

# 基于组合方式的延时精确测量方法

张志聪

(四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心 成都 610036)

**摘要:** 研究了延时线的精确时间测量方法。首先介绍了传统群时延测量方法的误差,并分析了误差形成的机理,然后提出采用基于群时延和相位时延相结合的方式进行延时精确测量的方法。采用二次测量的方式,结合群时延的粗测量和相位时延的精测量,完成延时的精确测量,并通过仿真、试验验证了该方法在延时测量方面的精度更高。

**关键词:** 时间测量; 群时延; 相位时延; 组合测量

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)05-0105-06

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20211103001

**引用格式:** 张志聪. 基于组合方式的延时精确测量方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 105–110.

## Time delay accurate measurement base on the combination mode

ZHANG Zhicong

(Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave Circuit High Density Integration, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** This paper investigates the precise measurement of the time-delay lines. Firstly, the error of traditional group delay measurement is introduced and the mechanism of error formation is analyzed, and then propose the time delay accurate measurement based on the combination of group delay and phase delay. The method adopts the secondary measurement, combined with the coarse measurement of group delay and the accurate measurement of phase delay, to complete the accurate measurement of time delay. We verify that the proposed method has higher measurement accuracy in delay measurement through simulation and experiment.

**Key words:** Time measurement; Group delay; Phase delay; Combination measurement

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20211103001

**Citation:** ZHANG Zhicong. Time delay accurate measurement base on the combination mode[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 105–110.

## 引 言

在阵列系统中,天线波束的扫描一般是通过对各个单元天线进行相位加权实现的。而对于宽带系统而言,一种是工作的调谐带宽大,一种是瞬时信号带宽大。由于仅仅相位加权会造成不同频率对应的延时不同,造成部分频率的波束指向误差较大,因此在宽带阵列中的天线需要有实时延时单元,以补偿各个天线至目标距离差异造成的时间延时误差<sup>[1]</sup>。实时延时单元可以采用射频延时线,射频延时线采用一段传输线对信号进行延时,可直接对所有频率信号进行相同时间延迟,补偿天线之间的空间路程差,从而适应宽带扫描阵列的场合。但是由于延时线的设计、加工等因素会造成延时线偏离理想特性,对不同的频率延时不同,即延时线存在一定的色散效应,这会造成不同频率波束指向的误差。因此,延时线的延时频率特性也非常关键,一般采用整个带宽内的延时误差来表征该参数。本文介绍了在对这个关键延时指标的测试中,传统群时延测量方式的局限性,提出了一种简洁、精确的组合测量方法。

## 1 延时测量

对于经过网络后的相位或延时的变化有三种描述方式:相位延时、群时延和包络延时<sup>[2,3]</sup>。但由于相

位延时存在相位模糊的问题, 而包络延时需要调制载频, 测量相对比较复杂, 工程上经常使用的测量手段基本上还是基于群时延的测量方式, 可以直接使用矢量网络分析仪(矢网)进行便捷的测试。

群时延定义为相位对频率的微分, 如图 1 所示, 可写为:

$$t = -\frac{d\theta}{d\omega} \quad (1)$$

采用群时延方法测量长延时量时, 相位模糊会造成测量的错误。可以通过调节整个带宽内的点数, 减小相邻两点之间的频差来解决相位模糊的问题<sup>[4]</sup>, 但这会造成分辨率和准确度之间的矛盾。也有一些基于傅里叶变换<sup>[5]</sup>、基于 Taylor 级数展开的测量方法<sup>[6]</sup>来解决分辨率和准确度之间的矛盾, 但 these 方法都相对计算量大, 且不方便, 因此在实际工程中应用较少。

在使用矢网直接测量时发现: 即使相位不模糊, 采用群时延测量仍存在一定的误差, 而把该延时误差折算到相位, 会对应较大的相位误差, 特别在延时线多级级联时, 积累的相位误差会更大, 从而影响阵列加权的效果。

比如有一款频率为 0.8 GHz~2 GHz、延时量为 1.4 ns 左右的延时线, 测量整个带宽的群时延波动为 ±70 ps, 如图 2 所示。若按照 1.5 GHz 的频率进行折算, 则对应 37.8°的相位偏差, 多个级联的相位误差会更大, 导致根本无法使用, 这个误差会容易造成该延时线无法使用的结果。

