

半主动激光制导武器的伪随机编码

邱雄*, 刘志国, 王仕成

火箭军工程大学研究生院, 陕西 西安 710025

摘要 通过分析半主动激光制导武器特性对激光脉冲间隔编码方法的编码间隔取值要求, 研究线性反馈移位寄存器(LFSR)调制码、LFSR 状态码的生成原理以及两种码型脉冲间隔的取值范围与产生方法对系统制导性能与抗干扰性能的影响。仿真结果表明, LFSR 调制码不利于精确制导, 且易被以最小脉冲间隔为周期的精确频率码干扰; LFSR 状态码能够克服 LFSR 调制码的缺陷, 但仍存在所需识别参数少和抗干扰性不强的问题。提出基于矩阵求余的伪随机码, 利用矩阵代替线性反馈移位寄存器和模二加法器, 结果表明, 其抗干扰性能比 LFSR 状态码更好。

关键词 激光器; 伪随机码; 脉冲间隔编码; 线性移位寄存器; 抗干扰性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801008

Pseudo-Random Coding of Semi-Active Laser-Guided Weapon

Qiu Xiong, Liu Zhiguo, Wang Shicheng

Rocket Army Engineering University Graduate School of PLA, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract The requirements of precision guidance characteristics of a semi-active laser-guided weapon on the laser-coded pulse interval ΔT_i were analyzed herein based on the pulse interval coding method. The generation principles of (the linear-feedback shift register) (LFSR) modulation code and the LFSR status code were studied and simulated. The guidance and anti-interference performances were studied based on the value range and generation method of the pulse interval ΔT_i of two codes. This study reports that the LFSR modulation code is not conducive to accurate guidance and is susceptible to accurate frequency code interference with a minimum pulse interval ΔT_{\min} . The LFSR status code overcomes the problem of poor precision guidance characteristics of the LFSR modulation code, and of being susceptible to accurate frequency code interference with the ΔT_{\min} period; however, the problems that the required identification parameters are few and the anti-interference is not strong still remain. This study uses a matrix to complete the register state transition, instead of the LFSR and the function of the modulo-2 adder, based on finding the coding with a high guidance performance and a strong anti-interference performance. A pseudo-random code based on the matrix remainder is proposed and applied. The theoretical analysis shows that the anti-interference performance of the pseudo-random code is better than that of the LFSR status code.

Key words lasers; pseudo random code; pulse interval coding; linear shift register; anti-interference

OCIS codes 140.3460; 230.0040; 250.0040; 280.3420

1 引 言

目前,半主动激光制导武器已成为现代战争的主要打击手段之一,制导精度高且抗干扰性能强是该武器决胜于战场的关键,而激光编码是制导脉冲信号调制和抗干扰的重要手段,研究激光编码至关重要。

激光编码主要有精确频率码、脉冲调制码、变间

隔码、等差型码以及伪随机码等^[1]。除伪随机码外,其他码型均具有较强的规律性,易被识别。文献[2-3]根据伪随机码各个脉冲间隔均为最小周期倍数的规律,提出通过两两脉冲间隔比值的方法,寻找最小周期后形成精确频率码进行有效干扰;文献[4-8]提出基于线性反馈移位寄存器和混沌系统的伪随机序列生成方法以及基于时间控制脉冲间隔的激光编码产生方法等;文献[9-11]介绍了激光编码在工程上

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-04-08; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61673017,61673386)

* E-mail: 757327440@qq.com

的实际应用;定义根据线性移位寄存器输出值“0,1”确定是否发射脉冲的码型为 LFSR 调制码,其存在最小周期,易被精确频率码干扰,不适用于武器系统;定义线性反馈移位寄存器各状态产生的伪随机码为 LFSR 状态码,其脉冲间隔不存在最小周期,故不能通过简单方法进行干扰。

为深入研究激光编码的精确制导性能与抗干扰性能,进而寻找一种精确制导性能高且抗干扰性能强的伪随机码,本文从脉冲间隔编码方法出发,分析半主动激光制导武器精确制导条件下的编码脉冲间隔有效范围;重点研究 LFSR 调制码和 LFSR 状态码的产生原理、精确制导性能及抗干扰性能;最后,利用矩阵实现寄存器状态变换,代替线性反馈移位寄存器和模二加法器的功能,提出矩阵求余的伪随机码。该码能够克服 LFSR 调制码存在最小周期且 LFSR 状态码识别参数少的缺点,抗干扰效果更佳。

