

微弱目标积累检测的包络移动补偿方法

王 俊,张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,西安 710071)

摘 要: 利用长时间信号积累来提高低信噪比对微弱运动目标检测的性能是一种有效方法.在积累过程中目标回波有可能越距离单元走动,因此包络时延补偿是实现信号积累的首要问题.本文利用相控阵雷达可提供的波束驻留方式,提出一种基于距离拉伸和时频分析的包络移动补偿方法.该方法利用距离拉伸将不同单元中的目标回波作为暂态信号,通过时频联合处理来进行运动补偿和匹配相参积累,适用于存在越多普勒分辨单元走动的情况.给出了检测器的实现框图并进行了性能分析.仿真结果及对实测数据的处理验证了该方法的有效性.

关键词: 微弱信号检测;距离走动;多普勒走动;运动补偿

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-056-04

Study on the Motion Compensation of Range Migration for Weak Moving Target Detection

WANG Jun, ZHANG Shou-hong

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Key issue of weak moving targets detection under lower signal noise ratio is managing to enhance the target echo energy using long time coherent integration. During integration the target may migrate from one to another across radar range and Doppler resolution cells, motion compensation should be taken into consideration to improve detector's performance. Based upon dwelling mode of radar beam in phased array radar system, this paper presents a novel detection framework which using range stretching and joint time frequency processing to fight against the case where range and Doppler cells of echoes migration is presented. A possible realization diagram of such a detector is suggested and performance analysis is given. Simulation results and experiments on real data confirm the effectiveness of this method.

Key words: weak target detection; range migration; Doppler migration; motion compensation

1 引言

微弱目标(低可探测性目标)是针对目标的雷达反射截面(RCS)而言的,随着现代低可探测技术的迅速发展和广泛应用,使得对微弱雷达目标的探测和早期预警方法的研究成为雷达技术中重要的研究内容.利用长时间相参和非相参处理进行信号积累是实现微弱运动目标检测的一种有效方法,其出发点是利用时间来换取能量.然而,要实现长时间良好的信号积累,需要解决低信噪比下对目标回波的运动补偿和长积累时间的获取等问题.运动补偿需要目标运动参数的精确估计,而一般情况下低信噪比时运动参数的精确估计是难以做到的,因此在未知目标速度和未进行运动补偿的情况下,如何进行积累检测和改善积累检测的性能是长时间信号积累检测需要研究的主要问题.

在成像系统中,常用的包络移动补偿方法是相邻相关法、半边矩形窗包络最小熵法、谱峰跟踪法等.这些方法适用于回

波信噪比较高的场合.低信噪比时由于强散射点不明显,且相邻回波的相关性较差,包络对齐的效果就比较差.对于低分辨率雷达来说,无法利用相邻相关来进行包络对齐.因此,对低信噪比目标模型需要采用新的包络移动补偿技术.对脉冲雷达回波的包络移动补偿主要是为了保证在回波包络时延后的有效持续时间内目标信号能量能够作有效的积累,它有三种情况:(1)在所考虑的积累时间内目标始终位于同一个距离分辨单元内;(2)长的观测时间内存在距离走动而无多普勒走动;(3)距离和多普勒走动同时存在的情况.前一种情况可以看作是经距离对准后的运动补偿问题,这时主要克服的是目标的相干性变化对长时间信号积累性能的影响,在文献[8]中已有讨论,而后两种情况则是实现较长时间信号积累所必须考虑的.

另一方面,长积累时间的获取主要取决于波束对目标的驻留时间.对于波束可灵活捷变的相控阵雷达系统和新体制

米波稀布阵综合脉冲孔径雷达系统^[7](SIAR)而言,波束对目标的驻留时间由目标的运动特性和系统的相关性决定,而不是由波束扫过目标的时间决定.因此长积累时间是容易实现的.对驻留波束方式来说,快速目标的距离走动和多普勒走动是影响积累检测性能的主要因素,实用中需要加以克服.

