

中华人民共和国工业和信息化部 通信计量技术规范

JJF（通信）069-2023

电子校准件校准规范

Calibration Specification for Electronic Calibration Modules

（报批稿）

2023-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

电子校准件校准规范

Calibration Specification for Electronic
Calibration Modules

JJF（通信）069-2023

归口单位：中国信息通信研究院

起草单位：中国信息通信研究院

参加单位：北京芯宸科技有限公司

本规范主要起草人：

孙景禄（中国信息通信研究院）

纪 锐（中国信息通信研究院）

张向阳（中国信息通信研究院）

参加起草人：

成 锴（中国信息通信研究院）

袁修华（中国信息通信研究院）

黄 辉（北京芯宸科技有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
4 概述	1
5 计量特性	1
6 校准条件	1
6.1 环境条件	1
6.2 校准用设备	2
7 校准项目和校准方法	2
7.1 外观及工作正常性检查	2
7.2 方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪	3
7.3 功能检查：散射参数	4
8 校准结果表达	5
9 复校时间间隔	5
附录 A 原始记录推荐格式	6
附录 B 校准证书内页推荐格式	9
附录 C 不确定度评定示例	12
附录 D TRL 校准法求解过程	17

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范针对电子校准件的校准方法，分别从方向性、源匹配/负载匹配、反射跟踪/传输跟踪等参数测量进行了规定，并在附录中给出了校准项目的测量不确定度评定示例。

本规范为首次发布。

电子校准件校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围为 5Hz~67GHz 的电子校准件（以下简称 ECal）校准，对于其他频段的电子校准件，也可参照执行。

2 引用文件

JJF 1495 矢量网络分析仪校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范。

3 术语和计量单位

网络分析仪等效误差：“等效”是矢量网络分析仪校准后的剩余误差或残余误差，是由于校准件的不理想、校准方法或校准模型的不完善等原因，校准后的网络分析仪仍然会有一部分系统误差未被修正。这部分校准后仍然存在的、未被修正的系统误差称为剩余误差或残余误差。当使用相同的校准方法选用不同的校准件校准时，可以通过分析分理出的已修正误差项，比较两次校准的差异，分析各个误差项对被测件的影响。

4 概述

电子校准件采用固态电路技术的校准方法，内置了开关，可以提供内置的标准开路、短路、负载和通路等状态。它简化了校准过程，缩短了校准所需的时间，减少了错误操作的可能性。

5 计量特性

5.1 频率范围：5Hz~67GHz；

5.2 方向性（等效）：(25-55)dB；

5.3 源匹配/负载匹配（等效）：(25-50)dB；

5.4 反射跟踪/传输跟踪（等效）：±0.31dB；

5.5 功能测试：散射参数

S_{ii} 模值（线性）：0~1，相角-180° ~180° ；

S_{ij} 模值（对数）：0dB~70dB，相角-180° ~180° 。

注：以上所有指标不用于合格性判别，仅提供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：23℃±5℃；

6.1.2 相对湿度: $\leq 80\%$;

6.1.3 电源要求: $220(1 \pm 10\%)V$ 、 $(50 \pm 1)Hz$;

6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 校准用设备

6.2.1 网络分析仪

频率范围: $5Hz \sim 67GHz$;

测试端口本底噪声 (IFBW=100Hz): 优于 $-90dBm$;

测试端口扫迹噪声 (IFBW=100Hz): 优于 $0.004dB$;

自校准修正后: 方向性、源匹配和负载匹配优于 $53dB$ (频率 $1GHz$), 传输扫迹优于 $0.01dB$;

6.2.2 失配负载

频率范围: $DC \sim 67GHz$;

标称电压驻波比: $1.10 \sim 2.00$;

反射系数模值不确定度: $0.01 \sim 0.04 (k=2)$ 。

6.2.3 衰减器

频率范围: $DC \sim 67GHz$;

标称衰减量: $20dB \sim 50dB$;

两端口电压驻波比: < 1.5 ;

衰减不确定度: $0.06dB \sim 0.30dB (k=2)$ 。

6.2.4 空气线

频率范围: $DC \sim 67GHz$;