2 半主动制导武器的激光编码

2.1 脉冲间隔编码的实现

在半主动激光武器制导过程中,若目标激光器发射第 i 个脉冲与第 $i+1$ 个脉冲的间隔时间(脉冲间隔)为 ΔT_i ,设脉冲间隔编码序列为 ΔT ,则有

$$\Delta T = (\Delta T_i | i = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

$$\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

式中: ΔT_b 为固定时间间隔; ΔT_v 为脉冲间隔增量; i 为脉冲间隔的序号; k_i 为脉冲间隔对应的参数, $k_i \in N(1 \leq i \leq m)$, N 为整数; m 为脉冲间隔的个数。通常情况下, ΔT_b 、 ΔT_v 为固定值,所以 ΔT_i 和 k_i 存在一一映射关系,通过改变 k_i 值可以获得不同的脉冲间隔 ΔT_i ,但 k_i 为十进制计数,而计算机采用二进制计数,在转换过程中需将十进制数转换为二进制数。

假设 $k_i(1 \leq i \leq m)$ 中最大元素为 $\max(k_i) \leq 2^s - 1$,则 k_i 与其对应的 s 位二进制码为 $X_i = (x_{is} \dots x_{ii} \dots x_{i2} x_{i1})_2$,即

$$\begin{cases} k_1 \rightarrow X_1 = (x_{1s} \dots x_{1j} \dots x_{12} x_{11})_2 \\ \vdots \\ k_i \rightarrow X_i = (x_{is} \dots x_{ij} \dots x_{i2} x_{i1})_2 \\ \vdots \\ k_m \rightarrow X_m = (x_{ms} \dots x_{mj} \dots x_{m2} x_{m1})_2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: s 为二进制码的位数。上述过程实现了将二进制码转换成脉冲间隔编码。

2.2 脉冲间隔编码的有效性

若脉冲间隔 ΔT_i 过大,就会导致导引头在长时

间内接收不到激光信号,进而影响制导精度,因此, ΔT_i 的取值范围应满足半主动激光武器的精确制导需求。

假设目标激光器发射脉冲频率的最大值为 $f_{\max} = 20$ Hz,导引头在高精度制导情况下,接收制导脉冲频率的最小值为 $f_{\min} = 4$ Hz,则 ΔT_i 应满足 $\frac{1}{f_{\max}} \leq \Delta T_i \leq \frac{1}{f_{\min}}$,即 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$ 。但当 ΔT_i 均满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$ 时, ΔT_i 取值个数是否能达到少重复或者不重复,需进一步分析。

若制导过程中导引头判定两个不同激光脉冲的最小差异 $\delta = 1 \mu\text{s}$,则脉冲间隔编码中变量 k_i 可取的最大个数 $N_{k_{\max}}$ 为

$$N_{k_{\max}} = \frac{\frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_{\max}}}{\delta} = \frac{\frac{1}{4} - \frac{1}{20}}{10^{-6}} = 200000. \quad (4)$$

通常情况下,半主动激光制导武器全程制导所需的激光脉冲数约数百个,所以脉冲间隔编码完全可以实现全程制导中 ΔT_i 不重复。

精确频率码、变间隔码、等差型码、脉冲调制码易被敌方识别编码规律,而伪随机码可以在一次全程制导过程中周期不重复,比其他码型具有更强的抗干扰性。

3 LFSR 调制码

3.1 理论分析

伪随机码一般基于线性反馈移位寄存器产生。根据线性反馈移位寄存器输出的“0,1”序列确定是否发射激光,若输出“1”,则发射脉冲;若输出“0”,则不发射脉冲,定义该方法产生的伪随机码为 LFSR 调制码。假设线性反馈移位寄存器的级数为 n ,反馈系数为 c_1, c_2, \dots, c_n ,线性反馈移位寄存器的状态变换在时钟脉冲驱动下每次右移一位,并将第 1 位的状态输出,第 n 位的状态通过模二加法器反馈得到,其工作原理如图 1 所示。

图 1 中, $a_{r+1}, a_{r+2}, \dots, a_{r+n}$ 表示线性反馈移位寄存器的当前状态, r 表示线性移位寄存器的第 r

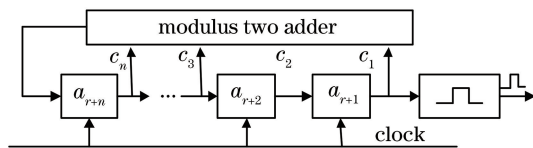


图 1 伪随机码脉冲序列产生原理

Fig. 1 Generation principle of pseudo random code pulse sequence

个状态; c_1, c_2, \dots, c_n 为反馈系数, $c_j = 1, c_j = 0$ 分别表示线性反馈移位寄存器第 j 位参与和不参与反馈。若 $c_1 = 0$, 则 n 级线性反馈移位寄存器将变为 $n-1$ 级, 因此理论上 $c_1 = 1$ 。线性反馈移位寄存器的输出序列不仅与反馈系数有关, 还与初始状态有关, 若初始状态 a_1, a_2, \dots, a_n 全为 0 时, 则输出一个全 0 序列; 若初始状态不全为 0, 则会输出一个周期不大于 $2^n - 1$ 的周期序列。

