

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0001-06

## 对抗有源干扰的雷达探测范围修正模型与分析

马 浩, 阮增苗, 赵春光, 唐志群

(中国电子科技集团公司 第二十八研究所, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 有源干扰是雷达电子对抗中最重要的威胁之一, 而雷达探测范围是衡量抗干扰性能的基础。为便于在干扰环境中计算雷达探测范围、分析抗干扰性能, 在对雷达探测范围理论计算和实际抗干扰措施分析的基础上, 给出简化通用的雷达探测范围修正计算模型。该模型仅需计算一系列修正因子, 应用简便灵活, 并且能够体现对抗干扰的探测范围动态变化, 为评估与改进抗干扰性能提供支持。最后通过仿真实验验证了该模型的有效性。

**关键词:** 雷达探测范围; 有源干扰; 抗干扰; 性能评估

中图分类号: TN956

文献标识码: A

## Model modification and analysis of radar detection range for anti-jamming

MA Hao, RUAN Zeng-miao, ZHAO Chun-guang, TANG Zhi-qun

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Active jamming was one of the most important menaces for radars, and the radar detection range was the basis for evaluation of anti-jamming. Based on the analysis of theoretical computation and practical anti-jamming measures, a modified mathematical model for calculating the radar detection range in jamming environment was proposed. The simplified model only needed the calculation of a few modification coefficients, so it was convenient for application. The model could also explain the dynamic change of radar detection range under different anti-jamming measures, thus it was helpful for the evaluation and improvement of the anti-jamming performance. The simulations showed the validity of the modified model.

**Key words:** radar detection range; active jamming; anti-jamming; performance evaluation

在现代电子战条件下, 电磁环境越来越复杂, 夺取制电磁权是夺取制空权的关键, 作战双方在电磁环境领域展开十分激烈的电子对抗。雷达作为战场上获取信息的重要手段, 受到电子干扰攻击的威胁日益增大。雷达利用目标对电磁波的反射性质来发现目标并测定其位置, 而有源干扰则是发射噪声信号试图降低雷达对目标的发现概率并缩小雷达对目标的探测范围。作战双方电子对抗手段的高低已经成为影响双方战争进程的重要因素, 如何在干扰环境中确定雷达的有效探测范围对于实际作战和对抗评估训练都有非常重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

在干扰环境中, 雷达的探测范围理论上可以根据雷达方程和干扰方程得到。但在工程实现中, 雷达方程和干扰方程的一些参数难以获取, 或者实际的参数误差和损耗使得理论结果和实际数据不符。因此有必要根据实际情况对相应的计算模型作适当改进, 使之更符合工程应用的背景。另外, 作为抗干扰的一个重要指标, 雷达探测范围与参数的改变、采取的抗干扰措施存在一定关系。为便于评估抗干扰性能, 雷达探测范围的计算模型应能反映对抗过程中的动态变化。针对这些问题, 本文在对雷达方程、干扰方程以及应用背景的分析基础上, 综合考虑多种影响因素, 改进了雷达探测范围的计算模型, 使之更灵活实用。

### 1 雷达探测范围计算和评估模型

#### 1.1 自由空间中的雷达探测范围

雷达探测范围的理论基础是雷达方程<sup>[3-6]</sup>, 雷达接收到的目标散射回波信号功率为:

$$S = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_r} \quad (1)$$

式中： $\sigma$ 表示目标的雷达截面积； $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ 分别表示雷达的发射功率、发射天线增益和接收天线增益； $\lambda$ 表示雷达工作波长； $R$ 表示雷达与目标之间的距离； $L_r$ 表示雷达系统总的损耗。

接收机内部噪声功率可以用下式表示：

$$N_0 = kT_0 B F \quad (2)$$

式中： $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K 是 Boltzmann 常数； $T_0$ 是接收机参考温度； $B_r$ 是雷达工作带宽； $F$ 是噪声系数。

当上述信噪比  $S/N_0$  超过雷达探测目标所需最小输出信噪比  $R_{SN, \min}$  时，雷达即可探测到目标，经过推导得到雷达最大探测距离  $R_{\max}$  为：

