

· 雷达组网协同探测技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.008

基于信号配准的组网信号级融合检测研究

方 轩,孙晓凡,万海东

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:针对多雷达的信号级融合检测,提出了一种信号配准方法。在目标搜索阶段利用预处理的匹配表将各雷达信号时空对应,根据预先划分的检测单元进行目标检测,该方法能够减少信号配准时间,排除无用观测值,降低融合中心计算资源消耗;在目标跟踪阶段,利用雷达接收波束重合区间确定信号融合检测区间,能够减少融合中心待处理观测值,更快聚焦至目标。该方法对距离欺骗的有源干扰目标有一定预判性,降低了虚假目标出现的可能,并且能够降低运算量,提高检测效率。

关键词:网络化雷达;信号配准;信号级融合检测;预处理

中图分类号:TN957.51

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2020)12-0040-06

引用格式:方 轩,孙晓凡,万海东. 基于信号配准的组网信号级融合检测研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(12): 40-45.

FANG Xuan, SUN Xiaofan, WAN Haidong. A study on signal level fusion detection based on signal registration[J]. Modern Radar, 2020, 42(12): 40-45.

A Study on Signal Level Fusion Detection Based on Signal Registration

FANG Xuan, SUN Xiaofan, WAN Haidong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Based on the signal level fusion of multiple radar detection, a method of signal registration is presented in this paper. The target search phase by using the matching table of the pretreatment to the corresponding radar signal in time and space, according to the division in advance detection unit for target detection, this method can reduce the registration time signal, eliminate useless observations, reduce consumption of computing resources fusion center; In the target tracking stage, signal fusion detection interval can be determined by using radar received beam coincidence interval, which can reduce the observation value to be processed in fusion center and focus to the target faster. This method can be used to predict the range spoofing active jamming targets, reduce the possibility of false targets, reduce the amount of computation, and improve the detection efficiency.

Key words: networked radar; signal registration; signal level fusion detection; pretreatment

0 引 言

网络化雷达系统由空间分散部署的若干发射机、接收机组成,利用多雷达在时域、频域、空域等多个方面的信息融合提升系统时空覆盖率,抗干扰能力,拥有更强的可靠性和生存能力^[1]。网络化雷达系统常利用信号配准后的分辨单元进行检测^[2-4],通过提高联合检测的信号配准效率,能够减少融合中心计算量,提高检测速度。各体制雷达信号匹配基于信号特点和融合检测算法:相控阵雷达利用子单元结构实现信号匹配积累;分布式雷达利用各站信号相互正交精确估计相参参数,对各信道匹配滤波器输出信号依照相参参数进行时延和相位调整后实现信号相参融合^[5];文献[6]利用多个脉冲时刻差配准脉冲回波,对不同频带的雷达观测在统计相关域积累后检测。

对多雷达信号融合,利用信号相干检测调整时延的信号配准方法^[5]对信号形式提出了要求,且计算量较高;文献[6]对配准后的信号以滑窗分割,分割后的信号滑窗的互相组合会爆炸式提升融合中心运算量;文献[7]将整体数据分割为单块数据,逐一进行融合检测,在组网中通过数据逐级传输同步更新检测参数,降低了单次检测数据量,但是提高了检测次数。为了降低运算量,提高检测效率,本文提出了一种信号级融合检测的信号配准方法:该方法通过接收波束间的重合关系确定融合检测区间,利用各雷达最小分辨单元划分检测区间,减少了检测初始区间,提高分辨精度,能有效运用于目标跟踪,减少联合检测时间。融合中心对信号检测选取非相参积累的广义似然比检测方法(GLRT)^[8]对似然函数中的未知量进行最大似然估计(MLE),获得次优的全局判决。仿真结果证明了该方法能在对检测性能影响较低条件下,快速聚焦至目标存在区间,有效提高检测效率。

