

一种混合噪声调制的脉冲多普勒雷达信号分析¹

陆锦辉 丁庆海 是湘全 张清泰

(南京理工大学电光学院 南京 210094)

摘要 本文研究了随机脉冲位置调制与脉冲之间随机相位调制相结合的脉冲多普勒雷达信号。首次给出了该随机序列的模糊函数数学表达式,对其推导所采用的主要方法作了叙述,研究了该序列的产生方案,最后对结果进行了分析。

关键词 噪声雷达, 平均模糊函数, 随机脉位序列, 随机二相码

中图分类号 TN958, TN911.7

1 引言

雷达发射信号的波形,很大程度上决定了信息的类型和信息的质量。目前广泛应用的连续波或周期调制的雷达系统都存在距离选择性不够好,鉴别力差,易受干扰等缺点。噪声雷达的发射信号是被随机噪声信号调制的载波信号,所以它具有低截获概率的特点,适合于干扰场合。噪声雷达可分为随机调幅雷达,随机调频雷达,随机调相雷达,随机调制脉冲位置雷达等。但随机调制脉冲位置、同时脉冲之间又随机调相的脉冲多普勒雷达在国内外还未见到过。它既有随机脉位调制脉冲多普勒雷达的优点,又具有随机调相噪声雷达的优点。所以,我们有必要对该雷达信号加以分析和研究。

2 随机脉位加随机调相脉冲串信号分析

2.1 随机脉位加随机调相脉冲串信号数学模型

设该随机脉冲串信号包络数学表示式为

$$U(t) = \frac{1}{\sqrt{NT_p}} \sum_{i=0}^{N-1} C_i U_1(t - iT_r - X_i), \quad (1)$$

其中

$$U_1(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_p; \\ 0, & \text{其他;} \end{cases} \quad (2)$$



图 1 随机脉位加随机调相脉冲串信号波形

T_p 为脉冲宽度; T_r 为脉冲重复周期; $C_i = e^{j\varphi_i}$ ($\varphi_i = 0$ 或者 π) 是取值为 +1 或者 -1 的随机二元序列; X_i 是在 $[0, T_0]$ 间均匀分布的随机变量; T_0 为调制范围; N 为脉冲积累数。为推导方便设 $T_r = HT_p$, $T_0 = MT_p$, $0 < M < H$, 随机脉位加随机调相脉冲串信号波形如图 1 所示。

¹ 1996-06-05 收到, 1997-10-07 定稿

2.2 随机脉位加随机调相脉冲串信号的平均模糊函数

由平均模糊函数的定义^[1,2], 知

$$A(\tau, \varphi) = \frac{1}{(NT_p)^2} \int_0^{NT_r} \int_0^{NT_r} \sum_{i_1=0}^{N-1} \sum_{i_2=0}^{N-1} \sum_{i_3=0}^{N-1} \sum_{i_4=0}^{N-1} E\{C_{i_1} C_{i_2} C_{i_3} C_{i_4} \times U_1(t_1 - i_1 T_r - X_{i_1}) \times U_1(t_1 + \tau - i_2 T_r - X_{i_2}) \times U_1(t_2 - i_3 T_r - X_{i_3}) \times U_1(t_2 + \tau - i_4 T_r - X_{i_4})\} \times \exp(-j2\pi\varphi(t_1 - t_2)) dt_1 dt_2. \quad (3)$$

