

用于分布式天基 SAR 系统低速运动目标检测的空时波形优化设计

黎薇萍, 洪 伟, 陶海红, 廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一种空时波形优化设计方法, 该方法将零相关区序列集应用于多发单收体制下的分布式小卫星雷达系统, 实现了在单颗接收卫星上直接进行地面运动目标检测(SAR GMTI), 使得多颗卫星之间不需要进行通讯和数据传送. 这种特殊的二相编码信号作为发射信号, 其回波信号与多路发射信号分别进行匹配之后的输出信号均在特定区域(主峰旁边) 值很小而且具有一致的主瓣形状和旁瓣形状, 因此对于目标附近的强杂波具有很好的抑制作用. 仿真结果验证了优化波形的有效性和可行性.

关键词: 天基多发单收雷达系统; 零相关区域序列集; 波形优化; 合成孔径雷达- 运动目标检测

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)12-2383-06

Space-Time Bi-phase Encoded Waveform Optimal Design for Distributed Space-Based Radar Systems

LI Wei ping, HONG Wei, TAO Hai hong, LIAO Gui-sheng

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

Abstract: A waveform optimal design algorithm is presented in the paper, which utilizes zero correlation zone codes in the multiple input single output system used for sparse space borne radar. It is shown that a single satellite receiver is sufficient for SAR GMTI. The special bi-phase encoded waveforms are transmitted by multiple satellites, the echoes from all transmit satellites are received by one satellite. After separating by different signal match filters, the main lobes in the special region of the pulse compression results are almost identical, and the side lobes are low. And so, the clutter, around the detected cell, can be rejected by the presented algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm is effective and feasible.

Key words: multiple input single output space based Radar; zero correlation zone codes; waveform optimizing; SAR GMTI

1 引言

对于分布式小卫星的这种超稀疏星座系统^[1], 存在单发和多发体制. 单发体制下, 传统的星载雷达地面低速运动目标检测系统中^[2], 发射信号多为线性调频信号(LFM), 而系统信号处理模型多是单发多收体制, 在多颗接收卫星之间进行数据传送, 得到多幅合成孔径雷达(SAR)图像或是多通道空时自适应处理(STAP)之后进行运动目标检测^[3,4]. 在多发体制下, 传统的相干发射由于各发射站电波间的干涉效应, 会在照射地面形成“相干斑”, 而出现“死区”, 将会产生很多栅瓣和非常小的照射面积. 为此, 多个卫星同时发射不同的信号, 多天线接收目标回波信号, 目标回波信号相互独立. 即各星载的发射天线同时发射不同的正交波形, 这样发射电磁

波可同时覆盖整个空间, 不存在波束扫描的问题. 为了硬件实现上更为简便, 考虑采用多发单收体制下的分布式小卫星雷达系统, 多个卫星发射不同波形, 在接收卫星上用回波信号分别和各个发射信号匹配出多路信号, 从而得到不同发射卫星所对应的图像, 然后进行 SAR-GMTI, 这样就不存在多颗卫星之间的通讯和数据传送问题, 也大大提高了整个系统的实时处理性能. 本文主要采用的是三发单收体制 SAR-GMTI 系统.

多发单收体制下的系统要求发射信号正交, 便于多个回波信号分离. 多发体制下正交波形分为两大类, 一类是多个天线发射所需带宽中互不交叠的一部分, 即发射游标^[5]. 这一类方法虽然能保证信号完全正交, 但是由于每个天线只能发射所需带宽的一部分, 从而能量上有损失. 另一类是每个天线都发射全带宽的编码信

号,能够充分利用能量且利用正交编码信号来克服“相干斑”.这就要求不同天线发射的信号正交,即互相关峰值为零,旁瓣积分电平尽可能低.

