

一种数字矢量调制器设计与实现

牛伟,方鑫,叶峰,欧亚

(中国电子科技集团公司第26研究所,重庆400060)

摘要:提出描述了数字矢量调制器的设计方法、实现过程及试验结果。该数字矢量调制器采用数字与模拟相结合、混合集成工艺技术实现,其调试简单,控制电压与电压传输系数成线性关系,一致性好。在VHF频段内,衰减量变化30 dB时,其相位误差变化小于 $\pm 1.5^\circ$,I路与Q路的正交性小于 $\pm 2^\circ$ 。

关键词:数字矢量调制器;双极性衰减器;线性度;相位差

中图分类号:TN743

文献标识码:A

Design and Implementation of a Digital Vector Modulator

NIU Wei, FANG Xin, YE Feng, OU Ya

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The design method, implementation and testing results of a digital vector modulator are described in this paper. The proposed digital vector modulator is combined the digital technology and analog technology, implemented by the microwave hybrid integrated technology, and has the features of easy-to-adjust, good linearity with the control voltage and voltage transmission coefficient. The phase error change is less than $\pm 1.5^\circ$ and I/Q orthogonality is less than $\pm 2^\circ$ when the attenuation decrement change is 30 dB in VHF frequency range.

Key words: digital vector modulator; bipolar attenuator; linear; phase difference

0 引言

在现代通信系统中,当宽带接收机与功放处于同一平台工作时,会出现严重的干扰问题,当频率相隔较远时,可采用调谐滤波器把干扰信号滤除,但当信号频率很近,滤波器无法解决问题时,多采用干扰对消器来消除干扰信号。国内外对干扰对消器技术早有研究,致力于解决越来越严重的电磁干扰问题。矢量调制器作为干扰对消器的核心模块,其性能决定干扰对消器的整体水平。矢量调制衰减范围、相位的正交性和同轴相位的恒定性直接决定干扰对消器的对消比、对消响应时间及算法的复杂度。提高干扰对消器的性能本质就是提高矢量调制器准确产生所需相移和衰减的能力,本文提出数字矢量调制器的是为更好的实现其理论指标。

1 数字矢量调制器原理及测量

典型的数字矢量调制器是数字电路和模拟集成电路相结合的结果,数字电路部分包括控制部分、数模转换器及I/Q路缓冲器部分。模拟电路部分就是传统的矢量调制器,其由 90° 功分器、2个低相移双极性衰减器及功率合成器构成,其工作原理如图1所示。

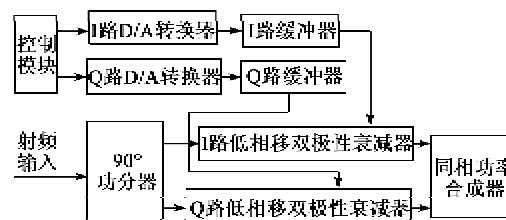


图1 数字矢量调制器原理框图

数字矢量调制器的工作原理是,射频输入信号经 90° 功分器正交分解为I路信号和Q路信号,两路信号分别馈入到低相移衰减器中,信号最后经过同相功率合成器相加在一起输出。控制模块产生的控制码通过D/A转换器为模拟电压,经过缓冲放大后控制低相移双极性衰减器;矢量调整器的输出信号^[1]为

$$u_c(t) = \frac{\sqrt{2}AA_c}{2} \cos(\omega_c t + \varphi_{in} + \varphi_c) \quad (1)$$

式中: A 为输入信号的幅度; ω_c 为载波频率; φ_{in} 为输入信号相位; A_c 和 φ_c 为矢量调制器的衰减和相移。

由式(1)可知,数字矢量调制器就是通过外界控制 A_c 和 φ_c 来改变输入信号的幅度和相位。

通过解析式来表达数字矢量调制器性能是存在

收稿日期:2013-12-22

作者简介:牛伟(1982-),男,安徽淮北人,工程师,硕士,主要从事跳频滤波器及矢量调制组件的研制。

误差的,主要包括以下方面:

1) 90° 功分器和同相功率合成器幅度和相位误差。

2) 控制码所产生不同电压值,其对输入信号的噪声抑制、非线性抑制均不同。

3) 不同衰减条件下,I/Q路低相移双极性衰减器所产生的相移也存在误差。为提高矢量调制器的性能,可通过校准和提高器件性能来减小误差。

要获得数字矢量调制器的性能,主要测量 I 路和 Q 路不同衰减值及其对应的相位,由于 A_c 和 φ_c 均为连续变化的变量,如果采用手工测量方法,测量值有限,无法反应数字矢量调制器的真实情况。为了解决问题,须设计自动测量系统,如图 2 所示。

