

文章编号: 2095-4980(2023)10-1230-09

基于参数匹配的调频连续波干扰抑制方法

麦超云¹, 黄传好^{1,2}, 向洪², 刘子明^{1,2}, 曾军英¹, 秦传波¹, 王占^{1,2}

(1.五邑大学 智能制造学部, 广东 江门 529020; 2.北京航空航天大学 杭州创新研究院, 浙江 杭州 310051)

摘要: 随着线性调频连续波(FMCW)车载雷达的广泛应用, 同一个场景下若干个雷达的相互干扰可能导致传感器灵敏度降低, 甚至虚警。针对该问题, 提出一种基于量子遗传和中心值匹配相结合的干扰抑制方法。该方法首先将发射波形和干扰信号的互相关函数作为目标函数, 通过量子遗传算法进行波形参数优化, 在约束范围内得到互相关最小的工作参数, 然后基于这个参数生成发射波形, 最后根据干扰信号参数, 通过中心值匹配的方法选择合适的工作雷达参数, 实现自适应干扰抑制。仿真结果表明, 该方法可以以较低的计算量达到良好的干扰抑制结果。

关键词: 调频连续波雷达; 干扰抑制; 智能算法; 中心值匹配; 量子遗传; 互相关函数

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021276

A method for suppressing FMCW interference based on parameter matching

MAI Chaoyun¹, HUANG Chuanhao^{1,2}, XIANG Hong², LIU Ziming^{1,2}, ZENG Junying¹,
QIN Chuanbo¹, WANG Zhan^{1,2}

(1.Intelligent Manufacturing Department, Wuyi University, Jiangmen Guangdong 529020, China;

2.Hangzhou Innovation Research Institute, Beihang University, Hangzhou Zhejiang 310051, China)

Abstract: With the wide application of Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW) on-board radar, the mutual interference of several radars in the same scene may lead to the decrease of sensor sensitivity and even false alarm. To tackle with this problem, an interference suppression method based on quantum genetic and center value matching is proposed. Firstly, the cross-correlation function of the transmitted waveform and the jamming signal is taken as the objective function, and the waveform parameters are optimized by Quantum Genetic Algorithm(QGA) to obtain the working parameters with the minimum cross-correlation within the constraint range. Then, the transmitted waveform is generated based on these parameters. Finally, according to the parameters of the jamming signal, the appropriate working radar parameters are selected by the center value matching method, realizing adaptive interference suppression. Simulation results show that this method can achieve good interference suppression results with low computation complexity.

Keywords: Frequency Modulated Continuous Wave radar; interference suppression; intelligent algorithm; center value matching; Quantum Genetic Algorithm; cross correlation function

随着自动驾驶和物联网等不同应用领域的传感设备数量的增加, 雷达传感器的数量也在增加^[1]。因为它们具有全天候昼夜功能, 在大多数情况下, 由于频谱分配的原因, 这些雷达传感器必须在相同或相近的频带内工作, 并且工作时有可能靠近其他雷达或收发器。在这种情况下, 多个雷达位置非常接近, 容易产生相互干扰, 导致目标的漏检甚至出现虚警^[2-3]。因此, 干扰抑制对于雷达传感器发送与接收连续且正确的信息流至关重要。

目前克服干扰处理主要集中在信号的产生、传输、接收处理3个阶段^[4-5]。信号的产生阶段生成的波形具有很好的抗干扰效果; 在传输阶段, 主要对信号进行编码等处理, 提高所传输信号本身的抗干扰能力; 在信号接收处理阶段, 提高信号处理算法的速度和准确度。

由于相位编码可以用来减少附近雷达之间的干扰, 学者对相位编码波形的使用越来越感兴趣, 文献[6]提出了一种不需要任何先验知识, 也不需要检测干扰的相位编码技术。学者 F Uysal^[7]首次在 FMCW 汽车雷达系统中

实现了单次发射 chirp 波形的多位编码，讨论了相位编码调频连续波雷达的传感特性，指出了瞬时相位变化对雷达的影响，最后提出了一种由抑制滤波和信号恢复 2 步组成的智能滤波方法，提高了传感器的性能。浙江大学的陈积明团队^[8]针对 77 GHz FMCW 毫米波雷达的干扰抑制问题，于 2020 年提出了一种基于车载自组织网络正交匹配追踪 (Vehicular Ad hoc NETwork, VANET) 的雷达干扰抑制方法。Correas-Serrano 提出一种利用快速 OMP (Orthogonal Matching Pursuit) 算法^[9]将干扰信号投影到一个缩减的 Chirplet 基上，并以最小的信息损失将干扰信号从目标信号中分离出来的技术，可以显著地降低噪声和干扰水平。针对在同一频段内时，不同的汽车雷达之间产生的相互干扰不能通过频率或极化分集轻易降低问题，Zhihuo Xu 和 Quan Shi^[10]提出一种新的正交噪声波形来减少这种相邻干扰。首先，利用优化的 Kaiser 函数定义了所提出波形的谱密度分布函数。随后，将噪声波形的相位表示为相位恢复问题，由于非均匀解的存在，该方法能够产生具有良好随机相位分集的正交信号。

