

文章编号:1001—893X(2010)03—0049—05

# 基于作用距离衰减的雷达间电磁兼容模型<sup>\*</sup>

李圭源,张 厚,殷 雄,舒 楠

(空军工程大学 导弹学院,陕西 三原 713800)

**摘 要:**为了更好地判定雷达间的电磁兼容性,分析了远距离支援干扰的效能评估模型,并在此基础上提出了雷达最大作用距离衰减系数的概念,建立了最大作用距离衰减系数与天线增益等六大参数的定量关系。最后,针对两部雷达间的干扰情况做了算例分析,仿真实验结果表明:降低天线副瓣增益、增加雷达间距离以及提高受扰雷达压制系数均可以获得较好的雷达间电磁兼容性。这种将最大作用距离衰减系数用于雷达间电磁兼容判决的模型,能够真实、定量地反映出雷达间的干扰情况。  
**关键词:**雷达;电磁兼容性;远距离支援干扰;最大作用距离  
**中图分类号:**TN959      **文献标识码:**A      doi:10.3969/j.issn.1001—893x.2010.03.011

## Radar Electromagnetic Compatibility Model Based on Radar Range Attenuation

LI Gui-yuan, ZHANG Hou, YIN Xiong, SHU Nan

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** In order to better judge radar electromagnetic compatibility(EMC), the effectiveness evaluation model of stand-off jammer(SOJ) is analyzed, the attenuation coefficient of maximum range is proposed based on SOJ evaluation model, the relationship between the attenuation coefficient and the six parameters(antenna gain, etc) of radar is established. Finally, interference of two radars is calculated, simulation results indicate that decreasing sidelobe gain, increasing the space between of radars and improving the victim radar suppressing coefficient can achieve better radar EMC. This model which applies the attenuation coefficient of maximum range to judge radar EMC can illuminate the interference condition between radars realistically and quantitatively.  
**Key words:** radar; electromagnetic compatibility(EMC); stand-off jammer(SOJ); maximum radar range

### 1 引 言

随着电磁环境的日益复杂,电子设备总会受到各种各样的干扰。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,相互之间必然存在干扰,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,因此需要对其进行电磁兼容性(EMC)预测<sup>[1-3]</sup>。电磁兼容预测的计算过程比较

复杂,第一步是建立干扰源数学模型、受扰设备数学模型以及电波传播模型,国内外学者已经提出了许多有效的模型进行电磁兼容预测<sup>[4-8]</sup>。第二步是采用某种判决模型判决雷达是否受到干扰。目前,常采用干扰裕量模型,但是该模型存在一定的弊端,它不能定量描述干扰对雷达性能具体的影响程度<sup>[9]</sup>。本文以远距离支援干扰(Stand-off Jammer, SOJ)的

<sup>\*</sup> 收稿日期:2009—12—03;修回日期:2010—01—26

效能评估模型为依据,提出了一种新的雷达间电磁兼容判决模型,仿真实验证明了其有效性。

2 理论依据

从图 1 和图 2 可以看出,雷达间干扰与电子对抗中的远距离支援干扰有相同之处,两种干扰的目标一样,均为空中目标,目标与干扰源都不在一个载体之上,存在一定的夹角,所以可以通过远距离支援干扰的评估模型来研究雷达间电磁兼容判决模型。

