

文章编号: 1001- 4322(1999)02- 0234- 05

# 单次短脉冲微波频率分析系统 ——环流波导色散线\*

刘国治, 黄文华, 王宏军

(西北核技术研究所, 西安市 69 信箱 13 分箱 710024)

**摘 要:** 提出环流波导色散线微波频率分析方法, 介绍了环流波导色散线系统设计思想、电路工作原理、主要性能及应用结果。实验应用表明, 该系统测频分辨率比相同长度普通色散线提高 6 倍以上, 克服了微波脉宽引起的测频误差, 测量误差小于 2%, 同时能够测量不同频率成份在微波脉冲中的时间分布, 为单次短脉冲微波频率分析提供了一种有效的手段。

**关键词:** 微波频率测量; 波导色散线; 高功率微波

**中图分类号:** TM 935. 23      **文献标识码:** A

在高功率微波 (HPM) 产生和应用的研究中, 微波频率是需要测量的重要参数之一, 由于 HPM 源具有输出功率高、脉冲窄(几十纳秒)和单次工作等特点, 常规测量仪器不能用来对其进行测量分析, 因此, 必须研制一系列的专门测量系统。就微波频率测量而言, 通常有波导色散线法、多路带通检波法、外差法(混频法)等<sup>[1]</sup>。其中波导色散线法因其原理简明、测频范围大、简单实用, 被国内外学者广泛采用。但传统波导色散线法存在以下不足之处: (1) 测频分辨率与波导长度成正比, 要提高频率分辨率必须增加波导长度, 从而造成体积过大, 成本上升, 使用不便, 尤其对低频的 HPM, 用该方法几乎是不可能的; (2) HPM 脉冲中可能存在多个频率分量, 普通的色散线只将微波脉冲信号色散一次, 在测量不同频率的色散延时量时, 假设所有频率分量都同时发送, 参考点都是参考微波脉冲的同一时刻, 而实际不同频率可能产生的时间不同, 这样就导致了因微波脉宽引起的不确定误差; (3) 不能测量不同频率成份在微波脉冲中的时间分布。为此, 在传统色散线基础上提出了环流波导色散线微波频率分析方法, 并成功地研制了一套环流波导色散线系统。该系统克服了传统色散线的不足, 为单次短脉冲微波频率分析提供了一种新的有效手段。

## 1 环流色散线基本思想及工作原理

### 1.1 传统色散线测频原理<sup>[1]</sup>

传统的色散线测频原理基于波导对微波的色散特性。将一个单次微波脉冲分为二路, 一路信号直接经魔 T 后检波出脉冲包络 1, 第二路经过一段波导色散线延时, 再经魔 T 后检波出脉冲包络 2, 脉冲包络 2 和包络 1 同时显示在示波器上, 包络 2 落后于包络 1 一定的时间  $T$ , 由于波导的色散特性, 不同频率的微波信号在波导中传播速度不同, 因而经相同长度波导色散线后, 不同频率的微波脉冲延迟时间  $T$  也就不同。  $T$  由下式决定

$$T = \frac{L}{c \sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \quad (1)$$

\* 国家 863 激光技术领域资助课题

1997 年 10 月 22 日收到原稿, 1999 年 1 月 18 日收到修改稿。

刘国治, 男, 1960 年 11 月出生, 博士, 研究员

式中,  $L$  为波导有效长度;  $c$  为光速;  $f_c$  为波导截止频率;  $f$  为传输的微波频率。

因此检出脉冲 1 和脉冲 2 之间的延时  $T$ , 又已知波导长度  $L$ 、截止频率  $f_c$  (对于 BJ100,  $f_c = 6.557\text{GHz}$ ; BJ58,  $f_c = 3.71\text{GHz}$ ), 即可推导出频率值和频率分辨率  $\Delta f$

$$f = f_c / \sqrt{1 - (\frac{L}{c} T)^2} \tag{2}$$

$$\Delta f = \pm (\frac{c}{L}) \cdot [1 - (\frac{f_c}{f})^2]^{-3/2} \cdot \frac{f_c^3}{f^2} \cdot \Delta T \tag{3}$$

由(3)式可知: 当最小时间分辨率  $T$  一定时, 频率的分辨力与波导长度成正比, 即波导越长, 可分辨的最小频差  $f$  越小, 分辨率越高。可见增加波导长度, 可提高分辨率和测频精度, 但是一般讲,  $T$  由脉冲宽度决定。

