

航空机载雷达研制费参数化估算方法研究

刘芳, 张海涛*

中国航空工业发展研究中心 财经研究部, 北京 100029

摘要: 现代作战飞机机载雷达的研制费和成本已经出现了严重超支的情况, 在项目启动时或项目初期如何对其费用进行准确估算已经成为军方和工业部门普遍关心的问题。本文利用国外机载火控雷达的技术经济数据, 采用偏最小二乘法, 建立了适用于机载火控雷达研制费快速估算的参数模型, 估算效果较好。同时, 该模型的合理性和精度得到了F-22A战斗机装雷达APG-77数据的验证。

关键词: 机载雷达; 研制费; 估算; 偏最小二乘法; 参数模型

中图分类号: V2-9 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 05-0067-06

在项目立项论证时, 如何对机载电子设备, 尤其是机载火控雷达的研制经费进行快速且比较准确的估算, 已经成为军方和业内越来越关心的问题。目前, 国内外可用于费用估算的方法主要有以下几种: 参数估算法、工程估算法、类比估算法和专家判断法。在项目的不同阶段进行费用估算时, 应该采取相应适宜的方法。在项目初期, 系统设计存在着不确定性, 已知信息比较少, 而参数估算法仅选用极少数对费用影响最大的因素做自变量, 并且允许在系统管理和技术方面加入一些修正量, 使用简便, 且具有一定的可信精度, 因此, 它是方案设计与论证阶段首选的费用估算方法^[1]。美国政府和军方经常采用参数法, 美国国防部在备忘录中明确要求, 凡是提交给防务系统采办委员会的所有费用估算都应采用参数法进行。例如, 美国空军对F-16飞机雷达的成本进行参数法估算时, 将其费用估算关系式(Cost Estimation Relationships, CERs)抽象为: 首台装置费用=f(探测距离、工作方式、频段)^[2]。

研制型号比较少, 技术经济数据积累也不够完善, 可用于建立费用估算模型的样本十分有限。这不仅影响了模型的精确性, 也影响了模型的可用性。因此, 本文利用国外典型型号的技术经济数据, 采用参数法, 建立了机载火控雷达研制费的参数化估算模型。目前, 该模型已经应用于我国某型机

载火控雷达的经济性分析工作中, 取得了较好的效果。

1 参数回归方法与模型结构的选择

目前, 可用于建立参数法模型的方法有主成分回归、岭回归、偏最小二乘回归、神经网络、支持向量基、灰色系统理论等, 特点可总结如表1所示, 其中的“样本量”是指估算方法所依赖样本的多少; “精确度”指估算方法的精度高低; “成熟度”指估算方法本身的理论完整性和在工程应用中广泛程度; “适用性”指估算方法用来解决相关产品研制费估算问题的适合程度^[3]。

神经网络方法由于需要的样本量相对比较大, 虽然估算精度比较高, 但在解决研制费估算问题上还是不合适的,

表1 参数估算法及其特点

Table 1 Parameter estimation method and its characteristics

方法	样本量	精确度	成熟度	适用性
岭回归方法	少	较高	成熟	完全可用
主成分回归方法	少	较高	成熟	完全可用
偏最小二乘回归方法	少	较高	成熟	完全可用
神经网络方法	多	很高	成熟	不可用
支持向量基回归方法	少	高	不成熟	比较可用
灰色系统理论方法	较多	较高	较成熟	比较可用

收稿日期: 2014-03-22; 录用日期: 2014-04-25

*通讯作者. Tel.: 18910406659 E-mail: zhanghaitao_adr@163.com

引用格式: LIU Fang, ZHANG Haitao. Research on parameters estimation method of airborne radar development cost[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(05): 67-72. 刘芳, 张海涛. 航空机载雷达研制费参数化估算方法研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(05): 67-72.

