doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2013.01.017

# 基于 MAC 序列的抗回波遮挡准连续波雷达波形设计\*

曾维贵1,\*\*\*,朱平云1,孙迎丰1,崔连华2

(1. 海军航空工程学院 科研部,山东 烟台 264001;2. 解放军 91619 部队,河北 秦皇岛 066000)

摘 要:为了解决相位编码准连续波雷达的回波遮挡问题,首先引入遮挡率函数和遮挡情况下的回波 主旁瓣比定量分析回波遮挡。在此基础上提出一种基于 MAC(Multimode Arbitrary Code)序列的长短脉 冲结合的波形设计方法,并给出了基于此方法的波形设计实例和相应的仿真分析。仿真结果表明该波 形设计方法能够有效解决相位编码准连续波雷达的回波遮挡问题,实现远近目标的同时探测。 关键词:低截获概率;准连续波雷达;相位编码;回波遮挡;MAC 序列;波形设计 中图分类号:TN958.94 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2013)01-0082-06

# A Quai-CW Radar Waveform Design Based on Multimode Arbitrary Code Sequence to Avoid Echo Eclipse

ZENG Wei-gui<sup>1</sup>, ZHU Ping-yun<sup>1</sup>, SUN Ying-feng<sup>1</sup>, CUI Lian-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 91619 of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: In order to solve the echo eclipse problem in phase-coded quasi-continuous wave(quasi-CW) radar, the echo eclipse is quantitatively analyzed by using echo eclipse ratio function and main lobe to side lobe ratio. On this base, a phase-coded waveform design method based on multimode arbitrary code(MAC) sequence and long-short pulse width is proposed, and an example of quasi-CW radar signal design based on this method is presented and simulated. Simulation results show that the echo eclipse problem is effectively solved as well as the whole range target can be detected simultaneously.

**Key words**: low probability of interception(LPI); quasi-CW radar; phase-coded; echo eclipse; MAC sequence; waveform design

# 1 引 言

随着电子战技术的飞速发展,针对雷达的侦察、 截获和干扰变得日益繁多和有效,这种复杂的对抗 环境使雷达面临着越来越严峻的生存挑战。低截获 概率(LPI)雷达是一种能够较好适应这种复杂对抗 环境的雷达系统。目前,LPI 雷达大多采用连续波 体制和准连续波体制<sup>[1-2]</sup>。其中,连续波雷达具有 诸如测速精度高、外形尺寸小、机动性强等优良的性 能,但是却存在比较严重的发射信号泄露问题。准 连续波雷达则既具有连续波雷达低截获概率特性又 具有脉冲雷达收发时间隔离的优点<sup>[3-4]</sup>。虽然准连 续波雷达可以较好地解决收发隔离问题,但由于雷 达发射信号期间接收系统关闭的原因,某些距离段 (特别是近距离段)内的目标回波不能完全进入雷达 接收机,原本具有良好自相关性能的目标回波被截 断,这样就导致了脉冲压缩处理后的目标回波主旁 瓣比严重下降,进而影响雷达检测性能;情况严重 时,甚至有可能导致雷达无法检测目标<sup>[5]</sup>。这就需

 <sup>\*</sup> 收稿日期:2012 - 08 - 17;修回日期:2012 - 10 - 22 Received date:2012 - 08 - 17; Revised date:2012 - 10 - 22 基金项目:武器装备预研基金资助项目(9140A01010411JB1401)
 Fundation Item: Weapon Equipment Pre-research Fund(9140A01010411JB1401)

