

# 外辐射源雷达长时间积累目标探测性能分析

张 南, 陶 然, 单 涛, 王 越

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

**摘要:** 针对以电视伴音信号为照射源的外辐射源雷达在长时间积累时, 距离和多普勒频率徙动对目标探测的影响, 定义了一种时延-频移-时延率-调频率联合模糊函数, 推导了电视伴音信号的平均联合模糊函数与积累增益损失因子, 给出了积累增益损失与目标运动速度、加速度和积累时间的关系以及相关结论, 为分析外辐射源雷达的探测性能提供了一定的理论参考。

**关键词:** 联合模糊函数; 距离徙动; 多普勒频率徙动; 长时间积累

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)06-1103-05

## Performance Analysis of Target Detection Using Long-Term Integration in External Illuminating Radar

ZHANG Nan, TAO Ran, SHAN Tao, WANG Yue

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The performance of target detection using long time integration would be influenced by the migrations of range and doppler frequency. In order to analyze the influence in the external illuminating radar which makes use of TV radio signal, an associated ambiguity function expressed by the time delay, doppler shift, time delay varying rate and chirp rate is defined. Subsequently, the average associated ambiguity function and integration loss of the TV radio signal are both derived. The relationship of the integration loss with the velocity, acceleration and integration time is obtained. And some conclusions are also acquired. This research can provide some theoretical reference for analyzing the performance of target detection in the external illuminating radar.

**Key words:** associated ambiguity function; range migration; doppler frequency migration; long time integration

### 1 引言

利用调频广播信号、模拟电视信号等空间存在的信号作为照射源的外辐射源雷达, 实现对被监视区域内目标的探测和定位是当今国际前沿研究课题之一。但由于所利用的外辐射源信号并非专为雷达设计且功率较低, 因此外辐射源雷达进行目标探测的主要技术难点之一是微弱信号的检测, 通常积累时间在 1s 以上, 而隐身飞机等低 RCS 目标的回波信号更弱, 积累时间还需进一步增加。但随着积累时间的增加, 目标运动引起的距离徙动和多普勒频率徙动越来越大, 给目标探测带来了严重的影响。文献[1~4]对以调频广播、电视信号、GSM 信号等作为外辐射源信号的模糊函数进行了分析; 同时, 针对具有加速运动的目标, 文献[5, 6]分析了加速度模糊函数以及相关性质, 文献[7~8]分析了高阶模糊函数及其性质。

虽然可利用的外辐射源信号种类较多, 但由于 GSM 信号功率较小且存在同频干扰等不利因素, 因此实际运

用中常采用调频广播或电视信号作为外辐射源信号。与调频广播信号相比, 电视信号的频率较高且与现役雷达的频率非常接近, 因此利用电视信号为照射源的外辐射源雷达更加适合对现役雷达的改造, 使其增加外辐射源探测功能。由于电视信号由伴音信号和图像信号构成, 而伴音信号相比图像信号具有一定的优势<sup>[9]</sup>, 更适合进行目标探测。因此, 本文主要研究以电视信号为照射源的外辐射源雷达在长时间积累时的目标探测性能。由于现有的文献中基于时延和多普勒频率的模糊函数以及基于时延-多普勒频率-调频率的加速度模糊函数对在长时间积累下的目标探测性能均不能很好的表示, 因此在现有研究的基础上, 本文首先建立了长时间积累时匀加速运动目标的回波信号模型, 然后提出了一种时延-频率-时延变化率-调频率联合模糊函数, 并定义了积累增益损失, 同时分析了目标运动速度、加速度、积累时间和积累增益损失的关系, 最后进行了仿真并给出了相关结论。

收稿日期: 2007-01-12; 修回日期: 2008-03-19

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 60625104); 装备预先研究项目(No. 51307060504); 武器装备预研基金项目(No. 9140A07040806BQ01); 北京理工大学优秀青年教师资助计划(No. 2007YS0101)

