

基于 SystemVue 汽车雷达系统研究

焦安霞

(烟台汽车工程职业学院, 山东 烟台 265500)

摘要: 针对毫米波雷达射频、信号处理以及超分辨测角问题, 提出了一种基于 SystemVue 进行汽车雷达系统设计和信号处理算法设计的方法; 首先, 利用 SystemVue 自带的射频库和通用算法库进行雷达系统设计, 真实模拟了毫米波射频、天线及目标环境的相互影响; 其次, 针对快调频的 FMCW 信号波形, 给出了完整的汽车雷达目标距离、速度和角度的信息处理算法流程; 最后, 针对汽车雷达系统测角精度较低的问题, 提出了基于酉变换 MUSIC 的测角算法, 大大降低了汽车雷达超分辨求角的运算量; 仿真结果表明, 该方法解决了汽车雷达的链路设计、射频指标对雷达信号处理性能影响的评估问题, 更真实、更全面地反映了汽车雷达系统的性能, 为雷达系统的研究提供了有力依据。

关键词: 汽车雷达; SystemVue; 雷达信号处理; U-MUSIC

Research of Automobile Radar System Based on SystemVue

Jiao Anxia

(Yantai Automobile Engineering Professional College, Yantai 265500, China)

Abstract: For the problem of millimeter-wave radar RF, signal processing and super-resolution angle measurement, a method based on SystemVue for designing automotive radar system and signal processing algorithm is proposed. First, based on SystemVue, this paper researchs the automotive radar system, and uses SystemVue's own RF library and general algorithm library to design radar system. It truly simulates the interaction of millimeter-wave RF, antenna and target environment. Secondly, for the fast FM-FMCW signal waveform, a complete flow of information processing algorithm for target distance, speed and angle of automobile radar is presented. Last, in order to solve the problem of small number of reception units in automotive radar system, an improved angle measurement algorithm based on MUSIC is proposed, which greatly reduced the operation amounts of super-resolution angle measurement. The simulation results show that this method can solve the problem of the link design of the automotive radar and the performance influence evaluation of the radio frequency index on the radar signal processing. It reflects the performance of the automotive radar system more realistically and comprehensively, and provides a powerful basis for the research of radar system.

Keywords: automobile radar; systemVue; radar signal processing; U-MUSIC

0 引言

高级辅助驾驶系统 (ADAS) 是目前智能汽车发展的重要方向, 其中汽车雷达在该系统中扮演了重要的角色, 汽车毫米波雷达可以探测前方车辆目标, 并对目标的属性和某些场景进行分类^[1]。汽车雷达可根据探测距离和功能分为: 长距雷达、短距雷达和 BSD 扫描角雷达。

ADAS 工程师根据不同功能和场景应用, 利用毫米波雷达输入信息进行汽车行为控制, 为用户打造稳定、舒适、可靠、可依赖的辅助驾驶功能, 如 ACC、LKA、FCW。汽车雷达传感器能够提供给 ADAS 系统目标的空间位置和目标的类型信息。因此, 汽车雷达系统对目标的距离、速度、方位信息的测量至关重要。

SystemVue 是一款 EDA 软件, 是由德科技公司 (Keysight, 原安捷伦电子测量部) 研发的一款商用软件, 主要用于电子系统设计, 可以完成通信、雷达等电子系统的信号流模块化的仿真设计^[2]。该软件包括丰富的射频模块和信号处

理算法库^[3]。用户也可以根据自己的实际需求进行模块的二次开发, 可以采用 C/C++, 或者采用 MATLAB 进行定制的算法开发。软件使用者可以根据汽车雷达的用途, 设计不同功能的雷达系统, SystemVue 射频电路仿真库包含有通用算法库和汽车雷达仿真库, 主要包括雷达环境、雷达及目标运动平台、收发天线、雷达信号及数据处理。

其中, 雷达环境包括雷达目标仿真, 软件使用者可以根据雷达系统精度设置复杂目标多散射点模型, 进而验证数据处理的聚类和目标识别算法, 汽车雷达库针对行人目标提供了多散射点的行人目标, 软件使用者可以设置行人不同的运动状态, 接收端采集的行人回波数据经过短时傅立叶变换可以提取行人的微多普勒特性, 从而完成行人识别的功能; 汽车雷达库还提供雷达杂波的仿真模块, 用户可以根据所要评估的雷达系统选择不同路况条件 (柏油、水泥、泥土), 并加入雷达的运动平台参数, 生成汽车雷达的检测背景杂波; 此外, 汽车雷达仿真库还提供了产生误报目标, 如下水道井盖、减速带的目标回波生成的解决方案, 真实还原雷达工作的电磁环境。