上述方法在干扰抑制方面，需要调制发射波形或者需要较高的计算复杂度，较难适应现有的车载雷达实时处理系统。文献[11]提出一种在不改变调制方式的条件下调整波形参数使得工作波形与干扰信号尽可能非相关，并通过粒子群算法获取最优参数值的方法。为了提高参数搜索能力，需要收敛速度更快的算法，量子遗传算法将量子的态矢量表达引入遗传编码，利用量子逻辑门实现染色体的演化，达到了比常规遗传算法更好的效果，文献[12]提出一种基于量子遗传算法优化 MIMO 雷达正交波形的设计，降低不同目标回波之间的干扰。

本文提出了一种基于量子遗传智能优化算法^[13-14]和中心值匹配的 FMCW 雷达干扰抑制方法。该方法将发射波形与接收信号相结合，首先在载频和调频约束范围内，通过量子遗传算法将发射波形和干扰信号的自相关函数作为目标函数，计算出对应的载频和调频斜率，作为工作雷达的初始工作参数；然后将接收机的干扰信号参数与划分的中心值进行匹配，最快获得工作雷达在干扰下的工作参数。该方法只需用智能优化算法计算一次获得最优工作参数，避免每次接收都采用优化算法计算发射端波形参数与接收端的互相关值，提高了实时处理。为了验证所提方法的有效性，本文采用蒙特卡洛实验，仿真结果表明，该方法可以较快得到干扰抑制的结果。

1 信号模型

调频连续波雷达系统框图如图 1 所示。波形发射机产生 FMCW 激励波形，同时给接收机提供相干本振信号。在对下变频正交接收信号进行采样后，应用快速傅里叶变换并在频域中处理信号，消除干扰后并采用恒虚警(Constant False-Alarm Rate, CFAR)算法检测目标。

发射信号为频率线性增加的 FMCW 信号，其表达式如下：

$$s_T(t) = \text{Re} \{ e^{j2\pi(f_c + \alpha/2)t} \} = \cos \left(2\pi \left(f_c + \frac{\alpha}{2} t \right) t \right) \quad (1)$$

式中： f_c 为中心频率； α 为调频斜率。多个目标接收到的信号可以描述为：

$$s_R(t) = \sum_{m=1}^M A_m s(t - \tau_m) + \omega(t) \quad (2)$$

式中： M 为目标的个数； A_m 、 τ_m 分别为第 m 个目标的衰减系数和时延； $\omega(t)$ 为加性高斯白噪声信号，将发射信号与接收信号进行混频即可得到拍频信号：

$$s_b(t) = \sum_{m=1}^M A_m e^{j2\pi(f_{bm}t + \phi_m)} + n(t) \quad (3)$$

式中： f_{bm} 、 ϕ_m 分别为目标发送和接收信号之间的拍频和相位； $n(t)$ 为加性高斯白噪声。

FMCW 雷达发射和接收的基本波形为锯齿波或三角波，三角波如图 2 所示。该波形由一个上升斜坡和一个下降斜坡组成，每个斜坡中可用的拍频用

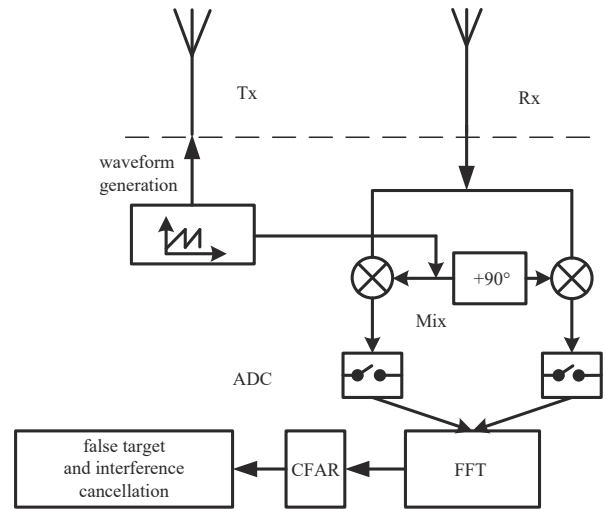


Fig.1 Diagram of FMCW radar
图 1 调频连续波雷达系统框图

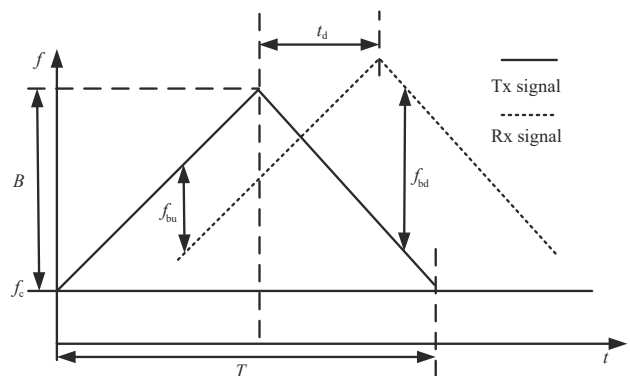


Fig.2 Basic waveform of FMCW radar
图 2 FMCW 雷达基本波形

f_{bu} 和 f_{bd} 表示。发射信号和接收信号之间的时延用 t_d 表示, f_d 为目标相对速度引起的多普勒频率。波形带宽、一个斜坡周期和载波频率分别用 B 、 T 和 f_c 表示。每个斜坡的拍频 (f_{bu}, f_{bd}) 可以用距离 R 以及目标的相对速度 v 表示, 即:

$$\begin{cases} f_{bu} = f_r - f_d = t_d \times \frac{B}{T} + 2 \times \frac{v}{c} f_c = \frac{2R}{c} \times \frac{B}{T} + 2 \times \frac{v}{c} f_c \\ f_{bd} = f_r + f_d = t_d \times \frac{B}{T} - 2 \times \frac{v}{c} f_c = \frac{2R}{c} \times \frac{B}{T} - 2 \times \frac{v}{c} f_c \end{cases} \quad (4)$$

如果只存在一个目标, 可以使用式(4)得到目标的精确距离和相对速度。在多目标情况下, FMCW 雷达探测目标的过程可分为 2 步: 第 1 步, 获得目标发射和回波信号之间的上下拍频 (f_{bu}, f_{bd}); 第 2 步, 通过拍频等由式(5)确定目标的距离 R 和相对速度 v 。

$$\begin{cases} R = -f_c \times \frac{T}{B_1} v + f_{bu} \times \frac{cT}{2B_1} \\ R = f_c \times \frac{T}{B_2} v + f_{bd} \times \frac{cT}{2B_2} \end{cases} \quad (5)$$

如果在理想环境中, 线性调频毫米波雷达可以准确地获取目标的距离、速度, 但随着汽车雷达越来越普及, 拥挤不堪的电磁场将变成一个电子战场, 汽车雷达通常会遭受拒绝式或欺骗式干扰。拒绝式干扰是当干扰雷达与目标雷达的调频斜率不同时, 在时域中产生脉冲干扰状信号, 对应于频域则会抬高频谱中的底噪, 造成目标的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)降低, 经过 CFAR 之后目标检测的概率降低。欺骗式干扰是当干扰雷达与目标雷达的调频斜率相同时, 干扰信号与目标雷达发射信号混频之后, 能够被低通滤波器通过, 中频信号在频谱中出现虚假目标的幅值, 工作雷达出现虚警。

2 基于量子遗传算法与中心值匹配干扰抑制方法

为了应对拒绝式或欺骗式干扰, 本文提出一种基于量子遗传算法和中心值匹配的干扰抑制方法。根据工作雷达载频和调频斜率可设定的范围, 将载频与调频斜率分为若干区间。车载雷达工作时, 短时间内仅接收外部干扰信号, 按照可行的频段将干扰信号参数划分到载频和调频斜率的区间。通过量子遗传算法计算发射波形与干扰信号的互相关值, 其中该部分舍弃量子遗传算法大量时间运算得到的最优值, 而是将每一代优化迭代后获取的自变量规划到预定的区间, 直接取其中心值作为自变量参与下一次优化, 多次训练之后, 下次获得干扰信号时, 直接将其匹配到划分的区间, 匹配该区间最好的工作参数, 生成发射波形。

2.1 波形优化基本思路

通过优化算法搜索与干扰波形相关度最低的波形参数, 生成最优工作波形。波形优化的基本思路是在不改变调制方式的条件下, 通过调整波形工作参数(调频斜率和载频), 使得雷达工作范围内波形与干扰信号尽可能非相关, 混频结果趋于平稳, 从而结合干扰抵消方法实现干扰抑制^[11]。

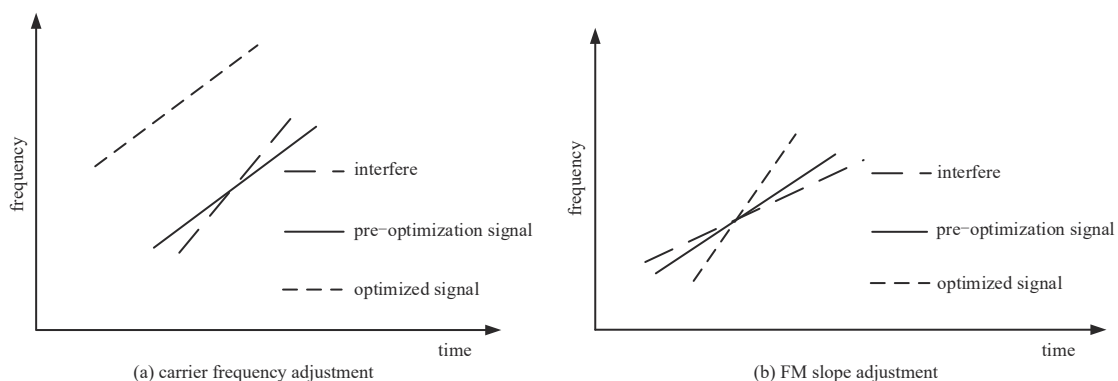


Fig.3 Example of waveform parameter optimization

图3 波形参数优化示例

图 3 为通过调整波形参数对信号进行优化的例子。图 3(a)的情况主要调整载频, 使信号与干扰在同一时刻的频率不重叠。在可用频段允许的情况下, 调制工作雷达载频, 减少信号与干扰的相关性。图 3(b)的情况主要调整

