

# 火控雷达测量误差自相关时间分析

邹士迁 刘 鑫 陈卫华

(中国人民解放军 92941 部队 94 分队 葫芦岛 125001)

**摘 要:** 舰炮火控雷达跟踪精度试验时需要确定跟踪数据的采样时间间隔,采样时间间隔主要取决于雷达跟踪误差特性的自相关时间。数据采样时间间隔直接影响试验航次数的确定和试验效率。从基础自相关估计理论出发,给出通过协方差函数直接计算和利用 FFT 变换计算雷达误差自相关时间方法,实测数据结果验证了火控雷达误差数据序列的平稳性;分析得到了火控雷达对典型目标的跟踪误差弱相关时间并给出雷达精度试验对空中目标数据采样时间间隔先按距离和方位角弱相关系数  $K$  值确定,即 1~2 s,数据处理时再对高低角误差数据进行取 2~3 倍间隔的建议。通过自相关时间分析发现雷达伺服系统对消舰艇摇摆存在剩余的技术问题,有助于雷达技术改进和跟踪误差源分析。

**关键词:** 火控雷达;测量误差;采样时间间隔;自相关时间

**中图分类号:** TN957.52    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Research on autocorrelation time analysis of measure error for fire control radar

Zou Shiqian Liu Xin Chen Weihua

(92941 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

**Abstract:** Determining sampling time interval of tracking data is the basic work of naval gun fire control radar in tracking precision experiment, which chiefly depends on autocorrelation time of radar tracking error character. Sampling time interval has direct influence on test voyages and test efficiency. Based on the basic theory of autocorrelation estimate, methods of calculating autocorrelation time of radar, including covariance function and FFT transform are presented, combined with engineering application, some experimental results are also analyzed, which verify that error data sequence of fire control radar is stationary. The weak correlation time of radar tracking error for typical targets was analyzed, sampling time interval of aerial target according to weak correlation coefficient of range and azimuth angle  $K$  was made with 1 to 2 seconds, and 2 to 3 times interval of elevation angle suggestion during data processing was made as well. The autocorrelation analysis results show that radar servo system has cancellation residue towards warship rolling; which has certain guidance in improving radar techniques and analyzing tracking error sources in the future.

**Keywords:** fire control radar; measurement error; sampling time interval; autocorrelation time

### 1 引言

跟踪精度试验是舰炮火控雷达试验的主要基本任务之一,对火控雷达测量误差的自相关分析是雷达精度试验确定采样时间间隔的前提基础。随着武器系统对抗“低、小、快”类目标精确度要求的提高,对火控雷达测量精度的要求也越来越高,精度试验设计过程中测量及录取要求也相应提高。科学合理地确定数据采样时间间隔直接关系到精度试验的效率和精度估计的准确性。20 世纪 70 年代国外研

究信号或数据的相关特性理论已经非常成熟,如 KNAPP C 等人<sup>[1]</sup>研究了一种估计信号时延的推广相关算法;国内 21 世纪初以来,对信号或数据的自相关特性研究越来越深入,黄姣英等人<sup>[2]</sup>研究人员运用自相关分析与 EMD 相结合的方法处理实际工程中所采集的路面轮胎音频信号,用于判别其中的周期信号;蒋青平等人<sup>[3]</sup>从自相关理论上证明了正交频分复用信号具有循环平稳性,验证了自相关算法在低信噪比条件下,对信号周期和时间参数估计有较好的性能;文献<sup>[4]</sup>引入短时自相关函数和短时平均幅度差函数相结合的加权自相关函数提高了基音周期信号检测的准确性

收稿日期:2015-06

和低信噪比下检测性能。文献[5]在分析舰炮火控系统射击误差时,给出了火控雷达跟踪目标时的一般误差相关性规律和雷达观测时的误差相关性衰减比光学观测时衰减快的结论。总的看来,国内外将自相关分析用于信号的周期性检测或时间延迟参数的估计方面较为深入,但将其运用到靶场试验误差数据分析方面,实践较少,相关研究还不细致;对于试验数据采样时间间隔的确定在相关舰炮火控雷达试验规程和试验理论中仅提出误差频谱相关性分析方法和经验性数据结论<sup>[6]</sup>,缺乏具体算法和分析过程。本文提出通过协方差函数直接计算和利用FFT变换计算雷达误差自相关时间方法,并结合工程实践给出了一些实测数据和测试结果,分析不同速度情况下,两种典型目标雷达试验数据处理相关时间,验证了火控雷达误差数据序列的平稳性,给出雷达精度试验确定数据采样时间间隔的建议。算法和分析过程提高了数据处理可信度,可广泛应用于武器装备的试验误差数据处理与分析实践,是提高试验效率和结果分析水平的重要途径。

