

引用格式:王道重,唐金国,肖玉杰,等.基于三维比例导引的舰空导弹协同杀伤区研究[J].电光与控制,2019,26(6):1-5. WANG D Z, TANG J G, XIAO Y J, et al. Collaborative killing zone of ship-to-air missile based on 3D proportional guidance[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):1-5.

基于三维比例导引的舰空导弹协同杀伤区研究

王道重^{1,3}, 唐金国¹, 肖玉杰², 陈方超³

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100161;
3. 中国人民解放军91206部队, 山东 青岛 266108)

摘要:介绍了舰空导弹杀伤区的基本概念,杀伤区可分为垂直杀伤区和水平杀伤区。由导弹速度可在垂直平面和水平平面进行矢量分解,引出三维比例导引弹道的方法,并利用此方法进行了单舰和双舰协同制导两种情况下弹目遭遇过程的仿真验证。仿真结果表明,协同制导可大大提高舰空导弹的低空杀伤远界,有效提高舰空导弹的作战效能。

关键词:比例导引; 杀伤区; 舰空导弹; 协同制导; 舰艇编队

中图分类号: TJ761.1⁺³ **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.001

Collaborative Killing Zone of Ship-to-Air Missile Based on 3D Proportional Guidance

WANG Dao-zhong^{1,3}, TANG Jin-guo¹, XIAO Yu-jie², CHEN Fang-chao³

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China;
3. No. 91206 Unit of PLA, Qingdao 266108, China)

Abstract: The basic concept of killing zone is presented, which can be divided into the vertical killing zone and the horizontal one. Considering that the missile speed vector can be decomposed into the vertical plane and the horizontal plane, the three-dimensional method of proportional guidance trajectory is introduced, which is then used to simulate the process of missile/target encountering under the guidance of single warship and dual-warship cooperation. The simulation results show that collaborative guidance can greatly improve the far edge of the killing zone of the ship-to-air missile at low altitude, and effectively improve the operational efficiency of the missile.

Key words: proportional guidance; killing zone; ship-to-air missile; collaborative guidance; warship formation

0 引言

面临敌方采用低空、超低空隐蔽突防、超视距空袭等战术时,传统的水面舰艇单舰自卫防空显得有些不足。水面舰艇编队协同作战时,舰空导弹的制导任务由两个及两个以上的作战平台协同完成,舰空导弹的作战范围不再受发射平台的探测制导距离限制,提高了舰空导弹杀伤区。文献[1-2]对协同制导下舰空导弹的杀伤区低界进行了简单计算,通过二维模型,得出了协同制导在一定程度上增加了可拦截目标的纵深和航路捷径的结论;文献[3]给出了网络化反导条

件下舰空导弹杀伤区远界的建立方法和解算流程,但没有仿真实例;文献[4]研究了舰艇编队协同防空的耦合杀伤区问题,并根据耦合杀伤区纵深提出了编队队形的建议。舰空导弹杀伤区是衡量其作战能力的重要指标,是水面舰艇协同制导防空作战的关键问题。鉴于此,本文基于三维比例导引弹道的方法,对舰艇编队协同制导防空作战的杀伤区进行了更深入的研究。

1 杀伤区概述

通过对一般杀伤区概念^[5-8]的拓展,舰空导弹的杀伤区是指制导站周围的某一空域,在该空域内,舰空导弹杀伤目标的概率不低于某一给定值,也就是说杀伤区内各点的杀伤概率可能是不相等的,但无论哪一个点的概率都不低于给定值^[9]。影响舰空导弹单发杀伤概率的因素有很多,包括导弹自身性能指标、目标技术性

收稿日期:2018-07-16

修回日期:2018-07-28

基金项目:国家自然科学基金(51605487)