调频斜率，当调频斜率差距增大时，波形间的相关度减少，混频结果趋于平稳，可通过去噪方法进行干扰消除^[15-16]。

2.2 量子遗传算法(QGA)

为了在调频斜率和载频约束下求得最优值，需要用到一些智能优化算法。由于遗传算法存在耗时长和容易陷入局部极值等缺点，本文采用QGA求解目标函数。QGA将量子的态矢量表达引入遗传编码，利用量子逻辑门实现染色体的演化，达到了比常规遗传算法(GA)更好的效果。工作雷达在发射信号之前仅处于接收状态，通过选择与干扰相关度最低的波形参数自适应生成发射波形。该过程主要利用量子遗传智能优化算法，将工作雷达的载频与调频斜率作为约束条件，以工作雷达发射信号与干扰信号互相关建立目标函数，其形式如式(6)所示。

$$\begin{cases} R_{xy}(\tau) = \sum_{-\infty}^{\infty} s(t)i(t+\tau) \\ \text{s.t. } f_{c-low} \leq f_c \leq f_{c-high}, \alpha_{low} \leq \alpha \leq \alpha_{high} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $s(t)$ 为工作信号； $i(t)$ 为干扰信号； f_{c-low} 和 f_{c-high} 分别为工作雷达载频可达最低和最高范围； α_{low} 和 α_{high} 分别为调频斜率可达最低和最高范围； t 为时间； τ 为时间间隔； $R_{xy}(\tau)$ 为信号互相关函数。将初始条件代入目标函数，在约束条件内使目标函数最小的自变量取值作为最优解，求取在可行范围内自变量载频和调频斜率最优值。其流程如图4所示。

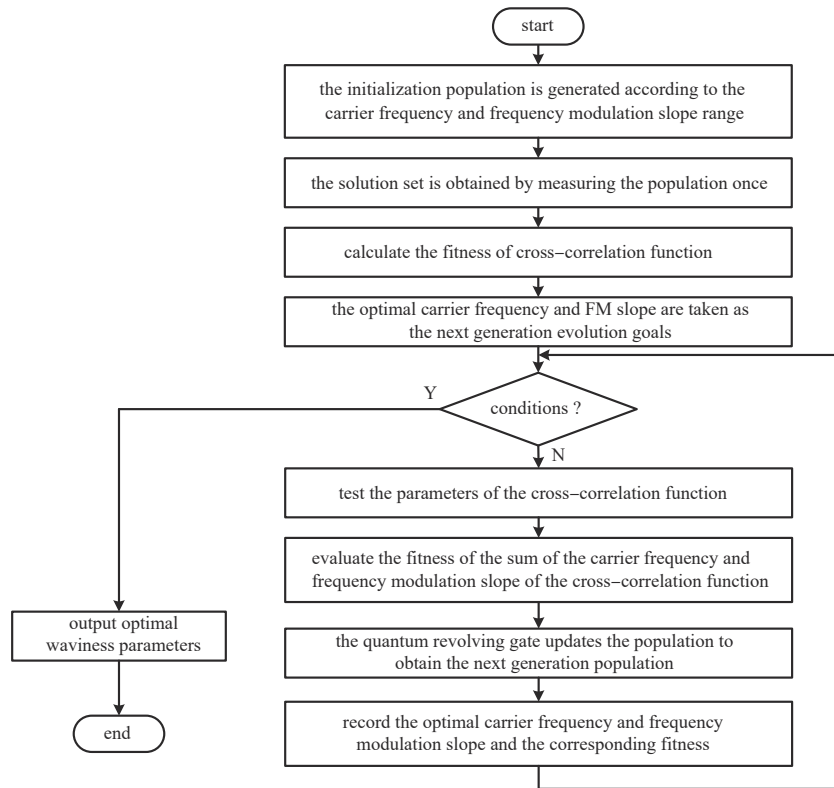


Fig.4 QGA
图4 量子遗传算法

QGA 流程如下：

Step1: 初始化波形，即根据载频 f_c 和调频斜率 α ，随机生成一个种群，将种群定义为：

$$Q(It) = \{q_{It,1}, q_{It,2}, \dots, q_{It,Pn}\} \quad (7)$$

式中： It 为迭代次数； Pn 为种群个体大小。其中对于每一个个体的概率幅为：

$$q_{It,k} = \begin{bmatrix} \alpha_{It,k,1} & \alpha_{It,k,2} & \dots & \alpha_{It,k,l} \\ \beta_{It,k,1} & \beta_{It,k,2} & \dots & \beta_{It,k,l} \end{bmatrix} \quad (8)$$

l 为个体的量子比特数, 满足:

$$l = ZK \quad (9)$$

式中: Z 为自变量的个数; K 为每个自变量所占用的比特数。

将所有的概率幅进行随机初始化为 $1/\sqrt{2}$, 随机初始化可以增大个体间的差异, 增加种群的多样性, 防止过早收敛。根据种群的概率幅状态生成含 h 个个体的二进制解集 $\mathbf{P}(t)$:

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} p_{1,1}(t) & p_{1,2}(t) & \cdots & p_{1,l}(t) \\ p_{2,1}(t) & p_{2,2}(t) & \cdots & p_{2,l}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{h,1}(t) & p_{h,2}(t) & \cdots & p_{h,l}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Step2: 对各确定解进行适应度评估。记录最优载频和调频斜率以及对应的互相关值, 并判断计算过程是否可以结束。若满足结束条件则退出; 否则继续计算。

Step3: 将种群 $Q(t)$ 中的每个载频和调频斜率代入互相关函数计算, 得到对应的互相关值。对各互相关值进行适应度评价, 利用量子旋转门 $U(t)$ 对载频和调频斜率实施调整, 得到新的种群 $Q(t+1)$ 。

其中量子旋转门的调整操作为:

$$U(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

其更新过程如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = U(\theta_i) \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: α_i 、 β_i 、 α'_i 、 β'_i 为概率幅; θ_i 为旋转角。

Step4: 记录最优载频、调频斜率和对应的互相关值, 将迭代次数 It 加 1, 返回 Step3。

2.3 中心值匹配方法

线性调频连续波体制雷达以一段时间调频为发射波形, 根据起始频率和调频斜率的设定, 线性调频雷达可用的频段可划分为若干段, 中心值匹配的方法是根据工作雷达的性能, 将载频和调频斜率的可行范围按照比例分为有限集, 取每个有限集的中心值作为初始条件, 迭代循环搜索波形参数离散集, 统计若干次。

量子遗传算法与中心值匹配相结合的步骤如下:

Step1: 根据雷达型号, 确定其工作时载频和调频斜率可设定的范围, 将载频与调频斜率分为 I 和 J 个区间, 其各自区间的中心值分别为 $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cI}$ 和 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_J$, 则此时工作雷达可选择的工作参数的总数为 IJ 。

Step2: 获取外界干扰信号, 即工作雷达短时间内仅接收外部干扰信号, 按照可行的频段将干扰信号参数划分到中心值 f_{cx} 和 α_y 的任意组合中。通过量子遗传算法计算目标函数的最优值, 其中该部分舍弃量子遗传算法大量时间运算得到的最优值, 而是将每一代优化迭代的自变量规划到预定的区间, 直接取其中心值作为自变量参与下一次优化, 设定每次量子遗传计算一次结果时间为 T 。工作雷达参数可行的区间个数为 IJ , 量子遗传算法与中心值匹配工作的最大时间为 IJT 。

若干次迭代循环搜索波形参数离散解, 统计若干次的结果, 建立本体库。工作雷达下次获取干扰雷达参数时, 无需再利用量子遗传算法计算干扰与发射波形的相关度, 而是根据中心值匹配的方法, 在中心值库中选择一种最优区间的中心值作为工作参数, 迅速降低计算量, 满足实时性的要求。量子遗传与中心值匹配方法通过改变发射波形的参数, 增加了有效信号与干扰信号的不相关度, 使得干扰信号趋于零均值噪声。

3 仿真实验

3.1 干扰仿真及抑制效果评估

仿真多部雷达场景。设置两个与自车同向行驶的目标和一辆与自车相向行驶的车辆。当其中工作雷达和其中一部干扰雷达设置参数接近时, 干扰信号与工作信号的差频位于抗混叠滤波器的带宽内时, 干扰与参考信号的混频结果会在频谱呈现一个尖峰, 可能被错误地检测为目标, 雷达仿真参数配置如表 1 所示。

其中当工作雷达与其中一个干扰雷达的调频斜率相同时, 工作雷达通过混频低通滤波之后将会出现一个虚假目标, 其仿真结果如图 5 所示。

表 1 车载干扰雷达工作参数
Table1 Working parameters of vehicle borne jamming radar

types	carrier frequency/GHz	frequency modulation time/ μ s	range/m	velocity/($m \cdot s^{-1}$)
jamming radar 1	75.4	4.0	20	13.5
jamming radar 2	77.0	4.8	60	5.5
jamming radar 3	77.6	5.6	100	-2.0

