

基于数据链的预警机协同作战下的 发现目标能力的效能评估

杨 牧, 陈长兴, 王晓东, 林 兴, 文志军

(空军工程大学基础部, 西安, 710051)

摘要 为研究加装数据链后,预警机协同作战情况下的敌我双方实力对比和战斗进程,在对数法的基础上,给出了预警机协同情况下的作战效能评估方法。通过计算有无预警机协同情况下的雷达探测范围,给出了发现目标能力参数变化量的具体表达式。基于 Lanchester 方程,建立了预警机协同情况下的空战模型,并在 5 种给定的实力对比条件下,对空战进程进行了仿真,给出了仿真数据及耗损图。结果表明:加装数据链后预警机协同作战的情况下,红方实力只需要大于蓝方实力的 77.3% 即可获得胜利。

关键词 预警机协同;数据链;效能评估;lanchester 方程;雷达探测

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.008

中图分类号 V271;TN919 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0043-05

An Effectiveness Evaluation of Target Capability in the Air Combat in Cooperation with Early-Warning Aircraft Based on Data Link

YANG Mu, CHEN Changxing, WANG Xiaodong, LIN Xing, WEN Zhijun

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: On the basis of the logarithm method, an operational effectiveness evaluation method is put forward. Through calculating the radar detection range to know whether there is an early-warning aircraft in cooperation with or not, a specific expression of the change of the target ability parameters is given. Based on the Lanchester equation, an air combat model is established under the condition of the cooperation of the early-warning aircraft. And the air combat process is simulated under five given conditions, the air combat process is simulated, and the simulation data and loss charts are given. The results show that after the installation of the data chain under condition of the early-warning aircraft cooperative combat, so long as the military strength of our side exceeds a foe by 77.3%, our side will surely win victory.

Key words: early-warning aircraft cooperation; data link; performance evaluation; Lanchester equation; radar detection

由于数据链的信息共享效能,使得战场信息在 不同机型和地面指挥系统之间实现实时、高效、安全

收稿日期: 2017-05-22

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM8344)

作者简介: 杨 牧(1994—),男,江苏宿迁人,硕士生,主要从事数据链系统效能评估及影响分析研究。E-mail:349037064@qq.com

引用格式: 杨牧, 陈长兴, 王晓东, 等. 基于数据链的预警机协同作战下的发现目标能力的效能评估 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1): 43-47. YANG Mu, CHEN Changxing, WANG Xiaodong, et al. An Effectiveness Evaluation of Target Capability in the Air Combat in Cooperation with Early-Warning Aircraft Based on Data Link [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 43-47.

的传输,有效地提高了战斗力。如图1所示,加装数据链后,预警机,歼击机,情报组网中心和地面指挥系统实现了信息共享。

文献[1]分析了加装数据链后,在同一机型组成的双机编队内部实现的信息共享。文献[3]将其扩展为同一机型情况下多个飞机之间的信息共享。文献[4]研究了加装数据链的情况下,协同部署距离对作战效能的影响。然而现代空战在加装数据链的情况下,已不在局限于一种机型间的信息共享,通过数据链而实现的预警机协同作战将在更大程度上提高我发现敌方的能力。

本文以数据链实现的信息共享为出发点,探究预警机协同作战的情况下,空中作战效能的提高。

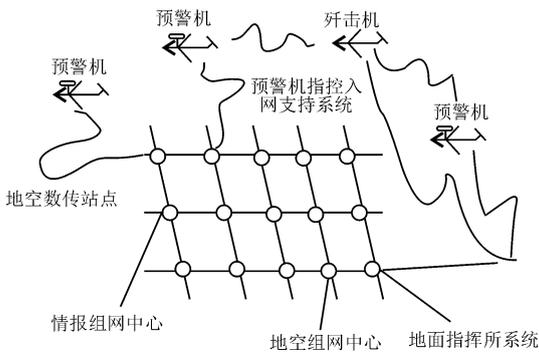


图1 基于数据链的战场信息共享示意图

Fig.1 Sketch map of battlefield information sharing based on data link

1 基于数据链的预警机协同作战

1.1 预警机协同方式

以空中防空作战为例,首先划设预警机巡逻空域,其基本要求是:有利于地空、空空通信;有利于地面防空兵等部队掩护预警机;在敌方火力范围之外。通常预警机按照双180°航线进行巡航,见图2。在敌情出现以前,我歼击机升空跟随预警机按指定空域进行巡逻待战,对我方保卫目标进行保卫。

