

基于 LFM CW 雷达多目标检测的 CA-CFAR 改进算法

孙宾宾^{1,2*}, 沈涛¹, 李洪鹏², 崔晓荣¹, 陈雨魁³

¹火箭军工程大学核工程学院, 陕西 西安 710025;

²北京遥感设备研究所 25 所, 北京 100854;

³电子科技大学电子科学与技术学院, 四川 成都 611731

摘要 雷达目标检测器是雷达接收机中的重要组成部分, 目标检测的目的是在恒虚警概率的约束下, 最大化提升目标的检测效率。针对车载毫米波雷达目标检测过程中传统单元平均恒虚警率(CA-CFAR)在相邻多目标条件下往往会出现遮蔽的情况, 改进了一种新的一维 CA-CFAR 检测算法。首先, 对左右参考单元做等分处理, 求出等分后各个子参考单元的平均值。然后, 将子参考单元的平均值与参考单元的平均值进行比较。最后, 对大于参考单元的平均值进行处理, 得到新的检测门限。仿真和实验结果表明, 改进 CA-CFAR 算法相比于传统 CA-CFAR 在线性调频连续波雷达多目标检测上具有更好的检测性能, 验证了所提算法的有效性。

关键词 机器视觉; 单元平均恒虚警率; 目标遮蔽; 目标检测

中图分类号 U461.99

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0815005

Improved CA-CFAR Algorithm Based on LFM CW Radar Multi-Target Detection

Sun Binbin^{1,2*}, Shen Tao¹, Li Hongpeng², Cui Xiaorong¹, Chen Yukui³

¹ School of Nuclear Engineering, Rocket Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

² 25th, Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854;

³ School of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract The radar target detector is an important part of the radar receiver. The purpose of target detection is to maximize the detection efficiency of the target under the constraint of constant false alarm probability. Aiming at the traditional cell averaging-constant false alarm rate (CA-CFAR) in the vehicle-mounted millimeter-wave radar target detection process tends to be obscured under the condition of adjacent multiple targets, we improves a new one-dimensional CA-CFAR detection algorithm. First, the left and right reference units are divided equally, and the average value of each sub-reference unit after the division is obtained. Then, the average value of the sub-reference unit is compared with the average value of the reference unit. Finally, the average value greater than the reference unit is processed to obtain a new detection threshold. Simulation and experimental results show that the improved CA-CFAR algorithm has better detection performance in linear frequency modulation continuous wave radar multi-target detection compared to traditional CA-CFAR, which demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words machine vision; cell averaging-constant false alarm rate; target detection; target occlusion

OCIS codes 150.1135; 040.1880

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(6207031005)

* E-mail: 1491967912@qq.com

1 引言

车载毫米波雷达发射线性调频信号,然后发射信号和接收到的回波进行混频得到差拍信号,之后对差拍信号进行一系列的信号处理,可以得到待检测目标在距离维和多普勒维的功率信息,最后确定目标的位置及运动信息。传统雷达监测系统中的常规检测都是将接收到的信号电平与预定义的阈值进行比较。当阈值为固定值时,随着干扰功率的变化,误报率会不断增加,导致虚警。在这种情况下,需要使用具有自适应阈值的平均恒虚警率(CFAR)算法来避免虚警和漏检的情况发生^[1-2]。自适应阈值处理器的最基本形式是众所周知的单元平均恒虚警率(CA-CFAR)^[3]。后者在均匀高斯噪声中表现良好。但在实际情况下,背景噪声分布可能不均匀。这种不均匀性是由杂乱的边缘和干扰目标的存在引起的。为了适应参考单元内存在多个目标和杂波干扰的问题。文献[4]推导出了一个 CA-CFAR 的通用结论:在 CA-CFAR 中当参考单元数与干扰目标数的比值小于归一化门限时,主目标的“遮挡”与信噪比无关。文献[5]基于线性调频连续波(LFMCW)雷达目标检测提出了两种虚警抑制策略对频域 CFAR 进行改进。

针对传统 CA-CFAR 在相邻多目标情况下会提高检测门限值从而导致目标遮蔽,本文提出一种基于 LFMCW 雷达多目标检测的 CA-CFAR 改进算法。通过改进 CA-CFAR 算法得到效果更好的门限值,来消除 CA-CFAR 在检测过程中出现的目标遮蔽效应。

