

冲激雷达体制的数据采集和脱靶量测量方法

周宇翔 魏国华 吴嗣亮

(北京理工大学信息科学技术学院电子工程系 北京 100081)

摘要: 本文提出了一种基于冲激雷达体制的数据采集和标量脱靶量测量方法。通过利用波门对回波数据进行采集,得到各波门脱靶距离及其脉冲个数差的观测数据。对观测数据进行二次曲线拟合并估计出二次曲线系数,从而得到标量脱靶量的最优估计。仿真结果表明,该测量方法具有较高的测量精度,可以得到满意的标量脱靶量估计结果。

关键词: 冲激雷达; 数据采集; 脱靶量测量; 二次曲线拟合

中图分类号: TN957.52+4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2350-04

Data Collection and Miss Distance Measurement Based on Impulse Radar

Zhou Yu-xiang Wei Guo-hua Wu Si-liang

(Dept. of Electronics Eng., School of Info. Sci. and Tech., Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The methods of data collection and miss distance measurement based on impulse radar are presented in this paper. The impulse radar collects return signal by range gates, which gets the data of distance corresponding every range gate and difference of impulse number between range gates. Then the miss distance can be estimated by fitting the collected data into conic. Simulations show that the measurement method has satisfying result for the parameter estimation of miss distance.

Key words: Impulse radar; Data collection; Miss distance measurement; Conic fitting

1 引言

二战以来,高性能制导武器随着科技水平的提高和现代战争的需要而迅速发展,在导弹靶场测量中,脱靶量的测量对鉴定导弹性能起着至关重要的作用。当前脱靶量测量方法主要分为多普勒测量方法和窄脉冲测量方法。其中多普勒测量方法出现的时间较早,目前在国内外发展的也较为成熟^[1,2]。但该方法存在着只能针对点目标等缺点,在近距离情况下,目标回波的多普勒频率表现出一定程度的展宽,从而影响多普勒频率的测量和脱靶量估计精度。而窄脉冲测量方法具有较高的距离分辨力,从而可以实现体目标测量,具有较高的估计精度和更稳定的估计性能。

当前基于窄脉冲的脱靶量测量技术在国外发展的非常迅速,美国Babcock公司在 20 世纪 80 年代就相继开发出 AN/DSQ-24, AN/DSQ-24A 等标量脱靶量测量系统,但由于信号处理方法简单而精度较低^[3]。20 世纪 90 年代以来至本世纪初,英国CCL(Cambridge Consultants Ltd)公司相继开发出 ARMS、SMART 等矢量脱靶量测量系统及多目标标量脱靶量测量系统 STAR,可实现高机动体目标脱靶量的精确测量,脱靶量测量精度可达 5%^[4-6]。目前 CCL 公司正与 MOTOROLA 公司协作开发新一代矢量脱靶量测量系统 NAVS。而在我国,基于窄脉冲的脱靶量测量方法的研究和应用尚处于起步阶段。

由于窄脉冲的雷达体制决定了其从接收到数据采集、信号处理、数据处理都不同于常规窄带雷达,其中数据采集尤为重要,它决定了后续信号和数据处理技术的方法和可行性,因此本文提出了一种基于波门的等效采样方法。另外,由于在遭遇段导弹运动可看作是匀速直线运动,因此本文以交会过程中弹、靶做匀速直线运动为模型,提出了用于脱靶量测量的冲激雷达系统。该雷达系统通过对回波数据进行二次曲线拟合的方法建立测量方程,并利用最小二乘原理给出脱靶距离的估计公式,进而对标量脱靶量进行较高精度的估计。

2 冲激雷达系统和数据采集方法

2.1 冲激雷达系统

冲激雷达是无载频的极窄脉冲雷达,属于超宽带(UWB)雷达的一种。冲激雷达发射波形具有多种信号形式^[7,8],本文采用正负脉冲的高斯信号,因为实验证明高斯脉冲更适合于冲激雷达系统的分析研究^[8]。而且,使用正负脉冲的高斯信号在脱靶量测量系统中还有如下好处:

(1) 冲激雷达发射信号是无载波信号,若将无载波信号直接从天线发射出去,其直流分量应为零,而采用正负脉冲作为发射信号可以满足这种要求。

(2) 可以通过回波中正负脉冲出现的顺序来判断导弹是否通过脱靶点。未过脱靶点时雷达回波正负脉冲出现顺序与过脱靶点后正负脉冲出现顺序相反。

正负高斯脉冲的表达式为

$$\Omega(t) = E(e^{-\pi(t/\Delta T)^2} - e^{-\pi[(t-\Delta T)/\Delta T]^2}) \quad (1)$$

式中 E 为脉冲峰值, ΔT 为单高斯脉冲脉宽。

冲激雷达与常规窄带雷达的本质区别之一在于其回波不再是发射信号的“复制品”, 而是与目标的特性密切相关, 即目标回波是发射信号与目标冲击响应的卷积。通过实验, 复杂体目标的冲击响应函数为^[9]

$$h(t) = u(t) \sum_{i=0}^{N-1} E_i e^{-a_i^2(t-t_i)^2} \quad (2)$$

式中 $u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ 确保体目标是一个因果系统。 E_i, a_i, t_i 的

物理意义分别为目标各散射点的幅度、高斯传播因子和时延。

因此, 冲激雷达回波的表达式为

$$\begin{aligned} r(t) &= \Omega(t) * h(t) \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{-\beta_i(t)} \operatorname{erfc} \left(\frac{-\eta_{1i}(t)}{\alpha_i} \right) \\ &\quad - \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{-\beta_{2i}(t)} \operatorname{erfc} \left(\frac{-\eta_{2i}(t)}{\alpha_i} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\alpha_i = (\pi/\Delta T^2 + \alpha_i)^{1/2} \quad (4)$$

$$A_i = \sqrt{\pi} E E_i / 2 \alpha_i \quad (5)$$

$$\beta_{1i} = [(\sqrt{\pi}/\Delta T) a_i (t_i - t) / \alpha_i]^2 \quad (6)$$

$$\beta_{2i} = [(\sqrt{\pi}/\Delta T) a_i (\Delta T + t_i - t) / \alpha_i]^2 \quad (7)$$

$$\eta_{1i}(t) = p / \Delta T^2 + a_i^2 (t - t_i) \quad (8)$$

$$\eta_{2i}(t) = p / \Delta T + a_i^2 (t - t_i) \quad (9)$$

2.2 数据采集方法

标量脱靶量测量系统采用单通道天线, 即冲激雷达天线系统由一个发射天线和一个接收天线组成, 图 1 为参考定义的测量坐标系, 发射天线位于坐标系原点, 接收天线位于 y 轴, 与发射天线距离 0.3 m。导弹运动轨迹的偏角为 α , 倾角为 β 。雷达的工作方式采用基于靶标坐标系的非协同式。

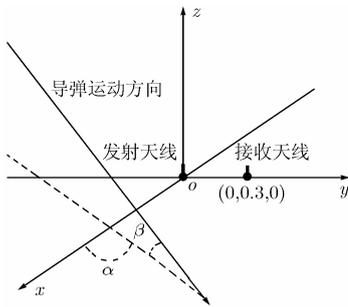


图 1 导弹运动轨迹与雷达天线系统的位置关系

由于式(3)所示回波的脉宽很窄, 且发射信号的脉冲重复周期很短, 如果对每个发射信号的回波都全程采样, 一方面要求的采样率过高, 另一方面要求的数据传输速率也较大, 数据无法传输到地面站。因此利用波门进行等效采样, 即接收机