该函数为 τ 的偶函数, 所以, 下面我们只计算 $\tau \geq 0$ 时的情况。可以看出, 计算的难点主要是连续均匀分布的随机变量 X_i 在括号内部。为了计算方便, 我们将连续均匀分布的随机变量 X_i 看作为在 $[0, T_0]$ 间以间隔 ΔT 的整数倍均匀分布的离散随机变量 $X'_i \in \{0, \Delta T, 2\Delta T, \dots, M L \Delta T\}$, 即设 $T_0 = M \times L \times \Delta T$, $L \times \Delta T = T_p$, 则当 $L \rightarrow \infty$ 时, 即 $\Delta T \rightarrow 0$ 时, 间隔变为无穷小, X'_i 就又变为连续随机变量 X_i 。其次, 我们将离散随机变量 X'_i 从括号内提到外面, 变为离散随机变量 D_{ikq} , 即将 (1) 式写成如下形式

$$U'(t) = \frac{1}{\sqrt{NT_p}} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{L-1} C_i D_{ikq} U_1(t - iT_r - kT_p - q\Delta T), \quad (4)$$

其中在一个脉冲周期内, D_{ikq} 在 LM 个位置上仅在一个位置取值为 1, 其余位置取值为 0, 则当 $L \rightarrow \infty$ 时, $U(t) = U'(t)$ 。将 (4) 式代入 (3) 式后, 可得

$$A(\tau, \varphi) = \frac{1}{(NT_p)^2} \int_0^{NT_r} \int_0^{NT_r} \sum_{i_1=0}^{N-1} \sum_{i_2=0}^{N-1} \sum_{i_3=0}^{N-1} \sum_{i_4=0}^{N-1} \sum_{k_1=0}^{M-1} \sum_{k_2=0}^{M-1} \sum_{k_3=0}^{M-1} \sum_{k_4=0}^{M-1} \sum_{q_1=0}^{L-1} \sum_{q_2=0}^{L-1} \sum_{q_3=0}^{L-1} \sum_{q_4=0}^{L-1} E(C_{i_1} C_{i_2} C_{i_3} C_{i_4} D_{i_1 k_1 q_1} D_{i_2 k_2 q_2} D_{i_3 k_3 q_3} D_{i_4 k_4 q_4}) \times U_1(t_1 - i_1 T_r - k_1 T_p - q_1 \Delta T) \times U_1(t_1 + \tau - i_2 T_r - k_2 T_p - q_2 \Delta T) \times U_1(t_2 - i_3 T_r - k_3 T_p - q_3 \Delta T) \times U_1(t_2 + \tau - i_4 T_r - k_4 T_p - q_4 \Delta T) \times \exp(-j2\pi\varphi(t_1 - t_2)) dt_1 dt_2. \quad (5)$$

下面我们先来计算 $E(C_{i_1} C_{i_2} C_{i_3} C_{i_4} D_{i_1 k_1 q_1} D_{i_2 k_2 q_2} D_{i_3 k_3 q_3} D_{i_4 k_4 q_4})$, 然后通过它的结果和约束条件来简化 (5) 式。因为随机变量 D_{ikq} 与 C_i 相互独立, 由随机信号理论和随机变量 D_{ikq} 与 C_i 的性质, 可得^[1]

$$E(C_{i_1} C_{i_2} C_{i_3} C_{i_4} D_{i_1 k_1 q_1} D_{i_2 k_2 q_2} D_{i_3 k_3 q_3} D_{i_4 k_4 q_4}) = \begin{cases} 1/LM, & \begin{cases} i_1 = i_2 = i_3 = i_4, \\ k_1 = k_2 = k_3 = k_4, \\ q_1 = q_2 = q_3 = q_4, \end{cases} \\ 1/(LM)^2, & \begin{cases} i_1 = i_2 \neq i_3 = i_4, \\ k_1 = k_2; k_3 = k_4, \\ q_1 = q_2; q_3 = q_4, \end{cases} \\ \text{或} & \begin{cases} i_1 = i_3 \neq i_2 = i_4, \\ k_1 = k_3; k_2 = k_4, \\ q_1 = q_3; q_2 = q_4, \end{cases} \\ \text{或} & \begin{cases} i_1 = i_4 \neq i_2 = i_3, \\ k_1 = k_4; k_2 = k_3, \\ q_1 = q_4; q_2 = q_3, \end{cases} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (6)$$