## 2 火控雷达精度试验数据录取采样时间间隔的确定

火控雷达跟踪目标的误差是连续的,随机的。为了对连续误差量进行数据统计分析,需要将其变为离散数据这就需要采样。一系列随时间变化的随机量,一定时间间隔  $T$  的两个量存在统计相关性。 $T$  取得长,能满足数据不相关的要求,但数据量少,试验效率低。选用多大采样比例,需要经过科学计算和试验实际情况来决定<sup>[7]</sup>。取采样间隔,既要考虑相关性满足基本要求,即低于完全相关的 0.2 倍,又要考虑较高的数据录取率。火控雷达跟踪精度试验中,距离、方位和高低三维跟踪系统同时工作,3 个跟踪系统的功率谱频率特性决定了雷达数据的相关性。比较严格的确定采样间隔的方法是分别对 3 个跟踪系统的自动跟踪误差统计计算其相关函数,确定误差相关时间之后,然后综合 3 种相关函数,确定一个同时满足 3 个跟踪系统的相关函数值都较小值的采样时间间隔。如果按最窄功率谱确定采样间隔时,降低了宽功率谱系统的采样数据率认为不经济时,可按宽功率谱系统确定采样时间,同时通过采用适当取间隔办法,保证窄功率谱系统数据的弱相关性。采样时间间隔要大于或等于被试雷达跟踪误差特性的相关时间。

## 3 自相关函数的计算方法

### 3.1 通过直接方法计算自相关时间

被试火控雷达输出跟踪数据经检验为平稳遍历序列后,由下列公式计算相关时间。

数据序列  $\{X_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$  为来自被试雷达跟踪数据一次差的采样值,采样周期为  $T$ 。

1) 数据序列  $\{X_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$  的采样周期  $T' = kT$ 。其中  $k = 1, 2, \dots$

2) 计算其均值得到  $\bar{Y}$ ;

3) 计算延迟为  $T'$  处的自协方差函数  $\bar{\gamma}_k$ :

$$\bar{\gamma}_k = \frac{1}{M-k} \sum_{n=1}^{M-k} (Y_{n+k} - \bar{Y})(Y_n - \bar{Y}) \quad (1)$$

4) 计算自相关函数  $\bar{\rho}_k$ :

$$\bar{\rho}_k = \frac{\bar{\gamma}_k}{\frac{1}{M-1} \sum_{n=1}^{M-1} (Y_n - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

5) 计算相关时间:增大  $k$  值,使自相关函数  $|\bar{\rho}_k| \leq 0.2$ ,此时的  $T'$  值即为相关时间。

### 3.2 通过快速 FFT 变换计算自相关时间

计算自相关函数估计的间接方法是利用信号的功率谱密度函数和相关函数存在互为傅里叶变换对的关系<sup>[8]</sup>,首先用快速傅里叶变换 FFT 计算采样数据的功率谱密度函数估计,然后再进行傅里叶变换 IFFT,求得自相关函数估计。

用 FFT 方法计算自相关函数估计的具体步骤如下:

1) 取  $N = 2^m$  个火控雷达跟踪误差一次差的采样值,建立数据序列  $\{x(k)\} (k = 0, 1, \dots, N-1)$ 。再添加  $N$  个零点<sup>[9]</sup>,得到  $2N$  个点新序列  $\{x(k)\} (k = 0, 1, \dots, 2N-1)$ 。

2) 对  $2N$  点的数据  $\{x_k\}$  作快速傅里叶变换,得到  $\{X(n)\}$ ,其中  $n = 0, 1, \dots, 2N-1$ 。

$$X(n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k) W_k^{nk} \quad (3)$$