通信作者:方轩 Email:819679698@qq.com

收稿日期:2020-08-08 修订日期:2020-10-10

1 信号模型及配准

网络化雷达系统可视为一个多发多收的分布式雷达系统。假设对于一个目标进行检测, 组网内各接收机和发射机已完成时空校准和误差校准, 若 t 时刻, 该目标能被组网中的多个雷达检测, 则目标必定存在于该时刻各接收机扫描空间波束角重合区, 对于雷达系统 R_j , d_{sj} 为发射机至目标距离, d_{vj} 为接收机至目标距离, 都有接收角 θ_{vj} , 波束宽度 $\Delta\theta_{vj}$, 信号采样率 f_{vj} , 最小分辨距离 $\Delta l_i = c/(2f_{vj})$ 。由采样定理^[9]可知, f_{vj} 需满足 $f_{vj} \geq \tau_j$, 且 $f_{vj} \geq 1/B_j$, τ_j 为脉冲信号时宽, B_j 为脉冲信号带宽。由于重合区间可能大于该位置的最小分辨单元, 故 R_j 接收信号起始点可能存在于接收机对重合区间对应的距离单元上的多个采样点之间。对时空配准后的网络化雷达系统, 若各接收机空间位置确定且接收角参数可知, 则利用各接收机中心角可获得目标相对各接收机距离参数估值 (d_{vj}, θ_{vj}), 可得单站 R_j 在该点的空间分辨单元 ΔS_j

$$\Delta S_j = \frac{1}{2} (d_{vj}^2 - (d_{vj} - \Delta l_j)^2) \Delta \theta_{vj} \quad (1)$$

对 ΔS_i 按照大小排序可得 $\Delta S_i'$, 其中, $\Delta S_1' = \min[\Delta S_i]$, 利用 $\Delta S_1'$ 对应单站与其他单站比较可获得接收波束重合区间 S_{ij} 。可以证明若存在两个接收机, 对其他任何接收机的重合区域都相同, 则两个接收机在空间上重合。由重合区间对各单站接收采样的时空对应可在接收采样序列上取到 $r_j(n)$

$$\begin{cases} s_j(n) + \text{noise}, & 0 < n\Delta T_j - T_j < \tau_j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n \in [n_{\min}, n_{\max}]$, 最小距离单元 $n_{\min} = \lceil 2R_{j\min}/(c\Delta T_j) \rceil$, 最大距离单元 $n_{\max} = \lceil 2R_{j\max}/(c\Delta T_j) \rceil$, 采样时间间隔 $\Delta T_j = 1/f_{vj}$, $R_j \in S_{ij}$; 对回波脉冲采样有 $s_j(n) = \bar{A}_j \exp(j(2\pi f_{sj}(n\Delta T_j - T_j) + \theta_{sj}))$, 其中, \bar{A}_j 为回波信号幅度; f_{sj} 为回波信号频率; θ_{sj} 为信号采样初始相位; τ_j 为信号时宽。 T_j 为信号发射至接收的时间间隔, 有

$$T_j = \frac{d_{si} + d_{vj}}{c} \quad (3)$$

若该单站自发自收, 则 $i=j$, $d_{si} = d_{vj}$; 若收发异站, 则 $i \neq j$ 。

由此得到了一段可能存在目标的较短时空域, 将检测区域从全局缩小至了该重合域, 极大减少了信号级融合检测的信号匹配时间和总体计算量。由于常有 $n_{\min} \neq n_{\max}$, 且 $n_{\max} - n_{\min} > 1$, 获得的时域并不是一个距离单元, 而是一段区间, 可以基于此进行下一步融合检测, 也可利用信号特征对信号进一步处理, 获得一个唯

一的目标距离单元: 可以利用信号相干性时延处理^[5]; 或使用文献[6]提出的相关域互积累的方法统一处理; 本文利用各接收站的信号统计特性单独处理, 方法如下:

存在目标时, 对回波脉冲的 $N = \lfloor \tau/\Delta T_j \rfloor$ 个快时间连续采样可得信号矢量集 $\mathbf{r}_j = [r_j(1), r_j(2), \dots, r_j(N)]$, 对回波信号 $s_j(i)$ 有

$$s_j(i) = s_j(1) \exp(j(i-1)\Delta\theta_j) \quad (4)$$

式中: $\Delta\theta_j = 2\pi f_{vj}\Delta T_j$, 为信号采样间隔弧度; $s_j(1) = \bar{A} \exp(j\theta_j)$; 对这连续的 N 个观测值, 根据信号特征, 我们可以获得

$$\sum_{i=1}^{N-1} r_j(i) = \bar{A} e^{j\theta_j} \frac{1 - e^{j(N\Delta\theta)}}{1 - e^{j(\Delta\theta)}} + \sum_{i=1}^{N-1} \text{noise} \quad (5)$$

