基于极大似然估计的高分辨雷达测角方法

陈新亮 曾 涛 郑 乐
(北京理工大学信息与电子学院，北京 100081)

摘 要：研究了高分辨雷达的测角方法：在介绍单脉冲测角原理的基础上，建立了宽带高分辨雷达角度估计模型，推导了目标偏角与回波信号的联合概率密度函数；提出了基于极大似然估计的宽带雷达测角方法，通过采用迭代算法交替更新目标偏角和回波信号，实现了目标偏角和回波信号的联合估计，并给出了目标偏角估计精度的近似克拉美罗界。仿真比较了该方法与传统窄带雷达测角方法的估计性能，结果表明，本方法的测角精度优于传统窄带测角方法，且在信噪比一定的条件下目标距离单元数越多，测角的均方根误差越小。仿真验证了该角度估计方法是渐近无偏的，估计误差方差小于传统窄带测角方法，且随距离单元数增多而减小。

关键词：高分辨雷达；测角；极大似然估计；克拉美罗界
中图分类号：TN95 **文献标识码**：A **文章编号**：1003-0530(2012)09-1241-07

An angle measurement method for high resolution radar based on maximum likelihood estimation

CHEN Xin-liang ZENG Tao ZHENG Le
(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The problem of target angle measurement in high resolution radar was studied. The principle for measuring angle in mono-pulse radar was introduced, then the model of angle estimation in high resolution radar is built, and the joint probabilistic density function of target angle and return signal was derived. An angle estimation method based on maximum likelihood estimation for high resolution radar was proposed, in which the angle of the target and the return signal were updated iteratively and estimated jointly, and the Cramer Rao Lower Bound of the angle estimation was approximated. The performance of the proposed method was compared against the traditional angle estimation method in narrow band radar by simulation, and it came out that the angle measurement accuracy is higher than traditional method. When the signal-to-noise ratio is given, the more the number of range cell is, the smaller the root mean square of the estimation error is. Simulation results verify that the proposed method is asymptotically unbiased, and has a smaller estimation error variance than traditional method in narrow band radar.

Key words: high resolution radar; angle measurement; maximum likelihood estimation; Cramer Rao Lower Bound

1 引言

单脉冲偏轴测角技术[1][2][3]是一种成熟的雷达角度测量技术。传统窄带跟踪雷达一般采用振幅和差法测量目标的角度。由于窄带雷达分辨率低，目标的多个散射点在同一个距离单元矢量叠加，目标与雷达之间存在相对转动或姿态变化时，会导致角闪烁。采用宽带雷达可以将目标散射中心分散到多个距离单元，减少多个散射点矢量叠加的机会，从而抑制角闪烁。但是，宽带雷达也导致目标回波能量被分散，且热

收稿日期：2012-07-25；修回日期：2012-08-28
基金项目：国家自然科学基金项目(批准号:61101229)资助

噪声功率增大,信噪比降低,给角度测量带来不利影响。由于宽带雷达距离维的测量精度远高于角度测量精度,角度测量误差是限制宽带跟踪雷达的目标跟踪精度的主要因素。对于宽带雷达角度测量问题,国内外均有研究[4][5][6][7],其中[8]采用最大熵准则进行测角,[9]考虑多目标情形下的测角,还有利用宽带信号先进行高分辨处理然后再测角[10]。本文基于单脉冲等信号法测角原理,建立了宽带高分辨雷达和差通道回波模型,提出了目标偏角的极大似然估计,通过仿真分析了所提方法的测角精度,并与窄带雷达测角精度进行了比较,验证了本方法的有效性。

2 雷达测角原理

2.1 雷达测角原理

精密跟踪雷达广泛采用等信号法进行自动测角,该方法采用两个相同且彼此部分重叠的波束,如果目标处在两波束的交叠轴方向,则两波束接收到的信号强度相等,该轴称为等信号轴。否则,如果目标处在等信号轴的一侧,则该侧的波束接收到的信号强度高于另一侧。因此,比较两个波束回波信号的强弱就可以判断出目标偏离等信号轴的方向,并可用查表的办法估计出偏离等信号轴的大小。

