

水下声呐探测系统的博弈对抗模型研究*

于小宁¹ 张风平²

(1. 西安工业大学保密处 西安 710032; 2. 兰州石化公司动力厂电气二车间 兰州 730060)

摘要:针对水下目标探测的多声传感器信息处理和协同对抗多目标对战策略,研究了声呐信号探测与协同对抗决策关联,分析了声传感信号的特点,给出了声探测信号恢复与分离的处理算法,建立在声传感信号的基础上,依据多声传感信号在水下对敌我双方探测与对抗条件,研究了多声传感信号博弈模型和协同对抗决策方法,给出了详细的推理分析和函数求解方法。通过给定的多声传感信号的处理和两组敌我协同作战的博弈分析,验证了声传感探测协同对抗决策。

关键词:声传感器;探测;协同对抗;决策

中图分类号: O225 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Study on game antagonism model of underwater sonar detection system

Yu Xiaoning¹ Zhang Fengping²

(1. Security Department, Xi'an Technology University, Xi'an 710032, China;

2. Lanzhou Petrochemical Company Power Plant Electrical Workshop 2, Lanzhou 730060, China)

Abstract: For underwater target detection of multi-acoustic sensors information processing and cooperative confrontation strategy, this paper researches the correlation between sonar signal detection and collaborative confrontation decision, analyzes the characteristics of acoustic sensing signal, gives out a processing algorithm of acoustic detection signal recovery and separation. Based on acoustic sensing signal, according to the game model of multi acoustic sensing signal and synergetic countermeasure decision method, and the condition of detecting and confrontation between the two sides of underwater acoustic sensing signal, and the reasoning analysis and function solving method are given in detail. Through the processing of a given acoustic sensing signal and the game analysis of two groups of collaborative warfare, the acoustic sensing detection collaborative confrontation decision is verified.

Keywords: acoustic sensors; detection; collaborative against; strategy

0 引言

水下声呐探测系统的博弈对抗模型问题是目前国内研究的热点。冲突抗衡是博弈对抗的行为特征,主要表现为水下声呐探测系统编队与对手的互动抗衡,水下声呐探测系统编队根据双方局势,确定自己的行为方式,最大程度消灭或遏制敌方。关于水下声呐探测系统“协同对抗”的研究,目前比较少见,各国的武装力量延伸至海洋过程中,水下声呐探测将出现纷繁复杂的对抗^[1-3],水下声呐探测系统将是海洋战争中最重要战斗力量,此系统的发展方向是水下对抗无人化的基础,主要表现为水下声呐多个探测系统的协同对抗。基于不同的

毁伤手段和水下环境的特点,建立协同对抗策略,其关键性限制条件是声呐压制与反压制,这也是水下声呐探测对抗的技术途径。水下对抗典型的“多源约束”表现在声呐的发射功率、作用距离、接收增益、检测概率等性能,另外一个性能约束表现在对抗博弈的效果判定,带来收益矩阵模糊等严重的“收益不确定”。因此,研究声传感的声呐特性以及声传感探测协同对抗决策,有利于攻破水下多源信息协同对抗的关键技术,具有很高的研究价值^[4-5]。

1 声呐信号探测与协同对抗决策关联

声呐的工作原理是利用水中声波进行探测,并进行定

收稿日期:2017-05

* 基金项目:国家自然科学基金(61473224)、陕西省教育厅专项科研计划(16JK1368,16JK1372)项目资助

位和通信。除声呐本身的技术状况外,声呐工作的外界条件也严重制约着声呐工作性能,外界因素包括海面和海底混响干扰、海洋噪声、自噪声等,外界因素受声呐工作的海洋环境影响。因此降低声呐数据中的噪声干扰,可以有效提高复杂水声条件下声呐的探测性能^[6]。假设有 N 个信源,声呐接收阵列将一系列的信号转换成数字信号,并整理得到声呐探测数据,经过去噪算法,这些数据分析得到信源混合数据^[7],基于信源分离算法,对得到的信源混合数据加以计算分析,将得出协同对抗的决策,声呐信号探测优化框图如图1所示。

