

一种宽适应性多普勒变化率估计新算法研究

韩学涛, 刘枫, 周彬, 黄阳
(电子信息控制重点实验室 成都 610036)

摘要: 目标与观测平台之间的径向加速度会引起多普勒频率发生变化, 多普勒变化率高精度估计在信号处理领域具有广泛的应用前景。为了提高处理增益, 首先在脉内采用频域累积, 将长时时域数据稀释为有限的谱线数据, 然后再通过脉间切片谱相关处理, 将多普勒变化率估计问题转换为最小二乘估计问题, 使得脉间积累成为可能, 通过脉内积累和多脉冲最小二乘估计可以大大提升处理增益进而获取较高的估计精度。同时通过谱相关处理, 巧妙避开了信号载频、到达时间和初相的准确估计难题, 对于脉内调制和重复周期变化特征不敏感, 普适性强, 工程应用价值高。最后通过各种场景下仿真试验, 验证了算法的原理正确性、普适性和高精度估计特性。

关键词: 多普勒变化率; 谱相关; 最小二乘估计; 高精度估计; 宽适应性; 脉冲序列; 时间切片

中图分类号: V556.1; TN953

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)06-0145-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250607001

CSTR: 32406.14.ycyk.20250607001

引用格式: 韩学涛, 刘枫, 周彬, 等. 一种宽适应性多普勒变化率估计新算法研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(6): 145-151.

Research on A New Wide Adaptability Algorithm for Doppler Rate of Change Estimation

HAN Xuetao, LIU Feng, ZHOU Bin, HUANG Yang

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: The radial acceleration between the target and the observation platform causes Doppler frequency changes. High-precision estimation of Doppler change rate has broad application in the field of signal processing. To improve the processing gain, firstly, frequency domain accumulation is used within the pulse, the data for long time is diluted into limited spectral line data, then, the estimation of doppler rate of change is transformed into a least squares estimation through spectral correlation processing of inter-pulse. It is possible for inter pulse accumulation. The processing gain can be greatly improved, and the high estimation accuracy can be easily achieved by intra-pulse accumulation and multi-pulse least squares estimation. The difficulty of accurately estimating the frequency, time of arrival and initial phase is avoided by cleverly utilizing spectral correlation processing. This algorithm is insensitive to intra-pulse modulation and pulse repetition interval, and has strong universality. Finally, the validity, universality and high-precision estimation of the algorithm are verified through simulation in various scenarios.

Keywords: Doppler rate-of-change; Spectral correlation; Least-squares estimation; Highprecision estimation; Wide adaptability; Pulse sequence; Time slicing

Citation: HAN Xuetao, LIU Feng, ZHOU Bin, et al. Research on A New Wide Adaptability Algorithm for Doppler Rate of Change Estimation[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(6): 145-151.

0 引言

多普勒变化率估计一直是信号处理研究的热点之一, 广泛应用于雷达、通信和无源定位等领域^[1-5]。高精度的多普勒变化率估计, 往往是这些领域实现应用需求的关键。文献[6]给出了多项式相位信号参数估计的克拉美罗界, 从中可知, 要

达到较高的多普勒变化率估计精度, 必须要增加信号的观测时间, 尤其是脉冲信号需要脉冲间积累等效延长观测时间来提高多普勒变化率估计精度。由于目标运动特性的限制, 一般来说, 在较短的观测时间内, 目标与观测平台的径向加速度可视作不变, 因此观测平台接收信号的多普勒变化率可视作恒定, 这就为多脉冲处理延长信号观

