

分布式卫星多发射波形—地面运动目标检测系统研究

陶海红, 黎薇萍, 洪 伟, 廖桂生

(西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对分布式小卫星雷达系统的地面低速运动目标检测, 本文给出了一种新的基于多发射正交编码信号的单接收 GMTI 处理系统体制, 详细分析了该系统对多发射正交编码波形的性能要求, 并基于此给出了相应的正交波形优化设计方法. 在这种新的系统体制中, 采用不同卫星分别发射优化后的正交波形, 在接收卫星上将回波信号分别和各个发射信号匹配得到不同发射卫星所对应的图像, 然后利用基于图象域的多通道、多像素二维联合自适应处理进行地面低速运动目标检测, 这样避免了多颗卫星之间的数据传送, 提高了整个系统的实时处理性能. 采用的正交波形优化设计方法以接收回波信号中匹配出各发射卫星的一维像性能为优化准则, 即利用一维像的主瓣形状和旁瓣性能的约束来实现. 波形正交性、算法收敛性、杂波相消以及动目标检测方面的仿真结果和性能分析验证了该系统以及相应算法的可行性和有效性.

关键词: 分布式小卫星雷达; 地面低速运动目标检测; 多发单收体制; 波形优化设计

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2803-07

Multiple-Transmit Waveform GMTI Algorithm in Space Borne Radar Systems

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

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

Abstract: By exploiting multiple transmissions of orthogonal coding signal and single reception, a new GMTI processing scheme for ground moving targets detection with low velocity in space borne multiple input and single output (MISO) radar systems is presented in the paper. Firstly, the requirements of multiple orthogonal coding waveform for the MISO radar system is analysed in detail. Focusing on this new scheme, an orthogonal waveform optimization design method is also proposed. In this GMTI processing scheme, different satellites independently transmit the optimized orthogonal waveform and one of the transmission satellites acts as the receiver and matches the received echo signal with each of the transmission signal, respectively. Detection of ground moving targets with low velocity can be achieved by joint adaptive two dimension processing of multi channel and multi pixel on image domain. In this way, data communications among multiple satellites is not necessary and hence real time processing capability of the whole system can be improved. The performance of one dimension image after matching by the receiving satellite, i. e. the shape of its mainlobe and the performance of its sidelobe is considered as the optimization criteria in the proposed waveform design method. Simulations and analysis are performed to testify the feasibility and effectiveness of the proposed system and waveform design method, in terms of the orthogonality of waveform, convergence of the design algorithm, clutter cancellation, and detection performance of targets.

Key words: sparse space borne radar; ground moving target identification; MISO; waveform optimal design

1 引言

小卫星分布式雷达由于低制造成本、低发射费用、抗毁性强、可靠性高的显著优点, 已成为卫星雷达的发展趋势. 分布式小卫星这种超稀疏星座系统^[1]可以工作在单发和多发体制. 多卫星发射系统增加了功率消耗较大的发射系统, 而卫星功率是卫星载荷的重要指标, 这

也是现实问题, 本文只是针对这一分布式小卫星系统研究了多发单收下的 GMTI 系统体制的性能分析, 当然该系统是可以做 INSAR 处理和单发多收、多发多收情况下 GMTI 等工作. 星载单发体制下, 用于地面低速运动目标检测^[2]的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, 在单个大卫星的多接收天线或多颗接收卫星分别获得多幅合成孔径雷达

(SAR) 图像, 然后多图像之间进行数据综合, 检测运动目标; 或是直接进行回波数据综合, 进行多通道空时自适应处理 (STAP), 完成动目标检测^[2], 这都避免不了多天线或多卫星间的数据传输. 星载多发体制下, 为了克服传统的相干发射带来的“相干斑”, 多个卫星需同时发射独立的信号, 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. 为了提高实际应用的可行性, 我们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, 在一颗接收卫星上将回波信号分别和各个发射信号匹配得到不同发射卫星所对应的图像^[3], 然后完成图像域的运动目标检测 (SAR-GMTI), 这样就不存在多颗卫星之间的数据传送问题, 极大提高了整个系统的实时处理性能. 不失一般性, 本文针对的是三发单收体制的 SAR-GMTI 系统.

