第 12 期
2002 年 12 月

电　子　学　报
ACTA ELECTRONICA SINICA

Vol.30 No.12
Dec. 2002

多站被动雷达系统的多目标测量数据关联

王　成[1,2],李少洪[1],黄　槐[2]
(1.北京航空航天大学电子工程系,北京 100083;2.北京无线电测量研究所,北京 100854)

摘　要: 本文提出了观测量集相关、观测量集不相关的概念,基于此概念从理论上概括分析了多站被动雷达系统的多目标测量数据关联问题,并针对测时差被动雷达系统进行了分析,提出了三时差关联算法和四时差关联算法,并进行仿真证明了其正确性.

关键词: 被动定位技术;多目标数据处理;数据关联
中图分类号: TN95　**文献标识码**: A　**文章编号**: 0372-2112(2002)12-1857-04

Multi-Target Measure Data Association in the Multiple Passive Radar System

WANG Cheng[1,2], LI Shao-hong[1], HUANG Huai[2]
(1. *Department of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083, *China*;
2. *Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing* 100854, *China*)

Abstract: In this paper, two concepts of observation variable set correlation and observation variable set non-correlation are defined. According to these concepts, multi-target measure data association in the multiple passive radar system is researched theoretically. Three-TDOA data association algorithm and four-TDOA data association algorithm are analyzed based on the TDOA passive radar system. Simulation results show their validity and feasibility.

Key words: passive radar position location; multi-target data processing; data association

1　引言

在雷达数据处理技术中,一个关键的问题是多站多目标的测量数据关联.对于主动式雷达的多目标数据关联问题,其理论发展已经比较成熟了[1,2].而对于被动雷达系统,由于无法利用一个接收站的测量数据对空间目标进行三维定位,它需要其它站的数据联合起来才能给出空间目标的位置[3].对单目标情况,这个问题比较简单,只涉及定位问题.当空间中存在多个目标时,情况就变得十分复杂,需要分清各个被动站的测量数据中那些是来源于同一目标的,并把属于同一目标的测量数据组合起来(即完成测量数据关联),然后才能进行目标定位,如果关联不正确就会出现虚假目标.

2　多站多目标测量数据关联

一般对于多站多目标的测量数据关联,有两种基本方法:一种是利用所处理的带有目标自身特征的信号进行关联,如基于不同目标所辐射电磁波的特征参数(频率、脉宽、重频、调频斜率等)不同,利用信号分选等技术把各站的测量数据依不同的目标进行分组,这种方法在此不做讨论.另一种方法是利用多站测量数据的空间冗余信息(相关数据)进行关联,本文讨论此种方法的测量数据关联问题.

2.1　观测量集相关与不相关的定义

定义观测量为无源探测系统对目标位置(x,y,z)的某一几何特征的观测,为目标位置的函数$f(x,y,z)$.测量数据为观测量在某一次测量的具体取值$z=f(x,y,z)$.

现在定义观测量集相关与不相关,设无源探测系统对目标进行观测,为了完成一次定位得到一个观测量集$\{f_i(x,y,z),i=1,\cdots,m\}$,其共有$m$个观测量,如果$f_1,f_2,...,f_m$中的某一观测量如$f_i$能表示成其余观测量$f_1,...f_{i-1},f_{i+1},...,f_m$的函数,即$f_i=F(f_1,...f_{i-1},f_{i+1},...,f_m)$,则称观测量集$f_1,f_2,...,f_m$相关.若观测量集$f_1,f_2,...,f_m$不满足上述相关条件,则称观测量集$f_1,f_2,...,f_m$不相关.观测量集相关可以看作存在只由观测量$\{f_i,i=1,\cdots,m\}$及常系数组成关系式(不包含待求变量如目标位置$(x,y,z)$等的未知信息).观测量集不相关表示对于所有由观测量$\{f_i,i=1,\cdots,m\}$组成的关系式,其中任一种关系式都含有待求变量等未知信息[4].观测量集的具体取值也可分为:相关测量数据集和不相关测量数据集.相关测量数据集同样满足某一由测量数据及常系数组成的关系式.

