

# 多假目标欺骗干扰下组网雷达跟踪技术

赵艳丽<sup>1</sup>,王雪松<sup>1</sup>,王国玉<sup>2</sup>,刘义和<sup>2</sup>,罗 佳<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073; 2. 洛阳 061 信箱,河南洛阳 471003)

**摘 要:** 针对距离多假目标欺骗干扰下的组网雷达跟踪,提出了一种基于同源量测融合的跟踪技术.该跟踪技术包括同源量测融合、多目标跟踪两部分.同源量测融合相当于对所有量测进行预处理,其关键在于同源量测自适应检验门限的设计.通过该预处理,输入的假目标的量测数目大大减少,且问题简化为单雷达的多目标跟踪.多目标跟踪中,根据航迹优先级顺序依次进行数据关联.该跟踪技术使得组网雷达可以有效剔除假目标,并更精确的跟踪真目标.仿真结果证明了该技术的可行性和有效性.

**关键词:** 距离多假目标欺骗干扰; 组网雷达; 同源量测融合; 多目标跟踪

**中图分类号:** TN95

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0454-05

## Tracking Technique for Radar Network in the Presence of Multi-Range-False-Target Deception Jamming

ZHAO Yan-li<sup>1</sup>, WANG Xue-song<sup>1</sup>, WANG Guo-yu<sup>2</sup>, LIU Yi-he<sup>2</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; 2. Post Box 061, Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract:** In the presence of multi-range-false-target deception jamming, a tracking technique is proposed for radar network, which is based on the fusion for the same source measurements. The technique involves two steps: fusion for the same source measurements and multi-target tracking. The fusion for the same source measurements is a preprocessing of the technique. The key of the fusion is design of an adaptive threshold for test the same source measurements. The preprocessing can not only decrease the number of the false targets' measurements, but also simplify the problem as multi-target tracking for single radar. In multi-target tracking, data association is performed in sequence of track's priority. Using this tracking technique, radar network can reject false targets effectively, and track the true targets more precisely. Simulation results verify the feasibility and validity of the proposed technique.

**Key words:** multi-range-false-target deception jamming; radar network; fusion for the same source measurements; multi-target tracking

### 1 引言

在弹道导弹攻防对抗中,各种电子干扰措施被广泛采用<sup>[1]</sup>.有源距离多假目标欺骗干扰是一种正在发展中的、越来越被重视的新的导弹突防干扰手段<sup>[2,3]</sup>.采用了数字射频存储器(DRFM)的先进的转发式干扰机<sup>[4]</sup>,可以瞬时精确复制接收到的雷达信号,根据指令随机或程控产生单个或多个和真实回波距离分布不同的假目标回波.多假目标会严重消耗雷达资源,使得真实目标迟迟达不到可以拦截的精度,甚至使雷达误判其为真目标,对其发射拦截导弹.

组网雷达是导弹防御系统中探测、跟踪、识别与制

导过程的核心传感器.多假目标欺骗干扰下,雷达采用集中式组网比较合适<sup>[5]</sup>.对于集中式多传感器多目标跟踪,经典的算法有多传感器联合概率数据互联法(MSP-DA)<sup>[5]</sup>、广义S-维分配算法等<sup>[6]</sup>.这些算法比较复杂,且主要针对无电子干扰的情况,通常只考虑数个真目标及少量杂波.在大量假目标干扰下,若不加特殊处理,这些算法可能会产生计算量上的组合爆炸,甚至无法进行正常跟踪.多假目标欺骗干扰下,组网雷达跟踪采取什么样的具体处理措施,才能达到较优的抗多假欺骗效果,目前尚无公开发表的文献.在多假目标欺骗干扰下,提出抗干扰、计算量小、简单易行的组网雷达跟踪算法,是工程实践中亟待解决的问题.

