

# 基于 K 分布舰载雷达海杂波仿真方法研究

曹艳霞, 李国君

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁葫芦岛 125001)

**摘要:** 海杂波的仿真对杂波环境下舰载雷达性能的研究具有重要意义。介绍了海杂波仿真的有关概念,研究了基于 K 分布海杂波的建模及实现方法,建立了一个较为准确的舰载雷达海杂波幅度分布模型和功率谱模型,最后以 Matlab 为平台给予了仿真实现,仿真数据与理论曲线吻合较好,仿真算法有效可行。结果表明,该方法可以有效地模拟舰载雷达海杂波特性,为雷达信号处理器的设计奠定了基础,该方法具有较高的估计精度和很好的工程实用性,对于雷达海杂波建模与仿真及其背景下目标检测研究具有现实意义。

**关键词:** 舰载雷达; 海杂波; K 分布; 建模; 仿真

中图分类号: TN959.7 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2016)01-0086-05

## Study on Simulation Method of Ship-Borne Radar Sea Clutter Based on K Distribution

CAO Yanxia, LI Guojun

(Unit 92941 of PLA, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Simulation of sea clutter will benefit the research on ship-borne radar performance in the clutter environment. The essential of simulation of the sea clutter is introduced, and the modeling and realizing methods of ship borne radar sea clutter based on K-distribution are researched. The amplitude distribution model and power spectrum model are exactly established. At last, the simulation is performed with Matlab. The simulation data tallies with the theory curve well, and the simulation algorithm is feasible. The results demonstrate that this method can simulate sea clutter of ship-borne radar effectively, and lay a foundation for designing radar signal processor. This method is of high estimation precision and perfect engineering practicality. This conclusion is quite reasonable and applicable in the research on target detection under sea clutter background.

**Key words:** ship-borne radar; sea clutter; K distribution; modeling; simulation

## 0 引言

舰载雷达的背景是海面,由于海面和气象微粒反射使雷达波形成不希望的杂波背景,雷达在杂波背景中检测目标,杂波的作用降低了雷达信噪比,减小了雷达探测距离。当雷达处于搜索、跟踪状态时,由于电磁波的海面反射对舰载雷达发现目标的影响非常大,受海面、海浪等杂波的干扰,尤其是雷达发现低空小目标时回波会被削弱;雷达频率越高,海杂波越严重<sup>[1]</sup>,杂波的大小与雷达参数(波长、极化方向、射线与水平面角度、脉冲宽度)等有关,在舰载雷达设计中,必须充分考虑

各种因素。海杂波是构成舰载雷达性能试验环境的重要组成部分,海杂波的建模和仿真可为舰载雷达性能考核提供逼真作战环境,使仿真试验数据更为精确。在不同的统计分布特性中,K 分布最能有效地模拟舰载雷达海杂波特性。K 分布具有很宽的使用范围,适用于不同类型的雷达海杂波。K 分布不但可以模拟海杂波幅度分布的长“拖尾”现象,而且能模拟杂波间的时空相关性。本文首先介绍了海杂波特性仿真的实质,建立了一个较为准确的舰载雷达海杂波幅度分布模型和功率谱模型,并根据该模型仿真海杂波特性,以 Matlab 为平台给予仿真实现。有效地模拟了真实环境下舰载雷达海杂波特性。

## 1 海杂波仿真

海杂波是来自舰载雷达分辨单元内许多散射体的回波矢量和,由于雷达分辨单元内一般包括许多随机分布的散射体,它们的介电常数和几何特性等都是随机变量,同时散射体或雷达的运动也将引起回波振幅和相位的变化,这些原因导致了杂波雷达截面积具有起伏性,因此可将海杂波理解为与海面随机状态相关的一种随机过程<sup>[2]</sup>,此随机过程可通过雷达接收机包络检波后的幅度概率密度函数来描述。因此,舰载雷达海杂波仿真,实际上就是生成在幅度上服从某种特定的概率密度分布和自相关函数的随机序列,而自相关函数是功率谱密度的傅里叶逆变换,杂波模拟就等价于模拟同时具有特定的概率密度(PDF)和功率谱密度(PSD)的随机过程。

