

## 高速运动目标宽带雷达回波频域模拟及分析

宁超\* 耿旭朴 王超 黄培康

(电磁散射重点实验室 北京 100854)

**摘要:** 该文提出了一种高速运动目标宽带雷达回波频域模拟方法。根据雷达波与运动目标相互作用的物理过程建立了运动目标宽带雷达回波的频谱模型,提出了一种雷达回波的频域建模流程,分析了目标径向距离和径向速度对LFM信号匹配滤波结果的影响,推导了高分辨率距离像(HRRP)平移和扩展的定量结论。仿真结果验证了该方法的正确性和有效性。

**关键词:** 雷达信号处理; 宽带雷达; 运动目标; 雷达散射截面(RCS); 线性调频(LFM)波形

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)02-0142-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14021

## Wideband Radar Echo Frequency-domain Simulation and Analysis for High Speed Moving Targets

Ning Chao Geng Xu-pu Wang Chao Huang Pei-kang

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

**Abstract:** A frequency-domain method is proposed for wideband radar echo simulation of high-speed moving targets. Based on the physical process of electromagnetic waves observing a moving target, a frequency-domain echo model of wideband radar is constructed, and the block diagram of the radar echo simulation in frequency-domain is presented. Then, the impacts of radial velocity and slant range on the matching filtering of LFM radar are analyzed, and some quantitative conclusions on the shift and expansion of the radar profiles are obtained. Simulation results illustrate the correctness and efficiency of the proposed method.

**Key words:** Radar signal processing; Wideband radar; Moving target; Radar Cross Section (RCS); LFM waveform

### 1 引言

利用宽带雷达对高速运动目标如导弹、卫星、空间碎片等进行探测和成像具有重要的军事和科研价值<sup>[1-3]</sup>。雷达回波仿真是雷达系统研制及雷达信号处理技术研究的重要环节和关键技术之一<sup>[4-10]</sup>。

“走-停-走”模型常用于雷达回波仿真,该模型假设目标在脉冲持续时间的运动很小可以被忽略。但对于远距离且高速运动的目标,脉冲持续期间的径向位移已经不能忽略,“走-停-走”模型不再适用<sup>[8-12]</sup>。线性调频信号(Line Frequency Modulation, LFM)是宽带雷达系统常用的波形之一,国内外若干研究者开展了高速运动目标的LFM回波仿真研究,建立了宽带LFM雷达回波的时域信号模型;分析了高速运动对雷达波频率的压缩或扩展以及对LFM回波调制斜率的改变;通过理论推导和仿真试

验,研究了高速运动对目标1维高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)的平移和展宽,提出了速度补偿或成像的方法<sup>[13-20]</sup>。

上述研究成果对宽带雷达回波模拟大多采用时域模型,时域模型与信号的传播过程相对应,时间关系清晰,易于理解。但对于频率捷变的雷达发射信号(如常用的LFM波形),若采用时域模型仿真,通常利用散射中心模型提取出强散射中心的位置、幅度和相位等,再与发射波形运算,得到回波<sup>[2,11]</sup>。但散射中心位置难以准确提取,尤其是散射中心间距很近时<sup>[21]</sup>,而且大部分高精度的提取散射中心的运算如Music算法、状态空间法等具有运算复杂的缺点<sup>[22,23]</sup>;另外,回波的时域建模是一个卷积过程,也有较大运算量。而采用频域模型则可克服上述缺点,通过频域的乘法运算可以方便地解决雷达目标宽带回波的高速运动模拟问题。

基于上述考虑,本文首先建立运动目标的雷达回波频域模型,提出了高速运动目标的频域回波模拟方法。针对LFM波形,建立了运动目标LFM波匹

2014-01-26 收到, 2014-03-31 改回; 2014-04-11 网络优先出版  
国家 973 计划(2010CB731905)和电磁散射重点实验室基金项目资助课题

\*通信作者: 宁超 nc\_09@sina.com

配滤波后的频域表达, 分析了目标径向速度和径向距离引起HRRP的平移和散焦, 得到了定量结果。最后, 分别利用理想点源目标和复杂形体目标进行仿真, 验证了本文方法的有效性和正确性。