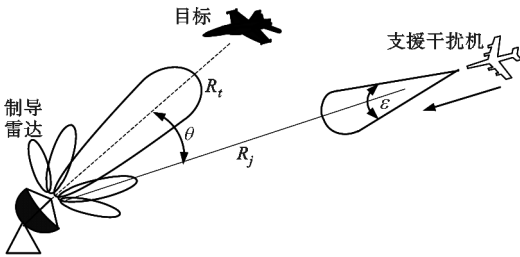


图 1 远距离支援干扰示意图  
Fig. 1 Stand-off jammer

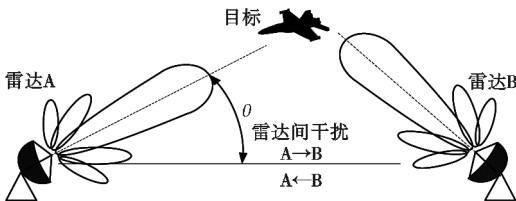


图 2 雷达间干扰示意图  
Fig. 2 Interference between radars

在支援干扰评估中,采用雷达暴露区来衡量干扰机对雷达的干扰程度<sup>[10]</sup>,下面分析雷达暴露距离和雷达暴露区。

在支援干扰的条件下,雷达的暴露距离  $R_0$  为

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{P_i G_i \sigma K_j D B_j I_i(n) R_j^2}{4 \pi \gamma_j P_j G_j B_r (G_{rj} / G_r)}} \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为雷达发射功率,  $G_i$  为雷达天线增益,  $K_j$  为压制系数,  $B_r$  为雷达接收机带宽,  $B_j$  为干扰信号带宽,  $P_j$  为干扰机发射功率,  $G_j$  为干扰机天线增益,  $\gamma_j$  为干扰极化损失,  $\sigma$  为目标的雷达散射截面积,  $D$  为接收机处理增益,  $I_i(n)$  为积累改善因子,  $R_j$  为干扰机与雷达之间的距离,  $G_{rj}$  为干扰机方向的雷达接收天线的增益,  $G_r$  为雷达接收天线增益。

干扰机方向的雷达接收天线增益  $G_{rj}$  是随着  $\theta$  ( $\theta$  为干扰机、目标与雷达的相对波束张角,如图 1 所示)变化的函数,  $G_{rj}(\theta)$  由下式近似计算<sup>[10-11]</sup>:

$$G_{rj}(\theta) = \begin{cases} G_i, & 0 \leq \theta \leq \frac{\theta_{0.5}}{2} \\ K_2 \left( \frac{\theta_{0.5}}{\theta} \right)^2 G_i, & \frac{\theta_{0.5}}{2} < \theta < 90^\circ \\ K_2 \left( \frac{\theta_{0.5}}{90} \right)^2 G_i, & \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\theta_{0.5}$  为天线半功率波束宽度;  $K_2$  为常数,取值为 0.04~0.10。

假设雷达与干扰机的参数如下:雷达发射功率  $P_i=200$  kW,雷达天线增益  $G_i=30$  dB,半功率波束宽度  $\theta_{0.5}=10^\circ$ ,常数  $K_2=0.1$ ,压制系数  $K_j=3$ ,雷达接收机带宽  $B_r=0.2$  MHz,干扰信号带宽  $B_j=20$  MHz,干扰机发射功率  $P_j=500$  kW,干扰机天线增益  $G_j=12$  dB,干扰极化损失  $\gamma_j=0.5$ ,目标的雷达截面积  $\sigma=10$  m<sup>2</sup>,接收机处理增益  $D=3$  dB,积累改善因子  $I_i(n)=8$  dB,干扰机与雷达之间的距离  $R_j=300$  km,雷达接收天线增益  $G_r=30$  dB。那么,由式(1)、(2)得到雷达的暴露区如图 3 所示。可以看出,在干扰机方向,雷达暴露区凹陷最严重,即在该方向上,雷达最大作用距离最小,在远离干扰方向一定角度后,雷达最大作用距离趋近于一个定值,但要小于无干扰条件下的雷达最大作用距离。

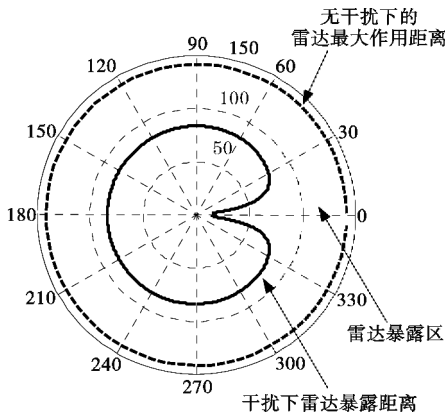


图 3 雷达暴露区示意图  
Fig. 3 Radar exposed zone

因此,可以得出结论:雷达在受到干扰的情况下,其探测能力降低,雷达的暴露区增大,主要体现为雷达最大作用距离的衰减。

3 基于作用距离衰减的雷达间电磁兼容判决模型

3.1 判决模型

下面在远距离支援干扰效能评估模型的基础之

上对雷达间电磁兼容判决模型进行研究。雷达在受到干扰的情况下,其最大作用距离会减小,干扰的强弱直接影响到雷达最大作用距离衰减的大小。这里首先给出雷达最大作用距离衰减系数的概念。雷达最大作用距离衰减系数是指雷达在干扰情况下的最大作用距离与不受干扰情况下的最大作用距离的比值,它反映了雷达受到相邻雷达干扰影响的程度,即反映了雷达间的电磁兼容程度。定义雷达最大作用距离衰减系数 $\mu$ 为

