

## 基于相位编码的稀布阵综合脉冲孔径雷达的 脉冲压缩性能分析<sup>1</sup>

陈伯孝 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要** 稀布阵综合脉冲孔径雷达 (SIAR) 采用多个频率信号同步全向照射工作方式, 通过脉冲综合可以获得一定的脉压比。根据其距离模糊函数知, 距离分辨率仅取决于发射信号带宽, 增大发射信号的时宽带宽积则存在距离栅瓣效应。为此本文利用相位编码调制各阵元的发射信号, 讨论其脉冲压缩性能。结果表明: 这时不仅可以大大提高脉压比, 而且可以降低距离旁瓣, 同时可以满足 SIAR 对各向同性照射的要求。从而有利于提高其作用距离和距离分辨能力。

**关键词** 稀布阵, 综合脉冲孔径雷达, 脉冲压缩, 相位编码

**中图分类号** TN958, TN911.31

### 1 引 言

稀布阵综合脉冲孔径雷达 (SIAR) 是一种新型米波分布阵体制雷达。它的主要特点之一是每个发射天线全向辐射一组正交编码频率调制的宽脉冲信号, 可确保对空间的各向同性照射, 其发射方向图是在接收端通过脉冲综合 (即时空三维匹配滤波) 而形成的。

SIAR 是一种四坐标雷达 (距离、方位、仰角和速度), 其模糊函数是四维的。根据匹配滤波理论知, 为了提高雷达的作用距离和分辨能力, 要求雷达信号具有大的时宽、带宽、能量乘积。但是, 在系统的发射和馈电设备峰值功率受限制的情况下, 大的信号能量只能靠加大信号的时宽来得到。本文从距离模糊函数出发, 分析大时宽带宽信号对距离模糊函数的影响, 讨论脉冲综合与普通相位编码脉冲压缩相结合时的脉冲压缩性能。

### 2 SIAR 的距离模糊函数

SIAR 的天线系统由均匀分布在两个圆周上的  $N_e (= 25)$  个发射天线阵元和  $N_r (= 25)$  个接收天线阵元组成, 如图 1 所示。第  $k$  个阵元辐射信号的复数形式为

$$S_{ek}(t) = \text{rect}(t) \exp(j2\pi f_k t), \quad k = 1, \dots, N_e, \quad (1)$$

其中  $\text{rect}(t) = 1/\sqrt{T_e}$ ,  $|t| \leq T_e/2$ , 否则为零;  $T_e$  为发射脉冲宽度;  $f_k$  表示第  $k$  个阵元发射信号的频率,  $f_k = f_0 + c_k \Delta f$ ,  $f_0$  为中心载频,  $\Delta f$  为发射信号之间的频率间隔,  $c_k$  为各阵元发射信号频率编码的码元,  $c_k \in \{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 12\}$ 。发射信号的总带宽  $B = N_e \Delta f$ 。由于各阵元采用异频发射方式, 因而系统的距离分辨率就仅与发射信号的总带宽有关。假定有一

<sup>1</sup> 1996-10-30 收到, 1997-03-28 定稿  
国防科技预研基金资助课题

目标  $T$ , 与阵列中心的距离为  $R_0$ , 在窄带假设 (即各阵元发射信号的包络时延可以近似相等) 条件下, 第  $l$  路接收信号的复包络为

$$x_l(t) = \text{rect}(t - \tau_0) \exp(j2\pi f_0 \tau_{rl}) \cdot \sum_{k=1}^{N_e} \exp[j2\pi c_k \Delta f (t - \tau_0)] \exp(j2\pi f_k \tau_{ek}), \quad l = 1, \dots, N_r, \quad (2)$$