由上式可获得信号到达时间在抽样值 n 上的估计

$$\min_{n \in [n_{\min}, n_{\max}]} \left| \sum_{i=0}^{N-1} r_j(n+i) - s_j(n) \frac{1 - e^{j(N\Delta\theta)}}{1 - e^{j(\Delta\theta)}} \right| \quad (6)$$

或者基于匹配滤波器非相参积累有

$$\max_{n \in [n_{\min}, n_{\max}]} \sum_{i=0}^{N-1} \| r_j(n+i) \|^2 \quad (7)$$

由此可以获得一个估计的回波到达距离单元, 并以此获得回波功率等参数。针对不同的单站波束组合, 接收站可以获得不同距离单元 n_i ; 利用不同接收站的 n_i , 我们可以对回波信号进行配准, 以此信号进行接下来的检测判决; 利用融合中心资源调度可实现目标追踪和检测空域全覆盖。对组网系统, 由式(1)、式(7)可知, 信号配准后的系统空间分辨单元精度与各雷达单站分辨率有关, 单站分辨率不一致时, 分辨精度由单站最高分辨率决定。

这种配准方法存在一定的误差: 若存在某点的噪声瞬时功率大于相邻的回波信号瞬时功率与该点噪声瞬时功率的和, 则会将该噪声点视为信号的起始或结束点。由仿真结果可知, 误差产生的概率与信噪比、脉冲采样数有关: 信噪比越大, 误差产生的概率越小; τ_j/f_{vj} 越大 (对非调频信号; 对调频信号, 时宽带宽积 $\tau_j B_j$ 越大), 采样数越多, 误差产生的概率越小。

2 信号级融合检测

针对网络化雷达系统的信号融合检测时, 对目标的非起伏模型 (Swearing 0 型) 在 NP (Neyman Pearson) 准则下采用 GLRT 检测^[9]。

已知基于观测值 r_{km} 的决策准则

$$\Lambda(r) = \frac{\prod_{k=1}^K \prod_{m=1}^{M_k} \prod_{n=0}^{N_{km}-1} f(r_{km}(n) | H_1)}{\prod_{k=1}^K \prod_{m=1}^{M_k} \prod_{n=0}^{N_{km}-1} f(r_{km}(n) | H_0)} \frac{H_1}{H_0} \stackrel{?}{>} \lambda \quad (8)$$

由于采样时的信号不是先验已知,所以使用次优的 GLRT 检测器^[10],则有

$$\hat{A}_{km} = \arg \max_{\tilde{A}_{km}} f(r_{km} | \tilde{A}_{km}, H_1) \quad (9)$$

可得检测对象 z'

$$z' = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{n=0}^{N_{km}-1} \frac{|r_{km}(n)|^2}{\sigma_{km}^2} \frac{H_1}{H_0} \stackrel{?}{>} T \quad (10)$$

式中: k 是发射机编号; m 是接收机编号,假设接收机上各信号不重合; M_k 是接收到来自 k 发射机信号的接收机数目; N_{km} 是接收机 m 和发射机 k 构成的探测信道的观测信号数,信号时宽越大,采样率越高,观测数越多。

H_0 条件下, z' 满足指数分布

$$p_{z'}(z' | H_0) = \begin{cases} 0, & z' < 0 \\ \frac{(z')^{MN-1}}{(MN-1)!} \exp(-z'), & z' \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

H_1 条件下, z' 满足广义偏正卡方分布, $p_{z'}(z' | H_1)$

$$\begin{cases} 0, & z' < 0 \\ \left(\frac{z'}{E}\right)^{\frac{MN-1}{2}} \exp(-(z' + E)) I_{MN-1}(2\sqrt{z'E}), & z' \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $MN = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{n=0}^{N_{km}-1} 1 \geq 2$, 是观测总数,归一化后的能量 E (即信噪比) 满足下式

$$E = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{n=0}^{N_{km}-1} \frac{A_{km}^2}{\sigma_{km}^2} \quad (13)$$

