

基于多普勒通道对齐的多帧步进频信号速度补偿方法

原浩娟 高梅国 牟建超
(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

摘要: 该文分析了利用多帧步进频信号联合处理实现运动目标距离-速度 2 维高分辨检测的信号处理方法, 并针对目标运动引起处理结果波形发散的问题, 提出了基于多普勒通道对齐的速度补偿方法。该方法利用不同步进频点测速结果之间的关系, 通过对各频点的多普勒频域数据进行重组以及相位补偿, 实现对运动目标的速度补偿。该算法可以在不需要任何目标速度先验信息的情况下, 同时实现多个运动目标的速度补偿。理论分析及仿真表明, 这一信号处理方法能够有效地补偿目标运动的影响, 得到运动目标的距离-速度 2 维高分辨像, 并且算法简单, 运算量低, 易于实现。

关键词: 信号处理; 步进频; 多帧; 多普勒通道对齐; 相位补偿

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1659-05

Multi-frame Stepped-Frequency Signal Processing Based on Doppler Bin Alignment

Yuan Hao-juan Gao Mei-guo Mu Jian-chao

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper presents a multi-frame stepped-frequency signal processing method to detect moving targets, and a Doppler bin alignment method is proposed to compensate the image aliasing caused by moving targets. This method makes use of the relationship of Doppler bins among different sub-frequencies and can realize the velocity compensation of moving targets via the rearrangement of Doppler bins and phase compensation. This algorithm can simultaneously compensate the effects of linear range migration for all moving targets without knowing their unknown velocity. Analysis and simulation results show that this processing can image the range and velocity of moving targets simultaneously with stepped-frequency signals and can be applied easily because of its computational efficiency.

Key words: Signal processing; Stepped-frequency; Multi-frame; Doppler bin alignment; Phase compensation

1 引言

步进频信号具有瞬时带宽低、A/D 采样率低、易于实现等优点^[1], 近年来得到了广泛的应用。如何利用步进频信号进行运动目标检测, 一直是步进频研究中的重点和难点, 目前较受关注的方法包括利用其它手段测速^[2], 改变发射信号波形使其具有类似于图钉形模糊函数^[1], 通过特殊的参数设计减小耦合时移的影响^[3]等。文献[4]提出的相位对消合成运动目标距离像方法, 通过发射两组具有不同重频的信号, 对消目标速度生成的相位因子, 实现运动补偿, 但由于采用非线性的方式对回波进行合成, 噪声的影响需进一步讨论。文献[5]介绍了利用高重频步进频信号进行无模糊测速及解距离模糊的信号处理及参数设计方法, 但由于采用波形分析法测距, 测距精

度较差且受信噪比的影响较大。文献[6]提出了利用多帧步进频信号的一维距离像相关测速的方法, 但对信噪比要求较高, 不利于微弱目标的检测。

米波雷达由于具有良好的植被穿透特性和反隐身性能, 近年来重新受到关注。利用米波的穿透特性探测丛林中的目标, 是米波雷达的一个重要发展方向。丛林内的运动目标通常具有如下特性: (1) 由于丛林环境复杂, 目标运动速度相对较小; (2) 由于丛林植被对雷达信号的衰减作用, 雷达的作用距离相对较小。同时, 米波雷达也存在许多局限, 比如实现相同的速度分辨率需要比微波雷达更长的相参积累时间, 无法实现几百 MHz 的带宽等。

基于米波的上述特性, 本文提出了多帧步进频信号联合处理方法, 用于实现丛林运动目标的距离-速度 2 维高分辨检测。并针对运动目标长时间相参积累引起的峰值损失, 波形发散等问题, 提出了基于多普勒通道对齐的速度补偿方法, 不需要估计运