本文提出了一种多假目标欺骗干扰下的组网雷达跟踪技术,该技术包括同源量测融合、多目标跟踪两部分。第 2 节详细介绍了同源量测融合,它包括最近邻关联、自适应门限同源检验和量测融合三个环节,其中同源检验门限的设计是问题的核心。文中第 3 节给出了单雷达多目标跟踪算法,阐述了依据航迹优先级的关联策略。最后给出了仿真结果和结论。

## 2 同源量测融合

本文讨论的情形假定组网雷达关注同一空域,各部雷达采样间隔相等,目标回波到达各个雷达的时间差、假目标的转发延迟时间,都远远小于采样间隔,也就是各部雷达近似同步照射。对于雷达量测严重不同步的情况,将另文论述。

同源量测融合由最近邻关联、同源检验和量测加权融合三个环节构成,其核心思想是:真目标对所有雷达形成的观测序列在空间分布上相对“集中”,可以判别量测序列同源(来自同一个目标);而干扰脉冲对不同雷达形成的假目标在空间分布上相对“分散”,可以判别量测序列非同源(不是来自同一个目标)。仅对通过同源检验的量测序列进行加权融合,做为多目标跟踪的输入值。由于量测噪声在统一直角坐标系下的时变、非高斯,如何设计合适的同源检验门限,使得真目标以很高的概率保留,而假目标被最大程度的剔除,是问题的关键所在。

### 2.1 最近邻关联

为了使干扰机更好地掩护真目标,一般希望多个距离假目标能和真目标分布在同一个雷达角度分辨单元内,干扰机可以随目标携带或随队掩护。距离多假目标分布在各个雷达与干扰机的连线上。

$N$  部雷达组网,某量测时刻第  $i$  部雷达量测点迹数目为  $M_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。假定对第  $i$  部雷达,真目标(或干扰机)的真实值为  $\mathbf{z}_i^t = (r, \phi, \dots)$ ,则对应的第  $m$  个转发延迟的距离假目标的量测为:

$$\mathbf{z}_{im}^t = (r + r_m + v_r, \phi + v_\phi, \dots + v) \quad (1)$$

其中  $r_m$  为转发延迟距离,  $v_r, v_\phi, v$  分别是距离、方位角、俯仰角量测误差。

量测是在各自的雷达站球坐标系下获得,进行数据关联时,所有量测需要统一到某个直角坐标系下。采用最近邻方法对来自不同雷达的量测数据进行关联。

$N$  部雷达两两进行最近邻关联,得到  $C_N^2$  个关联链表,取其交集,最终形成  $k$  个关联量测序列  $AZ^i$ ,每个序列包含  $N$  个来自不同雷达、在各自雷达分站中不同序号的量测点迹:

$$AZ^i = (Z_1^{Id_1}, Z_2^{Id_2}, \dots, Z_N^{Id_N}), \quad i = 1, 2, \dots, k; Id_i \in \{1, 2, \dots, M_{\max}\} \quad (2)$$

其中  $M_{\max} = \max(M_1, M_2, \dots, M_N)$ ,  $Z_i^{Id_i}$  表示来自第  $i$  个雷达的第  $Id_i$  个点迹,  $Z_j^{Id_j}$  表示来自第  $j$  个雷达的第  $Id_j$  个点迹。  $AZ^i$  中任意两个点迹  $Z_i^{Id_i}$  和  $Z_j^{Id_j}$  在第  $i, j$  两部雷达的关联链表中都是一对相关联的点迹对。不能满足式(2)的点迹全部舍弃。

对应的,关联量测序列  $AZ^i$  对应的协方差序列,可由其量测值及雷达量测标准差(包括距离量测和俯仰角、方位角量测标准差)计算获得<sup>[7]</sup>:

$$AZ^i: R^i = (R_1^{Id_1}, R_2^{Id_2}, \dots, R_N^{Id_N}) \\ i = 1, 2, \dots, k; Id_i \in \{1, 2, \dots, M_{\max}\} \quad (3)$$

### 2.2 自适应门限同源检验

最近邻关联后的量测序列  $AZ^i$ ,可能是由真目标形成的,也有可能是由干扰信号形成的。为了甄别真假,对其进行同源检验,被同源检验接受则认为是真目标,拒绝则认为是假目标。由于量测噪声的时变,检验门限也需自适应时变。自适应检验门限的设计是同源检验的关键。本文的设计准则是:在真目标(1 个或多个)保持高接受概率的前提下,假目标最大程度的被拒绝。下面详细阐述自适应门限的设计。