对于被动定位系统的多目标情况下,从所有被动站的测量数据中任取三个不相关的测量数据就可以定出一个目标点来,但无法分清这三个测量数据是否来自同一目标.在数据处理中,我们采用方法的基本思想是依据不同目标所处的空间位置不同的先验条件,利用测量数据的冗余信息(相关数据),采用一定的最优算法进行测量数据关联.对三维空间目标进

收稿日期:2001-08-20;修回日期:2002-08-02

行定位,当存在冗余测量数据(既 $m>3$)时,测量数据集相关.则可以利用冗余测量数据即相关测量数据集完成测量数据关联.

2.2 确定各站测量数据之间的关联度

设无源探测系统共有 m 个接收站,每个接收站只测量目标位置的一个几何量.当探测空域共有 n 个目标,并且任一接收站 i 测得 n_i 个测量数据(包括目标或杂波)为 $\{z_{i,j}, j=1,\cdots n_i\}$, $i=1,\cdots m$,其中 $z_{i,j}$ 表示接收站 i 的第 j 个测量数据.接收站的发现概率为 p_d;每个测量数据或来源于目标或来源于杂波,并且每个测量数据仅来源于唯一的一个辐射源.对于接收站 i 的测量数据 $\{z_{i,j}\quad j=1,\cdots n_i\}$ $i=1,\cdots m$,当其来源于目标 k 时,其观测数据服从高斯分布:

$$p(z_{i,j}\mid(x_k,y_k,z_k))=N(f_i(x_k,y_k,z_k),\sigma_{i,j}^2)$$

其中 $f_i(x_k,y_k,z_k)$ 为接收站 i 对目标 k 的观测函数,$\sigma_{i,j}^2$ 为 $z_{i,j}$ 的测量误差的方差.当其来源于杂波时,设杂波在探测空域均匀分布,杂波的概率密度函数为:

$$p_c=1/L_m$$

L_m 为测量数据的取值范围.

为了进行数据关联,假设用测量数据 $\{z_{i,0}\}$ 表示接收站 i 没有发现目标的情况.从每一个接收站的测量 $\{z_{i,j}, j=0,\cdots n_i\}$ $i=1,\cdots m$ 中任取一个测量数据,组成一个可能关联假设的测量数据集 $\{z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots,z_{m,jm}\}$,其中 $j_1,\cdots,j_m$ 为所有可能关联假设的一种排列,即第 1 个接收站取第 j_1 个测量数据,第 2 个接收站取第 j_2 个测量数据,依此类推.当此关联假设的测量数据来源同一目标 k 时,满足如下概率关系:

$$p(z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots,z_{m,jm}\mid(x_k,y_k,z_k))=\prod_{i=1}^{m}[N(f_i(x_k,y_k,z_k),\sigma_i^2)p_d]^{\delta}[1-p_d]^{1-\delta}$$

当 $\delta=0$ 时,接收站没有发现目标,此时测量数据取 $\{z_{i0}\}$;当 $\delta=1$ 时,接收站发现目标,此时测量数据取 $\{z_{i,j}, j=1,\cdots n_i\}$ $i=1,\cdots m$.其中目标 (x_k,y_k,z_k) 的真值未知,可以用测量数据集 $\{z_1,j_1,z_2,j_2,\cdots,z_m,j_m\}$ 对目标 k 的某一最优估计 $(\hat{x}_k,\hat{y}_k,\hat{z}_k)$ 代替.

共可组成 n^m 个可能关联假设的测量数据集,其中有 n 个测量数据集分别对应 n 个真实目标,其余测量数据集为虚假目标.对于任意 n 个互不交联的可能关联假设测量数据集对应 n 个目标作为一种可能划分 D,其满足:

$$D=\{\{z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots,z_{m,jm}\}$$

来源于目标 (x_k,y_k,z_k);$k=1,\cdots n\}$,

则此划分 D 的关联概率为:

$$P_A=p(Z\mid D)=\prod_{z_{ij}\in D}p(z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots;z_{m,jm}\mid(x_k,y_k,z_k))\prod_{z_{ij}\notin D}\left(\frac{1}{L_m}\right)$$

其中 $Z=\{\{z_{i,j}j=0,\cdots n_i\}\ i=1,\cdots m\}$,包括两部分:一部分属于此划分 D 的测量数据,其来源于目标,剩余测量数据来源于杂波.求出所有可能划分中,关联概率最大的为正确的划分.