某一时刻的线性反馈移位寄存器状态为 $a^{r+1} = (a_{r+1}, a_{r+2}, \dots, a_{r+n})$, 则下一时刻寄存器状态为 $a^{r+2} = (a_{r+2}, a_{r+3}, \dots, a_{r+1+n})$, 其中

$$a_{r+1+n} = c_1 a_{r+1} \oplus c_2 a_{r+2} \oplus \dots \oplus c_n a_{r+n}, \quad (5)$$

式中: $c_j = 0$ 或 1; \oplus 表示“异或”。

LFSR 调制码根据线性反馈移位寄存器输出为“0”或“1”来确定是否发射脉冲, 假设脉冲时钟驱动频率为 f , 即线性反馈移位寄存器连续两个“1”所产生的脉冲间隔(最小脉冲间隔 ΔT_{\min})为 $\frac{1}{f}$, 则 LFSR 调制码中脉冲间隔为

$$\Delta T_i = k \times \Delta T_{\min}, \quad (6)$$

式中: k 为伪随机编码序列中两个“1”中含有“0”的个数加 1。

3.2 仿真分析

线性反馈移位寄存器为 16 位, 反馈系数为 $(c_1 \dots c_{16}) = (1011100000101111)$, 初始状态为 $a_1 \dots a_{16} = 1010010110011001$, 时钟脉冲驱动器频率为 $f = 13 \text{ Hz}$, 即 $\Delta T_{\min} = 76.92 \text{ ms}$, 制导过程中两个脉冲间隔为 $\Delta T_i = k \times \Delta T_{\min}$ 。利用 MATLAB 软件仿真 LFSR 调制码的脉冲间隔序列, 结果如图 2 所示。

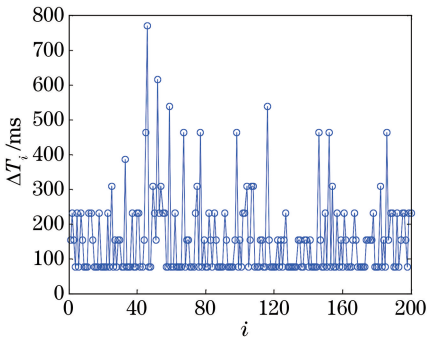


图 2 LFSR 调制码

Fig. 2 LFSR modulation code

由图 2 可知, 在半主动全程制导过程中, LFSR 调制码可以实现激光编码周期不重复。脉冲间隔编码产生过程中含有多个 0 的可能, 进而导致 $\Delta T_i >$

250 ms, 不利于高精度制导; 同时, 由于 LFSR 调制码存在最小脉冲间隔, 所以其抗干扰性能差。

3.3 抗干扰性能

LFSR 调制码中脉冲间隔产生方式如(6)式所示, 所以采用以 ΔT_{\min} 为周期的精确频率码可以对 LFSR 调制码进行有效干扰。在 LFSR 调制码下, 采集有限个脉冲间隔序列查找 ΔT_{\min} , 并以 ΔT_{\min} 为周期生成精确频率码可以实施有效干扰。其具体过程如下:

第一步, 记录 $m_1 + 1$ 个激光脉冲时刻, 得到脉冲间隔序列 $\Delta T = (\Delta T_1 \Delta T_2 \dots \Delta T_{m_1})$;

第二步, 在 ΔT 中寻找最小元素 ΔT_x , 将 ΔT 中所有元素依次与 ΔT_x 作商, 即 $R_l = \frac{\Delta T_l}{\Delta T_x} (l = 1, 2, \dots, m_1)$, 若 R_l 均为整数, 则认为 ΔT_x 为最小脉冲间隔 ΔT_{\min} , 若 R_l 存在分数, 则利用所有分数的最大公约数与 ΔT_x 做积得到 $\Delta T'_x$, $\Delta T'_x$ 即为最小脉冲间隔 ΔT_{\min} 。通常情况下, ΔT_x 即为 ΔT_{\min} 。

第三步, 以某个激光脉冲时刻为基准, 以 ΔT_{\min} 为周期生成精确频率码, 即可进行有效干扰。

3.4 抗干扰性仿真

第一步: 设置 16 级线性反馈移位寄存器初始状态为 $a_1 \dots a_{16} = 1010010110011001$, 反馈系数为 $(c_1 \dots c_{16}) = (1011100000101111)$, 时钟脉冲驱动器频率为 $f = 13 \text{ Hz}$, 利用 MATLAB 软件仿真 LFSR 调制码的脉冲间隔序列, 结果如图 3 所示。

