

DOI: 10.7652/xjtuxb201302012

多分量 Chirp 信号相位参数的精确估计算法

郑纪彬¹, 任爱锋², 苏涛¹, 朱文涛¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安;

2. 西安电子科技大学电子工程学院, 710071, 西安)

摘要: 针对循环平稳法在多分量 Chirp 信号相位参数估计中参数取值范围小和低信噪比下相位参数估计精度低的问题,提出一种联合循环平稳法与多普勒模糊数搜索法的多分量 Chirp 信号相位参数精确估计算法。该算法针对二阶相位参数的模糊性特点,采用循环平稳法完成 Chirp 信号的二阶相位模糊估计,然后在二阶相位模糊估计的基础上,根据多普勒模糊数导致多普勒扩散的原理,利用多普勒模糊数搜索法解决多普勒模糊问题。仿真结果证明,与已有循环平稳算法相比,该算法的相位参数取值范围不受限,低信噪比下的相位参数估计精度约提高了 30 dB。雷达实测数据处理结果证明了算法的工程实用性。

关键词: 循环平稳;多分量 Chirp 信号;相位参数估计;多普勒模糊数

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)02-0069-06

An Accurate Estimation Algorithm for Phase Parameters of Multi-Chirp Signals

ZHENG Jibin¹, REN Aifeng², SU Tao¹, ZHU Wentao¹

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Electronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An accurate estimation algorithm for phase parameters of multi-chirp signals is proposed to improve the disadvantages of operation over a limited range of phase parameter values and low estimation precision in low signal-to-noise ratio using the cyclostationarity method. The method bases on the joint cyclostationarity method and Doppler ambiguity searching method. The characteristic of ambiguous second-order phase and cyclostationarity method are employed to perform the ambiguous estimation of the second-order phase for Chirp signal. Then, the Doppler ambiguity searching method is utilized to resolve the problem of Doppler ambiguity based on the ambiguous estimation and the principle of Doppler ambiguity inducing Doppler spread. Simulation results and comparisons with the existing cyclostationarity method show that the range of phase parameter values is not limited in the proposed algorithm and the estimation precision using the proposed algorithm is improved by about 30dB. Engineering practicability of the algorithm is verified by raw radar data results.

Keywords: cyclostationarity; multi-chirp signals; phase parameter estimation; Doppler ambiguity

收稿日期: 2012-04-11。 作者简介: 郑纪彬(1986—),男,博士生;苏涛(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001204);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JY0000902020);陕西省“13115”科技创新工程项目(2009ZDKG-26)。

网络出版时间: 2012-12-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121227.1733.002.html>

Chirp 或线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号检测及相位参数估计已广泛应用于雷达、声纳、通信、地质勘探和医学成像等信号处理系统中。Chirp 信号相位参数包含重要信息,在雷达信号处理中,一次相位参数和二次相位参数分别对应高速目标的初始速度和加速度,其估计的准确性对战争的胜利将起到重要作用^[1]。伸缩 Keystone-Wigner 变换 (stretch Keystone-Wigner transform, SKWT) 算法^[2-3]及最小熵准则算法^[4]采用参数搜索的方式进行高速目标检测及运动参数估计,但参数估计运算量大、精度低及适用性差的缺陷限制了这 2 种算法的应用。最大似然 (maximum likelihood, ML) 估计是目前最优的 Chirp 信号相位参数估计算法^[5-6],然而该算法需要对非线性代价函数进行优化,计算复杂度高,且容易陷入局部极小值。针对最大似然估计的缺点,有基于相位展开的最小二乘估计算法^[7]、降秩法^[8]、离散多项式相位变换 (discrete polynomial-phase transform, DPT) 算法^[9]及循环平稳估计算法^[10]等,其中循环平稳估计算法由于计算复杂度低,易于实现,受到广泛关注^[11]。然而,循环平稳算法存在相位参数取值范围与估计均方误差 (mean square error, MSE) 相矛盾的缺陷。针对此问题,文献[12-13]提出了基于循环平稳的迭代算法,该算法在不损失估计精度的条件下提高了相位参数的取值范围,然而算法的相位参数取值范围仍然受限,且在低信噪比下的相位参数估计均方误差相比文献[11]算法没有改善。

