

# 一种高精度数控矢量调制器的设计

蒋 东

(中国西南电子技术研究所,四川 成都 630036)

**摘 要:**为了提高矢量调制器的技术指标,使得其所应用的射频干扰抵消实现更好的性能,该文提出了数字控制矢量调制器的技术方案,可以实现稳定的高精度矢调步进控制。测试结果表明,研制的矢调模块可以实现满足系统要求的 0.03 dB 的步进精度。

**关键词:**数控矢量调制器;高精度步进;电调衰减器;射频干扰抵消;电磁兼容

**中图分类号:**TN821+.8;TN828.4 **文献标识码:**A

## Design of High-precision Digital-control Vector Modulator

JIANG Dong

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

**Abstract:** In order to improve the technical index of vector modulator and realize a better performance in the usage of RF interference cancellation, the technical scheme of digital-control vector modulator is proposed in this paper. The stable and high-precision step control can be realized by using this proposed digital-control vector. The testing results show that the developed vector modulator module has realized the step-precision of less than 0.03 dB which has satisfied the system requirement.

**Key words:** digital controlled vector modulator; high-precision step; electrically controlled attenuator; RF interference cancellation; EMC

### 0 引言

矢量调制器的功能是对输入的两路同相信号进行正交相关调制,然后合成矢量信号,通过调整每路合成信号的幅度,从而得到所期望的矢量信号<sup>[1-2]</sup>。由于矢量调制器可同时调整信号的幅度和相位,因此,其在通信、雷达等领域得到了大量的应用,即

1) 在通信系统中,矢量调制器可用于射频信道中信号的接收解调。

2) 矢量调制器可用于雷达系统中的幅相控制、相控阵天线中队信号的复加权控制及单边带调制的多普勒模拟等场景。

3) 由于矢量调制器可对信号进行幅度和相位的调整,因此,它被广泛地用于系统中的干扰抑制。如共址系统中的收发耦合干扰信号抵消,功放中的预失真或前馈功率放大器中的交调失真抵消等<sup>[3-6]</sup>。

在干扰抵消中的应用,矢量调制器作为其中的

一个核心组件,用于进行抵消信号的高精度调整时,在系统中发挥了重要的作用。

### 1 矢量调制器在干扰抵消中的应用

在早期的电子信息平台,受限于电子技术水平与平台能力,系统中装备的无线电系统和设备较少,一般采用天线布局和滤波器技术作为技术手段,实现多个无线电设备的兼容工作。因航空载机和舰船等平台的发展和电子技术的巨大进步,则现代电子信息系统的的发展呈现出设备作用范围扩大,频段综合利用效率提升,接收机灵敏度动态范围提高等技术特点,这使得接收机同平台共址兼容成为系统电磁兼容设计中的重点。射频干扰抵消技术即是最近几十年发展起来的一种系统电磁兼容技术。

射频干扰抵消技术通过构建一个与干扰信号幅度相同,相位相反的射频信号,并与干扰信号合成,从而对干扰信号形成抵消效果。抵消技术原理简单,便于用多种技术形式实现,干扰信号的正交合成

技术即是最开始技术实现形式。由于具有“选择性”的特点,射频干扰对消技术在近几十年内得到了长足的发展<sup>[7-10]</sup>。图1为对消可实现对滤波器带宽内的干扰抑制<sup>[10]</sup>,图中, $f$ 为频率, $A$ 为信号幅度。

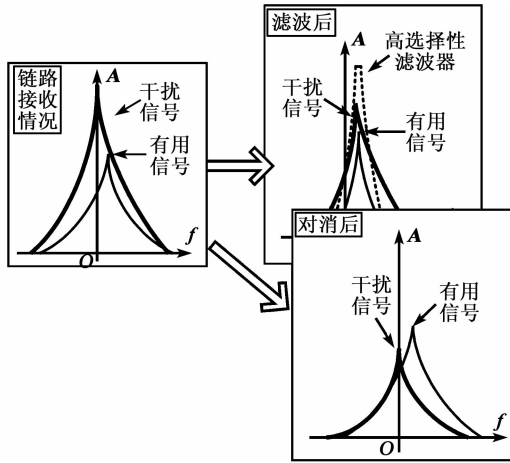


图1 对消可实现对滤波器带宽内的干扰抑制

以正弦波信号为例,如图2所示<sup>[10]</sup>,不考虑其时间变化,其可以描述为极化图上的一个固定矢量信号  $A$ 。矢量信号  $B$  是该信号的等幅反向信号,用于对消该干扰信号,使两者的合成矢量信号为  $0$ 。

