

文章编号: 1001 - 893X(2012)04 - 0440 - 07

基于直线斜飞弹道的弹载 SAR 成像方案*

张 刚, 祝明波, 赵振波, 李相平

(海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要:针对弹载 SAR 成像实时性高、非匀直弹道下成像算法、运动补偿困难, 难以工程实现的现状, 提出了一种末制导阶段在恒定高度采用直线斜飞弹道的 SAR 成像制导模式。详细分析了该模式的工作过程、极坐标格式 SAR 聚束成像算法及直线斜飞弹道对制导性能产生的影响。仿真结果表明, 该模式在增加少量制导时间的代价下, 借鉴机载聚束 SAR 成像算法即能获得高质量的 SAR 图像, 为 SAR 末制导的工程化提供了有益借鉴。

关键词:弹载 SAR; 聚束成像; 末制导; 极坐标格式算法

中图分类号: TN959 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.004

A Missile-borne SAR Image Scheme Based on Linear Slant Trajectory

ZHANG Gang, ZHU Ming-bo, ZHAO Zhen-bo, LI Xiang-ping

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For the difficulties in realizing synthetic aperture radar (SAR) terminal guidance, such as high real-time, imaging algorithms under non-uniform straight trajectory and motion compensation, a SAR terminal guidance mode is proposed, where the missile flies in a straight squint trajectory at constant height. The working process polar format SAR spotlight imaging algorithm and effect of straight slant trajectory on guidance performance are analysed in detail. Simulation results show that this working mode can obtain high-resolution image referring to space spotlight SAR image algorithm in the price of adding little guidance time and it gives a meaningful reference in realizing SAR terminal guidance.

Key words: missile-borne SAR; spotlight imaging; terminal guidance; polar format algorithm

1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像末制导是指在导弹的末制导阶段采用 SAR 成像技术对目标区域进行二维成像, 提高导弹的打击精度。SAR 图像有助于导引头克服强烈的地杂波、海杂波, 实现高方位分辨率, 从而实现导引头的自动目标识别和对目标关键部位的打击, 增强导弹的智能

化和精确打击能力。SAR 末制导技术是精确制导技术发展的热点, 美国、法国等国的 SAR 末制导技术发展迅速^[1]。SAR 末制导与红外、电视末制导相比具有作用距离远、全天候工作、成像分辨率不随弹目距离变化等优点, 但是 SAR 侧视、斜前视成像的特点使得 SAR 导引头不能对目标进行前向打击, 使得 SAR 末段制导弹道具有很大的特殊性。成像是 SAR 系统最理想的工作模式是 SAR 传感器平台做水平

* 收稿日期: 2011 - 09 - 28; 修回日期: 2012 - 02 - 17

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程项目

Foundation Item: Project Supported by “Taishan Scholar” Special Foundation of Shandong Province

匀速直线运动。目前机载、星载 SAR 在正侧视条带、聚束、扫描模式下的成像技术日益成熟,分辨率可以达到亚米级,美国 Sandia 国家实验室研制的 Lynx 无人机载聚束式 SAR 的分辨率已经达到 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 。将 SAR 成像技术用在末制导中,如果不对飞行弹道进行规划,导弹高机动、非匀直的弹道破坏了 SAR 最优的成像条件,难以实现成像聚焦。另外,在曲线弹道上实现 SAR 实时成像,需要进行复杂的运动补偿算法和成像算法,算法理论研究与硬件实现都存在困难。相比较而言,利用巡航导弹的航路规划能力,借鉴较为成熟的机载、无人机载 SAR 成像算法和运动补偿算法,发现目标后在导弹恒定高度横向直线机动(即直线斜飞)实现进行 SAR 成像,有利于 SAR 成像末制导的工程实现。本文首先研究了该模式的工作过程;其次根据弹载平台的特性,构建聚束 SAR 的几何场景,详细给出了用于聚束成像的极坐标格式算法(Polar Format algorithm, PFA)成像流程,进行了点目标成像仿真;然后采用三维最优制导律仿真比较了采用直线斜飞弹道 SAR 成像对制导性能的影响;最后对全文进行总结,对 SAR 成像制导的工程化进行了展望。