测时间提供了积累前提。文献[7]提出了利用离散多项式变换法估计多普勒变换率, 文献[8]则提出了利用最大似然算法估计多普勒变换率, 这些算法往往从理论的角度给出估计方法, 运算量很大, 仅仅适用于连续波信号, 并未给出脉冲信号的处理算法, 缺少一定的工程实用性。文献[9-11]给出了 LFM(Low Frequency Mangement)信号载频和调频斜率的离散多项式变换估计方法和最大似然估计方法, 文献[12]在此基础上借鉴雷达里的匹配滤波方法, 针对 LFM 信号, 提出一种“准匹配滤波”方法, 需要估计出每个脉冲的到达时间、脉冲宽度、起始频率和调频系数, 进而构造本地参考信号用于对接收信号进行“准匹配滤波”处理, 最后对其输出进行多普勒变化率估计, 其方法仅仅局限于 LFM 信号。文献[13]采用平方倍频法将 BPSK(Binary Phase-Shift Keying, 二进制相移键控)信号转化为单载频信号, 但是平方倍频过程增加了噪声交叉项, 信号的信噪比损失约 6 dB, 并且对等效载频估计精度要求过于苛刻。在文献[14-16]研究基础上文献[17]针对 BPSK 编码信号相位存在 π 跳变的特点, 提出了基于信号相位信息的去 BPSK 调制方法, 对相位编码信号的多普勒变化率估计方法进行了改进, 但其方法仅仅局限于 BPSK 调制, 具有一定的局限性。文献[18]提到用频率差分进行多普勒变化率的测量, 并分析了多普勒变化率测量精度对定位精度的影响, 文献[19]给出了多普勒变化率的数学模型, 并给出了多普勒变化率在可接受时间范围内典型有效数据时长, 但都没有给出多普勒变化率的测量方法。文献[20-25]提出了 DCFT(Discrete Chirp-Fourier Transform, 离散余弦变换)和 FRFT(Fractional Fourier Transform)方法估计多普勒变化率, 但针对的都是特定调制样式信号, 且运算量较大, 尤其不适合宽带实时处理应用场景。

当前多普勒变化率估计研究, 往往针对特定信号提出特定估计算法, 缺乏通用性, 且以连续波信号为主。脉冲信号的特点为持续时间很短且功率有限, 利用单脉冲有限的持续时间提取多普勒变化率十分困难。因此, 亟需一种能够大大提升处理增益进而获取高精度多普勒变化率估计的新算法。基于此, 本文提出了一种不需要脉内调制和脉间调制先验信息的估计新算法, 利用脉冲序列切片谱相关技术, 可以去除脉内调制信息,

构建脉间积累的相位观测序列, 等效延长信号的积累时间, 并结合最小二乘估计算法获取多普勒变化率的估计值, 算法对于脉内和脉间调制不敏感, 适应性较宽, 估计精度较高。

1 运动观测平台接收信号数学模型

目标与运动观测平台之间存在径向运动速度时会产生多普勒频率, 存在径向运动加速度时会产生多普勒变化率。假设在观测处理时间内, 信号载频不变, 多普勒变化率保持不变或近似不变, 即目标与观测平台之间保持匀加速运动, 观测平台上的接收机接收到射频信号的数学表达式为:

$$s_r(t) = \sum_k A_k \text{rect}(t - kT) e^{j(2\pi(f_c + f_{d0})t + \pi f'_d t^2 + \varphi_0)} \quad (1)$$

其中 k 为脉冲序号, A_k 为脉冲幅度, $\text{rect}(t)$ 为矩形函数, T 为脉冲重复周期, f_c 为信号载频, f_{d0} 为初始时刻的多普勒频率, f'_d 为多普勒变化率, φ_0 为初相。

将射频信号变频至中频并数字化后 $t = mt_s$, 第 k 个脉冲的数学表达式为:

$$r_k(m) = A_k e^{j(2\pi f_l m t_s + \pi f'_d m^2 t_s^2 + \varphi_0)} + n(m) \quad (2)$$

其中 $m = M_k, M_k + 1, \dots, M_k + P_k - 1$, M_k 为第 k 个脉冲到达时间以 t_s 为采样周期对应的量化值 (到达时间除以采样周期并取整), P_k 为第 k 个脉冲脉宽以 t_s 为采样周期对应的量化值 (脉宽除以采样周期并取整), f_l 为信号的中频频率, $n(mt_s)$ 为变频通道噪声。

令 $m_k = m - M_k$, 则第 k 个脉冲的数学表达式可变为:

$$r_k(m_k) = A_k e^{j(2\pi f_l (m_k + M_k) t_s + \pi f'_d (m_k + M_k)^2 t_s^2 + \varphi_0)} + n(m_k) \quad (3)$$

