

步进跟踪模式下的单脉冲雷达三维成像技术研究¹

张 涛 马长征* 张 群 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)

*(北京邮电大学信息工程系 北京 100876)

摘 要 该文提出了步进跟踪模式下的单脉冲三维成像方法,分析了步进跟踪体制下差信号的幅度线性调制问题,同时提出了补偿方法,该方法解决了单脉冲三维成像中所必须的目标精确跟踪问题,最后通过仿真验证了所提方法的有效性。

关键词 单脉冲雷达, 三维成像, 步进跟踪

中图分类号 TN951

1 引 言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像利用大带宽信号获得目标距离上的高分辨,利用目标相对于雷达的转动获得横向上的高分辨。一般来说它有如下的缺点^[1,2]: (1) ISAR 像平面不能决定目标的真正的方位,会出现反像,因为不通过辅助手段,雷达得不到目标的旋转向量的方向。(2) ISAR 像是目标在距离-多普勒平面上的二维投影像,距离-多普勒平面垂直于转轴。在机动情况下,当距离-多普勒平面和客观坐标平面不一致时,ISAR 像不容易反映目标的形状信息,不利于自动识别和精密制导。利用一维距离像和单脉冲测角技术可以得到目标中具有较大能量的散射点的真实的空间位置,即得到目标的较大散射点在空间的三维分布,即散射点的三维像。但同一距离单元可能有多个能量较强的散射点,单脉冲测角会出现角闪烁。利用 ISAR 成像技术分离不同横向上的具有较大能量的散射点可提高三维像的质量。单脉冲三维成像的特点是三维像不随目标姿态的变化剧烈变化,其中正面像与光学像的含义类似,利于光电复合和目标的识别。文献 [3] 讨论了单脉冲三维成像中遇到的实际问题,文献 [4,5] 讨论了舰船目标单脉冲三维成像的问题及角闪烁的判断准则。然而,单脉冲三维成像中,必须对目标进行精确跟踪,即雷达必须精确跟踪目标中特定的或目标中某一虚拟的散射点,即所谓的三维成像中特有的“空间聚焦”问题,它与 ISAR 像的包络对齐和初相校正同等重要。这在实际雷达中很难做到,本文提出了一种不需要雷达对目标进行连续跟踪的单脉冲三维成像的方法,即在数据记录时间内,雷达波束不动,目标横穿波束的单脉冲三维成像方法,即所谓的“步进跟踪”成像算法。该算法通过对差波束对目标回波的线性调制的补偿,等效于实现了目标的精确跟踪,从而获得较好的单脉冲雷达的目标三维像。

2 差波束调制对单脉冲测角的影响

步进跟踪模式指的是:相干处理时间段内雷达固定波束不动,目标横穿波束,不需要雷达连续精确跟踪目标中的某一实际的或虚拟的散射点。对于飞机等目标,在相干处理时间内,在一定的横向分辨率条件下,目标需要穿波束运动,才能提供一定的目标相对于雷达的夹角的变化。对于和波束接收信号来说,当目标处于主波束时,各散射点的信号幅度可近似为不变,但对差信号来说,各散射点的回波幅度受到差波束方向图的调制,不再是常数,近似为线性函数。为了分析步进跟踪模式下三维成像的可行性,我们首先分析差波束调制对单脉冲测角的影响。

¹ 2000-06-27 收到, 2000-11-16 定稿

设 t 时刻相干处理时间段为 $[t_0, t]$, 和、差波束接收到的目标上第 i 个散射点的回波信号为

$$\Sigma(\theta(t'), t') = a_i \exp(-j2\pi\varphi(t'))F_{\Sigma}(\theta(t')), \quad t' \in [t_0, t] \quad (1)$$

$$\Delta(\theta(t'), t') = a_i \exp(-j2\pi\varphi(t'))F_{\Delta}(\theta(t')), \quad t' \in [t_0, t] \quad (2)$$