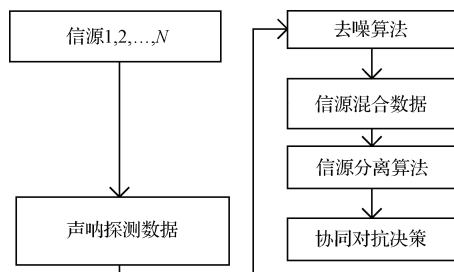


图1 声呐信号探测框图

由图1可知,在声呐信号探测优化的过程中,重点之一是去除声呐接收阵列探测数据中的加性噪声;其次,基于信源分离算法,对去噪后的混合信源进行逐个分离。从图1可以看出,水下多目标的多协同对抗决策是建立在多声传感回声波信号的处理上进行分析,将分离出的声波信息,按照多声波协同对抗的原理推算和建立博弈模型以及决策机制^[8]。

2 水下声呐传感器信号处理方法

2.1 声传感器信号恢复

依据图1,按照水下多声传感器布置方法,每一声源探测都含有自身的噪声信号和目标信号,采用EVA算法处理探测的信号,可以更好地识别目标信息^[9-10],由于是阵列布置方法,盲信号不可避免出现^[11],而且盲信号处理相对困难^[12]。为了有效的提高识别性能,需要从信源的恢复和信源的分离方面加以分析。假设含加性噪声的信号源为:

$$r(k) = r_1(k) + \dots + r_N(k) + n(k) \quad (1)$$

式(2)为水下声传感的声呐阵列输出信号,式(3)为经过信道均衡器得到的恢复信号,用于补充信道的均衡器 e 与实际信道影响 h 满足式(4)。

$$s(k) = r(k) \times h(k) = (r_1(k) + \dots + r_N(k) + n(k)) \times h(k) \quad (2)$$

$$y(k) = x(k) \times e(k) = (r_1(k) + \dots + r_N(k) + n(k)) \times h(k) \times e(k) \quad (3)$$

$$h(k) \times e(k) = \sum_i h(i)e(k-i) \approx c\delta(k-k_0) \quad (4)$$

式中: c 是实常数,由此可以实现源信号的恢复。

2.2 信号分离

按照声传感器信号恢复的原理,假设有 M 个传感器的声呐接收阵列,如式(5)所示:

$$(CUM_4(r_i(k)) = E\{|r_i(k)|^4\} - 2E^2\{|r_i(k)|^2\} - |E\{r_i^2(k)\}|^2) \quad (5)$$

式中:基于 N 个窄带、非高斯、相互统计独立且四阶的累积量, $r_i(k)(i=1,2,\dots,N)$ 是不为 0 的信号,利用 EVA 算法,得到的信号源恢复结果 $y(k) = r(k) = r_1(k) + \dots + r_N(k) + n(k)$,其中 $n(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_N(k)]^T$, $n_i(k)(i=1,2,\dots,M)$ 为第 i 个阵元的加性高斯白噪声,其均值为 0,方差为 δ^2 。基于峰度自然对数最大化准则的代价函数为:

$$y(\omega) = \frac{1}{4} \ln \left(\frac{|CUM_4[y(k)]|}{E^2[|y(k)|^2]} \right) \quad (6)$$

$d_1(k)$ 是第一次分离出的信号源,将第一个信号从原混合信号中去掉可以得到第二个信号源,其计算公式为:

$$y_2(k) = y_1(k) - \hat{w}_2 d_{1(k)} \quad (7)$$

式中: \hat{w}_1 为滤波器的权系数,是 N 维列向量。式(7)为一阶函数。

$$l_1(\hat{w}_1) = \frac{1}{p} \|y_2(k)\|^p \quad (8)$$

在式(8)中, P 可取 4~8 之间的正整数^[13-15]。令 $l_1(\hat{w}_1)$ 最小化,则可得到 \hat{w}_1 的叠代公式如式(9)所示,按照式(9),可以对恢复的信号进行分离。

$$\hat{w}_1(k+1) = \hat{w}_1(k) + \eta_1(k) y_1(k) (s_2(\hat{k}+1))^{p-1} \quad (9)$$

