

编号: 1000-6788(2008)05-0142-06

## 复杂电磁环境下雷达探测能力分析及其仿真

刘己斌, 关祥辰, 路建伟, 张 艺

(防空兵指挥学院, 郑州 450052)

**摘要:** 首先分析总结理想情况下雷达方程及其相应参数的求取, 研究了有源干扰方程、无源干扰方程、接收机噪声方程及其参数的求取, 详细推导了频谱系数. 在此基础上, 给出复杂电磁环境下综合信干比的计算公式, 最后利用求出的综合信干比, 计算单次扫描雷达的探测概率和自卫距离, 并提出仿真中雷达捕获的判断方法. 通过将该模型应用于某型仿真系统中的雷达实体探测模块中, 证明该模型具有一定的通用性、准确性和简单实用性.

**关键词:** 电磁环境; 干扰; 信干比; 探测概率; 自卫距离

中图分类号: TN95

文献标志码: A

## Radar detection capability analysis and simulation in complicated electromagnetic environment

LIU Ji-bin, GUAN Xiang-chen, LU Jian-wei, ZHANG Yi

(CPLA Air Defense Forces Command Academy, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Radar equation and its parameters are summarized in ideal environment. Then, active jamming equation, passive jamming equation, noise equation, and their parameters are analyzed, and frequency spectrum coefficient is deduced in detail. On this basis, the equation of SJR is provided in complicated electromagnetic environment. At last, radar detection probability in one scan and self-defence distance is deduced by use of the SJR. Moreover, the method of object captured is provided. The application shows that the model has some currency, correctness, simpleness and practicability.

**Key words:** electromagnetic environment; jam; signal to jamming ratio (SJR); detection probability; self-defence distance

### 1 引言

高技术条件下, 各种武器装备威力的发挥, 战区的监视和警戒, 诸兵种协同作战的调配、联系、指挥和控制等, 都越来越多地依赖于雷达的效能. 而电子战技术的日益成熟和发展, 极大地恶化雷达的工作环境, 降低雷达的效能. 因此, 对复杂电磁环境下雷达探测能力的分析和仿真, 可为实战条件下雷达的组网、技战术使用等提供有效的理论指导.

复杂电磁环境将包括各种有源遮盖性干扰、无源遮盖性干扰、有源欺骗性干扰、无源欺骗性干扰以及各种接收机噪声. 遮盖性干扰通常影响雷达的信干比, 其作用是遮盖目标信息, 使雷达的探测能力下降(发现概率下降或烧穿距离减小). 欺骗性干扰主要针对跟踪雷达, 其主要作用是破坏雷达的跟踪系统, 使雷达得出错误的目标数据, 从而保护目标.

现有的各种电磁环境下雷达的探测能力分析和计算, 或者对干扰谱密度和干扰带宽等因素考虑不全<sup>[1]</sup>, 或者没考虑雷达的抗干扰改善因子<sup>[2]</sup>, 或者有针对性地限定了干扰的样式<sup>[2]</sup>等. 本文在综合考虑这些因素的基础上, 主要分析各种有、无源遮盖性干扰和接收机噪声条件下雷达的信干比、发现概率、目标捕

收稿日期: 2006-07-06

资助项目: 防空兵指挥学院重点项目(2006YJS-05)

**作者简介:** 刘己斌(1976-), 男, 博士, 研究方向: 电子对抗, 作战仿真; 关祥辰(1966-), 男, 本科, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 雷达指挥; 路建伟(1966-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 作战指挥; 张艺(1979-), 男, 本科, 研究方向: 作战仿真.

