

矢量调制在相干多通道信号发生中的应用研究

刘亮 何攀峰 台鑫

(电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

摘要: 对基于相干体制的多通道电子系统如 MIMO 通信、相控阵雷达、多通道侦察接收机等性能评估与测试一直是一个复杂、昂贵的过程,因为难以产生符合测试要求的多路相干信号。提出了一种基于矢量调制技术的宽频带相干多通道信号发生方法,分析了矢量调制器的非理想特性对多通道相干信号发生的影响,给出了解决思路。该方法具有频率覆盖范围宽、相位控制范围大、精度高、调节分辨率精细等优点,为基于相干体制的多通道接收机测试提供了一种高效便捷的信号模拟方法。

关键词: 矢量调制;相干;多通道;信号发生

中图分类号: TP931 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research of application for vector modulation in the phase-coherent multichannel signal generation

Liu Liang He Panfeng Tai Xin

(Electronic Test & Measurement Technology National Laboratory, Qingdao 266555, China)

Abstract: The performance evaluation and testing for coherent principle based multi-channel electronic systems such as MIMO communication, and phased-array radar and multi-channel reconnaissance receiver have always been complicated and expensive. Because the multi-channel signals can be received is hard to stimulate. This paper presents a wide band phase-coherent multi-channel signal stimulating method based on vector modulation technique, analyzes the influences of the vector modulator's non ideal characteristics on multi-channel signals, and finally gives solutions. We propose a convenient and efficient simulation way for phase-coherent multi-channel receiver testing by stimulating signals of wider frequency covering range, larger phase control range, higher precision and finer resolution.

Keywords: vector modulator; phase coherent; multi-channel; signal generation

1 引言

相干多通道信号接收技术由于其特有的技术优势,在 MIMO 通信、相控阵雷达、定向系统以及无源侦察等现代电子系统中得到了广泛应用^[1-2]。新技术的应用在提升电子系统性能的同时,也带来了新的问题^[3],那就是如何对这些相干多通道接收系统进行性能测试与评估。

针对多通道相干接收系统的性能与评估一直以来是一个复杂、昂贵的过程,这是因为必须用能够准确代表现实世界情况的信号激励接收机,而这些信号特性几乎在每个接收机的天线上都是不同的^[4-5]。这是因为每个天线获得的信号在时间、相位、幅度和频率上都有细微的差别。在相干多通道接收系统评估与测试中,要实现这样信号精确模拟的关键就在于使信号模拟时使用的多路信号之间相位相干,并使各路信号相互之间在相位上完全可控。针对这一

测试面临的问题,国外在早期基于共时基、延迟线实现多路相干信号的基础上,近年来提出了新的解决思路,借助于其在矢量调制技术方向多年的研究成果,通过全新的多通道校准补偿算法,基于矢量调制技术实现了宽频带、高精度的多路相干信号的产生,最高频率覆盖可达 20 GHz。国内由于相关研究起步较晚,在相干多通道信号的产生方面还停留在基于传统延迟线、简单数控移相器的技术方案。这种技术方案频段窄,精度低。针对上述研究现状,本文提出了一种基于矢量调制技术的相干多通道信号发生方法,并针对矢量调制在工程实现时的非理想特性对多通道相干信号发生的影响进行了研究,最终给出了解决思路。