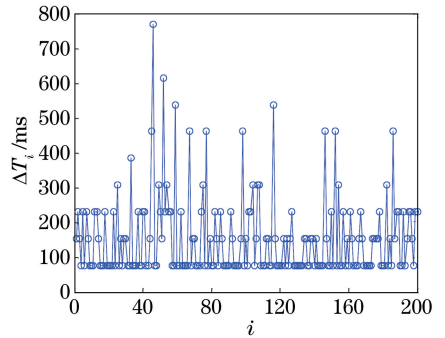


图 3 LFSR 调制码脉冲间隔序列

Fig. 3 LFSR modulation code pulse interval sequence

第二步: 连续采集 40 个脉冲间隔, 组成序列 $\Delta T = (\Delta T_1 \Delta T_2 \dots \Delta T_{40})$, 采集第一步产生的第 31~70 个脉冲间隔, 结果如图 4 所示。按照 3.3 节第二步的方法, 编程计算得到最小脉冲间隔为 $\Delta T_{\min} = 76.92 \text{ ms}$, 符合 $\Delta T_{\min} = \frac{1}{f}$ 。

第三步: 以某个激光脉冲时刻为基准, 以最小脉

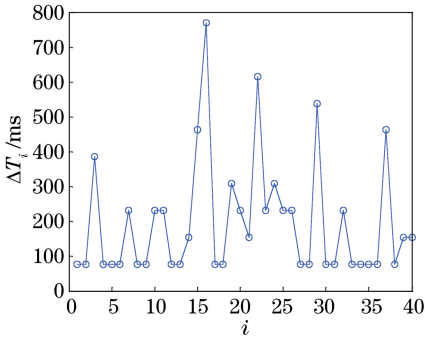


图 4 采集的 LFSR 调制码中的 40 个脉冲间隔

Fig. 4 Collected 40 pulse intervals in LFSR modulation code
 脉冲间隔 ΔT_{\min} 为周期生成精确频率码(如图 5 所示),从而实施有效干扰。

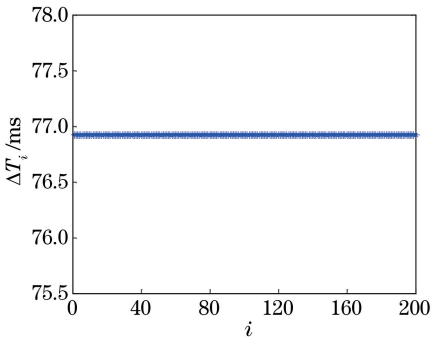


图 5 以最小脉冲间隔为周期的精确频率码

Fig. 5 Precise frequency code with minimum pulse interval as period

LFSR 调制码中 ΔT_i 均为最小脉冲间隔 ΔT_{\min} 的整数倍,所以按照 LFSR 调制码产生制导脉冲的时刻,干扰激光器以 ΔT_{\min} 为周期可以在相同时刻产生激光脉冲信号,进而实现有效干扰。但 LFSR 调制码有两个缺点:一是 ΔT_i 不完全满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$,不利于导引头精确制导;二是 ΔT_i 为 ΔT_{\min} 的整数倍,可以通过以 ΔT_{\min} 为周期的精确频率码进行有效干扰。

4 LFSR 状态码

4.1 理论分析

LFSR 调制码存在缺点的原因是其编码脉冲间隔通过 $\Delta T_i = k \times \Delta T_{\min}$ 形成。脉冲间隔编码方法为 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v$ 时,变量 k_i 根据线性移位寄存器的当前状态生成,即 $k_i = (a^i)_{2 \rightarrow 10}$ 表示将线性移位寄存器第 i 个状态组成的二进制数转换为十进制数,定义该伪随机码为 LFSR 状态码,其产生原理为

$$\begin{cases} \Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v \\ k_i = (a^i)_{2 \rightarrow 10} \end{cases} \quad (7)$$

分析可知,LFSR 状态码型脉冲间隔 ΔT_i 与 ΔT_{\min} 不是倍数关系,不能被以 ΔT_{\min} 为周期的精确频率码有效干扰;同时 ΔT_v 仅需满足不小于 δ (导引头判定两个不同激光脉冲的最小差异),因此, ΔT_v 取值合适时,完全可以满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$ 。

4.2 实验仿真

假设线性移位寄存器级数为 $n = 16$,初始状态为 $a_1 \cdots a_{16} = 1010010110011001$,线性反馈参数为 $(c_1 \cdots c_{16}) = (1011100000101111)$, $\Delta T_b = 70 \text{ ms}$, $\Delta T_v = 2.5 \mu\text{s}$,Matlab 软件的仿真结果如图 6 所示。