### 1.2 环流式色散线的基本思想

为在波导长度不变时, 增加波导有效长度, 我们提出采用微波脉冲在波导中多次传输法, 即在波导中能循环传输, 这样经多次传输后的脉冲信号相当于经过了相应多倍的波导传输线, 若检出第  $n$  次循环后的脉冲, 则其在波导中传输的距离  $L_n = nL$ , 频率分辨率最少提高  $n$  倍。

同时, 若分别检出经波导环行 1, 2, 3, ...,  $n$  次的微波脉冲, 记录下这多个脉冲波形, 通过这多个脉冲可对微波频率进行详细的分析, 从而确定出不同频率在脉冲中的时间位置。这对准确的频率分析是十分重要的, 同时可以基本消除脉冲宽度对测量精度的影响, 这样大大提高了测频精度。

### 1.3 微波频率分析方法及频率在脉冲中的时间分布测量

在一个脉宽为  $\tau$  的微波脉冲中, 其包含的各种频率不一定是分布在全部脉冲时间内, 即在脉冲的不同时刻可能产生不同频率的微波(如虚阴极振荡器), 假设两不同频率  $f_1$  和  $f_2$  分别在  $t_1$ 、 $t_2$  时刻, 普通色散线测量延时量  $T$  时是以未色散的脉冲同一时刻为基准, 这样脉冲宽度值及不同频率成份微波在脉冲内的时间位置必然引起测量的不确定度。

利用环流色散线后, 可测得第 1, 2, 3, ...,  $n$  次经色散线后的多个脉冲波形, 如图 1。

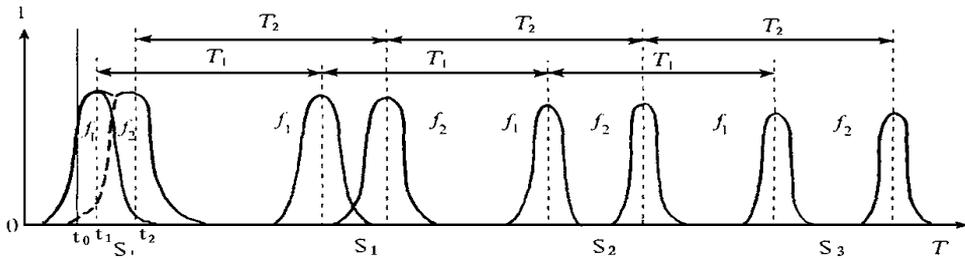


Fig 1 Schematics of the dispersive signals of microwave pulse with two frequencies in the ring of dispersive line

图 1 双频微波脉冲在环流波导中传输色散示意图

因第 2 次环流以后的多个不同频率的脉冲已被分开, 可通过测量相邻次环流输出的对应频率脉冲固定不变的时间间隔  $T_1$ 、 $T_2$ , 由  $T_1$ 、 $T_2$  推出  $f_1$ 、 $f_2$  在  $S_0$  脉冲中的时间位置, 这样, 不但可以消除脉宽引起的测频不确定误差, 而且可以确定脉冲中各频率成份的时间分布。

## 2 系统电路设计

### 2.1 环流的实现和 HPM 信号的注入



为实现环流,采用了一四端口定向耦合器,利用其副波导将色散线联成闭合回路,设计的电路基本框图如图 2。

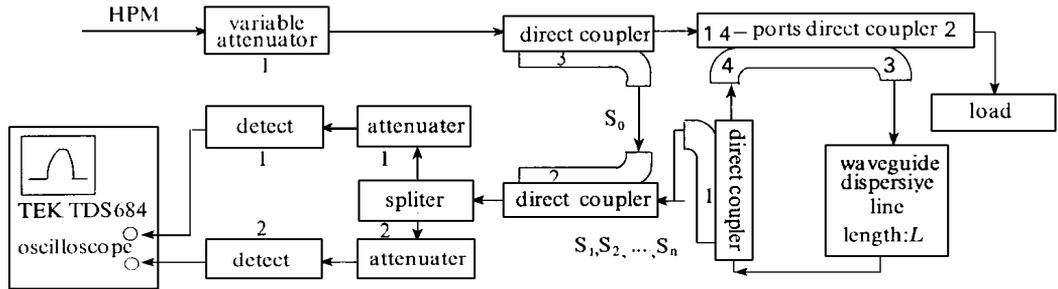


Fig 2 Schema of the ring of waveguide dispersive line

图 2 环流波导色散线系统电路框图

微波脉冲由定向耦合器 3 先提取一个参考信号  $S_0$ , 主微波信号由四端口定向耦合器的 1 端口注入, 并耦合部分功率进入端口 3, 这样就实现了微波至环路的注入, 进来的微波信号经波导色散线一次后, 由定向耦合器 1 取出部分信号进行检测, 其余经四端口定向耦合器的 4 端口、3 端口, 再进入色散线, 如此循环, 便实现了微波脉冲在色散线中的环流。