2 传统相干多通道信号发生方法

根据信号相干性的特点,要想获得多路相干信号发生最直接最简单的方法就是采用移相器,基本原理是把同一

收稿日期:2015-07

本振信号功分成多路后,通过不同的移相器移相后得到相互之间保持一定相位关系的多路相干信号,基本原理如图1所示。

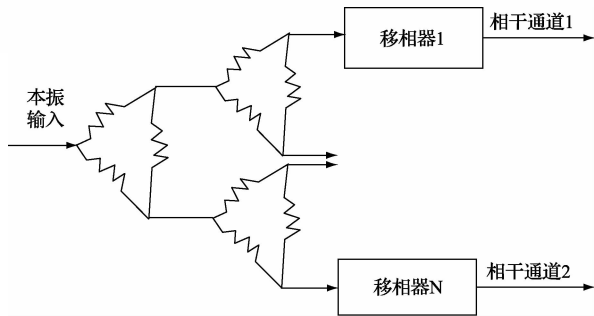


图1 基于移相器的多路相干信号发生

移相器法中最典型的技术方案是采用开关延迟线,即通过开关让同一信号功分后经过不同电长度的延迟线后输出,从而实现多通道相干信号的发生。但是由于延迟线的长度是固定的,不同长度延迟线的数量也有限,随着频率的改变其相位延迟也会跟着改变,因此工作频段一般较窄,相位调整分辨率比较粗,一旦设计完成其调整范围只能是有限的几个。随着数控移相器技术的发展,数控移相器也得到了一定的应用,基本原理同开关延迟线法相同,只不过采用数控移相器来代替延迟线。相位调整精度取决于数控移相器的相位分辨率,工作频率范围也比较有限,目前在较宽的频率范围内难以实现较高的精度^[6-8]。

无论是开关延迟线还是数控移相器,都难以实现宽频率覆盖范围内的高精度相干多路信号发生,无法实现对相干性的实时校准、修正和连续调节。因此,基于该方法一般只能针对某一设备解决有限的测试问题,难以实现大范围的推广应用。

3 基于矢量调制器的相干多通道信号发生

矢量调制器是指能够同时实现对信号幅度和相位控制的部件,由于它在数字通信系统、复杂信号模拟产生等方面的巨大优势,近年来取得了快速发展和越来越多的应用^[9-11]。典型矢量调制器组成如图2所示,本振(载波)信号输入到90°移相功分单元,其相位相差90°,功分后的每个支路信号均通过一个双相调制器,通过I和Q信号控制每个支路信号的大小(幅度),最后再同相组合得到合成矢量^[7-8]。加到矢量调制器上的任何本振信号可以按所希望衰减的电平 x dB 和所希望的相移 θ 同时移相和调整幅度。理想的矢量调制器幅度相位与 I、Q 控制信号的关系为:

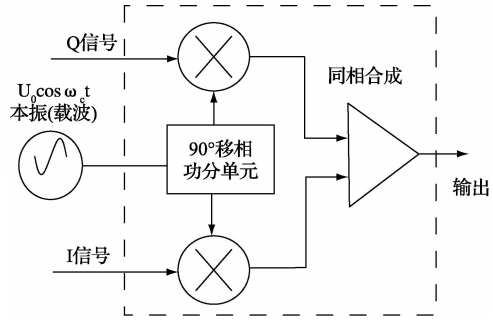


图2 典型矢量调制器原理

$$G = G_{\max} \frac{\sqrt{(V_i + V_q) + (V_q + V_o)}}{A} \quad (1)$$

$$\theta = \operatorname{arcth} \frac{V_q - V_o}{V_i + V_o} \quad (2)$$

式中: V_o 是直流偏置电压, A 是控制电压的最大幅度, V_i 、 V_q 是 I、Q 控制电压, G_{\max} 是最大增益, G 和 θ 分别是调制器的幅度和相位响应。如果调整 I、Q 的控制电压使得合成矢量的大小保持固定,即 G 保持恒定,则 I、Q 矢量调制器就成为一个固定幅度的移相器。进行归一化后,所希望的相移和 I、Q 之间的关系为:

$$|V_i|^2 + |V_q|^2 = 1 \quad (3)$$

$$\theta = \operatorname{arcth} \left(\frac{V_q}{V_i} \right) \quad (4)$$

式中: V_i 和 V_q 是归一化后的电压。因此,通过对 V_i 和 V_q 的控制即可实现对相位的控制,而且可方便的在 V_i 和 V_q 上进行有关移相的补偿,比如非线性补偿、温度补偿等,这为高精度移相的实现提供了依据。

