

转动对细长体目标一维成像的影响

韩文勇 王东进

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽, 合肥, 230027)

摘要 研究了频率步进高分辨率毫米波雷达一维距离成像方法, 定性地分析了细长体目标(独立散射点)转动时对距离成像的影响, 推导了成像公式和成像条件, 针对只有两个散射点的简单情况进行了具体的定量分析, 并扩展讨论了有多个独立散射点的细长体目标在转动时对距离成像的影响, 为目标识别提供了有效的途径。

关键词 频率步进, 雷达信号, 距离成像, 细长体目标, 精确制导。

THE EFFECT OF TURNING ON ONE-DIMENSIONAL RANGE PROFILE OF SLENDER TARGET

HAN Wen-Yong WANG Dong-Jin

(Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract The method of synthesizing one-dimensional range profile was studied. It's a method based on the stepped-frequency high range resolution microwave radar. The effect of rotation on range profile of slender target (scattering points stand alone) was analyzed qualitatively, then the imaging formula and requirement of range profile were derived. A detailed analysis for only two scattering points was given quantitatively. In addition, the effect of slender target of many scattering points standing alone was discussed. According to the above analysis, an efficient way to recognize target was provided.

Key words stepped frequency, radar signal, slender target, precision guidance.

引言

在雷达系统中采用高距离分辨率信号具有很多优越性, 其中频率步进信号是一种很重要的高距离分辨率信号形式, 其基本思想为: 发射一串(k 个)窄带的宽脉冲, 脉宽为 τ , 脉冲的周期为 T , 每个脉冲的载频是均匀步进的, 步进值为 Δf , 在接收时对这串脉冲的回波信号用与之载频对应的本振信号进行混频, 再对视频信号的一串采样值进行 IDFT 变换, 得到目标的合成距离一维像。与其它高分辨率雷达信号相比, 频率步进信号雷达的优点能够在不增加瞬时信号带宽的基础上相参合成高距离分辨率, 因此近年来受到了广泛的注意。

由于在信号处理过程中, 对回波信号采样值相参合成产生高距离分辨率, 要求雷达和目标应用相对静止, 如果两者相对运动或转动, 将对目标合成像产生影响; 本文针对细长体目标相对雷达转动时, 通

过理论计算和仿真, 分析它对目标合成像的影响。

1 信号处理初始条件

假定细长体目标由 n 个散射点组成, 并且 n 个散射点之间在成像时是独立分布的, 散射点间距为 d_i (表示第 i 点和第 1 点的间距, $i=1, 2, 3, \dots, n-1, d_1=0$)。假定各个散射点的回波振幅 A_i 等于 1;

$$\begin{cases} f_k = f_0 + k \cdot \Delta f, & k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \\ R_i = R_1 + d_i, & i = 1, 2, 3, 4, \dots, n, \\ A_i = 1; \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, f_k 为第 k 个脉冲的载频, R_i 为第 i 点距离雷达的距离, A_i 为第 i 点回波的振幅。

2 静止成像

2.1 回波视频信号

细长体目标上第 i 个点的视频信号^[1]为

$$V_i(f_k, t) = A_i \exp\left\{-j2\pi f_k \cdot \frac{2R_i}{c}\right\}, \quad (2)$$

式(2)中, t 为发射某一个脉冲开始到接收此脉冲回波的时间. 对于细长体目标上的所有散射点, 它们的视频信号为

$$V(f_k, t) = \sum_{i=1}^n V_i(f_k, t) = P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q_i(k), \quad (3)$$

$$\begin{cases} P(k) = \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2R_1}{c}\right] \\ Q_i(k) = \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2d_i}{c}\right] \end{cases}, \quad (4)$$

式(3)和(4)中 $i=1, 2, 3, \dots, n, k=1, 2, \dots, N-1$

2.2 目标静止时的成像公式^[2]

$$\begin{aligned} |H(l)| &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} V(f_k, t) \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{lk}{N}\right\} \right| \\ &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q_i(k) \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{lk}{N}\right\} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 $i=0, 1, 2, \dots, N-1$

2.3 目标静止的结论

因为 $B=N\Delta f$, 所以频率步进信号的距离分辨

力为 $\delta R = \frac{c}{2N\Delta f}$, 假定 $D = \min(d_i - d_{i-1})$ 为相连两散射点间的最小值, $i=2, 3, 4, \dots, n$

(1) 当 $D > \delta R$ 时, 能够进行分辨, 理论计算结果应该为有几个散射点就有几个像(峰值), 仿真与计算结果吻合;

(2) 当 $D \leq \delta R$ 时, 不能对此物体的各个独立散射点进行分辨.

