

基于MAC序列的间断连续波雷达信号的研究

杨立扬, 王汝传, 张登银, 孙开翠

(南京邮电学院 计算机科学与技术系, 江苏南京 210003)

摘要: 间断连续波雷达信号有效地解决了收发隔离的问题, 其应用日益引起了雷达界的重视. 本文首先建立了间断连续波二相编码信号的数学模型, 并在此数学模型的基础上推导了间断连续波二相编码信号的平均模糊函数, 然后我们采用一种特殊的二元序列——MAC序列, 对间断连续波雷达信号进行 $0, \pi$ 调相, 最后给出了对该信号性能的计算机仿真结果.

关键词: MAC序列; 间断连续波雷达; 平均模糊函数; 伪随机二相码

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0994-03

Research on Quasi-Continuous Wave Radar Signal Based on MAC Sequence

YANG Li yang, WANG Ru chuan, ZHANG Deng yin, SUN Kai cui

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: Quasi continuous wave radar signal has solved the problem of separating transmitting from receiving, and its application has aroused the regards of radar community. This paper first establishes the mathematical model of Quasi continuous wave binary phase code signal; then concludes the average ambiguity function of Quasi continuous wave binary phase code signal; later we adopt a kind of special binary sequence——MAC sequence, by which we make 0 and π phase modulation of Quasi continuous wave radar signal; finally the results of computer simulation of the signal performance are given.

Key words: MAC sequence; quasi continuous wave radar; average ambiguity function pseudo random binary phase code

1 引言

现代战争下, 雷达面临电子干扰、隐身、反辐射导弹和低空突防4大威胁, 连续波雷达比脉冲雷达更有利于对抗这些威胁. 但是, 连续波雷达也存在一个显著的缺点: 收发不能很好的隔离, 即发射信号与噪声直接漏到接收机里, 造成信号泄漏, 影响检测的灵敏度. 间断连续波雷达很好地解决了这个问题, 它结合了伪随机二相码及脉冲压缩雷达信号的优点. 首先, 它具有大的时宽带宽积, 因此具有较高的速度、距离分辨力和测量精度; 其次, 它是脉冲压缩信号, 因此可以充分利用发射设备的平均功率, 提高目标的发现能力; 最后它又是伪随机信号, 因此具有很好的电子抗干扰能力, 所以这种信号是一种优良的雷达信号. 本文首先建立了间断连续波二相编码信号的数学模型, 并在此数学模型的基础上推导了间断连续波二相编码信号的平均模糊函数, 然后我们采用了一种特殊的二元序列——MAC序列对间断连续波雷达信号进行调相, 最后给出了对该信号性能的计算机仿真结果.

2 间断连续波二相编码雷达信号的数学模型

设矩形子脉冲可表示为:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

则周期性相参脉冲串为:

$$u_1(t) = \sum_{m=0}^{N-1} u(t - mT_r) \quad (2)$$

式中: T ——单元子脉冲宽度; T_r ——脉冲重复周期; N ——脉冲重复总数

随机多相码连续波信号的复包络表达式为:

$$b_1(t) = a(t) \exp[j\theta(t)] \quad (3)$$

其中 $\theta(t)$ 为相位调制函数. 对二元随机序列调相, $\theta(t)$ 仅取 0 或 π , 且取 0 或 π 的概率各为 0.5 , 子码持续时间为 T_p . 为方便, 记 $x(t) = \exp[j\theta(t)]$, 则 $x(t)$ 为二元随机序列, 幅值为 ± 1 的概率各为 0.5 , 设一个子码为:

$$v(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

经过编码后连续波信号为:

$$b_1(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} v(t - nT_p) x(t), & 0 \leq t < NT_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

则由式(2)和(5)得到随机二相码脉冲多普勒雷达信号的表达式, 并对其归一化为:

$$\begin{aligned} b(t) &= kb_1(t) u_1(t) \\ &= \frac{1}{\sqrt{NPT_p}} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{P-1} u(t - mT_r) v(t - nT_p) x(t) \end{aligned} \quad (6)$$

从图 1(a)至图 1(c)反映出这种信号的组合过程.

