

测速雷达回波模拟技术研究

唐苗¹, 杨丰茂², 任程², 王亚²

(1. 海装驻北京地区第三军事代表室, 北京 100071;

2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100071)

摘要: 针对测速雷达研发与测试中的回波模拟需求, 开展了测速雷达回波模拟技术研究; 通过对传统雷达回波模拟器在测速雷达应用中的局限性进行分析, 结合车辆目标回波建模与零米目标模拟方法, 设计了适用于测速雷达的回波模拟器系统架构; 该架构经实验验证, 可实现测速雷达回波的高精度模拟, 满足其在研发、生产线测试及现场标定等全周期的应用需求。

关键词: 测速雷达; 回波模拟器; 电磁波; 回波模型; 距离模拟

Research on Echo Simulation Technology for Speed Measurement Radars

TANG Miao¹, YANG Fengmao², REN Cheng², WANG Ya²

(1. The Third Military Representative Office of Haizhuang in Beijing, Beijing 100071, China;

2. Beijing Zhenxing Metrology and Testing Institute, Beijing 100071, China)

Abstract: Research on the echo simulation technology for speed measurement radars was conducted to meet the requirements of radar development and testing. By analyzing the limitations of traditional radar echo simulators in speed radar applications and integrating vehicle target echo modeling with zero-meter target simulation methods, a system architecture of radar echo simulators suitable for speed measurement radars was designed. Experimental results demonstrate that this architecture achieves the high-precision simulation of speed measurement radar echoes, meeting the full-cycle application needs of development, production line testing, and field calibration.

Keywords: speed measurement radar; echo simulator; electromagnetic wave; echo model; distance simulation

0 引言

利用交通测速雷达回波模拟器实现模拟车辆目标回波, 考核验证交通测速雷达功能性能是否满足使用要求, 一方面能够降低研制成本、提高研制效率^[1]; 另一方面可以进行交通测速雷达定期现场测试, 确保设备有效性, 也能够提高现场设备维护和故障诊断的效率^[2]。作为一种仿真装置, 交通测速雷达回波模拟器主要作用是产生符合测试要求的车辆目标回波给雷达, 回波需要调制时延、多普勒频率、功率衰减等信号特性^[3]。

测速雷达在智能交通系统中发挥着关键作用, 其研发与测试过程中需借助回波模拟技术以验证性能、降低成本并提升效率。传统雷达回波模拟器虽在军事与实验室领域应用广泛, 但其在交通测速场景下面临响应速度、动态目标建模及近距离模拟等方面的局限。近年来, 国内外学者围绕雷达模拟技术开展了诸多研究, 包

括基于 FPGA 的信号处理、FMCW 雷达模型构建以及目标回波模拟方法等, 但针对交通测速雷达的全周期、高精度回波模拟系统研究仍显不足。本文针对上述需求, 开展测速雷达回波模拟技术研究, 通过构建车辆目标回波模型、设计零米目标模拟方法, 提出适用于测速雷达的回波模拟器系统架构, 以支持其研发、生产测试及现场标定等全流程应用。

1 研究背景及问题分析

交通测速雷达在实际应用中面临多样化的道路环境挑战, 不同场景对雷达性能提出了差异化要求。在城市道路环境中, 密集的车流、频繁的启停、道路两侧建筑物及桥梁等固定障碍物造成的多径反射, 对雷达的目标分辨与抗干扰能力提出了更高要求。高速公路场景中, 车辆速度高、流量大, 雷达需具备更快的信号处理速度与更宽的动态范围, 同时需应对大型车辆造成的信号遮

收稿日期: 2025-11-11; 修回日期: 2026-01-04。

作者简介: 唐苗(1981-), 男, 硕士, 工程师。

通讯作者: 杨丰茂(1988-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 唐苗, 杨丰茂, 任程, 等. 测速雷达回波模拟技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(4): 115-121.

挡与邻道干扰。山区或弯道路段则因地形起伏、弯道曲率等因素，导致雷达波束覆盖范围受限，目标进入和离开检测区域的时间变短，对雷达的波束指向稳定性与快速捕获能力构成考验。此外，恶劣天气（如雨、雪、雾）及道路表面湿滑导致的信号衰减与杂波增强，进一步增加了测速雷达在实际环境中稳定运行的难度。因此，针对不同应用场景开展有针对性的回波模拟与性能验证，对提升交通测速雷达的环境适应性与可靠性具有重要意义。