## 2 运动目标回波的频域模型

假设目标与雷达之间初始距离为 $R_0$ , 雷达发射的同时, 目标以径向速度 $v$ 向雷达运动。根据雷达波与目标相互作用的时间关系可知, 在 $t$ 时刻雷达收到的回波是在 $t - \tau_x$ 时刻发射的, 则电磁波信号与目标作用的时刻为 $t_x = t - (1/2)\tau_x$ , 此时目标与雷达的距离为:

$$R_x = R_0 - vt_x = R_0 - (t - (1/2)\tau_x)v \quad (1)$$

根据上述分析, 有:

$$R_x = \frac{c}{2}t_x \quad (2)$$

可求得:

$$\tau_x = \frac{2}{c-v}(R_0 - vt) \quad (3)$$

设雷达的发射信号为 $s_0(t)$ , 回波信号为 $s_r(t)$ , 若目标时域响应为 $h(t)$ , 目标时域回波可由发射信号与目标时域响应通过卷积运算得到, 表示为:

$$s_r(t) = s_0(t - \tau_x) * h(t) \quad (4)$$

其中

$$t - \tau_x = \frac{c+v}{c-v}t - \frac{2R_0}{c-v} \quad (5)$$

式(4)中,  $*$ 表示卷积运算。由傅里叶变换的性质, 目标回波的频谱可表示为:

$$S_r(\omega) = \frac{1}{\beta} S_0\left(\frac{\omega}{\beta}\right) H(\omega) \exp\left(-j\omega \frac{2R_0}{c+v}\right) \quad (6)$$

其中,  $S_0(\omega)$ 为发射信号的频谱,  $H(\omega)$ 为目标的频域响应,  $\beta$ 与目标的运动速度有关

$$\beta = \frac{c+v}{c-v} \quad (7)$$

对于静止目标,  $v = 0$ 和 $\beta = 1$ , 回波延迟与速度 $v$ 无关, 设目标与雷达径向距离为 $R_0$ , 则目标回波的频域响应为:

$$S_r(\omega) = S_0(\omega) H(\omega) \exp\left(-j\omega \frac{2R_0}{c}\right) \quad (8)$$

可见, 静止目标的频域回波模型为目标的频域响应、发射信号频谱以及距离引起的相位因子的乘积。对于运动目标,

$$v \ll c, \quad \frac{1}{c+v} \approx \frac{1}{c} - \frac{v}{c^2}$$

因此

$$\begin{aligned} S_r(\omega) &= \frac{1}{\beta} S_0\left(\frac{\omega}{\beta}\right) H(\omega) \exp\left(-j\omega \frac{2R_0}{c} + j\omega \frac{2R_0 v}{c^2}\right) \\ &\approx \frac{1}{\beta} S_0\left(\frac{\omega}{\beta}\right) H(\omega) \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{c} f + j2\pi f_d \frac{R_0}{c}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 2\pi f \\ f_d &= \frac{2v}{c} f \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

即由运动引起的多普勒频率, 对于窄带信号, 可以基于载波的频率计算多普勒频偏; 而对于宽带信号, 不同频率引起的多普勒不同, 不能以载波频率来近似计算。

由式(9)可知, 对于高速运动的目标, 速度对回波的影响表现在两个方面: 一是速度和距离共同作用产生了频率的1次项, 在时域表现为散射中心距离的偏移。二是对频率产生了压缩或扩展, 若后续用匹配滤波的方法处理回波时不加以考虑, 会造成匹配滤波器输出的失配, 通常所见到的速度引起1维距离像的散焦就是由此产生。

实际应用中,  $H(\omega)$ 即为目标的宽带RCS数据。对于扩展目标, 目标的各个部分与雷达距离 $R$ 并不相同, 但是计算目标的宽带RCS时都会设定相位零点(一般选在目标质心), 在计算过程中会考虑目标的各个面元与相位零点的相位超前或滞后, 所以利用式(6)仿真时只需要取目标质心的 $R$ 计算附加相位项即可。

## 3 高速运动目标的频域回波模拟方法

运动目标的频域回波建模流程如图1所示。主要流程如下:

- (1) 根据频段等参数, 通过复杂目标的几何建模和电磁散射建模计算, 得到某观测角下目标的静态宽带RCS扫频结果;
- (2) 利用发射波形的参数, 计算得到发射信号频谱;
- (3) 根据目标的径向速度和径向距离, 将发射信号频谱进行压缩( $v > 0$ )或扩展( $v < 0$ )的变频标处理;
- (4) 计算径向速度和径向距离产生的幅度、相位乘性调制因子;
- (5) 在频率域将各部分所得数据相乘, 得到运动目标的频域频谱模型;
- (6) 若把频域回波进行逆傅里叶变换, 则得到高速运动目标的时域回波数据。