支持向量基方法是一种比较先进的方法,需要样本量少、估算精度也比较高,但其技术还处于发展之中,有很大的不确定性,在工程实际中还是暂时不能选用;灰色系统理论方法在技术上比较成熟,估算精度也比较高,但其对样本量还是有一定要求的,对解决研制费估算问题不是最适用的方法;岭回归方法、主成分回归方法、偏最小二乘回归方法都属于成熟的技术方法,虽然达到的估算精度不是最高的,但其需要的样本量相对较少,工程上比较适用^[4]。

经多次试算验证,发现在多重共线性严重存在的情况下,3种由偏回归方法建立起来的模型和预测因变量方面优于普通回归模型。岭回归方法在岭迹图和参数的输出值上可以十分直观地发现回归系数的区域,但缺陷是偏倚常数K的选取中人为因素会多一些;主成分方法会发现自变量系统中每一主成分与因变量的相关程度,一般第一主成分与因变量的相关度比较强;偏最小二乘回归方法会在自变量系统中找到与因变量相关最强的因子,从预测效果上看,根据预测残差平方和PRESS的大小可知,偏最小二乘回归要比主成分回归效果好。主成分回归方法和偏最小二乘方法揭示了自变量系统数据的内在结构,可以通过对每个因子的研究去分析因子所代表的具体含义。3种方法共同的不足之处是回归系数的分布情况不太清楚,其估算的置信区间不能给出。

当主要看重预测效果时,就可以首先使用偏最小二乘回归方法;如果仔细考察各个技术指标对费用的影响程度和进行直观的控制时,可首选岭回归;而当对某些难于数量化的综合因素特别关心(比如制度方面),又需要把它拟合进回归方程时,可考虑选用主成分回归。不过进行费用建模最为重要是依靠有关的费用数据信息,如果费用数据不真实或不完整,则无论什么样的好方法也不能奏效。因此,采集真实合理的信息资料,就显得尤其重要,这也是能否建立合理的参数估算模型的基础^[5]。本文考虑到方法的成熟性、模型的有效性前提下,选用偏最小二乘法建立了费用估算模型。

参数方程的结构直接影响到预测模型的精度和预测未来型号费用的准确性。在美国兰德公司和其他研究机构建立的机载电子设备成本估算模型中,都统一取参数方程的结构为:

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln x_1 + a_2 \ln x_2 + \dots \quad (1)$$

其中, Y 表示费用元素; x_1, x_2, \dots 表示雷达的性能参数; a_0, a_1, a_2, \dots 为由回归分析确定的系数。

这种形式的参数方程称为全部参数对数方程。这种参数方程的结构基于

费用元素和性能参数的无量纲化^[6]。

考虑到机载雷达技术经济数据的自然规律以及偏最小二乘回归的特点和原理,本文采用的参数方程为全部参数对数方程。

2 雷达样本的选择

本文共收集到10个国外雷达型号的技术经济资料,在确保了原始数据准确可靠的条件下,通过深入研究甄别,选取了6个型号作为样本点,建立研制费估算模型。这6个雷达型号普遍应用于美国空军、海军的作战飞机和新的四代机上,具有一定的代表性。研制费参数估算模型样本点如表2所示。

由于数据从不同的渠道收集而来,费用的可比性成了很大的问题。在确保消除了所有的定义的差别之后,还要做出一些调整(如计量单位的统一、价格水平变化),以便于在固定币值的基础上进行比较。

材料、设备器材和燃料动力费用是构成武器装备研制费用的重要组成部分,其价格上涨直接影响着武器装备费用的增长。同样的币值在不同年份的购买力是不同的。为了方便分析和比较,在本文中针对国外数据使用的术语“研制费”指美国国防部每年为该型雷达投入的研制费统一换算到2013年币值^[7]。

3 说明性变量的选择

影响机载雷达研制费的技术战术指标很多,本文在建模的初始阶段选取雷达体积、雷达重量、天线最大截面积、最大输出功率、平均输出频率、修复间隔时间(MTTR)、平均故障间隔时间(MTBF)、研制开始年、研制结束年和研制继承系数作为建立机载雷达研制费估算模型的技术战术指标,主要理由如下^[8]:

(1) 美国兰德公司于1981年建立的机载雷达生产成本估算模型中,使用了雷达体积和雷达重量作为说明性变量;

表2 国外雷达样本点列表

Table 2 Foreign radar sample points list

序号	雷达型号	生产厂商	配套飞机	研制周期	技术特征
1	AN/APG-63	雷神	F-15A/B/C/D/J	1969年-1974年	脉冲多普勒
2	AN/APG-65	雷神	F/A-18A/B/C/D	1975年-1982年	脉冲多普勒
3	AN/APG-68	诺斯罗普·格鲁门	F-16C/D	1980年-1985年	脉冲多普勒
4	AN/APG-73	雷神	F/A-18C/D/E/F	1990年-1994年	脉冲多普勒
5	AN/APG-79	雷神	F/A-18E/F, EA-18G	1999年-2006年	有源电扫阵
6	AN/APG-81	诺斯罗普·格鲁门	F-35A/B/C	在研	有源电扫阵