毫米波雷达射频电路的性能直接影响雷达的探测精度和目标的检测性能, SystemVue 通用算法库提供了频率源模

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-11-01。

作者简介: 焦安霞 (1984-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事雷达信号处理方向的研究。

块, 用户可以根据实际情况设置频率源的相噪, 进而验证毫米波雷达的探测精度及多目标环境的弱目标检测性能, 此外影响毫米波雷达的射频参数还包括: FMCW 线性度、LNA 噪声系数、接收通道间的不一致性等等。

SystemVue 仿真库提供基于汽车雷达信号处理流程仿真解决方案, 主要包括 2-D FFT 算法用于生成目标的距离多普勒分布, 恒虚警处理 (CFAR) 用于多目标检测。用户可以根据系统设计需求采取不同的求角算法。关于雷达数据处理 SystemVue 仿真库提供 IMM-Kalman 滤波模块。关于目标关联 SystemVue 没有提供现成的模块, 雷达系统设计工程师可以根据仿真场景二次开发相关模块完成多目标关联和跟踪处理。

1 汽车雷达仿真框架设计

目前, 汽车雷达系统研发采用芯片商提供的片上集成芯片, 分为射频芯片和数字单片机芯片^[4]。射频芯片^[5]主要采用压控 VCO 产生中频信号, 二次上变频到工作频点 77 GHz, 限于目前毫米波芯片的制作工艺, 早期的汽车雷达采用较长周期的三角连续波体制^[6], 单周期波形达到 ms 量级, 长周期三角波调频连续波进行多目标检测会产生“鬼影”目标, 需要进行额外的数据处理进行假目标剔除。随着毫米波雷达射频制作工艺的提升, 新一代的毫米波雷达采用快调频锯齿波信号 (Fast-Chirp), 雷达相干处理周期发射短周期 FMCW 脉冲串信号, 该种毫米波雷达与军用 PD 雷达体制类似, 快调频 FMCW 信号可以借鉴 PD 雷达信号处理方式, 易采用流水线处理, 目标速度模糊可以采用发射不同重复频率的脉冲串进行求解。因此, 本文中毫米波雷达系统采用快调频 FMCW 信号进行雷达系统设计和信号处理算法设计。

1.1 汽车雷达波形参数选择

本仿真中汽车雷达系统设计采用快调频 FMCW 信号, 发射信号带宽为 200 MHz, 回波信号与本地的发射信号进行去斜处理, 产生频率较低的差频信号, 信号时频分布如图 1 所示, 其中实线为发射信号, 虚线为回波信号。发射信号的表达式为:

$$S(t) = A \cos[2\pi f_0 \times (t - nT) + 0.5ut^2] \quad (1)$$

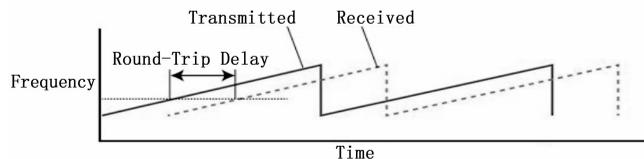


图 1 发射信号和回波信号时频分布图

其中: 连续调频周期 T 为 $51.2 \mu\text{s}$, u 为调频斜率, 信号带宽为 200 MHz, 相干处理周期脉冲个数为 128 个。利用汽车雷达库里的波形模块, 设置波形参数如图 2 所示。

1.2 汽车雷达射频性能仿真

SystemVue 算法库提供了射频器件库^[7], 其中频率源模块可以设置雷达系统频率源相噪等级, 放大器模块可以

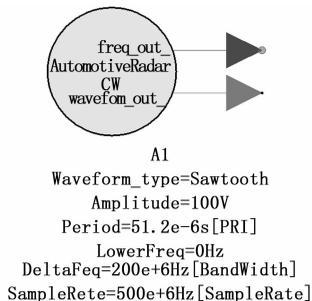


图 2 FMCW 模块参数设置

设置放大器的噪声系数、非线性特性。用户可以根据实际情况设置射频参数, 通过后面的信号处理观测射频指标对雷达分辨力的影响。随着汽车雷达性能的提升, 汽车雷达系统将会变得越来越复杂, 汽车雷达库提供射频多通道参数设置: 幅相不一致以及 IQ 不平衡的参数设置, 根据用户需求可以灵活配置相控阵系统。