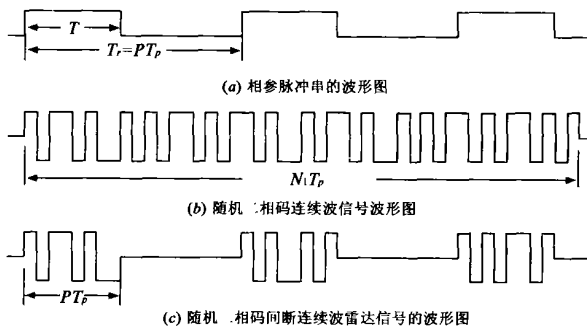


图 1 随机二相间断连续波雷达信号的组合过程

3 间断连续波二相编码信号的平均模糊函数

我们假设:

$$E[x(t)] = 0 \quad (7)$$

$$E[x(t_1)x(t_2)] = \begin{cases} 1, & t_1, t_2 \text{ 在同一子脉冲区间} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$E[x(t_1)x(t_2)x(t_3)x(t_4)] = \begin{cases} 1, & t_1, t_2, t_3, t_4 \text{ 在同一子脉冲} \\ & \text{区或其中任两点在一区间,} \\ & \text{而另外两点同在另一区间} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

则由 Cooper 关于随机信号的平均模糊函数定义:

$$A(\tau, \varphi) = E \left[\left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t - \tau) e^{2\pi i \varphi t} dt \right|^2 \right] \quad (10)$$

将表达式代入上式可得:

$$A(\tau, \varphi) = \frac{1}{(NP)^2} \sum_{g_1=0}^{N-1} \sum_{k_1=M_{g_1}}^{M+P-1} \sum_{g_2=0}^{N-1} \sum_{k_2=M_{g_2}}^{M+P-1} \sum_{g_3=0}^{N-1} \sum_{k_3=M_{g_3}}^{M+P-1} \sum_{g_4=0}^{N-1} \sum_{k_4=M_{g_4}}^{M+P-1} \left\{ \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} E[x(t_1)x(t_2-\tau)x(t_2)x(t_2-\pi)] \cdot y(t_1, t_2) \cdot e^{2\pi i \varphi(t_2-t_1)} dt_1 dt_2 \right\} \quad (11)$$

其中: $y(t_1, t_2) = v(t_1 - k_1 T_p) \cdot v(t_1 - \tau - k_2 T_p) \cdot v(t_2 - k_3 T_p) \cdot v(t_2 - \tau - k_4 T_p)$

为了分析方便,我们将 τ 分解,即令 $\tau = (M \cdot a + b) T_p + \tau_1$, 考虑到 $A(\tau, \varphi)$ 的对称性,我们只讨论 $\tau \geq 0$ 的情况,即 $a \geq 0$, 且当 $a = 0$ 时 b, τ_1 均不取负值;另外由定义式(10)可见,要使 $A(\tau, \varphi) \neq 0$,即要求 $u(t) \cdot u^*(t - \tau) \neq 0$, 所以由 $u(t)$ 表达式知, τ 取值范围应满足: $0 \leq a \leq N-1, -(P-1) \leq b \leq (P-1), -T_p \leq \tau_1 \leq T_p$ 其中 b 与 τ_1 取同号且当 $a = 0$ 时, $\tau_1 \geq 0$.

在以上分析的基础上,对式(11)积分和,推导结果为:

$$A(\tau, \varphi) = \begin{cases} (1 - \frac{|\tau_1|}{T_p})^2 Sa^2[\pi \varphi (T_p - |\tau_1|)] \cdot \frac{Sa^2(\pi \varphi P T_p)}{Sa^2(\pi \varphi T_p)} \cdot \frac{Sa^2(\pi \varphi N M P T_p)}{Sa^2(\pi \varphi M T_p)} + \frac{P-1}{NP^2} (\frac{\tau_1}{T_p})^2 Sa^2(\pi \varphi \tau_1), & \text{当 } a = b = 0, 0 \leq |\tau_1| \leq T_p \text{ 时} \\ \frac{N-|a|}{N^2} \cdot \frac{P-|b|}{P^2} (1 - \frac{|\tau_1|}{T_p})^2 Sa^2[\pi \varphi (T_p - |\tau_1|)] + \frac{N-|a|}{N^2} \cdot \frac{P-|b|-1}{P^2} \cdot \left(\frac{\tau_1}{T_p}\right)^2 Sa^2(\pi \varphi \tau_1), & \text{当 } |a| \leq N-1, |b| \leq M-1, |\tau_1| \leq T_p, (a \neq 0 \text{ 时}, b \neq 0) \text{ 时} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\tau = (M \cdot a + b) T_p + \tau_1$