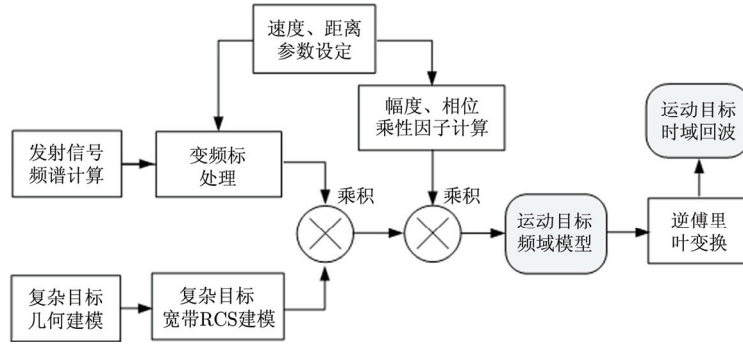


图1 运动目标雷达回波频域模拟流程

Fig. 1 Diagram of radar echo simulation of a moving target in frequency domain

## 4 运动目标的 LFM 回波模拟

### 4.1 运动目标的 LFM 回波频域模型

LFM信号是常用雷达波形之一，本节将建立运动目标的LFM回波的频谱模型，分析速度对宽带波形后续处理带来的影响。

LFM信号可表示为：

$$s_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp[j(\omega_0 t + \pi \mu t^2)] \quad (11)$$

其中  $T$  为脉冲宽度， $\omega_0$  为载波中心频率， $\mu$  为调频斜率， $\text{rect}(x)$  为矩形函数

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |x| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (12)$$

LFM发射波形频域表达的精确解为菲涅耳积分，近似解为<sup>[24]</sup>：

$$S_0(\omega) \approx \sqrt{\frac{1}{\mu}} \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0}{\mu T}\right) \exp\left[-j \frac{\omega^2}{4\pi\mu} + j \frac{\pi}{4}\right] \quad (13)$$

位于  $R_0$  处，径向速度为  $v$  的目标 LFM 回波的频域表达式为：

$$S_r(\omega) = H(\omega) \frac{1}{\beta \sqrt{\mu}} \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0 \beta}{\mu T \beta}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{\omega^2}{4\pi\mu\beta^2} + j \frac{\pi}{4}\right] \exp\left[-j \omega \frac{2R_0}{c+v}\right] \quad (14)$$

考虑目标为理想点目标的情况，分析式(14)可知，高速运动点目标的 LFM 频谱仍符合原来的线性调频形式，但速度引起了信号的回波幅度、脉冲时宽、带宽、调制斜率、中心频率等的一系列变化。其中调制斜率变为：

$$\mu' = \mu \beta^2 \approx \mu \left(1 + \frac{4v}{c}\right) \quad (15)$$

带宽变为：

$$B' = B \beta \approx \mu T \left(1 + \frac{2v}{c}\right) \quad (16)$$

中心频率为：

$$\omega'_c = \omega_0 + \frac{1}{2} B' = \omega_0 + \frac{1}{2} \mu T \left(1 + \frac{2v}{c}\right) \quad (17)$$

由式(14)的逆傅里叶变换，可得高速运动理想点源的 LFM 回波时域表达式为：

$$s_0(t) = \frac{1}{\beta} \text{rect}\left(\frac{\beta}{T} \left(t - \frac{2R_0}{c+v}\right)\right) \cdot \exp\left[j \left[ \omega_0 \beta \left(t - \frac{2R_0}{c+v}\right) + \pi \mu \beta^2 \left(t - \frac{2R_0}{c+v}\right)^2 \right]\right] \quad (18)$$

于是回波的时间偏移量为：

$$\tau = \frac{2R_0}{c+v} \quad (19)$$

可得，脉冲时宽为：

$$T' \approx \frac{T}{\beta} = \frac{T}{\left(1 + \frac{2v}{c}\right)} \quad (20)$$

综上，雷达和目标的相对靠近运动，产生了脉冲时宽的压缩以及调制斜率、调制带宽的变大；反之若远离运动则对应着时宽的扩展以及调制斜率、带宽的变小。

### 4.2 LFM 回波匹配滤波后频谱及分析

对 LFM 的回波一般采用匹配滤波方法进行处理，设参考距离为  $R_{\text{ref}}$ ，则参考信号频谱为：

$$S_{\text{ref}}(\omega) = S_0(\omega) \exp\left[-\frac{j 2 R_{\text{ref}} \omega}{c}\right] \quad (21)$$

匹配滤波后信号的频域表达式为：

$$H_r(\omega) = S_{\text{ref}}^*(\omega) S_r(\omega) \quad (22)$$

可得：

$$H_r(\omega) = \frac{1}{\beta \mu} H(\omega) \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0}{\mu T}\right) \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0 \beta}{\mu T \beta}\right) \cdot \exp(j\Phi_1 + j\Phi_2 + j\Phi_3) \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= -\frac{2(R_0 - R_{\text{ref}})\omega}{c}, & \Phi_2 &= \omega \frac{2R_0 v}{c^2} \\ \Phi_3 &= \frac{\omega^2}{4\pi\mu} \left(1 - \frac{1}{\beta^2}\right) = \frac{\omega^2}{4\pi\mu} \frac{4v}{c}\end{aligned}\quad (24)$$

