

城市移动数字电视地面广播的信道噪声模型

王仲园^{1,2}, 金荣洪¹, 耿军平¹

(1. 上海交通大学电子工程系, 上海 200240; 2. 上海文广新闻传媒集团技术管理部, 上海 200041)

摘 要: 21 世纪以来, 中国的一些大城市先后开展了数字电视地面广播试验, 并实现了车载移动接收数字电视. 试验中发现: 车载天线因时空限制难以避开干扰源, 白噪声与脉冲相混合的噪声不断地影响着车载数字电视系统的接收效果. 为了进行高效的传播信号覆盖规划, 需掌握实际运行环境中数字电视地面广播信道的噪声情况. 本文介绍了上海市内公共交通线上 UHF 频段内某个频道的平均噪声功率测量结果; 通过对噪声功率概率累积分布曲线的回归分析, 不仅获得城市中三个典型交通环境下该 UHF 频道的噪声系数模型, 而且给出了频道噪声系数统计分布的上侧十分位数 K 倍方差值.

关键词: 数字电视; 地面广播; 超高频频段; 移动接收; 噪声系数

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 05-0811-05

Mobile Digital Television Channel Noise Models for Urban Terrestrial Broadcasting

WANG Zhong-yuan^{1,2}, JIN Rong-hong¹, GENG Jun-ping¹

(1. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Technical Supervision, Shanghai Media Group, Shanghai 200041, China)

Abstract: Since 21st century, the test service for digital TV terrestrial broadcasting has been successively carried out in some Chinese big cities, and bus commuters can watch TV programmes while traveling in the signal covered regions. In the trial, it has been found that the environment noise comprising two dominant and distinct components: white Gaussian noise and impulsive noise affects the reception of mobile TV on the vehicle continuously, and that when the equipped vehicle traces along the traffic courses, in a limited time and space, the TV antenna is not able to avoid the noise source from the environment. In order to plan high effective DTTV signal coverage, it is necessary for engineers to foreknow the noise level of a DTTV channel in the real electromagnetic environment. This paper introduces the results of average noise power of a digital TV channel in UHF band on public transportation lines in Shanghai. Not only the noise fact models but also the noise factor K times variance deviation of its upper decile under three typical communication environments has been obtained through the analysis of nonlinear regression of cumulative distribution functions on the test results.

Key words: digital television (TV); terrestrial broadcasting; ultrahigh frequency (UHF) band; mobile receiving; noise factor

1 引言

对于固定电视和便携式移动通讯的信号接收而言, 为避开环境中的噪声源, 可以改变天线接收方向或接收地点; 而车载数字电视接收天线在沿着车辆的规定线路移动过程中, 因不能随意改变天线位置和指向, 会接收到许多来自自然界与人为信号源发出的电波. 通常的自然界或人为噪声源可产生“静态”或“干扰”的两种类型噪声, 它们的统计特征明显不同; 干扰波的突出特征是它的脉冲特性, 并且在 VHF/UHF 频段内人为的干扰源占剧了主导地位^[1]. 事实上, 城市交通线路中移动数字电视的干扰主要来自交通工具的点火系统, 例如, 汽车产生的干扰脉冲具有 100 kHz - 2.45 GHz 带宽; 即使是汽车发动机处于空转, 3 米以外的天线仍然能够接收到较

大幅度的干扰信号^[2]. 中国开通或试播的移动数字电视地面广播均选择了 UHF 频段, 因此车载天线接收到的噪声功率明显高于屋顶固定天线和人行道上的移动天线. 国际电信联盟 (ITU-R) 提供了 UHF 频段在商业区、居住区和乡村中环境噪声功率模型^[3], 但是, 未明确推荐城市中心区域繁忙交通线路上的干扰噪声情况; 而且, 世界各地对城市道路中噪声的测量和模型研究^[4-8]也并不很多. 1997 年 Wilfred 和 Jean^[4] 在加拿大首都渥太华市的一条四车道高速公路上, 测量了 150 MHz - 500 MHz 频段内四个固定频率上汽车发出的干扰噪声. 同年 Manuel 等人^[5] 在西班牙首都马德里布满汽车的卡斯提亚大街旁, 对中心频率 762 MHz、带宽 10 MHz 频段内的干扰噪声分别进行了水平极化波与垂直极化波的测量, 结果表明城市道路的干扰波幅度在水平极化方向