我们知道设计一组码使其自相关函数(ACF)和互相关函数(CCF)为理想冲击函数是不可能的.文献[6]提出了一种梯度遗传算法对多发射二相码波形进行优化,使其自相关峰值、积分旁瓣电平和互相关主副比、积分旁瓣电平尽可能的低.但是回波信号距离压缩以后的主瓣形状和旁瓣形状不一样,这使得待检测单元附近杂波相消效果受影响.由于能量恒定使得主瓣宽度和主副比是矛盾的,而且在恒虚警检测(CFAR)中一般考虑运动目标附近距离单元与之竞争的杂波,所以我们考虑设计一组码,使其主瓣形状一致而且主瓣旁边的若干距离单元内旁瓣形状也一致即可.在通信中,文献[7]提出了零相关区序列集二相码信号的构造方法,又称广义正交码,其周期自相关函数和互相关函数具有零相关区域,即其周期相关函数的主瓣两边是有限长度的零区域.但是通信里要求周期的相关性能,而在雷达的信号设计中要求信号的非周期相关性能.本文提出了非周期零相关区序列集二相码信号的波形优化设计方法,而且研究了这一特殊广义正交码的非周期相关性能.研究表明:在特定区域,非周期相关函数的模值具有相同值,而且回波信号距离压缩后的主瓣旁瓣形状也一致.

2 用于雷达系统的零相关区序列集(ZCZ codes)的设计

2.1 零相关区序列集模型

零相关区序列集^[7]是用于通信中的一组特殊的二相编码信号.如果信号表示为 $\{a_n^{(r)}\}$,设信号个数为 $M(r=1, 2, \dots, M)$,每一个二相码信号的长度为 $P(n=0, 1, \dots, P-1)$,则它的周期相关函数具有下面性质:(下标 $n+\tau$ 是指以 P 为模求余运算)

$$R_{r,s}(\tau) = \sum_{n=0}^{P-1} a_n^{(r)} a_{n+\tau}^{(s)} = \begin{cases} P, & \tau=0, r=s \\ 0, & \tau=0, r \neq s \\ 0, & 0 < |\tau| \leq Z \end{cases} \quad (1)$$

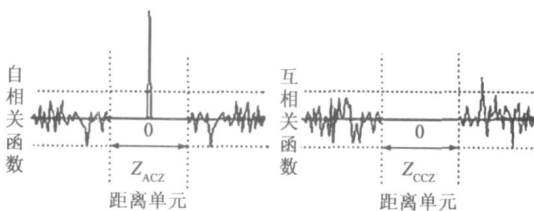


图1 零相关区域示意图

图1中左图是周期自相关函数,其零相关区域是 Z_{ACZ} ,右图是周期互相关函数,其零相关区域是 Z_{CCZ} .零相关区域定义为 $Z_{CZ} = \min\{Z_{ACZ}, Z_{CCZ}\}$.为了表述简单,我们把自相关函数的峰值点($\tau=0$)也被认为包含在零

相关区域.

2.2 零相关区序列集的构造方法

零相关区序列集的构造方法^[7]有两种:串联和截断.在下面的描述中我们把零相关区序列集用矩阵($M \times P$)形式表示,记为 $F(P, M, Z)$,其中 P, M 分别为码长和序列个数, $0 < |\tau| \leq Z$ 为零相关区域.其构造过程分以下几个步骤:

Step1: 给定初始矩阵 F^0 或构造初始矩阵 $F^0(P_0, M_0, Z_0)$.

构造初始矩阵的方法:以 $[X^0 \ Y^0]$ 为构造初始矩阵的初始向量,依式(2)进行 m 次递归迭代得到 X^m, Y^m ,则 $F^0 = G^m$,其中式(2)中的 $\overrightarrow{Y^m}$ 是指 Y^m 倒序排列后的序列

$$G^m = \begin{bmatrix} -X^m & Y^m \\ -\overrightarrow{Y^m} & -X^m \end{bmatrix}_{2 \times (2L_n)},$$

$$[X^m \ Y^m] = [X^{m-1} \ Y^{m-1} \ (-X^{m-1}) \ Y^{m-1}] \quad (2)$$

当 $[X^0 \ Y^0] = (1, 1)$ 时,初始矩阵 F^0 的 $M_0 = 2, P_0 = 2^{m+1}$,零相关区域 $Z = 2^m$,即 $F^0(2^{m+1}, 2, 2^m)$.如果 X^0 的长度为 L_0 (大于1),则初始矩阵 $F^0(P_0, M_0, Z_0)$ 中, $M_0 = 2, P_0 = 2^{m+1}L_0$,但是零相关区域 $Z_0 \neq 2^m$.随着迭代次数 m 的增加,码长 P_0 增加,但 M_0 不变.