作者简介:王道重(1988—),男,辽宁昌图人,硕士,讲师,研究方向为军事装备学。

能以及目标类型等,本文主要研究舰空导弹在协同情况下对同一目标的杀伤区大小问题,不涉及杀伤概率。

1.1 典型杀伤区外形

令舰空导弹武器系统的发射装置(或制导站)为坐标原点 O ,目标以 OY 轴的反方向来袭,建立三维直角坐标系 $OXYZ$,如图1所示。

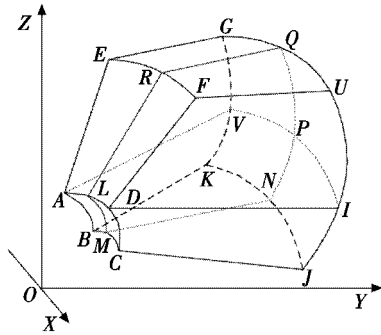


图1 典型杀伤区外形

Fig. 1 Typical shape of killing zone

图1中: OXY 平面表示水平面,且 OY 轴垂直于 OX 轴, OX 轴用来描述来袭目标的航路捷径; OZ 轴垂直于平面 OXY , OZ 轴表示高度。在三维坐标系 $OXYZ$ 中建立舰空导弹迎击来袭目标的杀伤区基本外形: $ABCD$ 表示杀伤区低近界面,是以 O 点为球心的球面的一部分; $ADFE$ 表示杀伤区高近界面,是一个扇形; $EFUG$ 表示杀伤区高界面,是一个扇形; $GVIK$ 表示杀伤区原界面,一般是一个曲面; $BCJK$ 表示杀伤区低界面,是一个扇形; $ABKGE$ 和 $CDFUJ$ 分别表示杀伤区的左、右两个侧近界面。

通常情况下,杀伤区的形状是左右对称的,为了更加直观地表示,杀伤区可分为垂直杀伤区(垂直剖面)和水平杀伤区(水平剖面)。

1.2 垂直杀伤区

用垂直于航路捷径轴的平面切割杀伤区得到的剖面称为垂直杀伤区^[8],如图2所示。

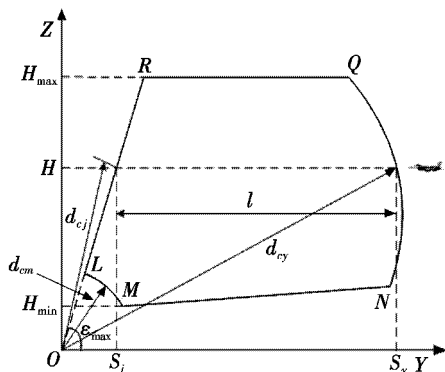


图2 垂直杀伤区

Fig. 2 The vertical killing zone

图2中:曲线 LM 表示杀伤区低近界,是以 O 点为

圆心的一段圆弧; LR 表示杀伤区高近界; RQ 表示杀伤区高界; QN 表示杀伤区远界; MN 表示杀伤区低界; H 表示来袭目标的飞行高度; H_{\min} 表示杀伤区的最小高度; H_{\max} 表示杀伤区的最大高度; d_{cj} 表示在高度 H 时的杀伤区远界斜距; d_{cj} 表示在高度 H 时的杀伤区近界斜距; d_{cm} 表示杀伤区最小近界斜距; ϵ_{\max} 表示杀伤区的最大高低角; $l = |S_y - S_j|$ 表示航路捷径为0、高度为 H 时的杀伤区纵深。

1.3 水平杀伤区

用给定高度的水平面切割杀伤区得到的截面称为水平杀伤区^[8],如图3所示。

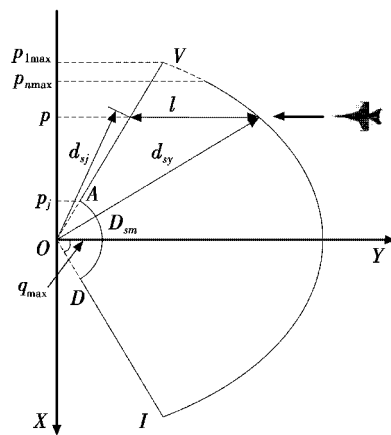


图3 水平杀伤区

Fig. 3 The horizontal killing zone

图3中:曲线 AD 表示杀伤区近界,是以 O 点为圆心的一段圆弧; VA 和 DI 表示杀伤区的侧近界,是两段斜线,其延长线经过 O 点,且与 OX 轴的夹角相等; VI 表示杀伤区远界,是以 O 点为圆心的一段圆弧; p 表示来袭目标的航路捷径; $p_{1\max}$ 表示保证1发导弹在杀伤区内遭遇的最大航路捷径; $p_{n\max}$ 表示保证 n 发导弹在杀伤区内遭遇的最大航路捷径; OD_{sm} 表示在高度为 H 时杀伤区近界的水平距离; q_{\max} 表示杀伤区的最大航路角; l 表示航路捷径为 p 、高度为 H 时的水平杀伤区纵深。

