

# 一种基于自聚焦的交通雷达测速算法

刘 丽 李 勇

(雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学),  
南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

**摘要:**针对一种横向安装的交通监测雷达研究了其用于车辆实时运动测速的信号处理方法。基于逆合成孔径雷达原理建立了雷达回波数学模型,分析了运动目标速度与多普勒参数内在关系,并提出了一种基于自聚焦的目标速度估计算法。该算法采用两步估计来完成速度测量,首先用最小熵检测算法对目标速度进行粗搜索,再用图像偏置法完成目标速度的精确估计。仿真结果验证了算法的有效性,速度测量误差可小于 1 km/h,且运算效率高,满足实时处理要求。

**关键词:**逆合成孔径雷达;参数估计;最小熵;图像偏置

**中图分类号:** TN957      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2013)06-0843-06

## Velocity Estimation Algorithm for Traffic Surveillance Radar Based on Autofocus

*Liu Li, Li Yong*

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics (Nanjing University of Aeronautics & Astronautics) of Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** A real-time velocity measurement method for a transversely-mounted traffic surveillance radar is presented. The mathematic model based on the inverse synthetic aperture radar is developed followed with the internal relation analysis between the speed of the moving vehicle and its Doppler parameters. The improved velocity estimation algorithm mainly involves two processing steps. Firstly, the minimum entropy principles are used to achieve the coarse velocity measurement. Secondly, the more accurate velocity is estimated by using the map drift autofocusing. The simulation results demonstrate the validity and efficiency of the proposed methodology. The speed measurement error is less than 1 km/h which fulfills the requirement of real-time processing.

**Key words:** inverse synthetic aperture radar (ISAR); parameter estimation; minimum entropy; map drift

测速精度高、设备成本低、安装维护方便等优点已成为目前交通测速雷达技术发展的趋势<sup>[1-4]</sup>。传统的交通监测雷达系统是根据多普勒效应实现目标径向速度测量,一部雷达只能测量一个车道车辆的速度(如图 1(a)所示),多车道测量时硬件成

本较高,计算量较大。而本文研究的测速雷达系统明显区别于前者,雷达侧向安装在道路一侧上方(如图 1(b)所示),可同时对穿越波束覆盖范围内的所有车辆进行探测,从而实现一部雷达的多车道同时测量;由于工作在正侧视模式,车辆的运动速

**基金项目:**国家自然科学基金(61301210)资助项目;江苏省高校优势学科建设工程资助项目;航空科学基金(20112052025)资助项目;国防基础科研计划(B2520110008)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费(NS2013023)资助项目。

**收稿日期:** 2013-08-15; **修订日期:** 2013-10-15

**通信作者:** 李勇,男,副教授,1977 年出生, E-mail: limack@nuaa.edu.cn。

度几乎垂直于雷达视线,可直接测出目标的运动速度。该体制测速雷达在工作效率、成本投入、稳定性等方面均有很大的改善,但其速度测量方法和实时信号处理也比前者复杂。

文献[2]利用 DSP 进行信号处理,实现了高精度的雷达测速,但其仍属于传统的多普勒测速雷达,多车道测量时硬件成本较高。文献[3]研究了基于雷达干涉技术的车道和车辆速度检测,虽然能够实现多车道测量,但其目标前向速度是通过测量目标径向速度换算而来的,测速精度很容易受到角度测量误差的影响。文献[4]研究了斜视条件下雷达的速度测量方法。斜视模式增加了系统的复杂度,待测量目标的距离徙动十分显著。为此,该文献引入了逆合成孔径雷达<sup>[4-9]</sup>(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)信号处理中的距离对准方法进行校正,但前向速度本质上仍是通过测量径向速度换算而来。文献[5]同样基于 ISAR 成像原理,在正侧视情况下使用最小熵检测算法来估计不同车道上行驶车辆的速度,该算法采用逐点穷举搜索估计的方法,虽能够进行高精度的速度测量,但运算复杂度很大,对于实时测量多车道多车辆的情况,该检测算法的时效性将大大降低。针对上述问题,本文提出了一种基于自聚焦的目标速度估计算法。该方法适用于正侧视工作模式,对不同车道上车辆的雷达回波信号先应用最小熵检测算法搜索得到速度粗略值,然后用图像偏置算法精确估计出车辆的速度,避免了直接用穷举搜索法的很多重复搜索过程,提高了算法效率。

