

8-3-2020

## Design of Navigation Electronic Interference System for Flight Simulator

Zengbo Zhou

1. 93199 Army Flight Simulator Techonology Research Institute, Harbin 150001, China;

Chen Xi

1. 93199 Army Flight Simulator Techonology Research Institute, Harbin 150001, China;

Zhenyu Sun

1. 93199 Army Flight Simulator Techonology Research Institute, Harbin 150001, China;

Li Xiang

1. 93199 Army Flight Simulator Techonology Research Institute, Harbin 150001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Design of Navigation Electronic Interference System for Flight Simulator

### Abstract

**Abstract:** Modern military combat pays more attention to the electronic interference and anti interference, as the important component, the aircraft navigation system is one of the main objects attacked by enemy electronic jamming. In order to simulate the electronic jamming influence on navigation performance of the system, the establishment of an electronic jamming system in aircraft engineering simulator, was designed for the flight simulator *interference model and statistical model frame work*, and according to *the integrity of the system testing* and calculation results, the interference was divided into five levels, which not only specified the electrical interference, but also measured evaluation of anti jamming effectiveness. The simulation of navigation system is much more practical, and greatly improves the pilot dealing with electronic jamming disposal capacity, and it has important significance for popularization.

### Keywords

electronic interference, engineering simulator, navigation system, interference model

### Recommended Citation

Zhou Zengbo, Chen Xi, Sun Zhenyu, Li Xiang. Design of Navigation Electronic Interference System for Flight Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1760-1765.

## 飞行模拟器导航电子干扰系统设计

周增波, 陈曦, 孙振宇, 李想

(93199 部队飞行仿真技术研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 现代军事作战更加注重电子干扰和反干扰, 导航系统作为飞机的重要分系统是受敌方电子干扰攻击的主要对象之一。为了模拟电子干扰对导航性能系统的影响程度, 在某型飞机工程模拟器中建立了电子干扰系统, 设计了适用于飞行模拟器的干扰模型和统计模型架构, 并根据完好性检测和统计计算结果将干扰程度分为 5 个级别, 既明确了电子干扰程度, 又可考核反干扰措施的有效性。使导航系统仿真更符合实际, 大大提高飞行员应对电子干扰的处置能力, 具有重要的推广意义。

**关键词:** 电子干扰; 工程模拟器; 导航系统; 干扰模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章标号: 1004-731X (2015) 08-1760-07

## Design of Navigation Electronic Interference System for Flight Simulator

Zhou Zengbo, Chen Xi, Sun Zhenyu, Li Xiang

(1. 93199 Army Flight Simulator Technonlogy Research Institute, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Modern military combat pays more attention to the electronic interference and anti interference, as the important component, the aircraft navigation system is one of the main objects attacked by enemy electronic jamming. In order to simulate the electronic jamming influence on navigation performance of the system, the establishment of an electronic jamming system in aircraft engineering simulator, was designed for the flight simulator *interference model and statistical model frame work*, and according to *the integrity of the system testing* and calculation results, the interference was divided into five levels, which not only specified the electrical interference, but also measured evaluation of anti jamming effectiveness. The simulation of navigation system is much more practical, and greatly improves the pilot dealing with electronic jamming disposal capacity, and it has important significance for popularization.

**Keywords:** electronic interference; engineering simulator; navigation system; interference model

## 引言

导航系统主要完成定向、测距、测速、引导飞机着陆等功能, 是飞机最重要的系统之一。大多导航设备都是利用无线电波的传输特性来实现以上功能, 当处于对抗环境条件下, 导航系统很容易受到敌方电子干扰的影响, 从而使导航系统精度降低

甚至失效, 这时飞行员的故障判断能力和处置能力将直接关系到飞行安全。在日常训练任务中一般没有特定的电子干扰环境, 飞行员往往缺乏反干扰这一方面的锻炼。随着飞行仿真事业的不断发展, 用数字仿真技术实现电磁环境模拟成为可能, 人们可以在飞行模拟器中建立导航设备模型和电子干扰模型来进行干扰和反干扰的演练。

在以往飞行模拟器中, 建立的电磁环境主要是针对雷达和导弹, 并没有针对导航的电子干扰系统。导航系统只实现各导航设备的定向和测距等功能, 无法反映出导航系统受到干扰时的真实性能指