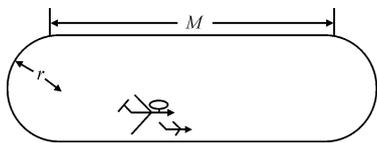


图2 预警巡逻空域

Fig.2 Warning patrol of airspace

1.2 雷达探测能力

由于数据链的加装实现了预警机和作战飞机之间的信息共享,所以预警机探测范围内的一切信息可以实时传输给作战飞机,这就相当于作战飞机共享了预警机的雷达探测范围。图3中,预警机的雷

达探测范围是一个半径为 r 的圆(简化情况下,未考虑干扰和雷达盲区),歼击机的雷达探测范围是一个半径为 d ,圆心角为 ϕ 的扇形。

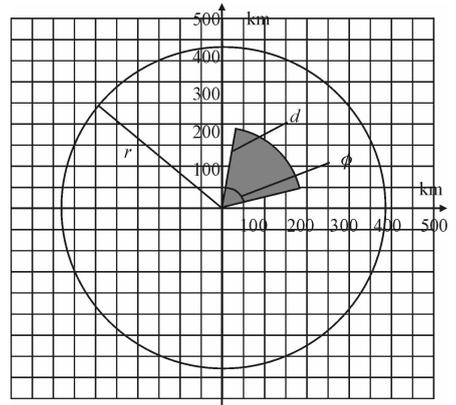


图3 雷达探测范围

Fig.3 Radar detection range

2 作战模型的建立

2.1 基于对数法模型的作战效能的评估

飞机空中作战效能评估的对数法表达式为:

$$I = [\ln E + \ln(\sum D + 1) + \ln C] \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \quad (1)$$

式中: I 为空战能力指数; E 为发现目标能力参数; D 为火力性能参数; C 为机动性能参数; ϵ_1 为生存能力系数; ϵ_2 为电子对抗能力系数; ϵ_3 为航程系数; ϵ_4 为飞行员操纵效能系数。

具体运用中,空战能力指数中电子对抗能力和发现目标能力参数值由于不同机型的协同和数据链的引入发生了改变,所以空战能力指数模型(基于数据链体制下)可以表示为:

$$I' = [\ln E' + \ln(\sum D + 1) + \ln C] \epsilon_1 \epsilon_2' \epsilon_3 \epsilon_4 \quad (2)$$

式中: E' 和 ϵ_2' 分别为装备数据链后预警机协同情况下的发现目标能力参数和电子对抗能力参数,现定义 λ_1 、 λ_2 分别为加装数据链后预警机协同作战的情况下这2项参数的提升率。即:

$$\begin{cases} E' = E(1 + \lambda_1) \\ \epsilon_2' = \epsilon_2(1 + \lambda_2) \end{cases} \quad (3)$$

根据图3可知,预警机的雷达探测范围简化后看成半径为 r 的圆,歼击机的雷达探测范围为半径为 d ,圆心角为 ϕ 的扇形,因为预警机的雷达探测范围相比歼击机大的多所以这里只考虑歼击机雷达探测范围被预警机雷达探测范围完全覆盖的情况。由此可以计算得:

$$\frac{E'}{E} = \frac{\pi r^2}{\pi d^2 (\phi/2\pi)} = 1 + \lambda \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{r^2 - d^2 (\phi/2\pi)}{d^2 (\phi/2\pi)} \quad (5)$$

$$\lambda = l^2 2\pi/\phi - 1 \quad (6)$$

式中: q 为 $\frac{r}{d}$ 即预警机探测距离和歼击机雷达探测距离之比, ϕ 为雷达搜索方位角,在 $\pi/2 \sim \pi/8$ 之间变化。图4为不同雷达搜索方位角 ϕ 对应下的 λ_1 随 r/d 变化的关系。