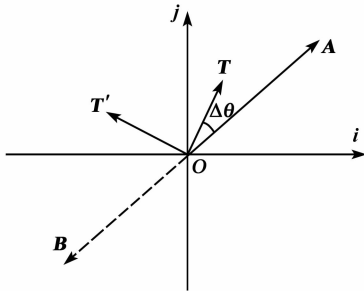


图2 矢量信号的正交合成

图1中,矢量  $A$  在正交矢量  $T$  和  $T'$  上的投影分别为

$$\frac{A \cdot T}{|T|^2} = A \cdot \cos(\Delta\theta) \tag{1}$$

$$\frac{A \cdot T'}{|T'|^2} = A \cdot \sin(\Delta\theta) \tag{2}$$

通过把正交矢量  $T$  和  $T'$  上的单位矢量分别缩放  $\frac{A \cdot T}{|T|^2}$  倍和  $\frac{A \cdot T'}{|T'|^2}$  倍,并且将该两个信号反向,进行矢量相加,从而得到干扰矢量的反向矢量信号  $B$ 。对消的执行过程,即是不断调节矢量  $T$  和  $T'$ ,使矢量  $B$  达到与矢量  $A$  等幅反向的过程<sup>[7-10]</sup>。这个正交矢量  $T$  和  $T'$  的调节过程的实现即是采用矢量调制器实现。

整个调整过程是基于对消合成后的信号参量,利用算法控制矢量调制器逐步调整,最后实现满足系统要求的对消效果。

## 2 高精度矢量调制器的设计与研制

### 2.1 矢量调制器的总体构架

矢量调制器的典型功能构架如图3所示。根据矢量调制器的总体功能框架,设计了矢量调制器的系统框架,其对外有1个控制接口和2个射频接口。整个矢量调制器由正交电桥、 $0/\text{PI}$ 移相器、高精度电调衰减器及功分合路器等典型器件组成。为了在系统中配合使用,矢量调制器也具有控制功能,接收外部的控制指令,并且转换为对反相器和电调衰减器的控制。

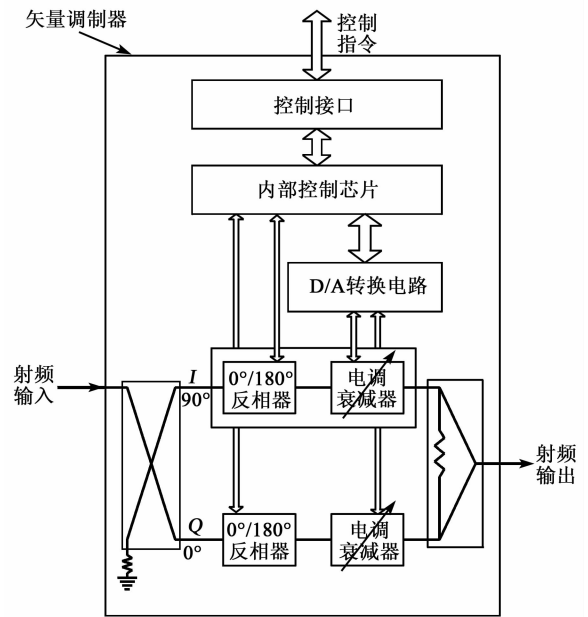


图3 典型的矢量调制器构架示意图

由图3可知,当输入信号进入矢量调制器后,其先通过正交电桥分成  $I$  路和  $Q$  路两路等幅正交的信号输出。输出的两路正交信号分别经过相同的  $0/\text{PI}$  移相器和电调衰减器,最后通过功分合路器合成后输出。在矢调电路中, $0/\text{PI}$  反相器使正交的两路信号可以同相或反相调整;电调衰减器通过改变衰减量从而改变每路信号的幅度。如图4所示, $I_m$  和  $Q_m$  表示  $I$  路和  $Q$  路可以实现的最大的信号幅度。矢量  $A$  由两个正交矢量  $AI$  和  $AQ$  合成,通过改变  $AI$  和  $AQ$  的正、反向及信号幅度,可以实现矢量  $A$  在等幅圆上及圆内的任意  $360^\circ$  调整。

