

主动雷达型空空导弹抗噪声干扰 制导精度研究

孟若含, 赵华超

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要:基于蒙特卡罗模拟法,以噪声干扰为例,对虚拟样机模拟打靶结果进行分析,研究噪声干扰对主动雷达型空空导弹制导精度的影响。该方法能够很好地用于干扰条件下制导精度的分析,具有实用价值。

关键词:制导精度;噪声干扰;蒙特卡罗

本文引用格式:孟若含,赵华超.主动雷达型空空导弹抗噪声干扰制导精度研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(S1):44-47.

Citation format:MENG Ruohan, ZHAO Huachao. Research on Anti-Noise Interference Guidance Accuracy of Active Radar Air-to-Air Missile[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(S1): 44-47.

中图分类号:TJ765.3

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)S1-0044-04

Research on Anti-Noise Interference Guidance Accuracy of Active Radar Air-to-Air Missile

MENG Ruohan, ZHAO Huachao

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Based on the Monte-Carlo simulation method, the guidance accuracy of the active radar air-to-air missile was studied by taking the noise interference as an example, and the simulation target results of the virtual prototype were compared with the product test data. The method can be well used for the analysis of guidance accuracy under interference conditions, and has practical value.

Key words: guidance accuracy; noise interference; Monte-Carlo

第4代主动雷达型空空导弹作为目前空战的主要拦截武器之一,也是保持空中优势的重要手段。随着现代战争中电子战的发展,其武器系统,尤其是导弹制导系统面临的干扰日趋严峻,不仅有无意的自然干扰,包括陆地、海面、气象等干扰,更多的是有意干扰,包括有源、无源电磁干扰等^[1-2]。如何在有意电磁干扰下对主动雷达型空空导弹的重要性能指标:制导精度进行评估或分析,是目前各国高度关注的研究方向。

选用合适的方法对制导精度进行研究十分重要,鉴于空中靶试数量有限,因此评估工作主要依靠数学仿真来进行。

仿真方法有很多,包括蒙特卡罗法、协方差分析法、伴随法、CADET协方差分析描述函数法、SLAM统计线性化伴随法等^[3-6]。蒙特卡罗法以其计算方法及程序结构简单、收敛的概率性和速度与问题无关、方法适用性强、节约成本等优点而得到了广泛的应用。

本文就是从电磁干扰下主动雷达型空空导弹制导精度研究出发,以噪声干扰作用为例,用蒙特卡罗方法对此进行了研究,并与产品试验数据进行了比对,结果表明,蒙特卡罗法可以很好地用于干扰情况下制导精度分析。

收稿日期:2019-10-15;修回日期:2019-11-20

作者简介:孟若含(1995—),女,硕士研究生、主要从事飞行器设计研究,E-mail:mengruohan7@163.com。

通讯作者:赵华超(1965—),男,研究员,硕士研究生,主要从事飞行器制导与仿真研究,E-mail:zhgjun123@x263.net。

1 仿真模型建立

1.1 制导系统模型

主动雷达型空空导弹制导系统根据测量的目标和导弹

运动参数,形成制导信号并控制导弹按制导规律要求飞向目标。雷达制导系统一般包括两个回路,一为导引回路,另一个为飞行控制回路(也称稳定回路),外部由导弹—目标相对运动学关系闭合^[7-8]。其雷达制导系统原理如图1。