其中  $\tau_0 = 2R_0/c$ ,  $c$  为光速;  $\tau_{rl}$ ,  $\tau_{ek}$  分别为目标和各阵元相对于阵中心的延时差。上式求和项中包括两个相位项, 分别与目标距离、方向有关。只有当距离和方向 (方位、仰角) 同时得到匹配时, 才能得到目标回波的时域窄脉冲。这里为分析方便, 仅以一个接收阵元为例说明问题。假定脉冲综合过程中与目标方向有关的延时  $\tau_{ek}$  得到补偿。根据模糊函数定义, SIAR 的距离模糊函数为

$$A(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_l(t) x_l^*(t + \tau) dt = \frac{\sin(N_e \cdot \pi \Delta f \tau)}{\sin(\pi \Delta f \tau)} \cdot \frac{T_e - |\tau|}{T_e} + \sum_{\substack{k, i=1 \\ k \neq i}}^{N_e} \exp[-j\pi(c_k + c_i) \Delta f \tau] \times \exp[j2\pi(f_k \tau_{ek} - f_i \tau_{ei})] \frac{\sin[\pi(c_k - c_i) \Delta f (T_e - |\tau|)]}{\pi(c_k - c_i) \Delta f \cdot T_e}, \quad |\tau| < T_e. \quad (3)$$

基于圆阵的对称性, 上式第二项近似为零。从上式第一项可看出: 当  $T_e \Delta f = 1$  时, 不存在距离栅瓣; 当  $T_e \Delta f = M > 1$  时, 在  $\Delta f \cdot |\tau| = m (m = 1, 2, \dots, M - 1)$  时出现距离栅瓣, 即

$$\tau = \pm m / \Delta f = \pm m / (M T_e), \quad (m = 1, 2, \dots, M - 1). \quad (4)$$

另外, (3) 式中因子  $[\sin(N_e \cdot \pi \Delta f \tau)] / [\sin(\pi \Delta f \tau)]$  的脉宽 (在 -4dB 处) 为  $T_1' \approx 1 / (N_e \Delta f) = 1/B$ 。在 SIAR 中, 由于  $1/B \ll T_e$ , 因此, 经脉冲综合后脉宽  $T_1 \approx T_1'$ , 则脉压比为

$$D = T_e / T_1 \approx T_e B = N_e \cdot T_e \Delta f. \quad (5)$$

从图 2 中的距离模糊图可看出,  $T_e \Delta f$  越大, 主瓣越窄, 但存在距离栅瓣。为了克服栅瓣效应, 本文仅讨论由  $P$  个紧连着的子脉冲组成的相位编码信号在 SIAR 中的应用。

### 3 SIAR 基于相位编码的脉冲压缩性能

伪随机编码信号的模糊函数大多呈近似图钉型。为了提高脉冲压缩比, 通常采用伪随机序列对发射信号进行相位编码。这里以二相编码信号 ( $m$ -序列) 为例进行计算。

当采用相位编码时, 第  $k$  个阵元辐射信号为

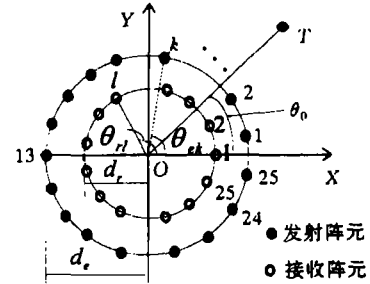


图 1 SIAR 天线阵元分布图

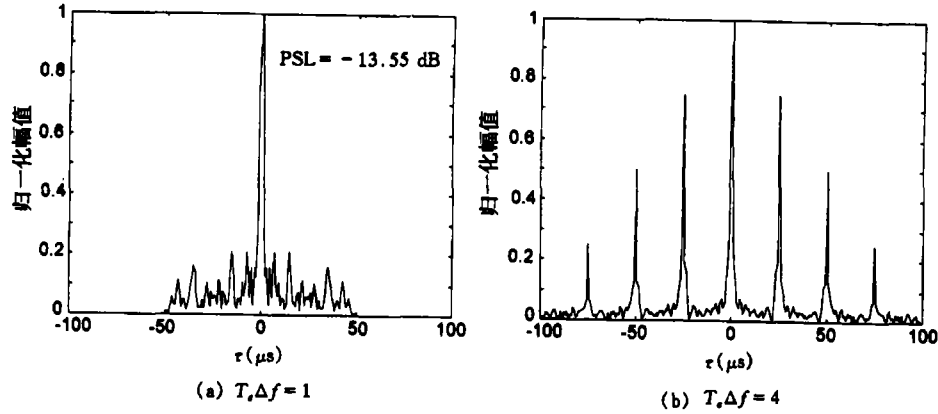


图 2 SIAR 距离模糊图

$$s_k(t) = u_k(t) \exp(j2\pi f_k t) = [u_1(t) \otimes u_{2k}(t)] \exp(j2\pi f_k t), \quad k = 1, \dots, N_e, \quad (6)$$

