

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.019

引用格式:韩丹,蒋豪,杨晓嘉.民航雷达电磁环境评估方法[J].电讯技术,2016,56(5):585-590. [HAN Dan,JIANG Hao,YANG Xiaojia. An electromagnetic environment assessment method for civil aviation radars[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(5):585-590.]

民航雷达电磁环境评估方法*

韩丹**1,蒋豪¹,杨晓嘉²

(1. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院,四川 广汉 618307;
2. 中国民用航空局第二研究所,成都 610041)

摘要:目前有关民航雷达电磁环境评估的方法国内尚未有统一的标准规范。针对这一问题,分析了MH/T4003-2014和GB13618-92,结合实际经验,从有源干扰和无源干扰两个方面提出了一套普遍适用的雷达电磁环境评估方法。以中南某机场拟建磁悬浮工程对该机场二次雷达的电磁环境影响为例进行了评估分析,并给出了建议及措施,证明了方法的可行性。该方法可以从源头上遏制电磁干扰的发生,为雷达电磁环境评估标准及相关规章体系的建设和完善提供参考。

关键词:民航雷达;电磁环境评估;飞行安全;有源干扰;无源干扰

中图分类号:TN954 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)05-0585-06

An Electromagnetic Environment Assessment Method for Civil Aviation Radars

HAN Dan¹,JIANG Hao¹,YANG Xiaojia²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
2. The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

Abstract:At present, there is no unified standard specification for civil aviation radar electromagnetic environment assessment. In order to solve the problem, MH/T4003-2014 and GB13618-92 are analyzed. According to practical experience, a general evaluation method for radar electromagnetic environment is proposed from two aspects of active jamming and passive jamming. The electromagnetic effect of a maglev project to be constructed in a south-central China airport is taken as example to prove the feasibility of this method. This method can restrain the electromagnetic interference fundamentally, and provides reference for the construction and improvement of radar electromagnetic environment assessment standards and regulations.

Key words:civil aviation radar; electromagnetic environment assessment; flight safety; active jamming; passive jamming

1 引言

民航雷达作为保障航空器安全飞行、航班正常及提高空中交通管制效率的一种手段,管制人员通

过对雷达设施的监控,可以有效维护飞行秩序,准确地掌握空中情况,不间断地实施飞行指挥^[1]。

随着我国民用航空器的数量以及机场、航路和

* 收稿日期:2015-09-15;修回日期:2015-12-18 Received date:2015-09-15;Revised date:2015-12-18

基金项目:湘磁合同[2014]2号;2014年中国民用航空飞行学院研究生创新基金项目(X2014-28)

Foundation Item: Xiang Magnetic Contract[2014]2; Graduate Student Innovation Fund Project of Civil Aviation Flight University of China in 2014(X2014-28)

** 通信作者:419025046@qq.com Corresponding author:419025046@qq.com

管制扇区的不断增加,各机场对航空通信频率的需求量迅速增长,各类电子设备大量普及与应用^[2],使得民航无线频谱占用急剧增加,各类干扰事件时有发生。其中,民航雷达的电磁干扰问题愈加突出^[3-4],电磁环境变得尤为复杂,严重地影响了飞行安全,特别是一些信号较强的干扰源可导致通话中断、雷达失效等。虽然民航的大多数设备都有备份(即主机发生故障后,可以马上启用备机),但电磁干扰可以令主备机同时失效^[4]。

目前,国内有部分学者对民航雷达的电磁环境评估进行了研究:张磊等^[1]通过对西安机场建设雷达站周围电磁环境的监测、预测,分析了建设雷达站对周围电磁环境的影响;孔雨飞^[2]提出根据天线系数公式,对机场无线电台站电磁环境进行评估,给出了保护方案;高水生等^[5]利用电磁辐射分析仪对成都、新疆区域管制中心内雷达的电磁辐射污染源状况进行了监测,根据 GB8702-88 的相关限制要求,分开机、关机两种状态对各测试点的电磁辐射状况进行了评定,并根据测试结果有针对性地提出了电磁辐射防护措施;费伟^[6]对二次雷达的电磁环境保护要求、电磁环境测试系统灵敏度要求及测试过程等关键技术进行了研究,并给出了测试建议。