设指向0°方向的天线电压方向性函数为 $F(\theta)$,等信号轴的指向为 θ_0,则波束1、波束2的方向性函数可分别写成:

$$\begin{aligned} F_1(\theta) &= F[\theta-(\theta_0-\theta_k)] \\ F_2(\theta) &= F[\theta-(\theta_0+\theta_k)] \end{aligned} \tag{1}$$

其中,θ_k 为波束最大值方向与 θ_0 方向的夹角,称为偏移角。测角精度随着偏移角度增大而提高。但偏移角太大又会引起和波束的峰值分裂现象。兼顾测角精度和和波束峰值两方面,一般情况下取偏移角 $\theta_k=\frac{1}{3}\theta_{1/2}$。

设目标方向为 θ_t,用等信号法测量时,波束1、波束2接收到的回波信号电压分别为:

$$\begin{aligned} s_1(t,\theta_t) &= s(t)F_1(\theta_t) = s(t)F[\theta_t-(\theta_0-\theta_k)] \\ s_2(t,\theta_t) &= s(t)F_2(\theta_t) = s(t)F[\theta_t-(\theta_0+\theta_k)] \end{aligned} \tag{2}$$

其中,$s(t)$ 为比例系数,它与雷达参数、目标距离、目标特性等因素有关,与目标方向无关。

记目标方向与等信号轴指向的角误差为 $\Delta\theta=\theta_t-\theta_0$,经过和差网络形成和差波束后,对应的和、差通道信号分别为

$$\begin{aligned} s_\Sigma(t,\Delta\theta) &= s_1(t,\theta_t)+s_2(t,\theta_t) \\ &= s(t)[F(\Delta\theta+\theta_k)+F(\Delta\theta-\theta_k)] = s(t)F_\Sigma(\Delta\theta) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} s_\Delta(t,\Delta\theta) &= s_2(t,\theta_t)-s_1(t,\theta_t) \\ &= s(t)[F(\Delta\theta-\theta_k)-F(\Delta\theta+\theta_k)] = s(t)F_\Delta(\Delta\theta) \end{aligned} \tag{4}$$

其中,

$$F_\Sigma(\Delta\theta) = F(\Delta\theta+\theta_k)+F(\Delta\theta-\theta_k) \tag{5}$$

$$F_\Delta(\Delta\theta) = F(\Delta\theta-\theta_k)-F(\Delta\theta+\theta_k) \tag{6}$$

分别为和波束和差波束方向图。

假设波束宽度为 $\theta_{1/2}$,则波束方向图可以写成:

$$F(\theta)=\frac{\sin(m\theta)}{m\theta} \tag{7}$$

其中 $m=\frac{0.886\pi}{\theta_{1/2}}$。代入式(5)(6)得

$$\begin{aligned} F_\Sigma(\theta) &= \frac{\sin(m\theta)\cos(m\theta_k)}{m(\theta^2-\theta_k^2)}2\theta \\ &\quad -\frac{\sin(m\theta_k)\cos(m\theta)}{m(\theta^2-\theta_k^2)}2\theta_k \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} F_\Delta(\theta) &= \frac{\sin(m\theta)\cos(m\theta_k)}{m(\theta^2-\theta_k^2)}2\theta_k \\ &\quad -\frac{\sin(m\theta_k)\cos(m\theta)}{m(\theta^2-\theta_k^2)}2\theta \end{aligned} \tag{9}$$

和差比为

$$\begin{aligned} f(\theta) &= \frac{F_\Delta(\theta)}{F_\Sigma(\theta)} \\ &= \frac{\cos(m\theta_k)\sin(m\theta)\theta_k-\cos(m\theta)\sin(m\theta_k)\theta}{\cos(m\theta_k)\sin(m\theta)\theta-\cos(m\theta)\sin(m\theta_k)\theta_k} \end{aligned} \tag{10}$$

