

MAC 序列码雷达信号设计¹

张登银 王汝传 王绍棣

(南京邮电学院计算机系 南京 210003)

摘要: 该文对采用 MAC 序列码设计雷达信号的理论及方法作了系统研究, 理论分析及实例仿真表明: MAC 序列是具有理想相关特性和抗遮挡能力的二元序列, 可以设计出具有无模糊测距、测速性能良好并且易于工程实现的低截获概率雷达信号。

关键词: MAC 序列, 低截获概率, 脉冲压缩

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1634-07

Design of MAC-Sequence-Coded Radar Signal

Zhang Deng-yin Wang Ru-chuan Wang Shao-di

(Dept. of Comp. Sci. & Tech., Nanjing Univ. of Posts and Telecom., Nanjing 210003, China)

Abstract The theory and method of designing radar signal with MAC-sequence-code are systematically studied in this paper. Both theoretic analysis and simulation results show that MAC-sequence is a binary sequence with ideal correlation property and ability of anti-shelter effect. MAC-sequence-coded radar signal is a practical signal with good LPI feature and can be used to measure the distance and velocity unambiguously.

Key words MAC-sequence, LPI, Pulse compression

1 引言

在天、空、地一体化的现代战争环境下, 雷达面临着电子干扰、隐身、反辐射导弹和低空突防四大威胁。最佳的雷达信号要求具有理想的图钉形模糊函数, 不仅要有高的测距、测速精度和好的速度、距离分辨力, 而且要有波形捷变能力。准连续波 (Quasi-continuous wave) 雷达信号结合了伪随机二相码及脉冲压缩雷达信号的优点^[1-5]: 一方面, 通过脉冲压缩 (Pulse compression) 可以充分利用发射设备的平均功率, 提高目标的发现能力; 另一方面, 利用伪随机信号可以增强抗电子干扰能力。准连续波雷达由于具有大的时宽带宽积, 能够同时满足测距、测速精度和分辨力要求。

本文对准连续波雷达信号的设计和 MAC (Multimode Arbitrary Code) 序列的相关性质进行了系统研究, 给出一个采用 MAC 序列码设计雷达信号的实例。MAC 序列是具有理想相关特性和抗遮挡能力的伪随机二元序列, 长度不受限制而且易于产生, 其模糊函数类似图钉形。采用 MAC 序列设计雷达, 可以根据具体应用灵活选取波形参数, 满足信号对最大作用距离、多普勒容限以及占空比等性能的要求。MAC 序列码雷达信号易于工程实现, 并且具有低截获概率 (Low Probability of Intercept, LPI) 特性。

2 信号模型

设周期性相参脉冲串为

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

¹ 2002-11-27 收到, 2003-05-27 改回

国家“863”计划基金资助项目 (2002AA712034)

式中 $u(t)$ 是宽度为 T , 周期为 T_r 的矩形脉冲, N 为该脉冲的观察数. 随机多项码连续波信号复包络表达式为

$$b_1(t) = v(t) \exp\{j\theta(t)\} \quad (2)$$

其中 $\theta(t)$ 为相位调制函数. 对于随机二相编码, $\theta(t)$ 取值为 0 或 π , 且概率各为 0.5. 记 $x(t) = \exp\{j\theta(t)\}$, 则 $x(t)$ 是取值为 ± 1 的 i.i.d 序列. 设子脉冲函数:

$$v(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_P \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

T_P 为码元宽度, 且 $T_r = MT_P$, $T = PT_P$ (M, P 为正整数, $M > P$). 经编码后的连续波信号为

$$b_1(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_1-1} v(t - nT_P)x(t), & 0 \leq t < NT_r \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $N_1 = NM$. 由 (1) 和 (4) 式得到随机二相码脉冲多普勒雷达信号表达式:

$$b(t) = kb_1(t)u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{NPT_P}} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{P-1} u(t - mT_r)v(t - nT_P)x(t) \quad (5)$$

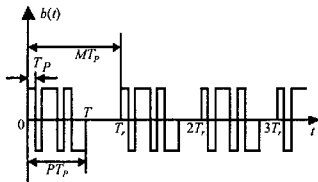


图 1 随机二相码 PD 雷达信号模型

k 为归一化系数. 当占空比 P/M 达到一定值时, 称之为准连续波, 信号模型如图 1 所示.