## 1 信号模型与多普勒参数分析

### 1.1 信号模型

基于自聚焦的交通监测雷达工作几何模型如图 1(b)所示。雷达安装在道路一侧上方的  $h$  处,工作在正侧视模式,阴影部分为雷达波束在地面的覆盖区,区域内有二车道,低速目标  $B$  和高速目标  $C$  分别以速度  $V_B, V_C$  相向运动。由于雷达波束在地面上的足印宽度很小,可近似认为目标通过雷达监测区的速度是不变的。

雷达发射调频连续波信号

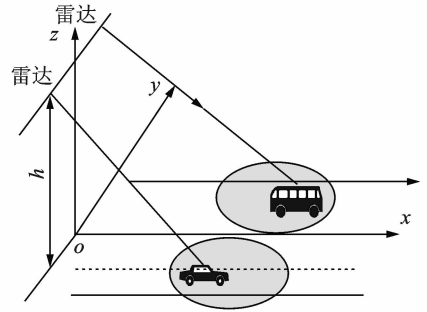
$$S_r(\tau) = \omega_r(\tau) \exp(j2\pi f_0 \tau + j\pi K_r \tau^2) \quad (1)$$

式中: $\tau$  为距离向时间; $\omega_r(\tau)$  为距离窗函数; $f_0$  为信号载频, $K_r$  为调频斜率。

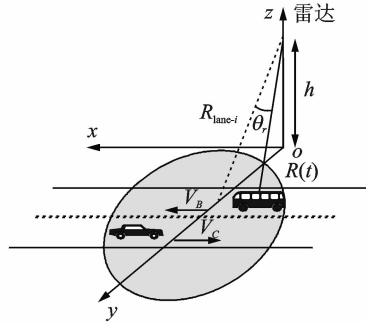
以目标  $B$  为例,雷达接收到的目标回波信号可写成

$$S_r(\tau, t) = A_0 \omega_r(\tau - 2R(t)/c) \exp\{j2\pi f_0(\tau - 2R(t)/c) + j\pi K_r(\tau - 2R(t)/c)^2\} \quad (2)$$

经去调频接收后信号为



(a) 传统的多普勒测速雷达工作几何模型



(b) 基于自聚焦的测速雷达工作几何模型

图 1 交通监测雷达工作几何示意图

$$S_r(\tau, t) = A_0 \omega_r(\tau - 2R(t)/c) \exp\{-j4\pi f_0 R(t)/c\} \exp\{-j4\pi K_r(\tau - 2R_{ref}/c)(R(t) - R_{ref})/c\} \quad (3)$$

式中: $t$  为方位向时间; $c$  为光速; $R(t)$  为目标  $B$  与雷达天线相位中心 (Antenna phase center, APC) 的瞬时距离; $A_0$  为幅度常数, $R_{ref}$  为参考距离。式 (3) 忽略了正侧视和小孔径条件下车辆连续运动带来的多普勒频移项和作差频运算产生的残留相位误差项。经过近似,可以得到目标  $B$  与雷达 APC 的瞬时距离方程为

$$R(t) = \sqrt{R_{lane-i}^2 + V_B^2(t - t_c)^2} \approx R_{lane-i} + \frac{V_B^2(t - t_c)^2}{2R_{lane-i}} \quad (4)$$

式中: $t_c$  为目标  $B$  经过孔径中心的时刻; $R_{lane-i}$  为目标  $B$  的车道捷径,即经过孔径中心时与雷达 APC 的最小斜距。

### 1.2 方位向多普勒参数分析

由图 1(b)所示几何关系可知目标  $B$  的波束指向的瞬时斜视角  $\theta_r$  为

$$\theta_r = \arctan\left(-\frac{V_B(t - t_c)}{R_{lane-i}}\right) \quad (5)$$

则目标  $B$  回波的多普勒中心频率  $f_{dc}$  为

$$f_{dc} = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} \Big|_{t=t_c} = -\frac{2V_B^2(t - t_c)}{\lambda R_{lane-i}} \Big|_{t=t_c} = +\frac{2V_B \sin\theta_r}{\lambda} \Big|_{t=t_c} = \frac{2V_B \sin\theta_{rc}}{\lambda} \quad (6)$$