上述方法计算量巨大,无法工程实现.可以简化如下:假设漏检概率和虚警概率均为零(可以通过信号分选等信号处理方法实现),即空间中的每个目标都被各接收站探测到,每个接收站的每次测量数据都是针对一个真实目标的,无杂波干扰.在存在观测噪声的情况下,假设测量误差相对于目标之间的空间分离度要小得多.为了度量每种可能关联假设的测量数据集中各测量数据来源于同一目标的真实程度,即为了计算各测量数据的正确关联程度,我们可以定义关联度的概念.关联度 P_A 是此关联假设的测量数据集中各测量数据的函数,并且在 0-1 之间取值,关联度越高则假设中各测量数据来源同一目标的真实度就越大,当 $P_A=1$ 时为正确关联.由于在传统的关联度计算过程中,需要用到目标的定位值,而定位值在关联完成之前是很难确定的.所以最好的方法是,在计算关联度时,无须使用目标的定位值.当某一可能关联假设的测量数据集来源同一目标时,其各测量数据都是对目标位置的某一侧面的描述(从目标的状态空间通过被动站的观测方程到测量空间的投影),因为测量数据集是相关的,所以依据"观测量集相关"的定义可知各测量数据必定满足某一个关系式,如 $\varepsilon(z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots,z_{m,jm})=0$.当此测量数据集来源不同目标,此各测量数据之间没有必然的联系.测量数据关联就是判断各测量数据之间是否满足这一关系式,所以关联度可依据此性质制定.某一可能关联假设的测量数据集来源同一目标的关联度可以定义为其各测量数据所确定的关系式的函数:

$$P_A(z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots;z_{m,jm}\mid(x_k,y_k,z_k))=g(\varepsilon(z_{1,j1},z_{2,j2},\cdots,z_{m,jm}))$$

此关系式与选择相关测量数据有关.依据一定的算法取其中关联度最大的 n 个组合作为正确关联,对应 n 个真实目标.在下一节将对测时差被动定位系统的多目标的测量数据关联问题进行具体讨论.

2.3 最优分配算法

如何利用各种可能关联假设测量数据集的关联度求出其中最优的 n 个(对应于空间的 n 个目标),属于 N 维指派问题.由于各站的测量数据都存在一定的测量误差,正确组合的关联度一般 $P_A\neq1$,所以只能选择关联度最大的 n 个测量数据集为正确相关,而各种可能都是相互交联的,所以最优的判别算法十分重要.关于最优分配算法已经有许多文章进行分析[5],在此不做讨论.

3 测时差被动定位系统中的测量数据关联

3.1 测时差系统的三时差关联法

对于三维探测空间的测时差定位问题,需要四个接收站(测得三个时差)才能完成空间目标的定位.其中一个为中心接收站(主站),三个为辅助接收站(副站),主站测量目标辐射电磁波到达主站与三个副站的三个时间差(对应距离差,为了论述方便,以下都采用距离差进行表示)来进行定位.

设主站站址为(0,0,0),副站 i 站址为 (x_{si},y_{si},z_{si}), $i=1,2,3$;测得目标 $t(x_t,y_t,z_t)$ 到主站与副站 i 的距离差为:

$$\Delta_{it}=\sqrt{(x_t-0)^2+(y_t-0)^2+(z_t-0)^2}-\sqrt{(x_t-x_{si})^2+(y_t-y_{si})^2+(z_t-z_{si})^2}$$

利用此三个距离差 Δ_{1t}、Δ_{2t}、Δ_{3t} 可对目标进行定位,当探测空

域存在多目标情况时，三个距离差无法区分空间中的多目标。为了完成对三个距离差的关联，需要增加一个或几个测量数据，来提供所需的相关测量数据（冗余数据）。则另外可测得目标到副站 1 与副站 2 的距离差 Δ_{4t}：

$$\Delta_{4t}=\sqrt{(x_t-x_{s1})^2+(y_t-y_{s1})^2+(z_t-z_{s1})^2}-\sqrt{(x_t-x_{s2})^2+(y_t-y_{s2})^2+(z_t-z_{s2})^2}$$