由 Cooper 的平均模糊函数定义^[6]:

$$A(t, \varphi) = E \left[\left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t - \tau)e^{2\pi\varphi t} dt \right|^2 \right] \quad (6)$$

可得该二元脉冲雷达信号的平均模糊函数:

$$A(\tau, \varphi) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|\tau_1|}{T_P} \right)^2 \text{Sa}^2[\pi\varphi(T_P - |\tau_1|)] \frac{\text{Sa}^2(\pi\varphi PT_P)}{\text{Sa}^2(\pi\varphi T_P)} \frac{\text{Sa}^2(\pi\varphi NMT_P)}{\text{Sa}^2(\pi\varphi MT_P)} \\ \quad + \frac{P-1}{NP^2} \left(\frac{\tau_1}{T_P} \right)^2 \text{Sa}^2(\pi\varphi\tau_1), & a = b = 0, \quad 0 \leq |\tau_1| \leq T_P \\ \frac{N - |a|P - |b|}{N^2} \frac{P^2}{P^2} \left(1 - \frac{|\tau_1|}{T_P} \right)^2 \text{Sa}^2[\pi\varphi(T_P - |\tau_1|)] \\ \quad + \frac{N - |a|P - |b| - 1}{N^2} \frac{P^2}{P^2} \left(\frac{\tau_1}{T_P} \right)^2 \text{Sa}^2(\pi\varphi\tau_1), \\ \quad |a| \leq N - 1, \quad |b| \leq M - 1, \quad |\tau_1| \leq T_P, \quad a = 0, \quad b \neq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\text{Sa}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$, $\tau = (Ma + b)T_P + \tau_1$ 为整数. 该模糊函数在多普勒轴上存在副瓣, 大小主要由占空比决定, 占空比越大, 副瓣越小. 当 $\tau = 0, \varphi = 0$ 时, $A(\tau, \varphi) = 1$, 近区副瓣峰值为

$(P-1)/(NP^2)$ 。因此,主副瓣比为 $(NP^2)/(P-1)$,与单元脉冲中的编码个数和观察脉冲数成正比。

3 MAC 序列

长度为 l 的 MAC 序列的生成算法是:首先确定一个 MAC 素数 W , $l/3 < W < l$,应用二次剩余算法产生核心序列 $\{a_n; 0 \leq n \leq W-1\}$;然后,截取核心序列末尾 u 个元素和开始 v 个元素,分别作为 u 扩展序列和 v 扩展序列, $u+v=l-W$;最后,将 u 扩展序列和 v 扩展序列分别加到核心序列的前端和末尾,这样就形成长为 l 的 MAC 序列。

3.1 相关特性

MAC 核心序列的循环自相关函数:

$$R(n) = \sum_{k=0}^{W-1} x_k x_{k+n} \quad (8)$$

它有以下性质:核心序列的循环自相关值是二值性,可表示为

$$R(n) = \begin{cases} W, & n = 0 \\ -1, & n = 1, 2, \dots, W-1 \end{cases} \quad (9)$$

MAC 序列和它的核心序列之间的互相关函数:

$$C(n) = \sum_{k=0}^{W-1} x_k y_{k+n}, \quad 0 \leq n \leq u+v \quad (10)$$

满足

$$C(n) = \begin{cases} W, & n = u \\ -1, & 0 \leq n \leq u+v, \quad n \neq u \end{cases} \quad (11)$$

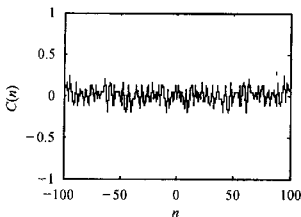


图2 不同参数 MAC 序列互相关

MAC 序列具有良好的自相关特性和互相关特性。图2显示了两个长为100但参数不同 ($W=97, u=2, v=1; W=67, u=15, v=18$) 的 MAC 序列之间的互相关特性,这两个 MAC 序列之间的互相关波形比较平稳,相关值较低,而且没有尖锐的峰值,两序列之间相互影响程度较小,因此,MAC 序列是一种抗干扰性能比较好的码形。