其在 $\theta=0$ 处的导数为 $K=f'(0)=\frac{\sin(m\theta_k)-\cos(m\theta_k)m\theta_k}{\sin(m\theta_k)\theta_k}$。和差位比与偏角的关系如图1所示,可以看出若目标偏角较小,可以近似认为和差比与偏角呈线性关系,有 $f(\theta)\approx K\theta$。

振幅和差法测角基于和通道、差通道信号幅度的比值进行测角,即

$$\frac{s_\Delta(t)}{s_\Sigma(t)}=\frac{F_\Delta(\Delta\theta)}{F_\Sigma(\Delta\theta)}=f(\Delta\theta) \tag{11}$$

对于脉冲压缩体制雷达,由于脉压后信噪比提高,一般是分别对和、差通道信号脉压后计算幅度比值进行测角。

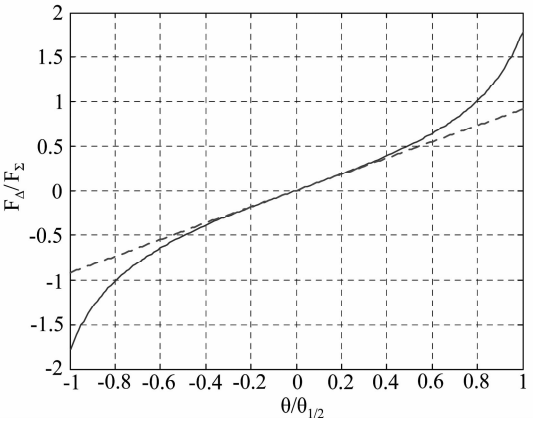

图 1　和差比随角度的变化关系

Fig. 1　The relation between difference/sum ratio and target angle

2.2　宽带雷达测角模型

假设宽带雷达检测区间有 N 个距离单元,每个距离单元上最多只有一个散射中心,且忽略散射中心的角度差异,即认为所有散射中心对应同一个目标角度。记和、差通道的第 n 个距离单元上的一维距离像分别为

$$\begin{aligned}\Sigma_n &= s_n + w_n \\ \Delta_n &= f(\theta-\theta_0)s_n + v_n \quad n=1,2,\cdots,N\end{aligned} \tag{12}$$

其中,θ 为目标方向偏离等信号轴方向的角度,$w_n, v_n \sim N(0,\sigma^2)$ 分别为和、差通道的高斯白噪声,方差为 σ^2。目标真实的一维距离像记为 $\mathrm{s}=(s_n), n=1,2,\cdots,N$。宽带雷达测角问题可以表述为,已知 $\Sigma=(\Sigma_n), \Delta=(\Delta_n)$,求 θ 的估计。当 $N=1$ 时,宽带雷达测角问题退化为窄带雷达测角问题。

3　宽带雷达测角方法

对于窄带雷达,目标为点目标,在目标位置处的和、差通道信号分别为 Σ 和 Δ,则角度测量值为 $\hat{\theta}=\theta_0+f^{-1}\left(\frac{\Delta}{\Sigma}\right)$,即角误差的大小由和差比 $\frac{\Delta}{\Sigma}$ 的幅度决定,符号与其实部的符号相同。

对于宽带雷达,目标在距离上是扩展的,其回波能量分布在多个距离单元上,导致单个距离单元上的信噪比降低。现有宽带测角方法是选取距离像上的最大值点,然后采用传统窄带雷达的点目标测角方法,计算目标最强散射中心的角度估计,作为对目标角度的测量值。

