

基于高频开关网络的自动测试系统的设计与实现

李泽明¹, 王鹤², 胡顺平³, 李明军¹

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;

3. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要: 针对目前航天测试任务需求日益复杂且多样化, 传统测试方法不能满足测试任务强度及测试精度要求的现状, 提出了一种基于高频开关网络的自动测试系统, 分析了高频开关网络的设计原理, 从链路、电路和结构三个方面对高频开关网络的设计予以优化, 给出一个详细的设计方案; 整个高频开关网络能够提供多达 8×72 通道的链路扩展, 经过实验测试验证各项性能指标良好; 以其为基础搭建的自动测试系统可以较好地解决不同被测微波组件产品测试通用性的问题, 具有自动测试与自动校准功能, 测试效率高与测量精度高等优点, 可实现卫星载荷产品的全过程自动测试, 解决传统人工测试效率低且容易出错的问题, 应用前景广阔。

关键词: 高频开关网络; 自动测试系统; 微波组件

Design and Implementation of Automatic Test System Based on High Frequency Switching Network

Li Zeming¹, Wang He², Hu Shunping³, Li Mingjun¹

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;

2. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China;

3. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: In view of the current situation of increasingly complex and diversified space test mission requirements, and the traditional test methods cannot meet the requirements of test mission intensity and test accuracy, an automatic test system based on high-frequency switch networks is proposed, analyzes the design principle, optimizes from three aspects of link, circuit and structure, and gives a detailed design scheme. The entire high-frequency switch network can provide link expansion of up to 8×72 channels, and various performance indicators are verified by experimental tests. The automatic test system based on it can better solve the problem of testing universality of different tested microwave component products. It has the advantages of automatic test and automatic calibration, high test efficiency and high measurement accuracy. It can realize the whole process of satellite load product automatic test, and solve the problem of low efficiency and error-prone of traditional manual test, and has a broad application prospects.

Keywords: high frequency switching network; automatic test system; microwave component

0 引言

随着航天技术的发展, 航天任务需求日益复杂且多样化, 有效载荷产品已达到批量化生产规模, 同时卫星总体针对其载荷产品的处理和通信功能要求也越来越高, 多端口微波组件得到了更广泛的应用^[1-2]。随之而来的是产品测试强度的不断增大, 针对不同微波部件的测试仪器、测试手段也不尽相同^[3], 在测试仪器测试通路有限的情况下, 传统人工测试模式需要测试人员全程随测, 每测一项指标就需要手动更换测试端口, 一套多端口微波组件产品测试完成需要耗费几个小时, 更换数十次端口, 同时由于不断地更换端口, 每次人工旋紧接头时可能有偏差, 导致同款产品间测试的一致性不高测量精度差, 这种测试模式已远

远不能满足需求。因此, 必须采用通用化集成度高的自动测试系统来完成庞大的测试任务^[4-5]。

本文设计了适用于不同卫星载荷微波组件产品的高频开关网络, 依托高频开关网络这一主要单元搭建的自动测试系统, 可实现卫星载荷产品的全过程自动测试, 解决传统人工测试效率低且容易出错的问题。

1 高频开关网络硬件设计

自主设计研发的高频开关网络是自动测试系统的重要组成部分。高频开关网络可以通过本地或上位机程序控制开关网络中多个级联同轴开关的通断, 实现被测件与测试仪器的联通。由于所有被测件都是经由开关网络提供的扩展链路和测试仪器相连通的, 可以说高频开关网络性能指标的优劣直接关系到整个自动测试系统的测试精度, 是整个系统的重难点^[6]。因此如何在满足实际测试需求的前提下, 优化设计高频开关网络显得尤为重要, 在硬件部分将从链路、电路和结构三个方面予以优化。