2 工作过程

以反舰巡航导弹为例,基于直线斜飞弹道的弹载 SAR 成像末段制导工作过程如图 1 所示。

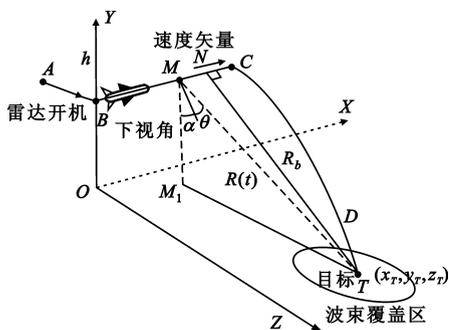


图 1 SAR 末制导工作过程

Fig. 1 Working process of SAR terminal guidance

图 1 中,以 SAR 成像段开始点 B 在水平面上的投影 O 作为原点,建立三维直角坐标系 $O - XYZ$, \widehat{ABCD} 为导弹攻击目标时从雷达开机到击中目标的运动轨迹,其中 BC 为直线,平行于水平面 XOZ 。目标 $T(x_T, y_T, z_T)$ 位于海面, NT 为目标与 SAR 平台轨迹的垂直斜距,值为 R_b 。导弹在 t 时刻位于直线

BC 上的 M 点,该点在水平面的投影为 M_1 ,瞬时斜距 MT 为 $R(t)$,此时的斜视角(NT 与 MT 的夹角)为 α ,下视角为 β 。SAR 成像末制导工作过程分为多普勒波束锐化(DBS)搜索、SAR 聚束成像、单脉冲前向打击 3 个阶段^[3]。DBS 搜索阶段其采用多普勒波束锐化技术进行大场景低分辨率成像以实现对目标的检测,对应图 1 的 AB 段。SAR 聚束成像阶段是在末制导的跟踪阶段通过聚束成像对目标进行自动识别,对应 BC 段。该阶段导弹在恒定高度上匀速直线斜飞,使得导弹速度矢量和弹目连线有一定的夹角,满足了 SAR 成像的条件。单脉冲前向打击阶段利用 SAR 图像对目标的定位信息,采用最优制导律或其他制导方法攻击目标,对应 CD 段。

3 聚束 SAR 成像几何与成像分辨率

3.1 聚束成像几何

如图 1 所示 SAR 末制导寻的场景,聚束成像阶段天线始终指向目标区域的中心。以目标区域中心为原点建立如图 2 所示的斜平面极坐标系,作为聚束 SAR 的数据采集平面照射几何,其中 x 为方位向, y 为距离向,导弹速度为 v_m ,慢时间为 t_a ,快时间为 τ 。散射点目标 P 的极坐标为 (a, γ) ,导弹瞬时位置 M 点的极坐标为 $(r_0, \pi/2 - \theta)$ 。

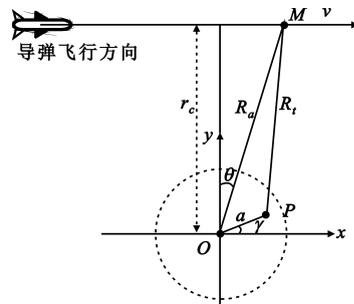


图 2 聚束 SAR 数据采集平面的几何关系

Fig. 2 Data collection plane of spotlight SAR

由图 2 可知,由雷达所在的 M 点到目标 O 的瞬时距离为

$$r = \sqrt{r_0^2 + a^2 - 2ar_0 \sin(\theta + \gamma)} \quad (1)$$

在满足 $a \ll r_0$ 的条件下,利用式(1)可以得到

$$r \approx r_0 - a \sin(\theta + \gamma) + \frac{a^2}{2r_0} \cos^2(\theta + \gamma) \quad (2)$$

一般情况下,为了降低成像算法的复杂度,增强成像实时性,常取式(2)的前两项,即进行波前平面假设。下面分析聚束 SAR 的成像分辨率和最大的

聚束成像面积。

3.2 距离与方位分辨率

SAR 一般通过发射大时间带宽积的线性调频信号来获得距离向的高分辨率。距离向分辨率的大小取决于发射线性调频信号的带宽,为^[4]

$$\rho_r = \frac{c}{2B_r} \quad (3)$$

式中, c 为光速, B_r 为发射信号带宽。聚束 SAR 的距离向分辨率由式(3)决定,距离的高分辨在工程上易于实现。

SAR 工作在聚束模式时,由于在数据录取期间始终照射同一区域,增加了回波信号的相干积累时间,可以突破条带 SAR 方位分辨率的限制,获得更高的方位分辨率。聚束 SAR 方位分辨率为^[4]

