

文章编号: 1001 - 893X(2011)10 - 0024 - 05

雷达脉冲上升/下降沿测量影响因素分析模型*

朱 斌^{1,2}, 金炜东¹, 余志斌¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031; 2. 长江师范学院, 重庆 408100)

摘要:为实现对雷达脉冲上升/下降沿的准确测量,在对其影响因素分析的基础上,将 Logistic 回归分析方法引入雷达脉冲上升/下降沿测量的影响因素分析,提出了雷达脉冲上升/下降沿测量的影响因素分析模型。采用因子分析和多元相关回归分析法对各影响因素的作用和模型的回归显著性进行了分析。实验结果表明,多径效应的影响最大,其次为通频带宽,影响最小的是杂波效应。同时,结果分析表明提出的影响因素分析模型是合理的,这对高精度的雷达脉冲测量以及影响程度评价具有一定的参考价值。

关键词:雷达辐射源识别; 雷达脉冲测量; 影响因素; 分析模型; Logistic 回归

中图分类号: TN95 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.10.006

Factors Analysis Model for Radar Pulse Rising/Falling Edge Measurement

ZHU Bin^{1,2}, JIN Wei-dong¹, YU Zhi-bin¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: To accurately measure radar pulse rising/falling edge, the Logistic regression analysis method is introduced into the influence factors analysis of radar pulse rising/falling edge measuring based on the analysis of its various factors, and the influence factors analysis model for the radar pulse rising/falling edge measurement is proposed. The role of various influences factors and the regression significant characteristics of the model are analysed by using factor analysis and multiple correlation regression analysis. Experimental results show that the greatest impact on the measurement result is the multipath effect, followed by passband width. Minimal impact on the measurement result is the clutter effect. Meanwhile, the results also show that the proposed analysis model of influence factors is reasonable and it has certain reference value for the precision measurement and the impact evaluation of radar pulses.

Key words: radar emitter recognition; radar pulse measurement; influence factors; analysis model; Logistic regression

1 引言

在电子情报侦察、电子支援侦察和威胁告警系

统中,雷达辐射源(RES)信号的分选识别是关键环节,是决定雷达对抗装备技术水平的较为重要的因素^[1]。无论是利用侦测所得的雷达脉冲上升/下降沿直接进行雷达辐射源识别^[2],或者是通过提取信

* 收稿日期: 2011 - 05 - 09; 修回日期: 2011 - 08 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971103)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60971103)

号相关的特征向量进行分选和识别,都必须建立在雷达脉冲上升/下降沿的准确测量的基础之上,但由于雷达应用环境的日益复杂^[3],杂波效应和多径效应很难避免,加上侦察接收系统内部噪声和通频带等因数,雷达脉冲上升/下降沿的测量不可避免地要受到各种因素的影响。

由于该研究领域的特殊性,国外研究资料相对较少,已有的研究多局限于雷达辐射源脉冲信号上升/下降沿测量准确度的单因素影响分析,这与多因素同时作用的实际应用情况不符,也难以区分不同影响因素对雷达脉冲上升/下降沿测量准确度的影响程度,从而给 RES 信号的准确分选和识别带来了不利,各因素影响程度的不确定也会给雷达辐射源信号特征评价指标的筛选带来不便。为此,本文在雷达脉冲影响因素分析的基础上,引入 Logistic 回归分析法。回归分析是研究一个变量关于另一些变量的依赖关系的计算方法和理论,它是处理变量之间相关关系的一种数学统计方法,可以解决预测、控制、优化等问题,在工农业生产和科学研究及国民经济的各个领域均有广泛的应用。通过该方法建立了雷达脉冲上升/下降沿的准确测量影响因素模型,实验结果表明该模型是有效的。

2 影响因素分析

2.1 杂波效应

瑞利分布是雷达杂波中最常用的一种统计模型。在雷达可分辨范围内,当散射体的数目很多时,根据散射体反射信号振幅和相位的随机特性,它们合成回波的包络振幅是服从瑞利分布的^[4]。如果用 x 表示瑞利分布杂波回波的包络振幅,其概率密度函数可表示为

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

式中, σ 是杂波的标准差。

2.2 多径效应

多径效应会引起脉冲包络的剧烈变化,也会引起脉冲内部的频率变化。多径信号可用直接路径信号经延迟后的复制信号进行模拟,它可以具有各种不同的幅度和相位^[4]。在任何给定的情况下,多径效应在脉冲与脉冲之间的影响可能非常严重。最强的多径信号来自于发射机和接收机附近的反射物体,以及它们之间沿线的反射物体。如果可能,通常

