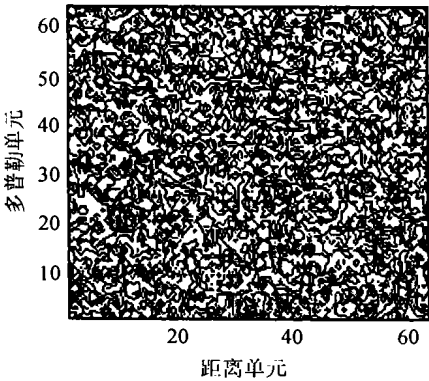


图 5 杂波消除前的目标成像

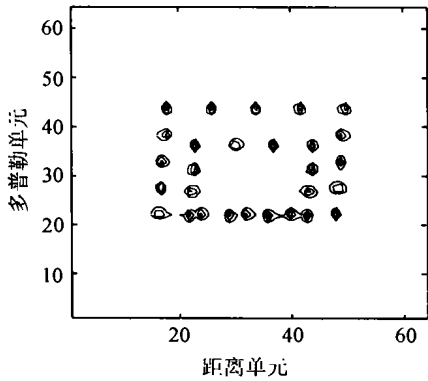


图 6 杂波消除后的目标成像

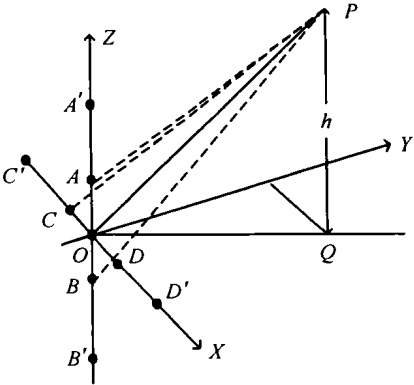


图 7 目标与天线几何图

4.2 干涉式三维成像

仿真中采用图 7 的天线配置方法, 目标距雷达 10km, 假设雷达视线为 Y 轴, 目标以初始速度 300m/s, 与 X 轴夹角 45° , 俯冲角 30° 的方向从原点飞行, 雷达参数同 4.1 所述. 图 8 是目标的散射点模型. 其中 (a) 为水平-距离平面投影图; (b) 为水平-俯仰平面投影图; (c) 为距离-俯仰平面投影图. 经过干涉处理后得到的目标三维像如图 9 所示. 图 10 是对大间距天线上的回波信号经过运动补偿, 再经过一次相消处理后所得目标的某天线上的 ISAR 像 (其它天线上的 ISAR 像类似, 不再给出).

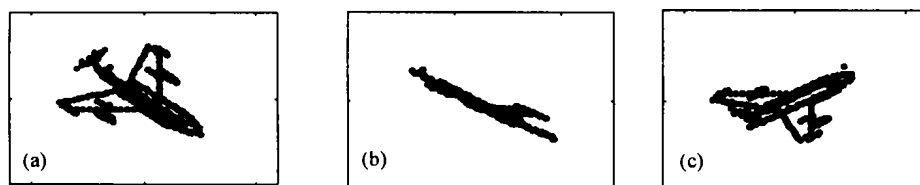


图 8 目标与视图

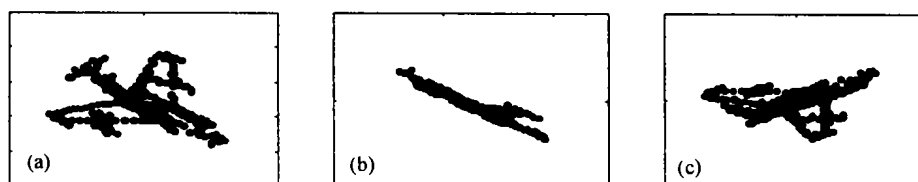


图 9 消除杂波后的目标三维像

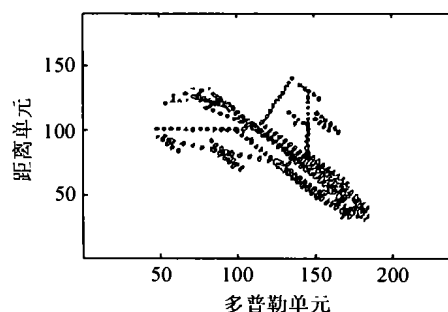


图 10 消除杂波后的目标 ISAR 像

5 结 论

在对运动目标成像时必须考虑客观存在的杂波背景. 本文的工作是以文献 [10] 为基础, 通过对步进频率信号形式的改动使其能够实现对杂波的一次相消且不影响成像; 同时, 这种信号形式的改变在工程实现中很容易实现. 仿真实验结果说明步进频率体制能够用于对强杂波背景下的运动目标成像. 需要指出的是: 无论步进频率体制还是拉伸信号体制, 在经过杂波的一次相消后, 目标信号幅度均较相消前变小, 这就使得成像中的某些点被去除掉, 需要寻找更好的

消除杂波方法。后续的工作还包括如何获取实际的目标回波数据并利用实测数据进一步验证上述成像方法的有效性等。

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, Range-Doppler imaging with motion through resolution cells, IEEE Trans. on AES, 1969, 5(1), 98-102.
- [3] C. C. Chen, H. C. Andrews, Target-motion-induced radar imaging, IEEE, Trans. on AES, 1980, 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 autofocusing of radar images, IEEE International Radar Conference, Virginia, 1995, 410-415.
- [6] T. J. Abatzoglou, G. O. Gheen, Range, radial velocity, and acceleration MLE using radar LFM pulse train, IEEE Trans. on AES, 1998, 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, 强地杂波背景下的低空飞行目标成像, 电子与信息学报, 2002, 24(10), 1352-1357.
- [11] 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.
- [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.

TARGET IMAGING IN STRONG GROUND CLUTTER WITH STEPPED FREQUENCY SIGNAL

Luo Binfeng Zhang Qun Zhang Tao Zhang Shouhong

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

Abstract The imaging method with stepped frequency signal for low-altitude target in strong ground clutter is presented. The format of normal stepped frequency signal is modified slightly to satisfy ISAR imaging. The ground clutter is filtered through the one-order canceller, then after the motion compensation is completed, the images of the target are obtained. The validity of the imaging method is proven by simulation results.

Key words Clutter, Radar imaging, Stepped frequency signal, Range profile

罗斌凤: 男, 1966 年生, 博士生, 副教授, 现从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作。

张 群: 男, 1963 年生, 博士后, 副教授, 现从事阵列信号处理、雷达成像等方面的研究工作。

张 涛: 男, 1971 年生, 博士后, 现从事信号处理、雷达成像、目标识别等方面的研究工作。

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作。