在  $i, j$  两部雷达的所有关联量测对中,假定关联距离最近的量测对(通常是来自于真目标的)是  $Z_i^l$  和  $Z_j^l$ ,其协方差  $R_i^l$  和  $R_j^l$ 。定义关联协方差为  $R_{ij}^0 = R_i^l + R_j^l$ 。  $R_{ij}^0$  是一个对称的实矩阵,则可通过正交变换把二次型  $R_{ij}^0$  转化为标准形,即:

$$R_{ij}^0 = C^T C \quad (4)$$

其中  $C$  为正交矩阵,  $R_{ij}^0$  为标准形,它们满足:

$$C^T C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

不妨令  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ,  $R_{ij}^0$  是高斯分布的 1 误差分布椭圆,其椭圆半径分别等于  $R_{ij}^0$  特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  的平方根<sup>[8]</sup>。为保证真目标(可能不止一个)具有 99.74% 的接受概率,定义一个圆球,其半径为:

$$G = 3 \sqrt{\lambda_1} \quad (5)$$

$G$  即是  $i, j$  两部雷达最近邻关联后,进行同源检验时的自适应门限。

任意一个关联量测对  $Z_i^{n1}$  (第  $i$  部雷达的第  $n1$  个量测) 和  $Z_j^{n2}$  (第  $j$  部雷达的第  $n2$  个量测),其关联距离为:

$$d_{ij}(n1, n2) = \sqrt{(x_i^{n1} - x_j^{n2})^2 + (y_i^{n1} - y_j^{n2})^2 + (z_i^{n1} - z_j^{n2})^2}, \\ n1 \in \{1, 2, \dots, M_i\}, n2 \in \{1, 2, \dots, M_j\} \quad (6)$$

进行同源检验的规则:

$$H = \begin{cases} 1, & d_{ij}(n1, n2) < G \\ 0, & d_{ij}(n1, n2) > G \end{cases} \quad (7)$$

对于它们来自同一个目标的假设,1 表示接受,0 表示拒绝.

对于某个真实目标  $t$ ,它对雷达分站  $i, j$  形成的量测在统一直角坐标系下的量测值及其之间的距离分别为:

$$Z_i^{m1} = \begin{pmatrix} x_i^{m1} & y_i^{m1} & z_i^{m1} \end{pmatrix} = (x_t \ y_t \ z_t) + v_i, \quad m1 \in \{1, 2, \dots, M_i\} \quad (8)$$

$$Z_j^{m2} = \begin{pmatrix} x_j^{m2} & y_j^{m2} & z_j^{m2} \end{pmatrix} = (x_t \ y_t \ z_t) + v_j, \quad m2 \in \{1, 2, \dots, M_j\} \quad (9)$$

$$d_t = \sqrt{(x_i^{m1} - x_j^{m2})^2 + (y_i^{m1} - y_j^{m2})^2 + (z_i^{m1} - z_j^{m2})^2} = \sqrt{v_i^2 + v_j^2} \quad (10)$$

其中  $\sqrt{v_i^2 + v_j^2}$  代表欧氏距离范数,  $(x_t, y_t, z_t)$  是无噪声条件下真目标在统一直角坐标系下的位置,  $v_i, v_j$  分别是近似高斯矢量,其均值为零,协方差为  $R_i^{m1}$  和  $R_j^{m2}$ .  $d_t$  近似为高斯分布,其均值为 0. 来自于真目标的量测值之间的距离  $d_t$  近似为高斯分布,对应的能被同源检测接受的概率为:

$$P_t = P(d_t < G) = 1 - 2(1 - (3.0)) = 99.74\% \quad (11)$$

对于  $N$  部雷达组网的情况,最近邻关联后形成的量测序列  $AZ^i$  如式(2)所示,则首先进行两两同源检验,然后求其交集.