因 Δ_{4t} 只对 Δ_{1t}、Δ_{2t} 的关联提供冗余信息，对 Δ_{3t} 的关联不能提供冗余信息，所以还得增加目标到达副站 1 和副站 3 的距离差 Δ_{5t}：

$$\Delta_{5t}=\sqrt{(x_t-x_{s1})^2+(y_t-y_{s1})^2+(z_t-z_{s1})^2}-\sqrt{(x_t-x_{s3})^2+(y_t-y_{s3})^2+(z_t-z_{s3})^2}$$

很明显对于同一目标 5 个测量数据满足如下线性关系：

$$\Delta_{1t}-\Delta_{2t}+\Delta_{4t}=0$$

$$\Delta_{1t}-\Delta_{3t}+\Delta_{5t}=0$$

当探测空域中存在 n 个目标时，测时差定位系统共可得到五组测量数据，每组测量数据包含对 n 个目标的距离差 $\{\Delta_{it},t=1,\cdots n\}$ $i=1,\cdots5$；则从每组测量数据的 n 个距离差中都任取一个测量数据组成一个可能关联假设，其对应的测量数据集为 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{3,i3},\Delta_{4,i4},\Delta_{5,i5}\}$，其中 $\{i1,i2,i3,i4,i5\}$ 为一种可能关联假设的排列，即从 Δ_{1t} 这组测量数据中取第 $i1$ 个测量数据，从 Δ_{2t} 这组测量数据中取第 $i2$ 个测量数据，依此类推。因对于同一目标的 5 个测量数据满足相互独立的两个关系式，所以分两个测量数据子集进行关联判断：

对于测量数据子集 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{4,i4}\}$，判断其测量数据是否来源同一目标。定义此测量数据集的关联度为：

$$P_A(i1,i2,i4)=e^{-(\Delta_{1,i1}-\Delta_{2,i2}+\Delta_{4,i4})^2}$$

对 $P_A(i1,i2,i4)$ 进行归一化处理，并计算所有的 n^3 个可能关联假设 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{4,i4}\}$，$i_1=1,\cdots,n$；$i_2=1,\cdots,n$；$i_4=1,\cdots,n$；的关联度 $P_A(i_1,i_2,i_4)$，取其最大关联度的测量数据子集 $\{i1,i2,i4\}$ 作为一个正确的关联，认为其测量数据来源同一目标。把上述测量数据从可能关联假设的集合中删除，从剩余的集合中取最大关联度的测量数据子集，重复上述操作，直到得到 n 个正确关联，即认为来源 n 个目标。

对于测量数据子集 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{3,i3},\Delta_{5,i5}\}$ 的数据关联同 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{4,i4}\}$，可以得到 n 个正确关联，即认为来源 n 个目标。最后，对于两次关联分别得到的两组 n 个正确关联 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{4,i4}\}$ 和 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{3,i3},\Delta_{5,i5}\}$ 中具有同一 $\Delta_{1,i1}$ 组成一组 n 个正确关联组合 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{3,i3},\Delta_{4,i4},\Delta_{5,i5}\}$，其对应 n 个目标。

3.2　测时差系统的四时差关联法

上述方法需要增加两个测量数据，其中任一个相关测量数据都不能完全提供数据关联所需的信息。下面的方法只需一个相关测量数据就可以提供所需的关联信息。

设在三个副站的基础上，增加第 4 副站，得到一个相关测量数据。对于空间 n 个目标，测得目标 $t(x_t,y_t,z_t)$ 到主站与副站 i 的四个距离差为 Δ_{it} $t=1,\cdots,n$；$i=1,\cdots,4$：

设主站站址为(0,0,0)，副站 i 站址为 (x_{si},y_{si},z_{si})，则对应方程[6]为：

$$\Delta_{it}=\sqrt{(x_t-0)^2+(y_t-0)^2+(z_t-0)^2}-\sqrt{(x_t-x_{si})^2+(y_t-y_{si})^2+(z_t-z_{si})^2}$$