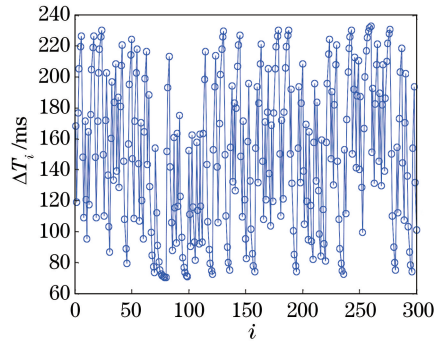


图 6 LFSR 状态码

Fig. 6 LFSR status code

如图 6 所示,LFSR 状态码的 ΔT_i 均满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$,因此可以实现精确制导;同时其克服了 LFSR 调制码中 ΔT_i 为 ΔT_{\min} 整数倍的缺点,能够完全避免敌方通过以 ΔT_{\min} 为周期的精确频率码的干扰。

4.3 抗干扰性

在 LFSR 状态码中,脉冲间隔为 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v$, $k_i = (a^i)_{2 \rightarrow 10}$,若敌方已知线性移位寄存器级数 n 、固定时间间隔 ΔT_b 、脉冲间隔增量 ΔT_v ,则可通过获取有限个 ΔT_i 对 LFSR 状态码进行识别。下文以识别采用 n 级线性反馈移位寄存器生成的 LFSR 状态码为例,分析如下:

第一步,记录各脉冲时刻,获取 m_2 ($m_2 > n$) 个脉冲间隔 $\Delta T_1 \cdots \Delta T_{m_2}$;

第二步,通过 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v$ 建立方程组,在已知 ΔT_b 、 ΔT_v 的情况下,获取连续的 m_2 个 $k_1 \cdots k_{m_2}$;

第三步,在已知线性反馈移位寄存器级数的情况下,通过 $k_i = (a^i)_{2 \rightarrow 10}$ 关系式,利用 $k_1 \cdots k_{m_2}$ 获得线性反馈移位寄存器的 $m_2 + n - 1$ 个连续输出,记为序列 $a_1 \cdots a_{m_2+n-1}$;

第四步,采集序列 $a_1 \cdots a_{m_2+n-1}$ 中 $2n$ 个元素,组

成序列 $a_1 \cdots a_{2n}$, 利用线性反馈移位寄存器的反馈方法 $a_{i+1+n} = c_1 a_{i+1} \oplus c_2 a_{i+2} \oplus \cdots \oplus c_n a_{i+n}$, 建立方程组

$$\begin{cases} a_{n+1} = c_1 a_1 \oplus c_2 a_2 \oplus \cdots \oplus c_n a_n \\ a_{n+2} = c_1 a_2 \oplus c_2 a_3 \oplus \cdots \oplus c_n a_{n+1} \\ \vdots \\ a_{2n} = c_1 a_n \oplus c_2 a_{n+1} \oplus \cdots \oplus c_n a_{2n-1} \end{cases}, \quad (8)$$

将其转换为代数运算, 则为

$$\begin{cases} a_{n+1} = \text{mod}(c_1 a_1 + c_2 a_2 + \cdots + c_n a_n, 2) \\ a_{n+2} = \text{mod}(c_1 a_2 + c_2 a_3 + \cdots + c_n a_{n+1}, 2) \\ \vdots \\ a_{2n} = \text{mod}(c_1 a_n + c_2 a_{n+1} + \cdots + c_n a_{2n-1}, 2) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $\text{mod}()$ 表示对 2 求余。所求参数个数大于方程式个数, 但由于 $c_1 \cdots c_n$ 仅能取 0 或 1, 可通过编程进行求解。

已知线性反馈移位寄存器级数为 8 位, 通过计算可知其中一段序列为 $a_1 \cdots a_{16} = 0111101010011111$, 现求参数 $c_1 \cdots c_8$, 具体分析

表 1 8 位线性反馈移位寄存器的参数分析

Table 1 Parameter analysis of 8-bit linear feedback shift register

Status	8-bit linear shift register stored value								Abbreviation of parameters	Number with parameter 1	theoretical analysis	Abbreviation of parameters	Number with parameter 1	Theoretical analysis
	1	2	3	4	5	6	7	8						
$i+1$	1	1	1	1	1	0	0	1						
$i+2$	1	1	1	1	0	0	1	0	123458	E 1		1458	E 1	
$i+3$	1	1	1	0	0	1	0	1	12347	O 1		147	O 1	$c_4 = 1$
$i+4$	1	1	0	0	1	0	1	0	12368	E 1		168	E 1	$c_1 = 1$
$i+5$	1	0	0	1	0	1	0	1	1257	O 1	$c_3 = 0$	157	O 1	$c_6 = 0$
$i+6$	0	0	1	0	1	0	1	1	1468	O 1	$c_2 = 0$	1468	O 1	$c_5 = 1$
$i+7$	0	1	0	1	0	1	1	1	3578	O 1		578	O 1	$c_7 = 1$
$i+8$	1	0	1	0	1	1	1	1	24678	O 1		4678	O 1	$c_8 = 1$
$i+9$	0	1	0	1	1	1	1	0	135678	E 1		15678	E 1	