(2) 美国陆军经济性研究中心于2005年进行的一项关于无人机用机载雷达研制费与采购费估算模型研究中,将雷达重量、天线最大截面积、最大输出功率、平均输出频率、MTTR、MTBF和雷达装机首飞年作为说明性变量。

(3) 国军标GJB20517-98《武器装备寿命周期费用估算》中给出的机载电子设备研制费预测模型中将作用距离、MTTR作为说明性变量。

各项指标的单位如表3所示。

表3 机载雷达技术经济数据的单位

Table 3 The unit of airborne radar technology economy data

序号	参数名称	参数单位
1	天线最大截面积	cm ²
2	最大输出功率	W
3	平均工作频率	GHz
4	最大作用距离	km
5	雷达体积	m ³
6	雷达重量	kg
7	MTBF	h
8	MTTR	min
9	研制开始年	无
10	研制结束年	无
11	研制继承性系数	无

其中,研制继承系数是指所研制的雷达继承以前的雷达技术的比例(见表4),能反映新技术采用的多少,也能反映现有的结构工艺超前的储备量^[9]。

选择说明性变量的原则是^[10]:

表4 研制继承系数取值表

Table 4 Development inheritance coefficient table

序号	研制雷达改进改型情况	继承性系数
1	在世界范围内没有相似型号的新雷达	15%
2	在国内没有相似的新雷达	25%
3	在本雷达设计单位内没有相似的新雷达	35%
4	在本雷达设计单位内已有相似的新雷达	45%
5	有工艺储备的主要部件有加大结构改变的雷达	55%
6	已批产雷达主要组件结构有显著更改的型号	65%
7	批生产雷达主要组件结构有明显更改的型号	75%
8	批生产雷达不明显的改进型号	85%
9	批生产雷达用于其他飞行器	95%

- (1) 在设计和研制初期易于确定的参数;
- (2) 说明性变量与研制费有较大的相关关系;
- (3) 说明性变量之间有较小的相关关系;
- (4) 在估计算机载雷达研制费时,说明性变量必须是确定的数值。

选择说明性变量时,主要使用了自变量对因变量的投影重要性指标VIP,并结合考虑的自变量与研制费以及自变量之间的相关关系,如图1、表5所示。如果以VIP=1来划分,11个自变量对研制费的解释能力分为2类,其中VIP≤1的自变量有5个(研制开始年、最大输出功率、平均频率、雷达体积和最大作用距离),这些自变量与研制费的相关系数也比较小,可以考虑剔除;VIP≥1的自变量有6个,即雷达重量、研制继承系数、天线最大截面积、MTTR、MTBF和研制结束年。这6个自变量中MTTR和研制结束年与其他自变量的相关系