针对已有循环平稳算法应用于多分量 Chirp 信号相位参数估计存在的问题,本文提出一种基于联合循环平稳法与多普勒模糊数搜索法的多分量 Chirp 信号相位参数精确估计算法。首先采用循环平稳法完成 Chirp 信号的二阶相位模糊估计,然后在相位模糊估计的基础上利用多普勒模糊数搜索法解决二阶相位参数的多普勒模糊问题。该算法以固定搜索步长利用快速傅里叶变换操作完成模糊数搜索,计算复杂度低,消除了已有算法相位参数取值范围小的缺陷,且由于相位参数估计均在循环平稳算法性能最优的条件下进行,从而降低了低信噪比条件下相位参数的估计均方误差。计算机仿真和雷达实测数据证明了所提算法的有效性。

1 多分量 Chirp 信号相位参数估计

1.1 基于循环平稳法的模糊估计

假设雷达接收信号 $y(n)$ 由 M 个 Chirp 信号

$x_i(n)$ 及加性高斯白噪声 $w(n)$ 组成,即

$$y(n) = \sum_{i=1}^M x_i(n) + w(n) = \sum_{i=1}^M A_i \exp[j(b_{i1}n + b_{i2}n^2)] + w(n) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: M 为雷达回波信号中 Chirp 信号分量个数; A_i, b_{i1}, b_{i2} 分别为第 i 个 Chirp 信号的幅值参数、一次相位参数和二次相位参数; N 为雷达接收信号采样数据个数; 加性高斯白噪声 $w(n)$ 为 0 均值的平稳噪声序列。信号 $y(n)$ 的瞬时自相关函数为

$$R_y(n, \tau) = E[y^*(n)y(n+\tau)] = R_{ii}(n, \tau) + R_{ij}(n, \tau) + R_w(n, \tau) \quad (2)$$

式中

$$R_{ii}(n, \tau) = \sum_{i=1}^M A_i^2 \{ \exp[j(b_{i1}\tau + b_{i2}\tau^2)] \cdot \exp[j(2b_{i2}n\tau)] \} (2-a)$$

$$R_{ij}(n, \tau) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M A_i A_j \{ \exp[j(b_{j1}\tau + b_{j2}\tau^2)] \cdot \exp[j((2b_{j2}\tau + b_{j1} - b_{i1})n)] \cdot \exp[j((b_{j2} - b_{i2})n^2)] \} (2-b)$$

式中: $R_{ii}(n, \tau)$ 和 $R_{ij}(n, \tau)$ 分别为 Chirp 信号自相关项和互相关项,其中 $R_{ij}(n, \tau)$ 存在二次相位参数造成的多普勒扩散,导致能量发生扩散; $R_w(n, \tau)$ 为信号自相关后的噪声项,能量集中在零循环频率处^[12-13]; τ 为循环延迟点数,且当 $\tau = \frac{N}{2}$ 时,循环平稳法的相位参数估计性能最优^[12-13]。在雷达信号处理中,由于多普勒扩散的存在, $R_{ij}(n, \tau)$ 对 $R_{ii}(n, \tau)$ 相当于干扰^[14]。

令 $\tau = \frac{N}{2}$, 通过代价函数式 (3) 可以计算出 Chirp 信号二次相位参数的估计值

$$b'_{i2} = \arg \max \left| \text{fft} \left[R_{ii} \left(n, \frac{N}{2} \right) \right] \right| \quad (3)$$

式中: $\text{fft}(\cdot)$ 为快速傅里叶变换。由文献[12-13]可知,式(3)中二阶相位参数 b_{i2} 取值范围必须满足

$$|b_{i2}| \leq \left| \frac{\pi}{N} \right| \quad (4)$$

在高速目标检测及运动参数估计中,目标加速度所产生的二次相位参数 b_{i2} 的取值较大^[14],已有循环平稳算法的参数估计值是模糊的,不能满足运动参数估计的要求。例如: Ka 波段载频 30 GHz 阵列雷达的重复频率为 200 Hz,积累脉冲数为 200,目标加速度为 110 m/s²,则对应的 $b_{i2} = 0.55\pi$,而式(4)中

$|b_{12}| \leq |0.005\pi|$,文献[11]及文献[12-13]算法中 $|b_{12}| \leq |0.5\pi|$,可见均不满足目标运动参数估计条件。

