

波形熵法在毫米波 Costas 跳频雷达运动补偿中的应用

刘 静 李兴国 吴 文

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

摘要 Costas 跳频信号是一种距离高分辨率的雷达信号, 运动补偿是其实现距离高分辨率的核心技术. 本文采用波形熵法对这种信号的运动补偿进行了研究, 并对波形熵的定义进行了优化. 仿真结果表明该方法可行, 且对正交解调误差不敏感, 有一定的抗噪性.

关键词 Costas、运动补偿、波形熵、正交解调.

APPLICATION OF WAVEFORM ENTROPY METHOD FOR MOTION COMPENSATION OF MMW COSTAS FREQUENCY HOPPED RADAR

LIU Jing LI Xing-Guo WU Wen

(Institute of Millimeter Wave and Optical Wave Near Sensing Technology, Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A Costas frequency hopped signal is a high range resolution radar signal, motion compensation is the key technology to realize high range resolution. A waveform entropy method for motion compensation of Costas frequency hopped signal is studied in this paper, and optimization is made in the definition of waveform entropy. Simulation results show that this method is feasible, insensitive to the quadrature demodulation error, and anti-noise to some extent.

Key words Costas, motion compensation, waveform entropy, quadrature demodulation.

引言

在众多的跳频编码信号中, Costas 跳频码被证明是最优的频率编码, 人们对 Costas 跳频编码信号做了大量研究^[1-3]. 与频率步进信号相比, 它具有近乎理想的“图钉形”模糊函数, 且距离旁瓣电平被控制在较低的电平; 成像时的整序处理使得距离——多普勒耦合被破坏^[4], 合成距离像不产生移位, 但目标运动产生的多普勒失配会引起能量发散. 为了使聚焦理想, 必须进行运动补偿.

最小波形熵法将衡量随机变量不确定性的熵引伸用于衡量一个信号的能量沿其参数轴的发散程度并定义一个波形熵, 并将其作为指示函数来衡量目标运动参数对目标距离像的影响. 当目标运动引起一维距离像峰值发散时, 波形熵变大; 而当速度补偿误差为零时, 波形熵具有最小值. 因此在速度轴上搜索波形熵的全局最小值对应的运动参数值即是目

标的运动参数^[5]. 本文将波形熵法用于 Costas 跳频雷达的运动补偿中, 并在噪声存在时, 对波形熵的定义进行了优化. 仿真结果表明该方法有一定的抗噪性, 且对正交解调误差不敏感.

1 Costas 跳频雷达的多普勒性能分析

1.1 成像原理

Costas 跳频雷达交射信号的数学表达式为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u(t - iT_r) \exp(j2\pi f_i t), \quad (1)$$

式(1)中, $u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right)$, $f_i = f_0 + (c_i - 1)$

$\cdot \Delta f$, c_i 为 Costas 序列, f_0 为被始载频, Δf 为跳频步长, N 为脉冲个数, T 为脉冲宽度, T_r 为脉冲重复周期.

对于距离为 R 的静止目标, 经过 I, Q 正交双通道的混频、滤波及归一化综合处理, 可得目标回波信

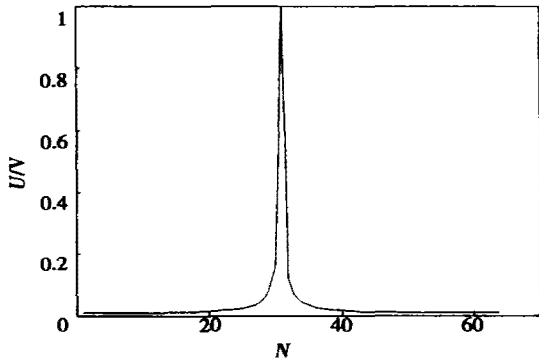


图1 一维距离像($v=0\text{m/s}$)
Fig. 1 1-D range profile($v=0\text{m/s}$)

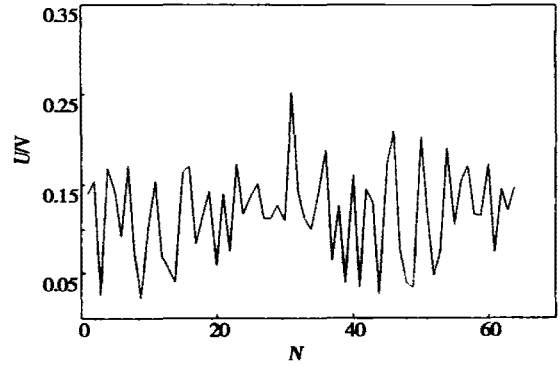


图3 一维距离像($v=2.5\text{m/s}$)
Fig. 3 1-D range profile($v=2.5\text{m/s}$)

