

DDS 芯片及其在雷达回波生成系统中的应用^{*}

杨俊岭 李 纲

(国防科技大学 长沙 410073)

【摘要】概述了 DDS 技术的一般原理,详细介绍了由美国 AD 公司生产的高性能完全正交 DDS 芯片 AD9854 的结构、性能及工作原理。最后给出了一个使用该芯片实现雷达回波信号生成系统的应用实例。

【关键词】直接数字频率合成(DDS), AD9854, 雷达回波信号

DDS Chip and Its Application in Radar Echo Generator System

YANG Jun-ling LI Gang

(National Univ. of Defense Technology Changsha 410073)

【Abstract】At firstly, the principle of DDS technique is briefly summarized in this paper. Then, the structure, function and performance of complete quadrature DDS chip-AD9854 are introduced in detail. At last, application to radar echo generating system based on AD9854 was presented.

【Key words】Direct Digital Synthesis(DDS), AD9854, radar echo

1 引言

频率合成是电子系统中的重要技术。传统的频率合成电路一般用振荡器和锁相环等器件实现,由于大量地使用非线性模拟器件,一是会造成电路结构复杂,生成信号的杂波成分多,频谱纯度低。二是根据锁相环本身的特性,使得频率分辨率与频率转换时间的矛盾始终难以解决。

直接数字频率合成技术(Direct Digital Synthesis),是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新的频率合成技术,它将先进的数字处理方法引入到信号合成领域,采用数字采样技术进行信号合成。与传统的频率合成技术相比,DDS 芯片具有以下优点:频率分辨率高,频谱纯净;频率捷变速率高,输出的变频信号相位连续;相位噪声低;全数字接口,易于编程控制;体积小,价格低,有助于提高系统的整体性价比等。目前,DDS 技术在电子系统领域中得到了越来越广泛的应用。一个典型的 DDS 芯片的结构示意图如图 1 所示。

初始相位寄存器中存放生成信号的初始相位,频率寄存器的数值 M 决定了相位累加器的步进大小。每来一个时钟 f_c ,相位寄存器中的数值就累加一个步长 M ,与初始相位相加后送入正弦查询表。正弦查询表一般是一个可编程存储器,存有一个周期的正弦波数据,表中的每个地址对应正弦波 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围的一

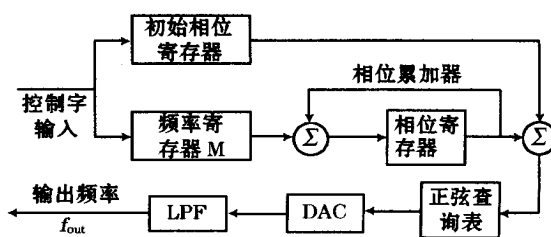


图 1 典型 DDS 结构示意图

个相位点。查询表首先将输入的相位信息转换为地址信息,然后再将地址信息映射成正弦幅度数值,通过驱动 D/A 转换器,输出生成信号的模拟数值。

若频率寄存器为 N 位,并以步长 M 累加(频率寄存器设置为 M),则频率寄存器每经过 $N_d = 2^N / M$ 个系统时钟后回到初始状态,相应地正弦查询表经过一个循环回到初始位置,整个 DDS 系统输出一个正弦波。输出的正弦波周期 $T_{out} = T_c * N_d$ (T_c 为系统时钟周期, $T_c = 1/f_c$),输出频率 $f_{out} = f_c / N_d = f_c * M / 2^N$,由此若要生成频率为 f_{out} 的信号,频率寄存器的设置值为 $M = f_{out} * 2^N / f_c$ 。

图 1 所示的结构只是一个典型 DDS 芯片的简单示意图,实际的 DDS 结构要复杂得多,例如还包括时钟控制,频率增量控制,输出幅度控制以及其它逻辑控制等单元。

2 AD9854 的性能及工作原理

* 收稿日期:2002-06-20 修订日期:2003-03-21

目前主流的 DDS 集成电路的生产厂家主要有三家: Qualcomm、Stanford 和 ADI 公司,现以 ADI 公司新推出的 DDS 芯片 AD9854 为例,介绍直接数字频率合成器的性能、结构及工作原理。