将雷达站部署在山顶或远离大型物体的地方。同样,电子对抗侦察接收机也应尽可能配置在远离大型物体的地方。

设接收机系统接收到的主径信号为

$$S_1(t) = A(t) e^{j(\omega_i t + \varphi(t))} \quad (2)$$

多径信号为

$$S_2(t) = \eta A(t - \tau) e^{j(\omega_i(t - \tau) + \varphi(t - \tau))} \quad (3)$$

噪声为

$$n(t) = N(t) e^{j(\omega_n t + \varphi_n(t))} \quad (4)$$

则多径干扰后的合成信号为

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) + n(t) \quad (5)$$

式(2)~(5)中, $A(t)$ 、 $N(t)$ 表示信号包络, ω_i 表示信号频率, $\varphi(t)$ 、 $\varphi_n(t)$ 表示信号相位, η 表示多径信号幅度相对于主径信号幅度的大小, τ 表示多径信号相对于主径信号的延迟。

2.3 内部噪声

一般认为接收机窄带系统之前的噪声是宽带的(或认为是白噪声),而在窄带系统输出端噪声受带宽限制变为窄带的,依据大数定理,其幅度满足正态分布。中频输出的噪声经包络检波处理后,输出为幅度满足瑞利分布的视频噪声^[5,6]。可以看出,在侦察接收机中高频噪声模型符合正态分布,概率密度表示为

$$f(v_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma_n} \exp\left[-\frac{(v_n - u_n)^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad (6)$$

式中, v_n 为噪声幅度, u_n 为噪声均值。

2.4 通频带影响^[7,8]

理论上,脉冲信号具有无限谱宽,当它通过有限带宽时,其形状不可避免地发生畸变,雷达对抗侦察接收机接收的雷达脉冲信号也不例外。如果接收机有足够的带宽,使所有的频率分量都能均匀响应地通过,那么就不会产生失真。但实际上,不仅接收机的通带是有限的,而且在其通带内响应也不是均匀的。因此就会使一部分能量不能通过,接收机输出的包络就会产生失真。为分析接收机带宽对脉冲的影响,可采用让计算机产生的仿真信号包络通过不同带宽的低通滤波器来模拟。

3 测准度影响因素建模

以侦察接收机接收的雷达脉冲信号的上升/下降沿是否准确为随机变量(因变量),以杂波干扰、多

径效应、内部噪声和通频带宽为因子(自变量)构建雷达脉冲上升/下降沿测准度影响因素 Logistic 回归模型,模型中各变量及赋值如表 1 所示。

表 1 模型变量及赋值

Table 1 Model variables and assignment

变量代码	变量意义	变量赋值
Accuracy	测准度	0:测量不准确; 1:测量准确。
Clutter	杂波干扰	0:无杂波干扰; 1:有杂波干扰。
Multipath	多径效应	0: $\eta = 0.1$; 1: $\eta = 0.2$; 2: $\eta = 0.3$; 3: $\eta = 0.4$; 4: $\eta = 0.5$ 。
Noise	内部噪声	0:无内部噪声; 1:有内部噪声
Passband	通频带宽	0:5 MHz; 1:10 MHz。

在 Logistic 回归分析假定下,测量准确度和各影响因素之间存在线性关系,即可采用多元线性回归求得回归方程,然后经显著性检验验证回归效果,并用 t 检验确认因子(各影响因素)对随机变量(测量准确度)作用的重要性。

对二态随机变量 Accuracy,可令:

$$P = \text{Prob}(\text{Accuracy} = 1) = F(X_i \beta) \quad (7)$$

式中, P 是随机变量为 1,即测量准确的概率, $F(X_i \beta)$ 是事件发生的累积分布函数。相应地,

$$\text{Prob}(\text{Accuracy} = 0) = 1 - P_i = 1 - F(X_i \beta) \quad (8)$$

由于本文采用 Logistic 分布函数,则:

$$\text{Prob}(\text{Accuracy} = 1) = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_j)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_j)} \quad (9)$$

式中, β_0 是与各影响因素 X_j 无关的截距项, β_j 是与各影响因素 X_j 有关的偏回归系数。

$$\text{Prob}(\text{Accuracy} = 0) = \frac{1}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_j)} \quad (10)$$

采用极大似然法估计模型参数,似然函数的对数表达式为

$$L^* = \ln L = \sum_{j=1}^5 \beta_j X_j - \sum_{j=1}^5 \ln(1 + e^{\beta_j X_j}) \quad (11)$$

对式(11)中每一个分量 β_j 求导并令其等于零,联立方程,由迭代法求出 Logistic 回归分析的回归系数估计值 β_j 即可获得测准度影响因素分析模型。

4 实验结果与分析

虽然单因素回归分析可以估计雷达脉冲上升/下降沿测量准确度与某一影响因素之间的关系,但不能很好地揭示各种影响因素之间的内在联系及多种影响因素对测量准确度的综合作用。为此,本文采用多元线性回归方法构建分析模型,将实验仿真数据输入 SPSS13.0 进行计算分析,模型的回归系数计算结果如表 2 所示,其中 Dependent Variable 为测量准确度。