2 LFMCW 雷达目标检测原理

LFMCW 雷达结构如图 1 所示,雷达发射机通过三路天线发射雷达信号,用四路天线接收目标的

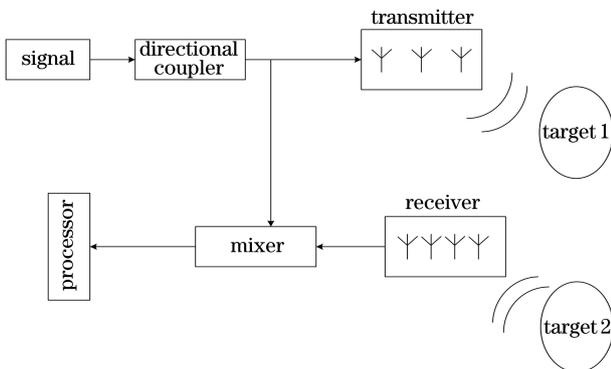


图 1 雷达系统结构

Fig. 1 Radar system structure

回波信号,并与发射信号在混频器中经过混频处理产生中频信号,之后再经过数字信号处理得到目标物体距离、速度等运动信息。

LFMCW 雷达系统锯齿波工作原理如图 2 所示,图中 T 为调制周期, $\Delta\tau$ 为发射信号与接收信号的延时, B 为调制带宽, f_0 为起始频率。

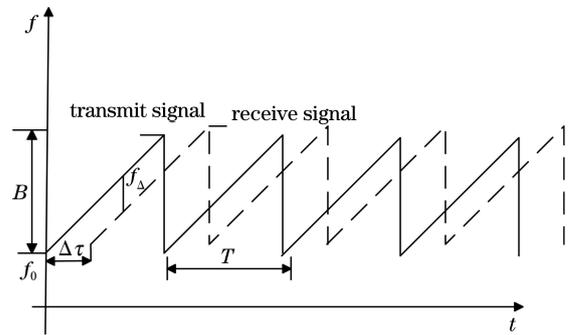


图 2 LFMCW 雷达系统锯齿波工作原理

Fig. 2 LFMCW radar system sawtooth wave working principle

LFMCW 雷达发射的信号经运动目标反射后,接收信号和发射信号具有相同的形状,只是在时间轴上向后平移了一个时间 $\Delta\tau$ 。

当目标静止时,不会存在多普勒效应,所以锯齿波 LFMCW 雷达的发射信号与回波信号的频差是常数 f_Δ ,表达式为

$$f_\Delta = kt = \frac{B}{T} \frac{2R}{c}, \tag{1}$$

式中: R 为目标与雷达之间的距离; c 为光速。由 (1) 式可知,频差中包含着目标的距离信息和频率信息,因此可通过测量频差来得到目标的距离和速度等信息。

3 CFAR 检测算法

3.1 CA-CFAR 算法原理

在雷达实际使用过程中,目标周围的环境在反射雷达信号的同时产生噪声和杂波,与目标反射的雷达信号夹杂在一起返回接收系统,同时雷达本身的电子器件在运行过程中也会产生干扰。由于背景噪声、杂波和电子器件等影响,很难找到一个合适的阈值来提取峰值频率,因此需要一种能够自适应调整检测门限的方法,在目标检测中最常见的是 CA-CFAR 算法^[6-7]。其工作原理如图 3 所示。

图中 A 为待检测单元的幅值,在 A 的两侧分别取 i 个保护单元,保护单元作用是防止参考单元目标能量泄漏从而影响 CA-CFAR 检测器对噪声水平的估计。为了降低保护单元带来的影响,在计算

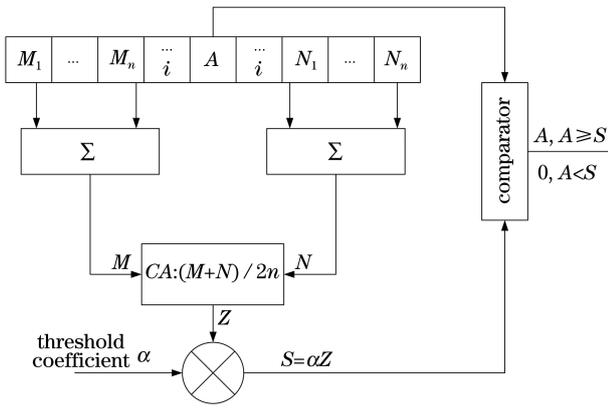


图 3 CA-CFAR 检测原理

Fig. 3 CA-CFAR detection principle

背景功率时通常不包括保护单元^[8]。在待检测单元 A 的两侧各取 n 个参考单元 $M_i (i=1, \dots, n)$ 和 $N_i (i=1, \dots, n)$, 用来估计待检测单元 A 的背景杂波功率 Z 。背景杂波功率 Z 乘以阈值系数 α 得到检测门限 S , 与检测单元 A 进行比较。若检测单元 A 大于检测门限 S , 则判定为目标; 否则, 不是目标。

假设接收机接收的噪声和杂波背景功率模型是高斯分布模型, 包络为瑞利分布, 并经过平方律检波器, 其概率密度服从指数分布, 对应的概率密度函数为

$$f_x = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right). \quad (2)$$

由 CA-CFAR 算法示意图可以得出, 待检测单元左右两侧 $2n$ 个参考单元的算术平均值为

$$Z = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=1}^n M_i + \sum_{i=1}^n N_i \right). \quad (3)$$