收稿日期: 2015-05-05 修回日期: 2015-06-23;  
作者简介: 周增波(1977-), 男, 黑龙江宾县, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行模拟器建模仿真; 陈曦(1976-), 男, 黑龙江哈尔滨, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行器仿真; 孙振宇(1981-), 男, 黑龙江哈尔滨, 硕士, 助工, 研究方向为飞行模拟器飞行性能建模。

<http://www.china-simulation.com>

• 1760 •

标<sup>[1]</sup>。所以十分有必要在飞行模拟器中建立一套导航电子干扰系统,在虚拟环境中模拟出导航系统被干扰后的性能差异,以满足训练飞行员的目的。本文通过分析无线电波特性,设计了针对飞行模拟器导航系统的电子干扰方案。搭建了干扰计算模型和评估模型架构,并将干扰效果简化为 5 个等级,逼真地模拟了电子干扰对导航设备性能的影响。

表 1 无线电波特性

序号	波段名称	波长范围	频率范围	特性
1	超短波	>10 m	>30MHz	地波衰减严重、电波会穿透电离层不进行反射,作用距离短,受视线距离限制,可用脉冲测距、雷达和卫星导航
2	短波	10~50 m	6~30 MHz	空间传播,表面波衰减严重,受电离层反射,一般不用于导航
3	中短波	50~200 m	1.5~6 MHz	可表面和空间传播,长波部分可用于脉冲测距差系统
4	中波	200~3000 m	1.5 M~100 kHz	地面波较强,大气干扰电平大,适用于双曲线导航系统
5	长波	>3000 m	<100 kHz	适合空间传播,信号强度和相位稳定。
6	超长波	>10 km	<30 kHz	传播损耗小,可用于水下导航

某型飞机的导航设备主要有自动定向仪、测距机、塔康、伏尔、仪表着陆系统、指点信标等。这些无线电导航设备工作在不同的频率范围内有着不同的表象,如自动定向仪(ADF)属于无线电振幅导航系统,工作频率在 150~1750 kHz 属于中波、长波波段,功率一般在 500 W 左右,自动定向仪与无方向信标(NDB)结合工作,ADF/NDB 主要依靠地波或直达波来得到有效的方位信息。VOR 导航属于相位导航系统,工作频率为 108~117.95MHz,属于超短波高频波段,克服了中波、长波无线电信号传播的不稳定、作用距离短的缺点,但存在多径反射干扰,对场地有所要求<sup>[3]</sup>。

但这些无线电导航设备的有效测量范围和测量误差综合起来主要由以下因素决定:

- (1) 发射机功率
- (2) 接收机灵敏度
- (3) 工作频率
- (4) 夜间效应
- (5) 雷雨
- (6) 地形起伏和飞机结构影响
- (7) 飞机高度
- (8) 周围建筑物影响

## 1 无线电导航设备的电波特性

无线电导航系统主要是通过无线电波即电磁波在空间以能量辐射的形式向外传播电信号参量来进行导航的系统。无线电波的工作频率从几赫兹到 300G<sup>[2]</sup>Hz,对于飞机上的无线电设备而言使用的无线电波有如表 1 的特征。

## 2 电子干扰效能

干扰分为无源干扰和有源干扰两种。无源干扰是干扰源本身并不产生无线电波,只是将目标发射的回波进行反射来达到干扰目标设备的使用。有源干扰是干扰源本身向外辐射无线电波,而且辐射的无线电波特性接近目标设备的无线电波特性,从而达到干扰目标设备正常运行,在对抗环境下更加强调的是有针对性的有源干扰。从有源(压制性)干扰和无源(诱骗式)干扰来说,这两种干扰可独立实施,因此相应的电子干扰效能为:

$$E_C = K_g E_g + K_t E_t \quad (1)$$

其中:  $K_g$ ,  $K_t$  为压制性干扰和诱骗式干扰的贡献系数,如果没有相应的干扰措施,则贡献系数为 0,且  $K_g + K_t = 1$ 。在不考虑无源干扰的情况下,干扰效果完全取决于有源干扰的干扰效能<sup>[4]</sup>。