矢调的幅度调整可以放大或缩小,但是高精度

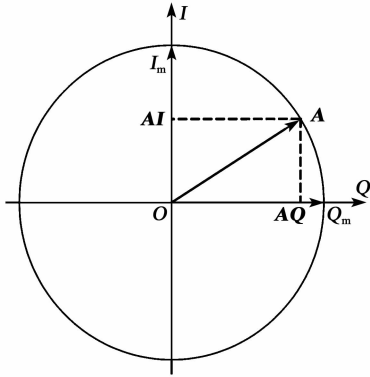


图 4 正交合成的原理模型

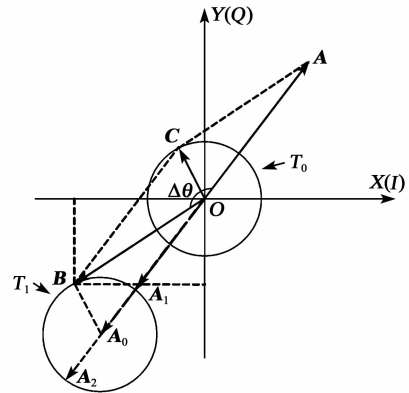


图 5 矢量相加分析模型

的可变增益放大在实现上难控制,高精度的信号幅度衰减控制易实现,因此,在矢量调制器的工程实现上,一般均采用大信号输入,通过高精度的可调衰减器控制信号调整步进,实现所需幅度调整。

### 2.2 矢量调制器的指标设计

矢量调制器的步进精度是系统中的一个重要指标,该指标决定着系统的对消效果。

如图 5 所示,从干扰矢量  $A$  与其对消矢量  $B$  进行对消比的推导,设定对消后的矢量为  $C$ ,最后得到干扰信号和对消后信号的功率之比,即对消比:

$$D(\text{dB}) = 10\log\left(\frac{A}{C}\right)^2 = 10\log\left(\frac{A}{A+B}\right)^2 = -10\log[1 + 2 \times 10^{\frac{M}{20}} \cos(\Delta\theta) + 10^{\frac{M}{10}}] \quad (3)$$

式中:  $M = 20\log(|B|/|A|)$  为对消矢量与干扰矢量的功率比。根据式(3),从矢量相加的角度进一步分析,满足式(3)条件的矢量  $C$  的矢端轨迹为直角坐标系中的一个圆,即图 5 所示的  $T_0$  圆,该圆也是系统的等对消比圆。

根据矢量相加原则,有

$$C = A + B \Rightarrow B = C - A \Rightarrow B = C + (-A) = C + A_0 \quad (4)$$

矢量  $C$  的矢端轨迹是一个圆,矢量叠加后,矢量  $B$  的矢端轨迹也是一个圆,即是以矢量  $A_0$  的端点为圆心,以矢量  $C$  的幅度为半径的一个圆(见图 5 中的  $T_1$  圆)。由图 5 可知,矢端落在  $T_1$  圆上的矢量  $B$  与矢量  $A$  合成后,形成的矢量落在圆  $T_0$  上。根据对消比指标,可推导出满足该指标的  $M$  的取值范围为  $[20\log(|A_2|/|A|), 20\log(|A_1|/|A|)]$ 。

以最大功率比的绝对值为参照,该指标对应到矢量调制器每路步进的最大取值要求。将该指标投影分解到矢量调制器正交坐标系的两个坐标轴上,最后计算得到对消比与矢量调制器每路坐标轴的步进精度的关系。表 1 为对应指标计算分析。在采用矢量调制器的对消系统中,只要矢量调制器每路的步进精度不大于功率步进要求,即可实现对应的对消比。

表 1 对应指标计算分析

对消比/dB	矢量间功率比/dB	矢量间角度差范围/(°)	矢量调制器坐标轴功率步进/dB
20	$[-0.915\ 150\ 0, 0.827\ 850\ 0]$	$[174.260\ 8, 185.739\ 2]$	1.230 400 0
30	$[-0.279\ 110\ 0, 0.270\ 420\ 0]$	$[178.187\ 8, 181.812\ 2]$	0.388 510 0
40	$[-0.087\ 296\ 0, 0.086\ 427\ 0]$	$[179.427\ 0, 180.573\ 0]$	0.122 840 0
50	$[-0.027\ 511\ 0, 0.027\ 424\ 0]$	$[179.818\ 8, 180.181\ 2]$	0.038 845 0
60	$[-0.008\ 690\ 2, 0.008\ 681\ 5]$	$[179.942\ 7, 180.057\ 3]$	0.012 284 0
70	$[-0.002\ 747\ 2, 0.002\ 746\ 3]$	$[179.981\ 9, 180.018\ 1]$	0.003 884 4

### 2.3 高精度的数控衰减的实现

整个矢量调制器的指标包括正交性、步进精度及动态范围等,其中最重要的指标步进精度由电调衰减器实现。电调衰减器一般采用 PI 型衰减

器<sup>[11]</sup>。典型的 PI 型衰减器<sup>[5,12]</sup>的工作带宽,插损等略有不足,通过对 PI 型衰减器进行改进,可以提升 PI 型衰减器的性能。