式中: $\lambda$  为工作波长; $\theta_{rc} = \theta_r|_{t=t_c}$  为目标经过孔径中

心时的波束斜视角。正侧视情况下,  $\theta_{rc}$  近似为 0, 因而  $f_{dc}$  也近似为 0, 与目标速度几乎无关。可见, 在图 1(b) 的工作模式下, 不能通过估计多普勒中心频率来估计目标的运动速度。这也是本文研究的交通监测雷达回波信号处理方法与传统多普勒测速雷达的本质区别。

考虑目标的径向速度越小, 切向速度就越大, 进而分析另外一个重要的多普勒参数, 即多普勒调频斜率。设  $f_{dr}$  为目标 B 雷达回波信号的多普勒调频斜率, 可以推得

$$f_{dr} = \frac{2}{\lambda} \left. \frac{d^2 R(t)}{dt^2} \right|_{t=t_c} = \frac{2V_B^2 \cos^2 \theta_r}{\lambda R_{lane-i}} \Big|_{t=t_c} = \frac{2V_B^2 \cos^2 \theta_{rc}}{\lambda R_{lane-i}} \quad (7)$$

在正侧视情况下,  $\theta_{rc} \approx 0$ , 则  $\cos \theta_{rc} \approx 1$ , 因而  $f_{dr} = \frac{2V_B^2}{\lambda R_{lane-i}}$ , 即对某一车道目标而言, 其雷达回波信号的多普勒调频斜率唯一取决于前向运动速度, 式(7)提供了测速雷达估算目标前向速度的依据<sup>[10-11]</sup>。速度  $V_B$  与  $\lambda, R_{lane-i}, f_{dr}, \theta_{rc}$  有关。其中,  $\lambda, R_{lane-i}, \theta_{rc}$  的误差是可控的, 其影响在算法设计阶段也可忽略。因而, 为了精确测算出  $V_B$ , 必须进一步研究  $f_{dr}$  的精确估计方法。

## 2 基于自聚焦的目标速度估计算法

基于自聚焦的目标速度估计方法分二步来实现目标速度测量, 第一步是用最小熵检测算法进行粗略搜索, 确定目标大致运动速度; 第二步是借助图像偏置算法实现目标速度的精确估计。这样可以提高效率 and 精确度, 算法流程图如图 2 所示。

### 2.1 最小熵检测算法粗略搜索速度

雷达成像中, 原始回波信号经过距离向压缩, 再经过方位压缩就可以得到雷达图像<sup>[12-15]</sup>。对于  $M \times N$  的雷达图像  $\{s_{m,n}\}$ , 其中  $m$  表示方位单元号,  $n$  表示距离单元号。令  $P_{m,n} = \frac{s_{m,n}^2}{\|S_n\|}$ ,  $|S_n| = \sum_{m=1}^M s_{m,n}^2$ , 则图像  $\{s_{m,n}\}_{M \times N}$  的信息熵定义为

$$H_{M \times N} = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P_{m,n} \lg P_{m,n} \quad (8)$$

由信息熵的定义式(8)和图像的物理意义可知, 估计中所用的多普勒调频率越精确, 则图像聚焦越好, 图像的熵值就越小, 当图像完全聚焦时, 图像的信息熵取得最小值。图像的信息熵越小, 所对应的多普勒调频率就越接近真实值的多普勒调频率。由式(7)可知, 速度搜索等价于多普勒调频斜率的搜索。最小熵检测算法粗略搜索过程如下:

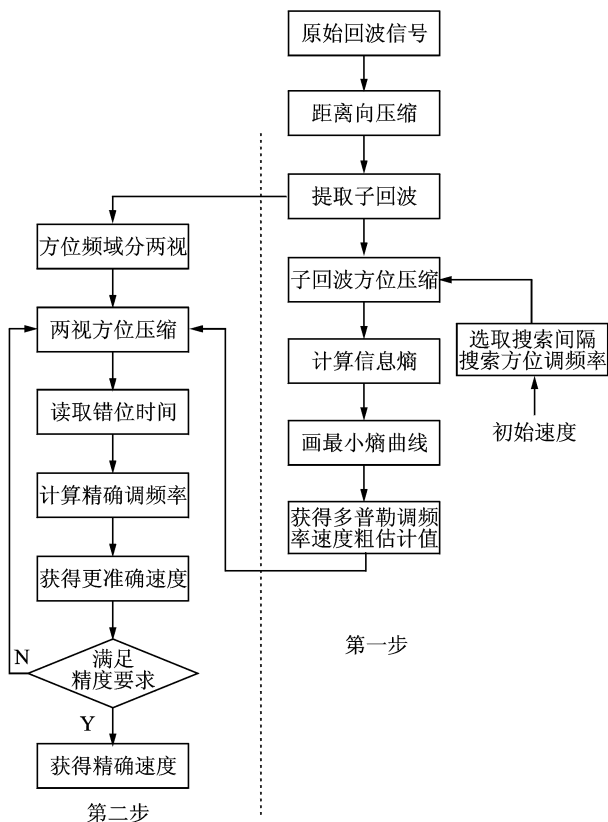


图 2 基于自聚焦的目标速度估计算法流程

(1)对原始回波信号进行距离向压缩。

(2)在距离压缩后的回波数据中提取各移动目标的子回波。

(3)根据已知的先验信息, 在包含目标真实速度的搜索区间内选择合适的速度搜索间隔, 搜索方位向调频斜率  $f'_{dr}$  (搜索间隔的选取应根据工程实践确定), 并用相应的搜索值  $f'_{dr}$  对各子回波进行方位向压缩。

(4)对每一次方位向压缩后的目标子回波信号  $X_m(n)$  求其相应的信息熵值, 形成一系列离散点。  $X_m(n)$  代表某一目标子回波中某一距离门上的方位信号, 其中  $n=1, \dots, N_a; m=1, \dots, M; N_a$  为方位向单元数目;  $M$  为距离门个数。

(5)利用上面的离散点形成曲线, 曲线最小值处所对应的调频斜率以及目标移动速度即为粗略搜索结果。将该步输出的粗略搜索值作为图像偏置法的初始参考值。

### 2.2 图像偏置算法精确估计速度

图像偏置算法把子回波信号从方位向频域中间分成两个子孔径, 即分成两视, 频谱低端部分为第 1 视, 频谱高端部分为第 2 视。方位调频率误差会造成方位压缩中两个方位视数之间的方位向错

位,这种错位可以通过对处理后的数据进行测量得到。这种利用方位向两视之间的错位来进行多普勒参数估计的方法就是图像偏置算法。

令  $f_{dr}$  为数据的实际调频率,  $f_{drmf}$  为方位向匹配滤波器的调频率,  $\Delta f_a$  是两视数据中心处的频率间隔, 则视 2 相对于视 1 的方位向错位时间  $\Delta\eta$  与方位调频率误差  $\Delta f_{dr}$  之间的关系为

$$\Delta\eta = -\Delta f_a \left( \frac{1}{f_{dr}} - \frac{1}{f_{drmf}} \right) \quad (9)$$

由于  $f_{drmf} = f_{dr} + \Delta f_{dr}$ , 并且认为相比于  $f_{drmf}$  和  $\Delta f_a$ ,  $\Delta f_{dr}$  很小, 可以忽略不计, 代入上式可得

$$\Delta f_{dr} = -\frac{f_{drmf}(f_{drmf} - \Delta f_{dr})}{\Delta f_a} \Delta\eta \approx -\frac{f_{drmf}^2}{\Delta f_a} \Delta\eta \quad (10)$$

图像偏置算法精确估计速度实现步骤如下:

(1) 将最小熵检测算法得到的粗略搜索值作为参考调频率  $f_{drmf}$ , 把经过距离压缩后分离出来的子目标回波信号在方位频域分成两视;

(2) 利用调频率为  $f_{drmf}$  的匹配滤波器分别对两视数据进行方位向压缩, 得到两视之间的错位时间  $\Delta\eta$ ;

(3) 根据式(10)计算得到此时方位调频率的误差  $\Delta f_{dr}$ , 进而得到数据的实际调频率  $f_{dr}$ , 最后根据式(7)反演得到目标的准确速度。实际估计中由于存在参数舍入误差和读图误差, 可以将估计结果作为新的速度搜索中心反复迭代几次, 获得更精确的目标速度值。

