

# 机载 MIMO 雷达 3-CAP 杂波抑制方法

郝琳, 张永顺, 李哲

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 针对机载雷达面临的杂波抑制问题,在考虑阵元误差、通道误差和杂波起伏等误差因素对杂波特性影响的基础上,建立了机载 MIMO 雷达杂波数学模型,提出了一种基于 MIMO 雷达体制下的空时自适应新方法——M3-CAP 方法。对接收信号进行时域滤波,选取被检测通道与其 2 个相邻通道为一组,进行自适应处理。该方法通过 MIMO 技术与 3-CAP 方法的有效结合,将波形分集的优势扩展到 3-CAP 方法中,显著提高了雷达系统自由度和杂波协方差矩阵估计精度。通过对不同雷达体制以及不同误差条件下杂波抑制性能的分析比较,结果表明:提出的 M3-CAP 方法的杂波抑制性能明显优于 JDL-GMB、改进的 JDL、3-CAP 等方法。

**关键词** 机载 MIMO 雷达;空时自适应处理;杂波建模;M3-CAP 方法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.013

**中图分类号** TJ430.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0051-05

## 3-CAP Clutter Suppression Method Research for Airborne Radar

HAO Lin, ZHANG Yong-shun, LI Zhe

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To solve the problem of clutter suppression faced by airborne MIMO radar, after considering the element error, channel uncertainty as well as clutter fluctuation, the clutter model for airborne MIMO radar under different error conditions is established, a new space-time adaptive processing method based on MIMO systems——M3-CAP method is proposed. Firstly, temporal filtering is performed on the space-time received data, and then the output data of three Doppler channels which are the detected Doppler channel and two of its adjacent channels, is adaptively filtered. By combining MIMO systems and 3-CAP method effectively, the advantage of waveform diversity is extended into 3-CAP method, this new method improves the degree of freedom and clutter estimation accuracy. By analyzing and comparing the clutter suppression performance under different radar systems and different error conditions, the result turns out: the clutter suppression performance of M3-CAP method is superior to JDL-GMB, Modified JDL, 3-CAP methods.

**Key words:** airborne MIMO radar; STAP; clutter model; M3-CAP method

机载雷达在对运动目标进行检测时,如何抑制强烈的地杂波和各种类型的干扰是其面临的主要难题,而空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)是解决该问题的关键技术<sup>[1-2]</sup>。在

收稿日期:2013-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372033)

作者简介:郝琳(1989-),女,河北邯郸人,硕士生,主要从事 MIMO 雷达空时自适应信号处理研究。E-mail:dearvic@126.com

**引用格式:**郝琳,张永顺,李哲.机载 MIMO 雷达 3-CAP 杂波抑制方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(4):51-55. FU Xiuzhu, ANG Yangwnag, YANG Pengfei, et al. A research of accuracy evaluation system of air-to-ground missile fall points[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 51-55.

实际应用中,机载相控阵雷达由于孔径较小,难以保证足够的系统自由度来对协方差矩阵进行估计,因而在实现杂波抑制上存在局限性。

MIMO 雷达发射端的正交分集可以产生大量的虚拟阵元,增大系统自由度<sup>[3]</sup>。这使得 MIMO 雷达在增强杂波与干扰抑制性能上具有极大潜力,为 STAP 技术带来了新机遇。2003 年,Bliss D W 首次提出 MIMO-STAP 的概念,将 STAP 技术应用于机载 MIMO 雷达中<sup>[1]</sup>。当前对于相控阵体制的 STAP 技术研究已经比较深入,提出了许多改进算法<sup>[3,6]</sup>,但对于 MIMO 雷达体制的 STAP 方法研究则不够深入。针对上述问题,本文将 MIMO 体制与 3-CAP<sup>[7]</sup> 技术相结合,提出了一种新的处理方法——M3-CAP 方法。

