

文章编号: 1001-2486(2009)04-0093-05

频率步进雷达高分辨距离像解模糊方法研究*

陈建军, 王飞行, 陈远征, 付强

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对频率步进雷达中存在的高分辨距离像模糊现象, 通过分析其本质原因——周期延拓引起循环移位, 提出了一种等效混频解距离像模糊的新方法, 并给出了等效混频本振频率的选择范围。通过仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 频率步进; 高分辨; 距离像; 解模糊

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** B

Research on Achieving Unambiguous High Resolution Range Profiles for Stepped frequency Radar

CHEN Jian-jun, WANG Fei-xing, CHEN Yuan-zheng, FU Qiang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Regarding the fact that ambiguous high resolution range profiles of stepped frequency radar is cycle extension, a new method to achieve unambiguous range profiles equivalent to mixing process is proposed, and the range of local mixing frequency is presented. Finally, the validity of this method is verified by simulation.

Key words: stepped frequency; high resolution; range profile; unambiguous

随着现代雷达技术的发展, 采用距离高分辨雷达信号成为获取目标详细信息的重要途径。频率步进雷达信号因具有瞬时带宽窄、对接收前端及 A/D 采样速率要求低、易于工程实现的特点^[1], 而成为应用于空中监视、非合作目标识别的一种重要的实用型高分辨雷达信号^[2-3]。

频率步进雷达通过发射一组载频线性跳变的脉冲, 获得等效大带宽和高距离分辨力。经过相参处理, 可以提取出回波中包含的目标距离信息, 对其进行离散傅立叶变换可以获得目标的高分辨距离维分布函数, 其幅度函数就是通常所说的距离像^[1,7]。考虑到离散傅立叶变换的周期延拓性质, 在特定情况下, 引起距离像位置的测量值模糊, 并导致距离像混叠、循环移位^[4]。文献[4]认为: 如果雷达发射脉冲串跳频间隔为 Δf , 回波采样时刻不是 $1/\Delta f$ 的整数倍时, 通过 IFT 处理所成距离像就会发生循环移位, 从而改变了距离像上各散射点的相对位置。本文认为文献[4]给出的距离像模糊原因并不准确, 并以一种等效频率的视角分析合成成像的距离像模糊原因, 给出了引起距离像模糊的雷达参数关系。

对多幅细化距离像而言, 由于各幅细化距离像的循环移位程度不同, 使距离像拼接算法复杂。针对频率步进雷达距离像拼接问题, 文献[4]提出了 3 种紧约束条件下用于距离像拼接的目标抽取算法, 其提出的解距离像模糊方法, 是先成距离像, 后对其位置顺序进行调整。由于各幅距离像的模糊情况不同, 对它们要分别进行位置调整, 关系复杂。文献[4]在分析距离像模糊成因的前提下, 提出通过补偿由周期延拓造成的距离像循环移位的解距离像模糊算法, 该方法仍是在紧约束条件下讨论解距离像模糊的算法。本文在分析得出引起距离像模糊的雷达参数关系的基础上, 提出了一种等效混频处理的解距离像模糊的新方法, 而且, 文献[4]提出的解模糊算法只是本文所提出方法的一种特例。讨论了该方法在雷达参数满足紧约束条件和宽约束条件下的应用。该方法物理意义明确, 适合于工程应用。

* 收稿日期: 2009-02-19

作者简介: 陈建军(1981-), 男, 博士生。

1 距离像模糊的成因

设频率步进信号的脉冲重复周期为 T_r , 发射脉冲宽度为 τ (若雷达发射的是脉内调制信号, 则 τ 为等效脉冲宽度), 载波起始频率为 f_0 , 频率步进量为 Δf , 频率步进数为 N , 采样频率为 f_s , 采样间隔 $T_s = 1/f_s$, 光速为 c 。对每一个脉冲延时 t_s 后采样。为分析方便, 假定在紧约束条件下, $\Delta f \tau < 1$, 每个脉冲回波只采 1 点。对多采样点情况下的距离像模糊以及宽约束条件下的距离像模糊问题, 将在 2.1、2.2 节专门讨论。

