

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0099- 04

毫米波主动导引头锥扫测角方法*

冯道旺, 卢启中, 曹东波, 刘章孟

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 主动毫米波导引头通过自主发射高频脉冲实现对目标的定位与跟踪, 具有良好的抗目标雷达关机性能。圆锥扫描是一种有效的导引头寻的工作体制。借助傅立叶变换方法, 从回波中提取出目标雷达相对导引头机械轴的角误差及其初始方位, 利用这两个参数就能对导引头轨迹进行实时校正, 从而实现对目标的精确瞄准。仿真结果验证了新方法对目标角误差和初始方位的估计性能。

关键词: 毫米波; 导引头; 圆锥扫描; 角误差测量

中图分类号: TN957; TN958 **文献标识码:** A

Angle Estimation for Seeker-steering with Active Conical Scanning MMW Antenna

FENG Dao-wang, LU Qi-zhong, CAO Dong-bo, LIU Zhang-meng

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Active MMW seeker can locate and track the target by emitting high-frequency pulse, and possess satisfying adaptability to suddenly cut-off radar while conical scanning is one of the effective seeker-steering systems. This paper aims to distill from the echo of the target location-related angles via Fourier Transformation, for these angles can be used to revise the attitude and course of the seeker timely, so that the target is kept in sight commendably. Numerical simulations were carried out to verify the satisfying performance of the proposed method.

Key words: MMW; seeker; conical scanning; angle estimation

毫米波主动导引头具有优越的抗雷达关机能力, 且可以通过对目标进行一维高精度距离成像和识别^[1-3], 实现对目标类型的识别以及攻击部位的选取, 但这些优越性能的体现都必须建立在导引头对目标进行精确定位和跟踪的基础之上。由于主动毫米波导引头与地面目标之间存在高速的相对运动, 随着导引头与目标相对位置的不断变化, 导引头所接收到的回波信号幅度会出现较大幅度的波动, 导致测角效果不理想^[4], 因而被动段的单脉冲测角定位体制很难再应用于主动段的导引头寻的。

圆锥扫描天线由于其成本低且原理简单, 被广泛用于主动毫米波导引头的测角寻的过程。本文利用毫米波导引头在进行 360°圆锥扫描过程中所接收到的回波信号幅度对目标位置的依赖性, 借助离散傅立叶变换方法从回波信号中提取出了目标相对于导引头机械轴的方位角和俯仰角, 从而实现了对目标的实时定位和跟踪。

1 锥扫毫米波导引头模型

1.1 导引头锥扫测角模型

为了实现对目标的精确打击, 毫米波导引头必须持续地获取目标的位置信息, 并在飞行过程中利用目标的反射信号实时地修正该信息, 以防止丢失目标。由于观测噪声和控制指令延迟等多种因素的影响, 导引头关于目标的位置信息一般难以保证完全准确, 而是存在一定的角误差, 锥扫测角寻的机制的目的就是通过检测这一角误差不断修正导引头航向, 使之不断逼近目标并最终对目标实施有效摧毁。

* 收稿日期: 2009- 12- 09

作者简介: 冯道旺(1975—), 男, 副研究员, 博士。

圆锥扫描测角原理如图1所示。图中 O' 为毫米波导引头的位置, OO' 为天线机械轴的延伸, O 为天线主瓣中心在目标所在截面的投影, M 点为目标所在位置, R 为导引头与目标之间的距离, θ 为误差角,表示目标偏离圆心的程度, ϕ 为方位角,表示目标与天线主瓣中心投影连线与投影面基准轴的夹角。实际工作过程中,需要通过测量误差角 θ 和方位角 ϕ ,以实时控制导引头的飞行方向。

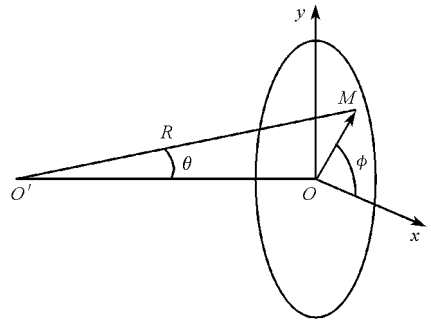


图1 毫米波主动导引头圆锥扫描测角示意图

Fig. 1 Schematic plan of angle estimation for seeker-steering with active conical scanning MMW antenna

