

doi: 10.7690/bgzd.2014.09.019

多频无线电引信速度补偿算法研究

胡秀娟¹, 邓甲昊², 计春雷¹

(1. 上海电机学院电子信息工程学院, 上海 200240; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 针对多频无线电引信中子脉冲回波的相位变化会造成距离像输出产生误差的问题, 提出一种实现多频无线电引信距离像速度补偿的方法。通过建立速度补偿准则, 给出一次相位项和二次相位项变化时一维距离像不失真条件, 将波形熵与免疫克隆选择算法进行结合, 以波形熵为搜索的亲密度函数, 以速度补偿准则为约束条件, 采用免疫克隆选择算法完成搜索, 消除径向相对速度对一维距离像的影响, 并对速度补偿算法进行仿真。仿真结果表明: 与传统的时域相关法相比, 该算法提高了补偿精度, 同时降低了对采样点数的依赖性, 可实现全局搜索, 具有较好的收敛性。

关键词: 无线电引信; 速度补偿; 波形熵; 免疫克隆选择算法; 距离像

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Multi Frequency Radio Fuse Velocity Compensation Algorithm

Hu Xiujuan¹, Deng Jiahao², Ji Chunlei¹

(1. School of Electronics & Information Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The phase change of sub-pulse echo in multi frequency radio fuse causes range profile output error, and put forwards a method of multi frequency radio fuse range profile velocity compensation method. Through building velocity compensation rule that is when once term and quadratic term change the range profile is not distorted. The waveform entropy and immune clone selection algorithm are united. Waveform entropy as fitness function and velocity compensation rule as constraint conditions. Use immune clone selection algorithm completes searching in order to eliminate the influence of radial velocity on the range profile and achieve velocity compensation of multi frequency radio fuse range profile. The simulation results show that: compared with the traditional time domain correlation method, this algorithm can improve the compensation precision, reduce the dependence on sampling points, realize global search and has great convergence.

Keywords: radio fuse; velocity compensation; waveform entropy; immune clone selection algorithm; range profile

0 引言

多频无线电引信要用到不同周期子脉冲的相位信息, 而目标在各个周期内的运动会使子脉冲回波的相位发生变化。相位的变化对子脉冲本身没有影响, 但是在后面的合成处理中会破坏脉冲序列的相位关系, 造成距离像输出产生误差, 影响检测效果。

目前, 速度补偿方法很多, 主要方法有时域互相关法、频域互相关法、循环补偿法、最小波形熵法等^[1-5]。同时见诸文献的也有其他很多方法, 但大多由上述方法衍生而来^[6-13]。时域互相关法是利用两组回波数据互相关函数, 求出目标在两帧之间的走动距离, 进而利用走动距离和目标速度之间的关系来估计目标速度的, 在速度估计范围内, 该方法能够获得较好的速度估计值, 并具有较好的抗噪声和杂波干扰; 缺点是受逆快速傅里叶变化长度的影响较大, 虽然能通过补零来减小估计误差, 但付出的代价却是增大系统的计算量。频域互相关法是基于两组回波数据互相关函数在零时刻的值建立目标

速度估计模型, 速度补偿精度较高; 但不模糊测速范围小, 仅适用于径向相对运动速度小的交会情况。循环补偿法则是假定速度在给定的区间变化的条件下, 对一维距离像进行速度补偿的一种方法, 该方法的目标函数是信噪比, 在循环结束后, 比较目标函数的值, 选出该函数值最大的距离像作为输出, 速度精确估计值, 依赖于速度步进量; 缺点是不但要受速度跳变量大小的限制, 还要受所需补偿速度值是否为速度跳变量的整数倍的影响。最小波形熵法是一种闭环迭代算法, 将衡量随机变量不确定性的熵引申用于衡量一个信号的能量沿其参数轴的分散程度, 并定义一个波形熵, 在速度轴上搜索该波形熵的全局最小值对应的运动参数值, 即目标的运动参数, 估计精度随信噪比的降低而明显降低; 不足之处是计算量大, 实时性较差, 且存在局部最小值。基于此, 笔者提出一种以波形熵为搜索的亲密度函数, 以实现多频无线电引信距离像速度补偿。该算法具有较好的收敛性, 搜索速度较快, 可较好