故我们可分两步计算 (5) 式。首先计算 $E(C_{i_1} C_{i_2} C_{i_3} C_{i_4} D_{i_1 k_1 q_1} D_{i_2 k_2 q_2} D_{i_3 k_3 q_3} D_{i_4 k_4 q_4}) = 1/(LM)$ 时 (5) 式的值, 这时有 $i_1 = i_2 = i_3 = i_4, k_1 = k_2 = k_3 = k_4, q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ 。将其代入 (5) 式, 得

$$\begin{aligned} A(\tau, \varphi) = & \frac{1}{(NT_p)^2} \int_0^{NT_r} \int_0^{NT_r} \sum_{i_1=0}^{N-1} \sum_{k_1=0}^{M-1} \sum_{q_1=0}^{L-1} \frac{1}{LM} U_1(t_1 - i_1 T_r - k_1 T_p - q_1 \Delta T) \\ & \times U_1(t_1 + \tau - i_1 T_r - k_1 T_p - q_1 \Delta T) \times U_1(t_2 - i_1 T_r - k_1 T_p - q_1 \Delta T) \\ & \times U_1(t_2 + \tau - i_1 T_r - k_1 T_p - q_1 \Delta T) \times \exp(-j2\pi\varphi(t_1 - t_2)) dt_1 dt_2. \end{aligned} \quad (7)$$

为了能够划分积分限, 我们将 τ 用 T_r 、 T_p 、 ΔT 来表示, 即写成如下形式: $\tau = aT_r + bT_p + c\Delta T + \tau_0$, a, b, c 分别为 τ 对 T_r 、 T_p 、 ΔT 的模值, 也就是由如下规则取值, 无论 τ 取何值, 我们都先将其量化成 T_r 的整数倍, 然后将其余下部分量化成 T_p 的整数倍, 然后再将其余下部分量化成 ΔT 的整数倍, 其余下部分用 τ_0 表示, 其中, $0 \leq |\tau_0| < \Delta T, 0 \leq |a| < N, 0 \leq |b| < H$ 。将 $\tau = aT_r + bT_p + c\Delta T + \tau_0$ 代入 (7) 式后可根据 $U_1(t)$ 函数的性质来划分积分上下限, 由于篇幅有限, 这里不再写出积分过程, 详细积分过程类似参考文献 [3, 4]。积分结果为

$$A_1(\tau, \varphi) = (1/N) Sa^2 \pi \varphi (T_p - c\Delta T - \tau_0) [1 - (\Delta T + \tau_0)/T_p]^2, \quad (8)$$

则当 $L \rightarrow \infty$ 时, 即 $\Delta T \rightarrow 0$ 时, $c\Delta T + \tau_0 \rightarrow \tau', 0 \leq |\tau'| < T_p$, 则

$$A_1(\tau, \varphi) = (1/N) Sa^2 \pi \varphi (T_p - \tau') (1 - \tau'/T_p)^2. \quad (9)$$

同理我们可计算出 $E(C_{i_1} C_{i_2} C_{i_3} C_{i_4} D_{i_1 k_1 q_1} D_{i_2 k_2 q_2} D_{i_3 k_3 q_3} D_{i_4 k_4 q_4}) = 1/(LM)^2$ 时, (5) 式的值取极限后, 得到 $A_2(\tau, \varphi)$, 与 $A_1(\tau, \varphi)$ 合并后并考虑 $\tau < 0$ 时的情况, 可写出随机脉位加随机调相脉冲串信号的平均模糊函数的数学表示式如下:

当 $|\tau| < T_p$ 时,

$$A(\tau, \varphi) = \frac{1}{N} Sa^2 (\pi \varphi (T_p - |\tau'|)) \left(1 - \frac{|\tau'|}{T_p}\right)^2 \left(1 + Sa^2 \pi \varphi M T_p \left(N \frac{Sa^2 \pi \varphi N T_r}{Sa^2 \pi \varphi T_r} - 1\right)\right), \quad (10)$$

