doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.002

飞行器射频隐身技术内涵及性能度量研究*

朱银川**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘　要:在分析射频无源探测系统工作机理和国内外射频隐身研究情况基础上,指出射频隐身技术概念、多层次的隐身内涵和技术实现途径,提出了与敌对方侦察接收机技术体制和性能指标无关的、仅反映射频隐身自身性能的技术指标及其应用思路。

关键词:射频隐身;射频辐射源;性能变量;特征不确定性;联合熵

中图分类号:TN97　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-893X(2013)01-0006-06

Implication and Performance Metric Research of RF Stealth for Aircrafts

ZHU Yin-chuan

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Based on the analysis of the operational principles of RF passive detection system and RF stealth research home and abroad, this paper brings up concept, multi-level intention and technology realization ways of RF stealth, creatively points out the technical indexs and application of RF stealth, which are unrelated with technical indexs of opponent scout receiver.

Key words: RF stealth; radio emitter; performance metric; uncertainty of features; joint entropy

1　引　言

在现代信息化战场上,几乎所有的武器平台都装备有电子装备,特别是飞行器平台,其信息化能力发挥都离不开电磁信号辐射。如飞机中典型的射频传感器就包括航管/IFF、雷达、电台、无线电高度表等,无人机中还必须加装无线电遥测遥控设备。

但在开放的战场电磁空间中,敌方电子侦察系统可通过截获我方发射的射频辐射信号,运用各种信号与信息处理技术来获取有用的情报信息,如射频辐射源的有关参数、类型、空间位置等,对我飞行器平台作战力和生存力形成严重威胁。因此有必要在保障飞行器射频传感器任务前提下,通过射频隐身使敌方电子侦察系统无法侦测或大幅度降低其截获我方射频信号能力。

但是关于射频隐身的指标体系至今未见国内外公开报道,常见的低截获信号研究也是建立在电子对抗的思路上,指标体系与对方侦察接收机性能指标紧密关联,重点用于评判被截获性能,而且对方的侦察接收机性能指标不仅与其技术体制相关还和其接收设备指标相关,无法指导开展射频隐身技术研究。为此,需要清晰地整理出射频隐身的概念和内涵,并开发一种既能描述射频隐身性能又可抛开侦察接收机性能指标的表征参量。

2　射频隐身技术概念和内涵

隐身是武器平台相对于敌方探测系统而言,目的是有效降低武器平台被敌方发现、跟踪、识别和攻击的概率,根据敌方探测器种类(如雷达、红外探测器、射频无源探测、声纳等)的不同,可分为雷达隐

* 收稿日期:2012-08-22;修回日期:2012-11-12　　Received date: 2012-08-22; Revised date: 2012-11-12
** 通讯作者:zhuyinchuan@163.com　　Corresponding author: zhuyinchuan@163.com

身、红外隐身、射频隐身、声隐身等。

射频隐身即是相对于敌方的射频辐射源侦测定位系统而言的,能否隐身由飞行器平台射频隐身能力和敌方探测器的探测能力共同决定。其中敌方探测器的探测能力不由我方掌握的,因此射频隐身技术就是我方能实施的在保持机载射频传感器任务性能(飞机达成其任务目的)前提条件下,减缩、控制我机载射频有源传感器工作时辐射的射频目标特征信号,实现敌对我射频辐射信号低可探测性或对侦测平台的信号不确定。

