

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.015

基于偏量与主系数的同步偏差估计改进算法

宋斌斌, 金慧琴, 周新力, 王正磊

(海军航空大学电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为解决 ST 和 DDST 方法中的同步问题, 给出未知信道阶数情况下的同步偏差估计方法。将已知信道阶数情况下的同步偏差估计方法进行改进, 利用改进算法对 ST 和 DDST 的同步偏差估计进行仿真, 并对 DDST 信道估计中不同延迟倍数情况下的同步偏差进行分析。仿真验证结果表明: 改进的算法适用于未知信道阶数情况下的同步偏差估计, 能准确估计出不同阶数情况下的同步偏差。

关键词: 同步; 偏差估计; 信道阶数

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A

An Improved Synchronous Deviation Estimation Algorithm Based on Deviator and Main Factor

Song Binbin, Jin Huiqin, Zhou Xinli, Wang Zhenglei

(Department of Electronic Information Engineering, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To solve the synchronization problem of ST and DDST method, the paper raises a synchronous deviation estimation method in case of unknown channel order. Through improving the synchronous deviation estimation method in case of known channel order, the paper simulated the synchronous deviation estimation of ST and DDST, analyzed the synchronous deviation of DDST channel estimation in case of multiple different delay. The results of simulation and verification show that the improved algorithm is appropriate for the synchronous deviation estimation in case of unknown channel order. It can correctly estimate the synchronous deviation of different order situation.

Keywords: synchronization; deviation estimate; channel order

0 引言

对直流偏量和信道阶数的估计, 都是基于信号同步条件下进行的讨论, 常常忽略同步问题, 然而同步作为通信中一个重要问题, 有必要对其进行分析探讨。文献[1-3]对同步问题进行了讨论, 但都是基于理想情况下或信道阶数已知的条件下进行的讨论。实际中, 接收数据不仅受到未知信息数据、直流偏量以及噪声的影响, 而且知道信道的阶数也是不可能的; 因此, 笔者主要针对信道阶数未知的情况下信号的同步问题, 研究信道阶数未知的同步偏差估计方法, 并进行仿真验证。

1 理想情况下的同步偏差估计

设接收信号存在同步误差 τ_S , $1 \leq \tau_S \leq N$ 。 $\tau_S = \tau_P P + \tau$, τ_P 为相对训练序列的延迟周期数(延迟倍数), $1 \leq \tau_P \leq N_P - 1$ 。 τ 为相对训练序列在一个周期内的同步偏差, $1 \leq \tau \leq P$ 。所以可以将估计同步误差, 转为估计接收序列相对于训练序列的同步偏差 τ 。

设信道阶数为 M , 没有同步偏差时, 称前面 M

个值为主系数, 后面的 $P-M$ 个值为偏量系数, 记为 $\mathbf{0}$ 。于是将信道记为:

$$\mathbf{h} = [\underbrace{h(0), h(1), \dots, h(M-1)}_M, \underbrace{\mathbf{0}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}}_{P-M}]^T。$$

当同步偏差为 τ 时, 可知:

$$\hat{\mathbf{y}}_\tau = \mathbf{P}_\tau \hat{\mathbf{y}}。 \quad (1)$$

其中: $\hat{\mathbf{y}}_\tau$ 为有同步偏差时接收数据的周期均值; $\hat{\mathbf{y}}$ 为没有同步偏差时接收数据的周期均值; \mathbf{P} 为循环移位矩阵; \mathbf{P}_τ 表示使矩阵循环移动 τ 位的循环移位矩阵; $\hat{\mathbf{y}}_\tau$ 即为对 $\hat{\mathbf{y}}$ 循环移动 τ 位后的矢量。

由公式 $\hat{\mathbf{h}} = \mathbf{C}^{-1} \hat{\mathbf{y}}$ 信道的估计得到:

$$\hat{\mathbf{h}}_\tau = \mathbf{C}^{-1} \hat{\mathbf{y}}_\tau = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{P}_\tau \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{P}_\tau \mathbf{C}^{-1} \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{P}_\tau \hat{\mathbf{h}}。 \quad (2)$$