### 2.3 量测融合

假定经过最近邻关联且被同源检验接受的量测序列  $AZ^i$  有  $k_c$  个 ( $k_c < k$ ),则这些量测序列  $AZ^i$  及其对应的协方差序列  $AZ^i \cdot R^i$ ,通过加权的方式可以得到其融合的位置数据和协方差数据<sup>[9]</sup>:

$$FZ^i = \left[ \sum_{j=1}^N (R_j^{Id_j})^{-1} \right]^{-1} \sum_{j=1}^N (R_j^{Id_j})^{-1} Z_j^{Id_j}, \quad i = 1, 2, \dots, k_c, Id_j \in \{1, 2, \dots, M_{\max}\} \quad (12)$$

$$FR^i = \left[ \sum_{j=1}^N (R_j^{Id_j})^{-1} \right]^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, k_c, Id_j \in \{1, 2, \dots, M_{\max}\} \quad (13)$$

$k_c$  个同源量测序列  $AZ^i$  经过融合后得到  $k_c$  个融合点迹的位置和协方差,做为观测值输入多目标跟踪数据处理,问题转化为统一坐标系下单部雷达的多目标跟踪.量测融合的本质就是数据求精.同源量测序列经过融合后,点迹位置比单个雷达更精确,同时航迹进行数据关联时的正确性也提高,这样就大大提高了跟踪航迹的精度.

## 3 多目标跟踪

在统一坐标系下对融合后的点迹进行跟踪滤波,是一个非常复杂的多目标跟踪问题,除了已有航迹的更新维持,还必须考虑新的航迹的出现,以及已有航迹

的终止.航迹的滤波更新采用 Kalman 滤波或扩展 Kalman 滤波,这里不赘述,主要阐述多目标跟踪中的数据关联和航迹管理.

把航迹类型按照其质量分为自由点航迹、暂时航迹、可靠航迹和终止航迹.航迹类型之间的转换是通过计分式航迹质量管理方法控制.其要点是:一个自由点航迹记为 1 分;如果下一次有点迹与此航迹相关则加 1 分;当分数到达某个定值(如 2 分)该航迹称为暂时航迹;一条航迹的分数到达定值(如 4 分)后就不在增加;如果航迹丢失一个相关点迹就减 1 分;当分数减到某个值(如 1 分)时就终止该航迹.在每一次关联和更新处理中,融合点迹首先与可靠航迹进行关联,剩余点迹再和暂时航迹关联;与暂时航迹关联完毕的剩余点迹再与自由点航迹关联,最后剩下的点迹做为新出现的目标起始一条自由点航迹.关联上的点迹用来滤波更新相关航迹,同时航迹的得分也予以更新.

### 3.1 可靠航迹关联

多目标跟踪的关键问题在于航迹与点迹的数据关联.联合数据关联(JPDA)是目前正在广泛研究的一种方法,但是这种方法存在航迹聚合等其他一些问题,在目标数目较多尤其杂波密度高时,其概率计算的复杂性和过大的计算量影响了实用价值.结合具体情况,本文采用一种经验公式<sup>[10]</sup>来计算可靠航迹与输入点迹的关联概率,其解很接近 JPDA 的最优解,并且计算速度快,实现容易,当采用最近邻的关联方法代替加权平均更新时,还可以消除 JPDA 所产生的航迹聚合趋势.

在更新目标状态时,找出关联概率最大的一个点迹,认为该点迹与该航迹配对,并把这一航迹与点迹去掉,重复此过程直到作出所有关联决策为止.没有关联上点迹的可靠航迹不做更新,进行一次预测外推,其航迹得分减 1.

### 3.2 暂时航迹的数据关联

从点迹列表中删除与可靠航迹关联上的点迹,剩余的点迹与暂时航迹进行关联.若剩余点迹数和暂时航迹数都不为 0,暂时航迹的关联波门采用斜距波门,计算航迹与点迹的距离,采用全局最近邻关联方法.关联上点迹的暂时航迹用该点迹进行更新,且航迹得分增加 1 分.关联不上点迹的暂时航迹进行一次外推,且其航迹得分减去 1 分.

### 3.3 自由点航迹的数据关联

从点迹列表中删除与可靠航迹和暂时航迹关联上的点迹,若剩余点迹数目不为 0,则这些点迹与自由点航迹进行关联,自由点航迹的关联波门可根据一定的先验信息,譬如目标的速度等,采用球波门,用全局最近邻方法对多个点迹和自由点航迹进行关联.对关联上点迹的自由点航迹进行更新,并对其航迹得分增加 1

分.没有关联上点迹的自由点航迹退化为终止航迹.