Step2: 由初始矩阵 $F^0(P_0, M_0, Z_0)$ 应用递归合成的方法构造 F ;

$$F^0 = \begin{bmatrix} F_{11}^0 & F_{12}^0 \\ F_{21}^0 & F_{22}^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F^n = \begin{bmatrix} F_{11}^n & \dots & F_{1M}^n & F_{1(M+1)}^n & \dots & F_{1(2M)}^n \\ F_{21}^n & \dots & F_{2M}^n & F_{2(M+1)}^n & \dots & F_{2(2M)}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{(2M-1)1}^n & \dots & F_{(2M-1)M}^n & F_{(2M-1)(M+1)}^n & \dots & F_{(2M-1)(2M)}^n \\ F_{(2M)1}^n & \dots & F_{(2M)M}^n & F_{(2M)(M+1)}^n & \dots & F_{(2M)(2M)}^n \end{bmatrix}_{M \times L} \quad (4)$$

其中 F_{ij}^n 和 $F_{(i+M)(j+M)}^n (1 \leq i, j \leq M)$ 的表达式如式(5)所示:

$$F_{i1}^n = F_{i1}^{n-1} F_{i1}^{n-1}, \dots, F_{iM}^n = F_{iM}^{n-1} F_{iM}^{n-1}$$

$$F_{i(M+1)}^n = (-F_{i1}^{n-1}) F_{i1}^{n-1}, \dots, F_{i(2M)}^n = (-F_{iM}^{n-1}) F_{iM}^{n-1}$$

$$F_{(i+M)1}^n = F_{i(M+1)}^n, \dots, F_{(i+M)M}^n = F_{i(2M)}^n$$

$$F_{(i+M)(1+M)}^n = F_{i1}^n, \dots, F_{(i+M)(2M)}^n = F_{iM}^n \quad (5)$$

由式(2)构造初始矩阵,再经过 n 次递归合成出 $F = F^n(2^{2n+m+1}, 2^{n+1}, 2^{n+m-1})$. F^n 的零相关区域满足: $Z \leq P/(2M)$ (或 $Z_{CZ} \leq P/(M+1)$).

Step3: 由串联方法得到的长码截断成 2^t 个短码 F

$(P, M, Z) = (2^{-t}P_n, M_n, 2^{-t}Z_n)$, 其中 t 为截断的次数.

2.3 用于雷达系统的零相关区域序列集的非周期函数性质

针对雷达应用, 本文分析了零相关区域序列集信号的非周期相关特性. 非周期自相关函数($r = s$)和互相关函数($r \neq s$)^[8]为:

$$X_{r,s}(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{P-1-t} a_n^{(r)} a_{n+t}^{(s)}, & 0 \leq t \leq (P-1) \\ \sum_{n=-t}^{P-1} a_n^{(r)} a_{n+t}^{(s)}, & -(P-1) \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

在零相关区域由于 ZCZ 码的周期相关函数为零, 所以其非周期相关函数在特定区域(该码周期相关函数的零相关区域)可以写为:

$$X_{r,s}(\tau) = \begin{cases} -\sum_{n=P-\tau}^{P-1} a_n^{(r)} a_{n+\tau}^{(s)}, & 0 \leq \tau \leq Z \\ -\sum_{n=0}^{-\tau-1} a_n^{(r)} a_{n+\tau}^{(s)}, & -Z \leq \tau \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, 式中的下标 $n + \tau$ 均是指按 P 求模运算, 即 $a_{n+\tau} = a_{\tau}$, 且特定区域为 $0 < |\tau| \leq Z$.

在分布式小卫星 SAR 系统中, 卫星位置坐标一般只有分米级的误差, 斜距一般为几百甚至上千公里, 相位补偿之后由卫星坐标位置引起的距离误差(若 x, y 坐标轴上的误差表示为 $\Delta d_x, \Delta d_y$)近似为 $\Delta R \approx (\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2) / 2R_c$, 则距离误差导致的三幅图像中峰值位置偏移量 $\Delta \tau = \Delta R / c$ 在 10^{-14} 数量级, 而带宽 B 一般为几百兆, 所以峰值位置偏移量远远小于一个采样间隔. 由 ZCZ 码的周期相关性质可知 $X_{r,s}(\pm 1)$ 的值只能为 1 或者 -1. 当码长超过 100 时, ZCZ 码的任意两组码的非周期相关函数在 $\tau = \pm 1$ 时的值可以达到 -78.2405dB 以下. 也可以说 ZCZ 码对于卫星坐标存在误差的情况不敏感.