可以看出, 得到的信道估计 $\hat{\mathbf{h}}_\tau$ 只是没有同步偏差情况下 $\hat{\mathbf{h}}$ 的简单循环移位。当已知信道阶数为 M , 如果在理想情况下, $h(M), h(M+1), \dots, h(P-1)$ 则都是零, 估计 $h(0), h(M-1)$ 不为零, $h(1), h(2), \dots, h(M-2)$ 可以为零。则只要叠加的训练序列的周期 $P \geq 2M-1$

收稿日期: 2018-02-22; 修回日期: 2018-04-17

作者简介: 宋斌斌(1979—), 男, 江西人, 博士研究生, 讲师, 从事无线通信研究。

时，可以通过观察数据中 $P-M$ 个零串所处的位置，便能确定同步偏差 τ 的大小。如当 $P=12, M=6$ ，信道估计为 $\hat{\mathbf{h}}_{\tau}=[0 \ 0 \ -0.35 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.53 \ 0.791 \ 0]$ 时，则可知信道同步偏差 $\tau=3$ 。

或者 $h(M), h(M+1), \dots, h(P-1)$ 在都相等的理想情况下，可以通过观察数据中 $P-M$ 个相等的值所处的位置来确定同步偏差 τ 的大小。如当 $P=12, M=6$ ，信道估计为 $\hat{\mathbf{h}}_{\tau}=[0.2 \ -0.4 \ -0.35 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.53 \ 0.791 \ 0.12]$ ，则可知信道同步偏差 $\tau=3$ 。

但实际情况中偏量系数都不为零，也不相等。可以估计出直流偏量的近似大小，但也不能完全消除未知直流偏量的影响，估计后的偏量系数依然不相等。所以必须对在偏量系数不为零、不相等的情况下的同步偏差估计问题进行进一步研究。

2 信道阶数已知的同步偏差估计及仿真

对在已知信道阶数为 M 的情况下，利用偏量系数与主系数的大小不同来进行同步偏差估计，笔者分别对叠加训练序列 (superimposed training, ST) 信道和叠加依赖序列的隐序列 (data-dependent superimposed training, DDST) 信道估计方法下信号的同步偏差估计进行分析和仿真。

由于 ST 和 DDST 估计方法都是基于接收数据的一阶统计量进行信道估计。所以在非理想接收机中会引入未知直流偏量，对信道估计性能产生影响。特别是在直接转换接收机中，直流偏量问题尤为重要，如果不加以考虑，会严重降低系统性能^[4]，所以需要直流偏量的大小进行估计。

直流偏量具有时变性，但在短时间内，可以考虑其为一个常数。设 $\mathbf{d}=[d, d, \dots, d]$ ，则 $\mathbf{y}=\mathbf{C}\mathbf{h}+\mathbf{d}$ 。此时有直流偏量时的信道估计 $\hat{\mathbf{h}}$ 可以写为：

$$\hat{\mathbf{h}}=\mathbf{C}^{-1}\mathbf{y}=\mathbf{h}+\mathbf{C}^{-1}\mathbf{d} \quad (3)$$

其中： \mathbf{h} 为没有直流偏量时的信道估计。从式可以看出：如果选取的训练序列的 \mathbf{C}^{-1} 的每行所有元素之和为零，则可以抵消直流偏量的影响^[5-6]。在此，笔者研究当 \mathbf{C}^{-1} 的每行所有元素之和不为零时的直流偏量估计。

假设接收数据没有同步偏差，信道阶数为 M 的情况。假设只有直流偏量引起估计误差，将 $\mathbf{y}=\mathbf{C}\mathbf{h}+\mathbf{d}$ 可写为：

$$\mathbf{y}=\mathbf{C}[\mathbf{h}_{[M]}^T \mathbf{0}_{1 \times (P-M)} + \bar{d} \times \mathbf{1}_{P \times 1}] \quad (4)$$

