

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.025

引用格式:王立,段恒毅. 射频连接器振动对信号相位噪声的影响[J]. 电讯技术,2014,54(7):1002-1005. [WANG Li,DUAN Heng-yi. Influence of Vibration on Phase Noise of Signal through RF Connector[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(7):1002-1005.]

射频连接器振动对信号相位噪声的影响*

王立**,段恒毅

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:振动环境作用于射频连接器会影响信号的相位噪声。为了提高通信质量,研究了振动对射频连接器相位噪声的影响。分析了振动条件下射频连接器对通过其中的高频信号产生相位噪声的基本原理,推导出了机械振动参数与其产生的相噪功率谱之间的数学关系,验证了振动对不同频率信号的影响关系,并在相应的试验中验证了推导结果的正确性。相关研究结果对分析射频连接器的工程应用中振动对信号的影响具有指导作用。

关键词:通信设备;机械振动;射频连接器;相位噪声;功率谱;分析与试验

中图分类号:TN01 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-1002-04

Influence of Vibration on Phase Noise of Signal through RF Connector

WANG Li,DUAN Heng-yi

(Southwest China Institute of Electronic Technology,Chengdu 610036,China)

Abstract:The phase noise of signal will be influenced when vibration environment acts on the Radio Frequency (RF) connector. In order to improve communication quality,the influence of vibration on RF connector phase noise is studied. The basic principle of phase noise produced by the vibration of connector is analyzed. The mathematic relationship between the mechanical vibration and power spectrum of phase noise is derived. And the validity of the derived results is verified in the corresponding experiment. The conclusions provide reference for analyzing the influence of vibration on signal in engineering application of RF connectors.

Key words:communication equipment;mechanical vibration;RF connector;phase noise;power spectrum;analysis and experiment

1 引言

振动环境会造成通信设备的电气性能劣化,目前有关这方面的分析文献主要集中在射频器件相位噪声特性分析^[1-3]、相位噪声抑制^[4-6]以及相位噪声机理^[7-8]方面。由于振荡器中的晶振对振动极为敏感以及当前接收机对参考源的频率稳定度要求越来越高,设计不良的高频连接器等无源器件,在振动环境中也会产生相位噪声,这个问题在系统和整机的研制中屡有发现,但相关研究内容还是空白。这当

然不是因为这个问题不重要,事实上,在调频、调相体制的数字通信设备中,因连接器受到振动而带来的相位噪声会导致设备接收信号的信噪比下降、误码率上升等问题,影响通信设备性能。

本文从高频连接器插接状态下内外导体形成的间隙电容入手,对高频连接器受到机械振动时产生相位噪声的机理进行了理论分析和数学推导,并通过实验对理论分析结果进行了验证。

* 收稿日期:2014-01-08;修回日期:2014-06-20 Received date:2014-01-08;Revised date:2014-06-20

** 通讯作者:vq2001@sina.com Corresponding author:vq2001@sina.com

2 产生相噪的机理分析

接插状态高频连接器内外导体的插接部分因为器件需要插拔而存在一些微小间隙,这个间隙对内外导体上流过的电流带来一个附加电容。如果将插接部分的连接器用传输线模型来表示,具有间隙附加电容的连接器插接部分的传输线模型如图 1 所示。

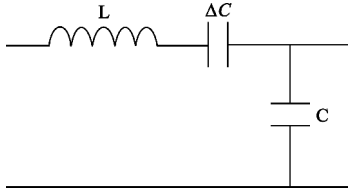


图 1 高频连接器插接处的电路模型

Fig.1 Circuit model at high-frequency connector plug

由于插接部分间隙电容的存在,导致通过该连接器段的射频信号传输速度发生改变,通过图 1 可计算出相对改变量为

$$\frac{v-v_0}{v_0}=\frac{1}{2\omega^2L\Delta C} \tag{1}$$

式中, v_0 为无间隙电容存在时的传输线信号传输速度, v 为接插状态有间隙电容时的信号传输速度, ω 是通过信号的频率, L 是作为连接器的传输线单位长度串联电感, ΔC 是连接器因插接而引入的单位长度间隙电容。由于传输速度发生改变而引入的附加相位变化