2 时分包络运动补偿方法

在距离-多普勒维的处理中,包络对齐的目的是将不同时刻散布在不同距离单元中的目标回波信号‘集聚’到单个处理单元中,以便于多普勒相参处理.这种补偿原则上需要精确预知目标的径向速度.对于目标探测而言,运动目标的参数往往是先验未知的,必须利用数据进行估计.米波雷达在无速度模糊的情况下,若积累期间目标多普勒变化不大,用多普勒滤波器组处理时,各滤波器输出的目标速度是确定的,可以分别在各个输出端进行补偿.例如,对所有的回波作时间分段处理,设总的回波分为 M 段,以第一段回波的多普勒滤波器输出为基准,第 m 段回波的第 p 个多普勒滤波器的输出对应的距离单元走动数可估计为:

$$M_{m,p} = \text{round}\left(\frac{p \cdot v \cdot m T_r}{R}\right), p = -N_{\text{sub}}/2 \sim N_{\text{sub}}/2 - 1 \quad (1)$$

其中 round 代表四舍五入运算, v 为速度分辨单元的大小,

R 为距离分辨单元的大小, T_r 为脉冲重复周期, N_{sub} 为分段多普勒滤波器的长度.用式(1)的输出作运动补偿,应保证目标在整个回波期间不会出现多普勒走动,对目标的积累是针对相同的多普勒滤波器输出进行的.对于 SIAR,为了达到全向发射以覆盖整个搜索空域,采取了正交编码调制的异频发射信号使得整个空域方向图不会出现干涉调制现象.这种工作方式会导致运动目标的回波多普勒频率有微小的频散现象.如设发射信号的总带宽为 B ,则由异频发射而引入的回波多普勒频散宽度为:

$$f_d = 2 \cdot B \cdot V_r / c \quad (2)$$

其中 c 为光速, V_r 为目标的径向速度.为保证目标回波落入同一个多普勒通道,要求其多普勒滤波器带宽 $f \geq f_d$,从而对分段多普勒滤波器的长度 N_{sub} 有一定的限制.另一方面,由于目标相干性的变化也会产生回波多普勒频散.设频散宽度为 f_i ,为了利用式(1)作运动补偿,亦需要降低多普勒滤波器的频率分辨率,则 N_{sub} 至少应满足:

$$N_{\text{sub}} \leq \min\left\{\frac{c}{2BV_r T_r}, \frac{1}{T_r \cdot f_i}\right\} \quad (3)$$

若分段多普勒滤波的点教较少,由于速度估计的误差较大,不但会大大降低了包络对齐的精度,另外,在较大的多普勒分辨单元内,目标回波的多普勒频率不能视为恒定,利用分段多普勒处理得不到好的积累结果.

3 距离拉伸处理

已知机动目标在可实现长时间观测的条件下回波的多普勒频率是随时间变化的.即使对沿直线平稳飞行的目标,在长时间内由于不同时刻其航向相对于雷达视线夹角的不同,也会导致目标回波的多普勒频率改变.因此,在长时间相参积累

时,需要考虑多普勒的时变效应.本文的方法是引入时频技术,并联合考察不同的分辨单元在不同时间段上的回波特性.对每个检测单元而言,这种处理方法需要利用多个距离单元的回波信息,因此在处理时可若若干个发生距离走动的回波信号进行“拉直”处理,即距离拉伸.

若目标在时间段 $[T_1, T_2]$ 内发生距离走动,设其回波散布在从 q 到 p 的若干个相邻的距离单元内,则利用常规的检测方法,第 i ($q \leq i \leq p$) 个检测单元的回波可表示为:

$$S_i(t) = \begin{cases} A_i \exp(-i t + j \cdot \frac{4 \cos}{2} (v t + \frac{1}{2} a t^2)) + c(t), & t \in [T_1, T_1 + t] \\ c(t), & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

这里 i 是包络调制系数, t 是目标在第 i 个距离单元的驻留时间.考虑常见的情况,即假设目标回波相位为时间的二次函数, $c(t)$ 为杂噪分量.如果对第 i 个检测单元进行长度为 $p - q + 1$ 的距离拉伸,则合成的回波信号 $S_p(t)$ 为:

$$S_p(t) = \sum_{i=1}^p A_i \exp(j \cdot \frac{4 \cos}{2} (v t + \frac{1}{2} a t^2)) \cdot [U(t - T_1 - t_i) - U(t - T_1 - t_{i-1})] + c(t) \quad (5)$$

