Journal of System Simulation

Volume 32 | Issue 11

Article 18

11-17-2020

Echo Simulation and Verification of High Resolution Range Profile

Xiaolin Li

1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute,Shanghai 201109,China; ;2. Shanghai University,Shanghai 200072,China;

Cheng Yu 1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute,Shanghai 201109,China; ;

Haifei Zang 1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute,Shanghai 201109,China; ;

Shuge Wang 1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute,Shanghai 201109,China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Echo Simulation and Verification of High Resolution Range Profile

Abstract

Abstract: In order to realize the echo simulation and verification of high-resolution range profile in laboratory environment, the multi-scattering point model and wideband LFM echo signal model are given, and *the time-domain convolution and high-precision delay realization methods in echo simulation process* are described. According to the different signal bandwidth forms of the tested equipments, a wideband echo simulator is used to realize the corresponding high-resolution range image echo. By comparing with the digital simulation results of the target characteristic modeling software, the fidelity of the high-resolution range echo simulation is verified. Simulation verification is carried out with an aircraft expansion target as the research object, and *the range resolution better than 0.1 m is achieved*.

Keywords

wideband, high-resolution, one-dimensional range profile, high-precision delay

Authors

Xiaolin Li, Cheng Yu, Haifei Zang, Shuge Wang, Liu Li, and Qingqing Yuan

Recommended Citation

Li Xiaolin, Cheng Yu, Zang Haifei, Wang Shuge, Liu Li, Yuan Qingqing. Echo Simulation and Verification of High Resolution Range Profile[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(11): 2218-2225.

第 32 卷第	11	期
2020年11	月	

高分辨距离像回波模拟与验证

李小琳^{1,2},程禹¹,臧海飞¹,汪书阁¹,刘栗¹,袁晴晴¹ (1. 上海机电工程研究所,上海 201109; 2. 上海大学,上海 200072)

摘要:为了在试验室环境下实现对高分辨距离像的回波模拟和成像验证,构建了多散射点和宽带 LFM(Linear Frequency Modulation)回波信号模型,描述了*回波模拟过程中关键的时域卷积和精确延 时实现方法*。根据被试设备不同的信号带宽形式,应用宽带回波模拟器对相应的高分辨距离像回波 进行了射频实现。通过与目标特性建模软件的数字仿真结果进行对比,验证了高分辨距离回波模拟 的逼真度。以某飞机类扩展目标为研究对象进行了仿真验证,*实现了优于0.1 m 的距离分辨率*。 **关键词:** 宽带;高分辨;一维距离像;精确延时

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 11-2218-08 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0463

Echo Simulation and Verification of High Resolution Range Profile

Li Xiaolin^{1,2}, *Cheng Yu*¹, *Zang Haifei*¹, *Wang Shuge*¹, *Liu Li*¹, *Yuan Qingqing*¹ (1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 2. Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to realize the echo simulation and verification of high-resolution range profile in laboratory environment, the multi-scattering point model and wideband LFM echo signal model are given, and *the time-domain convolution and high-precision delay realization methods in echo simulation process* are described. According to the different signal bandwidth forms of the tested equipments, a wideband echo simulator is used to realize the corresponding high-resolution range image echo. By comparing with the digital simulation results of the target characteristic modeling software, the fidelity of the high-resolution range echo simulation is verified. Simulation verification is carried out with an aircraft expansion target as the research object, and *the range resolution better than 0.1 m is achieved*.

Keywords: wideband; high-resolution; one-dimensional range profile; high-precision delay

引言

现代战争对精确识别、精准打击目标提出了愈 来愈高的要求,随着宽带信号处理和雷达成像技术 的发展,高分辨成像能力成为提高弹载雷达制导精 度的一种有效手段。为提高距离向分辨能力,一般 目视线径向上的多个距离分辨单元,雷达目标回波



收稿日期:2020-04-28 修回日期:2020-07-10; 作者简介:李小琳(1979-),男,河南开封,博士 生,高工,研究方向为通信与信息工程、半实物仿 真技术等:程禹(1993-),男,河北,硕士,研究方 向为仿真控制。 采用宽带雷达技术来实现目标在弹表现出多点起 伏的特征,通常称之为高分辨距离像(High Range Resolution Profile, HRRP),或简称为一维距离 像^[1-2]。随着宽带和相控阵雷达技术的进步,各国 对 HRRP 的研究取得了突飞猛进的突破,并大规 模应用于弹载雷达制导系统中^[3-6]。