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N_0 R_{SN, \min} L_r} \right)^{1/4} = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kT_0 B_r F R_{SN, \min} L_r} \right)^{1/4} \quad (3)$$

## 1.2 有源干扰环境下雷达探测范围

在电子对抗过程中，雷达所受到的威胁主要来自于有源干扰，即利用专门的干扰设备发射电磁波形成的干扰。有源干扰可以分为两类：压制性干扰和欺骗性干扰，其中压制性干扰主要利用类似噪声的干扰信号遮盖或淹没有用信号，使强干扰功率进入雷达接收机，尽可能降低信噪比，造成雷达对目标检测的困难。这种方式应用更多，更广泛，威胁也更大。因此下面的讨论主要针对有源压制型噪声干扰。假设干扰机的发射功率为  $P_j$ ，干扰机天线在雷达方向的增益为  $G_j(\varphi)$ ，干扰机相对雷达的距离为  $R_j$ ，根据雷达方程，进入雷达的干扰功率为：

$$J = \frac{P_j G_j(\varphi) G_r(\theta) \lambda^2 \gamma_j}{(4\pi)^2 R_j^2 L_j} \quad (4)$$

式中： $G_r(\theta)$ 表示雷达天线在干扰机方向的增益，与雷达天线方向图有关； $\gamma_j$ 表示干扰信号对雷达天线的极化损失； $\lambda$ 为雷达工作波长； $L_j$ 表示干扰的综合损耗。

一般假设干扰机功率远远大于接收机噪声功率，则当信干比  $S/J$  等于雷达探测目标所需最小输出信干比时，雷达可探测到目标。此时雷达探测距离又称为自卫距离(或烧穿距离)，表示为：

$$R_z = \left( \frac{P_t G_t G_r \sigma R_j^2 L_j}{P_j G_j(\varphi) G_r(\theta) \gamma_j 4\pi (S/J)_{\min} L_r} \right)^{1/4} \quad (5)$$

## 1.3 雷达抗干扰能力评估

雷达的抗干扰能力是雷达的一个重要性能，在评估雷达抗干扰的性能时，自卫距离显然是一个重要的指标。受干扰前后的雷达自卫距离变化程度反映了雷达抗干扰的性能特征。定性地讲，对于雷达而言，自卫距离越大抗干扰能力越强。除此之外，还可以用干扰压制比  $\rho$  定量描述雷达抗干扰的能力，定义为雷达暴露区面积与其探测区面积之比：

$$\rho = \frac{S_B}{S_A} \quad (6)$$

式中： $A$ 为探测区，指雷达未受干扰时可探测目标的区域； $B$ 为暴露区，指雷达受到干扰后仍能探测到的区域。由定义可以看出，干扰压制比作为雷达探测能力的定量指标，直接反映了雷达受到有源压制性干扰后探测区域的变化情况。

## 2 改进计算模型

### 2.1 原计算模型的局限性

上面关于雷达最大探测距离以及自卫距离的计算侧重于理论推导，阐述了雷达作用原理，从中可看出雷达探测距离与多项参数有着密切关系，在所需参数获取充足的条件下，可以直接利用雷达方程进行计算。但在实际应用中，上述公式中的一些参数并不容易确定，如接收机参考温度、雷达和干扰机的系统损耗等，而且得到的参数也难免会包含一定的误差，所以根据公式计算出的理论结果与实际检飞数据存在一定差异。

另外在雷达自卫距离的计算中，式(5)是在干扰机功率远大于接收机噪声功率的假设下得出的。当干扰机的

有效辐射功率较小时,或者远距干扰机与目标对雷达的夹角较大时,干扰机在雷达主瓣方向上产生的干扰频谱密度接近或小于雷达接收机内部噪声频谱密度,如果仍采用式(5)计算,得到的雷达自卫距离可能会大于雷达最大探测距离。这说明在有些情况下雷达接收机的噪声功率不可忽略不计,需要综合考虑干扰和内部噪声的比重确定雷达自卫距离。