阻抗: $25\Omega / 50\Omega$;

相角不确定度: $0.3^\circ \sim 3.0^\circ (k=2)$ 。

6.2.5 开路器

相位: 相角 $-180^\circ \sim 180^\circ$;

模值: $0.95 \sim 1.00$ 。

6.2.5 短路器

相位: 相角 $-180^\circ \sim 180^\circ$;

模值: $0.95 \sim 1.00$ 。

6.2.5 负载

反射系数模值: $0 \sim 0.02$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 外观及工作正常性检查

7.1.1 电子校准件应有说明书及全部配套附件。

7.1.2 电子校准件各端口、接口等应安装牢固, 调节正常。仪表不应有影响电气性能的机械

损伤。

7.1.3 进行以下校准时，电子校准件及校准用设备应按规定时间预热。

7.2 方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪

7.2.1 TRL校准法

7.2.1.1 仪表连接如图1所示。

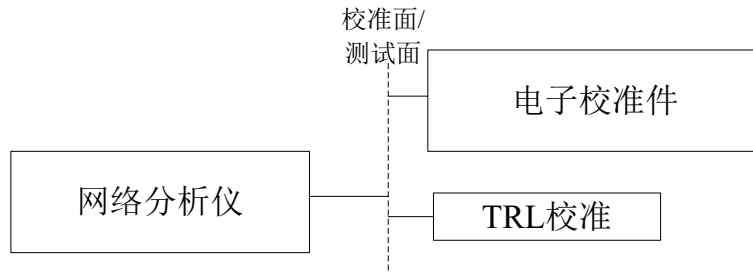


图 1 TRL 校准及电子校准件测量框图

7.2.1.2 将网络分析仪设置好相应的频率、中频带宽、点数、格式等参数，连接 TRL 校准件，进行双端口校准。

7.2.1.3 在网络分析仪中读取 TRL 校准后的校准参数曲线值。选择方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪等参数，并将结果记录于附录 A 表 A.2。

7.2.1.4 断开 TRL 校准件，在校准面连接电子校准件，进行双端口校准。在网络分析仪中读取电子校准件校准后的校准参数曲线值。选择方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪等参数，并将结果记录于附录 A 表 A.2。

7.2.1.5 根据 TRL 复数 S 参数以及电子校准件复数 S 参数测量值，按照附录 D 计算等效方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪，记录到附录 A 表 A.2 中。

