

脉冲调制信号相位噪声的测试方法

刘鹏飞 崔玉娟 马昱超
中国电子科技集团公司第二十七研究所 郑州 450047

摘要：简单介绍了脉冲调制信号的频谱特性，然后以PN9000相位噪声测试系统和R&S公司的FSWP相位噪声分析仪为例，介绍了脉冲调制信号相位噪声测试原理，测试中解决的问题，并给出了实际测试结果，对测试结果进行了分析，希望对相关人员有一定的帮助。

关键词：脉冲调制；相位噪声；相位检波器；视频滤波器

1 引言

信号的短期频率稳定度是衡量信号质量的重要因素，它直接影响着系统的性能。相位噪声是描述信号短期频率稳定度的重要指标^[1]，特别是在雷达、通信、导航等领域，相位噪声成为提高系统性能的关键因素。在雷达领域，雷达探测目标时，发射的基本都是脉冲调制信号，其相位噪声是决定雷达探测距离、目标分辨率、抗干扰度等性能的关键指标，脉冲调制信号相位噪声测量对很多系统来说具有一定的现实意义。

脉冲调制信号是由连续波信号经脉冲调制后得到的，其相位噪声特性与其连续波信号具有一定的相关性，但也有不同。通常的脉冲调制信号中有用信息的时间短，无用信息的时间长，使载频信号的频谱混合重叠，相位噪声增加，给测量带来困难，其测试原理更复杂，过程也更繁琐。

2 脉冲调制信号的频谱特性

脉冲调制信号就是脉冲信号对连续波的幅度调制，在时域可以看作是

连续波信号与脉冲信号的乘积，在频域可以看作是连续波信号频谱和调制波信号频谱的卷积，如图1所示。

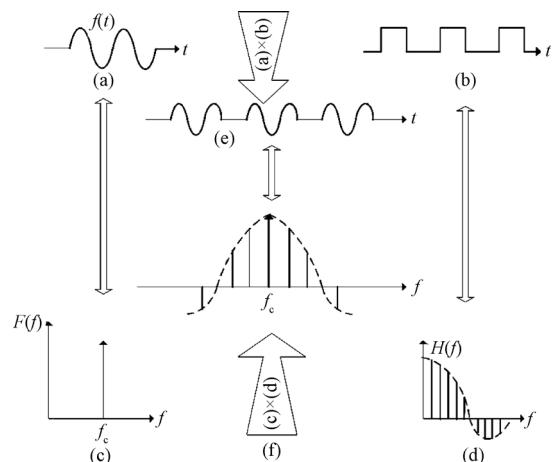


图1 脉冲调制信号频谱特性

图1 (a) 是连续波 (载波) 信号的波形，(b) 是脉冲 (调制波) 信号的波形，(c) 是连续波信号的频谱，(d) 是脉冲信号的频谱，(e) 是连续波和脉冲乘积的波形，(f) 是连续波和脉冲卷积的频谱。

载波信号经过脉冲调制，在时域上出现不连续，在频域上以sinc函数的包络进行频谱扩展。当载波存在噪声时，调制使得载波噪声混杂到脉冲调制频谱的每一根脉冲重复频率 (PRF) 谱线中，同样在频域上以sinc函

数的包络进行频谱扩展，受它们和的影响，载波频率处，即中心谱线的合成噪声将会增加，如图2所示。

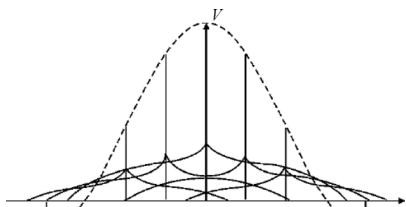


图2 脉冲调制信号相位噪声特性

依据取样定理，偏移载波频率大于PRF/2频偏的相位噪声信息将被添加到中心谱线PRF/2频偏范围内。

当脉宽固定时，谱线宽度与PRF成反比，对于固定的脉宽来说，载波频率处的噪声增加量与PRF成反比^[2]。

3 脉冲调制信号相位噪声测试原理及特点

3.1 PN9000相位噪声测试系统简介

PN9000相位噪声测试系统是模块化的测量系统，相关测量部件都以模块形式插在主机箱内。根据参考源、频率范围和信号分析的需要，系统可进行不同的配置。其基本系统由机箱、配置模块、电脑、IEEE 接口、电脑主机箱内的数字转换板和测量软件组成。