对有源压制干扰而言,其有效性也随着雷达的对抗措施和实际情况而变化。如干扰机对雷达实施干扰,当干扰频段对准雷达工作频率时干扰效果最好。但干扰机在一定频段内工作,很难覆盖雷达所有工作频段,当雷达改变工作频率,超出干扰机的频率范围时,则干扰不起作用。另外干扰机本身也有一定的作用距离,如果干扰机距离雷达较远,超过其作用范围,对雷达的干扰作用也是微乎其微。因此雷达自卫距离并非如式(5)中计算结果一成不变,需要考虑多种因素的影响,体现对抗过程中的动态变化。

## 2.2 计算模型的简化修正

针对上述理论计算存在的一些问题,并考虑实际情况的可操作性,下面在式(5)的基础上修改雷达探测距离计算模型,使之更全面实用。

### 2.2.1 计算综合信干比

根据以上讨论,在干扰环境中雷达接收机的实际信干比由多个因素决定,包括目标回波功率、干扰信号功率、内部噪声等。因此可以把干扰看作是对内部噪声的叠加,使得背景噪声的功率提高,此时总的噪声功率可表示为:

$$N = J + N_0 \quad (7)$$

进一步将单个干扰推广到更普遍的情况,假设共存在  $I$  个干扰信号,  $J_i$  表示第  $i$  个干扰信号的功率,总的噪声功率为:

$$N = \sum_{i=1}^I J_i + N_0 \quad (8)$$

此时综合信干比可以表示为:

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{\sum_{i=1}^I J_i + N_0} \quad (9)$$

若直接利用综合信干比类似式(5)计算雷达自卫距离,仍要面临确定全部参数的困难,或者由于参数误差引起理论结果与实际数据偏差较大。因此,为了使得理论计算结果接近实际雷达探测性能,重新考察式(3),假设在雷达默认参数设置下的最大探测距离为  $R_0$ (对于特定型号的雷达,最大探测距离作为性能参数是已知的),即

$$R_0 = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N_0 R_{SN, \min} L_r} \right)^{1/4} = W \left( \frac{1}{N_0} \right)^{1/4} \quad (10)$$

为了便于表达,其中用  $W$  表示除了噪声功率之外其它参数所构成的量。

在上述雷达参数不变的情况下,假设有源压制干扰使得噪声功率由  $N_0$  变为  $N$ ,此时的自卫距离为  $R_r$ ,则有:

$$R_r = W \left( \frac{1}{N} \right)^{1/4} \quad (11)$$

根据式(10)和式(11)消去  $W$ ,并将式(8)代入得到:

$$R_r = R_0 \left( \frac{N_0}{N} \right)^{1/4} = R_0 \left( \frac{N_0}{\sum_{i=1}^I J_i + N_0} \right)^{1/4} = R_0 \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{J_i}{N_0} + 1} \right)^{1/4} = R_0 \omega_0 \quad (12)$$

式(12)表明,自卫距离可以由自由空间中的最大探测距离乘以一个比例因子  $\omega_0$  得到,这个比例因子在 0~1 之间取值,由干扰和内部噪声的功率比决定。当干扰功率远大于内部噪声功率时,比例因子接近 0,从而自卫距离远小于自由空间中的探测距离;当干扰功率相对内部噪声功率较小时,比例因子接近 1,自卫距离接近自由空间的探测距离。这样计算出的自卫距离始终在合理的范围内变化,符合实际情况,不会出现计算值与实际值差别较大的异常情况。

### 2.2.2 计算雷达抗干扰改善因子

在现代战争中,面对有源干扰的威胁,雷达可以从战术、技术上采取一定的措施降低干扰的影响。对于有源干扰而言,常用的抗干扰措施有:增大发射信号峰值功率或平均功率,提高天线主瓣增益以加大信号能量;降低

天线副瓣增益以减少进入雷达接收机的干扰信号；采用频率选择、捷变频技术降低干扰影响；在信号/信息处理方面采取适当的杂波抑制技术改善综合信噪比等。

在对抗过程中，当采取不同的抗干扰措施时，雷达探测范围是不同的，因此对雷达探测距离的描述应该体现抗干扰措施的作用，通过一定改善因子实现探测距离的动态变化。为简化计算模型，便于灵活应用，这里用一个统一的修正因子  $\omega_M$  来表示雷达探测距离的变化：