### 3 仿真结果与分析

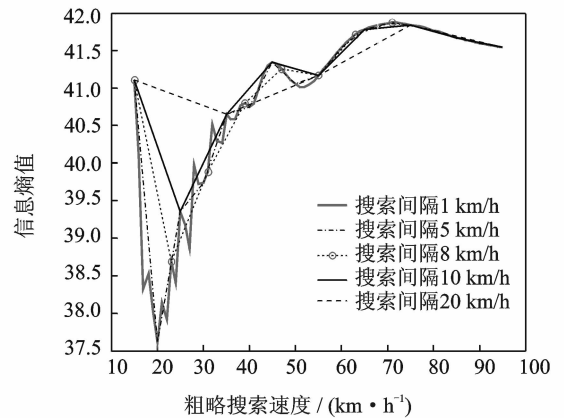
为了验证本文所研究算法的有效性, 以图 1(b) 所示的工作几何模型为基础, 对仿真车辆目标的模拟雷达回波信号进行了处理和分析。每次均设计低速和高速二个车辆目标在不同的车道上反向运动, 其中 B 目标代表低速的客车, C 目标代表高速的小汽车。交通监测雷达系统仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

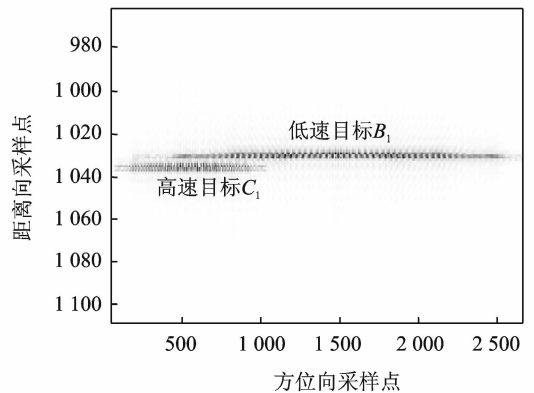
参数	数值
载频/GHz	2
脉冲重复频率 PRF/Hz	1 024
信号带宽/MHz	80
采样频率/MHz	100
雷达高度/m	10
斜视角	正侧视
波束宽度/(°)	40
中心斜距/m	14
监测场景大小/m×m	10×10

图 3(a) 给出了目标  $B_1$  (20 km/h) 在 5 种搜索间隔 (1, 5, 8, 10, 20 km/h) 下的粗搜索拟合曲线。可见, 在最小熵检测算法粗略搜索中, 搜索间隔过小虽可以提高估计精度, 但运算量显著增大, 会导致不必要的运算负荷开支; 搜索间隔过大, 会导致采样过于稀疏, 拟合出的曲线无法正确反映出目标真实速度的区间。因此, 搜索间隔的选取要兼顾算法精度和效率。合理折中参数估计精度和运算量, 最终确定选取 8 km/h 为搜索间隔。

图 3(b) 为高、低速二个目标进行距离压缩后的结果, 可以通过加窗处理取出不同的目标, 然后用最小熵检测算法粗略估计出各目标的速度, 为使用图像偏置算法精确估计目标速度做准备。



