

文章编号: 0253-9888(2002)03-0379-04

## 基于 DDS 技术的雷达波形产生系统

马合营, 杨子杰<sup>†</sup>, 王成虎

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 基于直接数字频率合成(DDS)技术在带宽、频率转换速率、调频线性度、频率分辨率和稳定度等方面的优异性能, 提出了采用直接数字频率合成芯片 AD9854 来设计雷达线性调频信号产生系统的一种方案, 该方案用 PC 机控制雷达波形参数, 频率转换时间最低可以达到 10 ns, 输出频率范围 4~10 MHz, 扫频带宽 3~100 kHz, 扫描时间 10~1 000 ms, 输出线性调频信号无杂散动态范围(SFDR)优于 70 dB, 经实验验证, 该系统可以满足高频地波雷达发射和接收系统的要求。

**关 键 词:** 直接数字频率合成; 高频地波雷达; 线性调频

**中图分类号:** TN 958.94; TN 742.1

**文献标识码:** A

### 0 引 言

线性调频信号是雷达系统中常用的一种脉冲压缩信号, 其信号频率在信号持续期内连续变化, 又称为 Chirp 信号<sup>[1]</sup>。高频地波雷达系统中, 对线性调频信号要求有大的时宽和带宽, 高的调频线性度, 高的稳定性和可靠性, 以及较简单的电路结构和灵活的操控方式<sup>[2~4]</sup>。而传统的产生线性调频的方法则难以满足上述要求, 如采用声表面波技术的色散延迟器件, 难以实现大的时宽和带宽; 而采用压控振荡器产生近似的线性调频信号, 通过控制电压进行闭环补偿来改善线性度的方法, 难以在宽的频率范围内实现高的调频线性度, 而且压控振荡器也易受温度变化的影响, 稳定度、可靠性差。因此, 为了满足上述高频地波雷达对线性调频信号的要求, 本文提出了采用直接数字频率合成(DDS)技术<sup>[5,6]</sup>, 具体采用 AD 公司生产的最新直接数字频率合成芯片 AD9854, 构成方便灵活的雷达线性调频信号产生系统。利用 DDS 技术产生线性调频信号有以下优点: 高的调频线性度, 由后面分析的实现线性调频的原理图可知, 经过频率累加器输出的是严格线性增长的瞬时频率, 实际中由于相位截断会引入一定的相

位误差, 会影响到调频线性度, 而调频斜率为相位的二次导数, 相位截断误差本身已经很小, 它对调频线性度的影响就更加小了, 实际中, 完全可以满足雷达的需要; 频率稳定度高, 采用 DDS 技术很容易实现高的频率稳定度, 因为产生的信号的频率决定于系统时钟, 而系统时钟通常采用稳定度很高的石英晶体振荡器, 稳定度可以做到很高的指标; 相对频带宽, 可以输出  $0.4f_s$  的频率,  $f_s$  为系统时钟频率; 频率分辨率高, 具有 48 位相位累加器的 DDS 芯片, 其频率分辨率可以达到  $f_s/2^N$ ,  $N=48$ ; 频率转换速度极快, 可以达到 ns 级; 频率转换时相位连续; 输出频率、相位、幅度可以快速和精确地数字控制。

### 1 硬件系统工作原理

本文设计的雷达线性调频信号产生系统硬件电路主要由 PC, 单片机系统, 片内集成了 D/A 转换器的 DDS 芯片 AD9854, 低通滤波器和时钟系统组成(如图 1 所示)。PC 机为主控设备, 控制波形参数, 单片机采用 AT89C51, 通过 RS-232 接口与 PC 通信, 通过逻辑接口控制 AD9854, 把 PC 机设定的波形参数输入 AD9854, 并使其工作于线性调频模式, 输出指定参数的线性调频信号。

收稿日期: 2001-11-21      <sup>†</sup>通讯联系人 E-mail: ZJY43017@public.wh.hb.cn  
基金项目: 国家 863 计划资助项目(863-818-01-02)  
作者简介: 马合营(1978-), 男, 硕士生, 现从事现代频率合成技术研究。