交通测速雷达回波模拟器与传统雷达回波模拟器在应用场景、技术要求和功能实现上存在显著差异，主要体现在以下方面：

1) 应用场景适配性差异。传统雷达回波模拟器主要用于军事训练、武器研制或实验室研发，强调复杂电磁环境模拟（如电子对抗、多频段干扰）及宽频信号覆盖能力，需应对海杂波、气象杂波、箔条干扰及电子对抗（ECM）等复杂电磁环境，杂波统计模型复杂（如 K 分布）^[4]。交通测速雷达回波模拟器需模拟道路环境中的车辆目标动态场景，由于目标距离较近需要极快的响应速度以及超前模拟，并支持正向/背向车辆捕捉模式^[5]。

2) 核心功能设计差异。传统雷达回波模拟器的关键技术包括支持脉冲压缩、频率捷变等复杂调制信号^[6]，满足雷达抗干扰性能测试，且覆盖更宽频段（如军用雷达频段）^[7]。而交通测速雷达回波模拟器的关键技术包括动态速度曲线模拟：可自定义 -360~360 km/h 范围内的匀加速/减速运动轨迹，实时比对车载雷达测速误差，具有相参信号生成能力等^[8]。

2 车辆目标回波模型

通过构建车辆目标回波模型对车辆的运动进行简化，对整个测速过程的主要因素进行研究，以便验证回波模拟算法是否符合实际，是否可行。交通测速雷达工作场景如图 1 所示。

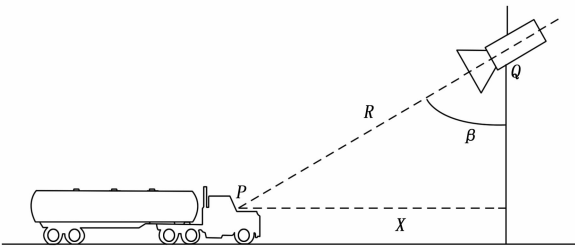


图 1 交通测速雷达工作场景几何关系图

2.1 车辆水平运动速度

测量车辆水平运动速度为交通测速雷达的最终目的，运动速度反映到雷达上由多普勒频移表征^[9]，交通测速雷达回波模拟器通过对多普勒频率的调节模拟目标

的相对运动趋势，其公式为：

$$f_d = f_c * \frac{2v}{c} = 2v/\lambda \quad (1)$$

其中： f_c 为交通测速雷达信号载波频率， λ 为信号载波波长， v 为车辆目标与交通测速雷达的径向相对运动速度，由于交通测速雷达通常以架高形式部署，且车辆目标为水平运动状态^[10]，因此雷达信号模型存在擦地角始终在变化的问题：

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} = 2V\sin\beta/\lambda \quad (2)$$

其中： V 为待测车辆的水平运动速度， β 为雷达波束与车辆前进方向之间的夹角。由于交通测速雷达架设高度相对于测试距离通常较小，因此 $\sin\beta$ 影响通常较小，假设测试距离为 300 m，车辆以 80 km/h 的速度由远及近运动，交通测速雷达架高为 5 m，信号载波频率为 93 GHz，则径向速度 v 与车辆水平运动速度 V 对车辆与雷达距离变化的对比关系如图 2 所示。

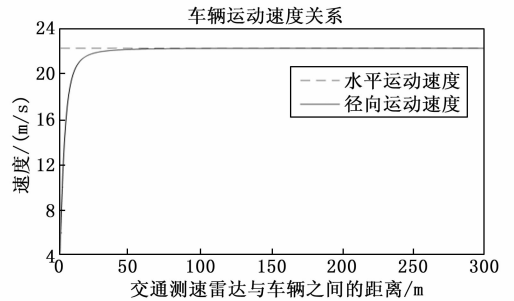


图 2 车辆运动速度变化关系

从图 2 可以看出，车辆距离雷达 32 m 时，车辆与雷达的径向速度和车辆的水平速度误差达到了 1 km/h。随着车速的提高，该距离会更远，因此在车辆速度测试时，雷达的架设高度与安装角度是必须考虑的因素。

2.2 回波时延

回波时延是交通测速雷达回波模拟器需要模拟的重要参数，也是对交通测速雷达工作状态进行测试评判的重要指标，同样由于 β 角的不断变化^[11]，模拟匀速运动的车辆时，回波时延不再均匀变化。设雷达的位置 Q 点与车辆的位置 P 点的水平距离为：