在分析使用场景时发现: 大部分通信、雷达设备, 虽然阵列扫描的带宽很宽, 但信号的瞬时带宽并不宽。因此在波束宽带扫描时, 更希望的是整个频段内部延时后各频点的附加相位为零, 从而实现阵面天线在整个频段内都能对特定方向的信号进行同向叠加。在实际宽带扫描使用中, 更为关心的是延时后的附加相移。若频点延时后的附加相移小, 则对系统的影响就越小。

对之前那款延时线重新测量, 通过矢网的相位测量功能直接测量相位, 如图 3 中的左图。再通过矢网的延时补偿功能, 对电延时进行 1.45 ns 的补偿, 发现整个频段的剩余相位较小, 小于 5°, 如图 3 中的右图, 比采用群时延测量的时间误差反算的相位误差小很多, 因此从附加的相移看, 这款延时线又是可用的。

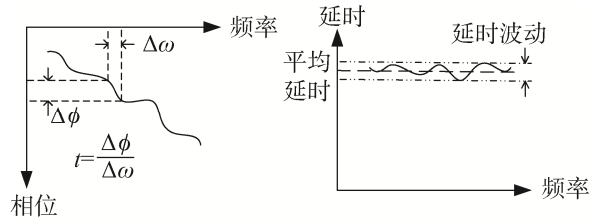


图 1 群时延定义

Fig. 1 Group delay definition

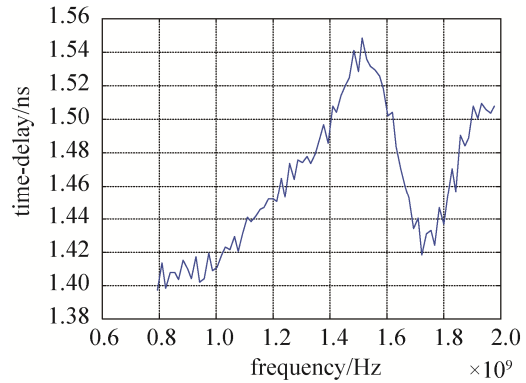


图 2 采用群时延测量的延时特性

Fig. 2 Time-delay characteristics by the group delay measurements

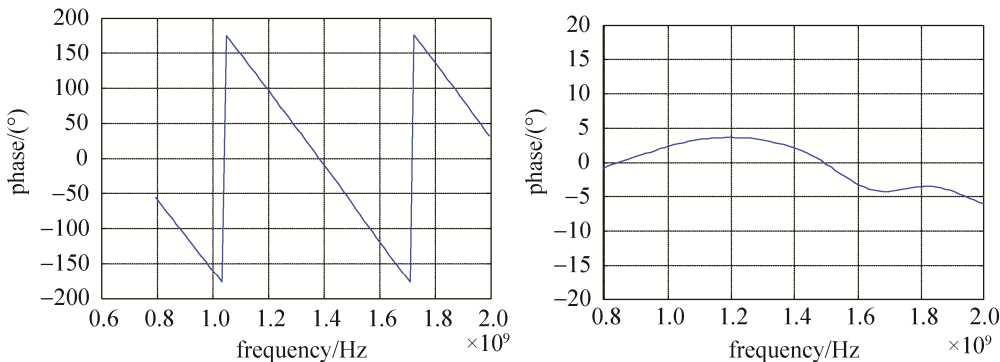


图 3 延时线的相位特性

Fig. 3 Phase characteristics of the delay line

由此可见，同一个延时线采用群时延测量的延时波动，并不能反映延时补偿后的附加相位特性，其原因或者是群时延的测量方法精度不高，或者是群时延测试的结果对该应用场景不适用。

### 2 群时延测量的误差分析

#### 2.1 误差分析

群时延的定义是相位对频率的微分，实际测试中由于不好直接测量此微分，因此采用一定频差的两个点的相位差进行计算，可写为：

$$t = -\frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \tag{2}$$

式中， $t$  表示群延时， $\Delta\theta$  表示相位差， $\Delta\omega$  表示频率差。实际测试中相位差  $\Delta\theta$  都存在测试误差，因此可以把相位拆解为测试值  $\Delta\theta_0$  和误差  $\theta'$ ，可写为：

$$t = -\frac{\Delta\theta_0 + \theta'}{\Delta\omega} = -\left(\frac{\Delta\theta_0}{\Delta\omega} + \frac{\theta'}{\Delta\omega}\right) \tag{3}$$