多发体制下正交波形分为两大类, 一类是多个天线或卫星发射所需带宽中互不交叠的一部分, 即发射游标. 由于每个卫星发射不同频率, 因而不存在“相干斑”. 第二类是所有天线或卫星发射相同带宽的编码信号, 而不同天线或卫星采用不同的正交编码信号来克服“相干斑”, 即互相关主副比为零, 旁瓣积分电平尽可能低. 第一类方法能保证信号完全正交, 但是由于每个天线或卫星只能发射所需带宽的一部分, 从而能量上有损失, 而且每个接收天线或卫星所接收的多发射信号补偿了发射的波程差后又成为一个大带宽信号, 没有了发射星的波形自由度. 第二类方法由于每个天线都发射全带宽, 所以能够充分利用能量, 而且在接收端依然有发射星的波形自由度, 但其正交性全靠编码的正交来保证. 近年来, 国内外对 MIMO 雷达波形设计有一定的研究, 取得了一些重要的进展. 文献[4]给出了一种用于目标识别和分类的 MIMO 雷达波形设计, 该波形设计需要利用目标的先验信息, 按互信息和均方根误差最小准则进行波形设计, 而对于天基 MISO 系统而言是无法提取目标的先验信息的, 因而不适用于本文考虑的系统. 文献[5]给出了一种用于 MIMO 雷达的距离压缩和波形优化设计, 该设计方法主要适用于在色干扰和噪声情况下多目标参数估计的优化, 而且认为不采用脉冲压缩能改善估计性能, 而天基系统由于距离地面目标上千公里, 所以需要长时间相干积累来提高雷达威力, 因此主要以 SAR 模式工作, 故和本文所研究的系统用途差别很大, 而且文献[5]给出的多发波形可以不正交, 通过采用正交投影处理来保证一定正交性.

针对第二类方法, 结合本文所给出的多发波形—单通道 GMTI 系统, 本文提出了波形优化设计方法, 拟采用空变特性来解决“相干斑”的问题. 所发送的正交波形个数就是发射卫星的个数, 但是由于波形的高

互相关旁瓣电平, 该方法有效性不能保障. 利用调整波形的信号处理方法和波形优化设计可以改进互相关积分旁瓣电平. 本文采用二相编码信号作为发射信号, 为了获得高的距离分辨率, 需要发射信号为大带宽信号, 那么优化波形的搜索空间维数很高, 采用穷举法是不可行的. 近年来, 遗传算法 (GA) 是在智能算法领域提出的解决工程优化问题的一种有效方法^[6], 具有全局的寻优能力, 并且初始值是随机产生的, 所以收敛速度不受初始值选取的约束. 由于传统遗传算法 (CGA) 往往选取较大的初始种群规模, 否则会收敛到局部值, 而且每次旋转就选择一个染色体, 往往造成最优个体的丢失, 强壮个体的过度支配作用以及不能在搜索空间有新的起点. 而且在波形优化设计中, 对于每一种组合都要实现匹配滤波来计算适应度, 因此初始种群的大规模带来的适应度运算量也是相当大的. 本文采用一种梯度遗传算法 (Gradient GA)^[7] 搜索最优码, 需要极小初始种群规模, 大大降低了运算复杂度.

2 基于多发正交波形单接收 GMTI 处理系统

多发正交波形单接收 GMTI 处理系统实现框图如图 1 所示.

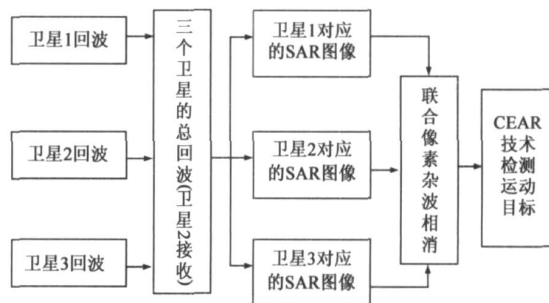


图1 多发正交波形单接收GMTI处理系统实现框图

不失一般性, 该系统采用三个卫星分别发射正交信号, 卫星 2 接收三个卫星的信号回波 (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对回波信号进行距离上的脉冲压缩 (即一维距离像), 然后采用传统 SAR 算法得到 3 幅 SAR 图像, 分别对应三个发射卫星对地面同一地块所成的像. 三个卫星的回波信号叠加在一起, 经过距离维脉压后, 得到的三幅一维像的主瓣性能和旁瓣性能对成像和后面的杂波抑制、动目标检测性能都会产生很大的影响.