## 2 匀加速运动目标回波信号模型

假设利用电视伴音信号为外辐射源信号, 其归一化表达式为:

$$x(t) = \exp(-j2\pi f_0 t - j\varphi(t)) \quad (1)$$

其中,  $f_0$  为载波频率,  $\varphi(t) = \int_0^t K_{FM}(t) dt$  为频率调制的相位,  $f(t)$  为音频调制信号。

假设目标初始距离为  $R_0$ , 以径向速度  $v_0$ , 径向加速度  $a$  匀加速运动, 忽略目标反射回波信号的幅度起伏, 那么归一化的回波信号  $y(t)$  的基带形式可以表示为:

$$y(t) = \exp[j2\pi f_0 \tau(t) - j\varphi(t - \tau(t))] \quad (2)$$

其中,  $\tau(t) = 2 \frac{R_0 - v_0 t - \frac{1}{2} a t^2}{c}$  为目标时延。

虽然复包络信号  $s(t)$  为一窄带信号, 但由于积累时间较长, 需要考虑  $2v_0/c$  项对包络的影响。而  $a/c$  项对包络变化的影响可以忽略。忽略常数相位, 式(2)可以表示为:

$$y(t) = s(t - (\tau_0 - \beta_0 t)) \exp[-j2\pi f_d t] \exp\left[-j2\pi \left(\frac{\alpha_d}{2}\right) t^2\right] \quad (3)$$

式中,  $s(t) = \exp(-j\varphi(t))$  为信号复包络,  $c$  为光速,  $f_0$  为载波频率,  $\lambda$  为信号波长,  $\tau_0 = 2R_0/c$  为时延,  $\beta_0 = 2v_0/c$  为时延率,  $f_d = 2v_0/\lambda$  为多普勒频率,  $\alpha_d = 2a/\lambda$  为调频率。

## 3 联合模糊函数

从式(3)的回波信号模型可以看出, 由于在长时间积累时目标反射回波信号可能会出现距离和多普勒频率徙动, 虽然加速度模糊函数<sup>[6]</sup>能表示二次相位项的影响但不能表示时延变化的影响。因此, 从分析距离徙动和多普勒频率徙动的角度定义一个时延-频率-时延率-调频率联合模糊函数(以下简称为联合模糊函数), 定义如式(4):

$$A(\tau, f, \beta, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t - \tau - \beta t) \cdot \exp\left[j2\pi \left(ft + \frac{1}{2} \alpha t^2\right)\right] dt \quad (4)$$

其中,  $\tau$  为目标时延,  $\beta$  为时延变化率,  $f$  为频率,  $\alpha$  为调频率。由于  $\beta = 2v/c$  和  $f = 2v/\lambda$  均为速度的函数(为了能够表示目标运动对距离和多普勒频率的影响, 因此定义这两个变量), 因此上述四个变量只包含三个独立的变量(目标的时延, 速度和加速度)。

从式(4)可以看出, 虽然信号的时延-频率-时延率-调频率联合模糊函数与加速度模糊函数<sup>[7]</sup>具有相同的物理意义: 当发射波形为  $s(t)$  时, 时延相差  $\tau$ , 速度相差  $v$  (即多普勒频率相差  $f = 2v/\lambda$ , 时延率相差  $\beta = 2v/c$ )

和加速度相差  $\alpha_d = 2a/\lambda$  的目标, 采用最优匹配接收处理, 雷达系统可能具有的最大分辨能力。但是, 该联合模糊函数与加速度模糊函数相比, 能有效的表示目标运动速度对包络变化的影响, 为距离徙动的定量分析奠定基础。

假设经过补偿后  $\tau = 0$  和  $f = 0$  时, 那么该联合模糊函数退化为时延率-调频率联合模糊函数:

$$A(0, 0, \beta, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t - \beta t) \exp(j\pi \alpha t^2) dt \quad (5)$$

