

# 一种多目标 FMCW 雷达的高效距离速度测量方法

邢自然<sup>1</sup>, 朱冬晨<sup>2</sup>, 金星<sup>2</sup>

(1. 上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 200120; 2. 中科院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

**摘要:** 为实现 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 雷达在复杂多目标场合的无模糊测量, 本文提出了一种梯形波调制方式, 并首次推导了其在最坏情况下的虚假匹配结果数. 在此基础上, 本文创新地设计了快速中频容差匹配算法 (TFBM, Tolerance-Fast Beat frequency Matching) 和虚假目标消除算法 (FGTC, Fast Ghost Targets Canceling) 及其对应的容差匹配条件. 其中 TFBM 算法可以根据一个梯形周期的测量结果, 容差、快速地找出所有可能的匹配; FGTC 算法可以消除 TFBM 算法结果中的虚假目标. 严格的理论推导和仿真结果表明, 在梯形波调制下的 FMCW 雷达配合使用 TFBM 和 FGTC 算法不仅可以无模糊测量多目标的速度、距离信息, 而且可以显著地降低计算复杂度.

**关键词:** FMCW; 梯形波调制; 多目标测量; 距离速度去耦合; 快速配对算法

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2016)09-2148-010

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.019

## An Effective Method for Multi-target Range and Velocity Measurement in FMCW Radar

XING Zi-ran<sup>1</sup>, ZHU Dong-chen<sup>2</sup>, JIN Xing<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Shanghai Technology University, Shanghai 200120, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem And Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** In order to realize unambiguous multi-target range and velocity measurement in FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) radar, a trapezoid waveform modulation is proposed and its worst-case matching numbers is derived. Then two processing algorithm, TFBM and FGTC, and their matching condition have been innovatively designed. TFBM (Tolerance-Fast Beat frequency Matching) algorithm can quickly find all possible results for each period. FGTC (Fast Ghost Targets Canceling) algorithm can quickly eliminate the ghost targets which are caused by TFBM algorithm. Strictly theoretical derivation and simulation results show that the joint use of TFBM and FTGC algorithm on trapezoid waveform radar can not only measure multi-target range and velocity without ambiguity, but also reduce the computational complexity significantly.

**Key words:** FMCW; trapezoid waveform modulation; multi-target measurement; range-velocity decoupling; fast pairing algorithm

### 1 引言

FMCW 雷达由于其优秀的性能和低廉的成本得到了广泛的应用. 单一目标场景下, 使用上、下扫频段中频回波信号匹配可以解决 FMCW 雷达速度距离耦合问题<sup>[1]</sup>. 但多目标场景下, 传统三角波或锯齿波调制的 FMCW 雷达由于上下扫频频率可能测量到多个, 无法进行正确的匹配, 难以准确测量目标信息.

文献[1]提出了一种 MTD-频域配对法. 该方法通

过 MTD(动目标检测)简化目标环境, 之后基于上下扫频段频谱的类似程度实现匹配. 但在实用中存在匹配条件难以确定、计算量大的缺点.

文献[2,3]研究了基于 2 维 FFT 的多目标速度距离测量算法. 该方法通过发送快速调频脉冲串, 利用 2 维 FFT 算法直接得到每个目标的信息, 从根本上避免了匹配的困难. 但是, 为扩大无模糊测速范围、增加速度分辨率, 雷达需要减少每个调制周期的时长并积累多个调制周期的中频信号, 这样不但会影响系统的响应

时间而且需要强大的计算资源。

文献[4]研究了基于变周期三角波调制的多目标测量方法.该方法首先通过改变三角波的调制周期,分别测量不同调制周期下所有可能目标的距离、速度;然后整合不同周期下的目标测量信息,利用真实目标的距离、速度不随调制周期改变的特点来消除其中的虚假目标.该方法在很大程度上解决了多目标雷达的测量问题,但没有明确指出消除虚假目标的高效算法.设目标数为  $T$ ,则在上下扫频段产生的待处理目标信息数均为  $T^2$ .若采用逐个比较的方法来处理这两组数据,其时间开销为  $O(T^4)$ .当目标数  $T$  大时,将严重影响雷达系统的实时性.

文献[5]研究了一种变周期锯齿波的测量方法并提出了目标匹配算法,但是采用最小耦合距离差的匹配方法可能导致多普勒频移大的目标丢失和虚假目标的产生,同时文献中的匹配方法需要从误差矩阵找出最小值,复杂度较高.

文献[6]研究了一种梯形调制波体制,该体制的 FMCW 雷达可通过上下扫频段和恒频阶段的中频信号的匹配确定目标并得到其运动参数,并且可以在很大程度上减少仅通过上下扫频段匹配所产生的虚假目标.但是,该文没有在理论上分析梯形波调制的性能提升程度,并且文中的匹配条件较为理想,匹配算法计算复杂度较高,在实用中影响系统的鲁棒性和实时性.

文献[7,8]研究了变周期梯形波调制的方法,类似于文献[4],该体制的 FMCW 雷达可以通过改变梯形波的调制周期,综合不同调制周期的目标检测结果来消除文献[6]中匹配方法产生的虚假目标.但依然存在匹配条件理想且计算复杂度高的问题.

本文首先提出一种变周期梯形波的调制方式,并在此基础上设计了相应的信号处理算法 TFBM 和 FGTC,如图 1.理论分析表明,梯形波调制相对于传统三角波调制具有减少虚假目标的能力,填补了文献[6]中没有理论分析的空白;TFBM 算法可以容差、快速地匹配一个调制周期的信号,提升了文献[6]中频匹配算法的速度和鲁棒性;FGTC 则可以快速整合不同调制周期的测量结果,实现虚假目标消除,提升了文献[4,5,7,

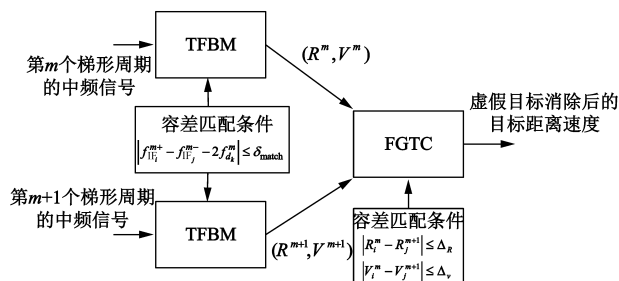


图1 TFBM算法、FGTC算法以及两算法的匹配条件

8]的虚假目标消除算法的速度和鲁棒性.同时,本文给出了这两种算法的容差匹配条件,并在理论上证明了算法及匹配条件的正确性.最后,通过详细的仿真给出了本文方法在不同场景下的性能表现.

## 2 变周期调制 FMCW 雷达原理

为了方便表示,本文采用如下符号定义:

$(R_i^m, V_i^m)$ :第  $m$  个调制周期,第  $i$  个目标的距离、速度真实值,其测量值用  $(R_i^m, V_i^m)$  表示.

$\overline{f_{IF_i}^+}$ :上扫频段第  $m$  个调制周期,第  $i$  个目标中频频率的真实值,其测量值用  $f_{IF_i}^+$  表示.

$\overline{f_{IF_j}^-}$ :第  $m$  个调制周期,第  $j$  个目标下扫频段中频频率的真实值,其测量值用  $f_{IF_j}^-$  表示.

$\overline{f_{d_k}^m}$ :第  $m$  个调制周期,第  $k$  个目标恒频阶段中频频率的真实值,其测量值用  $f_{d_k}^m$  表示.