$$\rho_a = \frac{\lambda}{4\sin(\Delta\theta/2)} \quad (4)$$

式中, λ 为雷达波长, $\Delta\theta$ 为雷达相对于目标转过的角度。可见聚束 SAR 方位分辨率与合成孔径长度有关,合成孔径时间越长, $\Delta\theta$ 越大,则得到的方位分辨率越高。当分辨率一定时,波长越短,实现该分辨率需要转过的角度越小。假设发射信号波长为 8 mm,若实现 1 m 的方位分辨率,需要转过的角度为 2.29°;假设发射信号波长为 3 cm,若实现 1 m 的方位分辨率,需要转过的角度为 8.60°。

3.3 聚束 SAR 的成像面积

在聚束成像时,目标始终在 SAR 波束的照射下,因此聚束 SAR 成像面积的选择很重要。由图 1 几何关系可知,水平面上聚束 SAR 成像面积与导弹飞行高度、下视角、斜视角的关系为

$$S = \frac{h^2\theta_1\theta_2}{\cos^3\alpha \cos^3\theta} \quad (5)$$

式中, S 为聚束 SAR 成像面积, θ_2 、 θ_1 分别为雷达波束宽度的水平角和俯仰角。

4 PFA 成像算法

常用的聚束成像算法有极坐标格式算法(PFA)、距离徙动算法(RMA)和频率 Scaling 算法(FSA)等。RMA 方法不需要平面波前的假设,能精确地实现距离徙动(RCM)校正,但对脉冲重复频率要求高,计算量非常大,难以适用于快速运动且实时性要求很高的弹载平台。FSA 方法的优势是不需要进行插值运算,但对 RCM 的校正也是近似的,且弹

载平台速度和天线指向改变较大,导致运动补偿算法复杂,实现难度较大。PFA 是经典的聚束 SAR 成像算法,方法简单,计算量适中,与自聚焦兼容,适应于高分辨率、小场景成像^[5],在机载和星载聚束成像中已经进行实际应用,如果结合子孔径处理,非常适合实时性要求高的平台。PFA 算法所需测量的参数如径向距离和方位角等,是跟踪阶段弹载平台本身需要测量的参数,与实际作战条件相适应,有利于实时实现。

4.1 聚束 SAR 回波信号模型

发射信号为线性调频信号(LFM),经 Dechirp 接收后的回波信号为^[6]

$$s_1(\tau, t_a) = \sigma_t \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_a/c}{T_p}\right) \exp(j\Phi) \quad (6)$$

$$\Phi(\tau, t_a) = -\frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - \frac{2R_a}{c}\right)(R_t - R_a) + \frac{4\pi K_r}{c^2} (R_t - R_a)^2 \quad (7)$$

式中, τ 表示快时间, t_a 表示慢时间, T_a 表示合成孔径时间, T_p 表示脉冲持续时间, K_r 表示距离向调频斜率, f_c 为载频, c 为光速, σ 为点目标的散射系数, R_t 、 R_a 分别为 t_a 时刻雷达与目标和场景中心的瞬时距离。这里采用 Dechirp 是基于中心距离去调频接收,实际就是对回波信号同时进行距离和方位的二维去调频,从而降低 A/D 采样频率。Dechirp 处理使得场景中心具有零距离频率和零多普勒频率,实现了场景中心散射点的完全聚焦。式(6)的第一个相位向为回波的距离向和方位向信号,第二个相位称为剩余视频相位(RVP),会使回波的多普勒发生改变,其消除方法如图 3 所示^[7]。

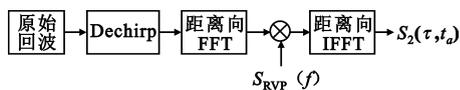


图 3 去除剩余视频相位的流程图
Fig.3 Flowchart of removing remain phase

图 3 中的参考函数 $S_{RVP}(f)$ 为

$$S_{RVP}(f) = \exp(-j\pi \frac{f^2}{K_r}) \quad (8)$$

式中, f 表示距离频率。消除 RVP 后的回波表达式为

$$s_2(\tau, t_a) = \sigma_t \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_a/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - \frac{2R_a}{c}\right)(R_t - R_a)\right) \quad (9)$$