假设经过补偿后  $\tau = 0, f = 0$  和  $\alpha = 0$  时, 那么该联合模糊函数退化为时延率模糊函数:

$$A(0, 0, \beta, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t - \beta t) dt \quad (6)$$

假设经过补偿后  $\tau = 0, f = 0$  和  $\beta = 0$  时, 那么该联合模糊函数退化为调频率模糊函数:

$$A(0, 0, 0, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 \exp(j\pi \alpha t^2) dt \quad (7)$$

由于时延率的存在, 即目标回波信号的时延时变, 在长时间积累时, 目标回波信号将跨越多个距离单元, 产生距离徙动, 引起积累增益损失; 同样, 由于调频率的存在, 即目标回波信号的多普勒频率时变, 在长时间积累时, 目标回波信号将跨越多个多普勒频率单元, 产生多普勒频率徙动, 引起积累增益损失。为了定量分析距离徙动和多普勒频率徙动引起的积累增益损失, 利用式(5)~(7), 可以定义由时延率及调频率同时以及分别引起的积累增益损失为

$$\eta_r = \frac{|A(0, 0, \beta, \alpha)|}{|A(0, 0, 0, 0)|} \quad (8)$$

$$\eta_\beta = \frac{|A(0, 0, \beta, 0)|}{|A(0, 0, 0, 0)|} \quad (9)$$

$$\eta_\alpha = \frac{|A(0, 0, 0, \alpha)|}{|A(0, 0, 0, 0)|} \quad (10)$$

在定义了积累增益损失后, 下面将对以电视伴音信号为照射源的外辐射源雷达的探测性能进行分析。

## 4 电视伴音信号平均联合模糊函数

由于电视伴音信号的随机性, 我们利用平均联合模糊函数进行分析, 时延-频率-时延率-调频率的平均联合模糊函数表示为:

$$A(\tau, f, \beta, \alpha) = E \left\{ \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) x^*(t - \tau - \beta t) \exp\left[j2\pi \left(ft + \frac{1}{2} \alpha t^2\right)\right] dt \right|^2 \right\} \quad (11)$$

式(11)还可以表示为

$$A(\tau, f, \beta, \alpha) = E \left\{ \iint_{-\infty}^{+\infty} x(t_1) x^*(t_2) x^*(t_1 - \tau - \beta t_1) x(t_2 - \tau - \beta t_2) \cdot \exp\left[j2\pi \left(f(t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \alpha (t_1^2 - t_2^2)\right)\right] dt_1 dt_2 \right\} \quad (12)$$

由于电视伴音信号是调频信号, 假设其归一化表达式为

$$x(t) = \exp(-j2\pi f_0 t - j\phi(t)) = \exp(-j2\pi f_0 t - jK_{FM} \int_0^t f(x) dx) \quad (13)$$

其中  $K_{FM}$  为频偏常数,  $f(t)$  为音频调制信号. 由于音频信号的频谱非常复杂, 用一个经过低通滤波器的高斯白噪声来近似, 其谱密度和相关函数<sup>[10]</sup>为:

$$W_n(\omega) = \frac{4\mu/\Delta\omega_n}{(1 + \omega^2/\Delta\omega_n)} \quad (14)$$

$$R_n(\tau) = \mu \exp(-\Delta\omega_n |\tau|) \quad (15)$$

其中  $\mu$  为音频调制信号的功率,  $\Delta\omega_n$  为音频调制信号的带宽.