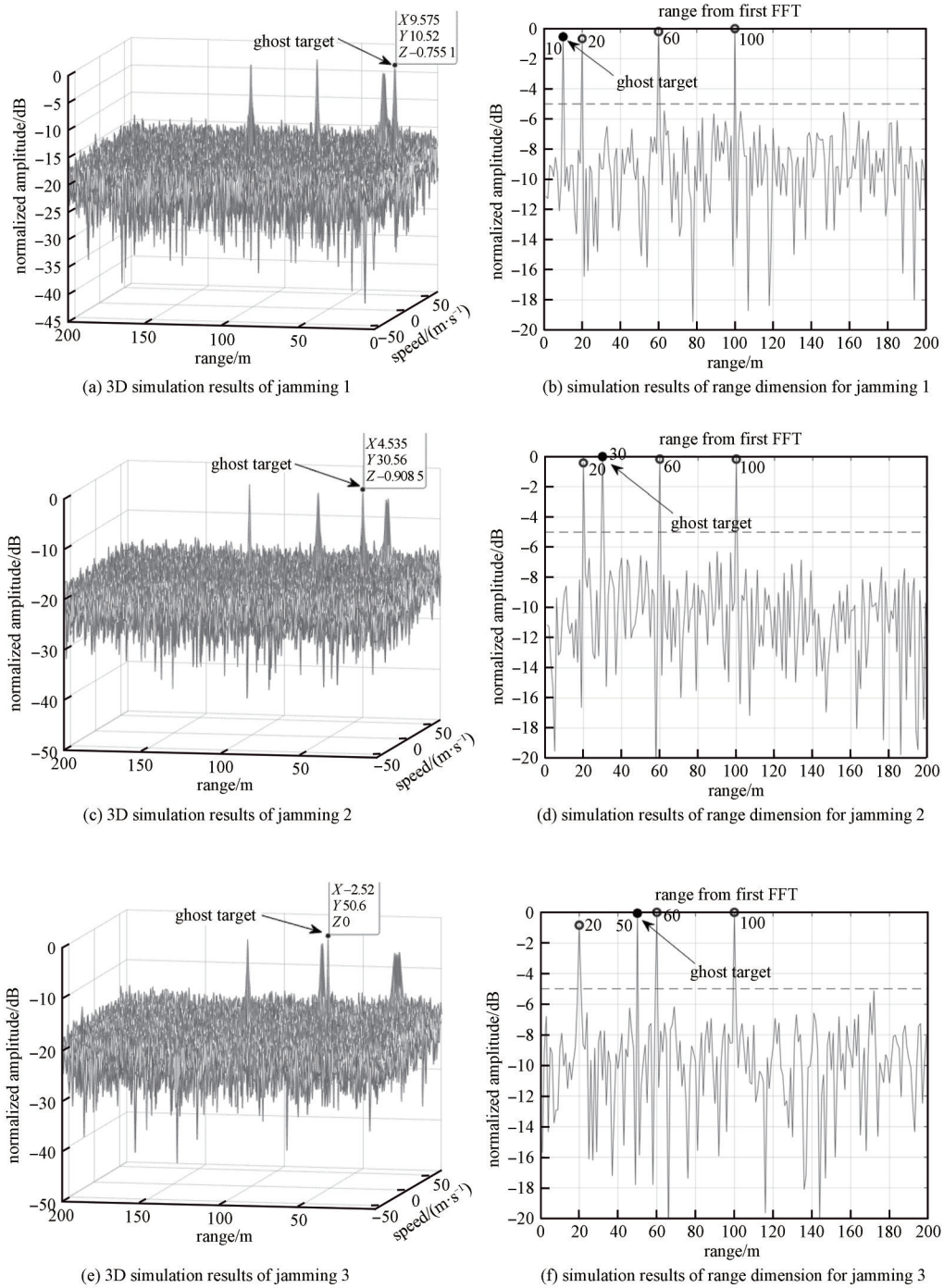


Fig.5 Interference
图5 有干扰情况

从图 5 可以看出，由于存在与本车雷达信号的调频斜率一致的干扰信号，仿真结果表明，分别距离工作雷达 10 m、30 m、50 m 处出现了虚假目标。

3.2 中心值匹配的有效性

根据中心值匹配的方法，从中心值库中选择一个最优区间，这样可以大大降低计算量，满足实时性的要求。同时该算法可以解决干扰波形参数与工作波形接近时产生的虚假目标。改变发射波形的参数增加了有效信号与干扰信号的不相关度，使得干扰信号趋于零均值噪声。由仿真结果可以看出，波形优化有利于改善假目标情况。对于干扰抑制前、遗传优化、量子遗传进行干扰抑制以及量子遗传和中心值匹配4种情况，根据工作雷达的性能，将调频时间和载频作为初始条件，迭代循环搜索波形参数离散集，并将其作为参数，测量目标信息并统计100次，其结果可以依据虚假目标的个数，目标外最高旁瓣峰值以及噪声功率水平乘以权重的方式分为2个等级。分别为不可行性区间和可行性区间，其中不可行性区间表明出现虚假目标，可行性区间表明无虚假目标出现，但是依据噪声功率及旁瓣峰值高度结果可再次细分为干扰区间、微弱干扰区间、无干扰区间。各种结果如表2所示。

表2 假目标消除统计
Table2 False target elimination statistics

interference suppression type	infeasible interval	feasible interval			false target occurrence probability/%
		interference interval	weak interference interval	interference free interval	
no inhibition	100	0	0	0	100
GA	34	25	25	16	34
QGA	25	30	29	16	25
proposed method	29	35	16	20	29

由统计结果可以看出，如果没有采取干扰抑制，虚假目标会一直出现，而智能优化能有效缓解虚警问题，但是优化算法有时会陷入局部极值，求取的工作参数存在与干扰雷达工作参数接近导致出现虚假目标的问题。本文所提的量子遗传和中心值匹配算法，只需利用智能算法得到一次工作参数，之后不再需要繁琐的计算，由于多目标干扰和划分区间的范围较小，从中心值匹配一种工作参数，出现与干扰雷达接近的参数，导致少量次数出现虚假目标，但是中心值匹配方法可避免出现智能优化算法那样多次增加复杂度的情况。本文主要采用遗传算法以及量子遗传算法对目标函数在可行域内搜索最优解，其参数见表3。得到其收敛过程如图6所示。