Step2 采用文献[8]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特征值对应的特征向量, 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. 该方法最大的优点是在杂波抑制过程中, 不像传统 SAR-GMTI 处理中要求图像配准的精度必须达到亚像素级(1/10 到 1/100 像素), 只要求图像粗配准到像素级(允许达到一个像素), 这样可以大大减轻图像精确配准的复杂性, 而且避免了传统方法进行精确配准所需的插值运算, 极大的降低了运算复杂度.

Step3 对杂波相消后的图像采用恒虚警(CFAR)检测运动目标.

此方法与一发三收体制相比, 其主要优点是避免了数据在卫星之间的传输, 有利于硬件实施. 在这一新系统体制下杂波相消的性能主要取决于在接收卫星上所成的三幅图像的性能, 这就对正交波形的优化设计带来了如下要求:

(1) 接收卫星所分离的三幅图像中地面同一目标的一维距离像主瓣位置尽可能一致;

(2) 三种正交波形混合后各自成的一维距离像的主瓣形状应尽可能一致, 这样接收卫星分离出的三幅图像联合处理抑制杂波的性能才能得到保障;

(3) 一维距离像的旁瓣尽可能一致, 这个条件很难达到, 那就要求积分旁瓣尽可能低, 这样主瓣受其他距离单元上目标的影响就能尽可能小;

(4) 采用多发单收进行 GMTI 处理, 会存在各通道图像去相干问题, 其中正交编码信号带来的去相干影响我们将做进一步分析.

针对要求(1) 由于小卫星群在空间超稀疏分布, 根据不同任务对基线长度有不同要求, 即使是较短的情况, 卫星基线也达到 100m 以上(防止碰撞), 甚至几百米. 这种长基线会导致各发射卫星和地面观测条带之间的斜距不同, 从而各发射卫星到地面同一目标产生的混合回波, 按发射波形分离后分别得到的一维距离像主瓣位置有大的偏差. 也就是说主瓣偏差主要是各发射卫星之间的长基线带来的, 而据相关文献报导, 当前星间测量和轨道控制精度可在分米量级, 即卫星之间的长基线可以精确已知, 误差为分米量级. 卫星和地面观测条带之间的斜距一般为几百甚至几千公里, 对卫星之间基线带来的相位差粗补偿之后(补偿到分米量级)由卫星基线引起的距离误差近似为 $\Delta R \approx (\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2)/2R_c$, 其中 Δd_x 、 Δd_y 为卫星两维基线误差, R_c 为卫星距离地面的高度, 则距离误差导致的三幅一维距离像主瓣位置偏移量 $\Delta \tau = \Delta R/c$ 在 10^{-14} 数量级, 而我们采用的带宽一般为 100M 左右, 所以主瓣位置偏移量

远远小于一个采样间隔. 因此多发射波形所成的一维距离像对基线补偿到分米量级后, 主瓣位置的偏移可以忽略.

而要求(2)~ 要求(4) 则成为波形优化设计的准则. 其中对要求(4), 我们将另文分析. 即接收卫星分离出的 3 发射卫星的一维距离像主瓣形状和积分旁瓣电平, 对于主瓣形状一致性问题, 如果一维距离像采用匹配滤波的方法, 那么主瓣的 3dB 宽度就是带宽的倒数, 对应于距离像就是一个距离单元, 主瓣形状就是一个点. 由于匹配滤波很难得到高的积分旁瓣电平, 因此本文一维距离像采用了失配滤波的方法, 对三幅图像都采用相同主瓣宽度的约束来保证一维距离像主瓣形状. 对于一维距离像的积分旁瓣电平要求, 首先一维距离像的积分旁瓣主要是由波形的非周期自相关函数的积分旁瓣电平和多波形之间的互相关积分旁瓣电平叠加得到的, 其次不同天线或卫星采用不同的正交编码信号来克服“相干斑”, 即要求不同波形互相关主副比为零. 因此本文将波形优化准则其等效为积分旁瓣和最高旁瓣的约束.

对于 SAR 来讲, 一般存在两种模糊, 即方位向模糊和距离向模糊. 方位向模糊主要是由于较低的脉冲重复频率(prf)造成的. 而较高的 prf 又会造成距离向模糊.

$$prf_{azi} \geq 2 \times v \times \alpha iAngle / \lambda \quad (1)$$

$$prf_{range} < c / (2 \times R \times altiAngle \times \tan \theta) \quad (2)$$

其中 v 为卫星等效地面运动速度, c 为光速, λ 是信号波长, θ 为入射角, R 是卫星到波束中心目标的斜距, $\alpha iAngle = NLa$ 、 $altiAngle = NWa$ 分别是天线波束的方位向、高低向的 3dB 波束宽度, 其中 La 、 Wa 分别是天线的方位向尺寸和高低向尺寸. 本文在选择脉冲重复频率(prf)时应保证方位、距离都不模糊. 对分布式小卫星来说, 由于载荷受限, 往往采用小天线, 如 $3m \times 1m$, 脉冲重复频率 = 5000 时可以满足距离、方位都不模糊.