展开可得:

$$r_k(m_k) = A_k e^{j(2\pi(f_l t_s + f'_d M_k t_s^2 + \frac{f'_d (P_k - 1)t_s^2}{2})m_k + 2\pi f_l M_k t_s + \pi f'_d M_k^2 t_s^2 - \pi f'_d \frac{(P_k - 1)t_s^2}{4} t_s^2 + \varphi_0 + \pi f'_d (m_k - \frac{P_k - 1}{2})^2 t_s^2)} + n(m_k)$$

在实际工程应用中, $f'_d (m_k - \frac{P_k - 1}{2})^2 t_s^2 < 10^{-10}$, 因此, 忽略多普勒变化率与时间二次耦合项可得:

$$r_k(m_k) = A_k e^{j(2\pi(f_l t_s + f'_d M_k t_s^2 + \frac{f'_d (P_k - 1)t_s^2}{2})m_k + 2\pi f_l M_k t_s + \pi f'_d M_k^2 t_s^2 - \pi f'_d \frac{(P_k - 1)t_s^2}{4} t_s^2 + \varphi_0)} + n(m_k) \quad (4)$$

令:

$$\omega_k = 2\pi(f_l t_s + f'_d M_k t_s^2 + \frac{f'_d (P_k - 1)t_s^2}{2})$$

$$\varphi_k = 2\pi f_l M_k t_s + \pi f'_d M_k^2 t_s^2 - \pi f'_d \frac{(P_k - 1)t_s^2}{4} t_s^2 + \varphi_0$$

则第 k 个脉冲中频接收信号的数学表达式可简化为:

$$r_k(m_k) = A_k e^{j(\omega_k m_k + \varphi_k)} + n(m_k) \quad (5)$$

2 利用谱相关估计多普勒变化率

为了提高信号的处理增益,对中频信号进行DFT(Discrete Fourier Transform, 离散傅里叶变换)处理,可得其频域表达式为:

$$R(k) = \sum_{m_k=0}^{P_k-1} r_k(m_k) e^{-j\hat{\omega}_k m_k} = \sum_{m_k=0}^{P_k-1} A_k e^{j(\omega_k m_k + \varphi_k)} e^{-j\hat{\omega}_k m_k} + \sum_{m_k=0}^{P_k-1} n(m_k) e^{-j\hat{\omega}_k m_k} = A_k e^{j\varphi_k} e^{j\frac{(P_k-1)(\omega_k - \hat{\omega}_k)}{2}} \frac{\sin(\frac{P_k(\omega_k - \hat{\omega}_k)}{2})}{\sin(\frac{\omega_k - \hat{\omega}_k}{2})} + \varepsilon_k \quad (6)$$

其中, $\hat{\omega}_k$ 为信号估计频率,对 $R(k)$ 进行鉴相,可得相位表达式为:

$$q(k) = \varphi_k + \frac{(P_k-1)(\omega_k - \hat{\omega}_k)}{2} \quad (7)$$

代入 ω_k 和 φ_k 的表达式至 $q(k)$ 并整理可得:

$$q(k) = 2\pi f_I t_s (M_k + \frac{P_k-1}{2}) - 2\pi \hat{f}_I t_s \frac{P_k-1}{2} + \pi f_d' t_s^2 (M_k + \frac{P_k-1}{2})^2 + \varphi_0 \quad (8)$$

如果做DFT时,从脉冲的起始时刻 M_k 开始,即旋转因子变为 $e^{-j\hat{\omega}_k(m_k+M_k)}$,则上述相位变为:

$$q(k) = 2\pi(f_I - \hat{f}_I)t_s(M_k + \frac{P_k-1}{2}) + \pi f_d' t_s^2 (M_k + \frac{P_k-1}{2})^2 + \varphi_0 = 2\pi(f_I - \hat{f}_I)t_k + \pi f_d' t_k^2 + \varphi_0 \quad (9)$$