令

$$z_1 = \phi(t_1 - \tau - \beta t_1) - \phi(t_1) = \int_{t_1}^{t_1 - \tau - \beta t_1} K_{FM} f(t) dt \quad (16)$$

$$z_2 = \phi(t_2 - \tau - \beta t_2) - \phi(t_2) = \int_{t_2}^{t_2 - \tau - \beta t_2} K_{FM} f(t) dt \quad (17)$$

利用式(16)、(17), 有

$$E\{x(t_1)x^*(t_2)x^*(t_1 - \tau - \beta t_1)x(t_2 - \tau - \beta t_2)\} = E\{\exp[-j\phi(t_1 - \tau - \beta t_1) + j\phi(t_1) + j\phi(t_2 - \tau - \beta t_2) - j\phi(t_2)]\} = C_{z_1 z_2}(u_1, u_2) \quad (18)$$

其中  $C_{z_1 z_2}(u_1, u_2) = E\{\exp[ju_1 z_1 + ju_2 z_2]\}$  为二维随机变量  $z_1, z_2$  的特征函数,  $u_1 = -1, u_2 = -1$ .

因为  $f(t)$  服从正态分布, 所以  $z_1, z_2$  也是零均值正态随机过程.

$$\text{则 } C_{z_1 z_2}(u_1, u_2) = \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u})\right].$$

$$\text{其中 } \mathbf{u} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} E[z_1 z_1] & E[z_1 z_2] \\ E[z_2 z_1] & E[z_2 z_2] \end{bmatrix}, \mathbf{u}^T =$$

$[-1 \ 1]$ .

进而有

$$E[z_1 z_1] = K_{FM}^2 \int_{t_1}^{t_1 - \tau - \beta t_1} \int_{t_1}^{t_1 - \tau - \beta t_1} R(k_1, k_2) dk_1 dk_2 \quad (19)$$

$$E[z_1 z_2] = K_{FM}^2 \int_{t_1}^{t_1 - \tau - \beta t_1} \int_{t_2}^{t_2 - \tau - \beta t_2} R(k_1, k_2) dk_1 dk_2 \quad (20)$$

$$E[z_2 z_1] = K_{FM}^2 \int_{t_1}^{t_1 - \tau - \beta t_1} \int_{t_2}^{t_2 - \tau - \beta t_2} R(k_1, k_2) dk_1 dk_2 \quad (21)$$

$$E[z_2 z_2] = K_{FM}^2 \int_{t_2}^{t_2 - \tau - \beta t_2} \int_{t_2}^{t_2 - \tau - \beta t_2} R(k_1, k_2) dk_1 dk_2 \quad (22)$$

其中,  $R(k_1, k_2) = \mu \exp(-\Delta\omega_n |k_2 - k_1|)$  为  $f(t)$  的相关函数.

将式(18)~(22)代入式(12)可得电视信号的时延-频率-时延率-调频率平均联合模糊函数为:

$$A(\tau, f, \beta, \alpha) = \iint_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}(E(z_1 z_1) - E(z_1 z_2) - E(z_2 z_1) + E(z_2 z_2))\right]$$

$$\times \exp\left[j2\pi\left(f(t_1 - t_2) + \frac{\alpha(t_1^2 - t_2^2)}{2}\right) dt_1 dt_2\right] \quad (23)$$

### 5 以电视信号为照射源的外辐射源雷达积累增益损失

考虑积累时间的影响, 将其限制为  $[0, T]$ , 即发射信号为:

$$x(t) = \exp(-j2\pi f_0 t - j\phi(t))(u(t) - u(t - T)) \quad (24)$$

则时延-频率-时延率-调频率平均联合模糊函数表示为

$$A(\tau, f, \beta, \alpha, T) = \iint_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}(E(z_1 z_1) - E(z_1 z_2) - E(z_2 z_1) + E(z_2 z_2))\right] \times \exp\left[j2\pi\left(f(t_1 - t_2) + \frac{\alpha(t_1^2 - t_2^2)}{2}\right)\right] \times [u(t_1) - u(t_1 - \tau - \beta t_1 - T)][u(t_2) - u(t_2 - \tau - \beta t_2 - T)] \cdot dt_1 dt_2 \quad (25)$$

其中,  $T$  表示积累时间.