获的判断和自卫距离的计算等。为简化仿真计算量,假设目标符合通视条件,落入理想情况下雷达的搜索区域,并正好处于雷达波束扫描范围内。

## 2 雷达方程及干扰方程计算及仿真

### 2.1 雷达方程

理想情况下雷达方程<sup>[1-3]</sup>

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r F_t^2(\alpha) F_r^2(\alpha) \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L_t} \quad (1)$$

式中  $P_t$  为雷达发射功率,  $G_t$ 、 $G_r$  分别为发射、接收天线功率增益(收发共用天线时,  $G_t = G_r$ ),  $F_t^2(\alpha)$ 、 $F_r^2(\alpha)$  为雷达天线方向性函数,  $\sigma$  为目标的雷达有效反射面积(RCS),  $\lambda$  为雷达的工作波长,  $R$  为雷达到目标的距离,  $L_t$  为雷达系统总损耗。

#### 1) RCS

RCS 的理论定义为<sup>[1-3]</sup>

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (2)$$

式中  $E^i$  入射电磁波在目标处的矢量电场强度(V/m),  $H^i$  入射电磁波在目标处的矢量磁场强度(A/m),  $E^s$  目标散射波在观测点处的矢量电场强度(V/m),  $H^s$  目标散射波在观测点处的矢量磁场强度(A/m),  $R$  目标到观测点的距离。

在数字脉冲多普勒雷达中,关于目标 RCS 起伏和接收机噪声的通常假设下,由 Marcum 和 Swerling 在确知恒定的接收机噪声中进行最优或准最优检测获得的结果(Swerling 曲线)适用于整个相干脉冲链的检测。起伏目标的四种 Swerling 模型定义如下:

①假设整个脉冲链的幅值是一个瑞利分布的独立随机变量,即其假设的是一个扫描间按瑞利分布起伏的非相干脉冲链。

②假设脉冲链中的每个脉冲的幅值是相互统计独立的瑞利随机变量,即其假设的是一个脉冲间按瑞利分布起伏的非相干脉冲链。

③假设整个脉冲链的幅值是一个主加瑞利分布的独立随机变量,即其假设的是扫描间按主加瑞利分布起伏的非相干脉冲链。③仅是分布形式上与①不同。

④假设脉冲链中的每个脉冲的幅值是相互统计独立的主加瑞利随机变量,即其假设的是一个脉冲间按主加瑞利分布起伏的非相干脉冲链。④仅是分布形式上与②不同。

考虑到目标运动过程中的摆动和旋转,故将瞬时 RCS 的变化表述为其平均值的随机变化。

在复杂目标(如飞机)仿真试验中,对应于第 1、2 类 Swerling 类型,雷达目标瞬时 RCS 服从负指数分布,仿真数学模型为

$$\sigma = -\sigma_0 \ln x \quad (3)$$

式中  $x$  为服从 [0, 1] 均匀分布的随机数,  $\sigma$  为目标瞬时 RCS,  $m^2$ ;  $\sigma_0$  为目标平均 RCS,  $m^2$ 。

对于 3、4 类 Swerling 类型,仿真数学模型为

$$2\sigma/\sigma_0 = \ln x + \ln(1 + 2\sigma/\sigma_0) \quad (4)$$

#### 2) 雷达系统总损耗

雷达系统损耗包括:天线罩损耗、发射馈线传输损耗、接收馈线传输损耗、波束覆盖损耗、CFAR 损耗、滤波器失配损耗、速度响应损耗、距离门跨越损耗、滤波器跨越损耗、重叠损耗、瞬态选通损耗、接收机匹配损耗等。

### 2.2 有源干扰方程

对有源干扰,由干扰方程,到达雷达接收机前端的干扰功率<sup>[3]</sup>为

$$P_{ji} = \frac{P_j G_r F_r^2(\alpha_j) G_j \lambda^2 F_j^2(\alpha_j) k_e \gamma_j}{(4\pi)^3 R_{ji}^2 L_j} \quad (5)$$

式中  $P_j$  为干扰机发射功率,  $G_j$  为干扰机的增益,  $F_j(\alpha_j)$  为干扰机发射天线方向性函数,  $\gamma_j$  为干扰信号的极化损耗系数,  $k_\epsilon$  为频谱系数, 取决于雷达体制、工作带宽、干扰谱密度以及干扰带宽,  $R_{ji}$  为干扰机到雷达的距离,  $L_j$  为干扰损耗, 其余变量同式(1).