## 1 误差条件下机载 MIMO 雷达杂波模型

正侧面机载 MIMO 雷达阵列天线几何模型见图 1,假设 MIMO 雷达载机以速度  $\mathbf{V}$  向  $\mathbf{X}$  向正方向做匀速直线运动,载机高度为  $H$ 。杂波散射单元方位角为  $\theta$ ,俯仰角为  $\varphi$ ,锥角为  $\psi$ 。MIMO 雷达收发天线均为正侧面均匀线阵,其中发射阵元总数为  $M$ ,间距为  $d_T$ ,接收阵元总数为  $N$ ,间距为  $d_R$ ,收发间距比  $\alpha = d_T/d_R$ ,时间域相干处理脉冲数目为  $K$ ,且  $M$  个发射波形相互正交。

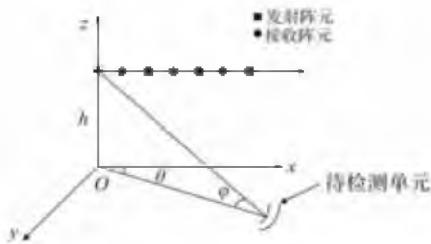


图 1 机载 MIMO 雷达系统模型

Fig.1 The model of airborne MIMO radar system

用矢量形式表示杂波回波模型,定义发射矢量、接收矢量及时域导向矢量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{St}(\omega_s) = [1, e^{j\omega_s(\theta_i, \varphi)\alpha}, \dots, e^{j\omega_s(\theta_i, \varphi)\alpha(M-1)}]^T \in \mathbf{C}^{M \times 1} \\ \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s) = [1, e^{j\omega_s(\theta_i, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_s(\theta_i, \varphi)(N-1)}]^T \in \mathbf{C}^{N \times 1} \\ \mathbf{S}_T(\omega_t) = [1, e^{j\omega_t(\theta_i, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_t(\theta_i, \varphi)(K-1)}]^T \in \mathbf{C}^{K \times 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\omega_s, \omega_t$  分别定义为空域角频率和时域角频率,其值为:

$$\begin{cases} \omega_s(\theta_i, \varphi) = 2\pi d_R \cos(\theta_i) \cos(\varphi) / \lambda \\ \omega_t(\theta_i, \varphi) = 4\pi \mathbf{V}_T \cos(\theta_i) \cos(\varphi) / \lambda \end{cases} \quad (2)$$

对于一个杂波点源的空时采样矢量经匹配滤波接收后,杂波接收数据可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} c_i &= \rho_i \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{St}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s) = \\ &\rho_i \mathbf{S}_{V,i}(\omega_s, \omega_t) \in \mathbf{C}^{MNK \times 1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\otimes$  为 kronecker 积;  $\mathbf{S}_{V,i}(\omega_s, \omega_t) = \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{St}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s)$ , 在该距离环上的总的杂波矢量可表示为:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^{NC} \rho_i \mathbf{S}_{V,i}(\omega_s, \omega_t) \in \mathbf{C}^{MNK \times 1} \quad (4)$$

可得到接收数据的杂波协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_c = E[\mathbf{y} \mathbf{y}^H] = \sum_{i=1}^{NC} [\delta_i^2 \mathbf{R}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{R}_{St}(\omega_s) \otimes \mathbf{R}_{Sr}(\omega_s)] \in \mathbf{C}^{MNK \times MNK} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_T(\omega_t) = \mathbf{S}_T(\omega_t) \mathbf{S}_T^H(\omega_t) \\ \mathbf{R}_{Sr}(\omega_s) = \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s) \mathbf{S}_{Sr}^H(\omega_s) \\ \mathbf{R}_{St}(\omega_s) = \mathbf{S}_{St}(\omega_s) \mathbf{S}_{St}^H(\omega_s) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{R}_T, \mathbf{R}_{Sr}, \mathbf{R}_{St}$  分别为第  $i$  个杂波散射单元在时域和空域上的自相关矩阵。因此,杂波协方差矩阵可以认为是某距离环上各杂波散射单元在时域、发射空域以及接收空域的自相关矩阵的 kronecker 积的加和。