仿真结果可知，使用遗传算法和量子遗传算法都能得到目标函数的最优解，但遗传算法迭代次数多，收敛速度较量子遗传慢。量子遗传算法比常规遗传算法有更好的效果。量子遗传算法在迭代11次后达到最优解，而同时遗传算法迭代29次后达到最优解，因此量子遗传算法的收敛时间比遗传算法更短，有利于实时处理。

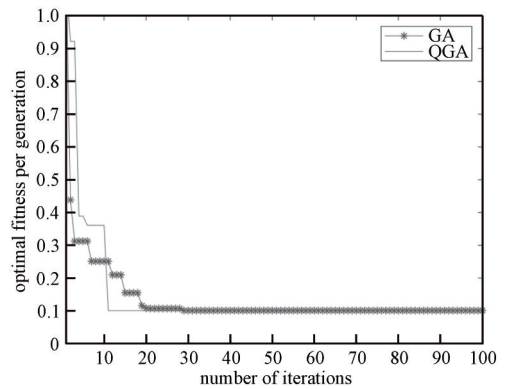


Fig.6 Comparison between GA and QGA
图6 遗传算法与量子遗传算法比较

表3 优化算法仿真参数
Table3 Simulation parameters of optimization algorithm

type	parameter	value	type	parameter	value
GA	population size	50	QGA	population size	50
	number of iterations	100		number of iterations	100
	crossover probability	0.9		binary length of variable	20
	mutation probability	0.01			

3.3 优化算法效果

为了消除虚假目标，对本车雷达发射信号进行智能算法优化，改变波形的调频斜率和载频，降低发射波形同干扰波形的相关度，获得可变范围内最优解，波形优化后的效果如图7所示。

由仿真结果可知，进行波形优化后，假目标位置处峰值大幅降低，虚假目标不存在。但是此时遗传算法和中心值匹配方法所得参数不是最优，导致一维距离维旁瓣过高，如果检测门限限定太低可能导致虚警，因此对中心值匹配方法获得的距离多普勒数据进行CA-CFAR算法检测，其结果如图8所示，3个目标此时的距离和速度都能准确地获得，目标1的距离为20.54 m，速度为13.39 m/s，目标2的距离为60.62 m，速度为5.51 m/s，目标3的距离为100.70 m，速度为-2.362 m/s，此时不存在虚假目标。

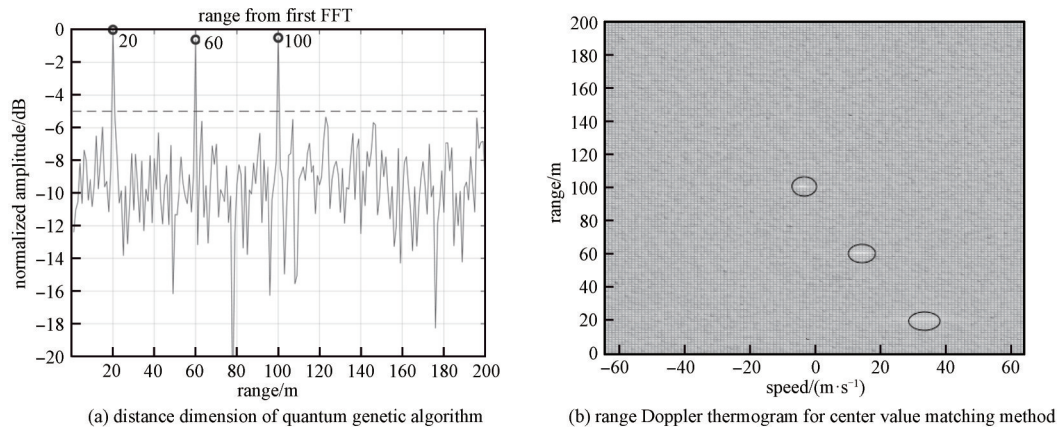


Fig.7 Effect after applying algorithm

图7 应用算法解决效果图

4 结论

本文针对线性调频车载雷达干扰问题，提出了基于量子遗传算法和参数中心值匹配的干扰抑制方法。该方法首先将发射波形和接收信号的互相关函数作为目标函数，然后通过量子遗传算法进行波形参数优化，在约束范围内得到互相关最小的工作参数，并基于这个参数生成发射波形。根据接收信号参数，合理选择工作参数，实现自适应干扰抑制。仿真结果表明，与常规遗传算法相比，本文提出的量子遗传方法可以更好地实现雷达间相互干扰抑制，有效缓解假目标问题，同时针对实时性问题，本文采取中心值匹配的方法，该方法通过改变发射波形，降低发射波形和干扰波形的相关性，CFAR算法之后可以准确获得目标信息。