结论 1: ZCZ 码的非周期相关函数特点: 在特定区域并不为零, 但是具有与周期相关函数类似的性质, 即在区域 $0 < |\tau| \leq Z$ 上, ZCZ 码的非周期相关函数 $X_{r,s}(\tau)$ 的值很小, 而且 $|X_{r,s}(\tau)|$ 具有相同的值(但不为零).

结论 2: 给定一个方阵 $F^0 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 为初始矩阵, 由式(5)、式(6)构造 $F^n (2^{2n+1}, 2^{2n+1}, 2^{2n+1})$ (下文中称之为“**A 型信号**”). F^n 中任意两组 ZCZ 码的非周期相关函数在特定区域里满足: 当 $r, s \in 1, 2, \dots, M_n$ 时, $\sum_r X_{r,s}^n(\tau) = 0$ 且 $\sum_s X_{r,s}^n(\tau) = 0$, 即所有发射信号的混合信号与任一发射信号匹配后的输出(该发射信号的非周期自相关函数及与其它发射信号的所有互相关函数叠加)在特定区域内值为 0, 且特定区域对称. 这在后

面的仿真中可以得到验证.

由结论 2 可知: 当发射卫星为 $M = 2^{n+1}$ 个, 它们分别发射 F^n 中的 M 个码长为 $P = 2^{2n+1}$ 的 ZCZ 码时, 其回波信号与任意发射信号匹配后的输出在主瓣附近的有限区域里值为 0, 由于在恒虚警检测中一般也只考虑运动目标附近距离单元里与之竞争的杂波, 所以这组码对于目标附近的杂波有很好的抑制作用.

在小卫星分布式雷达系统中, 其距离分辨率要求达到 1 米左右, 故所需信号带宽也应在 150MHz 左右, 如果信号时宽取为 1 μ s, 则码长至少要达到 150, 这时需要的发射卫星个数 M 至少大于 16. 由于卫星的成本很高, 系统中的发射卫星个数不可能达到这么多. 本文采用“**三发单收**”体制的系统, 卫星个数已经确定. 在这种情况下码的长度又要求达到 100 以上, 只能给定初始向量然后由初始向量依据式(2)迭代得到初始矩阵 F^0 , 因为随着迭代次数的增加码长增加了, 而码的个数不变, 最后再由初始矩阵迭代构造 F^n .

当初始矩阵由初始向量依据式(2)迭代 m (大于 0) 次构造而成, 即 $F^0 = G^m$, 此时的 F^0 不是方阵. 由式(2)得:

$$\begin{aligned} G^{m-1} &= \begin{bmatrix} -X^{m-1} & Y^{m-1} \\ -\overrightarrow{Y^{m-1}} & -\overrightarrow{X^{m-1}} \end{bmatrix}, \\ G^m &= \begin{bmatrix} -X^m & Y^m \\ -\overrightarrow{Y^m} & -\overrightarrow{X^m} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (-X^{m-1})(-Y^{m-1}) & (-X^{m-1})Y^{m-1} \\ (-\overrightarrow{Y^{m-1}})\overrightarrow{X^{m-1}} & (-\overrightarrow{Y^{m-1}})(-\overrightarrow{X^{m-1}}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

比较 G^n 与 G^{n-1} 两个式子, 由式(7)可知: 对于任意 $m > 0$, 在有限区域里其非周期相关函数 $X_{r,s}^{G^m}(\tau)$ 的值不随 m 的改变而改变, 取决于初始向量 X^0 和 Y^0 .

由上述方法构造的 ZCZ 码(下文中称之为“**B 型信号**”)的非周期相关函数除了满足结论 1 之外还具有以下特点:

结论 3: F^n 中任意两组 ZCZ 码的非周期相关函数在有限区域里(不一定是该码周期相关函数的零相关区域)满足: 当 $r, s \in 1, 2, \dots, M_n$ 时, $\sum_{s=1}^{M_n} X_{r,s}^n(\tau) = 0 (r = 1, \dots, M_t) \tau \geq 1$, 即所有发射信号的混合信号和与任一发射信号匹配后的输出(该发射信号的非周期自相关函数及与其它发射信号的所有互相关函数叠加)在有限内值为 0, 这一区域不对称.

这些结论在后面的仿真中可以得到验证.