为了在试验室环境下仿真模拟目标的高分辨 距离像,通常先对所研究目标进行几何建模,再应 用电磁分析方法计算出理论的电磁散射特性,然后 通过宽带雷达回波模拟器实现叠加了目标一维散 射特征信息的回波信号。回波信号通过匹配滤波脉 冲压缩处理后即可获得扩展目标的高分辨距离像[7]。

1 一维距离像原理

雷达分辨率一般指雷达对 2 个相邻目标或强 散射点之间的分辨能力。对于脉冲(或脉冲压缩)雷 达,当第1个目标回波脉冲的后沿与第2个目标回 波脉冲的前沿相接近以致不能区分出是 2 个目标 时,作为可分辨的极限,这个极限间距就是距离分 辨率。

通常情况下,射频信号 s(*t*)的模糊函数取决于 其复包络 u(*t*)的模糊函数,其模糊函数的表达式可 表示为:

$$\chi(\tau, f) = \int_{+\infty}^{\infty} \mathbf{u}(t) \mathbf{u}^*(t+\tau) e^{j2\pi f t} \mathrm{d}t \tag{1}$$

假定 2 个目标散射点在同一角度但处在不同 距离上,在不考虑相邻目标散射点之间的多普勒频 移时,信号的距离模糊函数为:

$$\left|\chi(\tau,0)\right| = \left|\int_{+\infty}^{\infty} \mathbf{u}(t)\mathbf{u}^{*}(t+\tau)\mathrm{d}t\right|$$
(2)

当 $\tau=0$ 时, $|\chi(\tau,0)|$ 有最大值。距离分辨率由 $|\chi(\tau,0)|$ 的大小来衡量。若存在一些非零的 τ 值, 使得 $|\chi(\tau,0)|=|\chi(0,0)|$,那么2个目标是不可分辨 的。当 $\tau \neq 0$ 时, $|\chi(\tau,0)|$ 随 τ 增大而下降的越快, 距离分辨性能越好。若要求系统具有高距离分辨 率,就要选择合适的信号形式使其通过匹配滤波器 (或相关积分器)输出很窄的尖峰。

通常用距离模糊函数和速度模糊函数主瓣的 3 dB 宽度(半功率宽度)来定义信号的固有分辨率, 分别称为名义距离分辨率 τ_{nr} (简称距离分辨率)和 名义速度分辨率 f_{nr}(简称速度分辨率)。名义分辨率 (nominal resolution)只表示主瓣内邻近目标的分辨 能力,而没有考虑旁瓣干扰对目标分辨的影响。有 时为了方便,如遇到 sinc 函数,也采用 4 dB 宽度 来表示名义分辨率。

时延分辨率可表示为:

$$\Delta \tau = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left| \chi(\tau, 0) \right|^2 \mathrm{d}\tau}{\left| \chi(0, 0) \right|^2}$$
(3)

根据 Parseval 定理,式(3)也可表示为:

$$\Delta \tau = 2\pi \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\mathbf{U}(\omega)|^2 \,\mathrm{d}\omega}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |\mathbf{U}(\omega)|^2 \,\mathrm{d}\omega\right]^2} = \frac{1}{B}$$
(4)

式中: *B* 为信号的有效带宽。因此,时延分辨率对 应的距离分辨率Δ*R* 可表示为:

$$\Delta R = \frac{\mathbf{c} \cdot T}{2} = \frac{\mathbf{c}}{2B} \tag{5}$$

式中: c 为光速; *T* 为发射脉冲宽度或脉冲压缩后 的等效脉冲宽度。可见脉冲宽度越窄,即发射信号 的带宽 *B* 越宽, Δ*R* 值越小,距离分辨力就越高。

为了提高雷达识别、跟踪、抗干扰能力,雷达 发射信号采用宽带波形(线性调频、相位编码或合 成宽带)来实现距离高分辨。当发射信号的大带宽 使得距离单元长度远小于目标的径向尺寸时,目标 将连续占据多个距离单元,散射回波形成一幅在雷 达视线上的目标图像,即目标高分辨一维距离像。 如图1所示,HRRP 揭示了目标散射中心沿雷达视 线方向的分布,反映了目标精细的结构特征^[8]。