即

$$\hat{\theta}=\theta_0+f^{-1}\left(\frac{\Delta_m}{\Sigma_m}\right) \tag{13}$$

其中,第 m 个距离单元为最强散射中心所在位置,即

$$m=\arg\max_n |\Sigma_n| \tag{14}$$

这种方法实现简单,但是没有充分利用目标回波信息,在目标不存在强散射中心,各散射点能量分布较为均匀时,信噪比损失较大,测量精度低。

因此,为充分利用回波数据,获得更高的测角精度,我们从回波模型出发,导出目标角度的最大似然估计。根据上一节建立的回波模型,第 n 个检测单元的和通道目标回波的似然函数为

$$p(\Sigma_n | s_n)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{\|\Sigma_n-s_n\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{15}$$

差通道目标回波的似然函数为

$$p(\Delta_n | \theta,s_n)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{\|\Delta_n-f(\theta-\theta_0)s_n\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{16}$$

联合分布为

$$p(\Sigma,\Delta | s,\theta)=\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^N \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{i=1}^{N}\left(\|\Sigma_i-s_i\|^2+\|\Delta_i-f(\theta-\theta_0)s_i\|^2\right)\right) \tag{17}$$

令

$$\alpha=f(\theta-\theta_0) \tag{18}$$

则估计 θ 的问题转化为估计 α,可通过先估计 α 间接求得 θ。

式(17)可写为

$$\begin{aligned}-\ln p(\Sigma,\Delta | s,\alpha) &= \frac{1}{2\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}|s_n|^2(1+\alpha^2) \\ &-\frac{\alpha}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}\mathrm{Re}(\Delta_n^* s_n)-\frac{1}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}\mathrm{Re}(\Sigma_n^* s_n) \\ &+\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}(|\Sigma_n|^2+|\Delta_n|^2)+N\ln 2\pi\sigma^2\end{aligned} \tag{19}$$

或

$$\begin{aligned}-\ln p(\Sigma,\Delta | s,\alpha) &= \frac{1+\alpha^2}{2\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}\left|s_n-\frac{\alpha\Delta_n+\Sigma_n}{1+\alpha^2}\right|^2 \\ &+\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}\left(|\Sigma_n|^2+|\Delta_n|^2-\frac{1}{1+\alpha^2}|\alpha\Delta_n+\Sigma_n|^2\right) \\ &+N\ln 2\pi\sigma^2\end{aligned} \tag{20}$$

将式(19)对 α 求导,得

$$-\frac{\partial \ln p(\sum,\Delta\mid\beta)}{\partial\alpha}=\frac{\alpha}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}|s_n|^2-\frac{1}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}\mathrm{Re}(\Delta_n^* s_n) \tag{21}$$

令式(21)为0,得到 α 的极大似然估计为

$$\hat{\alpha}=\frac{\mathrm{Re}\left(\sum_{n=1}^{N}\Delta_n^* s_n\right)}{\sum_{n=1}^{N}|s_n|^2} \tag{22}$$

注意到其中 s_n 是未知量,还需进一步的估计。若 α 已知,则由式(20)可得 s_n 的极大似然估计为

$$\hat{s}_n=\frac{\alpha\Delta_n+\sum_n}{1+\alpha^2} \tag{23}$$

可以看出,$\hat{\alpha}$ 与 $\hat{s}_n$ 的极大似然估计值的计算互相依赖于对方的真值。通过在式(22)和式(23)中用极大似然估计值取代真值,可以得到 α 的估计算法如下:

1) 初始化:$i=0,\alpha_0=0,s_n^{(0)}=\sum_n,n=1,2,\cdots,N$。

2) 收敛性判别:若 $|\alpha_i-\alpha_{i-1}|<\varepsilon$,$\varepsilon$ 为预先指定的精度参数,则算法收敛,输出最终估计值 $\hat{\alpha}=\alpha_i$;否则,$i=i+1$,继续。

3) 计算 $s_n^{(i)}$:对 $n=1,2,\cdots,N$,计算 $s_n^{(i)}=\frac{\alpha_{i-1}\Delta_n+\sum_n}{1+\alpha_{i-1}^2}$。