式中  $\otimes$  表示卷积,  $u_1(t)$  为子脉冲函数,  $u_{2k}(t)$  为每个阵元发射信号的相位编码函数:

$$u_1(t) = \text{rect}_1(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{T}, & |t| \leq T/2; \\ 0, & \text{其它}; \end{cases} \quad u_{2k}(t) = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{p_1=0}^{P-1} d_{p_1,k} \delta(t - p_1 T); \quad (7)$$

其中  $T$  为子脉冲宽度,  $P$  为码长,  $T_e = TP$ ;  $d_{p_1,k}$  为相位编码序列, 对二相编码信号来说,  $d_{p_1,k} \in \{+1, -1\}$ 。这时由于子脉冲宽度较小且稀布阵列孔径较大, 须考虑子脉冲的包络延时 (即宽带处理模型), 对目标  $T$ , 第  $l$  路接收信号的复包络为

$$x_l(t) = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{k=1}^{N_e} \sum_{p_1=0}^{P-1} \text{rect}_1(t - \tau_{0kl} - p_1 T) d_{p_1,k} \cdot \exp[j2\pi c_k \Delta f (t - \tau_{0kl} - p_1 T)] \exp[j2\pi f_0 (-\tau_{0kl} - p_1 T)], \quad (8)$$

其中  $\tau_{0kl} = \tau_0 - (\tau_{ek} + \tau_{rl})$ 。在接收端根据相位编码序列建立匹配滤波函数库, 并进行脉冲综合处理。这时距离模糊函数为

$$A(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_l(t) x_l^*(t + \tau) dt = A_1(\tau) + A_2(\tau) + A_3(\tau), \quad (9)$$

其中

$$A_1(\tau) = \frac{\sin(N_e \pi \Delta f \tau)}{\sin(\pi \Delta f \tau)} \cdot \frac{T - |\tau|}{T}, \quad |\tau| < T; \quad (10)$$

$$A_2(\tau) = \frac{1}{P} \exp(j2\pi f_0 m T) \sum_{k=1}^{N_e} R_k(m) \exp[-j2\pi c_k \Delta f (\tau - mT)] \frac{T - |\tau - mT|}{T},$$

$$|\tau - mT| < T, \quad -(P-1) \leq m \leq P-1, \quad m \neq 0; \quad (11)$$

$$A_3(\tau) = \frac{1}{P} \exp(j2\pi f_0 m T) \sum_{\substack{k,i=1 \\ k \neq i}}^{N_e} R_{k,i}(m) \exp[-j\pi(c_k + c_i) \Delta f (\tau - mT - \tau_{ek} + \tau_{ei})]$$

$$\cdot \exp[j2\pi f_0 (\tau_{ek} - \tau_{ei})] \frac{\sin[\pi(c_k - c_i) \Delta f (T - |\tau - mT - \tau_{ek} + \tau_{ei}|)]}{\pi(c_k - c_i) \Delta \cdot T},$$

$$|\tau - mT - \tau_{ek} + \tau_{ei}| < T, \quad -(P-1) \leq m \leq P-1, \quad m \neq 0. \quad (12)$$

$A_1(\tau)$  为其主瓣,  $A_2(\tau) + A_3(\tau)$  为其旁瓣,  $R_k(m)$ 、 $R_{k,i}(m)$  分别表示伪随机序列的非周期自相关函数和非周期互相关函数:

$$R_k(m) = \sum_{p_1=0}^{P-1-m} d_{p_1,k} d_{p_1+m,k} = \begin{cases} P, & m = 0; \\ a \ll P, & m = 1, 2, \dots, P-1; \end{cases} \quad R_k(-m) = R_k(m); \quad (13)$$

$$R_{k,i}(m) = \begin{cases} \sum_{p_1=0}^{P-1-m} d_{p_1,k} d_{p_1+m,i}, & 0 < m \leq P-1; \\ \sum_{p_1=0}^{P-1+m} d_{p_1-m,k} d_{p_1,i}, & -(P-1) \leq m < 0; \\ 0, & |m| \geq P, \quad m = 0. \end{cases} \quad (14)$$