不失一般性, 仅以  $\beta < 0$  为例分析, 经过计算可得时延率-调频率平均联合模糊函数为

$$A(0, 0, \beta, \alpha, T) = \int_0^{T/(1-\beta)} dt_1 \int_0^{t_1/(1-\beta)} \exp[K_{FM}^2 \mu (J_1 + I_1 + I_2)] Q dt_2 + \int_0^{T/(1-\beta)} dt_1 \int_{t_1/(1-\beta)}^{t_1} \exp[K_{FM}^2 \mu (J_2 + I_1 + I_2)] Q dt_2 + \int_0^{T/(1-\beta)} dt_2 \int_{t_2/(1-\beta)}^{t_2} \exp[K_{FM}^2 \mu (J_3 + I_1 + I_2)] Q dt_1 + \int_0^{T/(1-\beta)} dt_2 \int_0^{t_2/(1-\beta)} \exp[K_{FM}^2 \mu (J_4 + I_1 + I_2)] Q dt_1 \quad (26)$$

其中:

$$I_1 = \frac{\beta t_1}{\Delta\omega_n} - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n \beta t_1) + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \quad (27)$$

$$I_2 = \frac{\beta t_2}{\Delta\omega_n} + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n \beta t_2) \quad (28)$$

$$J_1 = \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n((1-\beta)t_2 - t_1)) + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(t_2 - (1-\beta)t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(t_2 - t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(1-\beta)(t_2 - t_1)) \quad (29)$$

$$J_2 = 2 \frac{(1-\beta)t_2 - t_1}{\Delta\omega_n} + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n((1-\beta)t_2 - t_1)) + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(t_2 - (1-\beta)t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(1-\beta)(t_2 - t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(t_2 - t_1)) \quad (30)$$

$$J_3 = 2 \frac{(1-\beta)t_1 - t_2}{\Delta\omega_n} + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(\Delta\omega_n(t_2 - (1-\beta)t_1)) + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n((1-\beta)t_2 - t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n(t_2 - t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n(1-\beta)(t_2 - t_1)) \quad (31)$$

$$J_4 = \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n(t_2 - (1-\beta)t_1)) + \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n((1-\beta)t_2 - t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n(1-\beta)(t_2 - t_1)) - \frac{1}{\Delta\omega_n^2} \exp(-\Delta\omega_n(t_2 - t_1)) \quad (32)$$

$$Q = \exp\left[ j2\pi \left( \frac{\alpha(t_1^2 - t_2^2)}{2} \right) \right] \quad (33)$$

由式(8)和(26)可得积累增益损失因子为:

$$\eta = \frac{|A(0, 0, \beta, \alpha, T)|}{T^2} \quad (34)$$

其中,  $A(0, 0, \beta, \alpha, T)$  如式(26)所示.

由式(9)、(10)和(26), 分别令式(26)中  $\beta$  和  $\alpha$  为 0, 可得仅由距离徙动引起以及仅由多普勒频率徙动引起的积累增益损失分别为:

$$\eta_\beta = \frac{|A(0, 0, \beta, 0, T)|}{T^2} \quad (35)$$

$$\eta_\alpha = \frac{C^2(\sqrt{2|\alpha|}T) + S^2(\sqrt{2|\alpha|}T)}{2\alpha^2 T^4} \quad (36)$$

其中,  $C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$ ,  $S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$  分别为 Fresnel 余弦和正弦积分函数.

### 6 试验仿真

假设电视伴音信号频率为 200MHz, 带宽为 15kHz, 目标以不同的速度和加速度运动, 雷达系统视频采样率为 200kHz, 分别和同时考虑距离徙动与多普勒频率徙动时, 积累增益损失如图 1~ 4 所示.

