

文章编号: 2095-4980(2018)05-0821-04

线性调频雷达全相参技术

杜仕雄, 田 殷, 杨 杰, 杨 光, 孙 敏, 宋烨曦, 李宪军

(四川九洲电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 在线性调频雷达系统中, 若发射机输出的脉冲信号起始相位是不相参的, 则接收机不能根据回波信号解调出准确的多普勒参数。引入了前导帧序列, 以控制直接数字合成(DDS)输出信号的相位初始化, 从而实现最终输出脉冲信号起始相位与参考时钟相参。该方法简单实用, 仅需更改 FPGA 程序, 无需对硬件电路做任何改动。实验结果验证了该方法的有效性。

关键词: 前导帧; 全相参; 直接数字合成; 线性调频

中图分类号: TN74

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0821

Full coherent technology of linear frequency modulation radar

DU Shixiong, TIAN Yin, YANG Jie, YANG Guang, SUN Min, SONG Yexi, LI Xianjun

(Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: In linear frequency modulation system, the receiver cannot demodulate the Doppler parameter correctly based on the return signal if the initial phase of the transmitter output is not coherent. A prior frame sequence is introduced to realize the coherence between the initial phase of the output pulse signal and the reference clock by initializing the Direct Digital Synthesis(DDS)'s phase accumulator. The proposed method is simple and practical, because it just only needs to modify the FPGA program without any changes to the hardware circuit. The effectiveness of the method has been verified by the experimental results.

Keywords: preamble frame; full coherent; Direct Digital Synthesis; linear frequency modulation

如果雷达系统的发射信号、本振信号、相参振荡电压和定时器的触发脉冲均由同一基准信号提供, 且这些信号之间均保持确定的相位关系(即相位相参), 这种雷达系统统称为全相参系统^[1]。频率合成器作为全相参雷达系统的关键技术, 其实现方式主要有锁相环电路和直接数字合成(DDS)电路。DDS 由于没有锁相过程, 直接用内置 D/A 产生需要的频率信号, 其频率转换速度快, 可以实现捷变频。此外, DDS 有多种工作模式, 可以产生需要的各种调制信号, 因而在雷达系统中得到广泛应用^[2-3]。

1 DDS 工作原理

DDS 基本原理框图如图 1 所示, 主要由相位累加器、正弦查找表、数模转换器和低通滤波器几部分构成。DDS 的各部分电路时序由参考时钟 F_c 来驱动, 相位累加器实质是一个受频率调节字(Frequency Tuning Word, FTW)改变的计数器, 它累加了每一个参考时钟周期 F_c 内合成信号的相位变化, 根据计算结果对正弦查找表 ROM 进行相应寻址, 产生 D (D 为 DAC 的分辨率位数)比特的数据给数模转换器(Digital Analog Converter, DAC), 然后由 DAC 生成相应的幅度序列, 如图 2 所示。

DAC 输出的离散信号经过低通滤波器后, 输出平滑的正(余)弦波信号, 如图 2(d)所示。由于输出信号是 DAC 重构的信号, 因此 DAC 输出信号的相位不会跟踪 DDS 参考时钟信号的相位, 但是输出信号的频率分辨率会和参考时钟的频率分辨率保持相关性。