其中 $\bar{d}=\text{sum}(\mathbf{c})\bar{d}$ ， $\text{sum}(\mathbf{c})=c(0)+c(1)+\dots+$

$c(P-1)$ 。

从而得到：

$$\mathbf{h}'=\mathbf{C}^{-1}\mathbf{y}=[\mathbf{h}_{[M]}^T \mathbf{0}_{1 \times (P-M)}]^T + \bar{d} \times \mathbf{1}_{P \times 1} \quad (5)$$

理想情况下，当训练序列周期 P 大于信道阶数 M 时，后面的 $P-M$ 个解 $h(M), h(M+1), \dots, h(P-1)$ 都是零。所以，式(5)得到的信道估计中的 $h(M), h(M+1), \dots, h(P-1)$ 可以认为是由直流偏量引起的，直流偏量由最后面的 $P-M$ 个元素估计得到。

因此，可以利用偏量系数与主系数的大小不同来进行同步偏差估计，由 $P-M$ 个元素构成的矢量与估计直流偏量构成的矢量距离为：

$$\left\| \left(\frac{1}{P\sigma_c^2} \mathbf{C}^H \mathbf{P}_l \mathbf{y}_{\tau} \right)_{[P-M]_{\text{last}}} - \tilde{m}_l \mathbf{1}_{(P-M) \times 1} \right\|^2 \quad (6)$$

只有当后面的 $P-M$ 个元素全为偏量系数时，距离才为最小值。所以同步偏差可以通过下式进行估计：

$$\text{SY}(l)=\arg \min _{0 \leq l \leq P-1} \left\| \left(\frac{1}{P\sigma_c^2} \mathbf{C}^H \mathbf{P}_l \mathbf{y}_{\tau} \right)_{[P-M]_{\text{last}}} - \tilde{m}_l \mathbf{1}_{(P-M) \times 1} \right\|^2 \quad (7)$$

其中： $(\bullet)_{[P-M]_{\text{last}}}$ 为矩阵的最后 $P-M$ 个元素； \tilde{m}_l 表示在同步偏差为 l 时，得到的直流偏量估计，使 $\text{SY}(l)$ 取得最小值的 l 即为同步偏差 τ 。

对 ST 信道估计方法，利用式(7)进行仿真计算。

仿真条件：发送的数据采用正交振幅调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 调制，数据符号 144 位。信息数据等概率出现，且 $\sigma_b=1$ 。最佳信道无关 (optimum channel independent, OCI) 序列周期为 12， $\sigma_c=1$ 。信道为瑞利衰落信道，阶数为 6，信道信噪比为 5 dB。噪声为零均值高斯白噪声^[7]。直流偏量为 $[0.08, 0.13]$ 之间的均匀分布。同步偏差 τ 为 3。

仿真计算的结果如图 1 所示。

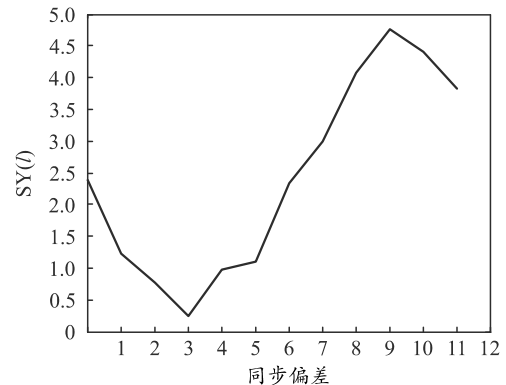


图 1 对 ST 的同步偏差估计

从图中可以看到：最小值对应的点为 3，得到的同步偏差估计为 3。通过仿真验证了上述同步偏

差估计方法。

对于 DDST 方法，由于它每帧叠加的依赖数据不一样，为了避免数据块之间的干扰，常常在每一帧数据前面插入循环前缀(cyclic prefix, CP)，可以通过前面的循环前缀来对它的同步偏差进行估计。由于循环前缀会占用信道资源，因此，希望在没有 CP 的情况下对信道进行估计。此时，就需要考虑没有 CP 时，DDST 信道估计方法下的同步偏差估计问题。