4 MAC 序列对间断连续波雷达信号调相

二相编码雷达信号通常使用二元伪随机序列对高频脉冲进行相位调制,而二相编码雷达信号的许多特性也都是由二元伪随机序列引起的,所以伪随机序列的选择对雷达信号性能的影响是至关重要的,目前常用的伪随机序列有巴克序列和 m 序列,但二者的序列长度都受到了一定的限制,巴克序列数目不多,目前只找到几种,最长的才 13 位;由 n 级反馈移存器产生的 m 序列,其最长周期等于 $2^n - 1$,这些序列长度的限制都影响了它们的应用,这里我们引入一种任意长度的理想相关峰值二元序列——MAC 序列,由 MAC 序列调相的雷达信号不仅易于实现,而且具有较好的测距测速性能以及抗干扰能力。

4.1 MAC 序列生成算法

为产生一个长度为 l 的 MAC 序列,首先要确定一个 MAC 素数 P , P 满足 $l/3 < P < l$, 同时选择 $u, v, u + v = l - P$, 然后,应用二次剩余算法,产生核心序列 $\{a_n; 0 \leq n \leq P-1\}$, 最后,截取核心序列末尾的 u 个元素和前端的 v 个元素分别作为 u 扩展序列和 v 扩展序列,再将 u 扩展序列和 v 扩展序列分别放在核心序列的前端和末尾,这样就形成了长度为 l 的 MAC 序列。

4.2 MAC 序列的相关特性

核心序列的循环自相关函数表示如下:

$$R(n) = \sum_{k=0}^{p-1} a_k a_{k+n} \quad (13)$$

并且有如下性质:核心序列的循环自相关值是二元值,表示为

$$R(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ -1/p, & n = 1, 2, \dots, p-1 \end{cases} \quad (14)$$

MAC 序列和它的核心序列的互相关函数表示如下:

$$C(n) = \sum_{k=0}^{p-1} a_k b_{k+n}, \quad 0 \leq n \leq u+v \quad (15)$$

并且 $C(n)$ 满足:

$$C(n) = \begin{cases} 1, & n = u \\ -1/p, & 0 \leq n \leq u+v, n \neq u \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可以看出,互相关函数在峰值点的两边都是 $-1/p$, 而且左右两边平坦区长度随 u, v 变化而变化。

当选取 $u = 2, p = 19, v = 3$ 时,就可以得到如图 2 所示的自相关特性和互相关特性。

4.3 间断连续波雷达信号波形设计

从上面的分析,我们知道了间断连续波二相编码雷达信号具有较高的速度和距离分辨力,低峰值功率等优点,是一种良好的低截获概率雷达信号。综合 MAC 伪随机码的优点,我们设计的雷达信号是一种用 MAC 伪随机码进行 $(0, \pi)$ 调相的间断连续波信号。

首先,我们对间断连续波信号的参数进行设定, (1) 子脉冲宽度 $T_p = 0.2 \mu s$; (2) 脉冲重复周期 $T_r = 1 ms$, 则 $M = T_r / T_p = 5000$; (3) 占空比 $P/M = 0.2$, 则 $P = 1000$; (4) $N = 25$, 相干积

累时间为 25ms.

其次,我们对 MAC 序列的参数进行设定,对于固定长度的 MAC 序列(这里我们取 1000 位), p, u, v 取值的不同可以产生数量庞大的 MAC 序列,在雷达信号设计中,MAC 序列的 p, u, v 的选择要考虑实际应用,一般要求 u, v 足够小,这样就能形成比较尖的相关尖峰,有利于在噪声中检测信号.通过分析比较了等长的各种 MAC 序列的相关函数,我们选定了 $p = 991, u = 5, v = 4$ 的 1000 位长 MAC 伪随机序列.

5 性能仿真分析

我们对以上所设计的间断连续波二相编码雷达信号的性能进行了计算机仿真,图 3, 4, 5 分别给出了使用 MATLAB 绘制的信号的平均模糊函数图、距离模糊函数图、速度模糊函数图.

由图 3 及式(12),可以看出具有尖锐的主峰,呈“图钉状”,所以这种信号具有良好的距离和速度分辨力以及测量精度,但速度轴上存在少数旁瓣.

由图 4 可见,其距离模糊函数图只有尖锐的主峰而没有旁瓣,距离轴上是无模糊的,其主瓣宽度 $Td = 0.2 \mu s$,可见其距离分辨力为 $\Delta R = \frac{1}{2} C \times Td = 30m$,距离分辨力较高.