由此可得虚警概率 P_{FA}

$$P_{FA} = \Gamma(T, MN) \quad (14)$$

检测概率 P_D

$$P_D = Q_M(\sqrt{2E}, \sqrt{2T}, MN) \quad (15)$$

可知,对同一组网系统,虚警概率 P_{FA} 不变时,观测值信噪比 E 越大,检测概率 P_D 越高。若各单站同构,各发射机发射信号均能被每一个接收机接收,则由上式可得

$$P_{D1} = Q_M\left(\sqrt{2N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \frac{A_{km}^2}{\sigma_{km}^2}}, \sqrt{2T}, K \cdot M \cdot N\right) \quad (16)$$

3 组网预处理

网络化雷达系统联合检测时,若已检测到目标,处于跟踪状态,对跟踪目标的信号配准可以较快实现;若未检测到目标或处于搜索状态,信号配准过程中对各单站的各波束角重合区域的重复计算会消耗额外的资源。为了减少计算资源开销,可以对配准过程进行如下的预处理。

3.1 方形单元栅格划分法

方形单元栅格划分法将空间配准后的各单站及探测目标置于统一的笛卡尔坐标系下,在固定的坐标系下将待检测区域划分为方形检测单元,然后映射至各单站雷达的波束角及距离单元,通过减少检测区域数降低计算资源开销。

如图 1 所示,方形单元栅格划分法直接将待检测区域划分为多个方形栅格,每个方格代表一个检测单元,融合中心提前计算各检测单元映射至各单站雷达的波束角和距离单元,获得映射表,平面坐标系下有

$$(X, Y) = R_i(n_i, \theta_i) = R_j(n_j, \theta_j) \quad (17)$$

式中: (X, Y) 为检测单元在统一坐标系下的坐标, i, j 为雷达单站编号, θ_i, θ_j 分别为雷达 i 和雷达 j 探测到该单元时的波束角, n_i, n_j 为探测该单元时的距离单元。由图 1 可知, w_x 和 w_y 分别为方形栅格的长和宽,此时的空间分辨率为 $w_x w_y$,为了获得较高的空间分辨率, w_x, w_y 需尽可能小;同时对方形栅格有 $w_x = w_y \geq \Delta R_{\max}$, ΔR_{\max} 为各单站距离分辨率的最大值,满足该条件时,各检测单元空间可分辨。

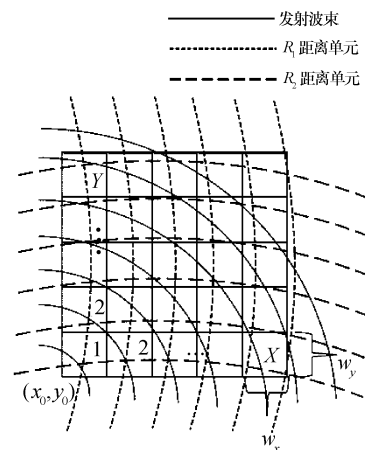


图 1 方形单元栅格划分法

各检测周期内,可对各检测单元直接查表获得相应的检测对象,此时检测单元 (x, y) 的信号级融合准

则对象为

$$z_{(x,y)} = \sum_{i=1}^M \frac{r_{i,\theta_i}(n_i)^2}{\sigma_i^2} \frac{H_1}{H_0} \begin{matrix} > T \\ < T \end{matrix} \quad (18)$$

式中: M 为雷达总数, 检测对象 $r_{i,\theta_i}(n_i)$ 是雷达 i 在 θ_i 方位角时第 n_i 个信号采样。

3.2 最小空间分辨率法

最小空间分辨率法在统一的坐标系下将待检测区域按照最小分辨单元划分检测单元, 然后映射至各单站雷达。

流程如图 2 所示, 判断各雷达各采样单元是否为所有雷达照射该空间的最小分辨率单元, 若不是最小分辨率单元, 则对下一个分辨单元进行判断; 若是最小单元, 即 $\Delta S_{\min} = \Delta S_i$, 提取各雷达相关参数信息于映射表