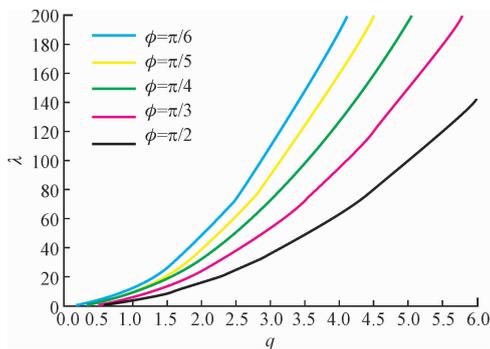


图4 不同 ϕ 对应下的 q 与 λ 的对应关系

Fig. 4 Correspondence between q and λ under ϕ

针对 λ_2 的取值,在借鉴文献[6]的基础上给出了其统一赋值的依据和处理办法。在数据链支持下,其抗干扰性也会得到提高。因此,为了突出数据链支持下的信息优势可以适当调整赋值差[6]。

为了使仿真的数据更加合理,对飞机空战效能指数 I 进行归一化映射,归一化后的单位化效能值 γ 将分布在区间 $(0,1)$ 上,式(7)为归一化公式:

$$\gamma = \sin\left(\frac{kI}{kI+1} \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

式中: k 为比例调节因子作用是避免归一化后 γ 在数值上过于集中,且 $k>0$ 。

2.2 空战过程建模

通过兰彻斯特方程来仿真敌我双方的空战进程。通过仿真分析,敌我双方兵力数量随空战进程的变化:

$$\begin{cases} \frac{dR}{dt} = -\alpha B \\ \frac{dB}{dt} = -\beta R \end{cases} \quad (8)$$

式中: R 为红方在时刻 t 的战斗单位数量; B 为蓝方在 t 时刻的战斗单位数量; α 为蓝方每个战斗单位的平均战斗力水平; β 为红方每个战斗单位平均战斗力水平[7]。

对上式变形后积分得:

$$\alpha(B_0^2 - B^2) = \beta(R_0^2 - R^2) \quad (9)$$

式中: R_0, B_0 分别为红蓝双方初始时刻兵力数量。令 $x=1-R/R_0$ 为红方兵力的耗损率, $y=B/B_0$ 为蓝方兵力的剩余率, $L=\beta R_0^2/(\alpha B_0^2)$ 为红蓝双方实力之比。当 $L<1$ 时,蓝方实力强于红方;当 $L>1$ 时,红方实力大于蓝方;当 $L=1$ 时,双方实力相等。

将 x, y 和 L 代入式(10)得:

$$y = [1-2Lx(1-x/2)]^{0.5} \quad (10)$$

若加装了数据链,考虑预警机协同对飞机作战效能的影响,红蓝双方平均战斗力水平提升率为:

$$\begin{cases} \eta_R = \frac{\gamma'_R - \gamma_R}{\gamma_R} \\ \eta_B = \frac{\gamma'_B - \gamma_B}{\gamma_B} \end{cases} \quad (11)$$

在空战过程中,要考虑加装数据链的一方的作战效能更强,为此计算数据链水平占优因子,将其定义为:

$$\eta = \eta_R - \eta_B \quad (12)$$

所以加装数据链后预警机协同作战情况下的模型为:

$$\begin{cases} dB/dt = -\beta'R = -\beta(1+\eta)R \\ dR/dt = -\alpha'B = -\alpha(1-\eta)B \end{cases} \quad (13)$$

则按照式(10)~(13)的分析可得,红方消耗率与蓝方剩余率的变化关系为:

$$y = [1-2((1+\eta)/(1-\eta))Lx(1-x/2)]^{0.5} \quad (14)$$

3 数值分析与仿真

3.1 参数的设定

假定红方所用机型为米格-29和预警机协同作战,蓝方为F-16C。红蓝双方在均不加装数据链无预警机协同作战的情况下,作战效能的各参数见表1[8]。米格-29中 $d=90$ km,雷达探测方位角 $\pi/3$,预警机中 $r=470$ km,则可求 $\lambda_1=162.62$ 。设定红、蓝方电子对抗能力为1.05和1.2,红方经数据链提升后变为1.5[6]。则红方加装数据链后在预警机协同下的作战效能参数和蓝方未加装数据链无预警机协同的作战效能参数见表2。

表1 均未加装数据链时红蓝双方效能评估

Tab. 1 The effectiveness evaluation of blue and red side without the addition of data link

机型	C	D	E	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	I
米格-29	27.13	2 493	668	0.95	1.05	1.01	0.85	15.094
F-16C	26.70	2 761	720	1.00	1.2	1.05	0.90	20.170

表2 红方加装数据链有预警机协同情况下的红蓝双方效能评估

Tab. 2 The effectiveness evaluation of the red with data link and blue sides without data link