2 三维比例导引弹道模型

既然杀伤区可用垂直杀伤区和水平杀伤区表示,那么将舰空导弹和目标在垂直、水平平面中的分运动合成,便可得到三维拦截过程。比例导引法要求导弹在飞向目标过程中,其速度矢量偏转角速率与目标视线(即导弹与目标的连线)偏转角速率成正比^[9]。

2.1 速度矢量分解

在三维坐标系 $OXYZ$ 中,舰空导弹武器系统的发射装置(或制导站)为坐标原点 O ,假设舰空导弹以 v_1 的速度做匀速运动, \vec{OW} 表示其运动方向, W 点在水平面

OXY 的投影为 W_1 , OW 与水平面 OXY 的夹角 θ_1 称为弹道倾角, OW_1 与 OY 轴的夹角 φ_1 称为弹道偏角, 如图 4 所示。

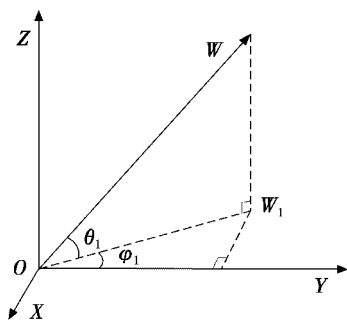


图4 舰空导弹速度矢量分解

Fig. 4 Velocity vector decomposition of ship-to-air missile

若以 v_{1x} , v_{1y} 和 v_{1z} 分别表示 OW 在 X, Y, Z 轴的分量, 则有速度矢量分解为

$$\begin{cases} v_{1y} = v_1 \cos \theta_1 \cos \varphi_1 \\ v_{1z} = v_1 \sin \theta_1 \\ v_{1x} = -v_1 \cos \theta_1 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (1)$$

若以 v_2 表示来袭目标的速度, 同理可以获得目标的速度矢量分解为

$$\begin{cases} v_{2y} = -v_2 \cos \theta_2 \cos \varphi_2 \\ v_{2z} = -v_2 \sin \theta_2 \\ v_{2x} = v_2 \cos \theta_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 弹目相对运动方程

将舰空导弹和来袭目标投影在垂直平面 OYZ 上, 如图 5 所示, 舰空导弹在垂直平面 OYZ 上的投影为 W_2 , 来袭目标在垂直平面 OYZ 上的投影为 T_2 , W_2 与 T_2 之间的距离为 l_{yz} , v_{1yz} 和 v_{2yz} 分别表示舰空导弹和来袭目标速度在垂直平面 OYZ 上的分量, W_2 和 T_2 的相对视线与 OY 轴的夹角为 ε_{yz} , θ_{1yz} 和 θ_{2yz} 分别表示 v_{1yz} 和 v_{2yz} 与 OY 轴的夹角。