这些结论在后面的仿真中可以得到验证.

3 基于优化波形的 SAR GMTI 算法

图 2 给出了基于联合像素杂波相消方法的 SAR-GMTI 的实现方法框图.

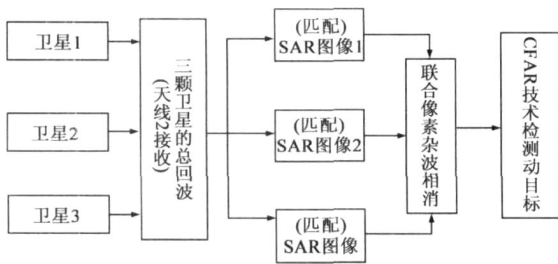


图2 SAR-GMTI实现方法框图

该方法采用三个卫星分别发射 ZCZ 二相码信号, 卫星 2 接收三个卫星的回波, 总的回波分别与对应的天线发射信号匹配, 接着采用 R-D 算法成像得到三幅 SAR 图像, (即三发一收体制). 在卫星 2 上进行地面低速运动目标检测, 其步骤如下:

Step1: 分别用各卫星的发射信号进行距离上的匹配滤波, 采用传统的正侧视 SAR 成像方式, 用 R-D 算法得到 3 幅 SAR 图像. 三个卫星的回波信号叠加在一起, 经过匹配后, 由于信号的自相关旁瓣和信号之间的互相关能量, 对成像和后面的动目标检测都会产生一定影响.

Step2: 采用文献[9]的联合像素方法进行杂波相消, 此方法的基本思路是: 所有 SAR 图像(此为 3 幅)经过图像粗配准后(像素级), 再利用所有 SAR 图像中的同一像素及其相邻像素的复数据构造联合观测矢量和协方差矩阵; 然后再对自适应估计得到的采样协方差矩阵进行特征值分解, 获得联合噪声子空间; 对相关函数矩阵进行特征分解以获得其大特征值矢量, 并由它和联合导向矢量构造联合信号子空间; 联合信号子空间向联合噪声子空间投影的最小值即为最优估计.

Step3: 对杂波相消后的图像采用 CFAR 检测出动目标.

系统的几何模型如图 3 所示:

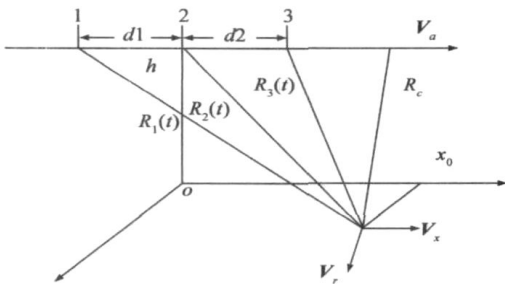


图3 三通道SAR几何关系示意图

其中, 观测条带中心斜距 R_c , d_1, d_2 为卫星之间间距, 卫星速度为 V_a , 动目标到 3 个卫星的距离分别为 $R_1(t), R_2(t), R_3(t)$, 沿运动平台飞行方向速度为 V_x , 在斜距平面内沿距离向的速度为 V_r , 到卫星飞行方向的斜距为 R_c , 方位位置在 x_0 处.

4 仿真实验与性能分析

仿真实验 1: 零相关区序列集的非周期自相关和互相关函数性质

(1) 当初始矩阵为方阵 $F^0 = [-1, 1; -1, -1]$, 迭代 2 次得到 $F^2(32, 8, 2)$, 8 个码长为 32 的 ZCZ 码, 特定区域为 $0 < |\tau - 32| \leq 3$.

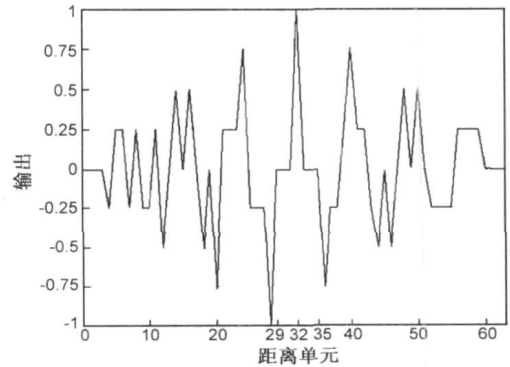


图4 多发射混合A型信号和信号1的脉冲压缩图

图 4 为多发射混合 A 型信号与发射信号 1 匹配后的输出. 由图 4 可知: 发射信号的混合信号与发射信号 1 匹配后的输出在特定区域内值为 0, 且特定区域对称. 实际中发射信号的混合信号分别与所有发射信号匹配后的输出在主峰附近特定区域内值均为 0, 我们可以对所有输出进行优化加权, 使得加权后的输出在杂波处形成零点, 同时优化积分旁瓣.