$$x = V_0 * t \quad (3)$$

其中： V_0 为车辆运动速度，这里设为匀速直线运动， t 为运动时间。则雷达的位置 Q 点与车辆的位置 P 点的直线距离为：

$$R = x/\sin\beta \quad (4)$$

则回波延时为：

$$\tau = \frac{2R}{c} = \frac{2V_0 * t}{c * \sin\beta} \quad (5)$$

其中： c 为光速。在上节仿真环境下，需要模拟的回波时延 τ 与运动时间 t 的关系如图 3 所示。

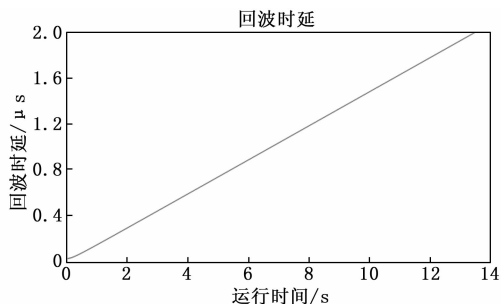


图 3 车辆运动速度变化关系

从仿真图中可以看出, 虽然车辆为匀速直线运动, 但由于存在与径向方向的夹角, 因此回波时延并不是均匀变化的, 需要根据实际运动参数实时计算。

2.3 回波幅度

回波幅度的模拟不直接影响交通测速雷达测速、测距的准确度和精度, 但对交通测速雷达测距能力验证、目标识别与跟踪稳定性具有重要意义。雷达回波幅度主要取决于发射功率、天线增益、传播路径损耗以及目标雷达截面积 (RCS) 等因素, 并通过系统输出端的功放进行动态调节控制。

交通测速雷达通常采用具有较强指向性的天线, 其天线方向图在实际应用中往往受到安装结构、环境遮挡、频率漂移及生产一致性的影响, 并非完全理想的旋转对称分布, 且在不同仰角与方位角上的增益存在一定波动。因此, 在模拟中若仅采用固定或理想化的天线增益值 G , 可能导致回波幅度在高精度测试场景中出现偏差。因此在工程应用中结合具体雷达型号的实测方向图数据或高阶方向图模型, 对增益进行随角度与频率变化的动态修正, 以提升模拟信号的空间一致性与真实性。

雷达目标 (即车辆) 的 RCS 值 σ 受车型、结构、材质、表面涂层及相对于雷达的姿态角等多重因素影响, 变化范围较大。例如, 小型轿车、大型货车、摩托车的 RCS 特征显著不同, 同一车辆在不同观测角度下的 RCS 也会发生剧烈变化。若在模拟中仅采用固定 RCS 值, 将难以全面考核雷达对不同类型目标的检测与跟踪性能。因此, 在回波模拟系统中引入典型车辆目标的 RCS 数据库或统计模型, 支持根据模拟场景动态调整 σ 值, 将显著增强测试的覆盖范围与实际贴合度。

在以上考虑基础上, 距离雷达 R 处的功率密度^[12]可表示为:

$$P_{Dr} = \frac{G(\theta, \varnothing, f) P_t}{4\pi R^2} \quad (6)$$

其中: $G(\theta, \varnothing, f)$ 为与方位角 θ 、俯仰角 \varnothing 及频率 f 相关的实际天线增益函数, P_t 为发射功率, 模拟车辆目标与雷达的距离为 R 时, 接收到的雷达信号功率 $P_{Mr} =$

P_{Dr} , 根据要模拟的距离 R_M 和交通测速雷达与模拟器之间的实际距离 R_0 对接收到的功率信号进行调节。

设 $\Delta R = R_M - R_0$, 则当 $\Delta R > 0$ 时, 即要模拟的距离大于雷达信号实际空间传输距离, 则按如下公式对信号进行衰减:

$$P_{Mr} = \frac{P_{Mr}}{(4\pi)^2 \Delta R^4} \sigma \quad (7)$$

式 (7) 为经典雷达方程, 交通测速雷达的目标信号回波模拟也根据该公式进行功率控制, P_{Mr} 为模拟器输出功率, σ 表示与目标类型和姿态相关的 RCS 值。

同理, 当 $\Delta R < 0$ 时, 需对信号进行增强。该模型在经典雷达方程基础上, 通过引入天线方向图修正与目标 RCS 动态赋值, 使回波幅度模拟更贴近复杂真实的交通场景, 有助于提升测速雷达在车型识别、多目标跟踪及抗干扰等方面的测试评估能力。

2.4 模拟时长

依据雷达天线距离向波束开角以及雷达架设高度、角度, 可以计算得到被测车辆的有效运动距离, 再根据设置的车辆运行速度, 可以计算得到需要模拟的回波时长, 具体几何关系如图 4 所示。