1.3 汽车雷达天线性能仿真

汽车雷达库提供了相控阵发射和接收模块, 相控阵模块可以根据用户需求设置天线的形式、天线个数、加窗形式, 并且用户可以根据需求导入天线方向如图 3 所示。

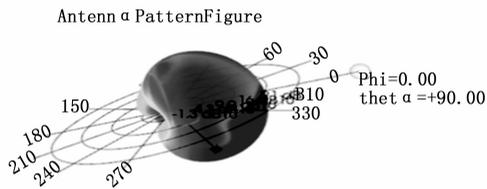


图 3 天线单元方向图

1.4 汽车雷达信号处理

通常长距汽车雷达探测距离^[8]约 200~300 m 即可以满足 ACC 需求, 发射天线口发射的电磁波经空气传播到达目标, 经由目标反射, 返回接收天线, 回波信号通过 4 个单元的接收阵列接收回波信号, 每个通道信号经过 LNA, 回波信号与本地发射信号混频得到差频信号, 得到 IQ 两路的差频信号, 差频信号的最大频率范围不超过 10 MHz。本仿真中 ADC 采样频率 10 MHz 即可以满足条件。经过 ADC 采样得到目标回波的差频信号经过 1 维 FFT 处理得到目标距离信息, 为了减少近距离目标的旁瓣影响可以进行加窗处理, 目标的距离分辨力会有所恶化。慢时间维信号回波经过第 2 维 FFT 处理得到目标速度信息, 与距离维处理一致, 加窗处理速度分辨力会变差。回波信号经过 2D-FFT 处理可以得到观测区域的目标速度距离多普勒谱, 处理结果如图 4 所示。

雷达回波数据经过脉冲多普勒处理后, 数据进入 CFAR^[9]模块, 由于汽车雷达工作场景杂波和目标非常密集, 为了获得较好的检测性能, 通常采用 OS-CFAR 完成多目标检测。经过恒虚警处理后得到目标距离多普勒谱矩阵位置的序号, 利用 4 个通道存在目标位置的采样数据做

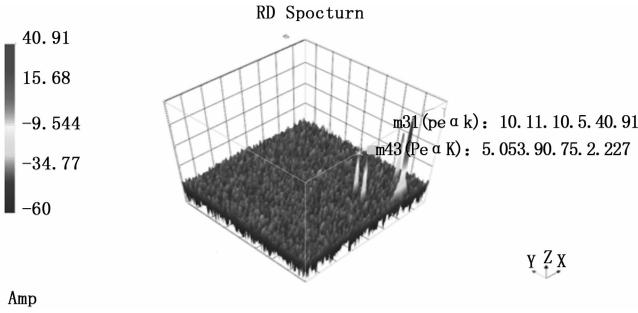


图 4 目标距离速度谱

相差求角，这样就可以获取目标的角度信息，其处理流程如图 5 所示。

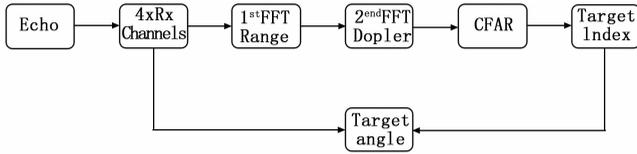


图 5 信号处理流程

2 汽车雷达超分辨算法改进

限于成本的约束，目前汽车雷达通常只有 4 个接收通道，因此汽车雷达无法采用类似军用雷达的和差测角技术，而是主要采用相差测角的方式来完成角度测量，当雷达距离分辨力不高的情况下，该算法可以满足一般场景的需求，而当目标落入相同距离和多普勒门情况，相差求角方法将会失效。对于较高分辨雷达，高密度目标场景不同散射点落入同一个距离和多普勒门的概率较高，为了在空间区分不同散射点，通常采用超分辨算法^[10]，如 MUSIC、ES-PRIT 或其算法改进。

由于波束形成受限于阵列长度，基于波束形成的非参数化的波达角估计分辨率受限于瑞利极限。超瑞利极限的方法称为超分辨方法，最早的超分辨算法是著名的 MUSIC 和 ESPRIT 算法，这两种算法属于特征结构的子空间方法。子空间方法建立在传感器个数比信源个数多的基础上，通过对回波快拍数据协方差数据进行特征值或奇异值分解，则目标的信号分量一定位于一个低秩的子空间。在特定条件下，这个子空间将确定信号的波达方向，由于线性空间的概念引入角度估计中，子空间算法实现了角度估计分辨率的突破。汽车雷达通常单元个数比较少，因此可以分辨的目标有限。汽车雷达设计者应根据雷达不同用途，平衡雷达带宽、角度分辨力、天线单元个数的参数选取。

