

一种数字式正交检波器的设计¹

吴远斌

(南京电子技术研究所 南京 210013)

摘要 本文提出了一种直接对中频信号进行 A/D 变换,然后在数字域中对信号进行正交检波处理的新方法。由于是在数字域中进行检波,因而可以得到高质量的正交检波信号,高保真、高效率地提取载波信号中的信息,大大提高了系统的整机性能。最后还给出了一种实验方案和实验结果。

关键词 中频采样, 数字检波, 正交 I、Q 通道

中图分类号 TN79

1 引言

在通信、雷达和声纳系统中,通常采用正交 I、Q 通道处理的办法来进行检波,传统的处理办法如图 1 所示。这种方法由于模拟元器件本身的精度所限,致使其检波失真大,效率低,并且到了一定精度,就很难再得到提高,从而大大限制了系统的整机性能^[1]。

随着现代科学技术的发展,如何高保真地提取载波信号中的有用信息已成为接收机迫切需要解决的一个问题。如在雷达中,为了消除过强的背景杂波和干扰,提高雷达分辨率,接收机必须提供高质量的检波信号以供信号处理机进行处理。在扩谱通信、移动通信和保密通信系统中,用模拟方法解调 BPSK、QPSK 等复杂调制的信号,失真大,误码率高,而且体积大,结构复杂。本文提出的直接中频采样,然后进行数字正交检波的方法就能提供高保真的检波信号,彻底解决了长期困扰接收机的检波失真和检波效率问题。这种方法是对传统检波技术的一次重大改革,必将对现代接收机设计产生重大影响。

2 工作原理

直接中频采样和数字正交检波的原理为:直接中频采样后,将数字中频信号与正交的两路数控振荡信号(Numerically-controlled Oscillator,简称“NCO”)进行数字乘法,然后通过数字低通滤波,得到 I、Q 两路正交基带信号。其原理框图如图 2 所示。

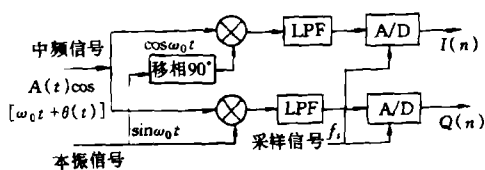


图 1 传统的正交 I、Q 通道

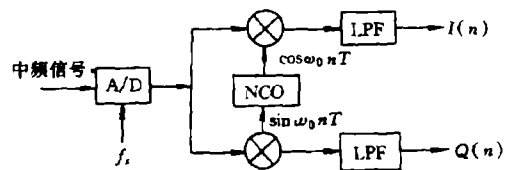


图 2 数字正交检波器的原理框图

¹ 1995-05-15 收到, 1995-12-13 定稿

与图 1 模拟式检波方法对比可见，这种方法与传统的模拟式正交双通道处理方法在原理上是一致的，只不过将对模拟信号的处理转换到数字域中来进行。由于数字电路处理精度高，稳定性好，它解调出来的 I 、 Q 通道间的幅度一致性和相位正交性要远远优于一般的模拟式 I 、 Q 通道。如果排除 A/D 量化误差和 A/D 瞬间相位抖动的影响，这种方法解调出来的 I 、 Q 通道间的幅度是完全一致的，而相位是完全正交的。也就是说它能够无失真地对信号进行解调。

下面对这种方法的两项关键技术：A/D 采样和 NCO 进行一下分析。

显而易见，这种方法加重了 A/D 变换器的负担，因为直接对中频信号进行采样，势必要求 A/D 变换器的输入带宽要比在基带采样时宽许多，否则信号要失真。那么 A/D 变换器的采样频率又该如何选取呢？根据奈奎斯特定理，A/D 变换器一定要以大于或等于信号频率两倍的采样率对信号进行采样，才能保证信号不失真。但对数字正交检波器而言，A/D 变换器的采样频率不要求高于中频信号中最高频率的两倍，只要高于中频信号带宽的两倍就行了，但必须正确选择采样频率以避免采样后信号频谱发生混叠。