3 多声传感对抗博弈模型以及决策方法

3.1 多声传感对抗博弈模型

基于阵列声传感的信源输出基础上,结合信源特性,设:

$$G = \langle N, S_1, S_2, u, u_2 \rangle, N = \{1, 2\} \quad (10)$$

式中:1 代表我方,2 代表敌方。

$$S_1 = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \quad (11)$$

$$S_2 = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) \quad (12)$$

为假设我方有 k 个声传感探测的探测区,相对 1 个敌方目标, $\alpha_i(i=1,2,\dots,m)$ 为可能采取的 m 种攻击策略; $\beta_j(j=1,2,\dots,n)$ 为敌方 1 个目标采取的 n 种攻击策略。当我方采取 α_i 攻击策略,而敌方采取 β_j 攻击策略时, $a_{ij} = u_1(\alpha_i, \beta_j)(i=1,2,\dots,m)(j=1,2,\dots,n)$ 为我方的收益。代表在我方采取 α_i 攻击策略,而敌方采取 β_j 攻击策略时, $b_{ij} = u_2(\alpha_i, \beta_j)(i=1,2,\dots,m)(j=1,2,\dots,n)$ 为敌方的收益,向量 (α_i, β_j) 为元素的 m 行 n 列矩阵为 G 的支付矩阵。

$$\begin{matrix} & \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_n \\ \alpha_1 & (a_{11}, a_{12}) & (a_{12}, b_{12}) & \dots & (a_{1n}, b_{1n}) \\ \alpha_2 & (a_{21}, b_{21}) & (a_{22}, b_{22}) & \dots & (a_{2n}, b_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_m & (a_{m1}, b_{m1}) & (a_{m2}, b_{m2}) & \dots & (a_{mn}, b_{mn}) \end{matrix} \quad (13)$$

博弈模型为 $G=(N, S_1, \dots, S_n, u_1, u_2, \dots, u_n)$, 此纳什均衡不一定总存在。为了保证此均衡的存在, 策略的概念需要扩充为混合策略概念。称 $A=(a_{ij})_{m \times n}$ 为我方支付矩阵, $B=(b_{ij})_{m \times n}$ 为敌方的支付矩阵, 此时博弈模型 G 完全可由支付矩阵 A, B 决定, 称 G 为双矩阵博弈模型。

3.2 多目标博弈模型策略

基于多声传感对抗博弈模型, 在博弈模型中我方策略集 $S_1=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 的定义为式(14):

$$\alpha_i = ((W_1, d_1), (W_2, d_2), \dots, (W_k, d_k)) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

在式(14)中, w_1, w_2, \dots, w_k 代表 k 个声传感探测系统, 具体特性如下:

$$W_1, W_2, \dots, W_k \subset W = (w_1, w_2, \dots, w_k, \varphi) \quad (15)$$

$$W_1 \cup W_2 \cup \dots \cup W_k = W \quad (16)$$

$$W_1 \cap W_2 \cap \dots \cap W_k = \phi \quad (17)$$

式中: φ 代表无实体, $(W_i, d_i) (i=1, 2, \dots, k)$ 为我方 W_i 探测系统协同攻击敌方目标 d_i 。式(18)表示博弈模型中敌方策略集 $S_2=(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 。具体特性如式(19)~(21):

$$\beta_j = ((D_1, w_1), (D_2, w_2), \dots, (D_k, w_k)), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$D_1, D_2, \dots, D_k \subset D = (d_1, d_2, \dots, d_k, \varphi) \quad (19)$$

$$D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_k = D \quad (20)$$

$$D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_k = \phi \quad (21)$$

式中: d_1, d_2, \dots, d_k 代表 k 个敌方目标, φ 代表无实体; $(D_i, W_i) (i=1, 2, \dots, k)$ 代表 D_i 个敌方目标协同攻击我方阵营 W_i 。

4 计算分析

为了验证声传感阵列的探测信号处理算法, 假设有 2 个声源, 分别为:

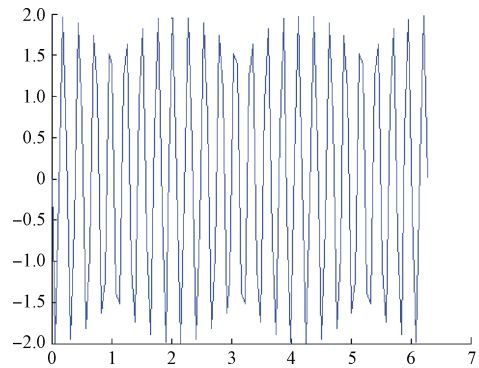
$$r_1(t) = 5\sin(1000t)$$

$$r_2(t) = 5\cos(1000t - 30^\circ) + 5\cos^2(1000t - 60^\circ)$$

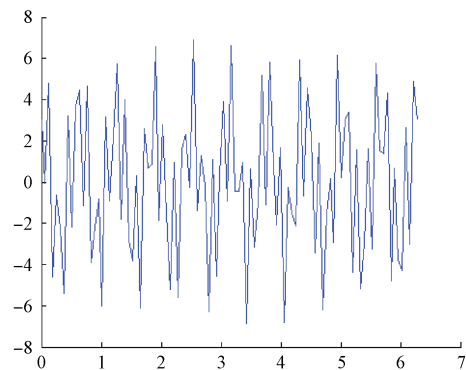
为了保证声传感信号源不失真, 根据采样定理, 选择 4 kHz, 采样时间 5 s, 100 ms 时间段的信号波形如图 2 所示。