2.1 AD9854 的结构及性能

该芯片由美国 Analog Devices 公司生产,其结构

框图如图 2 所示。

从图 2 可以看出,AD9854 主要包括以下几个部分:参考时钟乘法器,程序寄存器,DDS 核心,频率累加器,逆 sinc 函数滤波器,D/A 转换器,高速比较器,以及相关的传输逻辑控制单元等。

AD9854 的系统时钟为 300MHz,片内提供了 1

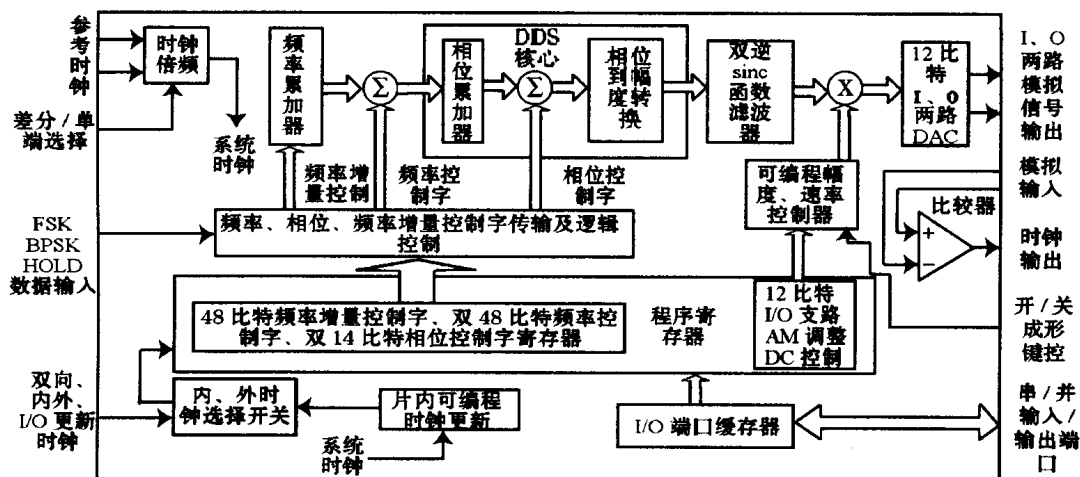


图 2 AD9854 的结构框图

个 4~20 倍可编程参考时钟乘法器,借助参考时钟乘法器,设计人员可以使用最低为 15MHz 的外部时钟,来产生 DDS 所需要的系统时钟,这降低了电路设计难度且减少了器件成本。

程序寄存器单元包括多个可编程控制寄存器,分别是双 48Bit 频率寄存器,双 14Bit 相位偏移寄存器,48 比特频率增量寄存器,12Bit I、Q 支路 AM 调整寄存器以及 12Bit DC 控制寄存器。由于频率寄存器的位数为 48 位,在 300MHz 的时钟下,AD9854 生成的信号频率精度可达 $1.066 \times 10^{-6} \text{ Hz} (f_d = 300 \times 10^6 / 2^{48} \text{ Hz})$ 。所有程序寄存器均可由外部逻辑控制电路通过 DDS 的 I/O 端口进行实时的读写操作。

频率、相位控制寄存器包括相位调整寄存器 (Phase Adjust Register1,2) PA1,2;频率步进字 (Frequency Tuning Word1,2) FTW 1,2;频率增量 (Delta Frequency Word)DFW。例如,要生成 40MHz 的信号,每生成 1 个周期的信号,频率累加器需要完成 $M = (1/40) / (1/300)$ 次累加。频率累加器为 48Bit,所以步进频率寄存器 $\text{FTW} = 2^{48} / M$,即 $\text{FTW} = 40 \times 2^{48} / 300$ 。如果信号具有 90°初相,则同时设置 $\text{PA} = 2^{14} \times 90 / 360$ 。

