

脉间 Costas FH 雷达信号的多普勒性能分析*

牟善祥 李兴国 孔德春

(南京理工大学电子工程系, 江苏, 南京, 210094)

TN 957.523

摘要 研究了脉间 Costas FH 雷达中用逆离散傅里叶变换(IDFT)进行信号处理的过程,分析了脉间 Costas FH 雷达信号不存在距离-速度耦合的原理,讨论并仿真了目标运动对合成距离像的影响。

关键词 Costas 序列, 脉间跳频, 逆离散傅里叶变换, 速度, 合成距离像。

雷达信号多普勒性能

DOPPLER PERFORMANCE ANALYSIS OF INTERPULSE COSTAS FH RADAR SIGNAL*

MU Shan-Xiang LI Xing-Guo KONG De-Chun

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A new waveform utilizing Costas sequence and interpulse frequency hopping (FH) can be used as a good high-range resolution radar signal. The signal processing using inverse discrete Fourier transform (IDFT) in the interpulse Costas FH radar was studied. The principle of the interpulse Costas FH radar signal without the delay-Doppler coupling was analyzed. The influence of target motion on synthetic range profile was discussed and simulated.

Key words Costas sequences, interpulse frequency hopping (FH), inverse discrete Fourier transform (IDFT), velocity, synthetic range profile.

引言

雷达系统采用距离高分辨率信号具有很多优越性^[1],脉间 Costas FH 信号就是其中一种。脉间跳频系统实现距离高分辨是通过对于一个相干跳频脉冲串采用信号处理的方法综合形成距离高分辨,其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。过去的研究主要集中在脉间步进频率雷达的研究^[1~4],这种信号的主要问题是存在距离-速度耦合,而且比较严重^[5]。

人们对现代雷达中的跳频码技术作了大量的研究^[6]。在众多的跳频编码形式中, Costas 跳频码被证明是最优的频率编码。John P. Costas^[7]研究了脉内 Costas 频率编码波形的模糊函数特性,证实了其不存在模糊旁瓣和距离-速度耦合。本文根据脉间 Costas

FH 雷达系统的信号处理过程分析了这种雷达信号不存在距离-速度耦合的原理,并且结合计算机仿真得到了速度对合成距离像的影响。

1 脉间 Costas FH 雷达信号

脉间 Costas FH 雷达信号(见图1)的数学表达式为:

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N u_1(t - (i-1)T_r) e^{j2\pi f_i t}, \quad (1)$$

子脉冲 $u_1(t)$ 为矩形脉冲,其表达式为:

$$u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{rect} \left(\frac{t - T/2}{T} \right), \quad (2)$$

第 i 个发射脉冲的发射频率是:

$$f_i = f_0 + (i-1)\Delta F, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中脉间 Costas FH 雷达信号波形的参数为: T 为子

* 国防预研基金(编号 YJ96113)资助项目

稿件收到日期 1999-07-19, 修改稿收到日期 2000-03-09

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense.

Received 1999-07-19, revised 2000-03-09

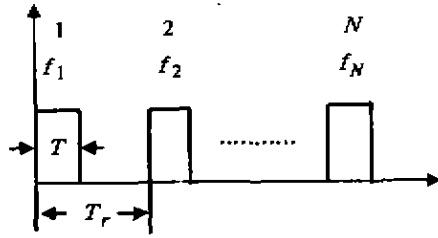


图1 脉间 Costas FH 雷达信号
Fig.1 Interpulse Costas FH radar signal

脉冲宽度, T_r 为脉冲重复频率, N 为相干脉冲个数. ΔF 为频率步进量, f_0 为发射的基准频率, $\{c_i\}$ 表示 Costas 序列, $(c_i - 1)\Delta F$ 表示第 i 个发射脉冲的载频增量.

Costas 阵列的构造方法较多, Golomb^[6] 在文中给出了各种 Costas 阵列的构造方法, 如 Welch 构造法, Lempel 构造法, Golomb 构造法, 以及各种增长法. 截短法. 现以 64 阶 Costas 序列的构造为例, 说明如何在实际中应用这些构造法. Costas 序列的构造需要用到有限域的知识. 这里借助有限域 GF(p) ($p=67$), 可由 Welch 构造法, Lempel 构造法, Golomb 构造法以及它们的推广法, 生成 66 阶或 65 阶 Costas 阵列, 然后通过截短法如 W3, L3, G3 等即可得到所要的 64 阶 Costas 阵列. 下面是利用 W3 生成的 64 阶 Costas 序列.