在不同的延迟倍数 τ_p 下，用接收到的 N 个数据对 DDST 方法下的同步偏差估计进行仿真。

仿真条件：设发送的数据采用 QAM 调制，数据符号 144 位。信息数据等概率出现，且 $\sigma_b=1$ 。OCI 序列周期为 12， $\sigma_c=1$ 。信道为瑞利衰落信道，信道阶数为 6，信道信噪比为 5 dB。噪声为零均值高斯白噪声^[7]。直流偏量为[0.08, 0.13]之间的均匀分布。同步偏差 τ 为 2。

仿真的结果如图 2 所示。

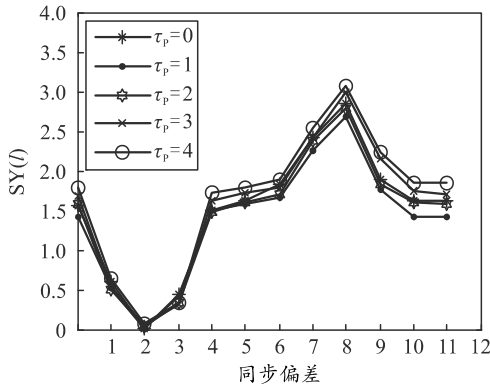


图 2 对 DDST 的同步偏差估计

从图 2 可以看到，最小值对应点为 2，估计的同步偏差都为 2。可见，在已知信道阶数的情况下，式(7)适用于 DDST 信道估计下的同步偏差估计，而且其估计结果不受 τ_p 的影响。此时，可以将由于下一帧叠加的依赖序列不同而引入的误差，类似地看成是 ST 中未知信息数据对估计造成的影响。所以在 ST 中能运用的同步偏差估计方法，在 DDST 中依然可以使用。

3 信道阶数未知的同步偏差估计及仿真

实际中，知道信道阶数是不可能的^[8]，所以需要未知信道阶数时，信号同步偏差的估计问题进行研究。首先，对 ST 信道估计方法下信号的同步偏差估计进行分析。

在不知道信道阶数时，进行同步偏差估计仿真。

仿真条件：设发送的信息数据采用 QAM 调制，数据符号 144 位。信息数据等概率出现，且 $\sigma_b=1$ 。OCI 序列周期为 10， $\sigma_c=1$ 。信道为瑞利衰落信道，实际阶数为 6。直流偏量为[0.08, 0.13]之间的均匀分布。同步偏差 τ 为 3。

以信道阶数为参数，信道阶数分别为 1~ P ，进行同步偏差估计的结果如图 3 所示。

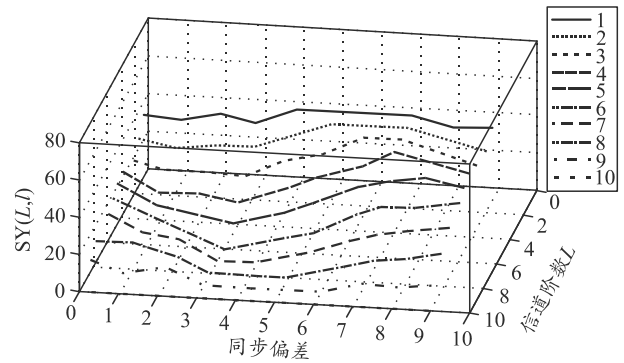


图 3 不同阶数下的同步偏差估计

由图 3 可见：在不知道信道阶数时进行估计，就会得到不同的估计结果，得不到正确的同步偏差估计。

在不知道信道阶数时，可以对式(7)所给的同步偏差估计方法进行改进，用 M_{max} 代替式(7)中已知的信道阶数。 M_{max} 为信道的最大阶数。可以得到在未知信道阶数时，同步估计的一种方法。判断公式如下：

$$SY(l) = \left\| \left(\frac{1}{P\sigma_c^2} C^H P_l y_\tau \right)_{[P-M_{max}, l_{last}]} - \tilde{m}_l \mathbf{1}_{(P-M_{max}) \times 1} \right\|^2, \quad l = 0, 1, \dots, P-1. \quad (8)$$