$$\mu = \frac{R'_{\max}}{R_{\max}}, 0 < \mu \leq 1 \quad (3)$$

式中, $R_{\max}$ 为无干扰条件下的雷达最大作用距离, $R'_{\max}$ 为干扰条件下雷达最大作用距离。 $\mu$ 值越大说明雷达间电磁兼容性越好, $\mu$ 值越小说明雷达间的干扰越严重。

假设某区域(平台)有 $N$ 部雷达,为分析问题方便起见,考虑同一水平面雷达间同频干扰,且将第 $k$ 部雷达作为受扰雷达来研究。那么,在无干扰条件下,第 $k$ 部雷达最大作用距离为 $R_{k\max}$ 为

$$R_{k\max} = \left[ \frac{P_k G_k^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{ki\min} L_k} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中, $P_k$ 为雷达 $k$ 的发射功率, $G_k$ 为雷达 $k$ 天线增益, $\lambda$ 为雷达 $k$ 发射电磁波波长, $\sigma$ 为目标散射截面积, $S_{ki\min}$ 为雷达 $k$ 最小可检测信号, $L_k$ 为雷达 $k$ 发射并接收电磁波过程中的能量损耗。

雷达 $k$ 收到的目标信号回波功率 $P_{rs}$ 为

$$P_{rs} = \frac{P_k G_k^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_k^4 L_k} \quad (5)$$

式中, $R_k$ 为目标与雷达 $k$ 之间的距离。

受到相邻雷达干扰时,雷达 $k$ 接收到相邻雷达同频干扰功率 $P_{rj}$ 为

$$P_{rj} = P_{rj1} + P_{rj2} + \dots + P_{rj(k-1)} + P_{rj(k+1)} + \dots + P_{rj(N)} = \sum_{i=1, i \neq k}^N P_{rji} = \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{P_i G_i G'_k \lambda^2 \gamma_i}{(4\pi)^2 R_{ik}^2 L_{ik}} \quad (6)$$

式中, $P_i$ 为相邻干扰雷达 $i$ 的发射功率, $G_i$ 为相邻干扰雷达 $i$ 的天线增益, $G'_k$ 为受干扰雷达 $k$ 的天线接收增益, $\gamma_i$ 为雷达 $i$ 干扰信号对雷达 $k$ 接收天线的极化系数, $R_{ik}$ 为雷达 $i$ 与受干扰雷达 $k$ 之间距离, $L_{ik}$ 为雷达 $i$ 发射的电磁波被雷达 $k$ 接收过程中的能量损耗。

在干扰条件下发现目标必须满足以下条件<sup>[11]</sup>:

$$\frac{P_{rj}}{P_{rs}} = \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{P_i G_i G'_k \lambda^2 \gamma_i}{(4\pi)^2 R_{ik}^2 L_{ik}}}{\frac{P_k G_k^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R_k^4 L_k}} \leq K_k \quad (7)$$

式中, $K_k$ 为第 $k$ 部雷达的压制系数。则在受到干扰情况下,且 $\frac{P_{rj}}{S_{i\min}} > K_k$ 时,第 $k$ 部雷达的最大作用距离 $R'_{k\max}$ 为

$$R'_{k\max} = \left[ \frac{\frac{P_k G_k^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 L_k} K_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{P_i G_i G'_k \lambda^2 \gamma_i}{(4\pi)^2 R_{ik}^2 L_{ik}}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