3 转动对成像的影响

3.1 回波视频信号

假定细长体目标以第一个散射点为圆心, 以角速度 ω 匀速转动(见图1), 为了说明简单, 只注明相邻的两个散射点, 间隔为 d_2 ; 要求各个散射点的转动半径小于雷达信号的主瓣宽度.

从图1中得出 $R_i = R_1 + d_i \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta_0)$, 令 $\theta_0 = 0; i=1, 2, 3, \dots, n$, 所以转动时细长体的视频信号为($k=0, 1, 2, \dots, N-1$)

$$\begin{aligned} V_i(f_k, t) &= \sum_{i=1}^n A_i \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2R_i}{c}\right] \\ &= P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q'_i(k), \end{aligned} \quad (6)$$

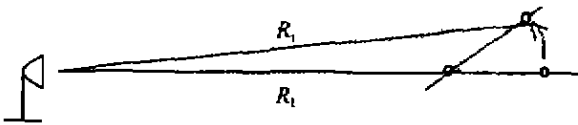


图1 目标转动示意图

Fig. 1 The diagram of the turning slender target

$$\text{其中} \begin{cases} P(k) = \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2R_1}{c}\right], \\ Q'_i(k) = \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2d_i}{c} \cos(\omega \cdot t)\right]; \end{cases} \quad (7)$$

当 $n=1$ 时, $V_i(f_k, t) = P(k)$, 相当于点目标的静止像.

当 $n \geq 2$ 时: 目标转动因子 $Q'_i(k)$;

$$Q'_i(k) = \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2d_i}{c} \cos(\omega \cdot t)\right]. \quad (8)$$

目标被照射时间 $t = NT$ 比较短, 当 $0 < \omega \cdot t < 1$ 时, $\cos(\omega \cdot t) \approx 1 - \frac{1}{2}(\omega \cdot t)^2$, 并且第 k 个脉冲的采样时刻为 $t_k = kT + \frac{2R_1}{c} + \frac{\tau}{2}$, $\frac{\tau}{2} \leq kT + \frac{2R_1}{c}$, 可略去;

$$\begin{aligned} Q'_i(k) &= \exp\left[-j2\pi f_k \cdot \frac{2d_i}{c} \left(1 - \frac{1}{2}(\omega \cdot t)^2\right)\right] \\ &= Q_i(k) \cdot \exp[j\Phi(k, i)]. \end{aligned} \quad (9)$$

目标转动因子产生的相位分量为 $\Phi(k, i)$, 令 $\beta = \frac{2\pi d_i}{c}$, 得出

$$\begin{aligned} \Phi(k, i) &= \beta f_k \cdot (\omega \cdot t)^2 \\ &= \beta f_k \cdot \omega^2 \cdot \left(kT + \frac{2R_1}{c}\right)^2. \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 转动时成像公式

$$\begin{aligned} |H(l)| &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} V_i(f_k, t) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{lk}{N}\right) \right| \\ &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q'_i(k) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{lk}{N}\right) \right| \\ &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} P(k) \cdot \sum_{i=1}^n [Q_i(k) \exp(j\Phi(k, i))] \cdot \exp\left(j2\pi \frac{lk}{N}\right) \right|. \end{aligned} \quad (11)$$

3.3 成像分析

(1) 分辨条件

对于频率步进雷达信号, 目标经过一串脉冲的照射, 总时间为 NT . 为了保证目标转动时, 目标上的散射点能够分辨开来, 需要满足下式:

$$D \cos(\omega \cdot NT) > \delta R = \frac{c}{2N\Delta f},$$

$$\text{令 } \psi = \arccos\left\{\frac{c}{2N\Delta f D}\right\}$$

$$0 < \omega \cdot NT < \psi, 0 < \psi < \frac{\pi}{2}, \quad (12)$$

(2) 当目标静止时, 散射点的回波视频信号为

$$V(k) = P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q_i(k).$$

当目标转动并满足条件式(12)时,散射点回波的视频信号为

$$\begin{aligned} V_r(k) &= P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q_i'(k) \\ &= P(k) \cdot \sum_{i=1}^n Q_i(k) \exp[j\Phi(k, i)]. \end{aligned} \quad (13)$$