其中 \tilde{m}_l 为同步偏差为 l 时由估计信道后面 M_{max} 个数估计出的直流偏量。

当信道的实际阶数为最大阶数时，最小点对应的点即为同步偏差值。当信道阶数不是最大阶数时，会出现几个接近零的较小点，第一个小值对应的点即为同步偏差值。

在不同阶数情况下，用式(8)对 ST 信道估计下的同步偏差估计进行仿真。

仿真条件：设发送的数据采用 QAM 调制，数据符号 144 位。信息数据等概率出现，且 $\sigma_b=1$ 。OCI 序列，其模为常数 $\sigma_c=1$ ，周期为 12。信道为瑞利衰落信道，最大阶数为 6。直流偏量为[0.08, 0.13]之间的均匀分布。同步偏差 τ 为 3。

当信道阶数分别为 1~6 时，用式(8)进行仿真的结果如图 4 所示。

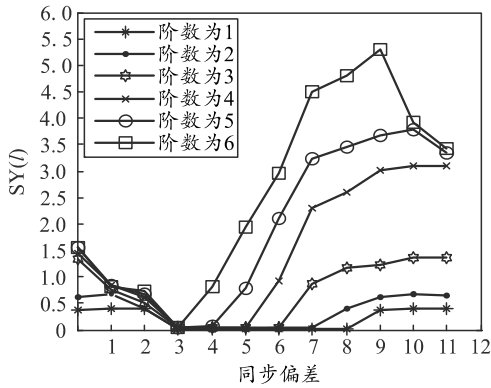


图 4 改进算法对 ST 的同步偏差估计

从图 4 可以看出：在信道阶数为最大阶数时，对应点为 3，信道阶数为其他值时，会出现几个接近零值的点，第一个近零点为 3，在不同信道阶数下，同步偏差都为 3。所以式(8)可以准确地估计出在不同阶数情况下的同步偏差。

在不同阶数情况下，用式(8)对 DDST 信道估计下信号的同步偏差估计进行仿真。

仿真条件：设发送的数据采用 QAM 调制，数据符号 144 位。信息数据等概率出现，且 $\sigma_b=1$ 。OCI 序列周期为 12， $\sigma_c=1$ 。信道信噪比为 5 dB。信道为瑞利衰落信道，信道最大阶数为 6。噪声为零均值高斯白噪声。直流偏量为 [0.08, 0.13] 之间的均匀分布。同步偏差 τ 为 3， $\tau_p=0$ 。

当信道阶数分别为 1~6 时，用式(8)进行估计同步偏差，仿真估计结果如图 5 所示。

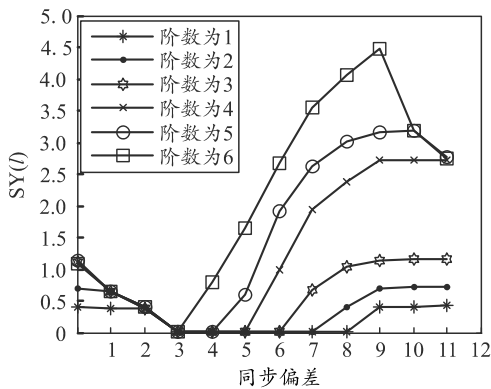


图 5 改进算法对 DDST 的同步偏差估计

从图 5 可以得到信号的同步偏差估计为 3。可见，式(8)依然适用于 DDST 信道估计下同步偏差的估计。

在不同延迟倍数和不同信道阶数下，用式(8)对 DDST 信道估计下信号的同步偏差估计进行仿真。

仿真条件：设发送的数据采用 QAM 调制，数据符号 144 位。信息数据等概率出现，且 $\sigma_b=1$ 。依赖序列按照式(9)生成。OCI 序列周期为 12， $\sigma_c=1$ ；

