

基于互信息的低分辨率对海雷达视频信号配准^①

刘文松^② 翟海涛 顾 晶

(中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210007)

摘 要 从低分辨率对海雷达在视频信号融合后的探测性能取决于视频信号配准效果这一结论出发,研究了两部对海雷达视频信号的配准。首先研究了视频信号配准空间特性及其影响因素,针对海上目标的运动随机性给出了线性配准的时间约束;然后分析了雷达之间的包络异同,给出了基于互信息的配准原理,提出了配准方法;最后基于 S 波段和 C 波段的实装数据进行了验证,给出了目标密集区和海杂波区的配准效果。试验结果表明,配准后的视频信号对后期的融合检测性能有较大提升。

关键词 对海雷达, 视频信号, 互信息配准, 目标密集区, 海杂波区

0 引 言

单站内工作有多部对海脉冲搜索雷达,一般为非相参模式,分辨率较低,波段不同。单部雷达独立探测时,仅通过非相参积累改善信噪比有限^[1,2],回波较弱的目标往往为海杂波淹没。同时,目标密集区域和强海杂波区域的探测效果不佳。若融合多部雷达航迹,则由于单站条件下多部雷达过于邻近且受限于单雷达的探测性能和信号处理手段,性能提升有限^[3]。传统的信号融合策略是基于目标后向散射特性一致,在中频阶段通过频谱外推、包络配准等手段来提高雷达成像效果^[4]。该类信号融合策略在前述的单站对海观测条件下将面临以下问题:(1)非相参雷达信号相位在 $[0, 2\pi]$ 间随机均匀分布,配准难度大;(2)海上目标繁多,包络特性差异较大;(3)须对现役雷达进行大幅度加改装,费效比低。针对这种情况,本文研究了两部雷达视频信号的配准,提出了基于互信息的视频信号配准方法,以期为下一步的多雷达联合探测研究奠定基础。

1 视频信号配准及相关研究

脉冲搜索雷达接收机中频滤波后的信号包含同相分量 $v_1(t)$ 与正交分量 $v_Q(t)$ 。包络检波后输出的

视频信号 $r(t)$ 表示为

$$r(t) = \sqrt{v_1(t)^2 + v_Q(t)^2} \tag{1}$$

该式表明,视频信号 $r(t)$ 仅包含时域上的包络信息。尽管如此,若可完成两部雷达视频信号的配准,则无需对现有装备进行加改装即可利用频率分集特性^[1,2],通过视频信号融合来改善目标回波的平均信噪比,从而提升发现概率。

经过距离采样和方位量化后,天线扫描一圈的二维离散视频信号 S 表示为

$$S = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,N} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{M,1} & r_{M,2} & \cdots & r_{M,N} \end{bmatrix} \tag{2}$$

行方向为距离上的回波序列,列方向为方位上的回波序列。对于离散视频信号配准而言,距离上回波信号的采样和方位上的量化虽然重要,但并不是核心问题。本文假设二者已经合适设置,则两部雷达视频信号的配准问题表示为

$$T_0 = \operatorname{argmax}_\rho (T(S), S') \tag{3}$$

式中 ρ 为相似性测度, T 为空间变换。该式表明:两部雷达视频信号的配准就是寻找二者相似性测度最大时的空间不一致性。

从已发表的文献看,仅文献[5,6]较早涉及了视频信号配准问题。该文认为不同波段下目标包络

① 总装备部“十二五”国防预研基金资助项目。
② 男,1983 年生,博士,工程师;研究方向:雷达信号处理,数字集成电路设计;E-mail: xss4@163.com
(收稿日期:2014-02-12)

相关性较强,而海杂波相关性较弱,并基于该假设对回波信号进行分选、重排。此外,该文设计要求天线保持较高转速以保持同步。但事实上,海上目标复杂多样,两部雷达的包络相似性很难仅用相关性来描述,上述假设经常无法成立。

与传统频率分集雷达不同,由于视频信号来自两部雷达,其回波不仅受不同波段、极化方式的影响,也受其他系统参数不同的影响,从而导致同一目标的回波形态、幅值起伏等差异性更大。此外,同一目标与不同雷达的距离和方位也需要校正。为实现两部雷达视频信号的配准,本文研究了视频信号的可配准空间以及影响因素,然后针对海上目标运动的随机性,提出了保证视频信号全局线性配准的时间约束,确立了回波空间分布的相似性,进而研究了同一目标的回波异同。在此基础上,提出了基于互信息的视频信号配准方法,分析了其基本原理,给出了具体流程,最后采用实装数据验证了其配准效果。