实际工程实现中,影响 MIMO 雷达阵列的非理想因素主要由阵元幅相误差、通道幅相误差和杂波起伏组成。

发射或接收阵元内部幅相误差为:

$$\rho_{p_1 p_2}^{(cell)} = (1 + ea_{p_1 p_2}) \exp(je_{p_1 p_2}) \quad (7)$$

式中  $ea_{p_1 p_2}, e_{p_1 p_2}$  分别为阵元内部的幅相误差,且当  $p_1 = p_2$  时  $ea_{p_1 p_2} = e_{p_1 p_2} = 0$ 。则杂波阵元误差矩阵为:

$$\mathbf{T}_{cell} = [\rho_{q_1 q_2}^{(cell)}] \otimes [\rho_{n_1 n_2}^{(cell)}] \quad q_1, q_2 \in [1, M], n_1, n_2 \in [1, N] \quad (8)$$

通道间的不一致系数可表示为:

$$\rho_{p_1 p_2}^{(channel)} = (1 + ca_{p_1 p_2}) \exp(jcp_{p_1 p_2}) \quad (9)$$

式中  $p_1, p_2 = n + (m-1)M$  ( $n=1, 2, \dots, N, m=1, 2, \dots, M$ ) 为第  $p_1$  与  $p_2$  个通道间的失配幅相误差。通道失配误差矩阵可表示为:

$$\mathbf{T}_{channel} = [\rho_{p_1 p_2}^{(channel)}]_{MN \times MN} \quad (10)$$

在阵元误差和通道失配幅相误差的共同作用下,空间去相关误差矩阵为:

$$\mathbf{T}_{space} = \mathbf{T}_{cell} \cdot \mathbf{T}_{channel} \quad (11)$$

式中  $\cdot$  表示 Hadamard 积。

杂波起伏引起了杂波带宽的展宽。通常杂波起伏服从高斯分布。杂波相对带宽  $B_c = B/f_{PRF}$  为杂波带宽,  $f_{PRF}$  为脉冲重频,第  $k_1$  个脉冲与第  $k_2$  个脉冲间的归一化自相关系数为:

$$\rho_{k_1 k_2}^{(c)} = \exp(-B_c^2 (k_1 - k_2)^2 / 8) \quad (12)$$

式中:  $k_1 = 1, 2, \dots, K; k_2 = 1, 2, \dots, K$ 。

相应的杂波频谱起伏引起的时间去相关误差矩阵表示为:

$$\mathbf{T}_{\text{time}} = [\rho_{k_1 k_2}^{\zeta}]_{K \times K} \quad (13)$$

综上所述,在既有时间去相关,又有空间去相关误差时,机载MIMO雷达的杂波协方差矩阵式可统一为:

$$\mathbf{R}_c = \mathbf{R}_c \cdot (\mathbf{T}_{\text{time}} \otimes \mathbf{T}_{\text{space}}) = \mathbf{R}_c \cdot \mathbf{T}_c \quad (14)$$

式中 $\mathbf{T}_c$ 为总的误差矩阵。反映了非理想情况下误差因素对杂波模型的影响,即为非理想因素影响下的机载MIMO雷达空时二维杂波统一模型。

## 2 机载MIMO雷达M3-CAP方法

3通道联合自适应处理(3-CAP)方法,它是先进行时域滤波,然后进行每个空域通道选取3个(也可以选取多个)多普勒通道进行时空自适应处理,当检测第 $k$ 个多普勒通道时,这一通道的输出和它的相邻的左右通道输出一起进行自适应处理。图2为M3-CAP的结构框图。