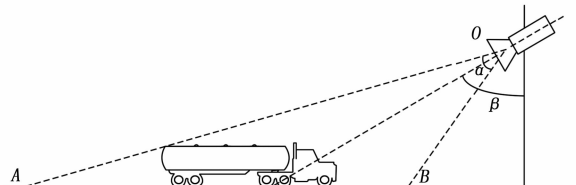


图 4 交通测速雷达观测范围示意图

雷达回波模拟器需要模拟回波信号时长:

$$t_a = \frac{d_{AB}}{V_0} = \frac{H_0 / [\tan(\beta + \frac{\alpha}{2}) - \tan(\beta - \alpha/2)]}{V_0} \quad (8)$$

其中: α 为雷达天线距离向波束开角, β 为雷达架设角度, H_0 为雷达架设高度, d_{AB} 为理论上车辆在波束主瓣覆盖范围内沿水平方向运动的距离, V_0 为预设的车辆匀速直线运动速度。由于雷达架设角度 β 通常较大, 常大于 $\alpha/2$, 故远端 A 点数值上可能为无限远, 则最远距离根据雷达发射功率及接收灵敏度确定。

该模型基于理想的几何关系与匀速直线运动假设, 为模拟器提供了基础的理论时长预测。然而, 在实际交通场景中, 车辆的动态行为与宏观交通环境会显著影响有效测试时长。例如, 在城市拥堵路段, 车辆频繁启停、低速跟驰, 其实际通过波束覆盖区的时间可能远大于模型预测的匀速通行时间; 在高速公路匝道、弯道或交织区, 车辆的运动轨迹偏离直线, 且在雷达波束内的径向速度与停留时间均会发生复杂变化, 导致模型预测出现偏差。此外, 不同交通流量密度下, 目标车辆可能

因前车遮挡而未能完整穿越波束,亦会影响有效检测时长的连续性。

为提高模拟时长模型的场景适应性与预测准确性,建议采用以下方式进行补充验证与优化:首先,通过实地采集典型道路(如城市主干道、高速公路、匝道等)的车辆轨迹、速度剖面及流量数据,对比分析模型预测时长与实际车辆处于有效探测区间时长的差异,并量化不同场景下的误差范围。其次,识别导致误差的主要因素(如非匀速运动、非直线轨迹、交通流干扰等),在此基础上对基础模型进行修正,例如引入基于历史数据的运动模式统计参数。最终,可在回波模拟器中集成多场景参数预设功能,允许用户根据实际测试路段的交通特性选择或自定义运动模型,从而确保模拟时长能更真实地反映复杂交通环境下的测速雷达测试需求。

2.5 回波信号

交通测速雷达通常为宽带调频连续波(FMCW)信号,发射信号^[13]的理想表达式为:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j(2\pi f_c t + \pi k t^2)} = \mu(t) e^{j(2\pi f_c t)} \quad (9)$$

其中: T 为发射信号脉宽, k 为线性调频斜率, f_c 为载波频率,发射信号的复包络为:

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi k t^2} \quad (10)$$

在实际道路环境中,宽带 FMCW 信号在传播和反射过程中易受多径效应、频率选择性衰落以及系统非线性等因素影响,导致回波信号出现频谱展宽、调频特性畸变和相位失真。例如,车辆目标在复杂道路场景中运动时,信号可能经路面、护栏、周围车辆等多条路径反射,形成多径叠加,引起合成信号的幅度起伏与相位跳变,进而影响速度与距离的解算精度。此外,雷达发射机与接收机中的非线性器件可能导致调频斜率 k 随频率或时间发生微小变化,进而影响宽带信号的整体相干性。

为更真实地模拟实际回波信号,在理想模型基础上引入多径信道模型与系统失真函数。假设存在 L 条传播路径,每条路径具有时变衰减系数 $a_l(t)$,时延 $\tau_l(t)$ 和多普勒频移 $f_{d,l}(t)$,则接收到的基带回波信号可扩展为:

$$f_b(t) = \sum_{l=1}^L a_l(t) \mu[t - \tau_l(t)] \cdot e^{j2\pi f_{d,l}(t)[t - \tau_l(t)]} + n(t) \quad (11)$$

其中: $n(t)$ 表示系统噪声与环境杂波。进一步,若考虑发射与接收链路的非线性相位误差 $\phi_n(t)$ 及频率响应 $H(f)$,则回波信号的复包络可修正为:

$$\tilde{\mu}(t) = F^{-1}\{H(f) * F[\mu(t) e^{j\phi_n(t)}]\} \quad (12)$$

在此基础上,回波信号经过正交检波后可分解为:

$$f_1(t) = A\tilde{\mu}(t - \tau) \cos[2\pi f_d(t - \tau) + \varphi(t)] \quad (13)$$

$$f_Q(t) = A\tilde{\mu}(t - \tau) \sin[2\pi f_d(t - \tau) + \varphi(t)] \quad (14)$$