在群时延测试中一般频差  $\Delta\omega$  较小，由式 (3) 可以看到：频差越小，相同相位测量误差  $\theta'$  造成测量误差越大。由于相位存在  $360^\circ$  的模糊，按照式 (2) 计算群时延的前提是  $\Delta\theta < 360^\circ$ 。因此，测试时需要矢网的点数足够（即频率孔径  $\Delta\omega$  不能太大）<sup>[7]</sup>，以满足相邻频点之间的相位不模糊，这使得频差不可能任意增加，同时频差的增加意味着中间很多频点的延时特性没有被测量到。也有采用电延时补偿与群时延法相结合的方式<sup>[8]</sup>，来解决长延时线在使用群延时方式测量时两点之间相位翻转的问题，但该方法没有解决测试误差较大的问题。

#### 2.2 测试数据

对之前的延时线进行不同点数的测量发现：采取群时延的测量方法，频率步进越细，测试的延时结果变化相对更大，如图 4 和图 5 所示，数据见表 1。因此，实际测量也验证了采用群时延的测量精度和频差有关，且频差越大测试精度越高。

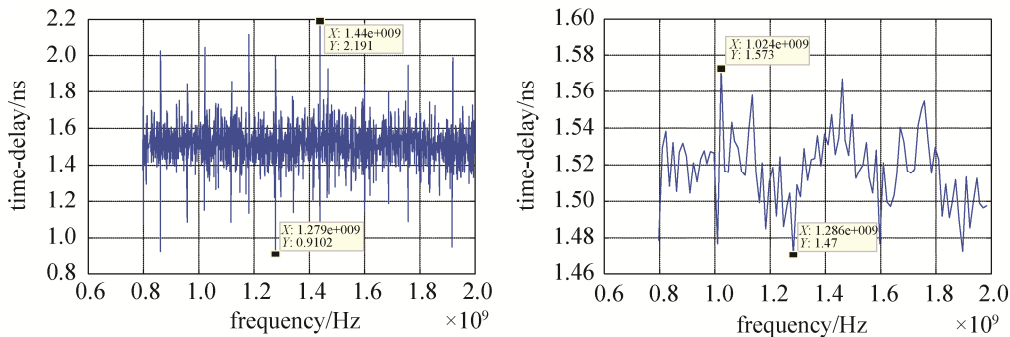


图 4 步进 1.25 MHz (左) /12.5 MHz (右) 测量的延时

Fig. 4 Time delay measurement of step 1.25 MHz(left)/12.5 MHz(right)

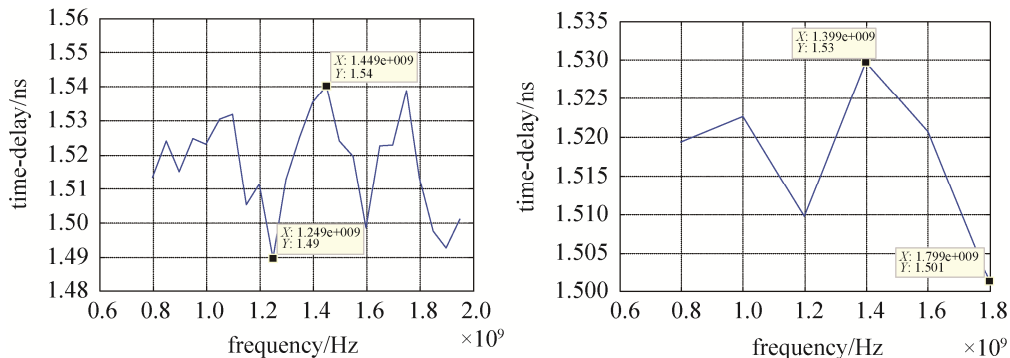


图 5 步进 50 MHz (左) /200 MHz (右) 测量的延时

Fig. 5 Time delay measurement of step 50 MHz (left)/200 MHz(right)

### 2.3 仿真分析

安捷伦矢量网络在 2 GHz 左右的相位测量的不确定性大约为  $0.3^\circ$ <sup>[9]</sup>。为验证相位误差对群时延的影响, 构造了一个  $0.3^\circ$  的相位随机误差, 频率为 0.8 GHz~2 GHz 的 1.5 ns 的延时线, 相邻两点的频率步进为 10 MHz (即带内 120 个点), 按照群时延定义进行仿真, 得到延时范围在 1 347 ps~1 636 ps, 存在约  $\pm 140$  ps 的误差, 如图 6 所示。

### 2.4 分析结论

群时延实际上是对相位突变的描述, 有可能相位在整个带宽内变化范围不大, 但由于变化得很剧烈, 有可能导致群时延变大。因此, 群时延实际反映的是相位变化的剧烈程度, 不能完全反映相位的最大偏差。