基于矢量调制器的相干多通道信号发生实现方案如图3所示。同一本振源输出信号经过同相功分后得到多路信号,这些信号相互之间的相位存在确定的关系,由于是同一路信号功分得到因此它们之间的相位关系具有很好的稳定性,漂移很小。每一路信号都进入以矢量调制器为核心的射频通道,由矢量调制器在基带的控制下实现对射频信号的相位控制,这样每一路信号的相位均可独立控制,如果再辅以信号幅度控制的电路,那么即可得到相位、幅度均可独立控制的多路相干信号。基带信号 I/Q 由计算机控制基带中的 DAC 实现,理论上在 360° 的移相范围内可以轻易获得由于 0.01° 移相分辨率,由于相位控制最终是基于数字的方式实现控制,因此可以通过计算机方便的对移相准确度进行实时校准修正。目前矢量调制器的工作频率覆盖越来越宽,单芯片已能轻易覆盖几百兆到 5~6 GHz 的频率范围,在高端也已有能够覆盖到 20 GHz 频段的宽带矢量调制器,因此基于矢量调制器实现宽频带高精度相位相干通道信号的产生具有突出的优势。

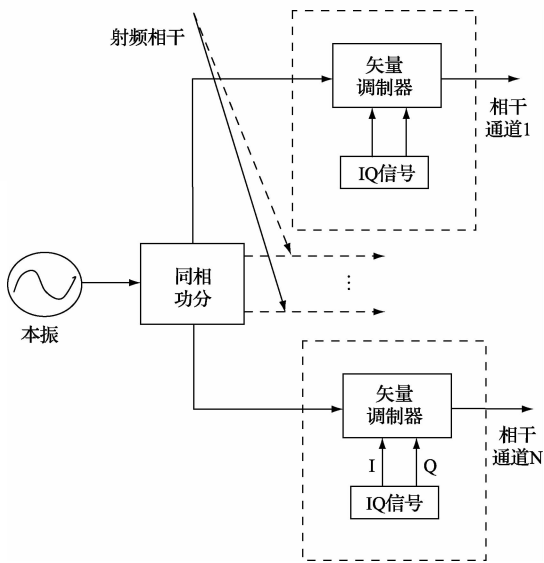


图3 基于矢量调制器的多路相干发生

4 矢量调制器非理想特性的影响与校准方法研究

矢量调制器的非理想特性主要来自以下几个方面：90°移相功分器存在幅度和相位误差；IQ信号的控制电压直流偏置和幅度都可能偏离理论值，对于正交调制应用这会导致载波抑制变坏；两路正交信号的幅度随IQ调制电压变化的非线性，也会使实际信号的实际相移偏离理论值^[12-13]。

1) 本振泄漏对移相精度的影响分析与校准

当I或Q等于“0”时，对应的同相或者正交部分输出应为0。但是两个双极性调制器不可能是完全匹配和平衡的，这样就会导致本振泄漏。对于调制器而言，如果在I或Q路上发生本振泄漏，则会影响调相精度。假设输出信号幅度为 A_0 ，相位角为 α ；泄漏信号幅度为 A_1 ，相位角为 β 。实际输出信号是理想信号和本振泄漏信号的矢量合成，如图4所示为本振泄漏对移相的影响示意。

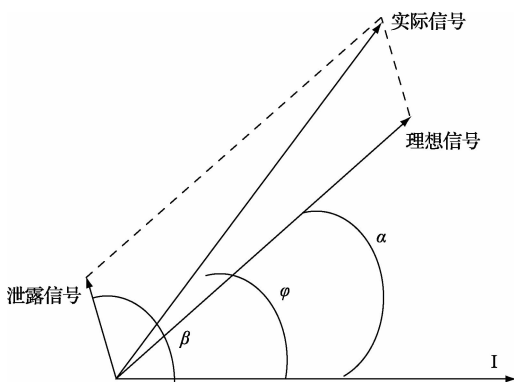


图4 本振泄漏对移相的影响示意

实际输出信号的幅度A和相位φ可以表示如下：

$$A = \sqrt{(A_0 \cos\alpha + A_1 \cos\beta)^2 + (A_0 \sin\alpha + A_1 \sin\beta)^2} \quad (5)$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{A_0 \sin\alpha + A_1 \sin\beta}{A_0 \cos\alpha + A_1 \cos\beta} \right) \quad (6)$$