设信号带宽为 B ，中心频率为 f_0 ，而采样频率为 f_s 。可以推算，由下式来选取 f_s 可避免频谱混叠：

$$x = f_0/B + 0.5,$$

$$f_s = (2f_0 + B)/N, \quad N \text{取小于等于 } x \text{ 的最大整数.}$$

如 $f_0=29\text{MHz}$ ， $B=2\text{MHz}$ 。则 $N=29/2+0.5=15$ ， $f_s=60/15=4\text{MHz}$ 。采样前和采样后的信号频谱如图 3 所示。按理 f_s 应 $\geq 2(29+2/2)=60\text{MHz}$ ，但按 $f_s=4\text{MHz}$ 采样后，由图 3 可见，载波上所携带的信息并未丢失。因为我们需要的只是载波上所携带的信息，而不必再恢复载波 [2,3]。

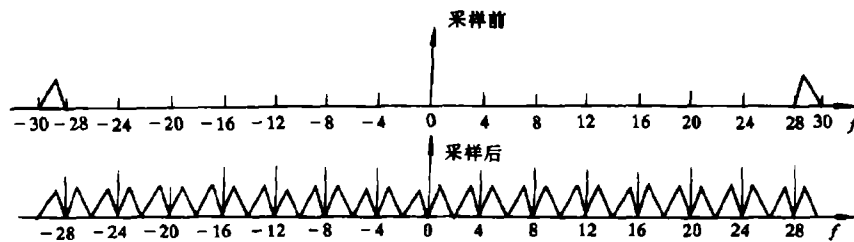


图 3 中频采样前和采样后的频谱

数字本振信号采用的是直接数字式频率合成技术 (Direct digital synthesis, 简称 "DDS") [4,5]，其构成如图 4。NCO 包括相位累加器和波形存储器两部分，如后面再加上 D/A 变换器和低通滤波器，即能输出模拟信号。

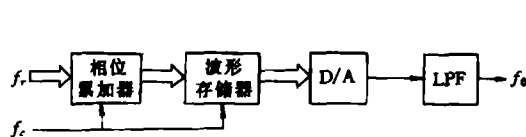


图 4 NCO 的构成

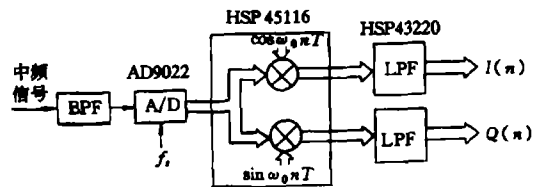


图 5 一种实验电路框图

相位累加器对输入频率控制码进行算术累加运算, 输出相应频率的相位码, 可以表示为: $W \cdot n \cdot T$, W 为输入角频率, n 代表第 n 个采样, T 为时钟周期. 然后由波形存储器来完成由 $W \cdot n \cdot T$ 到 $\sin(W \cdot n \cdot T)$ 的非线性变换. 波形存储器存储着一个周期的正弦采样信号 (利用其对称性, 也可只存一个象限的正弦采样信号). 在时钟作用下, 每一个时钟周期, 相位累加器输出一个相位码, 作为波形存储器的地址, 由波形存储器输出该相位时刻的幅度码, 这样周而复始形成一个数字振荡信号. 其输出频率由输入频率控制码和时钟所决定:

$$f_0 = f_r f_c / 2^L$$

f_r 为输入控制码, f_c 为时钟, L 为相位累加器的位数.

3 实验方案和讨论

本实验先将接收机接收到的回波信号下混到低中频 $f_0=1.5\text{MHz}$, 其带宽 $B=2.75\text{MHz}$, 然后用 $f_s=10\text{MHz}$ 的采样信号进行采样, A/D 变换后与正交的两路 NCO 进行数字乘法, 经过数字低通滤波后得到正交的两路基带信号. 其电路框图如图 5 所示.

A/D 变换器选用的是模拟器件公司的 AD9022. AD9022 是一种单片 12 位带采保 ADC, 其转换速率能高达 20Msamples/s , 在 1MHz 信号输入时有 80dB 的无杂散动态范围 (SFDR). 它的片内采样保证了这种 ADC 在整个奈奎斯特带宽内具有优良的谐波失真性能, 在 9.6MHz 模拟输入时的谐波失真为 -74dBc , 但对 70MHz 的中频输入, SFDR 就降到小于 -60dBc . HSP45116 是 Harris 公司生产的带调制解调器的 NCO. 它内部能产生正交的两路数字本振信号, 并和输入的数字中频信号相乘, 产生其和频和差频分量. HSP43220 是抽取式数字滤波器, 在本例的接收机中, 其带宽设置为 10kHz , 过渡带为 3kHz , 输出数据率为 100kHz , 经测试, 其阻带衰减能达 83dB , 插损小于 0.5dB .