如图 7 所示, 虽然这两个情况下相位的变化范围相同, 但是相位变化快的对应的群时延波动更大, 偏离平均延时也越大。对于宽带阵列扫描延时更关心的是延时后各个频点不同的相位误差, 而不是相位变化的快慢, 因此在实际应用中, 这两种不同特性的延时对波束指向的影响基本相当。采用群时延方式测量的延时特性存在一定的误差, 因而并不能完全反映其延时的性能。

从群时延的定义、实际测量的数据和仿真数据来看, 采用群时延方式测量延时对相位误差非常敏感。虽然可以通过增加频差  $\Delta\omega$  来减小测量误差, 但是  $\Delta\omega$  的减小意味着频率的分辨率变差, 很多频点的延时特性实际上没有测量到。

因此, 采用群时延方式测试延时线的延时在阵列扫描中并不适用, 不能准确地反映每个频点的真实延时。

## 3 新的测量方法

### 3.1 组合测量方法的误差分析

结合补偿延时后的附加相位较小的现象, 从相位延时的定义来讲, 该附加相位是延时造成, 如果将相位直接转换为延时, 也可以表达这部分附加相移对应的延时。

延时会造成相位的变化, 如果测量了对应频率的相位, 则可以根据式 (4) 计算延时。但对式 (4) 计算必须保证相位不出现模糊, 如果相位模糊, 仅知道相位, 无法得知时间。

$$\theta = \omega t \tag{4}$$

因此, 如果将延时分为两部分, 一部分是大步进延时  $t_0$ , 另一部分是小步进延时  $t_1$ ,  $t_1$  不会使相位模糊, 即  $\theta - \omega t_0 < 360^\circ$ , 则可以将式 (4) 分解为:

$$\theta = \omega(t_0 + t_1) = \theta_0 + \theta_1 \tag{5}$$

式中  $\theta_0$  表示  $t_0$  对应的相位,  $\theta_1$  表示  $t_1$  对应的相位。因此, 将测试的相位减去一个和真实延时接近的相位值, 使剩余相位小于  $360^\circ$ , 再将剩余相位  $\theta_1$  除以频率可以得到对应的延时  $t_1$ , 延时  $t_1$  加上之前减去的延时  $t_0$  就得到真实的延时。

表 1 不同步进群时延测试延时结果  
Table 1 Groups delay test results of different steps

频率步进	群时延的测量结果	带内延时波动
频率步进 1.25 MHz	0.91 ns~2.191 ns	1 281 ps
频率步进 12.5 MHz	1.47 ns~1.573 ns	103 ps
频率步进 50 MHz	1.49 ns~1.54 ns	50 ps
频率步进 200 MHz	1.501 ns~1.53 ns	29 ps

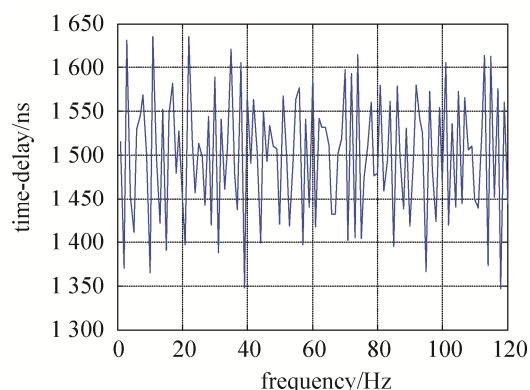


图 6 群时延方式测量误差 (相位误差  $0.3^\circ$ )  
Fig. 6 Measurement error by group delay measurement (phase error  $0.3^\circ$ )

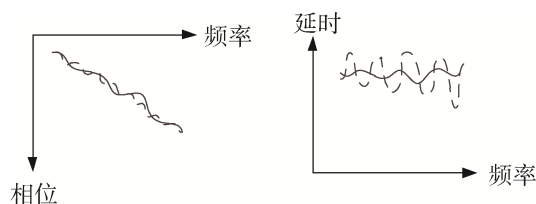


图 7 不同相位变化特性对应的群时延  
Fig. 7 Group delay corresponding to different phase change characteristics

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \omega t_1 = \theta - \omega t_0 \\ t_1 &= \frac{\theta_1}{\omega} = \frac{\theta - \omega t_0}{\omega} \end{aligned} \tag{6}$$