其中, t_k 为脉冲的中心时刻。

只要准确估计出 f_I 、 t_k 和 φ_0 ,就可以准确估计出多普勒变化率 f_d' ,但在实际应用中, f_I 、 t_k 和 φ_0 是无法准确测量的。

为了解决载频、脉冲的中心时刻和初相无法准确测量的问题,本文提出对脉冲序列进行切片处理,如图1所示,将接收时间内的脉冲序列切成两个时间片,两个时间片的相应脉冲进行谱相关处理,采用时间配准技术(切片内脉冲序列 Δt 保持不变)和频率配准技术(切片内脉冲序列选取相同估计频率),将脉冲中心时刻和中频测量值配准至某一特定值上,就可以解决多普勒变化率的测量问题。

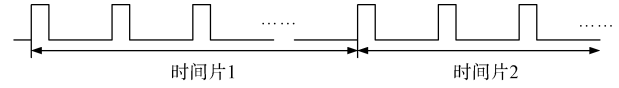


图1 脉冲时间切片示意

Fig. 1 Time slicing diagram of pulse

设间隔时间为 Δt ,对应的脉冲序号间隔为 L ,则:

$$q(k) = 2\pi(f_I - \hat{f}_I)t_k + \pi f_d' t_k^2 + \varphi_0$$

$$q(k+L) = 2\pi(f_I - \hat{f}_I)t_{k+L} + \pi f_d' t_{k+L}^2 + \varphi_0$$

对应序号的频谱数据作谱相关处理并鉴相可得:

$$\Delta q(k) = q(k+L) - q(k) = 2\pi(f_I - \hat{f}_I)t_{k+L} + \pi f_d' t_{k+L}^2 - 2\pi(f_I - \hat{f}_I)t_k - \pi f_d' t_k^2$$

整理可得:

$$\Delta q(k) = \pi \Delta t (t_k + t_{k+L}) f_d' + 2\pi \Delta t (f_I - \hat{f}_I) \quad (10)$$

在实际工程应用中,采用时间配准和频率配准技术可以保证在积累过程中 Δt 和 \hat{f}_I 保持不变,假设谱相关的次数为 N ,则 Δq 可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} \Delta q(0) &= \pi \Delta t (t_0 + t_L) f_d' + 2\pi \Delta t (f_I - \hat{f}_I) \\ \Delta q(1) &= \pi \Delta t (t_1 + t_{1+L}) f_d' + 2\pi \Delta t (f_I - \hat{f}_I) \\ &\dots \\ \Delta q(N-1) &= \pi \Delta t (t_{N-1} + t_{N-1+L}) f_d' + 2\pi \Delta t (f_I - \hat{f}_I) \end{aligned}$$

将上式写成矩阵形式:

$$\Delta Q = HX + W \quad (11)$$

$$\Delta Q \text{ 为相位差观测值, } \Delta Q = \begin{bmatrix} \Delta q(0) \\ \Delta q(1) \\ \dots \\ \Delta q(N-1) \end{bmatrix}, H \text{ 为}$$

$$\text{观测矩阵, } H = \begin{bmatrix} \pi \Delta t (t_0 + t_L) & 2\pi \Delta t \\ \pi \Delta t (t_1 + t_{1+L}) & 2\pi \Delta t \\ \dots & \dots \\ \pi \Delta t (t_{N-1} + t_{N-1+L}) & 2\pi \Delta t \end{bmatrix}, X \text{ 为待}$$

$$\text{估计向量, } X = \begin{bmatrix} f_d' \\ f_I - \hat{f}_I \end{bmatrix}, W \text{ 为观测噪声。}$$