7.2.2 纹波法（仅适用于方向性/源匹配/反射跟踪）

7.2.2.1 仪表连接如图 2 所示。

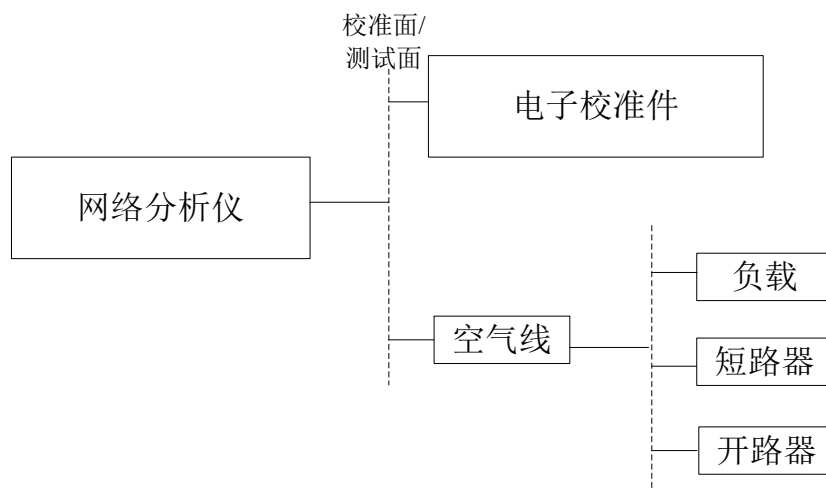


图 2 纹波法测量框图

7.2.2.2 将网络分析仪设置好相应的频率、中频带宽、点数（比如不少于 201 点）、格式等参数，连接电子校准件，并进行单端口校准。

7.2.2.3 选择相应频段的空气线，将网络分析仪端口 1 连接空气线，空气线另一端接负载，

测量 S_{11} 的模值曲线，单位为线性。

7.2.2.4 测量显示的 S_{11} 模值为带波动的曲线，即存在纹波，选择纹波相邻峰值最大点，则方向性 D 可以通过计算得到：

$$D = \frac{\Delta A}{2}$$

式中 ΔA 为纹波幅度。

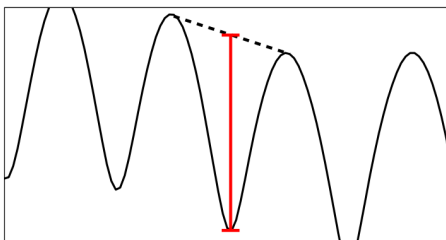


图 3 纹波幅度确定方法

7.2.2.5 将网络分析仪端口 1 连接空气线，空气线另一端接短路器，测量 S_{11} 的模值曲线，单位为线性，则源匹配 M_s 为：

$$M_s = \frac{\max(\Delta A)}{2}$$

7.2.2.6 端接特征短路器并校准矢网，则反射跟踪 R 为：

$$R = \frac{(\Gamma_s^m - E_{00})(1 - E_{11}\Gamma_s)}{\Gamma_s}$$

式中， Γ_s^m 为实测反射系数， Γ_s 为具有相关不确定度的实际特征反射系数， E_{00} 和 E_{11} 为在矢网校准过程中确定的其他两项误差系数。

7.3 功能检查：散射参数

7.3.1 仪表连接如图4所示。

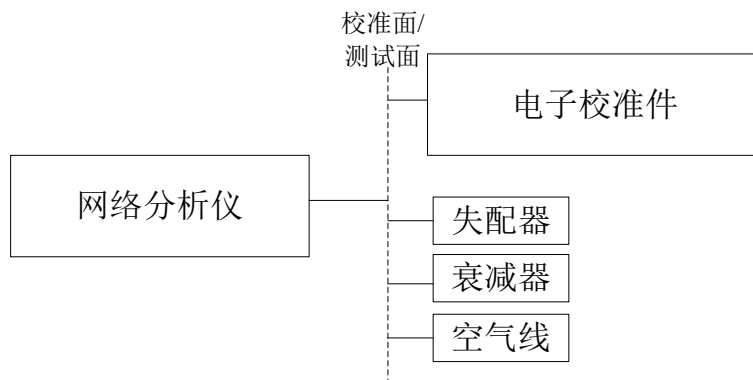


图 4 散射参数测量框图

7.3.2 将网络分析仪设置好相应的频率、带宽、点数等参数，连接电子校准件，进行双端口校准。

7.3.3 断开电子校准件，在校准面连接失配器，设置网络分析仪为 S_{ii} 单端口反射的散射参数，并将结果记录于附录 A 表 A.3。

7.3.4 网络分析仪双端口在校准面连接衰减器和空气线，在网络分析仪上读出 S_{ij} 双端口传输

的散射参数，并将结果记录到附录 A 表 A.3 中。

7.3.5 对于多端口的电子校准件，需要对每对端口进行校准测试，重复 6.3.2~6.3.4。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映，推荐校准证书内页格式见附录 B。校准证书应准确、客观的报告校准结果。校准结果用校准数据的形式给出，并给出测量不确定度，不确定度评定实例见附录 C。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
 - b) 实验室名称和地址；
 - c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
 - d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
 - e) 客户的名称和地址；
 - f) 被校对象的描述和明确标识；
 - g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
 - h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
 - i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
 - j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
 - k) 校准环境的描述；
 - l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
 - m) 对校准规范的偏离的说明；
 - n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
 - o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议不超过 1 年。更换重要部件、维修或对仪器性能有怀疑时，应及时校准。

附录 A

原始记录推荐格式

表 A.1 外观及工作正常性检查

检查项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

表 A.2 方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪

表 A.2.1 方向性

电子校准件 端口	参数	频率	TRL 标准值	ECal 被测值	实测值	不确定度
	方向性					
	方向性					
	方向性					
	方向性					
	方向性					
	方向性					