显然，当产生的信号与泄漏信号正交时对信号的相位影响最大。泄漏信号幅度相对于信号的1%（-40 dBc）时，由式(5)和(6)可以算出，最大会导致约0.6°相位误差；泄漏信号幅度相对于信号的3.5%（-30 dBc）时，最大会导致约2°相位误差。

对于本振泄漏可以有两种补偿的手段，一种可以调整IQ信号输入的直流偏置，这需要在硬件电路中增加条件环节，一般可通过D/A转换电路来实现，但在一定程度上会增加电路的复杂性；另一种方法是调整基带信号发生器的输出电压来调节，这种方法的缺点是会牺牲基带信号转换D/A的电压范围，但是只要选择的D/A的精度能够高一些就可以弥补这种缺点。

2) I/Q支路幅度不平衡对移相精度的影响分析与校准

基带幅度不平衡、通道增益不平衡、混频器变频增益不平衡等原因会导致I和Q两路信号的幅度不平衡，同样会影响相位调整准确度。假设输出信号幅度为1，相位为α，Q路信号相对I路信号的幅度不平衡误差为Δ，则实际输出信号的幅度和相位可表示如下：

$$A = \sqrt{\cos^2\alpha + ((1 + \Delta)\sin\alpha)^2} \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan^{-1} \left(\frac{(1 + \Delta)\sin\alpha}{\cos\alpha} \right) \quad (8)$$

如图5所示为幅度不平衡对相位误差的影响示意。如果幅度不平衡为1%，导致的最大相位误差约为0.3°；如果幅度不平衡为5%，导致的最大相位误差约为1.4°。

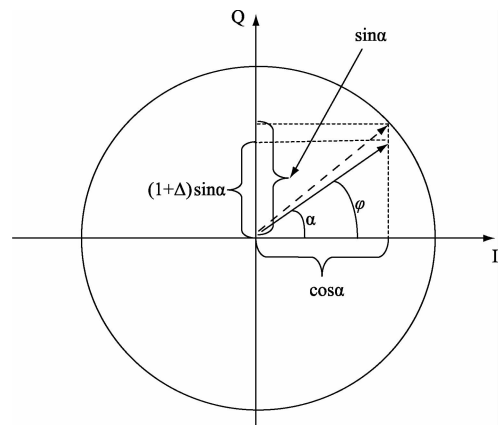


图5 幅度不平衡对移相的影响示意

这些由于IQ支路幅度不平衡引起的移相误差也可以通过改变IQ信号驱动电压值来修正。具体实现方法为：1)根据矢量调制器调制线性的要求设置合适的IQ信号的最大驱动电压值；2)在这一电压值的基础上分别设置

IQ 正负电压的最大值,在 0° 、 90° 、 270° 和 360° 4 个点设置 4 个校准数据,调整这 4 个校准数据,使对应的 4 种相位状态下的输出功率相等即可实现对 IQ 支路幅度不平衡的校准。

3) 正交相位误差对移相精度的影响分析与校准

由于 90° 移相器的移相误差、混频器相位匹配不理想等原因,在矢量调制器中本振信号功分出来的两路在合成时可能不完全正交,而是有一定的误差(通常称之为正交相位误差),从而也会造成输出的信号相位偏移。