动目标的速度，就可以实现多帧步进频回波的相参积累，得到运动目标的距离-速度 2 维高分辨像。

2 多帧步进频信号联合处理原理

假设步进频信号的步进点数为 N ，联合处理帧数为 M ，将 M 帧步进频信号称为一个测速帧，则一个测速帧的步进频发射信号时域表达式为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - (mN + n)T_r}{\tau}\right) \exp(j2\pi f_n t) \quad (1)$$

其中 T_r 为步进频信号的子脉冲间隔， τ 为子脉冲宽度， $f_n = f_0 + n\Delta f$ ，表示子脉冲频率， f_0 为载频起始频率， Δf 为频率步进量。

假设目标在一个测速帧中保持匀速运动，则距离为 R_0 处速度为 v 的点目标，在第 m 个步进帧的第 n 个子脉冲间隔中的距离可近似表示为 $R(m, n) = R_0 - v(mN + n)T_r$ ，对应的回波时延 $\tau(m, n) = 2R \cdot (m, n) / c$ ，则经过与本振混频之后的目标回波可表示为

$$x'(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - (mN + n)T_r - \tau(m, n)}{\tau}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_n \tau(m, n)) \quad (2)$$

对目标回波信号采样，并归一化，可得

$$x(m, n) = \exp(j2\pi f_n [-2R_0 + 2v(mN + n)T_r] / c) \quad (3)$$

对一个测速帧中步进频信号的同频点数据分别做 M 点 FFT，可得

$$X(k, n) = \exp(j\varphi(n)) \cdot \exp(j\pi(M-1)[2f_n vNT_r / c - k / M]) \cdot \frac{\sin(2\pi f_n vMNT_r / c - \pi k)}{\sin(2\pi f_n vNT_r / c - \pi k / M)} \quad (4)$$

其中 $k = 0, 1, \dots, M-1$ ，每一个 k 值对应一个多普勒通道；相位项

$$\varphi(n) = -4\pi f_n (R_0 - vnT_r) / c \quad (5)$$

仅与 n 有关，它决定了步进频信号的距离维成像效果。用 k_n 表示对第 n 个步进频点数据做 FFT 后的多普勒通道序号 k ，由式(4)可知，速度为 v 的目标，在第 n 个频点上的峰值位置为

$$k_n = 2f_n vMNT_r / c \quad (6)$$

由式(6)可知，同一速度的目标在不同频点的峰值位置是不一致的，亦即

$$f_d(n) = 2vf_n / c \quad (7)$$

很明显，目标速度越大， k_n 之间的差别就越大。若不补偿，由于目标峰值分散在多个多普勒通道上，无法积累全部的回波能量，必然会导致积累后的结果波形发散。本文提出的多普勒通道对齐方法，通过分析不同频点测速结果之间的内在联系，对 FFT 之后得到的数据矩阵进行校正，可以解决这一问题，

