

# 宽带单脉冲跟踪雷达的最大熵测角新方法

李 强, 张守宏, 张焕颖, 刘 峥

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 为抑制单脉冲雷达的测角闪烁, 本文提出宽带单脉冲跟踪雷达的最大熵测角新方法. 文中分析了由于差波束方向图调制引起的回波谱展宽现象, 证明了目标角运动中心与谱展宽程度和波形熵之间的关系, 提出基于最大波形熵搜索的目标角度估计方法, 并给出了改进的最大熵测角步骤以降低计算量. 与现有的高分辨体制下的角度估计方法相比, 本方法具有更强的角闪烁抑制能力. 仿真结果说明了本方法的有效性.

**关键词:** 单脉冲; 测角; 角闪烁; 最大熵; 高分辨

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2180-05

## Maximum Entropy Method for Angle Estimation in Wideband Monopulse Tracking Radar

LI Qiang, ZHANG Shou hong, ZHANG Huan ying, LIU Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** In order to suppress angle glint in monopulse radars system, a maximum entropy method for angle estimation in wideband monopulse tracking radar is presented. Spectrum widen of difference beam echoes due to the pattern modulation is investigated. Basing on the relations between the spectrum widen, center of target angular motion and waveform entropy, a novel angle estimation method by maximum waveform entropy searching is presented, and an improved method to reduce computational complexity is given later. Compared with high resolution angle estimation methods available, the novel method performs more conspicuous in angle glint suppression. Simulations show the effectiveness of the new method.

**Key words:** monopulse; angle estimation; angle glint; maximum entropy; high resolution

## 1 引言

单脉冲偏轴测角是一种非常成熟的技术, 对于点目标, 利用和差波束, 可以估计目标相对于波束中心的夹角. 单脉冲雷达在对复杂体目标测角时, 会产生测角噪声, 即角闪烁. 产生角闪烁的根本原因是在目标不能被看作点目标时, 目标与雷达之间存在相对转动或姿态变化, 引起回波信号相位的波前的畸变, 进而产生角闪烁. 若以离目标几何中心的线偏差值来表征, 则角闪烁噪声是与距离无关的, 而其对测角的影响随雷达与目标之间距离的减小而增大. 制导跟踪雷达, 特别是导弹制导雷达, 往往采用振幅和差式单脉冲跟踪雷达, 为了准确的击中目标, 希望能在近距离也能有很高的测角精度. 在未制导阶段, 目标张角大, 且目标和雷达平台处于高速相对运动状态, 此时角闪烁是限制精度的最主要的因素, 甚至使雷达不能作精确制导用. 对于角闪烁抑制问题, 国内外均有研究, 其主要方法有利用频率捷变技术进行非相干积累<sup>[1]</sup>, 或是采用卡尔曼滤波的方法滤除角闪烁噪声<sup>[2]</sup>, 还有利用宽带信号先进

行高分辨处理然后再测角<sup>[3~5]</sup>, 这样减小了多散射点矢量叠加的机会, 从而达到抑制角闪烁的目的. 本文在假设一个单脉冲测角周期内目标近似作线性角运动的基础上, 分析了高距离分辨体制下由于差波束方向图调制引起的谱展宽现象, 证明了目标角运动中心与谱展宽程度和波形熵之间的关系, 从而提出利用最大波形熵估计目标角运动中心的方法. 为降低最大熵搜索的计算量, 文中还给出了与传统测角方法相结合的改进的最大熵测角步骤. 最后对目标的角度跟踪进行了仿真, 将传统的高分辨加权处理测角结果与本文所提出方法的测量结果进行对比, 给出了线偏差曲线, 同时还仿真了信噪比变化时, 两种测角法的线偏差均方根差曲线, 表明了新方法的有效性.