尽管式(3)的估计参数值是模糊的,但在多普勒模糊数能够被正确计算出的条件下,式(3)代价函数的估计参数值是最优的,由此本文提出多普勒模糊数搜索法,此方法能够在不降低估计均方误差的条件下消除已有循环平稳算法参数相位取值范围小的限制。

1.2 基于多普勒模糊数搜索法的精确估计

当 $\tau = \frac{N}{2}$ 时, $R_{ii}(n, \tau)$ 所对应的多普勒频率可表示为

$$f_{\ddot{u}-d} = \frac{b_{i2}N}{2\pi} = f_{\ddot{u}-d0} + n_{\ddot{u}-k} \tag{5}$$

式中: $f_{\ddot{u}-d0}$ 为模糊多普勒频率; $n_{\ddot{u}-k}$ 为多普勒模糊数。将式(5)代入式(1)可得

$$g(n) = \sum_{i=1}^M A_i \left\{ \exp \left[j \left(b_{i1}n + \frac{2\pi f_{\ddot{u}-d0}}{N} n^2 \right) \right] \cdot \exp \left[j \left(\frac{2\pi n_{\ddot{u}-k}}{N} n^2 \right) \right] \right\} \tag{6}$$

根据式(6)信号形式,定义解模糊操作函数为

$$H(n, n_k) = \exp \left[-j \frac{2\pi n_k}{N} n^2 \right] \tag{7}$$

式中: n_k 为多普勒模糊数范围中的取值。

利用估计参数 b'_{i2} 对式(6)信号进行二次相位补偿,并通过解模糊操作函数式(7)进行解模糊处理

$$G(n, b'_{i2}, n_k) = \sum_{i=1}^M A_i \exp \left[j \left(b_{i1}n + \left(\frac{2f_{\ddot{u}-d0}\pi}{N} - b'_{i2} \right) n^2 \right) \right] \exp \left[j \left(\frac{2\pi(n_{\ddot{u}-k} - n_k)}{N} n^2 \right) \right] \tag{8}$$

由式(8)信号形式可以看出:若 $n_{\ddot{u}-k} - n_k = 0$,则由多普勒模糊数所引起的二次相位多普勒扩散被补偿。

根据设定的多普勒模糊数范围,通过代价函数式(9)可以计算出信号的多普勒模糊数

$$n'_{\ddot{u}-k} = \arg \max_{n_k} | \text{fft}[G(n, b'_{i2}, n_k)] | \tag{9}$$

式中: $n'_{\ddot{u}-k}$ 为估计得到的第 i 个 Chirp 信号的多普勒模糊数; $\hat{n}_k$ 为代价函数中多普勒模糊数的取值范围。

根据雷达参数、实际目标加速度范围及式(4)和式(5),可以得到实际情况下多普勒模糊数搜索范围及步长

$$\left. \begin{aligned} f_{\ddot{u}-d_max} &= \frac{a_{i_max}N}{f_{pr}^2\lambda} \\ \hat{n}_{k_com} &= \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

式中: $f_{\ddot{u}-d_max}$ 为信号最大多普勒频率; a_{i_max} 为目标最大加速度; N 为积累脉冲数; f_{pr} 为信号重频; λ 为信号波长; $\hat{n}_{k_com}$ 为模糊数搜索步长。例如: X 波段载频 10 GHz 阵列雷达的重复频率为 200 Hz,积累脉冲数为 100,假设实际情况下目标最大加速度为 60 m/s²,则式(10)对应的目标信号相对多普勒频率 $f_{\ddot{u}-d}$ 为 5,模糊数搜索范围可设置为 $[0, 0.5, 1, \cdots, 4, 4.5, 5]$ 。

利用由代价函数式(3)估计得到的模糊相位参数 b'_{i2} 及由代价函数式(9)估计得到的多普勒模糊数 $n'_{\ddot{u}-k}$,对式(6)信号进行多普勒扩散补偿处理,可以得到

$$B(n, b'_{i2}, n'_{\ddot{u}-k}) = A_i \exp \left[j \left(b_{i1}n + \left(\frac{2f_{\ddot{u}-d0}\pi}{N} - b'_{i2} \right) n^2 \right) \right] + \sum_{j=1, j \neq i}^M A_j \left\{ \exp \left[j \left(b_{j1}n + \left(\frac{2f_{\ddot{u}-d0}\pi}{N} - b'_{i2} \right) n^2 \right) \right] \cdot \exp \left[j \left(\frac{2\pi(n_{jj-k} - n'_{\ddot{u}-k})}{N} n^2 \right) \right] \right\} \tag{11}$$