当干扰为自卫式时

$$\alpha_j = \alpha, G_j F_j^2(\alpha_j) = G_r F_r^2(\alpha), R_{ji} = R \tag{6}$$

1) 频谱系数

一般有

$$k_\epsilon = \frac{1}{2\pi} \int \alpha(f + f_r - f_j) |H(f)|^2 df \tag{7}$$

$f_r$  雷达工作频率,  $f_j$  干扰机工作频率,  $\alpha(f)$  功率谱密度函数,  $H(f)$  滤波器传输响应函数. 一般有干扰信号的有效频偏大大于雷达带宽, 因此干扰谱密度近似为常数. 以噪声调频干扰为例, 其进入雷达接收机前端滤波器的功率谱密度为<sup>[14]</sup>

$$\alpha(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}f_e} \exp[-(f_j - f_r)^2 / 2f_e^2] \tag{8}$$

$f_e$  为频偏, 噪声调频干扰信号的等效频谱带宽  $B_j = \sqrt{2\pi}f_e$ , 设滤波器特性为理想矩形, 有

$$k_\epsilon \approx \frac{2B_r}{B_j} \exp[-\pi(f_j - f_r)^2 / B_j^2] \tag{9}$$

$B_r$  为雷达带宽. 上式的表达带有通用性, 对其他有源干扰信号,  $k_\epsilon$  的求取也可近似采用上述公式. 从式(9)

可看出, 当干扰频率对准雷达频率时,  $k_\epsilon \approx \frac{2B_r}{B_j}$ ; 而当干扰频率偏离雷达频率较大时,  $k_\epsilon \rightarrow 0$ .

2) 极化损耗

信号的极化对信号的接收有很大影响. 水平极化的天线, 若接收水平极化的信号, 这时天线和信号的极化形式相同称极化匹配, 则信号没有损失地被天线接收. 水平极化的天线垂直极化的信号完全不能接收. 对于倾斜极化信号, 水平极化天线和垂直极化天线都能收到信号, 但都能收到信号的一部分. 极化损耗系数  $\gamma_j$  主要用于说明信号损失的程度. 定义为

$$\gamma_j = \frac{\text{实际被接收到的信号功率}}{\text{极化完全一致时被天线接收的信号功率}} \tag{10}$$

通常干扰信号为圆极化, 雷达天线为线极化, 因此取  $\gamma_j = 0.5$ .

2.3 无源干扰方程

无源干扰主要是箔条云团、角反射器等, 它一般位于目标处, 因此, 对无源干扰, 到达雷达接收机前端的干扰功率为

$$P_{jp} = \frac{P_i G_i F_i^2(\alpha) G_r F_r^2(\alpha) \lambda^2 \sigma_b}{(4\pi)^3 R_{jp}^4 L} \tag{11}$$

此处  $L$  指综合损耗,  $\sigma_b$  指后向散射面积, 通常采用非相干散射情况下的简化计算公式

$$\sigma_b = 0.213\lambda^2 \eta N \tag{12}$$

$N$  为偶极子或角反射器的数目,  $\eta$  为修正系数, 其物理含义为有效偶极子或角反射器的比例系数. 对于相干散射情况, 可以根据极化散射矩阵, 导出精确散射公式<sup>[11]</sup>.

2.4 接收机噪声方程

雷达接收机输出噪声包括外部天线噪声和接收机工作时产生的内部噪声. 通常, 接收机噪声模型可以表示为一服从均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2$  的正态分布随机过程. 方差  $\sigma_n^2$  即为噪声平均功率

$$P_n = \sigma_n^2 = KT_0 B_r F_n \tag{13}$$

式中  $K = 1.38 \times 10^{-23} J/K$  为玻尔兹曼常数,  $T_0 = 290K$  为标准室温,  $B_r$  为雷达接收机有效带宽,  $F_n$  为噪声系数, 取值范围一般为 0 ~ 15dB.