2 配准空间

2.1 空间特性

两部雷达视频信号配准的前提是同一目标到两部雷达的回波距离和方位近似相同。回波方位误差主要与方位校标有关。方位校标是对合作目标进行检测,根据检测结果调节雷达方位码盘,改变某方向目标回波在矩阵 S 中的方位序列索引。由于校标精度仅能达到数据级,因此从信号级的粒度看,雷达方位调节必然存在一定误差,且该误差是定值。

回波距离主要与雷达布阵、距离校标等因素有关。距离校标是对合作目标进行检测,根据检测结果调节雷达定时器,改变回波输出的时间基准。与雷达方位调节类似,由于校标精度有限,从信号级的粒度来看,时间基准调节必然存在一定误差且该误差是定值。

单站条件下,两部雷达近似位于同一原点。但事实上,如图 1 所示,两部雷达总是存在一定间距,造成同一目标到两部雷达的回波距离不同。

由图 1 可知,海上目标至两部雷达的回波距离差值 $\Delta R = |R_1 - R_2|$ 。 ΔR 与雷达间距 R_{spacing} 、目标同雷达间距中心的夹角 α 、目标与雷达间距中心的距离 R_0 三者有关。图 2 给出了 R_{spacing} 为 0.5km, R_0 在 10km 至 100km 范围内, α 在 $-\pi$ 至 π 范围内, ΔR 的变化趋势。由图 2 可知,雷达间距 R_{spacing} 固定

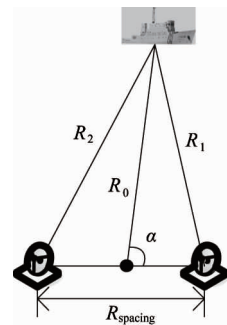


图 1 同一目标回波距离与两部雷达的关系

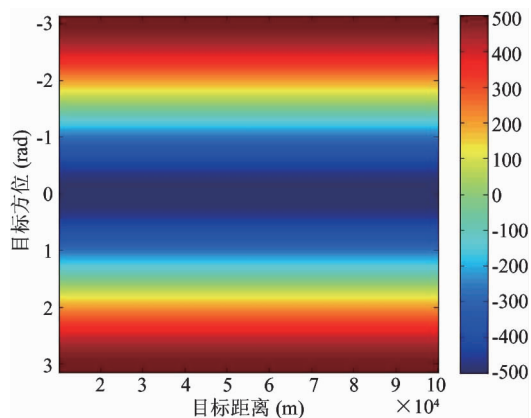


图 2 R_{spacing} 固定, ΔR 随 R_0 、 α 变化的趋势

时,在整个探测空间内, ΔR 处处呈现出非线性变化。同时注意到, ΔR 的极值等于两部雷达间距。尽管如此,考虑到雷达回波是由分辨率单元内所有物体的回波矢量叠加而成,或者说,在分辨率单元内雷达区分不出两个独立目标,所以应进一步考虑雷达距离分辨率的影响。图 3 和图 4 分别给出了雷达距离分辨率为 150m 和 300m 时,两部雷达归一化距离差值 ΔR_{res} 随 R_0 、 α 的变化趋势。