当 $\frac{P_{rj}}{S_{i\min}} \leq K_k$ 时,雷达的最大作用距离不受影响,即 $R'_{k\max} = R_{k\max}$ ,则可以给出雷达 $k$ 的最大作用距离衰减系数 $\mu_k$ :

$$\mu_k = \begin{cases} 1, & \frac{P_{rj}}{S_{i\min}} \leq K_k \\ \left[ \frac{K_k S_{ki\min}}{\sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{P_i G_i G'_k \lambda^2 \gamma_i}{(4\pi)^2 R_{ik}^2 L_{ik}}} \right]^{\frac{1}{4}}, & \frac{P_{rj}}{S_{i\min}} > K_k \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 算例分析

下面以两部雷达之间的电磁兼容性判决为例进行算例分析。设两部雷达A和B,将雷达A作为受扰雷达,雷达B作为干扰雷达,那么对于雷达A的最大作用距离衰减系数可以表述为

$$\mu = \begin{cases} 1, & \frac{P_{Bj}}{S_{Ai\min}} \leq K_{Aj} \\ \left[ \frac{(4\pi)^2 R_j^2 L_{Aj} S_{Ai\min} K_{Aj}}{P_{Bj} G'_{Bj} G'_{Aj} \gamma_j \lambda^2} \right]^{\frac{1}{4}}, & \frac{P_{Bj}}{S_{Ai\min}} > K_{Aj} \end{cases} \quad (10)$$

从上式可以看出,雷达间的电磁兼容程度与以下几个参数有关:雷达B的发射功率 $P_{Bj}$ ,雷达B在雷达A方向上的天线增益 $G'_{Bj}$ (这里一般指副瓣增益,因为地面雷达对空扫描时主瓣对准的概率非常小),雷达A的天线接收增益 $G'_{Aj}$ ,雷达B干扰信号对雷达A接收天线的极化系数 $\gamma_j$ ,雷达A发射电磁波波长 $\lambda$ ,两部雷达之间的距离 $R_j$ ,雷达B的干扰信号被雷达A接收的能量损耗 $L_{Aj}$ ,雷达A最小可检测信号 $S_{Ai\min}$ ,雷达A压制系数 $K_{Aj}$ 。

设 $P_{Bj} = 100$  kW,  $G'_{Aj} = -15$  dB,  $G'_{Bj} = -15$  dB,  $R_j = 30$  km,  $\gamma_j = 1$ ,  $L_{Aj} = 10$  dB,  $S_{Ai\min} = -95$  dBmW,  $K_{Aj} = 3$ 。这里以 $G'_{Bj}$ 、 $R_j$ 和 $K_{Aj}$ 为例分析这3个参数对雷达间电磁兼容性能的影响。

3. 2. 1  $G'_{Bj}$  对雷达间电磁兼容程度的影响分析

将  $G'_{Bj}$  作为变量,代入公式(10),仿真得出雷达 A 的最大作用距离衰减系数  $\mu$  随雷达 B 的天线增益  $G'_{Bj}$  变化的规律如图 4 所示。

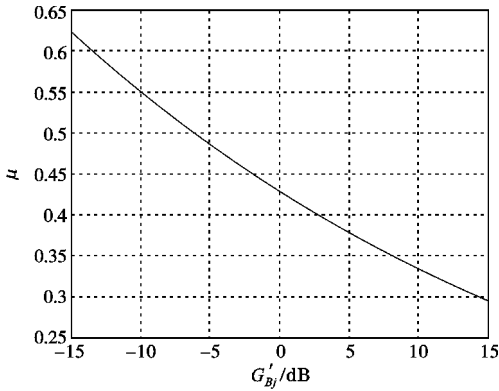


图 4  $\mu$  随  $G'_{Bj}$  变化的规律

Fig. 4 Relationship between  $\mu$  and  $G'_{Bj}$

从图 4 可以看出,雷达 A 的最大作用距离衰减系数  $\mu_A$  随着雷达 B 的天线增益  $G'_{Bj}$  的增加而减小,当  $G'_{Bj}$  增大到  $-6\text{ dB}$  以上时, $\mu_A < 0.5$ ,此时雷达最大作用距离下降一半以上。因此,减小天线副瓣增益可以提高两部雷达的电磁兼容度。

3. 2. 2  $R_j$  对雷达间电磁兼容程度的影响分析

将  $R_j$  作为变量,代入公式(10),仿真得出雷达 A 的最大作用距离衰减系数  $\mu$  随两部雷达之间距离  $R_j$  变化的规律如图 5 所示。