和自由点航迹关联完后如还剩有点迹,则这些点迹作为新目标建立自由点航迹.

#### 4 仿真结果

以某实际战术弹道导弹防御组网雷达系统为仿真背景,该组网雷达包含 3 个雷达分站.以导弹攻击点为坐标原点 $[0,0,0]$ ,建立东北天直角坐标系.根据实际的雷达布站位置可得,雷达分站 1 的坐标为 $[10089\text{m},0,0]$ ,雷达分站 2 的坐标为 $[11770\text{m},-9277\text{m},260\text{m}]$ ,雷达分站 3 的坐标为 $[8407\text{m},3711\text{m},0\text{m}]$ .计算一条抛物线弹道,在 80km 高度处关机,关机点速度为  $2\text{km/s}$ ,与地面的倾角为  $38.9^\circ$ ,弹道落点为坐标原点,弹道在  $xoy$  平面上的投影与  $x$  轴的正半轴重合.弹道轨迹与雷达布站如图 1 所示.

假设弹头上携带自卫式多假目标干扰机.为了验证本文的算法效果,假设干扰机不仅能产生比真目标距离靠后的假目标,也能产生比真目标距离靠前的假目标.干扰机在真目标前后各产生 3 个距离上均匀分布的假目标,其间距为 1500m.3 部雷达同步照射,采样间隔为 1s.为简单起见,仿真中不妨假设欺骗干扰信号强度大致与真目标回波信号强度一致.3 部雷达的量测标准差相同,雷达距离量测标准差为 3.75m,角度量测标准差为 1mrad.

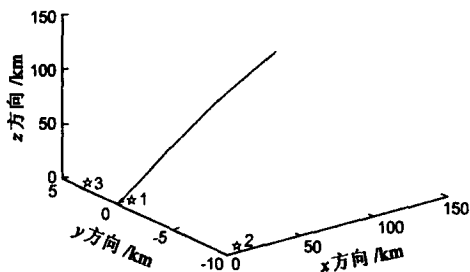


图 1 弹道轨迹与雷达布站

图 2 给出了单次仿真中,两部雷达(分站 1、2)组网时的关联量测对之间的距离与同源检验门限之间的关系.可见,对于真目标量测对,其距离几乎一直小于自

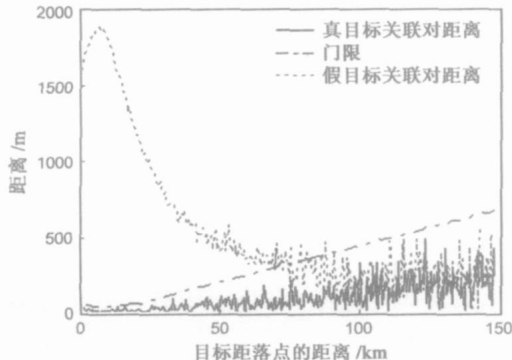


图 2 关联量测对之间的距离与自适应检验门限

适应门限,而对假目标量测对(仿真中取转发延迟距离最近的那对),其距离会随着目标临近雷达而逐渐变大,超过自适应门限.

图 3 给出了同源量测融合后的量测个数, Monte Carlo 实验次数为 500 次.分别给出了雷达分站 1、2 组网,1、3 组网,以及三部雷达组网的结果.可以看出,量测个数随目标的临近而逐渐减少,三部雷达组网比两部雷达组网能更快的剔除假目标.三部雷达组网,大约到 65km 后,只剩下一个量测,也就是真目标的量测.由于量测误差的存在,导致在某些采样时刻,最近邻关联、同源检验后,真目标发生漏检,该概率为 0.13%,或者真目标发生错检,该概率为 0.05%.

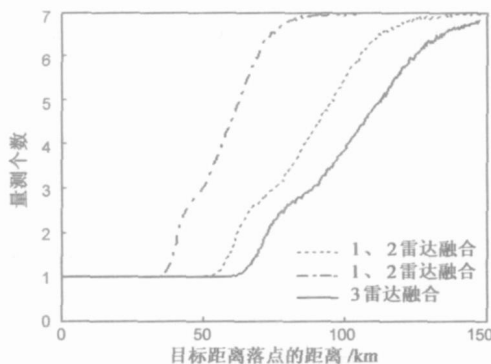


图 3 同源量测融合后的量测个数

图 4 描绘了单次仿真三部雷达组网时多目标跟踪的滤波航迹.可以看出,跟踪初始有 7 条航迹,包括真目标和 6 个假目标;随着目标的临近,假目标的航迹逐渐被终止,通常是距真目标越远,被终止的越早.本次仿真中目标距雷达约 65km 时,只剩下一条航迹,即真目标的航迹.