在实际处理中，得到的数据是在有限的时间范围内的有限快拍，在这段时间内认为空间源信号的方位不发生变化，空间源信号的包络随时间变化满足平稳随机过程，其统计特性不随时间变化。此外，阵列信号处理算法需要知道入射信号的源数，实际当中信源个数往往未知，然后再估计信源的方向。汽车雷达的快拍信号是经过距离多普勒处理之后的峰值数据，通常同一个距离多普勒门的信源较

少，可以直接根据数据协方差较大的特征值个数判断信源数，经过速度距离处理后的数据的 SNR 较高，因此估计的目标的信源个数比较准确。

此外，超分辨算法需要经过特征值分解及角度搜索扫描，由于限于汽车雷达 DSP 处理能力，因此需对超分辨算法进行变换，将信号的复数数据经过矩阵变换转化为实数，因此数据协方差数据特征值分解转换为实数特征值分解，复数角度搜索转换为实数角度搜索，大大减少了数据的存储和处理负担。

首先给出经典谱 MUSIC 估计公式：

$$P(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^M |e_i^H a(\theta)|^2} \quad (2)$$

其中： e_i 为量测数据特征向量， $a(\theta)$ 为角度搜索向量。

通常超分辨算法需要对快拍协方差数据求逆运算，然而汽车雷达的信号处理芯片处理能力较差，因此，需要对超分辨算法进行改进以降低求角算法的运算量。本文提出采用酉矩阵变换 MUSIC 算法进行改进，具体方法如下：

1) 构造 U 矩阵：

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I & J \\ jJ & -jI \end{bmatrix} \quad (3)$$

天线单元数为奇数，

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I & O & J \\ O^r & \sqrt{2} & O^r \\ jJ & O & -jI \end{bmatrix} \quad (4)$$

天线单元数为偶数。

2) 构造角度扫描向量：

$$a'(\theta) = U_a(\theta) \quad (5)$$

$$a(\theta) = [1, e^{j\varphi(\theta)}, e^{j2\varphi(\theta)}, \dots, e^{j(M-1)\varphi(\theta)}]^T \quad (6)$$

$$= e^{-j(M-1)\varphi(\theta)/2} a(\theta) = [e^{-j(M-1)\varphi(\theta)/2}, \dots, e^{-j(1/2)\varphi(\theta)}, e^{j(1/2)\varphi(\theta)}, \dots, e^{j(M-1)\varphi(\theta)/2}]^T \quad (7)$$

因此得到扫描向量表达式为：

$$a'(\theta) = \sqrt{2} \left[\cos\left(\frac{M-1}{2}\varphi(\theta)\right), \dots, \cos\left(\frac{1}{2}\varphi(\theta)\right), \sin\left(\frac{1}{2}\varphi(\theta)\right), \dots, \sin\left(\frac{M-1}{2}\varphi(\theta)\right) \right]^T \quad (8)$$

3) 由于 $e_i = U^H e'_i$ ，所以空间谱估计表达式为：

$$P(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^M |e_i^T a'(\theta)|^2} \quad (9)$$

可见，采用酉变换 MUSIC 算法重构快拍协方差数据，将快拍协方差转变为实数矩阵，从而将求逆运算和角度搜索简化为实数运算，因此将大大降低汽车雷达超分辨求角的运算量。

本文使用 SystemVue 里面的 MatlabScript 模块嵌入酉变换 MUSIC 算法来实现，得到空间谱估计结果如图 6 所示。

3 仿真结果分析

本文采用的基于 SystemVue 汽车雷达系统的仿真步骤

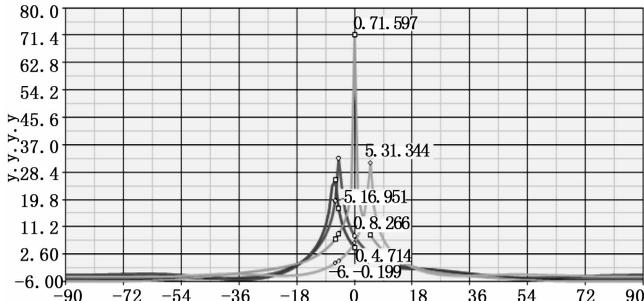


图 6 目标角度

如下：

1) 构建雷达传感器平台参数，设置汽车雷达车载平台信息，初始坐标、初始速度、加速度信息。构建被探测目标的 RCS 散射点分布，目标初始坐标、速度、加速度信息，用也可以根据实际需求控制平台横滚，纵滚，方位角度控制平台和目标做复杂运动，或通过文件形式导入目标运动轨迹；