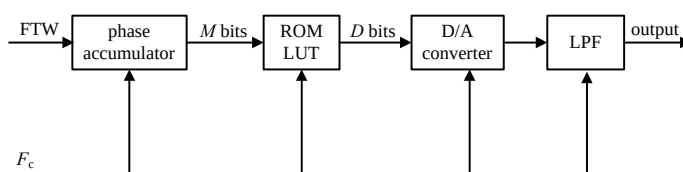


Fig.1 DDS block diagram
图 1 DDS 原理框图

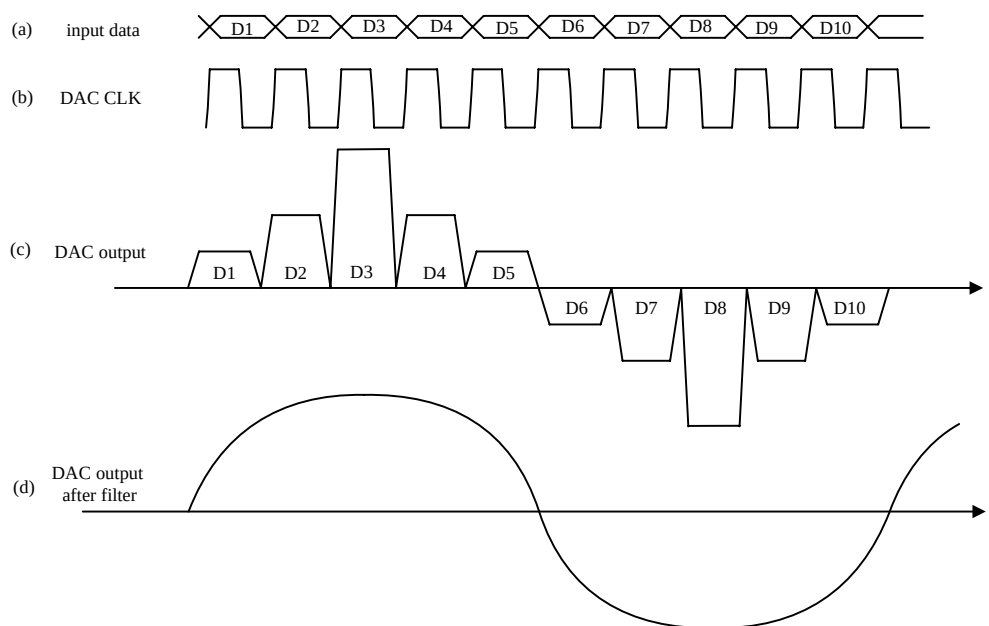


Fig.2 DAC output signal
图 2 DAC 输出信号

2 脉冲压缩技术

在现代雷达系统中,接收机通过测量目标回波的延迟获得距离信息,因而雷达对探测目标的距离分辨力与回波信号的脉冲宽度有关,回波信号的脉宽越窄,则相应的距离分辨力越高。但雷达发射机的峰值发射功率有一定限制,发射脉冲越窄,则雷达发射平均功率越低,从而影响雷达的作用距离^[4]。因此,现代雷达大都采用发射大时宽和大带宽信号的方式兼顾雷达作用距离和分辨力。大时宽雷达信号有助于提高发射机的平均功率,从而增加雷达作用距离,大带宽雷达信号有助于提高距离分辨力。但是对普通的单载频信号,雷达的时宽和带宽通常成反比,因此,传统单载频信号很难同时满足大时宽和大带宽的要求^[5]。

脉冲压缩技术在发射时将多个窄脉冲压缩成一个宽脉冲以实现足够大的作用距离,接收时通过采样压缩的窄脉冲以提高距离分辨力,较好地解决了大时宽和大带宽的矛盾,从而兼顾了雷达作用距离与距离分辨力^[6]。

线性调频信号是通过非线性相位调制或线性频率调制来兼顾大时宽和大带宽。线性调频信号在脉冲宽度 τ 内,将多个脉宽为 t_0 的窄脉冲信号压缩在一起打包发送出去,如图 3 所示。每个窄脉冲包含频率和相位调制信息,同等时宽内窄脉冲数量越多,雷达接收机端解析的多普勒频移越准确,距离分辨力越高。信号的频率在时间宽度 t 内由 $f_0-B/2$ 渐进变化到 $f_0+B/2$,调频的带宽为 B 。线性调频信号在国外也被称为 chirp 信号^[7]。线性调频脉冲压缩信号可由 DDS 直接产生,而且其压缩脉冲的形状与信噪比对多普勒频移不敏感,因而在近年来得到了广泛应用^[8],这也是本文重点讨论的内容。