系统中设计采用的 PI 型衰减器的电路示意图

如图6所示。为保证全温范围内的衰减变化特性,电调衰减器采用温度补偿型。在电路中采用对称的电路排布设计,固定 $V_2$ 处的电压,可采用电压 $V_1$ 来控制衰减量。在电路中采用对管二极管来替代单个二极管,提高电路的衰减动态范围和工作频率范围。电路中的 $R_1$ 和 $L_1$ 实现到地的直流通路。 $R_2$ 和 $R_3$ 为电路的匹配电阻,合理选择可以在整个衰减动态范围内提供较好的匹配。整个电路具有控制范围广,工作频率宽,信号失真小等特点。

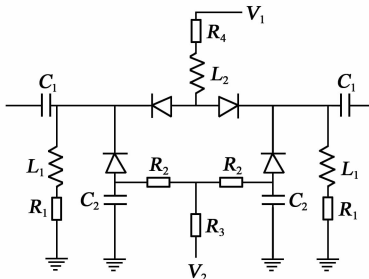


图6 PI型衰减器电路示意图

电路中采用的PI型衰减器是压控衰减器,其信号衰减幅度受输入电压 $V_1$ 的控制。以某工程项目中实现50 dB对消比为要求,进行矢量调制器的控制设计分析。实现该对消比所需矢量调制器的动态范围要求为25 dB,每路步进为0.038 8 dB。则系统中最小需要的离散控制量为 $25/0.038 8 \approx 644$ 个,这些离散控制信息通过电路中的D/A转换后转换成控制PI型衰减器的控制电压。

PI型衰减器的控制电压曲线与衰减曲线之间的关系一般为二次曲线关系。当PI型衰减器的衰减较大时,相同电压变化步进下,衰减变化增大,因此,需要步进精度更小的控制输出电压。经过实际测试,在电调衰减器衰减较大时,同样的离散控制量转换成电压后,衰减步进为其衰减较小时的两倍多。从系统实际控制考虑,兼顾余量,选取了可实现2 048个离散控制量的11位D/A转换芯片,确保可实现系统要求的最小0.038 8 dB的步进精度。

#### 2.4 矢量调制器的研制与测试

根据指标要求,进行了对应的系统电路构架设计,电路中组件设计,芯片选型,设计研制了矢量调制器的实物如图7所示。经过实际测试,研制的矢量调制器的主要指标如下:

幅度控制:动态 $\geq 25$  dB;

相位控制范围: $0^\circ \sim 360^\circ$ ;

响应时间: $\leq 5 \mu\text{s}$ ;

步进: $\leq 0.03$  dB。

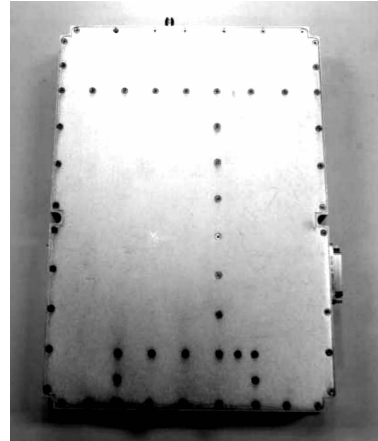


图7 矢量调制器实物照片

### 3 结束语

矢量调制器作为实现干扰对消的重要组成部分,其信号步进精度与系统的对消比相关。本文讲述了矢量调制器的系统设计,分解了矢量调制器的步进精度指标,设计并研制了矢量调制模块的实物,研制的矢量调制器实物可以满足系统的总体技术指标要求。

#### 参考文献:

- [1] 潘晓枫,沈亚,洪伟. 15~17 GHz高精度单片数控移相器的研制[J]. 固体电子学与进展, 2010, 30(1): 54-58.  
PAN Xiaofeng, SHEN Ya, HONG Wei. 15~17 GHz high precision digital phase shifter MMIC[J]. Research & Progress of SSE Solid State Electronics, 2010, 30(1): 54-58.
- [2] 陈荣. I-Q矢量调制器在噪声干扰模拟器中的应用分析[J]. 舰船电子对抗, 2004, 27(2): 7-10.  
CHEN Rong. Applied analysis of I-Q vector modulator in noise jamming simulator[J]. Shipboard Electronic Warfare, 2004, 27(2): 7-10.
- [3] 田为中,钱蓉,喻筱静,等. X波段混合集成平衡I-Q矢量调制器[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 615-618.  
TIAN Weizhong, QIAN Rong, YU Xiaojing, et al. X-band hybrid integrated balanced vector modulator[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2007, 13(6): 615-618.
- [4] 韩克武,杨明辉,孙芸,等. 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, 30(5): 425-428.