飞行器射频传感器辐射的射频信号从发射、传输到被敌方无源探测系统截获、分析处理过程如图 1 所示。

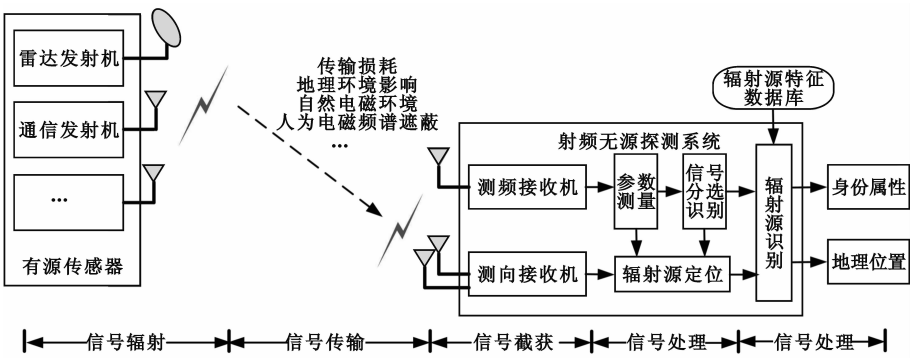


图 1　飞行器射频辐射信号被侦察识别过程

Fig.1 Scouted and indentified process of radio signal of aircraft

如图 1 所示,飞行器射频隐身的最终效果是敌方射频无源探测系统的信息处理结果上无输出或无序混乱。因此,我们可以将射频隐身理解为多个层面的隐身。

(1)使无源探测系统接收到的辐射信号太弱,无法满足其信号检测门限,也就谈不上进一步的参数测量、信号分选、目标识别等。此层面可以理解为能量检测方面的隐身。

(2)使满足无源探测系统信号检测门限的射频辐射信号淹没在其周边电磁环境信号之下,使侦收机无法完成混乱无序的重叠信号分离,同样也就谈不上进一步的参数测量、信号分选等,相当于大脑“弱智”。此层面可以理解为信号处理方面的隐身。

(3)在无源探测系统具备实现对飞行器平台信号的分离能力时,通过飞行器平台系统或飞行编队的反制措施,促使无源探测系统无法完成对飞行器平台的定位、跟踪,相当于“瞎子”。此层面可以理解为隐身策略方面的隐身。

因此,飞行器射频隐身首先是尽可能地使敌方无源探测系统无法从能量上截获飞行器的射频辐射信号。

但实际中,大多数情况下无法满足这点,例如在自由空间中,雷达距离方程[1]和侦收机距离方程[2]分别如下:

$$R=\sqrt[4]{\frac{P_T G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_R}} \tag{1}$$

$$R_I=\sqrt[2]{\frac{P_T G_{TI} G_I G_{IP} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_I}} \tag{2}$$

式中,P_T为发射功率(均方根值);G_T为雷达发射天线增益;G_{TI}为雷达发射天线相对于侦收机方向上的天线增益;G_{IP}为侦收机天线相对于辐射源目标方向上的接收天线增益;G_R为雷达接收机处理器增益;G_I为侦收机处理增益;P_R为雷达接收机正确检测目标所要求的灵敏度;P_I为侦收机正确检测目标所要求的灵敏度;λ 为工作波长;σ 表示目标的雷达散射特征,即雷达截面(RCS)。

可以看出,雷达作用距离与其辐射特性(包括发射功率和天线增益)成 4 次方关系,侦收机作用距离与雷达辐射特性成 2 次方关系,所以很难保证敌方无源探测系统不能从能量上截获飞行器射频辐射信号,除非大幅度提升主旁瓣比值(改善 G_{TI}),故第一层面的射频隐身适用面很小。

另一方面,若通过改善雷达的处理增益(G_R)的同时,设法压缩敌方侦收机的信号处理增益,即增大辐射信号特征的不确定性,破坏侦收机的信号相关积累效果,降低其信号参数预估、分选和定位能力,则可以保证我飞行器辐射的射频信号在被敌方侦收机截获时,无法从复杂电磁环境信号中分选出来飞

行器射频信号,更无法通过对飞行器射频辐射信号的识别和定位达成对我飞行器定位、跟踪。

3 国外研究情况

20 世纪 70 年代初期美国在研制 F-117 的早期发现,作战过程中使用的常规射频传感器极易暴露自身位置,导致其精心设计的雷达隐身、红外受到破坏,由此认识到射频隐身的重要性并开展了技术研究,但尚不具备工程应用条件。故在 F-117 中没有加装雷达,取消了无线电导航,并在作战过程中只被动接收作战命令,从而实行全机电磁静默攻击。

为彻底解决此问题,20 世纪 70 年代中期开始由美国防预先研究计划局(DARPA)、美国空军和海军主持,以休斯飞机公司为主承包商进行了大量的射频隐身技术研究工作,并进行了大量试验验证。如 1979 ~ 1980 年针对法国幻影飞机的 Cyrano 雷达和 F-111A 飞机的无源探测系统完成了第一个射频隐身的飞行试验,仅滞后于 F-117A 验证机首飞(1977 年 12 月)一年多的时间。射频隐身后雷达参数为 5 W/波束、9 波束、320 MHz 带宽、天线旁瓣 -55 dB、LPI 波形。射频隐身的作战对象为 F-111A 飞机载的 AN/ALR-62 雷达寻的告警接收机(RHAW)(当时美国最先进的 RHAW)、ELINT(电子情报)和反辐射导弹(ARM)。试验结果如表 1 所示。