在式(11)中,第 i 个 Chirp 信号的多普勒模糊数被补偿,此时可运用 $\tau = N/2$ 的循环平稳迭代算法,进一步降低第 i 个 Chirp 信号相位参数的估计均方误差。

文献[11-13]算法及本文算法均利用快速傅里叶变换实现相位参数估计,其中循环平稳法采用插值处理方式提高信号二阶相位参数估计精度,快速傅里叶变换针对插值处理后的数据进行操作,运算量大,相比之下,多普勒模糊数搜索步长固定,快速傅里叶变换针对插值处理前的数据进行操作,运算量小。假定处理信号脉冲数为 N ,插值处理后数据个数为 M ,循环平稳迭代次数为 L ,多普勒模糊数搜索次数为 K ,则文献[11-13]算法及本文算法的复乘次数如表 1 所示。

表 1 几种算法的运算量分析

参数估计算法	复乘次数
文献[11]算法	$(M/2)\text{lb}M$
文献[12-13]算法	$L(M/2)\text{lb}M$
本文算法	$(L-1)(M/2)\text{lb}M + K(N/2)\text{lb}N$

利用上例中雷达和目标仿真参数, $N = 100, M = 2^{18}, L = 3, K = 11$,根据表 1 中的各算法运算量分析结果,则文献[11]算法的复乘次数为 2 359 296,文献[12-13]算法的复乘次数为 7 077 888,本文算法的复乘次数为 4 722 246,由此可见,文献[11]算

法、文献[12-13]算法及本文算法运算量均在一个数量级。

通过以上对几种算法运算量的分析可知:本文算法在保持循环平稳法计算复杂度低的条件下,二阶相位参数取值范围不再受限,且由于本文算法中的循环平稳法均在 $\tau=N/2$ 的最优性能下运行,从而降低了低信噪比条件下二阶相位参数估计的均方误差。

2 计算机仿真及实测数据处理结果

2.1 计算机仿真

计算机仿真实验中目标信号仿真参数的设定如表 2 所示。

表 2 目标信号仿真参数

信号	A_i	b_{i1}	b_{i2}
Chirp 信号 1	1	-0.40	0.17
Chirp 信号 2	1	0.70	-0.12
Chirp 信号 3	1	-0.82	1.71
Chirp 信号 4	1	0.75	-1.92

计算机仿真实验中,数据样本点数 $N=300$,所有仿真结果均由 200 次 Monte-Carlo 实验统计得到。二阶相位参数克拉美罗界(Cramer-Rao lower bounds,CRB)的表达式^[12]为

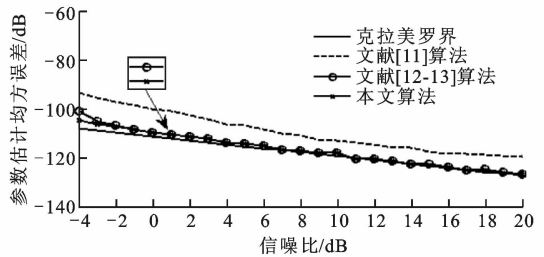
$$B_{CR}(b_{i2}) \approx 10\lg(90/N^5) - R_{SN} \quad (12)$$