表 A.2.2 源匹配

电子校准件 端口	参数	频率	TRL 标准值	ECal 被测值	实测值	不确定度
	源匹配					
	源匹配					
	源匹配					
	源匹配					
	源匹配					
	源匹配					

表 A. 2. 3 负载匹配

电子校准件 端口	参数	频率	TRL 标准值	ECal 被测值	实测值	不确定度
	负载匹配					
	负载匹配					
	负载匹配					
	负载匹配					
	负载匹配					
	负载匹配					

表 A. 2. 4 反射跟踪

电子校准件 端口	参数	频率	TRL 标准值	ECal 被测值	实测值	不确定度
	反射跟踪					
	反射跟踪					
	反射跟踪					
	反射跟踪					
	反射跟踪					
	反射跟踪					

表 A. 2. 5 传输跟踪

电子校准件 端口	参数	频率	TRL 标准值	ECal 被测值	实测值	不确定度
	传输跟踪					
	传输跟踪					
	传输跟踪					
	传输跟踪					
	传输跟踪					
	传输跟踪					

表 A.2.6 方向性（纹波法）

电子校准件 端口	参数	频率范围	纹波幅度	实测值	不确定度
	方向性				
	方向性				
	...				

表 A.2.7 源匹配（纹波法）

电子校准件 端口	参数	频率范围	线性模值	实测值	不确定度
	源匹配				
	源匹配				
	...				

表 A.2.8 反射跟踪（纹波法）

电子校准件 端口	参数	频率范围	线性模值	实测值	不确定度
	反射跟踪				
	反射跟踪				
	...				

表 A.3 功能检查：散射参数

电子校准件 端口	参数	频率	标准值	实测值	不确定度
	S11 驻波比				
	S22 驻波比				
				
	S21 衰减				
	S21 相位				

附录 B

校准证书内页推荐格式

表 B.1 外观及工作正常性检查

检查项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

表 B.2 方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪

表 B.2.1 方向性

电子校准件端口	参数	频率	实测值	不确定度
	方向性			
	方向性			
	方向性			
	方向性			
	方向性			
	方向性			

表 B.2.2 源匹配

电子校准件端口	参数	频率	实测值	不确定度
	源匹配			
	源匹配			
	源匹配			
	源匹配			
	源匹配			
	源匹配			

表 B. 2. 3 负载匹配

电子校准件端口	参数	频率	实测值	不确定度
	负载匹配			
	负载匹配			
	负载匹配			
	负载匹配			
	负载匹配			
	负载匹配			

表 B. 2. 4 反射跟踪

电子校准件端口	参数	频率	实测值	不确定度
	反射跟踪			
	反射跟踪			
	反射跟踪			
	反射跟踪			
	反射跟踪			
	反射跟踪			

表 B. 2. 5 传输跟踪

电子校准件端口	参数	频率	实测值	不确定度
	传输跟踪			
	传输跟踪			
	传输跟踪			
	传输跟踪			
	传输跟踪			
	传输跟踪			

表 B.3 功能检查：散射参数

电子校准件 端口	参数	频率	标准值	实测值	不确定度
	S11 驻波比				
	S22 驻波比				
				
	S21 衰减				
	S21 相位				

附录 C

不确定度评定示例

C.1 方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪不确定度评定

对源匹配的校准使用经 TRL 自校准的矢量网络分析仪测量被校电子校准件，在网络分析仪中读取电子校准件校准后的校准参数曲线值，并选择方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪参数。其数学模型为： $D=D+\delta$

式中： D 为方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪；

δ 为误差；

C.1.1 不确定度来源

(1) 网络分析仪自校准不完善引入的不确定度 u_1 ；

表 C.1 3.5mmTRL 校准 VNA 有效系统误差项（根据指标说明书）

TRL 校准件	频段(GHz)	方向性 δ	匹配 μ_1	匹配 μ_2	跟踪 τ_1	跟踪 τ_2
85052C	0.001 to 2	2.51E-03	3.98E-03	3.98E-03	1.15E-03	5.75E-04
	2 to 20	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	5.75E-04	5.75E-04
	20 to 26.5	1.78E-03	1.78E-03	1.78E-03	5.75E-04	5.75E-04