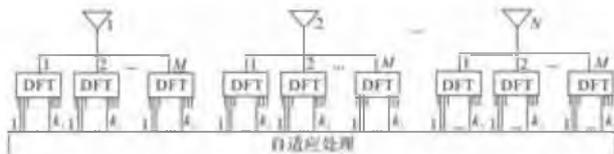


图2 MIMO多通道联合自适应处理(M3-CAP)结构

Fig.2 The structure of M3-CAP method

假设MIMO雷达有 $M$ 个发射阵元, $N$ 个接收阵元,一个相干处理时间(CPI)内每个阵元接收 $K$ 个脉冲,则第 $k$ 个脉冲接收的空时采样数据为 $MN \times 1$ 维的向量:

$$\mathbf{x}^k = [x^{11k}, x^{21k}, \dots, x^{m1k}, x^{12k}, x^{22k}, \dots, x^{m2k}, \dots, x^{1nk}, x^{2nk}, \dots, x^{mnk}]^T \quad (15)$$

式中 $x^{mnk}$ 为第 $n$ 个阵元接收到的来自第 $m$ 个阵元的数据。这样,在一个CPI内的采样数据矩阵为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^K] \quad (16)$$

假设 $\mathbf{Y}(k)$ 和 $\mathbf{Y}(A_j)$ 分别代表主通道矢量和第 $j$ 个辅助通道矢量,则:

$$\mathbf{Y}(k) = (\mathbf{I}_M \otimes \mathbf{W}_{tk} \otimes \mathbf{I}_N)^T \mathbf{X} \quad (17)$$

$$\mathbf{Y}(A_j) = (\mathbf{I}_M \otimes \mathbf{W}_{tA_j} \otimes \mathbf{I}_N)^T \mathbf{X} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{W}_{tk}, \mathbf{W}_{tA_j} (j=1, 2, \dots, L)$ ,分别为第 $k$ 个时域权和第 $A_j$ 个多普勒单元的权; $\mathbf{I}_M$ 为一 $M \times M$ 的单位矩阵; $\mathbf{I}_N$ 为一 $N \times N$ 的单位矩阵。

定义新的矢量:

$$\mathbf{Z}(k) = [\mathbf{Y}^T(k) \quad \mathbf{Y}^T(A_1) \quad \dots \quad \mathbf{Y}^T(A_L)]^T \quad (19)$$

于是,二次协方差矩阵 $\mathbf{R}_z$ 可表示为:

$$\mathbf{R}_z = \mathbf{E}[\mathbf{Z}(k)\mathbf{Z}(k)^H] \quad (20)$$

式中 $H$ 为共轭转置。根据线性约束最小功率输出,

可得如下优化问题:

$$\begin{cases} \min & \mathbf{W}_z^H \mathbf{R}_z \mathbf{W}_z \\ \text{s.t.} & \mathbf{W}_z^H \mathbf{S}_z = 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中 $\mathbf{S}_z$ 为二维空时导向矢量,可得:

$$\mathbf{S}_z = [\mathbf{S}_v^T(\psi_0) \quad g_1 \mathbf{S}_v^T(\psi_0) \quad \dots \quad g_L \mathbf{S}_v^T(\psi_0)]^T \quad (22)$$

式中 $g_j (j=1, 2, \dots, L)$ 为常数,且有:

$$\mathbf{g}_j = \mathbf{W}_{i,j}^H \mathbf{S}_i(f_{dk}) / \mathbf{W}_{i,k}^H \mathbf{S}_i(f_{dk}) \quad (23)$$

于是,可得最优权 $\mathbf{W}_z$ :

$$\mathbf{W}_z = \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{S}_z / \mathbf{S}_z^H \mathbf{R}_z \mathbf{S}_z \quad (24)$$

可计算得到处理器的改善因子为:

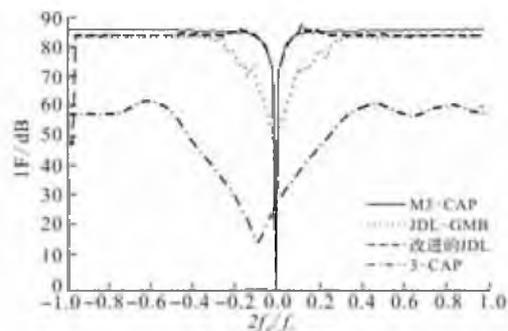
$$\text{IF} = \frac{\mathbf{W}_z^H \mathbf{S}_z \mathbf{S}_z^H \mathbf{W}_z}{\mathbf{W}_z^H \mathbf{R}_z \mathbf{W}_z} \cdot \frac{\text{tr}(\mathbf{R}_z)}{\mathbf{S}_z^H \mathbf{S}_z} \quad (25)$$