式中: R_{SN} 为信噪比。

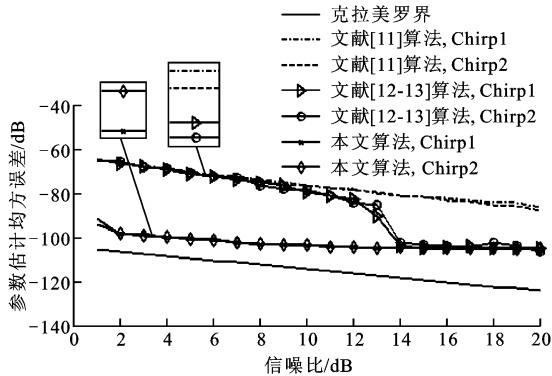
当循环延迟点数 $\tau=150$ 时,根据式(4)可知,传统循环平稳法参数估计范围小,易出现相位参数估计模糊。为解决相位参数估计模糊问题,文献[11]算法采用减小循环延迟值的方式进行解模糊处理,文献[12-13]算法采用迭代的方式进行解模糊及提高参数估计精度,计算机仿真实验中文献[11-13]算法根据仿真参数设定使循环平稳不出现模糊的循环延迟值。相比之下,本文算法采用循环平稳法进行模糊多普勒的估计,采用多普勒模糊数搜索方法进行解模糊处理,从而保证了计算机仿真实验中本文算法的循环延迟取最优值 $\tau=150$ 。

实验 1 选取 Chirp 信号 1 及 Chirp 信号 2,分别在单分量 Chirp 信号和多分量 Chirp 信号情况下进行计算机仿真。在文献[11]算法中取 $\tau=9$ (对于参数 $b_{12}=0.17$ 及 $b_{22}=-0.12$, τ 值取 9 是在保证不出现相位模糊的所有值中最优的);在文献[12-13]算法中,初始值 $\tau=9$,迭代过程中的 $\tau=150$ 。单分量 Chirp 信号和多分量 Chirp 信号情况下各算法的二

阶相位参数估计结果如图 1 所示。



(a)单分量 Chirp 信号情况



(b)多分量 Chirp 信号情况

图 1 $\tau=9$ 时二阶相位参数估计的 MSE 随信噪比变化的曲线

从图 1 可以看出:在文献[11]算法中取 $\tau=9$,循环平稳法参数估计性能下降;文献[12-13]算法在迭代过程中利用 $\tau=150$ 的循环平稳法提高参数估计精度,然而其解模糊处理的性能会影响算法的整体参数估计性能;本文算法可在低信噪比条件下准确地完成解模糊处理,且循环平稳法的性能最优,参数估计精度接近 CRB。图 1 的计算机仿真结果验证了本文算法相比文献[11]和文献[12-13]算法的优越性。

实验 2 选取 Chirp 信号 1 及 Chirp 信号 2,分别在单分量 Chirp 信号和多分量 Chirp 信号情况下进行计算机仿真。实际中对相位参数的取值范围没有任何的先验知识,在估计相位参数 b_{i2} 时,就无法确定最优的延迟值,为保证不出现相位模糊,文献[11]算法中取 $\tau=1$,文献[12-13]算法中取初始值 $\tau=1$,迭代过程中取 $\tau=150$ 。单分量 Chirp 信号和多分量 Chirp 信号情况下各算法的相位参数估计结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, $\tau=1$ 时的循环平稳法参数估计性能较 $\tau=9$ 时下降,从而导致文献[11]及文献[12-13]算法的参数估计精度降低。本文算法始终