收稿日期: 2014-03-23; 修回日期: 2014-04-21

作者简介: 胡秀娟(1978—), 女, 博士, 副教授, 从事雷达信号处理、无线电探测、数字图像处理研究。

地满足实时性要求。同时，算法的精度较传统的时域互相关法有所提高，可实现对目标的精确打击。

1 速度补偿准则的建立

由于径向相对速度的存在导致距离像的时移和能量扩散，信噪比降低。因此，要对傅里叶变换结果进行速度补偿。在进行速度补偿前，笔者先讨论基于满足精度要求的速度补偿准则。

假定径向相对速度为 v_r ，频率跳变量为 Δf ，初始频率为 f_0 ，一个大周期内脉冲个数为 N ，脉冲重复周期为 T_r ，电磁波真空中的传播速度为 c ，则回波走动的高分辨距离单元数为 $2v_r NT_r/c$ 。一次相位变化主要产生耦合距离误差，其大小为

$$R_c = \frac{v_r T_r f_0}{\Delta f} \quad (1)$$

相应的回波延时误差为 τ_c ，即：

$$R_c = \frac{c\tau_c}{2} \quad (2)$$

式中 $\tau_c = \frac{(f_0/\Delta f)T_r \cdot 2v_r}{c}$ 。

当对采样序列进行补偿时，若以距离走动不超过半个高分辨距离单元为条件，则

$$\Delta R_c \leq \frac{1}{2} \Delta r \quad (3)$$

式中： $\Delta R_c = \frac{c\Delta\tau_c}{2} = (f_0/\Delta f)T_r \cdot \Delta v$ ； $\Delta r = \frac{c}{2N\Delta f}$ 。

可见，为获得半个距离单元的测距误差，测速误差 Δv_{r1} 需满足：

$$|\Delta v_{r1}| \leq \frac{c}{4Nf_0 T_r} \quad (4)$$

上式为对一次相位项进行补偿的最大速度变化单元。

若以相参处理间隔 NT_r 内二次相位项相位变化不超过 $\pi/2$ 为合成像不失真条件，则测速误差 Δv_{r2} 应满足如下关系：

$$\left| 2\pi N \Delta f \cdot \frac{2\Delta v_{r2} \cdot NT_r}{c} \right| \leq \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

即：

$$|\Delta v_{r2}| \leq \frac{c}{4N^2 \Delta f T_r} \quad (6)$$

2 速度补偿算法描述

2.1 算法实现原理分析

假设离散化信号波形序列为 $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ ，令

$$\|X\| = \sum_{l=1}^N |x_l|, \quad p(l) = \frac{|x_l|}{\|X\|}, \quad \sum_{l=1}^N p(l) = 1。$$

借用统计学中概率的含义，把一维距离像中每个点组成的集合看作一个样本空间， p_l 则表示距离像中每一点出现的概率，则 X 的熵定义为 $E(X) = \sum_{l=1}^N p(l) \cdot \log p(l)$ 。

显然，对于一个波形，若能量在一定范围内均匀分布，则波形熵最大；反之，若仅少数采样点处能量较大而其余采样点处能量较小，即波形锐化度较高，则波形熵较小。

对于多频无线电引信脉冲信号，径向相对速度越大，合成距离像的失真越严重，表现为主瓣脉冲展宽、旁瓣电平抬高、波形趋于平坦，则波形熵越大。相反，弹目相对速度越小，合成距离像的失真越小，波形锐化度越高，波形熵越小；所以，当误差为零时波形熵达到最小，此时得到的速度估计值为最佳速度补偿值。

定义搜索径向运动参数的免疫克隆算法的亲合度函数为 $f(dv, da) = -E(dv, da)$ ，其中， $E(dv, da)$ 是目标回波信号的波形熵，它是速度误差估计 dv 和加速度误差估计 da 的函数。