## 2 海杂波的建模

海杂波建模包括两个方面:一是确定海杂波幅度和功率谱类型;二是根据具体舰载雷达体制与工作环境,确定幅度分布和功率谱模型的参数。

### 2.1 海杂波幅度分布建模

海杂波幅度分布通过设置仿真环境和雷达参数,可以利用计算机仿真模拟雷达海杂波,从而在雷达接收的回波信号中有效地提取出有用信号,滤去杂波信号。但由于海面上的风速、风向、风的持续时间,以及雷达自身参数(包括入射余角、频率、极化方式)等都对海杂波的强度以及特性有着较大的影响,导致在不同时期、不同气候环境下同一部雷达上获得的海杂波特性都有较大差异。国内外许多学者已对海杂波特性作出了大量的理论研究和实验测定,得到了许多关于海杂波幅度分布及相关特性方面的结论。常用的海杂波统计模型有瑞利分布(Rayleigh)、对数正态分布(Lognormal)、韦布尔分布(Weibull)等。这几种杂波模型缺乏模拟杂波的时间和空间相关性<sup>[3]</sup>,所以它们只适合于单脉冲检测的情况。近几年来,在分析杂波物理特性时所引入的K分布模型更接近实际情形。在K分布模型中,杂波幅度被描述为两个因子的乘积,第一部分是散斑分量(即快变化分量),

它由大量散射体的反射进行相参叠加而成,符合Rayleigh分布;第二部分是基幅度调制分量(即慢变化),具有长相关时间,服从Gamma分布。这种模型不仅能很好地满足所观察的幅值测量特性,而且包括了脉间的相关性能,是目前能较好地反映雷达杂波的概率模型。

#### 2.1.1 K分布的概率统计模型

海杂波仿真的关键在于概率分布模型的选择及仿真方法的选择。K分布模型得到大量实验数据和测量数据的支持,而且不同于以往的概率模型,K分布在杂波散射机理上可以得到很好的解释。根据K分布的杂波散射机理,把K分布看作是功率服从Gamma分布的随机过程调制的复高斯过程。其概率统计模型为

$$P(\gamma) = K[|\gamma|; a, v] = \frac{2}{a\Gamma(v)} \left(\frac{|\gamma|}{2a}\right)^v K_v\left(\frac{|\gamma|}{a}\right) \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为杂波幅度; $K_v(x)$ 为第二类修正Bessel函数; $\Gamma(v)$ 为Gamma函数; $a$ 为尺度参数,它影响杂波的平均功率; $v$ 为形状参数, $v > 0$ ,对于大多数杂波,形状参数 $v$ 的取值范围是 $0.1 < v < \infty$ 。当形状参数趋近0.1时,杂波有长的拖尾。K分布不同于其他分布,能够等效模拟海杂波幅度分布的长“拖尾”现象。而形状参数趋于无穷大时,杂波的分布接近瑞利分布。杂波平均功率 $\sigma^2$ 、 $v$ 和 $a$ 之间的关系可表示为

$$a^2 = \frac{\sigma^2}{2v} \quad (2)$$

#### 2.1.2 形状参数 $v$ 的估计

由式(1)可知,杂波幅度分布函数中需估计的参数有 $a$ 和 $v$ 。根据文献[4],形状参数的估计公式如下:

$$\lg v = \frac{2}{3} \lg \varphi + \frac{5}{8} \lg l + \sigma - K_1$$

$$0.1^\circ < \varphi < 10^\circ, 100 < l < 800 \quad (3)$$

式中, $\varphi$ 为入射余角, $l$ 为角分辨率对应的横距,水平极化时 $K_1=1$ ,垂直极化时, $K_1=1.7$ ,顺风或逆风时 $\sigma=-1/3$ ,侧风时 $\sigma=1/3$ ,无风时 $\sigma=0$ 。设距离分辨率 $L=4.2$  m,对给定的距离分辨率,形状参数可由4.2 m的距离分辨率的形状参数 $v$ 值按如下方法求得:

令 $N=L/4.2$ , $X_1, X_2, \dots, X_N$ 代表分辨率 $L$

所包含的 4.2 m 的分辨单元,  $v_1$  是 4.2 m 分辨下的形状参数,  $v_N$  是分辨率  $L$  的形状参数,  $X_1, X_2, \dots, X_N$  之间相关系数为  $r_1, r_2, \dots, r_{N-1}$ , 其中:

$$r_i = \exp(-LX_i/R) \quad (4)$$

$$R = \frac{\pi}{2} \frac{w^2}{g} (3 \cos\theta + 1)^{1/2} \quad (5)$$

式中,  $\theta$  为风向与雷达视线夹角。

$$\frac{v_1}{v_N} = \frac{N+2(N-1)r_1+2(N-2)r_2+\dots+2r_{N-1}}{N^2} \quad (6)$$

海杂波的空间相关性与脉宽相对应,  $X_1, X_2, \dots, X_N$  之间的相关系数由对海杂波的空间函数采样得到。

### 2.1.3 尺度参数 $a$ 的估计

尺度参数  $a$  的估计公式如下:  $a = \frac{\sqrt{\sigma^0 A}}{2\sqrt{v}}$ , 其中  $\sigma^0$  为海杂波的后向散射系数,  $\sigma^0$  为归一化的雷达散射截面积,  $\sigma^0 = \sigma/A$ , 其中  $A$  为被照射的海面面积,  $\sigma$  为被照射海面的雷达截面积。  $A$  在小入射角情况下, 公式如下:

$$A = R\theta_B(c\tau/2)\sec\varphi \quad (7)$$

式中:  $R$  为雷达至目标的距离;  $\theta_B$  为雷达波束宽;  $\varphi$  为雷达入射角。

在入射角接近  $90^\circ$  的情况下,  $A$  可表示为

$$A = (R^2\theta_B\cos\varphi)\pi/4 \quad (8)$$

据研究,  $\sigma^0$  与雷达波长、入射余角、海况、极化等因素有关, 其较为常用的经验公式为

$$\sigma^0 = -64 + 6K_B + 10 \lg \sin\varphi - 10 \lg \lambda - [40 \lg(\varphi_c/\varphi)], \quad \varphi_c = \lambda/5h_{av} \quad (9)$$

式中,  $K_B$  为蒲氏海况系数,  $h_{av}$  为平均浪高, 与海况有关, 均可通过查表获得。

## 2.2 海杂波的功率谱模型

海杂波起伏速度很慢, 在脉冲与脉冲间是强相关的, 这种相关性用功率谱来表述。在舰载雷达杂波模拟中, 采用的许多频谱模型都是高斯型或者近似高斯型。对于高光谱模型, 相应的表达式如下:

$$S_p(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f^2}} \exp\left[-\left(\frac{f^2}{2\sigma_f^2}\right)\right] \quad (10)$$

式中,  $\sigma_f$  为杂波谱的标准差, 它与杂波速度起伏展宽值  $\sigma_v$  有关:  $\sigma_f = \frac{2\sigma_v}{\lambda}$ 。功率谱与  $f_{3dB}$  的关系<sup>[5]</sup> 如下:

$$S_p(f) = \exp\left[-\left(\frac{af}{f_{3dB}}\right)^2\right] \quad (11)$$

式中,  $f_{3dB}$  为两个半功率点波束间的宽度, 由海浪的平均速度及舰载雷达波长决定,  $a$  为常数 1.665。

## 3 海杂波仿真

### 3.1 海杂波仿真 SIRP 方法

确定了海杂波的幅度分布及功率谱模型, 仿真的关键就是要产生一组具有给定相关性的  $K$  分布随机数序列。产生相关  $K$  分布随机数序列的方法主要有零记忆非线性变换 (ZMNL) 及球不变 (SIRP) 随机过程法<sup>[6]</sup>。随着雷达系统仿真精度的提高, 杂波的建模与仿真要求概率分布特性和相关特性同时得到很好的满足, 即保证“联合性”。由于 SIRP 方法允许对海杂波的边缘 PDF 和自相关函数独立地进行控制, 克服了 ZMNL 方法中非线性变换对相关函数的影响, 因此本文选择 SIRP 方法。