进一步简化可得如下方程：

$$x_{si}x_t+y_{si}y_t+z_{si}z_t-\Delta_{it}r_t=l_{it}$$

其中

$$r_t=\sqrt{x_t^2+y_t^2+z_t^2}$$

$$l_{it}=\frac{x_{si}^2+y_{si}^2+z_{si}^2-\Delta_{it}^2}{2}$$

经过推导可得，对于同一目标 t 的四距离差观测量 Δ_{1t}，Δ_{2t}，Δ_{3t}、Δ_{4t} 满足如下表达式：

$$\varepsilon(\Delta_{1t},\Delta_{2t},\Delta_{3t},\Delta_{4t})=\begin{vmatrix} l_{1t} & y_{s1} & z_{s1} & -\Delta_{1t}\\ l_{2t} & y_{s2} & z_{s2} & -\Delta_{2t}\\ l_{3t} & y_{s3} & z_{s3} & -\Delta_{3t}\\ l_{4t} & y_{s4} & z_{s4} & -\Delta_{4t}\end{vmatrix}+\begin{vmatrix} x_{s1} & l_{1t} & z_{s1} & -\Delta_{1t}\\ x_{s2} & l_{2t} & z_{s2} & -\Delta_{2t}\\ x_{s3} & l_{3t} & z_{s3} & -\Delta_{3t}\\ x_{s4} & l_{4t} & z_{s4} & -\Delta_{4t}\end{vmatrix}+\begin{vmatrix} x_{s1} & y_{s1} & l_{1t} & -\Delta_{1t}\\ x_{s2} & y_{s2} & l_{2t} & -\Delta_{2t}\\ x_{s3} & y_{s3} & l_{3t} & -\Delta_{3t}\\ x_{s4} & y_{s4} & l_{4t} & -\Delta_{4t}\end{vmatrix}-\begin{vmatrix} x_{s1} & y_{s1} & z_{s1} & l_{1t}\\ x_{s2} & y_{s2} & z_{s2} & l_{2t}\\ x_{s3} & y_{s3} & z_{s3} & l_{3t}\\ x_{s4} & y_{s4} & z_{s4} & l_{4t}\end{vmatrix}=0$$

对于探测空域的 n 个目标，通过主站与每个副站 i 可测得一组包含 n 个距离差的测量数据 $\{\Delta_{it},t=1,\cdots n\}$ $i=1,\cdots4$；则从对应每个副站 i 的 n 个距离差测量数据中都任取一个测量数据组成一个可能关联假设，其对应的测量数据集为 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{3,i3},\Delta_{4,i4}\}$，其中 $\{i1,i2,i3,i4\}$ 为一种可能关联假设的排列，判断这个测量数据集的测量数据是否来源同一目标。当上述表达式成立时，此测量数据来源于同一目标。否则，来源于不同目标。当存在测量误差的情况时，测量数据集的关联残差 $\varepsilon(\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{3,i3},\Delta_{4,i4})$ 不为零，则可定义此测量数据集的关联度为：

$$P_A(i1,i2,i3,i4)=e^{-\varepsilon(\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{3,i3},\Delta_{4,i4})^2}$$

对 $P_A(i1,i2,i3,i4)$ 进行归一化处理。计算所有可能的 n^4 个可能关联假设 $\{\Delta_{1,i1},\Delta_{2,i2},\Delta_{3,i3},\Delta_{4,i4}\}$，$i1=1,\cdots,n$；$i2=1,\cdots,n$；$i3=1,\cdots,n$；$i4=1,\cdots,n$；的关联度 $P_A(i1,i2,i3,i4)$，取其最大关联度的测量数据集 $\{i1,i2,i3,i4\}$ 作为一个正确的关联，认为其测量数据来源同一目标，把这些测量数据从可能关联假设的集合中删除，从剩余的集合中取最大关联度的测量数据集，重复上述操作，直到得到 n 个正确关联，即认为来源 n 个目标。

4　仿真分析

4.1　测时差系统三时差关联法

设主站在直角坐标系的站址为(0,0,0)，三个副站依次以等角度均匀分布在半径 30km 的圆上，并且第 1 副站与原点连

线与 x 轴的夹角为 60 度,布站如图 1 所示.测时差精度为 20ns 对应距离差精度为 6m.设目标间相距 d,其中目标 1 位于(100km,200km,10km);目标 2 位于(100 + d km,200km,10km);目标 3 位于(100 - d km,200km,10km);目标 4 位于(100 + 2d km,200km,10km);目标 5 位于(100 - 2d km,200km,10km).对整个关联过程作 1000 次蒙特卡罗仿真,求出所有目标正确关联的概率,如表 1 所示.