3) 计算  $2N$  点数据的功率谱估计

$$G(n) = \frac{T}{N} X^*(n) X(n) \quad (4)$$

式中: $T$  为采样时间间隔。

4) 计算  $G(n)$  的傅里叶逆变换,然后乘上比例因子  $\frac{N}{N-r}$ ,仅取前  $N$  个点得到延迟时间为  $r$  处的自相关函数。

$$\begin{aligned} \tilde{R}_x(r) &= \frac{N}{N-r} \text{IFFT}(G(n)) = \frac{N}{N-r} \times \\ &\frac{1}{2N} \sum_{n=0}^{2N-1} G(n) W_n^{-rk} \tilde{R}_x(r) = \frac{1}{2(N-r)} \sum_{n=0}^{2N-1} G(n) W_n^{-rk} \end{aligned} \quad (5)$$

5) 计算自相关系数  $\bar{\rho}_r = \frac{\tilde{R}_x(r)}{\tilde{R}_x(0)}$ ,增大  $r$  值,使自相关系数  $|\bar{\rho}_r| \leq 0.2$ ,此时的  $r$  值即为跟踪雷达精度试验数据误差弱或不相关时间。

结论:通过直接计算和通过快速 FFT 间接计算均能得到通常的自相关函数估计。但是由 FFT 间接计算方法得到的自相关函数估计,是考虑了混叠现象后形成的循环自相关函数。在实际分析中,循环自相关函数是没有什么用处的,为了得到通常的相关函数估计,需要将周期增加 1 倍,就可做到互不重叠,这样只要取前  $N$  个点的值,即可得到需要的通常自相关函数估计。经过实际计算检验用以上两种方法得到的相关分析结果是一致的。

与直接计算方法相比采用间接计算方法能大大压缩运算次数和时间,因此在大数据样本量分析时具有明显的

优越性。具体地讲,用直接计算方法式(2)计算延迟为  $P$  的自相关函数约需  $NP$  次实值乘法运算,若  $N=2^m$ ,用 FFT 的间接方法,其运算量约为  $8Nm$  次实值乘法运算<sup>[10]</sup>。以对海上目标精度试验为例, $N=2^{13}=8\,192$ , $P=0.1$  两种方法的速度比为  $819/8 \times 13=7.8$ ,则 FFT 间接方法运算量比直接方法少 7 倍多。

这两种计算方法适用范围:为当分析空中高速运动目标精度试验时,数据样本量较少,适合使用直接计算方法,而当分析海上慢速运动目标精度试验数据时,适合采用间接 FFT 计算方法。本文后续的自相关时间分析,对空中目标跟踪误差数据自相关分析就是采用直接计算方法,对海上目标跟踪误差数据自相关分析则是采用了 FFT 间接计算方法。

#### 4 某型火控雷达跟踪误差数据自相关时间分析

##### 4.1 火控雷达精度试验一般条件

国内外靶场组织进行火控雷达精度试验,一般分为对空高速目标精度试验和对海低速目标精度试验。火控雷达输出的目标信息通常包括跟踪目标距离、方位角和高低角。对空中目标试验通常采用歼击机、无人机或靶弹类靶标,雷达目标截面积为  $0.1 \sim 5 \text{ m}^2$ ,速度范围为  $50 \sim 680 \text{ m/s}$ ,目标高度通常为  $15 \sim 6\,000 \text{ m}$ 。对海低速目标精度试验通常采用架设雷达角反射体的靶艇作为靶标,目标截面积通过设计角反射体的形状及尺寸来模拟敌方典型作战舰艇的反射面积,速度范围为  $10 \sim 30$  节。

##### 4.2 对空中目标跟踪误差数据自相关分析

以某型火控雷达对空中飞机类目标跟踪误差为例,进行跟踪距离、方位角和高低角误差的自相关分析。火控雷达为单脉冲雷达,工作方式自动跟踪、频率捷变,雷达安装基座无摇摆,输出目标数据率为  $100 \text{ 次/s}$ ,序列间隔时间为  $10 \text{ ms}$ ;目标反射面积  $2 \sim 5 \text{ m}^2$ ,均速向站飞行。经过精度试验相关数据处理后得到的一次差曲线如图 1~3 所示。