$$S_i = \{(j, n_j, \theta_j)\} \quad (19)$$

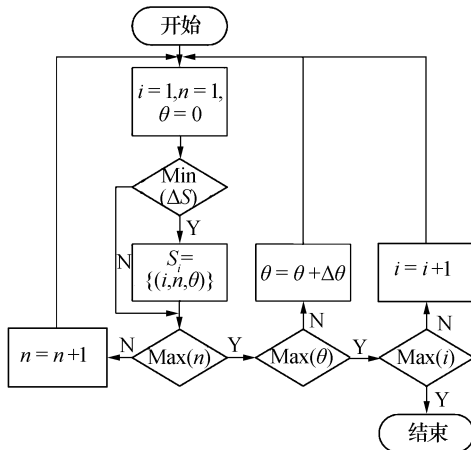


图 2 最小空间分辨率法

各融合检测周期内, 将非空的 $S_i(n_i, \theta_i)$ 对应的距离单元作为检测单元, 可得信号级融合检测对象

$$z_{(i,n,\theta)} = \sum_{i=1}^M \frac{r_{i,\theta_i}(n_i)^2}{\sigma_i^2} \frac{H_1}{H_0} \begin{matrix} > T \\ < T \end{matrix} \quad (20)$$

式中: M 为雷达总数, 检测对象 $r_{i,\theta_i}(n_i)$ 是雷达 i 在 θ_i 方位角时第 n_i 个信号采样。

4 抗距离欺骗式干扰

距离欺骗式干扰是一种基于数字射频存储器 (DRFM) 的有源欺骗式干扰, 其基本原理为^[11-12]: 干扰机捕获雷达发射的探测信号, 对其采样量化复制, 选择返回时延调制转发, 使探测雷达信号处理后获得多个真假“目标”。对各雷达单站的探测结果如图 3 所示^[13]。

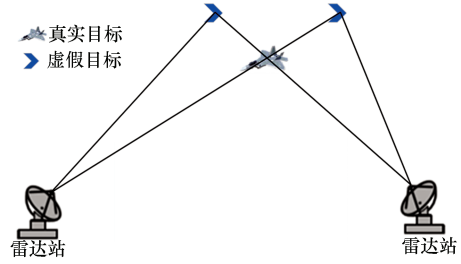


图 3 距离欺骗下的雷达单站检测结果

若存在距离假目标需满足

$$|R_f - R| > \Delta R \quad (21)$$

式中: R 为目标的距离; ΔR 为雷达分辨率; R_f 为距离假目标的距离, 满足

$$R_f = \frac{ct_f}{2} + R \quad (22)$$

式中: t_f 为干扰机欺诈脉冲与探测脉冲的时延。本文提出的配准方法能够减少干扰产生的虚假点迹, 对于距离欺骗产生的虚假点迹, 未被干扰的单站信号配准后的检测单元内只存在噪声, 对该类点迹可通过调整检测门限或进一步目标识别鉴别其真假。

5 仿真分析

仿真采用了两个独立的单基地雷达系统对同一固定目标进行检测。两雷达与目标空间分布: 雷达 1 的坐标为 $(0, 0)$, 雷达 2 的相对坐标为 $(40 \text{ km}, 0)$, 检测目标的相对位置为 $(40 \text{ km}, 30 \text{ km})$ 。两雷达同型, 且已经过时空配准, 同时对目标进行照射, 仿真设定的发射信号均为频率 1 MHz , 信号宽度 20 个周期, 最大检测区间为 60 km , 采样频率均为 500 kHz , 即对信号可获得 10 个采样点, 单周期共有 200 个采样点, 接收波束角均为 3° 。

两个自发自收雷达系统的接收信号幅度与时间关系及其配准结果如图 4 所示, 接收信噪比 $SNR_1 : SNR_2 = 1 : 1$ 。若两雷达信号非正交, 则接收信号如图 4a) 两幅图所示; 若两雷达信号正交, 且同时照射目标, 则信号处理后的结果如图 4b) 两幅图所示。红色方框内的区域是经过初步配准后确定的自发自收信号检测区间, 信号到达时刻处于该区间内, 站 1 确定的回波重合区间在 $3.20 \sim 3.46 \times 10^{-4} \text{ s}$, 站 2 确定的回波重合区间在 $1.84 \sim 2.14 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

配准后, 各雷达系统融合检测区间初步确定, 检测区间从雷达 1 接收信号整体的 200 个点缩小到 14 个点的检测区间, 从雷达 2 的 200 个点缩小到了 15 个点的检测区间, 降低了整体运算量。对图 4 的两雷达接收信号配准结果, 利用非相干积累方法进一步配准获取目标的回波到达时间估计, 在信号功率与时域上的