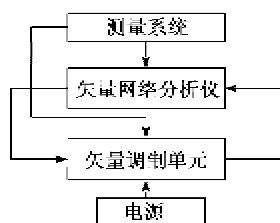


图2 数字矢量调制器自动测量系统

2 低相移双极性衰减器的设计

理想的低相移双极性衰减器是当衰减变化时,其相位维持不变,同相和反相状态相位差为 π ;低相移双极性衰减器一般是利用 FET 或 PIN 二极管的射频电阻随电压或电流变化的特性来实现对衰减量的控制。目前,此种主要采用基于 π 型结构电调衰减器^[2],如图 3 所示。本文采用另外一种改型的 π 型结构电调衰减器,其原理框图如图 4 所示。射频信号经过 180° 的功分器,直接进入 π 型衰减器,当控制电压为正电压时,其中一路衰减器导通,另外一路 π 型衰减器关断,导通段的开关打开,射频输出;当控制电压为负电压,工作原理类似。从结构上看,改型的 π 型结构的电调衰减器相比传统的 π 型结构的电调衰减器减少了反相器,首先就是插损减小了,其次就是反相器的工作带宽有限,一般仅约 20%,从而改进型的电调衰减器工作频带可以拓展到 2 个倍频程;使用开关替换了合路器可拓宽工作频带,减小插损,增加两路衰减器的隔离度,有利于幅度的稳定。

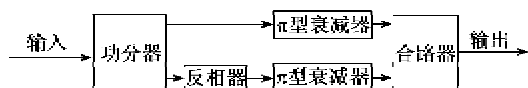


图3 基于 π 型结构的低相移双极性衰减器

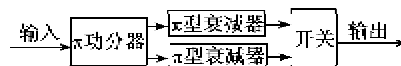


图4 基于 π 型结构的改型低相移双极性衰减器

π 型结构的电调衰减器具有插损小,结构简单等优点。

基本的 π 型衰减器(见图 5)及计算式^[3-4]为

$$R_1 = \frac{Z_0}{2} \left[K - \frac{1}{K} \right] \quad (2)$$

$$R_3 = Z_0 \left[\frac{K+1}{K-1} \right] \quad (3)$$

式中 K 为电压传输比。

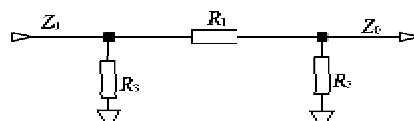


图5 基本 π 型衰减器原理框图

用 4 个 PIN 二极管代替图 5 中的 3 个电阻可得 1 个电调衰减器(见图 6),具有以下优点:

1) 用 2 个二极管代替 1 个二极管可提高衰减量或使工作频率上限加倍。

2) 因为对管二极管的串连电阻具有 180° 相位差,可抵消偶次失真。

3) 可得到对称的衰减网络与较简单的偏置电路。电路中 V_1 固定,用 V_c 的变化来控制电路的衰减量。

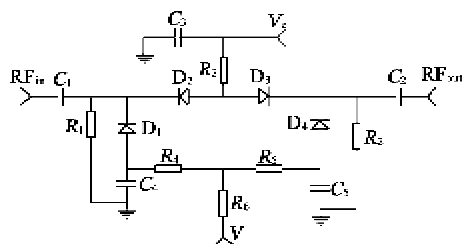


图6 π 型 PIN 衰减器原理框图

使用 2 个串连二极管将增大约 0.5 dB 插损。其中 R_1 和 R_2 作为 D_2 、 D_3 的偏压回路,所以,为减小插入损耗,就必须使 R_1 、 R_2 值足够大,但这要求偏值电压较高,如果频带要求不宽,可考虑在 R_1 、 R_2 和主传输线间加一电感来减小插入损耗, R_3 、 R_4 、 R_5 作为二极管的匹配电阻,适当选择其参数,可在大动态的衰减范围内为串连和旁路二极管提供正确的偏值与分流,使整个网络获得较好的匹配。

3 数字矢量调制器控制电路设计

数字矢量调制器的性能存在误差,这些误差是由器件本身的特性决定,因此,数字矢量调制器控制

电路设计的根本目的是大幅减小这些固有的误差,而在数字矢量调制器中,只能对 I、Q 两路上的低相移双极性衰减器进行控制,所以,减小误差的本质就是提高低相移双极性衰减器的控制精度。