将每个发射脉冲的回波, 在脉冲重复周期的固定时刻进行采样, 设第 i 个脉冲的回波为 $r_i(t)$, 在脉冲重复周期 t_{PRT} 上设置 N 个波门 $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ ($t_i < t_{\text{PRT}}, i = 1, 2, \dots, N$), 则各波门对该回波的采样为

$$r_i = \{r_i(t_1), r_i(t_2), \dots, r_i(t_N)\} \quad (10)$$

由于每个波门在脉冲重复周期上的位置固定, 在不存在距离模糊的前提下, 波门对应着固定的发射信号经辐射源到达接收天线的传播距离。由于导弹相对于靶标是运动的, 其回波在脉冲重复周期上也是运动的, 因此, 每个波门对所有发射脉冲的采样值序列 $\{r_1(t_i), r_2(t_i), \dots\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 等效于对导弹回波在脉冲重复周期上的全程采样。本文所采用的冲激雷达系统脉冲重复周期 $t_{\text{PRT}} = 250\text{ms}$, 所能测量的导弹速度上限 $v_{\text{max}} = 2000\text{m/s}$, 该情况下每一脉冲重复周期内导弹运动最大径向距离为

$$\Delta r_{\text{max}} = t_{\text{PRT}} v_{\text{max}} = 0.0005\text{m} \quad (11)$$

则对每一波门而言, 其相邻采样样本的最大时间间隔为

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{2\Delta r_{\text{max}}}{c} = 0.0033\text{ns} \quad (12)$$

对于纳秒量级的回波脉宽而言, 其频谱范围为吉赫量级, 其所要求的奈奎斯特采样间隔大于 10^{-2}ns , 而 $\Delta t_{\text{max}} \ll 10^{-2}\text{ns} < \text{奈奎斯特采样时间}$, 因此该等效采样满足奈奎斯特采样定律。

本文所建立的冲激雷达系统在脉冲重复周期上分别在 $t = 50, 75, 100, 125, 150, 200\text{ms}$ 位置上设置 6 个波门, 目标散射点经过各波门时所对应的信号由发射天线经散射点返回接收天线的路程分别为 $R = 15, 22.5, 30, 37.5, 45, 60\text{m}$ 。将上述 6 个波门按对应距离由大到小分别记为第 1 波门至第 6 波门。

由于冲激雷达具有极高的距离分辨力, 体目标的回波在时域上表现为各个散射点的一维距离像。利用目标回波的能量、最强散射点峰值、散射点回波样本数量等信息对各个距离门的采样数据进行时域多门限检测, 从而将体目标中各个散射点检测并提取出来, 从而为标量脱靶量的测量奠定基础。

3 标量脱靶量测量算法

定义导弹运动轨迹中弹头散射点与发射天线的最短距离为导弹标量脱靶量, 经验表明, 对于脱靶距离的观测数据, 可用二次曲线来拟合^[3]。二次曲线方程的一般表达式为

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (13)$$

利用上一部分所述检测方法可将各波门所采集到的弹头回波检测出来, 由于各波门所采集到的数据是各个发射脉冲回波在该波门的采样点的集合, 故通过将各波门弹头回波相关可以得到不同波门采到弹头回波时所相差的脉冲个数。由本文所建立的冲激雷达系统, 设第 1 波门(200ns 波门)采到弹头散射点时为第 n_1 个发射脉冲的回波, 则将其余各波门弹头散射点采样序列与之相关可得到第 2 至第 6 波门采到弹头散

射点时相对于第 1 波门的脉冲个数差 Δn_{i1}

$$\Delta n_{i1} = |n_i - n_1|, \quad i = 2, 3, \dots, 6 \quad (14)$$

另外, 冲激雷达天线系统必须采用收发分置^[10], 但当发射天线与接收天线距离很近时, 可以近似认为发射天线到目标散射点的距离等于目标散射点到接收天线的距离。因此对于各波门而言, 其对应的发射信号到目标散射点的距离 r 为

$$r_i \approx \frac{R_i}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (15)$$