式中 F 表示方向图函数, Σ 表示为和波束信号, Δ 表示为差波束信号, $\theta(t)$ 表示散射点与雷达和波束电轴的夹角, $-2\pi\varphi(t')$ 为运动补偿后散射点回波的相位变化。对于横向位置不同的散射点, 相位变化不同, 需要多普勒滤波来分离各散射点。首先假设 FFT 或解调频处理能把 $\varphi(t')$ 精确补偿掉, 则

$$P(\Delta(\theta(t'), t')) = a_i \int_0^t F_{\Delta}(\theta(t')) dt' \quad (3)$$

$$P(\Sigma(\theta(t'), t')) = a_i \int_0^t F_{\Sigma}(\theta(t')) dt' \quad (4)$$

$$\frac{P(\Delta(\theta(t'), t'))}{P(\Sigma(\theta(t'), t'))} = \frac{\int_0^t F_{\Delta}(\theta(t')) dt'}{\int_0^t F_{\Sigma}(\theta(t')) dt'} \quad (5)$$

由积分中值定理, 一定存在 $[t_0, t]$ 之间的某个值 ξ 使得

$$\frac{P(\Delta(\theta(t'), t'))}{P(\Sigma(\theta(t'), t'))} = \frac{F_{\Delta}(\theta(\xi))}{F_{\Sigma}(\theta(\xi))} = \frac{K\theta(\xi)}{A} \quad (6)$$

由此得出

$$\theta(\xi) = \frac{P(\Delta(\theta(t'), t'))}{P(\Sigma(\theta(t'), t'))} \times \frac{A}{K} \quad (7)$$

由 (7) 式得到的 $\theta(\xi)$ 是 ξ 时刻的方向角。若目标的切向运动是近似匀速的, 由 F_{Δ} 的近似线性和 F_{Σ} 的近似常数可得 $\xi \approx (t + t_0)/2$ 和

$$\theta(\xi) \approx (\theta(t_0) + \theta(t))/2 \quad (8)$$

可以看到, 测得的角度是散射点在某一时刻相对于雷达视线的角度。

3 差波束调制对目标上散射点的相对位置的影响

考虑小角度成像的情况。假设从雷达视线去看, 在成像时间内, 目标的姿态没有发生大的变化, 即对目标上任意两点 P, Q , 在 t_0 时刻, 相对雷达波束电轴方向的夹角分别为 $\theta_P(t_0)$, $\theta_Q(t_0)$, 在 t 时刻, 夹角分别为 $\theta_P(t)$, $\theta_Q(t)$, 满足

$$\theta_P(t) - \theta_P(t_0) \approx \theta_Q(t) - \theta_Q(t_0) \quad (9)$$

由 (8) 式可知, 实际上雷达测得的角度为 $\theta_P(\xi)$, $\theta_Q(\xi)$,

$$\begin{aligned}\theta_P(\xi) - \theta_Q(\xi) &= \frac{\theta_P(t_0) + \theta_P(t)}{2} - \frac{\theta_Q(t_0) + \theta_Q(t)}{2} \\ &\approx \theta_P(t_0) - \theta_Q(t_0)\end{aligned}\quad (10)$$

由(10)式看到,在目标穿过雷达波束的情况下,雷达测得的各散射点的相对位置反映目标上各散射点的相对位置。

前面的讨论假设 $\varphi(t')$ 能被精确补偿掉,实际上,即使在匀速转动情况下,由于只能计算有限个频率样点,不可能所有散射点的 $\varphi(t')$ 都能被精确补偿掉。为简化讨论,设 $\theta(t')$ 随 t' 线性变化, $\varphi(t')$ 为线性函数, $\varphi(t') = -f_1 t'$, f_1 为散射点回波的多普勒频率, \tilde{f} 为最接近 f_1 的离散频率,其误差设为 $f = \tilde{f} - f_1$,那么:

$$\begin{aligned}P(\Sigma(\theta(t'), t')) &= a_i \int_0^t F_\Sigma(\theta(t')) e^{j2\pi f_1 t'} e^{-j2\pi \tilde{f} t'} dt' \\ &= a_i A \int_0^t \exp(-j2\pi f t') dt' \\ &= a_i A \frac{\sin \pi f (t - t_0)}{\pi f} \exp(-j\pi f (t + t_0))\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}P(\Delta(\theta(t'), t')) &= a_i \int_0^t F_\Delta(\theta(t')) \exp(j2\pi f_1 t') \exp(-j2\pi \tilde{f} t') dt' \\ &= a_i \int_0^t K \left[\frac{\theta(t_0) + \theta(t)}{2} + \frac{\theta(t) - \theta(t_0)}{t - t_0} \left(t' - \frac{t + t_0}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi f t') dt' \\ &= a_i K \frac{\theta(t_0) + \theta(t)}{2} \frac{\sin \pi f (t - t_0)}{\pi f} \exp(-j\pi f (t + t_0)) \\ &\quad + a_i K \frac{\theta(t) - \theta(t_0)}{t - t_0} \exp(-j\pi f (t + t_0)) \\ &\quad \times \left[-j \frac{\sin \pi f (t - t_0) - \pi f (t - t_0) \cos \pi f (t - t_0)}{2\pi^2 f^2} \right]\end{aligned}\quad (12)$$

(12)式的第一项和散射点的位置有关,第二项为引入的正交分量。由傅里叶变换的分辨特性,一般情况下, f 满足 $|2f \times (t - t_0)| \leq 1$ 。当 $f(t - t_0) \rightarrow 0$ 时,由Taylor展式得

$$\frac{\sin \pi f (t - t_0) - \pi f (t - t_0) \cos \pi f (t - t_0)}{2\pi^2 f^2} \approx \frac{\pi f (t - t_0)^3}{12}\quad (13)$$

归一化误差信号为

$$\begin{aligned}E &= \frac{P(\Delta(\theta(t'), t'))}{P(\Sigma(\theta(t'), t'))} \times \frac{A}{K} \\ &= \frac{\theta(t_0) + \theta(t)}{2} - j(\theta(t) - \theta(t_0)) \frac{\pi f (t - t_0)}{\sin \pi f (t - t_0)} \frac{\pi f (t - t_0)}{12}\end{aligned}\quad (14)$$

实部仍然能反映散射点的位置。当我们利用虚部的大小来判断是否发生“角闪烁”时, E 的虚部可能较大, 极易被剔除出去, 所以应尽量提高谱分辨的能力, 减小 f 即减小虚部的大小。由此可以看出, 在步进跟踪模式下, 差波束的调制不会影响目标中各散射点的相对位置。

4 差波束调制对多普勒单元上的散射点的影响及其补偿

上述分析都是对一个散射点进行的, 本节分析同一距离单元中相邻多普勒单元的散射点的情况。对于差波束信号, 由于幅度被调制, 为梯形函数, 谱峰必然会展宽。一种特殊情况是在 (12) 式中, $\theta(t_0) + \theta(t) = 0$, 差信号的幅度是中心点为零的线性函数, 其谱为双边谱, 宽度近似为等长度的矩形函数的谱宽的一倍。由此可以想到, 差波束信号的 ISAR 像中相邻多普勒单元的散射点会互相影响。如果能补偿差波束信号的幅度调制则同一距离单元中相邻多普勒单元的散射点在测角时不会相互影响。

在小转角成像条件下, 目标上各散射点相对天线电轴夹角的相对关系基本不变。设 $\theta(t)$ 为目标上某参考点相对电轴的角度变化, θ_i 为各散射点相对参考点的角度, 则和波束接收信号为

$$s_h = A \sum a_i e^{j\varphi_i(t)} + n_h \quad (15)$$

其中 n_h 为噪声。差波束接收信号为

$$\begin{aligned} s_c(t) &= \sum K(\theta_i + \theta(t)) a_i e^{j\varphi_i(t)} + n_c \\ &= \sum K\theta_i a_i e^{j\varphi_i(t)} + (K/A)\theta(t)(s_h - n_h) + n_c \end{aligned} \quad (16)$$

如果能把 $\theta(t)$ 估计出来, 则可在 $s_c(t)$ 中把 $\theta(t)$ 引起的幅度调制项补偿掉。 $\theta(t)$ 可由本文第 5 节的基于一维距离像的单脉冲测角拟合来估计。考虑到噪声项, $\theta(t)$ 估计可能不精确, $\theta(t)$ 可以相差一个常数, 但要求误差不影响成像结果, 设角度补偿因子为 $\theta(t) + \Delta\theta(t) + \bar{\theta}$, 那么令

$$\begin{aligned} \tilde{s}_c &= s_c(t) - (K/A)(\theta(t) + \Delta\theta(t) + \bar{\theta})s_h \\ &= K \sum (\theta_i - \bar{\theta} - \Delta\theta(t)) a_i e^{j\varphi_i(t)} - (K/A)(\theta(t) + \Delta\theta(t) + \bar{\theta})n_h + n_c \end{aligned} \quad (17)$$