实现运动补偿。图 1 为多帧步进频信号联合处理框图。

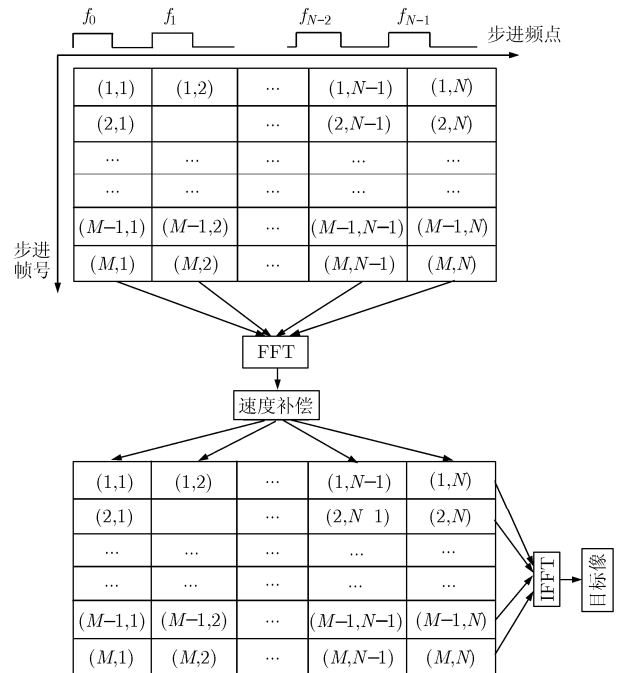


图 1 信号处理框图

3 多普勒通道对齐方法

3.1 算法概述

由前面的分析发现，同一目标速度在各个步进频点所在多普勒通道之间的关系如式(6)所示。以频点 f_0 的多普勒通道号 k_0 为基准，可得

$$k_n = k_0 f_n / f_0 \quad (8)$$

通过 k_0 可以计算出 k_n 的值。因此，在同频点 FFT 之后，可以根据式(8)对测速结果进行校正。假设目标在频点 f_0 上可能的多普勒通道范围为 $(-k_{\max}, k_{\max})$ ，那么通道对齐的过程可表示为

$$Y(k_0, n) = X(k_n, n) = X(k_0 f_n / f_0, n) \quad (9)$$

其中 $k_0 = -k_{\max}, \dots, k_{\max} - 1, k_{\max}$ ， Y 表示经过多普勒通道对齐处理后的数据矩阵。

需要注意的是，上述处理是在保证所有频点的测速结果均不出现模糊的前提下进行的，如果目标速度出现模糊，需要预先用模糊倍数进行补偿，具体方法这里不再赘述。

图 2 给出了不同 k_n 值在多普勒维的分布情况，每一条折线代表同一目标速度在 N 个步进频点上所在的多普勒通道。多普勒通道对齐的处理方法，相当于将较高频点的处理结果压缩为原来的 f_0 / f_n 倍，将图中所示的每条折线“拉直”，使不同频点的测速结果落在同一多普勒通道上。

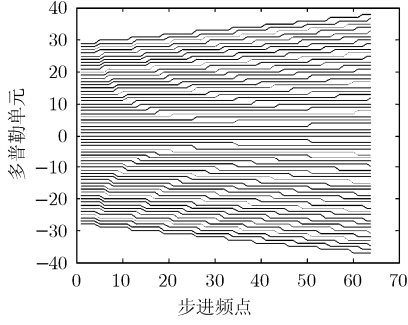


图2 不同目标速度在各个频点上所在多普勒通道分布图

在多普勒通道对齐的过程中, 由于 FFT 可以看成一组 sinc 形状的窄带滤波器组^[7], 如果目标速度恰好落在某个滤波器的中心, 该滤波器的输出相位为零; 如果目标速度位于两个滤波器之间, 就会引入一个相位, 如式(4)中的第 2 项所示, 相位大小可表示为

$$\varphi_{k,n} = \pi(M-1)[2f_n v N T_r / c - k_n / M] \quad (10)$$

在做了多普勒通道对齐之后, 这一相位项会在各个频点之间引入一个额外的相位误差, 破坏了步进频点之间的相位关系, 相位误差如式(11)所示:

$$\varphi_{k,n} - \varphi_{k,0} = \pi(M-1)[2n\Delta f v N T_r / c - (k_n - k_0) / M] \quad (11)$$

需要进行补偿, 补偿相位:

$$\varphi_{\text{com}}(n) = -\pi(M-1)[2n\Delta f v N T_r / c - (k_n - k_0) / M] \quad (12)$$

由于式(12)中的补偿相位与目标速度直接相关, 而实际中目标速度是未知的, 无法直接应用。由式(6)可知 $k_n = 2v f_n M N T_r / c$, 由于 k_n 通常为整数, 更为精确的表达式应为 $k_n = \text{round}[2v f_n M N T_r / c]$, 其中 $\text{round}[\cdot]$ 表示四舍五入。近似可得:

$$2v N T_r / c \approx k_n / M f_n \quad (13)$$

式(12)就可以近似表示为

$$\hat{\varphi}_{\text{com}}(n) = -\pi(M-1)[n\Delta f k_n / f_n - (k_n - k_0)] / M \quad (14)$$