4.2 PFA 成像

聚束 SAR 原始回波经过基于中心距离的 Dechirp 处理之后,距离向由距离时域变成距离频域,方位向由方位时域变成多普勒域,PFA 将在二维频域(即波数域)进行成像处理。

极径方向的波数为^[4]

$$K_R = \frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - \frac{2R_a}{c} \right) \quad (10)$$

方位向波数为

$$K_x = K_R \sin\theta \quad (11)$$

距离向波数为

$$K_y = K_R \cos\theta \quad (12)$$

则用波数表示的回波为

$$s_2(K_x, K_y) = \sum_n \sigma_n \text{rect}\left(\frac{t_a(n)}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_a(n)/c}{T_p}\right) \cdot \exp(-jK_x x_n - jK_y y_n) \quad (13)$$

式中, (x_n, y_n) 为目标 P_n 在数据采集平面上的坐标, θ 为瞬时斜视角。

对于二维频域的回波,直接进行二维 IFFT,即可得到目标的图像。由于回波数据在直角坐标系 $K_x - K_y$ 以极坐标分布时为扇形区域,直接进行二维 IFFT 时,得到的聚焦方位非常有限,为^[4]

$$D_x \leq \frac{2\rho_x \rho_y}{\lambda}, D_y \leq \frac{2\rho_x^2}{\lambda} \quad (14)$$

式中, D_x, D_y 为空间方位向和距离向的最大有效成像半径。当 $\rho_x = 1 \text{ m}, \rho_y = 1 \text{ m}, \lambda = 0.03 \text{ m}$ 时, $D_x = 66.7 \text{ m}^2, D_y = 66.7 \text{ m}^2$ 。显然,聚焦范围太小,难以满足实际需要。

为了增大聚焦范围,必须对回波数据进行由极坐标格式到直角坐标形式的插值转换,即由 $K_x - K_y$ 坐标系内插值得到矩形区域回波数据,然后再通过二维 IFFT 得到成像结果。插值算法是 PFA 算法中的关键,插值的效率和精度直接影响了成像的速度和效果。

对 $K_x - K_y$ 的二维插值一般分解为先距离向插值再方位向插值的两个一维插值。一维插值可以通过卷积实现

$$g(x) = \sum_i g_d(i)h(x - i) \quad (15)$$

式中, x 为插值点坐标, $g_d(i)$ 为原始序列, $h(x)$ 称为插值因子或插值核。一般插值核选择为 sinc 函

数,即

$$h(x) = \text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (16)$$

为了降低插值时间,插值核常选择 8 点。为了降低截断效应,插值核要进行锐化窗(如 Kaiser 窗)进行加权。为了进一步提高计算时间,可以将升采样后的插值核存储于表格中,这样就无需对每个插值点计算 sinc 函数、窗。插值算法的细节可参考文献[4,7]。经过极坐标插值后的回波,直接进行二维的 IFFT,即可得到目标的图像。综上所述,极坐标算法的流程如图 4 所示。

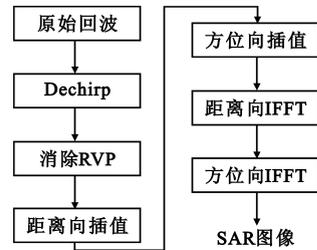


图 4 极坐标格式算法流程
Fig.4 Flowchart of PFA algorithm

4.3 仿真分析

为了验证算法的有效性,采用点目标仿真进行验证。如图 1 所示弹载平台攻击场景下,选择如表 1 所示的参数进行分析。仿真中目标取包括场景中心在内的 5 个点,坐标分别为 $(-30 \text{ m}, -30 \text{ m})$ 、 $(-30 \text{ m}, 30 \text{ m})$ 、 $(30 \text{ m}, -30 \text{ m})$ 、 $(30 \text{ m}, 30 \text{ m})$ 、 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 。

表 1 仿真参数
Tabel 1 Simulation parameters

参数	数值
信号带宽	0.03
信号脉宽/ μs	4
信号波长/cm	3
信号带宽/MHz	100
天线方位向孔径/m	0.4
导弹飞行高度/m	3 000
导弹飞行速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	300
PRF/Hz	200
采样频率/MHz	120
雷达与场景中心斜距/km	10

仿真结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,由于采用了基于场景中心的 Dechirp 方法,位于场景中心的点,得到精确的运动补偿,所以聚焦非常好。当点目标没有位于场景中心时,由于进行了插值处理后,给个目标点也能够很好地聚焦。