可基本补偿掉差信号的幅度调制项。为了减小噪声项的影响, $\bar{\theta}$ 的选择应使得 $|\theta(t) + \Delta\theta(t) + \bar{\theta}|$ 尽可能小, 选择 $\bar{\theta}$ 为 $-\theta(t) - \Delta\theta(t)$ 的中点即可。

当 $\Delta\theta(t)$ 不为零时所存在的问题与对差波束信号幅度调制进行补偿存在的问题相同, 这就要求 $\Delta\theta(t)$ 足够小。

我们知道 ISAR 像的横向分辨率和目标相对雷达视线的转角成反比, $\Delta r_c = \lambda/(2\Delta\theta)$ 。对于 8mm 波长, 1m 的横向分辨率, 需要大概 0.23° 的转角, 对于 30m 大小的目标, 在 5km 处约占 0.34° , 若和差波束的线性区有 1° – 2° , 则这种成像方式是可行的。在成一幅像以后, 需要天线电轴重新指向目标, 我们称这种成像方式为“步进跟踪模式”。对于 3cm 波长, 1m 的横向分辨率, 需要大概 1° 转角, 若横向分辨率要求更高, 相应要求更大的转角, 这时就需要“连续跟踪”的模式, 即雷达必须精确跟踪目标中的某一特定的或虚拟的散射点。

通过以上 2,3,4 节的分析,我们可以得出,通过对差波束对回波信号的调制问题的补偿,实际上已经使得雷达精确跟踪上了目标中的某一特定或虚拟的散射点,即焦点,完成了三维成像过程中所特有的空间聚焦问题。

5 基于一维距离像的角闪烁误差减小技术及角运动参数估计

角闪烁的产生主要是由于在回波信号中多散射点回波信号的矢量合成。在一维距离像已经形成的情况下,在每一距离单元内的散射点数将减少。若同一距离单元内散射点较少,回波幅度归一化方差较小,反之,归一化方差较大。利用能量较大(噪声相对较小)、幅度归一化方差较小的单元测角并进行平均或加权平均可以极大地抑制角闪烁的产生。上面的方法的要求是目标径向运动必须已经被补偿。

我们假设目标存在三维转动,没有平动。图 1 是目标的一维距离像。利用 10 个距离像计算方差,求出幅度较大,但幅度归一化方差最小的三个距离单元计算角度。图 2 是分别采用常规单脉冲测角算法与高距离分辨单脉冲测角得到的方位角(俯仰角的情况于方位角类似)误差信号。可以看出,后者的精度较高且比较平滑,起伏较小。通过单脉冲角度平滑算法得到的跟踪误差就较小。因目标为惯性目标,角运动一般是光滑的,对所测角的曲线进行多项式拟合可以得到整个相干处理段期间目标角运动的一个估计 $\hat{\theta}(t)$ 。

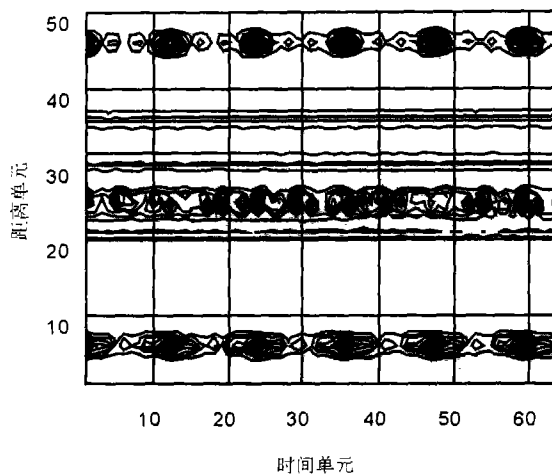


图 1 一维距离像

6 计算机仿真结果

设目标与雷达相对切向运动。若不补偿差波束调制项,当目标上散射点较多时,差波束 ISAR 像上各散射点会互相影响,影响单脉冲三维像。图 3 是飞机目标的三视图,我们设计在机身位置散射点之间的横向距离为 2m,而 ISAR 像的横向分辨率为 1.5m,所以在差波束 ISAR 像中各散射点会相互影响。图 4 是不补偿差波束幅度调制项得到的目标三视图,效果较差,特别是在机身位置。图 5 是补偿掉差波束幅度调制项后得到的目标三视图,可以看到成像效果较好。