式(12)成立的条件为 $0 < \omega \cdot t < 1$, 即 $0 < \omega \cdot NT < 1$. 综合式(13), 得出

$$0 < \omega \cdot NT < \min[\psi, 1]. \quad (14)$$

(3) 满足式(13)后, 目标转动因子产生的相位分量为:

$$\begin{aligned} \Phi(k, i) &= \beta \omega^2 f_n \frac{4R_1^2}{c^2} + \\ &\beta \omega^2 k \left(f_0 \cdot 2T \frac{2R_1}{c} + \Delta f \frac{4R_1^2}{c^2} \right) + \\ &\beta \omega^2 k^2 \left(f_0 T^2 + \Delta f 2T \frac{2R_1}{c} \right) + \beta \omega^2 k^3 \Delta f T^2 \\ &\approx \beta \omega^2 f_n \frac{4R_1^2}{c^2} + \beta \omega^2 f_n \cdot 2T \frac{2R_1}{c} k + \\ &\beta \omega^2 f_0 T^2 k^2 + \beta \omega^2 \Delta f T^2 k^3, \\ \text{令 } P_i &= \frac{d_i [1 - \cos(\omega \cdot NT)]}{\delta R} = \frac{d_i \omega^2 N^2 T^2}{2 \cdot \frac{c}{2B}} \\ &= B \cdot \frac{d_i \omega^2 N^2 T^2}{c}, \quad L_i = \frac{f_0}{B} P_i, \end{aligned} \quad (15)$$

其中 P_i 表明第 i 个散射点在目标被照射期间 NT 中移动了多少个系统径向距离分辨单元, 则

$$\begin{aligned} \Phi(k, i) &= \frac{2\pi L_i}{N^2} \left(\frac{2R_1}{c} / T \right)^2 + \\ &2 \cdot \frac{2\pi L_i}{N^2} \left(\frac{2R_1}{c} / T \right) \left(\frac{k}{N} \right) + \\ &2\pi L_i \left(\frac{k}{N} \right)^2 + 2\pi P_i \left(\frac{k}{N} \right)^3. \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中, 第一项为常数项, 对合成像位置没有影响, 可略去; 但是, 相对静止目标, 转动因子相位多了一、二、三次相位, 它们对目标成像有很大的影响。

4 成像影响和结果仿真

为了方便起见, 假设散射点总数 $n=3$, 仿真参数为:

$$\begin{aligned} f_0 &= 35.9 \text{GHz}, & \Delta f &= 5 \text{GHz}, & \tau &= 100 \text{ns}, \\ N &= 128, & T &= 20 \mu\text{s}, & n &= 3, \\ R_1 &= 1 \text{km}, & d_1 &= 0, & d_2 &= 1 \text{m}, \\ d_3 &= 2 \text{m}, & D &= 1 \text{m} \end{aligned} \quad (17)$$

4.1 静止成像

计算得出 $\delta R = \frac{c}{2N\Delta f} = 0.23 \text{m}$, 静止时的像如图2所示:

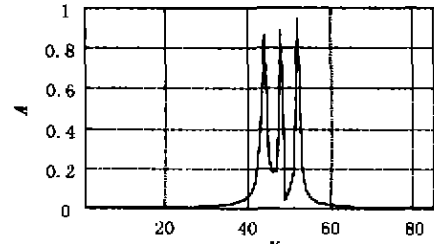


图2 静止时间目标成像($n=3$)
Fig. 2 The range profile of stillness target ($n=3$)

4.2 转动成像条件

当目标转动时, 按照上面的分辨条件, 可以知道 $\psi = \arccos\left(\frac{c}{2N\Delta fD}\right) = 1.334 \text{rad}$. 由 $0 < \omega \cdot NT < \min(1.334, 1)$, 最终得出条件为 $0 < \omega < 391 \text{rad/s}$, 此条件一般都能满足。