考虑静止点目标情形, 设目标与雷达径向距离为 R 。由于发射脉冲宽度有限, 一次采样只能包含距离在 $((t_s - \tau)c/2, t_s c/2)$ 范围内的目标信息, 故设 $(t_s - \tau)c/2 < R < t_s c/2$ 。

频率步进雷达接收到的视频回波信号可以表示为

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} y_n(t) \quad (1)$$

式中, $y_n(t) = A(R) e^{j2\pi n \Delta f \frac{2R}{c}} G\left[\left(t - nT_r - \frac{2R}{c}\right) \setminus \tau\right]$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$), 表示 1 帧脉冲串中的第 $n+1$ 个

脉冲回波, $A(R) = A \cdot e^{j2\pi f_0 \frac{2R}{c}}$, A 为脉冲回波的强度, $G(t \setminus \tau) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ 。

$nT_r + t_s$ 时刻的采样值为 $y(n) = y(t) |_{t=nT_r+t_s} = A(R) \cdot e^{j2\pi \frac{R}{c} \left(\frac{R}{2\Delta f}\right) \cdot n}$ 。显然, 采样值序列 $y(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$), 可以看作是对载频为 R 的单载波信号按照采样频率为 $c/(2\Delta f)$ 进行采样获得的, 因此, 本文的分析将基于这一观点进行。若令 $f_0^R = R, f_s^R = c/(2\Delta f)$, 则对 $y(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) 进行傅立叶变换, 得到其频谱函数

$$Y(f^R) = A(R) e^{j\pi(N-1)\left(\frac{f_0^R - f^R}{f_s^R}\right)} \sin\left[\pi N \left(\frac{f_0^R - f^R}{f_s^R} - \frac{f^R}{f_s^R}\right)\right] \setminus \sin\left[\pi \left(\frac{f_0^R - f^R}{f_s^R} - \frac{f^R}{f_s^R}\right)\right] \quad (2)$$

$|Y(f^R)|$ 的峰值为 NA , 对应目标的散射强度信息; 其峰值位置 f_{\max}^R 对应目标位置信息, 且

$$f_{\max}^R = \operatorname{argmax}_{f^R} |Y(f^R)| = \operatorname{mod}(f_0^R, f_s^R) = \operatorname{mod}(R, f_s^R) \quad (3)$$

其中, $f_s^R = c/(2\Delta f)$ 为一个频谱延拓周期, $\operatorname{mod}(A, B)$ 表示 A 对 B 取余数运算。由频谱周期延拓的性质可知, 目标距离像反映的距离范围为 $f^R \in D^P = [m \cdot f_s^R, (m+1) \cdot f_s^R)$ 。又已知一次采样包含的距离范围为 $D^R = \left[\left(t_s - \tau\right)c/2, t_s c/2\right)$, 因此, 只有当 $D^R \subseteq D^P$ 时, 即 $m \cdot f_s^R \leq (t_s - \tau) \cdot c/2 < t_s \cdot c/2 \leq (m+1) \cdot f_s^R$, 所成的距离像才能够反映出目标真实的距离顺序关系。由式(3)可知, 目标位置的真实值 R 可以表示为 $R = m \cdot f_s^R + f_{\max}^R$, 其中 m 为整数。要确定出目标的真实位置, 需要确定 m 值。文献[5]提出的解模糊方法为: 利用一次采样反映的距离范围确定 m 的值。