$$\Delta\varphi=\omega l\frac{v-v_0}{v_0} \tag{2}$$

式中, l 为连接器插接部分长度。将式(1)代入式(2)得到

$$\Delta\varphi=\frac{\pi}{\lambda}\frac{l}{\omega^2L\Delta C} \tag{3}$$

式中, λ 为存在间隙电容情况信号通过连接器接插段时的波长。当连接器所在的设备以正弦方式振动,其振动频率为 ω_v , 振动幅度为 A , 引起的间隙电容变化为

$$\Delta C(t)=\frac{k}{A}(T-\sin\omega_v t) \tag{4}$$

式中, k 为比例系数,用于反映间隙几何尺寸与电容量之间的关系; T 为大于 1 的常数,以保证间隙电容始终为正值。将式(4)代入式(3)得到

$$\Delta\varphi(t)=\frac{\pi}{\lambda}\frac{Al}{\omega^2Lk(T-\sin\omega_v t)} \tag{5}$$

令

$$k'=\frac{\pi}{\lambda}\frac{Al}{\omega^2Lk} \tag{6}$$

并将其中的时间函数关系展开

$$\frac{1}{1-\frac{1}{T}\sin\omega_v t}=1+\frac{1}{T}\sin\omega_v t+\frac{1}{T^2}\sin^2\omega_v t+\cdots \tag{7}$$

因为 T 大于 1, 因此其高阶项的系数会逐步减小。由于越高阶的项影响越小, 因此只需关注低阶项即可。本文为分析简单起见, 只取前面 2 阶以下的项进行分析, 并不会给最后结果的准确性带来大的影响, 这样将式(6)、(7)代入式(5)中就得到

$$\Delta\varphi(t)=k'(\frac{1}{T}+\frac{1}{2T^3}+\frac{1}{T^2}\sin\omega_v t-\frac{1}{2T^3}\cos2\omega_v t) \tag{8}$$

用该附加相位调制的信号为

$$\begin{aligned} V(t) &= V_0\sin(\omega t+\frac{k'}{T}+\frac{k'}{2T^3}+\frac{k'}{T^2}\sin\omega_v t-\frac{k'}{2T^3}\cos2\omega_v t)= \\ &V_0\sin(\omega t+\frac{k'}{T}+\frac{k'}{2T^3})\cos(\frac{k'}{T^2}\sin\omega_v t-\frac{k'}{2T^3}\cos2\omega_v t)+ \\ &V_0\cos(\omega t+\frac{k'}{T}+\frac{k'}{2T^3})\sin(\frac{k'}{T^2}\sin\omega_v t-\frac{k'}{2T^3}\cos2\omega_v t) \end{aligned} \tag{9}$$

如果 $\frac{k'}{T^2} \ll 1$, 式(9)可以简化为

$$\begin{aligned} V(t) &\approx V_0\sin(\omega t+\frac{k'}{T}+\frac{k'}{2T^3})+ \\ &V_0(\frac{k'}{T^2}\sin\omega_v t-\frac{k'}{2T^3}\cos2\omega_v t)\cos(\omega t+\frac{k'}{T}+\frac{k'}{2T^3}) \end{aligned} \tag{10}$$