至此,得到了运动目标的 LFM 脉冲匹配滤波后的频域模型。将式(24)作逆傅里叶变换即得到目标的 HRRP。

仍考虑目标为理想点目标的情况,分析式(23),匹配滤波后的回波的调制斜率变为:

$$\mu'' = \mu \frac{4v}{c} \quad (25)$$

可见,高速运动目标 LFM 匹配滤波后的信号斜率不再为 0(静止时为 0),相对靠近时,信号为正斜率;相背远离时为负斜率。式(25)的结论与文献[7]的时域模型结果是一致的,说明了本文频域模型的正确性。

#### 4.3 对高速运动产生 HRRP 频偏和散焦的分析

接下来,通过对  $\Phi_2, \Phi_3$  的讨论,分析径向速度对 HRRP 像产生的影响。其中,  $\Phi_2$  为频率的 1 次项,在时域中产生的平移距离为:

$$\Delta R = \frac{2R_0 v c}{c^2} \frac{1}{2} = \frac{R_0 v}{c} \quad (26)$$

可见,高速运动产生的距离像平移是由径向距离  $R_0$  和径向速度  $v$  共同决定。

$\exp(j\Phi_2)$  只会产生平移,不会产生散焦,  $\Phi_3$  为

频率的 2 次项,会产生距离像的散焦。 $\exp(j\Phi_3)$  符合线性调频的频谱结构,变换到时域有:

$$\begin{aligned}\text{IFT} \left[ \frac{1}{\beta\sqrt{\mu}} \exp(j\Phi_3) \right] &= \frac{c+v}{c-v} \sqrt{\frac{4v}{c}} \text{rect} \left( \frac{t}{T \frac{4v}{c}} \right) \\ &\cdot \exp \left[ -j \left( \frac{4v}{c} j\pi u t^2 + \frac{\pi}{4} \right) \right]\end{aligned}\quad (27)$$

显然若  $v=0$ ,则式(27)的包络为单位冲激函数,即对原系统响应无散焦作用。 $v \neq 0$ 时,式(27)的包络为矩形函数,其宽度:

$$\Delta T = T \frac{4v}{c} \quad (28)$$

该宽度本文称之为距离像扩展尺度。

高速运动引起的 HRRP 距离像散焦的原因可以看作是原系统响应函数(一般为 sinc 函数)与包络时宽为  $4Tv/c$  的矩形脉冲卷积造成的。显然速度越大, LFM 脉冲的时宽越宽,扩展尺度越大,散焦将越严重。

散焦的效果不易推导,现通过仿真进行分析。仍以理想点源为例,由于散焦与  $R_0$  无关,为了分析简便,设  $R_0 = R_{\text{ref}} = 0, \omega_0 = 0, B = 1 \text{ GHz}, T = 100 \mu\text{s}$ ,分别设  $v = 1.5 \text{ km/s}, v = 5 \text{ km/s}, v = 10 \text{ km/s}$ ,得到的 HRRP 结果与静止时的对比结果(采用汉明窗处理,并归一化)如图 2 所示。