## 2.2 多个信号的检测

为了减少各个脉冲信号之间的系统误差, 要求各个脉冲信号所经过的检测系统尽量一致, 因此, 我们采用了定向耦合器 2, 将不色散的参考信号  $S_0$  和环流色散信号  $S_1, S_2, \dots, S_n$  合成, 这样就可以通过同一只检波器检测各个脉冲信号, 保证了各信号之间的一致性。

由于环流系统具有一定的插入损耗 (现有的 BJ100 色散线为  $-15\text{dB}$ ; BJ58 为  $-3\text{dB}$ ), 插损较大时, 环流一次的信号衰减太大, 这样各次环流出来的信号幅度相差很大, 若在定向耦合器 2 输出口用一只检波器进行检波, 则会因幅度差距大而只能检出环流一两次的信号。另外, 检波器的线性范围较小, 必然造成检波的失真, 因此, 必须将信号分成几路, 分别经过适当的衰减后进行检测, 同时加上微波限幅器, 抑制环流次数少的大幅度信号, 以避免损伤检波器, 又可以确保检测信号波形不失真。这样, 就实现了幅度差距大的多个环流信号的检测。若色散线的插入损耗很小 (如 BJ58 色散线, 其环路衰减只有  $-3\text{dB}$ ), 用一只检波器进行检测就可获得 6 个以上的环流脉冲。

## 2.3 参考信号与色散信号的时间关联

对检测的多个信号进行精确的时间比较分析, 要求参考信号  $S_0$  到  $S_1$  所经过的路线与  $S_1$  到  $S_2$  的路线长度相等, 也就是要求:  $L_{ab} - L_{ac} = L_{db}$ , 如图 3 所示。这样就可以保证信号  $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$  之间的时间关系一致。

## 3 环流色散线的主要性能

本环流色散线微波频率分析系统的测频范围决定于所采用的波导、分路合成及检测器件等。测量的不确定度和分辨率也还与记录系统的时间测量不确定度有关。本记录系统时间测量不确定度小于  $2n_s$ 。

对系统的驻波、衰减、频率等特性及测频性能进行了标定和检测, 检测波形如图 4 所示。经实验检测与理论计算比较, 现有系统性能指标为:

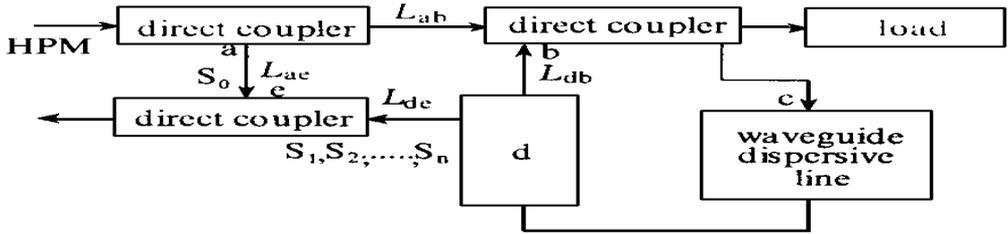


Fig 3 Diagram of signal in the ring of dispersive line

图 3 环流色散线信号线路图

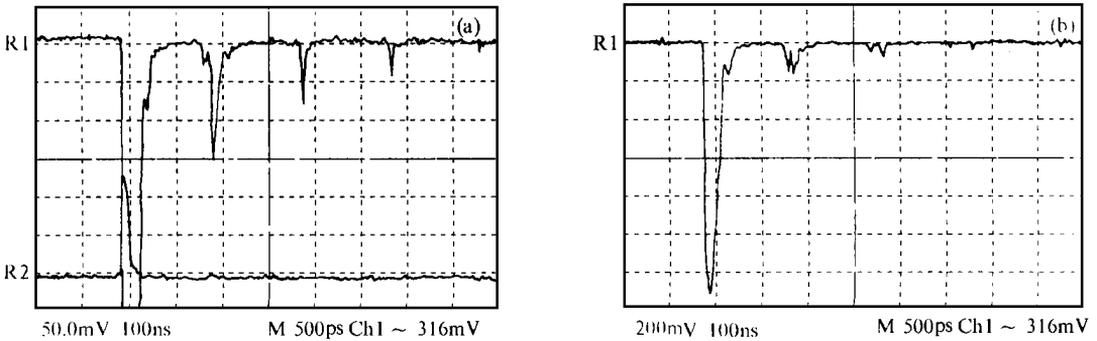


Fig 4 Typical dispersive waveform of microwave pulse with single frequency (a) and with two frequencies (b) measured by the BJ58 dispersive line ring