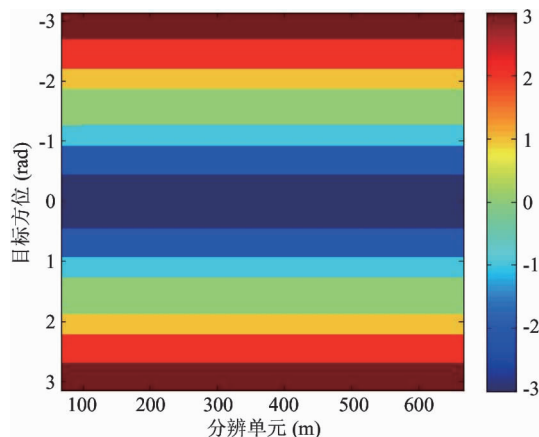


图 3 距离分辨率 150m, ΔR_{res} 随 R_0 、 α 变化的趋势

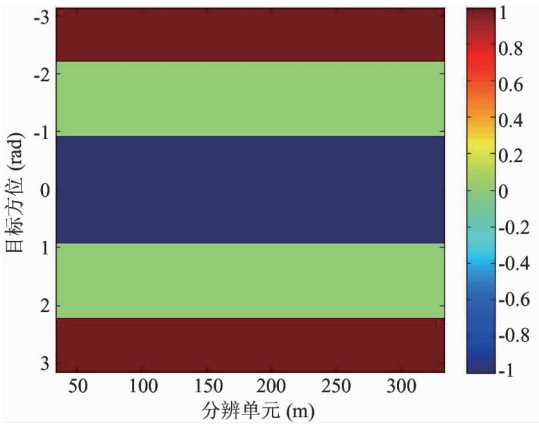


图 4 距离分辨率 300m, ΔR_{res} 随 R_0 、 α 变化的趋势

图 3、图 4 中,可配准空间在一定方位内连续存在。两部雷达可配准空间的范围与雷达距离分辨率、雷达间距有关。总的原则是:两部雷达间距越小,分辨率越大,可配准空间越大;两部雷达间距越大,分辨率越小,可配准空间越小。特殊情况是:两部雷达都位于彼此的分辨率单元内时,即可视为近似位于同一原点,整个探测空间处处可以配准。在部分情况下,可采用加权法将多个分辨率单元的回波叠加,形成较低分辨率回波,从而扩大可配准空间。

2.2 时间约束

两部雷达独立工作,天线波束先后扫掠同一目标。如果目标位置变化较大,则回波位置也将变化较大,进而该目标可能被两部雷达认作两个目标。对于单目标而言可以进行非线性配准。但海上众多目标运动随机,在可配准空间范围内做到所有目标的非线性配准便很难了。可配准空间内线性配准的时间约束在于:同一目标在两部雷达天线先后扫掠的时间差 Δt 内,最大位置变化不应超出单个最小方位分辨率单元和最小距离分辨率单元:

$$\begin{cases} \theta_{3\text{dB_min}} R_{\text{min}} > v_{\text{max}} \Delta t \\ c\tau_{\text{min}}/2 > v_{\text{max}} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\theta_{3\text{dB_min}} R_{\text{min}}$ 是两部雷达最小方位分辨率单元, $c\tau_{\text{min}}/2$ 是最小距离分辨率单元。 $v_{\text{max}} \Delta t$ 表示目标在时间差 Δt 内的最大位置变化。此时,即使目标进行了运动,但依然位于原来的分辨单元中,雷达无法将其区分为两个目标,可视为相对静止。

对海脉冲搜索雷达分辨率较低,一般情况下半功率波束宽度大于 1° ,脉宽大于 $1\mu\text{s}$,表 1 列出了不同半功率波束宽度 $\theta_{3\text{dB}}$ 、脉宽 τ 所对应时间约束。

对于绝大部分海上目标,30 节 (knot) 的航速已经足够高。考虑到 10km 以内主要以地面、港口的

杂波为主,因此 R_{min} 取 10km。 R_{min} 越大,配准时间越容易满足。雷达转速一般小于 10 秒/转,可以满足表 1 中的时间约束。所以公式(4)在工程中具有适用性。

表 1 时间约束

$v_{\text{max}} = 30\text{knot}, R_{\text{min}} = 10\text{km}$		Δt
$\theta_{3\text{dB}}$	$1^\circ (174.4\text{m})$	11.3s
	$2^\circ (348.8\text{m})$	22.6s
τ	$1\mu\text{s} (150\text{m})$	9.7s
	$2\mu\text{s} (300\text{m})$	19.4s

时间约束的意义不仅在于保证了可配准空间内的线性配准,更在于建立了目标分布位置的相似性,或者说保证回波在不同雷达的视频信号矩阵 S 中位置相同,从而更有利于配准。

3 互信息配准

3.1 包络特性

两部雷达工作在不同波段和极化方式,而且众多系统参数也不同,从而影响了回波的形态和幅值相似性。为选取合适的相似性测度进行配准,对影响两部雷达回波相似性的主要因素展开分析。

首先,假设两部雷达发射频率不同,其他系统参数相同。则对于由间距为 a 的两散射体构成的理想目标,两部雷达回波包络的相关性 $\rho(\Delta f)$ 表示为

$$\rho(\Delta f) = \frac{\sin[2\pi\Delta f(asin\theta)/c]}{2\pi\Delta f(asin\theta)/c} \quad (5)$$