### 3 复杂电磁环境下目标捕获判断及仿真

#### 3.1 综合信干比计算

在存在电磁干扰的环境中, 雷达目标检测综合信干比由诸多因素决定, 其中包括目标回波功率, 干扰信号功率, 杂波以及噪声等.

$$SJR = \frac{P_{rs}}{\sum (P_{ji}/F_{ji}) + \sum (P_{jp}/F_{jp}) + P_n} \quad (14)$$

式中“ $\sum$ ”表示存在多种有源干扰或多种无源干扰情况下采取累加的方法.  $F_{ji}$  雷达综合抗干扰改善因子的抗有源干扰改善因子,  $F_{jp}$  雷达综合抗干扰改善因子的抗无源干扰改善因子. 抗干扰改善因子由斯蒂芬·L·约翰斯顿 (S.L. Johnston) 于 1974 年提出<sup>[1]</sup>. 抗干扰改善因子是雷达中引入某种抗干扰措施后, 雷达输出端信干比与雷达未采取抗干扰措施时雷达输出端的信干比的比值. 如果雷达对某种干扰有几种抗干扰措施, 而且每种抗干扰措施的效果是不同的, 那么可用如下公式计算

$$F = \prod_{i=1}^n F_i \quad (15)$$

$F_i$  表示第  $i$  种抗干扰改善因子. 主要包括旁瓣对消抗干扰改善因子, 脉冲压缩抗干扰改善因子, 频率捷变抗干扰改善因子, 宽-限-窄抗干扰改善因子 (通常取 3dB ~ 5dB), MTI 抗干扰改善因子, 低副瓣天线抗干扰改善因子, 恒虚警处理抗干扰改善因子 (取 1dB ~ 2dB), 频率分集抗干扰改善因子.

根据式 (14) 理想情况 (即不存在遮盖性干扰) 下,  $P_{ji} = 0, P_{jp} = 0$ , 此时信干比也即信噪比

$$SJR = \frac{P_{rs}}{P_n} = \frac{P_t G_t G_r F_r^2(\alpha) F_n^2(\alpha) \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 K T_0 B_r F_n L_t R^4} \quad (16)$$

#### 3.2 单次扫描探测概率计算

单次扫描过程中, 雷达能否探测到目标, 由该目标的信干比 (理想情况下即信噪比) 决定<sup>[2]</sup>. 这里简化为以信干比  $SJR$  和虚警概率  $P_f$  为变量的探测概率  $P_d$  表达式

$$P_d = P_f^{1+SJR} \quad (17)$$

式中  $SJR$  (SNR) 是直接比值, 而不是 dB 值.

所谓虚警就是指没有信号而仅有噪声时, 噪声电平超过门限电平值被误认为信号的事件. 而噪声超过门限的概率即称为虚警概率. 一般有

$$P_f = e^{-\frac{U_T^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

式中  $\sigma$  为高斯噪声的均方值 (均值为 0),  $U_T$  为门限电平. 可大约取  $P_f = 10^{-6}$ .

#### 3.3 一定探测概率条件下单次扫描目标发现的判断

理论上讲, 雷达从  $P_d = 0.1$  时开始就有可能发现该目标, 但这时探测很不稳定、且精度较低, 因此把  $P_d < 0.5$  时当作 0 探测概率处理, 而当  $P_d > 0.9$  时, 当作可靠检测<sup>[5]</sup>.

在逐个扫描周期计算目标的信噪比 (信干比) 及单次扫描发现概率  $P_d$  的基础上, 运用随机数的方法模拟出在该点雷达能否发现目标. 具体算法:

- 1) 当  $P_d < 0.5$ , 不能发现目标;
- 2) 当  $0.5 \leq P_d \leq 0.9$ , 产生一个 (0, 1) 之间的随机数, 如果该随机数  $\leq P_d$ , 则认为能发现目标, 否则认为不能;
- 3) 当  $P_d > 0.9$ , 能发现目标.