## 2 单脉冲测角与距离高分辨原理

### 2.1 单脉冲测角原理

幅度单脉冲雷达和、差波束的天线方向图  $F_{\Sigma}(\theta)$ 、 $F_{\Delta}(\theta)$  可由图 1 描述. 对于已经跟踪的目标, 由于目标基本处于波束

中心, 和波束增益可以近似为常数, 差波束增益可以近似为线性函数. 设  $A$  为和波束天线增益,  $K$  为差波束天线方向图的斜率, 点目标和单脉冲雷达天线波束中心(电轴)夹角为  $\theta$ , 目标回波信号为  $s(t)$ , 通过单脉冲天线接收, 和信号为  $s_h = F_{\Sigma}(\theta) s(t) =$

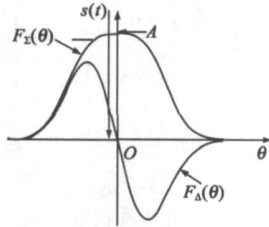


图 1 单脉冲测角示意图

$A s(t)$ , 差信号为  $s_c = F_{\Delta}(\theta) s(t) = K \theta s(t)$ ,

$$\text{通过计算归一化误差信号 } \theta = \frac{s_c A}{s_h K} \quad (1)$$

即可求出  $\theta$ . 考虑到复信号及各种噪声的影响, 应对式(1)取实部. 目标距雷达的距离  $R$  通常是可测出来的, 通过计算  $R \theta$  即可得到目标偏离波束中心的距离, 即线偏差.

### 2.2 宽带信号高分辨原理

我们讨论最常用的线性调频(LFM)信号的高分辨处理方法. LFM 信号是通过非线性相位调制或线性频率调制来获得大的时宽带宽积. 其时域表达式为:

$$s_0(t) = g_{t_p}(t) \exp[j2\pi(f_0 t + \frac{u}{2} t^2)] \quad (2)$$

其中  $g_{t_p}(t)$  为矩形窗函数,  $t_p$  为脉冲宽度. 对于静止的单散射点, 回波信号可以表示为

$$s_r(t) = s_0(t - \tau) = g_{t_p}(t - \tau) e^{j2\pi f_0(t - \tau) + \frac{u}{2}(t - \tau)^2} \quad (3)$$

其中  $\tau = 2R/c$  为目标回波距离延时,  $R$  为目标距离,  $c$  为光速. 在接收的时候采用时频转换的方法实现高距离分辨: 将回波与一个具有相同斜率的参考信号相混实现去斜率处理, 对于点目标, 就得到等频信号. 参考信号理想情况下可用式(4)表示.

$$s_l(t) = e^{j2\pi f_0(t - \tau) + \frac{u}{2}(t - \tau)^2} \quad (4)$$

式中  $\tau_l$  是利用窄带信号对目标测距所得的延时量, 与回波信号混频处理之后得到:

$$\begin{aligned} s(t) &= s(t) \cdot s_l^*(t) \\ &= g_{t_p}(t - \tau) \cdot e^{j2\pi f_0 \Delta \tau_l} \\ &\cdot e^{-j\pi u(\tau^2 - \tau_l^2)} \cdot e^{j2\pi u \Delta \tau_l t} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\Delta \tau_l = \tau - \tau_l$ . 前两项为常数相位项, 第三项反映了去斜率处理后输出信号的频率, 对其进行傅氏变换, 可以得到目标的一维距离像. 距离分辨率为  $\Delta R = C/(2B)$ , 其中  $C$  为光速,  $B$  为信号的带宽.

## 3 目标角运动中心与谱展宽程度和波形熵之间的关系

### 3.1 差波束方向图调制引起的谱展宽

我们假设目标在一次调频周期内的角运动函数可用线性函数表示  $\theta(t) = \theta_0 + mt$ , 称  $\theta_0$  为角运动中心, 通常情况下这

是可以满足的. 为分析方便, 将  $t$  坐标轴平移  $\tau$ , 令  $\omega_0 = 2\pi u \Delta \tau_l$ ,  $\varphi = \pi[2f_0 \Delta \tau_l - u(\tau^2 - \tau_l^2) + 2u \Delta \tau_l t]$ , 式(5)化为:

$$s(t) = g_{t_p}(t) \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot e^{j\varphi} \quad (6)$$

