

跳频脉冲雷达目标的距离 - 多普勒成像¹

刘 峰 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 该文采用跳频脉冲信号作为成像雷达信号形式, 研究了一种雷达等效转台目标距离 - 多普勒成像的新算法。与常规步进频率雷达傅里叶变换成像算法相比, 该算法具有多普勒不模糊范围大的特点, 因而克服了步进频率雷达成像算法容易产生多普勒混叠的缺点。计算机仿真结果表明了该算法的有效性。

关键词 跳频脉冲, 雷达成像, 距离 - 多普勒像

中图分类号 TN957.7

1 引 言

现代雷达技术的重要发展方向之一是雷达成像。步进频率信号 (stepped-frequency pulses) 是成像雷达采用的一种易于工程实现的高距离分辨力信号形式^[1]。步进频率雷达的成像处理过程一般分三步进行: 运动补偿、脉冲合成处理和成像处理。运动补偿就是对雷达与目标之间的纵向平动分量加以补偿, 使二者之间仅存在等效的转动分量, 目标等效为转台目标。脉冲合成处理就是对经过运动补偿后不同频率点的目标回波进行离散傅立叶逆变换 (IDFT) 以形成目标纵向一维距离像。由于成像所需的观测角度变化范围较小, 一般假设目标作匀速转动, 采用常规离散傅立叶变换 (DFT) 即可完成目标的横向成像处理^[2]。

为提高电子反干扰 (ECCM) 能力而设计的随机跳频脉冲信号, 简称跳频脉冲信号 (hopped-frequency pulses) 采用了脉间随机跳频的频率编码方式, 因此, 这种信号形式在具有步进频率信号的合成带宽大、瞬时带宽小、工程实现方便灵活等特点的同时克服了步进频率信号存在“距离 - 多普勒耦合”的缺点^[3]。本文基于这一特点, 研究了一种在跳频脉冲雷达上实现目标距离 - 多普勒成像的新算法, 称为多普勒搜索算法 (Doppler Search Algorithm, 简称 DSA)。该算法通过多普勒补偿的方法进行目标上散射点的多普勒分析, 具有多普勒不模糊范围大的特点, 因而不会产生步进频率雷达 DFT 成像算法容易出现的多普勒混叠现象。

本文首先简要介绍了跳频脉冲信号及其距离和多普勒分辨性能, 然后以目标转台成像模型为例详细介绍了 DSA 的距离 - 多普勒成像原理。最后以典型的等效转台目标模型对该算法的成像效果给出了计算机仿真结果。

2 跳频脉冲信号及其相参合成处理

跳频脉冲信号是一组载频以伪随机步长跳变的脉冲序列, 其复包络可表示为

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t - nT_r) \exp(j2\pi b_n \Delta f t), \quad (1)$$

其中 $u_c(t) = (1/\sqrt{T_p}) \text{rect}(t/T_p)$, N 为脉冲序列长度, T_p 为脉冲宽度, T_r 为脉冲重复周期, Δf 为载频跳变单位步长, $b_n \Delta f$ 表示第 n 个脉冲的载频增量, $b_n \in \{0, \dots, N-1\}$,

¹ 1999-01-27 收到, 1999-09-04 定稿

雷达信号处理国家重点实验室开放基金资助课题

且当 $n \neq l$ 时 $b_n \neq b_l$, ($n, l = 0, \dots, N-1$). 设 $B = (b_0, \dots, b_{N-1})$ 为跳频步长编码序列, 若 $b_n = n$, ($n = 0, \dots, N-1$), 即载频按固定步长 Δf 递增, 则 $u(t)$ 为常规步进频率信号. 若 B 为伪随机序列, 则 $u(t)$ 为跳频脉冲信号.