配准结果如图5所示,站1的回波起始点在黑框中间的黑线处,即 $t=3.34 \times 10^{-4}$ s;站2的回波起始点在 $t=2.04 \times 10^{-4}$ s处。

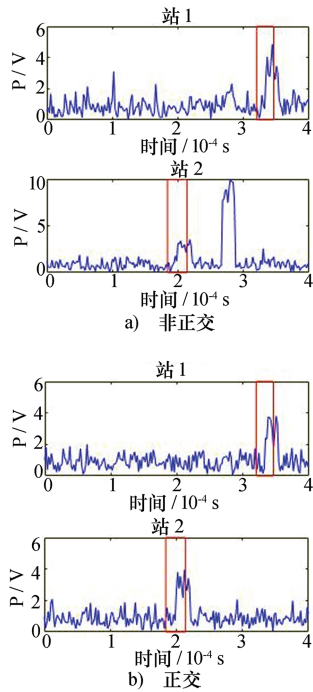


图4 配准的信号

这种配准方法存在一定的误差:若存在某点的噪声瞬时功率大于相邻的回波信号瞬时功率与该点噪声瞬时功率的和,则会将该噪声点视为信号的起始或结束点,这会使信号配准产生误差,误差产生的概率与信噪比有关。

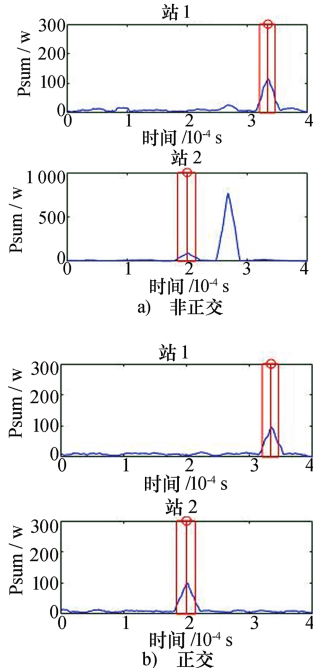


图5 非相干积累的信号配准

对检测性能进行仿真实验,结果如图6所示,虚警概率为 10^{-8} ,图6a)中两接收站的信噪比为 $SNR_1 : SNR_2 = 10 : 3$;通过各信噪比条件下的1000次重复积

累实验获得了如图的实验结果。图中实线表示理想的信号级融合检测结果,虚线表示了信号配准后的信号级融合检测结果,可以发现,配准误差对融合检测的结果有一定影响,但仍能获得较好的检测结果;图6b)中两接收站的信噪比为 $SNR_1 : SNR_2 = 1 : 1$ 时,通过各信噪比条件下的1000次重复积累实验获得了如图6b)的实验结果。图中实线表示理想的信号级融合检测结果,虚线表示了信号配准后的信号级融合检测结果,可以发现,配准误差对融合检测的结果有一定影响,与图6a)相比,相同信噪比下,图6b)的检测性能更好,配准误差对检测性能的影响更低。这是因为图6b)场景的单站信噪比 E 更高,配准失败的概率更低,这表明提高信噪比能够降低配准误差对检测性能的影响。

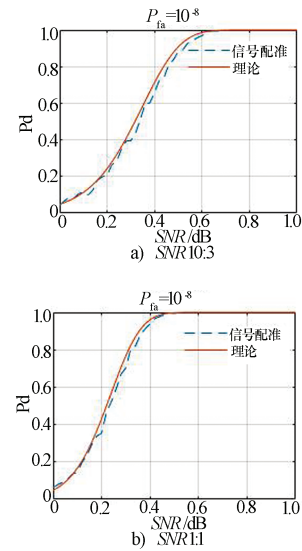


图6 SNR不同时,配准对信号检测的影响

假设目标的干扰时延 t_f 为0.02 ms,仿真结果如图7所示。图7a)为真实目标的配准结果,图7b)是站1虚假目标的配准结果,图7c)为站2虚假目标的配准结果。对于距离欺骗的虚假点迹,未干扰单站的归一化信噪比 $SNR_i \approx 0$,只存在噪声,通过调整检测门限可有效滤除该类点迹,也可进一步目标识别鉴别其真假。