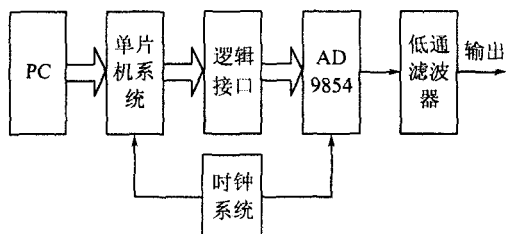


图 1 系统硬件结构

### 1.1 直接数字频率合成芯片 AD9854

AD9854 是 AD 公司生产的性能最好的可以产生线性调频信号的直接数字频率合成芯片,与传统的 DDS 芯片相比,为了实现线性调频和高度集成,除了一般 DDS 芯片所有的相位累加器、正弦值存储表以外,还在相位累加器前加了一级频率累加器和后面集成了数模转换器。原理图如图 2 所示。在频率累加器的作用下产生线性增加的瞬时频率,经过相位累加器输出线性调频信号的二次瞬时相位,以此相位值寻址正弦值存储表,得到与相位值对应的幅度量化值,再经数模转换器得到连续的阶梯波,用户设计的低通滤波器滤除其中的高频分量,最后得到所需的线性调频信号。

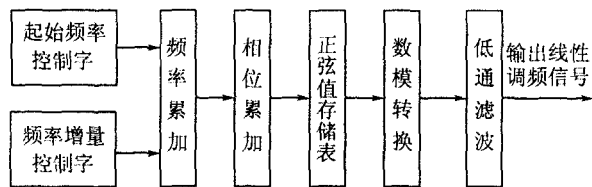


图 2 产生线性调频信号的原理图

AD9854 的 48 bit 频率控制字寄存器,提供优于  $1 \mu\text{Hz}$  的频率分辨率;相位截断到 17 bit,保证了良好的无杂散动态范围(SFDR);内部独特的 Inverse Sinc 滤波器对 DAC 的输入信号进行预补偿,使宽带信号的输出幅频特性曲线从零到 Nyquist 频率之间更平坦;简单的高速串、并行数据接口,并行口的数据传送速率达到 100 MHz,串行口也有 10 MHz 的速度,频率转换时间最低能达到 10 ns;时钟频率最高 300 MHz,最高输出频率 120 MHz<sup>[7]</sup>。

从上述 AD9854 的结构特点可知:与同类 DDS 频率合成器相比,AD9854 具有更高的集成度,更优良的无杂散动态范围(SFDR),简单的串并控制,可以实现雷达系统要求的高信噪比、操控灵活的要求。

### 1.2 单片机与 AD9854 的通信接口

AD9854 提供了 6 位的并行地址线和简单的 2 线和 3 线串行地址线,本系统采用了数据传输速率高的并行接口。单片机通过并行接口实现对

AD9854 内部寄存器的读写。单片机对 P0 口进行地址/数据复用,用 ALE 信号通过锁存器区分地址和数据,采用延时等待方式与 AD9854 通信。在 ALE 的下降沿,把地址信号锁存到 AD9854 中,在读写信号有效后,读写 AD9854 的内部寄存器。当写完所有的寄存器后,单片机发出一触发脉冲,启动 AD9854 工作,输出线性调频信号。

### 1.3 单片机与 PC 的串行通信

在雷达系统中,为了可以随时修改线性调频信号的参数:起始频率、扫频带宽、扫频周期,需要通过 PC 机传送上述参数给单片机,进而再通过单片机改变 AD9854 的寄存器值,实现输出信号波形的改变。单片机与 PC 机之间通过 RS-232 接口进行串行通信,由于通信距离较近,所以采用“零调制解调器”方式,即只使用 3 根导线(收、发、地)相连接。RS-232 与单片机之间的电平转换用收发器 MAX232 实现。

### 1.4 时钟和滤波

DDS 系统需要高速时钟信号,这些时钟信号可能通过分布电容或分布电感的耦合出现在 DAC 的输出信号中,因此在干扰时钟频率及其谐波处将出现谱线。如果某一时钟信号耦合到了 DAC 的采样时钟里,那么输出信号将被此时钟频率调制,在输出信号的谱线两边出现对称的杂散<sup>[8]</sup>。参考时钟信号的边缘抖动将影响采样周期,使采样过程变得不均匀,从而使输出频率发生抖动,增加杂散分量。DDS 的相位噪声主要由系统时钟的相位噪声<sup>[9]</sup>、外围电路的噪声、电源噪声和芯片内部集成工艺引入的噪声组成。因此,选择系统时钟时应选择相位噪声低、高稳定度时钟,同时对电源进行良好的退耦,在 AD9854 和电路中其他芯片的电源输入引脚,加  $0.1 \mu\text{F}$  的陶瓷表贴电容进行电源滤波。防止时钟信号泄漏和辐射,而且采用优良的印刷板布线和电路技术,防止模拟与数字信号之间的串扰。出于成本和简单考虑,本系统的低通滤波器采用了常见的 7 阶椭圆滤波器,截至频率为 15 MHz。