因此，通过将相位减去一个接近真实延时对应的相位，再计算剩余延时的方式有效地解决了相位模糊的问题，而这个接近真实的延时可以通过群时延方式进行测量。由于只是借助群时延测量的一个粗延时，精确的延时由相位  $\theta_1$  计算，因此群时延的误差对最终测量没有影响。同样，将相位  $\theta$  表示为测量值  $\theta_0$  和误差  $\theta'$  代入式 (6)，得到：

$$t_1 = \frac{\theta_0 + \theta' - \omega t_0}{\omega} = \frac{\theta_0}{\omega} + \frac{\theta'}{\omega} - t_0 \tag{7}$$

根据式 (7)，由于  $\omega$  是信号的频率，相对于采用群时延测量的频差  $\Delta\omega$ ，一般  $\omega \gg \Delta\omega$ ，因此对于同样的相位测量误差，新方法的时间误差更小，并且新方法和相邻点的频差没有直接的关系，这就意味着在整个频段可以取任意更多的点进行测试，从而全面了解整个带宽内的特性。

### 3.2 仿真分析

针对之前的  $0.3^\circ$  的相位随机误差场景，按照新方法得到的延时范围在  $1\,499.2\text{ ps} \sim 1\,500.8\text{ ps}$ ，如图 8 所示。由此可见，采用新方法测试的延时更能反映绝对延时，即更能反映经延时后的相位频率特性，更贴切实际使用需求。

### 3.3 新方法的操作步骤

在实际测量中，由于长延时会使相位翻转，因此需要先将相位补偿到一个周期内。新方法采用二次测量的方式，具体的测试步骤如下：① 采用群时延的方法测量一个初始延时量；② 切换到相位测量的方法，并先将之前测试的延时进行补偿，再测试剩余的相位；③ 通过剩余相位和频率计算剩余延时；④ 将剩余延时和补偿的延时相加，得到最终的测试结果。

### 3.4 实际验证

采用新方法对之前的延时线进行测试，测试结果如图 9 和图 10 所示，数据见表 2。可以看到：该方法测量的延时变化  $\pm 7\text{ ps}$ ，测量的误差更小，且和选择的频率步进没有关系，因此这种方式更能直观地表达延时补偿后的附加相位误差，更贴近使用。

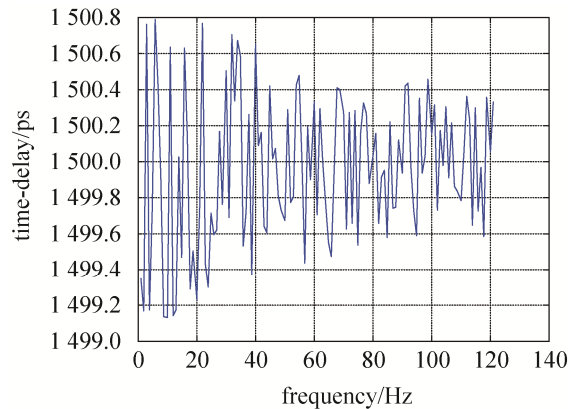


图 8 新方法的延时测量误差 (相位误差  $0.3^\circ$ )  
Fig. 8 Delay time measurement error by the new method (phase error  $0.3^\circ$ )

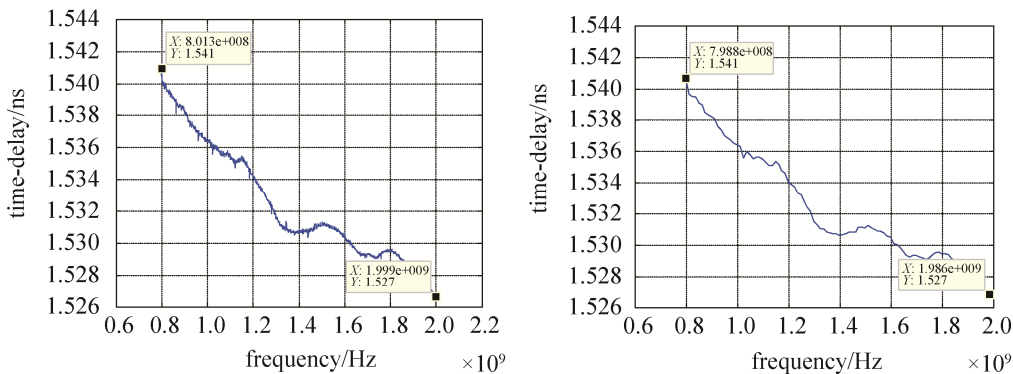


图 9 步进 1.25 MHz (左) / 12.5 MHz (右) 测量的延时  
Fig. 9 Delay measurement of step 1.25 MHz(left)/12.5 MHz(right)