则和差波束分别表示为:

$$s_h(t) = A s(t) \quad (7)$$

$$s_c(t) = K \theta s(t) = K \theta_0 s(t) + K m t s(t) \quad (8)$$

其中  $A$ 、 $K$  分别为和、差波束的增益, 再分别进行傅氏变换:

$$\begin{aligned} S_h(\omega) &= F[s_h(t)] = \int A g_{t_p}(t) e^{j\omega_0 t} e^{j\varphi} \cdot e^{-j\omega t} dt \\ &= A t_p \text{sinc}\left[\frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2}\right] \cdot e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (9)$$

$$S_c(\omega) = F[s_c(t)]$$

$$\begin{aligned} &= \int [K \theta_0 g_{t_p}(t) e^{j\omega_0 t} e^{j\varphi} + K m t g_{t_p}(t) e^{j\omega_0 t} e^{j\varphi}] \cdot e^{-j\omega t} dt \\ &= K \theta_0 t_p \text{sinc}\left[\frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2}\right] \cdot e^{j\varphi} + j K m \\ &\cdot \left\{ \frac{\cos\left[\frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2}\right]}{\omega - \omega_0} - \frac{\text{sinc}\left[\frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2}\right]}{\omega - \omega_0} \right\} \cdot e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (10)$$

可以看出  $S_h(\omega)$  的包络是 sinc 曲线, 而  $S_c(\omega)$  的包络则是 sinc 曲线及其导数的叠加. 差波束包含了 sinc 函数及其导数分量, 我们称之为谱的“自身项”和“分裂项”. 随着式(10)中  $\theta_0$  值的变化, sinc 分量——谱的“自身项”在其包络中的权重会随之变化, 减小到一定程度时, “自身项”的贡献已经小于“分裂项”, 差波束的谱包络就以分裂的形式表现出来. 为便于分析, 设目标的角运动函数为  $\theta(t) = \theta_0 + mt$ , 对  $m$  归一化, 令脉宽  $t_p = 1$ , 则对式(10)取模:

$$\begin{aligned} |S_c(\omega)| &= \{K^2 \theta_0^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\omega - \omega_0}{2}\right) \\ &+ K^2 \left[ \frac{\cos\left(\frac{\omega - \omega_0}{2}\right)}{\omega - \omega_0} - \frac{\text{sinc}\left(\frac{\omega - \omega_0}{2}\right)}{\omega - \omega_0} \right]^2\}^{1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

只考虑单散射点的情况, 取峰值下降 3dB 处的宽度值, 对和波束的谱宽归一化, 仿真运动中心  $\theta_0$  变化时差波束的谱宽变化曲线, 如图 3 所示. 可见当  $\theta_0 = 0$  时, 谱展宽程度最严重, 但  $\theta_0$  取值超出  $[-0.5, 0.5]$  范围时, 谱展宽程度大大降低.

### 3.2 波形熵与谱展宽的关系

为了定量评价谱展宽程度, 我们可以借用统计学中“信息熵”的概念, 在统计学里若有  $N$  个事件, 它们发生的概率分别为  $p_i (i = 1, \dots, N)$ , 则其信息熵

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (12)$$

当概率相等时, 熵最大; 概率越不均匀, 熵值越小. 最小熵表示概率分布最不均匀的情况. 联系到 3.1 节中分析的差波束的谱包络  $|S_c(\omega)|$ , 设离散化后的向量为  $S_c = [S_{c1}, S_{c2}, \dots, S_{cN}]$ , 对其值取归一化, 即归一化后元素值变为

$$D_i = \frac{S_{ci}}{\sum_{i=1}^N S_{ci}}, \quad i = 1, \dots, N \quad (13)$$

而  $\sum_{i=1}^N D_i = 1$ ,  $D_i$  非负, 也就是  $D_i$  具有类似概率的性质, 依照式(12)写出波形熵的表达式:

$$E = - \sum_{i=1}^N D_i \cdot \log[D_i] \quad (14)$$

同样的,我们将式(11)中  $\theta_0$  作为变量,计算差波束谱宽和波形熵的值,如图4所示.曲线呈单调上升趋势,因此我们可以通过计算波形熵来估计谱展宽的程度.