其中 $t_i \in [T_1, T_2]$, $t_0 = 0$, $t_p = T_2 - T_1$ 且 $t_i < t_{i+1}$. 式(5)表明,若信号起伏不大,则如果能有效地利用 $S_p(t)$ 来作检测的话,信号的能量可以增加近 $p - q + 1$ 倍,在同等的检测概率和虚警概率条件下可大大增加输入信噪比.此外利用距离拉伸的方法进行包络移动补偿还具有如下特点:(1)不需要对目标的运动参数进行预先估计.这一点对低信噪比下的微弱运动目标检测是比较有用的.我们知道包络运动补偿的实质和前提是目标运动参数的估计问题,一般在低信噪比情况下很难得到对运动目标参数的精确估计,即使能够利用多普勒滤波器组的输出来估计目标粗略的径向运动速度,但这种估计是有偏的,其偏离程度随着多普勒滤波的长度增加,而且应用中受到目标多普勒时变的影响.(2)不同距离分辨单元上目标回波信息的综合处理,并考虑了多普勒的时变效应.(3)将长时间信号积累划分为两个层次,先利用相参积累将信噪比提高到某个量级,再利用较易实现的非相参处理进行更长时间的信号积累.

由于目标回波相对于整个拉伸后的信号并不是处处存在的,对 $S(t)$ 的相参积累实际上是对存在于局部时间段上目标回波能量的积累,因此引入了含有时间变量的非平稳信号的分析方法,此时的信号积累成为一个二维时频平面上目标暂态信号的检测和参数估计问题.

4 基于时频分析的微弱运动目标检测方法

如前所述,距离拉伸用于包络移动补偿不需要对目标的初始运动参数作估计.只要拉伸量选择合理,就可以把整个目标回波的能量全部利用.由于拉伸使得目标信号分量呈短时间区间分布,径向速度变化较大的目标,其距离单元的散布程度也相应较大,目标回波能量的时频特性也是分段存在的.对检测单元的距离拉伸量选择,可根据目标的某些先验知识来确定,如目标最大可能的不模糊径向速度,总的回波数据长度

以及运算的复杂度来确定. 一般而言, 如果目标可能的最大不模糊速度为 V_{\max} , 距离单元分辨率为 c , 总的回波数据长度为 N , 距离拉伸量可由下式确定:

$$L_{stre} = \text{int} \left[\frac{V_{\max} \cdot N}{F_r \cdot c} \right] \quad (6)$$

F_r 为脉冲重复频率. 一旦选定了距离拉伸量 L_{stre} , 则子孔径长度 W_L 也随之确定:

$$W_L = N / L_{stre} \quad (7)$$

这里假定目标的距离拉伸量比较准确, 即目标在某个距离单元的脉冲数正好是子孔径的长度. 实际情况不一定刚好这样, 有可能发生多周期回波的目标回波取样偏离. 此时用 W_L 的子孔径长度作相参积累时由于目标信号能量泄漏而导致积累损失. 目标回波取样偏离 L 越大, 则子孔径积累的损失也越大. 为了克服这一问题, 可以利用重叠子孔径的相参处理进行积累, 重叠的长度可选为 $0.5L_{stre}$. 另一方面, 如果子孔径相参积累较长, 由于多普勒时变效应会引起目标的谱展宽, 能量发散. 为了得到更好的检测性能, 需要利用变斜率的广义边缘积分变换, 即所谓的解线性调频技术来得到更集聚的能量. 具体来说, 即对某个子孔径内的回波 $S_i(t)$, 利用变斜率的匹配搜索, 确定使下式最大的斜率 $\hat{\alpha}_i$:

$$\hat{\alpha}_i = \arg \max_{\mu} |F(S_i(t) \exp(j 2 \mu^2 t))| \quad (8)$$

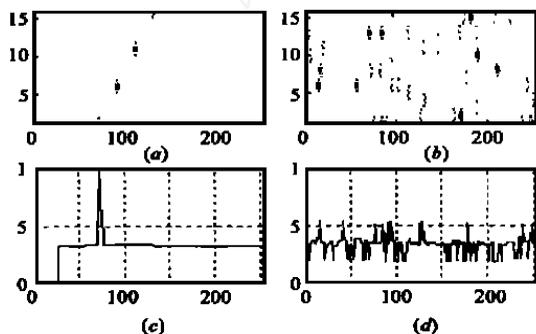


图 1 子孔径多普勒时变的处理, 时频特性 (a) 和归一化检测统计量 (c) 考虑了多普勒时变的影响, 而 (b) 和 (d) 只进行了距离补偿, 未考虑多普勒时变的影响. 输入信噪比为 -11dB . (a)、(b) 图: 横轴——频率, 纵轴——时间; (c)、(d) 图: 横轴——频率, 纵轴——归一化检测器输出.

其中 $F(\cdot)$ 为傅氏变换. 然后利用 $\hat{\alpha}_i$ 去对 $S_i(t)$ 的二次时变相位进行解调频, 即坐标旋转, 则旋转后的相位分量为线性分量, 可以利用常规的 FFT 进行处理. 而对于更高次的时变相位分量, 子孔径解调频技术相当于利用斜率可调的分段线性函数去逼近信号的高阶非线性频率的变化, 虽然不是完全的逼近, 但是这种近似也会比固定斜率的线性逼近方法带来好的信号能量积累. 设子孔径内的目标回波相位可用线性调频模型来近似, 图 1 给出了考虑多普勒时变与否的结果. 由于能量的二维散布, 低信噪比时的子孔径积累的信号能量已大大低于初始门限. 图 1 表明多普勒频变的运动目标回波对检测器性能有较大的影响. 图 2 给出了基于时频分析和距离拉伸处理的一个检测器结构, 图中 DC 表示解线调频运算, U_T 为初始门限, T_2 为第二门限. 这种检测器结构类似于经典检测理论

中的二元积累器在时频域上的推广实现. 所不同的是, 它利用子孔径的相参积累来提高对微弱运动目标的初检概率, 后续的非相参积累则综合考虑了目标越分辨单元走动的情况, 在同样检测概率和虚警概率的前提下, 进一步降低了单次目标检测所需的信噪比.

5 检测性能

基于距离拉伸处理和时频分析的信号积累器, 其检测性能和初始门限及第二门限的选择均有关系, 若初始门限 U_T 选择过高, 则信号很难检测到而产生漏警, 过低则虚警率较大, 第二门限的选择亦有相类似的影响.

设共有 $N = n \cdot N_s$ 次目标回波, n 为距离时间空间中子孔径时间段的个数, N_s 为子孔径的长度, 目标在各次观测之间是独立的, 且为非起伏模型. 并设 p_D 为 n 次观测中目标至少有 m 次检测到的积累概率. 由于独立事件之和仍为独立事件, 所以利用子孔径相参积累得到的各次观测结果之间也是相互独立的, 若不存在积累损失, 则子孔径相参积累的信号参量为 $E_s = N_s E_0$, E_0 为单个脉冲的信号能量, N_s 为子孔径的长度. 若噪声为零均值的高斯随机变量,

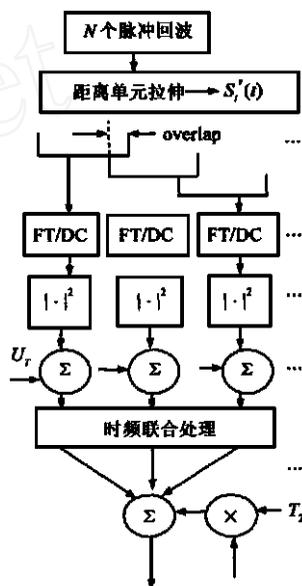


图 2 实现框图

根据其概率密度函数可以确定一定检测概率和虚警概率下的初始门限 U_T .