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2019-12-17。

作者简介: 李泽明(1990-), 女, 黑龙江肇东人, 硕士, 工程师, 主要从事自动测试方向的研究。

1.1 高频开关网络链路设计

通过查阅相关文献及实验室验证可知, 插入损耗作为微波射频方面的一个关键性能指标, 其指标的好坏与射频链路的长度是线性相关的。同一路射频信号, 如果实际通过的射频开关级数越多, 链路的物理长度越长, 其相应的插入损耗等指标就会越大, 整个链路的阻抗匹配性就会越差^[7]。所以在高频开关网络的链路设计中要尽可能地减少开关级数, 缩短射频线缆的物理长度, 优化整个开关网络的链路设计, 在保证被测产品的链路扩展需求的同时也可以降低整个自动测试系统的研制成本。

经过大量调研被测产品的需求^[8], 自动测试系统设计了由 5 台高频矩阵开关组成的高频开关网络, 可实现测试过程中 8×72 通道的链路扩展, 满足目前包括 T/R 组件、行波管放大器、正/负驱微波开关, 相控阵天线等绝大部分微波组件产品的测试需求。根据所连接端口数量的不同允许最多同时测量 4~8 件微波组件产品, 具体原理如图 1 所示。

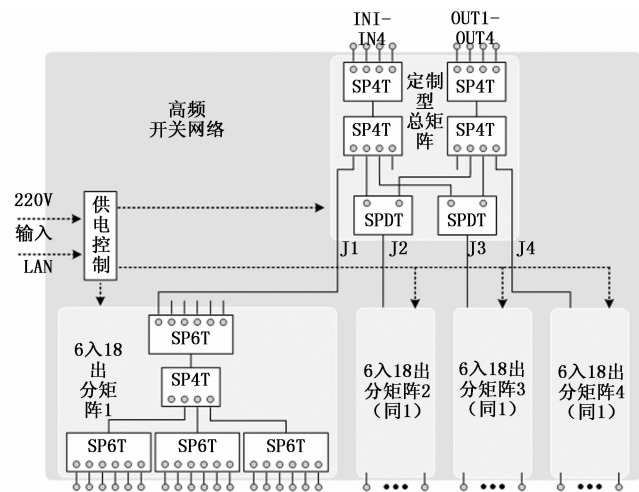


图 1 高频开关网络原理图

由图 1 可知, 高频开关网络包含 1 台定制型总矩阵和 4 台 6 入 18 出分矩阵。定制型总矩阵由 4 个四选一开关 (SP4T) 和 2 个二选一 (SPDT) 开关构成, 外部有 IN1—IN4、OUT1—OUT4、J1—J4 共计 12 个射频接口。其中 IN1—IN4 连接测试仪器的激励端, OUT1—OUT4 连接测试仪器的响应端, J1—J4 经过外部射频线缆依次与 4 个 6 入 18 出分矩阵连接。4 个分矩阵结构相同, 均由 4 个六选一开关 (SP6T) 和 1 个四选一开关 (SP4T) 构成, 前面板设计有 6 个射频接口 (IN1—IN6), 后面板设计有 18 个射频接口 (OUT1—OUT18)。5 台矩阵开关级联而成一套高频开关网络, 整体达到 8×72 通道扩展。需要特别提到的是, 其中与总矩阵 J2 和 J3 端口相连接的分矩阵 2 和分矩阵 3 可通过两个二选一开关的通断实现激励通道/响应通道的切换, 从而使整个高频开关网络为被测产品提供最多 54 个激励 (或响应) 通道, 提高了高频开关网络的灵活性与适用性。采取这种“五合一”的模式搭建高频开关网络可以

减少整体的体积重量, 便于搬运转移及满足日常维护需要; 另外由于矩阵开关设计为同时具备本地控制与程序控制两种模式, 当被测微波产品的测试端口数量需求较小时, 整个高频开关网络可以拆分作为独立的矩阵开关使用, 应用方面更为灵活多变。

另一个决定高频开关网络指标好坏的方面是机箱内部射频开关及级联射频电缆的选型。

目前主流射频开关分为机械式同轴微波开关与固态电子式微波开关。固态电子式微波开关具有造价低, 体积小, 切换速度快等特点, 同时由于内部没有切换的部件, 因此使用寿命更长。但其缺点也很明显, 频率覆盖的范围不够宽, 自身的插入损耗较大 (40 GHz 时超过 -5 dB), 不适用于性能指标要求较高的应用场合。