信道信噪比为 5 dB。信道为瑞利衰落信道，信道最大阶数为 6。噪声为零均值高斯白噪声。直流偏量为 [0.08, 0.13] 之间的均匀分布。信号同步偏差 τ 为 3。

叠加的依赖序列 $e(k)$ 为：

$$e(i+mP) = e(i) = -\frac{1}{N_p} \sum_{m=0}^{N_p-1} b(i+mP),$$

$$i = 0, 1, \dots, P-1. \quad (9)$$

其中： $b(i)$ 为信息序列； $N_p=N/P$ 为整数， N 为每帧发送的数据长度， P 为训练序列周期。

当延迟倍数 τ_p 分别为 0~4 时，信道阶数分别为 3~6，进行同步偏差估计的仿真，结果如图 6。

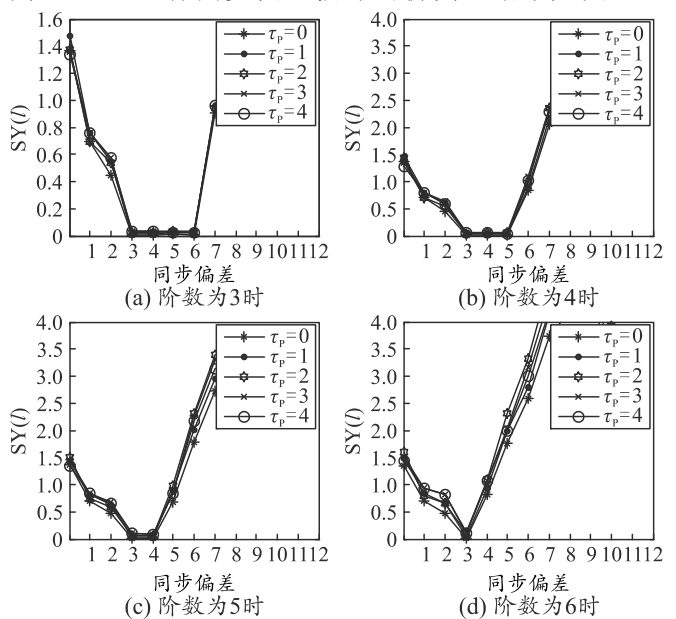


图 6 不同延迟倍数下的同步偏差估计

从图 6 可以看出：在不同延迟倍数、不同信道阶数下，用式(8)所得到的同步偏差估计都是 3。所以 DDST 信道估计下的同步偏差估计与 τ_p 的关系不大，可以直接用采集到的数据进行同步偏差估计^[9]。

4 结束语

笔者分析了信道阶数已知情况下的同步偏差估计方法，并对基于偏量系数与主系数的同步偏差估计方法进行了改进。经仿真验证可知：改进的算法适用于信道阶数未知情况下的 ST 和 DDST 信道估计，能准确地估计出在不同阶数情况下的同步偏差。

参考文献：

[1] ALDO G O L, M M LARA, D C MCLEMON. Channel Estimation Using Implicit Training[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2004, 52(1): 240-254.