我们知道, 在 n 个统计独立的取样值中有 k 个取样值超过确定门限的概率符合二项式分布, 则 n 个独立事件中, 至少发生 k 次的概率为

$$p_D = \sum_{i=k}^n C_n^i p^i q^{n-i} \quad (9)$$

其中 p 为每一事件发生的概率, $q = 1 - p$, p_D 即可以看作系统的检测概率, 为确保一定的检测性能, 按照曼曼-皮尔逊准则, 两个门限的选择应保证在虚警率一定的条件下使发现概率 p_D 为最大, 或者在虚警率和发现概率 p_D 相同的情况下所需的输入信噪比最小. 由于实际条件限制下有时对积累脉冲的个数有一定的要求, 因此需要估算一定检测概率的前提下所需的最少的总积累脉冲数 n . 从时间历经的观点, 目标在第 k 次观测时被检测到意味着在过去的 $k - 1$ 次观测中目标至少超过了门限 $m - 1$ 次. 因此, 在总共 n 次取样中目标至少发生 k 次的概率为:

$$p_D = \sum_{k=m}^n u(k) = p^m \sum_{k=m}^n C_{k-1}^{m-1} (1-p)^{k-m} \quad (10)$$

其中 $u(k) = \begin{cases} C_{k-1}^{m-1} p^m q^{k-m}, & k \geq m \\ 0, & k < m \end{cases}$ 表示在第 k 次取样时目标超过门限的概率. 式(10)的结果和式(9)的结果是等价的, 详细证明参见文[9].

若设 W 为概率分布服从 $u(k)$ 的随机变量, 则可以得到一定的检测概率条件下所需最少的总积累脉冲数. 由于 W 的均值 $E(W)$ 为

$$E(W) = \sum_{k=m}^{\infty} k \cdot u(k) = \sum_{k=m}^{\infty} k \cdot C_{k-1}^{m-1} p^m q^{k-m} \quad (11)$$

$$= m \cdot p^m \sum_{j=0}^{\infty} C_{j+m}^{m-1} q^j = \frac{mq}{p}$$

方差 $Var(W) = E(W^2) - [E(W)]^2$, 而采用类似的方法可得到 $E(W^2)$:

$$E(W^2) = \sum_{k=m}^{\infty} k^2 \cdot u(k) = \sum_{k=m}^{\infty} k^2 \cdot C_{k-1}^{m-1} p^m q^{k-m} = \frac{m^2 + mq}{p^2} \quad (12)$$

$$\text{故 } Var(W) = \frac{mq}{p^2} \quad (13)$$

利用 $E(W)$ 和 $Var(W)$, 可以近似地估计出所需的积累脉冲数 N . 例如若 $p = 0.6, m = 4$, 可算出 $E(W) = 6.7, \sqrt{Var(W)} = 2.1, n$ 至少应取为 9, 则 $N = 9N_s$. 图 3 给出了 p_d 分别大于 0.9, 0.95, 0.99 时 n, p 之间的关系, 其中 $m = 4$. m 不同时类似的关系也可以求出. 图 3 表明 p_d 和 m 固定时所需的 n 随 p 的增大而减小, 说明由于初检概率的增大, 后面的非相干积累检测所需的脉冲组数不需很多. 而在同等的 p 和 m 的水平下, 为达到较高的 p_d , 则所要求的 n 也要相应增加.

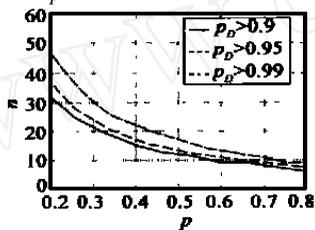


图 3 $m = 4$ 时积累脉冲数 n 和 p 的关系

6 对实测数据的处理结果

利用上述方法对实测数据进行了处理. 图 4 是某低分辨

脉冲雷达实测目标数据的距离-时间移动轨迹的三视图. 由于尖峰杂波的强度比目标信号强很多, 若利用单个脉冲回波来检测, 可能会存在较大的虚警. 实测数据的参数为: 雷达载频约 1092MHz, 脉冲重复频率 400Hz, 发射脉宽约 3 微秒, 采样频率 10MHz, 回波信号总长度 2000 个