有源干扰对无线电导航设备的影响取决于对抗条件下有源干扰源对对特定的目标设备的干扰效能。电子对抗的干扰效能需要考虑多方面的因素,包括空间干扰强度、电磁环境、干扰方式、干扰时机等等。综合多方面的环境因素,对电子干扰效能  $E_g$ ,  $E_t$  进行评估的数学表达式为:

$$E = S \circ A = \bigvee_{i=1}^m (s_i \wedge a_i) \quad (2)$$

其中:  $S$  为评估要素隶属函数集合, 包括干扰强度、电磁环境、干扰方式、干扰时机等,  $A$  为干扰评价模糊集, 可分为好中差等级别。

对于多机干扰的情况, 可将每一个干扰源加入到隶属函数集合  $S$  中, 进行模糊综合评判, 得到电子对抗修正指数:

$$K_C = S(E) \circ A = \bigvee_{i=1}^n (s(e_i) \wedge a_i) \quad (3)$$

目前经常采用的干扰效能评估方法主要有:

- (1) 对比法
- (2) 仿真法
- (3) 试验法
- (4) 解析法
- (5) 估算法

在本型飞行模拟器的电子对抗仿真环境中采用了解析法, 通过对无线电导航设备的技术指标进行分析, 建立了基本的数据评估模型, 根据仿真条件对具体的干扰效能进行量化处理, 从而评估出对抗条件下作用于无线电导航设备的有效效能。相对于其它方法, 解析法最容易实现, 不用考虑过多的外在因素<sup>[5]</sup>。

### 3 电子干扰仿真系统

首先建立干扰源系统模型包括干扰源的带宽、发射功率干扰源的区域等来估算每个干扰源的干扰效能, 然后再根据无线电导航设备的电波特性来分析干扰源对设备测角测距功能的影响。

#### 3.1 电子干扰系统背景

为了突出飞行模拟器在对抗条件下的无线电导航设备的一些基本特性, 需要建立一套电子对抗仿真系统, 电子对抗仿真系统的作用是对无线电导航设备实施干扰后, 被干扰的无线电导航设备产生关联的干扰和破坏效果<sup>[6]</sup>。

由于对抗条件异常复杂、影响因素众多, 而且以前从没有过针对飞行模拟器导航系统的电子对

抗仿真系统, 所以只能对特定背景、对象、作战原则的现有条件进行简化模拟。

(1) 作战背景: 作战的区域相对固定, 不考虑天气、地形条件因素。

(2) 作战对象: 该型飞机无线电导航设备。

(3) 作战原则: 对于选定的作战对象即仿真的无线电导航设备的电波特性和各项性能参数如接收机灵敏度等基本不变。

#### 3.2 电子干扰系统组成

电子干扰仿真系统由对抗条件设置、电磁环境参数、评估模型、兵力生成(CGF)<sup>4</sup>部分组成。

对抗条件主要是设置干扰源类型, 可选择地面干扰源或空中干扰机。对于地面需要设置干扰源的坐标, 发射角度从而确定出干扰区域。空中干扰机的一般按直线运动或做简单的圆周运动, 需要设置飞机的速度、高度、旋转半径等<sup>[7]</sup>。

电磁环境参数主要是干扰源的频率、功率、有效作用距离。这些数据同样可在工程仿真管理系统中设置以表格的形式存储于导航数据库中, 当教员控制台选定干扰源后系统加载相对应的干扰参数用于仿真计算。

兵力生成系统采用 MAK 公司的 VR-FORCE 软件, 其具有战场想定制定、目标环境模拟、对抗环境模拟、电磁环境模拟等功能。在仿真中可任意设置地面或空中目标作为干扰源, 并能建立传感器模型、干扰模型<sup>[8]</sup>。在导航电子对抗系统中兵力生成系统将根据设置的对抗条件和电磁环境参数生成干扰源模型。

评估模型主要是针对较为普遍的干扰类型模型, 根据兵力生成系统输出的干扰信号特性。分析作战想定和电磁环境的干扰区域、干扰强度, 对仿真数据进行处理, 按干扰效果按级分类, 得到每一导航设备的干扰效能, 从而观察对抗条件下无线电导航系统的工作状况。主要包括干扰计算模型和评估模型 2 部分。