$\overline{f_{IF}^m}$ : $f_{IF_i}^m$  组成的向量,  $\overline{f_{IF}^m} = [f_{IF_1}^m, f_{IF_2}^m, \dots, f_{IF_N}^m]$ ,同理有向量  $\overline{f_{IF}^m}$ ,  $\overline{f_{IF}^m}$ ,  $\overline{f_{d}^m}$ ,  $\overline{f_{d}^m}$ .

$f_{base}$ :雷达发射载波频率.

$B$ :扫频段带宽.

$T_{re,m}$ :第  $m$  个调制周期的扫频段总时长.

$T_{c,m}$ :第  $m$  个调制周期的恒频段时长.

$f_r$ :目标距离导致的差频.

$\Delta R$ :雷达系统距离分辨率.

$\Delta V$ :雷达系统速度分辨率.

$\Delta f_{IF}$ :扫频段频谱分辨率.

$\Delta f_d$ :恒频连续波阶段频谱分辨率.

$\delta_{match}$ :TFBM 算法匹配区间长度.

$e_R^m$ :第  $m$  个调制周期内 TFBM 算法的距离测量精度.

$e_v^m$ :第  $m$  个调制周期内 TFBM 算法的速度测量精度.

$\Delta_R$ :FGTC 算法距离维匹配区间长度.

$\Delta_v$ :FGTC 算法速度维匹配区间长度.

### 2.1 变周期梯形波调制的 FMCW 测量原理

图 2 展示了变周期梯形波调制 FMCW 雷达的测量原理.雷达的发射波在目标处反射,其延迟为  $\tau_d$ ,并且由于雷达目标间的相对运动产生了多普勒频移  $f_d$ .根据文献[6]的结果,可以得知:

$$\begin{cases} f_{IF_i}^+ = f_r + f_d \\ f_{IF_j}^- = f_r - f_d \end{cases} \quad (1)$$

其中有

$$\begin{cases} f_r = \frac{4B}{c} f_{re} R \\ \overline{f_{d_i}^m} = f_d = \frac{2v}{c} f_{base} \end{cases} \quad (2)$$

若  $v$  为正表示目标远离雷达,  $v$  为负表示目标接近雷达. 因此, 对于同一个目标在一个梯形调制周期内存在:

$$f_{IF_i}^{m+} - f_{IF_i}^{m-} = 2f_d^m \quad (3)$$

在多目标环境下的测量问题可以转化为匹配所有可能的  $f_{IF_i}^{m+}$ ,  $f_{IF_i}^{m-}$ ,  $f_d^m$  使得式(3)成立. 但是, 满足匹配条件只是检测目标的必要条件, 因此需要采用多次测量并改变梯形波调制周期的方法来消除匹配所产生的虚假目标<sup>[7,8]</sup>.

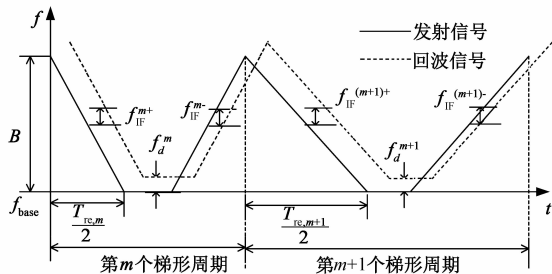


图2 变周期梯形波调制FMCW雷达的测量原理

## 2.2 梯形波调制消除虚假匹配的性能分析

由于梯形波调制方式增加了多普勒频率的测量信息, 目标信号匹配的条件被强化为式(3). 而三角波体系则不存在类似的匹配条件, 因此梯形波调制方式可以减少虚假目标的产生.

FMCW 雷达在扫频段只能得到中频信号的频率测量值  $f_{IF}^{m+}$  和  $f_{IF}^{m-}$ , 因此根据式(1)将某一扫频段的测量结果画在  $f_r - f_d$  图上会得到一系列斜率为 1 或 -1 的直线, 且目标只能存在于不同扫频段的交点处.

图 3 分别展示了基于三角波和梯形波调制的多目标测量性能. 其中横坐标  $f_d$  表示速度维多普勒频率轴,  $f_r$  表示距离维频率轴. 图 3(a) 表示在最好情况下梯形波体系(右)不会产生虚假目标, 而三角波体系(左)会产生虚假目标. 图 3(b) 则表示在一般情况下梯形波体系(右)也可能产生虚假匹配, 但是相对于三角波体系(左)还是具有虚假目标产生较少的优点.

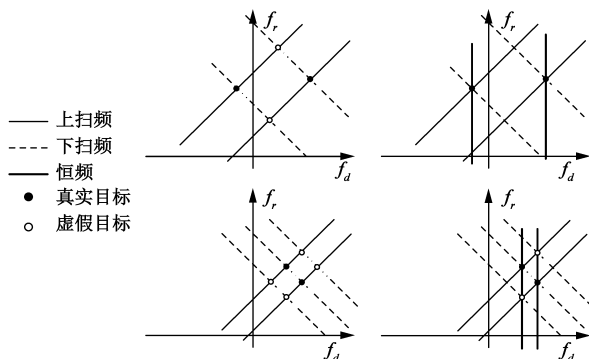


图3 三角波与梯形波调制在消除虚假匹配方面的性能比较

由于目标的位置的不确定性, 为定量分析梯形波调制方式带来性能提升, 本文采用最坏情况分析法. 所谓最坏情况指的是产生虚假目标最多的情况, 即恒频

段多普勒信号可以覆盖整个匹配区域, 如图 4. 为保证对静止目标的测量, 需补充多普勒频率为 0 的情况.

设在雷达监测区域内有  $T$  个目标, 则上、下扫频段最多各检测到  $T$  个目标信号. 因此, 在三角波体系下最多会产生  $T^2$  个匹配结果.

对于梯形波体系, 当目标数为  $T$  时, 产生的匹配网格边长最大为  $\lfloor T/2 \rfloor + 1$  个节点. 因此产生的最大匹配结果为:

$$(\lfloor T/2 \rfloor + 1)^2 \quad (4)$$

从表 1 中可以明显看出梯形波调制的优势. 当实际中目标数较大时梯形波体系在最坏情况下产生的匹配结果数约为三角波体制的 25%, 可以减少后续处理的复杂度并且节省内存空间.

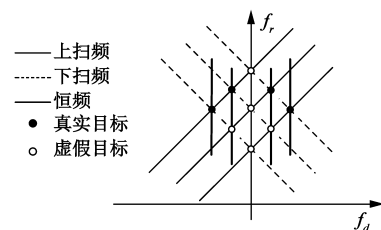


图4 梯形波调制的最坏情况示例

表 1 三角波与梯形波的性能对比

	目标个数	最坏情况下的所有可能目标数	最大虚假目标个数
三角波	$T$	$T^2$	$T^2 - T$
梯形波	$T$	$(\lfloor T/2 \rfloor + 1)^2$	$(\lfloor T/2 \rfloor + 1)^2 - T$

## 3 快速容差中频匹配算法 TFBM

### 3.1 算法设计

图 5 展示了 TFBM 算法在 FMCW 雷达信号处理流程中的应用. 本文目标中频信号测量采用 FFT 算法, 而信号检测则使用在多目标环境下鲁棒性较好的 OS-CFAR (有序统计量恒虚警率检测) 算法<sup>[9]</sup>.