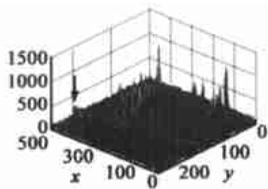


图 4 目标航迹. 距离按 2 1 抽取, 时间按 4 1 抽取

脉冲, 512 个距离单元. 目标附近若干个距离单元经拉伸后的时频分布利用 SIFT 分析获得, 如图 5 所示. 这里拉伸量为 30, 窗函数采用矩形窗. 时频特性说明在回波数据长度内目标不但出现距离走动, 同时其多普勒也是时变的. 利用常规 MID 方法处理, 由于未进行运动补偿, 目标能量在距离-多普勒两个轴上都发生扩散, 检测信噪比有

较大的损失, 对第 170 号目标所处距离单元的相参积累输出信噪比为 12.74dB. 经过补偿距离走动(未考虑多普勒的时变效应)后的信噪比 20.1dB. 图 6 为距离走动和多普勒走动联合补偿后的积累输出, 信噪比为 28.13dB. 比常规方法有近 16dB 的检测增益. 对实测数据的处理表明利用距离拉伸和时频分析的检测器增益取决于对目标多周期回波的能量利用率, 如果是步进频率发射信号(如 SIAR), 信噪比增益还不包含脉压的得益.

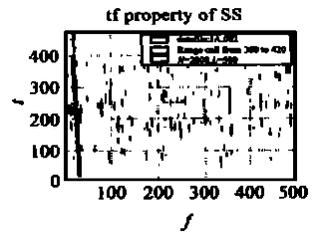


图 5 经距离拉伸后目标单元的时频特性

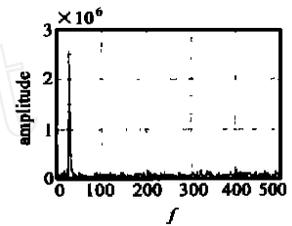


图 6 补偿距离走动和多普勒时变的检测输出 (SNR = 28.13dB)

7 结论

本文提出一种基于距离拉伸和时频分析的检测器对微弱雷达目标回波进行长时间信号积累, 该方法不需要对目标的运动参数进行预估计, 而是通过对多距离单元的综合处理和时频分析技术来进行运动补偿和匹配积累, 适用于存在多普勒时变的情况. 给出了实现框图并对检测器性能进行了分析. 仿真结果和对实测数据的实验验证了其有效性. 基于距离拉伸和时频联合处理的方法为有效的微弱信号积累检测以及改善积累检测的性能提供了一种备选方案.

作者简介:



王 俊 副教授, 1969 年出生, 1990 年于西安电子科技大学毕业后留校工作, 1995 年 3 月和 2000 年 3 月分别获西安电子科技大学信号与信息处理专业硕士和博士学位. 目前主要从事雷达信号检测、数字信号处理以及时频分析等方面的研究.



张守宏 1964 年毕业于西安军事电讯工程学院. 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 雷达学会委员. 长期从事雷达信号处理领域内的科研和教学工作, 已先后主持并完成近 20 项国防预研及工程性科研任务, 获国家级和省部级奖励多项. 主要研究方向为雷达信号处理与检测.

(下转第 55 页)

采用递归贝叶斯学习的方法与 RMM 框架结构相结合来跟踪交通网络中的动态变化,各智能体之间实时更新信息,增强了决策的可靠性.基于 RMM 和贝叶斯学习建立了简单的城市交通多智能体控制系统,并进行了仿真研究取得了较好的效果,

对 ITS 的发展有重要意义.同时应看到基于模型的方法在网络庞大时仍有缺陷,而基于多智能体无模型学习的交通网络协调控制将是理想的解决方案.