3.2 波形捷变

对于固定长度的 MAC 序列,随着 W, u, v 参数的取值不同,可以有很多种不同的组合。利用 MAC 序列抗干扰性能,可将不同的 MAC 序列作为同一波形库中的编码序列,通过不断更改编码序列提高抗截获性,同时避免影响雷达检测目标的性能。MAC 序列能够生成编码序列丰富的波形库,提供良好的波形捷变能力。

例如,对于码长为1000的 MAC 序列,取核心素数 $W=997$ 时, u, v 的取值有2种 ($u=2, v=1; u=1, v=2$),取 $W=991$ 时, u, v 的取值有7种,以此类推。图3比较了几种不同的 W, u, v 值时 MAC 序列的相关函数。研究发现: W 值越大 (u, v 值越小),它的旁瓣就越低,MAC 序列的相关性质越好。因此波形库中应尽量避免使用 W 值相对较小的 MAC 序列。

3.3 抗遮挡效应

在准连续波雷达中,应用周期性的 MAC 序列 $x(t)$ 对连续信号进行 $[0, \pi]$ 之间的相位调制。准连续波雷达中采用收发隔离机制,即接收和发射分时进行。由于接收的时间间隔有限,可能接收不到完整周期的伪码序列,因此必将损失一部分能量,导致系统发现目标的能力有所降低,

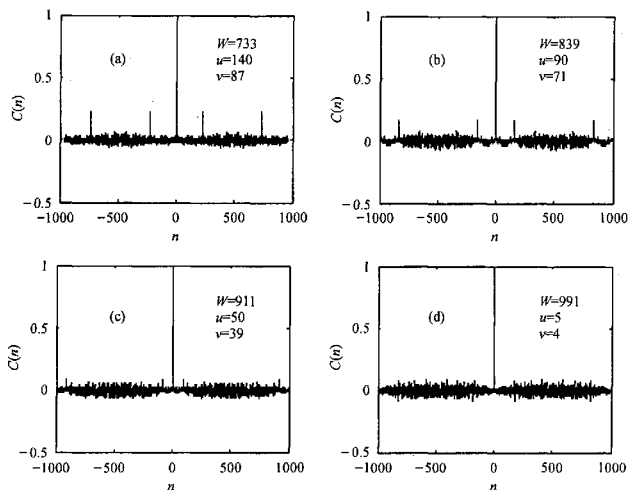


图 3 不同参数的 MAC 序列的相关函数

这就是所谓遮挡效应。MAC 序列码准连续波雷达,可以利用 W, u, v 值的不同改变峰值的大小和位置。对于固定长度的 MAC 序列,一般要求 u, v 足够小,以便形成比较尖的相关尖峰,有利于在噪声中检测到目标;对于残缺的回波信号,通过调整 u, v 的大小,相关器也能得到良好的相关峰值。

图 4 比较了当多普勒频移为 5kHz 时,采用 31 位 m 序列和采用 31 位 MAC 序列受到遮挡后的相关结果。由图可见,MAC 序列的相关包络更加接近于包含多普勒频率信息的正弦包络,抗遮挡特性比 m 序列好。

综上所述,MAC 序列具有良好的自相关特性,长度任意而且容易产生。特别是,对于相同长度的 MAC 序列,不同的 W, u, v 值,可以形成不同的 MAC 序列,其峰值大小和位置也不一样。在准连续波雷达信号设计中,MAC 序列有着广泛而又灵活的应用。

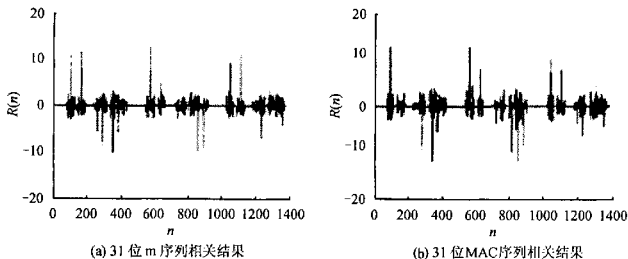


图4

4 信号设计

准连续波二相编码雷达信号具有较高的速度和距离分辨力、峰值功率低等优点,是一种比较好的低截获概率雷达信号。综合 MAC 伪随机码的优点,我们采用 MAC 序列码进行 $(0, \pi)$ 调相设计雷达信号。