根据 FFT 算法原理有:

$$\begin{cases} f_{IF_i}^{m+} = \hat{i} \times \Delta f_{IF} \\ f_{IF_i}^{m-} = \hat{j} \times \Delta f_{IF} \\ f_d^m = \hat{k} \times \Delta f_d \end{cases} \quad (5)$$

注意,  $i$  表示目标信号在向量中的顺序, 而  $\hat{i}$  则表示目标

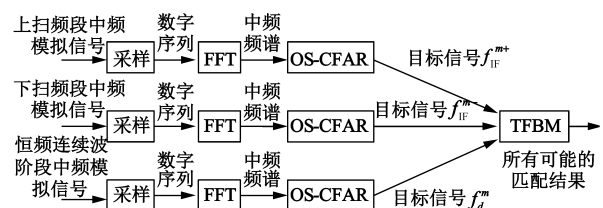


图5 TFBM算法在梯形波FMCW雷达信号处理流程中的应用

信号实际占据的谱线序号.  $j, k$  也有同样的定义.

在使用 FFT 算法测量时, 谱峰一定在最大和次大谱之间出现. 因此, 如果以最大谱峰所对应的频率作为实际测量的频率, 则最大带来  $\Delta f_{\text{IF}}/2$  的系统误差. 即:

$$\begin{cases} |\overline{f_{\text{IF}_i}^{m+}} - f_{\text{IF}_i}^{m+}| \leq \frac{\Delta f_{\text{IF}}}{2} \\ |\overline{f_{\text{IF}_j}^{m-}} - f_{\text{IF}_j}^{m-}| \leq \frac{\Delta f_{\text{IF}}}{2} \\ |\overline{f_{d_i}^m} - f_{d_i}^m| \leq \frac{\Delta f_d}{2} \end{cases} \quad (6)$$

在使用 OS-CFAR 算法检测目标信号时, 可以很容易保证  $\hat{i}$  随着  $i$  的增加单调递增. 则有:

$$f_{\text{IF}_i}^{m+} < f_{\text{IF}_{i+1}}^{m+}, f_{\text{IF}_j}^{m-} < f_{\text{IF}_{j+1}}^{m-}, f_{d_i}^m < f_{d_{i+1}}^m \quad (7)$$

为方便表示, 记  $X(i) = f_{\text{IF}_i}^{m+}$ ,  $Y(j) = f_{\text{IF}_j}^{m-}$ ,  $V(k) = 2f_{d_k}^m$ ,  $X, Y, V$  的维度分别为  $N, M, K$ . 因此, TFBM 算法就是要找出所有的  $i, j, k$  组合, 使得

$$|X(i) - Y(j) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}} \quad (8)$$

并有如下前提:

$$X(i) < X(i+1), Y(j) < Y(j+1), V(k) < V(k+1) \quad (9)$$

基于式(9)设计的 TFBM 流程如图 6 所示.

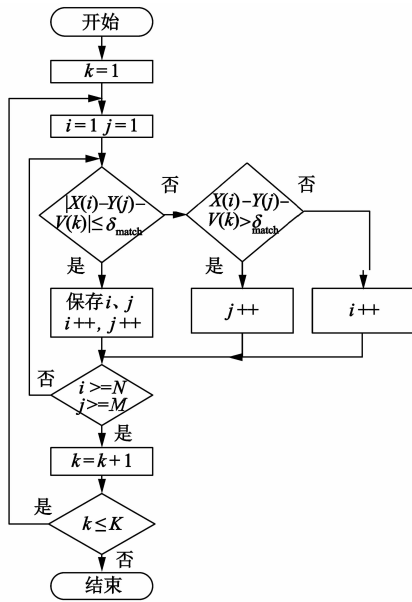


图6 TFBM算法流程

### 3.2 TFBM 算法的正确性证明

为证明算法的正确性, 首先证一个简单的定理.

#### 3.2.1 引理的证明

**定理 1** 对于  $X(i), Y(j), V(k)$  满足

$$\begin{cases} X(i) - Y(j) < V(k) - \delta_{\text{match}} \\ X(i+1) - Y(j) > V(k) + \delta_{\text{match}} \end{cases}$$

则对于所有的  $X(l) (l=1, 2, \dots, N)$ , 不存在  $Y(j)$  能与之匹配得到  $V(k)$ , 使得  $|X(l) - Y(j) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}}$

成立.

**证明** 对于任意的  $l=1, 2, \dots, i-1$ , 有:

$$X(l) - Y(j) < X(i) - Y(j) < V(k) - \delta_{\text{match}}$$

同理对于任意的  $l=i+2, i+3, \dots, N$ , 有:

$$X(l) - Y(j) > X(i+1) - Y(j) > V(k) + \delta_{\text{match}}$$

对任意  $l=1, 2, \dots, N$ , 有  $|X(l) - Y(j) - V(k)| > \delta_{\text{match}}$  成立, 原命题正确. 并且, 由此很容易得到推论 1.

**推论 1** 对于  $X(i), Y(j), V(k)$  满足

$$\begin{cases} X(i) - Y(j+1) < V(k) - \delta_{\text{match}} \\ X(i) - Y(j) > V(k) + \delta_{\text{match}} \end{cases}$$

则对于所有的  $Y(l) (l=1, 2, \dots, N)$ , 不存在  $X(i)$  与之匹配得到  $V(k)$ , 使得  $|X(l) - Y(j) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}}$  成立.

**约束 1** 若存在  $Y(j)$ , 使  $|X(i) - Y(j) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}}$  成立, 则不存在任意的  $Y(l), l=1, 2, \dots, M, l \neq j$ , 满足  $|X(i) - Y(l) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}}$ . 这表明在给定  $V(k)$  的前提下, 正确的  $\delta_{\text{match}}$  应该足够的小以区分  $Y(j)$  和  $Y(l)$ . 同样,  $X(i)$  也有类似的匹配关系.

#### 3.2.2 算法证明

为方便证明, 假设  $X(0) = -\infty, Y(0) = -\infty$ . TFBM 算法中, 当下标  $i$  变化时, 有如下两种情况:

$$(1) X(i) - Y(j) - V(k) < -\delta_{\text{match}}$$

此情况下, 有  $X(i) - Y(j-1) - V(k) > \delta_{\text{match}}$ . 根据推论 1 可知, 此时不存在  $Y(j)$  可以令  $X(i)$  满足  $|X(i) - Y(l) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}}$ . TFBM 算法正确.

$$(2) |X(i) - Y(j) - V(k)| \leq \delta_{\text{match}}$$

此时可以直接利用约束 1,  $X(i)$  应被排除. 因此, TFBM 算法也是正确的.

综上所述, TFBM 算法对于下标  $i$  的更新是正确的. 同理可证 TFBM 对于下标  $j$  的更新是正确的. 因此可证 TFBM 是正确的.

### 3.3 匹配区间 $\delta_{\text{match}}$ 的求取

#### 3.3.1 匹配区间 $\delta_{\text{match}}$ 的下界

为减少测量精度不足所导致的匹配丢失现象, 合理的匹配区间应足够大. 设  $\overline{f_{\text{IF}_i}^{m+}} - \overline{f_{\text{IF}_j}^{m-}} = 2\overline{f_{d_i}^m} = \text{Real}$ , 由式(6)得  $|f_{\text{IF}_i}^{m+} - f_{\text{IF}_j}^{m-} - 2f_{d_i}^m| \leq \Delta f_{\text{IF}} + \Delta f_d$ , 进而可得匹配区间值应满足  $\Delta f_{\text{IF}} + \Delta f_d \leq \delta_{\text{match}}$ .