3 正交编码信号的优化设计

适应度函数是波形优化的准则, 那么由 2 节所述, 波形优化的准则可以细化为式(3), 对于给定二相码 C_1, C_2, \dots, C_n , 选取 n 个二相码满足多目标函数的约束, 本文将各约束以罚函数形式附加到目标函数中,

$$\begin{aligned} f(C_1, C_2, \dots, C_n) = & \\ & w_1 * \sum_{i=1}^n auto_PSL(i) \\ & + w_2 * (Con2 - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n cross_PSL(i, j)) \\ & + w_3 * (Con3 - \sum_{i=1}^n auto_ISL(i)) \end{aligned}$$

$$+ w4^* (Con4 - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n cross_ISL(i, j)) \quad (3)$$

其中 $Con = [Con2, Con3, Con4]$ 是正常数, 以保证适应度函数中各个约束的非负性, $W = [w1, w2, w3, w4]$ 是自适应尺度因子, $auto_PSL$ 是自相关峰值旁瓣比, $cross_PSL$ 是互相关积分旁瓣比, $auto_ISL$ 是自相关积分旁瓣电平, $cross_ISL$ 是互相关积分能量, 其定义分别如下:

$$auto_PSL(i) = 20 \lg \frac{\max_{|m| < \delta} (X_i(m))}{\max_{\delta < |m|} (X_i(m))}$$

$$cross_PSL(i, j) = 20 \lg \frac{\max_{|m| < \delta} (X_y(m))}{\sqrt{\sum_{m=1}^{p-m-1} X_j(m) X_y^*(m) - (\max_{|m| < \delta} (X_y(m)))^2} / (p-m-2)}$$

$$auto_ISL(i) = \sum_{m=1}^{p-m-1} X_i(m) X_i^*(m) - (\max_{|m| < \delta} (X_i(m)))^2$$

$$cross_ISL(i, j) = \sum_{m=1}^{p-m-1} X_j(m) X_y^*(m) \quad (4)$$

其中 $X_i(m)$ 和 $X_y(m)$ 是对应的非周期自相关函数^[9]和互相关函数。

在执行遗传算法的初始阶段, 目标函数中各个约束的数量级不同, 那么影响数量级较高约束的个体会多次被复制, 反之会过早被舍弃。这种不正常的取舍, 对于个体数目不多的群体尤为严重, 会把遗传算法的搜索引向误区, 过早地收敛于局部最优解。另外本文主要是通过波形优化设计来实现天基 MISO 系统, 所以只要满足一维距离像的主瓣形状和副瓣性能的都可以借鉴。因为对波形设计而言, 主瓣宽度、主副比和信噪比损失是无法兼得的, 所以过分强调主瓣形状或副瓣性能, 都会使另一约束有较大的损失, 为了克服这种缺陷, 我们采用自适应尺度因子 W 加权多约束目标函数, 使各个约束根据要求调整到相应的数量级以优化所需的二相码信号。本文通过训练的方法得到 Con 及 W 。

本文采用 Gradient-GA 来优化正交二相码波形, 用 $\vec{X}(0)$ 表示初始种群, $\vec{X}(k)$ 表示第 k 代种群。则用于波形优化的 Gradient-GA 的过程如下。

Step1 对于 $k=0$ 随机产生初始种群 $\vec{X}(0)$, 并根据式(3)计算对应的适应度值, 构成 $P(0)$ 。其中 $W = W_0 = [1, 1, 1, 1]$;

Step2 从 $P(0)$ 中找出最优适应度值所对应的染色体, 计算该染色体所对应的式(4)的各项值, 估算出适应度函数各个约束的量级 $Q1, Q2, Q3, Q4$, 采用两两相除得到量级间的差值, 根据优化要求自行调整 $Con2, Con3, Con4$ 和 $W = [w1, w2, w3, w4]$, 从而得到本次进化的完整适应度函数, 并根据完整适应度函数重新计

算 $\vec{X}(0)$ 中的所有个体对应的适应度值, 刷新 $P(0)$;

