

一种提升汽车雷达方位角分辨率的成像处理方法

王同军*^① 吴 锋^① 徐 伟^②

^①(信阳农林学院信息工程学院 信阳 464000)

^②(内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010051)

摘 要: 针对汽车雷达方位角分辨率受方位向天线长度限制的问题, 该文提出一种基于多波束实孔径雷达图像融合来提升汽车雷达方位角分辨率的成像方法。该方法首先利用相控阵天线波束电扫描来获取前视实孔径雷达图像, 然后根据汽车雷达成像几何关系通过多张多角度实孔径雷达图像相参累加来提升雷达方位角分辨率。计算机仿真结果验证了该方法在提升汽车雷达方位角分辨率的有效性。

关键词: 汽车雷达; 前视成像; 合成孔径; 后向投影算法

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)08-2037-08

DOI: 10.11999/JEIT190618

A Novel Imaging Approach for Improving Azimuth Angular Resolution of Automotive Radars

WANG Tongjun^① WU Feng^① XU Wei^②

^①(College of Information Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China)

^②(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: As the azimuth angular resolution is limited by the antenna length in automotive radars, a novel imaging approach for improving azimuth angular resolution of automotive radars is proposed based on multi-beam real-aperture radar images combination processing. Firstly, the antenna beam of the phased array antenna is electronically scanned to obtain forward-looking real-aperture radar images. Afterwards, multiple real-aperture radar images are coherent accumulated according to the imaging geometry of automotive radar to improve azimuth angular resolution. Simulation results validate the proposed imaging approach to improve the azimuth angular resolution of automotive radar.

Key words: Automotive radars; Forward-looking imaging; Synthetic aperture; Back projection algorithm

1 引言

随着现代工业技术的发展, 交通安全问题已成为世界各国亟需解决的问题, 而交通安全问题主要由于驾驶员们的疏忽大意和无法及时反应所导致。无人驾驶技术通过车载传感系统感知道路环境, 自动控制车辆的转向和速度, 从而使车辆能够安全、可靠地在道路上行驶^[1-3]。前视微波成像雷达是车载传感系统的重要组成部分, 与超声波、摄像头、激光雷达相比, 微波雷达不仅具有高距离分辨率、

高角度分辨率、高速度分辨率, 还具有不受恶劣天气及极端光线影响的优势^[4-9]。

微波前视成像雷达距离向通过宽带信号脉冲压缩技术来获取高距离分辨率, 方位向通过实孔径成像或数字阵列合成处理来获取较高的方位分辨率^[10-13]。受雷达角分辨率瑞利限的约束, 要提高雷达方位角分辨率就需要提高雷达工作频率和雷达方位孔径天线长度, 这些给低成本微波成像雷达的实现带来了较大的工程实现难度^[2]。数字阵列超分辨处理技术也能够提升雷达方位角分辨率, 但阵列超分辨处理技术运算量大一般难以满足汽车雷达实时性的要求。

针对汽车雷达方位角分辨率受方位向天线长度限制的问题, 本文提出一种基于多波束实孔径雷达图像融合来提升汽车雷达方位角分辨率的成像方法, 本方法通过多波束实孔径雷达图像相参合成来提升雷达方位分辨率。从本质上讲, 本文方法利用合成孔径技术提升了雷达方位角分辨率。相比于传

收稿日期: 2019-08-13; 改回日期: 2020-02-23; 网络出版: 2020-03-21

*通信作者: 王同军 xy_wangtj@126.com

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102210450, 182102210533, 182102110160), 河南省高等学校重点科研项目(18B520035)

Foundation Items: The Scientific and Technological Project in Henan Province (172102210450, 182102210533, 182102110160), The Key Scientific Research Projects in Institutions of Henan Higher Learning (18B520035)

统合成孔径处理, 本文方法的处理可以在实孔径雷达图像域进行, 而且雷达数据合成不受单个雷达指向波束条件约束。因此, 本文方法更加有利于提升雷达的方位角分辨率。

本文首先介绍了提升汽车雷达方位角分辨率的成像方式和雷达回波信号模型; 然后根据汽车雷达成像方式和信号模型, 提出了一种提升汽车雷达方位角分辨率的成像方法; 最后通过计算机仿真验证了本文所提方法的准确性。