而当 $D^R \not\subseteq D^P$ 时, 则各距离边界满足: $m \cdot f_s^R < (t_s - \tau) \cdot c/2 < (m+1) \cdot f_s^R < t_s \cdot c/2$ 或 $(t_s - \tau) \cdot c/2 < m \cdot f_s^R < t_s \cdot c/2 < (m+1) \cdot f_s^R$, 根据周期延拓与循环移位理论可知, 频谱周期延拓将引起距离像循环移位, 从而改变距离像上各散射点的相对位置, 造成位置“乱序”。而文献[4]认为雷达回波采样时刻不是 $1/\Delta f$ 的整数倍时, 所成距离像就会发生循环移位, 从而改变了距离像上各散射点的相对位置, 显然, 这个说法是不准确的。

2 等效混频处理模糊原理

因为采样值序列 $y(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$), 被看作对频率为 $f_0^R = R$ 的正弦信号的采样, 所以可以通过混频处理, 将其频谱对应的频率范围进行频域搬移。此处, 若设等效混频采用的本振频率为 f_i^R , 则 $y(n)$ 经混频输出为

$$z(n) = A(R) \cdot e^{j2\pi n \left(\frac{f_0^R - f_i^R}{f_s^R}\right)} \quad (4)$$

此时, $z(n)$ 傅立叶变换后频谱函数的峰值位置为 $f_{\max}^R = \operatorname{mod}(f_0^R - f_i^R, f_s^R)$, 显然, $f_0^R - f_i^R = m \cdot f_s^R +$

f_{\max}^R , 即 $R = f_0^R = m \cdot f_s^R + f_l^R + f_{\max}^R$, 此时, 考虑到目标可能出现的位置范围既满足 $f_0^R \in D^R$, 又满足 $f_0^R \in D^P$, 且为避免循环移位, 要求 $D^R \subseteq D^P$, 则有 $m \cdot f_s^R \leq (t_s - \tau) \cdot c/2 - f_l^R < t_s \cdot c/2 - f_l^R \leq (m+1) \cdot f_s^R$ 。整理后, 得

$$ct_s/2 - (m+1) \cdot f_s^R \leq f_l^R \leq c(t_s - \tau)/2 - m \cdot f_s^R \quad (5)$$

此式即为等效混频本振频率的选择范围。特别地, m 值取为 -1 , 则可得等效混频本振频率的范围为 $ct_s/2 \leq f_l^R \leq c(t_s - \tau)/2 + c/2$, 若取等效本振频率 $f_l^R = ct_s/2$, 则本文讨论的处理将等效于文献[4]中的相位补偿解模糊方法, 也就是说文献[4]中的相位补偿解模糊方法是本文提出的等效混频处理的一种等效特例。

2.1 过采样情况下的应用

为了获得大尺寸扩展目标的距离像, 减小采样损失, 频率步进雷达通常对一个脉冲的回波进行多次采样。对于过采样合成高分辨距离像时, 将不同载频、相对时间延迟相同的采样值作为一组, 每一组采样值对应一幅细化的距离像。设一组脉冲串的开始采样时刻分别为 $t_0, T_r + t_0, \dots, (N-1)T_r + t_0$, 每个脉冲都采样 S 点, 采样间隔为 T_s , 则能测得的距离像长度约为 $T_s S \cdot c/2$ 。且用来合成一幅细化的距离像的一组采样序列对应的采样时刻分别为 $t_s(k), T_r + t_s(k), \dots, (N-1)T_r + t_s(k)$, 其中, $t_s(k) = t_0 + kT_s$ ($k = 0, 1, \dots, S-1$)。

根据式(5)知, 第 k 组采样值对应的等效混频本振频率的可选范围为(式中 m_k 为整数)

$$ct_s(k)/2 - (m_k+1) \cdot f_s^R \leq f_l^R \leq c(t_s(k) - \tau)/2 - m_k \cdot f_s^R \quad (6)$$