表 1 Cyrano 雷达射频隐身前后被探测距离比较[3]
Table 1 Detected distance comparison of Cyrano before and after RF stealth

空空下视探测(探测距离 37 km)	RHAW 对雷达探测距离/km	ELINT 对雷达探测距离/km	ARM 对雷达探测距离/km
采用射频隐身技术前	346.30	2 187.20	55.00
采用射频隐身技术后	8.50	19.30	0.48
无源探测距离下降	降低了 97.5%	降低了 99.1%	降低了 99.1%

从表 1 可以看出,机载雷达采用射频隐身技术后,在保持雷达对目标作用距离不降低的条件下,无源探测系统 RHAW 对飞机的探测距离从346.3 km降低到8.5 km,无源探测系统 ELINT 的探测距离从 2 187.2 km降低到19.3 km,反辐射导弹的无源探测距离从55 km降低到0.48 km。可见,采用射频隐身技术后,3 种无源探测系统的探测距离缩减均在 97%以上,射频隐身的效果十分显著。

20 世纪 80 年代中期,前苏联的无线电侦察与反侦察研究人员提出了无线电隐蔽的概念,指出无线电隐蔽是用于降低无线电侦察效果的综合技术和组织措施。A.и.库普里亚诺夫在其所著的《无线电侦察与反侦察》中也引用了无线电隐蔽的概念,并进一步分析能量隐蔽、无线电设备信号参数的隐蔽、侦察和伪装方法[4]。但其分析是建立在对抗的场景下,即无线电隐蔽的性能始终与侦察方接收机的性能指标高度关联,因此其实质是分析无线电隐蔽的战术应用效果。尽管文中指出在对抗条件下,因为敌方的无线电侦察设备的性能可能随时改进,造成无线电反侦察功能失效的问题,但文中并未对此作进一步的详细阐述和分析,特别是无线电设备自身的、与侦察方参数无关的隐蔽信号特征参量问题。

4 射频隐身性能的度量

对于雷达隐身性能表征指标如 RCS 至今已被国内外广泛应用,其仅仅反映了自身平台对雷达照射波的隐身性能,与对方雷达技术体制和性能指标无关,能很好地指导研究平台结构和隐身涂层材料的研究。同样,红外隐身也提出了红外辐射强度的表征指标,反映了隐身平台的对外红外辐射特性,与对方红外探测设备的技术体制和性能指标无关,能很好地指导平台结构、燃料和红外隐身措施的研究。相反,射频隐身至今仍沿用电子对抗的思路和指标体系,常见的截获概率、截获球半径等指标均与对方侦察接收机技术体制和性能指标紧密关联,不利于指导后续的射频隐身技术研究。

事实上,射频传感器的辐射功率、辐射时间、信号格式、天线波束特性均与侦察方技术指标无关而和射频隐身性能的特征参量紧密关联。对于信号的辐射功率、辐射时间和天线低副瓣技术方面,国内外已有成套的指标表达形式。但对于辐射信号的信号格式表征方面,却未见公开文献报道。因此本文提出反映射频隐身性能的信号特征参量,用以描述辐射信号的信号格式。

根据图 1 所示的侦收机截获过程图,一般的信号侦收过程中必须至少在同一侦收时段内捕捉到多个特征相同或相似的特定信号段方能确认该信号的存在,并借此确认辐射源平台的目标属性。也就是

说,即使捕捉到 1 个信号段,特别是脉冲信号很可能会在信号处理中被误认为干扰脉冲或虚警信号而被过滤掉,从而不在侦收系统操作界面上实时显示出来,尽管可能会在后期的数据挖掘中找出该信号,但也因不具时效性而失去战术使用价值,特别是对于飞行器这类高速运动目标。按此思路,则对于信号特征不确定的短脉冲信号一定具有隐身性能,那么针对给定波形特征空间中的特征集合,建立新型的波形特征不确定性度量方法和度量函数,优化选择特征子集,进而实现波形参数不确定性的最大化也就成为其中一个研究重点。