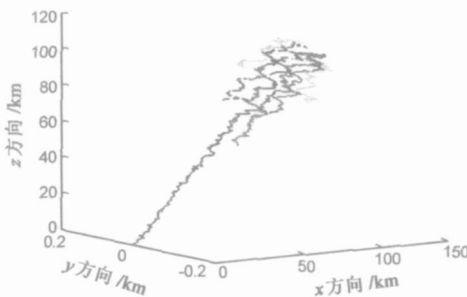


图 4 多条滤波航迹

#### 5 结论

本文的仿真情形以自卫式距离多假目标干扰为例,对于随队掩护式距离多假目标欺骗干扰,本文的算法同样有效且性能更好.同源量测融合后假目标被剔除的概率,和组网雷达的个数、各个雷达的布站位置、目标相对于组网雷达的位置、雷达探测精度以及假目标延迟(或超前)的距离有关.由于篇幅所限,没有列举

所有的仿真情形. 给定仿真参数, 用 Monte Carlo 法可以求出各个假目标序列被组网雷达拒绝的概率, 可以用来指导设计多假目标欺骗干扰或组网雷达对多假目标欺骗的抗干扰.

在距离多假目标欺骗干扰条件下, 经过同源量测融合和多目标跟踪处理, 组网雷达可以有效剔除假目标, 并更精确的跟踪真目标. 该方法简单易行且有效, 对工程实践具有较高的适用价值. 同时, 该方法也可以推广应用于无干扰条件下组网雷达的多目标跟踪.

#### 参考文献:

- [1] 史岩译. 新兴导弹国家对抗 NMD 系统手段概述[J]. 863 先进防御技术通讯(A 类), 2001, (7): 27 - 46.
- [2] 舍曼. 弗兰克尔. 用有源假目标挫败战区导弹防御雷达(连载一)[J]. 863 先进防御技术通讯(A 类), 1997, (11): 25 - 35.
- [3] 舍曼. 弗兰克尔. 用有源假目标挫败战区导弹防御雷达(连载二)[J]. 863 先进防御技术通讯(A 类), 1997, (12): 30 - 39.
- [4] D Curtis Schleher. Electronic Warfare in the Information Age [M]. Boston, MA: Artech House, 2000. 284 - 320.
- [5] 何友, 王国宏, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 78 - 104.
- [6] S Deb, et al. A generalized S-D assignment algorithm for multi-sensor multitarget state estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(2): 523 - 537.
- [7] T Kirubarajan, Y Bar-Shalom, et al. IMM-PDAF for radar management and tracking benchmark with ECM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115 - 1132.
- [8] Y Bar-Shalom, X R Li, Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques[M]. Storrs, CT: YBS, 1995. 444 - 445.
- [9] Qiang Gan, Chris J Harris. Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1): 273 - 280.
- [10] Fitzgerald R J. Development of practical PDA logic for multi-target tracking by microprocessor [A]. Proceedings of the American Controls Conference[C]. Seattle, WA: IEEE, 1986. 889 - 898.

#### 作者简介:



赵艳丽 女, 1977 年 11 月出生于河南新野, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生. 研究方向: 雷达数据处理, 多目标跟踪, 导弹攻防对抗, 雷达电子战建模与仿真.  
E-mail: nudtzy1@tom.com



王雪松 男, 1972 年 10 月出生于内蒙古包头市, 现为国防科技大学教授, 中国电子学会高级会员, “三遥”分会委员. 主要从事雷达极化信息处理、信号处理与目标检测及识别、弹道导弹攻防对抗电子战等领域的研究. 合作出版专著 2 部, 在国际、国内期刊及学术会议上发表论文 70 余篇, 其中 30 多篇进入 SCI 和 EI 等国际著名检索.