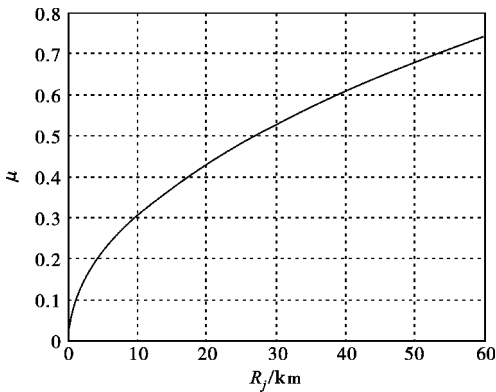


图 5  $\mu$  随  $R_j$  变化的规律

Fig. 5 Relationship between  $\mu$  and  $R_j$

从图 5 可以看出,雷达 A 的最大作用距离衰减系数  $\mu_A$  随着雷达间距离  $R_j$  的增大而增大,当两部雷达间距离小于  $28\text{ km}$  时, $\mu_A < 0.5$ ,此时雷达最大作用距离下降一半以上。因此,要使两部雷达具有良好的电磁兼容度,必须根据需要尽可能增加雷达

间距离。

3. 2. 3  $K_{Aj}$  对雷达间电磁兼容程度的影响分析

将  $K_{Aj}$  作为变量,代入公式(10),仿真得出雷达 A 的最大作用距离衰减系数  $\mu$  随雷达 A 压制系数  $K_{Aj}$  变化的规律如图 6 所示。

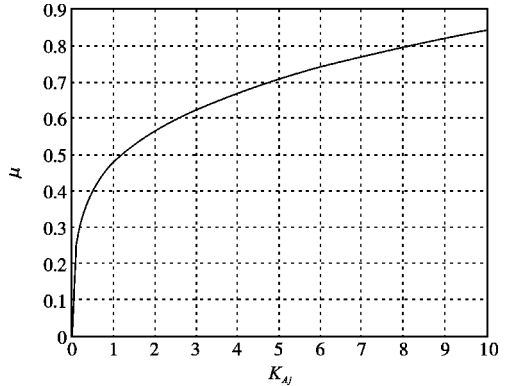


图 6  $\mu$  随  $K_{Aj}$  变化的规律

Fig. 6 Relationship between  $\mu$  and  $K_{Aj}$

从图 6 以看出,雷达 A 的最大作用距离衰减系数  $\mu_A$  随着雷达 A 压制系数  $K_{Aj}$  的增大而增大,当  $K_{Aj} < 1.3$  时, $\mu_A < 0.5$ ,此时雷达最大作用距离下降一半以上。因此,要使两部雷达具有良好的电磁兼容度,需要尽可能提高受扰雷达压制系数。

4 结束语

由前面的分析可知,本文提出的这种基于最大作用距离衰减的雷达系统间电磁兼容判决模型建立了最大作用距离与天线增益等参数的定量关系,使其可以直接用于雷达间的电磁兼容性判决。该模型能够客观、真实地反映出干扰对雷达系统性能的影响程度,因此,将其应用于雷达间电磁兼容预测中能够取得较好的预测结果。

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.  
HOU Min-sheng. The analysis of interference between radars and the computation of interference probability[J]. Radar and Countermeasure, 2006(2):16—18. (in Chinese)  
[2] 毛滔,曾浩. 雷达抗同频干扰方法研究[J]. 航天电子对抗,2005,21(5):43—45.  
MAO Tao,ZENG Hao. Anti-interference in The Common-Frequency Interference of Radar[J]. Spaceflight