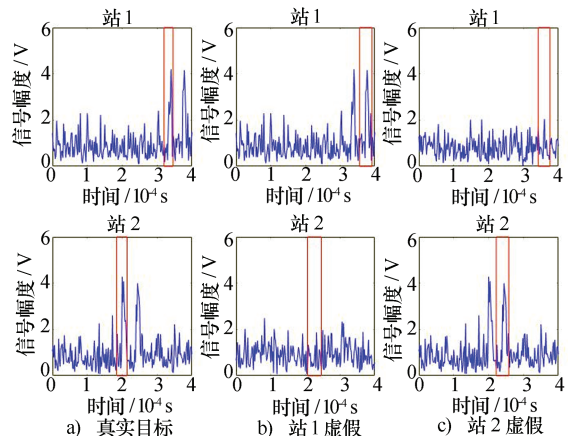


图7 距离欺骗式干扰的信号配准

6 结束语

本文基于组网雷达接收波束特性和回波时空匹配提出了一种信号配准的方法,在非相参积累下讨论了信号配准对信号级融合检测的影响。通过组网系统的两种预处理方法能够快速配准信号,减少了融合中心的运算量,提高了融合检测速度,更快获得检测结果,对距离欺骗的有源干扰方式有一定的预判性。通过仿真实验可以证明,该配准方法对融合检测的性能影响较低,通过提高单站信噪比能够降低该方法对检测的影响,利用该方法对组网检测空域预处理的工程实现能提高组网的信号级融合检测效率和定位精度。

参考文献

- [1] 徐 勇,刘文松,翟海涛. 多雷达组网检测系统技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(4): 619-624.
XU Yong, LIU Wensong, ZHAI Haitao. Technology of multi-radar detection system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(4): 619-624.
- [2] HU Q, SU H, ZHOU S, et al. Two-stage constant false alarm rate detection for distributed multiple-input-multiple-output radar[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2016, 10(2): 264-271.
- [3] 周生华,刘宏伟,刘保昌,等. 信噪比加权空间分集雷达目标检测算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(4): 82-88.
ZHOU Shenghua, LIU Hongwei, LIU Baochang, et al. SNR weighting based target detection algorithm for spatial diversity radar[J]. Journal of Xidian University (Natural of Science), 2011, 38(4): 82-88.
- [4] BRUYERE D P, GOODMAN N A. Adaptive detection and diversity order in multistatic radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronics Systems, 2008, 44(4): 1615-1623.
- [5] 余佳佳. 基于分布式组网的复杂环境微弱目标探测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
YU Jiajia. Research on weak target detection based on distributed network radar system in complex environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [6] 王 成,胡卫东,杜小勇,等. 基于互累积量的多雷达信号层融合检测[J]. 信号处理, 2006, 22(4): 480-485.
WANG Cheng, HU Weidong, DU Xiaoyong, et al. Multiple radar signal fusion and detection based on cross cumulant[J]. Signal Processing, 2006, 22(4): 480-485.
- [7] ZHOU S H, LIU H W. Signal fusion-based target detection algorithm for spatial diversity radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 5(3): 204-214.
- [8] GAO F, GUO L, LI H, et al. Quantizer design for distributed GLRT detection of weak signal in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(4): 2032-2042.
- [9] RICHARDS M K. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.
RICHARDS M K. Fundamentals of radar signal processing, second edition [M]. XING Mengdao, WANG Tong, LI Zhenfang, trans. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2017.
- [10] 胡勤振. 分布式 MIMO 雷达目标检测若干关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
HU Qinzhen. Research on several key technologies of target detection in distributed MIMO radars[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [11] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
ZHAO Guoqing. Principle of radar countermeasure [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012.
- [12] 田 晓. 雷达有源欺骗干扰综合感知方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
TIAN Xiao. Study on the methods of radar active deception jamming integrated sensing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [13] 张林让, 赵珊珊, 周 宇, 等. 网络化雷达协同抗欺骗式干扰技术研究进展[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 516-525.
ZHANG Linrang, ZHAO Shanshan, ZHOU Yu, et al. Research advance on cooperative anti-deception jamming in netted radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(4): 516-525.

作者简介:

方 轩 男, 1996 年生, 硕士研究生, 研究方向为雷达目标检测;

孙晓凡 男, 1965 年生, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为多雷达信息系统总体设计;

万海东 男, 1978 年生, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为雷达系统工程。