因此待检测单元 A 处的检测门限值 S 等于待检测单元两侧参考单元的算术平均值 Z 与门限系数 c 的乘积。表示为

$$S = cZ = \frac{c}{2n} \left(\sum_{i=1}^n M_i + \sum_{i=1}^n N_i \right). \quad (4)$$

令 $\alpha = \frac{c}{2n}$, 则(4)式可以表示为

$$S = cZ = \alpha \left(\sum_{i=1}^n M_i + \sum_{i=1}^n N_i \right). \quad (5)$$

再结合(2)式可以计算出检测门限值 S 的概率密度分布为

$$f_s = \frac{1}{(2n-1)!} \left(\frac{1}{\alpha\lambda}\right)^{2n} S^{2n-1} \exp\left(-\frac{S}{\alpha\lambda}\right). \quad (6)$$

通过奈曼-皮尔逊准则, 得出对应的虚警概率的概率密度分布函数为

$$P_{fa} = \int_s^{+\infty} \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) dx = \exp\left(-\frac{S}{\lambda}\right), \quad (7)$$

式中: s 为随机变量。对 s 积分可以得到虚警概率为

$$P_{fa} = \int_s^{+\infty} \exp\left(-\frac{S}{\lambda}\right) f_s dS = (1 + \alpha)^{-2n}. \quad (8)$$

由(8)式可以看出, 虚警概率仅受门限系数和参考单元个数的影响, 与杂波和噪声参数无关。因此在确定门限系数与参考单元个数之后, 虚警概率保持不变。确定虚警概率之后, 对应的门限系数可以由如下公式得到。

$$\alpha = (P_{fa})^{-\frac{1}{2n}} - 1. \quad (9)$$

原始门限系数为

$$c = 2n\alpha = 2n \left[(P_{fa})^{-\frac{1}{2n}} - 1 \right]. \quad (10)$$

3.2 目标遮蔽效应

由 CA-CFAR 原理可知, 单元平均恒虚警率检测的概念需要满足以下两个条件。

1) 目标独立, 不同目标之间应当保持一个以上的参考窗以便区分, 并且不同目标不能同时存在于一个参考窗内。

2) 参考窗内的噪声和杂波数据都是独立同分布的, 并且和含有目标的参考单元内的干扰具有相同的分布。

在实际应用场景中, 通常无法满足上述条件, 当同时存在两个或者两个以上的目标, 且一个目标位于待检测单元, 而其余一个或者多个目标落在参考单元内时, 会出现目标遮蔽现象。假设参考单元内的目标回波功率大于周围杂波和噪声的功率。由于目标回波功率的存在会提高噪声水平的估计值, 进而导致 CFAR 检测门限提高。待检测单元内的目标被遮蔽, 这是由于抬高的检测门限导致相应的检测概率降低, 增大了丢失目标的可能^[9-10]。图 4 中给出了发生目标遮蔽效应的例子, 干扰功率电平

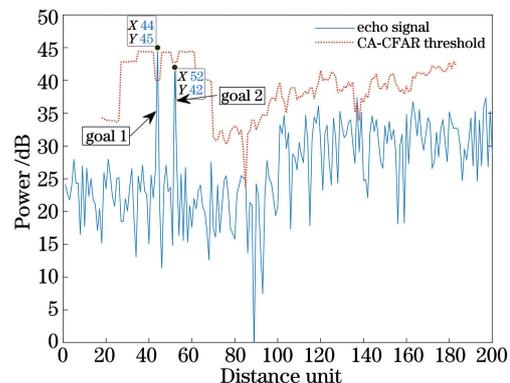


图 4 CA-CFAR 检测目标遮蔽效应

Fig. 4 CA-CFAR detection target shadowing effect

为 15 dB,位于第 44 个距离单元内,目标信噪比为 8 dB,位于第 52 个距离单元内,利用 32 个参考单元来计算 CFAR 门限,恒虚警率为 10^{-6} 。当目标 2 位于待检测单元位置时,位于第 44 个距离单元内的、信噪比为 15 dB 的第 1 个目标提高了干扰功率的估计值,导致无法检测到待检测目标。

传统的 CFAR 检测存在的主要问题是相邻多目标情况下,待检测目标参考单元内的其他目标会引起干扰导致目标遮蔽效应。一般来说,接收机噪声干扰功率会因为干扰目标传回的回波功率导致噪声功率电平的估计值提高,从而抬高检测门限,造成漏检。

4 LFM CW 雷达 CA-CFAR 算法改进

通过上文分析可知,在多目标环境下,如果能够消除相邻目标引起的干扰,则可以消除目标频谱单元值对后续噪声功率电平估计值的影响,且能保证检测算法仍然具有恒虚警率的性质。但消除目标频谱单元往往会损失待检测目标的信息,从而无法对目标进行有效检测。但可以通过减小目标频谱单元带来的影响,对目标进行有效检测^[11-12]。为此本文在 CA-CFAR 基础上,提出了一种相邻多目标条件下车载毫米波雷达 CA-CFAR 改进算法。改进算法原理图如图 5 所示。