上述分析中, 首先按照相同参数越多进行相加的原则, 如“123458”+“12347”=“578”=“O 1”, 由于“3578”=“O 1”, 所以 $c_3 = 0$; 再比如“12347”+“12368”=“4678”=“O 1”, 由于“24678”=“O 1”, 所以 $c_2 = 0$; 得出某个参数 c_j 后, 则将 c_j 代入上一次分析所得的表中, 减少未知量, 再重复进行相同的分析。

分析可知, 通过编程方法可以求得反馈参数 $c_1 \cdots c_n$ 。因此, 当已知 ΔT_b 、 ΔT_v 及 n 时, 就可通过采集有限个脉冲间隔 $\Delta T_1 \cdots \Delta T_{m_2}$, 对 $c_1 \cdots c_n$ 进行识别。若 $n=16$, 则最少采集 17 个脉冲间隔便可识别 $c_1 \cdots c_{16}$ 。

如下:

8 位线性反馈移位寄存器的状态变换为

$$\begin{cases} a_9 = \text{mod}(c_1 a_1 + c_2 a_2 + \cdots + c_8 a_8, 2) \\ a_{10} = \text{mod}(c_1 a_2 + c_2 a_3 + \cdots + c_8 a_9, 2) \\ \vdots \\ a_{16} = \text{mod}(c_1 a_1 + c_2 a_2 + \cdots + c_8 a_{15}, 2) \end{cases}, \quad (10)$$

将序列 $a_1 \cdots a_{16}$ 带入(10)式, 则有

$$\begin{cases} 0 = \text{mod}(c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_8, 2) \\ 1 = \text{mod}(c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_7, 2) \\ \vdots \\ 0 = \text{mod}(c_1 + c_3 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8, 2) \end{cases}. \quad (11)$$

由 $0 = \text{mod}(c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_8, 2)$ 易知, 参数 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_8$ 中为 1 的个数为偶数, 将 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_8$ 记为“123458”; 当参数 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_8$ 中等于 1 的个数为偶数时, 则记为 E 1; 当参数 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_8$ 中等于 1 的个数为奇数时, 则记为 O 1。对(11)式的分析结果如表 1 所示。

5 矩阵求余的伪随机码

5.1 理论分析

为克服 LFSR 状态码中参数少的缺点, 进一步分析 LFSR 状态码, 设某一个状态为 $\vec{a}^{i+1} = (a_{i+1}, \cdots, a_{i+n})$, 则下一个状态为 $\vec{a}^{i+2} = (a_{i+2}, \cdots, a_{i+1+n})$, 其中 $a_{i+n+1} = c_1 a_{i+1} \oplus \cdots \oplus c_n a_{i+n}$ 。将其表示为代数形式, 有

$$a_{i+n+1} = \text{mod}\left(\sum_{j=1}^n c_j a_{i+j}, 2\right), \quad (12)$$

式中: j 为 n 级线性反馈移位寄存器的第 j 位。从 \vec{a}^{i+1} 转换为 \vec{a}^{i+2} 过程的矩阵表示为

$$(a_{i+2} \cdots a_{i+n+1}) = \text{mod}[(a_{i+1} \cdots a_{i+n})\mathbf{A}, 2], \quad (13)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & c_1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & c_2 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & c_3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & c_n \end{pmatrix}$ 。因此, $(a_{i+2} \cdots$

$a_{i+n+1}) = \text{mod}[(a_{i+1} \cdots a_{i+n})\mathbf{A}, 2]$ 可以代替线性反馈移位寄存器与模二加法器的功能,基于此方法,提出矩阵求余的伪随机码。

为了使矩阵求余的伪随机码 ΔT_i 仍满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$, ΔT_i 仍根据 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v$ ($k_i = (\underline{a}^i)_{2 \rightarrow 10}$) 的方式产生,而寄存器状态更换原理如图 7 所示。