由于第一个散射点在整个照射过程中是静止不变的, 主要是后面两点转动对合成像有影响, 下面先讨论单个转动散射点对合成像的影响, 最后再把所有的散射点线性叠加起来即可。

4.3 单个散射点转动对成像的影响

对于第二个散射点的视频信号为:

$V(k)_2 = P(k) \cdot Q_2(k) \cdot \exp(j\Phi(k, 2))$, 又由于 $0 < \omega NT < 1$, 得出

$$\begin{cases} P_2 = B \cdot \frac{d_2}{c} \cdot (\omega NT)^2 < B \frac{d_2}{c} = 2.1 \\ L_2 = \frac{f_2}{B} \cdot P_2 < f_0 \cdot \frac{d_2}{c} = 120 \end{cases} \quad (18)$$

下面分别分析转动因子相位的各次项对成像的影响:

(1) 对于一次相位变化项

$$\begin{aligned} H_{21}(l) &= \sum_{k=0}^{N-1} P(k) Q_2(k) \exp(j\Phi_1(k, 2)) \exp\left(j2\pi \frac{lk}{N}\right) \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} V(k) \exp\left[j \frac{2\pi k}{N} \left(l + 2 \frac{L_2}{N} \left(\frac{2R_1}{c} / T \right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

像相对于静止时, 向左移动了一段距离 l' , 当 $0 < L_2 < 120$ 时,

$$l' = 2 \frac{L_2}{N} \left(\frac{2R_1}{c} / T \right) < 0.6 \text{ (IFFT BIN)}, \quad (20)$$

从中可以看出, 移动的最大距离只是 0.6 个 DFT 谱线, 所以一次相位变化项对整个成像的影响较小, 可以不用考虑一次相位对距离成像的影响, 下面是 $\omega=20$ 和 $\omega=200$ 时第二个散射点所形成的像如图3所示。

(2) 对于二次相位变化项

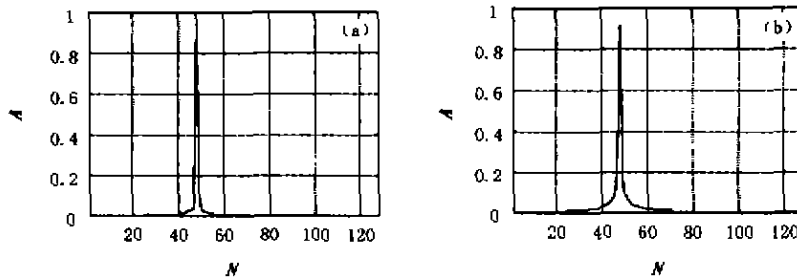


图 3 转动时一次相位对第二个散射点距离成像的影响 (a) $\omega=20$, (b) $\omega=200$

Fig. 3 The effect on the range profile of the 2nd turning point produced by the simple item of the phase (a) $\omega=20$, (b) $\omega=200$

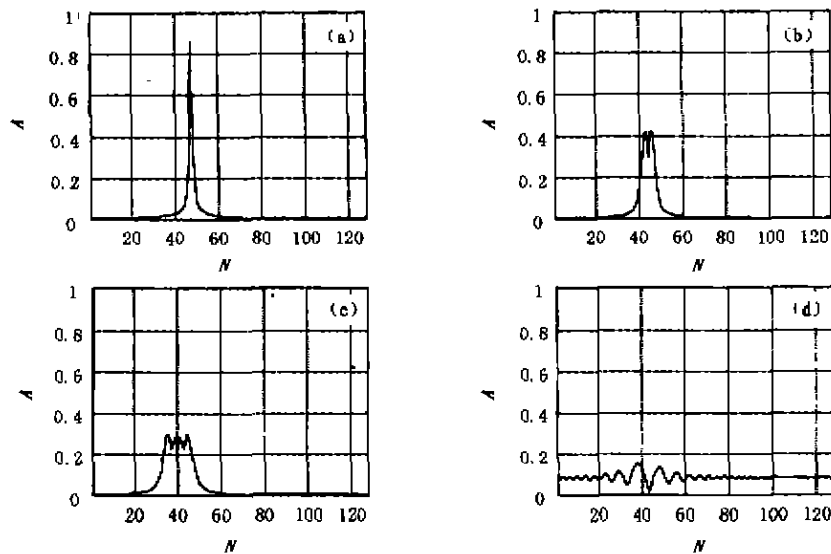


图 4 转动时二次相位对第二个散射点距离成像的影响 (a) $\omega=30$, (b) $\omega=70$, (c) $\omega=100$, (d) $\omega=300$