1.2 回波信号模型

导引头在做圆锥扫描的同时以特定重复间隔 T_r 发射载频为 f_0 的脉冲,导引头扫描一周所需时间为 T_s ,相应的扫描频率为 $f_s = 1/T_s$,且假设天线扫描一周的时间内导引头共发射 N 个完整的脉冲,即 $T_s/T_r = 1/(f_s T_r) = N$ 。

在图1所示模型中,当目标误差角为 θ 、方位角为 ϕ 时,目标对脉冲信号回波的幅度为

$$A(t) = A_0 [1 + k \theta \cos(2\mathcal{Y}_s t - \phi)] \quad (1)$$

其中 A_0 是假设目标位于圆心 O 处时相应的回波幅度, k 为天线误差斜率,即通常所说的调制系数。

此外,导引头与目标的相对运动也会对导引头所接收到的回波信号产生影响^[5]。假设导引头与目标之间的径向速度为 v ,则由导引头天线所发射的信号经目标反射后,天线接收回波的多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v}{C} f_0 \quad (2)$$

其中 C 为电磁波在空间的传播速度。

设反射波与原始脉冲之间的传输时延为 T_d ,则将 t 时刻发射信号的回波与频率为 f_0 的本振信号混频之后所得到的中频信号为

$$\begin{aligned} u(t) &= A(t) \exp[j2\pi(f_0 + f_d)(t + T_d) - j2\mathcal{Y}_0 t] \\ &= A_0 [1 + k \theta \cos(2\mathcal{Y}_s(t + T_d) - \phi)] \exp[j2\mathcal{Y}_0 T_d + j2\mathcal{Y}_d(t + T_d)] \end{aligned} \quad (3)$$

从式(3)不难看出,目标相对于导引头机械轴方向的角误差 θ 和方位角 ϕ 的信息都包含在中频回波信号 $u(t)$ 的幅度中,如果能够借助有效手段提取这两个参数信息,就能实现对导引头航向的实时修正。

2 锥扫测角寻的方法

针对圆锥扫描体制导引头,提出一种从中频回波信号 $u(t)$ 中提取角误差 θ 和方位角 ϕ 信息的方法。

2.1 中频回波信号预处理

假设导引头接收机在每个脉冲回波内采集一个数据样本,即在式(3)中取 $t = nT_r$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$),则在导引头扫描一周的时间内,接收机所接收到的 N 个数据样本为

$$u(n) = A_0 [1 + k \theta \cos(2\mathcal{Y}_s \cdot nT_r - \phi)] \exp[j2\mathcal{Y}_0 T_d + j2\mathcal{Y}_d(nT_r + T_d)], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

由于目标角误差 θ 和方位角 ϕ 的信息只包含在中频回波信号 $u(n)$ 的幅度项中,因此通过提取幅度项然后进行进一步处理可以有效避免相位项中相对运动速度等未知参数的影响^[6-7]。对上述 N 个数据取幅值并进行FFT变换,得

$$\begin{aligned} U(p) &= \sum_{n=0}^{N-1} \text{mag}\{u(n)\} \exp\left[-j2\pi \frac{n}{N} p\right] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} A_0 [1 + k \theta \cos(2\mathcal{Y}_s(nT_r + T_d) - \phi)] \exp\left[-j2\pi \frac{n}{N} p\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=0}^{N-1} A_0 \left\{ 1 + \frac{k\theta}{2} \left[\exp\left(j2\mathcal{Y}_s(nT_r + T_d) - j\phi\right) + \exp\left(-j2\mathcal{Y}_s(nT_r + T_d) + j\phi\right) \right] \right\} \times \exp\left[-j2\pi \frac{n}{N} p\right] \\
&= A_0 \frac{1 - \exp\left[-j2\pi p/N\right]}{1 - \exp\left[-j2\pi p/N\right]} + \frac{k\theta}{2} A_0 \exp\left(j2\mathcal{Y}_s T_d - j\phi\right) \frac{1 - \exp\left[j2\pi(Nf_s T_r - p)/N\right]}{1 - \exp\left[j2\pi(f_s T_r - p/N)\right]} + \\
&\quad \frac{k\theta}{2} A_0 \exp\left(-j2\mathcal{Y}_s T_d + j\phi\right) \frac{1 - \exp\left[-j2\pi(Nf_s T_r + p)/N\right]}{1 - \exp\left[-j2\pi(f_s T_r + p/N)\right]}
\end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\text{mag}\{u(n)\}$ 表示取 $u(n)$ 的幅度。