号的复包络输出

$$G_i = e^{-j2\pi f_i(2R/c)}, \quad (2)$$

由式(2)可见,对于发射的每一步进脉冲串,正交混频器输出信号的复包络采样值 G_i 是目标的频域响应数据,利用逆傅立叶变换即可获得相应的时域目标一维距离像.但由于其经过 Costas 编码调制,顺序被打乱,进行 IDFT 之前应将 G_i 按频率步进方式整序为 G'_i ,整序后的相位为

$$\psi'_i = -2\pi[f_0 + (i-1)\Delta f] \{2R/c - 2v[(c'_i - 1)T_r + T/2 + 2R/c]/c\}. \quad (3)$$

式(3)中 c'_i 是与 c_i 由同一个 Costas 阵列变换而来的 Costas 序列.

根据有限域的知识^[7],采用 Welch 法、Lempel 法、Golomb 法及各种增长法、截短法,可构造多种 Costas 序列^[8,9],本文采用 Lempel 截短法(L3)构造出序列

$\{c_i\} = \{28, 45, 15, 23, 36, 16, 21, 11, 62, 54, 8, 14, 41, 12, 3, 6, 25, 43, 55, 49, 7, 48, 4, 39, 17, 31, 33, 1, 53, 50, 26, 64, 27, 52, 56, 5, 38, 37, 24, 47, 13, 58, 18, 61, 2, 57, 40, 22, 20, 30, 60, 34, 29, 10, 19, 35, 46,$

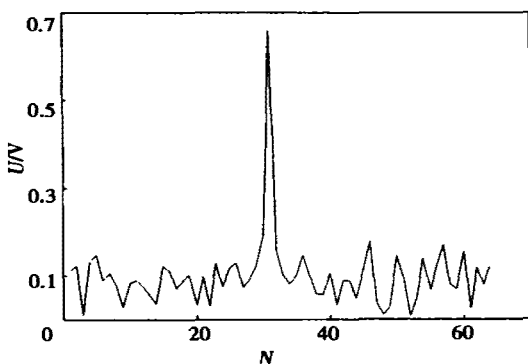


图2 一维距离像($v=1.5\text{m/s}$)
Fig. 2 1-D range profile($v=1.5\text{m/s}$)

42, 63, 51, 44, 9, 59, 32}

其相应的 $\{c'_i\}$ 为 $\{c'_i\} = \{c_i\}$.

1.2 目标运动对一维距离像的影响

当目标运动时,忽略加速度的影响^[6],目标回波信号的复包络相位为

$$\psi_i = -2\pi f_i \frac{2}{c}(R - vt), \quad (4)$$

为保证获得最大的基带响应信号幅度,取采样时刻在回波信号波形中心处

$$t = iT_r + T/2 + 2R/c, \quad (5)$$

将式(4)代入式(3)并去掉与速度无关的项可得

$$\begin{aligned} \psi_i = & -4\pi f_0 [R/c - v(T/2 + 2R/c)/c] \\ & -4\pi(i-1)\Delta f R/c + 4\pi(i-1)\Delta f v \\ & \cdot (T/2 + 2R/c)/c + 4\pi[f_0 + (i-1)\Delta f] \\ & \cdot (c'_i - 1)vT/c. \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中第一项为常数项,对合成距离像不影响;第二项是脉冲间正常的相位关系,是成像所必需的;第三项的影响可忽略;最后一项在不同发射子脉冲之间没有固定的相位关系,因而不存在距离——多普

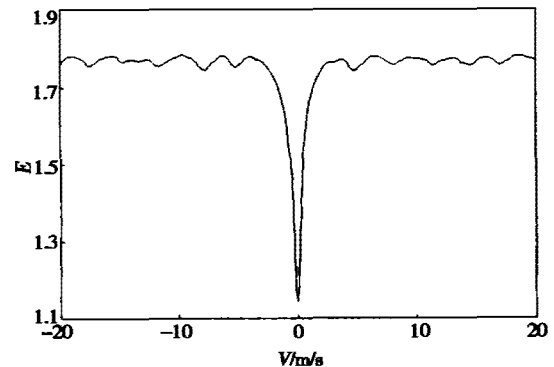


图4 波形熵与速度补偿误差的关系曲线
Fig. 4 Relationship between waveform entropy and velocity compensation error

