

脉间 Costas FH 高分辨毫米波雷达信号的 DDS 实现*

孙长贵 李兴国 娄国伟

(南京理工大学毫米波与光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

摘要 介绍了一种高分辨率雷达信号(脉间 Costas FH 信号)和直接数字合成(DDS)技术,给出了脉间 Costas FH 信号与步进频率脉冲雷达信号的统一表达形式,以及用“频率挑选矩阵”从 DDS 所产生的信号集合中产生脉间跳频信号的方法.使用该种方法,可以增加雷达系统软硬件实现的灵活性.

关键词 脉间跳频, 雷达信号, 直接数字合成(DDS), Costas 编码.

IMPLEMENTATION OF INTER -PULSES COSTAS FH HIGH RESOLUTION MMW RADAR SIGNAL USING DDS TECHNOLOGY *

SUN Chang-Gui LI Xing-Guo LOU Guo-Wei

(Institute of Millimeter Wave & Optical Proximity Sensing Technology, NanJing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A kind of high-resolution radar signal (inter-pulses Costas frequency hopping, or Costas FH) and a kind of direct digital synthesis (DDS) technique were introduced. A uniform expression of inter-pulses Costas FH radar signal and stepped frequency pulsed radar signal was presented. A method to generate Costas FH radar signal from the signal set produced by DDS using so-called "frequency-selecting matrix" was also presented. The result shows that by using this method, certain flexibility of implementation of radar system, including software and hardware, may be increased.

Key words inter-pulses frequency hopping, radar signal, direct digital synthesis (DDS), Costas codes.

引言

在发射端使用频率编码脉冲信号波形,在接收端可以用信号处理的方法获得合成宽带雷达目标信号,从而使雷达在不降低雷达作用距离的条件下,获得距离高分辨能力^[1,2,8].

频率编码脉冲雷达信号波形具有多种形式,如脉间线性步进频率脉冲信号、脉内 Costas FH 信号、脉间 Costas FH 信号等.脉间跳频雷达系统实现距离高分辨是通过对一个相干跳频脉冲串采用信号处理的方法加以综合,形成合成宽带信号从而获得距离高分辨能力^[5].这种合成方法的突出优点是既可以获得较大的等效带宽,又能保持相对较小的瞬时带宽,因此可以显著降低对数字信号处理速度的要

求^[1].由于脉间步进频率雷达信号较易产生,过去主要集中在脉间步进频率雷达的研究上,这种信号的主要问题是存在距离—速度耦合^[4,6].也就是说当目标静止时,采用脉间频率步进雷达信号可以做到很高的距离分辨率,而当目标相对于雷达有相对运动时,在速度补偿不佳的情况下,就会出现所谓的“散焦”现象,而且比较严重^[12].于是人们对现代雷达中的跳变频率编码脉冲信号进行了大量的研究^[7,8].跳变频率编码脉冲信号的频率跳变规律称为跳频图案或跳频模式^[11,10].在众多的跳频编码形式中, Costas 跳频编码被证明是最优的频率编码,它具有良好的自相关和互相关特性^[8].1984年, John P. Costas 首先提出这种编码形式.他在文献[8]中对脉内 Costas 频率编码波形的模糊函数特性进行了

* 国防预研基金(批准号 9810.1.3 BQ0208)资助项目
稿件收到日期 2001-12-10, 修改稿收到日期 2002-06-17

* The project supported by The Preliminary Research Foundation of National Defense (No. 9810.1.3 BQ0208)
Received 2002-12-10, revised 2002-06-17

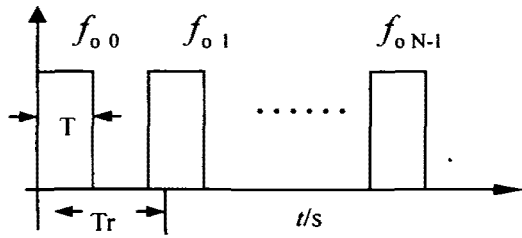


图1 跳频脉冲雷达信号波形

Fig. 1 Waveform of FH pulsed radar signal

详细的研究,并从理论上证明了这种雷达信号具有良好的模糊特性.采用这种脉内 Costas 频率编码波形可以解决距离—速度耦合问题.文献[1]对脉间 Costas FH 信号进行了研究,并得出了相同的结论.

本文采用直接数字频率合成(DDS)技术,给出了脉间 Costas FH 高分辨雷达信号的实现方法.