但是,众多学者都是针对雷达的测试内容进行研究,并未涉及对民航雷达电磁环境评估方法的探讨。此外,目前国内尚未制定民航雷达电磁环境评估方法的标准。本文通过研究普遍适用于雷达电磁环境的评估方法,旨在从源头上遏制电磁干扰的发生,保障雷达的正常运作和飞行安全。

2 雷达电磁环境评估方法

评估雷达的电磁环境,是为了保护雷达的电磁环境,使得雷达的电磁干扰在其正常工作允许的影响范围之内,不会对雷达的工作造成干扰。那么,应该保证干扰源产生的干扰场强不大于雷达工作允许的最大干扰场强,同时,也应该保证雷达信号的覆盖范围在可接受的影响范围之内。

根据 MH/T4003-2014《民用航空通信导航监视台(站)设置场地规范 第 2 部分:监视》^[7]和 GB13618-92《对空情报雷达电磁环境保护要求》^[8],结合实际经验,对民航雷达的电磁环境评估主要从有源干扰和无源干扰两个方面进行,流程如图 1 所示。首先判断当前的雷达工作环境是否满足

我国民用航空雷达设置的场地保护要求,当不满足要求时,应将待评估障碍物作为干扰源,从有源干扰和无源干扰两个方面对当前雷达的电磁辐射情况进行评定;然后分别计算这些干扰源对雷达运行产生的干扰,判断是否在雷达正常工作所需的电磁环境要求范围内,当同时满足有源干扰和无源干扰要求时,可以判断当前雷达的电磁环境满足雷达正常工作要求;反之,则不满足。若不满足,寻求相应的解决办法,以使电磁环境能满足雷达工作要求;若找不到合适的解决办法,则说明待评估障碍物不满足雷达的工作要求。

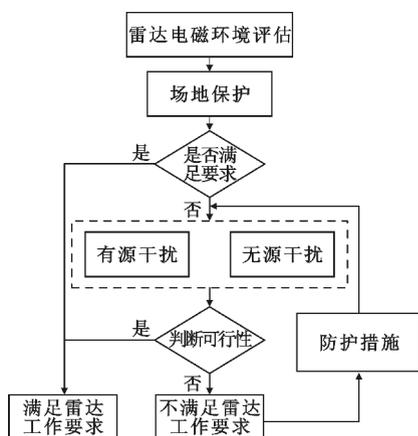


图 1 雷达电磁环境评估流程

Fig. 1 Flowchart of electromagnetic environment assessment method for civil aviation radars

2.1 雷达场地保护要求

场地保护是在雷达站的作用范围之内,根据已有的规范标准,评估干扰源在不影响雷达正常运行时应满足的场地要求。

文献[7]附录 B 规定了雷达台站(近/远程一次监视雷达、二次监视雷达)对干扰源和障碍物的防护间距要求,其中,平面防护间距为典型值,而对于具体的实际情况,可以按照 2.2 节和 2.3 节中的方法进行计算。

2.2 有源干扰

有源干扰是指干扰能量由雷达之外的辐射源(有源干扰源)产生,破坏雷达检测、追踪目标^[9]。有源干扰分析主要分析有源干扰源的电磁信号对雷达正常运行造成的影响程度。

参照 GB13618-92《对空情报雷达电磁环境保护要求》^[8],对有源干扰进行分析主要分为两类:一

是随机高频脉冲干扰;二是接收机通频带以外的调幅、调频干扰。在雷达接收机输入端的最大容许干扰电压有效值(单位 μV)为

$$U_{j\text{fmax}} = 0.48CU_{\text{nf}} \quad (1)$$

式中: C 为相当于白噪声最大容许干扰电压的增量系数; U_{nf} 为等效到接收机输入端的系统噪声电压有效值(单位 μV),对于 300 ~ 3 000 MHz 的雷达接收机取 0.85 μV 。

最大容许干扰电压峰值(单位 $\text{dB}\mu\text{V}$)为

$$U_{j\text{p}\Delta\text{fmax}} = K_{\Delta\text{f}} + U_{j\text{pmax}} \quad (2)$$