DDS 核心单元包括相位累加器和相位/幅度转换表(也即正弦查询表),这是 DDS 生成数字信号的核心

部分。由正弦查询表输出的数据将直接输入到逆 sinc 函数 (Inverse SINC Function) 滤波器。AD9854 具有两个逆 sinc 函数滤波器,能够对信号进行 $\sin(x)/x$ 校正,补偿 DAC 输出频谱中固有的 $\sin(x)/x$ 滚降 (roll-off) 效应,这种校正能够保证宽带信号如 QPSK (四相制移相键控信号),在从 DAC 输出时,幅度不会随着频率变化而产生突变。

由逆 sinc 函数滤波器输出的信号将会乘上 1 个衰减因子,然后再送入到 D/A 的转换器。通过配置 I、Q 支路 AM 调整寄存器,用户可以设置这个衰减因子的大小,该寄存器为 12Bit,衰减因子的数值范围是 0~4 095/4 096。例如,当 AM 调整寄存器设置为 200 时,衰减因子则为:200/4 096。此外,当开/关成形键控管脚(见图 2)被设置为 1 时,AM 调整寄存器还可设定信号幅度由 0 到峰值的转换时间。在数据突变传输情况下,该功能会有效缓解频谱冲击和数据突变给信号生成带来的不利影响。数字信号经过生成、查表、滤波、衰减,最终送入到 D/A 转换器。

AD9854 片内整合了两路高速、高性能的 12Bit 正交 D/A 转换器,能同时产生 I、Q 两路高品质、高稳定度的正交信号。通过配置相应寄存器,信号的频率、相位、幅度均可编程控制。在 300MHz 系统时钟下,输出信号的最高频率达 150MHz,可作为通信、雷达、测量

等多种电子设备的信号源。Q 支路 D/A 转换器还可设置为外部 D/A,即通过用户配置,能够对外部输入的数据进行 D/A 转换。在该状态下,程序寄存器中的 12Bit DC 寄存器将用于存储外部输入的数据。

此外,AD9854 还具有以下优良性能:

(1) 超高速比较器,转换速率大于 300MHz,抖动偏差仅为 3 ps RMS。

(2) 优良的动态特性,在 100MHz 信号输出下仍可保证 80dB 的伪自由杂散动态范围 (Spurious-Free Dynamic Range)。

(3) 可自动进行双向频率扫描。

(4) 单脚 FSK(移频键控)和 BPSK(二相制移相键控)数据接口,借助 I/O 接口实现 PSK(移相键控)。

(5) 通过单脚频率 "HOLD" 功能实现线性或非线性的 FM Chirp(脉冲调频)。

(6) 在时钟产生模式下,FSK 的线性频率总偏差小于 25 ps RMS。

(7) 简易的控制接口,可配置为 10 MHz 串行接口,2 线、3 线 SPI(串行外围设备接口)兼容或者 100MHz 8Bit 可编程并行接口。

(8) 采用先进的 0.33 μ m CMOS 工艺,小型 80 管脚 LQFP 封装,芯片工作电压仅为 3.3V,具备多路低功耗功能。

2.2 AD9854 的工作模式

AD9854 由外部逻辑控制单元输入数据和地址,并通过写程序寄存器来配置 DDS 的工作模式。AD9854 具有五种可编程的工作模式,配置控制寄存器(并行地址 0x1F)中 3 个模式比特位,可以得到相应的工作模式。见表 1。

表 1 模式选择表

模式 2	模式 1	模式 0	结果
0	0	0	Single-Tone
0	0	1	FSK
0	1	0	Ramped FSK
0	1	1	Chirp
1	0	0	BPSK

Single-Tone 模式:是芯片上电复位后的缺省模式,频率控制字 F1(Frequency 1)和相位偏移控制字 P1(Phase 1)决定输出信号的频率和相位。输出信号的频率发生变化时,信号的相位保持不变。通过控制信号的输出频率、幅度和相位,DDS 可以相应实现 FM、AM、PM、FSK 和 ASK 调制方式。