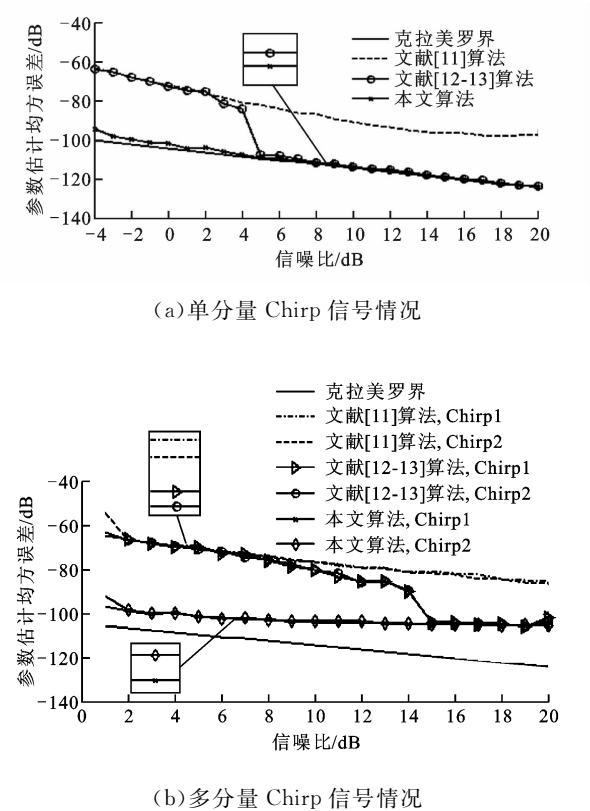


图 2 $\tau=1$ 时二阶相位参数估计的 MSE 随信噪比变化的曲线

工作于性能最优的情况下,保证在低信噪比条件下可以精确地估计参数。图 2 的计算机仿真结果证明了本文算法的有效性。

实验 3 选取 Chirp 信号 3 及 Chirp 信号 4,分别在单分量 Chirp 信号和多分量 Chirp 信号情况下进行计算机仿真。由文献[11-13]可知,当 $\tau=1$ 时,参数取值范围为 $|b_{i2}| \leq \left| \frac{\pi}{2} \right|$,可见目标信号

已经超出已有循环平稳算法的参数取值范围。单分量 Chirp 信号和多分量 Chirp 信号情况下各算法的相位参数估计结果如图 3 所示。

文献[11]和文献[12-13]算法不能完成正确的解模糊处理,二阶相位参数估计均方误差大。相比之下,本文算法可以完成正确的解模糊处理,且保证循环平稳法的性能最优,由图 3 可以看出本文算法明显优于文献[11]和文献[12-13]算法。

2.2 实测数据处理结果

采用某监视雷达的实测数据对本文算法进行验证,雷达积累脉冲数为 5 120。对目标进行常规检测,其检测结果如图 4a 所示,可以看出:由于目标初始速度及加速度的影响,目标能量发生扩散。利用本文算法对目标进行检测,其检测结果如图 4b 所

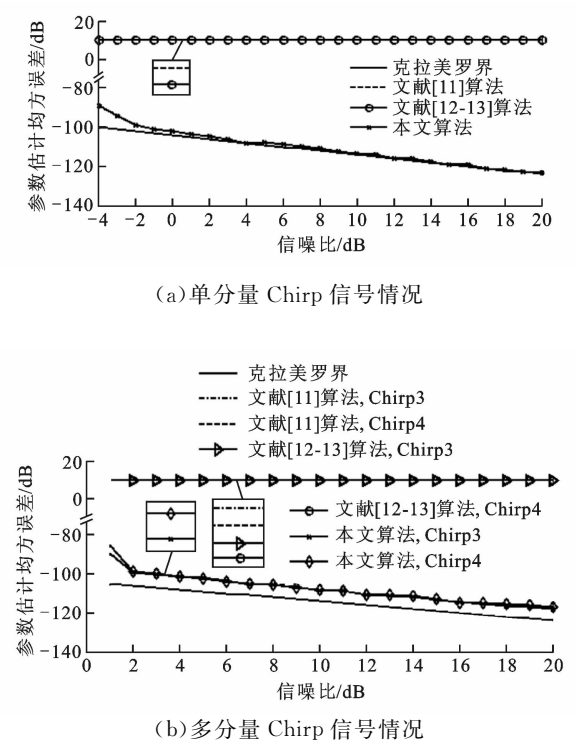
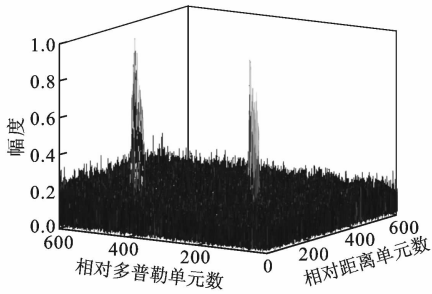
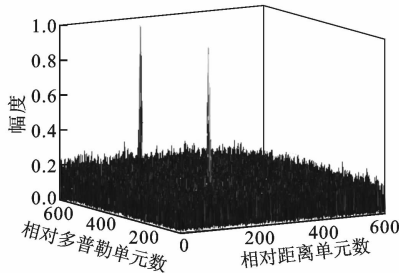