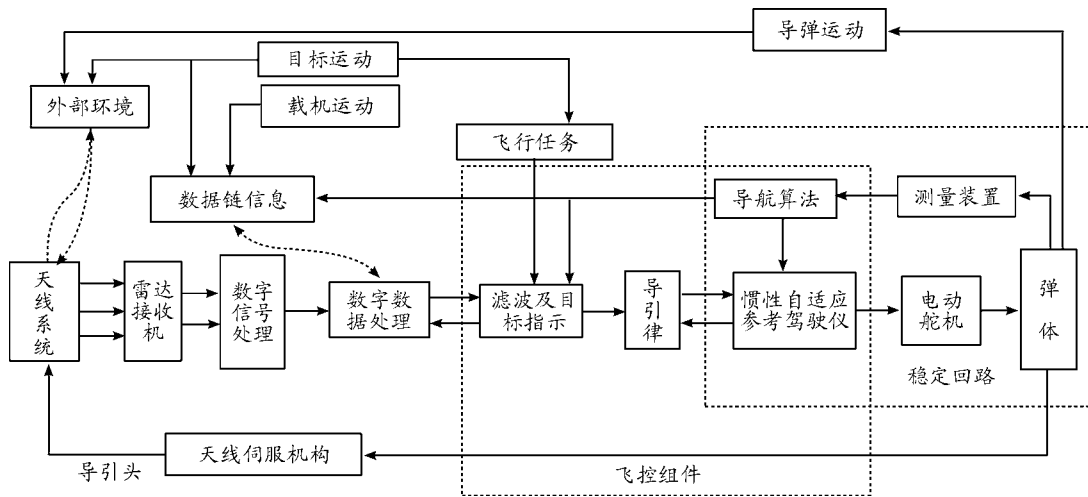


图1 雷达制导系统原理框图

1.2 噪声模型

雷达干扰是指一切破坏和扰乱敌方雷达检测己方目标信息的战术和技术措施的统称。对雷达来说,除带有目标信息的有用信号外,其他各种无用信号都是干扰。干扰的分类方法很多,一种综合性的分类如图2所示^[9]。

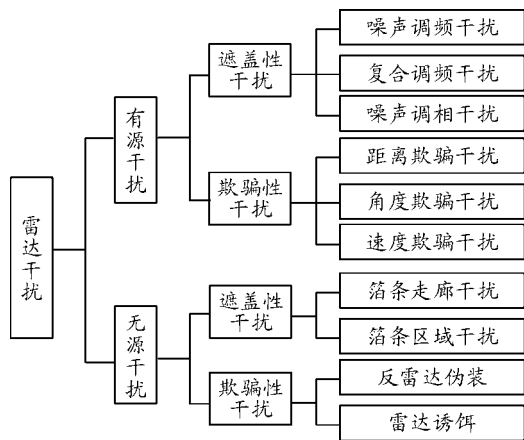


图2 雷达干扰分类框图

1.2.1 噪声干扰作用机理

噪声干扰利用噪声遮盖或淹没有用信号,阻碍雷达检测目标的信息。由于任何一部雷达都有外部噪声和内部噪声,所以,雷达对目标的检测是基于一定的概率准则在噪声中进行的。一般来说,如果目标信号能量 S 与噪声能量 N 之比(信噪比 S/N)超过检测门限 D ,则可以保证雷达以一定的虚警概率 P_{fa} 和检测概率 P_d 发现目标,否则称为不发现目标。噪声干扰使强干扰功率进入雷达接收机,降低雷达接收机的

信噪比 S/N ,使雷达难以检测目标^[10]。

按照信号中心频率 f_j 、带宽 Δf_j 相对导引头工作的中心频率 f_s 、带宽 Δf_s 的关系,可将噪声干扰分为瞄准式干扰、阻塞式干扰和扫频式干扰。

1) 瞄准式干扰

瞄准式干扰一般满足: $f_j \approx f_s$, $\Delta f_j = (2 \sim 5) \Delta f_s$,采用瞄准式干扰必须首先测得导引头工作频率 f_s ,然后把干扰频率 f_j 调整到导引头的载频上,从而保障较窄的 Δf_j 能够覆盖 Δf_s 。瞄准式干扰优点是在导引头 Δf_s 内的干扰功率强,但缺点是对频率引导要求高。

2) 阻塞式干扰

阻塞式干扰一般满足: $\Delta f_j > 5 \Delta f_s$, $f_j \approx f_s \in [f_j - \Delta f_j/2, f_j + \Delta f_j/2]$ 。由于 Δf_j 较宽,一方面对频率引导的精度要求降低,使得频率引导设备简单;另一方面也便于同时干扰频率分集雷达、频率捷变雷达和多部不同工作频率的雷达。其缺点是在 Δf_s 内的干扰功率密度低。