为了提高飞行器射频信号对侦察接收机的射频隐身能力,使其无法完成信号的分选、特征识别和跟踪,则需要使侦察接收机从飞行器射频隐身波形中能够提取的有用信息越少越好,也就是让射频波形参数的不确定性越大越好。在此设定在特征子集 X 中赋予一定结构关系,构成表示射频隐身波形的某特征子空间 $\tilde{X}$,进而构造出波形特征不确定性度量函数 $H(X)$,用以表示由 $\tilde{X}$ 所决定的射频隐身波形特征不确定性。

根据基于信息度量中的结构度量、统计度量、语义度量、语用度量、模糊度量的原理与方法,我们拟以熵的形式来对波形特征的不确定性进行度量。即若 X 是一个随机变量,按照熵的定义[5]:

$$H(X) = E[\lg p(x)] = -\int_x p(x)\lg p(x)\mathrm{d}x \quad (3)$$

其中,$H(X)$越大,则随机变量 X 所包含的不确定性就越高。

在离散系统中,根据概率论可以把离散的随机变量 x 和它的概率分布表示为[6]

$$x \sim \bar{p} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_k \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_k \end{pmatrix},$$

$$p_i \geqslant 0, i = 1,2,\cdots,k, \sum_1^k p_i = 1 \quad (4)$$

所以离散变量的熵即可表示为

$$H(p_1,p_2,\cdots,p_k) = -\sum_1^k p_i \log_c p_i, C > 0 \quad (5)$$

如式(5)所示,熵反映了随机变量 X 的概率分布函数 $F(x \sim \bar{p})$,可应用于后续分析熵或根据熵设计随机变量 X 的跳变图案。

由于飞行器平台的射频信号所包含特征多,样本数据量大,因此其特征不确定性一定具有空间高维复杂性特点。参见表 2,某隐身飞行编队由多个同类或异类隐身飞行平台组成,其中单个隐身飞行平台也是由多个射频传感器组成,对于单个射频传感器的射频特征则由多个射频波形参数组成等,如此可以不断细分下去。

给定某单个飞行器平台 A 的 1 号射频传感器射频波形样本数据集 $I = (f, \tau, T, \phi, V, P, \cdots)$,其中 $f = \{f_1, f_2, f_3, \cdots, f_\alpha\}$、$\tau = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \cdots, \tau_\beta\}$、$T = \{T_1, T_2, T_3, \cdots, T_\delta\}$等分别表示平台 A 的 1 号射频传感器射频波形的各维度参数样本集,其中工作频点样本集 f 中共存在 α 个点,脉宽样本集 τ 中存在 β 种参数,周期样本集 T 中存在 δ 种参数,等等。而且样本数据集 $I = (f, \tau, T, \phi, V, P, \cdots)$的每个子特征及子特征中包含的孙特征项均可看作随机变量,于是特征子集 $\tilde{I} = [f, \tau, T, \phi, V, P, \cdots]$就是一个由多个子特征$[f, \tau, T, \phi, V, P, \cdots]$及孙特征(如$[f_1, f_2, f_3, \cdots, f_\alpha]$、$[\tau_1, \tau_2, \tau_3, \cdots, \tau_\beta]$等)组成的随机变量组。

于是参考式(4)~(5)可以针对所研究的特征子集,分别计算出 $H(f)$、$H(\tau)$、$H(T)$等各项特征参数不确定性的熵,表示为

$$H(f) = -\sum_1^\alpha p(f)_i \log_c p(f)_i \quad (6)$$

$$H(\tau) = -\sum_1^\beta p(\tau)_i \log_c p(\tau)_i \quad (7)$$

若设计隐身波形时各组变化特征项之间均不相关,则可以得到平台 A 的 1 号射频传感器射频波形的不确定性熵:

$$H(A1) = H(f) \times H(\tau) \times H(T) \times \cdots\cdots \quad (8)$$

同理可以计算出 2 号、3 号……传感器的射频波形的不确定性熵 $H(A_2)$、$H(A_3)$……若本平台内的各射频传感器不相关,则可以得到平台 A 的射频特征不确定性熵

$$H(A) = H(A_1) \times H(A_2) \times H(A_3) \times \cdots\cdots \quad (9)$$

考虑电磁环境影响时,则可以将电磁环境参数作为一个虚拟的传感器对待。以波形工作频点为例。在该传感器射频辐射的时间和空间中,工作频段上一定存在包括本传感器频点在内的 m 个信号频点,通过背景监测可以得到各个频点出现概率,由此计算出此虚拟传感器的频点熵值 $H(A_{0f})$,同样计算得到 $H(A_{0\tau})$、$H(A_{0T})$等,再共同应用于式(8)~(9)中,得到平台 A 在实际电磁环境下射频特征不确定性的熵。