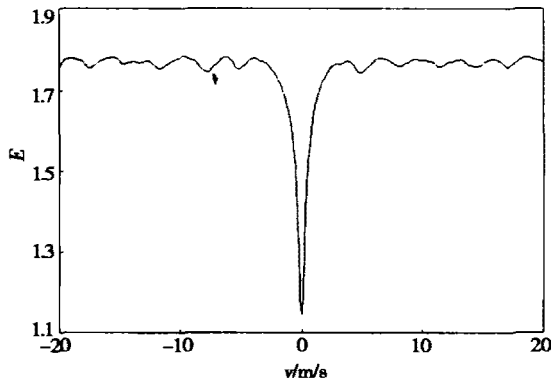


图 5 波形熵与速度补偿误差的关系曲线($S/N = 40\text{dB}$)

Fig. 5 Relationship between waveform entropy and velocity compensation error($S/N = 40\text{dB}$)

勒耦合^[4]. 可见, Costas 跳频信号的整序处理消除了距离——多普勒耦合现象, 合成距离像不会产生移位, 但由于多普勒失配使得峰值发散和衰减; 对于固定的雷达参数, 当速度超过某一门限时^[10], 目标的峰值衰减到噪声电平, 无法成像, 此时必须进行运动补偿.

为简便起见, 仿真采用单散射点模型. 令 $N = 64$, $f_0 = 35\text{GHz}$, $\Delta f = 10\text{MHz}$, $T_r = 20\mu\text{s}$, $T = 100\text{ns}$, $R = 1567\text{m}$ (若无特别说明, 下文均沿用上述数据). 图 1 和图 2 分别给出目标静止和速度为 1.5m/s 时的一维距离像. 其中, 纵轴 U 表示回波信号压缩后输出的归一化电压, 横轴 N 表示 IFFT 变换的点数 (对应目标的距离, 且相邻两点间距为距离分辨率).

显然, 图 2 与图 1 相比, 一维距离像峰值位置相同, 只发生衰减、能量发散, 这与上面的讨论完全相符. 更进一步当速度达到 2.5m/s 时, 峰值响应几乎

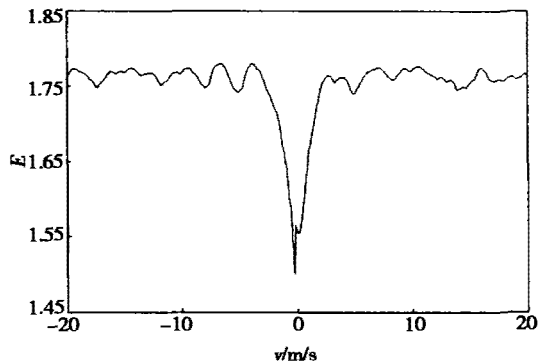


图 6 波形熵与速度补偿误差的关系曲线($S/N = 10\text{dB}$)

Fig. 6 Relationship between waveform entropy and velocity compensation error($S/N = 10\text{dB}$)

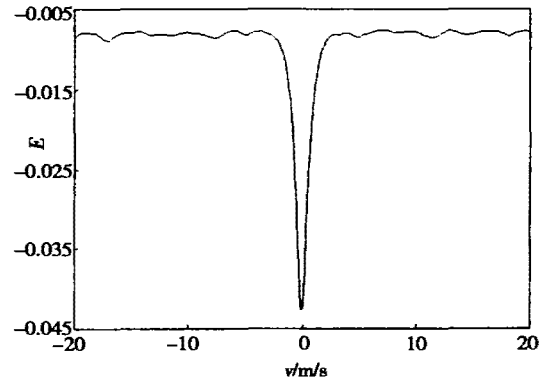


图 7 波形熵与速度补偿误差的关系曲线($S/N = 10\text{dB}$)

Fig. 7 Relationship between waveform entropy and velocity compensation error($S/N = 10\text{dB}$)

衰减到噪声电平, 如图 3 所示. 此时要满足后续信号处理的要求, 必须进行运动补偿.

2 Costas 跳频雷达运动补偿的最小波形熵法

熵是统计学中衡量随机变量不确定性的量度, 此处被用来衡量信号波形的能量沿其参数轴的分散程度, 即波形熵. 设离散信号序列为 $\vec{X} = \{x_1, \dots, x_N\}$, 令 $\|\vec{X}\| = \sum_{i=1}^N |x_i|$, $p_i = |x_i| / \|\vec{X}\|$, 则 \vec{X} 的波形熵定义为

$$E(\vec{X}) = - \sum_{i=1}^N p_i \lg p_i, \quad (7)$$

显然, 对于一个波形, 若其能量沿参数轴均匀分布, 则波形熵越大; 反之越小.

