

# 机载预警雷达互扰分析

刘庆林, 夏海宝, 唐书娟, 龙文彪

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 预警机组成编队时不同平台上的预警雷达间可能会有干扰产生, 因此需要研究预警机编队雷达电磁兼容问题; 在分析预警机作战运用的基础上, 建立了预警雷达在复杂电磁环境下的互扰模型, 分别从干扰功率和探测距离两个方面对预警雷达相互干扰做了定量的分析, 给出了预警雷达干扰计算方程并进行仿真验证; 该模型能够在不需要设备进行试验的情况下对预警雷达之间以及同其他用频装备的干扰进行预测评估, 从而对预警机的运用和电磁频谱管理提供有力的保障, 保证预警雷达作战效力的发挥。

**关键词:** 机载预警雷达; 干扰功率; 探测距离; 互扰

## Analysis of Interference Between Airborne Early Warning Radars

Liu Qinglin, Xia Haibao, Tang Shujuan, Long Wenbiao

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** A imperative is to study the compatibility issues existing in airborne early warning radars as AWACS coming into formation, which is especially important when mutual interference is induced by the airborne early warning radars in different platforms. Based on the analysis of the applications of AWACS, the model on the operation of early warning radars under the conditions of complicated electromagnetic environment is established. Also, this model gives a quantitative analysis on the mutual interference of airborne early warning radars in terms of interference power and detection distance, which proposes calculation equations of airborne early warning radar. Based on that, simulation verification is conducted at the end. The study model established in this text can forecast and evaluate the mutual interference among airborne early warning radars and other device with frequency without site test. Furthermore, this study can provide efficient safeguard for the application of airborne early warning radars and management of electromagnetic Spectrum to assure the particular function of airborne early warning radars.

**Keywords:** airborne early warning radar; interference power; detection range; mutual interference

## 0 引言

当在一个相对有限的区域内大量使用雷达这种大功率电子设备时, 相互间会存在干扰, 轻则降低雷达系统的某些战术性能, 重则造成雷达系统的瘫痪, 因此需进行电磁干扰预测<sup>[1-2]</sup>。目前的研究重点主要在对敌方的电子干扰上, 预警雷达相互之间的干扰以及雷达同其他用频装备之间发生的电磁兼容问题容易受到忽略。

当前对雷达相互之间的互扰主要采用实际测试的方法, 但由于机载预警雷达作战场景复杂, 作战空域内电子用频设备多变, 往往不具备实地测量条件。本文结合预警机的作战使用, 对两架预警机之间存在的互扰进行了定量地分析, 研究了预警雷达互扰产生的原因, 并提出了解决的方法, 对于研究和解决预警雷达组网电磁兼容问题以及频谱管控具有重要意义。

## 1 预警机的作战使用

为加强了对作战空域持续、严密地监视探测, 需要多架预警机同时升空, 构筑严密的空中警戒网。预警机编队一般有两种基本的组合航线方式: 并立和串接。如图 1 (a) 和图 1 (b) 所示。

在执行预警保卫任务时, 串接组合被广泛运用, 如美军在海湾战争期间, 调用 4 架 E-3 预警机 (其中一架为预备机)

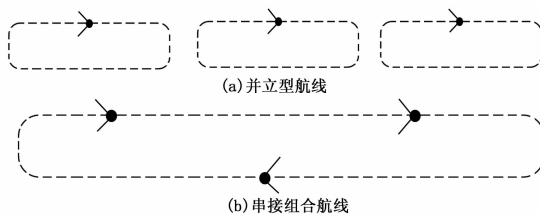


图 1

在沙特上空采用串接组合方式对科威特和伊拉克进行持续监视, 并取得了辉煌的效果。

为了减少预警雷达探测盲区、降低漏警概率、获得持续稳健的雷达探测区域, 一般要求雷达探测区域相互重叠, 从而得到增强探测区域。目前很多文献只考虑雷达探测威力, 忽略了预警雷达相互之间以及与预警雷达同地面雷达的干扰。通过文献 [3] 的研究表明, 预警雷达发射波束集中、功率大、覆盖范围广, 越来越多的实战表明, 在编队作战中必须考虑预警雷达相互之间的干扰以及其他用频装备对预警雷达的干扰。尤其是相同型号的预警雷达同时升空, 他们工作频率相同, 且电磁波只经过单程衰减, 出现主波束对准时会造成严重干扰, 甚至烧毁接收机前端。