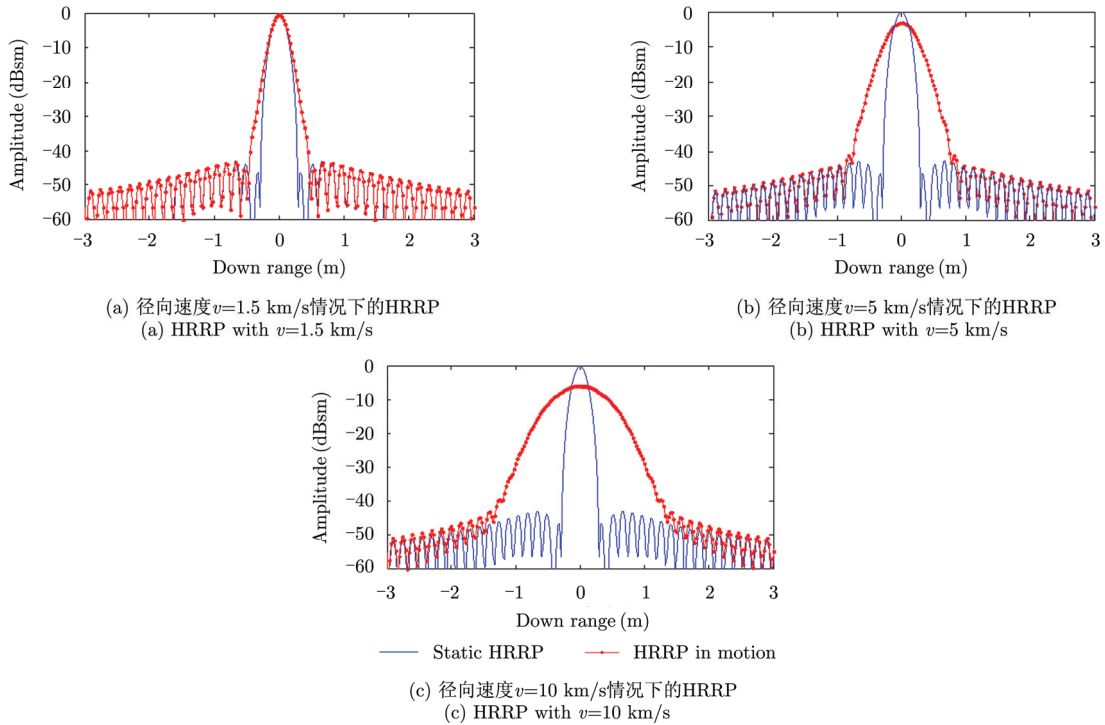


图 2 速度产生的 HRRP 散焦分析

Fig. 2 Analysis of HRRP defocusing with velocity

综上,初步结论为,高速运动产生的距离像平移到径向距离 $R_0$ 和径向速度 $v$ 共同决定,偏移结果可定量表示为 $R_0v/c$ 。高速运动产生的距离像扩展尺度由径向速度大小和LFM的脉冲宽度决定,速度越大,脉冲越宽,扩展尺度越大。

## 5 仿真分析

### 5.1 时域方法仿真验证

对高速运动的金属锥体目标进行仿真计算,模拟其宽带回波。锥体高度 $l=4$  m,底面半径 $r=0.5$  m,圆锥顶为一小球头,如图3所示。本文采用物理光学法(Physical Optics, PO)求解金属面元的RCS,利用物理绕射理论(Physical Theory of Diffraction, PTD)及等效边缘电磁流法(Equivalent Edge Current, EEC)计算棱边的RCS<sup>[25]</sup>。计算时设相位零点为其质心,雷达迎头观测,视线角为 $5^\circ$ (雷达入射方向与圆锥对称轴的夹角),计算得到该目标以中心频率为10 GHz, HH极化,带宽为1000 MHz的频域响应如图4所示。时域回波响应(即HRRP)如图5所示,为方便比较,这里设定图中的坐标原点为圆锥头部。如图5所示,目标距离像长度约4 m,共有2个强散射中心,成像处理时采用了汉明窗平滑。分析圆锥目标的电磁散射机理可知,迎头附近观测,共有3个散射中心,分别为头部球冠和底面棱边与雷达入射面交点<sup>[25]</sup>。但入射角为 $5^\circ$ 时,对于1000 MHz

的带宽,在距离像径向方向上无法将底面的两个散射中心区分。故表现为1维距离像上共有2个强散射中心。由图5可知,两个散射中心的位置分别为0 m和3.96 m,强度分别约为 $-27.3$  dBsm和 $-18.6$  dBsm。

设定LFM发射波形参数如下:脉冲宽度为100  $\mu$ s,中心频率为10 GHz,带宽为1000 MHz,采样率为2 GHz。为了验证本文频域方法的正确性,本节从时域出发进行仿真。

首先从目标的HRRP提取两个强散射中心的位置和幅度,再根据目标的径向距离和径向速度,通过时域计算得到目标的回波,计算公式为:

$$s_r(t) = \sum_{p=1}^2 \sigma_p \text{rect}\left(\frac{t - \tau_p}{T}\right) \cdot \exp\left[j\left(\omega_0(t - \tau_p) + \pi\mu(t - \tau_p)^2\right)\right] \quad (29)$$

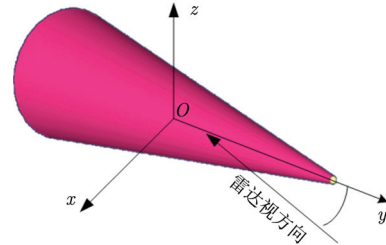
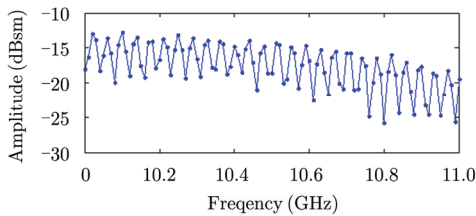
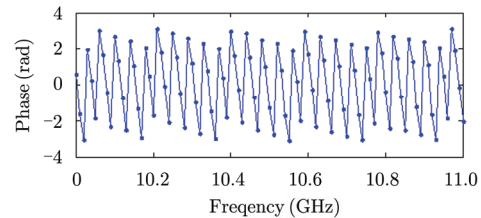