式中 Δf 为两部雷达的频率间隔, c 是光速, $asin\theta$ 是目标长度在距离上的投影。单站条件下, Δf 是定值,则包络相关性取决于目标自身结构。考虑到海上目标复杂多样,每个目标的包络相关性皆可能不同。同时,不同极化方式也会对包络相关性产生类似的影响。

其次,假设两部雷达发射频率相同,其他系统参数不同。则天线扫掠过目标时,每个散射体返回的回波脉冲数量表示为

$$N_p = \frac{\theta_{3\text{dB}} F_r}{6V_r \cos\varepsilon} \quad (6)$$

式中 V_r 是天线转速, ε 是仰角, F_r 是脉冲重复频率。由于系统参数不同,导致回波脉冲数量,即同一目标在方位上的回波长度不同。

返回的回波脉冲在天线波束中心及两侧幅值最

强且脉冲间相关性最强,在天线波束边缘的回波快速衰落且脉冲间相关性较弱。一般地,用高斯函数近似表示天线波束增益:

$$G(\theta) = \exp[-2.78\theta^2/\theta_{3dB}^2] \quad (7)$$

式中 θ 是散射体与天线波束中心夹角。结合公式(6),两组不同数量的回波脉冲分别在不同增益的天线波束内均匀分布,导致回波包络损失不同。同时,两部雷达包络可能不处于同一水平基准。因而,多个系统参数的不同削弱了包络相关性。

此外,回波信号中既包含目标回波,也包含海杂波。海杂波在低分辨率雷达观测时可视为均匀分布的点散射体,包络服从瑞利分布。相对于两部雷达而言,同一区域的海杂波独立同分布。

综合以上分析:两部雷达视频信号的包络相关性涉及众多系统参数,并与目标结构有关,难以统一描述。但总体来说,同一目标回波包络又具有一定的相似性,即呈钟形起伏,目标回波中心脉冲幅值最强且脉冲间相关性最强。

3.2 配准原理

基于上节分析,采用最大峰值法进行包络配准是自然而然的选择。但天线波束中心的包络较为平坦,最强点不易判别。常用的雷达信号配准算法有最大相关法^[7]和最小熵法^[8],但这两种算法仅能实现同一方位上距离序列之间的包络配准,效果有限。

设 $x_{i,j}$ 与 $y_{i,j}$ 分别表示两部雷达视频在同一位置 (i,j) 的包络幅值。直观来讲,两部雷达视频完全配准时,目标回波的中心应最大程度重合。由于目标回波中心及两侧的脉冲幅值相关性较强,则相同包络对 $h(x_{i,j}, y_{i,j})$ 的数量达到最多,包络对的概率分布密度 $p(x_{i,j}, y_{i,j})$ 用下式表示:

$$p(x_{i,j}, y_{i,j}) = \frac{h(x_{i,j}, y_{i,j})}{\sum h(x_{i,j}, y_{i,j})} \quad (8)$$

式中 $\sum h(x_{i,j}, y_{i,j})$ 表示两部雷达视频各类包络对数量的总和。以上分析表明,将两部雷达视频视为分布类型未知的两组随机变量,则二者配准时,联合概率分布 p_{XY} 的样本分布越为密集;未完全配准时,联合概率分布 p_{XY} 的样本分布越为分散。

在配准过程中,如果仅考虑联合概率分布的疏密,而不考虑包络幅值的相似性,可能导致两个面积相等目标,而非相同目标的配准。这在两部雷达系统参数不同时是完全可能的。因此,应在联合概率分布最大的同时,使得包络相似性达到最高,即使得边缘概率分布 p_X 和 p_Y 相关性最高。综合以上分析,

两部雷达视频信号的相似性条件可表示为

$$\rho(X,Y) = \sum p_{XY} \log p_{XY}/p_X p_Y \quad (9)$$

视频配准时,联合概率分布最为集中,边缘概率分布相似性最大;二者未配准时,联合概率分布最为分散,边缘概率分布近似独立,即有 $p_{XY} = p_X p_Y$ 。设 $U = p_{XY}$ 和 $V = p_X p_Y$, 则上式即为 Kullback-Leibler (K-L)距离的另一种表达形式:

$$\begin{aligned} D_{KL}(U,V) &= \sum u_i \log u_i - \sum u_i \log v_i \\ &= \sum u_i \log u_i/v_i \end{aligned} \quad (10)$$