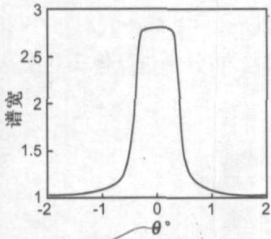


图3 运动中心变化时的谱展宽曲线

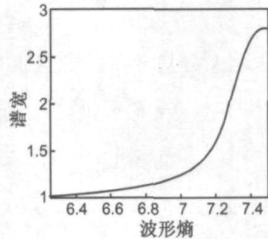


图4 波形熵与谱宽的关系曲线

## 4 最大熵测角方法

### 4.1 最大熵测角理论分析

由前两节推知,单散射点情况下:(1)在进行高分辨处理后,差波束的谱宽与目标的角运动中心  $\theta_0$  有一定关系;(2)波形熵可以度量谱展宽的程度.本节提出基于最大熵搜索的角度估计方法,下面给出寻优表达式:

$$\theta_{opt} = \frac{A}{K} \cdot \arg \max_{\theta_0} E \{ F[s_c(t)] - \theta_0 F[s_h(t)] \} \quad (15)$$

其中  $E\{\cdot\}$  是求波形熵的算子,也就是实现式(13)和式(14)的计算过程,  $F\{\cdot\}$  是傅氏变换算子,  $\theta_0$  是运动中心角度值的一个估计.

通常情况下,一个脉冲周期内目标的角度变化极小.假定线性调频连续波体制下,发射脉冲重复周期  $T = 1/25\text{ms}$ ,点目标相对雷达的横向运动速度  $v = 700\text{m/s}$ ,容易计算一个脉冲周期内目标的横向运动距离  $R_x = vT = 0.028\text{m}$ ,而运动中心就位于运动轨迹的中点  $R_x/2 = 0.014\text{m}$ 处.若取脉冲周期中间时刻的角度值作为目标的真实值,那么运动中心也就代表了目标的真实位置,即便取目标在脉冲周期的两端时刻的角度值作为真实值,容易计算运动中心估计的线偏差  $e = vT/2 = R_x/2 = 0.014\text{m}$ .厘米级的线偏差对于实际目标,如导弹、飞机等,是可以忽略的.因此  $\theta_0$  可以代表目标的角度,取值范围为实数域.联合式(9)和式(10),将  $E\{\cdot\}$  算子内的表达式重写:

$$F[s_c(t)] - \theta_0 F[s_h(t)] = K \left( \theta_0 - \frac{A}{K} \theta_0 \right) t_p \text{sinc} \left[ \frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2} \right] \cdot e^{j\varphi} + j Km \left\{ \frac{\cos \left[ \frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2} \right]}{\omega - \omega_0} - \frac{\text{sinc} \left[ \frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2} \right]}{\omega - \omega_0} \right\} \cdot e^{j\varphi} \quad (16)$$

当  $\theta_0 = K\theta_0/A$  时,第一项将变为0,剩余的第三项唯一对应最大熵,因此可以通过搜索算法得到角度的最优估计.

考虑到实际情况,和、差波束回波可能是由多个散射点叠加而成的,它们存在于同一分辨单元内的时候,就会导致散射波的波前相位畸变,这也就是产生角闪烁的根源<sup>[6]</sup>.设某分辨单元内有  $P$  个散射点,第  $i$  个散射点对应的反射系数和回波相位为  $a_i$  和  $\varphi_i$ ,由式(9)、(10)和(16)得:

$$F[s_c(t)] - \theta_0 F[s_h(t)] = K \left[ \sum_{i=1}^P \theta_i a_i e^{j\varphi_i} - \frac{A}{K} \theta_0 \sum_{i=1}^P a_i e^{j\varphi_i} \right] t_p$$

$$\cdot \text{sinc} \left[ \frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2} \right] + j \left\{ \frac{\cos \left[ \frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2} \right]}{\omega - \omega_0} - \frac{\text{sinc} \left[ \frac{t_p(\omega - \omega_0)}{2} \right]}{\omega - \omega_0} \right\} \cdot \sum_{i=1}^P a_i e^{j\varphi_i} \quad (17)$$

我们可以分两种情况讨论:(1)分辨单元内有一个强散射点,其余都是弱散射点;(2)分辨单元内有多强散射点.