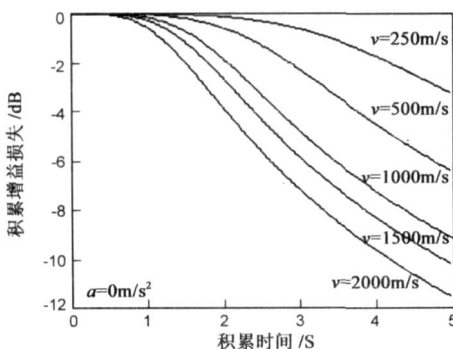


图 1 不同速度下积累增益损失随时间的变化关系示意图

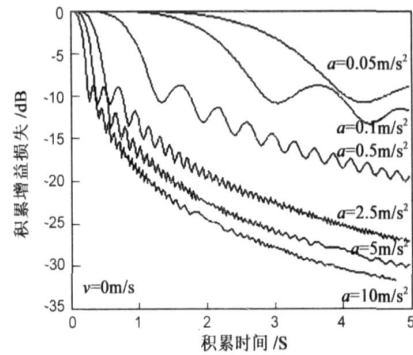


图 2 不同加速度下积累增益损失随时间的变化关系示意图

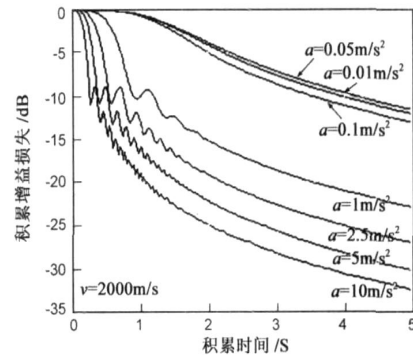


图 3 某一速度下积累增益损失随时间的变化关系示意图

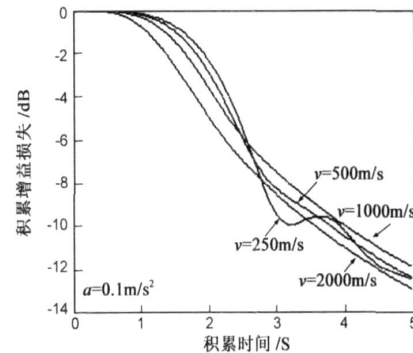


图 4 某一速度下积累增益损失随时间的变化关系示意图

图 1 表示仅由距离徙动引起的积累增益损失随时间的变化曲线. 图 2 表示仅由多普勒频率徙动引起的积累增益损失随时间的变化曲线. 可以看出, 随着积累时间的增加, 由于徙动不断增大, 即目标回波信号散布在更多的距离单元和多普勒频率单元上, 导致了积累增益损失也随之增大. 图 3 表示当速度为 2000m/s 时, 不同加速度下积累增益损失随时间变化曲线, 可以看出在目标的速度超过 2000m/s 而加速度低于  $0.1\text{m/s}^2$  时, 距离徙动起决定性作用. 图 4 表示当加速度为  $0.1\text{m/s}^2$  时, 不同速度下积累增益损失随时间的变化曲线. 可以看出在目标加速度高于  $0.1\text{m/s}^2$  而速度低于 2000m/s, 多普勒频率徙动起决定性作用.

对式(33~ 35)和图 1~ 4 进行分析可知: (1) 当距离徙动较大而多普勒频率徙动较小时, 积累增益损失主要

由距离徙动决定; (2) 当距离徙动较小而多普勒频率徙动较大时, 积累增益损失主要由多普勒频率徙动决定; (3) 对于同一个目标而言, 带宽相对较宽的信号, 相同速度引起的积累增益损失相对较大, 频率相对较高的信号, 相同加速度引起的积累增益损失相对较大; (4) 由于电视伴音信号的带宽较窄, 距离分辨力较差, 而长时间积累时多普勒频率分辨率较高, 因此多普勒频率徙动往往较距离徙动大, 其对积累增益的影响也较大; (5) 在实际情况下, 例如民航机或战斗机的飞行速度远小于  $2000\text{m/s}$ , 而加速度可能大于  $0.1\text{m/s}^2$ , 因此多普勒频率徙动是主要考虑的因素, 在长时间积累时必须进行多普勒频率徙动的补偿; (6) 如果针对弹道导弹等高速机动目标, 由于其飞行速度能够超过  $3000\text{m/s}$  甚至更高, 此时距离徙动也需加以考虑。