2 成像方式及回波信号模型

车载微波前视成像雷达的距离向与汽车平台的运动方向一致, 而方位向与汽车平台的运动方向垂直。雷达距离向通过发射大时宽-带宽信号并利用脉冲压缩技术实现距离向的高分辨率, 方位向通常通过实孔径成像或数字阵列合成处理来获取较高的方位分辨率。本文所提车载微波前视成像雷达工作方式如图1所示, 汽车雷达首先通过方位窄波束匀速扫描实现对前方区域的观测, 雷达波束扫描范围为 $\pm\theta_{\max}$ 。雷达方位波束扫描可以通过波束机械扫描和相控阵电扫描实现, 为了实现更加灵活的波束指向, 本文采用相控阵电扫描方式来实现方位波束扫描。

由于汽车雷达最大作用距离一般要小于300 m^[2], 因此通常采用收发分置的连续波雷达工作体制。假设车载毫米波前视成像雷达发射连续波可以写成

$$s(t, \tau) = w_a(\theta_s(t)) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau}{\tau_p}\right] \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi K_r \tau^2) \quad (1)$$

其中, t, τ 分别表示雷达回波信号的慢时间和快时间, $w_a(\cdot)$ 表示水平方向1维天线方向图, $\theta_s(t)$ 表示随慢时间 t 变化的雷达波束指向, τ_p 表示脉冲宽度, f_c 表示雷达载频, K_r 表示线性调频信号的调频率。

如图1所示, 假设车载前视成像雷达在 t 时刻, 点目标 (x, y) 对应的雷达回波可以写成

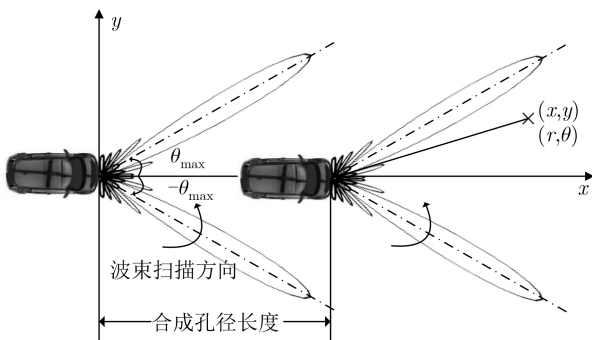


图1 提升方位分辨率的前视成像雷达工作方式示意图

$$s_r(t, \tau) = w_a(\theta_s(t) - \theta(t)) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R(t)/c}{\tau_p}\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_c(\tau - 2R(t)/c) + j\pi K_r(\tau - 2R(t)/c)^2\right] \quad (2)$$

其中,

$$R(t) = \sqrt{x^2 + (y - vt)^2} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{x}{y - vt}\right) \quad (4)$$

其中, c 为光速, v 为汽车前进速度, x, y 分别表示目标的距离和方位位置。连续波体制雷达通常采用去斜接收, 去斜参考信号可以写成

$$s_{\text{ref}}(t, \tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_{\text{ref}}/c}{\tau_{\text{ref}}}\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_c(\tau - 2R_{\text{ref}}/c) + j\pi K_r(\tau - 2R_{\text{ref}}/c)^2\right] \quad (5)$$

此时, 去斜后的雷达回波信号可以写成

$$\begin{aligned} s_{r,1}(t, \tau) &= s_r(t, \tau) \cdot s_{\text{ref}}^*(t, \tau) \\ &= w_a(\theta_s(t) - \theta(t)) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R(t)/c}{\tau_p}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi K_r}{c}(\tau - 2R_{\text{ref}}/c) \cdot \Delta R(t) - j\frac{4\pi f_c}{c} \cdot \Delta R(t) + j\frac{4\pi K_r}{c^2} \Delta R^2(t)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\Delta R(t) = R(t) - R_{\text{ref}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 连续波信号经过去斜处理后, 距离信号为快时间 τ 的1次函数, 利用傅里叶变换即可得到脉冲压缩后sinc状的窄脉冲信号。式(6)第2个相位项中的斜距将随着慢时间 t 变化而变化, 该项可产生多普勒频率, 第3个相位项为去斜线性调频信号特有的残余时频相位(Residual Video Phase, RVP)^[14]。由于傅里叶变换后雷达回波信号在频域, 此时对应的雷达信号4 dB分辨率为 $1/\tau_p$, 利用线性调频信号的时频对应关系, 转化到距离几何3 dB分辨率 ρ_r 可以写成

$$\rho_r = 0.886 \frac{c}{2} \cdot \left(\frac{1}{\tau_p} \cdot \frac{1}{K_r}\right) = 0.886 \frac{c}{2B_r} \quad (8)$$