## 2 预警雷达干扰分析

对于雷达间的相互干扰, 我们可以运用有源干扰的方法, 从干扰功率、探测距离两方面研究预警机相互之间干扰的影响。

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-05-16。

作者简介: 刘庆林(1989-), 男, 山东淄博人, 硕士, 主要从事雷达与信号处理方向的研究。

### 2.1 干扰功率计算

干扰功率的能够直观地表示预警雷达间相互影响。以 A 和 B 两架预警机为例, 假设雷达 A 为干扰雷达, B 为被干扰雷达, 则雷达 B 接收到的干扰信号功率为:

$$P_r = P_A + G_1(\theta) + G_2(\varphi) + 10\log\tau PRF - L - L_r - L_p \quad (1)$$

$P_r$  为雷达 B 接收到的干扰功率,  $P_A$  为雷达 A 的辐射功率,  $G_1(\theta)$ 、 $G_2(\varphi)$  分别为雷达 A、B 的天线增益, 随扫描角度的变化而改变,  $\tau$  为脉冲宽度 (s),  $PRF$  为干扰雷达的脉冲重复频率 (Hz),  $L$  为大气吸收损耗、雨雪损耗、两部雷达的天线罩损耗的和,  $L_p$  为极化损耗,  $L_r$  为电磁波空间传播损耗,  $L_r$  是距离  $R$  和频率  $f$  的函数, 表达式为

$$L_r = 32.5 + 20\lg f + 20\lg R \quad (2)$$

$f$  为频率 (MHz);  $R$  为距离 (km)。

定义 1: 饱和功率  $P_{sat}$ , 为预警雷达接收机所能接收的最大功率。

定义 2: 典型目标反射截面积的回波功率  $P_{type}$ , 为预警雷达在噪声环境中能够探测的典型目标的回波功率。

定义 3: 最小干扰信号检测功率, 被干扰雷达所能检测到得最小干扰信号功率定义为最小干扰检测功率, 记为  $P_{min}$ 。

$$P_{min} = S_{min} + L_a + L_f + D \quad (3)$$

$S_{min}$  为接收机灵敏度,  $L_a$  为积累损耗 (dB),  $L_f$  为频率失配损耗 (dB),  $D$  抗干扰因子 (dB)。

$$S_{min} = kT_0 B_n F_0 \left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{min} \quad (4)$$

$k$  为波尔兹曼常数,  $T_0$  为干扰温度,  $B_n$  为噪声带宽,  $F_0$  为

噪声系数,  $\left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{min}$  为可检测信噪比。

积累损耗计算公式

$$L_a = 8\lg n \quad (5)$$

$n$  为接收波束内脉冲驻留个数。

频率失配损耗  $L_f$  是由于干扰雷达发射信号频率与被干扰雷达中放滤波特性引起的:

$$L_f = \begin{cases} -10\lg \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2} & \text{部分重合} \\ \infty & \text{完全不重合} \end{cases} \quad (6)$$

当  $P_r < P_{min}$  时, 表示两预警雷达完全兼容, 不存在电磁干扰。

当  $P_{min} < P_r < P_{type}$  时, 干扰信号强度在接收机正常检测范围内, 只是由于干扰信号的存在增加了信号处理的负担, 引起了虚惊概率的增加, 导致最大作用距离的降低; 当预警雷达 B 执行跟踪任务时, 会导致跟踪抖动, 影响测角精度和测速精度。预警雷达之间的这种干扰最为普遍, 也容易被忽略。

当  $P_{type} \leq P_r < P_{sat}$ , 这是一种比较严重的互扰, 相当于敌方实施的有源压制性干扰, 将严重影响雷达的作用距离和跟踪精度。这种干扰是由于预警雷达配置不合理或主波束对准造成的。在此时预警雷达正常工作在抗干扰模式以获得精确的探测概率。