当 $|\tau| \geq T_p$ 时,

$$A(\tau, \varphi) = \begin{cases} \frac{1}{(NT_p M \pi \varphi)^2} (N - |a|) (1 - Sa^2 \pi \varphi T_p) \left(M - |b| - \frac{|\tau'|}{T_p}\right), & |a| \neq 0, 0 \leq |b| < M; \\ \frac{1}{(NT_p M \pi \varphi)^2} (N - |a| - 1) (1 - Sa^2 \pi \varphi T_p) \left(M - H + |b| + \frac{|\tau'|}{T_p}\right), & H - M \leq |b| < H. \end{cases} \quad (11)$$

图 2 是 $N = 10, M = 2, H = 10$ 时绘出的模糊图, 图 3 是 $N = 10, M = 9, H = 10$ 时绘出的模糊图。由图可以看出, 该体制可以很好地消除距离模糊, 当脉冲位置变化范围较小时, 多普勒轴上存在模糊峰, 当调制范围较大时, 不但不存在距离模糊, 而且在多普勒轴上也已经不存在明显模糊峰, 成一堵墙状, 其模糊图为近似图钉形。我们在选用该脉冲序列作为发射信号时, 在满足技术指标的前提下, 应使其脉冲调制范围尽量在整个脉冲间隔内变化, M/H 越大, 消除距离速度模糊越明显, 一般取 $M/H = 0.9$ 左右。