1 跳频脉冲雷达信号简介

跳频脉冲雷达信号波形如图1所示.

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u_i(t - iTr) e^{j2\pi f_i t}, \quad (1)$$

式(1)中 f_i 为脉冲串中第 i 个脉冲的载波频率, Tr 为子脉冲的重复周期, N 为脉冲串中子脉冲的个数.子脉冲 $u_i(t)$ 为矩形脉冲,其表达式为

$$u_i(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t - T/2}{T}\right), \quad (2)$$

式(2)中 T 为子脉冲的宽度.

所谓脉间跳频,就是雷达每次所发射的脉冲载频是有限集合 F 中的一个元素.有限集合 F 可以用行矩阵表示为

$$F = \{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}, \quad (3)$$

F 中各元素之间的关系为: $f_i = f_{i-1} + \Delta f$, 其中 Δf 为频率间隔.一般地,选择 $\Delta f = 1/T$, T 为子脉冲的宽度.如果脉冲串中子脉冲的载频按发射顺序用行矩阵

$$F_0 = \{f_{00}, f_{01}, \dots, f_{0N-1}\}, \quad (4)$$

表示,跳频模式用矩阵 A 来表示,则输出脉冲载频 F_0 与频率综合器所要产生的有限频率集合 F 之间有如下关系

$$F_0^T = A \cdot F^T, \quad (5)$$

式(5)中 A 为 $N \times N$ 阶方阵,且具有每行只有一个元素为1,其它元素为0的特点,它是一个置换矩阵,这里我们把它称为“频率挑选矩阵”, F^T 是 F 的转置矩阵.满足这种要求的矩阵很多,例如 $N \times N$ 单位阵与 Costas 阵列都满足上述要求.

当 A 为 $N \times N$ 阶单位阵时,式(5)所表示的雷达信号即为频率步进脉冲信号.当 A 为 $N \times N$ 阶 Costas 阵列时,式(5)所表示的雷达信号即为脉间 Costas FH 阵列编码的脉冲信号.

构造 Costas FH 编码阵列的著名的方法有 Welch 方法, Lempel 方法和 Golomb 方法^[9].所构造的 Costas FH 编码阵列可以表示为

$$A = \begin{Bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,N} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \dots & a_{N,N} \end{Bmatrix}_{N \times N}, \quad (6)$$

当 $N = 64$ 时,用 Welch 第二截短法^[8],在 $GF(67)$ * 中构造出矩阵 A , 该矩阵满足 Costas 矩阵的定义^[7-9].

为书写方便,可以按行的顺序只记录每行不为0的元素的列序号.例如,上述矩阵 A 可以记为

$$\{C_i\} = \{2, 6, 14, 30, 62, 59, 53, 41, 17, 36, 7, 16, 34, 3, 8, 18, 38, 11, 24, 50, 35, 5, 12, 26, 54, 43, 21, 44, 23, 48, 31, 64, 63, 61, 57, 49, 33, 1, 4, 10, 22, 46, 27, 56, 47, 29, 60, 55, 45, 25, 52, 39, 13, 28, 58, 51, 37, 9, 20, 42, 19, 40, 15, 32\}$$

这种序列称为 Costas FH 编码序列.

2 直接数字频率合成(DDS)技术简介

常用的频率合成方法有直接模拟合成(DAS)即直接混频方法、间接合成即锁相环(PLL)方法以及直接数字合成(DDS)方法.直接模拟合成方法需要大量的模拟混频器和滤波器,因而,体积大又笨,适合于测量仪器用频率源;锁相频率合成由于有闭环锁相环路,频率切换速度较慢,一般在10至100 μ s量级,因而在频率切换速度要求不高的场合应用较广.

直接数字合成是近年来出现的一种频率合成的新方法.由于是在数字域内实现的频率合成,因而,它具有易集成、频率分辨率高、频率切换速度快以及相位连续等优点,特别适合于跳频振荡信号的产生.一般地直接数字频率合成(DDS)器主要由相位累加器,正弦波形存储表(Sine Look-Up EPROM Table)以及高速数模转换器(DAC)组成.DDS的输出频率