当  $P_{sat} \leq P_r$  时, 将出现接收机高频前端电路的损伤阈值, 预警雷达将无法工作, 甚至瘫痪烧毁。当两预警雷达距离较近且主波束对准再回发生此种情况, 由文献 [1] 可知, 两地面雷达波束对准的概率在  $10^{-6}$ , 机载预警雷达波束对准的概率则更小, 本文对主波束对准情况不做深入研究。

### 2.2 探测距离计算

预警雷达的探测距离是雷达性能的重要指标, 本文以探测距离为干扰强度的度量。机载预警雷达理想条件 (无干扰) 的探测距离:

$$R_1 = \left[ \frac{P_A G_A \lambda^2 \sigma \bar{D}_{av}}{(4\pi)^3 k T_0 \Delta f_r F_n L (S/N)_{min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

式中,  $P_A$  为雷达发射功率,  $G_r$  为雷达天线增益,  $\lambda$  为雷达波长,  $\sigma$  为目标雷达截面积,  $k$  为波尔兹曼常数, 其值为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T_0$  为环境绝对温度,  $\Delta f_r$  为等效噪声带宽,  $F_n$  为噪声系数,  $L$  为系统损失因子,  $\bar{D}_{av}$  平均跨越遮挡损失。

$$\bar{D}_{av} = \frac{7-6d}{12} \quad (8)$$

其中:  $d$  为雷达脉冲占空比。

当 A、B 两预警雷达存在互扰时的作用距离

$$R_2 = \left[ \frac{k T_s (4\pi R_j)^2 B L_j L_r}{P_B G_B \lambda^2 G'} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

式中,  $P_B$  为干扰机发射功率,  $G_B$  为干扰机天线增益,  $R_j$  为干扰机与机载预警雷达的直线距离,  $\lambda$  为雷达工作波长,  $G'$  为雷达天线在干扰机方向的接收增益,  $B$  为干扰机干扰带宽,  $L_j$  为干扰信号到达雷达的极化损耗,  $L_r$  为干扰信号在大气中的单程损耗。

### 3 仿真实验

以美军的 E-2C 预警雷达为例, 雷达各个参数如表 1 所示。

表 1 E-2C 预警机探测性能数据

雷达体制	作用距离 /km	峰值功率 /kW	脉冲宽 / $\mu$ s	极化方式	飞行高度 /m
PD	400 ( $\sigma = 5$ $p_f = 10^{-6}$ $p_d = 50\%$ )	1 000	13	水平极化	9 100
工作频率 /MHz	波束宽度 /( $^\circ$ )	天线增益 /dB	重复频率 /Hz	天线转速 /( $r/min$ )	飞行速度 /( $m/s$ )
400~450	$7 \times 20$	36	300	5	139

仿真场景设计如下:

两架 E-2C 预警机沿着跑道型航线相向巡逻飞行, 3 dB 波束宽度:  $2^\circ$  (水平),  $5^\circ$  (垂直); 两载机做匀速直线运动  $v_A = v_B = 139$  m/s, 载机 A 初始坐标为 (0, 10 km, 0.9 km), 航向  $0^\circ$ , 俯仰  $0^\circ$ , 倾斜角  $0^\circ$ ; 载机 B 初始坐标为 (50 km, 0, 0.9 km), 航向  $180^\circ$ , 为计算简单取俯仰  $0^\circ$ , 倾斜角  $0^\circ$ ; 转弯半径  $R=5$  km, 预警雷达匀速旋转。

仿真步骤:

Step1: 预警雷达空间实时坐标计算与坐标系转化。设两载机均做匀速直线运动, 速度分别为  $v_A$ 、 $v_B$ , 航向角  $\varphi$ , 俯仰角  $\varphi$ , 载机 A 在地理坐标系下的初始坐标 ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), 任意  $t$  时刻的坐标为

$$\begin{cases} X_A = X_0 + v_A t \cos\varphi \cos\varphi \\ Y_A = Y_0 + v_A t \cos\varphi \sin\varphi \\ Z_A = Z_0 + v_A t \sin\varphi \end{cases} \quad (10)$$