根据香农不等式,当且仅当 $U = V$ 时, $D_{KL}(U,V)$ 等于 0。公式(9)还可以改写为互信息的表达式:

$$\begin{aligned} I(X,Y) &= H(X) + H(Y) - H(X,Y) \\ &= \sum p_{XY} \log p_{XY}/p_X p_Y \end{aligned} \quad (11)$$

互信息描述了两组随机变量的统计相关性,是一个随机变量包含另一个随机变量信息的测度。从互信息的角度理解雷达视频配准:在线性配准的时间约束下,两部雷达视频可认为不同传感器对同一区域共同目标的多模态描述。二者既包含一定的共同信息,也包含一定的互补信息。当二者完全配准时,单部雷达视频可以最好地描述另一部雷达视频中所包含的信息,即互信息达到最大。

在可配准空间内,通过时间约束确立了多目标回波在视频信号矩阵 S 中位置的相似性,结合前述的同一目标回波在幅值分布、形态上的相似性,可认为是两部雷达视频的共同信息。而回波在形态、幅值上的不同则可认为是互补信息,可丰富融合视频的信息量。因此,互信息配准的优势在于从多个方面考虑了视频信号的相似性并能很好地衡量。

3.3 配准过程

互信息作为两个随机变量之间统计相似性的测度,参与数据量越大,配准参数越稳定,也能达到整体最优。同时,考虑到部分海域内目标信噪比较低、或仅有海杂波或者背景噪声,而海杂波包络对于两部雷达而言独立同分布,配准难度大。因此,对时间约束内的视频信号共同参与配准,从而达到整体上的最优,其配准流程如图 5 所示。

尽管视频信号数量越多,配准效果越好,但也将导致存储量越大、配准参数搜索速率越慢。因此,需根据计算平台性能选取合适的最小阈值。

配准参数包括距离维参数和方位维参数。对于维度间的搜索算法采用局部最优的共轭方向组法,搜索速度快但局部最优。可根据需要换为全局最优

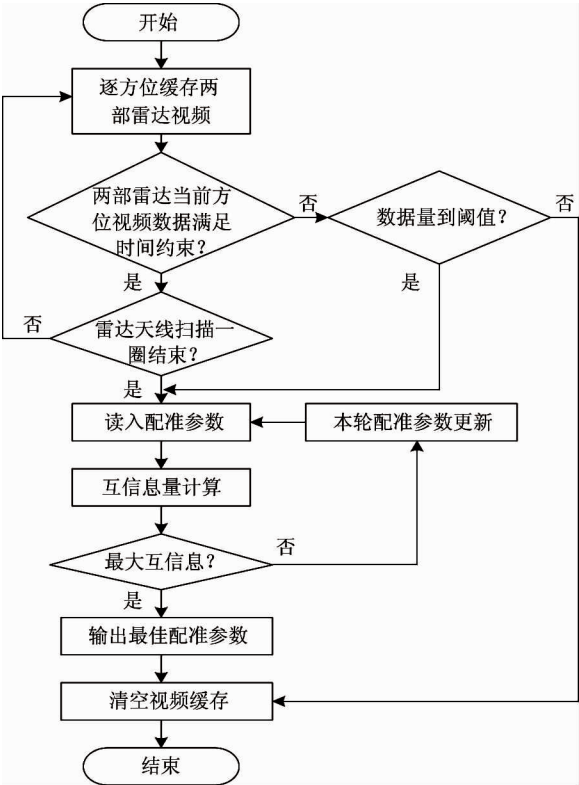


图 5 配准流程框图

的遗传算法或蚁群算法。一维搜索算法采用 Brent 法,通过求导锁定极值区间,通过黄金分割确定极值。采用基于 B 样条基函数的 PV 算法进行插值,以有效降低局部极值的产生。

4 实验

采用 S 波段和 C 波段的对海雷达实装数据进行验证。两部雷达间距 20m,位于彼此的距离分辨单元内,可认为处于同一原点。系统参数 θ_{dB} 、 V_r 、 F_r 等不尽相同。方位量化和距离采样已经适当配置。视频信号尺寸为 760 方位单元 $\times$ 3000 距离单元。同一方位时间差为 7s,符合线性配准的时间约束。将 S 波段和 C 波段的雷达视频信号直接叠加,效果如图 6 所示。由于未经配准,同一目标的回波参差,出现了明显的虚影现象。