与固态电子式微波开关相比, 机械式同轴微波开关频率覆盖范围足够宽且具有良好的稳定性, 静电作用反应对其基本没有影响, 自身的插入损耗远小于固态微波开关, 通常能做到 40 GHz 时不大于 -2 dB, 通道间切换也可达到 ms 级, 是高频开关网络设计中的首选开关类型。市场上能够提供该类型开关的厂商包括美国的 Keysight 公司、Dow-Key 公司、Pasternack 公司, 法国雷迪埃公司, 德国 Narda 公司等, 国内也有很多生产企业, 包括航天科技集团 504 所, 中电科技集团 41 所等等。综合考虑成本及开关指标问题, 本设计采用法国雷迪埃公司的产品, 具体指标如表 1 所示。

表 1 射频开关指标

指标\类型		SPDT	SP4T	SP6T
频段		DC~40GHz	DC~40GHz	DC~40GHz
端口驻波比	DC~6	1.30	1.30	1.30
	6~12.4	1.40	1.40	1.40
	12.4~18	1.50	1.50	1.50
	18~26.5	1.70	1.70	1.70
	26.5~40	1.90	2.20	2.20
插入损耗/dB		≤0.80	≤1.10	≤1.10
隔离度/dB		≥50	≥50	≥50
负载/Ω		50	50	50

机箱内部可采用的射频电缆分为柔性线缆、半柔性线缆及半刚性线缆。考虑到半刚性同轴线缆易于定型, 其高强度的外导体在提供良好屏蔽特性的同时, 也能很好地保证线缆结构尺寸的稳定性, 便于机箱内部的走线布局。本设计选取指标优异的进口半刚性同轴线缆作为内部射频开关间的级联射频电缆。

端口驻波调试: 矩阵开关微波接口处的级联形式为 2.92 型面板转接器+半刚电缆+微波开关。以 40 GHz 为例, 其中 2.92 型面板转接器驻波接近为 1.00, 半刚电缆驻波为 1.15, 射频开关驻波为 1.70 (二选一开关和多选一开关标称值为 1.90、2.20, 实测 1.70), 可见驻波主要取决于射频开关。此外各微波元器件级联时的失配状态也在一定

程度上影响到驻波指标。可采取的措施是,在线缆布局设计中尽量减小级联和避免电缆的弯折,还应注意弯折的角度,以减小微波传输的不连续性对驻波的恶化;确保单根电缆的驻波控制在 1.2 以内(40 GHz 时);另外在通道调试时,针对同批次多级开关驻波曲线基本一致,导致驻波累加的问题,对级联电缆进行驻波曲线仿真设计,通过电缆对链路进行匹配,使电缆和开关的驻波高点不重合,确保通道驻波指标满足要求。

各通道插入损耗调试:微波元器件的插入损耗指标是随着频率的增加逐渐恶化的。从表 1 可知,在 40 GHz 时,四选一开关和六选一开关的损耗为 1.10 dB,二选一开关的损耗为 0.80 dB,2.92 型面板转接器损耗为 0.5 dB,半刚同轴电缆损耗为 2.75 dB(电缆损耗为 3.5 dB/m,矩阵内预计电缆长度为 50 cm,考虑到电缆接头损耗在 1 dB 左右),连接造成的失配损耗为 0.4 dB,这样各通道插入损耗可以控制在 8 dB 以内。

幅度相位一致性调试:矩阵开关的幅度相位一致性主要受各射频开关和射频电缆幅相一致性的制约。在机箱内线缆布局设计中,需要注意结构的对称性,使每条线缆具有相同的物理长度,通过等长设计和通道电缆补偿来保证指标。本设计选用的射频电缆在全频带内的幅频特性较好,可以保证相同规格的电缆之间,在全频带内同一频点处的幅相接近。另外,所选用的各射频开关之间以及同一开关不同通道间的幅频特性较好,由开关引起的幅度不一致性可通过批量电缆筛选的方式予以补偿。

经过指标调试后,预计高频开关网络能够达到以下性能指标:

工作频段:DC~40 GHz;

最大承受功率:不大于 2 W;