$$\tilde{R}_i = R_i \omega_M \quad (13)$$

其中  $R_i$  表示如式(12)所示的受到有源干扰后的雷达探测距离， $\tilde{R}_i$  表示采取一定的抗干扰措施之后的探测距离，距离修正因子具体表述为：

$$\omega_M = \omega_p \omega_g \omega_f \omega_i \quad (14)$$

这里， $\omega_p = \left(\frac{\tilde{P}_t}{P_{t0}}\right)^{1/4}$  表示由于雷达发射功率改变引起的探测范围变化因子， $\tilde{P}_t$  表示改变后的雷达发射功率， $P_{t0}$  表示初始的雷达发射功率，变化因子  $\omega_p$  的推导可以由式(10)很容易得到。

同样， $\omega_g = \left(\frac{\tilde{G}_t \tilde{G}_r}{G_{t0} G_{r0}}\right)^{1/4}$  表示由于雷达天线增益改变引起的探测范围变化因子， $\tilde{G}_t$  和  $\tilde{G}_r$  表示改变后的雷达发射天线主瓣增益和接收天线主瓣增益， $G_{t0}$  和  $G_{r0}$  表示初始的雷达发射天线主瓣增益和接收天线主瓣增益。

$\omega_f = F(\tilde{f}, f_j, B_r, B_j)$  为关于雷达工作频率  $\tilde{f}$ 、干扰机工作频率  $f_j$ 、雷达带宽  $B_r$ 、干扰带宽  $B_j$  的函数，表示不同雷达工作频率引起的探测范围变化因子，当雷达工作频率不在干扰频带内时不受影响。函数  $F$  根据具体情况和近似方法选取，一般以高斯函数为基础。

$\omega_i$  表示采取杂波抑制技术引起的探测范围变化因子，与采用的技术有关，若未采用杂波抑制技术可设为 1。

根据以上各式，雷达采取一定抗干扰措施后的探测距离可以表示为：

$$\tilde{R}_i = R_0 \omega_0 \omega_M \quad (15)$$

### 2.2.3 干扰有效性对雷达探测范围的影响

有源干扰的有效性与干扰机的性能与位置都有关系，判断干扰的有效性是进行有源干扰情况下雷达探测范围计算的前提。

从干扰机的性能上讲，只有干扰功率足够大才能起作用，一般可用压制系数来衡量，即干扰功率和目标回波功率之比大于压制系数时干扰有效。采用的压制系数不同，干扰的影响也不同。压制系数由式(5)中的最小输出信干比决定，需根据实际情况和经验恰当设置。

从干扰机的位置上讲，干扰机和雷达之间的距离在一定范围内干扰才有效。由于雷达对低空目标的探测距离受视距影响<sup>[7]</sup>，当干扰机到雷达的距离  $R_j$  满足：

$$R_j < 4.12(\sqrt{H_r} + \sqrt{H_j}) \quad (16)$$

时，干扰有效；否则干扰无效。式(16)右边表示雷达对低空目标的通视距离(km)，其中  $H_r$  和  $H_j$  分别表示雷达天线的海拔高度(m)和干扰机的海拔高度(m)。

### 2.2.4 雷达探测范围修正计算流程图

综上所述，在自由空间雷达探测范围的基础上，根据雷达相关参数和干扰机相关参数，可以按照以上各环节分别计算出雷达在有源干扰环境下的探测范围，并能得到采取一定抗干扰措施后雷达的探测范围，根据这样的反馈过程可以直观了解抗干扰措施的效果，以便于进一步的分析与改善抗干扰性能。整个计算流程图如图 1 所示。