基于声传感器信号恢复与分离算法, 若信号为 $s(t)$, 建立声传感的解析信号, 此信号对应的解析信号为 $s(t) + j \times r(t)$ 。其中, $r(t)$ 是原声传感实信号 $s(t)$ 的希尔伯特变换, 强高斯白噪声的混合信号包含在内。对于水下声传感的信源, 由于环境因素不断干扰, 目标信号可能被淹没在信源噪声中, 为了有效分离出多声传感信息, 依据信号分离原则可以将声源信号进行有效的分离。基于本论文的处理算法, 2 个传感信息源的分离的结果分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

基于峰度自然对数最大化的盲源分离算法, 利用式(6)的代价函数, 进行了四次信号抽取。通过计算与分

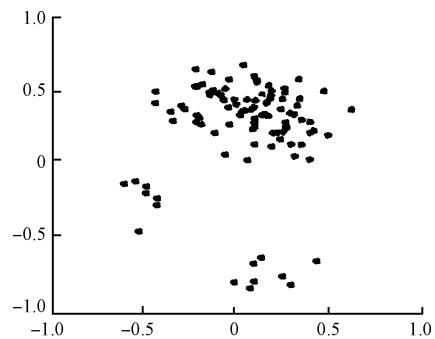


(a) 信源为 $r_1(t)$ 的波形

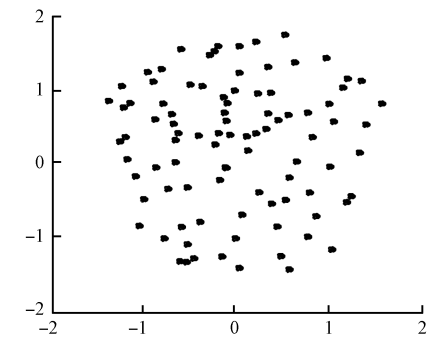


(b) 信源为 $r_2(t)$ 的波形

图 2 信源波形图



(a) 信源为 $r_1(t)$ 的分离图



(b) 信源为 $r_2(t)$ 的分离图

图 3 信源分离图

析, 得到信号抽取的收敛曲线, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 在强噪声背景情况下, 信号间相互统计独立, 并且四阶累计量不为 0, 这两个条件是进行多个窄

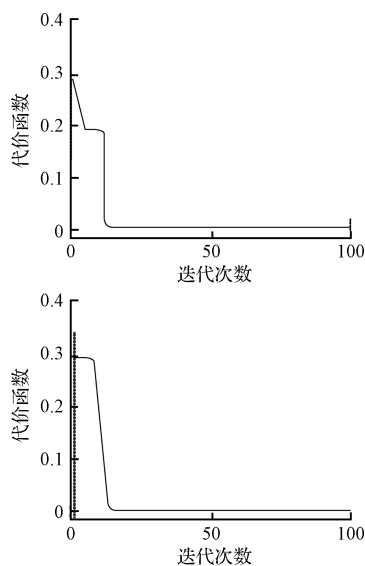


图4 信号抽取收敛曲线

带非高斯信号源分离的前提。基于信号源的个数与声纳阵元的个数相同情况时,分离出的信号与源信号形状基本相同,只是在幅度上有一定的变化,但是这并不影响对源信号信息的提取。信号源分离的代价函数都随着迭代次数的增加而减小,在迭代50次时基本趋于平稳,由此说明,本文采用的算法中所选取的判据、准则以及学习速率等因子是合理的。