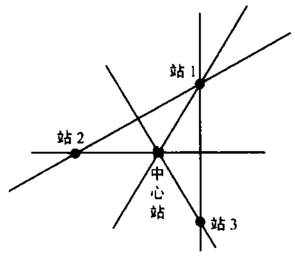


图 1 三时差关联法布站图

表 1

d \ n	2	3	4	5
1km	0.351	0.098	0.027	0.013
2km	0.578	0.406	0.195	0.126
3km	0.798	0.690	0.473	0.449
4km	0.926	0.915	0.670	0.665
5km	0.966	0.964	0.733	0.758
6km	0.992	0.987	0.711	0.727
7km	0.994	0.992	0.683	0.699

4.2 测时差系统四时差关联法

设主站在直角坐标系的站址为(0,0,0),四个副站依次以等角度均匀分布在半径 30km 的圆上,并且第 1 副站与原点连线与 x 轴的夹角为 45 度,布站如图 2 所示.目标数、目标位置及各站测量精度与线性相关关联法相同.对整个关联过程作 1000 次蒙特卡罗仿真,求出所有目标为正确关联的概率,如表 2 所示.

表 2

d \ n	2	3	4	5
1km	0.281	0.043	0.005	0.001
2km	0.395	0.161	0.041	0.014
3km	0.746	0.488	0.205	0.081
4km	0.838	0.676	0.315	0.171
5km	0.979	0.939	0.539	0.402
6km	0.999	0.993	0.746	0.660
7km	1.000	0.999	0.812	0.766

4.3 仿真结果分析

通过蒙特卡罗仿真,我们可以看到随着目标数的增加正确关联的概率降低,随着目标间距的增大正确关联的概率增大.在此仿真条件下,对两目标的情况,若正确关联的概率大于 0.9,则目标间距应大于 5km.

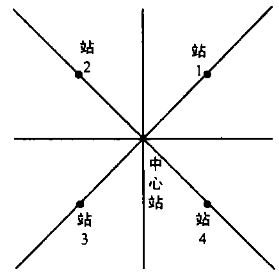


图 2 四时差关联法布站图

5 结束语

在被动定位系统中,由于单个接收站无法对目标进行三维定位,必须由两个以上接收站联合才能完成定位任务,所以在进行定位之前,必须判断完成目标定位所需的多个站测量数据是否来自同一目标,本文提出观测量集相关、不相关的概念,从基本理论入手讨论了多目标的测量数据关联问题,最后就被动定位的测时差法的多目标测量数据关联法进行了分析,给出了三时差、四时差关联算法,最后进行了仿真分析.

参考文献:

[1] Bar-shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association [M]. New York: Academic Press, 1988.

[2] A Houles, Y Bar-shalom. Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter [J]. IEEE Trans. AES, 1989, 25(2): 176 - 189.

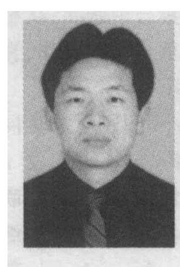
[3] 孙仲康,周一宇,何黎星.单多基地有源无源定位技术 [M].北京:国防工业出版社,1996.

[4] 沈永欢,等.实用数学手册 [M].北京:科学出版社.1992,8.

[5] S Deb, K R Pattipati, Y Bar_ Shalom, R B Washburn. Assignment algorithms for the passive sensor data association problem [J]. SPIE, 1989, 1096 Signal and Data Processing of Small targets.

[6] 王成,李少洪等.测时差被动定位算法的研究 [J].系统工程与电子技术,2001,23(11):9 - 12.

作者简介:



王 成 男,1970 年生于吉林长春,1992、1995 年分别获西北工业大学自动控制系学士、硕士学位,2002 年获北京航空航天大学电子工程系博士学位,现为北京无线电测量研究所高级工程师,主要从事研究领域:多站无源定位技术、雷达组网技术、雷达数据处理、雷达系统软件、雷达系统仿真,曾获部级科技进步奖.