上较大. 2002 年 Ming Hui 和 Kerr Huang^[6]在中国台湾选择 354—426MHz 频段内的六个频点测量其 1.44MHz 带宽内的噪声功率, 采用频域的噪声系数表达了不同区域(山坡旁的市中心、港口和高速公路出口)的通信噪声功率; 通过累积分布曲线表明垂直极化的噪声系数大于水平极化. David^[7]采用计算函数法构造出宽带噪声幅度的概率密度函数, 但模型的实用性取决于准确的参数估计. Wagstaff 与 Merricks^[8]将 100MHz 与 3GHz 之间 10MHz 带宽的人为噪声测量结果分解为高斯白噪声和脉冲噪声两个组成部分, 分析得出各频点上白噪声的噪声系数均值和干扰脉冲的平均电平密度和方差. 围绕着数字电视地面广播(Digital Terrestrial TV, DTIV)三制式—美国的 ATSC、欧洲的 DVB-T 和日本的 ISDB-T^[9], 世界各地的工程师们展开了许多系统抗噪性能的比较测试^[10], 并在噪声系数中位数的基础上, 进行数字电视地面广播覆盖场强的规划^[11]. 因此, 规划车载移动数字电视的覆盖网前, 须对交通线路上 UHF 频段的信道噪声进行系统与深入的模型研究.

本文介绍了上海市中心城区 UHF 频段以 730MHz (DS40) 为中心频率、带宽 7.61MHz 的车载移动数字电视信道噪声模型. 在选定的市区特征交通线路上测量车移动采集频道的平均噪声功率, 通过对噪声功率累积分布曲线的拟合, 建立频道噪声功率概率分布的有限组合模型, 利用模型精确地解出该数字电视地面广播频道的噪声系数一阶原点矩、二阶中心矩和其分布的双侧分位数的绝对差值及其 K 倍方差值. 对于具有高覆盖率需求的区域, 设想运用频道噪声系数上侧十分位数的 K 倍方差值, 提高规划的噪声系数阈值.

2 理论与模型

2.1 噪声系数

DTIV 系统标准带宽是 6~8MHz, 对于 8MHz 信道的数字电视系统, 信号频谱的宽度是 7.61MHz. 数字电视信号在通带内是一种类似白噪声的随机脉冲串, 由于没有模拟电视的“同步脉冲”等有规律的周期信号, 因此接收机的电视信号功率是信号频谱带宽内的“数字平均功率”, 即每 Hz 带宽内的电视信号功率. 参照数字电视信号功率的计量方法, 本文噪声系数是 7.61MHz 频宽等效无耗天线端噪声平均功率值与热噪声的比值, 其定义是^[6]:

$$F_a = 10 \log \left[\frac{p_{\text{avg}}}{k t_0 b} \right] \quad (1)$$

式中: F_a 为以 dB 为单位的噪声系数均值, 每单位带宽 (Hz) 内平均噪声功率与 $k t_0$ 相对值; k 为波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; b 为带宽, 以 Hz 为单位; t_0 为参考温度, 一般取 290K; p_{avg} 是等效无耗天线测得以 W/Hz 为单位的平均噪声功率均值, 对于数字电视信道, 平

均噪声功率 p_{avg} 的计算公式是^[11]:

$$p_{\text{avg}} = \left[\frac{E^2 (\text{V/m})}{120} \right] \left[\frac{1.64 G_R c^2}{4 f_c^2 (\text{MHz})} \right] \left[1 - \left(\frac{BW (\text{MHz})}{2 f_c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

针对自由空间的半波偶极子天线终端功率^[11]是:

$$10 \log p_{\text{avg}} (\text{dBW/Hz}) = -105.073 + E (\text{dB}\mu\text{V/m}) - 20 \log (f_c) - 10 \log \left[1 - \left(\frac{BW}{2 f_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式(2)与式(3)中: E 为等效无耗天线测得以频率 f_c 为中心、 BW 为带宽噪声均方根场强值的均值; f_c 为以 MHz 为单位的噪声测量中心频率; BW 为以 MHz 为单位的噪声测量带宽; G_R 相对于半波偶极子的天线增益, 无量纲; c 为光速, 单位 m/s.

2.2 有限混合概率分布模型

行驶在交通线路上的移动数字电视接收机都会受到白噪声与脉冲噪声的干扰. 白噪声持续不断、噪声功率具有瑞利 (Rayleigh—Weibull 分布在 $c=0, b=2$ 时的特例) 分布特性^[8]、功率谱密度在整个频域内均匀分布; 而脉冲噪声的时域模型通常使用脉冲幅度、持续时间和间隔三参数描述, 脉冲功率具有韦伯 (Weibull) 分布特性^[8], 功率谱密度随频率的变化而变化. 对于在一定的置信水平下不服从单一概率分布的噪声功率数据, 本文采用有限组合概率模型表达^[12].