而在速度模糊函数图中,由于周期脉冲串的相互作用而发生波瓣分裂,主瓣变窄(约为 40Hz),速度分辨力得到提高,但同时也在少数点附近出现速度模糊,决定这些模糊点电平高低的因素是间断连续波信号的占空比,占空比的提高可以有效的降低旁瓣电平,减弱或消除速度模糊的影响.图 6 中,我们仿真了旁瓣电平随占空比变化的曲线图,由图可见,随着占空比的逐步提高,旁瓣电平近似呈直线下降.

6 结论

从上面的仿真分析结果,我们可以看出,该间断连续波雷达信号利用了 MAC 序列良好的相关性和灵活性,易于产生,具有类似“图钉”形的平均模糊函数,可实现距离、速度无模糊,隐蔽性好,在地对地导弹系统中作为引信信号,选择适当的脉冲占空比以及脉内字码个数、脉冲重复周期,即可得到较高的主副瓣比,又可抗强地杂波的干扰,因此是一种性能优异的雷达信号.

参考文献:

- [1] Kaveh M, Cooper G R. Average ambiguity function for a randomly staggered pulse sequence[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1976, 12(3): 410-413.
- [2] Liu Guosui, Gu Hong. The present and the future of random signal radars[J]. IEEE Aerospace and Electronics System Magazine, 1997, 12(10): 35-40.
- [3] McGillern C D, Cooper G T. An experimental random signal radar[A].

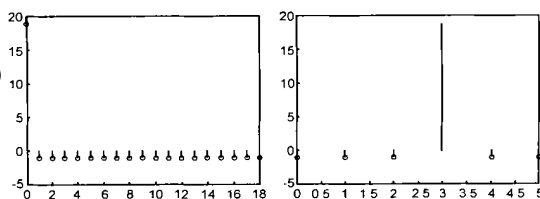


图 2 MAC 序列的相关特性

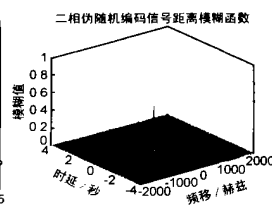


图 3 三维平均模糊函数图

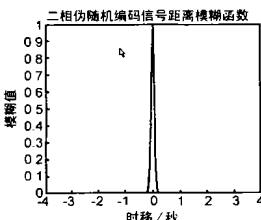


图 4 距离平均模糊函数

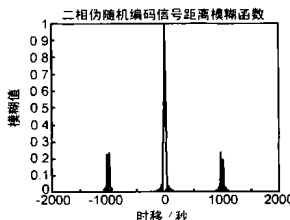


图 5 速度平均模糊函数

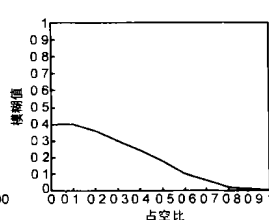


图 6 旁瓣电平随占空比变化曲线

Proc Nat Electron Conference[C]. USA: IPNEC, 1967, 409-411.

- [4] Srinivasan R. Distributed radar detection theory[J]. IEEE Proc, 1986, 133(2): 55-60.
- [5] M Modares Hashemi, M M Nayebi, H Alavi. Performance evaluation of the phase coded signal in LPD radars[A]. IEEE Military Communications Conference[C]. Atlantic City, NJ, USA: MILCOM '99, 1999, 796-800.
- [6] F Pérez, M Burgos, A Asensio. Group delay effects on the performance of wideband CWLFM radars[J]. IEEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(2): 95-100.
- [7] J Sanmartin, M Burgos, F Pérez. Radar sensor using low probability of interception SS-FH signals[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2000, 15(4): 23-28.
- [8] S E Hamran, D T Gjessing, J Hjeltnad, E Aarholt. Ground penetrating synthetic pulse radar: dynamic range and modes of operation[J]. The Journal of Applied Geophysics, 1995, 33(1): 7-14.

作者简介:



杨立扬 男, 1979 年出生于合肥市, 南京邮电学院计算机科学与技术系计算机专业硕士研究生, 目前研究方向为计算机在通信和信号中的应用.



王汝传 男, 1943 年出生于合肥市, 南京邮电学院计算机科学与技术系教授, 博导, 目前研究方向为计算机在通信和信号中的应用. Email: wangrc@njupt.edu.cn