如图1所示，免疫克隆选择算法流程为：

第1步，初始化个体。假设有 N 个采样值，当 $k=0 (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$ ，按照输入码书的索引值，产生1个初始化个体 $A(0)$ ；

第2步，初始化种群。由 $A(0)$ 通过变异产生第1代种群 $A_1(0), A_2(0), \dots, A_M(0)$ ，其中 M 为种群规模；

第3步，计算各种群个体的亲合度，将其值从大到小排列，且将 N 个亲合度值最大的个体放入记忆库中；

第4步，从记忆库中取出经第3步排序后的 N 点采样值，对其进行克隆复制，亲合度值最大的个体克隆的个数也相应最多，然后根据亲合度值从大到小排序；

第5步，将克隆的个体进行变异，从而获得新的抗体群落 $A(k)$ ；

第6步，计算个体之间的亲合度，在个体之间相似度超过阈值 T_r 的个体中只保留亲合度值最高的1个个体(克隆选择)，其余从种群中排除(克隆抑制)，然后重新排序，并用亲合度最高的 N 个个体替代原记忆库中的个体(亚动力过程)；

第 7 步，在满足引信实时性要求和速度补偿准则的指导下，判断是否满足速度补偿精度要求，如果不满足精度要求，则重复执行第 2 步至第 6 步；如果满足速度补偿精度要求，则搜索结束。

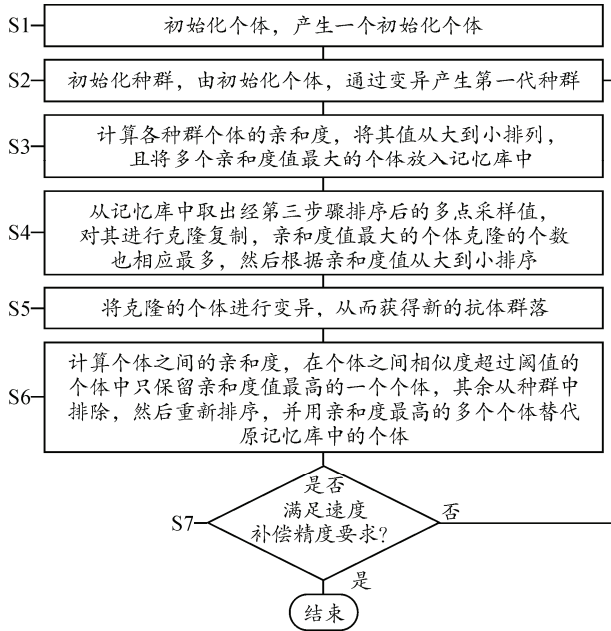


图 1 速度补偿算法流程

2.2 算法特征分析

为实现多频无线电引信距离像的速度补偿，并满足补偿精度和实时性要求，所提出的算法主要技术特征如下：

1) 结合克隆选择、免疫、最小波形熵思想，以最小波形熵为亲和函数，速度补偿准则为约束条件，免疫科隆选择进行局部、全局搜索，实现距离像速度补偿；

2) 在结构上采用“初始种群产生—亲和度函数评价—种群个体信息交换—新种群产生”的循环过程，以寻求速度估计的最优解，较好的群体多样性使群体中的某些个体能够跳出局部最优，更有效地达到全局最优解；

3) 设置了速度补偿准则，即设置了对一次相位项进行补偿的最大速度变化单元、二次相位项相位变化不超过 $\pi/2$ 时一维距离像不失真条件；

4) 加入了克隆选择因子，对速度信息集合进行选取，可以得到充分体现速度信息的最小集合，减少了运算量，同时搜索解空间中一系列的点，这使得它的搜索速度大大加快；

5) 该速度补偿方法是通过回波采样空间的扩张和压缩，将局部搜索和全局搜索结合起来实现问题的求解，即将 1 个低维的问题转化到更高维空间

(扩张)去解决，然后将结果投影到低维空间(压缩)中，从而获得对问题更全面的认识，克服了传统方法搜索范围小的缺点；

6) 引入了克隆选择扩增、克隆删除、克隆变异等思想，这不仅使亲合度高的优秀抗体能够获得较大的克隆规模，提高了速度补偿精度，而且能加快方法的收敛速度，更好地满足引信实时性要求。