FSK 模式:即无斜率 FSK 模式。该模式下,输出

信号的频率根据 29 管脚的高低电平而相应地在频率控制字 F1 和 F2 之间跳变,相位由相位控制字 P1 决定。

Ramped FSK 模式:有斜率 FSK 模式。该模式下,F1 和 F2 频率控制字分别存储低频率和高频率,输出信号的频率从 F1 ~ F2 扫描,而不是直接跳变。用户可以配置频率增量控制寄存器(见图 2),来编程控制扫描间隔和扫描速度。

Chirp 模式:"Chirp"也称为"脉冲调频"(Pulsed FM)。该模式下,输出信号的频率在指定的范围和精度上发生线性或非线性的变化,扫描方向可以编程控制。该模式需要用户通过"HOLD"状态(29 管脚高电平)控制停止频率点,并控制频扫停止后的状态。

BPSK 模式:与 FSK 模式的控制方式相同,只是 F1 为载波频率,29 管脚选择相位控制字 P1(低电平)和 P2(高电平)中的相位作为信号的相位输出。

AD9854 是一款功能先进、性价比很高的 DDS 芯片,它的应用也非常广泛,下面介绍一个利用该芯片实现的雷达回波信号生成系统的实例。

3 AD9854 在回波信号生成系统中的应用

在研制新型雷达的过程中,需要进行多次实验来检验雷达对目标回波信号的分析处理能力,用 AD9854 实现的雷达回波生成系统可以为被测雷达提供多目标环境,包括目标的位置、距离、运动速度等多种精确信息,可替代真实目标,用以检验雷达在多目标环境下对目标的发现、跟踪和导航能力。图 3 是雷达回波信号生成系统的结构框图。

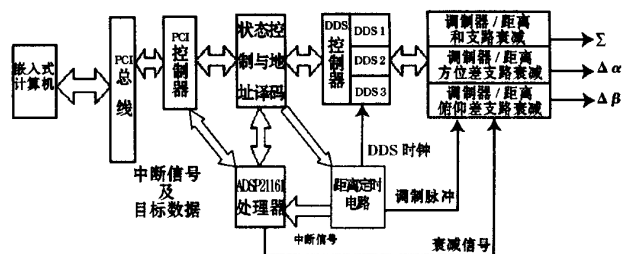


图 3 雷达目标回波信号生成系统结构框图

中频目标回波信号的生成采用 DDS 芯片加衰减器的实现方案。回波信号的频率和相位分量可以非常方便地用 DDS 芯片实现,而信号幅度的变化可以通过控制各级衰减器的衰减倍数来实现。

3.1 系统结构

如图 3 所示,该系统使用 3 片 AD9854 芯片,分别对应回波信号的和支路、俯仰差支路以及方位差支路。3 片 DDS 的控制功能由 1 片 AD 公司的高速 DSP 芯片 ADSP21161 完成,用来配置 DDS 实时生成雷达多

目标回波信号。DSP 同时要通过 PCI 总线与嵌入式计算机通信,以接收目标信号的各种参数,包括目标的距离、速度、方位、俯仰、雷达截面积等。PCI 控制器采用 Cypress 公司的 CY7C0944PV-AC 芯片。该芯片本身带有 128 Kb 即 16×8 K 的双口 SRAM,使得主控计算机和 DSP 处理器之间的数据、命令、状态之间的传递变得非常方便。

状态控制与地址译码单元采用 1 片 ALTERA 公司的 ACEX 1K 系列可编程逻辑器件 EPI K30TC144-1,产生整个电路板所需的控制信号和片选信号。

DDS 信号产生电路单元采用 1 片 ALTERA 公司的 ACEX 1K 系列可编程逻辑器件 EPI K30TC208-1,3 片 Cypress 公司的 18×4 K 3.3V CMOS 同步 FIFO 芯片 CY7C4245V-15ASC,3 片 AD 公司的 CMOS 300MSPS 完全型正交 DDS 芯片 AD9854ASQ。其中 1 片可编程器件作为 DDS 电路的控制器,3 片 FIFO 用于存储生成 3 路非线性 Chirp 信号和 QPSK 相位编码信号的码表,3 片 DDS 芯片来同时生成 3 路中频回波信号。脉冲调制器和幅度衰减器采用“多路器+衰减器”的方案来实现。其中,多路器采用 AD 公司的 700MHz 带宽 4 选 1 多路器 AD8184AR,衰减器则采用 Mini-Circuits 公司的固定衰减器 LAT-10(衰减 10dB)、LAT-20(衰减 20dB)、LAT-30(衰减 30dB)。多路器和固定衰减器构成 3 级衰减网络,以满足大衰减范围的需要。而精细的幅度衰减量(范围在 10dB 以内)控制则可配置 DDS 芯片中的 I、Q 支路 AM 调整寄存器(图 2)来完成。DDS 生成的信号通过衰减支路的分级衰减,可模拟目标在不同距离上产生的信号。