$\{B_1, C_1, D_1\}$ 。

据此可确定该保障分队需设置的维修保障人员专业为轮式装甲底盘系统维修专业、火力系统维修

专业、火控系统维修专业、轻武器系统维修专业、电气系统维修专业、通信指控系统维修专业和通用保障车辆底盘系统维修专业共 7 种，如图 4 所示。

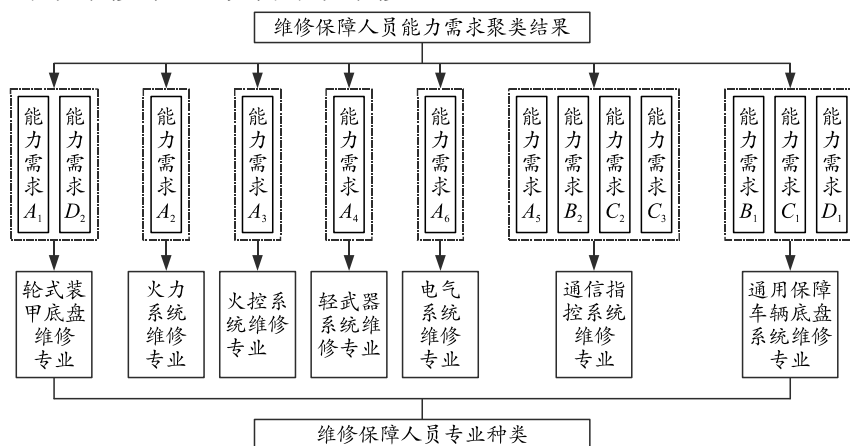


图 4 维修保障人员专业种类

5 结论

笔者从维修保障对象即部队列装装备出发，提出了基于能力需求的维修保障专业种类确定模糊聚类最大树方法，采用该方法得到的维修保障人员专业种类相对独立，既避免了专业的重复设置，整合了维修资源，又能够使维修保障人员最大程度地参与到维修保障工作中，避免人员冗余以及任务分工不明确。该方法为确定维修保障力量的人员要素提供了理论依据，确保了维修保障力量体系中人员力量构建的科学性与合理性。笔者仅从专业种类设置的角度进行了研究，下一步将结合战时维修任务工作量、维修规模等因素对各专业维修保障人员数量进行确定研究。

参考文献

[1] 庞升, 贾云献, 王强. 维修保障人员专业类别确定与优化配置[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(2): 30-34.

[2] 张杨, 付浩, 马文超, 等. 基于 QFD-KLEE 的新型装甲机械化部队维修保障能力评价指标体系[J]. 价值工程, 2017, 36(19): 12-15.

[3] 吕瑞强, 胡涛, 杨阳. 基于改进熵值法的装备维修保障能力灰色评估[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(5): 108-111.

[4] 罗明洋, 刘通. 部队装备维修人员需求模型研究[J]. 装备学院学报, 2013, 24(2): 44-47.

[5] 伊洪冰, 张爱民, 宫丽. 部队装备维修人员需求模型研究[J]. 装备学院学报, 2013, 24(2): 44-47.

[6] 王雄伟. 数字化部队战时维修保障力量运用研究[D]. 北京: 陆军装甲兵学院, 2017, 12: 25-28.

[7] 刘芳. 最大生成树聚类算法研究[J]. 软件导刊, 2015, 14(5): 68-69.

[8] 宋剑, 季大琴, 王宝宁. 基于最大树法的舰艇编队综合作战能力评估[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 40-42.

[9] 魏兆磊. 数字化部队保障装备体系构建理论与方法研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2016, 12: 63-64.

(上接第 67 页)

[2] ENRIQUE A-H, MCLEMON D C, ALDO G O L, et al. Frame/Training Sequence Synchronization and DC-Offset Removal for (Data-Dependent) Superimposed Training Based Channel Estimation[J]. IEEE Tran. Signal Processing, 2007, 55(6): 2557-2569.

[3] TUGNAIT J K, MENG X. Synchronization of superimposed training for channel estimation[J]. in Proc. Int. Conf. Acoust, Speech, Signal Process. 2004(4): 853-856.

[4] LINDOF B, MALM P. BER Performance Analysis of a Direct Conversion Receiver[J]. IEEE Trans. Commun, 2002, 50(5): 856-865.

[5] 袁伟娜. 基于新型训练序列的多天线移动通信信道估

计[D]. 成都: 西南交通大学, 2007: 43-49.

[6] ALDO G O L, LARA M M, MCLEMON D C. Channel Estimation Using Implicit Training[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2004, 52(1): 240-254.

[7] 夏美文. 基于双 MCU 的多通道信号检测模块[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 20-23.

[8] 王玉红, 崔波, 金梁, 等. 利用特征极值比的盲信道阶数估计方法[J]. 信号处理, 2015, 31(5): 528-535.

[9] 李润秋, 朱岸明, 王中阳, 等. 电压偏差及负荷不平衡补偿的静止无功补偿器控制方法[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1258-1262.