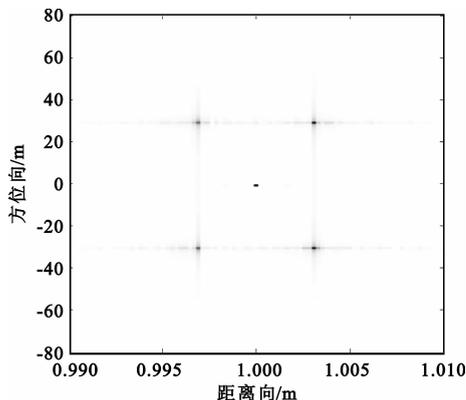


图 5 PFA 成像结果
Fig.5 Simulation result of PFA algorithm

5 制导性能分析

聚束 SAR 成像阶段完成后,导弹利用 SAR 图像的定位信息,采用三维比例导引或者其他三维导引律进行末段前向攻击。下面分析应用直线斜飞聚束 SAR 模式后对制导性能的影响。

5.1 三维制导律的选择

在如图 1 所示的弹目几何模型中,成像段 BC 处于直线斜飞状态,其弹道偏角 ψ_m 越大,成像时间 t_p 越长,则成像末段点 C 与目标点 P 的距离越大。设 B 点坐标为 $(0, h, 0)$, C 点坐标为 $C(V_{t_c}, h, 0)$, 目标 P 点的坐标为 $(x_T, 0, z_T)$, 则有

$$|CP| = \sqrt{(v_m t_c - x_T)^2 + h^2 + z_T^2} \quad (17)$$

导弹打击目标时,极坐标下的弹目运动方程是

$$\begin{aligned} \dot{R} &= -v_m \cos(q - \theta) + v_t \cos(q - \theta) \\ R\dot{q} &= v_m \sin(q - \theta) - v_t \sin(q - \theta) \end{aligned} \quad (18)$$

导弹末段前向攻击中采用三维最优制导律^[8-9], 在该最优制导律下,导弹脱靶量指标和能量消耗均为最小,与经典的比例导引律相比,最优制导律初始弹道弯曲大,而末段的弹道平直,导弹需用过载小,保证了对静止目标和机动目标有更高的脱靶量。

该制导律在图 1 中的 XOY、XOZ 面的表达式为

$$u_y = -3\dot{R}_y \dot{q}_y / g \cos(\theta_{xy} - q_y)$$

$$u_z = -3\dot{R}_z \dot{q}_z / g \cos(\psi_m - q_z) \quad (19)$$

式中, u_y 、 u_z 分别为 XOY、XOZ 面的控制过载, \dot{R}_y 、 \dot{R}_z 为平面上弹目相对距离变化率, q_y 、 q_z 为两平面上的弹目视线角, \dot{q}_y 、 \dot{q}_z 为视线变化率, g 为重力加速度, θ_{xy} 为导弹在 XOY 上的俯仰角, ψ_m 为弹道偏角, 也是 XOZ 平面的导弹速度矢量角。

5.2 仿真分析

导弹成像起点 B 点坐标为 $(0 \text{ m}, 3000 \text{ m}, 0 \text{ m})$, 速度 $v_m = 300 \text{ m/s}$, 成像段导弹平行 X 轴恒定高度飞行, 即初始弹道倾角为 $\theta_m = 0^\circ$, 弹道偏角为 $\psi_m = 0^\circ$ 。目标 T 的坐标为 $(15000 \text{ m}, 0 \text{ m}, 8000 \text{ m})$, 速度 $v_t = 20 \text{ knot}$, 以 $\psi_t = 90^\circ$ 做匀速直线运动。分别取成像时间 $T_{\text{SAR}} = 0 \text{ s}, 15 \text{ s}, 30 \text{ s}$, 则从 SAR 成像开始, 到击中目标的三维弹道如图 6 所示。