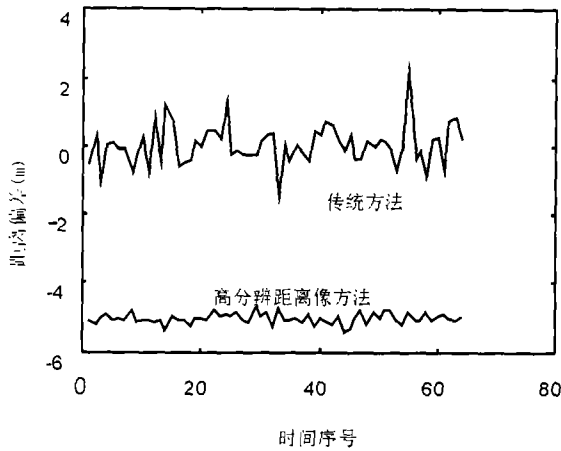


图 2 两种方法得到的方位横距测量误差曲线比较



图 3 飞机目标的三视图

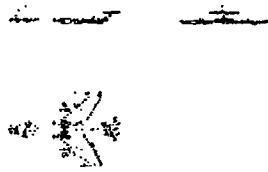


图 4 不补偿差波束幅度调制项得到的目标三视图

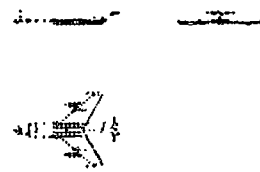


图 5 补偿掉差波束幅度调制项得到的目标三视图

7 结 论

本文提出了单脉冲三维成像的新的工作模式(步进跟踪模式)：在数据接收期间，波束固定不变，目标横穿波束。我们首先讨论了步进跟踪模式下，差信号幅度调制对单脉冲测角的影响和对散射点相对位置的影响问题，然后讨论了差信号幅度调制对多普勒单元中散射点测角的影响，并给出了利用角度参数估计对差信号的幅度调制进行补偿的方法。最后用仿真实验验证了本文所提方法的有效性。本文的方法解决了单脉冲三维成像中雷达必须精确跟踪目标中的特定或虚拟的散射点(即焦点)的问题。

参 考 文 献

- [1] D. R. Wehner, High Resolution Radar, London, Artech House, 1995, 435-466.
- [2] D. A. Ausherman, A. Kozma, J. L. Walker, H. M. Jones, E. C. Poggio, Development in radar imaging, IEEE Trans. on AES, 1984, 20(4), 363-399.
- [3] 郑学合, 高分辨率雷达导引头多维信息提取技术研究, [博士论文], 航天部二院, 1998.
- [4] 马长征, 张守宏, 舰船目标单脉冲雷达三维成像技术, 电子科学学刊, 2000, 22(3), 387-391.

- [5] Zhang Shouhong, Ma Changzheng, Chen Baixiao Monopulse radar three-dimensional imaging for maneuvering target, SPIE, ISMIP'98, Vol.3545, 1998, 193-196.

MONOPULSE RADAR THREE DIMENSIONAL IMAGING TECHNIQUES FOR TARGETS IN STEPPED TRACKING MODE

Zhang Tao Ma Changzheng* Zhang Qun Zhang Shouhong

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

(*Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China*)

Abstract The method of monopulse radar 3-D imaging in stepped tracking mode is presented. Then the amplitude linear modulation of error signals in stepped tracking mode is analyzed with its compensation method followed and so the problem of precisely tracking of target is solved. Finally the validity of these methods is proven by the simulation results.

Key words Monopulse radar, 3-D imaging, Stepped tracking

- 张 涛: 男, 1971 年生, 博士生, 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。
- 马长征: 男, 1967 年生, 讲师, 博士, 现主要从事雷达三维成像、阵列信号处理、无线通信中的信号处理等方面的研究工作。
- 张 群: 男, 1964 年生, 副教授, 博士生, 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。
- 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。