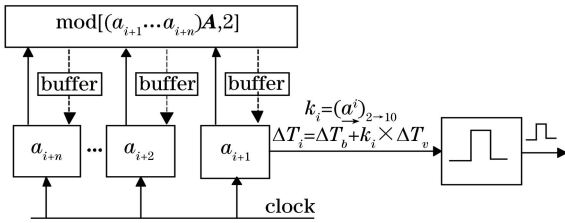


图 7 矩阵求余的伪随机码产生原理

Fig. 7 Pseudo-random code generation principle of matrix remainder

图 7 中, $a_{i+1} \cdots a_{i+n}$ 分别表示 n 级寄存器在某一时刻的状态,实线表示矩阵运算模块 $\text{mod}[(a_{i+1} \cdots a_{i+n})\mathbf{A}, 2]$ 采集寄存器当前数据,虚线表示矩阵运算模块 $\text{mod}[(a_{i+1} \cdots a_{i+n})\mathbf{A}, 2]$ 将新数据反馈给寄存器,缓冲器的作用是在每一次脉冲时刻,使得寄存器可以直接从缓冲器中读取数据,减小矩阵运算模块的解算压力。

时钟脉冲驱动器开始工作后,设寄存器在某一时刻的状态为 $a_{i+1} \cdots a_{i+n}$,按照 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v$ ($k_i = (\underline{a}^i)_{2 \rightarrow 10}$) 控制时钟脉冲驱动器下一次工作时刻,以及控制目标激光器发射下一个脉冲时刻, $\text{mod}[(a_{i+1} \cdots a_{i+n})\mathbf{A}, 2]$ 读取寄存器的数据 $a_{i+1} \cdots a_{i+n}$ 并进行实时计算,将新数据存入相应缓冲器内,当时钟脉冲驱动器下一次工作时,寄存器直接从缓冲器中读取数据并寄存,然后根据寄存器状态进行下一个循环,至此,实现了矩阵求余的伪随机码产生过程。在该过程中,为确保时钟脉冲驱动器与目标激光器的工作时序不混乱,时钟脉冲驱动器的脉冲驱动时刻应与目标激光器的激光脉冲发射时刻同步,即目标激光器与时钟脉冲驱动器相邻两次工作的时间间隔均应由寄存器当前时刻状态 $a_{i+1} \cdots a_{i+n}$ 产生的 ΔT_i 确定。

从抗干扰性能来讲,状态转换矩阵 \mathbf{A} 中的元素

可任意取值,若取 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} s_1 & r_1 & d_2 & \cdots & c_1 \\ s_2 & r_2 & d_2 & \cdots & c_2 \\ s_3 & r_3 & d_3 & \cdots & c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_n & r_n & d_n & \cdots & c_n \end{pmatrix}$, 则

所需要识别的参数变为 n^2 个,若寄存器级数 $n = 16$,则可确保敌方在导引头全程制导过程中不能识别状态转换矩阵 \mathbf{A} 中的所有参数。而当 LFSR 调制码、LFSR 状态码中线性反馈移位寄存器状态变换利用图 7 所示原理时,相当于 $\mathbf{A} =$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & c_1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & c_2 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & c_3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & c_n \end{pmatrix}, \text{参数 } c_1 \cdots c_n \text{ 取 } 0 \text{ 或 } 1, \text{ 此时}$$

\mathbf{A} 中的参数很少,仅为 n 个。由此可见,矩阵求余的伪随机码抗干扰性能明显优于 LFSR 调制码和 LFSR 状态码的抗干扰性能。

5.2 实验仿真

假设寄存器级数为 $n = 16$,初始状态为 $a_1 \cdots a_{16} = 1010010110011001$,状态转换矩阵为 $\mathbf{A} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

脉冲间隔为 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v$ ($k_i = (\underline{a}^i)_{2 \rightarrow 10}$), $\Delta T_b = 70 \text{ ms}$, $\Delta T_v = 2.5 \mu\text{s}$ ($\delta = 1 \mu\text{s}$), MATLAB 软件仿真的结果如图 8 所示。

分析图 8 结果可知,改进码型的脉冲间隔 ΔT_i 仍满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$,确保了制导武器的精确制导;同时,从抗干扰性方面来讲,状态转换矩

