

基于高速 ECL 数字电路的宽带多模信号的产生和设计¹

蔡英杰 李衍忠 向敬成

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要 该文给出了一种基于高速 ECL 数字电路的宽带多模信号产生系统,并简要介绍了线性调频(LFM),非线性调频(NLFM)信号产生系统的设计方法,该文实现系统的时钟频率为 280MHz,可输出带宽 70MHz 以下的多种时宽的 LFM, NLFM 信号,实际测试结果表明,该宽带信号产生系统输出的谐波与杂散均小于 -55dB,完全可以满足工程应用的要求。

关键词 数字产生, 宽带信号, 线性调频, 非线性调频, 脉冲压缩

中图分类号 TN911.72, TN79

1 引言

如何获得强的目标识别能力、好的抗干扰和抗截获性能是现代雷达研究的重要方向。强的目标识别能力的获得在很大程度上依赖于距离维上的高分辨。由雷达信号理论可知,距离分辨力及测量精度取决于雷达发射信号的频域结构。信号带宽越大,距离分辨力越好,测量精度也越高;速度分辨力及测量精度则取决于信号的时域结构。信号持续时间越长,速度分辨力和测速精度越高。也就是说,距离维上的高分辨力可以通过使用大时宽带宽积的信号来实现。

大时宽带宽积信号的应用除了可以实现距离维上的高分辨以外,还可以在在一定程度上提高雷达系统的抗干扰和抗截获性能,并能在雷达发射机峰值功率受到限制的条件下提高雷达系统的作用距离^[1]。

由于在雷达系统中使用大时宽带宽积的信号可以使雷达系统获得许多好处,因此高质量的大时宽带宽信号的设计与产生成了现代雷达系统设计中的一个重要课题。

下面将主要讨论宽带信号产生系统的设计方案和实现方法,并给出了雷达系统中广泛应用的 LFM 和 NLFM 信号的设计方法。最后给出了信号产生系统输出的实际测试结果。

2 宽带脉压信号的设计

由信号理论可知 LFM 信号的复数表示形式为

$$s(t) = a(t)e^{j2\pi f_0 t} = \begin{cases} (1/\sqrt{T})\text{rect}[t/T]e^{j2\pi(f_0 t + Kt^2/2)}, & -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0 & |t| \geq T/2 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $a(t) = (1/\sqrt{T})\text{rect}(t/T) \exp(j\pi Kt^2)$ ($-T/2 \leq t \leq T/2$) 为信号的复包络, T 为信号时宽, $K = B/T$, B 为信号带宽。将 (1) 式用实信号来表示则有

$$\begin{aligned} f(t) &= \text{Re}[s(t)] = \cos(2\pi f_0 t + \pi Kt^2) \\ &= i(t) \cos(2\pi f_0 t) - q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad -T/2 \leq t \leq T/2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$i(t) = \cos(\pi Kt^2), \quad -T/2 \leq t \leq T/2 \quad (3)$$

$$q(t) = \sin(\pi Kt^2), \quad -T/2 \leq t \leq T/2 \quad (4)$$

¹ 1999-10-08 收到, 2000-04-07 定稿

$i(t)$ 和 $q(t)$ 分别称为同相分量和正交分量。利用 (3) 式和 (4) 式即可精确的产生 $f(t)$ 。(2) 式表明了正交调制的过程。正交调制的实现可参考文献 [2]。

