

飞行装备 ARMA 滤波的电磁防护方法分析

刘述民, 张勇强, 吴杰

(空军第四飞行学院, 石家庄 050081)

摘要: 在复杂电磁环境下, 飞行装备很容易受到电磁脉冲的干扰而偏离航线或坠毁, 为了增加其抗干扰能力, 提出了基于 ARMA 滤波的电磁防护方法。该方法在装备受到电磁干扰无法控制的情况下, 根据先期的轨迹和指令, 通过 ARMA 滤波器算法, 自动产生控制指令, 用来剔除并更换掉无效的控制指令, 使飞行装备在复杂电磁环境下, 继续沿着航线飞行避免发生坠毁。通过仿真计算及模拟实验, 证明该方法能使飞行装备具有较好的抗干扰能力和“自修复”能力。

关键词: ARMA; 复杂电磁环境; 加固防护; 信号处理

中图分类号: TJ43; O441 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)06-0087-04

Electromagnetic Protection of Flying Equipment with ARMA Filtering

LIU Shu-min, ZHANG Yong-qiang, WU Jie

(Air Force Fourth Flying College, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Under complex electromagnetic environment, flying equipment is likely to be disturbed by electromagnetic pulses and to prang. In order to improve its immunity ability to electromagnetic pulses, a method of electromagnetic protection was proposed based on ARMA filtering. When flying equipment is disturbed and lost its control, this method can make equipment form control instructions automatically by ARMA filtering based on prior trajectory and instructions. While this restored instructions replace wrong instructions and control equipment flying along lane. Experimental results and simulation demonstrated that this method can improve self-restoring function and immunity ability of flying equipment.

Key words: ARMA; complicated electromagnetic environment; protection; signal processing

随着高技术在军事领域的广泛应用, 各种军用电磁辐射体以及电磁脉冲武器使得现代战场的电磁环境日益复杂、多变、恶劣^[1]。飞行装备由于具有大量的电子元件和微电子器件, 很容易受到电磁脉冲的干扰, 因此, 电磁防护对于飞行装备尤为重要, 传

统的电磁防护方法主要采用“硬”的防护措施^[2-3], 如屏蔽、滤波, 接地等方法。由于飞行装备需要与导引站进行数据交换, 如接收指令等, 采用传统的电磁防护方法就有一定的局限性。因此, 笔者从“软”的方面采取防护措施, 对控制信号进行抗干扰处理, 建立

收稿日期: 2011-06-28

作者简介: 刘述民(1963—), 男, 河南原阳人, 硕士, 特级飞行员, 主要研究方向为飞行教育理论。

了控制指令重建的电磁防护方法。

1 工作原理

飞行装备在飞行中主要依赖控制指令进行飞行,一旦控制指令在复杂电磁环境中受到干扰,飞行装备就有坠毁的危险。因此,为了使其在受干扰的情况下保持正常航线,就要对控制指令进行重建。图1为飞行装备控制指令重建的电磁防护原理,飞行装备通过指令判别器对来自复杂电磁环境下控制箱输出的指令信号进行判别,正确的指令直接送入信号合成器推动控制设备,错误的指令被剔除;然后由ARMA滤波器^[4]构成的信号处理模型,根据先前的控制指令以及装备的状态方程对目标方位及运动状态进行估计,测量出偏差角并重新构建一个新的控制指令来,再送入信号合成器来推动控制设备。即使电磁脉冲造成部分控制指令出现错误,控制设备也能根据重建的控制指令进行正确的飞行操作,短时的电磁干扰不会对飞行装备的飞行造成威胁^[5]。

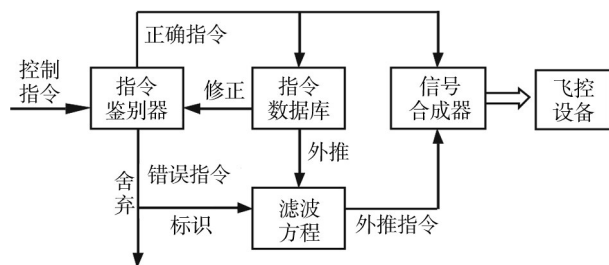


图1 指令重建的电磁防护原理

Fig. 1 Electromagnetic protection skeleton drawing of restored instruction

2 控制指令重建的数学模型

ARMA数学模型是一种平稳时间序列的线性模型,在工程技术中常用于预报、控制等方面。飞行装备控制指令的时间序列的变化是一类随机过程,由于产生随机现象的主要因素不随时间而变,因此它是一种平稳的随机过程,控制指令的时间序列符合ARMA滤波器数学模型的要求。控制指令时间序列分析的目的是找出变化规律,建立线性模型,预报出受到电磁干扰破坏的控制指令并替换。