双方	机型	DL	I	I'	γ	γ'	η
R	米格-29	1	15.094	27.791	0.810	0.915	0.128
B	F-16C	0	20.170	20.170	0.867	0.867	0.000

3.2 数值仿真

根据以上分析,双方均未加装数据链时无预警机协同的情况下,设红蓝双方实力比 $L=0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4$ 时,仿真蓝方剩余率和红方耗损率的变化曲线,见图5。从图中可知当 $L=1$ 时蓝方剩余率和红方耗损率变化关系一致,即同消同亡。

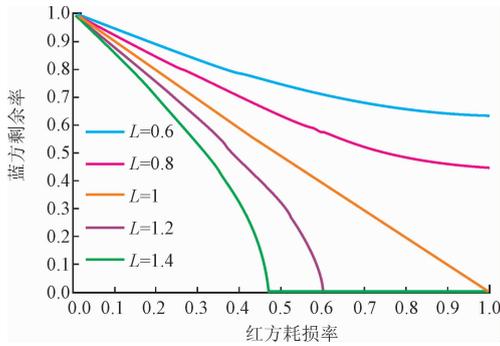


图5 均未加装数据链时蓝方剩余率与红方耗损率的变化关系

Fig. 5 Correspondence between residual ratio in B and exhaustive ratio in R without data link

红方加装数据链后有预警机协同的情况下,设红蓝双方实力比 $L=0.6, 0.7, 0.773, 1, 1.2$ 时,仿真蓝方剩余率和红方耗损率的变化曲线,见图6。

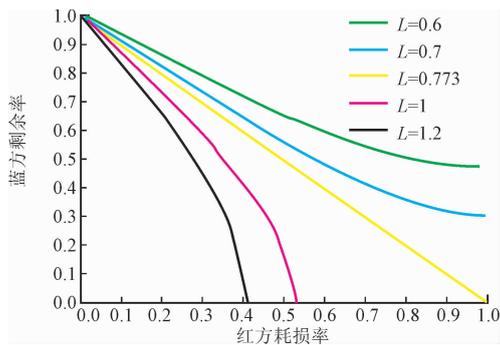


图6 红方加装数据链后蓝方剩余率与红方耗损率的变化关系

Fig. 6 Correspondence between residual ratio in B and exhaustive ratio in R with data link

从图中可知,当 L 的取值介于 0.7 和 1 之间时,双方达到平衡。已知 $\eta=0.128$, 令实力等效比 $((1+\eta)/(1-\eta))L=1$, 得 $L=0.773$, 这说明在红方加装数据链后,有预警机协同作战的情况下,红方实力只要高于蓝方实力的 77.3% 即可赢得胜利。当 $L=0.773$, 蓝方剩余率和红方耗损率的变化关系一

致,即同消同亡。

由仿真结果知,在双方均未加装数据链,无预警机协同的情况下红方只有当实力大于蓝方实力时才能获得胜利,红方加装数据链后,有预警机协同的情况下红方实力只要大于蓝方实力的 77.3% 即可获得胜利。

双方均未加装数据链无预警机协同情况下,设定红方投入兵力为 10 架米格-29,蓝方投入兵力为 10 架 F-16C,根据表(2)中数据得知,此时 $L=0.748$,蓝方实力强于红方实力,空战中双方兵力耗损情况见图7,红方兵力率先耗损完,可认为蓝方获得胜利。

红方加装数据链后,在获得预警机协同作战的情况下,设定红方的投入兵力为 6 架米格-29,蓝方投入兵力为 8 架 F-16C,根据表(2)中数据得知,此时, $L=0.775$ 。空战中双方的兵力耗损情况见图8,当蓝方的兵力率先耗损完,可以认为红方获得胜利。