以第 1 波门对应的发射天线与目标散射点的距离 r_1 为基准, 可得到各波门所对应的 $r_i (i = 2, \dots, 6)$ 与 r_1 的差

$$\Delta r_{i1} = |r_i - r_1|, \quad i = 2, 3, \dots, 6 \quad (16)$$

令第 1 波门对应的 n_1, r_1 为式(13)坐标系的坐标原点, 则对应各波门的 $\Delta n_{i1}, \Delta r_{i1}$ 分别为式(13)的 x, y 坐标值, 将坐标原点代入式(13)有 $f = 0$, 各波门所对应的 $\Delta n_{i1}, \Delta r_{i1}$ 代入式(13)有

$$a\Delta n_{i1}^2 + b\Delta n_{i1}\Delta r_{i1} + c\Delta r_{i1}^2 + d\Delta n_{i1} + e\Delta r_{i1} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, 6 \quad (17)$$

假设式(17)中 $c \neq 0$, 则式(17)可以简化为

$$\Delta r_{i1}^2 = a'\Delta n_{i1}^2 + b'\Delta n_{i1}\Delta r_{i1} + d'\Delta n_{i1} + e'\Delta r_{i1} \quad (18)$$

式中 $a' = a/c, b' = b/c, d' = d/c, e' = e/c, i = 2, 3, \dots, 6$ 。

对应的二次曲线方程可简化为

$$y^2 = a'x^2 + b'xy + d'x + e'y \quad (19)$$

记

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \Delta r_{21}^2 \\ \Delta r_{31}^2 \\ \vdots \\ \Delta r_{61}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Delta n_{21}^2 & \Delta n_{21}\Delta r_{21} & \Delta n_{21} & \Delta r_{21} \\ \Delta n_{31}^2 & \Delta n_{31}\Delta r_{31} & \Delta n_{31} & \Delta r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta n_{61}^2 & \Delta n_{61}\Delta r_{61} & \Delta n_{61} & \Delta r_{61} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} a' \\ b' \\ d' \\ e' \end{bmatrix} \quad (20)$$

则有

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{b} \quad (21)$$

由式(21)求得最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{r} \quad (22)$$

由估计出的 $\hat{\mathbf{b}}$ 即可拟合出式(19)所示的二次曲线, 从而得到该二次曲线顶点的纵坐标值 y_{\min} , 可实现标量脱靶量的估计:

$$\hat{r}_{\min} = r_1 - y_{\min} \quad (23)$$

4 误差分析

对于上述算法, 由于测量值 Δn_{i1} 和 Δr_{i1} 存在误差, 使得式(22)中二次曲线系数的估计也出现误差, 从而使拟合出的二次曲线不能反映真实脱靶数据, 造成标量脱靶量估计出现误差。其中 Δn_{i1} 是由噪声引起的, 由于目标散射点回波叠加了噪声, 故各波门对脉冲回波采样后的序列进行相关处理时峰值会发生偏移, 从而导致 Δn_{i1} 的误差。而 Δr_{i1} 的误差与噪声无关, 由天线收发分置造成, 属于系统误差。该误差的大小与导弹的飞行角度、姿态有关, 对于图 1 所示坐标系, 当导弹散射点通过波门时位于过发射天线与接收天线中点

且与 z 轴平行的平面时, 发射天线到散射点的距离等于散射点到接收天线的距离, 此时 Δr_{i1} 没有误差, 当导弹飞行轨迹偏离该平面较大时, 该误差也随之增大, 最大时为发射天线与接收天线间距的一半。该系统误差的减小可以通过减小发射天线与接收天线的距离来实现, 也可通过增加接收天线数量利用相应算法来实现。

5 仿真结果

设雷达发射脉冲采用脉宽 2 ns 的正负高斯脉冲, 脉冲重复周期为 250 ns。导弹目标假设含有 13 个散射点, 其冲击响应参数如表 1 所示。

表 1 导弹体目标各散射点冲击响应函数参数

E_1	E_{2-3}	E_{4-7}	E_{8-9}	E_{10-11}	E_{12-13}	$a_i (i=1, \dots, 13)$
3	1.5	0.5	2.5	4.5	5.5	$\sqrt{\pi}/\Delta T$