图3 圆锥目标模型

Fig. 3 A cone model



(a) RCS幅度值  
(a) Amplitude of wide-band RCS



(b) RCS的相位值  
(b) Phase of wide-band RCS

图4 圆锥目标 X 波段宽带 RCS 扫频结果

Fig. 4 Wide-band RCS of a cone target at X band

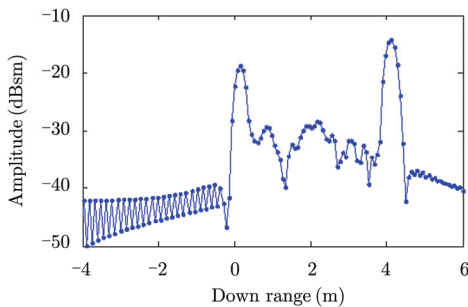


图5 圆锥目标 X 波段时域响应

Fig. 5 Time-domain respond of a cone target at X band

其中 $R_0$ 为发射时刻目标与雷达的径向距离, $L_p, \sigma_p$ 为第 $p$ 个散射中心的位置和幅度, $v$ 为目标的径向速度, $\tau_p$ 为第 $p$ 个散射中心的回波到达起始时刻:

$$\tau_p = \frac{2}{c - v} (R_0 + L_p - vt) \quad (30)$$

设目标位于距离雷达600 km处,分别仿真目标静止和目标径向速度为1.5 km/s两种情况。先仿真得到时域回波,再通过与发射信号卷积计算HRRP,结果如图6所示,在成像时,进行汉明窗平滑。图6中实线为目标静止仿真结果,带标记虚线为目标



运动时仿真结果。可见，目标静止时仿真 HRRP 中强散射中心结果与目标本身的时域响应相同。目标运动使 HRRP 发生了偏移约 3 m，与式(26)计算得到的理论结果吻合，说明本文方法的正确性。

经汉明窗处理后，测量静止目标距离像的主瓣 3 dB 宽度约为 0.20 m，当速度为 1.5 km/s 时，3 dB 主瓣宽度展宽约 0.22 m，对比与上一节点源目标的频域仿真结果，一致性好，进一步验证了本文方法。

### 5.2 频域模型仿真及分析

为了进一步研究速度对 HRRP 的影响，采用本文的频域方法仿真径向距离为 600 km, 1.5 km/s 的 LFM 回波，得到的 HRRP 如图 7 所示。HRRP 偏移量、主瓣展宽程度与时域的结果与图 6 一致。速度对距离像主瓣展宽的仿真结果如图 8 所示。图 8 中表示的是带宽 1 GHz, 脉宽 100 μs 的 LFM, 在不同速度下的 3 dB 主瓣宽度。由图 8 可知，当速度在 2 km/s 以下时，速度对主瓣宽度的影响不大。当速度不断增大时，主瓣宽度的恶化程度越严重。

## 6 结束语

本文建立了运动目标的雷达回波频域模型，提出了一种高速运动目标的雷达回波频域建模方法。该方法与基于散射中心模型的时域方法相比，运算简单，与散射中心的个数与结构无关，避免了目标散射中心位置的估计偏差对仿真精度的影响，适合工程应用。文中针对 LFM 波形，得到了运动目标 LFM 回波频域模型和匹配滤波后的频域响应，推导得到了目标径向速度和径向距离引起 HRRP 平移和扩展的定量结果，并对不同速度引起的散焦程度进行了分析；仿真结果表明本文方法的正确性和有效性。

本文仅考虑了动目标的雷达回波频域仿真问题，而且只是针对匀速运动，未讨论加速度的情况，该方面的工作需要进一步开展。另外，仿真得到运动目标雷达回波后，在后续数据处理阶段需要进行速度补偿，但具体的补偿方法以及测速和测距的不准确对补偿效果的影响本文也未涉及，需要在后续工作中继续深入研究。