由上节分析可知, 目标速度越大, 多普勒失配越

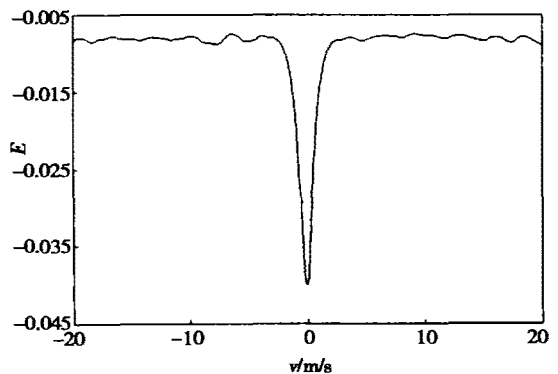


图 8 波形熵与速度补偿误差的关系曲线($S/N = 10\text{dB}$)

Fig. 8 Relationship between waveform entropy and velocity compensation error($S/N = 10\text{dB}$)

严重,表现为合成距离像峰值衰减、能量沿距离轴发散,若用波形熵来度量峰值衰减和发散的程度,则波形熵将增大;反之,当目标速度补偿误差为零时,波形熵达到最小. Costas 跳频雷达的动目标一维距离像按式(7)定义波形熵,图 4 给出了无噪声时,波形熵与速度补偿误差的关系曲线. 其中,纵轴 E 表示波形熵,横轴 v 表示速度补偿误差.

由图 4 仿真结果可知, Costas 跳频雷达一维距离像的波形熵在速度轴上有全局最小值,且位于目标运动真实径向速度处,结合实际中目标速度范围的先验知识,用一些较为简单的一维优化算法即可实现目标速度的估计.

3 噪声情况下波形熵法的优化

以上仿真结果均是在无噪声理想情况下得到的. 图 5 和图 6 分别是 Costas 编码信号在信噪比为 40dB 和 10dB 时,波形熵与速度补偿误差的关系曲线.

比较图 5 和图 6 可看出,随着信噪比的降低,熵曲线的凸性变差,并且开始出现伪峰,这将导致搜索算法性能下降,最终收敛到局部最小值;即使采用复杂的优化算法收敛于全局最小值,最终也会因为全局最小值已偏离目标真实运动参数值而导致测速误差. 针对这一问题,现重新定义波形熵如下

$$E(\vec{X}) = \sum_{i=1}^N p_i \lg(1 - p_i). \quad (8)$$

由式(8)可得到如图 7 所示的波形熵与速度补偿误差的关系曲线. 与图 6 相比,在相同信噪比条件下,图 7 波形熵曲线的梯度更陡峭,没有伪峰,且全局最小值准确的对应于目标的真实速度. 仿真中还发现该法对 IQ 通道失配不敏感,图 8 是增益误差为 0.95,相位误差为 6.7° 时,波形熵与速度补偿误差的关系曲线. 综合图 7 和图 8 可知,通过对波形熵定义的优化,保证了波形熵曲线在低信噪比时的凸性,

提高了在噪声中目标的测速精度.

4 结语

本文对波形熵法在 Costas 跳频雷达运动补偿中的应用进行了研究,且在噪声存在时,对波形熵的定义进行了优化,对噪声和正交解调误差的问题都得到了较为满意的仿真结果.

REFERENCES

- [1] Peyton Z Peebles. *Radar Principles*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998, 318—327
- [2] John P Costas. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-Doppler ambiguity properties. *Proceedings of the IEEE*, 1984, 72(8): 996—1009
- [3] David M Drumheller. Cross-correlation properties of algebraically constructed Costas arrays. *IEEE Trans. on AES*, 27(1): 2—10
- [4] MU Shan-Xiang. Doppler performance analysis of inter-pulse Costas FH radar signal. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (牟善祥. 脉间 Costas FH 雷达信号的多普勒性能分析. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(4): 313—317
- [5] LIU Zheng. Estimation of target motion parameter for hopped-frequency pulse radar. *Journal of Electronics* (刘峥. 跳频脉冲雷达目标的运动参数估计. *电子科学学刊*), 2000, 22(4): 591—596
- [6] LIU Zheng. Estimation of target motion parameter in a stepped-frequency pulses radar. *Acta electronica sinica* (刘峥. 步进频率雷达目标的运动参数估计. *电子学报*), 2000, 28(3): 12, 43—45
- [7] Nathan Jacobson. *Basic Algebra I*. San Francisco: W H Freeman & company, 1987, 28—197
- [8] Golomb. Constructions and properties of Costas arrays. *Proceedings of the IEEE*, 1984, 72(9): 1143—1163
- [9] Solomon W Golomb. Algebraic constructions for Costas arrays. *Journal of combinatorial theory*, 1984, 37(1): 13—21
- [10] Wehner D R. *High Resolution Radar*. London: Artech House Inc, 1997, 144—156