此外, 雷达的方位角分辨率则由方位向双程天线方向图 $w_a(\theta)$ 决定, 角度分辨率约为双程天线方位图3 dB波束宽度 $\theta_{3\text{ dB}}$ 。假设雷达工作频率为96 GHz, 天线长度为0.3 m, 雷达天线对应的3 dB波束宽度为 0.38° , 则在200 m斜距处转化到垂直于视线方向

的几何分辨率为1.33 m，较差的分辨率在一定程度上限制了前视雷达的应用。

3 成像方法与处理流程

为了提升垂直于视线方向的几何分辨率，这里采用合成孔径技术来提升方位几何分辨率。如图2所示，汽车雷达观测目标的合成孔径长度为 L_s ，整个观测过程对应 N 个采样时刻，每个采样时刻对应的观测角度分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ ，通过这 N 个时刻雷达回波数据相参积累即可实现雷达方位分辨率的改善。这种成像方法可以对前方区域连续成像，这与传统合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的条带模式相似；但对于每个观测目标来说，雷达通过雷达波束扫描实现目标的多角度观测，并通过多角度雷达观测数据相参积累来提升目标的方位几何分辨率，这又与传统SAR的高分辨率聚束模式相似。

以目标观测中心时刻为基准，根据合成孔径原理，目标垂直于雷达中心时刻观测视线方向的几何分辨率 ρ_a 可以表示成

$$\begin{aligned} \rho_a &= 0.886 \frac{\lambda}{2(\theta_N - \theta_1)} \\ &= \frac{0.443\lambda}{\arctan \frac{y}{x - L_s/2} - \arctan \frac{y}{x + L_s/2}} \end{aligned} \quad (9)$$

此时，目标对应的方位角分辨率为 $\rho_\theta = \rho_a/r$ 。

根据上述车载微波前视成像雷达利用多角度合成孔径技术来提升方位角分辨率的工作方式和雷达回波信号模型，图3给出了本文所提成像方法的处理流程图，本成像方法主要包含距离向处理和方位向处理两大处理步骤。其中，通过距离向脉冲压缩处理即可得到实孔径雷达图像，通过方位向多张实孔径雷达图像相参累加即可获得方位角分辨率得到明显提升的高分辨率雷达图像。

(1) 移除RVP相位：对去斜后的雷达回波进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)即可直接得到脉冲压缩的雷达数据。但由于式(6)中的RVP项存在，去斜后的回波脉冲在时间上无法对齐，这给时域加权抑制脉冲压缩旁瓣带来困难。因此，需要通过传递函数 $H_c(f)$ 来移除RVP项，

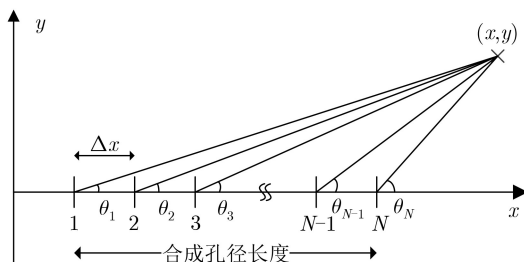


图2 提升方位分辨率的前视成像雷达工作方式示意图

$H_c(f)$ 传递函数的表达式

$$H_c(f) = \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{K_r}\right) \quad (10)$$

其中， f 表示去斜接收后的距离残差频率。

(2) 距离向时域加窗处理：在移除RVP项后，雷达回波数据通过逆快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)转换到时域，此时利用时域加窗函数来抑制距离脉冲压缩信号的旁瓣，时域余弦窗函数为

$$H_w(\tau) = \alpha + (1 - \alpha) \cdot \cos\left(\frac{\tau}{\tau_p} \cdot \pi\right) \quad (11)$$

其中， α 是根据不同的旁瓣抑制要求来调整余弦窗函数的参数。根据式(6)可得，完成距离向脉冲压缩后的实孔径雷达图像可以表示为

$$\begin{aligned} s_{\text{real}}(t, f) &\approx A \cdot w_a(\theta_s(t) - \theta(t)) \\ &\cdot \text{sinc}\left[\frac{1}{k} \cdot \tau_p \left(f + \frac{2K_r}{c} \Delta R(t)\right)\right] \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \cdot \Delta R(t)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中， A 为反映雷达回波强度的复常数， $k > 1$ 为时域加窗处理导致的分辨率展宽系数。从严格意义上讲加窗后脉冲压缩的信号并不是标准的sinc函数，这里利用sinc仅仅来表示目标的分辨率和距离位置。式(2)中的最后一项可由于目标斜距随时间 t 变化产生多普勒频率，本文通过这个时变相位利用合成孔径处理技术来提升车载前视雷达的方位角分辨率。