## 2 雷达信号产生系统软件的实现原理

本系统的软件由 PC 机控制软件和单片机软件组成。

### 2.1 PC 机控制软件

该软件的任务是接收用户输入的波形参数,转换成 AD9854 的控制字形式,然后传送给单片机。程序用 Visual C++ 6.0 编写,生成一个对话框界

面完成输入及发送等功能。程序中要求输入起始频率、扫频带宽和扫频时间,由这3个参数就可以惟一决定线性调频波形。程序对输入的十进制数调用函数转换为16进制数,通过串行口传送给单片机。本软件利用 Visual C++ 提供的专用于串行通信的 ActiveX 控件——Microsoft Communications Control(MSComm)来实现串行通信,这比使用 API 函数要简单、方便<sup>[10]</sup>。MSComm 控件提供了两种处理通讯的方式,类似于 DOS 下的查询和中断。对于较简单的任务,可以在程序的每个关键功能之后,通过检查 CommEvent 属性的值来查询事件和错误并进行相应的处理。对于较复杂的任务,在事件或错误发生时需要得到通知,则可以利用 OnComm 事件即时捕获并处理这些通讯事件或错误。本程序就利用后一种方式响应单片机发送来的数据,判断任务是否完成。PC 程序流程如图 3 所示。

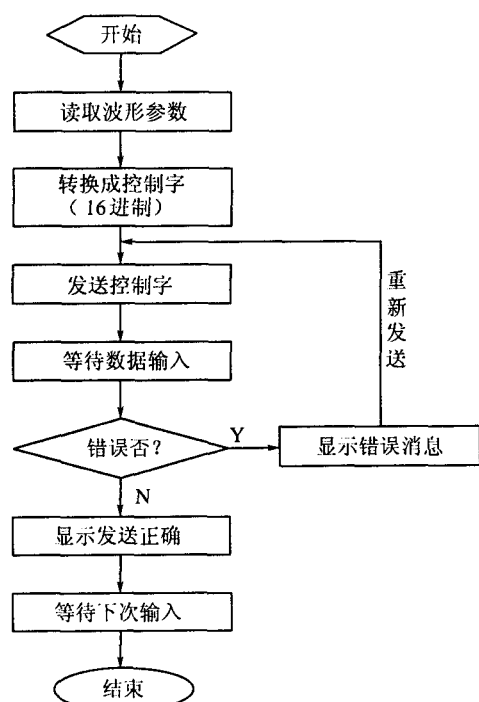


图3 PC程序流程图

## 2.2 单片机程序

单片机程序的任务是:系统复位后,控制 AD9854 产生默认的线性调频波,等待从 PC 机接收新的控制字;接收到的控制字存放在数据缓冲区中;接收完毕后一次性写入 AD9854,使其产生新的线性调频波形;如果接收过程中出现错误,就向 PC 机请求重新发送,并覆盖原有缓冲区中的内容。默认的波形参数是:起始频率 5 MHz,扫频带宽 60 kHz,扫频时间 800 ms。

程序分为主程序和串口中断服务程序两部分,用汇编语言编写。主程序的主要流程为:开始→延

时→写默认控制字→设置 T1 初值并开始工作→设串口工作模式→进入 IDLE 模式→等待中断。串口中断程序的主要流程为:保护现场→接收数据→判断是否接收完→判断是否有错误→通知 PC→恢复现场→返回。

定时器 T1 工作于方式 2,即 8 位自动装入时间常数方式,用来确定串行通信的波特率而无需进入 T1 的中断服务程序。串行口工作于方式 1。通信设置为“2400,n,8,1”方式,即波特率为 2 400 b/s,无奇偶校验,8 位数据位,1 位停止位,则传送完 1 帧(9 bit)数据需要 3.75 ms。单片机的晶振频率是 12 MHz,每条语句的运行时间不超过 4  $\mu$ s,则传送 1 帧数据的时间内最少可执行 937 条指令,大大超过了串行中断服务程序所需的指令数,因此以此波特率工作不会导致数据丢失。

单片机在等待数据输入时,应该转入空闲模式(Idle Mode)。这时,CPU 进入休眠状态,其它部分的状态不变,ALE 引脚保持为高电平,因此可以有效地减小电源及地线的波动,改善输出信号质量。任何中断或复位信号都可以终止该模式。

## 3 结果与分析

本文所讨论的雷达线性调频信号产生系统已做成实际电路,其起始频率变化范围 4~10 MHz,带宽 3~100 kHz,扫描时间 10~1 000 ms,输出信噪比优于 70 dB。图 4 给出了采用 HP 公司的 ESA-L150A 频谱分析仪测得的默认参数的输出的线性调频信号的频谱图。其起始频率为 5 MHz,扫频带宽 60 kHz,扫描时间 800 ms。