同理, 可以求得载机 B 的坐标, 因此, 两载机之间的距

离为

$$R = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \quad (11)$$

为求得被干扰雷达 B 偏移干扰雷达 A 的天线方向, 需要将地理坐标化为载机坐标系

$$\begin{bmatrix} X'_B \\ Y'_B \\ Z'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

方位角

$$\alpha = \frac{\arctan(Z'_B - Z'_A)}{\sqrt{(X'_B - X'_A)^2 + (Y'_B - Y'_A)^2}} \quad (13)$$

俯仰角

$$\beta = \begin{cases} \arctan \left[ \frac{(Y'_B - Y'_A)}{[X'_B - X'_A]} \right], & X'_B - X'_A \geq 0 \\ \arctan \left[ \frac{(Y'_B - Y'_A)}{[X'_B - X'_A]} \right] + \pi, & X'_B - X'_A < 0 \end{cases} \quad (14)$$

本文为计算方便, 设两架预警机在同一高度巡逻飞行, 因此  $\beta = 0$ 。

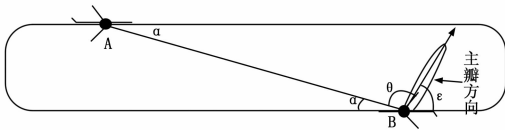


图 2 预警雷达相互干扰示意图

预警雷达 B 的天线主瓣与雷达 A 的夹角

$$\theta = \begin{cases} |\pi - \epsilon - \alpha| & 0 < \epsilon < 2\pi - \alpha \\ \epsilon + \alpha - 2\pi & 2\pi - \alpha \leq \epsilon < 2\pi \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $\epsilon$  为天线主瓣方向, 初始相位都设为  $0^\circ$ 。

同理可以得出预警雷达 A 的主瓣与雷达 B 的夹角

$$\varphi = \begin{cases} \epsilon + \alpha & 0 < \epsilon < \pi - \alpha \\ |2\pi - \epsilon - \alpha| & \pi - \alpha \leq \epsilon < 2\pi \end{cases} \quad (16)$$

Step2: 天线扫描设置。预警雷达天线扫描方式按其扫描轨迹大致为直线型、椭圆或圆形扫描。天线扫描形式又可分为: 固定、圆周、圆锥、扇扫、锥扫、光栅、帕尔莫、螺旋、锯齿、边扫描边跟踪、多波束、电子、波瓣转换、正交、同步、盘旋、跟踪、全向、帕尔莫扇扫、帕尔莫圆周、帕尔莫栅扫等多种。本文根据预警雷达扫描特点, 选择环形扫描。

Step3: 天线增益设置。为了确定不同方向上的天线增益, 需要获取天线方向性函数。常用的天线方向性模型有高斯型和余割平方型。预警雷达的天线方向图根据天线水平波束宽度、副瓣点评等参数, 按照高斯方向图函数计算产生。雷达天线在干扰雷达主瓣方向上的增益  $G_1(\theta)$  由经验公式给出

$$G_1(\theta) = \begin{cases} G_1, & |\theta| < \frac{\theta_{0.5}}{2} \\ K \left( \frac{\theta_{0.5}}{\theta} \right)^2 G_1, & \frac{\theta_{0.5}}{2} < |\theta| < 90^\circ \\ K \left( \frac{\theta_{0.5}}{90} \right)^2 G_1, & 90^\circ < |\theta| < 180^\circ \end{cases} \quad (17)$$