4) 计算 $\alpha^{(i)}$:$\alpha_i=\frac{\mathrm{Re}\left(\sum_{n=1}^{N}\Delta_n^* s_n^{(i)}\right)}{\sum_{n=1}^{N}|s_n^{(i)}|^2}$,转向2)。

为评估算法的估计性能,需分析估计子的克拉美罗界。α 的估计误差方差满足

$$\mathrm{var}(\hat{\alpha})\geqslant C_\alpha \tag{24}$$

其中 C_α 为克拉美罗界,定义为

$$C_\alpha=\frac{1}{-\mathbb{E}\left[\frac{\partial^2 \ln p(\sum,\Delta\mid s,\alpha)}{\partial^2\alpha}\right]} \tag{25}$$

由式(21)对 α 求导可得

$$-\frac{\partial^2 \ln p(\sum,\Delta\mid s,\alpha)}{\partial^2\alpha}=\frac{1}{\sigma^2}\sum_{n=1}^{N}|s_n|^2 \tag{26}$$

代入式(25)得到克拉美罗界为

$$C_\alpha=\frac{\sigma^2}{\sum_{n=1}^{N}|s_n|^2} \tag{27}$$

其中包含 s_n 的未知真值,不能直接计算,可用估计算法同时得到 s_n 的估计值代入,从而得到克拉美罗界的近似估计 $\hat{C}_\alpha$。

根据 α 的极大似然估计可以估计目标的角度 θ:

$$\hat{\theta}=\theta_0+f^{-1}(\hat{\alpha}) \tag{28}$$

相应的克拉美罗界为

$$C_\theta=\left(\frac{\partial\theta}{\partial\alpha}\right)^2 C_\alpha \tag{29}$$

若目标角度位于线性区内,式(28)可近似为

$$\hat{\theta}=\theta_0+\frac{\hat{\alpha}}{K} \tag{30}$$

其克拉美罗界的近似估计为

$$\hat{C}_\theta=\frac{\sigma^2}{K^2\sum_{n=1}^{N}|\hat{s}_n|^2} \tag{31}$$

4 仿真结果分析

通过计算机仿真,比较了宽带测角方法与窄带测角算法的测角性能。仿真中信噪比设置为 SNR = 10dB,蒙特卡洛仿真次数为 1000 次,目标偏角取值从 $-\theta_{1/2}$ 到 $\theta_{1/2}$,间隔为 $0.05\theta_{1/2}$。当目标占据的距离单元数 $N=1$ 时,即传统窄带雷达点目标的情形,采用传统窄带测角方法的估计结果如图 2 所示。当目标占据的距离单元数 $N=5$ 时,且各距离单元散射点能量相等,采用本文所提出的测角方法估计结果如图 3 所示。

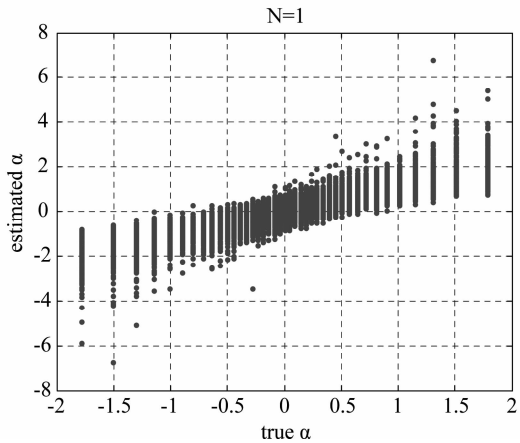

图 2 窄带测角的 α 估计结果

Fig. 2 angle estimation results in narrow band radar

对比图 2 和图 3 可以看出,传统窄带测角方法估计结果误差较大,且目标偏角越大,估计结果偏离真值越显著。而宽带测角方法通过利用多个距离单元的回波数据,显著减小了估计误差。