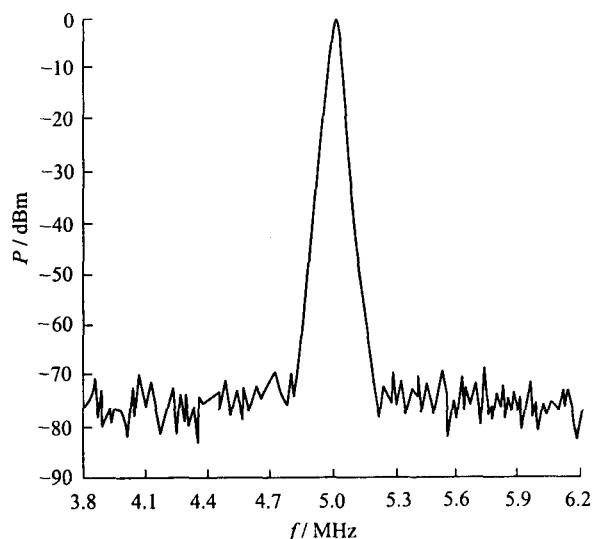


图4 输出线性调频信号的频谱

从上面的谱图可以看出,输出信号的信噪比优于 70 dB. 由于篇幅关系,本文并未给出其他波形参数的输出信号的谱图. 但经过实测,本系统能在要求的频率范围内产生高频谱纯度的线性调频信号,达到了预定的指标. 与 OSMAR2000 中的同类系统相比,本系统产生的雷达信号信噪比高了 5~10 dB,频率分辨率达到 0.2  $\mu$ Hz,不需要额外的 DAC,电路结构更简单,能更好的应用于高频地波雷达系统中.

#### 4 结 论

本系统有以下主要特点:

- 1) 该系统采用 DDS 技术,可以实现高线性度、高稳定性和高信噪比的要求.
- 2) 用 PC 机对线性调频信号波形参数灵活控制,为不同的频率要求提供了统一的硬件平台.
- 3) 硬件结构简单,成本低.

该系统能很好地满足高频地波雷达对线性调频信号波形的需求,而且可以随时改变参数,很容易满足用于不同探测距离的雷达的要求,在雷达系统中有很好的应用前景.

#### 参考文献:

- [1] Wu Shi-cai, Yang Zi-jie, Wen Bi-yang, *et al.* Waveform Analysis for Ground Wave Radar[J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2001, **47**(5): 519-527(Ch).
- [2] Khan R H, Mithell D K. Waveform Analysis for High-Frequency FMICW Radar[J]. *IEE Pro F*, 1991, **138**(5): 411-419.
- [3] Yang Zi-jie, Wu Shi-cai, Hou Jie-chang, *et al.* Some Problems in General Scheme for HF Ground Wave Radar Engineering[J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2001, **47**(1): 513-518(Ch).
- [4] Yang Zi-jie, Ke Heng-yu, Wen Bi-yang, *et al.* Waveform Parameters Design for Sea State Detecting HF Ground-Wave Radar[J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2001, **47**(1): 513-518(Ch).
- [5] Grandfield J. *Direct Frequency Synthesizer*[P]. United States Patent 4791377, 1988.
- [6] Vankka J, Waltari M, Kosunen M, *et al.* A Direct Digital Synthesizer with on-Chip D/A-converter[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1998, **33**(2): 218-227.
- [7] Analog Devices Inc. *CMOS 300 MHz Quadrature Complete-DDS AD9854*[S]. 1999.
- [8] Zhang Yu-xing, Peng Qing-yuan. Analysis on Background Spurious of DDS[J]. *Journal of UEST of China*, 1997, **26**(4): 362-365(Ch).
- [9] Zhang Jun-ling, Zhang Yu-xing. Analysis of Phase Noise in DDS[J]. *Journal of UEST of China*, 1999, **28**(1): 24-27(Ch).
- [10] Wang Cheng-hu, Yang Zi-jie, Wen Bi-yang. Serial Communications Programming in Windows95 with API Functions[J]. *Wuhan Univ J of Nat Sci*, 2000, **5**(3): 323-328.

## Design of DDS-Based Radar Waveform Generator

MA He-ying, YANG Zi-jie, WANG Cheng-hu

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** Based on the high performance of DDS in radar waveform synthesis, the DDS chip AD9854 is used in designing the radar waveform generator. This method has more advantages in the bandwidth, chirp rate, flexibility than that made up of traditional frequency synthesis based on VCO. The output frequency band is 4-10 MHz, and sweep band is 3-100 kHz, and sweep time is 10-1 000 ms, and SNR exceeds 70 dB. This radar waveform generator satisfies the requirement of high frequency ground wave radar.

**Key words:** direct digital synthesis; high frequency ground wave radar; linear frequency modulated