PN9000相位噪声测试系统配置有9个模块，分别是Status 模块(PN9060)、RF Synthesizer模块(PN9100)、Microwave Double模块(PN9151、PN9152)、Phase Detector模块(PN9341)、Lock Control模块(PN9451)、Low Noise Amplifier模块(PN9421)、

Noise Output 模块(PN9490)和Video Filter模块(PN9813)。

- Status模块提供系统工作所需的电源，提示测试进度、错误信息、远端控制等。

- RF Synthesizer模块提供测试所需要的低噪声参考信号，该信号源具有压控功能。

- Microwave Double模块对参考信号倍频，扩展测试系统的测量范围。

- Phase Detector模块负责对参考信号和被测信号进行正交检相，解调被测信号的相位噪声，将相位噪声转换为电压噪声。

- Lock Control模块实现锁相放大，通过直流参考电压控制并保持输出信号在测试过程中与参考源相位正交。

- Low Noise Amplifier 模块用来放大检出的噪声信号，同时该模块的“Auxiliary MonitorOutput”接口可以监测噪声信号，该接口监测的信号可通过频谱分析仪或示波器进行进一步分析。

- Noise Output 模块输出噪声

电压信号给数字转换板和测量软件进行数据处理。

- Video Filter模块提供截止频率为1/2PRF的滤波器，是进行脉冲调制信号相位噪声测试的关键模块。

PN9000相位噪声测试系统脉冲调制信号相位噪声测试原理如图3所示。脉冲调制信号可以用连续波信号源和脉冲产生调制器模块(PN9815)组合产生，也可以直接用外部的信号源产生脉冲调制信号，比如用安捷伦公司的E8257D直接产生脉冲调制信号。被测脉冲调制信号和连续波参考信号实现正交检相，检出的噪声电压信号通过视频滤波器传输给低噪声放大器，然后进行A/D转换、FFT等数字处理分析，最后进行显示^[3]。

不同于连续波相位噪声测试，当被测信号是脉冲调制信号时，存在功率损耗、周期性杂散和直流偏置的问题，PN9000相位噪声测试系统在硬件上加入了视频滤波器，在软件上也有相应的改变，很好的解决了这些问题。