为减小这些误差,在设计控制电路时,首先考虑将所有器件的固有误差信息存储起来,如理论上希望 90° 功分器的 0° 通道产生的 3 dB 的衰减和 0° 的相移,但实际情况中,其产生的衰减和相移是 3.5 dB 和 5° ,这就需要将这误差信息存入控制电路中,而对于低相移双极性衰减器,就需将不同控制电压对应的不同衰减量和相移这样一条特性曲线,整个存入控制电路中。当使用者通过输入接口将需改变的衰减和相移信息输入到控制电路,控制电路根据预先存入的各个器件固有的相移变化信息,通过计算,得到 I、Q 两路上需要变化的衰减量,再根据各器件的衰减变化信息,计算出 I、Q 两路上的低相移双极性衰减器需要变化的衰减量,最后根据存入的低相移双极性衰减器的特性曲线,得到需要产生的控制电压。

由于数字矢量调制器的各个器件都是模拟器件,即各器件的固有误差将随温度变化,因此一方面在存入这些固有信息时需要存入基于不同温度下的变化,另一方面,在控制电路上加上温度传感器,当计算 I、Q 两路上衰减器的衰减量时需基于当前温度进行计算。

为实现以上具有误差修正功能的控制电路,采用 Cyclone III 中的 EP3C25E144I7 这款 FPGA 作为核心处理器,其优点在于其拥有 24 624 个逻辑单元,能满足我们复杂控制流程设计的需求,同时其拥有 608 256 个存储单元,足够用来存储各个元器件基于温度的误差信息。整个控制电路设计的原理图如图 7 所示。

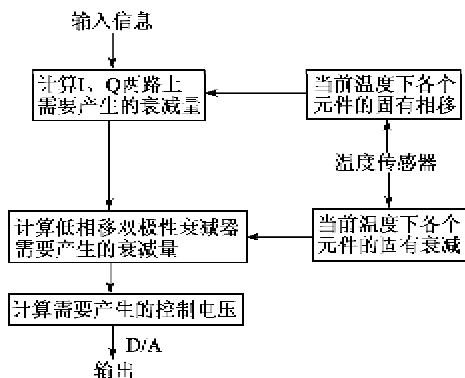


图 7 控制电路设计原理图

4 实验结果

图 8、9 分别为数字矢量调制模块校准前、后的电压衰减曲线。图 10 为数字矢量调制器 I 路在 6 dB、15 dB、30 dB 相对最小插损状态下的相位差,全频段内相位差小于 $\pm 1.5^\circ$ 。图 11 为数字矢量调制器 I 路与 Q 路的相位差,全频段内相位差小于 $90^\circ \pm 2^\circ$ 。图 12 为数字矢量调制器从关断到开通的响应时间,其响应时间小于 $3 \mu\text{s}$ 。