根据表 C.1，假设服从正态分布， $k=2$ ，则网络分析仪自校准不完善引入的不确定度为：

表 C.2 网络分析仪自校准不完善引入的不确定度分量

散射参数	网络分析仪自校准不完善引入的不确定度
方向性	0.0043
源匹配	0.0043
负载匹配	0.0043
反射跟踪	0.0020
传输跟踪	0.0020

(2) 校准过程中测量重复性引入的不确定度 u_2 ；

矢量网络分析仪测量被校电子校准件，频率 13.5GHz，重复测量 10 次，测量结果如下：

表 C.3 重复性测量结果

测量次数	方向性 (dB)	源匹配 (dB)	负载匹配 (dB)	反射跟踪 (dB)	传输跟踪 (dB)
1	40.2	33.0	32.6	1.91	2.39
2	40.8	32.1	32.3	1.86	2.36
3	41.3	32.9	30.6	1.86	2.41
4	39.8	32.2	31.4	1.89	2.35
5	39.6	33.5	32.9	1.91	2.42
6	40.5	33.1	33.1	1.92	2.38
7	38.9	30.9	31.9	1.89	2.34
8	39.6	32.3	32.2	1.90	2.40
9	41.5	31.5	31.4	1.85	2.39
10	42.1	30.3	29.8	1.92	2.41

则单次测量结果的试验标准差 s ，标准不确定度使用试验标准差表示，则

散射参数	标准不确定度
方向性	1.0
源匹配	1.0
负载匹配	1.0
反射跟踪	0.03
传输跟踪	0.03

C.1.3 合成不确定度

各标准不确定度分量互不相关，则

$$\text{合成标准不确定度 } u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_i^2}$$

散射参数	合成不确定度(dB)
方向性	1.0
源匹配	1.0
负载匹配	1.0
反射跟踪	0.03
传输跟踪	0.03

C.1.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 $U=k \times u_c$

散射参数	扩展不确定度($k=2$) (dB)
方向性	2.0
源匹配	2.0
负载匹配	2.0
反射跟踪	0.06
传输跟踪	0.06

C.2 散射参数不确定度评定

用 N5227A 型矢量信号分析仪同被测电子校准件校准，然后测量失配器、衰减器、空气线的散射参数。

C.2.1 不确定度来源

- (1) 矢量网络分析仪测量不准确引入的标准不确定度分量 u_1 ；
- (2) 校准过程中测量重复性引入的不确定度 u_2 ；
- (3) 失配器、衰减器、空气线溯源的不确定度 u_3 ；

C.2.2 不确定度分析

- (1) 矢量网络分析仪测量不准确引入的标准不确定度分量 u_1

由矢量网络分析仪的溯源证书得到散射参数不确定度：10GHz 的时候，反射模值：0.015，传输衰减：0.20dB，传输相位：1.5°， $k=2$ ，则其标准不确定度分量为

表 C.1 网络分析仪引入的标准不确定度

散射参数	标准不确定度
反射模值	0.0075
传输衰减	0.10dB
传输相位	0.75°

- (2) 校准过程中测量重复性引入的不确定度 u_2

在矢量网络分析仪测量散射参数，频率 10GHz，重复测量 10 次，测量结果如下：

表 C.2 重复性测量结果

测量次数	反射模值	传输衰减(dB)	传输相位(°)
1	0.008	40.15	114.8
2	0.008	40.13	115.2
3	0.009	40.14	115.1
4	0.004	40.16	114.7
5	0.005	40.17	114.9

测量次数	反射模值	传输衰减(dB)	传输相位(°)
6	0.009	40.17	115.1
7	0.004	40.16	115.0
8	0.005	40.16	114.6
9	0.004	40.16	115.4
10	0.010	40.17	115.6

计算单次测量结果的试验标准差 s ，标准不确定度使用试验标准差表示，则

表 C.3 散射参数重复性标准不确定度

散射参数	标准不确定度
反射模值	0.0024
传输衰减	0.013dB
传输相位	0.30°

(3) 失配器、衰减器、空气线溯源的不确定度 u_3

由失配器、衰减器、空气线的溯源证书得到不确定度：10GHz 的时候，反射模值：0.005，传输衰减：0.15dB，传输相位：0.6°， $k=2$ ，则其标准不确定度分量为