<sup>\*</sup> 通讯作者:13863896992@139.com Corresponding author:13863896992@139.com

第1期

要对准连续波雷达波形进行综合优化,以减少高占 空比带来的回波遮挡和保证雷达在全距离段内都具 有良好的探测性能。目前,解决准连续波雷达的回 波遮挡问题的文献大多数都集中在对雷达发射信号 的相位编码类型进行优化设计以提高遮挡情况下目 标回波的主瓣旁瓣比,而从雷达目标探测的角度对 雷达波形和编码类型进行综合优化设计的文献几乎 没有。文献[6]提出了基于最佳码和 Gold 码的复合 码调制脉冲波形,以降低距离遮挡概率。文献[7]针 对准连续波体制的多相码雷达信号进行设计,以优 化其在距离遮挡时的主旁瓣比性能,提高准连续波 体制雷达的探测性能。为了提高雷达发射信号的抗 遮挡性能和实现远近目标的同时探测,本文从波形 设计与码型选择两个方面综合考虑,提出一种基于 MAC(Multimode Arbitrary Code)序列的长短脉冲相结 合的准连续波雷达波形设计方法。

# 2 相位编码准连续波回波遮挡

相位编码准连续波信号属于大时宽信号,信号 占空比接近 50%。而高占空比会带来某些距离上 的回波被遮挡(部分或全部),遮挡情况如图1所示。



☎ 1 相位细鸣催建续波评制菌还四波遮挡示意图 Fig.1 Schematic diagram of echo eclipse in phase-coded quasi-CW radar system

假设光速为 c,二进制相位编码序列为  $\{c_m\}$ ,  $m = 0, 1, 2, \cdots, N - 1$ ,序列长度为 N,子码宽度为  $t_p$ ,脉冲重复周期为  $T_r$ 。由于天线收发共用的原因,相位编码准连续波雷达发射信号时接收通道关闭,这样会导致某些距离段上的回波无法进入接收机。根据目标距离远近不同,回波可以分为 3 种情况。

(1)目标距离  $R < \frac{cNt_p}{2}$ 

回波信号的前部被截断,称为前遮挡回波,进入 雷达接收机的信号只是完整信号的后部分,如图 1 中的回波1所示。

(2)目标距离
$$\frac{cNt_p}{2} \leq R < \frac{c(T_r - Nt_p)}{2}$$
  
回波信号全部被接收,如图 1 中的回波 2 所示。  
(3)目标距离 $\frac{c(T_r - Nt_p)}{2} < R < \frac{cT_r}{2}$ 

(3)日标距离—<u>2</u><*K*<<u>2</u> 回波信号的后部被截断,称为后遮挡回波,进入 雷达接收机的信号只是完整信号的前部分,如图 1

# 2.1 回波遮挡率函数

中的回波3所示。

相位编码准连续波雷达回波被遮挡的程度可以 通过回波遮挡率函数来描述。设发射脉冲为 $x_T$ (t),发射二相编码信号时, $x_T(t) = 1$ ;否则, $x_T(t) =$ 0。信号采样波门 $x_R(t)$ 为发射脉冲的反码, $x_R(t)$ =  $1 - x_T(t)$ 。回波遮挡函数 $g(\tau)$ 可以表示为

$$g(\tau) = \frac{1}{T_r} \int_{0}^{T_r} x_T(t-\tau) (1-x_R(t)) dt \qquad (1)$$

式中, $\tau$  为回波延迟。当 $\tau = 0$ 时,g(0) = 1,目标回 波信号完全被遮挡;当 $\tau \neq 0$ 时,回波信号部分被遮 挡, $0 < g(\tau) < 1$ ;当 $g(\tau) = 0$ 时,目标回波信号无遮 挡,为理想情况。 $g(\tau)$ 越大,回波遮挡的程度越严 重,进入雷达接收机的回波能量就越少。

# 2.2 遮挡情况下的回波主旁瓣比

由于存在回波遮挡的情况,对被遮挡的回波进 行脉压的过程是一种部分相关过程<sup>[8]</sup>。这样会导致 脉压后的信号主瓣衰减和旁瓣抬高,我们定义主瓣 峰值旁瓣电平(Peak Side Lobe Level, PSL)、积分旁瓣 电平(Integrated Side Lobe Level, ISL)来衡量遮挡情况 下回波脉压输出信号的主旁瓣比。其中,

$$PSL = 10 \lg \frac{\max(\chi_m^2)}{\chi_0^2}$$
(2)

$$ISL = 10 \lg \frac{\sum \chi_m^2}{\chi_0^2}$$
(3)