Step3 对于第 k 次进化在 $\vec{X}(k)$ 中按类似梯度的方法复制 M 个母体^[7]:

让 $V^t = \{ \forall v_i^{(v)} \leq v \leq v_i^{(u)} \}$ 成为搜索空间, 其中 $v_i^{(v)}$ 和 $v_i^{(u)}$ 分别是染色体 X 分组译码后 V 的第 i 个元素的下界和上界, n 是 V 的维数。新的复制算子

$$\bar{v}_j(k+1) = v_j(k) + \eta \frac{[f_b(k) - f_j(k)]}{f_b(k)} [v_b(k) - v_j(k)] \quad (5)$$

$$, 1 \leq j \leq M$$

其中 η 是一个正数^[10], $v_b(k)$ 是种群中最大适应度 $f_b(k)$ 对应的最优染色体 $X_b(k)$ 分组译码后的最优值。将矢量 $\bar{V}_j(k+1) (1 \leq i \leq M)$ 编码为 $X_j(k+1)$ 组成下一代进化种群 $X(k+1)$, 其中新的染色体由于上下界的限制不会超出搜索空间。

新的复制算子给当前种群中每一个染色体分配了一个新的参数矢量, 该矢量基于个体和最优染色体之间的归一化适应度差值和参数差值。这个算法实际上就是使种群朝最优染色体靠近, 弱的个体比强的个体得到更多的调整, 个体的复制减少了, 因为只要所有个体不具有相同的适应度就会产生不属于父代的新个体。为了运算成功, 新的参数点在复制过程中不能在搜索空间外发展, 选择 η 在 0 和 2 之间以确保复制算子的稳定性。

Step4 对 Step3 中复制的 M 个母体进行单点随机杂交和变异^[6],

Step5 如果满足停止准则, 则停止, 否则转向 Step3。

则从 $\vec{X}(0)$ 出发, 即得到种群序列 $\{\vec{X}(k); k \geq 0\}$ 的 Gradient GA^[11, 12] 为:

$$\vec{X}(k) = T(\vec{X}(k-1)) = T_m \cdot T_c \cdot T_s(\vec{X}(k-1)) \quad (6)$$

其收敛性分析参见参考文献[10], 其具有与免疫遗传算法^[13]类似的收敛特性, 但初始种群的规模却远远小于免疫遗传算法, 因此整体的运算复杂度有大的降低。

4 仿真实验和性能分析

本文采用仿真生成的杂波数据, 不失一般性, 仿真参数如下: 运动平台速度 $V_a = 7481.5 \text{ m/s}$, 工作波长 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, 相邻孔径中心间距 $d = 29.926 \text{ m}$ (不失一般性, 因为相邻孔径间距都可以粗补偿), 脉冲重复频率 $prf = 5000 \text{ Hz}$, 观测条带中心斜距 $R_s = 979.06 \text{ km}$, 观测条带宽 500 m (为了运算方便, 选取了较窄的观测条带做仿真, 实际中只要距离不模糊的观测条带都适用), 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。 $CNR = 30 \text{ dB}$, $SCR = -6 \text{ dB}$ 。动目标仿真参数如表 1。

表1 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 $V_x/(m/s)$	方位向位置 x_0/m	斜 距 $R/(km)$
1	15	0	100	979.06

仿真实验 1: 用于 3 个卫星的波形优化设计

由 $B_r \times T = 150$ 得 $P = 150$, $\Delta = T/P = 0.01\mu s$, $M = 8$, $p_c = 0.6$, $p_m = 0.1$, 最大进化代数 1000 代。

图 2 是用于二相码波形优化设计的 Gradient-GA 和 CGA 的 100 次独立蒙特卡罗实验最优适应度和平均适应度(种群的整体性能)收敛曲线, 可以看出: Gradient-GA 很快收敛到最优值, 平均适应度随着进化代数增加迅速提高靠近最优适应度曲线并一直接近; 而 CGA 很快收敛到局部最优值, CGA 的平均适应度和最优适应度则逐渐靠近。这些差异是由于采用了类似梯度的复制算子使种群朝最优染色体靠近, 弱的个体比强的个体得到更多的调整, 个体的复制减少了, 这使复制算子保持了种群的多样性, 因此避免了收敛到局部最小值的早熟现象。