SIRP 方法可以用于产生相参的非高斯相关雷达杂波, 且很好地解决了“联合性”的问题, 其主要思想是把雷达杂波看成一个球不变随机过程, 产生一个相关的高斯随机过程, 然后用具有所要求的单点概率密度函数的随机序列进行调制。具体步骤如图 1 所示。

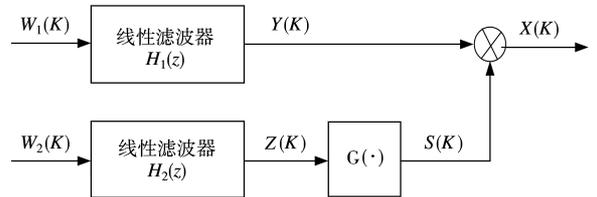


图 1 海杂波仿真 SIRP 法流程图

图中,  $W_1(K)$  为一复高斯白噪声, 线性滤波器  $H_1(z)$  由  $X(K)$  的相关系数即海杂波的功率谱密度函数决定。  $W_2(K)$  为一与  $W_1(K)$  相互独立的实高斯噪声, 线性滤波器  $H_2(z)$  必须使得输出的高斯序列具有高度的相关性 (相关函数接近于 1),  $G(\cdot)$  变换使得输出的  $S(K)$  的概率密度函数为杂波的特征概率密度函数, 对于  $K$  分布来说,  $S(K)$  服从广义 Gamma 分布<sup>[7]</sup>, 该分布的定义如下:

$$f_x(x) = \frac{2v^v x^{2v-1}}{\Gamma(v)} \exp(-vx^2), \quad x \geq 0 \quad (12)$$

因此, 要用图 1 所示的模型产生  $K$  分布杂波, 需要产生符合广义  $K$  分布的  $S(K)$ , 并设计线性滤波器 1 和线性滤波器 2。滤波器 1 的设计比较简单, 它使输出  $S(K)$  具有所要产生杂波的功率谱。表

达式如下:

$$g[v, E(y^2)s^2/a^2\pi] = 1 - Q(z) \quad (13)$$

式中:  $g(a, b) = \frac{1}{\Gamma(b)} \int_0^a e^{-t} t^{b-1} dt$  为不完全伽马函数;  $y$  为滤波器  $H_1$  的输出;  $v$  为 K 分布形状参数;  $a$  为 K 分布尺度参数。由式(2) 及  $E(y^2) = \sigma^2$  可知, 式(13) 可变化为

$$g(v, 2vs^2/\pi) = 1 - Q(z) \quad (14)$$

$Q(z)$  为标准正态随机变量的尾部面积, 即有

$$Q(z) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{u^2}{2}) du \quad (15)$$

将式(14) 代入式(15), 并应用概率密度在全区间积分为 1, 得

$$g(v, 2vs^2/\pi) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}(\frac{z}{\sqrt{2}}) \quad (16)$$

式中,  $\operatorname{erf}(x)$  为误差函数, 定义为

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \quad (17)$$

因此, 产生  $S(K)$  变量的问题转化为求式(15) 的问题, 这是一个非线性方程, 可以用二分法求解。

### 3.2 仿真结果

根据上述海杂波建模与仿真方法, 对海杂波进行仿真。仿真依据形状参数  $v$  和尺度参数  $a$  不同取值分为两组。组 1 中舰载雷达与环境参数为波长 4.5 cm, 脉宽 1.1  $\mu s$ , 脉冲重复频率 1000 Hz, 海况 3, 水平极化, 顺风, 探测距离 10 km, 雷达天线高度 25 m。仿真模型为  $\sigma^0 = -56.3$  dB, 形状参数  $v=1.7$ , 尺度参数  $a=0.05$ 。得到海杂波的仿真图形如图 2~5 所示。组 2 中雷达波长 5 cm, 脉宽 0.9  $\mu s$ , 脉冲重复频率 1500 Hz, 形状参数  $v=1.5$ , 尺度参数  $a=1$ , 其他参数与组 1 相同。得到海杂波的仿真图形如图 6~9 所示。