$K$  为常数, 高增益天线, 取  $K = 0.07 \sim 0.10$ ; 宽波束天线, 增益较低  $K = 0.04 \sim 0.06$ 。

同理可以求出干扰雷达 B 在受干扰雷达 A 主瓣方向上的增益  $G_2(\varphi)$ 。

仿真一: 干扰功率仿真。

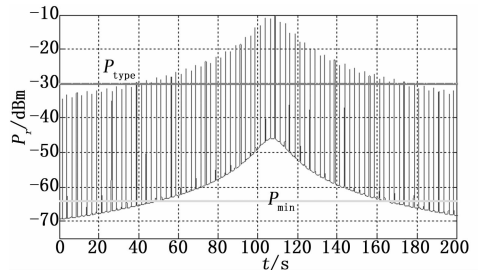


图 3 干扰功率仿真

由图 3 可以看出, 当两部预警雷达工作方式完全相同时, 其互扰程度非常严重, 干扰强度随距离的减小而不断加强; 同时由于预警雷达周期性的扫描, 使得主波束周期性的对准被干扰雷达, 周期性的出现干扰波峰。在  $38.5 \text{ s} \sim 176.5 \text{ s}$  之间, 两雷达的干扰比较严重, 预警雷达需要工作在抗干扰模式。

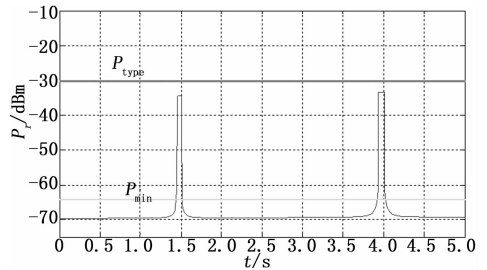


图 4 单个周期内的干扰示意图

图 4 是第一个扫描周期内的干扰功率谱图, 从图中看出, 在  $1.4 \text{ s}$  和  $3.9 \text{ s}$  时干扰突然增强, 在  $1.4 \text{ s}$  时, B 雷达接收波束正好对准雷达 A;  $3.9 \text{ s}$  时, 雷达 B 处于预警雷达 A 的发射波束内, 因此产生强的干扰。从图中可以看出, 只要距离足够远, 即使出现主瓣对准的情况也不会对雷达探测有严重影响。因此, 可以合理的配置预警机地距离, 使得它们之间的干扰功率在典型目标回波功率  $P_{type}$  以下。

仿真二: 受到互扰是的作用距离仿真

仿真条件:

$P_f = 10^{-5}, P_d = 90\%, \sigma = 5, L_j = 6 \text{ dB}$  其他仿真条件如表 1 所示。

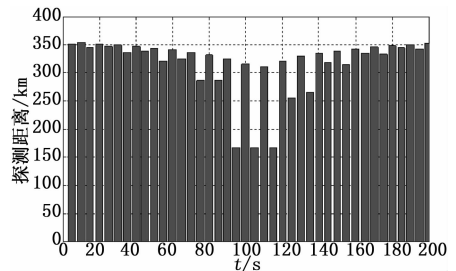


图 5 互扰时的作用距离变化

波的 3 倍左右, 在本文设计的硬件平台上仅需 316 μs 即可输出姿态信息, 更适合低成本硬件实现。

参考文献:

[1] 张荣辉, 贾宏光, 陈 涛, 等. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算 [J]. 光学精密工程, 2008, 16 (10): 1963-1970.

[2] 周 亢, 闫建国, 屈耀红. 捷联惯导系统姿态测量算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (6): 763-765.

[3] 高 勇, 曹娟娟, 唐海红, 等. 磁强计辅助基于 MEMS 惯性器件 SINS 的初始对准方法研究 [J]. 航天控制, 2013, 31 (3): 50-54.

[4] Yun X P, Bachmann E R, McGhee R B. A simplified quaternion-based algorithm for orientation estimation from earth gravity and magnetic field measurements [J]. IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, 2008, 57 (3): 638-649.

[5] Marins J L, Yun X, Bachmann E R, et al. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors [A]. International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Maui, Hawaii, USA, Oct. 2001; 2003-2011.

[6] Sebastien Gros, Moritz Diehl. Attitude Estimation Based on Inertial and Position Measurements [A]. IEEE Conference on Decision and Control [C]. Maui, Hawaii, USA, December, 2012; 1758

-1763.

[7] 马建萍. GPS 辅助捷联惯导系统动基座初始对准新方法 [J]. 传感技术学报, 2010, 23 (11): 1656-1661.

[8] Brown R G, Hwang P Y C. Introduction to random signals and applied kalman filtering with matlab exercises and solutions [M]. Wiley, 1996.