式中: $K_{\Delta\text{f}}$ 为干扰信号频率偏离接收机工作频率 Δf 的接收机带外抑制系数; $U_{j\text{pmax}}$ 为接收机通频带内最大容许干扰电压峰值(单位 $\text{dB}\mu\text{V}$)。

主要参数值见表 1 ~ 3。

表 1 不同性质随机高频脉冲干扰的增量系数和接收机输入端最大容许干扰电压、功率

Tab. 1 The incremental coefficient of random high frequency pulse interference and the maximum allowable interference voltage and power of receivers'input

干扰源	增量系数 C	$U_{j\text{fmax}}/\mu\text{V}$	$U_{j\text{fmax}}/\text{dBm}$
高压架空输电线路、变电站	3.0	1.200	-105
电气化铁路	4.0	1.600	-103
汽车公路	4.0	1.600	-103
高频热合机	4.0	1.600	-103
工业电焊	5.4	2.032	-100
高频理疗机	5.4	2.032	-100
高频炉	5.4	2.032	-100

表 2 接收机带外抑制系数

Tab. 2 The receiver out-band rejection coefficient

频偏/MHz	$K_{\Delta\text{f}}/\text{dB}$	
	80 ~ 300 MHz	300 ~ 3 000 MHz
0.3	10	
0.5	20	
1.0	50	
1.5	63	10
2.0	70	33
2.5		51
3.0		62
3.5		66
4.0		70

表 3 接收机通频带内最大容许干扰电压、功率

Tab. 3 The maximum interference voltage and power of the receiver passband

干扰种类	$U_{j\text{pmax}}/(\text{dB}\mu\text{V})$		$U_{j\text{pmax}}/\text{dBm}$	
	80 ~ 300 MHz	300 ~ 3 000 MHz	80 ~ 300 MHz	300 ~ 3 000 MHz
调幅	6.0	6.9	-101.0	-100.0
调频	18.0	18.7	-89.0	-88.3

对有源干扰的实际测量记为 $E_{j\text{p}}$,一般为场强值,将其与雷达最大允许干扰场强 $E_{j\text{pmax}}$ 进行比较:

$$E_{j\text{p}} < E_{j\text{pmax}} \quad (3)$$

若不等式成立则说明不会对雷达的正常运行造成影响;反之,则影响。

MH/T4003-2014 附录 B.2 中规定,空管雷达对高压架空输电线路、变电站、铁路、汽车公路及工医学射频等最大允许干扰场强按式(4)计算:

$$E_{j\text{pmax}} = U_{j\text{fmax}} + 20 \times \lg f - G - 10 \times \lg Z + \Delta E_{\text{gp}} + L - 9.8 \quad (4)$$

式中: $E_{j\text{pmax}}$ 、 $U_{j\text{fmax}}$ 同前; f 为信号频率(MHz); G 为雷达天线增益(dB); Z 为雷达接收机输入阻抗(Ω); ΔE_{gp} 为准峰值场强 $E_{j\text{q}}$ 与峰值场强 $E_{j\text{p}}$ 分贝数之差(dB); L 为雷达天馈系统损耗(dB)。

2.3 无源干扰

无源干扰是指雷达的信号照射到具有反射或吸收电磁波的器材后散射的回波^[9-10]。无源干扰分析主要是将影响设备作为无源干扰(障碍物),计算对雷达造成的遮蔽影响。

MH/T4003-2014 附录 C 雷达台站场地保护区遮蔽限制要求^[7]中给出了单体(或密集)障碍物(在水平方位角度上的单个障碍物或障碍物群)对雷达台站遮蔽角的计算公式。该规定分垂直遮蔽角 $\theta_{\text{垂直}}$ 和水平遮蔽角 $\theta_{\text{水平}}$ 对雷达的遮蔽角进行计算,当两者同时超过允许范围时,说明障碍物不满足雷达台站的场地保护要求;只要其中一个满足要求,则满足雷达台站的场地保护要求。具体计算按照式(5)和式(6):

$$\theta_{\text{垂直}} \leq 0.25^\circ,$$

即

$$\frac{B-T}{1000D} - \frac{D}{16970} \leq \tan 0.25^\circ; \quad (5)$$

$$\theta_{\text{水平}} \leq 1.5^\circ,$$

即

$$\frac{W}{1000D} \leq \tan 1.5^\circ. \quad (6)$$

式(5)中: B 为障碍物海拔高(m); T 为天线海拔高(m); D 为障碍物距台站距离(km)且 $D \leq 30$ 。要求净高度,即 $B-T$ 在1 km处不大于4.4 m,在2 km处不大于8.9 m,在4 km处不大于18.4 m。