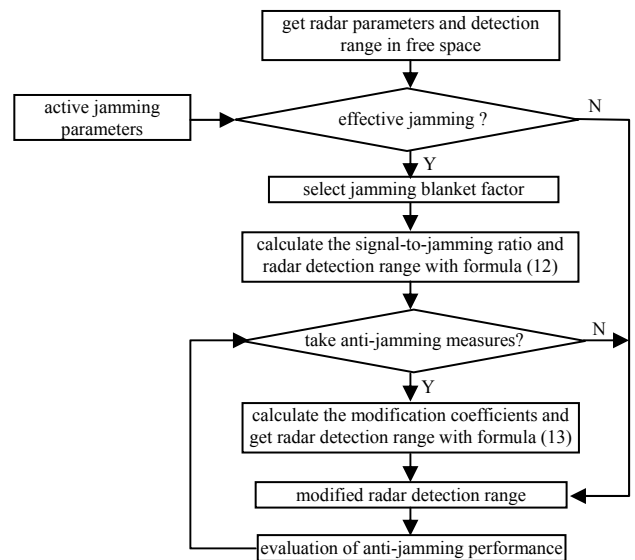


Fig.1 Flow of modified calculation for radar detection range  
图 1 雷达探测范围修正计算流程图

## 3 仿真实例

下面通过仿真实例对有源干扰环境下的雷达探测范围修正模型的应用进行详细说明。

示例 1 :假设已知某一雷达在默认参数下对 RCS 为  $2 \text{ m}^2$  目标的最大探测距离为  $340 \text{ km}$ , 现有一部干扰机对雷达实施远距离压制干扰, 干扰机与雷达之间的距离为  $304 \text{ km}$ 。假设干扰机指向完全对准雷达, 且干扰机频率对准雷达频率, 仿真结果如图 2 所示。其中外层虚线表示自由空间中的探测范围, 根据文中修正模型计算综合信干比, 利用式(12)中的修正因子得到干扰后探测范围如内层实线所示, 此时按式(6)计算得到的干扰压制比为  $0.5634$ 。另外, 当干扰机发射功率和增益降低, 或者指向角度偏离雷达, 使得干扰频谱密度较小时, 雷达的自卫距离接近  $340 \text{ km}$ , 干扰压制比接近  $1$ , 从而避免出现利用式(5)得到的自卫距离大于最大探测距离的现象, 更为合理。

示例 2 :为进一步验证文中修正模型的有效性与通用性, 仿真假设存在多部干扰机对上述雷达进行干扰。设各干扰机性能相同, 只是和雷达的距离有所不同, 且各干扰机天线指向和频率均对准雷达, 仿真结果如图 3 所示, 此时干扰压制比为  $0.29$ 。从图 3 中可以看到雷达探测范围随着干扰增多而缩小, 说明了文中修正模型可以体现干扰程度不同的修正效果, 且随着干扰分布变化呈现一定的规律, 具有通用性。

示例 3 :仍以单干扰源为例, 仿真示例考察采取抗干扰措施后雷达探测范围的变化。在示例 1 中, 雷达发射功率或主瓣增益增加  $0.5$  倍, 其它设置不变, 计算得到干扰压制比为  $0.69$ , 说明了采取抗干扰措施的有效性, 并且可以定量了解抗干扰性能的变化程度。

示例 4 :频率改变是雷达的一个重要抗干扰措施, 仿真仍以示例 1 为基础, 假设干扰频率对准雷达初始工作频率, 而雷达采取变频抗干扰后, 工作频率在干扰频带内逐步偏离初始工作频率直至跳出干扰频带, 所以受干扰的影响也在逐渐减弱, 结果如图 4 所示。图中从内到外的曲线依次表示雷达频率从对准干扰频率到逐渐偏离直至跳出干扰频带的探测范围, 各种情况下干扰压制比依次为  $0.5634, 0.6059, 0.7400, 0.8834, 1$ 。可以看出当雷达工作频率跳出干扰频带时已不受干扰影响, 如最外层曲线所示。

#### 4 结论

雷达探测范围是雷达的基本性能指标之一。由于有源干扰环境中电磁信号的复杂性, 精确获得雷达探测范围是一个较困难的问题, 但实际应用中却需要快速合理地计算出雷达探测范围以供对抗评估和分析。因此文中给出一种简化的雷达探测范围修正计算模型, 在自由空间最大探测范围基础上, 根据不同情况逐步计算相应的修正因子实现雷达探测范围的变化。该模型具有以下特点: 1)通用性, 模型既适用于单干扰情况, 又适用于多干扰情况, 不受干扰强弱的限制, 且对不同类型干扰都可以推广应用; 2)简便实用性, 文中模型仅需根据自由空间最大探测范围计算一系列修正因子, 计算量小, 减少一些复杂的重复计算, 在精确度要求不是特别严格时更便于实际应用; 3)灵活性, 修正因子的含义明确, 可根据不同情况确定需要计算哪些修正因子, 并且随着技术发展与实际验证可很容易对模型进一步扩充和完善; 4)便于评估分析, 该模型能够体现雷达探测范围随不同抗干扰措施的变化, 为对抗性能的评估分析提供定量的指标, 并为进一步的多雷达抗干扰战术设置和分析提供了参考。