图 4 BJ58 环流色散线典型检测波形 (a) 点频时多个环流波形, (b) 脉冲中含两个分量时的环流波形

(1) BJ100 色散线 工作频率 8~ 12.4GHz,  $L = 77.76m$ , 环流四次(即  $n = 4$ ), 衰减小于等于 15dB, 频率不确定度小于 2%;

(2) BJ58 色散线 工作频率 4.9~ 7.05GHz,  $L = 46.0m$ , 环流六次(即  $n = 6$ ), 衰减小于等于 3dB, 频率不确定度小于 2%, 频率时间分布测量不确定度小于 2ns;

由(3)式计算的分辨率和测量不确定度  $\Delta f$ , 以及相对误差  $\Delta f / f$  见表 1。

表 1 环流波导色散线测量不确定度分析

Table 1 Theoretical analysis of measurement uncertainty for different frequencies

	$f / GHz$	8	9	10	11	12	12.4
BJ100	$\Delta f / MHz$	4.32	10.5	19.3	30.9	45.5	52.2
	$\frac{\Delta f}{f} / \%$	0.04	0.12	0.19	0.28	0.36	0.42
	$f / GHz$	4.9	5	5.5	6	6.5	7
BJ58	$\Delta f / MHz$	5.0	6.0	10.5	16.5	24	33
	$\frac{\Delta f}{f} / \%$	0.1	0.12	0.19	0.28	0.37	0.47

### 4 环流色散线的实验应用

在虚阴极振荡器实验研究中, 用 BJ58 环流色散线进行微波频率测量诊断, 成功地测得了虚阴极高功率微波振荡器的频率成份及其在脉冲中的时间分布, 典型波形如图 5 所示, 实现了 6 次以上环流, 大大地提高了测量精度, 满足了 HPM 源研究的需要。

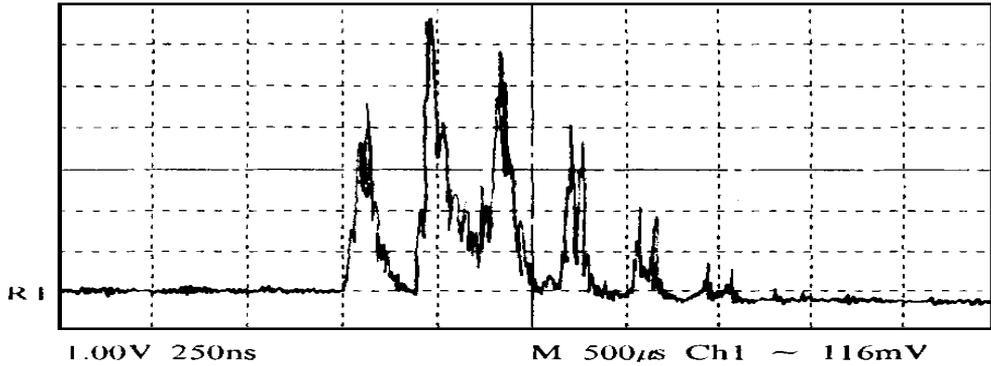


Fig 5 The dispersive waveform of microwave pulse generated by Vircator in the BJ58 waveguide dispersive line ring

图 5 BJ58 环流波导色散线测得的虚阴极 HPM 源的色散波形

## 5 结束语

环流波导色散线频率分析方法在测量低重复频率、多谱、窄脉冲微波频率方面具有独特的性能优势。利用该方法可建立各种频段的微波测频系统,应用于科研实验。

致谢 本工作得到范如玉研究员的支持、指导,在实验应用中得到了西核所微波组其他同志的协助,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 1 James Benford, John Swegle High power microwaves artech house, NC, 1992, 128~ 130

# A RING OF WAVEGUIDE DISPERSIVE LINE FOR SINGLE SHORT PULSE MICROWAVE FREQUENCY ANALYSIS

LIU Guo-zhi, HUANG Wen-hua, WANG Hong-jun

Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an, 710024, China

**ABSTRACT:** A frequency analysis system for single short microwave pulse which is developed by means of a ring of waveguide dispersive line is described in this paper. The system is characterized by frequency resolution 6 times higher than that of normal dispersive line with the same length. At the same time, the ring of dispersive line is capable of measuring the time-dependence relation for microwave frequency components and avoids uncertain arising from the duration of microwave pulse, making the uncertain is less than 2%. The system has been used successfully in the experimental study of Vircator.

**KEY WORDS:** microwave frequency measurement; waveguide dispersive line; high power microwave