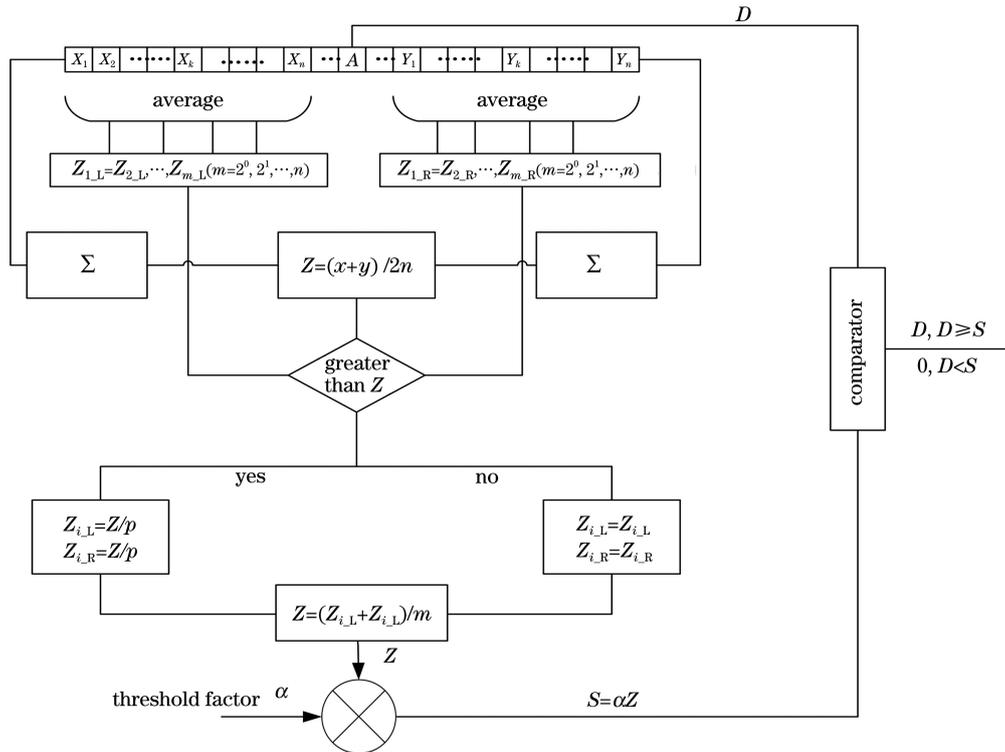


图 5 CA-CFAR 改进算法原理图

Fig. 5 CA-CFAR improved algorithm schematic

图中 A 为待检测单元,首先将 CA-CFAR 左右两侧参考单元进行 m 等分处理,其中 $Z_{1,L}, Z_{2,L}, \dots, Z_{m,L}$ ($m = 2^0, 2^1, \dots, n$) 和 $Z_{1,R}, Z_{2,R}, \dots, Z_{m,R}$ ($m = 2^0, 2^1, \dots, n$) 分别是左侧参考单元均分后的平均值和右侧参考单元均分后的平均值。左侧子参考单元平均值为

$$\begin{cases} Z_{1,L} = (X_1 + \dots + X_{n/m}) / (n/m) \\ Z_{2,L} = (X_{(n/m)+1} + \dots + X_{2n/m}) / (n/m) \\ \vdots \\ Z_{m,L} = [X_{[(m-1)n/m]+1} + \dots + X_n] / (n/m) \end{cases}, \quad (11)$$

式中: X_i 为目标回波信号功率; n 为左侧参考单元数。同理,右侧子参考单元平均值为

$$\begin{cases} Z_{1,R} = (Y_1 + \dots + Y_{n/m}) / (n/m) \\ Z_{2,R} = (Y_{n/m+1} + \dots + Y_{2n/m}) / (n/m) \\ \vdots \\ Z_{m,R} = (Y_{(m-1)n/m+1} + \dots + Y_n) / (n/m) \end{cases}. \quad (12)$$

之后,根据(3)式得到 CA-CFAR 的噪声功率估计值 Z 。并将(11)式和(12)式得到的平均值与 CA-CFAR 的噪声功率估计值 Z 进行对比。若子参考单元的平均值 $Z_{i,L}$ 或 $Z_{i,R}$ 大于噪声功率估计值 Z ,

则将相应的子参考单元的平均值减小为 Z 的 $1/p$, ($p \geq 1$); 否则保留原值。改进算法的噪声水平估计值表示为

$$Z_{i-L} = \begin{cases} Z/p, Z_{i-L} > Z \\ Z_{i-L}, Z_{i-L} < Z \end{cases}, \quad (13)$$

$$Z_{i-R} = \begin{cases} Z/p, Z_{i-R} > Z \\ Z_{i-R}, Z_{i-R} < Z \end{cases} \quad (14)$$