#### 3.3.2 匹配区间 $\delta_{\text{match}}$ 的上界

合理的  $\delta_{\text{match}}$  应足够小来区别不同的目标.

(1) 满足约束 1 的  $\delta_{\text{match}}$

当  $V(k) - \delta_{\text{match}} \leq X(i) - Y(j) \leq V(k) + \delta_{\text{match}}$  时, 若欲使 TFBM 算法运行正确, 则需要控制  $\delta_{\text{match}}$  使得  $[X(i), Y(j+1), V(k)]$  和  $[X(i+1), Y(j), V(k)]$  无法匹配. 以  $[X(i), Y(j+1)]$  为例, 有

$$X(i) - Y(j+1) = X(i) - Y(j) - p_1 \times \Delta f_{\text{IF}}$$

其中  $p_1$  为整数,则有:

$$\begin{aligned} V(k) + \delta_{\text{match}} - p_1 \Delta f_{\text{IF}} &\geq X(i) - Y(j+1) \\ &\geq V(k) - \delta_{\text{match}} - p_1 \Delta f_{\text{IF}} \end{aligned}$$

此时有一个充分不必要条件可以使  $[X(i), Y(j+1)]$  无法匹配,即:

$$\begin{aligned} X(i) - Y(j+1) &\leq V(k) + \delta_{\text{match}} - p_1 \Delta f_{\text{IF}} < V(k) - \delta_{\text{match}} \\ &\text{可以化简为 } 2\delta_{\text{match}} < p_1 \times \Delta f_{\text{IF}} \end{aligned}$$

(2) 正确区分  $V(k)$  和  $V(k+1)$  时匹配区间的选取条件

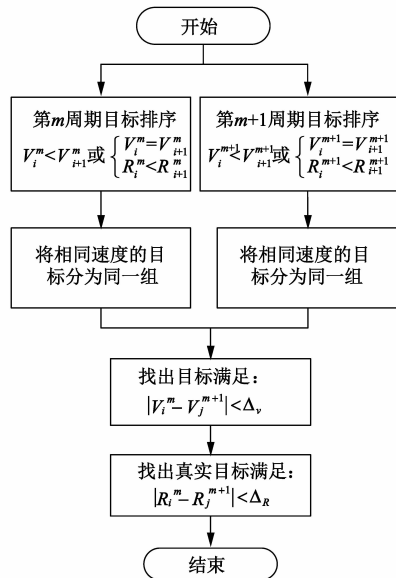
为保证速度匹配的唯一性,应保证速度区间不会相互重叠. 即有  $V(k+1) - \delta_{\text{match}} > V(k) + \delta_{\text{match}}$ , 由  $V(k+1) - V(k) = 2 \times p_2 \times \Delta f_d$ , 其中  $p_2$  为整数,可得  $\delta_{\text{match}} < p_2 \times \Delta f_d$ .

### 3.3.3 确定 $\delta_{\text{match}}$ 的取值范围

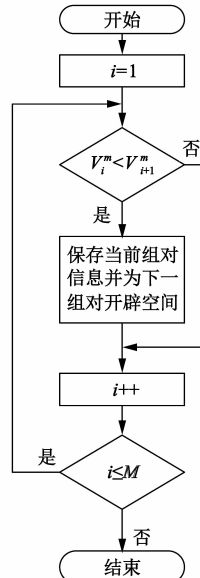
$$\text{综上所述, } \delta_{\text{match}} \text{ 取值范围为 } \begin{cases} \delta_{\text{match}} < \frac{p_1 \times \Delta f_{\text{IF}}}{2} \\ \delta_{\text{match}} < p_2 \times \Delta f_d \\ \Delta f_{\text{IF}} + \Delta f_d \leq \delta_{\text{match}} \end{cases}$$

令  $\Delta f_{\text{IF}} = 2\Delta f_d, p_1 = p_2 = p$ , 化简如下:

$$3\Delta f_d \leq \delta_{\text{match}} < p\Delta f_d \quad (p > 3) \quad (10)$$

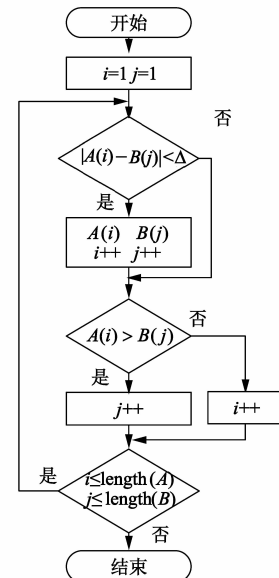


(a) FGTC算法总体流程



(b) 按照速度分组算法

$$V_i^m < V_{i+1}^m \text{ 或 } \begin{cases} V_i^m = V_{i+1}^m \\ R_i^m \leq R_{i+1}^m \end{cases} \quad (11)$$



(c) 距离、速度维通用目标配对算法

图7 FGTC算法及其核心步骤流程

## 4 虚假目标消除算法 FGTC

### 4.1 算法设计

若上、下扫频分别检测到了  $N, M$  个目标信号, 此时可能的匹配信号最多有  $N \times M$  个, 其中包含一些虚假目标, 如图 3(b). 这类虚假目标可利用真实目标与调制周期无关而虚假目标与调制周期相关的特性, 通过改变扫频时长  $T_{\text{sc}}$  来消除<sup>[4,5,7,8]</sup>. 设第  $m$  个调制周期, TFBM 算法所得到的匹配结果为:

$$(R_1^m, V_1^m), (R_2^m, V_2^m), \dots, (R_i^m, V_i^m), \dots, (R_N^m, V_N^m)$$

同理在第  $m+1$  个调制周期, 可以得到:

$$(R_1^{m+1}, V_1^{m+1}), (R_2^{m+1}, V_2^{m+1}), \dots, (R_j^{m+1}, V_j^{m+1}), \dots, (R_M^{m+1}, V_M^{m+1})$$

FGTC 算法的目标就是找出满足  $\begin{cases} |R_i^m - R_j^{m+1}| < \Delta_R \\ |V_i^m - V_j^{m+1}| < \Delta_v \end{cases}$  的所有组合, 其主要流程如图 7 所示. 注意, 排序是 FGTC 算法成功的关键, 排序之后的目标数据满足:

### 4.2 虚假目标出现情况分析

根据式(1)和式(2), 可以得出:

$$\begin{cases} f_{\text{IF}}^{m+} = A_m R_p^m + D V_p^m \\ f_{\text{IF}}^{m-} = A_m R_p^m - D V_p^m \\ f_{\text{d}_i}^m = D V_p^m \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $A_m = \frac{4B}{c} f_{\text{re}, m}$ ,  $D = \frac{2f_{\text{base}}}{c}$ . 式(12)在  $R$ - $V$  平面上代表着 3 条直线. 产生虚假目标的场景可以归结如图 8、图 9

和图 10, 图中直线为式(12)在  $R$ - $V$  平面上的表达.

图 8 中  $(R_1^m, V_1^m)$  和  $(R_2^m, V_2^m)$  是真实目标,  $(R_3^m, V_3^m)$  是伴随而产生的虚假目标,  $(R_3^{m+1}, V_3^{m+1})$  则为第  $m+1$  周期的虚假目标. 当  $(R_3^m, V_3^m)$  和  $(R_3^{m+1}, V_3^{m+1})$  相距过近时, 导致虚假目标的产生.

图 9 和图 10 代表着另两种虚假目标的产生场景. 这些场景的出现与目标的分布有关, 较为复杂, 本文在此不做过多定量分析. 这两幅图都表示  $(R_3^m, V_3^m)$  和

$(R_3^{m+1}, V_3^{m+1})$  相距过近, 导致虚假目标的产生.