3) 扫频式干扰

扫频式干扰一般满足: $\Delta f_j = (2 \sim 5) \Delta f_s$, $f_j = f_s + kt$, $t \in [0, T]$, k 为常数,即干扰的中心频率为连续的、以 T 为周期的函数。扫频干扰可对导引头造成周期性间断的强干扰,扫频范围较宽,也能够干扰频率分集雷达、频率捷变雷达和多部不同工作频率的雷达。

由上可知,噪声干扰种类多元,不同噪声的数学模型也不尽相同,这里选取噪声调频信号进行建模。

1.2.2 噪声调频信号模型

噪声调频干扰是一类常见的遮盖性干扰,它的时域表达式为

$$J(t) = U_j \cos[\omega_j t + 2\pi KFM \int_0^t u_n(t) d\tau + \varphi] \quad (1)$$

其中,调制噪声 $u_n(t)$ 是零均值、广义平稳的随机过程, φ 是在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布, 且与 $u_n(t)$ 相互独立的随机变量, U_j 为噪声调频信号的幅度, ω_j 是噪声调频信号的中心频率, K_{FM} 为调频斜率。

假设调制噪声 $u(t)$ 的功率谱 $G_n(f)$ 具有带限均匀谱, 即

$$G_n(f) = \begin{cases} \frac{\sigma n^2}{\Delta F_n} & 0 \leq f \leq \Delta F_n \\ 0 & \text{其他 } f \end{cases} \quad (2)$$

那么, 调频噪声成分 $e(t) = \int_0^t u(t') dt'$ 的功率谱密度为

$$G_e(w) = \frac{1}{(2\pi f)^2} G_u(f) \quad (3)$$

相应的相关函数

$$R_e(\tau) = \int_0^\infty G_e(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (4)$$

调频干扰信号 $J(t)$ 的功率谱密度通过其相关函数表示

$$G_J(f) = \frac{U_j^2}{2} \frac{f_{de}^2 / (2\Delta F_n)}{\left(\frac{\pi f_{de}^2}{2\Delta F_n}\right)^2 + (f - f_j)^2} \quad (5)$$

利用式(3)和式(5)的关系可以进一步得到由 $R_e(\tau)$ 表达的 $G_J(f)$ 表达式, 该积分表达式无法得出准确的解。定义有效频率带宽 $f_{de} = K_{FM} \sigma_n$, 在以下两种情况下可解得 $G_J(f)$ 的近似解。

1) $f_{de} \gg \Delta F_n$ 时

$$G_J(f) = \frac{U_j^2}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} f_{de}} e^{-\frac{(f-f_j)^2}{2f_{de}^2}} \quad (6)$$

2) $f_{de} \ll \Delta F_n$ 时,

$$G_J(f) = \frac{U_j^2}{2} \frac{f_{de}^2 / (2\Delta F_n)}{\left(\frac{\pi f_{de}^2}{2\Delta F_n}\right)^2 + (f - f_j)^2} \quad (7)$$

至此得到了噪声调频信号的功率谱密度函数。

1.3 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法又称统计试验法 (Statistical testing), 是一种常用的模拟仿真方法, 也是精度评定的常用方法之一^[11]。

1.3.1 蒙特卡罗方法基本原理

蒙特卡罗法基本思想是: 首先建立一个概率模型或随机过程, 使它的参数等于问题的解, 然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征, 最后给出所求解的近似值, 解的精确度可以用估计值的标准差来表示^[12-13]。