(3) 成像区域打网格处理：为了实现通过多角度雷达观测数据相参积累来提升目标的方位几何分辨率的目标，这里采用后向投影(Back Projection, BP)处理算法。BP算法首先需要对目标区域进行打网格处理，成像区域打网格处理如图4所示，其中网格的距离方位为 $[R_{\min}, R_{\max}]$ ，方位角度范围是 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ ，网格的距离间隔和方位角度间隔分别

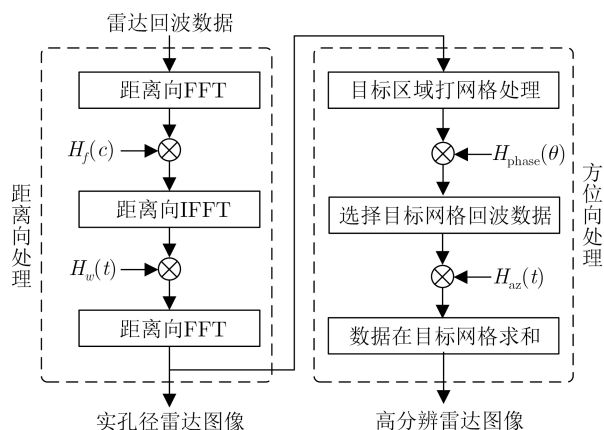


图3 成像处理流程图

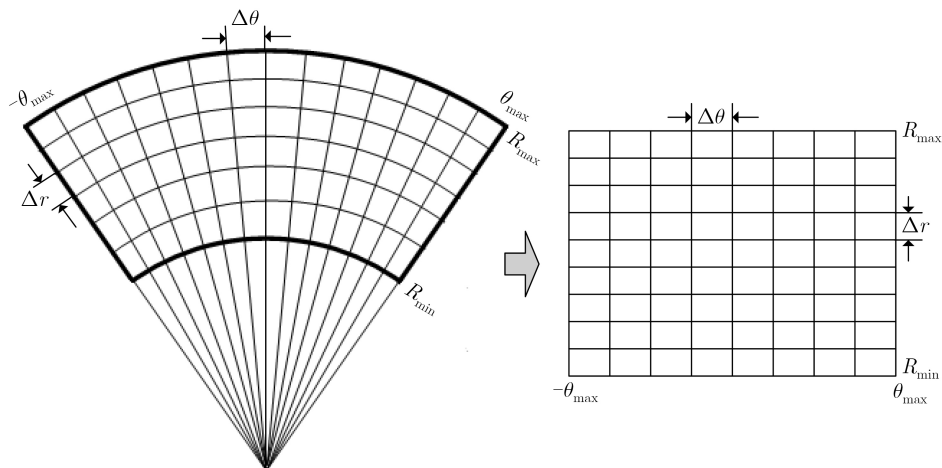


图4 成像区域打网格处理示意图

为 Δr 和 $\Delta\theta$, Δr 和 $\Delta\theta$ 需要小于距离和方位角度的最优分辨率。

(4) 多角度雷达回波数据相位校正: 从前面提到的车载微波前视成像雷达工作方式来看, 雷达通过相控阵波束电扫描来实现对一定角度范围内的目标观测成像。相控阵天线通过移相器和延时线来实现雷达波束电扫描, 此时会引入附加的相位, 这在一定程度上会影响后续多角度雷达观测数据相参积累。因此, 在针对每个网格进行雷达回波数据相参积累之前, 需要对不同角度观测的雷达回波数据进行相位校正如图3所示, 相位校正函数 $H_{\text{phase}}(\theta)$ 可通过暗室数据测量来获取。

(5) 网格内多角度雷达回波相参积累: 针对每个成像网格, 先利用相位补偿函数 $H_{\text{az}}(t)$ 对不同角度观测得到雷达回波数据进行相位补偿, 然后再将雷达回波数据在指定网格内进行累加, 其中相位补偿函数 $H_{\text{az}}(t)$ 可以表示为

$$H_{\text{az}}(t) = \exp \left[j \frac{4\pi f_c}{c} \cdot \Delta R(t) \right] \quad (13)$$

此外, 由于距离向雷达回波数据采样率较为有限, 在选择指定网格雷达回波数据时, 需要进行雷达回波数据的sinc插值或者升采样处理, 从而能够精确完成距离徙动校正处理(Range Cell Migration Correction, RCMC)。在网格内多角度雷达回波数据相参积累过程中, 各个网格的计算相互独立, 这种情况可以采用GPU并行计算提升运算速度^[15-17], 从而满足汽车雷达实时性的需求。