此时的补偿误差为

$$\varphi_{\text{err}}(n) = \varphi_{\text{com}}(n) - \hat{\varphi}_{\text{com}}(n) = -\pi \frac{(M-1)}{M} \frac{n\Delta f}{f_n} \Delta_1 \quad (15)$$

其中 $\Delta_1 = 2v f_n M N T_r / c - \text{round}[2v f_n M N T_r / c]$, 是由于多普勒通道量化产生的误差, 分布范围为 $[-0.5, 0.5]$ 。此外, 目标速度会在步进帧内引入一个相位项, 大小为

$$\varphi_v(n) = 4\pi f_n v n T_r / c \quad (16)$$

也需要进行补偿^[1], 结合式(13)和式(16), 可得补偿相位的大小为^[8]

$$\hat{\varphi}_{\text{vcom}}(n) = -2\pi n k_n / M N \quad (17)$$

综上所述, 多普勒通道对齐的具体实现方法描述如下:

(1) 根据探测目标的最大速度 v_{max} 计算 k_0 的最大值 k_{max} , 并确定 k_0 的取值范围 $[-k_{\text{max}}, k_{\text{max}}]$ 。

(2) 对 $[-k_{\text{max}}, k_{\text{max}}]$ 范围内的每一个 k_0 值, 根据式(8)分别计算 k_n 的值, 并通过式(9)所示的变换, 实现不同频点测速结果的对齐, 亦即所谓的“拉直”处理。

(3) 对第(2)步的处理结果做如式(14)和式(17)所示的相位补偿, 就可以实现运动目标的补偿。

由于整个速度补偿过程, 并不依赖于目标的具体速度, 而是对所有可能出现目标的多普勒通道进行了遍历处理, 因此该方法不需要任何目标速度先验信息, 就可以同时实现多运动目标的速度补偿。

3.2 问题分析及改进

由式(15)可知, 在多普勒通道对齐的过程中, 仍然存在一定的补偿误差, 这会抬高其后的 IFFT 处理结果的距离旁瓣。通过对同频点数据补零内插, 可以使 FFT 之后的谱线细化^[7], 提高多普勒补偿精度。对同频点数据补零并做 lM 点 FFT, 采用与上节类似的推导可得:

$$k'_n = 2f_n v l M N T_r / c \quad (18)$$

其中 $k'_n = 0, 1, \dots, lM - 1$, l 为大于 1 的整数。此时多普勒通道对齐引入的相位误差:

$$\varphi'_{k,n} = \pi(M-1)[2f_n v N T_r / c - k'_n / lM] \quad (19)$$

采用的补偿相位如式(20)所示:

$$\hat{\varphi}'_{\text{com}}(n) = -\pi(M-1)[n\Delta f k'_n / f_n - (k'_n - k'_0)] / lM \quad (20)$$

对应的补偿误差:

$$\varphi'_{\text{err}}(n) = -\pi \frac{(M-1)}{lM} \frac{n\Delta f}{f_n} \Delta_2 \quad (21)$$

其中 Δ_2 亦为通道量化误差。比较式(15)和式(21)可以看出, 对数据做 l 倍补零内插之后, 多普勒通道对齐方法的相位补偿误差减小为原来的 $1/l$, 因此通过调整 l 的值, 就可以有效地改善补偿性能。

内插的另一个优点是减小了 FFT 处理过程中频谱泄漏造成的幅度损失。内插的缺点是提高了系统的运算量和存储量, 实际应用中, 可以将内插倍数(运算量/存储量)与补偿效果进行折衷。

4 仿真结果

本节将通过仿真验证多普勒通道对齐方法的性能。仿真参数如下: $f_0 = 200$ MHz, $\Delta f = 1$ MHz, $\tau = 1$ μ s, $N = 64$, $M = 512$, PRF = 20 kHz, $R_0 = 1000$ m, $v = 80$ m/s。