令 $J(X) = [\Delta Q - HX]^T [\Delta Q - HX]$,通过求取 J 关于 X 估计值 \hat{X} 的梯度并令其为零,

$$\frac{\partial J(X)}{\partial \hat{X}} = 2H^T [\Delta Q - HX] = 0$$

可以得到 X 的最小二乘估计如下:

$$\hat{X} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta Q \quad (12)$$

由上述推导过程可以看出, 通过本文给出的脉内积累和脉间多脉冲积累的算法模型, 可以大幅度提高处理增益, 提升多普勒变化率的测量精度, 且本文提出的算法和信号的调制样式无关, 也和脉间调制特征无关, 具有很强的普适性和工程实用性。实际工程中, 在积累时间内多普勒变化率会有微小变化。因此, 积累时间的选取不是越大越好, 需要在脉间积累时间和多普勒变化率的变化之间进行折中考虑, 脉间积累时间的选取往往以多普勒变化率的变化不超过测量精度的 5% 作为准则。

3 仿真分析

为了验证本文提出算法的原理正确性、估计精度和工程实用性, 在本节对算法进行了大量的蒙特卡罗试验仿真验证。仿真参数设置为: 采样频率 500 MHz, 接收机瞬时带宽 200 MHz, 信号载频在接收机带宽内随机产生, 噪声在接收机带宽内服从高斯分布, 接收机瞬时带宽内信噪比变化范围为 -3~15 dB, 每种信噪比下蒙特卡罗试验次数不低于 100 次, 多普勒变化率在 -1 000 Hz/s~1 000 Hz/s 之间随机产生, 处理时间 100 ms, 等分成 2 个时间片, 每个时间片为 50 ms, 在处理时间内, 多普勒变化率有 0.2 Hz/s 的微小变化。仿真分析每种信噪比下多普勒变化率估计精度, 下面是几种仿真场景设置条件, 相应的估计性能分别如图 2~图 7 所示。

① 常规脉冲信号脉内无调制, PRI(Primary Rate Interface, 基群速率接口)固定, $p_w=0.5 \text{ us}$, $PRI=1 \text{ ms}$, 信号既无漏警也无虚警;

② 脉冲信号脉内无调制, PRI 固定, $p_w=0.5 \text{ us}$, $PRI=1 \text{ ms}$, 信号漏警率保持在 10% 左右;

③ 脉冲信号脉内无调制, PRI 固定, $p_w=0.5 \text{ us}$, $PRI=1 \text{ ms}$, 信号虚警率保持在 10% 左右;

④ 脉冲信号脉内无调制, PRI 三参差, $p_w=0.5 \text{ us}$, $PRI=875 \text{ us}/1\ 000 \text{ us}/1\ 125 \text{ us}$;

⑤ 脉冲信号脉内无调制, PRI 呈脉冲组变特性, $p_w=0.5 \text{ us}$, $PRI1=936 \text{ us}$, 持续脉冲数目为 23 个, $PRI2=1\ 064 \text{ us}$, 持续脉冲数目为 27 个;

⑥ 脉冲信号脉内呈线性调频特征, PRI 固定, $p_w=10 \text{ us}$, $PRI=1\ 000 \text{ us}$, 调频带宽 $B=4 \text{ MHz}$;

⑦ 脉冲信号脉内呈相位编码特征, 子码宽度 0.1 us, 码长 64, 码序列为随机码, PRI 固定, $PRI=1\ 000 \text{ us}$ 。

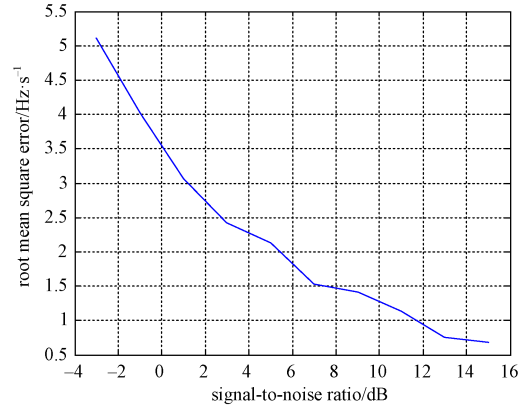


图 2 常规场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 2 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in conventional scenarios