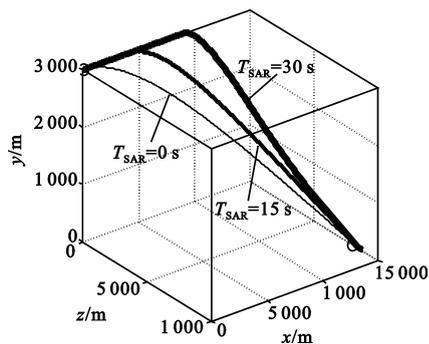


图 6 不同成像时间下的三维弹道
Fig.6 Three - dimensional trajectory of different iamging time

从图 6 可知,采用最优制导律的末段打击弹道较为平直。根据设定的弹目坐标,导弹相对于目标的初始偏角 $\Delta\psi = \psi_m - \psi_t = 28.1^\circ$ 。通过仿真可知,导弹直线斜飞 SAR 成像时间分别为 $T_{\text{SAR}} = 0 \text{ s}, 15 \text{ s}, 30 \text{ s}$ 时,总的制导时间为 $62.02 \text{ s}, 63.31 \text{ s}, 69.15 \text{ s}$,脱靶量均小于 1 m 。

图 7 给出了导弹斜飞角度 $\psi_m = 0^\circ$ 时,导弹直线斜飞成像时间与总制导时间、末段攻击时间的关系曲线。从图 7 可以看出,在设定的斜飞角度下, SAR 成像时间越长,则相对与未采用 SAR 成像的制导弹道横向机动就越大,总的制导时间就越长。若 SAR 成像 15 s , 则使总的制导时间增加 1.20 s ; 若 SAR 成像 30 s 时, 则使总的制导时间增加 7.13 s 。可见,增加少量的飞行时间,导弹即可获得数十秒的成像时间,使得导弹能对目标进行成像。但是成像考虑到导弹的突防能力,对于直线斜飞弹道, SAR 成像的时间不宜过长。

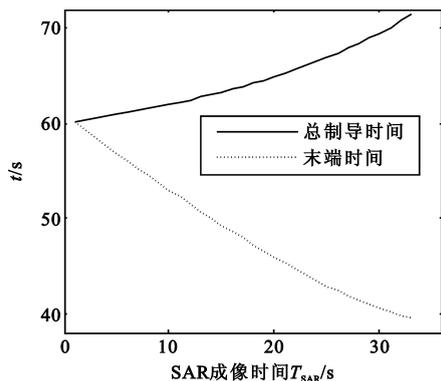


图 7 成像时间与总制导时间、末段攻击时间的关系

Fig. 7 Relation between imaging time and total guidance time, terminal attack time

采用直线斜飞弹道时,斜飞斜视角是关键参数。太小的斜飞角度,使得 SAR 成像的斜视角要求达不到;太大的斜视角,使得导弹横向机动太大,增加了总制导时间,不利于导弹的突防。图 8 给出了不同导弹、目标的初始偏角 $\Delta\psi$ 与总制导时间的关系, SAR 成像时间分别取 5 s、10 s、15 s。

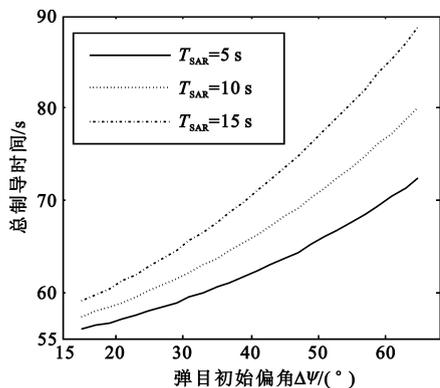


图 8 弹目初始偏角和总制导时间的关系

Fig. 8 Relation of initial slant angle and total guidance time

由图 8 可知,对于相同的 SAR 成像时间,弹目初始偏角越大,则越有利于 SAR 成像,同时,会使总制导时间增长。而对于同样的弹目初始偏角, SAR 成像时间越长,总的制导时间就越长。因此,采用直线斜飞弹道的 SAR 成像末制导,需要根据攻击场景,对斜飞角度、SAR 成像时间、SAR 成像分辨率等多个参数进行折衷。

6 结 论

直线斜飞模式的 SAR 成像末制导由于采用直线弹道,可以借鉴机载 SAR、无人机载的成熟设计,

因此在工程上具有易实现性。本文首先给出了该方案的工作过程,然后分析了聚束 SAR 的回波信号模型,给出了基于 PFA 成像算法的详细流程,并对点目标进行仿真验证。PFA 该算法能够很好地实现 SAR 聚束成像,运算量适中,且被国内外机载、星载 SAR 实际系统采用,因此适合对实时性、可靠性要求高的弹载平台。最后结合最优制导律,分析了直线斜飞的角度、直线斜飞阶段的时间对总的制导时间的影响。仿真结果表明,对于同样的斜飞角度, SAR 成像时间越长,总的制导时间就越长。在下一步的工作中, PFA 算法的二维插值可以采用 CZT 变换实现,同时可以结合子孔径成像算法,以提高聚束 SAR 成像的实时性。