其中: $\varphi(t)$ 代表由多径和系统失真引起的附加相位扰动。

为有效分析与模拟上述宽带信号的时频畸变特性,可采用时频分析工具(如小波变换、分数阶傅里叶变换等)对实测或仿真信号进行特征提取,构建更具一般性的信号模型。此类方法能够刻画信号能量在时频域的分布变化,为模拟器提供更接近真实场景的回波信号生成依据,进而提升测速雷达在复杂电磁环境下的测试可信度与适应性^[14]。

3 功能实现方法

要利用回波模拟器实现交通测速雷达现场测试,必须要抵消掉回波模拟器与交通测速雷达之间的固有传输时延^[15],具体补偿过程如下:

- 1) 系统搭建,设备开机;
- 2) 接收交通测速雷达辐射的信号;
- 3) 在回波模拟器上设定模拟距离 L_1 ,根据设定值进行回波模拟并通过天线空馈至交通测速雷达;
- 4) 接收交通测速雷达终端解算的距离 L_2 ,计算差值 $\Delta L = L_2 - L_1$,由于当前初始化状态未设置时延补偿值,则 ΔL 为交通测速雷达与目标模拟器实际距离;
- 5) 则固有传输时延 $\Delta t = 2 * \Delta L / c = 2 * \tau_1$,将 Δt 补偿到回波模拟器中,可实现固有时延消除,该固有时延主要指由于传播路径引起的固有时延, τ_1 为交通测速雷达与模拟器之间的信号传播时延值。

经过固有时延消除后可以实现 0 m 车辆目标的模拟。根据物理常识可知,要实现 0 m 车辆目标模拟需要将交通测速雷达发射出来的信号,立即返回交通测速雷达接收端才能实现,而模拟器架设位置显然与交通测速雷达存在一定距离,因此需要利用前序数据经过缓存延迟发射,与交通测速雷达当前帧进行混频处理,实现 0 m 车辆目标模拟。数字射频存储器(DRFM)是回波模拟器实现该功能的核心部件,利用其能够进行信号相干存储的功能,基于交通测速雷达辐射信号的规律性,进行上一帧信号的存储、处理、转发,使上一帧信号的回波与交通测速雷达当前帧信号进行混频^[15],实现 0 m 车辆目标模拟,基本原理如图 5 所示。

交通测速雷达发射脉宽为 $P\tau_w$ 的调频连续波脉冲,经过时间延迟后被回波模拟器接收,回波模拟器接收的前几帧信号可用于雷达参数分析,包括脉宽、带宽、重频、频率、幅度等,参数估计后,进行测量目标模拟时延调整,这里按边界指标 0 m 目标模拟进行分析,将 DRFM 存储的信号进行时延、多普勒频移处理,为保证与交通测速雷达实现零时延混频,如图所示,回波模拟器对信号进行的时延值为:

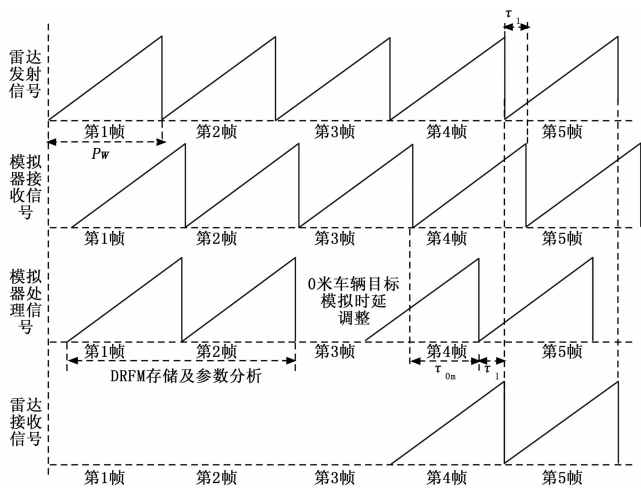


图 5 0 m 车辆目标模拟原理图

$$\tau_{0m} = Pw - \Delta t \tag{15}$$

将 τ_{0m} 值设置到模拟器后，可实现 0 m 目标模拟，进行任意距离模拟时，只需要在 τ_{0m} 基础上增加对应时延值即可。

4 模拟器系统实现

交通测速雷达回波模拟器的系统实现以高精度、高实时性及强场景适应性为核心目标。如图 6 所示，系统采用模块化、可配置的总体架构，通过主控计算机实现与用户的交互，并支持通过线馈（有线连接）或空馈（天线空间辐射）两种方式与待测交通测速雷达进行灵活的电磁信号交互^[16]，以适应实验室、生产线及外场等不同测试环境。