3 计算机仿真实验验证

3.1 实验分析

假设 $N=256$, $f_0=3\ 000\ \text{MHz}$, $\Delta f=1.0\ \text{MHz}$, $T_r=180\ \mu\text{s}$, 目标距离 $R_0=200\ \text{m}$, 背景噪声为零均值高斯白噪声, 信噪比为 13 dB, 杂波为韦伯分布, 信杂比为 35 dB, 目标具有 10 个强散射点。

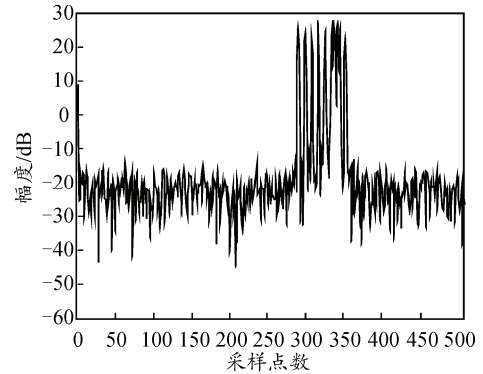


图 2 理想条件下距离像

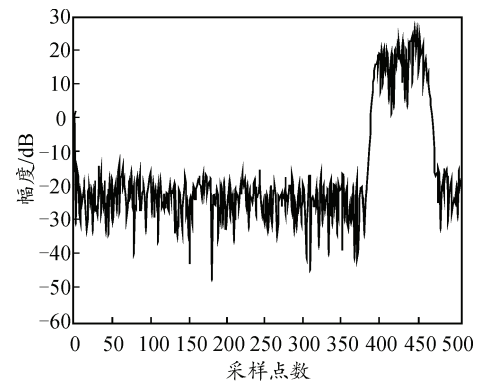


图 3 未补偿距离像

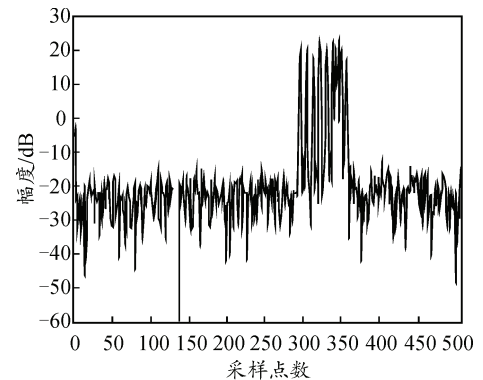


图 4 补偿后距离像

当径向相对速度为零时，对回波直接进行距离成像，所得结果如图 2 所示，当径向相对速度为 2 马赫时，得到的距离像如图 3 所示。以图 2 的波形熵为亲和函数，进行 300 次迭代，得到速度估计值，对图 3 进行速度补偿，补偿后的距离像如图 4 所示，估计误差为 0.1 m/s。

3.2 性能分析

对该算法的收敛性进行计算机仿真分析，如图 5 所示。结果表明该算法随着迭代次数的增加，路径长度减小，具有较好的收敛性。

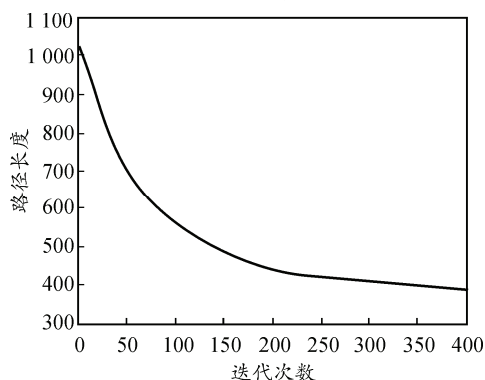


图 5 收敛结果

通过大量的仿真实验验证，考察当信噪比、信杂比、迭代次数不变的情况下，得到速度估计误差与采样点数 N 的关系曲线，如图 6 所示。由该曲线可知，速度估计误差随着采样点数的增加而减小。因此，可通过增加采样点数的方法来提高速度补偿的精度，但随着采样点数增加到一定程度后，速度估计误差减小量明显缩减。