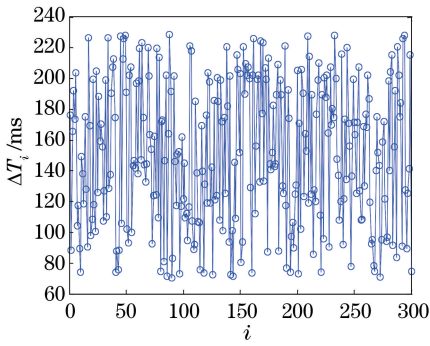


图 8 矩阵求余的伪随机码

Fig. 8 Pseudo-random code of matrix remainder

阵 \mathbf{A} 的变量增加为 n^2 个,改进码型更难被识别,其抗干扰性能比 LFSR 调制码和 LFSR 状态码更好。

6 结 论

研究了半主动激光制导武器的精确制导性能对激光编码脉冲间隔的要求。导引头在高精度制导下,当目标激光器发射脉冲频率最大值为 $f_{\max} = 20$ Hz,导引头接收制导脉冲速率最小值为 $f_{\min} = 4$ Hz时,满足 $50 \text{ ms} \leq \Delta T_i \leq 250 \text{ ms}$ 即可实现精确制导。基于脉冲间隔编码方法研究了 LFSR 调制码和 LFSR 状态码的产生原理,同时从精确制导和抗干扰性两方面对两种码型进行评价。LFSR 调制码的脉冲间隔 $\Delta T_i > 250 \text{ ms}$,不利于精确制导,同时脉冲间隔采用 $\Delta T_i = k \times \Delta T_{\min}$ 的方法生成,易被以 ΔT_{\min} 为周期的精确频率码干扰;LFSR 状态码的脉冲间隔采用 $\Delta T_i = \Delta T_b + k_i \times \Delta T_v (k_i = (a^i)_{2 \rightarrow 10})$ 方法生成, ΔT_i 可以满足精确制导的要求,且任意脉冲间隔 ΔT_i 与 ΔT_{\min} 不是倍数关系,不存在被以最小脉冲间隔为周期的精确频率码干扰,但仍存在识别参数少,易被识别编码规律的风险。

分析 LFSR 状态码产生原理后,利用矩阵求余方法代替线性反馈移位寄存器和模二加法器的功能,提出一种制导精度高且抗干扰性能强的伪随机码—矩阵求余的伪随机码。通常情况下,16 位寄存器最多可有 256 个参数需要识别,因此,导引头在一次全程制导过程中,无法通过采集有限个脉冲间隔进行解码,该码型具有比 LFSR 调制码和 LFSR 状态码更好的抗干扰性能。充分认识激光编码的内在规律,对研究武器系统中制导精度更高、抗干扰性能更强的激光编码具有借鉴意义。

参 考 文 献

[1] Wei W J, Qin S Q, Zhan D J, *et al.* Research on

laser encoding in laser semi-active homing guidance [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1199-1203.

魏文俭, 秦石乔, 战德军, 等. 激光半主动寻的制导激光编码的研究 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(12): 1199-1203.

[2] Zhou Z L, He Y Q, Zhou B, *et al.* Study on identification technique of guiding laser code information [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(6): 660-663.

周中亮, 何永强, 周冰, 等. 制导激光编码信息识别技术研究 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 660-663.

[3] Liu Z Y, Xing T X. Optical system design for laser semi-active guided seeker [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(5): 527-531.

刘智颖, 邢天祥. 激光半主动导引头光学系统设计 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(5): 527-531.

[4] Zhang X F, Fan J L. Pseudo-random sequence generating method based on LFSR and chaotic system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2289-2297.

张雪峰, 范九伦. 基于线性反馈移位寄存器和混沌系统的伪随机序列生成方法 [J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2289-2297.

[5] Miao X K, Zhao W, Zhang H W, *et al.* Research of laser encoding method based on time-controlled pulse interval [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006002.

苗锡奎, 赵威, 张恒伟, 等. 时间控制脉冲间隔激光编码方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 100600.

[6] Yao L H, Shao X D, Lu H X. Improvement of minimum period recognition algorithm of laser pseudo-random code [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012, 28(2): 9-11.

姚龙海, 邵晓东, 陆海翔. 激光伪随机编码的最小周期识别算法改进研究 [J]. *航天电子对抗*, 2012, 28(2): 9-11.

[7] Yang F, Zhang X, He Y, *et al.* Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0208001.

杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0208001.

[8] Liu S, Liu Z G, Wang S C, *et al.* Research on laser coding technology based on signal generator [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(9): 1144-1149.

刘硕, 刘志国, 王仕成, 等. 基于信号发生卡的激光编码技术研究 [J]. *激光与红外*, 2018, 48(9): 1144-1149.

[9] Li H, Liang W W, Yin R G, *et al.* Effect of disturbance and noise on laser guidance performance

- and precision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206005.
- 李慧, 梁巍巍, 殷瑞光, 等. 干扰和噪声对激光制导性能及精度的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0206005.
- [10] Zhou Y Z, Wang C, Wei T W, *et al.* Simulation research of coherent lidar based on Golay coding technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0810004.
- 周艳宗, 王冲, 魏天问, 等. 基于 Golay 脉冲编码技术的相干激光雷达仿真研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0810004.
- [11] Wang L, Hao S Q, Zhang D, *et al.* Performance of adaptive modulation coding system for atmospheric laser communication under discrete rate condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0706002.
- 王磊, 郝士琦, 张岱, 等. 离散速率条件下的大气激光通信自适应调制编码系统性能 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0706002.