(2) 初始矩阵不为方阵, 初始矢量如下给出:

$$[X^0] = [+ - - + - + - - - + + - - - - - + + -],$$

$$[Y^0] = [- + + - - - - - + - + + + - + - + + -]$$

构造初始矩阵 $F^0, M_0 = 2, P_0 = 40$, 取 $n = 1$, 由式(4)、(5)构造 F^n , 这样构造出的零相关区序列集 $M = 4$, 每个二相编码信号长度 $P = 160$, 其周期自相关和互相关函数零相关区域为 $0 < |\tau - 160| \leq 20$.

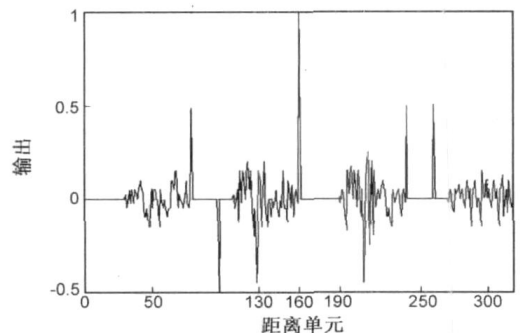


图5 多发射混合B型信号和信号1的脉冲压缩图

图 5 为多发射混合 B 型信号与发射信号 1 匹配后的输出结果. 由图 5 可知: 多发射信号所得的混合信号与发射信号 1 匹配后的输出在有限区域内 ($0 < |\tau - 160| \leq 30$) 值为 0, 且这一特定区域和 ZCZ 码周期相关函数的零相关区域并不一致.

仿真实验 2:用于 3 个卫星的波形优化设计

我们从仿真实验 1(2)中构造的四组码中取其中三组码(码 A、B、C)分别作为系统三颗卫星的发射信号.其中,信号的时宽、带宽分别为 $T = 1.6\mu s$ 和 $B = 100MHz$, 码长为 $P = 160$.

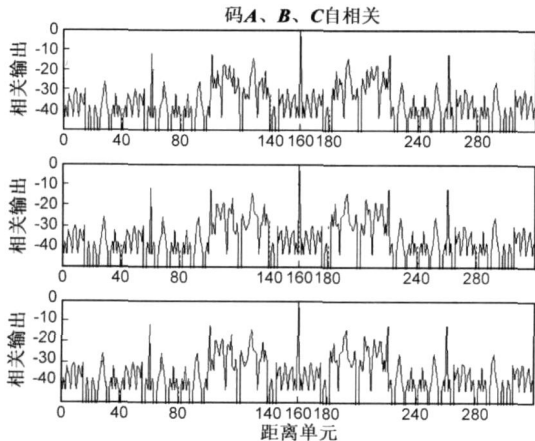


图6 码A、B、C自相关曲线

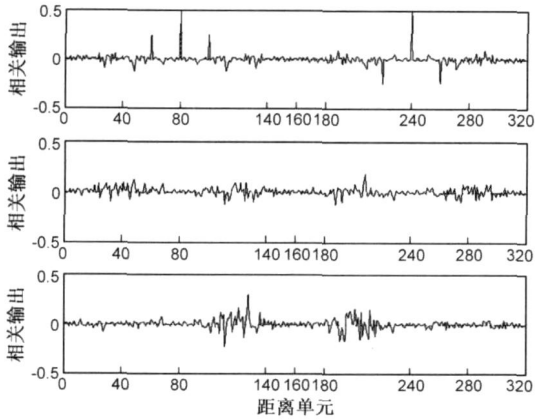


图7 码A、B,码A、B和码B、C互相关曲线

根据式(6),我们给出了它们的相关特性曲线,如图6和图7所示.将三组码的自相关特性曲线画在一幅图上,如图8所示.