## 3 仿真分析

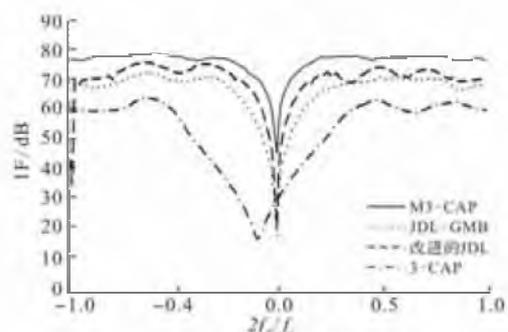
基于MATLAB仿真平台,利用M3-CAP方法计算机载MIMO雷达在各种误差条件下的杂波改善因子,并与一种改进的JDL方法<sup>[9]</sup>和JDL-GMB方法<sup>[10]</sup>进行了比较,以及基于传统相控阵雷达的3-CAP方法计算得到的改善因子进行了比较。仿真参数如下:正侧视阵雷达情况下,发射阵元数 $M=5$ ,发射阵元间距 $d_m=0.8$  m,发射全正交波形,接收阵元数 $N=8$ ,接收阵元间距 $d_n=0.1$  m,收发阵元间距比 $\gamma=8$ ,脉冲数 $K=16$ ,载机飞行速度为140 m/s,工作波长 $\lambda=0.23$  m,脉冲重复频率 $f_r=2434.8$  Hz,杂噪比 $\text{CNR}=60$  dB。误差条件设置如下:阵元误差为5%,通道误差为5%,杂波起伏为5%,图3(e)为多种非理想因素存在即3种误差并存的情况。

通过仿真结果可以看出,在理想情况下,M3-CAP法的杂波抑制性能最好,具有更强的主瓣杂波抑制能力,能在主瓣内有效形成零点,并且在远离主杂波区能获得准最优性能,改进的JDL方法次之,JDL-GMB方法在主杂波凹口区存在一定程度的展宽,而3-CAP方法在远离主杂波区以及主杂波区的性能均较差。在非理想情况下,通过图3(b)~图3(e)可以看出,存在阵元误差时,本文所提的M3-CAP方法性能下降10 dB左右,而其他方法性能均下降20 dB以上;在存在通道误差时,各种不同方法的改善因子的下降程度与阵元误差时类似,但除本文所提的M3-CAP外,其他方法的主杂波区凹口展宽较严重;杂波起伏主要是使主杂波谱展宽,可以看出,除3-CAP外的其他3种方法展宽程度相差不多;图3(e)考虑了多种误差因素并存的情况,更接

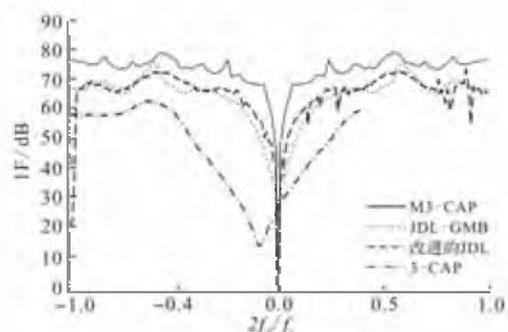
近于真实环境,各种 STAP 方法的杂波抑制性能都有所下降,但 M3-CAP 对误差最不敏感,性能下降最不明显,而 JDL-GMB 方法、改进的 JDL 方法和 3-CAP 方法在误差条件下杂波抑制性能均大幅度下降。综合以上的分析,可以看出本文所提的 M3-CAP 方法在非理想情况下具有较强的适应能力和优良的杂波抑制性能。