2.1 平稳时间序列的模型

1) 自回归模型。任意时刻 t 上的数值 W_t 可表示过去 P 个时刻的数值 $W_{t-1}, W_{t-2}, \dots, W_{t-P}$ 的线性组合加 t 时刻的白噪声。 p 阶回归模型记为 $AR(p)$,它的自相关函数 ρ_k 拖尾,偏相关函数 φ_{kk} 在 $k=p$ 处截尾。

2) 滑动平均模型。任意时刻 t 上的数值 W_t 可表示成白噪声 $\{a_t\}$ 在 t 和 t 以前 $q+1$ 个时刻上数值 $a_t, a_{t-1}, a_{t-2}, \dots, a_{t-q}$ 的加权和或滑动和的形式。 q 阶滑动模型简记为 $MA(q)$,它的自相关函数 ρ_k 在 $k=p$ 处截尾,偏相关函数 φ_{kk} 拖尾。

3) 自回归滑动平均模型(混合模型)。自回归滑动平均模型可表示为线性差分方程形式。混合模型记为 $ARMA(p, q)$,它的自相关函数 ρ_k 和偏相关函数 φ_{kk} 都是拖尾的。

2.2 程序流程及步骤^[6]

平稳时间序列的3种模型,前2种模型是第3种模型的特例,其实质均为自回归滑动平均模型(混合模型)。因此,选取的程序流程按照自回归滑动平均模型来进行。

1) 选取样本。对应控制指令的时间序列做 n 次实验,得到一个样本 $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$,一般 $n > 50$ 。

2) 数据预处理。 $W_t = Z_t - \bar{Z}$, 其中 $\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_j$ 计算得到 n 个数据 $W_1, W_2, \dots, W_n$ 。

3) 计算参数值。计算样本自协方差函数的 $\hat{\gamma}_k$ 、样本自相关函数 $\hat{\rho}_k$ 、偏相关函数 $\hat{\varphi}_{kk}$ 的数值, $k=0, 1, \dots, K$ 。一般取 $K < n/4$,常取 $K \approx n/10$ 。

因为 $EW_t = 0$,所以自协方差函数 $\gamma_k = E(W_t W_{t+k})$ 。可定义样本的自协方差函数为:

$$\hat{\gamma}_k = \frac{W_1 W_{1+k} + W_2 W_{2+k} + \dots + W_{n-k} W_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-k} W_j W_{j+k}$$

$$k=0, 1, \dots, K \quad (K < n) \quad (1)$$

样本的自相关函数为:

$$\hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0} \quad k=0, 1, \dots, K \quad (K < n) \quad (2)$$

样本的偏相关函数 $\hat{\varphi}_{kk}$ 可用式(3)定义:

$$\begin{bmatrix} \hat{\varphi}_{k1} \\ \hat{\varphi}_{k2} \\ \vdots \\ \hat{\varphi}_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \hat{\rho}_1 & \hat{\rho}_2 & \cdots & \hat{\rho}_{k-1} \\ \hat{\rho}_1 & 1 & \hat{\rho}_1 & \cdots & \vdots \\ \hat{\rho}_2 & \hat{\rho}_1 & \cdots & \cdots & \hat{\rho}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_{k-1} & \cdots & \hat{\rho}_2 & \hat{\rho}_1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_2 \\ \vdots \\ \hat{\rho}_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用托布利兹矩阵求逆和作矩阵乘法计算 $\hat{\varphi}_{kk}$, 计算量较大, 可用递推公式(4)计算:

$$\hat{\varphi}_{11} = \hat{\rho}_1 \quad (4)$$

$$\hat{\varphi}_{k+1,k+1} = [\hat{\rho}_{k+1} - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{k+1-j} \varphi_{k,j}] [1 - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_j \varphi_{k,j}]^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{\varphi}_{k+1,j} = \hat{\varphi}_{k,j} - \hat{\varphi}_{k+1,j,k+1} \varphi_{k,k-j+1} \quad j=1, 2, \cdots, k \quad (6)$$