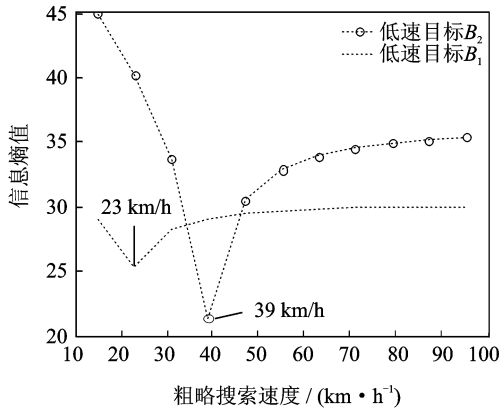
(a) 不同搜索间隔情况下的最小熵曲线



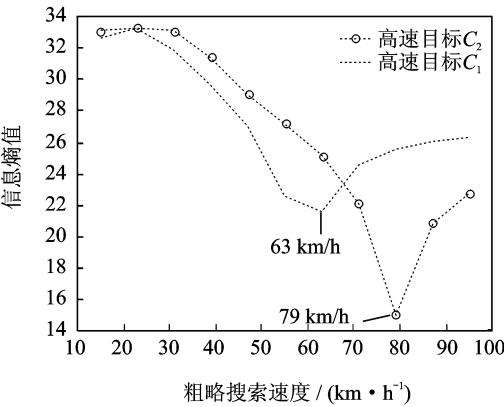
(b) 距离压缩后的回波图像

图 3 最小熵检测算法搜索间隔曲线拟合

用最小熵检测算法粗略搜索速度的结果如图 4 所示。通过图 4 的仿真结果可以看出, 低速目标  $B_1$  及  $B_2$  速度粗搜索值分别为 23, 39 km/h, 接近理论值 20, 40 km/h; 目标  $C_1$  及  $C_2$  速度粗搜索值分别为 63, 79 km/h, 接近理论值 60, 80 km/h。可见, 利用最小熵检测算法可以粗略地估计出移动目标的速度, 验证了本文所研究算法的第一步。下一

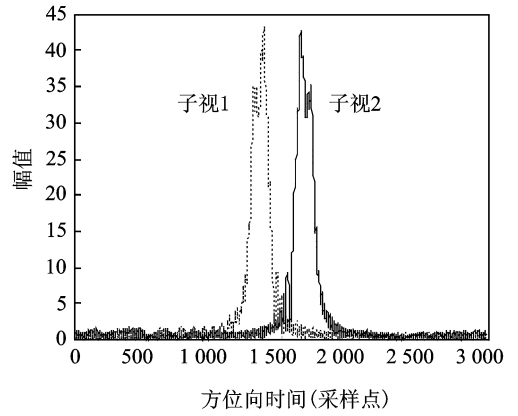


(a) 低速目标B组的最小熵曲线

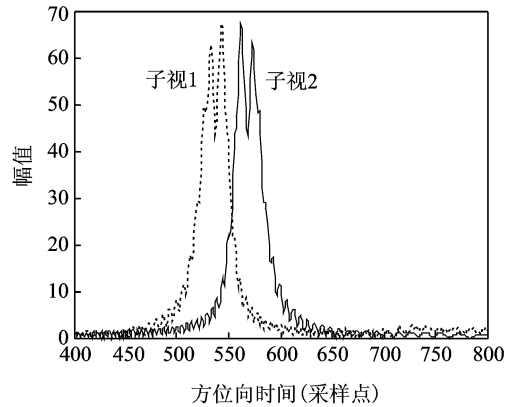


(b) 高速目标C组的最小熵曲线

图 4 速度粗略搜索最小熵拟合曲线



(a) 低速目标B1的图像偏置曲线



(b) 高速目标C1的图像偏置曲线

图 5 速度精确估计图像偏置曲线

步是以速度粗搜索值为搜索中心通过图像偏置算法得到各目标速度的精确估计值。

图像偏置算法得到目标的各视偏移如图 5 所示,反映出调频率的失配。多普勒频谱被分为不相交的两部分,每视覆盖一半频谱,对两视分别进行方位向压缩,调频率失配会造成方位压缩后两个方位视数之间的方位向时间错位。从图 5 中读出两

视的方位向错位时间  $\Delta\eta$  ( $\Delta\eta = \Delta n / PRF$ ,  $\Delta n$  为两视方位采样点数错位)之后,将结果代入式(10),就可以估计出目标的真实调频斜率  $f_{dr}$ ,进而得到目标的精确速度。表 2 给出了目标速度的最终估计结果,并给出了基于自聚焦的目标速度估计算法与直接使用最小熵穷举搜索算法的搜索次数和运算时间比较。

表 2 二组目标速度估计结果及其与直接用穷举搜索算法的效率比较

目标组	速度/(km · h <sup>-1</sup> )	穷举搜索算法		基于自聚焦的算法				
		理论值	粗搜索值	精估计值	搜索次数/次	运行时间/s	搜索次数/次	运行时间/s
低速目标 B组	B <sub>1</sub>	20.0	23.0	20.8	81	2.418	11	0.358
	B <sub>2</sub>	40.0	39.0	39.7				
高速目标 C组	C <sub>1</sub>	60.0	63.0	61.2	81	2.465	11	0.364
	C <sub>2</sub>	80.0	79.0	80.9				

仿真实验的结果表明,基于自聚焦的目标速度估计算法达到 1 km/h 的测速精度平均仅需要搜索 11 次,平均运算时间为 0.362 s,而直接使用最小熵穷举搜索算法为达到相同的精度平均需要搜