通常可以利用信号的模糊函数来设计 NLFM 信号。但直接应用信号的模糊函数来设计 NLFM 信号时，其数学求解十分复杂。因此一般情况下我们采用信号的一维距离模糊函数并运用逗留相位原理来进行求解。求解过程参见文献 [3]。其结论可归结如下

$$T(f) = K \int_{-\infty}^f W(x)dx \tag{5}$$

$$f(t) = T^{-1}(f), \quad 0 \leq t \leq T \tag{6}$$

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f(x)dx, \quad 0 \leq t \leq T \tag{7}$$

$$s(t) = e^{j[2\pi f_0 t + \phi(t)]}, \quad 0 \leq t \leq T \tag{8}$$

计算时首先由给定的窗函数 $W(f)$ 按 (5) 式求得信号群延时函数 $T(f)$ ，其中常数 K 则根据具体的时延和频率偏移确定。通常 $T(f)$ 是非线性函数，令 $t = T(f)$ ，可采用迭代或内插等数值计算方法由 (6) 式确定 $T(f)$ 的反函数，即 NLFM 的调频函数 $f(t)$ 。进一步按 (7) 式计算相位 $\Phi(t)$ ，由 (8) 式即可得到信号波形。与 LFM 信号类似，(8) 式也可以表示为实函数，因此它也可以通过正交调制的方式来实现。

3 宽带信号产生系统的设计

本宽带信号产生系统采用了先产生正交 I、Q 两路基带信号再进行正交调制的方案。系统工作原理框图如图 1 所示。图 1 中各模块的作用和模块设计中的关键性技术如下：

模块联动复位模块：该模块用于保证两路基带产生模块之间严格的同步工作特性。当两路基带信号产生模块不能保持严格同步工作时系统的输出信号质量将迅速降低。这主要表现在输出信号的脉压主副比迅速下降。

基带产生模块：该模块用于产生信号的基带 I、Q 波形，其工作原理框图如图 2 所示。图 2 中虚线框中的部分构成了本模块的主要工作逻辑，即总线数据率加速逻辑。

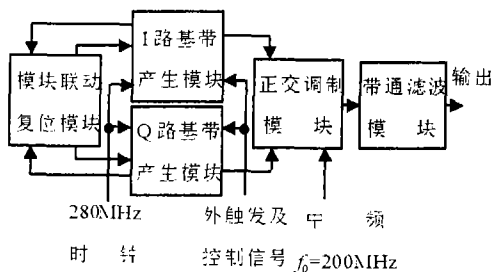


图1 宽带信号产生系统原理框图

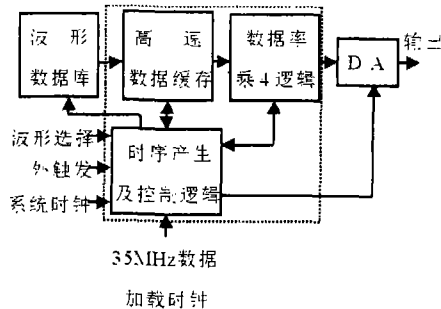


图2 基带产生模块原理框图

总线数据率加速逻辑的工作原理框图如图 3 所示。图中的 FIFO1~FIFO4 是 4 片可工作于 100MHz 的先进先出 (FIFO) 存储器，它们被作为高速缓存。

之所以选择 FIFO 作为高速缓存主要是出于简化电路设计的考虑。数据加速逻辑的作用是将 4 路 70MHz 的数据流合成为 1 路 280MHz 的数据流。总线数据和各路 FIFO 的输出数