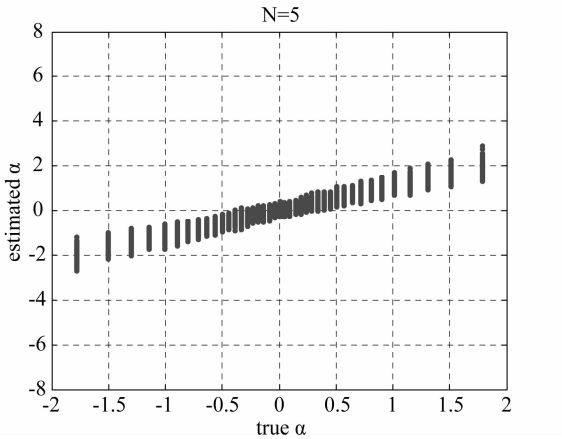

图 3　当 N=5 时宽带测角的 α 估计结果

Fig. 3　angle estimation results of the proposed method in wide band radar (N=5)

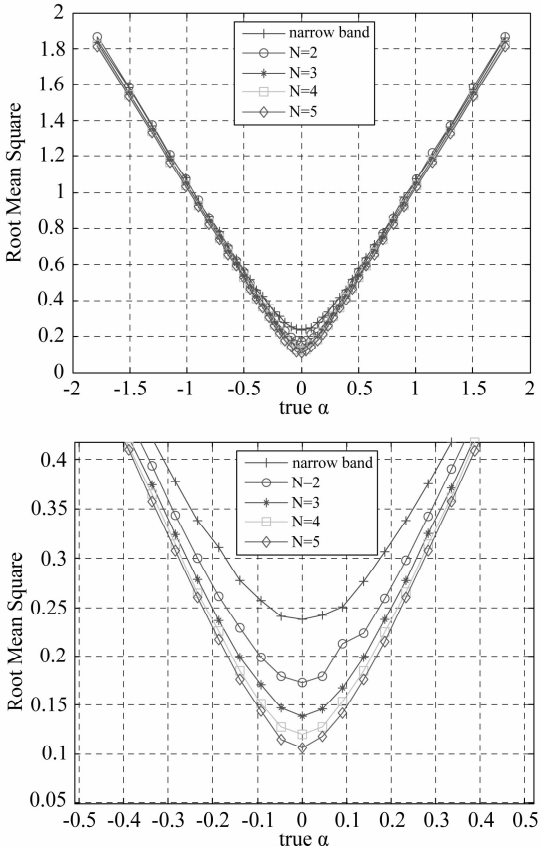

图 4　宽带测角均方根误差

Fig. 4　root mean square of angle measurement error in wide band radar

通常用目标偏角估计误差的均方根误差表征测角精度。为了分析比较宽窄带测角性能,仿真比较了窄带情况下和不同距离单元数时宽带情况下的目标偏角估计误差的均方根误差,结果如图 4 所示。从图中可以看出,目标偏角较大时,不同情况下的角度估计误差均方根误差差异较小;但在目标偏角较小的情况下,宽带测角的均方根误差显著小于窄带情况,且距离单元越多,测角的精度越高。

为分析目标偏角估计误差的来源,仿真比较了不同情况下角度估计误差的偏差和方差,结果分别如图 5 和图 6 所示。从图 5 中可以看到,传统窄带情况下 α 的估计误差偏差近似为零,即估计是无偏的;宽带情况下本文所提的目标偏角估计方法是有偏的,其估计误差偏差随着目标偏角的增大而增大,与目标偏角呈近似线性关系,且距离单元数越多,估计误差偏差越小。从图 6 中可以看出,α 的估计误差方差随着目标偏角的增大而增大;距离单元数越多,估计误差方差越小。