高分辨距离像是每个距离分辨单元中目标散 射点子回波相干求和的幅值,它表示目标散射中心 的复杂回波在雷达视线上的投影。在多种宽带雷达 目标特征中,由于 HRRP 包含目标尺寸、散射中 心分布等重要的结构特征,且易于获取。因此, HRRP 一直是雷达自动目标识别和精确制导领域 研究的热点^[9-11]。

2 扩展点回波模型

雷达一维距离像是以散射点模型为依据的,它

^{• 2219 •}

第 32 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 11
2020年11月	Journal of System Simulation	Nov., 2020

与目标表面的物理结构特性密切相关,可反映目标 的精细结构特征,从几何的角度看,它描述了目标 的散射中心在径向上的投影。

根据多散射中心理论,光学区复杂目标的后向 散射回波可以等效为目标物体上所有散射中心回 波的合成^[12],所以也可将一维距离像扩展目标的 回波近似为距离向上多个强散射中心对应的子回 波信号的相干合成,如图2所示。





对于发射信号 $S_t(t) = u(t) \cdot \exp(j\phi t)$,在任意时刻 t,设目标散射点 i 到天线相位中心的距离为 R_i ,则该散射点的回波信号经过正交解调后的回波信号数学模型可以表示为:

$$S_{i}(t) = A_{i} u(t - 2R_{i} / c) \times \exp\left[-j\frac{4\pi R_{k}}{\lambda} + j\phi(t - 2R_{i} / c)\right]$$
(6)

式中: *A*_i为接收信号的幅度因子, 它与目标的后向 散射系数及天线方向图有关; c 为光速; λ 为雷达 发射电磁波的波长。

对于宽带雷达,目标由不同的强散射点目标组成的,其回波信号模型为:

$$S_{e}(t) = \sum_{k=1}^{K} A_{k} u(t - 2R_{k} / c) \times \exp\left[-j\frac{4\pi R_{k}}{\lambda} + j\phi(t - 2R_{k} / c)\right]$$
(7)

式中: *K* 为散射点目标的个数; *A_k* 为第 *k* 个散射点 回波的幅度因子; *R_k* 为第 *k* 个散射点到天线相位中 心的距离。 目标回波是雷达照射波束内全部散射点回波 的叠加,它可以看作是雷达发射信号经过一个系统 后的输出。因而目标回波可表示为雷达发射脉冲 s_t(t)与目标回波系统函数(冲击响应序列) h(t)的卷 积,即

$$\mathbf{S}_{e}(t) = \mathbf{s}_{t}(t) \otimes \mathbf{h}(t) \tag{8}$$

式(8)中的系统函数包含了波束照射范围内所 有散射点回波的延迟、幅度以及相位等信息,此时 在某个采样时刻(代表不同的等距离环)的回波系 统函数将是落入该时刻所代表距离门的所有散射 点信息的叠加,它可表示为:

$$\mathbf{h}(t) = \sum_{k=1}^{K} A_k \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_k}{\lambda}\right) \cdot \delta\left(t - t_k\right) \tag{9}$$

式中: t_k为第 k 个散射点回波的延迟。

为了实现距离高分辨,现代雷达多采用大时带 宽积瞬时宽带信号作为发射信号,大时带宽积信号 有多种形式,最常用的是线性调频信号(LFM, Linear Frequency Modulation)。对于由多个散射点 构成的一维扩展点目标,用 R_k 表示某一 PRT 时刻 第 k 个散射点到雷达的距离,当发射信号 $s_t(t)$ 为线 性调频信号,即:

$$s_{t}(t) = \operatorname{rect}[(t - T_{p} / 2) / T_{p}] \times \exp[j2\pi f_{c}(t - T_{p} / 2) + j\pi k(t - T_{p} / 2)^{2}]$$
(10)

式中: T_p 为脉冲宽度; f_c 为载频; k 为调频率; rect[$(t - T_p / 2) / T_p$]为矩形窗函数。

当散射点个数为 k 时,经下变频后的回波信号为:

$$s_{e}(t) = \sum_{k=1}^{K} A_{k} \operatorname{rect}[(t - T_{p} / 2 - 2R_{k} / c)/T_{p}] \times \exp[j2\pi f_{c}(-\frac{2R_{k}}{c}) + j\pi k(t - T_{p} / 2 - \frac{2R_{k}}{c})^{2}] \quad (11)$$