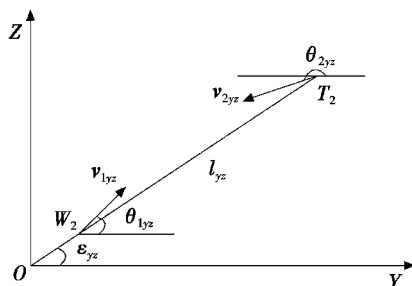


图5 弹目垂直平面相对运动模型

Fig. 5 The relative motion model of the vertical plane of the missile and target

根据比例导引法可获得舰空导弹与目标在垂直平

面内的相对运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dl_{yz}}{dt} = -v_{1yz} \cos(\varepsilon_{yz} - \theta_{1yz}) + v_{2yz} \cos(\varepsilon_{yz} - \theta_{2yz}) \\ l_{yz} \frac{d\varepsilon_{yz}}{dt} = v_{1yz} \sin(\varepsilon_{yz} - \theta_{1yz}) - v_{2yz} \sin(\varepsilon_{yz} - \theta_{2yz}) \\ \frac{d\theta_{1yz}}{dt} = k \frac{d\varepsilon_{yz}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} l_{yz} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ v_{1yz} = \sqrt{v_{1y}^2 + v_{1z}^2} \\ v_{2yz} = \sqrt{v_{2y}^2 + v_{2z}^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{yz} = \arctan \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} \\ \theta_{1yz} = \arctan \frac{v_{1z}}{v_{1y}} \\ \theta_{2yz} = \begin{cases} \arctan(v_{2z}/v_{2y}) & v_{2y} > 0 \\ \arctan(v_{2z}/v_{2y}) + \pi & v_{2y} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

若 $v_{2y} = 0$, 则目标在 OY 轴的速度矢量分解为 0, 即目标平行于 OX 轴运动, 永远无法攻击到 O 点, 此种情况不做考虑, 所以 $v_{2y} \neq 0$ 。

同理可得弹目水平面相对运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dl_{xy}}{dt} = -v_{1xy} \cos(\varepsilon_{xy} - \theta_{1xy}) + v_{2xy} \cos(\varepsilon_{xy} - \theta_{2xy}) \\ l_{xy} \frac{d\varepsilon_{xy}}{dt} = v_{1xy} \sin(\varepsilon_{xy} - \theta_{1xy}) - v_{2xy} \sin(\varepsilon_{xy} - \theta_{2xy}) \\ \frac{d\theta_{1xy}}{dt} = k \frac{d\varepsilon_{xy}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

与垂直平面相对运动方程不同的是, 由于图 4 中舰空导弹与目标在 OXY 上的投影的坐标象限在 X 轴的负方向, Y 轴的正方向, 所以

$$\begin{cases} \theta_{1xy} = -\arctan(v_{1x}/v_{1y}) \\ \varepsilon_{xy} = -\arctan \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 目标初始位置的确认

要利用三维比例导引法仿真舰空导弹与来袭目标的遭遇过程, 首先要确定来袭目标初始位置的范围。如图 6 所示, 设 O 舰和 O_1 舰的雷达制导跟踪距离分别为 R_1 和 R_2 , 以 O 舰为坐标原点, 两舰的距离为 L ($L \leq R_1$), OY 轴与 OO_1 的夹角为 β , β 在 OX 轴的正半轴为正, 在 OX 轴的负半轴为负。设在协同作战情况下, 两舰从发现跟踪来袭目标到发射舰空导弹的反应时间为 t_f , 舰空导弹的初制导时间为 t_c , 进入中制导的初始位置为 (x_1, y_1, z_1) , 来袭目标的初始位置为 $T(x_2, y_2, z_2)$ 。

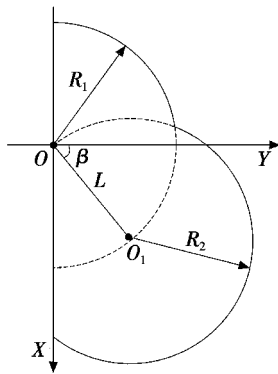


图6 双舰协同制导下雷达跟踪范围

Fig. 6 Radar tracking range under dual-warship cooperative guidance

如图7所示,对于O舰,目标的初始位置为T,当经过时间 t_f+t_c 后,目标的位置为T',T与T'的距离为 $s=v_2(t_f+t_c)$,两点在平面OXY的投影分别为 T_{xy} 和 T'_{xy} ,则有

$$\begin{aligned} [y_2 + v_{2y}(t_f+t_c)]^2 + [x_2 + v_{2x}(t_f+t_c)]^2 = \\ (R_1 - s)^2 - [z_2 + v_{2z}(t_f+t_c)]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

可以得出 $y_2 = y'$ 。

同理,对于 O_1 舰有

$$\begin{aligned} [y_2 + v_{2y}(t_f+t_c) - L\cos\beta]^2 + [x_2 + v_{2x}(t_f+t_c) - L\sin\beta]^2 = \\ (R_2 - s)^2 - [z_2 + v_{2z}(t_f+t_c)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