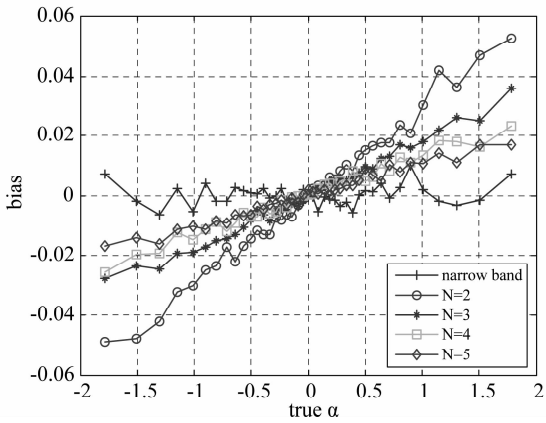

图 5　宽窄带测角偏差

Fig. 5　angle estimation bias in wide band radar and narrow band radar

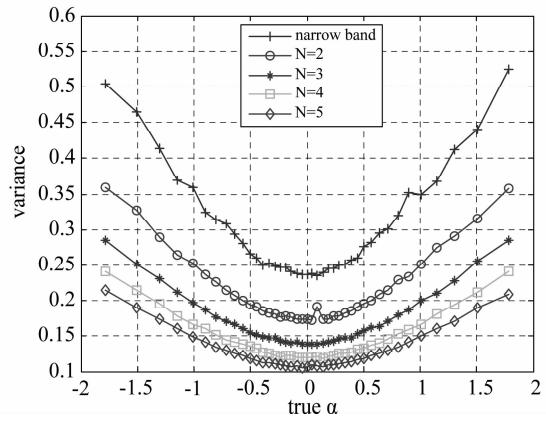

图 6　宽窄带测角方差

Fig. 6　angle estimation variance in wide band radar and narrow band radar

综合以上分析,尽管本文所提的宽带测角方法是有偏的,但其偏差与目标偏角呈简单的线性关系,易于矫正,且测角精度不低于窄带测角,特别是在目标的偏角较小的时候,宽带角度估计均方根误差显著优于窄带。由于目标跟踪时,雷达波束尽可能指向目标,即目标偏角较小,宽带测角的这一特性对提高跟踪精度是有利的。

目标偏角的估计精度与信噪比有关。仿真分析了不同偏角下信噪比对目标偏角估计均方根误差的影响,结果如图 7 所示。不难看出,信噪比越高,均方根误差越小,测角精度越高。

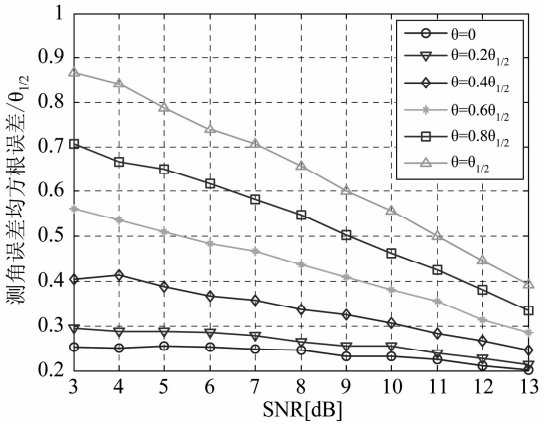

图 7 宽带测角误差与信噪比的关系

Fig. 7 the relation between angle measurement RMS error and SNR

5 结束语

本文针对高分辨雷达测角问题开展研究,基于雷达单脉冲测角原理建立了宽带雷达测角信号模型,从目标偏角和回波信号的联合似然函数出发,提出了基于极大似然估计的宽带雷达测角迭代算法,并分析了宽带雷达目标偏角估计的近似克拉美罗界。仿真结果表明,采用本文的角度估计方法,宽带雷达测角精度优于传统窄带雷达测角精度,特别是在目标偏角较小的情况下,宽带测角的优势更为明显,这一特性有利于提高宽带雷达跟踪精度。从宽带测角的误差构成来看,宽带雷达测角的误差方差显著小于窄带雷达,但其偏差较大;宽带雷达测角偏差与目标偏角呈线性关系,且目标占据的距离单元数越多,偏差越小,可以认为,该估计是渐近无偏的。

参考文献

[1] Mosca, E. Angle estimation in amplitude comparison monopulse systems[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1969, 2: 205-212.