式中: A_k 为第 k个散射点的回波幅度,令时延 $\tau_k = 2R_k / c$,回波信号可表示为:

$$s_{e}(t) = \sum_{k=1}^{K} A_{k} \operatorname{rect}[(t - T_{p} / 2 - \tau_{k}) / T_{p}] \times$$

$$\exp[j2\pi f_{c}(-\tau_{k}) + j\pi k(t - \frac{T_{p}}{2} - \tau_{k})^{2}] =$$

$$\sum_{k=1}^{K} A_{k} \operatorname{rect}[(t - T_{p} / 2 - \tau_{k}) / T_{p}] \times$$

$$\exp[j\pi k(t - T_{p} / 2 - \tau_{k})^{2}] \times \exp[j2\pi f_{c}(-\tau_{k})] (12)$$

http://www.china-simulation.com

序列。

式(12)中仅前 2 项与时间变量 *t* 有关,因此,可以表示为以下卷积形式:

$$s_{e}(t) =$$

$$\operatorname{rect}[(t - T_{p} / 2) / T_{p}] \exp[j\pi k(t - T_{p} / 2)^{2}] \otimes$$

$$\sum_{k=1}^{K} A_{k} \exp[j2\pi f_{c}(-\tau_{k})]\delta(t - \tau_{k}) \qquad (13)$$

$$\Rightarrow s(t) = \operatorname{rect}[(t - T_p / 2) / T_p] \exp[j\pi k(t - T_p / 2)^2],$$

 $h(t) = \sum_{k=1}^{K} A_k \exp[j2\pi f_c(-\tau_k)]\delta(t-\tau_k)$ 。其中, s(t)为 基带发射信号, h(t)为一维扩展点目标的冲激响应

根据一维扩展点目标回波生成原理及一维距 离像成像原理,一维扩展点目标回波生成与验证算 法流程如图 3 所示。





3 高分辨回波模拟实现

根据理论Δ*R*=c/2*B*, 雷达要实现 0.1 m 的距离 向高分辨,其照射信号的瞬时带宽要求不小于 1.5 GHz。相应地,所需模拟的雷达回波信号的瞬 时带宽也应不小于 1.5 GHz。为了实现优于 0.1 m 分辨率的一维距离像目标回波信号模拟,本文研制 了最大瞬时信号带宽可达 2 GHz 的宽带相控阵雷 达目标回波模拟器。

一维距离像回波信号生成原理如图 4 所示。微 波下变频后的中频信号 200~2 200 MHz, 经 ADC 后进行正交混频,由实信号变为复信号,中心频率 下移 1 200 MHz,再经过测频模块测中心频率的频 偏,进行二次下变频,将中心频率移到零频,然后 进行滤波抽取。经距离延时模块后,与多普勒信号 进行混频,根据一维距离像参数 RCS, Delay 进行 时域卷积。最后经内插、IQ 调制的 200~2 200 MHz 信号通过 DA 变换后输出给微波上变频模块。其中, 时域卷积和高精度延时是实现距离高分辨的关键。

3.1 时域卷积

宽带扩展目标回波模拟的关键在于能否高速 有效的完成激励信号与目标散射特性数据的卷积 运算,为满足卷积序列对实时性的要求,通常通 过 FPGA 实现。利用分布式算法和流水线结构在 时域上实现卷积运算,该方法可大大减少卷积运 算的时间。



Fig. 4 Principle block diagram of HRRP echo simulation

http://www.china-simulation.com

• 2221 •

第 32 卷第 11 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 11
2020年11月	Journal of System Simulation	Nov., 2020

卷积运算的实时性和资源占用率是卷积运算 FPGA 实现的 2 项重要指标,为了实现较高的实时 性必然会增加 FPGA 资源占用率,因此在实时性与 资源消耗率之间取得较优的值,即为实现方案的最 佳设计。分布式算法通过缩小规模和提高速度从而 来实现改进。

如图 5 所示,文中时域卷积包含多路复乘模块 和累加模块,将一维距离像中各散射点 RCS 参数 与信号复乘后延时累加。



图 5 时域卷积框图 Fig. 5 Convolution block diagram in time domain

2个散射点的时域卷积在 System Generator 中的仿真结果如图 6 所示。





3.2 高精度延时

宽带模拟器实现距离延时的方法分为2类:(1) 通过加载片外缓存器件实现多目标、大距离延时功 能; (2) 与 FPGA 主频相关的片内精确延时。通常 精确延时用于实现雷达回波仿真系统的精细距离 延时功能,也即实现一维距离像内各散射点之间的 延时。