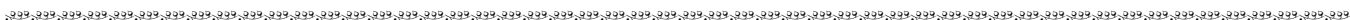
[9] Sabatini A M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53 (7): 1346-1356.

[10] Hu Y M, Qin Y Y. Adaptive two-stage Kalman filter in the presence of random bias [A]. IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology [C]. 2010; 135-138.

[11] Jwo D J, Wang S H. Adaptive fuzzy strong tracking extended Kalman filtering for GPS navigation [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7 (5): 778-789.

[12] Phil Kim. Kalman Filter for Beginners with MATLAB Examples [M]. A-JIN Publishing company, 2010; 207-220.

[13] Sabatini A M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53 (7): 1346-1356.



(上接第 2500 页)

从图 5 可以看出, 受到干扰时的探测距离幅度起伏比较大, 特别是在干扰波束对准被干扰雷达和接收波束对准干扰雷达时, 探测距离出现明显的下降。在 100 s 时刻 (两部预警雷达间距最小) 左右, 两部预警雷达的作用距离显著下降, 约为理想条件下的一半。仿真三: 改变干扰发射功率仿真

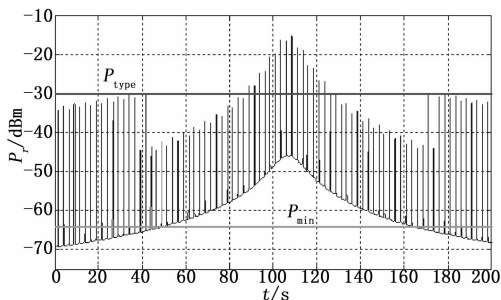


图 6 干扰功率仿真

从图 6 可以看出, 针对干扰比较严重的情况 ( $P_r > P_{type}$ ), 通过减小干扰波束对准时刻的发射功率, 可以显著减小预警雷达的干扰功率  $P_r$ , 这是以牺牲探测距离为代价的。

减小雷达互扰的另一种方法是合理地配置预警雷达的间隔距离。预警雷达之间干扰隔离度的计算公式:

$$L_r = P_T + G_T + G_R - I_{max} - \omega \tag{18}$$

其中:  $P_T$  为干扰雷达的发射峰值功率 (dBm);  $G_T$  为雷达的实际天线增益 (dB);  $G_R$  为被干扰雷达的天线实际增益 (dB);  $I_{max}$  为被雷达系统接收机所能忍受的干扰峰值功率 (dBm);  $\omega$  为接收机内部损耗, 包括极化损耗等 (dB)。

通过式 (2)、式 (17), 在满足检测概率的前提下, 可以反解出最小隔离距离  $R = 13.3$  km, 当预警雷达之间的距离小于最小间隔距离时, 将会产生严重的互扰。

4 结语

本文提出的基于干扰功率和探测距离的预警雷达互扰模型, 综合考虑了距离、角度、功率等因素, 并对两架 E-2C 预警雷达之间的互扰进行了定量分析, 通过减小互扰方向预警雷达发射功率能够有效地减小互扰, 并求出来最小间隔距离。本文所提出的干扰模型也适合其他用频装备之间的互扰分析, 对合理配置用频装备有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 侯民胜. 雷达之间的干扰及概率计算 [J]. 雷达与对抗, 2006, (2): 16-18.

[2] 侯民胜, 秦海潮. 雷达之间相互干扰的计算机仿真 [J]. 现代电子技术, 2007, (24): 91-93.

[3] 陆 军, 邴能敬, 曹 晨, 等. 预警机系统导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[4] 张光义. 相控阵雷达原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[5] 刘满堂. 基于感知的航空通信系统试飞频率管理 [J]. 电讯技术, 2013, (4).

[6] 夏 栋, 李敬辉, 等. 多路径效应因子修正下的雷达互扰方程 [J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23 (3): 31-34.

[7] Mchenry M, Livsics E. Dynamic spectrum access field test results [J]. IEEE Communications Magazine, 2007.

[8] 王先义, 陈丹俊, 刘 斌. 复杂电磁环境战场频谱管理 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, (4): 338-343.