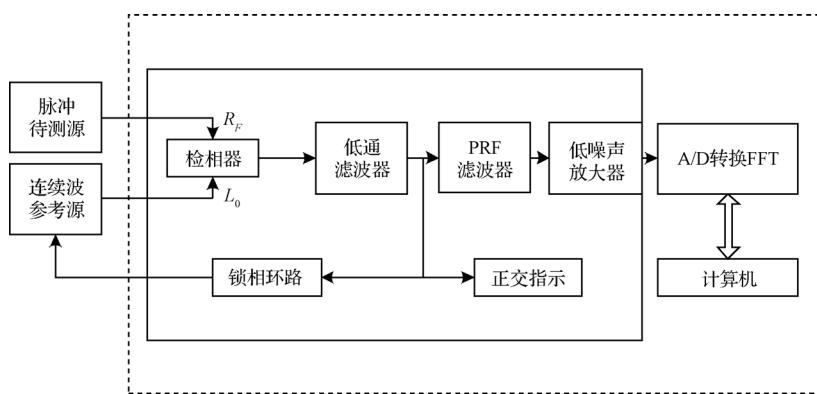


图3 PN9000相位噪声测试系统脉冲调制信号相位噪声测试原理

3.2 Rohde & Schwarz FSWP 相位噪声分析仪简介

附带R&S FSWP-K4选项的R&S FSWP能够测量不同脉宽和不同脉冲重复频率下的相位噪声，由于采用了更为先进的数字相位解调法，因此它能够记录信号，自动计算所有参数，比如脉冲重复频率、脉冲宽度，自动构建PRF数字滤波器；解调信号并显示相位噪声和幅度噪声，最大偏置频率范围和测量校准自动进行，可以通过定义脉冲门参数来避免脉冲沿的瞬态特性给测试结果带来影响并从而提高灵敏度^[4]。同样还可以使用互相关技术来测量相位噪声较好的信号源，补偿了由于脉冲调制带来信号灵敏度的降低。式(1)描述了期望达到的动态范围的提高量。

$$\Delta L = 5 \log n \quad (1)$$

式中： ΔL 为通过互相关技术相位噪声灵敏度的提高量(单位为dB)， n 为互相关的次数。

3.3 脉冲调制信号与连续波信号相位噪声的区别

1) 功率损耗

脉冲调制信号的功率，相比于连续波信号的功率，有一定的功率损耗，可以用下式表示：

$$P_{LOSS} = 20 \lg (\tau/T) \quad (2)$$

例如，当占空比为10%时，脉冲调制信号的功率比连续波信号的功率下降20 dB，当占空比为1%时，脉冲调制信号的功率比连续波信号的功率下降40 dB。相应地检测到的相位噪

声信号也下降了相同比例的大小。

2) 周期性杂散

脉冲调制信号的功率在载波信号的两边以基波和倍频的形式分散开，在PRF的整数倍处形成周期性杂散，这些杂散信号非常强，足以使低噪声放大器(LNA)饱和。LNA用来提取相位噪声信号，通过A/D转换输出给数字信号处理系统，通常LNA的输入信号非常小。为了解决这一问题，PN9000相位噪声测试系统在相位检波器的输出和LNA的输入之间，插入了PRF滤波器。PRF滤波器也称为视频滤波器，在测试中其最优化的截止频率是1/2PRF，因为对于脉冲

信号来说只有在这个频率范围内的信号才不存在频率混叠现象，测量得到的是主谱线fc经脉冲调制后的相位噪声信号。FSWP相对于传统鉴相器法测量脉冲相位噪声的一个主要优势是采用数字滤波模块，滤除了频率大于PRF/2的成分。自动构建合适的滤波器来大大简化测量过程。

3) 相位噪声信号的直流偏置

当参考源是连续波信号而被测信号是脉冲调制信号时，相位检波器输出的DC偏置电压远远高于差拍信号的电压，导致不能校准检波器，不能实现锁相控制。如图4所示，当脉冲关断期间，参考源在检相器输出端产生DC偏置。

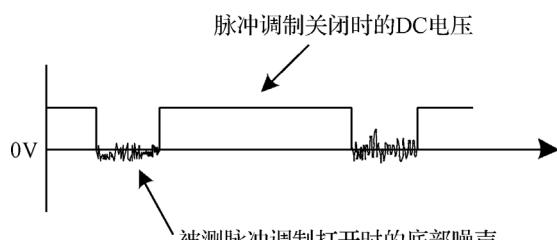


图4 脉内相位噪声信息与脉外无用噪声曲线图

使用连续波作为参考源简化了脉冲调制信号相位噪声的测试过程，不需要脉冲触发器控制参考源。

4 测试结果分析

采用信号发生器8257C作为被测信号源，分别采用PN9000相位噪声测试系统和Rohde & Schwarz FSWP相位噪声分析仪，分别对载波1 GHz和10 GHz信号在连续波和不同占空比条件下进行测试，所得的测试结果如表1~4所示，单位为dBc/Hz。图5、6

分别为FSWP和PN9000测试载波频率为10 GHz，PRF 10 kHz，占空比为50%的脉冲调制信号的结果。

通过分析可以得出如下结论：

1) 脉冲调制后信号的相位噪声有一定的恶化，占空比越小，恶化的越明显，连续波信号相位噪声指标越高，恶化的越明显。所以如需要表述脉冲调制信号相位噪声指标，除了载波频率、频偏外，还要给出脉冲宽度、占空比等脉冲相关参数，比如载