式(6)中: W 为障碍物水平宽度(m); D 为障碍物距台站距离(km)且 $D \leq 30$ 。要求障碍物宽度在1 km处不大于26 m,在2 km处不大于52 m,在4 km处不大于104 m。

3 实例分析

本文采用中南地区某机场拟建磁悬浮专线实例,对上述雷达电磁环境评估方法进行分析。如图2所示,根据规划,该线路距离机场二次雷达^[11-12]站的最近距离为402.7 m,拟建磁悬浮线路距离雷达站天线最近处的地面标高为74.15 m;雷达站的地面标高为86.56 m,塔高12 m;线路轨面标高与雷达站的发射塔相对高度差为24.41 m;磁悬浮车辆最高处与发射塔的相对高差为20.54 m。

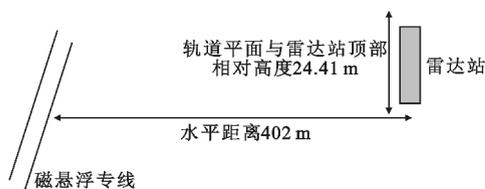


图2 磁悬浮专线与雷达站相对位置

Fig.2 Relative position between maglev line and radar station

3.1 雷达场地保护要求影响分析

该磁悬浮专线属于电气化运输,根据文献[7]附录B,有雷达台站对电气化铁路的防护间距要求为不小于700 m^[3]。而该磁悬浮列车最近处距离二次雷达仅402.7 m,不满足民航雷达的防护间距要求,因此需要进一步评估。

3.2 有源干扰分析

首先,计算该机场二次雷达允许的最大干扰场强。参照表1, U_{fmax} 取1.6 μV 。根据式(4),二次雷达下行接收频率 f 为1 090 MHz,电气化铁路的准峰值场强与峰值场强分贝数之差参考国家标准GB13618-92,可以得到空管二次雷达最大干扰场强为25.15 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ 。那么式(3)等价于式(7),通过计算该磁悬浮线路在二次雷达下行频率1 090 MHz产生的电磁干扰衰减到二次雷达接收天线处的干扰场强,将其与二次雷达允许的最大干扰场强进行比

较,若式(7)成立,则说明不会对二次雷达的运作产生影响;反之,则有影响。

分别以磁悬浮列车牵引、制动运行,测量并计算产生的有源干扰,具体分析如表4所示。对每种列车运行状态分峰值、准峰值和平均值3种扫描类型进行扫描,得到在距离列车10 m处的干扰场强值;然后根据自由空间传播的信号场强计算公式(8),推算得到距离线路402.7 m(等效于线路距二次雷达站最近点的距离)处的干扰场强值;进而判断式(7)成立与否:

$$E_{ifmax}^{ER} < 25.15, \quad (7)$$

$$E_s = 74.77 + 10 \lg P - 20 \lg d. \quad (8)$$

式中: E_s 为信号场强(单位dB $\mu\text{V}/\text{m}$); P 代表有效发射功率(单位W); d 是计算点距雷达的距离(单位km)。

表4 列车牵引和制动时产生的1 090 MHz干扰场强
Tab.4 1 090 MHz interference field strength generated by train traction and braking

列车状态	扫描类型	干扰场强		二次雷达最大允许干扰场强	公式(7)成立与否
		10 m处	402.7 m处		
牵引	峰值	70	37.9	25.15	否
	准峰值	53	20.9		是
	平均值	50	17.9		是
制动	峰值	70	37.9	25.15	否
	准峰值	55	22.9		是
	平均值	55	22.9		是

由表4可以看出:在磁悬浮列车牵引和制动时,以峰值场强计算,得到的磁悬浮列车产生的无线电脉冲在二次雷达接收频率内的干扰场强,会影响二次雷达的正常运行;以准峰值和平均值场强计算,不会影响二次雷达的正常运行。