跳频脉冲信号的模糊函数为“图钉”型模糊函数^[3], 其模糊图如图 1(a) 所示 (本文的仿真结果均采用如下系统参数: 载频初值 $f_0 = 35\text{GHz}$, $N = 128$, $\Delta f = 2.5\text{GHz}$, $T_p = 0.4\mu\text{s}$, $T_r = 250\mu\text{s}$). 该信号不存在“距离-多普勒耦合”现象, 因而可同时具有良好的距离和多普勒分辨性能, 其时延分辨力为 $1/(N\Delta f)$, 而多普勒分辨力为 $1/(NT_r)$, 多普勒不模糊窗宽度为 $1/T_r$. 由于采用了随机跳频编码方式, 因此其模糊函数存在一定幅度的旁瓣, 其位置在时延-多普勒平面呈随机分布, 称为自身杂波. 为了提高主旁瓣比, 可采用多组不同跳频步长编码序列的跳频脉冲信号, 即多组随机跳频脉冲信号, 进行脉组间相参积累处理, 处理后主旁瓣功率比增益可达 $10\lg M$ (dB) (M 为积累脉组数). 多组随机跳频脉冲信号的模糊图如图 1(b) 所示 ($M = 8$). 可见, 该信号的模糊图旁瓣电平显著降低, 且多普勒分辨力进一步得到提高, 达到 $1/(MNT_r)$, 接近理想“图钉”型模糊图, 且多普勒不模糊窗宽度保持不变.

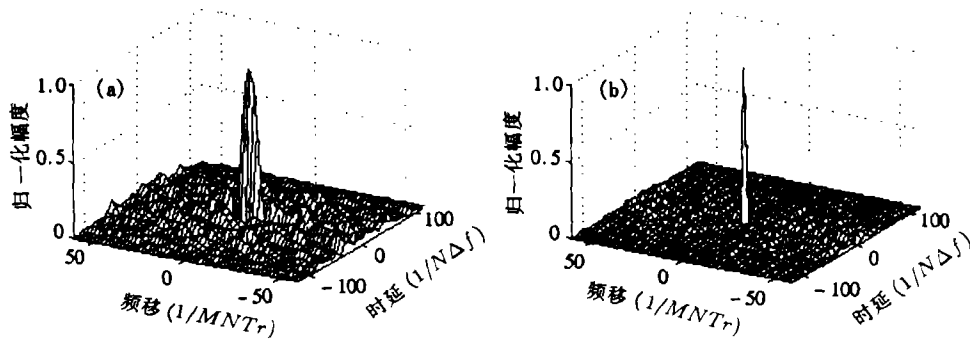


图 1 跳频脉冲信号及多组随机跳频脉冲信号的模糊函数

跳频脉冲雷达回波信号的脉冲相参合成处理过程与步进频率雷达的情况相类似^[1], 可以利用 IDFT 进行.

设 $S(n)$ 为系统第 n 个脉冲零中频回波信号的采样值. 对于一个位于 R 处的点目标, 幅度归一化采样值为

$$S(n) = \exp(-j2\pi f_n 2R/c), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (2)$$

式中 c 为光速, f_n 为雷达发射的第 n 个脉冲载频, $f_n = f_0 + b_n \Delta f$.

对 N 个脉冲的采样序列 $S(n)$ ($n = 0, \dots, N-1$), 按发射频率由低到高的顺序进行排序, 排序后的序列为

$$S'(n) = \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)2R/c], \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (3)$$

对该序列进行 IDFT 即可实现跳频脉冲雷达回波信号脉冲的相参合成处理. 可以看出, 对于静止点目标, 排序后的采样序列呈线性相位变化关系, 经 IDFT 处理后可合成出目标的高分辨一维距离像.

3 DSA 的距离-多普勒成像原理

设雷达发射信号为多组随机跳频脉冲信号, 对于多散射点目标模型^[4], 设 $S(m, n)$ 为第 m 组第 n 个发射脉冲所产生的零中频回波信号采样值, 则

$$S(m, n) = \sum_{p=1}^P \alpha_p \exp(-j2\pi f_{mn} \tau_{pmn}), \quad m = 0, \dots, M-1, n = 0, \dots, N-1, \quad (4)$$

其中 M, N 分别为脉组数和每一脉组内的脉冲数; P 为目标上散射点个数; α_p 为第 p 个散射点的回波响应幅度; f_{mn} 为雷达发射的第 m 组第 n 个脉冲载频, $f_{mn} = f_0 + b_{mn} \Delta f$, $b_{mn} \Delta f$ 表示第 m 个脉组内第 n 个脉冲的载频增量, $b_{mn} \in \{0, \dots, N-1\}$ 。