4 成像仿真

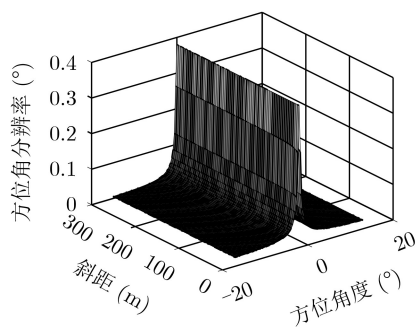
为了验证本文所提方法的有效性, 这里开展点目标仿真试验, 雷达仿真参数如表1所示。根据表1中参数, 可以计算得到方位向单程法向3 dB波束宽度为 0.53° , 双程3 dB波束宽度为 0.38° , 完成整个

方位区域扫描共需要扫描100个波位, 即获取整个方位区域实孔径雷达图像的时间为2.5 ms, 此时对应的方位合成孔径的等效PRF为400 Hz。根据本文所提利用多角度实孔径雷达图像相参合成处理的工作方式和原理, 图5(a)给出了在合成孔径长10 m条件下不同成像区域的方位角分辨率结果, 图5(b)对比了不同合成孔径长度下可以获得的方位角分辨率。从图5中的仿真结果可以看出, 多角度实孔径雷达图像相参积累可以大幅提升车载前视成像雷达的方位角分辨率, 但该方法只能对斜前方区域方位角分辨率改善较为明显, 而对于正前方目标无法提高其方位角分辨率。

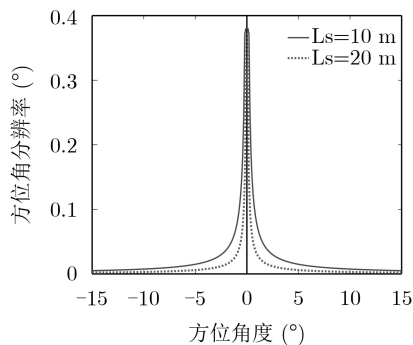
为了进一步验证本文方法的有效性, 这里设置了一个9个点的点阵成像场景目标, 它们之间的几何位置关系如图6所示。图7给出了该点阵目标的实孔径成像结果和多角度相参合成孔径成像的处理结果。从图7中的成像结果看出, 位于方位两侧的6个点目标方位角分辨率得到了十分明显提升, 而正前

表1 车载前视成像雷达仿真参数

参数	数值
雷达载频	96 GHz
方位向天线长度	0.3 m
系统PRF	4000 Hz
脉冲宽度	80 μ s
信号带宽	1 GHz
去斜接收后雷达信号采样率	150 MHz
AD量化位数	12位
方位波束扫描角度范围	$\pm 15^\circ$
雷达作用距离	20~300 m
波束跃度	0.3°
合成孔径长度	10 m
汽车速度	15 m/s