1.3.2 蒙特卡罗方法基本程序

1) 系统模型

系统模型可以用状态方程给出

$$\dot{x}(t) = f(X, t) + G(t)W(t) \quad (8)$$

假定系统状态方程为正态分布, 给定初始状态变量的均值和协方差为

$$E[X(0)] = m_0$$

$$E[(X(0) - m_0)(X(0) - m_0)^T] = p_0 \quad (9)$$

2) 多次独立模拟计算

依照给定的均值 m_0 和协方差 p_0 产生伪随机数作为初始的随机状态矢量 $X(0)$ 。

按照给定随机输入的均值及谱密度矩阵产生伪随机数, 作为随机输入噪声。

对状态方程进行数值积分, 从 $t=0$ 到末端时刻 $t=t_{\text{end}}$ 。

3) 状态矢量的均值和协方差估值的计算

经过 N 次蒙特卡罗模拟计算可以得到一组状态轨迹, 记为

$$\begin{cases} X^{(1)}(t, X^{(1)}(0), W^{(1)}(t)) \\ X^{(2)}(t, X^{(2)}(0), W^{(2)}(t)) \\ \vdots \\ X^{(N)}(t, X^{(N)}(0), W^{(N)}(t)) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $0 \leq t \leq t_{\text{end}}$ 。

则状态矢量 $\sigma_R = 0.77$ 的均值和协方差的估值可以求出。

4) 估计值的精度评定

在上面的计算中得到了参数的估计值, 对于这些估计可以进行精度评估。估值也是随机变量, 在样本容量即实验次数足够大时, 可以得到:

$$\begin{cases} E(\hat{m}) = m \\ E(\hat{\sigma}) = \sigma \\ \sigma(\hat{m}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \\ \sigma(\hat{\sigma}) = \frac{\sigma}{\sqrt{2N}} \end{cases} \quad (11)$$

可知对于大的样本容量, 样本均值 \hat{m} 服从正态分布 $N(m, \sigma/\sqrt{N})$, 样本均方差服从正态分布 $N(\sigma, \sigma/\sqrt{2N})$, 对于大的 N 值, 可以用估值 $\hat{m}, \hat{\sigma}$ 近似代替式中的真值 m 和 σ , 得到均值 \hat{m} 和 $\hat{\sigma}$ 的置信区间估计:

$$\begin{cases} P(\hat{m} - \hat{\sigma}/\sqrt{N} \leq m \leq \hat{m} + \hat{\sigma}/\sqrt{N}) = 0.68 \\ P(\hat{m} - 2\hat{\sigma}/\sqrt{N} \leq m \leq \hat{m} + 2\hat{\sigma}/\sqrt{N}) = 0.95 \\ P(\hat{m} - 3\hat{\sigma}/\sqrt{N} \leq m \leq \hat{m} + 3\hat{\sigma}/\sqrt{N}) = 0.99 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P(\hat{\sigma} - \hat{\sigma}/\sqrt{2N} \leq \sigma \leq \hat{\sigma} + \hat{\sigma}/\sqrt{2N}) = 0.68 \\ P(\hat{\sigma} - 2\hat{\sigma}/\sqrt{2N} \leq \sigma \leq \hat{\sigma} + 2\hat{\sigma}/\sqrt{2N}) = 0.95 \\ P(\hat{\sigma} - 3\hat{\sigma}/\sqrt{2N} \leq \sigma \leq \hat{\sigma} + 3\hat{\sigma}/\sqrt{2N}) = 0.99 \end{cases} \quad (13)$$

以上计算要求样本容量足够大, 一般情况下 $N > 25$ 就可看作满足该条件。

2 仿真实例

以宽带噪声干扰为例, 干扰带宽为 W_0 (MHz)、功率密度为 P_0 (W/MHz), 用虚拟样机在图 1 中的外部环境中对导引头的输入中加入噪声干扰信号, 首先在一条弹道条件下进行

仿真,弹道参数见表1中序号1,得到500次模拟打靶的脱靶量均值 $E_R=2.21$,方差 $\sigma_R=0.77$,计算得到在90%、95%、99%不同置信度下的脱靶量置信区间为 $[0,3.26]$ 、 $[0,3.61]$ 、 $[0,4.30]$ 。同理计算另外序号2~10弹道的脱靶量置信区间,如表2所示。