τ_{pmn} 为第 p 个散射点对第 m 组第 n 个脉冲的回波时延, 有

$$\tau_{pmn} = \frac{2}{c} \left[r_p - \frac{\lambda_{mn}}{2} (f_d + f_p) t_{mn} \right], \quad (5)$$

式中 r_p 为第 p 个散射点纵向距离; λ_{mn} 为第 m 组第 n 个发射脉冲载波波长,

$$\lambda_{mn} = \frac{1}{f_0 + b_{mn} \Delta f} \approx \frac{1}{f_0} = \lambda_0; \quad (6)$$

t_{mn} 为第 m 组第 n 个脉冲回波零中频信号采样时间, 取 $t_{mn} = (mN + n)T_r + T_p/2 + 2R/c$, R 为目标各散射点纵向距离的平均值; f_d 为目标各散射点的整体平动产生的多普勒频率, 各散射点的值均相同; f_p 为目标上第 p 个散射点以其上某一参考点为中心转动产生的多普勒频率。在小观测角范围内, 由目标转动产生的散射点多普勒频率与散射点距参考点的横向距离成正比, 在同一距离单元内, 目标上各散射点的横向距离与其多普勒频率之间存在一一对应的关系。因此, 在多普勒域对各散射点加以分辨, 即可实现散射点的横向分辨。DSA 通过沿多普勒轴进行搜索来实现对各散射点多普勒频率的分辨。

目标散射点多普勒频率的搜索可通过对零中频回波信号采样序列乘以多普勒补偿因子 $C(m, n, f)$ 进行, $C(m, n, f)$ 的取值如下:

$$C(m, n, f) = \exp(-j2\pi f t_{mn}), \quad m = 0, \dots, M-1, \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (7)$$

式中 f 为多普勒频率搜索值。

设 $C(m, n, f)$ 与 $S(m, n)$ 的乘积分组按发射频率由低到高的顺序排序, 排序后的值为 $S_c(m, n, f)$, 由 (4) 式、(7) 式可得

$$S_c(m, n, f) = \sum_{p=1}^P \alpha_p \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + n \Delta f) r_p \right] \exp \{ -j2\pi [f - (f_d + f_p)] t'_{mn} \}, \quad (8)$$

其中 $t'_{mn} = (mN + q_{mn})T_r + T_p/2 + 2R/c$, $q_{mn}, (m = 0, \dots, M-1, n = 0, \dots, N-1)$ 为 $n(n = 0, \dots, N-1)$ 经 $b_{mn} (m = 0, \dots, M-1, n = 0, \dots, N-1)$ 分组按 $n = 0, \dots, N-1$ 的顺序排序后产生的随机数序列。

对每组不同多普勒搜索频率 f 下的序列 $S_c(m, n, f)$ ($m = 0, \dots, M-1, n = 0, \dots, N-1$) 分组进行 IDFT 处理, 即形成每组不同多普勒搜索频率处目标的纵向距离像:

$$F(m, r, f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_c(m, n, f) W_N^{-rn}, \quad m = 0, \dots, M-1, \quad r = 0, \dots, N-1, \quad (9)$$

式中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$, r 为纵向距离单元数。(8) 式、(9) 式的处理过程完成了单组跳频脉冲信号对目标散射点在距离-多普勒平面上的分辨, 即形成了目标的距离-多普勒像。

如前所述, 单组跳频脉冲信号的模糊函数存在一定幅度的自身杂波, 因此采用单组跳频脉冲信号所形成的目标距离-多普勒像受自身杂波干扰较大。为此, 可对多组随机跳频脉冲信号所形成的距离-多普勒像进行相参积累, 即

$$F(r, f) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} F(m, r, f). \quad (10)$$

将 (9) 式代入 (10) 式, 并交换求和次序以减小运算量, 可得

$$F(r, f) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} S_c(m, n, f) W_N^{-rn}. \quad (11)$$