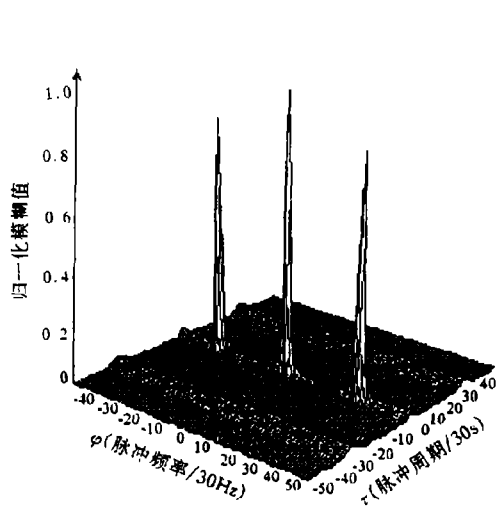


图 2 $N = 10, M = 2, H = 10$ 时绘出的模糊图

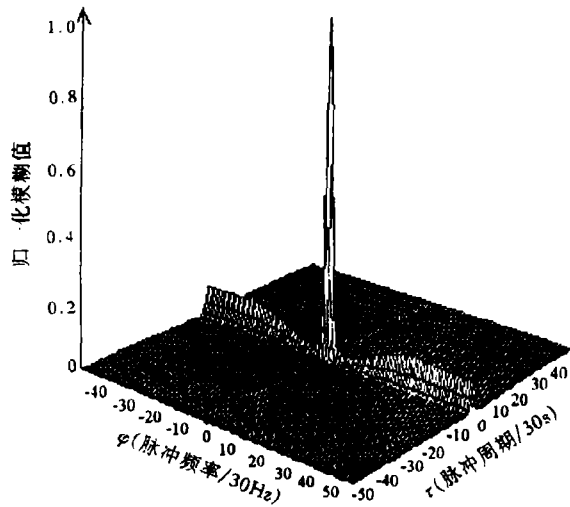


图 3 $N = 10, M = 9, H = 10$ 时绘出的模糊图

3 随机脉位加随机调相脉冲串序列的产生

随机脉位加随机调相脉冲串序列的产生框图如图 4 所示。图中随机数产生器有 n 位码元，产生一均匀分布的随机数，其值范围为 $1, \dots, 2^n$ (可根据调制范围来设置其最大值)。随机数产生器的时钟频率是晶振经 2^n 分频后得到的，而计数器是以晶振的时钟频率来进行计数的，这就保证了在计数器的计数值没到 2^n 之前，随机数产生器状态的稳定。随机数产生器与计数器通过一并行数值比较器作比较，当计数器的计数值与随机数产生器产生的均匀分布的随机数的值相一致时，数值比较器输出一码元，作为移位寄存器的时钟触发信号，将随机二相码产生器送来的二相码逐个输出。当计数器计到 2^n 时，计数器与随机数产生器同时状态翻转，并清零，然后分别重新开始计数和产生一均匀分布的随机数。这样，数值比较器就根据随机数产生器产生的随机数的大小输出一脉冲间隔随机变化的脉冲序列，而移位寄存器则输出一不但间隔随机变化而且相位也随机变化的序列。

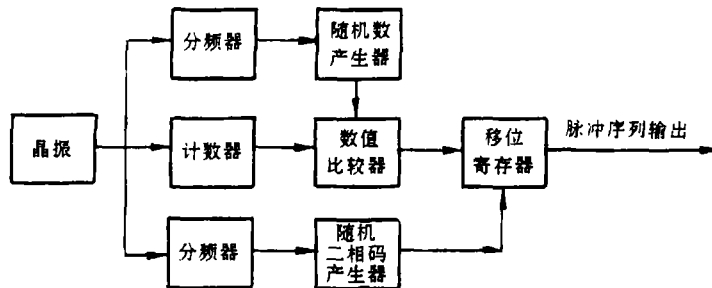


图 4 随机脉位加随机调相脉冲串序列产生框图

4 结 论

从随机脉冲位置调制与脉冲之间随机相位调制相结合的脉冲多普勒雷达信号的模糊函数数学表达式和模糊图可以看出, 在调制范围较小时它就可以较好地避免距离模糊, 而单纯随机脉位调制在调制范围较小时会存在距离模糊, 当调制范围较大时, 其模糊函数为近似图钉形, 与单纯的随机脉位调制相比, 其距离旁瓣更低, 而且它具有良好的抗干扰特性。所以, 它是一种较佳的脉冲多普勒雷达信号。

参 考 文 献

- [1] Kavch M, Cooper G R. Average ambiguity function for a randomly staggered pulse sequence. IEEE Trans. on AES, 1976, AES-12(3): 43-48.
- [2] Ching Tai Lin. The average ambiguity function for a random binary-phase-coded waveforms. International Radar Conference, Arlington, Virginia: 1985, 119-124.
- [3] 陆锦辉, 是湘全, 丁庆海, 汪敏. 随机二相码脉冲压缩雷达信号分析. 电子学报, 1996, 24(6): 125-127.
- [4] 丁庆海. 随机脉位序列调制的脉冲多普勒雷达信号分析: [硕士论文]. 南京: 南京理工大学电子工程系, 1995.

ANALYSIS OF PD RADAR SIGNAL MODULATED BY MIXED NOISE

Lu Jinhui Ding Qinghai Shi Xiangquan Zhang Qingtai

(School of Electronic Engineering and Optoelectric Technique,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract In this paper, a PD radar signal is researched, which is modulated by randomly staggered pulse sequence whose phase is also modulated by random binary-phase code. The expression of its ambiguity function is firstly presented, the main derived method is also given, and how to generate this pulse sequence is discussed. Finally simulation results are analyzed.

Key words Noise radar, Average ambiguity function, Randomly staggered pulse sequence, Random binary-phase code

陆锦辉: 男, 1961年生, 副教授, 从事信号处理, 数字通信等方面的研究。
丁庆海: 男, 1968年生, 博士生, 从事神经网络, 信号处理和雷达等方面的研究。
是湘全: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 从事信号处理和雷达等方面的研究。
张清泰: 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, 从事信号处理和引信等方面的研究。