2.2 宽约束情况下的应用

频率步进雷达参数与 2.1 节过采样参数相同, 第 k 组采样值序列包含距离信息范围为 $D_k^R = [t_s(k) - \tau, t_s(k)]$, 相应的第 k 幅细化的距离像反映的距离信息范围为 $D_k^P = [m_k \cdot f_s^R, (m_k+1) \cdot f_s^R]$, m_k 为整数。在宽约束条件下, 即 $\Delta f \cdot (\tau + T_s) < 2$, 存在关系 $f_s^R < c\tau/2$ 。当 $D_k^P \subseteq D_k^R$ 时, 即 $(t_s(k) - \tau) \cdot c/2 < m_k \cdot f_s^R < (m_k+1) \cdot f_s^R < t_s(k) \cdot c/2$, 根据周期延拓与循环移位理论可知, 距离像混叠结果如图 1(a) 所示, 图中阴影区域 1 和 2 为混叠区, 区域 3 为无混叠区, 距离像抽取无混叠区, 此时距离像中无混叠区各散射点的相对位置顺序与目标真实的距离顺序一致, 不存在“乱序”现象。

而当 $D_k^R \subseteq D_k^P$ 时, 即: $m_k \cdot f_s^R < (t_s(k) - \tau) \cdot c/2 < (m_k+1) \cdot f_s^R < t_s(k) \cdot c/2$ 或 $(t_s(k) - \tau) \cdot c/2 < m_k \cdot f_s^R < t_s(k) \cdot c/2 < (m_k+1) \cdot f_s^R$, 根据周期延拓与循环移位理论可知, 相应的距离像混叠结果如图 1(b) 和 (c) 所示。图 1(b) 中阴影区域 2 为混叠区, 区域 1 和 3 为无混叠区, 距离像抽取无混叠区, 显然, 抽取的距离像存在循环移位, 出现距离像“乱序”。图 1(c) 中阴影区域 1 为混叠区, 区域 2 和 3 为无混叠区, 距离像抽取无混叠区, 显然, 抽取的距离像存在循环移位, 出现距离像“乱序”。因此, 这两种情况需要对距离像进行重排后拼接。

通过上述分析可知, 宽约束条件下, 为保证目标抽取距离像反映出目标真实的距离顺序一致, 则要求等效混频本振频率的选择满足:

$$(t_s(k) - \tau) \cdot c/2 - f_l^R \leq m_k \cdot f_s^R < (m_k+1) \cdot f_s^R \leq t_s(k) \cdot c/2 - f_l^R \quad (7)$$

整理后, 得等效混频本振频率的选择范围为:

$$c(t_s(k) - \tau)/2 - m_k \cdot f_s^R \leq f_l^R \leq ct_s(k)/2 - (m_k+1) \cdot f_s^R \quad (8)$$

2.3 等效混频本振频率的选取

实际工程应用中, 等效混频本振频率需要通过式(5)~(8)的可供选择范围进行确定。这就需要知道相对雷达脉冲发射时刻的采样时刻信息(即式(5)中 t_s , 式(6)、(8)中 $t_s(k)$)。随着现代数据采集系统设计技术的发展, 已经能够准确记录这种采样时刻信息, 由此, 就可以明确等效混频本振频率的可选范围, 并完成等效本振频率选择, 为简便起见, 一般取为可选范围的下界或上界。这样, 通过等效混频处理后, 对各幅细化的距离像进行抽取得到的无混叠距离像区域都不存在循环移位, 目标各散射中心在距离