$|F(r, f)|$ 为积累后的目标距离-多普勒像, 其自身杂波干扰小, 图像更为清晰, 其纵向距离分辨率为

$$\Delta R_s = c/(2N\Delta f). \quad (12)$$

而多普勒分辨率为

$$\Delta f = 1/(MNT_r). \quad (13)$$

目标的横向距离分辨率 ΔR_c 在载波波长一定时, 由目标在观测时间内的总转角决定,

$$\Delta R_c = \lambda_0/(2\Delta\theta), \quad (14)$$

式中 $\Delta\theta$ 为目标在观测时间内的总转角, 对于多组随机跳频脉冲信号, $\Delta\theta = \omega MNT_r$ 。按本文采用的系统参数, $\Delta R_s = 0.47\text{m}$, 若要求 $\Delta R_c = \Delta R_s$, 则只要在观测时间内目标的总转角 $\Delta\theta = 9.12 \times 10^{-3}\text{rad}$ 即可。

多幅距离-多普勒像在进行相参积累前, 应对目标整体平动分量加以补偿, 这时相应的多普勒补偿因子为

$$C(m, n, f) = \exp[-j2\pi(f + \hat{f}_d)t_{mn}], \quad m = 0, \dots, M-1, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (15)$$

\hat{f}_d 为目标各散射点整体平动产生的多普勒频率估计值, 可采用有关文献介绍的方法^[5]加以确定。

4 计算机仿真结果

为了考察多普勒搜索算法对等效转台目标模型的成像效果, 假定目标与雷达间的纵向平动分量已加以补偿, 目标运动等效为沿其上某一点参考点在雷达视线 (RLOS) 所在的平面内相对于 RLOS 以角速度 ω 的转动。

设目标散射点模型如图 2(a) 所示, 其中各散射点散射强度相同. 按本文采用的系统参数, 若 $\omega = 3.56 \times 10^{-2} \text{rad/s}$, 则对于单组跳频脉冲信号, $\Delta\theta = \omega NT_r = 1.14 \times 10^{-3} \text{rad}$, 相应的目标横向距离分辨率为 3.75m, 而对于 $M = 8$ 的多组随机跳频脉冲信号, 其值为 0.47m. 图 2(b) 给出了单组跳频脉冲信号 DSA 的成像结果, 图 2(c) 为 8 组随机跳频脉冲信号 DSA 的成像结果. 可以看出, 采用单组跳频脉冲信号所成的像自身杂波干扰较大, 横向分辨率较低, 而采用多组随机跳频脉冲信号可以给出较为理想的成像效果.

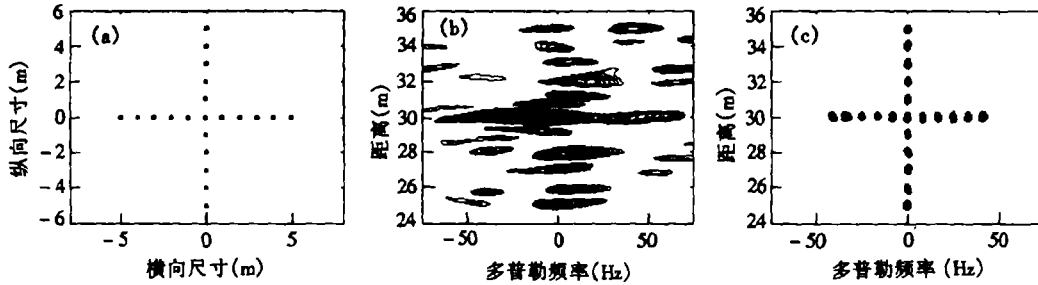


图 2 DSA 的成像效果

(a) 目标散射点模型

(b) 单组跳频脉冲信号的成像结果

(c) 多组随机跳频脉冲信号的成像结果

如前所述, 常规步进频率雷达成像处理采用了 DFT 来实现目标的横向成像. 因此, 这种处理方法的多普勒不模糊窗的宽度仅为 $1/(NT_r)$. 不大的 ω 值就有可能使目标上散射点的多普勒频差超出多普勒不模糊窗的范围而发生频率模糊, 造成图像横向混叠, 如图 3(b) 所示 (对应目标模型如图 3(a) 所示, $\omega = 0.70 \times 10^{-2} \text{rad/s}$, $M = 32$). 而采用多组随机跳频脉冲 DSA 相参合成处理, 由于这时的多普勒不模糊窗的宽度达 $1/T_r$, 因此, 一般不会发生上述图像横向混叠现象, 如图 3(c) 所示.