由(10)式知, 主瓣不仅与子脉冲宽度有关, 而且与发射信号带宽有关。根据  $T'_1$  和  $T$  的大小, 脉冲综合后的脉宽  $T_1$  可分三种情况: (1) 当  $T'_1 > T$  时, 主瓣主要为(10)式右边的第二个分量, 则脉宽  $T_1$  由  $T$  决定; (2) 当  $T'_1 < 5T$  时, 主瓣主要为(10)式右边的第一个分量, 则脉宽  $T_1$  由发射信号带宽决定; (3) 当  $T'_1$  与  $T$  比较接近时, 脉宽  $T_1$  由发射信号带宽和子脉冲宽度同时决定。

另外, 从(11),(12)式可看出, 距离旁瓣由编码序列的非周期自相关函数和互相关函数确定。为了得到尽可能低的距离旁瓣, 在选择各阵元辐射信号的编码序列时, 不仅要求这些序列具有良好的自相关特性, 而且彼此间具有良好的互相关特性, 即要求自相关函数的最大旁瓣电平和最大互相关函数值比较低。从图3所示的采用编码序列时的距离模糊图可看出, 码长越长, 峰值旁瓣(PSL)越低, 甚至比图2(a)中  $T_e \Delta f = 1$  时要低10dB以上。表1给出了几种不同情况下的脉冲压缩比。图4给出了  $T_e = 511 \mu s$ ,  $B = 1 \text{ MHz}$ ,  $P = 511$  时 SIAR 的距离和方位模糊图, 可见距离和方位旁瓣都比较低。

SIAR 要求各向同性照射, 当发射信号采用相位编码序列调制, 且  $T_e \Delta f$  不等于整数时, 是否满足该要求。图5给出了  $T_e = 511 \mu s$ ,  $B = 1 \text{ MHz}$ ,  $P = 511$  时的能量辐射图。可见, 在不同方向上辐射能量在  $\pm 1 \text{ dB}$  范围内变化, 在工程上可以近似认为是各向同性照射。所以在 SIAR 中采用相位编码序列时, 就允许增大  $T_e$ , 即可增大发射信号能量, 增大作用距离。

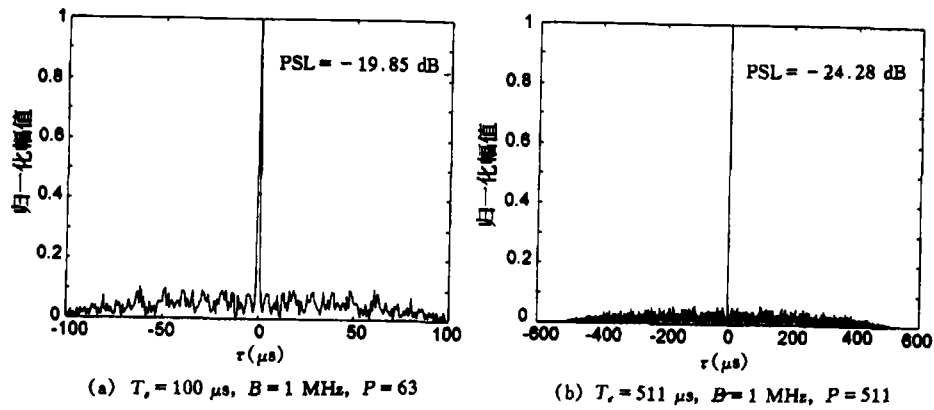


图 3 SIAR 距离模糊图

表 1 不同时宽带宽时的脉压比 (\* 表示存在栅瓣)