选取导弹运动模型为在图 1 所示的测量坐标系下的匀速直线运动, 当导弹运动速度为 2000 m/s, 偏角 $\alpha = 50^\circ$, 倾角 $\beta = 50^\circ$ 时, 在未加噪声情况下各波门采样数据的仿真结果如图 2 所示, 从图中可看出各波门采到的回波数据为导弹体目标接近脱靶点和远离脱靶点时的一维距离像。

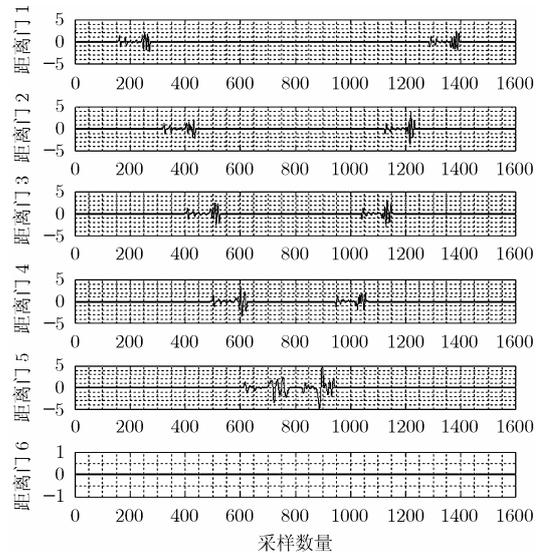


图 2 未加噪声的各波门采样结果

为验证算法对标量脱靶量测量的有效性, 对弹体回波加入高斯白噪声, 在不同信噪比条件下对不同脱靶量情况用本文方法分别进行 100 次 Monte Carlo 仿真, 对标量脱靶量的估计结果如下:

其中导弹各散射点回波信噪比定义为

$$\text{SNR}_i = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} [\Omega(t) * h_i(t)]^2 dt \quad (24)$$

式中 $h_i(t)$ 为第 i 个散射中心的冲击响应, T_i 为各散射中心回

波持续时间, $i = 1, 2, \dots, 13$, σ^2 为噪声方差。

表 2 给出了不同噪声方差时各散射点回波的信噪比。表 3 给出了各组信噪比条件下对应不同脱靶量和速度时的 100 组 Monte Carlo 仿真的均值、系统误差和标准差。

表 2 不同噪声方差时各散射点回波信噪比

仿真组数	散射点					
	1	2, 3	4-7	8, 9	10, 11	12, 13
1	10.79	4.77	-4.78	9.20	14.31	16.05
2	-1.25	-7.27	-16.82	-2.84	2.26	4.01
3	-9.21	-15.23	-24.78	-10.80	-5.69	-3.95

将表 3 所示仿真结果与文献[11, 12]中的基于多普勒体制的仿真结果对比, 对于第 1 组脱靶量参数, 在脱靶参数相同的条件下, 本文方法仿真结果的标准差要比文献[11]中采用多普勒频率时间序列非线性最小二乘拟合方法得到的标准差小一个数量级; 对于第 2 组脱靶量参数, 本文方法得到的标准差比文献[13]中采用基于距离差的被动定位方法得到的脱靶量标准差小两个数量级。由此可见, 基于冲激雷达体制的脱靶量测量方法可以得到比多普勒方法更高的估计精度和更稳定的性能。另外, 本文算法与相同体制下的美国 AN/DSQ-24 脱靶量测量系统以及文献[3]采用平滑滤波处理标量脱靶量的算法相比, 具有更高的估计精度; 与 CCL 公司 STAR 系统 5% 的标量脱靶量误差相比, 也远远高于其性能指标。

表 3 脱靶量估计仿真结果

真值 脱靶量 r (m) 速度 v (m/s)	统计项目	脱靶量(m)		
		第 1 组	第 2 组	第 3 组
$r: 10$ $v: 340$	均值	10.1040	10.1036	10.1038
	系统误差	0.1040	0.1036	0.1038
	标准差	0.0014	0.0075	0.0175
$r: 10$ $v: 1500$	均值	10.1415	10.1406	10.1405
	系统误差	0.1415	0.1406	0.1405
	标准差	0.0009	0.0042	0.0087
$r: 10$ $v: 2000$	均值	10.1418	10.1419	10.1407
	系统误差	0.1418	0.1419	0.1407
	标准差	0.0012	0.0061	0.0125