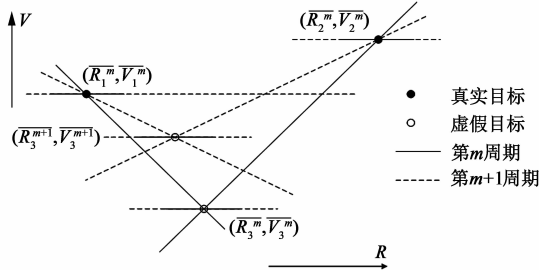


图8 同一对真实目标在不同周期下产生的虚假目标相距过近

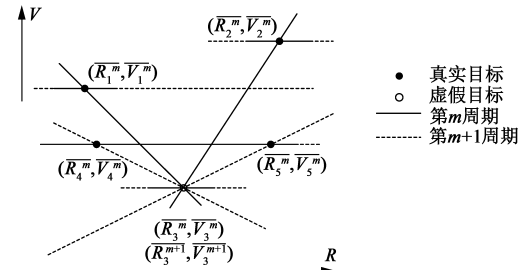


图9 两个真实目标产生虚假目标

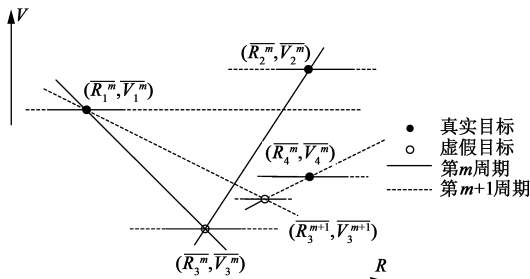


图10 三个真实目标产生虚假目标

### 4.3 用于 FGTC 算法的匹配条件推导

#### 4.3.1 保证真实目标不会丢失匹配的匹配条件

为保证系统最大分辨率, 取  $\delta_{\text{match}} = 3\Delta f_d, p = 4$ , 此时, 根据 2.1 得出在一个完整梯形周期内系统的距离、

速度测量精度为 
$$\begin{cases} \Delta f_{\text{IF}} = \frac{4B}{c} f_{\text{re}} e_R^m + \frac{2f_{\text{base}}}{c} e_v^m \\ \Delta f_d = \frac{2f_{\text{base}}}{c} e_v^m \end{cases}, \text{解得:}$$

$$\begin{cases} e_R^m = \frac{c \Delta f_{\text{IF}}}{4B f_{\text{re}}} \\ e_v^m = \frac{\Delta f_d c}{2f_{\text{base}}} \end{cases} \quad (13)$$

根据频谱分辨率与采样时间的关系  $\Delta f_{\text{IF}} = 2f_{\text{re}}$ , 得梯形波匹配之后的测量精度:

$$\begin{cases} e_R^m = \frac{c}{2B} \\ e_v^m = \frac{f_{\text{re}} c}{2f_{\text{base}}} \end{cases} \quad (14)$$

类似于  $\delta_{\text{match}}$  的求法, 可以得到:

$$\begin{cases} \frac{e_R^m}{2} + \frac{e_R^{m+1}}{2} \leq \Delta_R < \Delta R \\ \frac{e_v^m}{2} + \frac{e_v^{m+1}}{2} \leq \Delta_v < \Delta V \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\Delta R = e_R^m + e_R^{m+1}, \Delta V = e_v^m + e_v^{m+1}$ .

#### 4.3.2 使 FGTC 算法有效的匹配条件

FGTC 算法的最基本的要求是, 不同调制周期下同一对真实目标所产生的虚假目标无法匹配, 即图 8 的情况不会发生. 此时目标满足如下关系:

$$\begin{cases} A_m R_1^m + D V_1^m = A_m R_3^m + D V_3^m \\ -A_m R_2^m + D V_2^m = -A_m R_3^m + D V_3^m \end{cases}$$

由于  $(R_1^m, V_1^m)$  和  $(R_2^m, V_2^m)$  为真实的目标, 因此满足

$$\begin{cases} R_1^m = R_1^{m+1} = R_1 \\ V_1^m = V_1^{m+1} = V_1 \end{cases} \text{和} \begin{cases} R_2^m = R_2^{m+1} = R_2 \\ V_2^m = V_2^{m+1} = V_2 \end{cases}. \text{由此可得:}$$

$$\begin{cases} |R_3^{m+1} - R_3^m| = \left| \frac{1}{A_m} - \frac{1}{A_{m+1}} \right| \frac{V_1 - V_2}{2} D \\ |V_3^{m+1} - V_3^m| = |A_m - A_{m+1}| \frac{R_1 - R_2}{2D} \end{cases}$$

根据 FGTC 的匹配原理, 只要满足  $|R_3^{m+1} - R_3^m| > \Delta_R$  或  $|V_3^{m+1} - V_3^m| > \Delta_v$  即可以抑制  $(R_3^m, V_3^m)$  和  $(R_3^{m+1}, V_3^{m+1})$  的匹配. 由于  $|R_1 - R_2| > \Delta_R$ , 因此, 只要满足:

$$|A_m - A_{m+1}| \frac{\Delta_R}{2D} > \Delta_v \quad (16)$$

### 4.4 距离、速度维配对算法的正确性分析

FGTC 算法的核心是速度维和距离维的目标匹配.

由于容差存在, 配对算法只需保证不丢失应有的匹配.

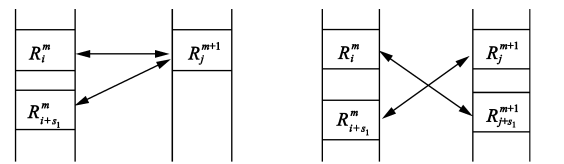
#### 4.4.1 距离维配对的正确性分析

距离维目标匹配算法若出现目标丢失, 有两种可能情景, 如图 11 所示.

针对图 11(a) 场景, 可写出 
$$\begin{cases} |R_i^m - R_j^{m+1}| < \Delta_R \\ |R_{i+s_1}^m - R_j^{m+1}| < \Delta_R \end{cases}$$

可以推知  $|R_i^m - R_{i+s_1}^m| < 2\Delta_R$ . 因此,  $R_i^m$  和  $R_{i+s_1}^m$  在分辨率范围内,  $R_j^{m+1}$  与其中任何一个匹配都可以满足系统测量约束.