为了验证水下多声传感信源系统对目标的对抗效能,设 $\mathbf{A}_1 = (a_1, a_2, \dots, a_5)$ 为代表我方对敌方实施攻击的策略集合,其中:

$$\begin{cases} a_1 = [(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), (\alpha_3, m), (\alpha_4, \beta_5)] \\ a_2 = [(\alpha_1, \alpha_2), \beta_1, (\alpha_3, \beta_2), (\alpha_4, m), (\phi, \beta_3)] \\ a_3 = [(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \beta_1, (\phi, \beta_2), (\alpha_4, m), (\phi, \beta_3)] \\ a_4 = [(\alpha_1, \beta_1), ((\alpha_2, \alpha_3), \beta_2), (\alpha_4, m), (\phi, \beta_3)] \\ a_5 = [(\phi, \beta_1), ((\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \beta_2), (\alpha_4, m), (\phi, \beta_3)] \end{cases} \quad (22)$$

为了验证水下多声传感信源系统对目标的对抗效能,式(22)为 $\mathbf{A}_1 = (a_1, a_2, \dots, a_5)$, \mathbf{A}_1 代表我方对敌方实施攻击的策略集合。设 $\mathbf{B}_1 = (b_1, b_2)$ 代表敌方对我方实施攻击的策略集合,表达式为式(23):

$$\begin{cases} b_1 = [(\beta_1, \alpha_1), (\beta_2, \alpha_2), (\beta_3, \alpha_3), (\phi, \alpha_4)] \\ b_2 = [(\beta_1, \beta_2), \alpha_1, (\beta_3, \alpha_2), ((\phi, \alpha_3)), (\phi, \beta_4)] \end{cases} \quad (23)$$

基于多目标博弈模型和策略理论,当我方在采取 a_i 策略时, $m_A^a(x)$ 为获得的收益, $m_A^a(y)$ 为将要付出的代价;当敌方在采取 b_j 策略时, $m_B^b(x)$ 为能够获得的收益, $m_B^b(y)$ 为将要付出的代价。在我方采取 a_i 策略,而敌方采取 b_j 策略时,设 $U_1(a_i, b_j)$ 为我方的支付函数,表达式如式(24)所示:

$$U_1(a_i, b_j) = \frac{m_A^a(x)m_A^a(y)}{m_B^b(x)m_B^b(y)}, i = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2 \quad (24)$$

在我方采取 a_i 策略,而敌方采取 b_j 策略时,设 $U_2(a_i, b_j)$ 为敌方的支付函数。表示式如式(25)所示:

$$U_2(a_i, b_j) = \frac{m_A^a(y)m_B^b(x)}{m_A^a(x)m_B^b(y)}, i = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2 \quad (25)$$

采用静态双矩阵博弈自行开发仿真软件,针对上述敌我双方支付矩阵,求解博弈模型纳什均衡。结果显示,当我方选取策略 a_5 ,而敌方选取策略 b_2 时,我方策略对应的支付值为 7.545,敌方策略对应的支付值为 0.132。若我方之间间距、敌方目标之间间距、我方飞机编队与敌方目标群之间间距缩小时,进行博弈决策,则获得如下结果:我方选取策略 a_1 ,而敌方选取策略 b_1 ,我方策略对应的支付值为 19.20,敌方策略对应的支付值为 0.052。当我方与敌方之间的距离超出了我方各武器的作用距离,决策出我方4架飞机全部攻击敌方前排目标是合理的。当我方与敌方全部目标之间的距离均在我方各武器的作用距离之内,决策出“我方与敌方形成对攻局面”以及“我方对敌方战略目标和阵地同时进行搜索”是合理的。

5 结论

基于特征向量算法和峰度自然对数最大化算法,针对强噪声背景下多个声呐信号,本文提出声呐盲信号分离算法,可以对按照峰度减少的顺序依次进行分离。要求信号源的个数和天线阵元的个数相等,当信号源的个数大于天线阵元的个数时,属于超定盲信号分离问题。利用静态双矩阵博弈算法,求解出了博弈模型的纳什均衡解。通过计算分析,结果显示,基于完全信息静态博弈论模型建立多机协同对抗多目标任务决策数学模型是合理的,通过对多机协同对抗多目标典型算例的计算与分析,可以初步确认博弈对抗任务决策结果有效。

参考文献

- [1] NAGPAL R, SHROBE H, BACHRACH J. Organizing a global coordinate system from local information on an Ad hoc sensor network[C]. Information Processing in Sensor Networks, Second International Workshop, 2003:333-348.
- [2] CHANDRASEKHAR V, SEAH W. An area localization scheme for underwater sensor networks[C]. Oceans. IEEE, 2007:1-8.
- [3] POMPILI D, MELODIA T, AKYILDIZ I F. Deployment analysis in underwater acoustic wireless sensor networks[C]. ACM International Workshop on Underwater Networks. ACM, 2006:48-55.
- [4] 孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4):39-46.
- [5] TEYMORIAN A Y, CHENG W, MA L, et al. 3D underwater sensor network localization [J]. IEEE

- Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(12): 1610-1621.
- [6] ISIK M T, AKAN O B. A three dimensional localization algorithm for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9):4457-4463.
- [7] 田晓东,刘忠. 水下成像声呐探测系统建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2006, 23(11):176-179, 201.
- [8] LING H, ZNATI T. Locate more nodes in under water sensor networks using out-of-range information [J]. 2008:2349-2354.
- [9] BOWER A S. A Simple kinematic mechanism for mixing fluid parcels across a meandering jet[J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(1):173-180.
- [10] GIROD L, ESTIN D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing[J]. Intelligent Robots and Systems, 2001, 3(2):1312-1320.
- [11] 姚宗信,李明,陈宗基. 基于博弈论模型的多机协同对抗多目标任务决策方法[J]. 航空计算技术, 2007, 37(3):7-11.
- [12] 谭艳春,樊海红,刘目磊. 水下声纳信号目标定位优化探测研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(11):221-224, 394.
- [13] 郝允志,周黔. 动态频率测量的滞后误差分析及改进方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):75-82.
- [14] 马学森,曹政,韩江洪,等. 改进蚁群算法的无线传感器网络路由优化与路径恢复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9):1320-1327.
- [15] 唐旭英. 双耦合谐振回路选频特性仿真研究. 国外电子测量技术, 2015, 34(3):42-50.

作者简介

于小宁,工程师,主要研究方向为水下光通信、激光制导。
E-mail:616941192@qq.com

张风平,高级工程师,主要研究方向为水下光通信。

全新 R&S ZN-Z32/33——用于 TVAC 和多端口生产测试的 新型矢量网络分析仪校准方案

罗德与施瓦茨推出了新的矢量网络分析仪校准设备: R&S ZN-Z32 和 R&S ZN-Z33 内联校准件。这些校准件是热真空室(TVAC)中的卫星器件测试和生产线上的多端口器件测试的理想选择。

2017年10月12日,与传统的网络分析仪自动校准件不同,罗德与施瓦茨的新型 R&S ZN-Z32/33 内联校准件与测试设备一直保持连接。这使得它们成为测试过程中需要频繁重新校准时的理想解决方案,尤其是在测试设备不易直接操作的情况下。

在真空条件下轻松校准

由于在真空条件下无法直接操作测试设备,新推出的内联校准件是唯一可用于 TVAC 室测试的校准件。在 TVAC 室抽真空和测试之前,需要首先在室内环境条件下进行初始校准,然后将测试装置放入 TVAC 室。对 TVAC 室抽真空后,由于热漂移效应,每次温度变化后都需要进行重新校准。内联自动校准件通过 CAN 总线一直与控制器保持连接状态,因此可以轻松执行重新校准。

生产测试时的高效多端口校准

对于生产测试中典型的多端口应用,由于电缆移动造成

的相位不稳定性,测试准确度和重复性随之恶化。常规校准件的重新校准需要花费大量的时间。相比之下,R&S ZN-Z32 / 33 内联校准件可以通过控制软件一键完成多端口的重复校准,将重新校准时间缩短到几秒钟。用户可以大大提高生产线的效率。

R&S ZN-Z32 覆盖 10 MHz 至 8.5 GHz 的频率范围,非真空条件下可在 +5℃ 至 +40℃ 下使用。R&S ZN-Z33 覆盖 10 MHz 至 40 GHz 的频率范围,非真空条件下可在 +5℃ 至 +40℃ 的温度范围内使用,热真空条件下可在 -30℃ 至 +80℃ 范围内使用。内联校准件受控于 R&S ZN-Z30 CAN 总线控制器,最多可控制 48 个单元。使用多个控制器,可支持几乎无限数量的内联校准件。R&S ZN-Z3ASW 应用软件可引导用户完成系统配置和校准的全过程。

新的 R&S ZN-Z32/-Z33 内联校准件、R&S ZN-Z30 CAN 总线控制器和 R&S ZN-Z3ASW 软件已正式发布,可用于 R&S ZNB(T)、R&S ZVA 和 R&S ZVT 矢量网络分析仪。