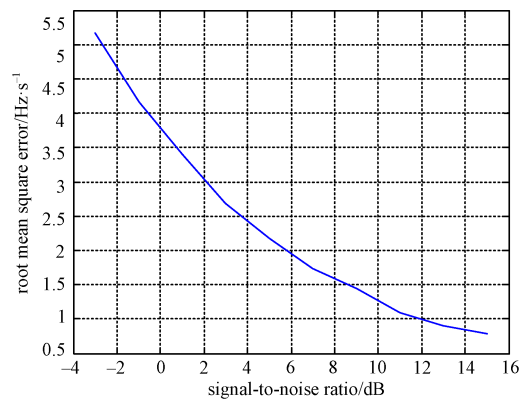


图 3 漏警场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 3 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in missed alarm scenarios

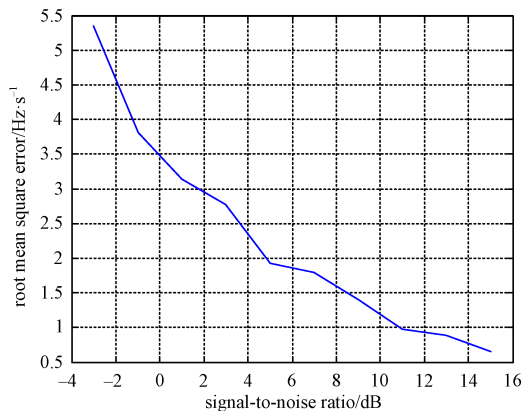


图 4 虚警场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 4 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in false-alarm scenarios

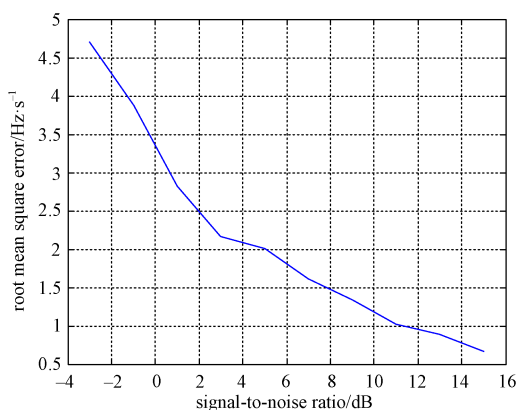


图5 PRI参差场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 5 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in PRI uneven scenarios

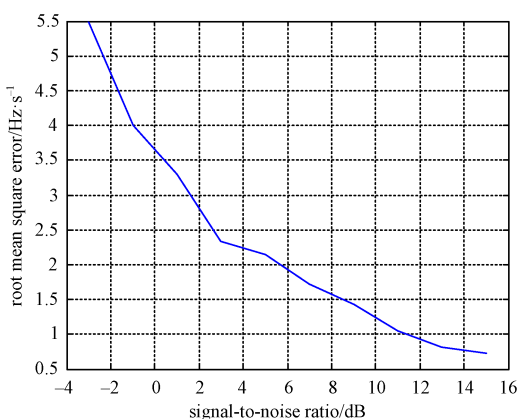


图6 PRI组变场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 6 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in PRI group change scenarios

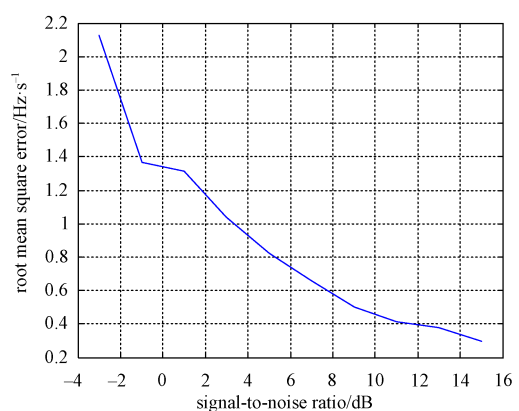


图7 脉内调频场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 7 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in pulse frequency modulation scenarios