针对图 11(b) 场景, 可写出 
$$\begin{cases} |R_i^m - R_j^{m+1}| > \Delta_R \\ |R_{i+s_1}^m - R_j^{m+1}| < \Delta_R \\ |R_i^m - R_{j+s_2}^{m+1}| < \Delta_R \end{cases}$$



(a) 由于  $R_i^m$  和  $R_{i+s_1}^m$  的匹配导致  $R_i^m$  和  $R_j^{m+1}$  配对的丢失  
(b) 由于  $R_{i+s_1}^m$  和  $R_j^{m+1}$  的匹配导致  $R_i^m$  和  $R_{j+s_2}^{m+1}$  配对的丢失

图11 可能出现的丢失目标场景

由  $\begin{cases} |R_i^m - R_j^{m+1}| > \Delta_R \\ |R_{i+s_1}^m - R_j^{m+1}| < \Delta_R \end{cases}$  和隐含条件  $R_i^m \leq R_{i+s_1}^m$ , 可以得到  $R_i^m - R_{j+s_2}^{m+1} < R_i^m - R_j^{m+1} < -\Delta_R$ , 与  $|R_i^m - R_{j+s_2}^{m+1}| < \Delta_R$  矛盾, 因此图 11(b) 场景在本算法中不会出现。

综上所述, 距离维配对不会出现匹配缺失现象。

#### 4.4.2 速度维配对的正确性分析

同理, 若速度维匹配时出现类似图 11(a) 情况, 有

$$|V_i^m - V_{i+s_1}^m| < 2\Delta_v, \text{ 由式(15)得 } |f_{d_i}^m - f_{d_{i+s_1}}^m| < \frac{\Delta f_d^m + \Delta f_d^{m+1}}{2},$$

选择  $\Delta f_d^m$  和  $\Delta f_d^{m+1}$ , 使得满足  $\frac{\Delta f_d^m + \Delta f_d^{m+1}}{2} < \delta_{\text{match}}^m$ , 则有

$|f_{d_i}^m - f_{d_{i+s_1}}^m| < \delta_{\text{match}}^m$ , 从而在 TFBM 算法计算之后,  $f_{d_i}^m$  和  $f_{d_{i+s_1}}^m$  的速度组内的目标重叠. 因此  $V_{i+s_1}^m$  与  $V_j^{m+1}$  的匹配丢失并不影响测量结果. 总结  $\Delta f_d^m$  和  $\Delta f_d^{m+1}$  的关系:

$$\frac{\Delta f_d^m + \Delta f_d^{m+1}}{2} < \min(\delta_{\text{match}}^m, \delta_{\text{match}}^{m+1}) \quad (17)$$

只要满足式(17), 速度维匹配不会丢失应有配对。

## 5 算法复杂度分析与比较

### 5.1 TFBM 算法的复杂度分析

采用 2.1 中的符号定义, 根据图 6, 可以很方便得出 TFBM 算法的最坏时间复杂度为  $K(N+M)$ . 为了方便比较, 采用目标数目  $T$  作为唯一参数, 最坏情况下有  $T=K=N=M$ . 因此 TFBM 算法的复杂度为  $2T^2$ .

### 5.2 FGTC 算法的复杂度分析

根据 2.2 的推导, 当目标数为  $T$  时, TFBM 算法最多产生  $(|T/2|+1)^2$  个匹配结果. 为了方便分析, 记为  $T^2/4$  个匹配结果. 根据图 7(a), FGTC 算法的时间复杂度为排序两组目标信息的时间复杂度、分组的时间复杂度、配对目标的时间复杂度之和. 其中, 众所周知, 排序的时间复杂度为  $\frac{T^2}{4} \log_2 \frac{T^2}{4}$ .

#### 5.2.1 速度分组所消耗的时间和结果分析

速度分组操作是在对目标排序之后进行, 排序之后的目标满足式(11). 根据图 7(b) 可知, 分组一个周期的测量结果需要遍历这个周期的所有目标数据, 因此其时间复杂度为  $T^2/4$ . 由于速度的最大可能值只有  $T$  个, 因此一次测量结果最多产生  $T$  个结果。

#### 5.2.2 配对目标的时间复杂度和结果分析

(1) 速度维配对

从图 7(c) 中易知其时间复杂度为  $2T$ . 匹配两组长度为  $T$  的数组, 最多得到  $T$  个配对结果. 因此, 速度组配对最多产生  $T$  对组合。

(2) 距离维配对

根据 2.2 节, 每个速度组中最多含有  $T/2$  个待处理目标. 类似于速度配对, 匹配每一对分组内的目标的时

间复杂度为  $T$ . 配对所有分组目标的时间复杂度为  $T^2$ .

### 5.2.3 FGTC 算法的时间复杂度

FGTC 算法的最坏情况时间复杂度为:

$$\left(\frac{T^2}{4} \log_2 \frac{T^2}{4} + \frac{T^2}{4}\right) + 2T + T^2 = T^2 \left(\log_2 T + \frac{1}{2}\right) + 2T \quad (18)$$

## 5.3 算法性能对比

文献[6]的方法时间复杂度为  $T^3$ , 文献[7,8]并没有明确提出梯形周期内的中频匹配算法. TFBM 算法的时间复杂度为  $2T^2$ , 是一种较为高效的匹配算法。

文献[1,6]采用频谱形状匹配的方法来消除虚假目标, 误差大、计算量大. 文献[4]没有明确提出消除算法. 文献[7]采用优化目标函数的算法, 提升了虚假目标的消除概率. 但计算量大, 枚举方法配对的复杂度为  $T^4$ , 由式(18)可知 FGTC 是一个比较高效的算法。

## 6 算法仿真与分析

### 6.1 仿真环境与参数设置

算法使用 Matlab 软件仿真, 雷达参数设置为  $f_{\text{base}} = 24\text{GHz}$ ,  $\Delta R = 0.1\text{m}$ ,  $\Delta V = 0.25\text{m/s}$ . 根据式(14)和式

$$(15) \text{ 得 } \begin{cases} e_R^m = e_R^{m+1} = \frac{c}{2B} = \frac{\Delta R}{2} \\ e_v^m + e_v^{m+1} \leq \Delta V \end{cases} \text{. 为保证两个周期的测速结}$$

果都在误差范围内, 有  $\max(e_v^m, e_v^{m+1}) \leq \frac{\Delta V}{2}$ , 可得  $B =$

$$3\text{GHz}, f_{\text{re},1} + f_{\text{re},2} = \frac{2f_{\text{base}}}{c} (e_v^m + e_v^{m+1}) \leq 40\text{Hz}, \max(f_{\text{re},1}, f_{\text{re},2})$$

$\leq 20\text{Hz}$ , 选取调频时长  $\begin{cases} f_{\text{re},1} = 10\text{Hz} \\ f_{\text{re},2} = 20\text{Hz} \end{cases}$ , 即  $\begin{cases} T_{\text{re},1} = 100\text{ms} \\ T_{\text{re},2} = 50\text{ms} \end{cases}$ , 验证满足式(16)、(17)。

进而可计算出第 1 调制周期 TFBM 算法参数如下  $\Delta f_{\text{IF}}^1 = 20\text{Hz}$ ,  $\Delta f_d^1 = 10\text{Hz}$ ,  $T_{c,1} = 100\text{ms}$ ,  $T_{c,1} = 100\text{ms}$ ,  $\delta_{\text{match}}^1 = 30\text{Hz}$ ,  $e_R^1 = 0.05\text{m}$ ,  $e_v^1 = 0.0625\text{m/s}$ .

同理, 可计算出第 2 调制周期 TFBM 算法参数  $\Delta f_{\text{IF}}^2 = 40\text{Hz}$ ,  $\Delta f_d^2 = 20\text{Hz}$ ,  $T_{c,2} = 50\text{ms}$ ,  $\delta_{\text{match}}^2 = 60\text{Hz}$ ,  $e_R^2 = 0.05\text{m}$ ,  $e_v^2 = 0.125\text{m/s}$ .

FGTC 算法参数为  $\Delta_v = 0.0938\text{m/s}$ ,  $\Delta_R = 0.05\text{m}$ . 若令  $R_{\text{max}} = 200\text{m}$ ,  $V_{\text{max}} = 250\text{km/h}$ , 由  $f_s = 2 \max_{1 \leq i \leq N} \left( \overline{f_{\text{IF}}^i} \right) =$

$$2 \left( \frac{4B}{c} f_{\text{re},2} R_{\text{max}} + \frac{2f_{\text{base}}}{c} V_{\text{max}} \right), \text{ 可得采样频率 } f_s \approx 340\text{kHz}.$$

第 1 周期扫频段 FFT 点数  $N_s^1 = f_s / \Delta f_{\text{IF}}^1 = 17000$ ,  $N_c^1 = f_s / \Delta f_d^1 = 34000$ . 第 2 周期扫频段 FFT 点数  $N_s^2 = 8500$ ,  $N_c^2 = 17000$ .