文中仅从模型的角度描述了雷达探测范围的计算, 随着电子对抗技术的发展和深入, 利用雷达探测范围的变化评估分析对抗措施应是一个不断反馈完善的过程, 这会对提高雷达电子对抗性能提供有益的帮助, 相关工作还在继续深入探索中。

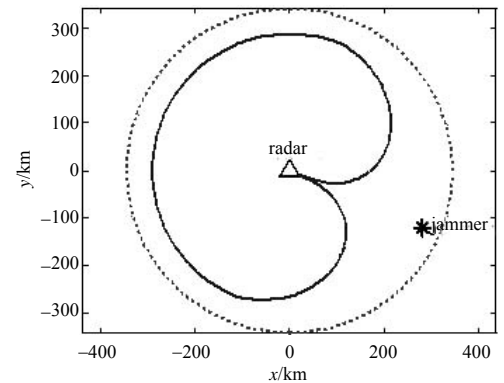


Fig.2 Radar detection range with single jammer  
图 2 单干扰源时的雷达探测范围示意图

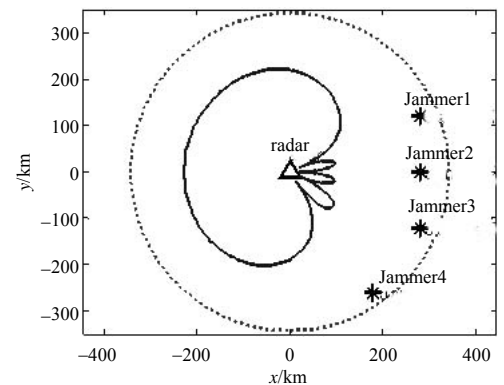


Fig.3 Radar detection range with multiple jammers  
图 3 多干扰源时的雷达探测范围示意图

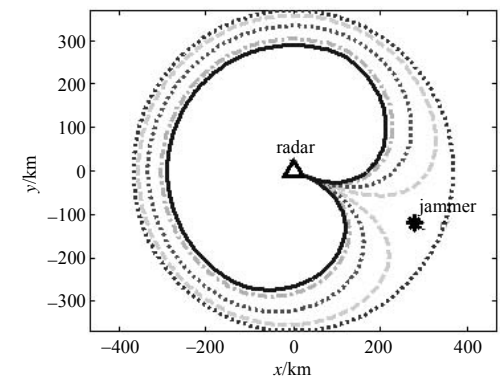


Fig.4 Radar detection range with frequency variation for anti-jamming  
图 4 采取变频抗干扰的雷达探测范围变化示意图

## 参考文献：

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1999.
- [2] 张锡祥. 电子战技术与应用——雷达对抗篇[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [3] 王国玉,汪连栋,王国良,等. 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.
- [4] Barton D K. Modern Radar System Analysis[M]. London:Artech House, 1988.
- [5] Skolnik Merrill I. Radar Handbook[M]. 2nd Edition. New York:McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [6] 王小谟,张光义. 雷达与探测——现代战争的火眼金睛[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [7] 郦能敬. 对空情报雷达探测威力的设计论证[J]. 雷达科学与技术, 2005,3(3):129-135.

## 作者简介：



马浩(1978-),男,安徽宿州人,博士,工程师,研究方向为雷达及电子对抗建模与仿真技术.email:mahaoc@126.com.

阮增苗(1959-),男,研究员,所副总工程师,长期负责雷达数据录取设备系列产品的开发研制,获得国家科技成果三等奖、省部级科技成果一、二、三等奖多次.

赵春光(1965-),男,高级工程师,长期从事并负责雷达数据录取终端及光电、指控系统的研制工作.

唐志群(1966-),女,高级工程师,长期从事雷达数据录取终端及雷达对抗指挥控制的研制.