AD 采样率 *F*_s=4.8 GHz,精确延时是按照 4.8 GHz 的时钟进行延迟的。将 16 路并行数据, 根据延迟量将对应的后面几路数据延迟一个系统 时钟周期(300 MHz),然后将这几路数据作为并行 数据的前几路输出,其它的顺延。

若延迟量为 1,将第 16 路数据延迟一个系统 时钟周期(1/300 μ s)后,作为并行数据的第 1 路, 然后将原来的第 1 路作为输出的第 2 路,后面一次 类推,如图 7 所示,即 16 路并行转为 1 路数据时, 第 2 个采样点的值得到了第 1 个采样点的值,第 3 个采样点的值得到了第 2 个采样点的值,以此类 推,即延迟时间为采样时间间隔 $t=1/F_s=1/4$ 800 μ s, 若延迟量为 n (0 $\leq n \leq$ 16 的整数),则延迟时间为 $t=n \times t$ 。



采样间隔时间 *t*=1/*F_s*=1/4 800 μs,即最小延迟 量为 1/4 800 μs,模拟目标距离为 *R*=*t*×c/1/32 m= 0.031 25 m。验证距离分辨率优于 0.1 m,测试时设 置精延时量为 3,即延迟 3 个采样时间,理论距离 差为 0.031 25×3=0.093 75 m。

3.3 距离分辨率验证

在 FPGA 中模拟雷达原始信号及目标回波信号,其中利用精延迟使目标回波信号为3个距离为 0.1 m 的点目标回波信号,采集雷达与回波信号后 做互相关函数处理,经画图分析即可得到一维距离像。距离分辨率验证程序功能框图如图8所示。



图 8 距离分辨率验证程序功能框图 Fig. 8 Functional block diagram of range resolution verification program

在 FPGA 中产生一个线性调频信号模拟雷达 发射的原始信号,通过 DACO 输出,且原始信号 同时模拟无距离延迟的点目标 0 的回波信号。原始 信号通过精确延时后的信号模拟另外 2 个点目标 1,2 的回波信号,将3 个目标回波信号相加后从 DAC1 输出。即其中一个通道输出为雷达发射的原 始线性调频信号,另一通道输出为带有3 个点目标 位置信息的累加的回波信号。叠加延时的回波仿真 结果如图 9 所示。



图 9 叠加延时的仿真图 Fig. 9 Simulation diagram of superimposed delay

如图 10 所示,将模拟器基带输出的两路中频 信号分别接到示波器的 2 个通道。将模拟器控制软 件设置为"一维距离像"模式,选择测试通道,并设 置 PRT, PW 等信号参数。



Fig. 10 Data acquisition test block diagram

将示波器采样率设置为 10 GHz,带宽设置为 3 GHz,采集保存 50 μs 时间长度的数据。选择同 时保存两个通道的数据,保存显示在示波器屏幕上 的数据,示波器实测图如图 11 所示。



图 11 示波器实测图 Fig. 11 Oscillograph measurement diagram

对采集的数据进行匹配滤波脉冲处理,脉压结 果如图 12 所示。



由于每个点目标的回波信号均为雷达原始信 号的延时信号,相关程度极大,将雷达原始信号与 叠加的目标回波信号进行互相关处理后,画图即可 看到 3 个尖峰,即 2 个点目标的相对位置。如图 13 所示,将前图放大后标记并记录 3 尖峰端点横 坐标,横坐标差即为距离分辨率 0.1 m。

http://www.china-simulation.com





4 模拟仿真结果验证

为了考核宽带相控阵雷达制导设备在不同瞬时信号带宽下的距离成像分辨能力,我们分别选择500 MHz 和 2 000 MHz 两种 LFM 信号带宽形式进行试验验证。根据不同信号带宽,宽带回波模拟器生成某飞机类目标的相应高分辨距离像回波,并通过半实物仿真验证了所模拟回波的逼真度和成像结果。

4.1 信号带宽 500 MHz

通过宽带目标特性建模软件生成某飞机类扩展 目标的设定参数下的一维距离成像结果,见图 14。





对宽带相控阵雷达制导设备接收到的回波信 号进行匹配滤波,通过处理分析得到对应场景下的 高分辨距离像,较逼真还原了数字建模软件生成的 一维距离向散射分布特性,第 500 个 PRT 的一维 距离成像结果如图 15 所示。