图 3 是优化码元 A、B、C 的自相关和互相关特性曲线, 从图 3 可以看出码元 A、B、C 具有很好的自相关

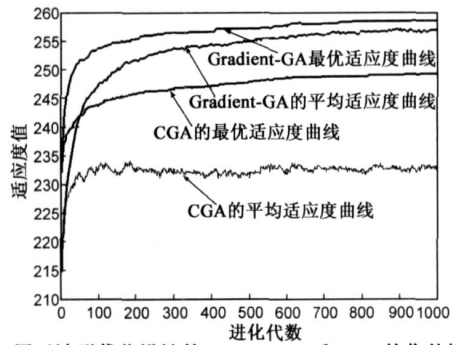


图2 用于波形优化设计的Gradient-GA和CGA的收敛性分析

峰值旁瓣电平和积分旁瓣电平, 而从码元 A、B、C 的互相关系数曲线可以看出基本没有主瓣突出, 而且旁瓣也尽可能的低, 自相关函数积分旁瓣电平达到 40dB 以上, 峰值旁瓣电平 15dB 左右, 互相关函数积分旁瓣电平主副比达到到 40dB 以上。图 4 是回波分离后一维距离像的性能图, 可以看出混合后的回波经 600 阶失配滤波器滤波后的主副比分别为: 22.3119dB、22.1824dB、23.0768dB。该方法设计结果在一定的多普勒范围内, 与匹配滤波相比, 能达到 10dB 以上的主副比改善, 且主瓣宽度展宽不大, 信噪比损失小于 0.6dB, 所采用的失配滤波器系数产生方法见参考文献[14]。

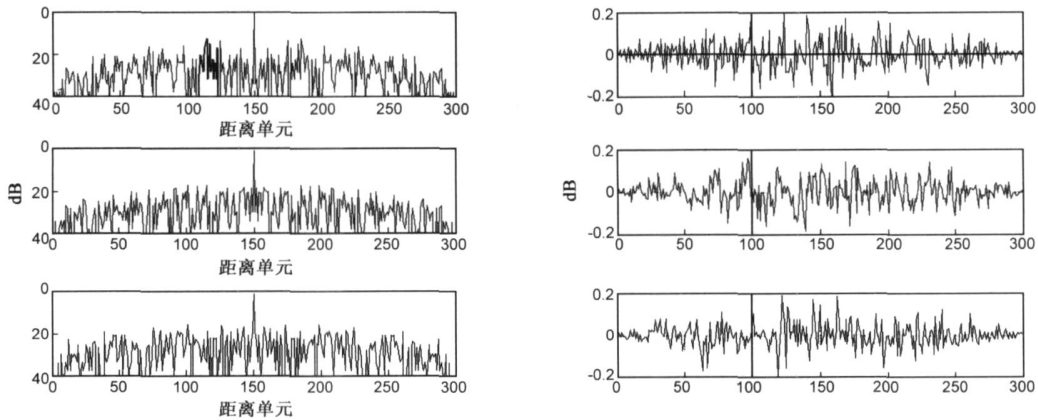


图3 优化所得码元A、B、C的自相关和互相关特性曲线

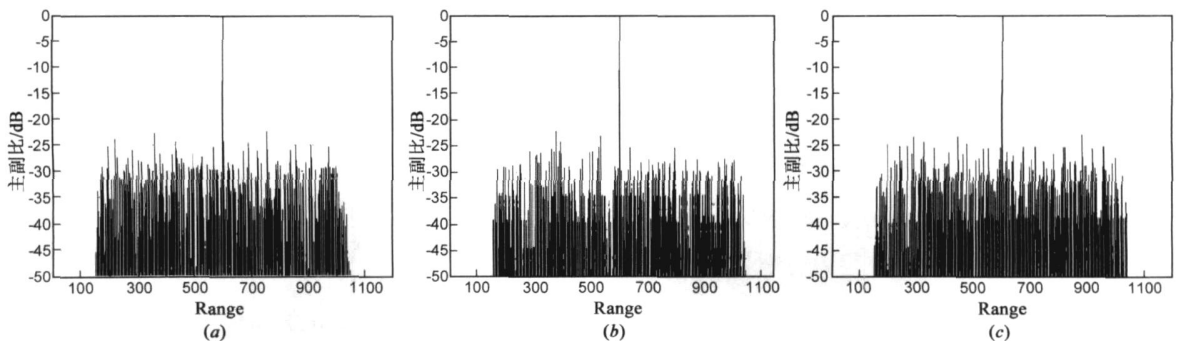


图4 回波分离后一维距离像的性能图

仿真实验 2: 基于波形优化结果的 SAR-GMTI 实验

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 图像如图 5~ 图 7 所示, 联合像素杂波相消后的图像如图 8 所示。其中横向为方位, 纵向为距离, 图 9 是杂波抑制后动目标所在距离门的图像。图 10 是动目标检测的改善因子曲线, 可以看出, 基于 Gradient-GA 优化的多发射波形分别成像后, 用基于图象域的多通道、多像素二维联合自适应处理算法能够有效的抑制地杂波显示动目标, 其改善能力可达到 25dB。