式中, $\chi_0$ 为脉压输出主瓣值; $\chi_m$ (-N+1 $\leq m \leq N$ -1, $m \neq 0$ )为第 m 个旁瓣值。PSL、ISL 的绝对值越小,表明脉压信号的主旁瓣比越低,回波信号的遮挡情况越严重。

我们对码长为1 023的 m 序列二相编码信号进 行仿真分析。假设雷达发射信号的占空比为 50%, 目标回波出现在 $\frac{ckt_p}{2}(1 \le k \le 2P - 1)$ 处,当  $1 \le k \le$ 1 022时,目标回波前部被截断;当 k = 1 023时,目标 回波无遮挡;当1 024 $\le k \le 2$  045时,目标回波后部被 截断,脉压信号的主瓣、最高旁瓣、PSL 仿真结果如 图 2 所示。其中,图 2(a)表示脉压后的主瓣幅度随 目标位置 k 的变化,图 2(b)表示脉压后最高旁瓣幅 度随目标位置 k 的变化,图 2(c)表示脉压后 PSL 随 目标位置 k 的变化。



图 2 1 023 位 m 序列二相编码回波信号脉冲压缩性能仿真 Fig.2 The pulse compression performance simulation of eclipsed echoes for 1023-element m sequence code

从图 2(c)我们可以看出,脉压输出信号的主旁 瓣比随遮挡率的增大而迅速降低。当遮挡比较严重 时,由于参与相关的子码个数太少,主旁瓣比过低, 强目标旁瓣不仅会造成大量虚警,而且会影响弱目 标的检测。

## 3 基于 MAC 序列的抗遮挡波形设计方法

一般而言,雷达往往搜索近距离目标同时也要 兼顾远距离目标的探测,但是由于存在严重的回波 遮挡,长二相编码雷达信号探测近距离目标和远距 离目标时性能严重下降。为了解决这种问题,国外 一些雷达专家曾经提出了"与距离匹配"的信号设计 方法<sup>[9-10]</sup>。这种方法可以概述为:首先,将雷达的 探测范围合理地划分为几个距离段,并设计相应的 "匹配"雷达信号。当探测近距离目标时,发射旁瓣 性能优良的短二相编码信号,短码信号不存在严重 的距离遮挡问题,虽然信号总能量小,但用于探测近 距离目标是可取的;当探测远距离目标时,发射长二 相编码信号,长码信号能量大,作用距离远,当只用 于探测远距离目标时也不会造成严重的距离遮挡。 应用此方法可以较好地解决相位编码准连续波雷达 的回波遮挡问题,但应用这种方法需要采用两种不

· 84 ·

同的相位编码类型,增加了雷达发射信号硬件实现的难度。同时,雷达需要频繁切换工作模式来实现远近目标的探测,这限制了雷达对机动性较强目标的探测。

在此,本文参考"与距离匹配"的信号设计方法, 从波形设计和码型选择两个方面综合优化,解决准 连续波雷达的回波遮挡问题并实现全距离段目标同 时探测。

#### 3.1 波形设计

根据实际应用情况,将雷达的探测距离划分为 几个距离段,并在一个重复周期 T 内依次发射与这 些距离段匹配的二相编码信号,这些信号有着不同 的脉冲宽度并与对应的距离段匹配。各个距离段内 的目标回波分别接收和脉压,然后再将脉压后的结 果综合以实现全距离段的目标探测。同时,为了降 低雷达系统的复杂性,雷达的距离段划分不能太多, 一般设置为远距、中距、近距3个不同探测距离段。 设这3种距离段的作用距离范围分别为[*R*<sub>1</sub>,*R*<sub>2</sub>]、 [*R*<sub>2</sub>,*R*<sub>3</sub>]、[*R*<sub>3</sub>,*R*<sub>4</sub>],设计的雷达波形如图3所示。