由于 $T_d/T_r = 1/(f_s T_r) = N$, $Nf_s T_r = 1$, 所以式(5)三个加数的分子均为 0, 即

$$1 - \exp\left[-j2\pi p\right] = 1 - \exp\left[j2\pi(Nf_s T_r - p)\right] = 1 - \exp\left[-j2\pi(Nf_s T_r + p)\right] = 0 \quad (6)$$

当且仅当其各自对应的分母也为 0 时, 所对应的加数项才可能取非零值, 因此式(5)进一步简化为:

$$U(p) = NA_0 \delta(p) + N \frac{k\theta}{2} A_0 \exp\left(j2\mathcal{Y}_s T_d - j\phi\right) \delta(p-1) + N \frac{k\theta}{2} A_0 \exp\left(-j2\mathcal{Y}_s T_d + j\phi\right) \delta(p-N+1) \quad (7)$$

2.2 角度估计

由式(7)不难看出, $U(p)$ 只在 $p=0, 1, N-1$ 三个离散频率点处取非零值, 分别为

$$U(p) = \begin{cases} NA_0, & p=0 \\ N \frac{k\theta}{2} A_0 \exp\left(j2\mathcal{Y}_s T_d - j\phi\right), & p=1 \\ N \frac{k\theta}{2} A_0 \exp\left(-j2\mathcal{Y}_s T_d + j\phi\right), & p=N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

因此, 角误差 θ 和方位角 ϕ 可由上述三个非零离散频域数据得到,

$$\hat{\theta} = \frac{2}{k} \left| \frac{U(1)}{U(0)} \right| = \frac{2}{k} \left| \frac{U(N-1)}{U(0)} \right| \quad (9)$$

$$\hat{\phi} = 2\mathcal{Y}_s \frac{2R}{C} - \text{Arg}\{U(1)\} = 2\mathcal{Y}_s \frac{2R}{C} + \text{Arg}\{U(N-1)\} \quad (10)$$

其中 $|\cdot|$ 表示取模运算, $\text{Arg}\{\cdot\}$ 表示取花括号中复数的角度。

在实际情况下, 由于受到接收机热噪声等因素的影响, 由 $U(1)$ 和 $U(N-1)$ 独立得到的角误差和方位角估计结果不可能完全准确, 且两者可能不一致。为了改善参数估计性能, 对这两个频率点处的信息综合利用, 得到最终的估计结果为

$$\hat{\theta} = \frac{1}{k} \left(\left| \frac{U(1)}{U(0)} \right| + \left| \frac{U(N-1)}{U(0)} \right| \right) \quad (11)$$

$$\hat{\phi} = 2\mathcal{Y}_s \frac{2R}{C} + \frac{1}{2} \left\{ \text{Arg}[U(N-1)] - \text{Arg}[U(1)] \right\} \quad (12)$$

这样就得到了目标偏离导引头机械轴的角误差 θ 和初始方位角 ϕ , 为下一步的导引头姿态调整提供了依据。

3 仿真实验

以下分两组实验考查方位角和信噪比变化时, 对角误差 θ 估计性能的评估以其估计相对误差的均

方根值为标准, 即 $\sqrt{\sum_{m=1}^M (\hat{\theta}_m/\theta - 1)^2/M}$; 对方位角 ϕ 的评估以其估计误差的均方根值为标准, 即

$\sqrt{\sum_{m=1}^M (\hat{\phi}_m - \phi)^2/M}$, 其中 M 为独立蒙特卡罗仿真次数, θ 和 ϕ 分别为角误差和方位角的真实值, $\hat{\theta}_m$ 和 $\hat{\phi}_m$ 为第 m 次实验中对 θ 和 ϕ 的估计值。

假设天线锥扫频率 $f_s = 125\text{Hz}$, 脉冲重复周期 $T_r = 25\mu\text{s}$, 目标偏离导引头机械轴 $\theta = 5^\circ$, 采集天线锥扫一圈所得到的回波数据对目标角误差和方位角进行估计。

(1) 假设导引头所接收到的目标回波信号的信噪比为 20dB, 当目标方位角 ϕ 在 0° 到 360° 之间变化时, 通过 100 次蒙特卡罗仿真得到对角误差 θ 相对估计误差的均方根值随方位角的变化情况如图 2(a) 所示, 对方位角的估计均方根误差如图 2(b) 所示。