(a) 不同成像区域方位角分辨率



(b) 不同合成孔径条件下的方位角分辨率

图5 方位角分辨率仿真结果

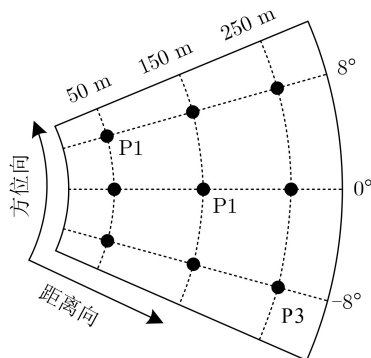


图6 点阵目标场景设置

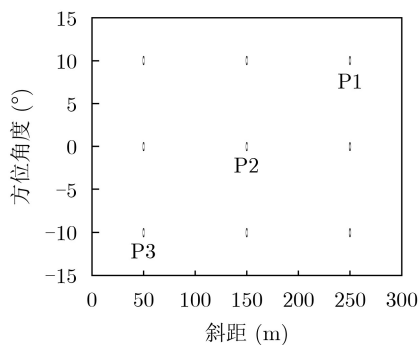
方3个点目标的方位角分辨率基本没有变化，这与图5的分析结果完全一致。

图8、图9和图10分别给出了实孔径10 m车载

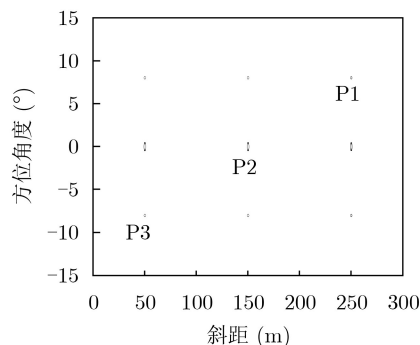
前视雷达图像、15 m合成孔径和5 m合成孔径高分辨率雷达图像中的3个点目标P1, P2和P3的8倍插值后的等高线。从图中的仿真结果可以看出，实孔径雷达图像和合成孔径雷达图像都取得了很好的聚焦效果。此外，实孔径雷达图像中点目标方位向旁瓣较低，这主要由于收发双程天线方向图的缘故。表2给出了实孔径雷达图像、图8和图9点目标的性能测试指标(分辨率、峰值旁瓣比(Peak SideLobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integrated SideLobe Ratio, ISLR))和理论指标，技术指标与理论分析指标基本相一致。

5 结论

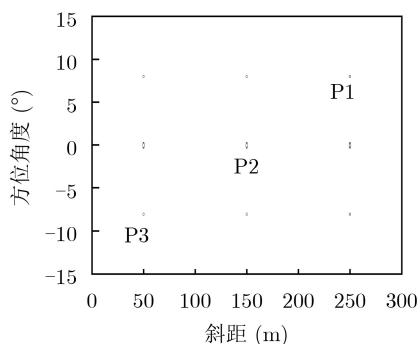
相比于与超声波、摄像头、激光雷达相比等传



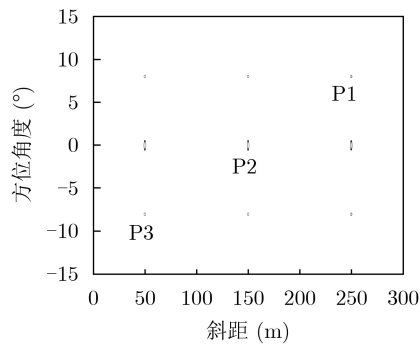
(a) 实孔径雷达图像



(b) 高分辨雷达图像 (10 m合成)



(c) 高分辨雷达图像 (15 m合成孔径)



(d) 高分辨雷达图像 (5 m合成孔径)

图7 点阵目标场景设置

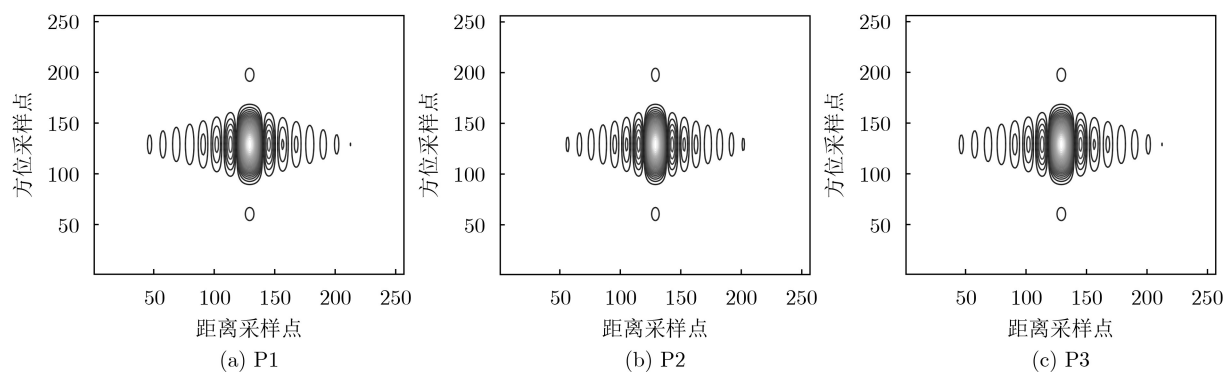


图8 前视成像雷达实孔径点目标插值处理后的等高线(10 m合成孔径)