#### 3.4 目标捕获判断

目标捕获是多次探测到目标后对该目标的确认. 这需要一定的准则: 连续检测  $m$  次, 当有  $k$  ( $k \leq m$ ) 次发现目标时, 确认捕获目标. 它实际上是一滑窗检测器.  $m$  与  $k$  之间的理论最优关系为  $k = 1.5 \sqrt{m}$ . 仿真中一般取  $m = 4, k = 3$ , 而对于存在目标指示的情况, 或紧急目标 (如进入视距内的目标), 则发现一点即可确认.

### 4 复杂电磁环境下雷达自卫距离计算

当干信比等于雷达在干扰中的可见度时,雷达能以一定的检测概率发现目标.此时,二者之间的距离称为“最小隐蔽距离(对干扰机而言),或“烧穿距离”,又称为“自卫距离(对雷达而言).定性地说,自卫距离越小,干扰效果越好.

由式(1)、式(14)和式(17)可推出自卫距离

$$R_z = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r F_i^2(\alpha) F_j^2(\alpha) \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_i (\log_{10} \frac{P_d}{P_d}) - 1 [\sum (P_{ji}/F_{ji}) + \sum (P_{jp}/F_{jp}) + P_n]}} \quad (19)$$

### 5 仿真及结论

基于HLA的框架体系,构建雷达实体成员.根据上述理论编制雷达探测仿真模块.采用某型干扰机干扰某型雷达,假设雷达参数为

$$P_t = 300\text{kW} \quad G_t = G_r = 25\text{dB} \quad \lambda = 120\text{cm} \quad F_n = 3.5 \quad L_i = 1\text{dB} \\ F_i^2(\alpha) = F_j^2(\alpha) = 1 \quad B_r = 200\text{kHz} \quad \sigma = 2\text{m}^2$$

干扰机参数为

$$P_j = 12.1\text{kW} \quad G_j = 5\text{dB} \quad L_j = 4\text{dB} \quad B_j = 2.95\text{GHz} \quad R_{ji} = 400\text{km}$$

干扰天线对准雷达天线,干扰工作频率完全对准雷达工作频率.分别得理想情况下和存在干扰情况下不同距离上雷达的探测概率(如表1所示),以及不同探测概率情况下雷达的自卫距离(如表2所示).

表1 单次扫描雷达的探测概率

距离(km)	50	70	100	150	180
理想情况下探测概率	0.9964	0.9864	0.9449	0.7543	0.5643
单次扫描是否发现	Y	Y	Y	Y	N
干扰情况下探测概率	0.0118	0.0001	5.02e-6	1.42 e-6	1.12 e-6
单次扫描是否发现	N	N	N	N	N

由理论分析和仿真计算可知:

表2 雷达的自卫距离

探测概率	0.3	0.5	0.7
自卫距离(km)	35.432	30.559	25.719

1)该模块模型对一些公式进行了通用化处理,如式(5)、式(9)和式(14),从而使得模型既适用于自卫式干扰情况、又适用于远距离支援干扰情况,既适用于理想情况、又适用于复杂电磁环境,既适用于有源干扰情况、又适用于无源干扰情况,既适用于多种干扰情况,又适用于单种干扰情况,既带有一定的通用性、又带有一定的准确复杂性.

2)该计算模型对一些公式和数据进行了必要的简化,如式(12)和式(17),虽然从某种程度上降低了计算精度,但却使得模型具有一定的简单实用性.

3)在干扰天线对准雷达天线,干扰工作频率完全对准雷达工作频率的情况下,雷达基本失去工作能力.

4)当干扰工作频率偏离雷达工作频率较大时,由式(9)及仿真可知,干扰对雷达的影响较小.

5)以上主要考虑相对理想的情况,如果再考虑地球曲率和副瓣等影响,以上方程还需做相应修改.

#### 参考文献:

[1] 王国玉,汪连栋.雷达电子战系统数学仿真与评估[M].北京:国防工业出版社,2004.  
Wang G Y, Wang L D. Radar Electronic Warfare System Mathematical Simulation and Evaluation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.

