

跳频脉冲雷达目标的运动参数估计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 本文分析了目标运动对跳频脉冲雷达相参合成目标一维距离像的影响,并在此基础上提出了一种以最小波形熵为准则的最优运动参数估计方法。仿真结果表明,该方法测速精度高,抗噪性能好,可在目标距离信息未知时,实现对目标速度的精确测量。

关键词 跳频脉冲, 雷达信号, 波形熵, 参数估计

中图分类号 TN957, TN958

1 引 言

现代雷达在军事应用与民用领域中,提高其分辨力是一个重要发展方向。研究高分辨力雷达信号形式以及相应的信号处理方法,对雷达目标探测精度的提高、多目标分辨以及雷达成像与目标识别都有着重要意义。跳频脉冲(hopped-frequency pulses)雷达信号是一种大时宽带宽信号,可同时具有良好的距离和多普勒分辨性能。另外,该信号又因具有较窄的瞬时带宽,可以在窄带发射机、接收机的条件下工作,易于工程实现,是一种实用的高分辨力信号形式。

与步进频率(stepped-frequency)雷达信号^[1]相比,跳频脉冲信号消除了“距离-多普勒耦合”现象^[2]。因此,对这种雷达信号形式及其相应的信号处理方法的研究引起了国内外有关研究者的兴趣。文献[1,3]介绍了跳频脉冲雷达接收信号的相参合成处理方法并初步讨论了目标运动对处理结果的影响;文献[2]研究了跳频脉冲雷达信号的模糊函数,并以此作为工具分析了这种信号形式的距离和多普勒分辨性能。然而,由于跳频脉冲信号对目标的径向运动较为敏感,在进行脉冲相参合成处理时必须对目标运动速度加以精确补偿,否则,将无法产生目标的高分辨径向一维距离像。所以,对目标运动速度参数的精确估计成为跳频脉冲雷达应用中亟待解决的问题。针对这一问题,本文首先介绍了跳频脉冲信号及其距离和多普勒分辨性能,然后分析了目标运动对跳频脉冲雷达相参合成目标一维距离像的影响,在此基础上提出了一种以最小波形熵为准则的最优运动参数估计方法。最后对该方法的测速精度、抗噪性能,给出了计算机仿真结果。

2 跳频脉冲信号

跳频脉冲信号是一组载频以伪随机步长跳变的脉冲序列,其复包络的数学表达式可写为

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

其中

¹ 1998-11-04 收到, 1999-06-04 定稿

$$u_c(t) = \frac{1}{\sqrt{T_p}} \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right). \quad (2)$$

N 为脉冲序列长度, T_p 为子脉冲宽度, T_r 为子脉冲重复周期, F_s 为载频跳变单位步长, 一般取 $F_s = 1/T_p$; $b_n F_s$ 表示第 n 个子脉冲的载频增量, $b_n \in \{0, \dots, N-1\}$, 且当 $n \neq m$ 时 $b_n \neq b_m$, ($n, m = 0, \dots, N-1$). 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 F_s 递增, 则 $u(t)$ 即为常规步进频率信号. 若 B 为伪随机序列, 则 $u(t)$ 即为跳频脉冲信号.

跳频脉冲信号的模糊函数呈近似理想“图钉”型^[2], 如图 1 所示 (本文的仿真结果均采用如下系统参数: 载频 $f_0 = 35\text{GHz}$, $N = 64$, $F_s = 5\text{MHz}$, $T_p = 0.2\mu\text{s}$, $T_r = 20\mu\text{s}$). 因此, 该信号可同时具有良好的距离和多普勒分辨性能, 不存在“距离-多普勒耦合”现象, 其时延分辨力为 $1/(NF_s)$, 而多普勒分辨力可达 $1/(NT_r)$.

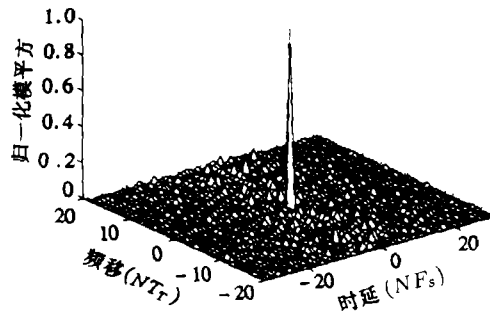


图 1 跳频脉冲信号的模糊函数

3 目标运动对合成距离像的影响

跳频脉冲雷达回波信号的相参合成处理过程与步进频率雷达的情况相类似, 可以利用离散傅里叶逆变换 (IDFT) 处理过程.