各端口驻波比:DC~26.5 GHz 时不大于 1.7;
26.5~40 GHz 时不大于 2.0;

各通道插入损耗:不大于 9 dB;

通道间幅度一致性: $\leq \pm 1.0$ dB;

通道间相位一致性: $\leq \pm 40^\circ$;

通道间隔离度: ≥ 50 dB。

1.2 高频开关网络电路设计

高频开关网络的电路控制主要包括系统主控计算机核心板和射频开关继电器控制板两部分。主控计算机核心板选用了市面上主流厂商研扬科技的产品,该产品具有体积小、接口资源丰富等优点,可以提供 4 个 RS232 串行接口、两个 USB3.0 接口、一个 LAN 局域网口、一个 CRT 显示端口、一个 LVDS 显示端口等,满足系统需求。

射频开关继电器控制板为自主设计研发产品,以 ATMEL 的 AT91SAM7X256 ARM 处理器^[9]和 Altera 的 EPM7256SRI208-10 CPLD 处理器^[10]为主要架构,配合 MAX485 接口、CAN 接口等单元,可以对开关矩阵箱中各个射频开关进行快速切换,从而形成多路组合开关协同工

作。继电器控制板需要 5 V 和 24 V 两路供电,其中 5 V 提供给各芯片电路,24 V 为包括六选一开关、四选一开关和二选一开关三种类型的射频开关提供驱动供电。为了满足多型开关矩阵机箱的开关控制,控制板能够为最多 6 个 SPDT 矩阵开关和 12 个 SP4T/SP6T 矩阵开关提供供电及控制信号,具体原理如图 2 所示。

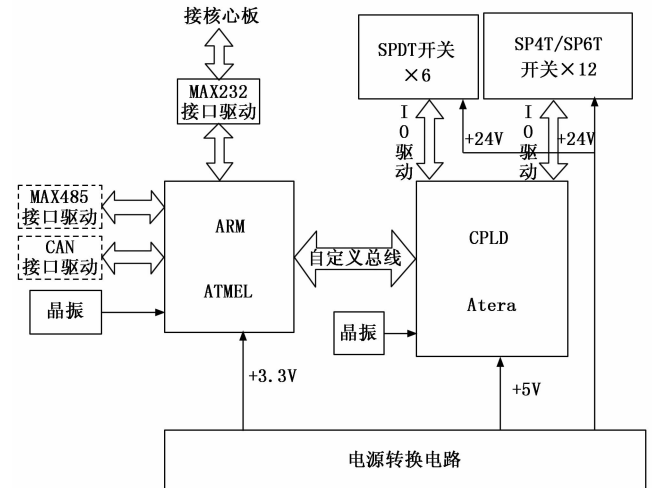


图 2 继电器控制板原理

实际工作过程中,通过前面板的触摸显示屏或程控选择相应的切通通道,主控核心板中安装的控制软件将切换命令解析为每一个射频开关的控制指令,经由 RS232 串行接口与继电器控制板进行串行通信发送控制信号。继电器控制板接收到控制指令后,驱动电路将该指令转化为合适的电压和驱动电流,进行开关控制,从而实现多路微波信号传输切换,控制矩阵开关射频通道不同链路的选择。

1.3 高频开关网络结构设计

单台高频矩阵开关的组成包括多端口微波开关、半刚性同轴电缆、转接器、数据及电源连接器、矩阵开关控制电路、矩阵电源稳压电路、开关箱结构件等部分,考虑到以后可能的扩展需求,将微波开关通道、开关控制电路及电源稳压电路分别进行模块化设计和集成,依次规划为电源区、控制区和开关链路区。所有矩阵开关机箱采用电磁兼容模式,全铝合金材质能够屏蔽外界信号的干扰,机箱散热通过安装在机箱内部的电风扇进行散热。成品为标准的 4U 高 19 英寸上架结构,尺寸 420 mm(长)×450 mm(宽)×170 mm(高)。