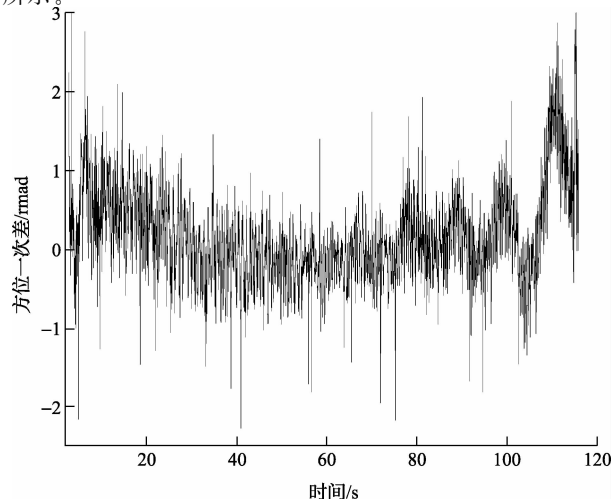


图1 方位角一次差曲线

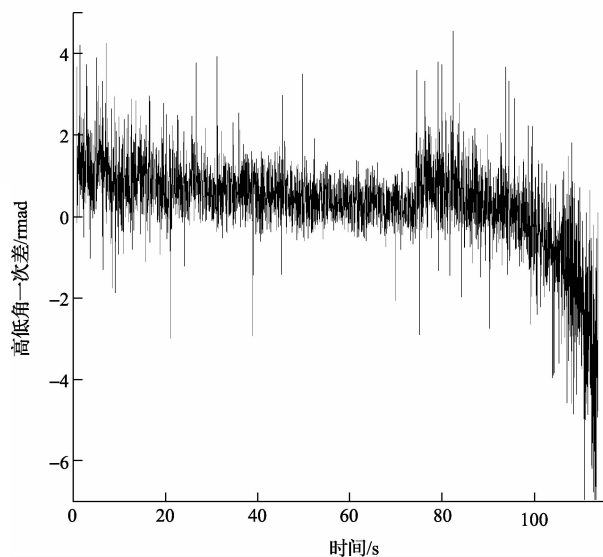


图2 高低角一次差曲线

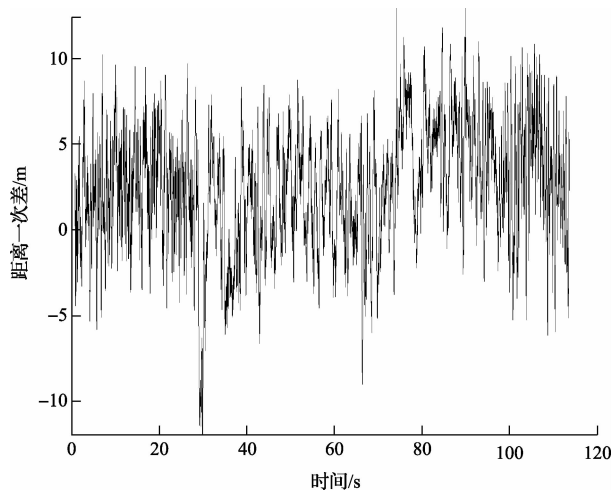


图3 距离一次差曲线

按式(2)分别对火控雷达跟踪空中目标方位角、高低角和距离一次差数据进行自相关系数计算,不同的延迟数得到不同的自相关系数,计算结果如图 4 所示。

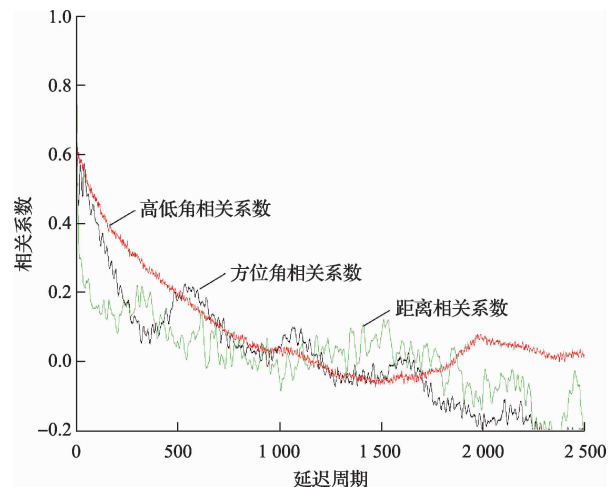


图4 对空中目标跟踪自相关系数曲线

### 4.3 对海上目标跟踪误差数据自相关分析

以某型火控雷达对海上靶船类目标跟踪误差为例,进行跟踪距离、方位角和高低角误差的自相关分析。雷达的工作状态同上,测试条件区别于对空中目标为雷达安装基座有摇摆;目标反射面积  $5\,000\text{ m}^2$ ,匀速向站航行。经过相关系数处理后得到的相关曲线如图 5~7 所示。