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

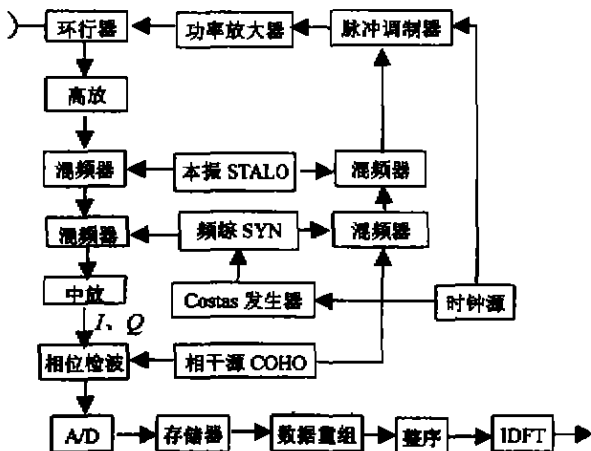


图2 脉间 Costas FH 雷达系统原理框图
Fig.2 Block diagram of interpulse Costas FH radar system

图 2 是能实现脉间 Costas FH 雷达系统原理框图. 发射信号的产生由高稳定本振和中频相干振荡器混频产生. 每个脉冲的附加跳频由受 Costas 发生器控制的跳频频综提供. 为了保证 Costas 码产生与脉冲调制一致, 采用同一时钟源来同步. 在接收端相反的过程从所得的接收信号中取出高频稳定本振、跳频和相干频率. 中频放大器起到了对单个脉冲包络的匹配滤波器的作用. 相位检波输出视频信号的同相和正交分量. A/D 转换器的输出被存储, 再根据距离门进行数据重组和 Costas 码进行整序. 在每一个距离门的接收的所有 N 个脉冲信号的采样值被重组在一起, 然后按线性步进的方式整序, 经过加权处理后进行逆离散傅里叶变换 (IDFT). IDFT 的输出表示更好的可分辨的距离门.

2 脉间 Costas FH 信号的处理

为分析方便, 设发射波形是 $X_i(t)$, 回波信号是 $Y_i(t)$, 回波延迟时间是 $\tau(t)$, 即是时间的函数. 设

$$X_i(t) = \begin{cases} B_i \cos(2\pi f_i t - \theta_i), & iT_r \leq t \leq iT_r + T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

θ_i 为相对相位, B_i 为第 i 个发射频率 f_i 上的脉冲幅度.

而接收信号

$$Y_i(t) = \begin{cases} B'_i \cos\{2\pi f_i [t - \tau(t)] + \theta_i\}, & iT_r + \tau(t) \leq t \leq iT_r + T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式中 B'_i 为第 i 个发射频率 f_i 上接收到的回波脉冲幅度, 而目标的距离延时为

$$\tau(t) = \frac{R - Vt}{C/2} \quad (6)$$

式(6)中 R 是目标距离, V 是目标速度.

本振参考信号可表示为:

$$Z_i(t) = B \cos(2\pi f_i t + \theta_i), \quad iT_r \leq t \leq (i+1)T_r \quad (7)$$

设式(7)中 B 为一个常数.

回波信号与本振参考信号混频后输出的基带响应分量为:

$$m_i(t) = \begin{cases} A_i \cos[-2\pi f_i \tau(t)], & iT_r + \tau(t) \leq t \leq iT_r + T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中 A_i 为第 i 个发射频率 f_i 上回波信号经混频器输出的幅度. 混频器输出的相位是:

$$\psi_i(t) = -2\pi f_i \left(\frac{2R}{C} - \frac{2V_i t}{C} \right), \quad (9)$$

式(9)是从发射到接收的每个脉冲总回波相位,从式(9)可见目标的距离信息包含在混频器输出基带响应分量的相位中.脉间 Costas FH 雷达的信号处理就是要从这些相位信号中提取目标散射中心的信息.