Fig. 4 The effect on the range profile of the 2nd turning point produced by the quadratic item of the phase (a) $\omega=30$, (b) $\omega=70$, (c) $\omega=100$, (d) $\omega=300$

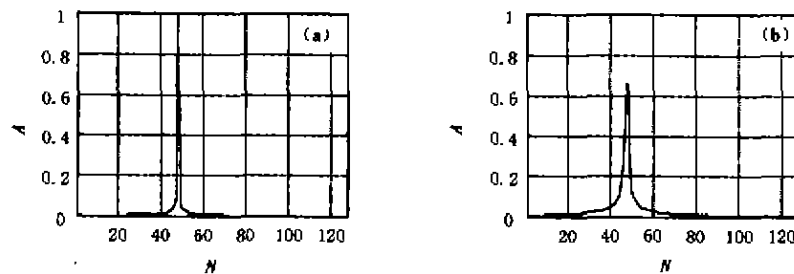


图 5 转动时三次相位对第二散射点成像的影响 (a) $\omega=20$, (b) $\omega=180$

Fig. 5 The effect on the range profile of the 2nd turning point produced by the cubic item of the phase (a) $\omega=20$, (b) $\omega=180$

$$H_{2c}(l) = \sum_{k=0}^{N-1} P(k)Q_2(k)\exp\left[j\frac{2\pi}{N}\left(l + L_2\left\{\frac{k}{N}\right\}\right)\right] \quad (21)$$

对于平方相位 $L_2\left(\frac{k}{N}\right)^2$, 将导致像的发射和分裂, 成像的影响程度取决于系数 L_2 的大小; 我们知道在点目标相对于雷达匀速运动时, 也产生平方相

位, 当它的系数大于 3 时, 像的峰值就下降了差不多 3dB, 并且像已经严重展宽, 大约是静止像的 2 倍^[2]; 而对于本系统, $L_2 = \frac{f_0}{B}P_2$, $f_0 \gg B$, P_2 有一微小的变化, L_2 的变化也将比较大, 并且 $P_2 \propto \omega^2$, 由此可见, 目标比较小的角速度转动, 也将严重影响成像质量,

最坏的有可能导致目标成像信息无法使用；

$$\text{当 } L_2 = 3 \text{ 时, } P_2 = 0.053 \Rightarrow \omega = 6.18. \quad (22)$$

所以在 $\omega \geq 62$ 时, 距离像的峰值就已经下降了差不多 3dB, 并且像严重展宽, 甚至分裂, 下面为二次变化项对像的影响的仿真图(注: 只是第二个散射点)(见图 4).

从图 4 中可见, 转动所产生的二次相位变化量对距离成像的影响是巨大的, 当角速度 $\omega > 62$ 时, 像开始发散和分裂, 随着 ω 的增大, 分裂和发散现象越来越严重, 当 $\omega = 300$ 时, 已经无法从仿真图上得出成像信息, 所以在目标转动距离成像时, 必须对转动所产生的二次相位进行补偿.

(3) 对于三次相位变化项

$$H_{23}(l) = \sum_{k=0}^{N-1} P(k) Q_2(k) \exp \left[j \frac{2\pi k}{N} \left(l + P_2 \left(\frac{k}{N} \right)^2 \right) \right] \quad (23)$$

从上面的计算中知道, $0 < P_2 < 2.1$, 远小于二次相位变化项的系数 L_2 , 它对成像的影响远不如二次项那么严重; 并且三次相位变化项 $P_2 \left(\frac{k}{N} \right)^3$ 主要导致像的幅度下降, 如果要求像幅度下降在 3dB 之内时, $P_2 < 0.375 \Rightarrow \omega = 164$, 图 5 是转动时三次变化量对距离成像的影响(第二个散射点).