表 2 回归系数表

Table 2 Regression coefficient table

Mode	Unstandardized Coefficients		Stand - arized Coefficients	t	Sig.	Correlations			Collinearity Statistic	
	B	Std. Error	β			Zero - orde	Partial	Part	Tolerance	VIF
(Constant)	0.538	0.114		4.736	0.000					
杂波干扰	-0.301	0.125	-0.236	-2.414	0.017	0.184	-0.227	-0.183	0.600	1.666
多径效应	-2.782	0.372	-0.784	-7.470	0.000	-0.459	-0.585	-0.566	0.521	1.920
内部噪声	-0.401	0.125	0.314	-3.216	0.002	0.089	-0.297	-0.244	0.600	1.666
通频带宽	0.421	0.077	0.527	5.474	0.000	0.186	0.468	0.415	0.619	1.616

由表 2 中的非标准化回归系数可得测准度影响因素模型如下:

$$\text{Accuracy} = 0.538 - 0.301\text{Clutter} - 2.782\text{Multipath} - 0.401\text{Noise} + 0.421\text{Passband} \quad (12)$$

根据回归方程自变量系数,可以看出雷达脉冲

上升/下降沿测量准确度受多径效应的影响最大,其次为通频带宽,然后为接收机内部噪声,影响最小的是杂波效应。影响因素中多径效应、内部噪声、杂波效应对雷达脉冲上升/下降沿测量准确度的影响是负向的,其值越小,影响越小;通频带宽的影响是正

方向的,这说明通频带越宽,它对雷达脉冲上升/下降沿测量准确度的影响就越小。

为验证分析模型的合理性和有效性,进行了因子分析和多元相关回归分析。通过因子分析计算,得到影响因素的相关矩阵和方差分析结果,如表 3 和表 4 所示。

表 3 各因子的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of the factors

	Clutter	Multipath	Noise	Passband
Clutter	1.000			
Multipath	-0.311	1.000		
Noise	-0.217	-0.311	1.000	
Passband	0.204	0.292	0.204	1.000

表 4 回归模型方差分析表

Table 4 Variance analysis table of regression model

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	10.315	4	2.579	16.825	0.000 ^a
Residual	16.399	107	0.153		
Total	26.714	111			

从表 3 知,各影响因素之间的相关性不强,即将所有因素全部用于回归分析,不会引起多重共线性问题^[9]。从表 4 中可以看出,模型的 F 值为 16.825,显著性概率为 0.000^a,表明回归是显著的。这说明因子分析和多元相关回归分析表明构建的模型是合理且有效的。

5 结 论

本文在影响因素分析的基础上,通过 Logistic 回归分析法建立了雷达脉冲上升/下降沿测量影响因素分析模型,明确了一般情况下不同影响因素对雷达脉冲上升/下降沿测量准确度的影响程度。目前,已有的研究多局限于单因素作用下的影响因素分析,但在实际应用中,雷达辐射源脉冲信号上升/下降沿测量准确度往往受多个因素的影响,多因素同时作用下的雷达辐射源脉冲信号上升/下降沿测量准确度影响因素分析比较复杂,这对雷达脉冲信号上升/下降沿的准确测量较为不利,从而为雷达辐射源信号的特征提取以及准确识别带来负面影响。同时,各因素影响程度的不确定也会给雷达辐射源信号特征评价指标的筛选带来不便。为此,本文通过选取典型的 4 个影响因素进行建模和仿真计算,计算分析结果表明这 4 个影响因素都具有显著意义,