具体组成及控制关系如图 1 所示。

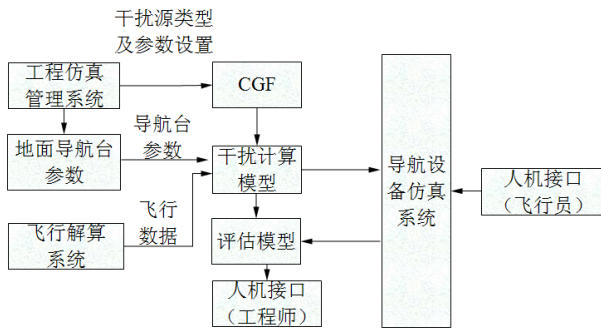


图 1 电子干扰系统组成和控制关系

### 3.3 干扰计算模型

飞行模拟器中对无线电导航设备的干扰效能主要从干扰区域和干扰强度两方面考虑。

#### (1) 干扰区域计算

当干扰源为地面目标时, 干扰源坐标为  $x_g, y_g, z_g$ , 飞机坐标为  $x_p, y_p, z_p$  则

$$\begin{cases} d_p = \sqrt{d^2 - z_p^2} \\ d_g = \tan \frac{\theta}{2} \times |z_g| \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $d$  为飞机到干扰源距离;  $\theta$  为干扰源辐射角。

$d_p - d_g \leq 0$  飞机在干扰区域内。

当干扰为空中目标时, 首先进行坐标矩阵转换, 将本机转到干扰目标机的机体坐标系下。

计算飞机在干扰目标系下的方位角和高低角有:

$$\begin{cases} a_z = 57.2958 \times a \tan\left(\frac{z}{x}\right) \\ e_1 = 57.2958 \times a \tan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{cases} \quad (5)$$

通常情况干扰源的范围为向上  $30^\circ$ , 向下  $60^\circ$ , 左右各  $60^\circ$ , 计算所得的方位角、高低在这个范围则飞机处于干扰有效区域内。

#### (2) 干扰强度计算

飞行模拟器中对无线电导航设备的干扰效能主要因素是电子干扰强度, 而电磁环境、干扰方式、干扰时机等动态因素过多, 在飞行仿真中无法采集到相关信息, 所以可取其平均作用或忽略<sup>[9]</sup>。

干扰强度与干扰源的发射功率和对目标的瞄准程度有关, 瞄准程度可定义为:

$$R = \frac{\max(f_{j2}, f_{m2}) - \min(f_{j1}, f_{m1})}{f_{m2} - f_{m1}} \quad (6)$$

式中:  $f_{j1}, f_{j2}$  表示干扰源频带,  $f_{m1}, f_{m2}$  表示目标(无线电导航设备)接受频带, 显然  $R$  介于 0 和 1 之间。

为达到有效的干扰效果, 可根据功率准则从干扰和信号出发, 利用功率足够大的噪声使得机载无线电设备无法识别导航台信号即当检测概率低于 0.1, 这时接收机无法从搜索状态进入跟踪状态, 从而导致无线电导航设备的测距测向功能完全被压制。反映功率准则的重要参数为压制系数。压制系数定义为干扰源与无线电导航设备或地面导航台发射功率之比<sup>[10]</sup>。

$$K = \frac{P_j}{P_m} \quad (7)$$

根据实际经验, 干扰源功率效能可为

$$E_p = \begin{cases} 0 & P_j/P_m < 0.5R_j \\ \frac{2}{3} \left( \frac{P_j/P_m}{R_j} \right) & 0.5R_j < P_j/P_m < 2R_j \\ 1 & P_j/P_m \geq 2R_j \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $E_p$  为主瓣截获条件下, 信号电平超过检测门限的概率;  $P_j/P_m$  为干扰源与目标的发射功率比值;  $R_j$  为信噪比门限。

综合可得干扰强度的隶属函数:  $S_p = R \cdot E_p$ 。

通过有效干扰区域计算可以得到本机与干扰源的相对位置关系, 判断干扰源的作用范围, 干扰强度计算能得到干扰效能与频带和功率之间的关系, 用于修正之前无线电导航设备模型计算的结果, 从而更贴切地反映出在对抗条件下无线电导航设备的导航定位性能。