(4) 总的转动相位因子对成像的影响

在转动因子相位 $\Phi(k, 2)$ 中, 常数项对距离成像没有影响, 可以略去; 并且从上面的分析中看来, 一、三次项的系数远小于二次项的系数, 所以在整个式子中, 二次项具有重要的作用, 它对距离成像的影响远较其它两项严重, 图 6 是整个式子对距离成像的影响.

4.4 同时考虑两个转动散射点合成像的影响

从上面的分析中, 我们知道, 转动目标对合成像的影响主要是转动因子相位中二次项的影响. 由于在计算 IDFT 时, 算法是线性化的, 并且从假设中知道, 细长体目标各个散射点是独立成像的, 所以反映到整个成像中是各个散射点的合成像的线性叠加. 由于 $P_1 \propto d_1$ 和 $L_1 \propto d_1$, 所以距离转动支点越远的散射点对合成像的影响越强烈. 按照上面的算法, 当

$$L_3 = 3 \text{ 时, } P_3 = 0.053 \Rightarrow \omega = 43.7. \quad (24)$$

从图 7 中可以看出, 当 $\omega \geq 44$ 时, 转动角速度 ω 已超过式(24)的条件, 第三个散射点所形成的像开始分裂; 但是对于第二个散射点, 还没有达到式(22)定义的条件, 仍然可分辨出它的像, 由于二次项系数 L_2 的作用, 各个点的峰值都已经下降了不少, 并且第二个散射点有点展宽, 这符合单个散射点转动对成像的影响得出的结论. 在各个散射点转动成像过程中, 各个散射点的合成像会展宽和分裂, 叠加在一起时, 难免会出现混迭现象.

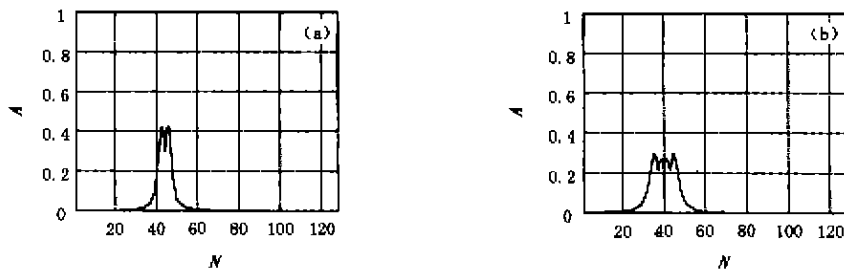


图 6 整个相位因子对距离成像的影响 (a) $\omega = 70$, (b) $\omega = 100$
Fig. 6 The effect on the range profile of the turning slender target produced by the whole polynomial of the phase (a) $\omega = 70$, (b) $\omega = 100$

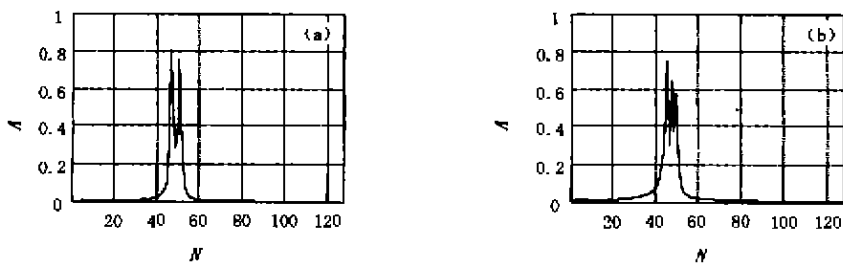


图 7 细长体目标的两个转动散射点对合成像的影响 (a) $\omega = 30$, (b) $\omega = 44$
Fig. 7 The effect on the range profile of the 2nd and 3rd turning points produced by the whole polynomial of the phase (a) $\omega = 30$, (b) $\omega = 44$