* $GF(p)$ 指 p 阶有限域或 Galions 域, p 为参数.参见肖国镇等编著《编码理论》第158页,国防工业出版社,1993年10月出版

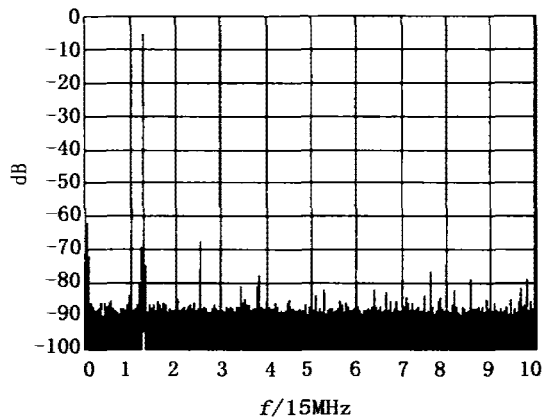


图2 无杂散信号动态范围(SFDR)@19.1MHz
Fig. 2 Wide-band SFDR @ 19.1MHz

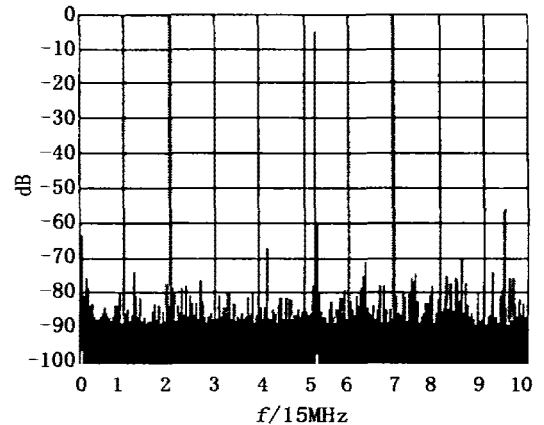


图3 无杂散信号动态范围
Fig. 3 Wide-band SFDR @ 79.1MHz

f_o 与参考时钟频率 f_c 之间的关系为

$$f_o = \frac{M \cdot f_c}{2^n}, \quad (7)$$

式(7)又称为 DDS 的频率调谐方程,式中 M 为频率调谐控制字, n 为相位累加器位数,也称为精度.从式(7)可以看出:给定相位累加器位数 n 及参考时钟频率 f_c ,只要改变 DDS 频率调谐控制字 M ,就可改变 DDS 的输出频率 f_o . DDS 的主要技术指标是无杂散信号动态范围(SFDR).

影响 SFDR 的因素很多,如: DAC 的精度、非线性,相位累加器的截断,参考时钟的前馈以及抖动等,还与电路板的地线,线路布局等有关,限于篇幅,恕不赘述.

3 脉间 Costas FH 高分辨毫米波雷达信号的 DDS 实现方案

美国 ADI 公司生产的 DDS 芯片 AD9854ASQ,是一片用 CMOS 工艺制造的 300MHz/S 采样率(MSPS)的完全直接数字正交合成器(Complets-DDS),它的外部参考时钟可达 30MHz,并且在内部可以编程为 4~10 倍频后作为系统参考时钟 f_c . 它的相位累加器位数,即式(7)中的 $n=48$,频率分辨率为 10^{-6} Hz. 当 f_c 选定后,根据所要产生的信号频率 f_o ,就可以计算出频率调谐控制字 M . 它的耐奎斯特频率为

$$f_{\text{omax}} = \frac{f_c}{2} = 150\text{MHz}, \quad (8)$$

图2和图3分别给出了当外部参考频率为 30MHz,内部倍频系数为 10,即 $f_c=300$ MHz 时,它所产生的 19.1MHz 和 79.1MHz 信号的宽带无杂散信

号动态范围(SFDR),所画出的频谱带宽为 150MHz.

我们用它产生 64 个离散频率点,频率点之间的间隔为 2MHz. 因此,可以得到有限频率集合 F ,用矩阵表示为

$$F = \{f_0, f_1, \dots, f_{v-1}\} \\ = \left\{ \underbrace{2, 4, 6, \dots, 128}_{64} \right\}, \quad (9)$$

我们选择外部参考频率为 30MHz,内部倍频系数编程为 10,即系统参考时钟频率为 $f_c=300$ MHz,这样,输出频率范围为 DC→150MHz. 由式(7)和式(9)即可算出频率调谐字矩阵