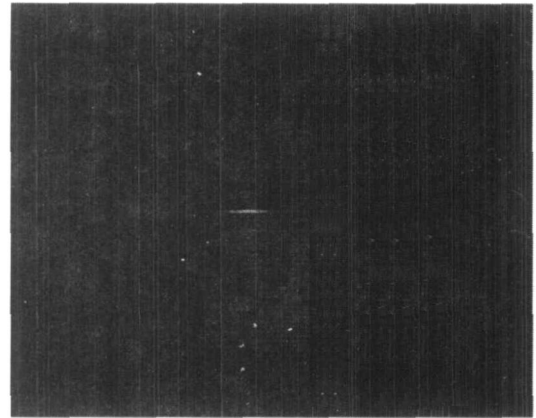


图8 杂波相消后的图像

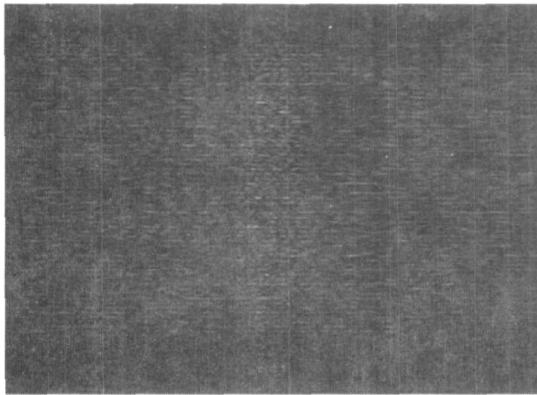


图5 卫星1发射信号的SAR图像

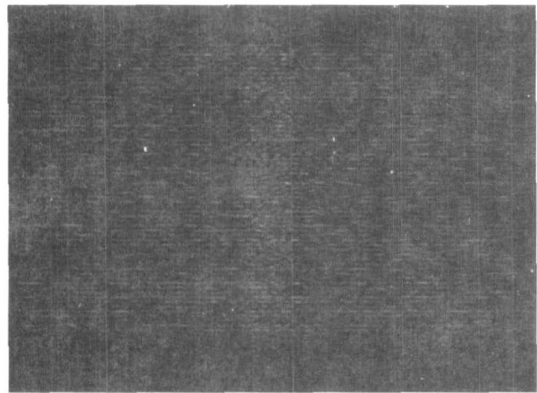


图6 卫星2发射信号的SAR图像

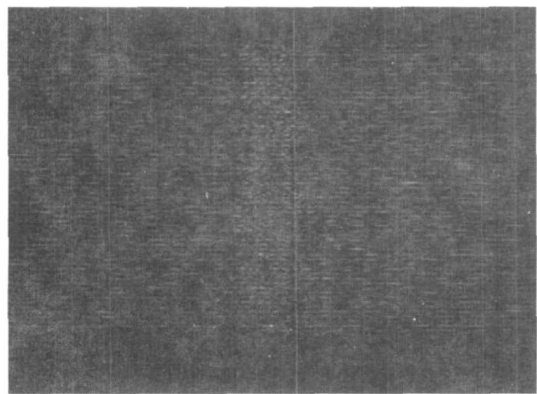


图7 卫星3发射信号的SAR图像

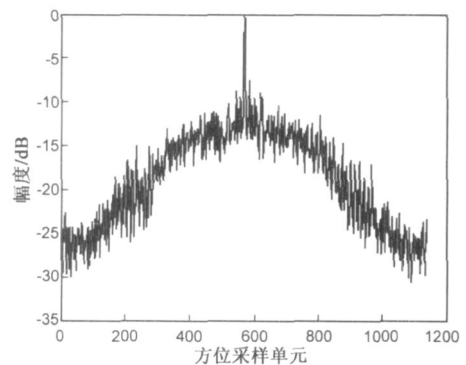


图9 动目标所在距离门的图像

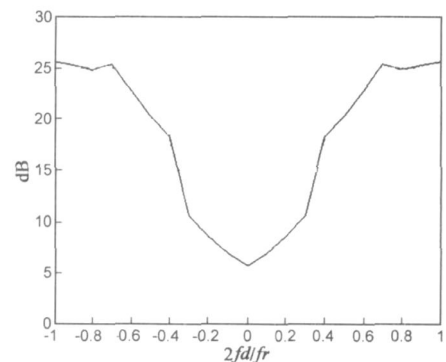


图10 改善因子

5 结论

本文针对分布式小卫星多发单收雷达系统的地面运动目标检测, 给出了一种新的基于多发射正交编码信号的单接收 GMTI 处理系统体制, 提出了一种新的基于 Gradient-GA 的多发射波形二相编码信号的优化设计, 该方法利用调整波形的信号处理方法和优化设计波形可以改进互相关旁瓣电平。不同卫星发射不同波形, 在接收卫星上将回波信号分别和各个发射信号匹配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地面运动目标检测, 这样就不存在多颗卫星之间的数据传送问题, 也大大提高了整个系统的实

时处理性能. 波形正交性、算法收敛性、杂波相消以及目标检测方面的仿真结果和性能分析验证了该系统和相应算法的可行性和有效性.

参考文献:

- [1] Gamham John, Wainwright Ross, Burns Rich. Enabling research and development for flight demonstration of sparse aperture sensing [A]. AIAA Space 2001 Conference and Exposition [C]. Albuquerque, New Mexico: AIAA, 2001. 1- 10.
- [2] Merrill I Skolnik. Radar Handbook Second Edition [M]. 王军, 林强, 米慈中, 等译. 北京: 电子工业出版社. 395- 399.
- [3] 刘永坦. 雷达成像技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社. 1999, 10. 166- 171.
- [4] Yang Yang, Rick S Blum. Minimax robust MIMO radar waveform design [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 147- 155.
- [5] Jian Li, Luzhou Xu, Petre Stoica, Keith W Forsythe, Daniel W. Bliss range compression and waveform optimization for MIMO radar: a Cramér Rao bound based study [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(1): 218- 232.
- [6] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. Ann Arbor, MI: Univ, MichiEAn Press, 1975. 20- 25.
- [7] Pham D T, G Jin. Genetic algorithm using gradient like reproduction operator [J]. IEEE Electronics letters, 1995, 31(18): 1558- 1559.