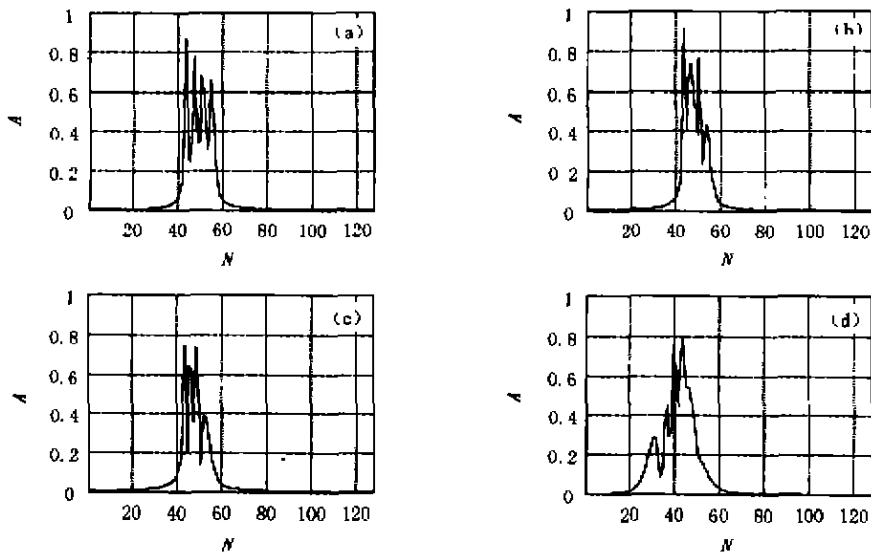


图8 4个散射点转动时的综合成像

(a) $\omega=20$. (b) $\omega=40$. (c) $\omega=50$. (d) $\omega=80$

Fig. 8 The range profile of the turning slender target with 4 scattering points

(a) $\omega=20$. (b) $\omega=40$. (c) $\omega=50$. (d) $\omega=80$

4.5 推广至多个散射点时,综合对合成像的影响

对于当前这个模型,即转动支点在目标一侧,对于某一散射点的分裂条件,考虑每个散射点峰值下降3dB这个条件,这时 $d_s\omega^2$ 为常数,所以散射点距离转动越远,转动角速度的条件限制越严格.可能会出现这种现象,距离支点最远端的散射点的合成像分裂已经很严重时,最近端的散射点成像可能还是完好的,比如当第一个散射点作为支点时,它在整个转动成像过程中是静止的.图8为4个散射点转动的综合成像($d_m=m-1, m=1,2,3,4$).

5 结语

在上面的分析中,定性地分析了细长体目标(独立散射点)转动时对距离成像的影响,推导了成像公式和成像条件,并针对只有两个散射点的简单情况进行了具体的定量分析,从中扩展到具有多个独立散射点的情况满足细长体目标的条件.从上面的分析中知道,转动的散射点对距离成像有着巨大的影响,特别是转动时产生的二次相位变化项对距离成像的影响,严重时可能无法得出成像信息;并且知道,如果是独立的散射点,每个散射点所成的像是线性叠加在一块的,但是由于散射点的转动,导致合成像的展宽和分裂,难免会出现混迭现象,将对目标识

别带来很大的困难,所以必须对这种情况下的合成像进行转动补偿.

REFERENCES

- [1] Wehner D R. *High Resolution Radar* (2ed). Artech House, 1995, 5—180
- [2] Einstein T H. Generation of high resolution radar range profiles and range profile auto-correlation functions using stepped-frequency pulse trains. AD-A149242, 1984; 15—49
- [3] DING Lu-Fei, ZHANG Ping. *Radar System*. Xi'an: College of Telecommunication Engineering of North West Publishing House (丁鹭飞, 张平. 雷达系统. 西安: 西北电讯工程学院出版社), 1984; 383—430
- [4] LIN Mao-Yong, KE You-An. *Theory of Radar Signal*. Beijing: National Defense Industry Publishing House (林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论. 北京: 国防工业出版社), 1984; 115—229
- [5] CHEN Ding-Feng. Principles of high ranged resolution of pulse stepped-frequency radar signal and system designing. Hefei: Master Dissertation, University of Science and Technology of China (陈定峰. 脉冲步进雷达高分辨力成像机理及系统设计. 合肥: 中国科学技术大学硕士论文), 1997; 20—43
- [6] Rihaczek A W. *Principles of High-Resolution Radar*. McGRAW-HILL Book Company, 1969; 42—117 (Rihaczek A W 著, 董士嘉译. 雷达高分辨理论. 北京: 科学出版社), 1981; 42—117