可以得出 $y_2 = y''$ 。在协同制导情况下, y_2 应取最大值,即 $y_2 = \max(y', y'')$ 。

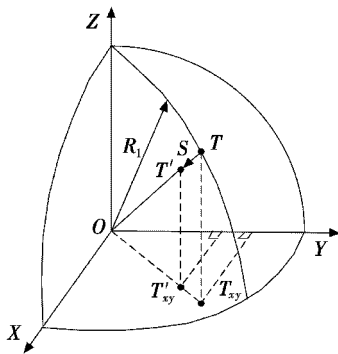


图7 单舰制导下雷达跟踪范围

Fig. 7 Radar tracking range under the guidance of a single warship

3 仿真实例

假设来袭目标在巡航阶段的飞行高度一定(目标的纵坐标 z_2 一定),再给定一个 x_2 (目标攻击的航路捷径),就可以利用三维比例导引法确定第一个弹目遭遇点。令弹道偏角 $\varphi_1 = (\varphi_1, \varphi_1 + \Delta\varphi, \varphi_1 + 2\Delta\varphi, \dots, \varphi_1 + n\Delta\varphi)$,可以求出 n 个弹目遭遇点,将这些遭遇点拟合便可确定协同制导情况下的杀伤区远界。为了便于研究,本仿真将不考虑干扰、误差和交接成功概率等因素。

设定参数为:两舰的雷达天线高度为25 m,两舰

距离 $L = R_1 = R_2, \beta = -60^\circ$,舰空导弹进入中制导阶段的初始坐标 (x_1, y_1, z_1) 为 $(0, 0, 0.025)$ (单位km),舰空导弹速度 v_1 为800 m/s, $t_f = 12$ s, $t_c = 6$ s, $k = 4$ 。目标的速度 v_2 为300 m/s,飞行高度为25 m,方向为OY轴的负方向且平行于平面OXY, $\Delta\varphi = 10^\circ$ 。根据文献[10],在理想情况下,雷达对目标的探测距离 $\rho_{gz} = \min[0.7 * 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), r^* \sqrt{\sigma} / \sqrt{\sigma^*}]$,设 $r^* = 35$ km, $\sigma = \sigma^* = 0.2$ m²,则可计算出舰载雷达探测距离。

当只有O舰进行制导时,弹目遭遇过程如图8所示,图9描述的是弹目遭遇过程在水平面的投影。

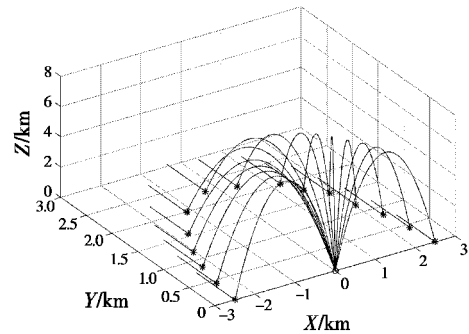


图8 单舰制导弹目遭遇过程

Fig. 8 The process of missile/target encountering when guided by single warship

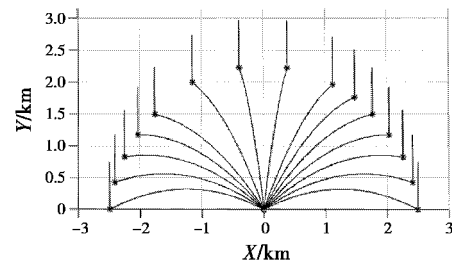


图9 单舰制导下舰空导弹杀伤区

Fig. 9 Killing zone of ship-to-air missile guided by single warship

可见舰空导弹进入中制导阶段后,要不断地进行指令修正才能与目标相遇。当 O_1 舰与O舰协同制导时,弹目遭遇过程如图10所示,图11描述的是协同制导情况下弹目遭遇过程在水平面的投影。