### 3.4 评估模型

评估模型包括完好性检测模型和统计模型, 导航设备仿真系统和电子干扰系统通过接口把数据

送给完好性检测模型和统计模型，完成数据统计，结构和数据流向如图2所示。

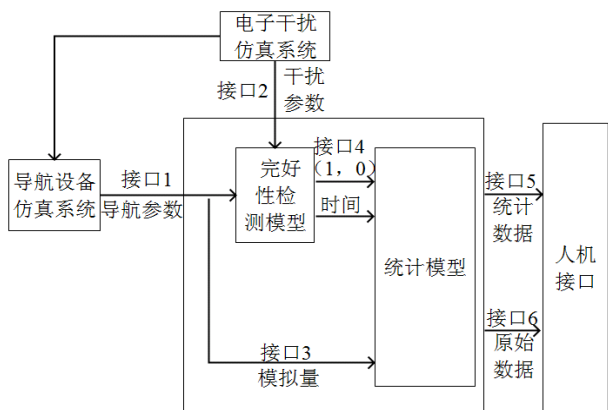


图 2 评估模型

接口1为导航参数，包括各导航设备的方位、距离、工作频率等性能数据以及电源状态、工作模

式等状态量。接口2为干扰参数，包括干扰源类型，干扰功率、干扰的检测门限概率等。接口1和接口2的数据作为原始数据输入到完好性检测模型中。接口1中的各导航设备的方位、距离等模拟器数据又通过接口3输入到统计模型中。接口4为完好性检测模型输出，主要包括故障状态的逻辑量和时间戳。接口5和接口6为评估模型的输出数据，其将原始数据和计算的统计结果输出给人机接口进行图形显示和性能分析。

图 3 为以 ADF 为例说明了模型中设置检测点的情况，外部的信号、经过 ADF 计算模型得到的解算量以及调和平均滤波、卡尔曼滤波、联邦滤波的子滤波器和主滤波器的输出都被作为监控对象。

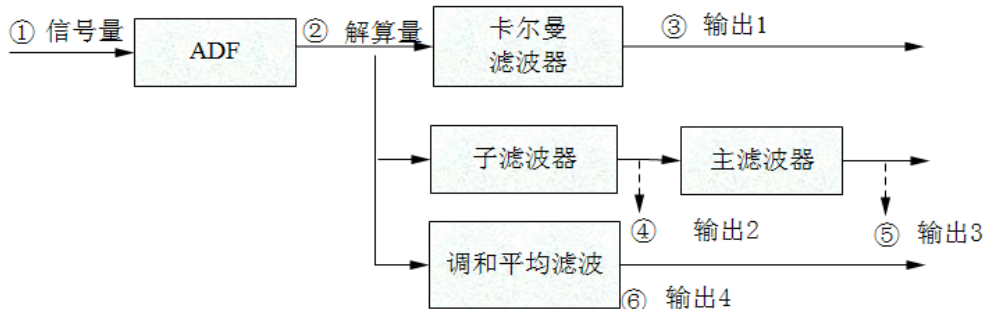


图 3 ADF 完好性检测结构图

实施电子干扰后，对接收端的干扰程度体现为接收机的完好性，因此还应对接收机进行完好性检测，以判断接收机的是否处于故障状态。RAIM 算法的残差为

$$v = Q_v w \varepsilon \tag{9}$$

式中： $Q_v$  为残差敏感矩阵； $W$  为观测权矩阵； $\varepsilon$  为观测误差。

残差敏感矩阵和观测权矩阵的定义如下：

$$Q_v = w^{-1} - D(\hat{x}) [D(\hat{x})^T w D(\hat{x})]^{-1} D(\hat{x})^T \tag{10}$$

$$\hat{x} = \arg_x \min [f(\hat{x})^T \Gamma f(\hat{x})] \tag{11}$$

其中  $\Gamma$  为对角阵。

导航设备接收机残差的验后误差和统计量为

$$\sigma = \sqrt{\frac{v^T w v}{K - 4}} \tag{12}$$

$$d_k = \frac{v(k)}{\sigma_0 \sqrt{Q_v(k, k)}} \tag{13}$$

设置接收机的总体误警概率为  $P$  则检测门限  $T_d$  为

$$P_r(d_k > T_d) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{T_d}^{\infty} e^{-x^2/2} dx = \frac{P}{K} \tag{14}$$