3.3 无源干扰分析

将该磁悬浮专线作为绝缘障碍物,对二次雷达的运行影响进行评估。

(1) 垂直遮蔽分析

磁悬浮线路最近点距民航雷达402.7 m,即 $D = 0.4027$ km;该处线路海拔高为74.15 m,列车厢高3.87 m,则障碍物海拔高 $B = 74.15 + 3.87 = 78.02$ m;雷达天线中心线海拔高度 T 为地面标高、塔高及雷达半径2.75三者之和,即 $T = 86.56 + 12 + 2.75 = 101.31$ m。根据式(5),净高度 $B - T = -23.29$ m,满足其净高度要求;代入计算,得到不等式成立。

(2) 水平遮蔽分析

根据式(6)有 W 为障碍物水平宽度即线路的水平宽度,也就是无限宽,所以不等式不成立。

国家标准 MH/T4003-2014 中规定:当垂直遮蔽角和水平遮蔽角同时超过允许范围时,不满足雷达台站的场地保护要求。因此,磁悬浮线路满足对民航雷达的场地保护要求。

3.4 总体分析

综上分析,根据上述雷达电磁环境评估方法,该机场的磁悬浮工程不满足二次雷达的场地规范要求。但是,进行有源干扰和无源干扰分析发现,作为无源干扰时,该线路满足二次雷达的场地要求;作为有源干扰分析时,该线路在牵引和运行状态运作下,测量产生的准峰值和平均值干扰场强满足二次雷达的干扰场强要求,而峰值干扰场强不满足二次雷达的干扰场强要求。

已知该磁悬浮专线与上海磁悬浮列车原理相同,均采用常导电磁铁磁吸悬浮和车载短定子单边直线电机牵引的中低速磁悬浮列车系统,技术原理类似。上海的磁悬浮工程中,为了减少列车运作时产生的电磁干扰,在列车的取流靴上增加了金属屏蔽罩。

因此,本文基于实例分析结果和上海磁悬浮列车的防护措施,对上海磁悬浮列车的屏蔽效能进行实测分析。分别对上海磁悬浮列车线路在列车经过和无列车经过时,在二次雷达接收和发射时的频率上产生的电压值进行测量,测量时保持峰值不变,结果如表 5 所示。

表 5 有无列车经过时在 1 030 MHz、1 090 MHz 上的电压值
Tab. 5 The voltage value of the train passing or not on 1 030 MHz, 1 090 MHz

频率/MHz	背景电压/dB μ V	测试电压/dB μ V
1 030	27.0	27.0
1 090	26.4	26.4

测量结果表明列车运行时的电压较无列车经过时的背景电压无变化,即由于上海磁悬浮在取流靴增加了金属屏蔽罩,列车经过时没有产生干扰信号。因此,实例中的拟建磁悬浮专线列车可以参考该方法,在取流靴上增加金属屏蔽罩,屏蔽列车运作时产生的电磁干扰。该方法可以作为有效的措施,为减少该磁悬浮专线对机场二次雷达的电磁干扰影响提供参考依据。

4 结束语

民航雷达的正常运行涉及航空器运行、机场运

作和空管指挥等有关民航安全方方面面。科学合理地评估雷达的电磁环境,保障其正常运行显得尤为重要。本文系统性地提出了一套雷达电磁环境评估方法,从有源干扰和无源干扰两个方面对雷达的电磁环境进行评估。该方法可用于新建雷达基站或周边设施的电磁环境评估方法,也可用于雷达台站周边电磁辐射污染源的分析。因此,本文的研究具有十分重要的现实意义,可以一定程度上促进和保障雷达的合理规范运行,保障民航安全;同时,该方法也填补了我国民航雷达电磁环境评估标准研究的空白,希冀为我国民航雷达电磁环境评估相关标准、规章体系的建立和完善贡献微薄之力。在此研究基础上可进一步对该套方法逐渐补充完善,增强实用价值。

参考文献:

- [1] 张磊,陈茜,李少婷,等. 民航空管雷达站电磁环境影响分析[J]. 环境与可持续发展,2014,39(6):50-53. ZHANG Lei, CHEN Qian, LI Shaoting, et al. Analysis on electromagnetic environmental impact of civil air traffic control radar station [J]. Environment and Sustainable Development, 2014, 39(6): 50-53. (in Chinese)
- [2] 孔雨飞. 天津市机场无线电台站电磁环境评估与测试研究[D]. 北京:北京邮电大学,2013. KONG Yufei. The electromagnetic environment testing and evaluating of tianjin airport radio station [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
- [3] 高云,畅洪涛,聂宏斌,等. 一起公众移动通信基站信号干扰民航二次雷达的案例分析[J]. 中国无线电, 2009(11):67-71. GAO Yun, CHANG Hongtao, NIE Hongbin, et al. A case study of the civil aviation secondary surveillance radar's electromagnetic interference received from signals of public mobile communication base station [J]. China Radio, 2009(11):67-71. (in Chinese)
- [4] 李暄. 电磁干扰 飞行界的“隐形杀手”[N]. 中国民航报,2015-03-13(3). LI Xuan. Electromagnetic interference “Invisible Killer” in flight field [N]. CAAC Journal, 2015-03-13(3). (in Chinese)
- [5] 高水生,蔡意,饶丹. 成都区域管制中心电磁辐射环境影响分析与防护措施[J]. 环境科学与管理,2010,35(10):190-194. GAO Shuisheng, CAI Yi, RAO Dan. The electromagnetic radiation environmental impact analyses and protection countermeasures in Chengdu area control center [J]. Environment Science and Management, 2010, 35(10): 190-

194. (in Chinese)
- [6] 费伟. 关于二次雷达电磁环境测试方法的研究[C]//2011 年全国无线及移动通信学术大会论文集. 北京:人民邮电出版社,2011:405-407.
- FEI Wei. Research on the measure method of electromagnetic environment of secondary surveillance radar [C]//National Wireless and Mobile Communication Academic Conference Proceedings in 2011. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2011: 405 - 407. (in Chinese)
- [7] MH/T4003-2014,民用航空通信导航监视台(站)设置场地规范 第2部分:监视[S].
- MH/T4003-2014, Technical standards for ATC secondary surveillance radar Part 2: surveillance[S]. (in Chinese)
- [8] GB13618-92,对空情报雷达电磁环境防护要求[S].
- GB13618-92, Electromagnetic environment protection requirements for air intelligence radar[S]. (in Chinese)
- [9] 屈兵超,文若鹏. 现代战场复杂电磁环境[M]. 沈阳:白山出版社,2010.
- QU Bingchao, WEN Ruopeng. Modern battlefield complex electromagnetic environment [M]. Shenyang: Baishan Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 郝佳新,甘斌. 复杂电磁环境下防空雷达的探测模型研究[J]. 计算机仿真,2009,26(6):33-36,69.
- HAO Jiaxin, GAN Bin. An air defence radar's detection model in complex electromagnetic environment[J]. Computer Simulation, 2009, 26(6): 33-36, 69. (in Chinese)
- [11] 张尉. 二次雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

ZHANG Wei. Secondary radar principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. (in Chinese)

- [12] FAAO6310. 6, Primary/secondary terminal radar siting handbook [S].

作者简介:



韩丹(1991—),女,陕西渭南人,2013年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为空中交通管理、雷达电磁环境评估;

HAN Dan was born in Weinan, Shaanxi Province, in 1991. She received the B. S. degree in 2013. She is now a graduate student. Her research concerns air traffic control and electromagnetic environment assessment of civil aviation radar.

Email: 419025046@qq.com

蒋豪(1989—),男,四川雅安人,2013年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为空中交通管理;

JIANG Hao was born in Yaan, Sichuan Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2013. He is now a graduate student. His research concerns air traffic control.

Email: jiang_hao6666@163.com

杨晓嘉(1967—),男,四川泸州人,2000年获硕士学位,现为研究员,主要研究方向为通信、导航和监视。

YANG Xiaojia was born in Luzhou, Sichuan Province, in 1967. He received the M. S. degree in 2000. He is now a senior engineer of professor. His research concerns communication navigation and surveillance.

Email: atmyxj@163.com