像中的相对位置的顺序与其真实顺序一致,可以直接进行距离像拼接,不再需要进行解模糊和重排,简化了目标抽取算法。

3 仿真结果分析

以上分析结果,通过三组仿真实验进行验证。为了反映距离像细节,仿真中对采样值做 128 点补零 FFT,并对输出幅度进行归一化。

仿真实验一(紧约束单次采样):假设 $\Delta f = 8\text{MHz}$, $N = 32$, $\tau = 100\text{ns}$,此时, $\Delta f\tau < 1$,满足紧约束条件。点目标的位置为 69m、73m、78m,散射强度分别为 1、3、2,采样时刻为 521ns。图 2 是对每个脉冲回波单次采样所成的距离像。从下至上分别为: a. 目标位置; b. 对一组采样值直接做 FFT 得到的距离像,它相对于目标真实位置,发生了循环移位; c、d、e 为经混频处理后做 FFT 得到的距离像,等效混频本振频率在式(5)确定的范围内随机选取,参数 m 分别取为-1、0、1。等效混频后成像结果与目标真实位置一一对应,不存在模糊,说明等效混频处理能有效解决因周期延拓循环移位引起的高分辨距离像模糊问题,而且等效混频本振频率在可选范围内随机选取并不影响结果,为简便起见,一般选取为可选范围的下边界。

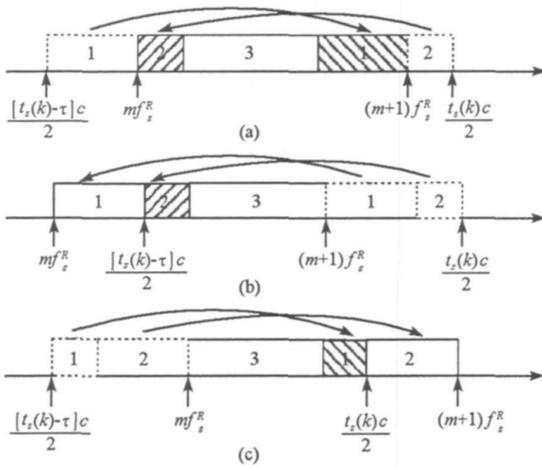


图 1 距离像混叠示意图

Fig. 1 Sketch map of range profiles overlap

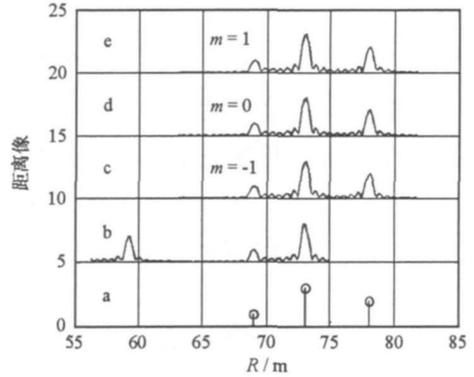


图 2 紧约束条件下,一次采样序列成像结果

Fig. 2 Range profiles of once sampling on strict restriction

仿真实验二(紧约束过采样):假设 $\Delta f = 8\text{MHz}$, $N = 32$, $\tau = 100\text{ns}$,脉内采样次数 $S = 3$,采样频率 $F_s = 30\text{MHz}$, $T_s = 33.3\text{ns}$,采样开始时刻 $t_0 = 356\text{ns}$;各散射点位置分别为 51.5m, 54m, 56.5m, 58m, 61m, 65m, 68m,对应的散射强度分别为 2, 3, 2, 4, 5, 2, 3。等效混频本振频率选择范围参数 m_k 取为 0,为简便起见,等效混频本振频率取为可选范围下边界。通过对比图 3 中各幅细化后的距离像中各散射点位置可知,经过等效混频处理后,得到的距离像中各散射点的相对位置顺序与其真实位置相一致,不存在模糊,可直接按照同距离冗余信息舍弃法^[6-7]拼接出完整的距离像。图 3 中亦给出了拼接后的完整距离像。

仿真实验三(宽约束过采样):假设 $\Delta f = 8\text{MHz}$, $N = 32$, $\tau = 180\text{ns}$,此时, $\Delta f(\tau + T_s) < 2$,满足宽约束条件。脉内采样次数 $S = 3$,采样频率 $F_s = 16.67\text{MHz}$, $T_s = 60\text{ns}$,采样开始时刻 $t_0 = 481\text{ns}$;设置 7 个散射点,位置分别为 65.5m, 69m, 71.5m, 73m, 76m, 80m, 83m,对应的散射强度分别 2, 3, 2, 4, 5, 2, 3。等效混频本振频率选择范围参数 m_k 取为 0,为简便起见,等效混频本振频率取为可选范围下边界。图 4 中各幅细化后的距离像中,实线所示为无混叠距离像区域,虚线所示为混叠区域。显然,各细化距离像的无混叠距离像区域中各散射点的相对位置顺序与其真实位置相一致,不存在模糊,可直接抽取并按照同距离冗余信息舍弃法^[6-7]顺序拼接出完整的距离像。图 4 中给出了拼接后的完整距离像。