假定,载波信号角速度为 ω_c ,矢量调制器正交相位误差为 α ,则移相产生的两个信号可以如下表示:

$$LO_1 = \sin(\omega_c t)$$

$$LO_2 = \cos(\omega_c t + \alpha)$$

如果不进行频率调制,改变载波信号的相位,显然在进行 90° 或者 270° 移相时,正交相位误差完全传递到输出信号,此时造成的移相误差最大。

正交相位误差的修正可以采用矢量信号合成原理来实现。基本原理如图 6 和 7 所示,图 6 中理想正交分量为 I 、 Q ,实际分量为 I_0 、 Q_0 ,合成矢量为 E 。由于存在正交相位误差实际上 I 和 Q 的夹角 θ 不是 90° , I 和 Q 分别被修正为 I_0 和 Q_0 ,如图 7 所示,保证实际合成矢量 E 和理想情况下相等。

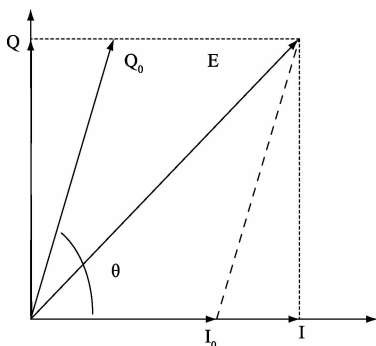


图 6 理想正交分量和实际正交分量示意

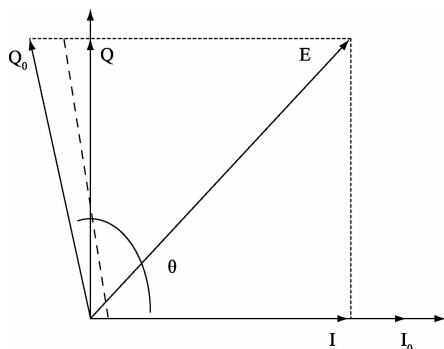


图 7 正交分量修正前后示意

通过计算分析,得到实际分量和理想分量之间的修正公式如下:

$$I_0 = I - Q \times \text{ctg}\theta$$

$Q_0 = Q/\sin\theta$ 具体实现修正方法为:设 I 为 1, Q 为 0,测量出射频矢量调制通道模块输出信号的相位,然后设 I 为 0, Q 为 1,再测量出射频矢量调制通道输出信号的相位,二者的差即为正交相位 θ ,通过上面的公式计算出补偿后的 IQ 信号的值。

4) 通道中其他因素的影响分析

多通道信号间的相位不仅取决于各个通道的点长度一致性,当信号频率、幅度改变时,均会带来相位改变,从而影响相干多通道输出信号之间的相对相位差。

如果整个信号通道中包含有对幅度控制的自动电平控制电路,则当输出信号功率变化时会引起信号的相位变化。此外当温度改变时,信号通道会存在增益漂移,此时为了保持信号输出信号功率不变,ALC 会自动调节信号通道中的功率调整电路来补偿通道的增益漂移,这样也会引起信号的相位漂移。如果信号通道中还包括步进衰减器,由于各个衰减量程的长度不同,因此选择的衰减量程不同对同一信号的相移也不同,而且在相同的衰减量程时不同频率下相移也会不同。

由于以上原因引起的通道中相位的改变,如果各个通道采用分别补偿的办法,那补偿的数据会非常复杂,包括频率的因素、功率的因素以及温度的因素等。不但数据繁杂,而且补偿中引入误差的几率也会增加,影响多通道间相位的精度。但是可以在设计多通道相干信号产生时,每个通道采用相同的设计,并尽可能保证每个通道处于相同的环境温度下,这样可以大大降低通道不一致带来的相位漂移。实际应用中关心的是最终几个通道之间相对相位差的准确性,所以采用先测量出通道间的相对相位差,通过软件计算调整各个通道中矢量调制器的移相度数,从而对齐或者调整多通道信号之间的相位。

5 实现结果

基于上述设计思想,设计了一种模块化的相位相干多通道信号发生装置,频率覆盖范围 $1\sim 18$ GHz,可以同时产生 2 通道相干信号。如表 1 所示实现的相干多通道信号发生装置实测移相精度,测试频率分别为 1 GHz、2 GHz、5 GHz、8 GHz 和 16 GHz,设置移相度数分别为 45° 、 135° 、 270° 和 315° ,移相误差在 $\pm 2^\circ$ 以内,取得了比较理想的效果。