最大不模糊测量距离由  $\tau_d \leq \min(T_{\text{re},1}, T_{\text{re},2})/2$  决定, 其中  $\tau_d = 2R/c$  为目标回波延迟. 但实际最大不模糊

测量距离和速度都由采样频率决定. 本次仿真最大不模糊测量距离和速度分别为 200m 和 250km/h.

## 6.2 所有目标均可分辨的仿真

选取目标距离、速度见表 2. 将两个不同周期的 TFBM 算法的匹配结果和 FGTC 算法的结果放在一幅图上,如图 12.

表 2 仿真所使用的目标参数

目标序号	1	2	3	4	5	6	7	8
距离(m)	1	2	3	5	5	7	8	2
速度(m/s)	0	0.2	0	-1	-0.5	-0.5	0	0.5
目标序号	9	10	11	12	13	14	15	-
距离(m)	11	12	15.05	18	20	20.1	25	-
速度(m/s)	-0.5	3	1.5	18	-1	0.7	18	-

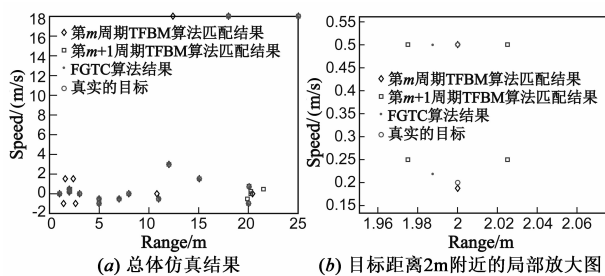


图 12 所有目标均可分辨情况下的测量结果

## 6.3 存在不可分辨目标的仿真

修改表 2 目标 8 的速度为 0.1m/s,使其与目标 2 不可分辨,添加目标 16 作为对比,其参数为(2m, 1m/s). 结果如图 13. 可以看出,在出现不可分辨的目标的情况下,本文方法可能将其看作同一目标,但是不会丢失匹配.

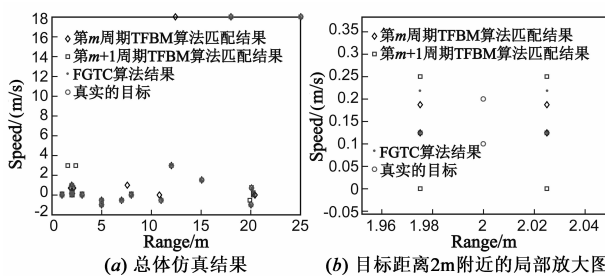


图 13 存在不可分辨目标情况下的仿真

## 6.4 理想环境下随机目标仿真

为充分验证算法的性能,本文使用 MATLAB 的 randi 函数随机产生了一些可以互相分辨的目标,距离范围在 200m 以内,速度范围为  $0 \sim \pm 250\text{km/h}$ . 目标环境为理想,即没有噪声和干扰,检测概率为 100%,虚警概率为 0%.

### 6.4.1 场景密集程度的定义

为验证本文方法在不同密集程度的场景下的性

能,此处定义目标在距离维上的占有率为密集程度:

$$D = \frac{T}{R_{\max}/\Delta R} = \frac{T\Delta R}{R_{\max}} \quad (19)$$

基于式(19)定义密集程度的经验判据为: $D \leq 2.5\%$  认为当前场景是非密集场景, $D > 5\%$  认为是密集场景, $D \gg 5\%$  认为是超密集场景.

### 6.4.2 非密集场景的仿真

令  $T = 50$ . 将 100 次仿真数据绘入图 14.

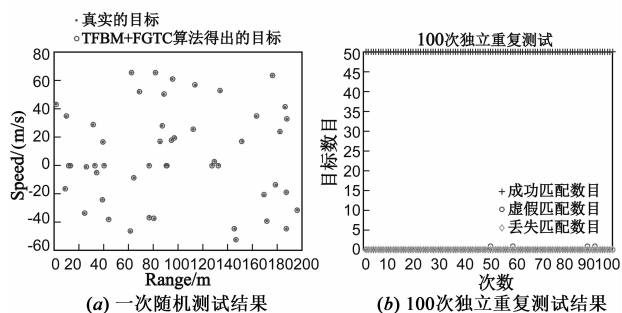


图 14 非密集情况下的随机目标仿真

### 6.4.3 密集场景的仿真

令  $T = 100$ . 将 100 次仿真数据绘入图 15.

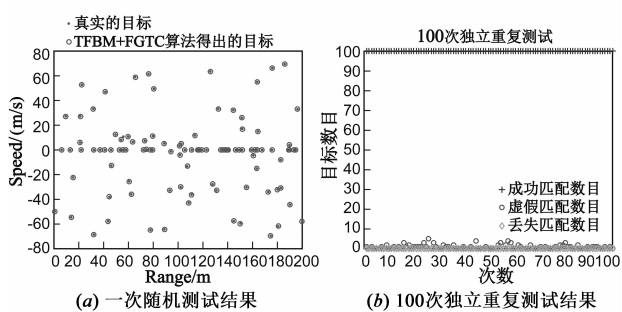


图 15 密集情况下的随机目标仿真

### 6.4.4 超密集场景的仿真

令  $T = 500$ . 将 100 次仿真数据绘入图 16.

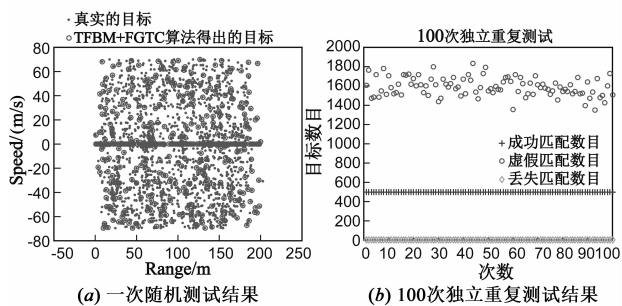


图 16 超密集情况下的随机目标仿真

### 6.4.5 理想环境仿真结果分析

总结 6.4.1 至 6.4.4 的结果如表 3. 可见,本文提出的算法  $D \leq 2.5\%$  时可近似认为不重不漏地检测出所有目标. 并且任何场景下都没有丢失目标.

表 3 不同密集程度下随机目标仿真结果总结

场景	$D \leq 2.5\%$	$D > 5\%$	$D \gg 5\%$
成功匹配的目标数	50	100	100
100 次测试中最大虚假匹配目标数	1	5	1800
100 次测试中出现虚假匹配的次数	4	49	100
丢失匹配的目标数	0	0	0

## 6.5 非理想环境下随机目标仿真

### 6.5.1 虚警情况仿真

令虚警概率  $P_{fa} = 1\%$ , 则 CFAR 检测器在每个扫频段产生的平均虚假目标谱线数目为  $\frac{P_{fa} R_{max}}{\Delta_r} = 40$ . 本文在产生每一段真实目标谱线之后, 使用 randi 函数加入了 40 个随机产生的虚假目标谱线, 之后采用 TFBM + FGTC 算法对其进行处理. 在非密集场景下进行 100 次测试, 如图 17.