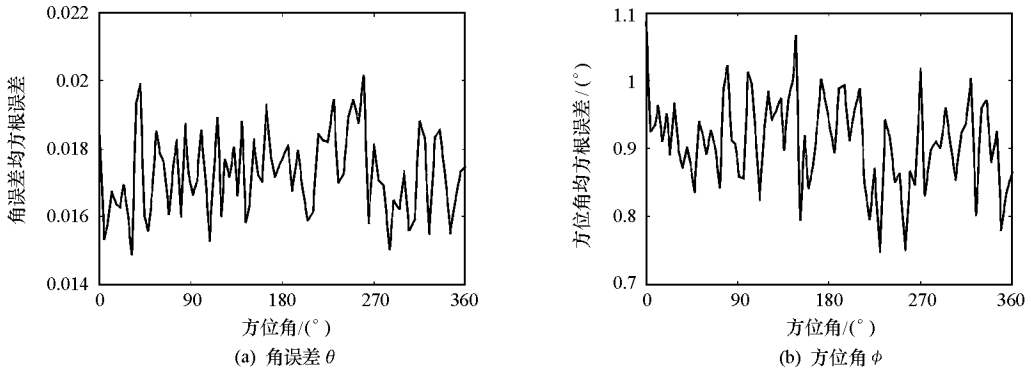


图2 目标方位角变化时角误差 θ 和方位角 ϕ 估计值的均方根误差

Fig. 2 Root mean square error of angle θ and azimuth ϕ for varying target azimuth

从图 2 的仿真结果可以看出, 在信噪比为 20dB 时, 对于不同的目标方位角, 本文所提出的方法对角误差 θ 估计值的相对误差保持在 2% 以内, 对方位角的估计精度保持在 $1.^\circ$ 以内, 能够较好地满足实际设备的定位精度需求。

(2) 取定目标方位角为 60° , 回波信号信噪比从 10~30dB 变化, 通过 100 次蒙特卡罗仿真得到对角误差 θ 相对估计误差的均方根值随信噪比的变化情况如图 3(a) 所示, 对方位角的估计均方根误差如图 3(b) 所示。

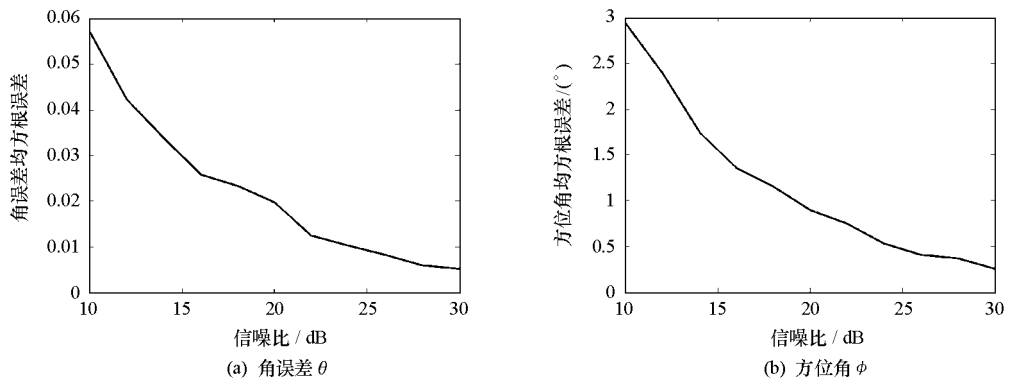


图3 回波信噪比变化时角误差 θ 和方位角 ϕ 估计值的均方根误差

Fig. 3 Root mean square error of angle θ and azimuth ϕ for varying signal-to-noise of the echo

图 3 中的仿真结果表明, 随着信噪比的提高, 本文方法对角误差和方位角的估计精度显著改善。考虑到毫米波导引头工作频段的背景噪声能量较小, 因而回波信号信噪比较高, 所以本文方法能够较好地适应实际的工作环境, 得到较高的定位精度。

4 结束语

本文利用锥扫毫米波导引头中频回波信号的特殊形式, 借助时-频域傅立叶变换方法, 从回波数据中有效地提取出了与目标位置相关联的角误差和方位角两个参数信息, 为导引头的姿态调整提供了依据。仿真结果表明, 新方法对不同方位角上的目标均有较好的定位性能, 且定位精度随着信噪比的提高而显著改善, 因而具有一定的实际应用前景。