第1种情况:设第一个散射点为唯一的强散射点,和、差波束回波相位的叠加就可以分别表示为

$$A \sum_{i=1}^P a_i e^{j\varphi_i} = A a_1 e^{j\varphi_1} + A \sum_{i=2}^P a_i e^{j\varphi_i} \quad (18)$$

$$K \sum_{i=1}^P \theta_i a_i e^{j\varphi_i} = K \theta_1 a_1 e^{j\varphi_1} + K \sum_{i=2}^P \theta_i a_i e^{j\varphi_i} \quad (19)$$

我们认为大量弱散射点的无序叠加会导致合成矢量的幅度趋向于0,因此式(18)、(19)中第二项的贡献远小于第一项,可以忽略不计.当  $\theta_0 = K\theta_0/A$  时,唯一得到角度的最优估计.

第2种情况:多个强散射点叠加,当  $\theta_0 A \sum_{i=1}^P a_i e^{j\varphi_i} = K$

$\sum_{i=1}^P \theta_i a_i e^{j\varphi_i}$  时,式(17)第一项被补偿为0,但是通常  $\theta_0$  为复数解.式(15)实现的寻优是有实际意义的,即  $\theta_0$  代表的是目标的角度,取值范围为实数域,所以难以得到完全不含第一项的谱包络,也就无法搜索到谱展宽最严重的包络.并且由对图3的分析也知道,  $\theta_0$  取值超出  $[-0.5, 0.5]$  范围时,谱展宽程度同样也会大大降低.因此我们认为,通常情况下存在角闪烁的分辨单元对最大波形熵搜索结果的影响是很小的.

考虑到通道噪声的存在,我们认为和、差通道的噪声是独立同分布的,类似于以上对角闪烁单元的分析,差通道噪声的“自身项”是难以通过和通道噪声的实数加权来抵消掉的.也就是说,在最大熵搜索时,散乱分布的噪声引起的波形熵的变化很小,远不及目标散射点回波的熵的变化.综合以上分析我们给出以下判断:孤立散射点在最大熵测角过程中占有主导地位,只要不是目标回波的高分辨距离像中完全不含孤立散射点或者被噪声淹没,本方法均会表现出优良的性能.

### 4.2 改进的最大熵测角步骤

依据式(15),我们可以对回波信号进行高分辨处理,然后开始最优搜索,整个过程包含了傅氏变换、波形熵计算和排序等运算模块.工程上普遍采用的快速傅立叶变换(FFT),大大提高了傅氏变换的效率,但是求波形熵的计算量依然很大,要完成大范围的高精度搜索,整体运算量相当巨大.并且熵本身并不是一个解析函数,求梯度、最陡下降法等不能应用<sup>[7]</sup>,可能会陷入局部最大值,出现偏差.本节提出与传统比幅测角相结合的最大熵测角方法,也就是首先比幅测得目标的角度,再围绕这个角度在一定范围内进行高精度搜索,具体实现步骤如下:

(1)对回波进行高分辨处理得到  $F[s_c(t)]$  和  $F[s_h(t)]$ .

(2)应用传统比幅测角方法得到目标的角度估计  $\theta$ .

(3)令  $\theta_0 = \theta + \Delta\theta$ ,  $\Delta\theta \in (\theta_{min}, \theta_{max})$ ,在定义域内遍历  $\Delta\theta$ ,

计算  $E[F[s_c(t)] - \theta_0 F[s_h(t)]]$

(4)寻找出第3步计算结果最大值对应的  $\theta_0$ ,就得到了目

标的角度估计  $\theta_{opt}$ .

本文仅结合比幅测角方法提出了改进步骤, 其实可以利用任何现有的测角方法, 首先得到初步角度估计, 然后再应用最大熵角度估计方法. 由于熵本身就是对波形的整体平均化程度的评估, 所以利用本方法进行目标角度估计具有抑制个别角闪烁点的特性, 同时对于通道噪声也不敏感.