4.1 波形设计

(1) 码元宽度 随机二相编码雷达的码元宽度 T_P 取决于雷达的距离分辨率 ΔR , 即

$$\Delta R = cT_P/2 \quad (12)$$

式中 c 为光速。假设距离分辨率要求达到 30m, 则 $T_P = 0.2\mu\text{s}$ 。

(2) 单元脉冲周期 随机二相编码雷达的单元脉冲周期 T_r 取决于雷达的最大作用距离 R_{\max} , 即

$$R_{\max} = cT_r/2 \quad (13)$$

假设最大作用距离要求达到 150km, 则 $T_r = 1\text{ms}$ 。于是, $M = T_r/T_P = 5000$, 即每个单元脉冲周期长度为 5000 个码元宽度。

(3) 单元脉冲宽度 随机二相编码雷达的单元脉冲宽度 T 一方面取决于雷达的多普勒容限 $f_{d\max}$, 即

$$f_{d\max} = 1/(2T) \quad (14)$$

另一方面, 由于 $T = PT_P$, T 的取值又与主副瓣峰比直接相关, 既要提高主副瓣峰比又要达到一定的多普勒容限, 必须根据具体应用环境综合考虑。取 $P = 1000$ 时, 占空比为 $P/M = 0.2$, 多普勒容限 $f_{d\max} = 2.5\text{kHz}$ 。

(4) 观察脉冲数 随机二相编码雷达的观察脉冲数 N 取决于雷达的相干积累时间 t_A , 即

$$t_A = NT_r \quad (15)$$

取 $N=25$ 时, 相干积累时间为 25ms。

(5) 信号处理增益 间断连续波雷达信号处理采用零中频 I, Q 双通路全数字信号处理,

$$G_{\max} \approx 10\lg(NP) \approx 44\text{dB} \quad (16)$$

用 MAC 伪随机序列进行 $[0, \pi]$ 二相调制的间断连续波雷达信号的等效时宽为

$$\alpha = \sqrt{2}Nt_r = 35.35\text{ms} \quad (17)$$

等效带宽为

$$\beta = \sqrt{2}/T_p = 7.071\text{MHz} \quad (18)$$

该雷达信号时宽带宽积为 $\alpha\beta = 2.5 \times 10^5$, 具有很好的低截获特性。把上述各参数代入 (7) 式得到波形的模糊函数, 如图 5 所示。该模糊函数近似为图钉状, 主副瓣比达到 44dB。沿距离轴 τ 的第一个零点为 $0.2\mu\text{s}$, 旁瓣比较低; 沿速度轴 φ 的第一个零点为 0.04kHz , 具有较高的速度分辨力。

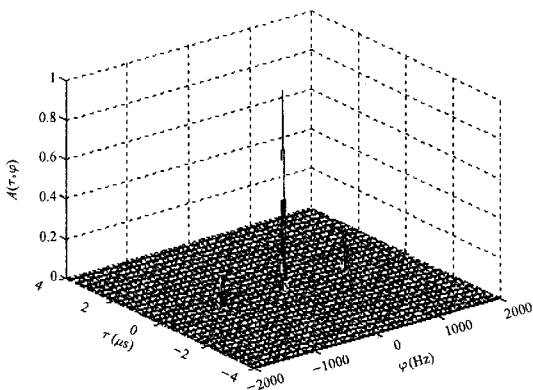


图 5 MAC 序列码雷达信号模糊函数

该模糊函数具有尖锐的主峰, 可使雷达系统同时具有良好的距离和速度分辨力以及测量精度。多普勒轴上出现旁瓣, 说明该信号在某些多普勒频率下存在速度模糊。该旁瓣的峰值主要由占空比决定。理论计算和计算机仿真表明, 当占空比及观察脉冲数等参数选择恰当时, 可以基本消除速度模糊。根据所测目标的多普勒频率动态范围选择合适的波形参数, 可以满足雷达的测速测距要求。