距离定时电路采用 2 片 ALTERA 公司的 ACEX 1K 系列可编程逻辑器件 EPI K30TC144-1。其中,1 片可编程逻辑器件用来产生距离时延信号,另 1 片可编程逻辑器件用来产生 DDS 所需时钟和回波脉冲宽度,并生成最终的 3 路距离调制脉冲。考虑到系统解距离模糊的问题,整个定时电路一共有 6 个定时通道,因此,当模拟常规雷达(单波束)的目标回波时,最多可解 5 重距离模糊。

3.2 DDS 生成信号波形的方

借助 ADSP21161 芯片强大的运算处理能力以及 AD9854 灵活的信号生成模式,本系统不但可以同时多个雷达目标进行模拟,还能模拟多种信号的波形,包括脉冲调制信号、相位编码信号、线性调频信号和非线性调频信号。具体实现如下:

固定中频信号实现:选择 AD9854 的 Single-Tone 模式,只需设置相应的频率和相位控制字,在距离延迟

同步脉冲的启动下,即可产生所需的中频信号。再经过脉冲调制,能够生成未经压缩的脉冲调制信号。

相位编码信号实现:选择 AD9854 的 BPSK 模式,同时需要 DSP 提供相位编码序列表。

线性调频信号实现:选择 AD9854 的 Ramped FSK 模式,设置线性调频的起始频率控制字和结束频率控制字,并根据调频斜率设置步进频率和步进值,在距离延迟同步脉冲的作用下,即可产生所需要的线性调频信号。

非线性调频信号实现:也是选择 AD9854 的 Ramped FSK 模式,不同的是步进频率和步进值需要根据非线性调频规律来设置。在系统实现中,是将脉宽时间 T 内的信号均匀分为若干段,分段调整 DDS 的频率和相位参数,从而近似生成非线性调频信号。

3.3 性能指标

- (1)模拟的环境内目标数 500;
- (2)波束内目标数 20;
- (3)中频范围 150 MHz;
- (4)波形种类:常规脉冲,线性调频,非线性调频,相位编码;
- (5)动态范围 120dB;
- (6)幅度分辨率:0.25dB;
- (7)中频开/关隔离 100dB;
- (8)带内杂散抑制比(最坏情况):32 到大于 60 dBc;
- (9)返回延迟:150 ns ~ 2.1 ms;
- (10)返回延迟精度:10ns;
- (11)平均雷达截面积:0.001 ~ 10 000 m²;
- (12)回波起伏种类:SW I ~ IV;

4 结束语

实践证明,DDS 具有集成度高、控制简单、频率分辨率高、生成信号灵活等特点,因此已被广泛应用于电子对抗、雷达、通信等领域。本文介绍的使用 AD9854 芯片实现的雷达多目标回波信号生成系统,不但可以实时生成多个目标回波信号,而且可以对多种信号波形进行模拟,为被测雷达提供较为全面的测试环境,从而为新型雷达的研制节省费用,缩短开发周期、提高工作效率,因而具有很高的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Analog Devices Inc. CMOS 300 MSPS Quadrature Complete-
DDS AD9854, 2001

(下转第 56 页)

增益有一定的降低,从而导致雷达的作用距离会一定减少,为了弥补这一缺陷,可以采用其它措施来提高系统灵敏度,已达到增大雷达作用距离的目的。

5 结 论

将旋转抛物面天线设计成具有第二反射体的复合抛物面天线以后,在垂直方向产生了类余割平方波束,使波束在垂直方向展宽了,从而显著提高了雷达的搜索能力。通过控制驱动装置,使同一副天线达到既能具有精确跟踪(“跟踪状态”),又能具有快速目标搜索的能力(“搜索状态”)。