4) 模型识别。将 $\hat{\rho}_k$, $\hat{\varphi}_{kk}$ 的数值分别作图, 按“截尾”、“拖尾”情况, 根据 ARMA 模型的性质来判断数学模型的类别与阶数 p, q 。在工程技术中 p, q 一般不超过四阶。

判断 p, q 阶数的方法如下: 当 $k > p$ 时, 平均 20 个 $\hat{\varphi}_{kk}$ 中至多有 1 个使得 $|\hat{\varphi}_{kk}| \geq \frac{2}{\sqrt{n}}$, φ_{kk} 截尾在 $k=p$ 处; 当 $k > q$ 时, 平均 20 个 $\hat{\rho}_k$ 中至多有 1 个 $|\hat{\rho}_k| \geq \frac{2}{\sqrt{n}}$, 则 ρ_k 截尾在 $k=q$ 处。

5) 参数估计。利用 Yule-Walker 方程计算参数估计值 $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \cdots, \hat{\varphi}_q, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \cdots, \hat{\theta}_p$ 以及 σ_n , 最后获得 W_t 的线性模型式(3)。

6) 模型考核。从低到高取 p 和 q 的阶数, 直到所得到的模型通过考核为止, 以此判定选取的预报模型是否合理。

7) 模型转换。通过 $W_t = Z_t - \mu$ ($\mu \approx \bar{Z}$) 的变换, 建立控制指令 Z_t 的线性预报模型:

$$Z_t = \theta_0 + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \cdots - \theta_q a_{t-q} + \varphi_1 Z_{t-1} + \cdots + \varphi_p Z_{t-p} \quad (7)$$

8) 制作预报。通过 Z_t 的线性模型就可以对控制指令进行递推和预报, 平稳随机序列的预报方法有 2 种: 递推预报法和直接预报法。递推预报法计算第下一步时要用到上一步值, 以此递推; 直接预报法可以直接预报出 k 步值。

3 仿真验证及模拟实验

选择某型飞弹的控制指令进行模型实验验证。

对于飞弹攻击固定目标情况(或目标与发射点成直线运动), 设电磁干扰发生在飞弹飞行 7~8.5 s 时, 此时弹道未收敛, 数据可以进行验证。根据前 7 s 的控制指令, 运用 ARMA 滤波模型进行指令重建, 得到的重建指令和真实指令的对照见表 1、表 2, 表 1 为俯仰指令, 表 2 为偏航指令。从表 1、表 2 中可以看出, 这 2 种控制指令相差很小, 如果用重建的指令控制弹体舵机飞行, 解算飞弹的控制力以及飞行的弹道方程, 在目标处偏航和俯仰的线度误差小于 1.5 m。因此, 该模型满足要求。

表 1 俯仰真实指令与重建指令对比

Table 1 Real instruction and restored instruction in pitch

时间 t/s	7.00	7.24	7.48	7.72	7.96	8.20	8.44
真实指令	0.321	0.322	0.324	0.328	0.334	0.338	0.342
重建指令	0.320	0.323	0.326	0.329	0.333	0.337	0.341

表 2 偏航真实指令与重建指令对比

Table 2 Real instruction and restored instruction in yaw

时间 t/s	7.00	7.24	7.48	7.72	7.96	8.20	8.44
真实指令	0.074	0.078	0.079	0.079	0.080	0.082	0.083
重建指令	0.076	0.077	0.078	0.079	0.080	0.081	0.082