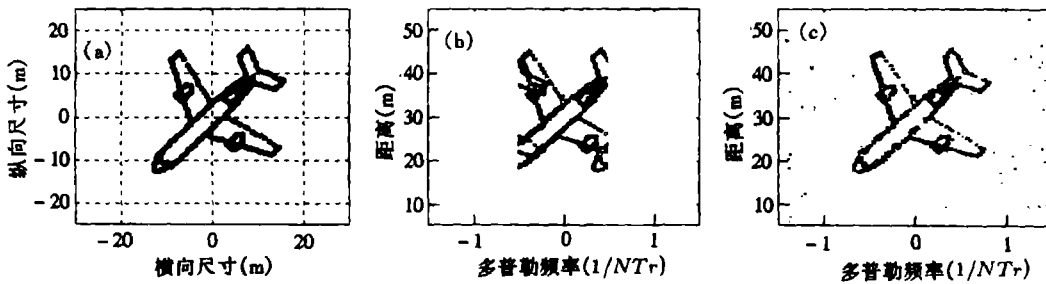


图 3 步进频率 DFT 成像与多组随机跳频脉冲 DSA 成像结果比较

(a) 目标散射点分布模型

(b) 步进频率 DFT 成像结果

(c) 多组随机跳频脉冲 DSA 成像结果

5 结束语

本文基于跳频脉冲雷达信号形式,提出了一种雷达等效转台目标距离-多普勒成像的多普勒搜索算法(DSA)。与常规步进频率雷达 DFT 成像算法相比,该算法通过多普勒补偿的方法进行目标上散射点的多普勒分析,具有多普勒不模糊范围大的特点,克服了步进频率雷达 DFT 成像算法容易出现多普勒混叠的缺点。另外,常规 DFT 成像算法对观测时间内目标的转角有所限制,而本文提出的方法是通过通过对多幅小转角下目标的距离-多普勒像进行相参积累而形成高分辨率目标像的,因此,该方法具有对大转角目标高分辨率成像的潜力,对此问题尚需作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Wehner D R. High-Resolution Radar (2nd ed.). London: Artech House, 1994, Chapt.5, Chapt.6, Chapt.7.
- [2] Ausherman D A, Kozma A, *et al.* Developments in radar imaging. IEEE Trans. on AES, 1984, AES-20(4): 363-399.
- [3] 刘峰,张守宏. 频率编码脉冲信号的模糊函数与编码优化. 系统工程与电子技术, 1999, 21(11):38-40.
- [4] Mitchell R L. Models of extended targets and their coherent radar images. Proc. IEEE, 1974, 62(6): 754-758.
- [5] 刘峰,张守宏. 跳频脉冲雷达目标的运动参数估计. 电子科学学刊, 2000,22(3). 591-596

RANGE-DOPPLER IMAGING OF TARGETS VIA A HOPPED-FREQUENCY PULSES RADAR

Liu Zheng Zhang Shouhong

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

Abstract With adoption of the hopped-frequency pulses as a radar waveform for imaging targets, a novel algorithm for range-Doppler imaging of rotating targets is proposed. Compared with the stepped-frequency radar Fourier transform (FT) imaging algorithm, the algorithm is characterized by large unambiguous Doppler window that eliminates Doppler confusion occasionally arising via the stepped-frequency radar FT imaging algorithm. Computer simulation results are given to confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words Hopped-frequency, Radar imaging, Range-Doppler image

刘峰: 男, 1964年生, 高级工程师, 中国电子学会高级会员, 研究方向为高分辨雷达信号波形设计与处理、雷达成像与目标识别等。

张守宏: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 长期从事雷达系统和雷达信号处理等领域的研究工作。