6 结论

本文提出了基于冲激雷达体制的数据采集方法和标量脱靶量估计算法, 建立了测量方程并用最小二乘拟合方法进行估计。仿真结果表明, 本文提出的算法与基于多普勒测量算法和其它基于窄脉冲测量算法相比, 具有较高的估计精度和更稳定的性能, 并且对噪声不敏感。本文雷达系统的参数是参考文献[4, 5]的指标来选取的, 实际应用中可根据雷达组网性能灵活选择参数, 以满足不同作用距离和分辨率的需

要。另外, 由于冲激雷达极高距离分辨力的特点决定了该体制可以完成基于多普勒体制无法实现的高精度定位、目标姿态角及多目标脱靶量的测量。因此, 基于冲激雷达体制的矢量脱靶量、姿态角及多目标脱靶量测量的算法和技术有待于下一步研究。

参考文献

- [1] 魏国华, 吴嗣亮, 王菊等. 脱靶量测量技术综述[J]. 系统工程与电子技术. 2004, 26(6): 768-772.
Wei Guo-hua, Wu Si-liang, and Wang Ju, et al. Overview of miss distance measurement technology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(6): 768-772.
- [2] 吴嗣亮. 矢量脱靶量测量系统数据处理方法的研究与实践[D]. 北京: 北京理工大学博士后研究报告, 1998.
- [3] 张锦斌. 采用数据平滑(滤波)方法处理标量脱靶量[J]. 无线电工程, 1983(1): 10-24.
Zhang Jin-bin. Scalar miss distance processing by data smoothing method[J]. *Radio engineering*, 1983(1): 10-24.
- [4] Kerry Nicholas J, Usti per A V, Upton Miles E G, et al. Apparatus for and method of determining positional information for an object[P]. United States Patent, 6218983, 2001.
- [5] Oswald G K A, Neal C S, and Richardson A T. System for sensing the approach of a moving missile to a target[P]. United States Patent, 5181039, 1993.
- [6] Cambridge Consultants Ltd. STAR scalar missile scorer[EB/OL]. <http://www.camcon.co.uk>, 2003.
- [7] Shubert K A and Ruck G T. Canonical representation of the radar equation in the time domain[C]. Proc. of the SPIE Ultra-Wideband Radar, 1992, 1631: 2-12.
- [8] Hussain M G M. Principles of high-resolution radar based on nonsinusoidal waves. I. Signal representation and pulse compression[J]. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 1989, 31(4): 359-368.
- [9] Hussain M G M. Principles of high-resolution radar based on nonsinusoidal waves. III. Radar-target reflectivity model[J]. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 1990, 32(2): 144-152.
- [10] Taylor J D. Introduction to Ultra-Uideband Radar System[M]. CRC, press.1995: 147-153.
- [11] 吴嗣亮, 毛二可. 匀加速直线运动目标脱靶量测量方法[J]. 电子学报. 2000, 28(3): 99-100.
Wu Si-liang and Mao Er-ke. Miss distance measurement for targets with rectilinear trajectories and constant accelerations[J]. *Acta Electronica Sinica*. 2000, 28(3): 99-100.
- [12] 王菊. 矢量脱靶量测量系统数据处理新方法研究[D]. [博士学位文], 北京: 北京理工大学, 2004.

周宇翔: 男, 1977 年生, 博士生, 目前从事脱靶量测量、冲激雷达信号处理的研究工作。

魏国华: 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为脱靶量测量、雷达信号处理、多媒体信号处理等。

吴嗣亮: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统理论与技术、电子系统仿真与信号模拟、现代信号处理理论与应用、扩频信号处理理论与技术及其在无线电测控与卫星导航定位中的应用等方面研究。