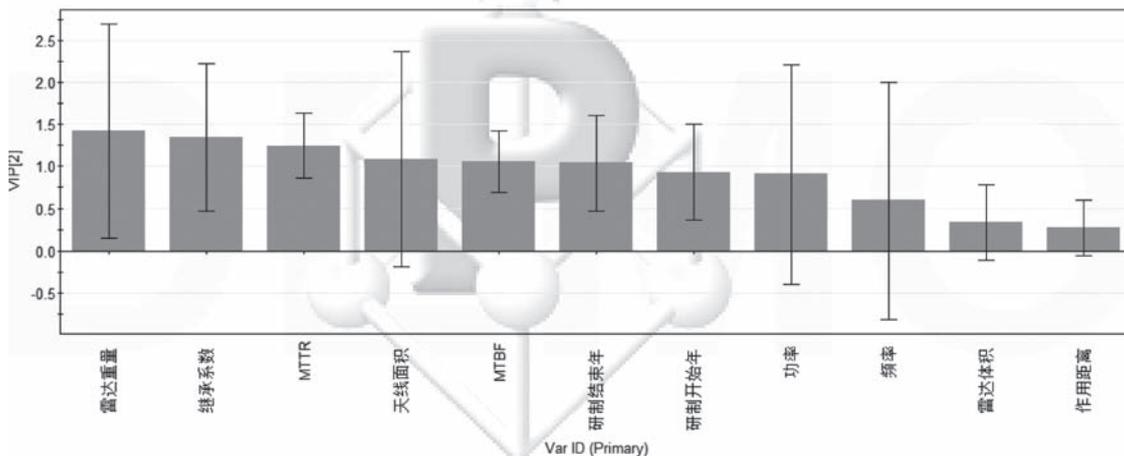


图1 变量投影重要性柱状图

Fig.1 variable Projection importance histogram

表5 自变量相关关系表
Table 5 Variable correlation table

	天线最大截面积	最大输出功率	平均工作频率	最大作用距离	雷达体积	雷达重量	MTBF	MTTR	研制开始年	研制结束年	研制继承系数	研制费
天线最大截面积	1.00											
最大输出功率	0.28	1.00										
平均工作频率	0.35	0.24	1.00									
最大作用距离	0.69	0.78	0.17	1.00								
雷达体积	0.87	0.63	0.63	0.79	1.00							
雷达重量	0.37	-0.15	0.08	-0.17	0.23	1.00						
MTBF	0.20	0.02	-0.57	0.14	-0.05	0.55	1.00					
MTTR	-0.29	0.29	0.77	-0.11	0.16	-0.26	-0.71	1.00				
研制结束年	0.06	-0.31	-0.64	-0.26	-0.26	0.71	0.83	-0.76	1.00			
研制结束年	0.26	-0.16	-0.62	-0.01	-0.07	0.68	0.90	-0.84	0.96	1.00		
研制继承系数	-0.50	-0.02	0.33	-0.59	-0.21	0.36	-0.21	0.62	0.02	-0.18	1.00	
研制费	0.58	-0.50	-0.27	0.12	0.10	0.26	0.40	-0.77	0.43	0.53	-0.70	1.00