对于攻击移动目标的情况(如目标移动方向与发射方向垂直), 由于无法采集到真实的控制指令, 因此采取文献[7]中的一个理想的弹道进行仿真验证, 目标沿发射点垂直方向作水平等速直线运动, 飞弹按三点法导引拦截目标, 不考虑飞弹俯仰运动, 飞弹在水平面上的运动方程为:

$$\frac{dR_M}{dt} = V_M \cos(q_M - \varphi_V) \quad (8)$$

$$R_M \frac{dq_M}{dt} = -V_M \sin(q_M - \varphi_V) \quad (9)$$

$$\frac{dR_T}{dt} = -V_T \cos q_T \quad (10)$$

$$R_T \frac{dq_T}{dt} = V_T \sin q_T \quad (11)$$

$$q_M = q_T \quad (12)$$

式中: R_M 和 R_T 分别为飞弹和目标(坦克)在 t 时刻与原点的距离; V_M 和 V_T 分别为飞弹和目标在 t 时刻的运动速度; q_M 和 q_T 为飞弹和目标在 t 时刻与 x 轴的夹角; φ_V 为飞弹在 t 时刻瞬时角偏差。

图2为运动轨迹的俯视图,坐标原点为飞弹的发射位置, x, y 分别表示与原点的横向距离和纵向距离。图2中带圈的直线为目标运动轨迹,而飞弹的运动轨迹可通过解算方程(8)~(12)得到,如图2中的实线所示。

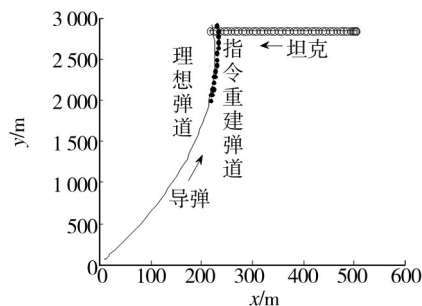


图2 理想弹道与重建控制指令形成的弹道比较

Fig. 2 Comparison of ideal trajectory and formed trajectory by restored instruction

通过计算,飞弹将在23.9 s时击中目标。如果飞弹在飞行18 s以后受到强电磁脉冲的干扰,根据先前指令,通过模型重建的控制指令起作用控制飞弹飞行,那么18 s以后运动轨迹如图2中的点线所示,此时如果将飞弹和目标看成质点的话,两者就不会在同一时刻相交,但目标如果是较大的物体,且目标速度较慢的情况下,飞弹仍能击中目标。通过计算,击中目标的条件是:目标长度大于4 m,行进速度小于12 m/s。

4 结论

基于ARMA滤波的飞行装备的电磁防护方法,

改变了传统的电磁防护方法只从硬件层面解决的方式,使得飞行装备在硬件防护失效的情况下,能够从软件层面进行抗干扰,并具有“修复自救”的功能。从仿真计算及模拟实验的结果来看,证明了这种防护措施的有效性,从而为飞行装备的电磁防护方法以及“智能化”的发展开辟了一个新途径。

参考文献:

- [1] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(1):1—5.
- [2] 周壁华,陈彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [3] WERNER Graf, EDWARD F. Shielding Effectiveness and Electromagnetic Protection[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30(3). (余不详)
- [4] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [5] 张勇强. 有线制导装备快沿电磁脉冲效应及防护方法研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2010.
- [6] 张勇强,刘崇刚. 一种基于ARMA模型的能见度预报方法[J]. 航空气象,2002,181(4):25—26.
- [7] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

(上接第42页)

- [32] 马贵春,张树生,张景林. 人工神经网络方法在火炸药科学领域应用进展[J]. 火工品,2005(1):42—44.
- [33] 刘沃野,蒙古海. 基于神经网络的库存枪弹储存寿命预测研究[J]. 军械工程学院学报,2001,13(3):12—15.
- [34] 曹营军. 基于人工神经网络的库存发射药安全贮存寿命预测研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2002.
- [35] 吕延龙,曹营军,田春雷. 用神经网络技术预测库存发射药安全寿命的可行性[J]. 火炸药学报,2003,26(1):68—

73.

- [36] 杨小震. 分子模拟与高分子材料[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [37] FRENKEL Smit. 分子模拟——从算法到应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [38] ANDREW Rleach. Molecular Modeling Principles and Applications [M]. Second Edition. Prentice Hall, 2001.
- [39] 邢耀国,董可海. 固体火箭发动机寿命预估研究的发展和展望[J]. 固体火箭技术,2001,24(3):30—33,41.