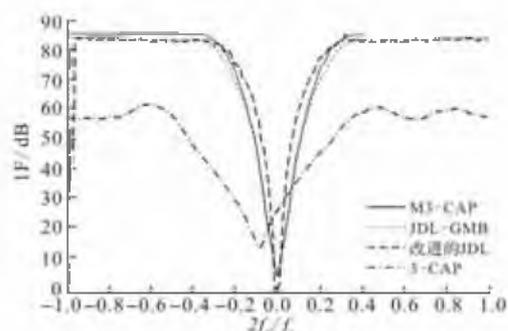
(a) 理想情况下



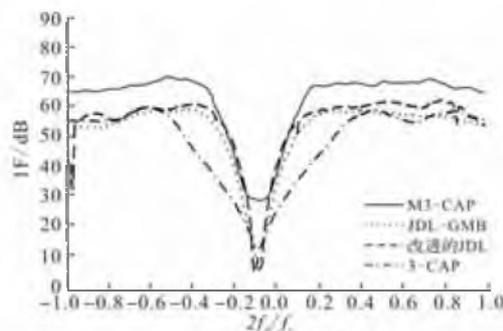
(b) 阵元误差为5%



(c) 通道误差为5%



(d) 杂波起伏为5%



(e) 多种非理想因素存在

图3 杂波抑制性能比较

Fig.3 The compare of clutter suppression performance

## 4 结语

本文针对 MIMO-STAP 处理中的关键问题,建立了非理想情况下机载 MIMO 雷达杂波数学模型,将机载 MIMO 雷达技术同 3-CAP 空时自适应方法相结合,提出一种 M3-CAP 空时自适应新方法,并对该方法在不同误差条件下的杂波抑制性能进行了仿真分析,仿真结果证明 M3-CAP 方法的杂波抑制性能优于 JDL-GMB、改进的 JDL、3-CAP 等方法,特别是在非理想情况下,杂波抑制的优势更为明显。

## 参考文献(References):

- [1] Brennan LE, Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE trans AES, 1973, 9 (3): 237-252.
- [2] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
WANG Yongliang, PENG Yingning. Space-time adaptive processing [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2000. (in Chinese)
- [3] Fishier E, Hainovich A, Blum R. MIMO radar: an idea whose time has come [C]// Radar conference 2004 proceedings of the IEEE. Philadelphia: IEEE Press, 2004: 71-78.
- [4] Bliss D W, Foraythe K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: degrees of freedom and resolution [C]// Proceedings of the 37th IEEE asilomar conference on signals systems computers. Monterey, USA: IEEE press, 2003: 51-59.
- [5] Jaffer A G, Ho P T, Himed B. Adaptive compensation for conformal array STAP by configuration parameter estimation [C]// Proc of the IEEE conference on radar verona. NY, USA: IEEE press, 2006: 731-736.
- [6] Stoica P, Li J, Zhu X M, et al. On using priori knowledge in space-time adaptive processing [J]. IEEE trans on SP, 2008, 56(6): 2598-2602.
- [7] Wang Yongliang, Bao Zheng, Liao Guisheng. Three

united configurations on adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar system [C]//International conference on signal processing (ICSP'93). Beijing: [s.n.], 1993: 23-27.

- [8] 张西川, 张永顺, 王永良, 等. 机载MIMO雷达空时二维建模及特性分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(5): 35-38.

ZHANG Xichuan, ZHANG Yongshun, WANG Yongliang, et al. Model and clutter characteristic analysis for airborne MIMO radar[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(5): 35-38. (in Chinese)

- [9] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 一种两级机载MIMO雷达

空时自适应处理方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1102-1108.

YANG Xiaochao, LIU Hongwei, WANG Yong, et al. A novel two-stage space-time adaptive processing method for airborne MIMO radar[J]. Journal of electronics & information technology, 2012, 34(5): 1102-1108. (in Chinese)

- [10] 张贝贝, 严家明. 一种空时自适应处理的降维矩阵改进算法[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(6): 37-41.