索 81 次,平均运算时间为 2.441 s。在多车道的情况下,基于自聚焦的目标速度估计算法的运算量明显减少,提高了效率和精确度,这对于实际交通监测情况下的实时处理很有益。

## 4 结束语

本文提出了一种新的交通监测雷达测速算法,即基于自聚焦的目标速度估计算法,主要用于监测车辆行驶状态、超速判断等。通过计算不同车道上目标车辆回波信号的信息熵和方位向错位时间得到方位调频率的估计值,进而反演得到车辆速度的估计值。仿真结果表明,该算法速度测量误差可小于1 km/h,满足实时处理要求;避免了直接使用经典的穷举搜索算法许多不必要的搜索运算,在粗搜索的基础上通过图像偏置算法直接得到了高精度的速度估计结果,显著降低了运算复杂度,适于多车道且实时处理要求高的场合。但对于开发实际的交通监测雷达系统而言,还存在一些工作必须结合实测数据深入研究,如算法鲁棒性、并行性分析及其优化工作等,后续工作将围绕这些方面进一步展开。

### 参考文献:

- [1] Fisher P D. Improving on police radar[J]. Spectrum, IEEE, 1992, 29(7): 38-43.
- [2] 赵仲郎. 交通测速雷达系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
Zhao Zhonglang. The design and implementation of traffic speed measuring radar system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [3] Martín D F, Partida J G, González P A, et al. Vehicular traffic surveillance and road lane detection using radar interferometry[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions, 2012, 61(3): 959-970.
- [4] Munoz-Ferreras J M, Perez-Matinez F, Calvo-Gallego J, et al. A traffic surveillance system based on a high resolution radar [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2008, 46(6): 1624-1632.
- [5] Tao Manyi, Li Yong. The information extraction algorithm for a traffic detection radar using ISAR principle[C]//2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an: [s. n.], 2009: 705-708.
- [6] 张今培, 李勇. 基于 MCA 的 FMCW 交通雷达信息处理[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(2): 217-222.  
Zhang Jinpei, Li Yong. Information processing of FMCW traffic radar based on MCA[J]. Radar science and technology, 2012, 10(2): 217-222.
- [7] Chen C C, Prickett M J. Principles of inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging[C]//IEEE ASCON Record. Arlington, New York: IEEE, 1980: 340-345.
- [8] Fisher P D, Pyhtila J W. Timing quantization error in lidar speed measurement devices [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions, 2000, 49(1): 276-280.
- [9] 李丽亚, 刘宏伟, 纠博, 等. 斜视干涉逆合成孔径雷达成像算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1290-1294  
Li Liya, Liu Hongwei, Jiu Bo, et al. An interferometric inverse synthetic aperture radar imaging algorithm for squint model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10): 1290-1294.
- [10] Cumming I G, Wong F H. 合成孔径雷达成像-算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: Algorithms and implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [11] 梁毅, 王虹现, 邢孟道, 等. 调频连续波 SAR 信号分析与成像研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1018-1021.  
Liang Yi, Wang Hongxian, Xing Mengdao, et al. The analysis of FMCW SAR signal and image study [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5): 1018-1021.
- [12] 黄立胜, 王贞松. Map Drift 算法在实时成像处理器中的应用[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 138-144.  
Huang Lisheng, Wang Zhensong. The application of map drift algorithms in the real time SAR processor [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 138-144.
- [13] 康雪艳, 杨汝良. 对比度最优与子孔径相关自聚焦算法的比较[J]. 测试技术学报, 2003, 17(1): 19-24.  
Kang Xueyan, Yang Ruliang. Comparison of contrast optimization and map drift autofocus algorithms [J]. Test and Measurement Technology, 2003, 17(1): 19-24.
- [14] 武昕伟, 朱兆达. 一种基于最小熵准则的 SAR 图像自聚焦算法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(7): 437-440.  
Wu Xinwei, Zhu Zhaoda. A novel autofocus algorithm based on minimum entropy criteria for SAR images [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(7): 437-440.
- [15] Zhu Daiyin, Shen Mingwei, Zhu Zhaoda. Some aspects of improving the frequency scaling algorithm for dechirped SAR data processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(6): 1579-1588.