据应满足图 4 所示的时序关系。由图 4 可以看出, 总线数据加速逻辑是以流水线方式工作的。

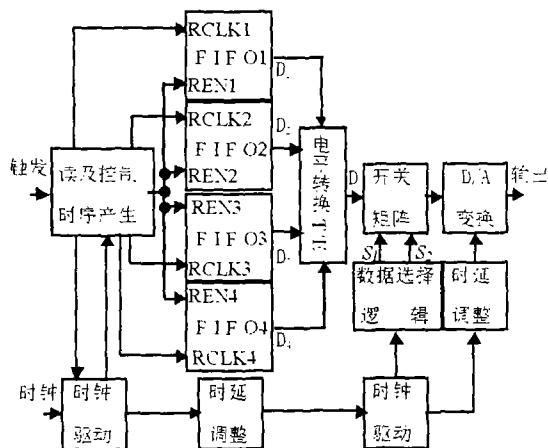


图 3 总线数据加速逻辑原理框图

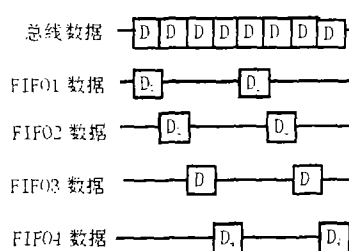


图 4 总线数据与高速缓存输出数据的关系

由于 ECL 存储器的容量一般较小, 所以在系统设计中采用了 TTL 逻辑和 ECL 逻辑混合设计的方法。正因如此, 在该模块设计中如何解决好慢速的 TTL 逻辑和高速的 ECL 逻辑的兼容问题及模块本身的电磁兼容问题成为模块设计的关键之一。

当本系统的工作时钟为 280MHz 时, 基带产生模块可产生的基带信号的最大带宽可达 35MHz, 这是按照 8 倍数据转换率 (8 倍数据转换率是由计算机模拟和实验确定的) 换算得到的结果。8 倍数据转换率的含义是, 基带产生模块的最高输出频率与模块中 D/A 数据转换速率之比。如果采用波形数据的预失真技术, 在同样的时钟频率下将可以产生更大带宽的基带信号。当然, 通过提高系统工作时钟频率也可以达到产生更大带宽信号的目的。由于器件的关系, 本系统的最高工作时钟频率为 400MHz。

正交调制模块: 该模块的作用则是利用所产生的基带波形来合成所需的中频输出信号波形。本模块包括了对基带信号进行低通滤波所需的低通滤波器。对该模块来说, 如何获得大相对带宽情况下线性良好的正交调制器和带内反射极小且幅频、群时延特性平坦的低通滤波器 (带内反射系数小于 -50dB、带内群时延变化小于 1%) 是设计成败的关键。经实验测定, 当低通滤波器的带内反射和群时延较大时系统输出信号的脉压主副比将急剧下降。所以从一定程度上来说, 低通滤波器设计的好坏将直接影响整个系统设计的性能指标。

带通滤波模块: 该模块的主要作用是对正交调制器的输出进行滤波, 以抑制带外杂散。由于该系统的输出中频为 200MHz, 而调频带宽为 70MHz, 因此在该模块的设计中, 相对带宽达 35% 的幅频特性和群时延特性平坦且带外衰减好的带通滤波器的设计技术是该模块设计中的关键性技术。带通滤波器的设计指标将直接与系统输出信号的杂散、谐波和带内波动等指标密切相关。宽带带通滤波器的设计方法可参考文献 [2]。

4 宽带信号产生系统输出测试结果

图 5 和图 6 分别给出了本文所述系统输出的中频 200MHz、时宽 20 μ s、带宽 70MHz 线性调频和非线性调频信号的频谱。图 5 和图 6 的测试结果可知, 系统输出的中频 200MHz 的 LFM 和 NLFM 信号频谱特征符合理论计算的 LFM 和 NLFM 信号的频谱特征。输出的 LFM 信号频谱具有较好的矩形特性和小于 -55dB 的谐波和杂散指标, 且输出信号频谱带内平坦波动小、带宽满足设计要求。

对于本系统产生的其它一些不同时宽和带宽的 LFM 和 NLFM 信号, 表 1 给出了对它们的基带 I、Q 分量(经 35MHz 低通滤波)进行 100MHz 的数据采集后, 计算机进行脉冲压缩处理的结果。

对表 1 中信号进行脉压处理时均采用 Hamming 窗进行加权, 并对时带积小于等于 100 的 LFM 和 NLFM 信号采用了谱修正技术。由表 1 的脉压结果可知, 本文所述系统输出的不同时宽和带宽的 LFM 和 NLFM 信号具有较为理想的脉冲压缩性能, 完全可以满足实际工程的需要。