通过上面仿真可以看出, 本文提出的算法不管是对PRI调制信号, 还是对脉内调频和调相信号

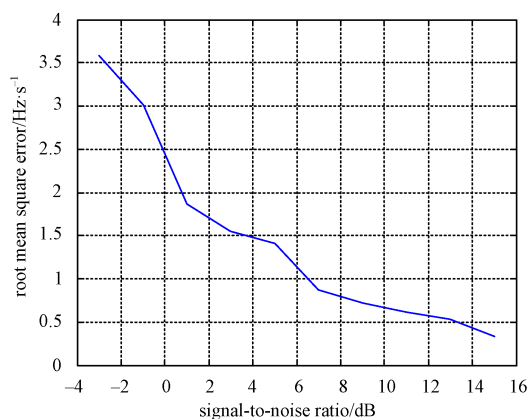


图8 脉内编码场景下估计精度与信噪比关系

Fig. 8 The relationship between estimation accuracy and signal-to-noise ratio in pulse coding scenarios

均有很好的适应性, 算法在采用时间配准技术和频率配准技术之后, 在中频信噪比不低于1 dB时, 可以获得多普勒变化率优于3.5 Hz/s的估计精度。尤其是对脉内调频和调相信号, 相同信噪比下算法的估计精度还要优于脉内无调制信号。文献[17]在观测时间为100 ms, 采用26位最小峰值旁瓣序列, 带内信噪比为20 dB (等效本文中频信噪比为-3 dB) 时, 对BPSK信号的估计精度约为1 Hz/s, 而本文算法的估计精度为0.95 Hz/s, 且本文算法优势在于通用性较强, 对脉内调制特性不敏感, 如图9所示。

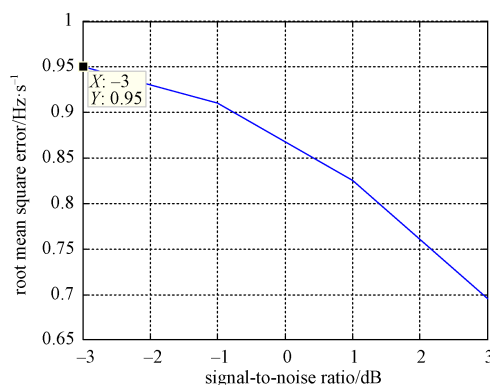


图9 最小峰值旁瓣序列算法估计性能

Fig. 9 Estimation performance of the minimum peak sidelobe level (MPSL) sequence algorithm

4 结论

本文提出的多普勒变化率估计算法将脉冲序列进行时间切片并做谱相关处理, 借助时间配准和频率配准技术, 构建了脉间积累相位观测序列,

形成了一个包含多普勒变化率信息的连续信号, 等效延长了观测时间, 可以在较低信噪比下获得较高的多普勒变化率估计精度, 且不需要任何脉内调制和脉间调制先验信息, 估计精度高, 具有较强的工程实用价值。