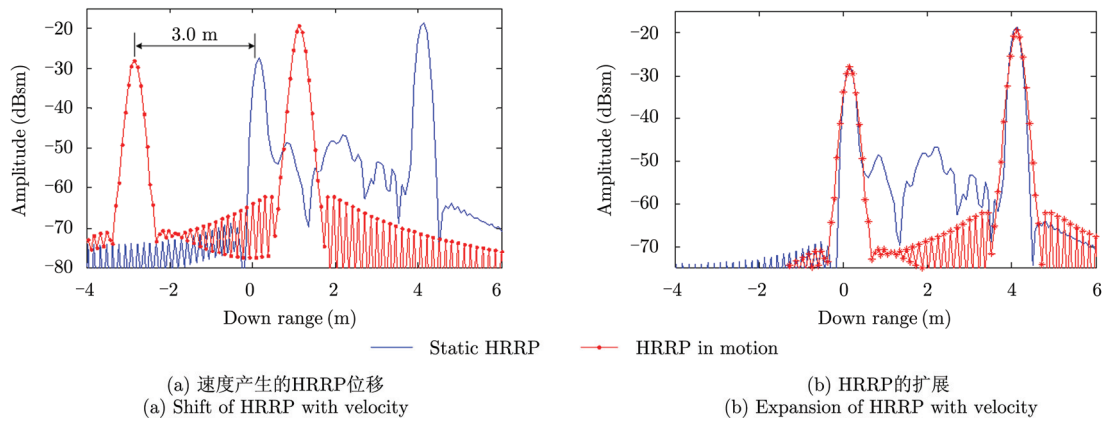


图 6 目标静止与运动时 HRRP 对比结果( $v=1.5$  km/s)

Fig. 6 Comparison of HRRP between static target and moving target ( $v=1.5$  km/s)

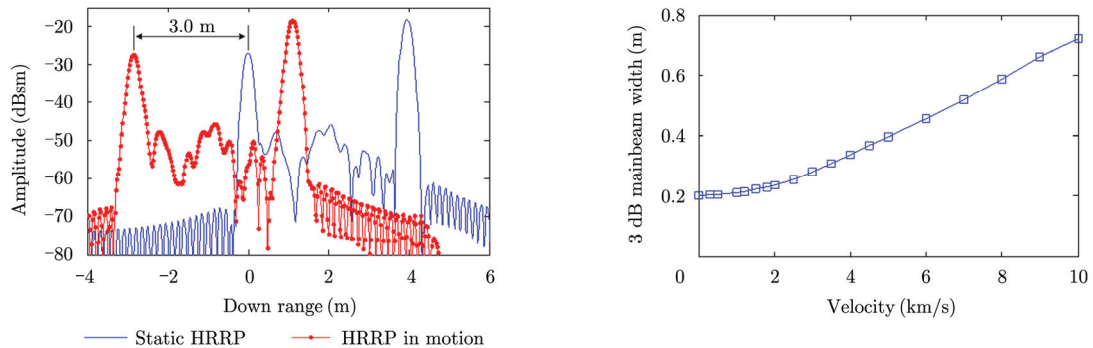


图 7 频域模型得到的 HRRP 结果

Fig. 7 HRRP simulation with the proposed frequency domain model

图 8 不同速度下的 HRRP 的 3 dB 主瓣宽度 (LFM 带宽 1 GHz, 脉宽 100 μs)

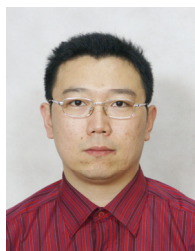
Fig. 8 3 dB width of HRRP mainlobe in different velocity (LFM waveform with  $B=1$  GHz,  $T=100$  μs)