由改进 CA-CFAR 算法示意图可知,待检测单元 D 两侧参考单元得到的新的噪声功率的估计值为

$$Z = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m Z_{i-L} + \sum_{i=1}^m Z_{i-R} \right). \quad (15)$$

最后将得到的新的噪声功率估计值与阈值因子相乘得到新的判决门限,并与待检测单元进行对比。

5 仿真与实验

为了验证本文算法的有效性,本文对其进行了

计算机仿真与实验,在前文理论分析的基础上,给出了理想条件下的仿真分析,并以树林环境为例给出了改进 CA-CFAR 算法的测试结果。本次仿真和实验设定雷达多目标检测的杂波和噪声的幅度为瑞利分布,经平方律检波器后为指数分布,虚警概率定为 $P_f = 10^{-6}$,参考单元数 $M = 32$ 。

5.1 计算机仿真实验

计算机仿真实验中,目标数为 4,目标信号的信噪比分别为 15 dB、8 dB、12 dB、10 dB。对 CA-CFAR 左右参考单元分别进行二等分、四等分、八等分,分别计算子参考单元的平均值并与 CA-CFAR 的平均值进行比较,对于子参考单元平均值大于 CA-CFAR 平均值 Z 的情况,令子参考单元的平均值等于 CA-CFAR 的平均值,之后再将所有子参考单元平均值进行计算来重新估计噪声功率水平。当对 CA-CFAR 左右参考单元分别进行二等分、四等分、八等分时,CA-CFAR 对相邻多目标测试效果如图 6 所示。

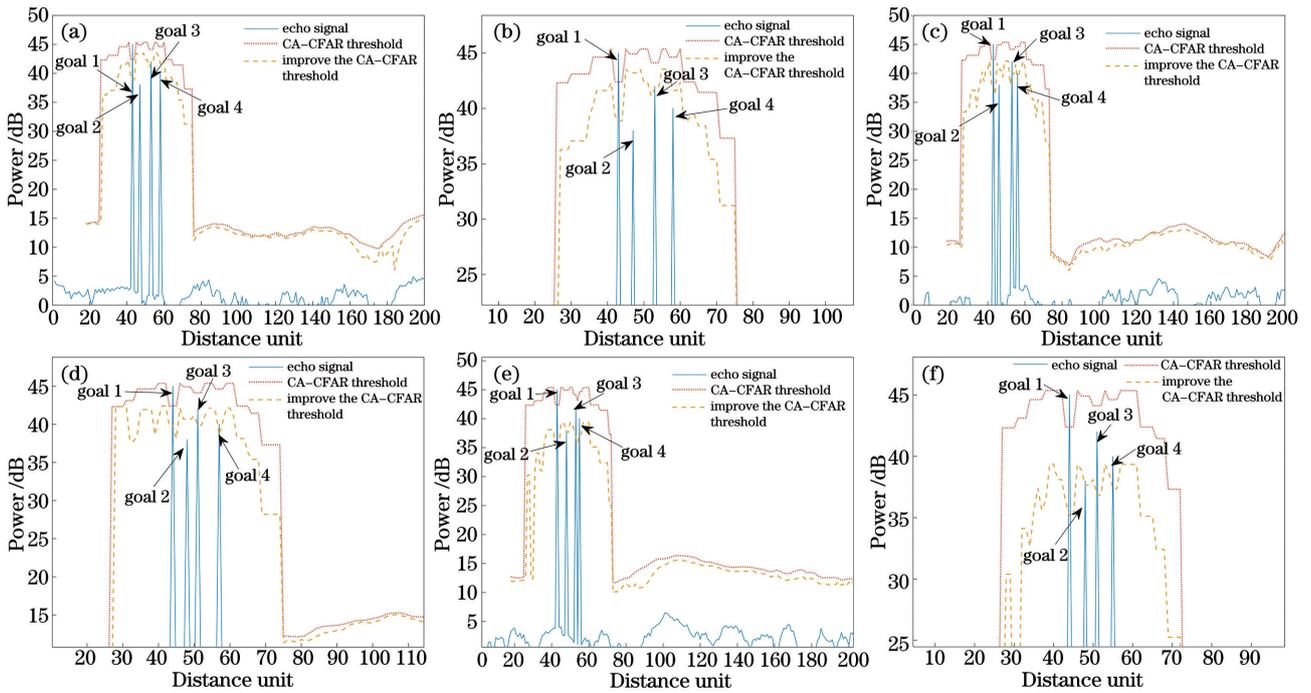


图 6 CA-CFAR 在不同等分条件下的多目标检测图。(a)(b)二等分多目标检测及局部放大图;(c)(d)四等分多目标检测及局部放大图;(e)(f)八等分多目标检测及局部放大图