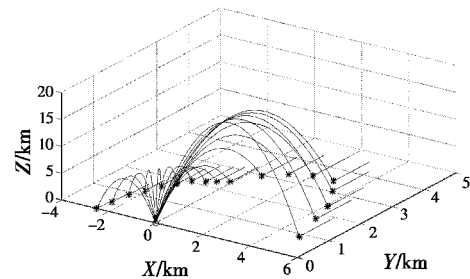


图10 协同制导下弹目遭遇过程

Fig. 10 The process of missile/target encountering under collaborative guidance

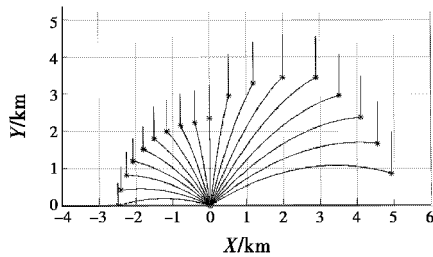


图 11 协同制导下杀伤区

Fig. 11 The killing zone under collaborative guidance

通过对比图 9 和图 11 的弹目遭遇点可以看出,协同制导情况下, O 舰在 25 m 低空杀伤远界的扩大范围相当可观,即协同制导大大提高了导弹的低空杀伤远界。此外,还可以调整两舰的相对位置(β 以及 L),从而达到杀伤远界最大化的目的。

4 结束语

本文从杀伤区可分为垂直杀伤区和水平杀伤区的基本概念出发,利用三维比例导引弹道的方法,对单舰和双舰协同制导两种情况下的弹目遭遇过程进行仿真,通过对比两种情况的遭遇点可以看出,相比于单舰制导,双舰协同制导情况下,舰空导弹的低空杀伤远界得到了很大程度的提高。此外,影响舰空导弹杀伤区的因素有很多,如干扰、时空一致性和误差等,本文在不考虑其他不利因素、目标特性一定的理想情况下对弹目遭遇过程进行仿真,今后对舰空导弹的杀伤区还需要开展更加综合、全面的研究。

参考文献

- [1] 聂心东,姜文志,刘涛. 驱护舰编队舰空导弹低空反导杀伤区研究[J]. 电光与控制,2009, 16(9):20-23.
- [2] 姜文志,李居伟,柳玉. 舰空导弹杀伤区低界研究[J]. 弹舰与制导学报,2008, 28(2):45-46.
- [3] 代进进,李相民,黎子芬,等. 网络化反导条件下舰空导弹杀伤区远界建立方法[J]. 火力与指挥控制,2012, 37(10):46-49.
- [4] 姚跃亭,赵建军,杨利斌,等. 耦合杀伤区射击次数与舰艇间距分析[J]. 火力与指挥控制,2012, 37(6):119-112.
- [5] CHENG S W. Very long range anti-air missile systems design[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2003. doi:10.1109/AERO.2003.1235208.
- [6] 董银文,石章松,李云. 舰空导弹协同制导杀伤区建立研究[J]. 指挥控制与仿真,2010, 32(6):16-19.
- [7] 徐品高. 防空导弹体系总体设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2009.
- [8] 娄寿春. 地空导弹射击指挥控制模型[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [9] 韩晓明,李彦彬,徐超. 防空导弹总体设计原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2016.
- [10] 姜鲁东,余家祥,斗计华. 舰空导弹武器系统战斗损伤评估[J]. 四川兵工学报,2011, 32(5):131-133, 145.

下 期 要 目

压缩感知成像雷达研究进展

拼接光窗对机载光学成像系统的影响

时空可控点聚焦 FDA 的动目标跟踪研究

基于到达时间和多普勒频率的海战场无源跟踪模型

转速饱和的四旋翼飞行器偏航姿态自抗扰控制

线性的增量式三维稀疏重建系统设计

CMOS 和 EMCCD 在全局快门模式下的信噪比探讨

隐蔽故障计算模型审定要求分析

干扰下岸舰通信畅通区可视化仿真研究

适用于有向图网络的多无人机目标跟踪一致性算法

一种稳健的盲波束形成方法

高精度大气折射率插值方法研究

激光引偏干扰效果评估仿真试验系统设计

惯性和电磁综合瞄准线测量方法

预警机引导单机多目标攻击方案决策研究

高精度捷联惯导姿态算法的性能分析