## 5 仿真试验与结果分析

为验证本文提出方法的性能, 我们进行了电脑仿真. 采用线性调频连续波 (LFMCW) 体制, 载频 35GHz, 重频 25kHz, 对应不模糊距离为 6000m, 信号带宽 55MHz, 因而距离分辨率为 2.73m. 目标为仿真战斗机散射点模型, 长 35m, 宽 30m, 高 4.5m, 散射点间距 0.5m. 由距离分辨率知, 在对回波进行高分辨处理之后, 距离门内散射点叠加情况依然非常严重. 设弹载雷达与目标相距 800m, 二者速度方向夹角  $15^\circ$ , 速度差为 700m/s, 目标的俯仰角为  $50^\circ$ , 方位角为  $60^\circ$ . 初始时刻, 假设雷达波束指向目标尾部, 采用步进跟踪方式, 即在本次相干处理期间, 波束指向不变, 下一次的波束指向则是由本次或者前几次的结果外推出来的. 由于多普勒效应会使距离像发生畸变, 如果不能精确得到补偿将严重影响测角精度. 由于本文只关注测角原理, 因此假定距离像已经完成径向运动补偿.

### 5.1 无噪声条件下的角度估计

仿真不含噪声条件下 2.56ms (64 个重复周期) 内的角度估计. 从仿真参数可以推知, 此时的散射点叠加已经很严重, 传统的直接对距离单元进行比幅测角的方法将会出现很大误差. 仿真结果也说明了这一点, 线偏差范围为  $(-80, 80)$  m, 对于一个  $30 \times 35\text{m}^2$  的目标, 此时的测角已失去意义, 因而未在图 5 中绘出.

我们采用高分辨加权测角方法<sup>[5]</sup>进行角度估计: 选取多个归一化方差较小的距离单元, 取各自比幅测角的结果按照它们各自的幅度加权作和, 然后取均值作为角度估计结果, 这在一定程度上抑制了角闪烁噪声. 图 5 所示高分辨加权和最大熵两种测角方法的角运动估计曲线 (已完成均值归 0 化), 点划线为 0 均值的目标方位运动轨迹, 点曲线是高分辨加权测角结果, 实线为最大熵测角结果. 可以看出, 高分辨加权方法的测角线偏差范围相对于直接估计结果  $(-80, 80)$  m 已明显变小, 为  $(-9, 26)$  m, 若剔除掉明显闪烁的测角结果, 线偏差动态范围约为 20m, 而最大熵估计结果明显优于

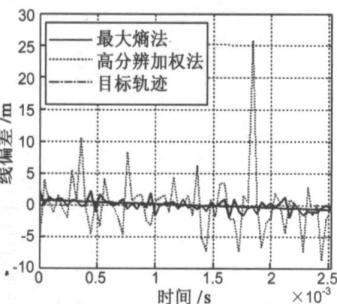


图 5 两种方法的估计曲线

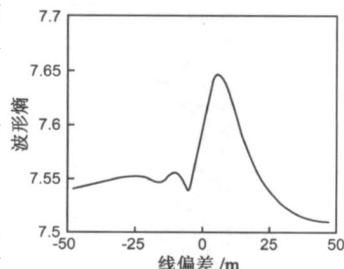


图 6 最大熵搜索曲线

高分辨加权方法, 偏差范围约 4m.

图 6 是某一周期的波形熵变化曲线, 以当次高分辨测角结果为中心, 搜索步进量 0.12m, 搜索范围  $(-48, 48)$  m. 可以看出虽然存在局部最大值, 但是最大熵所在的峰还是很明显的. 因此最大熵搜索方法可以采用先粗搜索、后精搜索的方法, 这样可以节省运算量, 易于工程实现.