[2] Lipman, M. Comment on Variance Analysis of the Angle Output Voltage for an Amplitude Monopulse Receiver [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1971, 5: 1009-1011.

[3] Kehr, D. E. Variance analysis of the angle output voltage for an amplitude monopulse receiver[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1968, 4: 535-540.

[4] Willett, P. K., W. D. Blair, and Y. Bar-Shalom. Correlation between horizontal and vertical monopulse measurements [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2003, 39(2): p. 533-549.

[5] 高磊,许人灿,陈曾平. 一种宽带单脉冲雷达测角方法[J]. 电光与控制,2011,18(10):55-58.
GAO Lei, XU Ren-can, CHEN Zeng-ping. A Method for Angle Measurement on Broadband Mono-Pulse Radar, Electronics Optics & Control, 2011, 18(10): 55-58. (in Chinese)

[6] 李文臣,丹梅,刘进等. 宽带一维像雷达单脉冲跟踪建模仿真[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4732-4735.
LI Wen-chen, DAN Mei, LIU Jin, etc. Radar Mono-pulse Tracking Modeling and Simulation of Wideband Range Profile, Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4732-4735. (in Chinese)

[7] 董瑞军. 用 STAP 提高机载相控阵雷达的测角精度,信号处理,2000,16(s1):88-94.
Dong Ruijun. An Approach to Improve Precision of Angle Measurement for Airborne Phased Array, Signal Processing, 2000, 16(s1): 88-94. (in Chinese)

[8] 李强,张守宏,张焕颖等. 宽带单脉冲跟踪雷达的最大熵测角新方法[J]. 电子学报,2006,34(12):2180-2184.
LI Qiang, ZHANG Shou-hong, ZHANG Huan-ying, etc. Maximum Entropy Method for Angle Estimation in Wideband Monopulse Tracking Radar, Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2180-2184. (in Chinese)

[9] 赵永波,谷泓,张守宏. 一种多目标情况下的单脉冲测角方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),

2005,32(3):383-386.
ZHAO Yong-bo, GU Hong, ZHANG Shou-hong. A monopulse angle measurement method for multiple targets, Journal of Xidian University, 2005, 32(3): 383-386. (in Chinese)

[10] 赵宏钟,何松华. 基于高分辨距离像的单脉冲角跟踪技术[J]. 电子学报,2000,28(4):142-144.
ZHAO Hong-zhong, HE Song-hua. High Resolution Profile-based Angular Tracking Technology for Monopulse Radar [J], Acta Electronica Sinica, 2000, 28(4): 142-144. (in Chinese)

[11] 杨建宇,李俊生. 高分辨率雷达目标的随机参量脉冲串检测方法[J]. 电子学报,2004,32(6):1044-1046.
YANG Jian-yu, LI Jun-sheng. Random Parameters Pulse Train Detector for High Range Resolution Radar [J], Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 1044-1046. (in Chinese)

作者简介

陈新亮(1984-),男,生于湖北,2005 年本科毕业于武汉大学,2010 年在中国科学院半导体研究所获博士学位。现为北京理工大学信息与电子学院博士后,从事雷达目标检测与跟踪等方面的研究。
E-mail:chenxinliang123@126.com

曾　涛(1971-),男,1994 年本科毕业于北京理工大学电子工程系,1999 年获博士学位。现为北京理工大学信息与电子学院研究员,博士生导师,从事雷达系统、雷达信号处理等方面的研究。
E-mail:zengtao@bit.edu.cn

郑　乐(1987-),男,生于河北,2009 年本科毕业于西安电子科技大学。现为北京理工大学信息与电子学院博士生,从事雷达系统、统计信号处理等方面的研究。E-mail: lezheng8451@163.com