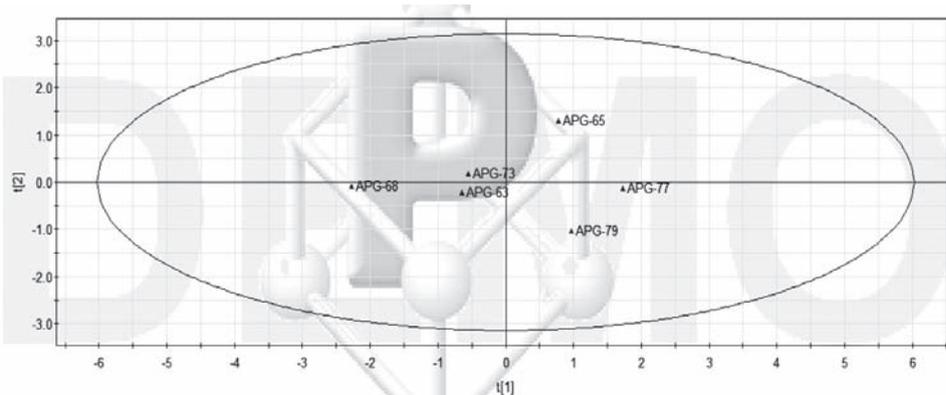


图2 样本筛选椭圆图
Fig.2 Sample selection ellipses

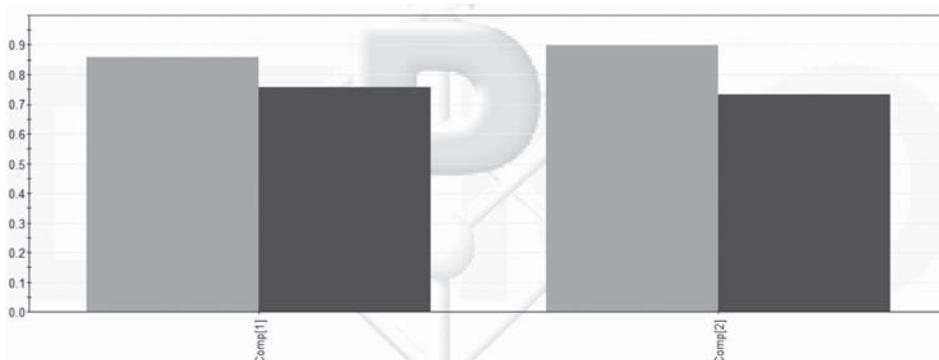


图3 PLS成分的解解释能力
Fig.3 The explanation ability of the PLS component

数不大,可以考虑剔除。

基于以上考虑,再结合上百次不同自变量组合的测算,本文选取了天线最大截面积、MTBF、研制继承系数和雷达重量等4个变量作为说明性变量。以4个说明性变量为自变量,以研制费为因变量,采用偏最小二乘回归提取2个主成分 t_1 和 t_2 。计算 t_1 和 t_2 的方差,取置信度为95%, t_1/t_2 在平面上作出椭圆图,见图2。

从图2中椭圆可以看出,样本点分布在椭圆内,不存在特异点。因此,模型的拟合效果是理想的,不需要剔除样本。

根据交叉有效性指标,研究中选择了2个偏最小二乘(PLS)成分,图3给出了这2个PLS成分的累计解释能力与交叉有效性。从中可以看到它们对于4个自变量的解释能力在0.85以上,可以满足建模的需要。

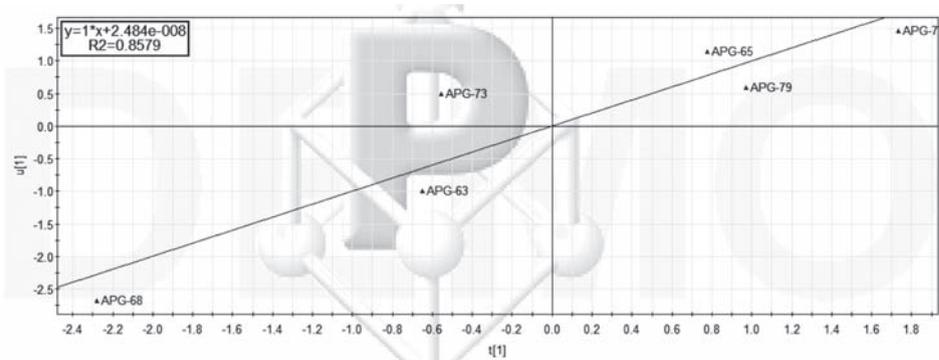


图4 PLS拟合精度平面
Fig.4 PLS fitting accuracy plan

Var ID (Primary)		R2VY	R2VY(cum)	Q2VY	Q2 limit	Q2VY(cum)
Total	Comp 1	0.857874	0.857874	0.75556	0.05	0.75556
	Comp 2	0.041461	0.899335	-0.118499	0.05	0.731116
研制费	Comp 1	0.857874	0.857874	0.75556	0.05	0.75556
	Comp 2	0.041461	0.899335	-0.118499	0.05	0.731116

图5 模型拟合效果
Fig.5 Model fitting effect

表6 APG-77雷达技术经济数据
Fig.6 APG-77 technology economy data

型号	天线最大截面积 (cm ²)	雷达重量 (kg)	MTBF (h)	研制继承系数	实际研制费 (2012年亿美元)
AN/APG-77	10000	240	2000	0.25	6.4

从图4 t_1/u_1 平面图可以看出, 研制费与解释变量存在比较明显的线性关系, 说明使用2个主成分 t_1 和 t_2 建立估算模型是合理的。

4 估算模型的建立

根据以上分析, 利用天线最大截面积、MTBF、研制继承系数和雷达重量等4个自变量建立的研制费估算模型如下:

$$C = a_0 \times Area^{a_1} \times Weight^{a_2} \times MTBF^{a_3} \times Factor^{a_4} \quad (2)$$

其中: C 代表研制费, 单位是2013年亿美元; $Area$ 代表雷达天线最大截面积, 单位是 cm^2 ; $Weight$ 代表雷达整机重量, 单位是 kg ; $MTBF$ 代表雷达整机平均故障间隔时间, 单位是 h ; $Factor$ 代表雷达研制继承系数, 为无量纲参数。

从图5的解释效果来看, 模型对机载雷达研制费的解释能力为0.899, 达到了较高的精度。

5 模型估算效果评价

以F-22A战斗机装配的APG-77雷达作为样本点(数据见表6)对本文建立的研制费估算模型进行验证。该型雷达由诺斯罗普·格鲁门公司和雷神公司于1991年开始联合研制, 1999年设计定型, 2005年装备部队。由模型计算得到该型雷达的研制费估算结果为6.52亿美元, 较其实际研制费6.4亿美元的误差为1.9%, 达到了较好的估算效果, 说明该模型可以适用于未来新型雷达, 尤其是先进的有源相控阵雷达研制费的快速估算。