同样道理可以引入到编队之中。但实际应用

中，飞行器编队各平台间不可能是不相关的，因此编队的射频特征不确定熵计算要顾及平台之间相关性，是一种条件熵。还需要引入编队平台间相关函数、边界条件等参与计算，复杂性较高，在此不再展开论述。

如表 2 所示，飞行器平台包含有多个射频传感器，每个传感器的射频信号波形又具有多维的信号特征。

表 2　单一传感器、射频参数、单平台以及多平台编队的联合熵构成表

Table 2 Joint entropy table of single sensor, RF parameter, single platform and multi-platform formation

飞行器平台类			编号	取同一时空背景中存在多个辐射源目标				联合熵	
				特征项		特征项的不确定熵	说明		
平台(A)			传感器 1	载频	f_1	$H(A_{1f}) = -\sum_{1}^{m} p(f)_i \log_d p(f)_i \cdot \frac{n!}{r!(n-r)!}$	α 个频点	$H(A_1) = H(A_{1f}) \times H(A_{1\tau}) \times H(A_{1T}) \times \cdots\cdots$	$H(A) = H(A_1) \times H(A_2) \times \cdots \times H(A_M)$
				脉宽	τ_1	$H(A_{1\tau}) = -\sum_{1}^{\beta} p(\tau)_i \log_d p(\tau)_i$	β 种脉宽		
				周期	T_1	$H(A_{1T}) = -\sum_{1}^{\gamma} p(T)_i \log_d p(T)_i$	γ 种周期		
				⋮	⋮	⋮	⋮		
			传感器 2	载频	f_2	$H(A_{2f}) = -\sum_{1}^{\varepsilon} p(f)_i \log_d p(f)_i$	ε 个频点	$H(A_2) = H(A_{2f}) \times H(A_{2\tau}) \times H(A_{2T}) \times \cdots\cdots$	
				脉宽	τ_2	$H(A_{2\tau}) = -\sum_{1}^{\zeta} p(\tau)_i \log_d p(\tau)_i$	ζ 种脉宽		
				周期	T_2	$H(A_{2T}) = -\sum_{1}^{\eta} p(T)_i \log_d p(T)_i$	η 种周期		
				⋮		⋮	⋮		
			⋮	…	…	…	…	…	
			传感器 M	载频	f_M	$H(A_{mf}) = -\sum_{1}^{\kappa} p(f)_i \log_d p(f)_i$	κ 个频点	$H(A_M) = H(A_{Mf}) \times H(A_{M\tau}) \times H(A_{MT}) \times \cdots\cdots$	
				脉宽	τ_M	$H(A_{m\tau}) = -\sum_{1}^{\lambda} p(\tau)_i \log_d p(\tau)_i$	λ 种脉宽		
				周期	T_M	$H(A_{mT}) = -\sum_{1}^{\mu} p(T)_i \log_d p(T)_i$	μ 种周期		
				⋮	⋮	⋮	⋮		
编队	同类	平台(B_1)	1	计算同平台(A)				$H(B_1)$	$H(B) = H(B_1) \times H(B_2) \times \cdots \times H(B_n)$
		平台(B_2)	2	计算同上				$H(B_2)$	
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		平台(B_n)	N	计算同上				$H(B_n)$	
	异类	平台(C)	–	计算同上				$H(C)$	
		平台(D)	–	计算同上				$H(D)$	

5　不确定性熵值的考核方法和应用

如图 2 所示，当已知特征参数的跳变图案时或通过实际仪器进行测试后，可以得出该特征参变量分布概率或概率密度函数，继而计算出该特征参变量的不确定性熵值。

反之，在对射频传感器的设计过程中，若要求提升某特征参变量的不确定性熵值，或者直接要求不确定性熵值达到某个目标时，可以计算出该特征参变量的概率密度函数或分布概率，再按照分布概率设置该特征参变量对应的最佳跳变图案。