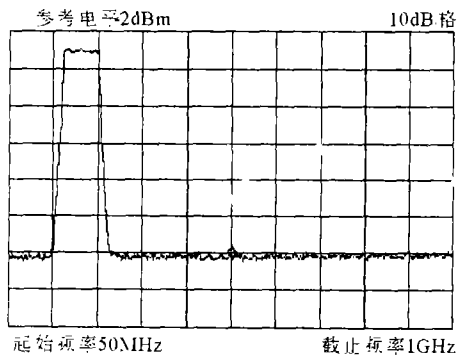


图 5 输出的 70MHz 带宽的 LFM 信号频谱

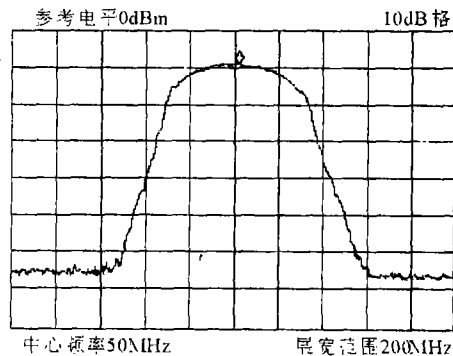


图 6 输出的 70MHz 带宽的 NLFM 信号频谱

表 1 系统输出基带信号经 100MHz 数据采集后的脉压结果

信号形式	线性调频					非线性调频
	时宽 (μs)	20	20	10	10	
带宽 (MHz)	70	5	70	5	70	70
主副比 (dB)	42.1	54.3	37.7	32.7	35.5	41.5

5 结论

测试结果表明, 本宽带信号产生系统的设计方案是可行的, 由该方案所实现的宽带信号产生系统输出的宽带 LFM 和 NLFM 信号具有较为理想的脉冲压缩性能, 完全可以满足工程应用的要求。如果在本系统之后加上倍频链, 则由此构成的新系统具有产生调频带宽 400MHz 或 800MHz 信号的能力^[4]。此外, 实验证明, 本系统的单路基带产生模块可用于最高频率不大于 50MHz 信号的中频直接产生。

采用 280MHz 的系统工作时钟来产生 70MHz 中频调频带宽的 LFM 和 NLFM 信号, 并达到表 1 所述指标的宽带信号产生系统, 在国内未见报道。

参 考 文 献

- [1] 林茂庸, 柯有安, 雷达信号理论, 北京: 国防工业出版社, 1984, 115-127.
- [2] 蔡英杰, 向敬成, 宽带 LFM/NLFM 信号及其产生, 系统工程与电子技术, 1999, 21(1), 36-40.
- [3] 杨斌, 多信号脉冲压缩系统及低旁瓣处理方法研究: [博士论文], 成都电子科技大学, 1999.
- [4] H. D. Griffiths, W. J. Bradford, Digital generation of high time-bandwidth product linear FM waveforms for radar altimeters, IEE Proc-F, 1992, 139(2), 160-169.

THE DESIGN AND GENERATION OF MULTI-MODE WIDEBAND SIGNALS BASED ON HIGH SPEED ECL DIGITAL CIRCUITS

Cai Yingjie Li Yanzhong Xiang Jingcheng

(*College of Electron. Eng., UEST of China, Chengdu 610054 China*)

Abstract In this paper, a multi-mode signal generation system based on high speed ECL digital circuits is introduced. The method to design LFM and NLFM signal systems is also discussed. The implemented system working at clock frequency of 280MHz can output LFM and NLFM signals with different time duration and frequency bands within 70MHz. The measurement results of the system show that its performances of harmonic and spurious signals less than -55dB . It can meet the needs of practical engineering applications.

Key words Digital generation, Wideband signal, LFM, NLFM, Pulse compression

蔡英杰：男，1964 年生，博士生，研究方向：信号与信息处理。

李衍忠：男，1968 年生，工程师，研究方向：信号与信息处理。

向敬成：男，1938 年生，教授，博士生导师，研究方向：信号与信息处理。