参考文献

- [1] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [2] BECKER K. An efficient method of passive emitter location[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic System, 1992, 28(4): 1091-1104.
- [3] BECKER K. Passive localization of frequency-agile radars from angle and frequency measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic System, 1999, 35(4): 1129-1144.
- [4] 郭福成, 樊昀. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [5] 胡来招. 无源定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [6] PELEG S, PORAT B. The Cramer-Rao lower bound for signals with constant amplitude and polynomial phase[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(3): 749-752.
- [7] PELEG S, FRIEDLANDER B. The discrete polynomial-phase transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(8): 1901-1914.
- [8] GHOGHO M, NANDI A K, SWAMI A. Cramer-Rao bounds and maximum likelihood estimation for random amplitude phase-modulated signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(11): 2905-2916.
- [9] PELEG S, PORAT B. LINEAR FM signal parameter estimation from discrete-time observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(4): 607-616.
- [10] LI Y, FU H, KAM P Y. Improved, approximate, time-domain ML estimators of chirp signal parameters and their performance analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1260-1272.
- [11] DENG Z, YE L, FU M, et al. Further investigation on time-domain maximum likelihood estimation of chirp signal parameters[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(5): 444-449.
- [12] 陈曦, 邓振森, 傅茂忠. LFM 相参脉冲串多普勒频率变化率估计[J]. 现代雷达, 2014, 36(3): 29-33.
CHEN Xi, DENG Zhenmiao, FU Maozhong. Doppler frequency rate estimation for LFM coherent pulse trains[J]. Modern Radar, 2014, 36(3): 29-33.
- [13] 郁春来, 占荣辉, 万建伟. 一种 BPSK 相参脉冲信号多普勒频率变化率测量方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1): 53-56.
YU Chunlai, ZHAN Ronghui, WAN Jianwei. A measurement method for Doppler frequency rate-of-change with BPSK coherent pulse signal[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1): 53-56.
- [14] NGUYEN V K. Frequency estimation of a radar pulse train with an unknown binary phase-coded sequence[C]// Proceedings of the 2008 International Conference on Radar. Adelaide, Australia, 2008: 271-275.
- [15] HANDEL P, TICHAVSKY P. Frequency rate estimation at high SNR[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(8): 2101-2105.
- [16] 苑小华, 罗武忠, 罗来源. MPSK 信号载波频率盲估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1148-1150.
YUAN Xiaohua, LUO Wuzhong, LUO Laiyuan. Blind carrier frequency estimation for MPSK signals[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5): 1148-1150.
- [17] 李宏, 秦玉亮, 李彦鹏, 王宏强, 黎湘. 基于相位补偿的 BPSK 相参脉冲串信号多普勒频率变化率估计算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2156-2160.
LI Hong, QIN Yuliang, LI Yanpeng, Wang Hongqiang, Li Xiang. A phase compensation based algorithm for Doppler frequency rate estimation from BPSK coherent pulse train[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9): 2156-2160.
- [18] 袁翔宇, 张政超, 刘军. 基于单站多普勒变化率的无源定位及其试验方法研究[J]. 电子信息靶场, 2017, 27(3): 5-9.
YUAN Xiangyu, ZHANG Zhengchao, LIU Jun. Research on passive localization and its testing method based on single-station Doppler frequency rate[J]. Electronic Information Shooting Range, 2017, 27(3): 5-9.
- [19] 王桂良, 黄渊凌. 多普勒及多普勒变化率对辐射源个体识别性能的影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2671-2676.
WANG Guiliang, HUANG Yuanling. Analysis of the influence of Doppler and Doppler rate-of-change on the specific emitter identification[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(12): 2671-2676.
- [20] FAN B, ZHANG K, QIN Y, et al. Discrete chirp-Fourier transform-based acquisition algorithm for weak global positioning system L5 signals in high dynamic environ-

- ments[J]. LET Radar, Sonar & Navigation, 2013, 7(7): 736-746.
- [21] 徐会法, 刘锋. 线性调频信号分数阶频谱特征分析[J]. 信号处理, 2010, 26(12): 1897-1901.
XU Huifa, LIU Feng. Spectrum characteristic analysis of linear frequency-modulated signal in the fractional Fourier domain[J]. Signal Processing, 2010, 26(12): 1897-1901.
- [22] 邵岩. 分数阶傅里叶变换的算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [23] 赵健根, 张天骐, 李鑫凯, 等. 基于FRFT的双二进制偏移载波信号捕获算法[J]. 信号处理, 2020, 36(2): 240-249.
ZHAO Jiagen, ZHANG Tianqi, LI Xinkai, et al. FRFT-based dual binary offset carrier signal acquisition algorithm[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(2): 240-249.
- [24] CHEN Xiaolong, GUAN Jian. A fast FRFT based detection algorithm of multiple moving targets in sea clutter [C]//2010 IEEE Radar Conference. Arlington, VA, USA. IEEE, 2010: 402-406.
- [25] 方竹, 张天骐, 汪锐, 等. 高动态环境二进制偏移载波调制信号的捕获[J]. 信号处理, 2022, 38(10): 2164-2172.
FANG Zhu, ZHANG Tianqi, WANG Rui, et al. Acquisition of binary offset carrier modulation signals in a highly dynamic environment[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(10): 2164-2172.

[作者简介]

韩学涛 1981年生, 硕士, 高级工程师。

刘枫 1972年生, 博士, 研究员。

周彬 1969年生, 大学, 研究员。

黄阳 1996年生, 硕士, 工程师。

(本文编辑: 赵尹默)