Fig. 6 CA-CFAR multi-target detection diagrams under different equidistant conditions. (a)(b) Multi-target detection image and partial enlarged image with bi-division; (c)(d) multi-target detection image and partial enlarged image with four-division; (e)(f) multi-target detection image and partial enlarged image with eight-division

图 6 为 CA-CFAR 在不同等分条件下的多目标检测图,待检测目标数为 4,图 6(a)、(c)、(e)分别为将 CA-CFAR 左右参考单元二等分、四等分、八等份条件下的检测效果图,图 6(b)、(d)、(f)分别是二等

分、四等分、八等分的局部放大图。

从图 6(a)和图 6(b)可以看出,当对参考单元二等分时,此时参考单元中检测到目标 1 和目标 3 两个目标,CA-CFAR 检测器检测性能得到了提升,且

二等分的检测门限曲线相比于 CA-CFAR 门限曲线并无明显变化。

从图 6(c)和图 6(d)可以看出,当对参考单元四等分时,此时参考单元中检测到目标 1、目标 3 和目标 4 三个目标,CA-CFAR 检测器检测性能得到了进一步提升,同时四等分的检测门限曲线较原曲线变化较小。

从图 6(e)和图 6(f)可以看出,当对参考单元八等分时,此时参考单元中检测到四个目标,但是八等分后计算量较二等分和四等分呈指数型增加,导致计算时间变长,同时八等分的检测门限曲线变化较大,存在虚警的可能。综合计算时间、检测性能以及检测门限曲线可知,理想噪声条件下当取四等分时对多目标检测的效果最好。

综上所述,综合计算时间、检测性能以及检测门限曲线等对 CA-CFAR 四等分时,并将大于 CA-CFAR 参考单元平均值 Z 的子参考单元重新赋值

为 Z ,此时对于多目标检测的效果最好。但无法完全检测到所有的目标,因而本节讨论当子参考单元平均值大于平均值 Z 的情况下,对其重新赋值达到相对较好的检测结果。

在仿真条件不变的情况下,杂波和噪声的幅度仍为瑞利分布。经平方律检波器后为指数分布,虚警概率、参考单元数、目标数目以及目标信号的信噪比均不变。在对 CA-CFAR 左右参考单元四等分的条件下,当将子参考单元平均值赋值为 $Z/2$ 、 $Z/3$ 、 $Z/4$ 时,改进 CA-CFAR 对相邻多目标的检测效果。

如图 7 所示,CA-CFAR 在对子参考单元赋不同值的情况下,多目标检测图待检测目标数为 4,图 7(a)、(c)、(e)分别为当 CA-CFAR 子参考单元平均值大于参考单元平均值 Z 时,将其赋值为 $Z/2$ 、 $Z/3$ 、 $Z/4$ 条件下的检测效果图,图 7(b)、(d)、(f)分别为 $Z/2$ 、 $Z/3$ 、 $Z/4$ 的局部放大图。