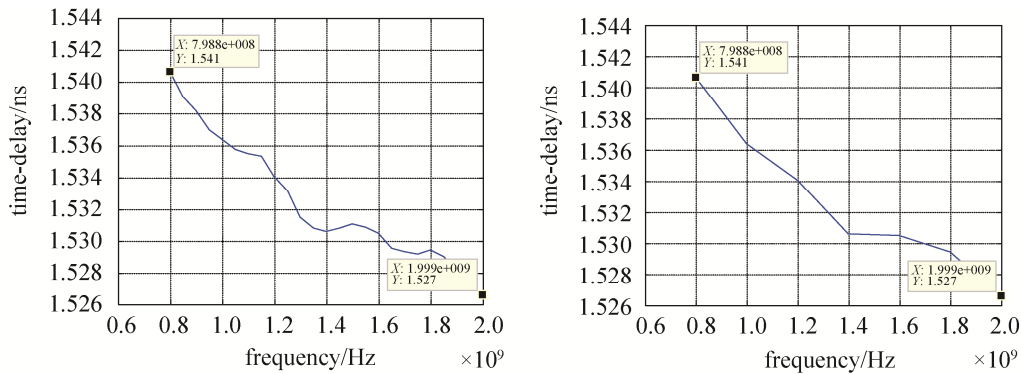


图 10 步进 50 MHz (左) /200 MHz (右) 测量的延时

Fig. 10 Delay measurement of step 50 MHz(left)/200 MHz(right)

表 2 新方法测试延时误差

Table 2 The delay time error by the new method

频率步进	补偿延时后直接计算延时的方法	带内延时波动
频率步进 1.25 MHz	1.527 ns~1.541 ns	14 ps
频率步进 12.5 MHz	1.527 ns~1.541 ns	14 ps
频率步进 50 MHz	1.527 ns~1.541 ns	14 ps
频率步进 200 MHz	1.527 ns~1.541 ns	14 ps

#### 4 结束语

从推导、仿真和测试情况可以看到, 采用群时延方式测量延时, 往往由于频率分辨率限制而存在一定的测量误差, 并不适合精确测量的场景。而组合测量方式, 利用群时延进行初步测量和补偿之后再行相位测量, 从而既避免了相位模糊的问题, 又能利用相位测量时由于对应的频率很高, 随机相位误差造成的测量误差较小的特性。新的组合测量方法的精度明显高于传统的群时延方法, 且该方法能够依据矢量网络分析进行简单快速的测量, 不需要复杂的运算, 因此非常适合于工程上应用。

#### 参考文献

- [1] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 胡以镛. 群时延特性及其测量[J]. 通信与广播电视, 1992, (4): 65-69.
- [3] 朱旭东. 系统绝对群时延测量的研究[J]. 现代雷达, 2006, 28(11): 75-76.  
ZHU Xudong. Study of measurement for absolute group delay[J]. Modern Radar, 2006, 28(11): 75-76.
- [4] 周峰, 买望, 牟丹, 等. 群时延测量的约束条件[J]. 计量技术, 2014, (8): 231-232.
- [5] 刘涛. 群时延的快速测量方法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(2): 369-370.  
LIU Tao. Fast measurement of group delay measurement[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(2): 369-370.
- [6] 朱祥维, 李垣陵, 雍少为, 等. 群时延的新概念、测量方法及其应用[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1819-1821.  
ZHU Xiangwei, LI Hengling, YONG Shaowei, et al. A new definition, measurement method of group delay and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1819-1821.
- [7] 黄凯冬, 尹仲琪, 胡勇. 利用矢量网络分析仪测量时延特性的方法[J]. 电讯技术, 2007, 47(1): 193-194.  
HUANG Kaidong, YIN Zhongqi, HU Yong. Delay measurement methods by using vector network analyzer[J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(1): 193-194.
- [8] 孙现福, 马玉培, 王国彬. 基于安捷伦 VNA 网络分析仪实现长延时器件的测量[J]. 电子测试, 2007, (10): 73-75.  
SUN Xianfu, MA Yupei, WANG Guobin. Measurement of delay device based on agilent delivers network analyzer[J]. Electronic Test, 2007, (10): 73-75.
- [9] Agilent Technologies. Agilent PNA microwave network analyzers[DB/OL]. www.keysight.com/us/en/assets/7018-08817/data-sheets-archived/5988-7988.pdf.

#### [作者简介]

张志聪 1974 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电子侦察接收机设计。

(本文编辑: 傅 杰)