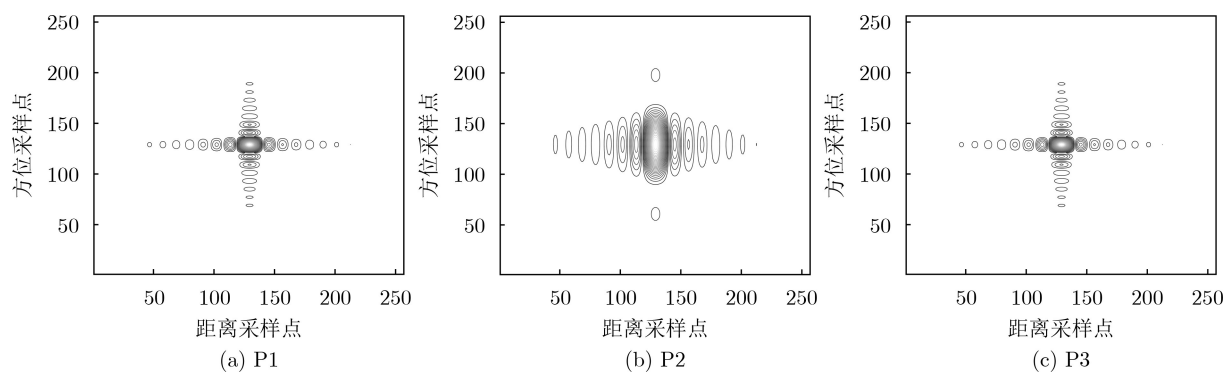


图9 前视成像雷达高分辨合成孔径点目标插值处理后的等高线(15 m合成孔径)

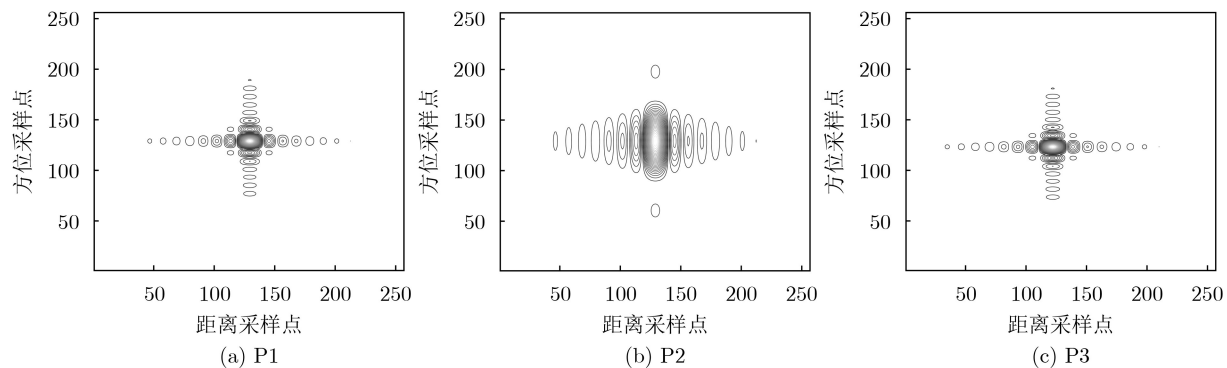


图10 前视成像雷达高分辨合成孔径点目标插值处理后的等高线(5 m合成孔径)

表2 点目标聚焦性能指标

模式	目标	距离向			方位向		
		分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(°)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
实孔径图像	P1	0.09	-13.26	-9.98	0.390	-26.40	-22.24
	P2	0.09	-13.26	-9.98	0.380	-26.52	-22.47
	P3	0.09	-13.26	-9.98	0.390	-26.40	-22.24
实孔径理论值	P1	0.09	-13.26	-9.80	0.380	-26.60	-22.30
	P2	0.09	-13.26	-9.80	0.380	-26.60	-22.30
	P3	0.09	-13.26	-9.80	0.380	-26.60	-22.30
合成处理图像(10 m合成孔径)	P1	0.09	-13.26	-9.98	0.010	-13.18	-9.74
	P2	0.09	-13.26	-9.98	0.390	-26.52	-22.29
	P3	0.09	-13.26	-9.98	0.010	-13.18	-9.74

续表 2

模式	目标	距离向			方位向		
		分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(°)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
合成处理理论值(10 m合成孔径)	P1	0.09	-13.26	-9.80	0.010	-13.26	-9.80
	P2	0.09	-13.26	-9.80	0.390	-26.60	-22.30
	P3	0.09	-13.26	-9.80	0.010	-13.26	-9.80
合成处理图像(15 m合成孔径)	P1	0.09	-13.06	-9.72	0.007	-13.08	-9.44
	P2	0.09	-13.26	-9.98	0.390	-26.52	-22.29
	P3	0.09	-13.06	-9.72	0.007	-13.07	-9.40
合成处理理论值(15 m合成孔径)	P1	0.09	-13.26	-9.80	0.007	-13.26	-9.80
	P2	0.09	-13.26	-9.80	0.390	-26.60	-22.30
	P3	0.09	-13.26	-9.80	0.007	-13.26	-9.80