2 高频开关网络软件设计

高频开关网络的控制软件在 WINDOWS 操作系统环境下采用 Visio Studio 2010 编译软件进行开发,具体控制软件流程如图 3 所示。按照图 3,采用 C++ 语言进行源代码编写工作,经过调试及编译仿真,生成可执行程序(*.exe 格式)。设备上电后,自动运行控制软件,软件首先对各射频开关发出复位指令完成系统初始化,等待接收本地控制指令或上位机程序控制指令,收到控制指令后,以通道链

路概念为核心, 控制软件将其解析为各射频开关的切换命令, 通过串口发送给继电控制板, 由控制板控制链路中的多个微波开关按信号方向和工作先后顺序切换实现通道控制完成通道切换。

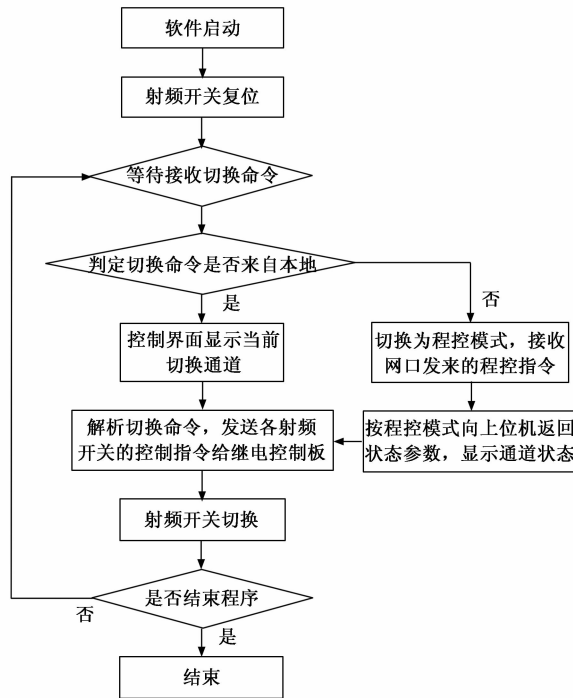


图 3 高频开关网络控制软件流程图

软件具备远程控制和本地控制两种模式, 远程控制优先; 本地控制支持触摸屏控制方式, 控制界面可实时显示开关切换次数, 总矩阵控制软件本地控制界面如图 4 所示。



图 4 高频开关网络控制软件界面图 (总矩阵)

3 实验结果与分析

对搭建好的高频开关网络进行实验验证测试, 测试所需台式仪器为是德科技生产的矢量网络分析仪 N5244B 及配套测试电缆一组。矢量网络分析仪上电校准后, 按图 5 所示与被测矩阵开关连接, 依次设置测量参数 S11、S22 测量前后面板的端口驻波比, S21 测量通道插入损耗, S12 测量幅度相位一致性 (以 IN-1~OUT1 通道为基准将 S12 参数中幅度相位数值归一化)。通过前面板触摸显示屏手动控制

矩阵开关的通道切换, 得到每个通路的测试截图如图 6 所示。对全部测试截图中数据进行整理, 得到实验结果, 以 6 入 18 出矩阵 1 为例节选部分实验测试数据详如表 2 所示。

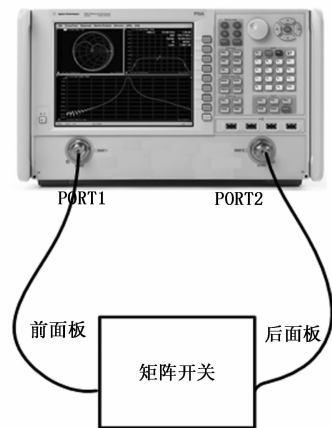


图 5 高频开关网络测试连接图

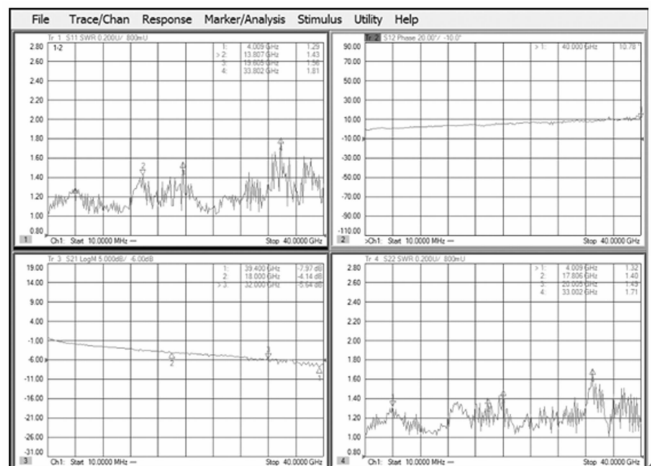


图 6 高频开关网络实验验证测试截图

表 2 6 入 18 出矩阵 1 实验测试数据 (节选)