表1 载波频率1 GHz, PRF 1 kHz

频偏	连续波		占空比5%		占空比1%	
	PN9000	FSWP	PN9000	FSWP	PN9000	FSWP
10 Hz	-91.0	-90.80	-91.7	-89.81	-93.5	-90.39
100 Hz	-93.4	-95.58	-94.9	-93.87	-96.0	-93.65
1 kHz	-104.7	-102.34	-122.7	-123.15	-114.5	-115.10
5 kHz	-127.4	-127.64	-125.0	-125.32	-113.6	-114.22

表2 载波频率10 GHz, PRF 1 kHz

频偏	连续波		占空比5%		占空比1%	
	PN9000	FSWP	PN9000	FSWP	PN9000	FSWP
10 Hz	-70.1	-69.90	-67.0	-69.86	-71.5	-70.52
100 Hz	-74.7	-75.39	-75.0	-73.82	-72.1	-73.74
1 kHz	-84.3	-82.25	-112.1	-112.93	-101.9	-120.42
5 kHz	-105.7	-108.36	-117.2	-117.86	-104.4	-104.75

表3 载波频率1 GHz, PRF 10 kHz

频偏	占空比50%		占空比10%	
	PN9000	FSWP	PN9000	FSWP
10 Hz	-85.3	-90.96	-85.8	-91.00
100 Hz	-95.7	-95.28	-94.1	-94.60
1 kHz	-99.1	-102.15	-101.5	-102.17
5 kHz	-128.4	-125.67	-129.2	-122.55

表4 载波频率10 GHz, PRF 10 kHz

占空比 频偏	占空比50%	
	PN9000	FSWP
10 Hz	-66.0	-71.70
100 Hz	-76.8	-75.56
1 kHz	-76.4	-82.23
5 kHz	-105.9	-105.65

波频率1 GHz、频偏1 kHz、脉冲宽度1 μs、占空比1%时的相位噪声指标为120 dBc/Hz。

2) 本底噪声抬高的比例基本符合 $20 \log(\tau / T)$ 的理论分析结果。

3) 用相位噪声测试系统只能测试频偏小于1/2PRF的脉冲调制信号的相位噪声，频偏大于1/2PRF的测试数据无意义。

4) Rohde & Schwarz FSWP相位噪声分析仪和PN9000相位噪声测试系统测试结果水平相当。

5 结论

本文简单介绍了脉冲调制信号的频谱特性，然后以PN9000相位噪声测试系统和Rohde & Schwarz FSWP相位噪声分析仪为例，介绍了脉冲调制信号相位噪声测试原理，并给出了实际测试结果，对测试结果进行了分析，实际测试表明，Rohde & Schwarz FSWP相位噪声分析仪和PN9000相位噪声测试系统测试结果水平相当，Rohde & Schwarz FSWP相位噪声分析仪操作更简洁，无需复杂的参数设置，能够一键完成相位噪