Fig.3 The waveform design based on long-short pulse width for quasi-CW radar

由图可知,在重复周期 T内,雷达依次发射波 形1、波形2和波形3,分别用于探测近距、中距和远 距的目标。为了避免距离段内的回波遮挡,这3种 发射波形的参数应满足以下条件:

$$\begin{cases} T_{w1} \leq \frac{2R_{1}}{c} \\ T_{1} - T_{w1} \geq \frac{2R_{2}}{c} \\ T_{w2} \leq \frac{2R_{2}}{c} \\ T_{2} - T_{w2} \geq \frac{2R_{3}}{c} \\ T_{w3} \leq \frac{2R_{3}}{c} \\ T_{3} - T_{w3} \geq \frac{2R_{4}}{c} \end{cases}$$
(4)

简化后得到

$$\begin{cases} \frac{2R_2}{c(1-\eta_1)} \leqslant T_1 \leqslant \frac{2R_1}{c\eta_1} \\ \frac{2R_3}{c(1-\eta_2)} \leqslant T_2 \leqslant \frac{2R_2}{c\eta_2} \\ \frac{2R_4}{c(1-\eta_3)} \leqslant T_3 \leqslant \frac{2R_3}{c\eta_3} \end{cases}$$
(5)

其中, $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 分别是3种发射信号的占空比,且都小于50%。 $\eta_1 = T_{w1}/T_1, \eta_2 = T_{w2}/T_2, \eta_3 = T_{w3}/T_3$ 。

#### 3.2 码型选择

准连续波雷达通常采用二元伪随机序列对信号 进行相位调制,而相位编码准连续波雷达的许多性 质也是源于二元伪随机序列。因此,二元伪随机序 列的选择对雷达信号的性能影响是至关重要的。由 上可知,设计的波形要求用于相位编码的二元伪随 机序列长度是任意的,以适应不同的信号脉冲宽度, 并且要求序列长度的变化不影响序列的固有特性。 然而,具有这样性质的二元随机序列很少。这里我 们引入 MAC 序列对信号进行二相编码调制。MAC 序列具有良好的自相关和互相关特性且序列长度任 意,非常适合应用于本文设计的雷达波形中。我们 可以根据实际应用情况进行距离划分和设计相应脉 宽的发射信号,而无需考虑是否受限于编码序列的 长度。

(1)MAC 序列生成算法

为了产生一个长度为1的 MAC 序列,首先要确 定一个 MAC 素数 p,且 p 满足 l/3 ,同时选择<math>u < v,u + v = l - p,然后,应用二次剩余算法,产生核 心序列 $\{c_k\}$ , $0 \le k \le p - 1$ 。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 扩展序列分别放在核心序列的前段和末尾,这 样就形成了长度为 l 的 MAC 序列<sup>[11]</sup>。

(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:

$$R(n) = \sum_{k=0}^{p-1} c_k c_{k+n}$$
(6)

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

$$R(n) = \begin{cases} p, & n = 0\\ -1, & n = 1, 2, \dots p - 1 \end{cases}$$
(7)

MAC 序列和它的核心序列的互相关函数表示如下:

$$C(n) = \sum_{k=0}^{p-1} c_k b_{k+n}, 0 \le n \le u + v$$
 (8)

并且 C(n)满足:

$$C(n) = \begin{cases} p, & n = u \\ -1, & 0 \le n \le u + v \end{cases}$$
(9)

根据式(7)、(9)可以看出, MAC 序列具有良好的自相关特性和互相关特性。

此外,对于长度相同的 MAC 序列,选取不同 u、 v值,可以形成不同的 MAC 序列族,其序列间同样 具有优良互相关性能。我们可以在重复周期间采用 不同的序列进行相位调制,从而进一步提高发射信 号复杂程度,增强发射信号的抗干扰性能。