图 3 二阶相位参数估计的 MSE 随信噪比变化的曲线

示。由于本文算法可以在低信噪比条件下估计得到精确的目标运动参数,目标的距离徙动及多普勒扩散得到补偿,从而保证目标信号能量得到有效的积累。



(a) 常规检测



(b) 本文算法检测

图 4 实测数据检测结果

3 结 论

提出一种基于联合循环平稳法与多普勒模糊数

搜索法的多分量 Chirp 信号相位参数估计的算法。多普勒模糊数搜索法消除了 Chirp 信号相位参数取值范围小的缺点,且由于循环平稳法运行在最优性能条件下,从而保证了本文算法可以在低信噪比条件下精确地估计相位参数。另外,本文算法均采用 FFT 算法实现,计算复杂度低。计算机仿真和实测数据处理结果证明了本文算法的有效性。

参考文献:

- [1] 许述文. 窄带、宽带雷达机动目标检测技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 1-3.
- [2] 钱江, 苏军海, 李凉海, 等. 利用 KWT 进行动目标成像的三通道 SAR-GMTI 快速目标运动参数估计 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1660-1667.
QIAN Jiang, SU Junhai, LI Lianghai, et al. Tri-channel SAR-GMTI high-speed target imaging and motion parameter estimation using KWT [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32 (7): 1660-1667.
- [3] LU Xiaolei, XING Mengdao, WANG Chunru, et al. ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(1): 141-153.
- [4] XING Mengdao, SU Junhai, WANG Genyuan, et al. New parameter estimation and detection algorithm for high speed small target [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 214-224.
- [5] IKRAM M Z, ABED-MERAİM K, HUA Yingbo, et al. Estimating the parameters of chirp signals: an iterative approach [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(12): 3436-3441.
- [6] BOASHASH B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(4): 519-568.
- [7] DJURIC P M, KAY S M. Parameter estimation of chirp signal [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, 38(12): 2118-2126.
- [8] SCHARF L, TUFTS D. Rank reduction for modeling stationary signals [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1987, 35(3): 350-355.
- [9] PELEG S. Estimation and classification of polynomial-phase signals [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(2): 422-430.
- [10] MORELANDE M R. On the performance of cyclic moments-based parameter estimators of amplitude modulated polynomial phase signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(3): 590-606.
- [11] GARDNER W A, NAPOLITANO A. Cyclostationarity: half a century research [J]. Signal Processing, 2006, 86(4): 639-697.
- [12] 金艳, 姬红兵. 一种基于循环平稳的 Chirp 信号相位参数估计迭代算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 868-871.
JIN Yan, JI Hongbing. A cyclostationarity based iterative algorithm for chirp signal phase parameter estimation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(4): 868-871.
- [13] JIN Yan, JI Hongbing. Improved parameter estimation for Chirp Signals based on cyclostationarity [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 17(2): 309-313.
- [14] SU Junhai, XING Mengdao, WANG Genyuan, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2010, 4(4): 595-603.

[本刊相关文献链接]

- 吴俊峰, 牟轩沁, 张砚博. 一种快速迭代软阈值稀疏角 CT 重建算法. 2012, 46(12): 24-29.
- 杨旭, 李兵兵, 常义林. 引入拉格朗日算子的纹理深度联合比特分配方法. 2012, 46(12): 42-48.
- 朱磊, 水鹏朗, 章为川, 等. 利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抑制算法. 2012, 46(10): 83-88.
- 谢航, 廖与禾, 林京. 一种含噪声多模态调频调幅信号的提取方法. 2012, 46(7): 93-97.
- 李玉花, 齐春. 利用位置字典对的人脸图像超分辨率方法. 2012, 46(6): 7-11.
- 穆为磊, 高建民, 陈富民, 等. 符合人眼视觉特性的焊缝射线数字图像增强方法. 2012, 46(3): 90-93.
- 蒋舒卉, 钱学明. 一种重要区域重采样的人脸检索方法. 2012, 46(2): 119-123.
- 常国宾, 许江宁, 李安, 等. 迭代无味卡尔曼滤波的目标跟踪算法. 2011, 45(12): 70-74.
- 黄伟平, 徐毓, 王杰. 应用回归分析的数据关联算法. 2011, 45(8): 92-96.
- 李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 2011, 45(4): 60-66.
- 侯云山, 黄建国, 史文涛. 强干扰环境水下运动阵列方位估计的新方法. 2010, 45(12): 71-75.
- 陈志菲, 孙进, 侯宏. 子阵和相位平滑的相位差方向估计方法. 2010, 45(10): 72-76.

(编辑 刘杨)