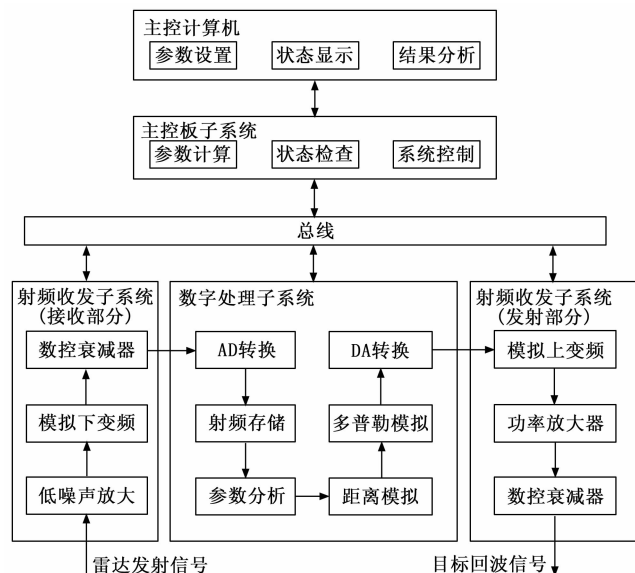


图 6 交通测速雷达回波模拟器系统总体架构

系统主要由以下 5 个子系统协同构成：

1) 主控计算机与显控软件：作为人机交互的核心，提供图形化操作界面，用于模拟场景参数（如目标距

离、速度、运动模式、RCS 模型）的设置、系统工作模式的切换、各子系统状态的实时监控与数据显示，以及测试流程的自动化控制。显控软件内置参数校验与场景数据库，保障测试设置的规范性与可复现性。

2) 主控板子系统：承担系统“中枢神经”的角色。负责解析并分发来自主控计算机的各类控制指令至射频手法、数字处理及频率综合等子单元；同时，轮询收集各子系统的状态信息（如增益、锁相状态、温度、错误代码等），进行统一管理和上报，确保系统协调、稳定运行。

3) 射频收发子系统：负责完成微波信号的变频、放大与调理。接收链路将待测雷达辐射的射频信号（如 Ku/Ka 波段）下变频至中频，以满足后续 ADC 的采样要求；发射链路则将数字处理子系统生成的回波模拟信号从中频上变频至原射频频率，并经过精确的功率控制（模拟距离衰减或增强）后，通过天线或电缆馈送至待测雷达。该子系统通常包含低噪声放大器、滤波器、混频器、可变衰减器及功率放大器等关键器件，其线性度、噪声系数和动态范围直接决定了模拟信号的质量。

4) 数字处理子系统：本系统的核心信号处理单元，其详细架构如图 7 所示。它接收来自射频子系统下变频后的中频信号，经高速 ADC 采样数字化后，送入以“FPGA+DSP”为核心的处理平台^[17]。FPGA 凭借其并行处理和硬件定时的优势，主要负责实时性要求极高的任务，包括：对雷达信号的实时捕获与参数（脉宽、重频、调频斜率等）快速估计^[18]；基于 DRFM 技术对信号样本进行精确的数字延迟与多普勒调制^[19]；依据第 2 章建立的车辆回波模型，实时计算并注入时延、频移及幅度调整量。DSP 则侧重于复杂算法的运算与系统管理，负责接收主控下发的运动模型参数，解算生成距离—速度—时间曲线，并下发给 FPGA 作为实时控制的依据；同时，DSP 还可运行更复杂的回波生成算法（如多目标、微多普勒模拟），并处理 FPGA 上报的状态数据。ADC/DAC 器件则完成模拟域与数字域的高保真转换。

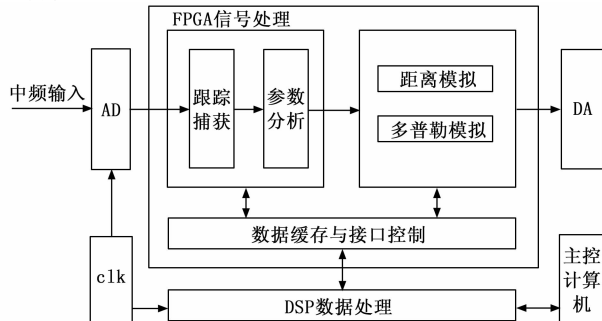


图 7 数字处理子系统结构框图

5) 频率综合子系统: 为整个系统提供高稳定、低相噪的时钟和本振参考信号。它生成射频收发子系统所需的本振信号, 以及数字处理子系统的采样时钟和工作时钟, 是保证全系统信号相参性和处理精度的基础。该系统通常支持内部高稳晶振与外部参考时钟输入, 以满足不同测试场景下对时间同步精度的要求。