混频器输出的模拟基带响应信号经过 A/D 变换后,对获得的数据进行数据重组后获得逆离散傅里叶变换需要的数字信号.为了保证获得最大的基带响应信号幅度,采样时间应选择在回波信号波形的中心处,采样时间 S_i 表示为:

$$S_i = iT_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{C}, \quad (10)$$

则

$$\psi_i = -2\pi[f_0 + (c_i - 1)\Delta F] \left[\frac{2R}{C} - \frac{2V_i}{C} \left(iT_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right], \quad (11)$$

对一个混频器取样的输出为 $m_i = A_i \cos \psi_i$,而对两个混频器取样的正交混合输出为

$$G_i = A_i [\cos \psi_i + j \sin \psi_i], \quad (12)$$

写出复数形式为:

$$G_i = A_i e^{j\psi_i}. \quad (13)$$

对发射的每一串脉冲而言,正交混频器输出信号的复包络采样值 G_i 是目标的频域响应数据,但由于其经过 Costas 编码调制,故顺序已经被打乱,因此在进行逆离散傅里叶变换(IDFT)之前应该将这一组频域响应数据按频率步进方式整序.即将 $G_i (i=1, 2, \dots, N)$ 整序成 $G'_k (k=1, 2, \dots, N)$,相应的相位为:

$$\psi'_k = -2\pi[f_0 + (k-1)\Delta F] \left[\frac{2R}{C} - \frac{2V_k}{C} \left((c'_k - 1)T_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right], \quad (14)$$

式中 c'_k 与 c_i 由同一个 Costas 阵列变换而来,所以 $\{c'_k\}$ 也为 Costas 序列,满足 Costas 序列的性质.如前面所举的 64 阶 Costas 阵列,其对应的 $\{c'_k\}$ 为:

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

对整序后 N 个复数取样进行逆离散傅里叶变换得到一个复数相干级数为:

$$H_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G'_i e^{+j2\pi l i / N}, \quad 1 \leq l \leq N \quad (15)$$

假如不考虑回波幅度的影响,令所有 $A_i = 1$,以及目标运动速度的影响 $V_i = 0$,则

$$G'_i = \exp \left[-2\pi(f_0 + i\Delta F) \frac{2R}{C} \right], \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

把式(16)代入式(15),得:

$$H_l = \frac{1}{N} \exp \left[-j2\pi f_0 \frac{2R}{C} \right] \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left[j \frac{2\pi i}{N} \left(-\frac{2NR\Delta F}{C} + l \right) \right], \quad (17)$$

把以上方程用下列恒等式化简,

$$\sum_{p=0}^{\beta-1} e^{+j\alpha p} = \frac{\sin \frac{\beta\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (18)$$

设 $\beta = N, p = i, \alpha = 2\pi y / N, y = \frac{-2nr\Delta F}{C} + l$,

$$\text{得: } H_l = \frac{1}{N} \left[\exp \left(-j2\pi f_0 \frac{2R}{C} \right) \right] \frac{\sin \frac{\pi y}{N}}{\sin \frac{\pi y}{N}} \exp \left(j \frac{N-1}{2} \frac{2\pi y}{N} \right), \quad (19)$$

,则合成距离轮廓的幅度为:

$$|H_l| = \left| \frac{\sin \frac{\pi y}{N}}{N \sin \frac{\pi y}{N}} \right|, \quad (20)$$

3 目标运动对脉间 Costas FH 信号的影响

为了研究的简便,本文只考虑目标以匀速运动的情况.当 $V_i \neq 0$,则

$$\begin{aligned} \psi'_k &= -2\pi[f_0 + (k-1)\Delta F] \\ &\left[\frac{2R}{C} - \frac{2V_k}{C} \left((c'_k - 1)T_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right] \\ &= -4\pi f_0 \left[\frac{R}{C} - \frac{V_k}{C} \left(\frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right] - \\ &\frac{4\pi(k-1)\Delta F R}{C} + \\ &\frac{4\pi(k-1)\Delta F V_k}{C} \left(\frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right) + \\ &\frac{4\pi[f_0 + (k-1)\Delta F](c'_k - 1)V_k T}{C}, \quad (21) \end{aligned}$$

把 ψ'_k 分解成以下四个相位项,并分析其对合成距离像的影响.

$$\varphi_{1k} = -4\pi f_0 \left[\frac{R}{C} - \frac{V_i}{C} \left(\frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right], \quad (22)$$

$$\varphi_{2k} = \frac{-4\pi(k-1)\Delta F R}{C}, \quad (23)$$

$$\varphi_{3k} = \frac{4\pi(k-1)\Delta F V_i}{C} \left(\frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right), \quad (24)$$

$$\varphi_{4k} = \frac{4\pi[f_0 + (k-1)\Delta F](c'_k - 1)V_i T_i}{C}, \quad (25)$$