同理，参见表 2 计算方法，可以利用联合熵的计算方法进行多维、多传感器以及多平台编队时的不确定性熵值分析和设计，合理分配各级、各特征参变

量所对应的最佳跳变图案。

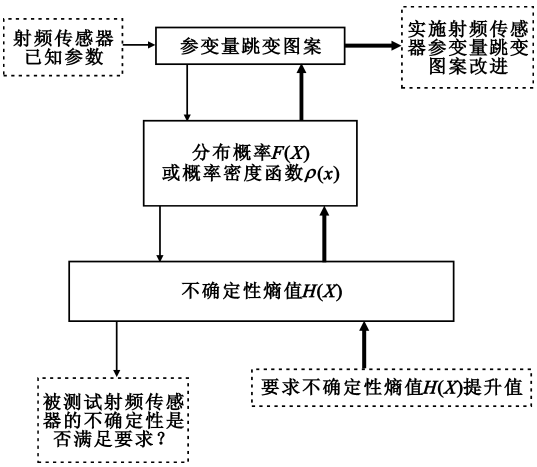


图 2　不确定性熵的应用流程图

Fig.2 Application flowchart of entropy

6　结束语

通过分析无源探测机理,提出了射频隐身技术概念和内涵是多层次隐身的观点和技术实现途径,并切断敌对方侦察接收机技术体制和性能指标与射频隐身指标高度关联性,提出了反映射频隐身传感器及平台的不确定性技术指标定义、分析计算方法和设计应用方法,可为射频隐身技术、低截获信号设计等研究人员提供有价值参考。

本文中未提及条件熵的计算模型和分析,这需要在具体工程中结合实际来进一步深入研究。

参考文献:

[1]　Blake L A. 雷达距离性能分析[M].吴秉玮,赵扬,刘元林,等,译.南京:《SSS》丛书编辑部,1990.

Blake L A. Radar Range-Performance Analysis[M]. Translated by WU Bing-wei, ZHAO Yang, LIU Yuan-lin, et al. Nanjing: SSS Agency, 1990. (in Chinese)

[2]　Poisel R A.通信电子战系统导论[M].吴汉平,译.北京:电子工业出版社,2003.

Poisel R A. Introduction to Communication Electronic Warfare Systems[M]. Translated by WU Han-ping. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2003. (in Chinese)

[3]　Lynch D. 射频隐身导论[M].沈玉芳,译.西安:西北工业大学出版社,2009.

Lynch D. Introduction To RF Stealth Scitech[M]. Translated by SHEN Yu - fang. Xi′an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009. (in Chinese)

[4]　Kupriyanov A и.无线电侦察与反侦察[M].薛启凤,译.成都:电讯技术编辑部,1998.

Kupriyanov A и. Radio Reconnaissance and Anti-reconnaissance[M]. Translated by XUE Qi-feng. Chengdu: Telecommunication Engineering Agency, 1998. (in Chinese)

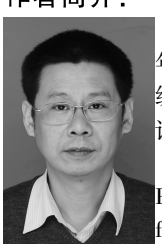
[5]　陈希孺. 概率论与数理统计[M].北京:中国科学技术大学出版社,2000.

CHEN Xi-ru. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 2000. (in Chinese)

[6]　沈世镒,陈鲁生. 信息论与编码理论[M].北京:科学出版社,2002.

SHEN Shi-yi, CHEN Lu-sheng. Information theory and coding theory[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:



朱银川(1968—),男,福建厦门人,1990 年于成都信息工程学院获学士学位,现为高级工程师,主要从事综合性电子信息系统论证工作。

ZHU Yin-chuan was born in Xiamen, Fujian Province, in 1968. He received the B. S. degree from Chengdu Institute of Information Technology in 1990. He is now a senior engineer. His research concerns demonstration of integrated electronic information system.

Email: zhuyinchuan@163.com

勘　　误

本刊 2012 年第 12 期第 1874 页左栏第 20 行“225400 MHz”应为“225 ~ 400 MHz”,特此更正。

本刊编辑部