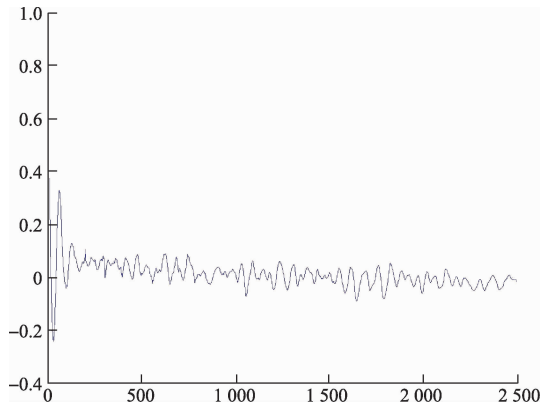


图 5 对海上目标跟踪方位角相关系数曲线

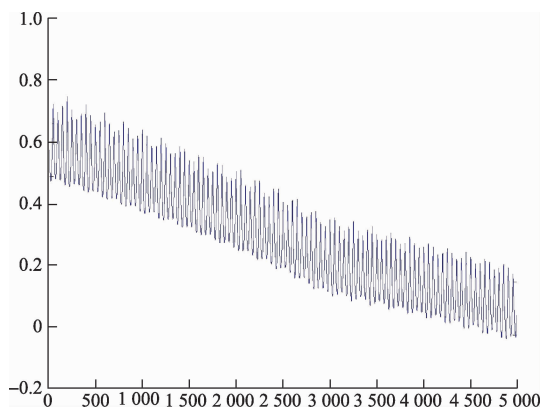


图 6 对海上目标跟踪高低角相关系数曲线

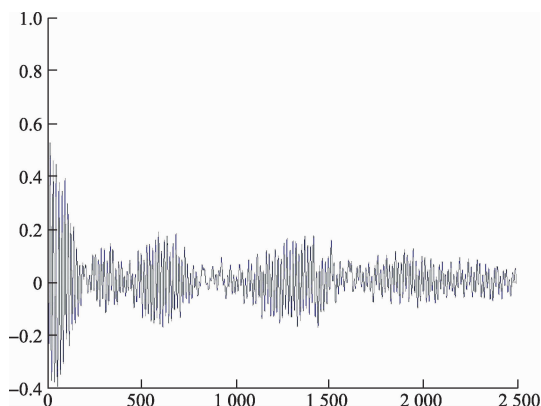


图 7 对海上目标跟踪距离相关系数曲线

### 4.4 跟踪误差数据相关系数曲线分析结论

#### 4.4.1 一次差数据序列平稳性检验

通过对空中和海上目标跟踪误差的自相关系数曲线分析,可以检验火控雷达跟踪目标误差的数据序列是否平

稳。平稳过程的自相关系数会以某种方式衰减趋于 0,如果跟踪误差时间序列的自相关系数随着滞后  $K$  的增加而很快地衰减趋于 0.2 以内,即可认为该序列为平稳序列。图 4~7 所示,无论是火控雷达对空中目标或是对海上目标跟踪误差数据序列,均逐渐趋于 0 值附近,证明火控雷达跟踪误差数据的平稳性。

#### 4.4.2 通过自相关系数曲线分析确定精度试验采样时间间隔

火控雷达跟踪精度试验中,距离、方位和高低三维跟踪系统同时工作,3 个跟踪系统的功率谱频率特性决定了雷达数据的相关性。通过分析图 4~7 自相关系数曲线,可以得到火控雷达对高速空中或慢速海上目标跟踪误差的自相关系数特点,曲线衰减至自相关系数小于 0.2 以内弱相关或不相关的滞后  $K$  值,滞后  $K$  值计算过程分别如下:

对空中目标跟踪时按式(2)计算数据序列  $\{X_i\}$  相关系数并绘制曲线,即在图 4 中,查找距离、方位角和高低角 3 个跟踪通道相关系数曲线衰减至 0.2 时对应横坐标延迟周期数;对海上目标跟踪时式(5)计算误差数据相关系数并绘制曲线,即在图 5~7 中,查找相关系数下降至 0.2 时对应的横坐标延迟周期数,如表 1 所示。

表 1 不同目标类型跟踪误差自相关系数小于 0.2 的滞后延迟  $K$  值

| 不同目标类型<br>弱相关 $K$ 值 | 方位角 | 高低角   | 距离  |
|---------------------|-----|-------|-----|
| 对空中目标跟踪             | 205 | 489   | 68  |
| 对海上目标跟踪             | 120 | 2 820 | 140 |