当目标以恒定速度运动时,即 $V_i = \text{常数}$,则 φ_{1k} 也为常数,因此 φ_{1k} 对合成距离像无影响。 φ_{2k} 是正常的距离相位关系,能合成正确距离像。

因为 $\varphi_{2k} - \varphi_{2(k-1)} = \text{常数}$,所以 φ_{2k} 不会改变正常的相位关系,但对目标距离像有移位。移位的大小为:

$$\Delta R' = V_i \left(\frac{T}{2} + \frac{2R}{C} \right), \quad (26)$$

由式(26)可知,距离像的移位影响随着距离 R 的增加而增大。脉间 Sostas FH 雷达系统要求探测距离 $R \leq T \cdot C/2$,由于 $\ll T_r$,因此由 φ_{2k} 产生的最大移位为 $\Delta R'_{\max} = V_i T_r$ 。脉间 Sostas FH 雷达系统的要求,目标运动在相干处理时间内不能移出同一个合成距离单元,即 $NV_i T_r < \Delta r$,其中 Δr 为合成距离分辨率。所以 $\Delta R'_{\max} < \frac{1}{N} \Delta r$,由于脉间 Sostas FH 雷达系统的要求较高的距离分辨率,因而相干处理的脉冲数目 N 一般较大,如 64, 128 等。因此 φ_{2k} 对目标距离像产生的移位影响基本上可忽略不计。

φ_{4k} 是速度对相位的主要影响。根据 Costas 序列的性质^[7]:

$$\begin{aligned} \Delta_{L,K} &= c_{K+L} - c_K, L = 1, 2, \dots, N-1, \\ K &= 1, 2, \dots, N-L, \end{aligned}$$

则对于任意 L 都有:

$$\Delta_{L,r} \neq \Delta_{L,s}, \quad r \neq s \quad (27)$$

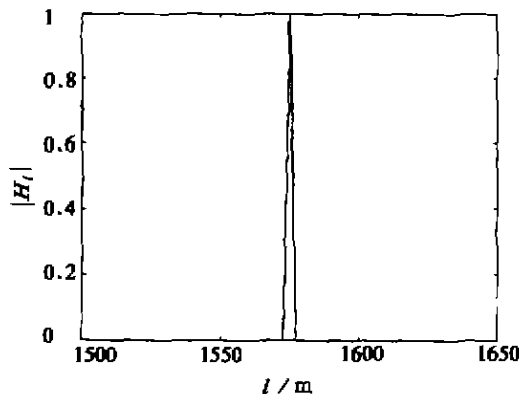


图3 固定散射点的合成距离像
Fig. 3 The synthetic profile for a single fixed-point target

由于 c'_k 为 Costas 序列,同样可设 $\Delta\varphi_{L,K} = \varphi_{4(L,K)} - \varphi_{4(L,K-1)}$, $L=1, 2, \dots, N-1, K=1, 2, \dots, N-L$,则对任意 L 都有:

$$\Delta\varphi_{L,r} \neq \Delta\varphi_{L,s}, \quad r \neq s, \quad (28)$$

φ_{4k} 之间不存在固定相位关系,因而不存在距离-速度耦合关系。因此 Costas FH 的整序处理使得多普勒耦合被破坏,不会使合成距离像产生移位,但由于多普勒失配使得峰值响应降低。

4 仿真结果

仿真用的脉间 Costas FH 雷达信号波形的参数为:

脉冲个数 N 为 64,等效带宽为 64MHz,脉冲重复周期 T_r 为 180 μ s,脉冲宽度 T 为 0.2 μ s,频率步进量 ΔF 为 1.0MHz,发射的基准频率 f_0 为 3000MHz, $\{c_k\}$ 为前面所生成的 Costas 序列。散射点距离 R 为 1575m。