6 结束语

本文利用国外机载火控雷达的技术经济数据, 建立了机载火控雷达研制费估算模型。同时, 用于某型雷达研制费估算分析, 取得了较好的效果。模型的估算精度得到了APG-77雷达数据的验证。但本文建立的模型是雷达整机的研制费估算

模型, 还未分解到天线/扫描器、低功率射频单元、发射机、综合处理机等分机级别, 这也将是今后研究工作的重点和方向。

AST

参考文献

- [1] 蒋铁军, 王树宗, 魏汝祥. 武器系统费用估算的参数法研究[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(3):303-306.
JIANG Tiejun, WANG Shuzong, WEI Ruxiang. Formalization study on parametric methods for weapon system cost estimation[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2007, 29(3):303-306. (in Chinese)
- [2] J.Dryden, T.Britt, S.Binnings-Depriester. An Analysis of Combat Aircraft Avionics Production Costs[R]. N-1685-AF, 1981.
- [3] 张翀, 郑绍钰, 王璐璐. 基于偏最小二乘回归分析的试验装备修理成本预测[J]. 兵工自动化, 2010, 29(12):1-5.

- ZHANG Chong,ZHENG Shaoyu,WANG Lulu.Forecast of Tentative Equipment Repair Cost Based on Partial Least Squares Regression[J].Ordnance Industry Automation, 2010,29(12):1-5. (in Chinese)
- [4] 朱程.战斗机研制费用及其理论分布的估算方法[D].北京:北京航空航天大学,2000.
- ZHU Cheng.A Way To Estimate Fighter R&D Expenditure And Distribution[D]Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2000. (in Chinese)
- [5] 罗朝晖,彭若虹,董鹏.费用估算关系式在装备购置费估算中的应用研究[J].武器装备自动化,2008,27(9):16-18.
- LUO Zhaohui,Peng Ruohong,Dongpeng.Research on Application of CER in Estimation of Original Equipment Cost[J]. Armament Automation, 2008,27(9):16-18. (in Chinese)
- [6] R.W.Hess,H.P.Romanoff.Aircraft Airframe Cost Estimating Relationships; Study Approach and Conclusions[R].R-3255-AF,1987.
- [7] G.C.Bell.Life Cycle Cost Analysis of Federated and Modular [8] Avionics in Military Transport Aircraft[R].1993-3964,1993.
- Bruce E.Armstrong.Avionics Data for Cost Estimating[R]. P-5745-1,1977.
- [9] L.A.Rondinelli.An Analysis of Cost Versus Performance Relationships for Phased Array Radars[R].RM-5380-PR,1967.
- [10] D.W.McIver,A.I.Robinson,H.L.Shulman.A Proposed Strategy for the Acquisition of Avionics Equipment[R].R-1499-PR,1974.

作者简介

刘芳(1977—)女,本科,高级工程师。主要研究方向:航空装备成本分析与费用管理。

Tel: 13911873785

E-mail: lfy_2004@126.com

张海涛(1982—)男,硕士,工程师。主要研究方向:航空装备成本估算技术。

Tel: 18910406659

E-mail: zhanghaitao_adr@163.com

Research on Parameters Estimation Method of Airborne Radar Development Cost

LIU Fang, ZHANG Haitao*

The Ministry of Finance and Economics Resesrcg,AVIC Development Research Center,Beijing 100029,China

Abstract: Modern combat aircraft airborne radar development and procurement costs has been grievous ever spending estimating the costs at a program startup or early in a project more accurately has become the issues of common concern of the military and industry sector. Using foreign techno-economic data of airborne fire control radar, and employing partial least squares, the airborne fire control radar development cost estimation model was established. At the same time, the rationality and accuracy of the mode have been verified by the data of radar APG-77 equipped in F-22A fighter.

Key Words: airborne radar; development cost; estimating; partial least squares method; parametric model

Received: 2014-03-22; Accepted: 2014-04-25

*Corresponding author. Tel.: 18910406659 E-mail: zhanghaitao_adr@163.com