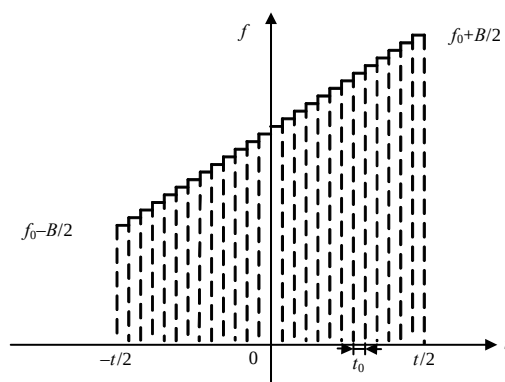


Fig.3 Linear frequency modulation signal
图 3 线性调频信号

3 全相参系统设计方案

在线性调频雷达系统中,若发射机输出脉冲信号的起始相位是不相参的,则接收机不能准确解调出目标的距离信息、速度信息和角度信息。只有在发射机输出的脉冲信号起始相位相参后,接收机采集到的回波信号才有统一的相位基准,才能结算出正确的多普勒参数,从而完成对目标的检测。本文在脉冲起始相位的相参方面进行重点研究。该工程设计一个输出频率 1 310~1 490 MHz,带宽为 5 MHz,占空比为 1/100 的线性调频脉冲发生器。

系统工作原理如图 4 所示,系统使用 80 MHz 晶振作为系统时钟,经过 3 路功分,一路产生变频电路需要的本振信号,一路产生 DDS 电路需要的参考时钟,另一路作为产生幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK)触发信

号的 FPGA 控制电路的时钟。方案中选择的 DDS 芯片是 ADI 公司的 AD9914。该 DDS 集成电路包含 1 个 32 位相位累加器, 1 个正弦查找表 ROM, 1 个 12 位 DAC。DDS 产生中心频率为 600 MHz, 带宽为 5 MHz 的线性调频信号, 与模拟锁相合成的本振信号混频生成 1 310~1 490 MHz 的线性调频信号, 再经过幅度调制器, 生成发射机需要的线性调频脉冲信号。

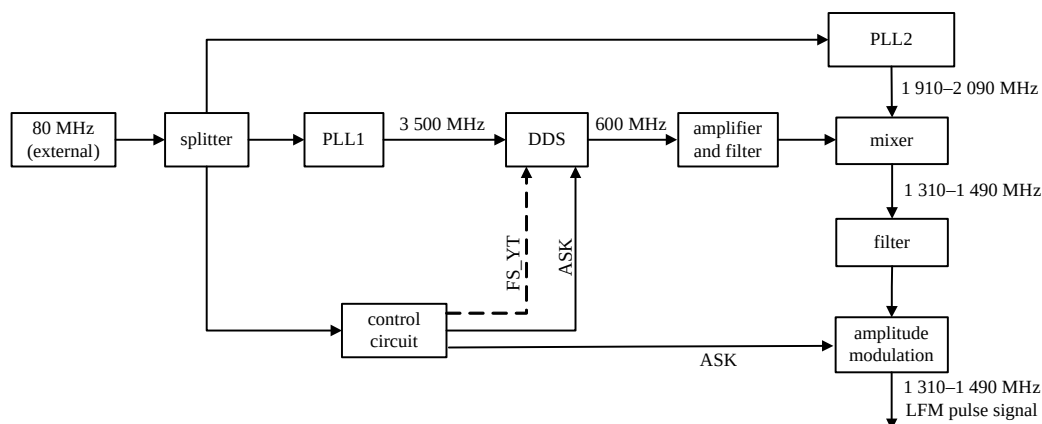


Fig.4 Block diagram of linear frequency modulation full coherent system

图4 线性调频全相参系统原理框图

在传统 DDS 电路设计中, DDS 使用非驻留高位工作模式直接输出周期性的线性调频脉冲信号, 如图 5 所示。其中 ASK 信号既是幅度调制器的幅度使能信号, 同时也作为线性调频的触发信号。ASK 上升沿启动 DDS 线性调频信号输出, 在时间宽度 τ 内将输出频率从 f_1 扫描至 f_2 。ASK 为低时, DDS 输出频率为 f_1 的连续波信号。由于 DDS 输出的连续波信号 f_1 和线性调频信号均有量化误差, 因此在一个周期 T 内相位误差的累积会导致线性调频信号的起始相位是不相参的。本文引入 DDS 的相位初始化来解决这个问题。