- [8] Zhenfang Li, Zheng Bao, Hai Li, Guisheng Liao. Image autocoregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection [J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44(2): 288- 297.
- [9] Somaini U. Binary sequences with good autocorrelation and cross correlation properties [J]. IEEE Transactions on AES, 1975, 11(6): 1226- 1231.
- [10] 陶海红, 廖桂生, 王伶. 用于杂波抑制滤波器优化设计的混合遗传算法及其收敛性分析 [J]. 电子学报, 2004, 32(12): 2086- 2089.
- Tao Haihong, Liao Guisheng, Wang Ling. Hybrid genetic algorithm for optimal design of clutter rejection filter and its astringency analysis [J]. Acta electronica sinica, 2004, 32(12): 2086- 2089. (in Chinese)
- [11] Papoulis Athanasios, Unnikrishna S Pillai. Probability, Random Variables and Stochastic Processes [M]. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Inc, 2002. 696- 709.
- [12] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000. 93- 96.
- [13] 陶海红, 于江, 王洪洋, 廖桂生. 基于 IGA-ML 的星载天线抗干扰技术 [J]. 中国科学 E 辑 信息科学, 2005, 35(2): 124- 134.
- Tao Haihong, Yu Jiang, Wang Hongyang, Liao Guisheng. A novel space borne antenna anti-jamming technique based on immunity genetic algorithm maximum likelihood [J]. Science in China, Series E: Information Sciences, 2005, 35(2): 124- 134. (in Chinese)
- [14] Baden J M, Cohen M N. Optimal peak side lobe filters for bi-phase pulse compression [A]. Radar Conference. 1990, Record of the IEEE, 1990 International [C]. Arlington, VA, USA: IEEE, 1990. 249- 252.

作者简介:



陶海红 女, 1976 年出生, 安徽省亳州市人, 西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室教授, 博士. 从事信号与信息处理的研究与教学工作, 主要研究方向为信号波形优化设计和自适应波束形成及智能方法在信号处理上的应用.

E-mail: hhtao@xidian.edu.cn

黎薇萍 女, 1985 年 12 月出生, 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: liweiping@mail.xidian.edu.cn