配准时,以 S 波段视频信号为参考模型,将 C 波段视频信号向其变换。配准效果如图 7 所示。配准过程中,方位上与距离上的互信息曲线如图 8 所示。对同一区域,连续 10 转的配准参数进行统计,结果如表 2 所示。在可配准空间内,归一化的距离误差是由于距离校标造成的,且是定值。表 2 中的距离维参数尽管有一点起伏,但基本稳定,验证了这一结论。对于方位维参数,方位误差是由于方位校标造成的,也是定值。表 2 中的方位维参数起伏比较剧烈,这是因为受各种因素影响导致回波在方位上起伏比较剧烈。但总体上,方位维配准参数是在某均值上下起伏,可以统计拟合出该均值作为最终的配准参数。

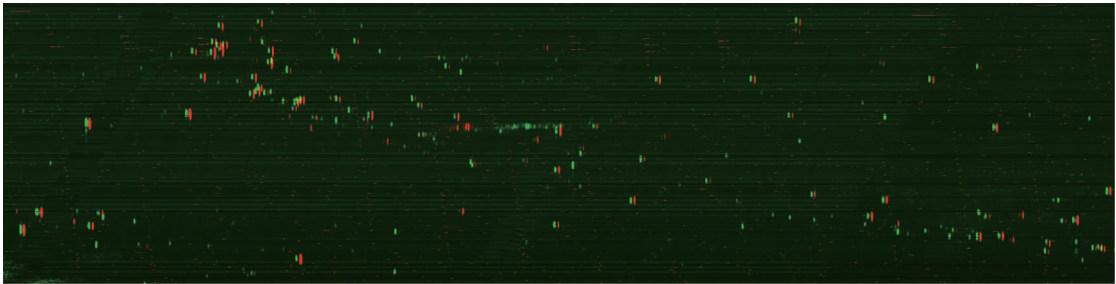


图 6 未配准效果

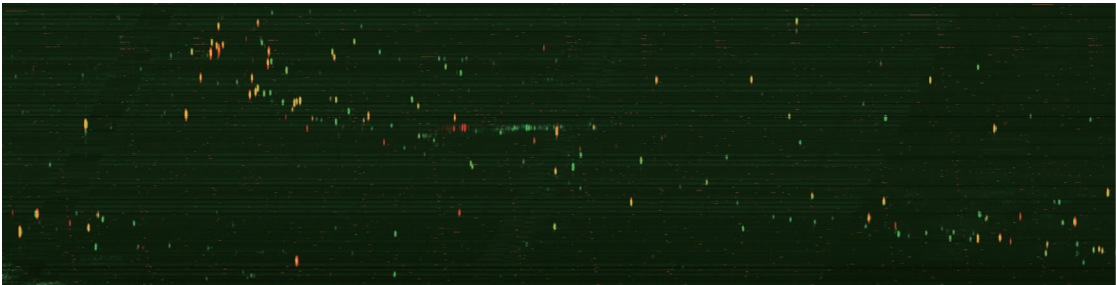


图 7 基于互信息的雷达视频信号配准

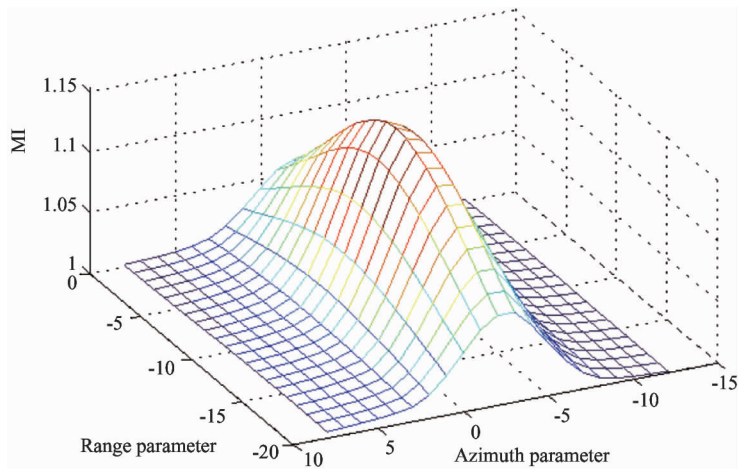


图 8 配准过程中的互信息曲线

表 2 天线连续扫描 10 转时配准参数统计

天线转数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
方位配准参数	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3
距离配准参数	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-9	-10	-10