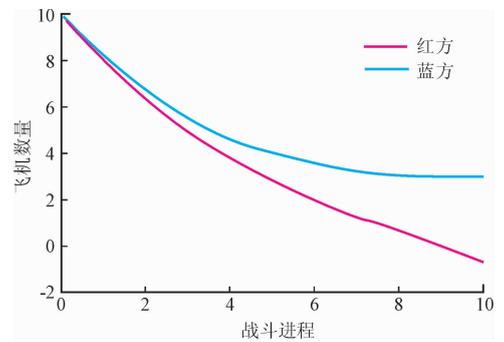


图7 均未加装数据链空战过程中双方兵力耗损图

Fig. 7 Dynamic exhaustion for both sides without data link

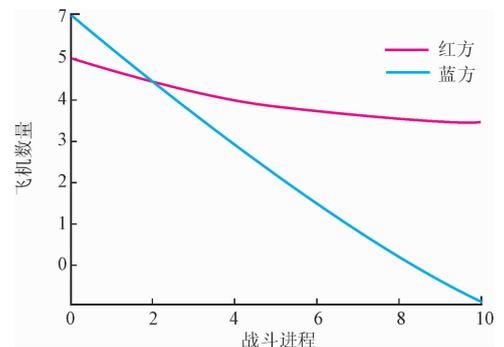


图8 红方加装数据链后空战过程中双方兵力耗损图

Fig. 8 Dynamic exhaustion for B and dynamic exhaustion for R with data link

由仿真结果可知,在双方均未加装数据链的情况下 $L=0.748$,蓝方胜利。在红方加装数据链,有预警机协同的情况下 $L=0.775$,红方胜利。仿真结果和研究结论相符。

可见,基于数据链的预警机协同作战能够提高单位平均战斗力水平,以较少的兵力获得战斗的胜利。

4 结语

本文基于加装数据链后预警机协同下的空中作战为背景,对空战中红蓝双方的效能进行了重新计算,对空战中发现目标能力做了定量的研究,通过 Lanchester 方程模型对双方空中进程进行了模拟。本文只是单纯以提高发现目标能力为出发点进行研究,下一步将针对该情况下其他效能参数的提高进行探究。

参考文献(References):

[1] 牛德智,陈长兴,斑斐,等. 基于效能评估的航空作战进程预测 [J]. 航空学报, 2014, 35(5): 1416-1423.
NIU D Z, CHEN C X, BAN F, et al. Prediction on Force in Air Combat Process Based on Data Link [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(5): 1416-1423. (in Chinese)

[2] 徐大勇,王裕. 美军数据链作战应用及其启示[J]. 指挥信息系统与技术, 2015, 6(6): 69-75.
XU D Y, WANG Y. Operational Application and Suggestions of US Army Data Links [J]. Command Information System and Technology, 2015, 6(6): 69-75. (in Chinese)

[3] 陈强,陈长兴,陈婷,等. 数据链对多机航空作战效能影响分析评估 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 3(16): 16-20.
CHEN Q, CHEN C X, CHEN T, et al. Effectiveness Analysis Evaluation on Force in Air Combat Process Based on Data Link [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 3(16): 16-20. (in Chinese)

[4] 牛德智,陈长兴,耿稻田,等. 基于数据链的飞机空中进攻作战协同距离部署 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(10): 2018-2023.
NIU D Z, CHEN C X, GENG D T, et al. Cooperative Distance Deployment of Aircraft in Combat Based on Data Link [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(10): 2018-2023. (in Chinese)

[5] 蔡理金,戴光华,许晓峰,等. 基于信息-决策影响因素的兰彻斯特作战模型 [J]. 指挥控制与仿真,

2016, 38(4): 18-21.

CAI L J, DAI G H, XU X F. Lanchester Operation Model Based on Information and Decision-Making Impact Factors [J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(4): 18-21. (in Chinese)

- [6] 朱宝鏊,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估 [M]. 2 版. 北京: 航空工业出版社, 2006: 63-64.
ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Aircraft Effectiveness Evaluation [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006: 63-64. (in Chinese)
- [7] 牛德智,陈长兴,徐浩翔,等. 基于数据链的飞机效能评估及作战运用 [J]. 电子技术应用, 2014, 40(7): 103-105.
NIU D Z, CHEN C X, XU H X, et al. Prediction on Force in Air Combat Process Based on Data Link [J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40(7): 103-105. (in Chinese)
- [8] 黄金才,张勇,杨磊,等. 战术数据链作战效能定量评估方法 [J]. 火力指挥与控制, 2010, 12, 35(12): 66-68.
HUANG J C, ZHANG Y, YANG L, et al. A Quantitative Evaluation Method for Operation Efficiency of Tactical Data Link [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 12, 35(12): 66-68. (in Chinese)
- [9] LEE J, KANG S H, ROSENBERGER J, et al. A Hybrid Approach of Goal Programming for Weapon Systems Selection [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(3): 521-527.
- [10] GRAY F B, LHOMMEDIEU W R. A Combat-Effectiveness Approach to Information Assurance [R]. AIAA 2010-1748.
- [11] ZHOU L, ZHANG H Y, WANG T, et al. Static check of WS-CDL documents [J]. IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, 2008(8): 142-147.
- [12] XU Y L, LI Q Z, XIE S F, et al. Study on Algorithm and Communication Protocol of Differential GPS Position Based on Pseudo Range [C]// Information Technology and Application. Chengdu: IEEE, 2009: 606-609.
- [13] 黄金才,张勇,杨磊,等. 战术数据链作战效能定量评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(12): 66-69.
HUANG J C, ZHANG Y, YANG L, et al. A Quantitative Evaluation Method for Operation Efficiency of Tactical Data Link [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(12): 66-69. (in Chinese)
- [14] 赵伟,伞冶. 基于 q -高斯的模糊神经网络在飞机作战效能评估中的应用 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 674-678.