表1 弹道参数						
弹道 序号	载机 高度/ m	目标 高度/ m	载机 速度/ Ma	目标 速度/ Ma	水平进 入角/ (°)	发射 距离/ m
1	9 000	8 000	1.2	0.8	180	40 000
2	9 000	10 000	1.2	0.9	180	40 000
3	10 000	9 000	1.5	0.9	180	85 000
4	5 000	2 000	0.9	0.5	0	10 000
5	9 000	6 000	0.9	0.8	180	25 000
6	9 000	8 000	0.8	1.2	180	40 000
7	9 000	8 000	1.5	1.8	180	40 000
8	9 000	7 000	1.2	0.9	180	40 000
9	8 000	6 000	1.2	0.8	180	30 000
10	9 000	6 000	1.2	0.8	0	40 000

表2 仿真脱靶量置信区间					
弹道 序号	仿真 均值/ m	仿真 方差/ m	脱靶量置信区间/m		
			$1-\alpha=$ 90%	$1-\alpha=$ 95%	$1-\alpha=$ 99%
1	2.21	0.77	0~3.26	0~3.61	0~4.30
2	1.73	2.80	0~5.54	0~6.83	0~9.34
3	6.02	0.86	0~7.19	0~7.59	0~8.36
4	2.40	3.45	0~7.09	0~8.68	0~11.77
5	8.32	1.30	0~10.09	0~10.69	0~11.85
6	4.49	2.12	0~7.49	0~8.51	0~10.49
7	5.58	1.37	0~7.44	0~8.03	0~9.30
8	6.11	1.25	0~7.81	0~8.39	0~9.51
9	7.20	0.35	0~7.68	0~7.84	0~8.15
10	3.36	1.28	0~5.10	0~5.69	0~6.84

将产品试验的脱靶量与表中数据对比,发现所有条件产品试验的脱靶量均落入统计仿真脱靶量置信度99%区间内,可以认为在此置信参数条件下统计仿真脱靶量与试验数据保持一致。该方法也可以应用到其他干扰样式的制导精度研究上。

3 结论

运用蒙特卡罗模拟方法,研究主动雷达型空空导弹在噪声干扰背景下的制导精度。利用虚拟样机仿真得出噪声干扰条件下多条弹道模拟打靶的脱靶量置信区间,与实测数据进行比对,结果表明,蒙特卡罗法可以很好地用于噪声干扰情况下制导精度分析。后续将进一步运用该方法研究导弹在其他类型干扰作用下的制导精度。

参考文献:

[1] 李海军,刘强昌,周立军. 电子干扰对空空导弹的作战效能影响分析[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(2):314-316.

[2] 高卫. 导弹电子干扰试验方法探讨[J]. 战术导弹技术,2008(4):8-11.

[3] 袁林. 显式制导下飞行器落点精度蒙特卡洛仿真[J]. 航空兵器,2017(2):19-22.

[4] 蒋瑞民,周军,郭建国. 导弹制导系统精度分析方法研究[J]. 计算机仿真,2011,28(5):76-79.

[5] 林晓辉,崔乃刚,刘育华. 协方差分析描述函数法在导弹惯性末制导制导精度计算中的应用[J],航空兵器,1997(3):10-13.

[6] 张宏,林德福,祁载康,等. 雷达制导系统噪声对制导精度的影响[J]. 系统仿真学报,2008,20(5):1295-1298.

[7] 乔燕涛,赵华超. 弹载 PD 雷达主杂波盲区建模与仿真[J]. 四川兵工学报,2014(11):48-50.

[8] 赵华超. 空空导弹研制阶段总体设计数学模型的建立[J]. 战术导弹技术,2001(12):21-28.

[9] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理[M]. 北京:航空工业出版社,2013:365-367.

[10] 高静,杨甫,王愈琦,等. 单脉冲雷达导引头抗噪声干扰性能分析与验证[J]. 航空兵器,2005(5):35-36.

[11] 吴立人. 制导精度评定的蒙特卡罗模拟[J]. 导弹与航天运载技术,1995(5):9-17.

[12] 袁子怀,钱杏芳. 有控飞行动力学与计算机仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2001:82-138.

[13] 刘新爱,王如根. 导弹武器系统制导精度综合鉴定方法研究[J]. 战术导弹技术,2005(5):13-16.

(责任编辑 周江川)