本例的接收机实际上是一种多通道化接收机, 它的回波信号中包含了 100 个通道的信息, 每个通道的带宽均为 20kHz . 只要将 NCO 的频率调谐到我们感兴趣的那个通道, 通过数字相乘和数字滤波后, 输出即为对应通道解调后的数字 I 、 Q 基带信号.

为了检验这种数字正交检波器的性能, 我们设计了专用的测试软件. 测试结果表明, 本方案解调出来的 I 、 Q 两路正交信号其幅度一致性误差基本为零, 相位正交误差为 0.0075° (统计平均值), 镜象抑制比达 86dB . 而对于模拟正交检波器, 其性能一般为: 幅度一致性误差 0.5dB , 相位正交误差 3° , 镜象抑制比 40dB . 由此可见, 这种数字正交检波器的性能比模拟正交检波器提高了近两个数量级.

数字式正交检波器的相位正交误差主要是由 A/D 变换器的瞬间相位抖动造成的, 设相位抖动时间为 δt , 则从理论上可以推算出其产生的相位误差为 $\delta\theta = 2\pi f_0 \delta t$. 显然, A/D 的相位抖动时间越短, 中频频率越低, 则解调出来的相位误差就越小, 解调精度就越高.

用数字式正交检波器来代替模拟正交 I 、 Q 通道, 由于是直接在中频对信号进行 A/D 变换, 省掉了将中频混到基频的模拟乘法器和后面的低通滤波、低频放大电路, 因而可以提高整机系统的信噪比 (SNR). 而且信号偏离零频, 可以降低在低频时 $1/f$ 噪声的影响. 由于 A/D 变换器与中频信号交流耦合, 可以排除前端模拟电路的零漂影响, 在数字正交检波器中, I 、 Q 通道的输出零漂仅由 A/D 变换器的零漂决定, 因而数字正交检波器的零漂要远远低于模拟正交检波器的零漂. 类似图 3 的频谱分析可知, 将本例的中心频率选为 8.5MHz , 用 10MHz 频率采样以后, 其频谱和本例是一样的, 也就是说, 本电路也能解调中心频率为 8.5MHz , 带宽为 2.75MHz

的中频信号。但中心频率选得越高，A/D 变换器的性能就越难得到保证，特别是 A/D 变换器的无杂散动态范围 (SFDR) 会降低。

4 结束语

直接中频采样，然后进行数字正交检波，具有许多模拟正交 I 、 Q 通道无法比拟的优点，如误差小，精度高，其幅度一致性误差和相位正交误差与模拟正交 I 、 Q 通道相比提高了一个数量级以上，而且还能改善系统的 SNR。但这种方法对 A/D 变换器的要求比较高，特别是对于高中频，宽带宽的信号，现在还没有厂家生产出理想的 A/D 变换器。但由于是在数字域中进行检波，便于信号处理，可方便地解调各种复杂的调制信号，而且易于集成，体积小，因而特别适用于移动通信、保密通信和扩谱系统之中的信号解调。可以预见，随着现代技术的发展，这种技术必将得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 杰里 L. 伊伏斯著，卓荣邦译. 现代雷达原理. 北京：电子工业出版社，1991，3. 257-288.
- [2] Waters W M, Jarrett B R. Bandpass signal sampling and coherent detection. IEEE Trans on AES, AES-18(4), Nov.1982. 731-736.
- [3] Rice D W, Wu K H. Quadrature sampling with high dynamic range. IEEE Trans on AES, 1982, AES-18(4): 736-739.
- [4] Coope H W. Why complicate frequency synthesis? Electronic Design, 1974, 22(15): 80-85.
- [5] 吴远斌. DDS 的设计与应用. 电子技术参考. 1992, (2): 18-24.

A NOVEL DESIGN FOR DIGITAL QUADRATURE DETECTOR

Wu Yuanbin

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013)

Abstract This paper presents a novel technique for directly IF sampling and digitally obtaining the inphase (I) and quadrature (Q) components of the IF signal. Because all subsequent processing and detection are accomplished in the digital domain, it can provide even more improved I and Q signals and improve the overall performance greatly. Finally an experimental scheme is provided.

Key words IF sampling, Digital product detection, I and Q channels

吴远斌：男，1967年生，工程师，主要从事接收系统设计以及 DDS、DSP、高速数据采集系统等方面的研究工作。