## 7 结论

随着目标运动速度的加快, 加速度的出现以及和雷达信号积累时间的增加, 回波信号可能出现距离徙动和多普勒徙动, 徙动的存在会引起积累增益的损失。本文主要针对以电视伴音信号为照射源的外辐射源雷达系统, 研究了目标运动速度、加速度和积累时间与积累增益损失的关系, 提出了一种时延-频率-时延率-调频率联合模糊函数, 定义并给出了积累增益损失计算公式。这些研究结果不仅仅局限于以电视伴音信号为照射源的外辐射源雷达徙动影响的研究, 还适用于类似的外辐射源雷达的徙动影响的分析; 不仅可以为积累时间的选择与距离徙动与多普勒频率徙动与积累增益损失的定量分析奠定了基础, 同时对徙动补偿算法的研究也具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] H D Griffiths, C J Baker. Passive coherent location radar systems. Part 1: Performance prediction [J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(3): 153–159.
- [2] C J Baker, H D Griffiths, I Papoutsis. Passive coherent location radar systems. Part 2: Waveform properties [J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(3): 160–168.

## 作者简介:



张 南 男, 1980 年生于四川绵竹, 北京理工大学信息安全与对抗专业博士研究生。主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理等。  
E-mail: matt@bit.edu.cn

- [3] 郭强, 陶然, 王越, 周思永, 单涛. 关于矩形脉冲类信号距离分辨力的算法研究 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 927–931.  
Guo Qiang, Tao Ran, Wang Yue, Zhou Si yong, Shan Tao. Study on algorithm of range resolution of signals like rectangular pulse [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 927–931. (in Chinese)
- [4] 杨运甫, 陶然, 王越, 赵兴浩. 一种 GSM 无源雷达信号模型及模糊函数性质研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1048–1052.  
Yang Yur fu, Tao Ran, Wang Yue, Zhao Xing hao. A model of GSM based passive radar signal and ambiguity function features [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1048–1052. (in Chinese)
- [5] Xiang Gen Xia. Discrete chirp fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(11): 3122–3133.
- [6] 赵宏钟, 付强, 周剑雄. 雷达信号的加速度分辨力分析及应用 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 958–961.  
Zhao Hong zhong, Fu Qiang, Zhou Jiar xiong. The analysis of acceleration resolution and application for the radar signal [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 958–961. (in Chinese)
- [7] S Peleg, B Friedlander. The discrete polynomial phase transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(8): 1901–1914.
- [8] 刘庆云, 李志舜, 李海英, 梁红. 多分量多项式相位信号的参量估计 [J]. 电子学报, 2004, 32(12): 2031–2024.  
Liu Qing yun, Li Zhi shun, Li Hai ying, Liang Hong. Parameter estimation of multicomponent polynomial phase signals [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 2031–2024. (in Chinese)
- [9] 单涛. 基于电视辐射源的运动目标检测算法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2004.  
Shan Tao. Study on the moving target detection algorithm based on the television illuminator [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [10] 刘国岁, 顾红, 苏卫民. 随机信号雷达 [M]. 国防工业出版社, 2005.  
Liu Guo sui, Gu Hong, Su Wei min. Random Signal Radar [M]. National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)



陶 然 男, 1964 年生于安徽南陵, 博士, 北京理工大学信息安全与对抗学科首席教授、博士生导师、国家杰出青年科学基金获得者、IEEE 高级会员。研究方向: 分数阶傅里叶变换理论及应用、雷达系统及信号处理、信息安全与对抗。E-mail: rantao@bit.edu.cn