发射脉宽 $T_c(\mu s)$	发射带宽 $B(\text{MHz})$	子脉冲宽度 $T(\mu s)$	脉冲综合后脉宽 $T_1(\mu s)$	脉压比 $D(= T_c/T_1)$
50	0.5		2.0	25
50	1.0		1.0	50*
510	1.0	2.0	0.72	708
511	1.0	1.0	0.4633	1103
511	2.0	1.0	0.37	1381

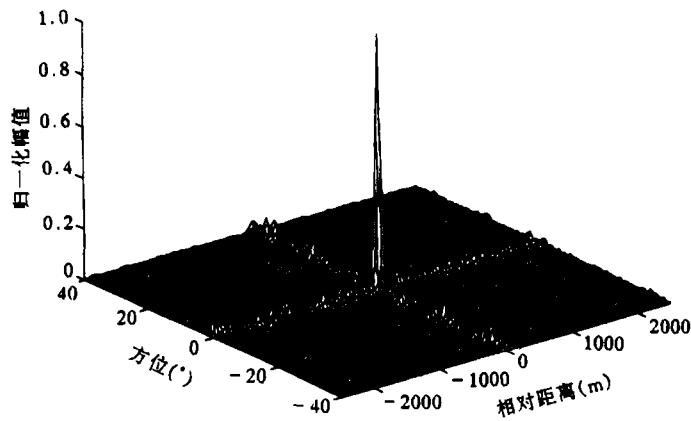


图 4 距离和方位模糊图

#### 4 结束语

本文针对稀布阵综合脉冲孔径雷达, 讨论了脉冲综合与相位编码脉冲信号相结合时的脉冲压缩特性。结果表明, 这种新的脉冲压缩方法不仅可以得到大的脉冲压缩比, 而且可以降低距离旁瓣, 同时可以满足 SIAR 对各向同性照射的要求。从而有利于增大其作用距离和提高距离分辨能力。

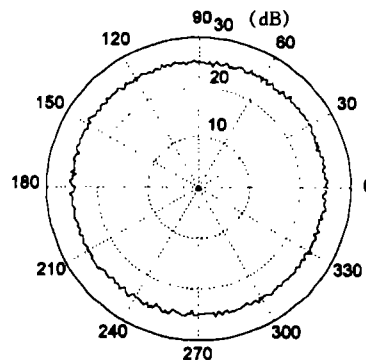


图 5 能量辐射图 (对单个阵元归一化)

#### 参 考 文 献

- [1] Dorey J, Garnier G, Auvray G. RIAS, synthetic impulse and antenna radar. International Conference on Radar, Paris: 1989, 556-562.
- [2] 保 铮, 张庆文. 一种新型的米波雷达——综合脉冲与孔径雷达. 现代雷达, 1995, 17(1): 1-13.
- [3] 张庆文, 保 铮. 综合脉冲与孔径雷达时空三维匹配滤波及性能分析. 电子科学学刊, 1994, 16(5): 481-489.
- [4] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论. 北京: 国防工业出版社, 1984, 第七章.
- [5] 陈伯孝. SIAR 四维跟踪及其长相干积累等技术研究: [博士论文]. 西安: 西安电子科技大学, 1997.8.

### PERFORMANCE ANALYSIS OF PULSE COMPRESSION USING PHASE-CODED SIGNALS FOR SPARSE-ARRAY SYNTHETIC IMPULSE AND APERTURE RADAR

Chen Baixiao     Zhang Shouhong

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract** Sparse-array Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR) can isotropically radiate by employing multiple frequencies (synthetic pulse) and multiple antennas (synthetic antenna). The range resolution only depends on bandwidth of transmitting signals. The distance grating lobes emerge in the case of increasing time-bandwidth product of transmitting signals. The performance of pulse compression is analyzed with the transmitting signals modulated by phase-coded sequences. The great ratio of pulse compression and range sidelobe suppression in SIAR are obtained, and its effective range and range resolution are raised.

**Key words** Sparse array, Synthetic impulse and aperture radar, Pulse compression, Phase-coded

陈伯孝: 男, 1966 年生, 博士, 目前主要从事雷达信号处理、目标跟踪等方面的研究。

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事雷达系统和雷达信号处理等领域的研究工作。