2) 构建目标相对于天线位置关系，该仿真流程主要是计算目标相对于天线阵面的角度关系，雷达坐标系下可以输出目标相对于雷达的方位角以及俯仰角；

3) 构建发射波形以及发射参数通道设置，用可以根据不同的仿真条件设置波形的发射周期，脉宽，线型调频斜率。发射射频通道可以采用单通道发射，多通道发射或者不同通道分时发射；

4) 设置发射天线参数，包括天线单元个数，天线单元间距，发射接收天线根据目标的方位和俯仰角度以及平台与目标的相对位置和运动关系生成目标回波数据；

5) 接收通道采用多通道接收通道，可以根据求角精度配置接收单元的个数，设置低噪声放大器参数，包括：LNA 的噪声系数以及放大器线型度设置，根据波形的工作带宽和滤波器参数加入通道噪声；根据通道不一致性配置不同通道的幅度误差、相位误差，以及各自通道 IQ 不平衡参数。

6) 设置频率相噪参数，将回波信号与本地信号进行去斜处理，通过 ADC 模块进行数字化，设置 ADC 采样频率，量化位数，峰峰值等参数，将数字化的回波数据进行信号处理，根据不同处理进行不同的加窗处理，完成速度距离频谱估计；对距离维数据做 CFAR 检测，记录所有目标的采样点序号，将所有通道下的目标复数数据分组存储，利用该数据做超分辨率处理。

7) 利用目标分组的通道数据做求角运算，按照第 2 节的算法对矩阵进行酉变换处理，并对酉变换后的实数数据进行协方差奇异值分解，根据奇异值大小确定目标的个数，利用实数扫描矩阵求得目标空间频谱，提取峰值点的角度信息，完整提取目标距离、速度、方位信息。

通过以上流程，基于 SystemVue 可以完成汽车雷达整系统的设计，包括雷达波形生成，射频器件仿真，雷达天线，雷达电磁环境模拟以及雷达信号处理。根据仿真预设

的目标空间信息，通过信号处理抽取了目标的距离、速度及角度信息。根据表 1 可以对比雷达测量值与真值的差别，进而可以估计雷达的测量精度。

表 1 目标真值与测量值对比

Item	True Value	Measure Value
Range/m	10,60.21,60.21,90.55	10.5,60.75,60.75,90.75
Velocity/(m/s)	10,14.95,3.99,4.97	10.11,14.86,3.86,5.05
Angle/Degree	0,4.76,-4.76,-6.34	0,5,-5,-6

4 结论

本文基于 SystemVue 实现了汽车雷达系统的模拟仿真，并给出了针对汽车雷达目标信息提取的完整解决方案。本文利用 SystemVue 汽车雷达仿真库完成了包括雷达射频和信号处理的系统性能评估，与单纯的信号处理仿真相比，本文考虑了所有可能影响雷达性能的因素，如射频、雷达工作的电磁环境。本文解决方案更真实、更全面地反映了雷达系统的性能。同时，本文针对汽车雷达信号处理芯片处理能力较差的问题，提出了改进的酉变换 MUSIC 测角算法，大大降低了汽车雷达超分辨求角的运算量。

参考文献：

- [1] Alabaster C M. Pulse Doppler radar: principles, technology, applications [M]. SciTech Publishing, Raleigh, NC, 2012.
- [2] Kellner D, Barjenbruch M, Klappstein J, et al. Instantaneous full-motion estimation of arbitrary objects using dual Doppler radar [A]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings [C]. 2014.
- [3] Giubbolini L. Approximate reasoning for obstacle recognition in radar images [M]. TIWRS 2003, Elba Island, Italy.
- [4] Giubbolini L, Sassi G. Approximate reasoning for object recognition in radar images [M]. Atti della "Fondazione Giorgio Ronchi"; Italy, year LIX, 2004, N. 1, 2004.
- [5] Belfiori F, et al. TDMA X-band FMCW MIMO radar for short range surveillance applications [A]. Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation [C]. 2011: 483-487.
- [6] Watanabe M, Akita M, Inaba T. Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Radar and the Fundamental Experiment [J]. IEEJ, 2015, 135 (3): 285-291
- [7] Chavez-Garcia R O. Multiple sensor fusion for detection, classification and tracking of moving objects in driving environments [D]. Universite de Grenoble, 2014.
- [8] Marple S L. Digital spectral analysis with applications [M]. Englewood cliffs. NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [9] Mahafza B R. Radar systems analysis and design using MATLAB [M]. Chapman & Hall/CRC, New York, 2000.
- [10] Huarng K C, Yell C C. A unitary transformation method for angle of arrival estimation [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1991, 39: 975-977.