$$M = \left\{ \underbrace{m_0, m_1, \dots, m_{127}}_{64} \right\}, \quad (10)$$

直接将频率调谐字 M 存入 EPROM 中就构成了线性步进频率调谐字表. 如将式(10)作如下变换

$$M_c = A_{64 \times 64} M^T, \quad (11)$$

式中 M^T 为 M 的转置矩阵, $A_{64 \times 64}$ 为 64 阶 Costas 方阵. 再将频率调谐字 M_c 存入 EPROM 中就构成了 Costas FH 频率调谐字表. 有了频率调谐字表,就可以由 DSP 根据脉冲列发射方案,如脉冲宽度 T 和脉冲重复周期 T_r 等,对 AD9854ASQ 频率调谐控制字进行更新,就可以产生 2~128MHz 的 DDS 信号,各脉冲的频率由相应的频率调谐字决定. 这样所产生的脉间 Costas FH 信号等效带宽为 128MHz,合成距离分辨率为 1.17m. 用上变频的方法可以将所得到的脉间 Costas FH 基带信号上变频到毫米波段. 图4给出了实现脉间 Costas FH 毫米波雷达信号的框图.

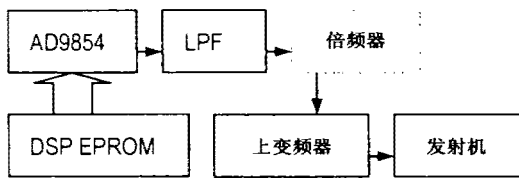


图4 实现脉间 Costas FH 毫米波雷达信号的框图
Fig. 4 Implementation Of Inter-pulses Costas FH MMW Radar Signal Using DDS and DSP

4 讨论

本文讨论了采用 DDS 实现脉间 Costas FH 编码雷达信号的方案,给出了脉间 Costas FH 信号与步进频率脉冲雷达信号的统一表达形式,以及用“频率挑选矩阵”从 DDS 所产生的信号集合中产生脉间跳频信号的方法.使用该方法,可以增加雷达系统软硬件实现的灵活性.此外,还讨论了频率调谐字矩阵 M 与编码序列矩阵 A 之间的变换关系以及频率调谐字矩阵 M 在 EPROM 中的存储方法.

今后要做的工作是采用倍频的方法进一步扩展带宽,以便更好地提高距离分辨率(0.3m),如图4中虚框所示.重点解决倍频过程中宽带滤波的问题.

REFERENCES

- [1] MU Shan-Xiang, LI Xing-Guo, KONG De-Chun. Doppler performance analysis of inter-pulses costas FH signal. *Journal Of Infrared and Millimeter waves* (牟善祥, 李兴国, 孔德春, 脉间 Costas FH 雷达信号的多普勒性能分析. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(4): 313 — 317
- [2] Wehner D R. *High Resolution Radar*. London: Artech House Inc 1985: 7 — 12
- [3] Gill GS, Huang Jen Chin. Analysis of step frequency radar using ambiguity function. *SPIE*, 1996, 2845: 333 — 342
- [4] WANG Yi-Ding, LI Xing-Guo. The ambiguity of frequency stepped radar signal. *Modern Radar* (王一丁, 李兴国. 步进频率雷达信号的模糊函数. *现代雷达*), 1997, 19(6): 6 — 11
- [5] Roebert Vasquez, Benjamin C, Flores. Fourier transform receiver processing of hopped frequency sequences for synthetic range profile generation. *SPIE*, 1996, 2845: 14 — 25
- [6] LONG Teng. Doppler performance analysis of frequency stepped radar signal. *Modern Radar*. (龙腾. 频率步进雷达信号的多普勒性能分析. *现代雷达*), 1996, 18(2): 31 — 37
- [7] MEI Wen-Hua, YANG Yi-Xian. Frequency hopping codes Technique for modem radar systems. *Modern Radar* (梅文华, 杨义先. 现代雷达中的跳频编码技术. *现代雷达*), 1996, 18(5): 82 — 85
- [8] Costas J P. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range Doppler ambiguity function. *Proc. IEEE*. 1984, 72(8): 996 — 1009
- [9] Golomb S, W Taylor H, Constructions and properties of Costas arrays. *Proc IEEE* 1984, 72(9): 1143 — 1163
- [10] SHEN Yun-Chun. *Spread Spectrum Technology*. Beijing: National Defense Publishing Company (沈允春. 扩谱技术. 北京: 国防工业出版社), 1995, 288 — 293
- [11] ZHU Jin-Kang. *Spread Spectrum Communication and Its application*. Hefei: USTCPRESS (朱近康. 扩谱通讯及其应用. 合肥: 中国科学技术大学出版社), 1991, 70 — 181
- [12] Morris G V. *Air Borne Pulse Doppler Radar*. Beijing: Aviation Publishing Company (莫里斯. 机载脉冲多普勒雷达. 北京: 航空工业出版社), 1990, 100 — 150