其中, 前一项是信号电压, 后一项是噪声电压, 表示为

$$\begin{aligned} V_n(t) &= V_0(\frac{k'}{T^2}\sin\omega_v t-\frac{k'}{2T^3}\cos2\omega_v t)\cos(\omega t+\frac{k'}{T}+\frac{k'}{2T^3})= \\ &\frac{k'V_0}{2T^2}\left\{\begin{aligned} &\sin[(\omega_v-\omega)t-\frac{k'}{T}(1+\frac{1}{2T^2})] + \\ &\sin[(\omega_v+\omega)t+\frac{k'}{T}(1+\frac{1}{2T^2})] \end{aligned}\right\}- \\ &\frac{k'V_0}{2T^3}\left\{\begin{aligned} &\cos[(2\omega_v-\omega)t-\frac{k'}{T}(1+\frac{1}{2T^2})] + \\ &\cos[(2\omega_v+\omega)t+\frac{k'}{T}(1+\frac{1}{2T^2})] \end{aligned}\right\} \end{aligned} \tag{11}$$

对该噪声电压进行自相关积分得其相关系数

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{v_{n1},v_{n2}}(\tau) &= \frac{1}{2}(\frac{k'V_0}{2T^2})^2[\cos(\omega_v-\omega)\tau+ \\ &\cos(\omega_v+\omega)\tau]+\frac{1}{2}(\frac{k'V_0}{2T^3})^2[\cos(2\omega_v-\omega)\tau+ \\ &\cos(2\omega_v+\omega)\tau] \end{aligned} \tag{12}$$

再将式(12)进行傅氏变换, 即得到功率谱

$$\begin{aligned} S_g &= \frac{\pi}{2}(\frac{k'V_0}{2T^2})^2[\delta(\omega_v)+\delta(2\omega-\omega_v)+ \\ &\delta(-\omega_v)+\delta(2\omega+\omega_v)]+\frac{\pi}{2}(\frac{k'V_0}{2T^3})^2[\delta(2\omega_v)+ \\ &\delta(2\omega-2\omega_v)+\delta(-2\omega_v)+\delta(2\omega+2\omega_v)] \end{aligned} \tag{13}$$

由于频率与信号载波频点相近的噪声不易被信道中的滤波器滤除,因而会对通信系统产生干扰,因此我们取最邻近载波信号频谱两边的相位噪声分量进行分析,即

$$S_g = \frac{\pi}{2} \left(\frac{k' V_0}{2T^2} \right)^2 [\delta(\omega_v) + \delta(-\omega_v)] + \frac{\pi}{2} \left(\frac{k' V_0}{2T^3} \right)^2 [\delta(2\omega_v) + \delta(-2\omega_v)] \quad (14)$$

可见,因为振动连接器产生的相位噪声功率谱以离散方式分布在载波频率的两侧,其最小频率间隔为振动频率。由于本文在式(7)中只取了前3项,因此式(14)中仅有2倍频项出现,如果取更高项就会出现更高的倍频项,只是数学推导更繁杂。从式(14)的系数项可以看到,由于 $T>1$,因此距离信号频率越远的高阶项振动频率谐波上的相位噪声幅度越小;同时信号电平越高,振动幅度越大,所产生的噪声功率也越大。

3 试验结果

现在对高频连接器在振动环境下的噪声情况进行验证试验。由于正弦波是振动的最基本形式,因此试验条件按照定频条件下正弦振动试验要求设定。振动方向与连接器放置方向垂直,振动时间10 min,振动加速度为5 g,从连接器通过单音信号频率100 MHz,为了模拟真实振动频率,设置机械振动频率为300 Hz、500 Hz、1 kHz、1.5 kHz时,通过多次试验得到一组稳定的试验结果,测得的信号相位噪声谱如图2~5所示。为了防止信号本身的噪声对试验的干扰,我们通过比较振动前后的信号相位噪声谱来确认机械振动所产生的相位噪声。