通道	端口驻波比 (前面板/后面板)		通道 插入 损耗 /dB	相位 一致 性 /(°)	幅度 一致 性 /dB
	DC~ 26.5GHz	26.5~ 40GHz			
IN-1~OUT-1	1.61/1.68	1.77/1.82	7.30	0.01	0
IN-1~OUT-2	1.57/1.55	1.80/1.82	7.37	13.09	0.06
IN-1~OUT-3	1.61/1.65	1.84/1.95	7.58	7.71	-0.25
IN-1~OUT-4	1.55/1.53	1.84/1.85	7.49	14.85	0.04
IN-1~OUT-5	1.58/1.62	1.82/1.83	7.31	12.8	0.09
IN-1~OUT-6	1.57/1.59	1.82/1.87	7.58	15.8	-0.15
IN-1~OUT-7	1.59/1.57	1.81/1.93	7.35	20.49	-0.01
.....				
IN-6~OUT-16	1.62/1.63	1.84/1.89	7.45	17.18	0.06
IN-6~OUT-17	1.62/1.63	1.85/1.88	7.45	12.67	0.03
IN-6~OUT-18	1.60/1.58	1.80/1.93	7.32	10.34	0.11

从表 2 可见, 高频开关网络整体性能指标良好, 端口驻波比、各通道插入损耗及通道间幅度相位一致性的实验

测试数据能够满足 1 节中预期的指标要求。当其应用于自动测试系统中时，可以最小限度的降低由于使用开关网络扩展测试通道而对被测产品测试数据产生的影响。实验测试数据证明整个高频开关网络设计与实现过程中选取的射频开关与射频电缆之间的匹配性较好，指标调试方法合理，可应用于后续类似矩阵开关的设计生产中。

4 高频开关网络的系统应用

高频开关网络自动测试系统由高频开关网络和围绕它的系统应用组成，主要包括工控计算机、激励及测试仪器、提供遥控遥测信号的指令驱动设备等。本系统配备的台式仪器为是德科技生产的信号源 E8257D、矢量网络分析仪 N5244B、频谱仪 N9030A、频率计 53149A 及功率计 N1914A，整体结构如图 7 所示。