## 4 实例与仿真

为了验证本文提出的准连续波波形设计方法, 我们给出了一个相位编码准连续波雷达的波形设计 实例。此雷达为低截获对海搜索雷达,雷达的最小 无遮挡探测距离为0.470 km,最大无遮挡探测距离 23.000 km,距离分辨率为15.0 m,发射功率约为0.1 ~10 W。根据距离分辨率要求,确定发射信号的码 元宽度  $t_p = 0.1 \, \mu s$ ;雷达探测对象为海面目标,目标 多普勒频移小,可以不考虑多普勒补偿问题。设计 的雷达波形参数如表 1 所示。

表 1 相位编码准连续波雷达设计实例波形参数 Table 1 The parameters of designed radar signal for binary phase-coded quasi-CW radar

for binding phase coded quasi of rudui										
发射 信号	脉冲宽 度/µs	重复周 期/μs	距离范 围/km		编码序列 参数					
波形 1	3.1	40.0	[0.465	5.400]	u = 1, p = 29, v = 1					
波形 2	40.0	120.0	[5.400	12.000]	u = 12, p = 383, v = 5					
波形 3	80.0	233.5	[12.000	23.000]	u = 8, p = 787, v = 5					

我们从抗回波遮挡性能和波形间互相关性两个 方面对上述的雷达波形进行仿真分析以考察信号的 实际性能。

## 4.1 抗回波遮挡性能分析

由于在波形设计时充分考虑了回波遮挡问题,因 此利用上述雷达信号进行搜索跟踪目标时不存在回 波遮挡问题。与未进行优化的相位编码准连续波雷 达信号相比,设计的准连续波二相编码信号明显地改 善雷达的目标检测性能。图4显示了分别利用该雷 达信号的波形1与码长为1023的m序列相位编码雷 达信号探测近距离段目标的匹配滤波器输出。





Fig. 4 The matched filter outputs of Waveform 1 and binary phase-coded signal based on 1023-element m sequence

由图可见,采用波形1探测近距离段内的目标 (此时目标距离为465 m)时,匹配滤波器输出的最大 归一化旁瓣电平约为0.19,对目标的检测无影响。 而相比之下,采用1023位的m序列相位编码信号探 测时,匹配滤波器输出的最大旁瓣电平值则将近 0.68,这很容易导致产生虚假目标,进而影响真实目 标的检测。

## 4.2 互相关性能分析

当雷达接收机接收目标回波时,回波包含有3 种类型波形,并且这3种波形都会进入接收机。如 果3种波形具有较强的互相关,雷达接收机则无法 利用匹配滤波器选择性地接收与目标所在距离段对 应的回波信号,并很有可能导致接收机饱和。因此, 波形间的互相关性能对雷达接收机的正常工作有着 重要影响。设计的雷达信号中3种波形的互相关统 计结果如表2所示。

## 表 2 3 种波形间的互相关统计分布结果(取绝对值) Table 2 The statistical distribution of cross-correlation

results between designed waveforms									
设计信号	互相关结果取绝对值后的数值分布								
间的互相关	0 ~ 30	$31 \sim 60$	$61 \sim 90$	> 90	最大值				
p = 29 & p = 383	799	0	0	0	15				
p = 383 & p = 787	1 543	56	1	0	68				
p = 29 & p = 787	1 559	0	0	0	17				

从表2可以看出,99.94%的互相关绝对值都小

于 60,仅有一个绝对值大于 60(波形 2 与波形 3 之间的互相关值)。因此,可以明显地看出 3 种信号互相关性极弱,依次发射和同时接收这 3 种波形信号 不会产生互相的干扰。

# 5 结 论

本文提出的基于 MAC 序列的长短脉冲相结合的相位编码准连续波雷达波形设计方法,较好地解决了准连续波雷达的回波遮挡问题,并保证了雷达远近目标同时探测时的检测性能,相对只考虑雷达发射信号的相位编码类型优化的方法而言,该方法更具实用价值。设计实例和仿真分析表明利用该方法设计的准连续波雷达发射信号具有良好的抗回波遮挡性能,同时由于波形间的互相关相对较弱,依次发射和同时接收这些波形不会产生相互干扰,在整个探测距离内雷达都具有良好的目标检测性能。