图 3 为未作速度补偿时目标所在的多普勒通道分布情况以及 IFFT 之后的成像结果。可以看出,

未作速度补偿时,不同频点上的目标落在了不同的多普勒通道上,这会导致处理结果能量发散,如图(b)所示。图4为多普勒通道对齐之后目标所在多普勒通道的分布情况以及成像结果。由图4(a)可以看出,经过通道对齐之后,不同频点的测速结果基本落在了同一多普勒通道上,其中的断点是目标速度落在两个多普勒通道之间产生的频谱泄漏造成的。图4(b)为多普勒通道对齐之后的成像结果,与图3相比,峰值降低和波形发散的现象得到了很好的改善,但是存在较高的距离旁瓣。图5为8倍内插后多普勒通道对齐得到的目标所在多普勒通道分布情况以及成像结果。可以看出,内插很好地改善了多普勒通道对齐的性能,解决了频谱泄漏的问题;同时由于内插减小了相位补偿误差,有效降低了多

普勒通道对齐方法中的距离旁瓣,改善了相参累积性能。图6比较了多普勒通道对齐以及内插后多普勒通道对齐对目标一维距离像的改善情况。图7为内插倍数与一维距离像旁瓣性能的关系,采用Hamming窗抑制旁瓣,并用峰值旁瓣比(PSLR)衡量一维距离像的旁瓣性能,可以看出内插可以有效的改善补偿性能,但当内插倍数增大到一定程度($l \geq 8$)时,继续增大内插倍数对算法性能的改善不大,反而会增加系统运算量。图8是对实测数据的成像结果,检测对象为多个地面运动目标。可以看出经过多帧步进频信号联合处理及多普勒通道对齐的速度补偿之后,可以清晰的将多目标在速度和距离上分辨开来。