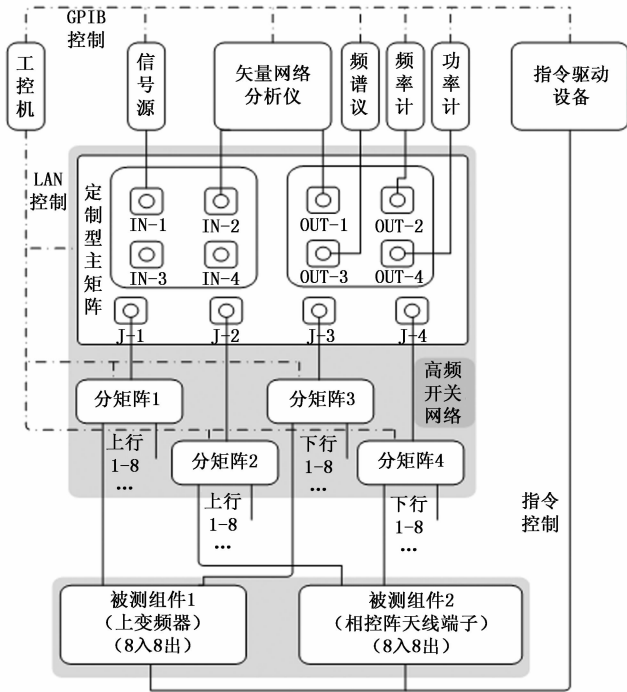


图 7 高频开关网络自动测试系统组成及结构

使用自动测试系统进行测试工作时，测试人员首先根据被测微波组件的测试需求在系统搭载的自研软件平台上编辑相应的测试流程，选定测试项目，工控计算机通过 LAN 或 GPIB 的通信方式对各仪器设备发送程控指令，依托高频开关网络提供的通路扩展实现对多端口微波组件产品的自动测试。自动测试系统具备如驻波、谐波抑制、增益、带内响应、带外增益、幅相一致性、增益稳定度、噪声系数、相位噪声、非线性特性 (P-1) 等相关参数的测试能力，同时可利用矢网自校准功能，对多个通道进行自动切换，实现多通道 S 参数的自动和循环测试，自动测试系统测试结果如图 8 所示。现以图 7 中测试 8 入 8 出的上变频器和相控阵天线端子的插入损耗为例进行说明。

输入激励信号流向：矢量网络分析仪激励端口 (port1) 发出激励信号，信号通过开关接口 IN-2 进入定制型主矩

阵，主矩阵输入端切换到 J-1，信号进入 6 入 18 出分矩阵 1，分矩阵依次切换 1-8 输出通道，信号分别流入被测上变频器的 8 路输入端予以激励。

输出响应信号流向：激励信号进入上变频器产生 8 路响应信号，信号流入分矩阵 3，矩阵依次切换 1-8 输出通道，主矩阵输出端切换到 J-3，8 路响应信号依次经由 J-3、OUT-1 进入矢量网络分析仪响应端口 (port2) 进行分析，软件平台自动读取矢网 S21 参数得到被测上变频器对应各通路的插入损耗值。

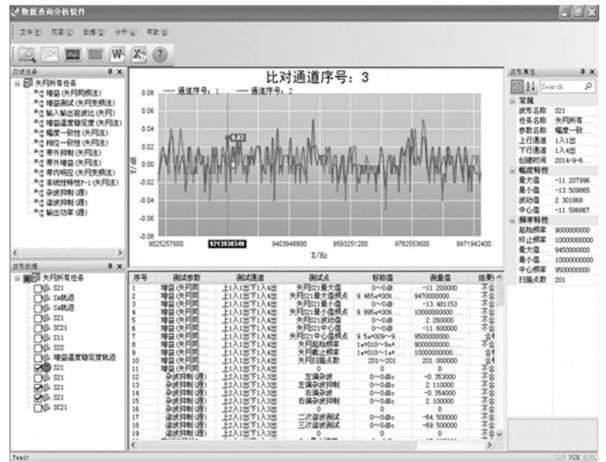


图 8 自动测试系统测试结果

5 结束语

本文设计了一种依托高频开关网络的自动测试系统，能够适配目前大多数微波组件产品的测试需求，解决了不同卫星载荷微波组件产品测试的通用性问题，提高了工作效率和人员利用率。目前已有多套自动测试系统投入使用，市场反应良好，应用前景广阔。

参考文献：

- [1] 李立功. 现代电子测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 庞之浩. 我国通信卫星平台与应用发展 [J]. 现代电信科技, 2014, 44 (7): 13-17, 22.
- [3] 李东蔚. 卫星地面测试系统多通道射频开关矩阵技术研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [4] 刘旭阳. 自动测试系统在新趋势下的发展与应用 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (11): 4-5.
- [5] 齐永龙, 宋 斌, 刘道熙. 国外自动测试系统发展综述 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (12): 1-4, 7.
- [6] 李士刚, 王文伟, 姚崇斌. 微波开关矩阵设计与使用 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28 (7): 69-70, 75.
- [7] 黄志涛, 王晓金. 微波传输线理论与实用技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [8] 蒋晓红, 李为玉, 石 慧. T/R 组件自动测试系统的研制 [J]. 测控技术, 2008 (2): 11-12, 21.
- [9] Atmel, Inc. SAM7X256 Datasheet [Z]. 2014.
- [10] Altera, Inc. EPM7256S Datasheet [Z]. 2005.