图 9 和图 10 给出了海杂波区域和目标密集区域的配准效果。在此基础上,若配以较好的融合策略,可以极大地改善类似区域的检测效果。

5 结 论

传统的雷达信号配准充分利用了信号的时间和相位信息,而检波后雷达视频信号仅具备包络信息。通过分析两部雷达布阵和雷达参数的关系,论证了雷达视频信号配准空间是刚性的条件。进一步,通

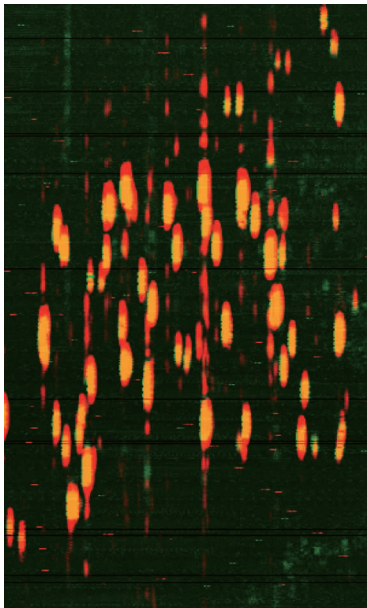


图 10 目标密集区配准效果

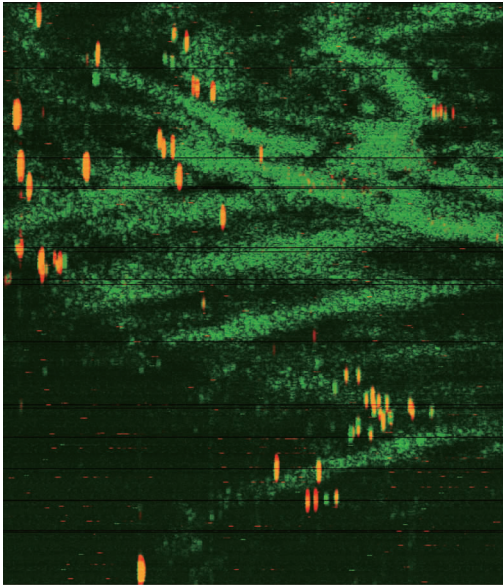


图 9 海杂波区域配准效果

过时间约束保证了同一目标包络的空间相关性。在此基础上,通过研究目标回波的包络特性,指出互信息配准的优势在于从多个方面考虑了视频信号的相似性并能很好地衡量,给出了具体实施的方法和实装数据验证,为多雷达的集中式检测打下了良好基础。基于互信息的包络配准算法可作为共性技术用于一般性的包络配准。

参考文献

[1] Merrill I S. Radar Handbook (Second Edition). NY, USA: McGraw-Hill Companies, 2003

[2] Merrill I S. Introduction to Radar Systems. NY, USA: McGraw-Hill Companies, 2001

[3] Varshney P K. Distributed Detection and Data Fusion. NY, USA: Springer-Verlag, 1996

[4] Morre T G, Zuerndorfer B W. Enhanced imagery using spectral-estimation-based techniques. *Lincoln Laboratory Journal*,1997,10(2):171-186

[5] Wang C, Hu W D, Du X Y, et al. Multiple radar signal

fusion and detection based on Cross Cumulant. *Signal Processing*, 2006, 22(4): 480-485(in Chinese)

[6] Wang C, Hu W D, Du X Y, et al. Application of signal level fusion for Detection of low-velocity small target. *Modern Radar*, 2006, 28(6): 41-65(in Chinese)

[7] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1980, 16(1): 2-14

[8] Wang G Y, Bao Z. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6): 5-8(in Chinese)

Mutual information registration of the video signals from the low-resolution radars observing the sea

Liu Wensong, Zhai Haitao, Gu Jing
(28th Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Nanjing 210007)

Abstract

The study on video signal registration for two sea-observing radars was conducted from the view that the detection performance of low-resolution radars observing the sea after video signal fusion depends on the effect of video signal registration. Firstly, the features of the registration space of radars’ video signals and the influence factors to registration were studied, and the time constraint to linear registration was proposed according to the motion randomness of sea-borne targets. Then based on the analysis of the similarities and differences of the envelopes between radars, the registration theory based on mutual information was proposed and the registration course was presented. Finally, the registration method was tested by the real radar data from the C and S bands, especially, the registration effect in the target-dense area and in the fierce sea clutter area was presented. The test results show that the joint detection performance of the fused video signals can be greatly improved after registration.

Key words: radars observing the sea, video signal, mutual information registration, target-dense area, fierce sea clutter area