- Countermeasure, 2005, 21(5): 43—45. (in Chinese)
- [3] 杨国伟, 张厚. 雷达间 EMC 预测准则的研究[C]//全国电磁兼容学术会议论文集. 扬州: [s. n.], 2006: 174—177.
- YANG Guo-wei, ZHANG Hou. Research on the EMC Forecasting Criteria between Radars[C]//EMC Symposium of China. Yangzhou: [s. n.], 2006: 174—177. (in Chinese)
- [4] 蔡仁钢. 电磁兼容原理、设计和预测技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
- CAI Ren-gang. Electromagnetic Compatibility Principle, Design and Prediction[M]. Beijing: Beijing Aeronautical and Astronautical University Press, 1997. (in Chinese)
- [5] Daniel W, Tam S, Azu C. A Computer-aided Design Technique for EMC Analysis [C]//1995 IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record. Atlanta: IEEE, 1995: 234—235.
- [6] Terry Foreman. Antenna coupling model for radar electromagnetic compatibility analysis [J]. IEEE Transactions on EMC, 1989, 31(1): 85—87.
- [7] 赵欣楠, 程光伟. 雷达系统间电磁兼容性的计算与预测[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(4): 48—51.
- ZHAO Xin-nan, CHENG Guang-wei. Prediction and Evaluation of EMC in Radar System[J]. Firepower Control Radar Technology, 2007, 36(4): 48—51. (in Chinese)
- [8] 胡皓全, 杨显清, 赵家升. 雷达之间电磁干扰预测模型研究[J]. 电子科技大学学报, 2001, 30(1): 37—40.
- HU Hao-quan, YANG Xian-qing, ZHAO Jia-sheng. Research on Electromagnetic Interference Prediction Model in Radar System[J]. Journal of Electronic Technology University, 2001, 30(1): 37—40. (in Chinese)
- [9] 夏惠诚, 毛建舟. 舰艇作战系统电磁兼容的综合预测[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(8): 47—49.
- XIA Hui-cheng, MAO Jian-zhou. Comprehensive Prediction of Electromagnetic Compatibility for Warship Combat System[J]. Fire Control and Command Control, 2005, 30(8): 47—49. (in Chinese)
- [10] 张永顺, 童宁宁, 赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- ZHANG Yong-shun, TONG Ning-ning, ZHAO Guo-qing. Radar Electronic Warfare[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 史豪杰. 地面防空作战雷达间电磁兼容优化研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2008.

SHI Hao-jie. Research on Electromagnetic Compatibility Optimization Between Radars on the Ground to Air Defense Operation[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)

## 作者简介:

**李圭源**(1983—), 男, 甘肃庆阳人, 2005 年获空军航空大学工学学士学位, 2008 年获解放军信息工程大学军事学硕士学位, 现为空军工程大学博士研究生, 主要研究方向为雷达系统间电磁兼容、电磁干扰等;

LI Gui-yuan(male) was born in Qingyang, Gansu Province, in 1983. He received the B. S. degree in Aviation University of Air Force and the M. S. degree in Information Engineering University of PLA in 2005 and 2008, respectively. He is currently working toward his Ph. D. degree in Air Force Engineering University. His research concerns radar EMC, EMI, and so on.

Email: kg\_ligu yuan@126.com

**张厚**(1962—), 男, 河北武安人, 空军工程大学教授、博士生导师, 分别于 1983 年、1988 年获得空军导弹学院学士及硕士学位, 于 2003 年获得西安电子科技大学博士学位, 长期从事天线与电磁兼容领域的研究;

ZHANG Hou(male) was born in Wuan, Hebei Province, in 1962. He received the B. S. degree, the M. S. degree from Air Force Missile Institute and Ph. D. degree from Xi'an Electron Science and Technology University in 1983, 1988 and 2003, respectively. He is now a professor and tutor. He is interested in the areas of antenna, electromagnetic compatibility, and so on.

**殷雄**(1984—), 男, 湖南人, 分别于 2007 年和 2010 年获得空军工程大学工学学士及硕士学位, 目前攻读空军工程大学电磁场与微波技术工学博士学位, 主要从事天线技术及电磁带隙结构的应用研究;

YIN Xiong(male) was born in Hunan Province, in 1984. He received the B. S. degree and the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2007 and 2010, respectively. He is currently working toward his Ph. D. degree in Air Force Engineering University. He is interested in the areas of antenna, electromagnetic bandgap, and so on.

**舒楠**(1987—), 男, 河南人, 2008 年获得空军工程大学工学学士学位, 目前攻读空军工程大学电磁场与微波技术工学硕士学位, 主要从事电磁兼容领域的研究。

SHU Nan(male) was born in Henan Province, in 1987. He received the B. S. degree from Air Force Engineering University in 2008. He is currently working toward his M. S. degree in Air Force Engineering University. He is interested in the area of electromagnetic compatibility.