参考文献：

- [1] TANIS S. 汽车雷达传感器和拥挤不堪的无线电频谱：潜在的城市电子战场[J]. 微波杂志, 2019(3,4):46–54. (TANIS S. Car radar sensors and crowded radio spectrum: potential urban electronic battlefield[J]. Microwave Journal, 2019(3,4):46–54.)
- [2] MAKINO Y, NOZAWA T, UMEHIRA M, et al. Inter-radar interference analysis of FMCW radars with different chirp rates[J]. The Journal of Engineering, 2019(19):5634–5638. doi: <https://doi.org/10.1049/joe.2019.0167>.
- [3] 贺利良. 77 GHz 车载雷达系统防干扰技术及专利申请分布研究[J]. 科学与信息化, 2018(30):44,48. (HE Liliang. Research on anti interference technology and patent application distribution of 77 GHz vehicle radar system[J]. Technology and Information, 2018 (30):44,48.)
- [4] KUNERT M. The EU project MOSARIM: a general overview of project objectives and conducted work[C]// 2012 The 9th European Radar Conference. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2012:1–5.
- [5] SCHIPPER T, PROPHET S, HARTER M, et al. Simulative prediction of the interference potential between radars in common road scenarios[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(3):322–328. doi:10.1109/TEMC.2014.2384996.
- [6] DAVIS R M, FANTE R L, PERRY R P. Phase-coded waveforms for radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1):401–408. doi:10.1109/TAES.2007.357142.
- [7] UYSAL F, ORRU S. Phase-coded FMCW automotive radar: application and challenges[C]// 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR). Washington, DC, USA: IEEE, 2020:478–482. doi:10.1109/RADAR42522.2020.9114798.
- [8] ZHANG Mengyuan, HE Shibo, YANG Chaoqun, et al. VANET-assisted interference mitigation for millimeter-wave automotive radar sensors[J]. IEEE Network, 2020, 34(2):238–245. doi:10.1109/MNET.001.1900271.
- [9] CORREAS-SERRANO A, GONZALEZ-HUICI M A. Sparse reconstruction of chirplets for automotive FMCW radar interference mitigation[C]// 2019 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). Detroit, MI, USA:

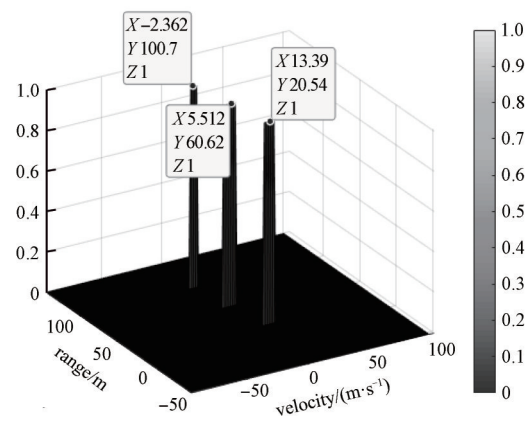


Fig.8 CA-CFAR results

图8 CA-CFAR结果

- IEEE, 2019:1-4. doi: 10.1109/ICMIM.2019.8726758.
- [10] XU Zhihuo, SHI Quan. Interference mitigation for automotive radar using orthogonal noise waveforms[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018,15(1):137-141. doi:10.1109/LGRS.2017.2777962.
- [11] 李阳,王楚媛,陈桥,等. FMCW 车载雷达自适应干扰抑制方法[J]. 信号处理, 2021,37(2):258-267. (LI Yang,WANG Chuyuan, CHEN Qiao,et al. Mutual interference suppression method for FMCW automotive radar[J]. Journal of Signal Processing, 2021,37(2):258-267.) doi:10.16798/j.issn.1003-0530.2021.02.011.
- [12] 郝昭昕,孙进平. 基于量子遗传算法的 MIMO 雷达正交信号波形设计[J]. 信号处理, 2019,35(6):1064-1071. (HAO Zhaoxin, SUN Jinping. MIMO radar orthogonal waveform design based on quantum genetic algorithm[J]. Journal of Signal Processing, 2019,35(6):1064-1071.) doi:10.16798/j.issn.1003-0530.2019.06.018.
- [13] 焦传海,杜奕航. 基于改进云量子遗传算法的动态频谱分配[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(3):465-470. (JIAO Chuanhai,DU Yihang. Dynamic spectrum allocation based on MCQGA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(3):465-470.) doi:10.11805/TKYDA2020193.
- [14] 王海蛟,贺欢,杨震. 敏捷成像卫星调度的改进量子遗传算法[J]. 宇航学报, 2018,39(11):1266-1274. (WANG Haijiao,HE Huan,YANG Zhen. Scheduling of agile satellites based on an improved quantum genetic algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2018,39(11):1266-1274.) doi:10.3873/j.issn.1000-1328.2018.11.009.
- [15] HARRIS F, TRAGER D, DAVIS C, et al. Adaptive filtering for FMCW interference mitigation in PMCW radar systems: US9791564B1[P]. 2017-10-17.
- [16] JIN Feng, CAO Siyang. Automotive radar interference mitigation using adaptive noise canceller[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(4):3747-3754. doi:10.1109/TVT.2019.2901493.

作者简介:

麦超云(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为信号与信息处理、数字信号处理。

黄传好(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为雷达信号处理、数字逻辑电路设计。

刘子明(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为雷达信号处理、FPGA 硬件开发。

向洪(1988-), 男, 博士, 主要研究方向为阵列信号处理、分布式雷达等。

曾军英(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为信号与信息处理、图像处理。

秦传波(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为信号与信息处理、图像处理。

王占(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波雷达信号处理。