1) 三维跟踪系统中,距离误差自相关系数衰减最快、其次为方位角误差自相关系数,最后为高低角误差,即对空中目标跟踪弱相关滞后时间分别为延迟  $K$  值乘以序列时间间隔 10 ms,即距离为 680 ms、方位角为 2 050 ms、高低角为 4 890 ms。

2) 对海上目标跟踪距离和方位角自相关系数弱相关滞后  $K$  值与对空中目标跟踪情况相差不大,但高低角自相关系数明显变大。即高低角具有三维跟踪系统中最窄功率谱。如果按高低角确定采样间隔时,降低了距离和方位宽功率谱系统的采样数据率认为不经济时,可按方位和距离确定采样时间,同时通过采用适当取间隔办法,保证高低角误差数据的弱相关性。

3) 建议进行火控雷达精度试验时,对空中目标数据采样时间间隔先按距离和方位角弱相关系数  $K$  值确定,即 1~2 s,数据处理时再对高低角误差数据进行取 2~3 倍间隔;对海上目标数据采样时间间隔先按距离和方位角弱相关系数  $K$  值确定,即 2~3 s;数据处理时再对高低角误差数据进行取 10 倍左右间隔来确定。

4) 通过分析图 4~7,可以得出雷达安装基座有摇摆

情况下,高低角和距离自相关系数曲线具有明显的周期性,周期值为曲线局部极大值点,如图7中 $K=300$ 处为由自相关系数曲线探测到距离误差周期为3 s。方位角不具有明显的周期性。说明该火控雷达伺服系统进行消除摇摆量处理时高低角和距离上存在剩余,影响了雷达的跟踪精度。

5)自相关系数分析时,关于滞后 $K$ 的取值范围存在一定的限制,因为在计算滞后相关系数时,计算的时间点是 $N-K$ ,如果 $K$ 值太大,计算涉及的时间点将会太少,从而导致计算误差增大,因此限制 $K$ 的最大值为 $N/2$ ,其中 $N$ 为对空中或海上目标跟踪雷达输出的最大录取点数。

## 5 结 论

本文详细分析了火控雷达对空中高速和海上慢速目标距离、方位角和高低角误差自相关系数特性,分析结果说明了火控雷达误差数据序列的平稳性;得到了火控雷达对典型空中和海上目标的跟踪误差弱相关时间一般性规律:对空目标分别为0.68~4.89 s,对海上目标跟踪距离、方位角弱相关时间为1.2~28 s;验证了相关舰炮火控雷达试验规程和试验理论中提出误差频谱相关性的经验性结论,即:火控雷达距离方位角和高低角三维跟踪系统中相关性衰减最快通道为距离其次为方位角,最慢的是高低角跟踪系统;解决了火控雷达消除平台摇摆存在剩余导致误差数据存在周期性的检验问题;给出了火控雷达对空中目标和海上目标精度试验数据采样时间间隔确定建议。对于促进工程技术人员掌握火控雷达装备精度试验技术,提高雷达试验数据分析能力具有重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] KNAPP C, CATER G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans-

actions on Speech, and Signal Processing, 1976, 24(4):320-327.

- [2] 黄姣英,袁海文,崔勇,等. 基于EMD和自相关分析的轮胎音频信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(9):33-37.
- [3] 蒋青平,杨士中,张天骐. OFDM信号循环自相关分析及参数估计[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(2):118-119.
- [4] 张君昌,刘海鹏,樊养余. 一种自适应时移与阈值的DCT语音增强算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2014, 41(6):155-159.
- [5] 邢昌风,李敏勇,吴玲. 舰载武器系统效能分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [6] 武小悦,刘琦. 装备试验与评价[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [7] 郭齐胜,罗小明,潘高田. 武器装备试验理论与检验方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.
- [8] 王锋,刘美全,孙钦蕾. 被动探测中相关时延估计研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2):61-64.
- [9] 倪媛媛,胡永辉. 基于改进的PMF-FFT扩频信号快速捕获算法研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(8):33-36.
- [10] 郭筱亮,杨建伟,杨俊. 一种基于差分相关的DS/FH信号快速捕获方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊2):89-92.

## 作 者 简 介

邹士迁,1971年出生,工学学士,高级工程师。主要研究方向为舰炮火控雷达系统测试检验与试验等。