并得出了分析模型及各因素的相对重要程度的定性描述。计算结果表明,该模型回归效果显著,说明构建的模型是合理、有效的,这对雷达辐射源信号上升/下降沿的准确测量及雷达辐射源信号特征评价指标体系的构建都具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] JIN Wei - dong, ZHANG Ge - xiang, HU Lai - zhao. Radar Emitter Signal Recognition Using Wavelet Packet Transform and Support Vector Machines [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 14(1): 15 - 22.
- [2] 王且波, 罗来源. 基于脉冲前沿波形的辐射源识别[J]. 无线电通信技术, 2005, 31(6): 58 - 61.
WANG Qie - bo, LUO Lai - yuan. Radar Emitter Recognition Based on Front Edge of Pulse Signal [J]. Radio Communications Technology, 2005, 31(6): 58 - 61. (in Chinese)
- [3] 俞志富, 罗景青. 基于灰关联分析与 D - S 证据理论的多传感器雷达辐射源识别方法[J]. 电讯技术, 2004, 44(1): 52 - 56.
YU Zhi - fu, LUO Jing - qing. A Method Based on the Combination of Grey Association Analysis and D - S Theory for Radar Emitter Identification with Multi - sensor [J]. Telecommunication Engineering, 2004, 44(1): 52 - 56. (in Chinese)
- [4] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
JIAO Pei - nan, ZHANG Zhong - zhi. Environment and Wave Propagation Characteristics of Radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2007. (in Chinese)
- [5] 林震鹊, 姜秋喜, 李帅. 基于脉冲信号上升/下降沿的雷达辐射源识别[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(3): 33 - 37.
LIN Zhen - que, JIANG Qiu - xi, LI Shuai. Radar Emitter Recognition Based on Rising/Falling Edge of Pulse Signal [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(3): 33 - 37. (in Chinese)
- [6] 王宏伟, 赵国庆, 王玉军. 基于脉冲包络前沿高阶矩特征的辐射源个体识别[J]. 现代雷达, 2010, 32(10): 42 - 49.
WANG Hong - wei, ZHAO Guo - qing, WANG Yu - jun. Specific Emitter Identification Based on Higher Order Moment of the Envelope's Front Edge [J]. Modern Radar, 2010, 32(10): 42 - 49. (in Chinese)
- [7] 林震鹊, 姜秋喜, 黄建冲. 雷达脉冲信号上升/下降沿测量影响因素[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(1): 117 - 120.
LIN Zhen - que, JIANG Qiu - xi, HUANG Jian - chong. Measurement Factors on Rising/Falling Edge of Pulse Signal [J]. Sichuan Ordnance Technology, 2010, 31(1): 117 - 120. (in Chinese)
- [8] 窦林涛, 程健庆, 李素民. 基于 Matlab 的雷达信号处理系统仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(2): 78 - 82.
DOU Lin - tao, CHENG Jian - qing, LI Su - min. Simulation

of Radar Signal Processing Based on Matlab[J]. Command Control & Simulation, 2006,28(2):78-82. (in Chinese)

[9] 桂文林,韩兆洲,潘庆年.基于逐步回归模型的期刊质量影响因素分析[J].情报杂志,2010,29(3):75-79.

GUI Wen-lin, HAN Zhao-zhou, PAN Qing-nian. The Analysis on Influencing Factors of the Journal's Quality Based on Stepwise Regression Model [J]. Journal of Intelligence, 2010,29(3):75-79. (in Chinese)

作者简介:

朱 斌(1973—),男,重庆人,1997年于浙江大学获工学学士学位,2005年于重庆邮电大学获工学硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理;

ZHU Bin was born in Chongqing, in 1973. He received the B. S. degree from Zhejiang University and the M. S. degree from

Chongqing University of Posts and Telecommunications in 1997 and 2005, respectively. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research direction is radar signal processing.

Email: zb8132002@163.com

金炜东(1959—),男,安徽人,教授、博士生导师,主要研究方向为智能信息处理、系统优化与仿真等;

JIN Wei-dong was born in Anhui Province, in 1959. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interest includes intelligent information processing, system optimization and simulation, etc.

余志斌(1976—),男,湖南人,博士,讲师,主要研究方向为智能信息处理。

YU Zhi-bin was born in Hunan Province, in 1976. He is now a lecturer with the Ph. D. degree. His research direction is intelligent information processing.

诚聘审稿专家启事

为了进一步加大审稿力度,充实审稿专家数据库,提高办刊质量,本刊常年面向社会诚聘电子信息领域的专家、学者担任本刊的审稿专家。审稿专家将享有如下权利:

(1)向本刊投稿通过评审后优先安排发表,并免收审稿费和版面费;

(2)向本刊推荐稿件通过评审后优先安排发表,并酌情减免版面费;

(3)获得每期免费赠阅的《电讯技术》及本刊编辑部编辑出版的《电讯技术动态》(月刊,内部交流,全彩色铜版纸印刷);

(4)获得按最高标准支付的审稿费;

(5)参加本刊举办的学术活动。

如果您有意应邀加入到本刊的审稿专家行列,请填写附表(可向编辑部索要电子版或在本刊网站www.teleonline.cn下载)后通过电子邮件发送到本刊编辑部邮箱。我们承诺为您的个人信息保密,对于您的支持表示衷心感谢。

电 话:028-87555632 传 真:028-87538378 Email:dianxunjishu@china.com

《电讯技术》审稿专家登记表

姓 名		单 位		
基 本 信 息	职 务	联 系 方 式	通 讯 地 址	邮 编
	职 称		电 话	
	学 历 学 位		传 真	
	从 事 专 业		Email	
			QQ 号	
个 人 简 介 (科研及学术成就、社会兼职等)				