Fig. 15 HRRP of 500 MHz echo signal

4.2 信号带宽 2 000 MHz

当 雷 达 制 导 设 备 发 射 信 号 瞬 时 带 宽 为 2 000 MHz 时,数字建模仿真的一维距离成像结果 如图 16 所示。



图 16 带宽 2 000 MHz 建模仿真结果 Fig. 16 Simulation result of 2 000 MHz bandwidth modeling

回波信号第 500 个 PRT 的一维距离成像结果 如图 17 所示。



从以上仿真试验结果可以看出,宽带回波模拟 器实现了对高分辨距离像回波的逼真模拟,且随着 雷达制导设备瞬时信号带宽的增大,一维距离像的 分辨精度相应得到提高。

5 结论

为了在半实物仿真试验环境下验证宽带相控

阵制导设备的距离维成像性能,本文介绍了一维距 离像的原理和回波模型,分析了回波模拟过程中关 键的时域卷积和精确延时实现方法。根据被试设备 不同的信号带宽形式,应用宽带回波模拟器对相应 的高分辨距离像回波进行了射频实现,并进一步对 被测设备接收的回波信号进行匹配滤波脉压处理, 得到高分辨距离成像结果。通过与目标特性建模软 件的数字仿真结果进行对比,验证了高分辨距离回 波模拟的逼真度。

参考文献:

- 张家昌,饶伟,蒋志国. 雷达目标一维距离像仿真研 究[J]. 电子测量技术,2013,36(5):38-40,44.
 Zhang Jiachang, Rao Wei, Jiang Zhiguo. Research on Radar Target's One Dimensional Range Profile Simulation[J]. Electronic Measurement Technology, 2013,36(5):38-40,44.
- [2] 秦敬喜,胡磊,周剑雄,等.基于三维散射中心模型的 一维距离像识别[J]. 雷达科学与技术,2009,7(1): 46-51.

Qin Jingxi, Hu Lei, Zhou Jianxiong, et al. The Profile Recognition Based on 3D Scattering Center Model[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(1): 46-51.

- [3] 李龙. 基于高分辨距离像的雷达地面目标识别技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
 Li Long. Radar Ground Target Recognition Based on High Resolution Range Profiles[D]. Xi'an: XiDian
- [4] Mitchell R A, Dewall R. Overview of High Range Resolution Radar Target Identification[C]. Automatic Target Recognition Working Group Conference, Monterey, CA, 1994.

University, 2018.

[5] Menon M M, Boudreau E R, Kolodzy P J. An Automatic

Ship Classification System for ISAR Images[J]. The Lincon Laboratory Journal (S0896-4130), 1993, 6: 289-308.

- [6] 周云. 基于高分辨距离像的雷达目标识别研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
 Zhou Yun. Research on Radar Target Recognition Based on High Resolution Range Profile[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China. 2016.
- [7] 马跃华,魏欣,胡彦宇.提高米波雷达距离分辨率的 脉冲压缩方法[J]. 空天防御, 2018, 1(2): 42-45.
 Ma Yuehua, Wei Xin, Hu Yanyu. A New Pulse Compression Method to Range Resolution of Meter-band Radar[J]. Air&Space Deffense, 2018, 1(2): 42-45.
- [8] 姜卫东. 光学区雷达目标结构成像的理论及其在雷达 目标识别中的应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2000. Jiang Weidong. The Theory of Radar Target Structure Imaging in Optical Zone and Its Application in Radar Target Recognition[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000.
- [9] Du L, Liu H, Bao Z, et al. A Two-distribution Compounded Statistical Model for Radar HRRP Target Recognition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2006, 54(6): 2226-2238.
- [10] Vespe M, Baker C J, Griffiths H D. Radar Target Classification Using Multiple Perspectives[J]. IET Radar Sonar & Navigation (S1751-8784), 2007, 1(4): 300-307.
- [11] Liu J, Fang N, Wang B F, et al. Scale-space Theory-based Multi-scale Features for Aircraft Classification Using HRRP[J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2016, 52(6): 475-477.
- [12] 李娟. 距离扩展目标检测与参数估计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

Li Juan. Research on the Method of Range Extension Target Detection and Parameter Estimation[D]. Changsha: Hunan University, 2009.