设 $S(n)$ 为系统第 n 个子脉冲零中频回波信号的采样值. 为分析简单起见, 可假设目标为单散射点模型, 其分析结论也适用于目标为多散射点模型的情况. 对于一个位于 R 处的点目标, 幅度归一化采样值为

$$S(n) = \exp(-j2\pi f_n \cdot 2R/c), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

式中 c 为光速, f_n 为雷达发射的第 n 次子脉冲载频, $f_n = f_0 + b_n \cdot F_s$, f_0 为载频初值, b_n 、 F_s 的含义同前述.

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

$$S(k) = \exp[-j2\pi(f_0 + kF_s) \cdot 2R/c], \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (4)$$

对该序列进行 IDFT 处理即可实现跳频脉冲雷达回波信号的相参合成处理。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距离像。

当目标相对于雷达存在径向运动时, 上述处理的结果即目标一维距离像将受到影响。假设目标以速度 v , 加速度 a 相对于雷达作径向运动, 则第 n 个回波脉冲的复采样信号相位为

$$\varphi_n = -2\pi f_n \frac{2}{c} \left[R - v(nT_r + \tau_r + \frac{2R}{c}) - \frac{1}{2} a(nT_r + \tau_r + \frac{2R}{c})^2 \right], \quad (5)$$

式中 τ_r 是雷达接收系统传输时延, 为固定值。

设 $a = 0$, 考察目标速度 v 对相参合成处理结果的影响。这时, 按发射频率递增的顺序重排 N 个回波脉冲的采样序列后, 相位关系可表示为

$$\begin{aligned} \varphi_k &= -4\pi \frac{f_0 + kF_s}{c} R + 4\pi \frac{f_0 + kF_s}{c} v \left(\tau_r + \frac{2R}{c} \right) + 4\pi \frac{f_0 + kF_s}{c} v q_k T_r, \\ k &= 0, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $q_k (k = 0, \dots, N-1)$ 为 $b_n (n = 0, \dots, N-1)$ 重新排序后形成的伪随机序列。

可以看出, 式中第一项是与距离有关的线性相位项, 是产生距离像所必须的; 第二项是由目标速度产生的线性相位项, 其值远小于第一项, 可以忽略。第三项是由目标速度产生的随机相位项。因此, 对于跳频脉冲信号, 目标运动速度的影响可以等效为在采样序列的相位中加入随机噪声, 其结果是造成合成距离像的峰值降低和能量发散。当目标运动速度达到 (7) 式所示的值时, 合成距离像的峰值幅度降低约 3dB^[3]。

$$|v| = \lambda / (4NT_r), \quad (7)$$

式中 λ 为波长。按本文所采用的系统参数, $|v| = 1.56\text{m/s}$ 。当 v 大到一定程度时, 目标则完全淹没在由 v 引起随机噪声中。如图 2 的仿真结果所示。

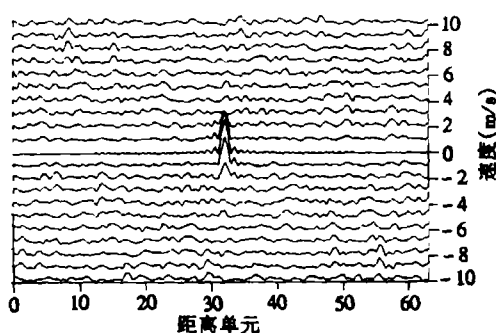


图 2 目标运动速度对合成距离像的影响

由上面的分析可知, 跳频脉冲雷达要想实现对运动目标的高分辨距离成像, 必须在相参合成处理之前, 对目标的运动速度加以补偿, 以消除目标速度对相参合成处理的影响。可通过对采样序列乘以复补偿因子 $C(n)$ 来实现速度补偿,

$$C(n) = \exp \left[-j2\pi f_n \frac{2\tilde{v}}{c} \cdot \left(nT_r + \tau_r + \frac{2R}{c} \right) \right], \quad (8)$$

式中 \hat{v} 为目标速度参数的估值。

令 $a \neq 0$ ，并假设在相参合成处理之前，已对目标的运动速度进行了精确补偿，这时，仅考察目标加速度 a 对相参合成处理结果的影响。当目标运动加速度分别为 $0(\text{m/s}^2)$ 和 $50g(g=9.81\text{m/s}^2)$ 时的合成距离像见图 3 所示。可见，在通常应用中目标加速度对合成距离像的影响是极小的，可以忽略不计。