4.2 参数选择

4.2.1 最大作用距离与多普勒容限 当信号存在一定的频差时, 匹配滤波器能否正常工作取决于信号的多普勒容限。为了保证目标检测性能, 必须尽量增加多普勒容限。在占空比一定的情况下 ($Q=0.2$), 通过对信号参数的优化, 例如取 $P=300$, $M=1500$, $N=83$, 距离分辨率仍为 30m , 时宽带宽积为 2.49×10^5 , 多普勒容限可以达到 8.3kHz , 但是最大作用距离则下降为 45km , 模糊函数在多普勒轴上存在比原来高的周期性峰值。因此增加多普勒容限是以牺牲最大作用距离等参数为代价的。如果用于地面目标, 仍然不失为一种较好的低截获概率雷达信号。在不同占空比情况下, 最大作用距离和多普勒容限的关系如图 6 所示。最大作用距离随着多普勒容限的增大而下降, 并且占空比越大, 下降得越多。

4.2.2 最大作用距离与占空比 为了抑制副瓣峰值, 必须尽量增加占空比。在多普勒频率一定的情况下 ($f_{d\max}=0.2\text{kHz}$), 通过对信号参数的优化, 例如取 $P=100$, $M=2500$, $N=50$, 距离分辨率仍为 30m , 时宽带宽积为 2.5×10^5 , 占空比可以达到 0.4 。此时模糊函数在多普勒轴上没有很高的周期性峰值, 但是最大作用距离则下降为 75km 。为了得到高占空比的信号, 是以牺牲多普勒容限和最大作用距离等参数为代价的。对于特定的应用环境来说, 仍不失为一种较好的低截获概率雷达信号。在不同多普勒频移时, 最大作用距离和占空比的关系如图 7 所示。最大作用距离随着占空比的增加而下降, 多普勒频移越大, 下降得越多。

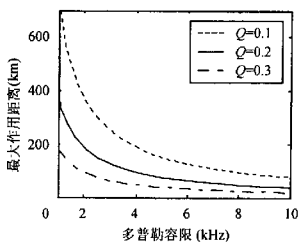


图 6 最大作用距离与多普勒容限关系

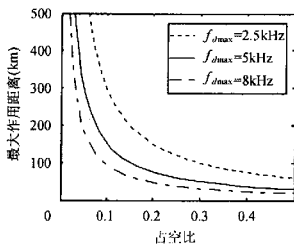


图 7 最大作用距离与占空比关系

5 结论

我们在研究准连续波雷达信号设计过程中,专门开发了 MAC 序列生成器以及基于 MATLAB 的雷达信号仿真平台。理论分析和仿真结果表明:MAC 序列具有良好的相关性和随机性,长度不限且易于生成,可以构建码字丰富的波形库,具有波形捷变能力和抗遮挡特性。它所产生的雷达信号,模糊函数类似图钉形,具有较大的时宽带宽积和较高的主副瓣比。本文设计的 MAC 序列码雷达信号,既解决了连续波雷达信号收发隔离,同时又降低了脉冲雷达信号的截获因子,是一种性能良好并易于工程实现的低截获概率雷达信号。

参 考 文 献

- [1] Modarres-Hashemi M, Nayebi M M. The effect of code distribution and parameters on the LPD feature of phase-code radar signals. *The Journal of Scientia-Iranica*, 2002, 9(4): 297-304.
- [2] Modarres-Hashemi M, Nayebi M M, Alavi H. Performance evaluation of the phase-coded signal in LPD radars. *IEEE Military Communications Conference, MILCOM-99, Atlantic City, NJ, USA*, 1999: 796-800.
- [3] Pérez F, Burgos M, Asensio A. Group delay effects on the performance of wideband CWLFM radars. *IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(2): 95-100.
- [4] Sanmartin J, Burgos M, Pérez F. Radar sensor using low probability of interception SS-FH signals. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, 15(4): 23-28.
- [5] Hamran S E, Gjessing D T, Hjeltnstad J, Aarholt E. Ground penetrating synthetic pulse radar: Dynamic range and modes of operation. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(1): 7-14.
- [6] Kaveh M, Cooper G R. Average ambiguity function for a randomly staggered pulse sequence. *IEEE Trans. on AES*, 1976, 12(3): 410-413.

张登银: 男, 1964 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为信号与信息处理、宽带无线 IP 技术。
 王汝传: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机软件、计算机图形和信息处理。
 王绍隼: 男, 1942 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、计算机应用。