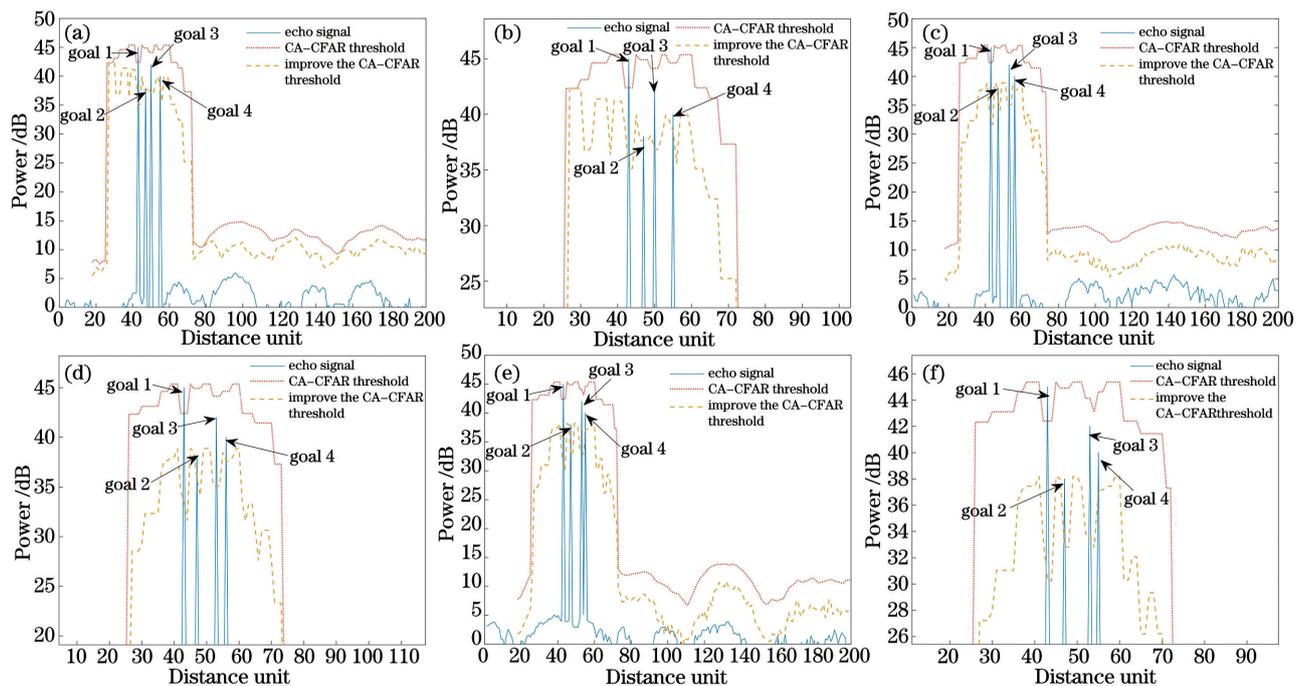


图 7 子参考单元不同平均值条件下的多目标检测图。(a)(b)平均值为 $Z/2$ 检测及局部放大效果图;(c)(d)平均值为 $Z/3$ 检测及局部放大效果图;(e)(f)平均值为 $Z/4$ 检测及局部放大效果图

Fig. 7 Multi-target detection diagrams under different average conditions of sub-reference units. (a)(b) Detection image and partial enlarged image with average value of $Z/2$; (c)(d) detection image and partial enlarged image with average value of $Z/3$; (e)(f) detection image and partial enlarged image with average value of $Z/4$

从图 7(a)可以看出,当子参考单元赋值为 $Z/2$ 时,此时 CA-CFAR 检测器能够检测到所有四个目标,同时 $Z/2$ 条件下的检测门限曲线相比于 CA-CFAR 门限曲线变化较小。但从局部放大图 7(b)中可以看出,对于目标 2 的检测效果较差,可能会造

成漏检。

从图 7(c)可以看出,当子参考单元赋值为 $Z/3$ 时,此时 CA-CFAR 检测器对于目标的检测效果优于 $Z/2$ 、 $Z/3$ 条件下的检测门限曲线相对于 $Z/2$ 情况时变化稍有增加,但并未发生较大的变化。同时

从图 7(e)局部放大图中看出,CA-CFAR 检测器对于目标 2 的检测效果明显优于 $Z/2$ 的情况。

从图 7(e)和图 7(f)可以看出,当子参考单元赋值为 $Z/4$ 时,此时 CA-CFAR 检测器对于目标的检测效果要明显优于前两者。但是 $Z/4$ 条件下的检测门限曲线变化较大,因此可能会造成虚警。

5.2 外场实验

为了进一步测试改进算法的有效性,本文进行了外场测试,将人行道两侧的树木作为目标进行测试,回波数据如图 8 所示。毫米波雷达的指标如下:中心频率为 76.5 GHz,带宽为 600 MHz,频扫周期为 33.6 μs ,有效调频时间为 25.6 μs 。实验目标数为 4,信噪比分别为 56 dB、49 dB、55 dB、52.5 dB。由于在实际环境中会存在目标之间的相互干扰以及杂波和噪声的影响,同时基于上述仿真结果分析,改进算法采用对 CA-CFAR 左右参考单元进行二等分,并将子参考单元中平均值大于 CA-CFAR 平均值 Z 的值缩小为 Z 的 $2/3$,再重新估计噪声功率水平,计算新的门限值。相邻多目标测试效果如图 9 所示。图中传统 CA-CFAR 算法由于目标之间的相互干扰导致未能检测到目标 2 和目标 4,造成了漏