感器，微波前视雷达具备在恶劣天气以及极端光线条件下高分辨率成像和运动目标检测的能力，因此其将在未来无人驾驶技术上发挥重要作用。毫米波雷达在方位向通常采用实孔径成像方法，雷达方位分辨受到天线孔径长度限制。针对这个问题，本文利用多角度观测合成孔径处理技术来提升方位角分辨率方法，给出了本成像方法详细的成像处理流程，最后通过计算机仿真验证了方法的有效性。从计算机仿真结果可以看出，本文方法可以提升毫米波前视成像雷达方位角分辨率，在两侧区域方位角分辨率提升效果更佳明显。

参 考 文 献

- [1] XU Zhihuo, SHI Quan, SUN Ling, *et al.* Novel orthogonal random phase-coded pulsed radar for automotive application[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(3): 364–375. doi: [10.12000/JR17083](https://doi.org/10.12000/JR17083).
- [2] PATOLE S M, TORLAK M, WANG Dan, *et al.* Automotive radars: A review of signal processing techniques[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34(2): 22–35. doi: [10.1109/MSP.2016.2628914](https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914).
- [3] KRONAUGE M and ROHLING H. New chirp sequence radar waveform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(4): 2870–2877. doi: [10.1109/TAES.2014.120813](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120813).
- [4] TAK J, JEONG E, and CHOI J. Metamaterial absorbers for 24-GHz automotive radar applications[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2017, 31(6): 577–593. doi: [10.1080/09205071.2017.1297257](https://doi.org/10.1080/09205071.2017.1297257).
- [5] GUO Kunyi, HOARE E G, JASTEH D, *et al.* Road edge recognition using the stripe hough transform from millimeter-wave radar images[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 825–833. doi: [10.1109/TITS.2014.2342875](https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2342875).
- [6] MAO Xuesong, INOUE D, MATSUBARA H, *et al.* Demonstration of in-car doppler laser radar at 1.55 μm for range and speed measurement[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2): 599–607. doi: [10.1109/TITS.2012.2230325](https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2230325).
- [7] LEE J E, LIM H S, JEONG S H, *et al.* Enhanced iron-tunnel recognition for automotive radars[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 4412–4418. doi: [10.1109/TVT.2015.2460992](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2460992).
- [8] KELLNER D, BARJENBRUCH M, KLAPPSTEIN J, *et al.* Tracking of extended objects with high-resolution Doppler radar[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(5): 1341–1353. doi: [10.1109/TITS.2015.2501759](https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2501759).
- [9] WANG Xiao, XU Linhai, SUN Hongbin, *et al.* On-road vehicle detection and tracking using MMW radar and monovision fusion[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(7): 2075–2084. doi: [10.1109/TITS.2016.2533542](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2533542).
- [10] WANG H N, HUANG Yingwei, and CHUN S J. Spatial diversity 24-GHz FMCW radar with ground effect compensation for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(2): 965–973. doi: [10.1109/TVT.2016.2565608](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2565608).
- [11] ASKELAND S A and EKMAN T. Tracking with a high-resolution 2D spectral estimation based automotive radar[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(5): 2418–2423. doi: [10.1109/TITS.2015.2407571](https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2407571).
- [12] LEE M S and KIM Y H. Design and performance of a 24-GHz switch-antenna array FMCW radar system for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2290–2297. doi: [10.1109/TVT.2010.2045665](https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2045665).
- [13] HU Chenxi, LIU Yimin, MENG Huadong, *et al.* Randomized switched antenna array FMCW radar for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(8): 3624–3641. doi: [10.1109/TVT.2014.2308895](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2308895).

- [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 169–170.
BAO Zheng, XING Mengdao, and WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 169–170.
- [15] DEVADITHYA S, PEDROSS-ENGEL A, WATTS C M, *et al.* GPU-accelerated enhanced resolution 3-D SAR imaging with dynamic metamaterial antennas[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(12): 5096–5103. doi: [10.1109/TMTT.2017.2766060](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2766060).
- [16] CHANG W Y, WU Mengche, CHANG Yanglang, *et al.* GPU acceleration of adaptive local kriging applied to retrieving slant-range surface motion maps[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(11): 4317–4325. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2871877](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2871877).
- [17] WIJAYASIRI A, BANERJEE T, RANKA S, *et al.* Dynamic data-driven SAR image reconstruction using multiple GPUs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(11): 4326–4338. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2873198](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2873198).
- 王同军: 男, 1985年生, 讲师, 研究方向为交通环境智能感知、高速信息处理、物联网应用.
- 吴 锋: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为信号处理、无线数据通信、物联网技术.
- 徐 伟: 男, 1983年生, 教授, 研究方向为新体制雷达系统、微波遥感应用.
- 责任编辑: 余 蓉