[2] 梁棠文.防空导弹引信设计及仿真技术[M].北京:宇航出版社,1995.

- Liang T W. The Aerial Defence Missile Fuze Design and Simulation Technology[ M ]. Beijing : Astronautics Press , 1995 .
- [ 3 ] Skolnik Merrill I. Radar Handbook 2nd Edition[ M ]. New York : McGraw-Hill Publishing Company , 1990 .
- [ 4 ] Mitra Sajit K. Digital Signal Processing A Computer-Based Approach 2nd Edition[ M ]. New York : McGraw-Hill Publishing Company , 2001 .
- [ 5 ] 袁奇伦 , 谭绍贤 . 建立雷达探测概率模型的方法 [ J ]. 现代防御技术 , 2002 , 30( 3 ) : 46 - 49 .
- Yuan Q L , Tan S X . A method of establishing model of radar detection probability[ J ]. Modern Defence Technology , 2002 , 30( 3 ) : 46 - 49 .
- 

( 上接第 141 页 )

参考文献 :

- [ 1 ] 巴宏欣 , 赵宗贵 , 杨飞 , 等 . 机动目标的模糊自适应跟踪算法 [ J ]. 系统仿真学报 , 2004 , 16( 6 ) : 1181 - 1186 .
- Ba H X , Zhao Z G , Yang F , et al . Fussy adaptive tracking algorithm for maneuvering target[ J ]. Journal of System Simulation , 2004 , 16( 6 ) : 1181 - 1186 .
- [ 2 ] 周宏仁 , 敬忠良 , 王培德 . 机动目标跟踪 [ M ]. 北京 : 国防工业出版社 , 1991 .
- Zhou H R , Jing Z L , Wang P D . Tracking of Maneuvering Targets[ M ]. Beijing : The National Defence Industrial Press , 1991 .
- [ 3 ] Li X R , Jilkov V P . A survey of maneuvering target tracking : Dynamic model[ C ] / Signal and Data Processing of Small Targets , SPIE Vol. 4048 , 2000 : 212 - 236 .
- [ 4 ] 范小军 , 刘锋 , 秦勇 , 等 . 基于 STF 的“当前”统计模型及自适应跟踪算法 [ J ]. 电子学报 , 2006 , 34( 6 ) : 981 - 984 .
- Fan X J , Liu F , Qin Y , et al . Current statistic model and adaptive tracking algorithm based on strong tracking filter[ J ]. Chinese Journal of Electronics , 2006 , 34( 6 ) : 981 - 984 .
- [ 5 ] 周东华 , 叶银忠 . 现代故障诊断与容错控制 [ M ]. 北京 : 清华大学出版社 , 2000 .
- Zhou D H , Ye Y Z . Modern Fault Diagnosis and Tolerance-fault Control[ M ]. Beijing : Tsinghua Univ Press , 2000 .
- [ 6 ] 刘刚 . 多目标跟踪算法及实现研究 [ D ]. 陕西 : 西北工业大学 , 2003 .
- Liu G . Research of multi-target tracking algorithm and its realization[ D ]. Ph. D. Dissertation , Northwestern Polytechnical Univ . , Xian , Shanxi , China , 2003 .
- [ 7 ] 王芳 , 冯新喜 , 李鸿艳 . 一种新的自适应滤波算法 [ J ]. 现代雷达 , 2003 , 25( 7 ) : 33 - 35 .
- Wang F , Feng X X , Li H Y . A novel adaptive filtering algorithm[ J ]. Modern Radar , 2003 , 25( 7 ) : 33 - 35 .
- [ 8 ] 徐毓 , 金以慧 , 杨瑞娟 . 基于强跟踪滤波器的多目标跟踪方法 [ J ]. 传感器技术 , 2002 , 21( 3 ) : 17 - 20 .
- Xu Y , Jin Y H , Yang R J . Method of IMM target tracking based on STF[ J ]. Journal of Transducer Technology , 2002 , 21( 3 ) : 17 - 20 .