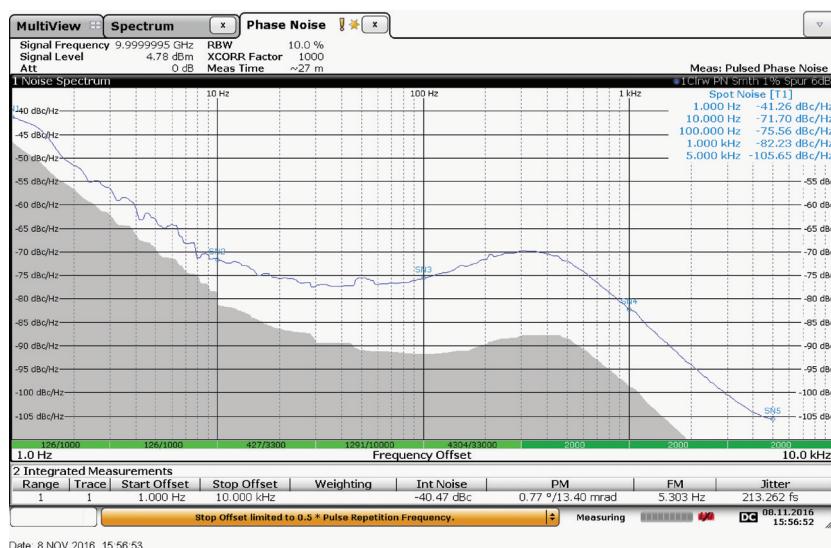


图5 FSWP测试载波频率为10 GHz, PRF 10 kHz, 占空50%信号结果

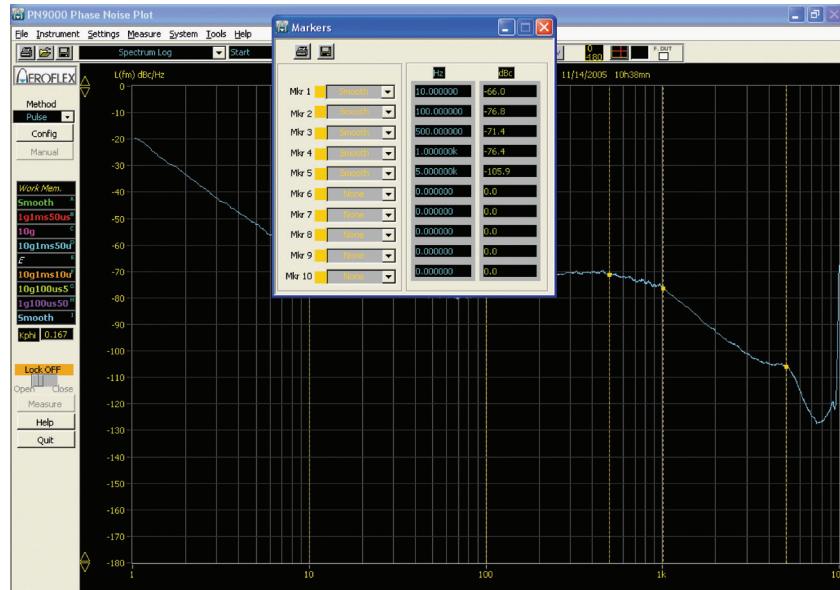


图6 PN9000测试载波频率为10 GHz, PRF 10 kHz, 占空50%信号结果

声测试，且测试时间明显要优于传统的PN9000相位噪声测试系统。

参考文献

- [1] 李宗杨, 国防科工委科技与质量司, 王志田, 等. 时间频率计量[M]. 原子能出版社, 2002.
- [2] 冯丹. 基于噪声模型的脉冲调制信号相位噪声测量方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [3] AEROFLEX-EUROPTEST, WPN9000 Manual V2.2, 2005.
- [4] R & S® FSWP Phase Noise Analyzer Specifications, 2015.

(上接第6页)

标模拟。多种测试仪器和测试方法对雷达各种功能和性能进行全面覆盖测试，保证了汽车雷达出厂合格率。聚星仪器融合各个厂商产品和自身在微波测试测量、汽车电子生产测试和智能制造的经验，提供面向先进制造和工业4.0的自动化组装测试整体解决方案。

参考文献

- [1] ETSI TR 101 982 V1.2.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio equipment to be used in the 24 GHz band; System Reference Document for automotive collision warning Short Range Radar[R].
- [2] SCHNEIDER M. Automotive radar-status and trends[C]. German Microwave Conference Gemic, 2005.
- [3] KATSUYUKI O, IKUNO M, MASAYUKI K. 79 GHz band ultra-wideband automotive radar[J]. Fujitsu Ten Technical Report, 2014, 31(1):9-14.
- [4] ETSI EN 302 858-1 V1.3.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Road Transport and Traffic Telematics (RTTT); Automotive radar equipment operating in the 24,05 GHz up to 24,25 GHz or 24,50 GHz frequency range; Part 1: Technical characteristics and test methods[R].