表 C.1 网络分析仪引入的标准不确定度

散射参数	标准不确定度
反射模值	0.0025
传输衰减	0.075dB
传输相位	0.3°

C.2.3 合成不确定度合成

各标准不确定度分量互不相关，则

$$\text{合成标准不确定度 } u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_i^2}$$

表 C.4 散射参数合成不确定度

散射参数	合成不确定度
反射模值	0.0083
传输衰减	0.13dB
传输相位	0.86°

C.2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 $U = k \times u_c$

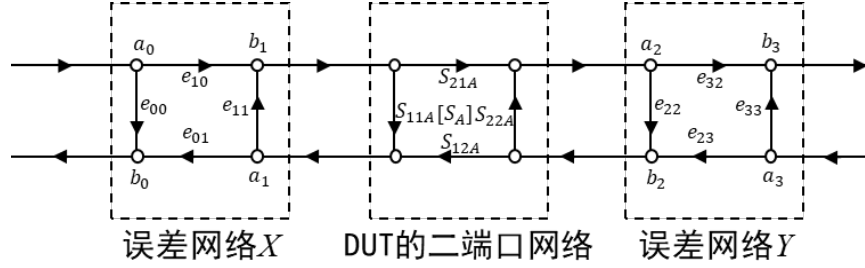
表 C.5 散射参数扩展不确定度

散射参数	扩展不确定度
反射模值	0.017
传输衰减	0.26dB
传输相位	1.7°

附录 D

TRL 校准法求解过程

双端口网络分析仪信号流图如图所示：



图中， e_{ij} 为误差网络的误差参数， S_{ijA} 为被测件的实际 S 参数。用 TRL 校准的目的就是计算出误差网络的误差参数，从而对测得的 S 参数进行误差系数修正，得到被测件的真实 S_{ijA} 。

假设 TRL 校准后的二端口误差网络传输矩阵分别为 T_X 、 T_Y ，电子校准件校准后的实测误差网络传输矩阵为 T_X' 、 T_Y' ，则电子校准件校准后的实际误差网络传输矩阵为 T_{XE} 、 T_{YE}

$$T_X' = [T_{XE}][T_X], \quad T_Y' = [T_{YE}][T_Y], \quad T_X' T_Y' = [T_X][T_{XE}][T_Y][T_Y]$$

其中：

$$T_X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{10}} \begin{bmatrix} e_{10}e_{01} - e_{00}e_{11} & e_{00} \\ -e_{11} & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{32}} \begin{bmatrix} e_{32}e_{23} - e_{22}e_{33} & e_{22} \\ -e_{33} & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_X' = \begin{bmatrix} X'_{11} & X'_{12} \\ X'_{21} & X'_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{10}'} \begin{bmatrix} e_{10}'e_{01}' - e_{00}'e_{11}' & e_{00}' \\ -e_{11}' & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_Y' = \begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} \\ Y'_{21} & Y'_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{32}'} \begin{bmatrix} e_{32}'e_{23}' - e_{22}'e_{33}' & e_{22}' \\ -e_{33}' & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{XE} = \frac{1}{e_{10E}} \begin{bmatrix} e_{10E}e_{01E} - e_{00E}e_{11E} & e_{00E} \\ -e_{11E} & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{YE} = \frac{1}{e_{32E}} \begin{bmatrix} e_{32E}e_{23E} - e_{22E}e_{33E} & e_{22E} \\ -e_{33E} & 1 \end{bmatrix}$$

式中 e_{ij} 为 TRL 校准后的误差网络的误差参数， e_{ij}' 为电子校准件校准后的误差网络的实测误差参数， e_{ijE} 为电子校准件校准后的误差网络实际误差参数。

因此，根据 TRL 校准后的误差项、电子校准件校准后的实测误差项，可以求出电子校准件的实际方向性/源匹配/负载匹配/反射跟踪/传输跟踪。