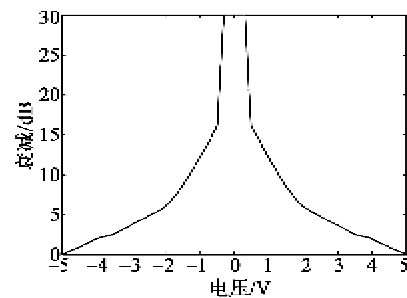


图 8 数字矢量调制器未校准的电压衰减曲线

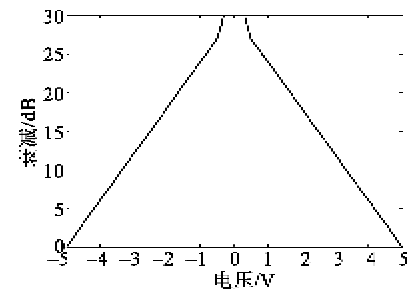


图 9 数字矢量调制器校准后的电压衰减曲线

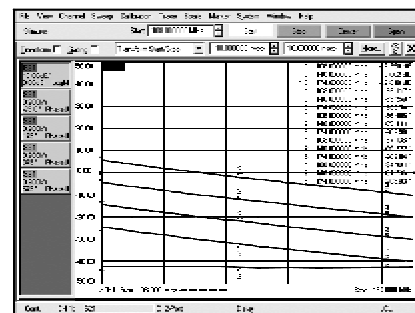


图 10 低相移双极性衰减器不同衰减下的相移

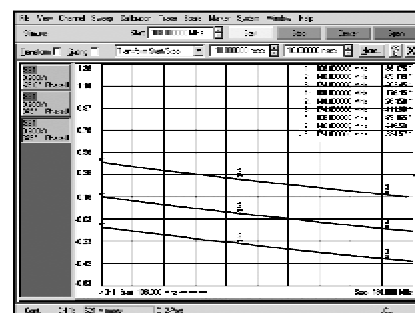


图 11 低相移衰减器同相和反相的相位差

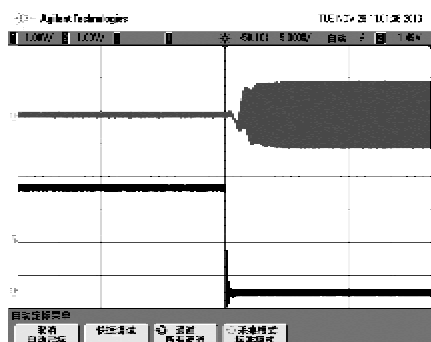


图 12 数字矢量调制器导通响应时间

5 结束语

试验结果表明,数字矢量调制器的线性校准方

(上接第 186 页)

参考文献:

- [1] 张长泉, 李立春. 坦克装甲车辆火控技术的现状及发展[J]. 火力与指挥控制, 2003, 10(5): 5-7.
ZHANG Changquan, LI Lichun. The status quo and the trend of fire control technology of armored vehicles [J]. Fire Control & Command Control. 2003, 10 (5): 5-7.
- [2] CAPOROSSI J. Target characterization by using B-spline curves for infrared image segmentation algorithms evaluation[J]. SPIE, 2001: 4379-4388.
- [3] 史豪杰, 邢清华, 沈继承. 基于支持向量机和无源特征的目标识别方法[J]. 电光与控制, 2009, 16(2): 36-38.
SHI Haojie, XING Qinghua, SHEN Jicheng. Airplane recognition based on SVM and passive features [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(2): 36-38.
- [4] BOGLER P L. Shafer-dempster reasoning with application to multisensor target identification systems[J].

(上接第 189 页)

- [5] TEO M L S, KONG L B, LI Z W, et al. Development of magneto-dielectric materials on Li-ferrite ceramics: I. Densification behavior and microstructure development[J]. J Alloy Comp, 2008, 459(1/2): 557-566.
- [6] KONG L B, TEO M L S, LI Z W, et al. Development of magneto-dielectric materials on Li-ferrite ceramics: III. Complex relative permeability and magneto-dielectric properties[J]. J Alloy Comp, 2008, 459(1/2): 576-

法是有效的,更利于系统整机的使用。矢量调制器不同衰减状态的相位差及跳频时间均能满足整机的使用要求,该模块的研制成功为微波对消器的研制打下了基础。

参考文献:

- [1] 黎剑, 蓝永海, 李大光, 等. 矢量调制器研究及干扰抵消器的改进[J]. 通信对抗, 2009(3): 58-61.
- [2] 邱力军. 短波电磁兼容自适应干扰抵消处理器[J]. 西安电子科技大学学报, 1992, 19(4): 30-35.
- [3] 白菊容. Pin 二极管 π 型电调衰减器的设计[J]. 广西民族学院学报: 自然科学版, 2005, 11(3): 74-76.
- [4] A low-cost surface mount PIN diode π attenuator[M]. S. I.; Hewlett-Packard Application Note 1048, 1997.

- IEEE Trans Syst, Man Cybern SMC, 1987, 17(6): 968-977.
- [5] ODUDA R, E HART P, GSTPRK D. Pattern classification[M]. New Jersey, USA: John & Sons Press, 2000.
- [6] 闫莉萍. 多速率传感器状态融合估计及多分辨率图像融合算法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [7] 刘贵喜. 多传感器图像融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [8] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [9] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. U. K: Thomson Press, 2002.
- [10] 范华春, 杨红江, 苏波. 坦克装甲车辆升降式周视稳定观瞄镜的设计与实现[J]. 车辆与动力技术, 2006, 9(3): 42-46.
FAN Huachun, YANG Hongjiang, SU Bo. The design and realization of the panoramic stabilized and elevated sight in tank and armored vehicles[J]. Vehicle & Power Technology, 2006, 9(3): 42-46.

582.

- [7] XIA Q, SU H, SHEN G C, et al. Investigation of low loss Z-type hexaferrites for antenna applications[J]. J Appl Phys, 2012, 111(6): 063921-1.
- [8] XIA Q, SU H, ZHANG T S, et al. Miniaturized terrestrial digital media broadcasting antenna based on low loss magneto-dielectric materials for mobile handset applications[J]. J Appl Phys, 2012, 112(4): 043915-1.