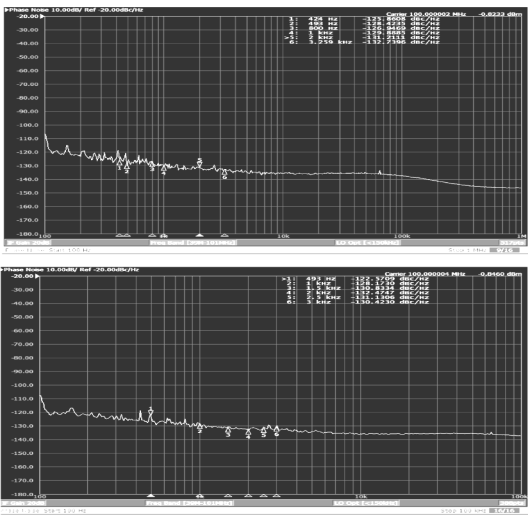


图3 振动频率500 Hz的相位噪声
Fig.3 Phase noise at 500 Hz

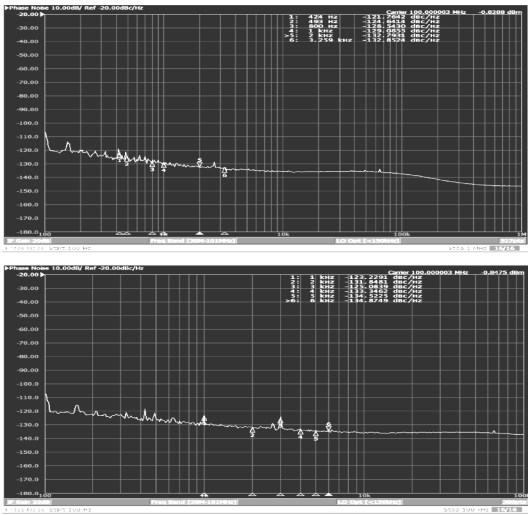


图4 振动频率1 kHz的相位噪声
Fig.4 Phase noise at 1 kHz

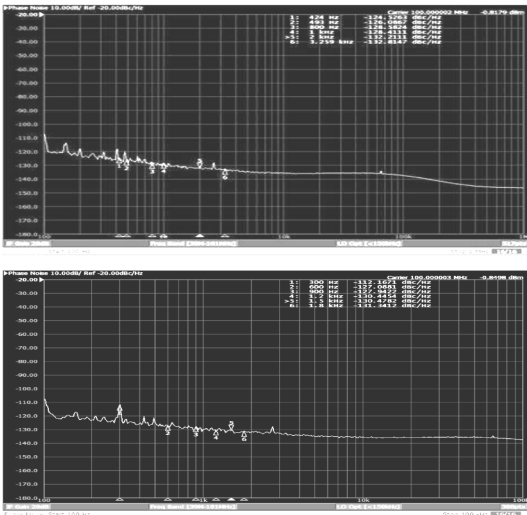


图2 振动频率300 Hz的相位噪声
Fig.2 Phase noise at 300 Hz

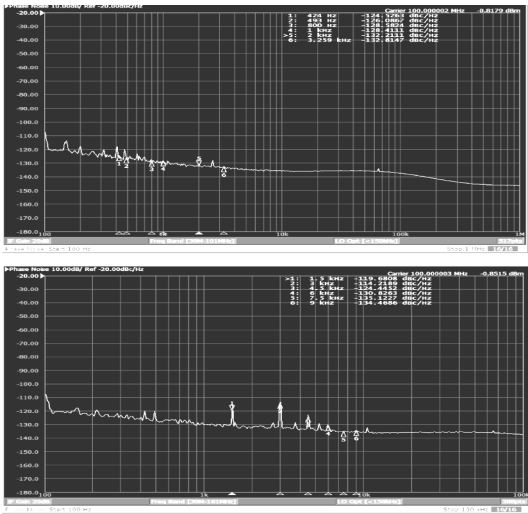


图5 振动频率1.5 kHz的相位噪声
Fig.5 Phase noise at 1.5 kHz

从以上测试结果可以看到,在施与振动后,通过连接器的信号都出现了与振动频率相同相噪谱线,谱线幅度大小与振动频率未见有相关关系,在前面得到的相位噪声功率公式中其谱线系数确实未含有振动频率因子。另外,从测试曲线中还看到,在振动频率的倍频上也有相噪谱线的出现,只是幅度比振动频率上的谱线幅度小,也就是说,在振动频率一定的情况下,对高阶倍频上的相噪比较弱,这也与式(14)中得到的结果是一致的。