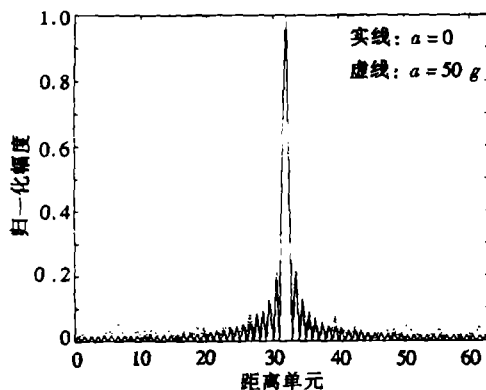


图 3 目标运动加速度对合成距离像的影响

从上面的分析可知，目标运动对跳频脉冲雷达相参合成目标一维距离像的影响主要体现在目标相对于雷达的径向运动速度参数上，因此，对目标运动速度参数的精确估计成为跳频脉冲雷达应用中必须解决的一个问题。

4 最小波形熵准则

熵作为统计学中衡量随机变量不确定性的一个概念，在这里被引申用于衡量一个信号波形的锐化度^[4]。设离散化信号波形序列记为 $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ ，令

$$\|X\| = \sum_{i=1}^N |x_i|, \quad p_i = |x_i|/\|X\|,$$

则 X 的熵定义为

$$E(X) = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log p_i. \quad (9)$$

对于幅度在一定范围内分布的波形，如处处幅度相等（类似于统计学中的概率相等），则波形熵最大；相反，若仅少数采样点处幅度较大而其余采样点处幅度较小，即波形锐化度较高，则波形熵较小。跳频脉冲雷达合成目标一维距离像的波形熵可依据 (9) 式得到。

由上节分析可知，目标径向运动速度越高（或经速度补偿后的速度补偿误差越大），合成距离像的失真越严重，表现为主瓣脉冲展宽、旁瓣电平抬高、波形趋于平坦，波形熵增大；反之，则合成距离像的失真小，波形锐化度高，波形熵小。图 4 给出了波形熵随目标运动速度的变化曲线。图 4(a) 为单散射点目标模型的情况，图 4(b) 为多散射点目标模型^[5]的情况。

由图 4 的仿真结果可知, 合成距离像的波形熵在速度轴上具有全局最小值, 且位于目标速度真值处。这样, 目标速度参数估计问题就可转化为在速度轴上基于最小波形熵准则的参数优化问题。采用一些较为简单的参数优化算法^[6], 结合实际应用中对目标速度范围的先验知识, 即可实现目标速度参数的快速最优估计。