表 1 两通道相干信号移相实验测试结果

频率	45°	135°	270°	315°
1 GHz	44.7°	134.8°	269.1°	315.5°
2 GHz	44.3°	134.3°	269.9°	314.1°
5 GHz	45.6°	135.1°	270.8°	315.5°
8 GHz	45.9°	135.9°	271.2°	313.7°
16 GHz	45.5°	135.6°	270.8°	313.5°

目前基于数控移相器的技术方案在微波频段一般只能做到有限的4~6 bit的控制,此时其移相度数只能是设置为有限的16~64个,无法实现360°范围内精细的移相控制。本文与之相比频率覆盖范围更宽,相位调节分辨率更加精细。同国外同类技术相比,本文的移相精度和频率覆盖范围与其在同一水平。在产生4路相干信号时,体积只有国外的1/3,而且成本低、使用灵活方便,更易于现场使用。相位控制范围大、精度高、调节分辨率精细等优点。

6 结论

本文通过研究矢量调制的基本原理和控制方法,提出了一种基于共本振矢量调制法的多通道相干信号产生方法。由于矢量调制的宽频率覆盖特性以及基于正交I/Q数字基带可实现对信号相位的精确控制,因此该方法具有频率覆盖宽、移相精度高等特点。但是由于工程实现过程中矢量调制器不可避免地会存在非理想特性,而且这种非理想特性随着频率的提高、频率覆盖范围的加大会越来越严重。因此基于该技术实现相干多通道信号的产生,必须针对这种非理想特性进行研究并校准修正。本文在此方面进行了研究并提出了相应的解决方法,通过实验测试取得了比较理想的效果。本文的研究成果为基于相干体制的多通道电子设备测试提供了一种高效便捷的信号模拟方法。

参考文献

- [1] 李学勇. 双/多基地雷达发展及关键技术[J]. 雷达与对抗, 2013, 33(2): 4-8.
- [2] 朱丰, 张群, 罗迎, 等. OFDM-LFM信号MIMO高分辨率雷达一次快拍稀疏成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1076-1085.
- [3] 喻龙, 王党卫, 马晓岩. 基于MIMO技术的相控阵雷达及目标检测方法[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(4): 235-239.
- [4] 刘晓, 李海森, 周天. 波束域相位中心互相关DOA估

计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(3): 202-207.

- [5] 喻龙, 王党卫, 马晓岩. 基于MIMO技术的相控阵雷达及目标检测方法[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(4): 235-239.
- [6] 张霍, 马佩军, 罗卫军. X波段GaN五位数字移相器MMIC的设计[J]. 电子器件, 2013, 37(3): 441-444.
- [7] 潘晓枫, 沈亚, 洪伟. 15~17 GHz高精度单片数控移相器的研制[J]. 固体电子学研究与进展, 2010, 30(1): 54-58.
- [8] 徐伟, 汤莹, 杨绪森, 等. 基于CPLD的高精度程控移相器[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 5-9.
- [9] 韩克武, 杨明辉, 孙芸. 毫米波矢量调制器及其在有源相控阵天线中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 26(2): 425-428.
- [10] 王宝平, 李力, 刘德喜, 等. C波段矢量调制器的设计[J]. 遥测遥控, 2013, 34(1): 48-52.
- [11] 朱畅, 袁乃昌. 一种宽带矢量调制器的设计及其应用[J]. 微波学报, 2006, 22(2): 55-58.
- [12] 方红, 卞昕, 何昭, 等. 基于星座图设计的矢量调制误差计量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 128-132.
- [13] 刘亮, 秦伟. 基于矢量调制技术的宽带微波高精度移相方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 475-478.

作者简介

刘亮, 高级工程师。主要研究方向为微波毫米波测试技术。

E-mail: 22466402@qq.com

何攀峰, 高级工程师。主要研究方向为信号发生与信号模拟技术。

台鑫, 工程师。主要研究方向为矢量调制与校准算法。