参 考 文 献

- 1 刘有及,等. 炮瞄雷达搜索天线系统的研制及其对雷达战技性能的影响. 雷达技术交流会论文集 1997.9

(上接第 46 页)

理,通过将 8~18 GHz 的频段分成 5 个信道,实现从 8~18 GHz 宽频带敌方信号的接收,以获取敌方更多的信息。本文对其中的 10~12 GHz 接收机作了详细的讨论,从测试结果看,当天线接收信号从-70~-20dBm 和 10~12 GHz 变化时,中频输出信号基本符合要求。所以这种方案基本实现了大动态、高截获概率、宽频带接收机的要求,从而为后端的信号处理提供了大量的前端处理。

参 考 文 献

- 1 林茂庸,等译. 雷达系统导论. 北京:国防工业出版社,1992
- 2 黄席椿,高顺泉. 滤波器综合法设计原理. 北京:人民邮电出版社,1975

(上接第 50 页)

- 2 刘 芳. 直接数字频率合成器 AD9852 及应用. 国外电子元件,2001,32(3)
- 3 文必洋,等. 利用 DDS 器件设计高频雷达回波模拟器. 武汉大学学报(理学版),2001,47(5)
- 4 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论. 北京:国防工业出版社,1984
- 5 (美)R.L 米切尔. 雷达系统模拟. 北京:科学出版社,1982

- 2 顾瑞龙,沈民宜. 微波技术与天线. 北京:国防工业出版社,1980.1

丁卫安 男,1962 年 12 月生,桂林空军学院副教授,空军高层次科技人才,1986 年毕业于空军导弹学院,获学士学位,1992 年毕业于电子科技大学,获硕士学位。曾获军队科技进步奖 4 项,在国外及国家核心期刊发表论文 10 多篇,目前从事雷达系统及电子对抗方面的研究与教学工作。

林瑞平 男,1962 年 12 月生,桂林空军学院副教授,1983 年毕业于空军导弹学院,获学士学位,曾获得过军队级科技进步三、四等奖多项,在中文及核心期刊上发表过文章 10 几篇。目前从事雷达及电子对抗方面的教学与研究工作。

安立才 男,1961 年 5 月生,桂林空军学院讲师,1984 年毕业于空军高炮学院,在中文期刊上发表文章多篇。现从事炮瞄雷达的教学研究工作。

出版社,1975

- 3 (美)文德林(Vendelin,G.D). 用 S 参数设计放大器和振荡器. 成都:成都电讯工程学院出版社,1993
- 4 陈天麒. 微波低噪声晶体管放大器. 北京:人民邮电出版社,1991
- 5 (美)卡逊(Carson,R.S). 高频放大器. 北京:人民邮电出版社,1997

周建明 1976 年出生,1999 年获北京理工大学电子工程系电磁场与微波技术专业学士学位,1999 年攻读北京理工大学电子工程系电磁场与微波技术硕士学位,2000 年转攻博士学位至今。

费元春 1938 年出生,现为北京理工大学电磁场与微波技术专业首席教授,博士生导师。

杨俊岭 国防科技大学电子科学与工程学院硕士研究生,现在主要从事雷达多目标回波信号生成系统的研究及实现方面的工作。

李 纲 国防科技大学电子科学与工程学院副教授,主要研究内容有:雷达信号处理及高速实现,神经网络技术,信号处理新技术应用等。

美国售给我国台湾 12 架 P-3C 反潜侦察机

美国布什政府 2001 年 4 月 24 日通知国会,同意

售给我国台湾 12 架 P-3C 猎户座反潜侦察机(P-3 Orion),单价 3 600 万美元。这是一种陆基远程反潜侦察机,配备有先进的声纳浮标、磁性侦测仪、航电系统和武器,滞空时间长达 12h,堪称最可怕的潜艇杀手。

(雷讯供稿)