系统工作流程可简述为: 主控计算机设定测试场景后, 指令经主控板分发。频率综合子系统为各单元提供同步时钟。雷达辐射信号被射频接收链路捕获并下变频, 由数字处理子系统进行采样、分析、按模型处理后, 生成数字化回波信号, 再经 DAC 转换。射频发射链路将该信号上变频至射频并调节功率后, 发射给待测雷达, 完成一次闭环模拟。

该架构充分考虑了交通测速雷达测试的全周期需求, 通过软硬件协同设计, 实现了回波参数的高精度、可编程控制, 为雷达的研发调试、出厂检验和现场计量提供了稳定可靠的测试平台。

5 系统指标测试

5.1 距离模拟指标测试

利用矢量网络分析仪对交通测速雷达回波模拟器的距离模拟指标进行测试^[20], 系统连接如图 8 所示。

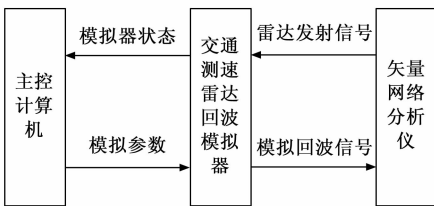


图 8 系统闭环联调测试连接框图

交通测速雷达回波模拟器距离模拟包括 3 种运动模型, 包括固定点距离模拟、匀速直线运动距离模拟、变速直线运动距离模拟。设置 3 种不同运动模型参数进行距离模拟功能验证, 测试结果如表 1 所示, 下图中左侧为设置的距离与矢量网络分析仪测得的模拟距离对比图, 右侧为设置值与模拟值之间的误差。

表 1 测试结果表

序号	设置距离/m	实测距离/m	误差值/mm
1	50	50.006	6
2	78	77.993	7
3	100	100.005	5
4	188	188.002	2
5	256	255.995	5
6	300	300.009	9
误差均值/mm			5.67

从表中可以发现, 模拟误差能够控制在 0.01 m 以下, 完全能够满足交通测速雷达距离模拟的需求。

5.2 多普勒频移模拟指标测试

利用标准信号源、频谱分析仪对交通测速雷达回波模拟器的多普勒频移模拟指标进行测试, 系统连接如图 9 所示。

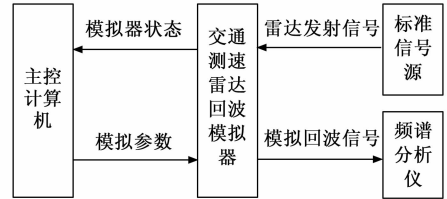


图 9 系统闭环联调测试连接框图

由于宽带信号很难进行频率偏移量的测试, 因此采用单频信号进行多普勒频移测试验证, 即通过标准信号源发射未进行线性调频信号调制的载频信号, 通过模拟器进行多普勒频移模拟, 再利用频谱分析仪验证频移量是否正确。

以 93 GHz 的载频为例进行测试, 经过验证多普勒频移模拟误差小于 100 Hz, 速度模拟误差小于 0.6 km/h, 能够满足交通测速雷达 1 km/h 速度模拟的需求。

6 结束语

本文围绕测速雷达在研发、生产与现场标定中的回波模拟需求, 系统开展了车辆目标回波模拟技术研究。通过分析传统雷达回波模拟器在交通测速应用中的局限性, 结合车辆运动几何模型、回波时延与幅度建模、以及多径与系统失真等因素, 构建了贴近真实交通场景的回波信号模型。在此基础上, 提出了基于数字射频存储器 (DRFM) 的零米目标模拟方法, 有效解决了近距离目标回波模拟的固有延时补偿问题, 并设计了以 FPGA + DSP 为核心的数字处理子系统架构, 实现了高精度、可配置的回波模拟功能。

实验结果表明, 所设计的测速雷达回波模拟器在距离模拟方面误差小于 1 cm, 多普勒频移模拟误差低于 100 Hz, 速度模拟精度满足 1 km/h 的应用要求, 系统具备良好的可靠性与重复性, 能够有效支持测速雷达在固定点、匀速及变速运动等多种场景下的性能验证。

本研究不仅为测速雷达提供了覆盖全生命周期的测试手段, 降低了外场测试成本与复杂度, 也为复杂交通环境下的雷达目标模拟与评估提供了技术参考。未来工作可进一步集成典型道路环境杂波模型、多目标交互模拟以及天气影响仿真等功能, 以增强模拟系统的场景适应性与测试覆盖范围, 推动测速雷达智能化、高可靠化发展。

参考文献:

[1] XU Y H, WANG F Z, LIU Y L, et al. Study on echo fidelity of radar simulator [J]. Applied Mechanics and Ma-

- terials, 2014 (10): 687 - 691.
- [2] 李鑫宇, 吕雅柔, 李媛媛, 等. 雷达回波模拟源发展现状及实现方法研究 [J]. 信息技术与信息化, 2020 (9): 136 - 139.
- [3] 林 杰. 雷达目标模拟器关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [4] ZHANG S, LI Y S, FU G H, et al. Wavelet packet analysis of ground-penetrating radar simulated signal for tunnel cavity fillings [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2018, 11 (6): 62 - 69.
- [5] 赵一鹤. 基于 FPGA 的车载雷达信号处理系统的设计与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [6] 鲁晓帆. FMCW 测距雷达设计与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [7] 张雅萌. 现代雷达信号处理及发展趋势研究 [J]. 科技风, 2019 (36): 66 - 66.
- [8] 何 明. 现代雷达信号处理技术的发展趋势 [J]. 电子世界, 2021 (15): 17 - 18.
- [9] HUANG X, ZHANG L R, ZHANG J, et al. Efficient angular chirp-fourier transform and its application to high-speed target detection [J]. Signal Processing, 2019 (9): 234 - 248.
- [10] ZHAO S, CHEN L. Research on the angle measurement algorithm for low-speed target of radar [C] //International Conference on Mechanical Engineering, Civil Engineering and Material Engineering, 2014: 1 - 8.
- (上接第 114 页)
- [10] GAZI V. Swarm aggregations using artificial potentials and sliding-mode control [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21 (6): 1208 - 1214.
- [11] MABROUK M, MCINNES C. Solving the potential field local minimum problem using internal agent states [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56 (12): 1050 - 1060.
- [12] XIROS I N, AKTOSUN E, LOGHIS C E. Distributed control of autonomous watercraft dynamics using physicomimetics and robust synthesis for disturbance rejection [J]. Franklin Open, 2024, 7100099.
- [13] NING M, YUNFENG C. Consensus-based distributed formation control for coordinated battle system of manned/unmanned aerial vehicles [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2024, 46 (1): 3 - 14.
- [14] YE F, CHEN J, TIAN Y, et al. Cooperative task assignment of a heterogeneous multi-UAV system using an adaptive genetic algorithm [J]. Electronics, 2020, 9 (4): 687.
- [11] LI X L, SUN Z, YI W, et al. Computationally efficient coherent detection and parameter estimation algorithm for maneuvering target [J]. Signal Processing, 2019 (9): 130 - 142.
- [12] 丁鹭飞, 耿富路. 雷达原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [13] 叶凌溯. 高速目标回波模拟与信号处理技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [14] XU Y H, WANG F Z, LIU Y L, et al. Study on echo fidelity of radar simulator [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (687): 687 - 691.
- [15] 宋 玮. FMCW 雷达测距精度及其信号处理技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [16] 孔维太, 全大英, 辛崇丰, 等. 一种基于软件无线电技术的低成本运动目标探测雷达 [J]. 科学技术与工程, 2018 (36): 60 - 66.
- [17] 张海龙. 雷达中频转发模拟器的设计与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [18] 徐启威. 雷达中频目标回波模拟器 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [19] 王 硕, 张景璐, 岳增龙. 基于 FPGA 的 FMCW 雷达收发机系统 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58 (4): 162 - 164.
- [20] PANG C S, LIU S H, HAN Y. High-speed target detection algorithm based on sparse fourier transform [J]. IEEE Access, 2018 (6): 37828 - 37836.
- [15] GENG H, CHEN Z, LIU Z, et al. Consensus of a heterogeneous multi-agent system with input saturation [J]. Neurocomputing, 2015, 166: 382 - 388.
- [16] 莫立坡, 潘婷婷. Markov 切换拓扑下异构多智能体系统的均方一致性 [J]. 中国科学 F 辑, 2016, 46 (11): 1621 - 1632.
- [17] 张 超, 张宏立. 固定和切换拓扑下异构多智能体分组一致性 [J]. 现代电子技术, 2023, 46 (1): 118 - 123.
- [18] 赵 阳. 基于事件触发的异构无人机集群分布式编队控制研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [19] REN W, BEARD R W, MCLAIN T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems [C] //Cooperative Control: A Post-workshop 2003 Block Island Workshop on Cooperative Control. Springer: Berlin, 2004: 171.
- [20] 卫强强. 异构无人机飞控及其一致性编队控制的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [21] 林 凯. 垂起固定翼无人机编队飞行控制方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [22] 程云鹏, 张凯院. 矩阵论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.