- Application of Array Signal Processing [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [12] CHANG L, YE H C C. Effect of Pointing Error on the Performance of the Projection Beamformer [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1993, 41(8): 1045-1056.
- [13] 罗云. 主瓣内外干扰同时抑制的分维测向算法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014
LUO Y. Dimension-Separated DOA Estimation Algorithm for Anti Mainlobe and Sidelobe Interference [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [14] COX H. Some Improvements to Dominant Mode Rejection Adaptive Beamforming [C]// Proceedings of the Adaptive Sensor Array Processing (ASSP) Workshop, Lexington, MA, 1998: 473-486.
- [15] 张明明. 相控阵雷达抗主瓣干扰方法及应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
ZHANG M M. Research on Mainlobe Interference Suppression Method and Application with Phased Array Radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [16] CARLSON B D. Covariance Matrix Estimation Errors and Diagonal Loading in Adaptive Arrays [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems, 1988, 24(4): 397-401.
- [17] 刘聪锋, 杨洁, 甘昶. 加载与约束结合的主瓣干扰抑制方向图保形 [J]. 电波科学学报, 2012(2): 138-143. (in Chinese)
LIU C F, YANG J, GAN C. Reshaping Pattern under Mainlobe Interference Suppression with Combining Diagonal Loading and Linear Constraints [J]. The Chinese Journal of Radio Science, 2012(2): 138-143.
- [18] 朱德智, 吕新正, 黄鹤. 零陷加深的自适应波束形成技术研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 365-369.
ZHU D Z, LV X Z, HUANG H. Research on Augment of Null Depth for Adaptive Beamformer [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(4): 365-369. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

(上接第 47 页)

- ZHAO W, SAN Y. Fuzzy Neural Network Based on q -Gaussian and Its Application in Operational Effectiveness Evaluation of Planes [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 674-678. (in Chinese)
- [15] ENEL L, GUILLEM F. Improvements in Navy Data Networks and Tactical Communication Systems [J]. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2006, 18: 97-101.
- [16] 杨磊. 战术数据链协同分层模型及效能评估方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
YANG L. Research on Tactical Data Link Interoperable Layered Model and Efficiency Evaluating Method [D]. Changshan: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [17] JEON S, YIM Z, SEO J S. Path Loss Model for Coupling Loop Interference with Multiple Reflections over Single Frequency Network [J]. IETE Technical Review, 2012, 29(6): 499-500.
- [18] KANG S, WANG H. Analysis of Microwave over-the-Horizon Propagation on the Sea [J]. Microwave Conference, 2009, 36(1): 1545-1548.
- [19] CHEN J, MU Y P, LI D F. Study on Effect Evaluation of Weapon Coordinated Use of Fleet [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2009, 23(3): 66-71.
- [20] ENEL L, GUILLEM F. Improvements in Navy Data Networks and Tactical Communication Systems [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2006, 18: 97-101.
- [21] KOKKONEN M, PIETILA S. Anew Bit Synchronization Method of a GPS Receiver [C]// Proc IEEE Positioning, Location, and Navigation Symposium (PLANS), Palm Springs, CA, USA; IEEE, 2002.
- [22] HASHIM S, BUKHARI R, SIRAJ S. PRACB: A Novel Channel Bonding Algorithm for Cognitive Radio Sensor Networks [J]. IEEE Access, 2016, 4(99): 6950-6963.

(编辑: 徐楠楠)