ZHANG Beibei, YAN Jiaming. An improved STAP algorithm based on dimension reduction[J]. Journal of detection & control, 2010, 32(6): 37-41. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

(上接第12页)

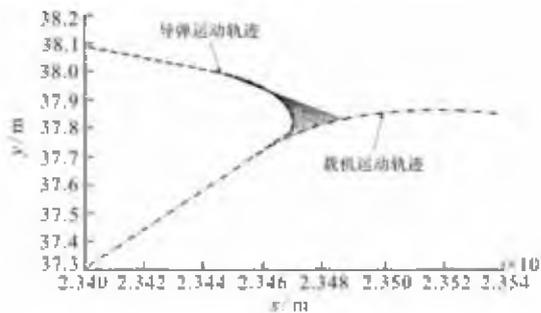


图9 越肩发射过程放大图

Fig.9 Amplificatory course of OTS

## 5 结语

本文重点放在了越肩发射火控技术的战术使用层面,对越肩发射的整个过程进行了简要描述和仿真。分析了空战中目标对载机的威胁因素,经过仿真明确了不同因素的威胁程度,为飞行员提供正确决策;阐述了航迹正切规避法,明确了使用条件;最后提出了越肩发射导弹的使用时机,仿真结果表明了把握好导弹发射时机既可以消灭敌人,又可以保存自己。

### 参考文献(References):

- [1] Innocenti M, Thukral A. Simultaneous reaction jet and aerodynamic control of missile systems [C]//AIAA guidance navigation and control conference. Monterey, CA: AIAA press, 1993: 347-354.

- [2] 高劲松, 邹庆元, 陈哨东. 采用本机智能机动策略增大越肩发射截获区[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2948-2950.

GAO Jinsong, ZOU Qingyuan, CHEN Shaodong. Improving-capture zone of OTS through adopting intelligent maneuver strategy for own plane [J]. Journal of system simulation, 2007, 19(13): 2948-2950. (in Chinese)

- [3] 高劲松, 陈哨东. 越肩发射系列研究对航空火控技术的推动[J]. 航空科学技术, 2010, 25(3): 45-47.

GAO Jinsong, CHEN Shaodong. Promoting airborne fire control technology through study on OTS [J]. Aeronautical science & technology, 2010, 25(3): 45-47. (in Chinese)

- [4] 董彦非, 郭基联, 张恒喜. 多机空战目标威胁评估算法[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(4): 73-76.

DONG Yanfei, GUO Jilian, ZHANG Hengxi. Threat assessment for multi-aircraft-air combat [J]. Fire control & command control, 2002, 27(4): 73-76. (in Chinese)

- [5] 高永, 向锦武. 一种新的超视距空战威胁评估非参量法模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2570-2573.

GAO Yong, XIANG Jinwu. A new assessment model of beyond-visual-range air combat threat [J]. Journal of system simulation, 2006, 18(9): 2570-2573. (in Chinese)

- [6] Woosung Park, Chang-Kyung Ryoo. A new practical guidance law for a guided projectile [R]. AIAA 2011-6249.

- [7] 李浩亮, 张斌, 左星星. 基于波束引导的空空导弹越肩发射制导律研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(2): 130-134.

LI Haoliang, ZHANG Bin, ZUO Xingxing. Research on guidance law for the over-the-shoulder air-to-air missile based on beams [J]. Flight dynamics, 2013, 31(2): 130-134. (in Chinese)

- [8] Cloutier J R, Stansbery D T. All-aspect acceleration-limited homing guidance [C]//Proceedings of the AIAA guidance navigation and control conference. [S.l.]: AIAA press, 1999: 11-13.

- [9] Anisi D A. On-line trajectory planning for aerial vehicles: a safe approach with guaranteed task completion [R]. AIAA 2006-6107.

(编辑: 田新华)