(下转第 108 页)

参考文献:

- [1] Schmidl T M, Cox D C. Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613–1621.
- [2] 严春林. 正交频分复用系统中的同步技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 39–52.
- [3] 李加生, 尹锁柱, 邓茜. 基于 IEEE802.11a 的 OFDM 同步算法及 FPGA 实现[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(7): 117–119.
- [4] Zhang Z, Kayama H, Tellambura C. Joint Frame Synchronization and Carrier Frequency Offset Estimation in Multicarrier Systems [C]//IEEE Globecom, 2006: 1–6.
- [5] Guo Y, Liu G, Ge J. A New Time and Frequency Synchronization Scheme for OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 321–325.
- [6] Park B, Cheon H, Kang C, et al. A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 239–241.
- [7] Kim J J, Noh J H, Chang K H. Robust Timing & Frequency Synchronization Techniques for OFDM-FDMA Systems [C]//IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation, 2005: 716–719.
- [8] Wu M, Zhu W P. A Preamble-aided Symbol and Frequency Synchronization Scheme for OFDM Systems [C]//IEEE ISCAS, 2005: 2627–2630.
- [9] Manusani S K, Kshetrimayum R S, Bhattacharjee R. Robust Time and Frequency Synchronization in OFDM Based 802.11a WLAN Systems [C]//Annual IEEE India Conference, 2006.
- [10] Zhou E, Hou X, Zhang Z, et al. A Preamble Structure and Synchronization Method Based on Central-symmetric Sequence for OFDM Systems [C]//IEEE VTC, 2008: 1478–1482.
- [11] IEEE Std. 802.16a–2003. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S].
- [12] 田野, 谈振辉, 冯永新, 等. 基于共轭对称结构训练符号的 OFDM 同步算法性能分析[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(6): 1240–1243.
- [13] GSM 05.05. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Radio Transmission and Reception [S].

(上接第 93 页)

参考文献:

- [1] Daley D J, Gani J. Epidemic Modeling: An Introduction [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
- [2] Staniford S, Paxson V, Weaver N. How to Own the Internet in Your Spare Time [C]//Proceedings of the 11th USENIX Security Symposium, 2002.
- [3] Frauenthal J C. Mathematical Modeling in Epidemiology [M]. New York: Springer-verlag, 1980.
- [4] Zou C C, Gong W, Towsley D. Code Red Worm Propagation Modeling and Analysis [C]//Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communication Security, 2002.
- [5] Chen Z, Gao L, Kwiat K. Modeling the Spread of Active Worms [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2003, 2003.
- [6] Andersson H, Britton T. Stochastic Epidemic Models and Their Statistical Analysis [M]. New York: Springer-verlag, 2000.
- [7] Weaver N, Paxson V, Staniford S, et al. A Taxonomy of Computer Worms [C]//Proceedings of ACM CCS Workshop on Rapid Malcode (WORM'03), 2003.
- [8] Zou C C, Gong W, Towsley D. On the Performance of Internet Worm Scanning Strategies [J]. Journal of Performance Evaluation, 2006, 63(7): 700–723.
- [9] Moore D, Shannon C, Brown J. Code-red: A Case Study on the Spread and Victims of an Internet Worm [C]//Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement, 2002.

(上接第 102 页)

参考文献:

- [1] Wehner D. High Resolution Radar [M]. Artech House, 1994.
- [2] 刘华林, 杨万麟. 基于 QR 分解的广义辨别分析用于雷达目标识别[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 205–208.
- [3] Kyung K, Dong S, Hyo K. Efficient Radar Target Recognition Using the MUSIC Algorithm and Invariant Features [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2002, 50(3): 325–337.
- [4] Currie N, Brown C. Principles and Applications of Millimeter-wave Radar [M]. Artech House, 1987.
- [5] 沈吉, 向锦武, 祁载康, 等. 目标运动对步进频率毫米波雷达锥扫测角的影响研究[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 987–989.
- [6] 王桂丽, 李兴国. 频率步进和脉冲多普勒复合测速研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3): 190–192.
- [7] 李文臣, 王雪松, 王国玉. 机动目标一维距离像的展宽与补偿分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1364–1368.