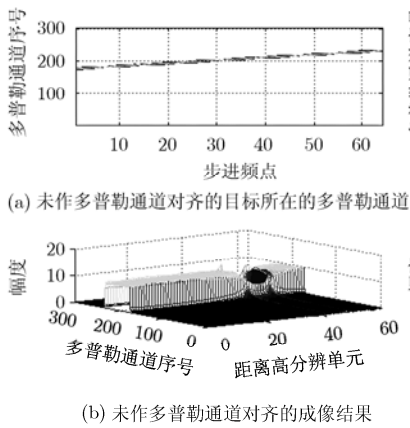


图3 未作速度补偿的处理结果

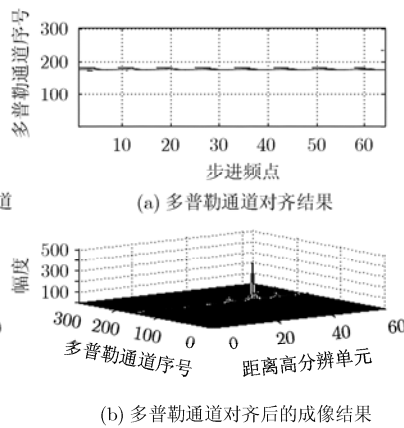


图4 多普勒通道对齐的处理结果

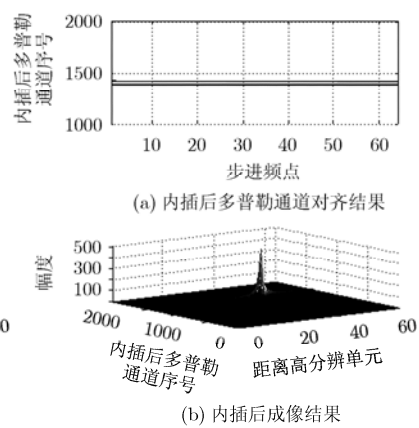


图5 内插后多普勒通道对齐处理结果

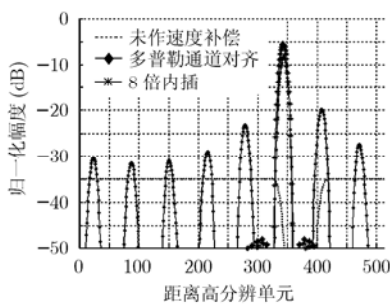


图6 多普勒通道对齐法补偿效果比较

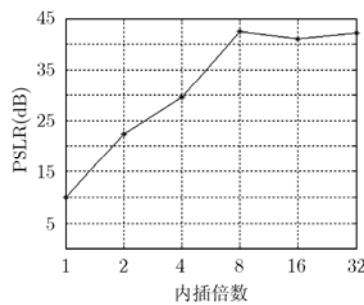


图7 距离维峰值旁瓣比与内插倍数的关系

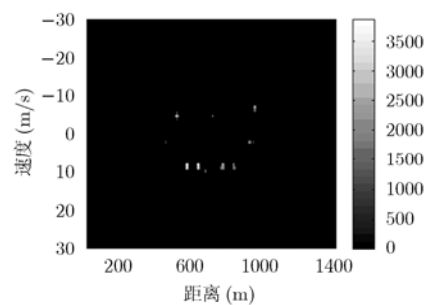


图8 多个地面运动目标实测数据成像

5 结论

本文针对米波性质及丛林中目标的运动特性,提出了多帧步进频信号联合处理的方法,实现运动目标的长时间相参积累以及距离-速度2维高分辨检测。针对多帧步进频信号长时间相参积累过程中目标运动引起的波形发散问题,提出了多普勒通道对齐的速度补偿方法,通过对同频点FFT之后的数据进行重组并做相位补偿,实现目标的运动补偿。分

析及仿真表明,在不出现速度模糊的前提下,该方法不需要任何目标个数及目标速度的先验信息,就可以实现对运动目标的补偿,实现多帧步进频信号的相参积累。该算法的另一个优点是运算量低,易于实现,为低速目标的长时间积累检测提供了一种有效的途径。

参考文献

[1] Wehner D R. High-Resolution Radar[M]. Second Edition.

- Boston: Artech House, 1995: 197-225.
- [2] Ma Yu-bin. Velocity compensation in stepped frequency radar[D]. [Master's dissertation], Naval Postgraduate School, 1995.
- [3] Myers H, Moore R, and Butler W, *et al.* Common aperture multiband radar (CAMBR)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2845: 1-13.
- [4] 陈行勇, 刘永祥, 黎湘, 等. 步进频率信号相位对消合成运动目标距离像[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 815-818.
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, and Li Xiang, *et al.* Phase cancellation for synthesizing range profiles of a moving target via stepped frequency signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 815-818.
- [5] 任丽香, 龙腾, 远海鹏. HPRF 脉冲多普勒频率步进雷达信号处理与参数设计[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1630-1636.
Ren Li-xiang, Long Teng, and Yuan Hai-peng. Signal processing and parameter design of HPRF pulsed-Doppler stepped-frequency radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(9): 1630-1636.
- [6] 包云霞, 毛二可, 何佩琨. 基于一维高分辨距离像的相关测速补偿算法[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(2): 160-163.
- Bao Yun-xia, Mao Er-ke, and He Pei-kun. Motion compensation method based on one-dimension high resolution range profile cross-correlation[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(2): 160-163.
- [7] 王世一. 数字信号处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 68-119.
Wang Shi-yi. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Beijing institute of technology, 2006: 68-119.
- [8] 田黎育, 高梅国. 一种二相码信号多普勒补偿方法的研究与实现[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(6): 757-785.
Tian Li-yu and Gao Mei-guo. A Doppler compensation method for biphas coded signals[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(6): 757-785.
- 原浩娟: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理.
高梅国: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号与图像处理、信息安全与对抗技术、目标探测与识别理论与技术.
牟建超: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理.