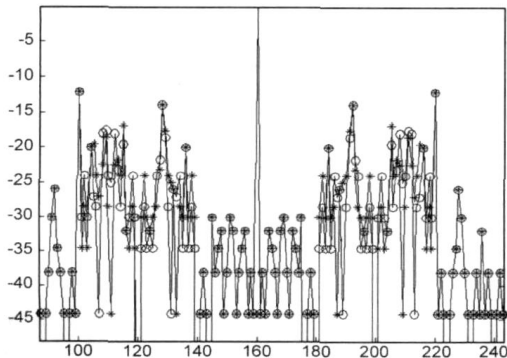


图8 码A、B、C自相关曲线

将回波信号分别和发射信号 A、B、C 匹配出的输出曲线画在一幅图上,比较回波信号距离压缩后的主瓣、

旁瓣形状,比较结果如图9所示.

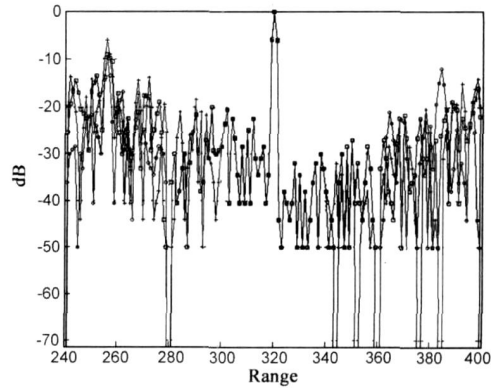


图9 回波信号分别距离压缩后主、旁瓣形状

由图9可知,回波信号距离压缩后的主、旁瓣形状在特定区域 $0 < |\tau - 160| \leq 20$ (周期自相关和互相关函数零相关区域)上完全重合.回波信号距离压缩后的输出曲线,其主瓣主要是每个信号的自相关的主瓣,而其旁瓣主要是每个信号的自相关的旁瓣以及分别与其它两路信号的互相关旁瓣的叠加.回波信号距离压缩后的主瓣、旁瓣形状在峰值点(相位中心)附近有限区域一致这一结论也是由于发射的信号具有特殊的相关特性.

仿真实验 3:基于波形优化结果的 SAR-GMTI 仿真实验

本文采用仿真生成的杂波数据,仿真选择的参数如表1所示:运动平台速度 V_a ,工作波长 λ 相邻孔径中心间距 $d = 29.926m$ (这里不失一般性,中心间距在进行脉冲压缩前都会补偿掉),脉冲重复频率为 prf (保证距离方位上都没有模糊),观测条带中心斜距为 R_c ,观测条带宽 $500m$,SAR 采用正侧视工作方式.静止杂波由均匀散布在观测条带内的静止点目标组成.动目标仿真参数如表2所示.

表1 雷达参数

波长 λ	信号带宽	prf	采样率	卫星速度
0.03m	100MHz	5KHz	200MHz	7481.5m/s
信杂比 SCR	杂噪比 CNR	R_c/km	天线方位向尺寸 La	天线距离尺寸 Wa
-6dB	30dB	979.06	3m	1m

表2 动目标运动参数

目标序号	距离向速度 $V_r/m/s$	方位向速度 $V_a/m/s$	方位向位置 x_0/m	斜距 R_c/km
1	15	0	100	979.06

三个卫星分别发射仿真实验1获得的波形A、B、C.其中卫星2接收了三个发射卫星的回波信号,在卫星2上对回波用波形A、B、C的权值进行脉冲压缩分别成像,所得三幅SAR图像如下图10、11、12所示.(横向为