DDS 的相位初始化不需改变原有的硬件电路设计, 在图 4 的原有硬件电路中, FPGA 控制程序需引入一个前导帧 FS_YT, 如图 6 所示。前导帧的每个下降沿进行一次 DDS 相位初始化, 将相位清零, 则经过时间 t_0 之后线性调频信号的起始相位, 即 ASK 上升沿对应的 DDS 输出信号相位为 φ_r 。由于 t_0 和信号周期 T 固定, 因而每次 ASK 上升沿 DDS 输出信号相位均能保持为 φ_r 。此外, 模拟锁相环合成的变频本振信号使用同一参考时钟信号, 因此不会改变中频信号的相参性。图 4 中的功分器、LC 滤波器等无源器件和放大电路均不会改变射频信号的相参性。因此, 最终输出的信号能实现和参考时钟的相参。

4 实验结果及分析

为了验证提出方法的有效性, 进行引入前导帧前后对比实验。图 7 为未引入前导帧时 DDS 输出的 600 MHz 信号与 ASK 输入信号, 图中 1 通道为 DDS 输出的 600 MHz 线性调频信号, 2 通道为 ASK 信号, 余辉设置为 0.5 s, 由图可见, DDS 输出的信号与 ASK 触发信号并不相参。图 8 为 FPGA 控制程序引入了前导帧之后 DDS 输出的线性调频信号与 ASK 输入信号, 图中 1 通道为 DDS 输出的 600 MHz 中频信号, 2 通道为外部输入的 ASK 信号, 余辉设置为 0.5 s。由图可见, 引入前导帧之后 DDS 输出信号与 ASK 信号实现了相参, 而产生 ASK 信号的控制电路和 DDS 参考时钟使用同一时钟源。如前所述, 最终实现了系统参考时钟与系统输出的线性调频信号之间的相参。

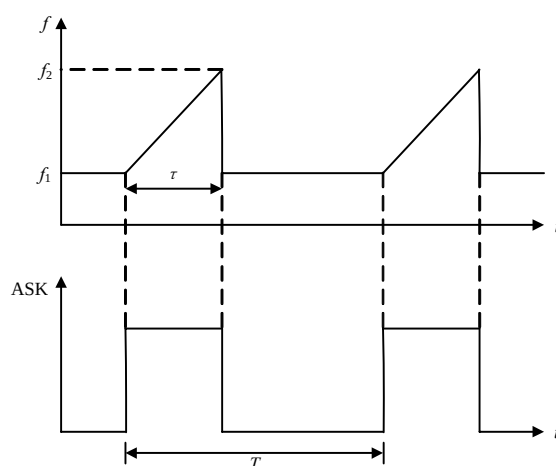


Fig.5 Non-dwelling high operating mode

图5 非驻留高位工作模式

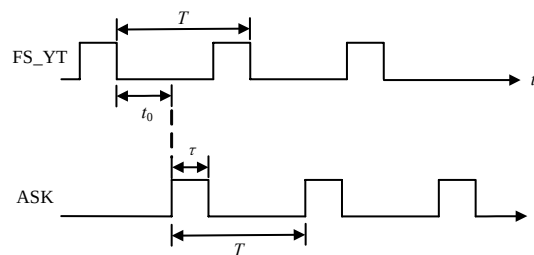


Fig.6 Schematic of LFM preamble frame

图6 线性调频前导帧示意图

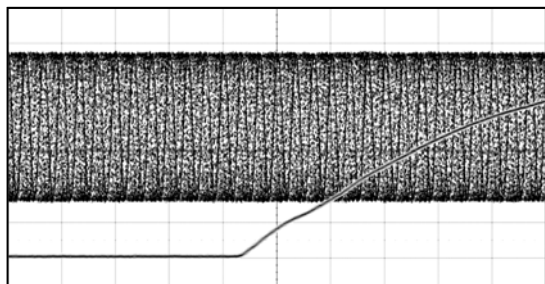


Fig.7 Comparison of ASK and DDS output signals
(preamble frame is not introduced)
图 7 未引入前导帧时 DDS 输出信号与 ASK 信号