### 5.2 信噪比 (SNR) 变化时的线偏差均方根差曲线

为了评估最大熵测角方法对噪声的敏感程度, 我们分别对和、差通道叠加独立同正态分布的复噪声, 然后采用两种方法估计 2.56ms (64 个重复周期) 内的角度, 计算它们各自的线偏差均方根差, 如图 7 所示. 由于初始时刻波束零点指向目标的尾部, 且相干时间很短, 所以整个测角期间目标均在差波束零点附近, 差通道回波幅度受其方向图调制必然变得很小, 和通道的信号则相对强得多, 经计算和、差通道功率相差 13.2dB, 图中横坐标均为和通道的信噪比. 可以看出两种方法的线偏差均方根差曲线在  $-21\text{dB}$  附近有交点, 在  $\text{SNR} < -21\text{dB}$  的情况下, 最大熵方法测角结果出现很大偏差,  $-25\text{dB}$  的时候, 均方根差已达 61m, 远大于高分辨加权法的 7.1m. 这是因为和通道  $\text{SNR} = -25\text{dB}$  时, 差通道  $\text{SNR}$  已恶化至  $-38.2\text{dB}$ , 基于波形熵的角度估计方法已经无法正常工作, 而在  $\text{SNR} > -20\text{dB}$  后, 最大熵测角方法就表现出稳定的性能了. 因此在保证目标不移出线形区的前提下, 应该尽量使波束零点偏离目标, 提高和、差通道的信号功率比, 也就保证了最大熵测角的正常工作.

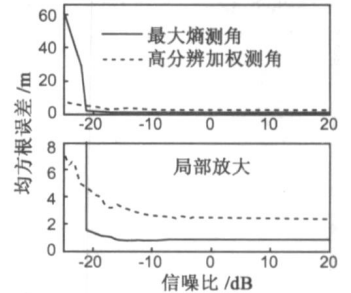


图 7 信噪比变化时两方法的线偏差均方根差曲线

## 6 结论

在未制导阶段, 目标张角大, 且目标和雷达平台处于高速相对运动状态, 此时角闪烁是限制精度的最主要的因素, 甚至使雷达不能作精确制导用. 本文在假设一个单脉冲测角周期内目标近似作线性角运动的基础上, 分析了高距离分辨体制下由于差波束方向图调制引起的谱展宽现象, 证明了目标角运动中心与谱展宽程度和波形熵之间的关系, 从而提出利用最大波形熵估计目标角运动中心的方法. 为降低最大熵搜索的计算量, 文中还给出了与传统测角方法相结合的改进的最大熵测角步骤. 最后对目标的角度跟踪进行了仿真, 将传统的高分辨加权处理测角结果与本文所提出方法的测量结果进行对比, 给出了线偏差曲线, 同时还仿真了信噪比变化时, 两种测角法的线偏差均方根差曲线, 表明了新方法的有效性.

参考文献:

- [1] 乔晓林, 肖渺, 金铭. 基于频率捷变和 RCS 加权抑制雷达角闪烁的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(4): 54

Qiao Xiaolin, Xiao Miao, Jin Ming. Research of radar angular glint suppression based on frequency agility and RCS weighting [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(4): 54-57. (in Chinese)

- [2] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking part I: dynamic models[J]. IEEE Trans on AES, 2003, 39(4): 1333-1364.
- [3] Zhang Qun, Tat Soon Yeo. Three dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique[J]. IEEE Trans on GRS, 2004, 42(9): 1818-1828.
- [4] Zhang Qun, Tat Soon Yeo, Du Gan, Zhang Shouhong. Estimation of three dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging[J]. IEEE Trans on GRS, 2004, 42(2): 292-300.
- [5] 张涛, 张群, 马长征, 张守宏. 基于高分辨距离像的角闪烁抑制方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(3): 295-300.
- [6] Howard, D D. Radar target angular scintillation in tracking and guidance system based in echo signal phase front distortion[J]. Proc NEC, 1959, 15: 840-849.
- [7] 张群. 干涉式目标三维成像及其三维运动补偿技术[D]. 西安: 西安电子科技大学电子工程研究所, 2001. 60-61.

#### 作者简介:



李强男, 1979 年生于山东潍坊, 现为西安电子科技大学博士研究生. 从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作.

E mail: Leechon@163.com



张守宏男, 1938 年生, 教授, 电子学会会员, 博士生导师. 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作.



张焕颖男, 1980 年生于河北河间, 现为西安电子科技大学博士研究生. 从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作.

E mail: zhy2699@263.net

刘峥男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达成像、目标识别、高分辨信号处理等方面的研究工作.