### 6.5.2 漏警情况仿真

令检测概率  $P_d = 98\%$ , 则 CFAR 检测器在每个扫频段产生的平均目标谱线数目为  $T \times P_d = 49$ . 本文在产生每一段真实目标谱线后, 随机删除一个目标谱线, 之后采用 TFBM + FGTC 算法对其进行处理. 在非密集场景下进行 100 次测试, 结果如图 18.

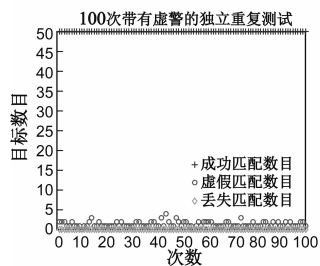


图 17 虚警情况下的非密集场景仿真

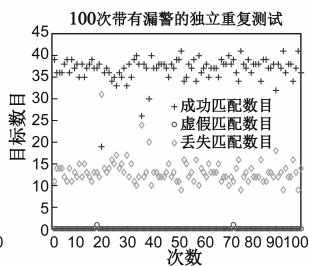


图 18 漏警情况下的非密集场景仿真

### 6.5.3 非理想环境仿真结果分析

在 6.5.1 的仿真中, 每一个调频段有真实目标谱线 50 条, 随机虚警目标谱线 40 条. 虽然较于图 14, 虚假匹配的概率有所提高, 但 100 次实验中, 最多出现的虚假匹配数目不超过 5 个. 使用本文方法将真实目标比例从原来的 50/90 提升到了 50/55, 这表明本文方法对于虚警目标具有良好的抑制能力.

在 6.5.2 的仿真中, 每一个调频段有真实目标谱线 50 条, 随机漏警目标谱线 49 条. 较于图 14, 丢失匹配的概率从 0 提高到了 15/50. 这表明本文方法不适合用在检测概率低的环境下.

由于本文采用多段匹配的测量方法, 输出一组结果需要 6 个 CFAR 检测器的判决, 等效检测概率和虚警概率约为  $\tilde{P}_d = (P_d)^6$ ,  $\tilde{P}_{fa} = (P_{fa})^6$ . 因此本文也适用于克服 CFAR 检测器虚警概率高的不良影响.

对于最大不模糊距离、速度之外的目标, 在采样时

出现频谱泄漏, 即在测量结果中引入虚警影响. 本文方法对于虚警目标具有较强的抑制能力, 因此本文方法适用于抑制模糊测量范围之外的目标.

## 6.6 本文算法的适用性分析

本文方法在密集环境、噪声等方面的适应性如表 4.

表 4 本文算法的适用性分析

影响因素		本文方法的适应性	
密集度影响	非密集环境	非常适合	
	密集环境	适合	
	超密集环境	不适合	
噪声杂波影响	虚警概率	高	较适合
		低	非常适合
	检测概率	高	非常适合
		低	不适合
模糊测量范围之外的目标影响		较适合	

## 7 总结

本文针对 FMCW 雷达在多目标参数测量方面的困难, 提出了一种结合 FMCW 和 CW 的变周期梯形波调制方式. 首次推导了梯形波调制方式在最坏情况下匹配结果的表达式; 发现在目标数量较大时, 梯形波体系下的最坏情况匹配结果数约为传统三角波结果数的 25%. 这表明在梯形波体制下, 可以产生更少的匹配结果数, 可以优化后续处理的时间和空间复杂度. 并且, 可以通过改变梯形波调制周期, 利用真实目标与调制周期无关而虚假目标与调制周期相关的特性来进一步消除虚假目标.

同时, 本文还针对变周期梯形波调制 FMCW 雷达的实际应用, 设计了两个高效的容差匹配算法 TFBM 和 FGTC. 通过理论推导证明了算法的正确性和复杂度, 并在详细的仿真之后给出了算法的适应性分析. 测试结果表明: 本文所提出的方法在非密集场合与高检测概率的条件下不仅可以无模糊地测量多目标的速度并且具有较低的计算复杂度.

针对 4.2 中关于虚假目标的产生情况的分析, 本文并没有深入讨论如图 9 和 10 的情况. 下一步的工作就是找出调频参数与虚假目标产生概率的定量关系, 并最大程度减少虚假目标的产生.

## 参考文献

- [1] 杨建宇, 凌太兵, 贺峻. LFM CW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(2): 169-173.  
Yang Jian-yu, Ling Tai-bing, He Jun. MTD and range-velocity decoupling of LFM CW radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(2): 169-173. (in Chinese)

- [2] 王月鹏,赵国庆. 二维 FFT 算法在 LFM CW 雷达信号处理中的应用及其性能分析[J]. 电子科技,2005,18(5): 25-32.  
Wang Yue-peng, Zhao Guo-qing. The application of 2D FFT algorithm in LFM CW radar signal processing and its performance analysis[J]. Electronic Science and Technology,2005,18(5):25-32. (in Chinese)
- [3] Rohling H, Kronauge M. New radar waveform based on a chirp sequence[A]. Radar Conference (Radar), 2014 International IEEE[C]. Cincinnati, USA; IEEE,2014. 1-4.
- [4] 徐涛,金昶明,孙晓玮,夏冠群. 一种采用变周期调频连续波雷达的多目标识别方法[J]. 电子学报,2002,30(6):861-863.  
XU Tao, JIN Chang-ming, SUN Xiao-wei, XIA Guan-qun. A novel method to identify multi-target by FMCW radar [J]. Acta Electronica Sinica,2002,30(6):861-863. (in Chinese)
- [5] 郑远,温博,马瑞平. 基于双周期锯齿波 LFM CW 的距离速度去耦合[J]. 电子科技,2013,26(7):125-133.  
ZHENG Yuan, WEN Bo, MA Rui-ping. Range-velocity decoupling based on dual period saw-tooth wave LFM CW radar[J]. Electronic Science and Technology,2013,26(7): 125-133. (in Chinese)
- [6] Hyun E, Lee J H. A method for multi-target range and velocity detection in automotive FMCW radar[A]. Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC 09. 12th International IEEE Conference on IEEE [C]. St Louis, USA; IEEE, 2009. 1-5.
- [7] Fan Y, Xiang K, An J, et al. A new method of multi-target detection for FMCW automotive radar[A]. Radar Conference 2013, IET International[C]. Xi'an, China; IET, 2013. 1-4.

[8] 薛效龙. 基于梯形波 FMCW 雷达的多目标探测技术的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2014.

[9] BLAKE S. OS-CFAR theory for multiple targets and nonuniform clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems,1988,24(6):785-790.

#### 作者简介



**邢自然** 男,1992年3月出生,山西长治人,2013年毕业于中北大学电子科学与技术系,其后进入上海科技大学信息科学与技术学院.现为硕博连读生,从事高维信号处理方面的有关研究.

E-mail: xingzr@shanghaitech.edu.cn



**朱冬晨** 女,1991年1月出生,山东德州人,2013年毕业于武汉大学电子信息工程系,其后进入中科院上海微系统与信息技术研究所.现为硕博连读生,从事数字信号处理方面的有关研究.



**金星** 男,1967年4月出生于吉林,中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员、博士生导师.1989年于吉林大学获物理学学士学位,1995年于大连理工大学获微电子材料博士学位,1999年于欧洲微电子研发中心(IMEC)获微电子材料与器件博士后.目前主要从事微电子技术的研究,总线类汽车级芯片(LIN/CAN)设计、生产和应用,引导汽车级集成电路的可靠性研究.