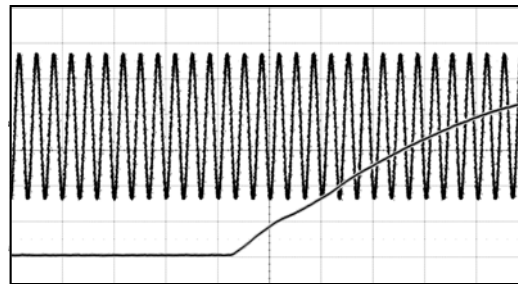


Fig.8 Comparison of ASK and DDS output signal
(preamble frame is introduced)
图 8 引入前导帧之后 DDS 输出信号与 ASK 信号

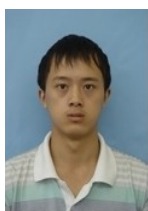
5 结论

利用 DDS 的相位初始化功能,使 DDS 输出信号与参考时钟相参,从而实现线性调频雷达系统最终输出脉冲信号起始相位与参考时钟的相参,该方法操作简单,仅需修改相应程序,利于工程实现。同时,该方法也可应用于其他调制信号的相参,具有重要的理论和工程指导意义。

参考文献:

- [1] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2013. (DING Lufei,GENG Fulu,CHEN Jianchun. Radar principles[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [2] 白居易. 低噪声频率合成[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1995. (BAI Juxian. Low noise frequency synthesizer[M]. Xi'an,China:Xi'an Jiaotong University Press, 1995.)
- [3] 杨杰,杨光,蒋国琼,等. 基于 DDS 的低杂散捷变频频率合成器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(4): 501-504. (YANG Jie,YANG Guang,JIANG Guoqiong,et al. Design of a frequency agility synthesizer with low spurious using DDS technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(4):501-504.)
- [4] 王玉军. 线性调频雷达干扰新技术及数字干扰合成研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011. (WANG Yujun. New technologies of linear frequency modulation radar interference and research on digital interference synthesis[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2011.)
- [5] 何志权. 脉内调频信号与时频分析应用研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2004. (HE Zhiquan. Research on step-chirp signal and time frequency analysis[D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004.)
- [6] 钱云襄,刘渝,黄慧慧. 线性调频连续波信号参数估计算法[J]. 现代雷达, 2006,28(3):40-43. (QIAN Yunxiang,LIU Yu,HUANG Huihui. Parameter estimation algorithm of linear frequency modulation continuous wave[J]. Modern Radar, 2006,28(3):40-43.)
- [7] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006. (ZHANG Guangyi,ZHAO Yujie. Phased array radar technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.)
- [8] 郭琳. 线性调频雷达的干扰技术及其实现[D]. 上海:复旦大学, 2012. (GUO Lin. Interference technology and realization of linear frequency modulation radar[D]. Shanghai,China:Fudan University, 2012.)

作者简介:



杜仕雄(1986-),男,四川省南充市人,硕士,工程师,主要研究方向为微波频率合成器.email:dsx058117@163.com.

田 殷(1981-),男,四川省广元市人,高级工程师,研究方向为微波毫米波收发电路以及相关产品.

杨 杰(1969-),男,四川省绵阳市人,高级工程师,主要研究方向为微波技术.

宋烨曦(1985-),男,四川省乐山市人,硕士,工程师,研究方向为频率合成器.

李宪军(1985-),男,山东省郯城市人,工程师,研究方向为频率合成器及上下变频技术.

杨 光(1976-),男,四川省遂宁市人,工程师,主要研究方向为频率合成器及相关产品.

孙 敏(1986-),男,陕西省宝鸡市人,工程师,主要研究方向为频率合成器及相关产品.