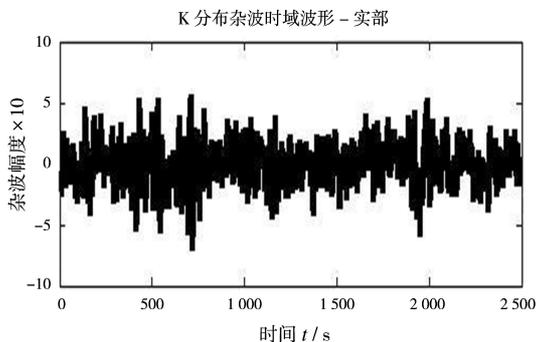


图 2 组 1 仿真 K 分布杂波时域 I 路仿真数据

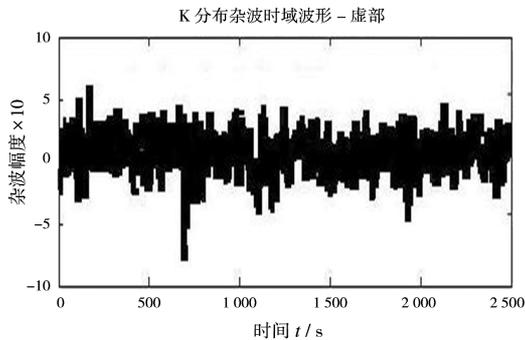


图 3 组 1 仿真 K 分布杂波时域 Q 路仿真数据

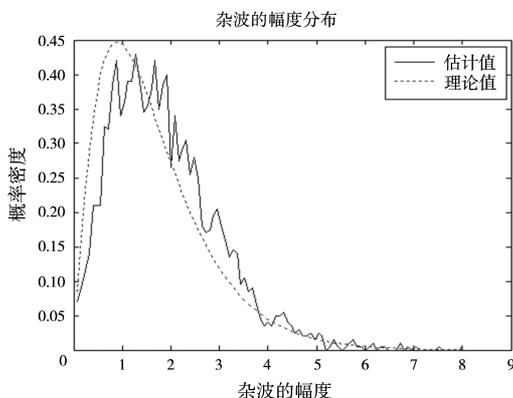


图 4 组 1 杂波幅度概率密度理论曲线与仿真数据统计曲线

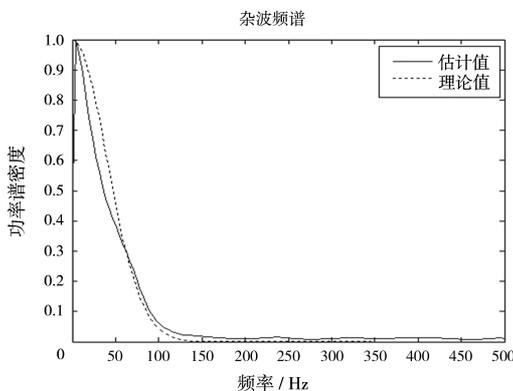


图 5 组 1 杂波功率谱理论曲线与仿真数据功率谱统计曲线

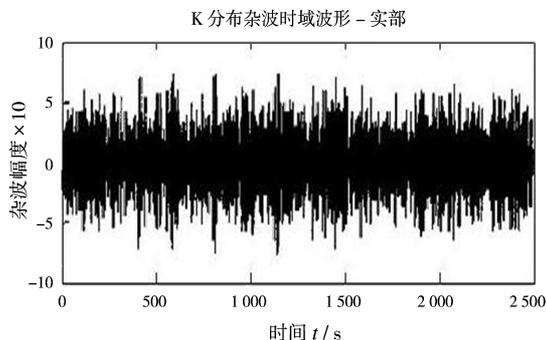


图 6 组 2 仿真 K 分布杂波时域 I 路仿真数据

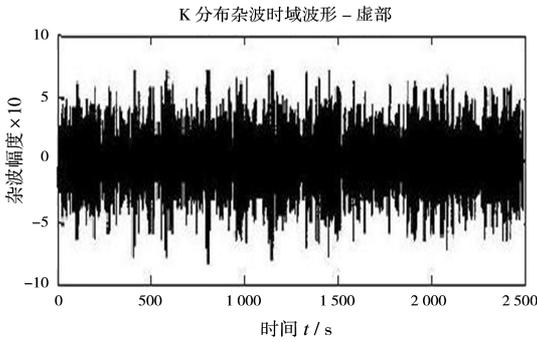


图 7 组 2 仿真 K 分布杂波时域 Q 路仿真数据

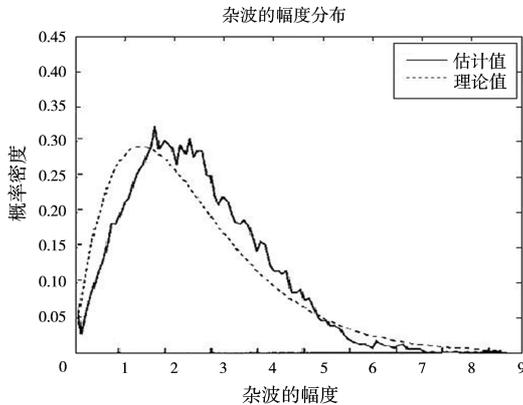


图 8 组 2 杂波幅度概率密度理论曲线与仿真数据统计曲线

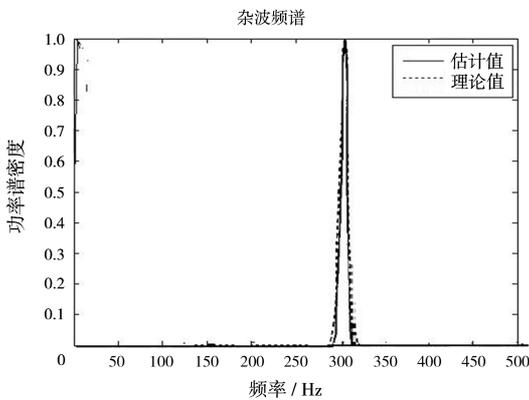


图 9 组 2 杂波功率谱理论曲线与仿真数据功率谱统计曲线

图 2、图 3、图 6 和图 7 表示生成的时域 K 分布序列,图 4 和图 8 中实线表示仿真数据的概率密度统计曲线,虚线表示理论值。图 4、图 8 两曲线拟合较好,说明仿真数据在概率密度分布上符合理论值;图 5 和图 9 表明仿真数据的功率谱密度估计值与理论值接近,组 2 仿真中功率谱密度估计值与理论值比组 1 仿真拟合更好,说明在不同入射角、风向、雷达波长及不同海况等情况下,仿真数据在功率谱密度分布上与理论值吻合程度存在差异。

通过分析全部仿真数据说明按该方法生成的海杂波随机序列是正确的。

## 4 结束语

K 分布用于雷达的信号处理和数据处理中,大大提高了信号处理和数据处理效率。随着现代雷达技术的不断发展,对雷达海杂波的精确建模和仿真已越来越重要,它是实现雷达优化设计的先决条件。本文对 K 分布的海杂波建模与仿真技术作了较为深入的讨论,并给出了具体仿真方法、步骤,根据实际雷达参数,用 Matlab 实现了仿真。结果表明,仿真数据与理论曲线吻合较好,仿真算法有效可行。本文的结果可以有效地模拟舰载雷达海杂波特性,为舰载雷达信号处理器的设计及雷达仿真试验奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 熊群力. 综合电子战:信息化战争的杀手锏[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2008:5-17.
- [2] 徐伟,陈永森. 一种 K-分布杂波参数估计方法[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(3):82-84.
- [3] 顾云涛. 海杂波建模与仿真方法研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(4):81-85.
- [4] FERTING L B. Estimation of Space-Time Clutter Rank for Subarrayed Data[C]// Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, [S. l.]:IEEE, 2004:289-292.
- [5] 董蒙,谈亮. 基于功率拟合的时空相关 K 分布海杂波信号级仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1):93-94.
- [6] 陈小龙,李秀友,包中华,等. 基于 FRFT 的末制导雷达海面动目标检测方法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(2):181-184.
- [7] RICHARDS M A. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道,王彤,李真芳,等译. 北京:电子工业出版社, 2010:211-218.

## 作者简介:



曹艳霞 女, 1978 年 1 月出生于天津宝坻区, 现任海军 92941 部队工程师, 主要从事舰载探测跟踪与制导控制系统的试验与鉴定工作。

E-mail:472821162@qq.com