## 参考文献

- [1] William W C, Joseph T M, and Robert M O. Wideband radar for ballistic missile defense and range-doppler imaging of satellites[J]. *Journal of Lincoln Laboratory*, 2000, 12(2): 267-280.
- [2] 马超, 许小剑. 空间进动目标的宽带雷达特征信号研究[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 636-643.  
Ma Chao and Xu Xiao-jian. Modeling of wideband radar signature for precession space objects[J]. *Acta Electronica*, 2011, 39(3): 636-643.
- [3] Kahler B and Blasch E. Impact of HRR radar processing on moving target identification performance[C]. 12th International Conference on Information Fusion Seattle, WA, USA, 2009: 858-866.
- [4] Winters D W. Target motion and high range resolution profile generation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2140-2153.
- [5] 张居凤, 冯德军, 王雪松, 等. 雷达目标动态 RCS 仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(4): 834-837.  
Zhang Ju-feng, Feng De-jun, Wang Xue-song, *et al.* Simulation of dynamic RCS data of radar targets[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(4): 834-837.
- [6] 马梁, 冯德军, 刘进, 等. 高速目标距离像的结构特征及补偿方法[J]. *信号处理*, 2009, 25(7): 1051-1056.  
Ma Liang, Feng De-jun, Liu Jin, *et al.* The structure characteristic of range profiles and compensating method for target moving with high velocity[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(7): 1051-1056.
- [7] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 19-27.  
Yang Jian-yu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 19-27.
- [8] Xing Meng-dao and Bao Zheng. High resolution ISAR imaging of high speed moving targets[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 152(2): 58-67.
- [9] 张义安, 尹治平, 王东进, 等. 高速运动目标的瞬时距离多普勒成像[J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(9): 954-960.  
Zhang Yi-an, Yin Zhi-ping, Wang Dong-jin, *et al.* Instant range Doppler imaging of high speed targets[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(9): 954-960.
- [10] 杨正龙, 刘爱芳, 李士国, 等. 高速运动目标的宽带回波仿真和成像[J]. *现代雷达*, 2007, 29(6): 43-45.  
Yang Zheng-long, Liu Ai-fang, Li Shi-guo, *et al.* Broadband echo simulation and imaging for fast-moving object[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(6): 43-45.
- [11] Liu Yan, Xing Meng-dao, Sun Guang-cai, *et al.* Echo model analyses and imaging algorithm for high-resolution SAR on high-speed platform[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2012, 50(3): 933-950.
- [12] 张焕颖. 高速运动目标 ISAR 成像方法研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2007.  
Zhang Huan-ying. ISAR imaging of high speed moving targets[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2007.
- [13] Welsh B M and Hawley R W. Linear FM radar effects on moving target signatures[C]. Proceedings of SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VIII, Bellingham WA, USA, 2001: 164-173.
- [14] Liang Fu-lai, Huang Xiao-tao, Li Xiang-yang, *et al.* HRR profile imaging of fast moving target based on multiple radars using wide-band LFM signals[C]. Radar Conference IEEE, Rome, Italy, 2008: 164-173.
- [15] Ma Chao and Xu Xiao-jian. A novel technique for accurate velocity measurement using LFM radar[C]. Proceedings of SPIE on Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications, Prague, Czech republic, 2011: 81860L1-L11.
- [16] 刘爱芳, 朱晓华, 陆锦辉, 等. 基于解线调处理的高速运动目标 ISAR 距离像补偿[J]. *宇航学报*, 2004, 25(5): 541-545.  
Liu Ai-fang, Zhu Xiao-hua, Lu Jin-hui, *et al.* The ISAR range profile compensation of fast-moving target using the dechirp method[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(5): 541-545.
- [17] 许人灿, 杜琳琳, 陈曾平. 一种改进的空间目标高速运动补偿方法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(4): 1118-1125.  
Xu Ren-can, Du Lin-lin, and Chen Zeng-ping. An improved compensation method for high velocity of space targets[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1118-1125.
- [18] 曹向东. 一种高分辨雷达宽带信号处理速度补偿方法[J]. *现代雷达*, 2005, 27(6): 36-38.  
Cao Xiang-dong. A velocity compensation method for wide-band signal processing in high-resolution radar[J]. *Modern Radar*, 2005, 27(6): 36-38.
- [19] Delisle G Y and Wu H. Moving target imaging and trajectory computation using ISAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 887-899.
- [20] 刘振, 魏玺章, 黎湘. 一种新的随机 PRI 脉冲多普勒雷达无模糊 MTD 算法[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 28-35.  
Liu Zhen, Wei Xi-zhang, and Li Xiang. Novel method of unambiguous moving target detection in pulse-Doppler radar with random pulse repetition interval[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 28-35.
- [21] Zhou J, Zhao H, and Shi Z, *et al.* Analysis performance bounds on estimates of scattering center parameters[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(2): 813-816.
- [22] Moghaddar A, Ogawa Y, and Walton E K. Estimating the time-delay and frequency delay parameter of scattering

- components using a modified MUSIC algorithm[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 43(10): 1412-1418.
- [23] Kung S Y, Arun K S, and Rao D V. State-space and singular-value decomposition-based approximation methods for the harmonic retrieval problem[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(12): 1799-1811.
- [24] Richards M A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*[M]. USA, New York: McGraw-Hill Companies, 2008: 142-143.
- [25] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 24-30.  
Huang Pei-kang, Yin Hong-cheng, and Xu Xiao-jian. *Radar Target Characteristics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 24-30.

### 作者简介



宁 超(1978-), 男, 籍贯河北, 航天二院研究生院在职博士生, 现为航天二院 207 所高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理、目标特征提取与识别等。  
E-mail: nc\_09@sina.com



王 超(1979-), 男, 籍贯陕西, 中国传媒大学获博士学位, 现为航天二院 207 所高级工程师, 主要研究方向为电磁理论建模、雷达回波仿真等。  
E-mail: wangc207@126.com



耿旭朴(1981-), 男, 籍贯河南, 中国科学院电子学研究所获博士学位, 现为航天二院 207 所高级工程师, 主要研究方向为雷达系统、雷达成像等。  
E-mail: gxp331@hotmail.com



黄培康(1935-), 男, 籍贯上海, 航天二院研究生院博士生导师, 航天二院科技委副主任, 研究员, 主要研究方向为雷达目标特性、微波遥感等。  
E-mail: peikanghuang@vip.sina.com