当  $d_k > T_d$  时则导航接收中存在故障即受到干扰的影响或人为设置了故障。这时检测模型记下发生故障时的时间戳，输出故障状态逻辑量 1。同样，故障消失时也记下一个时间戳并使水故障状态量清零。时间戳和故障状态逻辑量是统计模型进行统计的重要数据。

统计模型主要是根据完好性检测输出的时间戳、故障状态逻辑量和导航数据进行统计。统计数据的最主要的指标是故障时间片(Time Slot)即各个故障时间段的总和。故障状态是一个逻辑量,因此统

计模型中将故障作为脉冲处理,上升沿发生故障、下降沿故障消失,之间为故障时间,然后用累加计将所有故障时间相加得到故障的总时间。

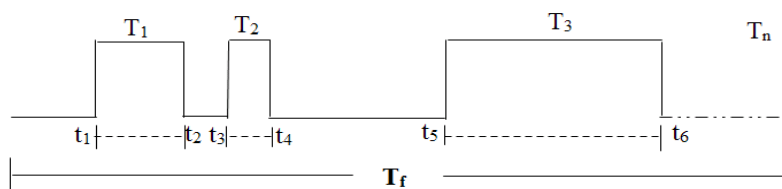


图 4 故障时间片

故障时间片公式为

$$T_f = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n t_{2i} - t_{2i-1} \quad (15)$$

经过统计模型的计算,可以统计出在受到电子干扰情况下,各种导航设备的故障时间。也就是说受到电子干扰时导航设备处于故障状态,飞行员根据现象做出判断,采取相应的措施进行反干扰如更换频率、飞出干扰区域等消除导航设备故障。不难

发现根据从故障中恢复的时间可以判断本次干扰的效果和飞行反干扰措施是否合理、正确。因此,在飞行模拟器中为简化模拟过程,根据故障时间片  $T_f$  将干扰效果分为 A, B, C, D, E 5 个等级,5 个等级反映出导航设备受到干扰的程度,  $T_f$  一般是飞行员的经验值,可在工程仿真管理系统中人为设定,干扰效果等级如表 2 所示。

表 2 干扰效果等级

序号	等级	干扰强度	故障时间 $T_f$ (s)	反干扰方法
1	A	完全	$T_f > 500$	采用其它导航设备导航
2	B	严重	$180 < T_f \leq 500$	更换频段
3	C	中等	$750 \leq T_f \leq 800$	人工修订或采用组合导航
4	D	轻微	$T_f < 75$	对导航影响不大,无需操作
5	E	无干扰	$T_f = 0$	无

在电子干扰系统中并未考虑欺骗式干扰的影响,干扰模型也是针对压制性干扰而言。如设置干扰方式为欺骗式干扰则系统并不进行干扰强度等的计算,欺骗式干扰信号会被当成有效信号放过。因此,在评估模型中进行完全性检测时并不会存在故障,统计的故障时间也为零。对于欺骗式干扰目前系统留有输入、输出接口,以便以后不断完善干扰模型和评估模型<sup>[11]</sup>。

测试过程中,在 CGF 设定干扰源的功率等参数,生成的干扰机距机场 15 km 匀速向特定机场飞行。本机从机场起飞从侧方飞过干扰机,记录飞行过程中自动定向仪的正常方位输出和受干扰的方位角输出值,如图 5 所示。

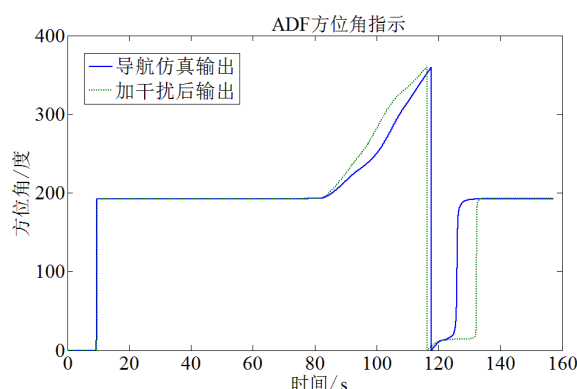


图 5 ADF 干扰曲线

从图中可以看出在飞向干扰机的过程中,进入干扰有效区域方位角偏离正常值,之后逐渐又恢复输出。在受干扰的整个过程中持续时间为 55 s,由

(下转第 1773 页)