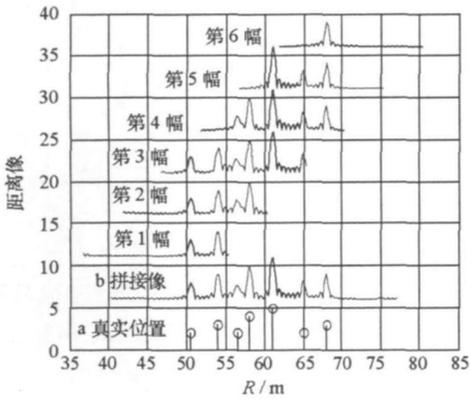


图3 紧约束条件下,过采样各组序列成像结果
Fig. 3 Range profiles of oversampling on strict restriction

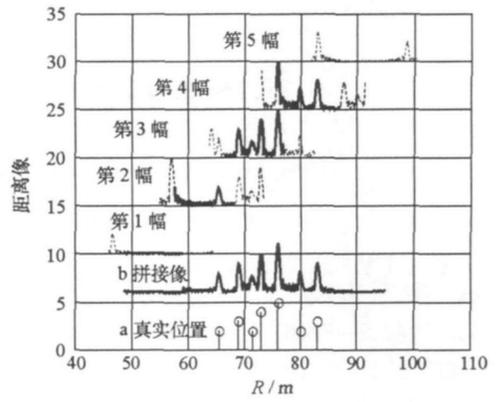


图4 宽约束条件下,过采样各组序列成像结果
Fig. 4 Range profiles of oversampling on wide-sense restriction

4 结束语

对频率步进雷达所成距离像中存在的模糊成因进行了详细分析,提出了等效混频方法来避免距离像模糊,以获得与目标各个散射中心真实位置排列相一致的距离像。同时,本文推导得出了紧约束和宽约束条件下的等效混频振的选择范围,并通过紧约束条件下单次采样成像和过采样成像,以及宽约束条件下过采样成像仿真实验,验证了本文方法的有效性。此外,本文的分析都基于目标静止这一假设。在目标高速运动情况下,距离像循环移位引起的模糊问题较为复杂,该方法需要在运动补偿^[2-8]后进行应用,而其适用性有待进一步的分析和验证。

参考文献:

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar (2ed) [M]. Artech House, 1995.
- [2] Chen H Y, Liu Y X, Jiang W D, et al. A New Approach for Synthesizing the Range Profile of Moving Targets via Stepped-frequency Waveforms [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(3): 406-409.
- [3] Zhang Q, Yeo T S, Du G. ISAR Imaging in Strong Ground Clutter Using a New Stepped-frequency Signal Format [J]. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 948-952.
- [4] 周剑雄, 赵宏钟, 付强. 频率步进雷达距离像解模糊算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(9): 1601-1604.
- [5] 毛二可, 龙腾, 韩月秋. 频率步进雷达信号处理 [J]. 航空学报, 2001, 22(增刊): 16-25.
- [6] 龙腾, 李眈, 吴琼之. 频率步进雷达参数设计与目标抽取算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 28(6): 26-31.
- [7] 李眈, 龙腾. 步进频率雷达目标冗余算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 60-63.
- [8] Jiang B, He X, Wang H Q, et al. Research on Motion Compensation for High Resolution Profile of Extended Target for Stepped Chirp Radar and DSP Implementation [J]. Journal of Electronics (China), 2007, 24(2): 191-198.