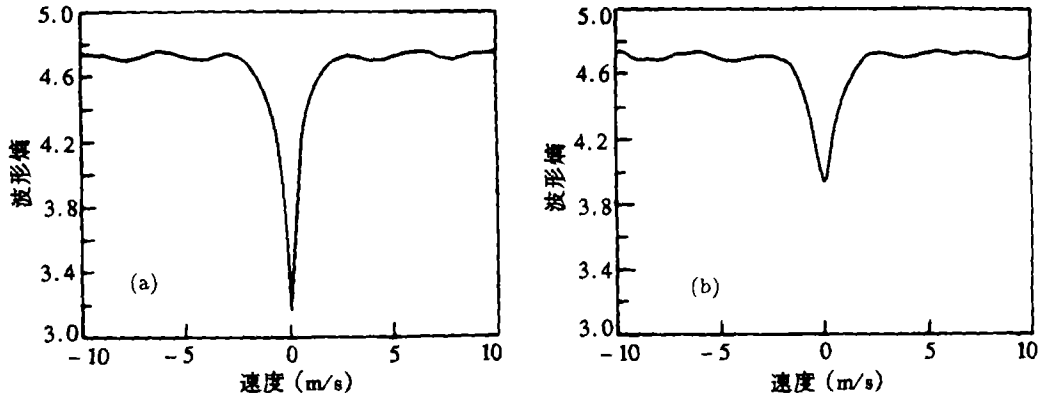


图 4 波形熵随目标运动速度的变化曲线
(a) 单散射点模型 (b) 多散射点模型

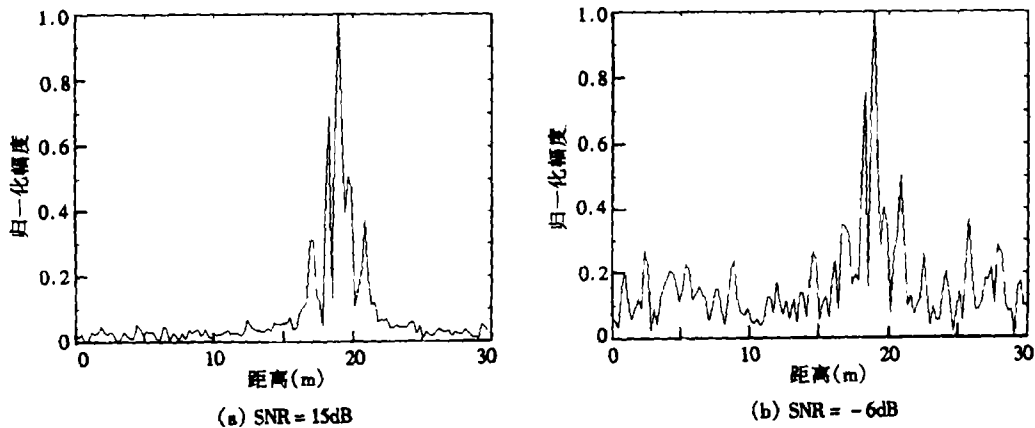


图 5 经运动补偿后目标的合成距离像

5 计算机仿真实验

为了考察文中所述方法对实际目标的测速精度以及噪声对测速精度的影响, 实验中设目标为多散射点模型, 并设目标中心位于 2985m 处, 径向速度真值 $v=250\text{m/s}$ 。对目标回波复采样数据加入不同信噪比的复高斯白噪声, 取 (8) 式中的速度补偿值在 $[200\text{m/s}, 300\text{m/s}]$ 的范围内变化, 速度量化间隔 $dv=0.1\text{m/s}$ 。表 1 给出了不同信噪比下的目标速度估值误差。图 5 分别给出了信噪比 $\text{SNR}=15\text{dB}$ 和 $\text{SNR}=-6\text{dB}$ 时, 经速度估值、运动补偿后目标的合成距离像。可以看出, 文中所述方法的测速精度高并且具有较好的抗噪性能。

表 1 不同信噪比下的目标速度估值误差

SNR(dB)	15	12	9	6	3	0	-3	-6	-9
均值 (m/s)	250.00	250.02	250.01	249.97	249.98	250.06	250.08	250.02	249.60
均方差 (m/s)	0.0649	0.0696	0.1071	0.1309	0.1785	0.2037	0.2837	0.2966	3.6041

注: 表中数据为同一信噪比下 20 次测量的统计值

6 结 束 语

本文针对跳频脉冲雷达在运动目标环境下的应用问题, 分析了目标运动对跳频脉冲雷达相参合成目标一维距离像的影响, 并在此基础上研究了一种以最小波形熵为准则的最优速度参数估计方法. 计算机仿真结果表明, 该方法测速精度高、抗噪性能好, 可在目标距离信息未知时, 实现对目标速度的精确测量.

参 考 文 献

- [1] Wehner D R. High-Resolution Radar (2nd ed). London: Artech House, 1995, Ch.5.
- [2] 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): 38-41.
- [3] Vasquez R, Flores B C. Fourier transform receiver processing of hopped frequency sequences for synthetic range profile generation. Proc. SPIE, 1996, Vol.2845: 14-25.
- [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] Mitchell R L. Models of extended targets and their coherent radar images. Proc. IEEE, 1974, 62(6): 754-758.
- [6] 陈开周. 最优化计算方法. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985, 第十章.

ESTIMATION OF TARGET MOTION PARAMETER FOR HOPPED-FREQUENCY PULSE RADAR

Liu Zheng Zhang Shouhong

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

Abstract The effect of target motion on a synthetic range profile produced by a hopped-frequency radar is analyzed, and then a method for optimal estimation of motion parameter of targets is presented based on the least waveform entropy rule. Simulation results indicate that the method can accomplish accurate estimation of motion parameter of targets with a good anti-noise performance.

Key words Hopped-frequency, Radar signal, Waveform entropy, Parameter estimation

刘 峰: 男, 1964 年生, 高级工程师, 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.