图3表示固定散射点的合成距离像,图4表示散射点以 1.0m/s 的速度运动时的合成距离像。图3和图4中纵坐标 H 为幅度,横坐标 l 为目标距离。从图3和图4中可知,目标运动不影响合成距离像的峰值位置,但是峰值响应产生衰减。从式(25)可知,随着 V_i 的增加,由 V_i 所形成的干扰相位越大,因而对合成距离像的峰值影响也越大。因而存在一个速度门限,此时峰值响应将会衰减到某一个值,如半功率点。Wehner^[1] 推导了一个速度值,这是使步进频率波形合成距离像在匹配的距离时延位置响应为零的最小速度。相同的速度值被用在 Costas FH 波形中发现,当速度近似速度门限值时,峰值响应接近为零。这个速度值的表达式为:

$$V_0 = \frac{\lambda}{2NT_r}, \quad (29)$$

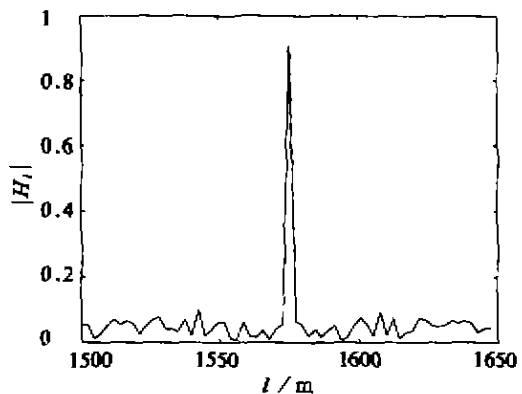


图4 速度为 1.0m/s 运动散射点的合成距离像
Fig. 4 The synthetic profile for a single moving-point target with the speed of 1.0m/s

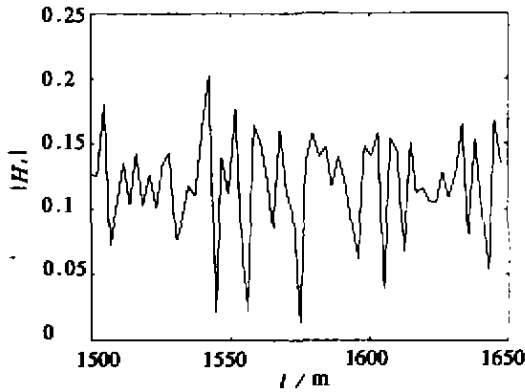


图5 速度为 4.34m/s 运动散射点的合成距离像
Fig. 5 The synthetic profile for a single moving-point target with the speed of 4.34m/s

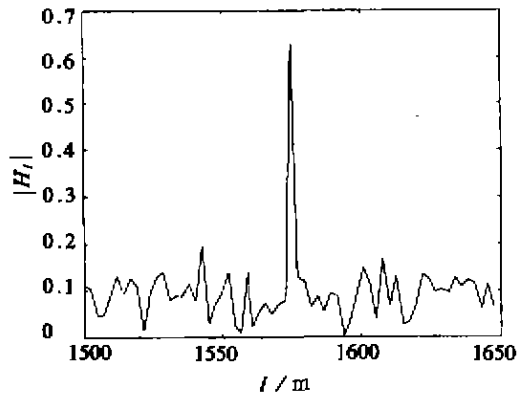


图6 速度为 2.17m/s 运动散射点的合成距离像
Fig. 6 The synthetic profile for a single moving-point target with the speed of 2.17m/s

式(29)中 V_0 可作为 Costas FH 所允许的最大速度. 如果考虑峰值响应衰减 3dB, 这时的速度为:

$$V_{th} = \frac{V_0}{2} = \frac{\lambda}{4NT_r}, \quad (30)$$

代入前面的仿真参数, 可得: $V_0 = 4.34\text{m/s}$, $V_{th} = 2.17\text{m/s}$. 图 5 表示目标运动速度为 V_0 时的合成距离像, 此时峰值响应衰减接近零, 图 6 表示目标运动速度 V_{th} 时的合成距离像, 此时峰值响应衰减接近一半. 图 5 和图 6 中 H 与 l 的含义同图 3 和图 4.

REFERENCES

- [1] Wehner D R. *High Resolution Radar*. London: Artech House Inc. 1985, 7-12
- [2] Gill G S, Huang Jen Chin. Analysis of step frequency radar using ambiguity function. *SPIE*, 1996, **2845**: 333-342
- [3] 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
- [4] Roberto Vasquez, Benjamin C. Flores. Fourier transform receiver processing of hopped frequency sequences for synthetic range profile generation. *SPIE*, 1996, **2845**: 14-25
- [5] 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
- [6] MEI Wen-Hua, YANG Yi-Xian. Frequency hop codes designed for modern 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
- [7] Costas J P. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range doppler ambiguity function. *Proceeding of the IEEE*, 1984, **72**(8): 996-1009
- [8] Golomb S. W Taylor H. Constructions and properties of Costas arrays. *Proceeding of the IEEE*, 1984, **72**(9): 1143-1163