方位, 纵向为距离) 联合像素杂波相消后的图像如图 13 所示。

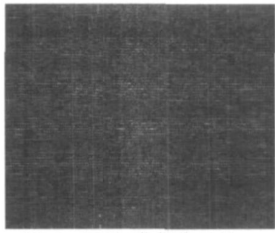


图10 卫星1发射信号的 SAR图像

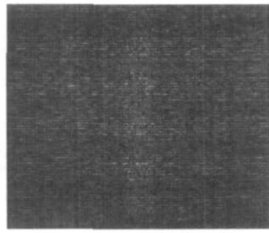


图11 卫星2发射信号的 SAR图像

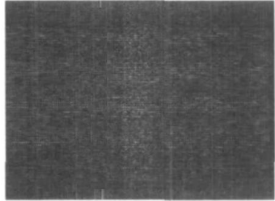


图12 卫星3发射信号的 SAR图像

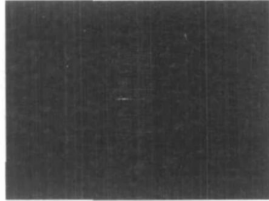


图13 杂波相消后的图像

改变动目标距离向速度, V_r 在 $-20 \sim 20$ 之间变化, 其它参数不变的情况下, 得到 SCNR (信杂噪比) 改善因子, 如图 14 所示。由于动目标距离向速度不同, 其对消程度不同^[3]。由图 14 可以看出当改善因子大于 15dB 时, 动目标可以检测到, 小于 15dB 时, 杂波剩余较大, 动目标还是被淹没其中。

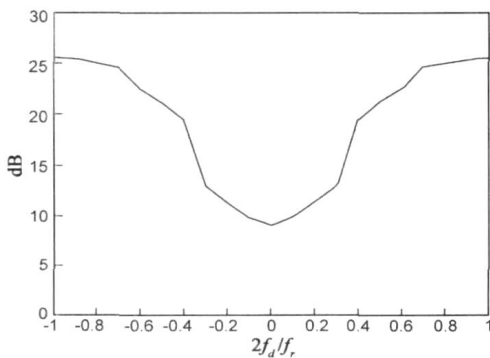


图14 改善因子

5 结论与展望

本文针对多发单收体制下的分布式小卫星雷达系统, 提出了一种新的基于雷达系统的多发发射波形零相关区域序列集信号的优化设计。这种特殊的二相编码信号作为发射信号, 其回波信号与多路发射信号分别进行匹配之后的输出信号在特定区域其主瓣形状和旁瓣形状大致一样, 对于目标附近的强杂波具有很好的抑制作用。不同卫星发射不同波形, 在接收卫星上用回波信号分别和各个发射信号匹配出多路信号, 从而得到不同发射卫星所对应的图像, 然后利用联合像素方法进行低速运动目标检测, 这样就不存在多颗卫星之间的通讯和数

据传送问题, 也大大提高了整个系统的实时处理性能。仿真实验和性能分析验证了该方法的有效性。针对非周期零相关区域序列集波形的深入分析等后续工作还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Gamham John, Wainwright Ross, Bums Rich. Enabling research and development for flight demonstration of sparse aperture sensing[A]. AIAA Space 2001 Conference and Exposition[C]. Albuquerque: AIAA, 2001. 1- 10.
- [2] 斯科尼克. 雷达手册(第二版)[M] 王军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2001. 1- 10.
- [3] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测与成像研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003. 26- 73.
- [4] 李景文, 何峻湘, 周荫清. 基于时空二维信号处理的合成孔径雷达动目标检测[J]. 电子学报, 1995, 23(9): 88- 91. Li Jingwen, He Junxiang, Zhou Yinqing. Detecting of moving targets with SAR based on space time two dimensional signal processing[J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(9): 88- 91. (in Chinese)
- [5] 鲍昆超, 陶海红, 廖桂生. 多发射体制下分布式小卫星的波形设计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2117- 2119. Bao Kunchao, Tao Haihong, Liao Guisheng. Waveform design for multi emtted and distributed space based radar system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(9): 2117- 2119. (in Chinese)
- [6] 陶海红, 廖桂生. X 波段单发多收体制下用于解距离模糊的时变二相码波形优化设计[J]. 宇航学报, 2005, 26(5): 657- 662. Tao Haihong, Liao Guisheng. Bi phase encoded waveform design to deal with the range ambiguities for sparse spacebased radar systems[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 657- 662. (in Chinese)
- [7] PZ Fan, N Sushiro, N Kuroyanagi, X M Deng. Class of binary sequences with zero correlation zone[J]. Electron lett, 1999, 35(10): 777- 779.
- [8] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 合肥: 国防工业出版社, 1984.
- [9] 李真芳. 分布式小卫星 SAR InSAR GMTI 的处理方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. 95- 99.

作者简介:

黎薇萍 女, 1985 年 12 月生于江西抚州市, 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士生. 主要研究方向为雷达信号与信息处理、MMO 雷达和波形优化设计等。

E-mail: liveiping@mail.xidian.edu.cn

洪伟 男, 1983 年 10 月生于湖北荆州市, 硕士生. 主要研究方向为合成孔径雷达地面运动目标检测等。