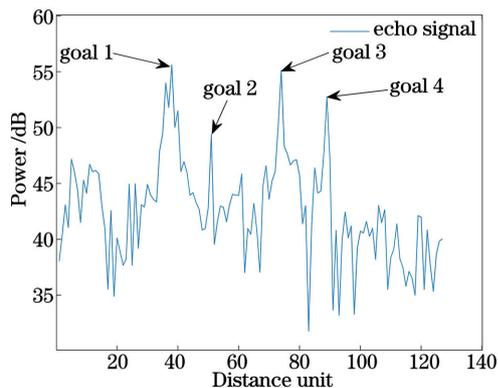


图 8 人行道树木回波图

Fig. 8 Echo of sidewalk trees

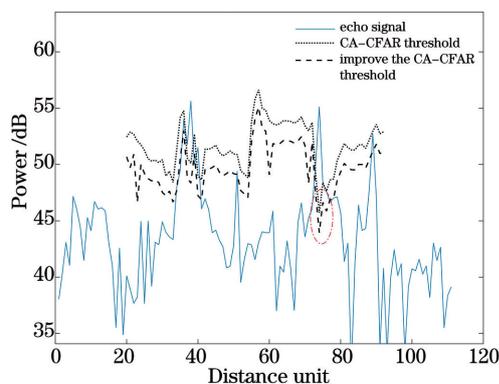


图 9 人行道树木目标检测

Fig. 9 Sidewalk tree target detection

检,而改进算法在传统 CA-CFAR 的基础上经过均分再处理,自适应地降低了检测门限值,能够检测到图中的四个目标。

5.3 结果分析

从上述仿真和实验结果可以看出,在多目标环境下改进的 CA-CFAR 能同时检测出多个相邻的目标,且计算方法简单高效,而且仍保持原始 CA-CFAR 的基础特性,弥补了传统 CA-CFAR 算法对于多目标检测时造成目标遮蔽效应的不足。综上所述,本文所提出的在多目标环境下的 CA-CFAR 改进算法对降低 CA-CFAR 的漏检、提高多目标检测性能具有重要作用^[13]。但是在实际环境中,由于改进 CA-CFAR 是在传统 CA-CFAR 基础上进行再计算,通过降低门限值来降低漏检率,所以在弱目标附近可能会出现虚警现象,因此本文算法的适用性还需要进一步完善。

6 结 论

针对 LFM CW 雷达采用传统自适应检测算法在多目标环境下存在漏检、目标遮蔽的问题,本文提出了一种在多目标环境下 CA-CFAR 改进算法。通过仿真分析可知,该算法能正确检测出多个相邻目标,有效解决传统 CA-CFAR 算法漏检、目标遮蔽的问题,而且算法复杂度相对较低,能够适用于对多目标的快速、准确检测。仿真和实验结果表明了所提算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M I. Introduction to radar systems [M]. Zuo Q S, Xu G L, Ma L, et al, Transl. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2014:15-28.
斯科尼克. 雷达系统导论[M]. 左群声, 徐国良, 马林, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2014:15-28.
- [2] Ding L F, Geng F L, Chen J C. Principle of radar [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 45-56.
丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013:45-56.
- [3] Finn H M, Johnson R S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates [C] // RCA Review, 1968: 414-464.
- [4] Du P F, Zhang X J. A new conclusion in CA-CFAR detection[J]. Modern Radar, 2007, 29(2): 60-62.
杜鹏飞, 张祥军. 单元平均恒虚警率检测中的一个新

- 结论[J]. 现代雷达, 2007, 29(2): 60-62.
- [5] Liu Z L, Lei P Z, Liu W Y, et al. An improved CFAR algorithm in frequency domain based on LFM CW radar for ranging [J]. Information and Electronic Engineering, 2012, 10(6): 707-712.
刘泽龙, 雷鹏正, 刘文彦, 等. 基于 LFM CW 雷达测距的改进频域 CFAR 算法 [J]. 信息与电子工程, 2012, 10(6): 707-712.
- [6] Hao Y C. Research on radar CFAR detection algorithm and optimization of threshold detection coefficient [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 36-42.
郝迎春. 雷达 CFAR 检测算法及门限判决系数的优化研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 36-42.
- [7] Wang B. Research on constant false alarm processing technology based on clutter map [D]. Xi'an: Xidian University, 2018: 21-26.
王蓓. 基于杂波图的恒虚警处理技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 21-26.
- [8] Sun Y, Sun W Y, Wei J J, et al. CFAR based signals processing of millimeter-wave radar for automotive anti-collision [J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(9): 45-49.
孙元, 孙梧雨, 韦家军, 等. 基于恒虚警检测的汽车主动防撞毫米波雷达信号处理算法 [J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 45-49.
- [9] Yan X. Multi-target detection and parameter estimation algorithm for millimeter wave radar [D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 18-22.
严鑫. 毫米波雷达多目标检测与参数估计算法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017: 18-22.
- [10] Du J, Song C L. A modified millimeter-wave radar multi-target detection algorithm [J]. Communications Technology, 2015, 48(7): 808-813.
杜佳, 宋春林. 一种改进的毫米波雷达多目标检测算法 [J]. 通信技术, 2015, 48(7): 808-813.
- [11] Zhao Q, Li B Q, Li T W. Target detection algorithm based on improved YOLO v3 [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121502.
赵琼, 李宝清, 李唐薇. 基于改进 YOLO v3 的目标检测算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121502.
- [12] Li L K, Lu C H, Zou B. Research on target detection and feasible region segmentation based on deep learning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121013.
李立凯, 卢焯华, 邹斌. 基于深度学习的目标检测与可行域分割研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121013.
- [13] Chen Y, Ren K, Gu G H, et al. Moving object detection based on improved single Gaussian background model [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1109002.
陈银, 任侃, 顾国华, 等. 基于改进的单高斯背景模型运动目标检测算法 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1109002.