参考文献:

- [1] 秦玉亮,王建涛,王宏强,等. 弹载合成孔径雷达技术研究综述[J]. 信号处理, 2009, 25(4): 630 - 635.
QIN Yu-liang, WANG Jian-tao, WANG Hong-qiang, et al. Overview on Missile-borne Synthetic Aperture Radar[J]. Signal Processing, 2009, 25(4): 630 - 635. (in Chinese)
- [2] 尹曼. 高分辨聚束 SAR 成像和运动补偿算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
YIN Man. Research on high resolution spotlight SAR image and motion compensation[D]. Chengdu: University of Electric and Science Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [3] 张刚,祝明波,赵振波,等. 弹载 SAR 应用模式及关键技术探讨[J]. 飞航导弹, 2011(9): 67 - 73.
ZHANG Gang, ZHU Ming-bo, ZHAO Zhen-bo, et al. Study on application mode and key technology of missile-borne Synthetic Aperture Radar[J]. Cruise Missile, 2011 (9): 67 - 73. (in Chinese)
- [4] 孙进平. 机载聚束模式合成孔径雷达的成像算法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001.
SUN Jin-ping. Research on SAR Imaging Algorithms of Space-borne spotlight SAR[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. (in Chinese)
- [5] 彭岁阳,张军,沈振康. 弹载聚束 SAR 平台的 PFA 算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 592 - 598.
PENG Sui-yang, ZHANG Jun, SHEN Zhen-kang. Polar Format Algorithm for the Missile-borne Spotlight SAR Platform[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(3): 592 - 598. (in Chinese)
- [6] Jakowatz C V, Wahl D E, Eichel P H, et al. Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [7] 洪文,胡东辉. 合成孔径雷达成像算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
HONG Wen, HU Dong-hui. Digital Processing of Synthetic

Aperture Radar: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)

- [8] 冯志刚, 杨希祥. 反舰导弹最优末制导律及其仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 27(2): 39 - 41.
FENG Zhi - gang, YANG Xi - xiang. Research on Optimal Terminal Guidance Law for Anti - ship Missile and Its Simulation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 27(2): 39 - 41. (in Chinese)
- [9] 赵红超, 王凤莲, 顾文锦. 超音速反舰导弹的最优末制导律研究[J]. 航空兵器, 2005(3): 8 - 11.
ZHAO Hong - chao, WANG Feng - lian, GU Wen - jin. Research on Optimal Terminal Guidance Law for Supersonic Anti - Ship Missile[J]. Aero Weaponry, 2005(3): 8 - 11. (in Chinese)

作者简介:

张刚(1982—),男,山东泰安人,2008年获硕士学位,现为海军航空工程学院博士研究生,主要研究方向为精确制导技术、合成孔径雷达制导;

ZHANG Gang was born in Tai'an, Shandong Province, in 1982. He received the M.S. degree in 2008. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research interests include preci-

sion guidance technology and SAR guidance.

Email: gangzhang2008@163.com

祝明波(1971—),男,山东青州人,1999年获博士学位,现为副教授,主要研究方向为精确制导技术;

ZHU Ming - bo was born in Qingzhou, Shandong Province, in 1971. He received the Ph. D. degree in 1999. He is now an associate professor. His research concerns precision guidance technology.

Email: 15314486867@126.com

赵振波(1984—),男,河北邯郸人,2009年获学士学位,现为海军航空工程学院硕士研究生,主要研究方向为精确制导技术、合成孔径雷达制导;

ZHAO Zhen - bo was born in Handan, Hebei Province, in 1984. He received the B. S. degree in 2009. He is now a graduate student. His research interests include precision guidance technology and SAR guidance.

Email: zhaozhenbo228@163.com

李相平(1963—),男,山东邹平人,1989年获硕士学位,现为教授,主要研究方向为精确制导技术。

LI Xiang - ping was born in Zouping, Shandong Province, in 1963. He received the M. S. degree in 1989. He is now a professor. His research concerns precision guidance technology.

Email: lxp401@163.com