4 结束语

本文分析了设备振动时,射频连接器给通过信号带来相位噪声的机理以及同产生这些相位噪声的各种因素之间的关系。虽然分析是建立在试验的基础上,是在先期试验中发现问题后,为解决问题所进行的理论分析,但这不仅有助于我们评估振动环境对设备性能的影响,对振动环境下射频连接器的加固设计工作也大有帮助。在满足设备功能前提下,尽可能将信号频率下变频到较低频率可以降低振动引起的相位噪声对系统性能的影响。但要从机理上深入探讨振动幅度和信号电平对连接器相位噪声的影响,需要进一步开展研究工作。

参考文献:

- [1] 任菁圃,张德伟,周东方,等. 同轴谐振腔微波均衡器中随机振动引入相位噪声分析[J]. 电讯技术,2006,46(1):31-34.
REN Jing-pu, ZHANG De-wei, ZHOU Dong-fang, et al. Analysis of the Vibration-induced Phase Noise of a Coaxial-resonator Equalizer[J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(1):31-34. (in Chinese)
- [2] Thomas D G, Branner G R. Accuracy of residual phase noise characterization of active RF/microwave devices[C]//Proceedings of IEEE 39th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Ames, IA:IEEE, 1996:1371-1374.
- [3] Boudot R, Rubiola E. Phase noise in RF and microwave amplifiers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2012, 59(12):2613-2624.
- [4] 顾欣欣. 晶振振动相位噪声抑制方法的改进[J]. 现代雷达, 1989(3):27-30.

GU Xin-xin. Improvement method of crystals vibration phase noise suppression[J]. Modern Radar, 1989(3):27-30. (in Chinese)

- [5] 孙刚. 一种高精度、低振动相位噪声数补晶振的研制[J]. 电子世界, 2014(1):65-66.
SUN Gang. A kind of high precision low phase noise vibration for crystals[J]. Electronics World, 2014(1):65-66. (in Chinese)
- [6] 杨永红, 皮亦鸣. 在振动环境下相位噪声对星机 BiSAR 的影响[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(3):182-201.
YANG Yong-hong, PI Yi-ming. Phase noise in vibration environment on the influence of the star machine BiSAR[J]. Science and Technology of Radar, 2008, 6(3):182-201. (in Chinese)
- [7] 万心平, 郑继禹, 张厥盛. 论证振荡器相位噪声幂律谱的形成机理及低噪声振荡器的设计考虑[J]. 西安电子科技大学学报, 1981(6):47-53.
WAN Xin-ping, ZHENG Ji-yu, ZHANG Jue-sheng. Demonstrates the formation mechanism of the oscillator phase noise power spectrum and low noise of the oscillator design consideration[J]. Journal of Xidian University, 1981(6):47-53. (in Chinese)
- [8] 张海明. 频率源的相位噪声特性分析[J]. 无线电通信技术, 1999(1):25-27.
ZHANG Hai-ming. Phase noise characteristics analysis of frequency source[J]. Wireless Communication Technology, 1999(1):25-27. (in Chinese)

作者简介:



王立(1976—),男,四川万源人,2000年于电子科技大学获学士学位,现为工程师,主要研究方向为系统电磁兼容;

WANG Li was born in Wanyuan, Sichuan Province, in 1976. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. He is now an engineer.

His research concerns electromagnetic compatibility of system.

Email:vq2001@sina.com

段恒毅(1964—),男,四川成都人,硕士,高级工程师,主要研究方向为微波技术与理论。

DUAN Heng-yi was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1964. He is now a senior engineer with the M. S. degree. His research concerns microwave technology and theory.

Email:duan_hy@sohu.com