## 参考文献:

- [1] Stove A G, Hume A L, Baker C J. low probability of intercept radar strategies [J]. IEE Proceedings of Radar Sonar Navigation, 2004, 151(5):249 – 260.
- [2] 张锡熊. 低截获概率(LPI)雷达的发展[J]. 现代雷达, 2003,25(12):1-4.
   ZHANG Xi-xiong. Development of LPI radar[J]. Modern Radar,2003,25(12):1-4.(in Chinese)
- [3] Khan R H, Mitchel D K. Waveform analysis for high frequency FMICW radar[J]. IEE Processing-F, 1991, 138(5): 411-419.
- [4] 顾红,李玺,尚卫华,等. 解决连续波雷达泄露的一种 新途径——周期方波断续法[J]. 电子学报, 1998, 26 (12):7-11.
  GU Hong, LI Xi, SHANG Wei-hua, et al. A new approach of periodic square-wave interruption to solution of the leakage of CW radar[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(12):7-11. (in Chinese)
- [5] 高梅国,田黎育.长二相码准连续波雷达信号脉压及 多目标影响[J].系统工程与电子技术,2004,26(2): 163-166.

GAO Mei-guo, TIAN Li-yu. Radar signal processing for long phase-coded pseudocontinue waveforms [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26 (2): 163 – 166. (in Chinese)

- [6] 袁伟明. 一种新的准连续波雷达波形设计方法研究
  [J]. 现代雷达, 2007, 29(9):16-19.
  YUAN Wei-ming. Study on the design method of a novel quasi-CW radar Waveform [J]. Modern Radar, 2007, 29 (9):16-19. (in Chinese)
- [7] 王海青,张劲东,李彧晟,等. 准连续波雷达的抗距离
   遮挡波形优化[J].数据采集与处理,2011,26(5):531
   535.

· 86 ·

WANG Hai-qing, ZHANG Jin-dong, LI Yu-sheng, et al. Antirange eclipse waveform optimization method for quasi-CW radar[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2011,26 (5):531-535. (in Chinese)

- [8] Baden J M, Cohen L R. Optimal peak side lobe filters for biphase pulse compression[C] //Proceedings of IEEE International Radar Conference. New York, USA: IEEE, 1990: 249 - 252.
- [9] Scala B L, Rezaeian M, Moran B. Optimal adaptive waveform selection for target detection [C]//Processdings of 8th International Conference on Information Fusion Parkville. Victoria, Australia; IEEE, 2005;492 – 496.
- [10] Niu R, Willett P, Bar-Shalom Y. Tracking considerations in selection of radar waveform for range and range-rate measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2):467 – 487.
- [11] 杨立扬,王汝传,张登银,等. 基于 MAC 序列的间断连 续波雷达信号的研究[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 994-996.

YANG Li-yang, WANG Ru-chuan, ZHANG Deng-yin, et al. Research on quasi continuous wave radar signal based on MAC sequence[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 994 – 996. (in Chinese)

## 作者简介:



曾维贵(1984—),男,江西萍乡人,博士 研究生,主要研究方向为雷达波形设计与信 号处理;

ZENG Wei-gui was born in Pingxiang, Jiangxi Province, in 1984. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns radar waveform design and signal processing.

Email: 13863896992@139.com

朱平云(1964—),男,江苏扬州人,教授、博士生导师,主 要研究方向为导弹突防与对抗;

ZHU Ping – yun was born in Yangzhou, Jiangsu Province, in 1964. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns missile penetration and defence.

**孙迎丰**(1983—),男,湖南益阳人,博士研究生,主要研 究方向为雷达系统仿真;

SUN Ying-feng was born in Yiyang, Hunan Province, in 1983. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research direction is radar systems simulation.

**崔连华**(1980—),男,湖北荆门人,工程师,主要研究方向为雷达系统设计。

CUI Lian-hua was born in Jingmen, Hubei Province, in 1980. He is now an engineer. His research direction is radar systems design.