表 1 三种控制方法在仿真中的每周周期车辆平均等待队长

仿真中的网络 交通流量 (veh/h)	每周周期车辆平均等待队长			仿真中的网络 交通流量 (veh/h)	每周周期车辆平均等待队长		
	M1	M2	M3		M1	M2	M3
< 1008	< 0.05	< 0.05	< 0.05	2186	2.58	3.87	6.78
1008	0.1	0.12	0.19	2320	3.56	4.72	8.92
1152	0.15	0.17	0.24	2548	4.03	6.43	11.2
1296	0.26	0.29	0.37	2670	4.85	8.77	16.56
1368	0.34	0.48	0.75	2858	5.60	10.27	*
1512	0.47	0.80	1.12	3016	6.48	13.89	*
1656	0.77	1.08	1.95	3120	7.86	15.73	*
1728	0.91	1.67	2.54	3368	9.22	17.23	*
1944	1.23	2.10	3.38	3420	10.26	*	*
2088	1.94	2.45	5.80	3608	11.22	*	*

其中 * 表示等待车流队长很长,即交通拥塞已经发生.

参考文献:

- [1] 冯蔚东,贺国光,刘豹. 交通流理论评述 [J]. 系统工程学报, 1998, 3:71 - 87.
- [2] 王亦兵,韩曾晋,贺国光. 城市高速公路交通控制综述 [J]. 自动化学报, 1998, 7:485 - 406.
- [3] B. Burmeister, A. Haddadi, and G. Matylis. Applications of multi-agent systems in traffic and transportation [J]. IEE Transaction on Software Engineering, February 1997, 144(1) :51 - 60.
- [4] C. V. Goldman and J. S. Rosenschein. Mutual supervised learning in multi-agent systems [C]. Distributed AI, 1996:85 - 96.
- [5] N. V. Fidler. Distributed control of collaborating and learning expert systems for street traffic signals [C]. In Lewis and Stephanon, editors, IFAC Distributed Intelligence Systems, Pergamon Press, 1991: 125 - 130.
- [6] Gerhard Weib. Introduction to Distributed Artificial Intelligence [M]. MIT Press. Cambridge, MA, 1998.

- [7] P. J. Gmytrasiewicz, and E. H. Dufree. A rigorous, operational formalization of recursive modeling [J]. ICMA95, 1995:125 - 132.
- [8] Martin Anthony and Norman Biggs. Computational Learning Theory [M]. Cambridge University Press, 1992.

作者简介:



欧海涛 1973 年出生,上海交通大学自动化系博士研究生,研究方向为智能控制,多智能体系统和 ITS 等.

张卫东 1967 年出生,上海交通大学自动化系教授,研究领域为过程控制,多智能体系统和现场总线.

(上接第 59 页)

参考文献:

- [1] H. L. Van Trees. Detection, Estimation and Modulation Theory, Part III: Radar-sonar Signal Processing and Gaussian Signal in Noise [M]. New York: Wiley, 1971.
- [2] B. D. Carlson, E. D. Evans and S. L. Wilson. Search radar detection and track with the Hough transform, Part 1-Part 3 [J]. IEEE Trans. 1994, AES, 30(1).
- [3] C. C. Chen and H. C. Andrews, Targets motion induced radar imaging [J]. IEEE Trans. 1980, AES, 16(1).
- [4] 保铮. 雷达信号的长时间积累 [R]. 第七届中国雷达学术年会特邀报告, Nov. 1999.

- [5] V. C. Chen, S. Qian. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging [J]. IEEE Trans. 1998, AES, 34(2).
- [6] S. Barbarossa. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar Part 1: Optimal detection and parameter estimation theory, Part 2: Joint time-frequency analysis by wigner-Ville distribution [J]. IEE Proceedings-F, 1992, 139(1).
- [7] 陈伯孝, SIAR 四维跟踪及长相干积累等技术研究 [D]. 西安电子科技大学博士学位论文, July 1997.
- [8] 王俊, 张守宏, 杨克虎. 利用自适应子波变换提高对微弱运动目标的检测性能. 电子学报, 1999, 27(12): 80 - 83.
- [9] 王俊. 微弱目标信号积累检测的方法研究 [D]. 西安电子科技大学博士学位论文, Dec. 1999.