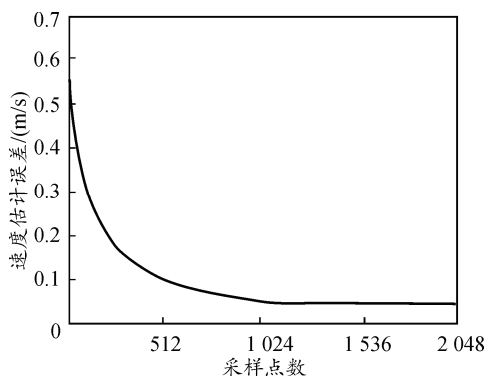


图 6 采样点数对速度估计的影响

3.3 对比分析

当采样点数为 512 时，时域互相关法速度补偿的结果如图 7 所示，与图 4 比较可知，2 种方法的速度补偿误差基本相同，即 0.1 m/s。当采样点增加时，时域互相关法速度补偿的结果如图 8 所示，文中提出算法所得结果如图 9 所示，该算法得到的

精度较高，且速度补偿误差为 0.08 m/s。

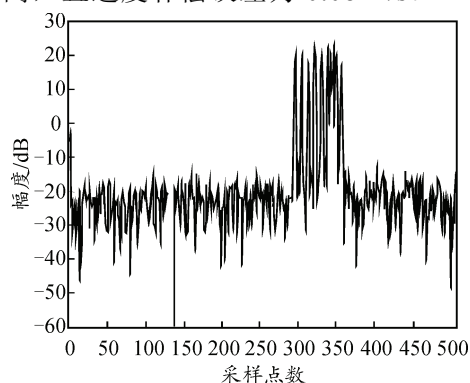


图 7 采用时域互相关法补偿后的距离像(512 点)

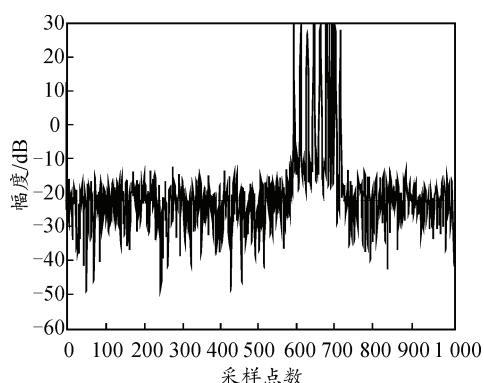


图 8 采用时域互相关法补偿后的距离像(1 024 点)

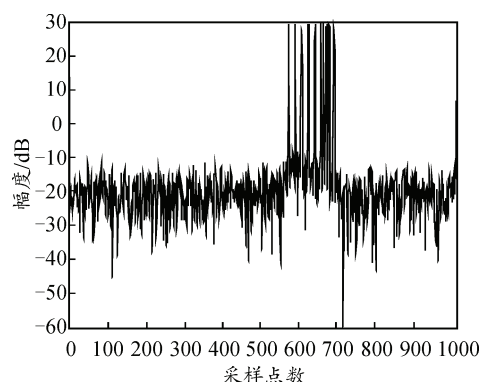


图 9 采用文中算法补偿后的距离像(1 024 点)

4 结论

笔者提出以波形熵为搜索的亲和度函数，并以速度补偿准则为约束条件，采用免疫克隆选择算法完成搜索，实现了多频无线电引信距离像速度补偿。仿真结果表明：该算法具有较好的收敛性，搜索速度较快，可较好地满足实时性要求。同时，算法的精度较传统的时域互相关法有所提高，可实现对目标的精确打击。

参考文献：

[1] Otten M P G. Motion compensation in a time domain SAR processor[C]// Radar Conference. 1992: 403-406.