(1) 三参数 Weibull 分布模型

包含分布范围控制参数 a 、形状参数 b 和位置参数 c 的三参数 Weibull 分布模型表达式是:

$$f(x|a, b, c) = ab(x-c)^{b-1} e^{-a(x-c)^b} \quad (4)$$

$$F(x|a, b, c) = 1 - e^{-a(x-c)^b} \quad (5)$$

式(4)和式(5)分别为概率密度函数 (PDF) 和累积分布函数 (CDF).

(2) 三参数概率分布模型的有限组合

若随机变量 X 服从 k 分量的有限组合分布, 那么 X 的 PDF(6) 和 CDF(7) 表达为:

$$f(x) = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^3 \binom{3}{n} \binom{k}{m} p_m^n f(x|a_m, b_m, c_m) \quad (6)$$

$$F(x) = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^3 \binom{3}{n} \binom{k}{m} p_m^n F(x|a_m, b_m, c_m) \quad (7)$$

其中: x 是随机变量 X 的一个特定输出, $\{a_m, b_m, c_m\}$ 是需定义组合模型的全参数集; $\{p_m\}$ 是组合权数, 需满足 $\sum_{m=1}^k p_m = 1$. k 分量有限组合概率分布的均值和方差分别按式(8)和式(9)的模型计算后获得.

$$\mu = \sum_{i=1}^k p_i \mu_i \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^k p_i (\mu_i^2 + \sigma_i^2) - \left(\sum_{i=1}^k p_i \mu_i \right)^2 \quad (9)$$

其中: μ 为有限组合概率分布的均值; σ 为有限组合概率分布的方差; μ_i 为有限组合概率分布的第 i 个分量的均值; σ_i 为有限组合概率分布的第 i 个分量的方差.

$$\sigma^2 = E[(X - \mu)^2] \quad (10)$$

3 移动数字电视环境噪声的测量与结果分析

上海城市总面积 6340 平方公里, 常住人口 1700 多万. 尽管城市地势平坦, 但内环线以内约 100 平方公里的中心城区内高楼与道路密集, 又有黄浦江贯穿中心城区, 所以城市内进行地面广播时面临环境噪声情况复杂. 为了规划数字电视地面广播, 2002 年 1 月至 2 月间, 上海市文广局对城市交通环境噪声展开了测量工作.

3.1 测量系统

将已知天线因子的双锥全向天线放置在车顶, 天线中心高度距离地面为 2.5 米, 通过 50 Ω 线缆与车内频谱分析仪连接, 计算机通过 GPIB488.2 接口控制并采集测量结果. 测量框图如图 1 所示.

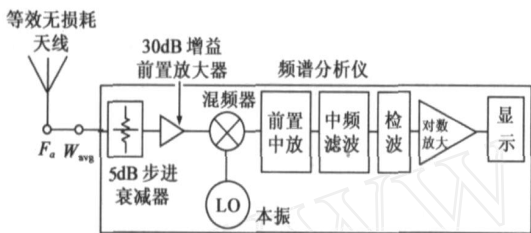


图 1 测量系统框图

3.1.1 天线参数

测量天线为水平极化、水平面上接收无方向性, 工作频率在 450MHz ~ 1GHz 范围内, 输出阻抗 50 Ω , 增益 0dB. 在 700MHz ~ 800MHz 频率范围内, 天线驻波比 1.75、天线系数 K_e (因子) 为 23dB/m. 为了避免电磁干扰车内使用屏蔽良好的发电机供电.

3.1.2 频谱分析仪测量性能和设置

频谱分析仪 E4401B 的接收灵敏度是 501MHz - 1.0GHz 范围内可接收最低功率为 -117dBm, 约等于 $2 \times 10^{-9} \mu W$; 最高功率为 +30dBm, 即 1W. 测量过程中频谱分析仪的参考电平设置在 0dBm 后, 频谱功率动态范围显示为 117dB. 采用均方根有效值检波器进行功率测量. 为避免邻频干扰, 测量频率选择在上下频道都未被占用和无强辐射干扰的 DS-40 频道. 频谱分析仪将频率中心点选择在 730MHz, 带宽 8MHz, 噪声的平均功率积分带宽为 7.61MHz (等同于移动数字电视的 3dB 带宽), 在分辨率带宽 30KHz, 视频分辨率带宽 300KHz 的条件下, 每次测量所需扫描时间为 19.32 毫秒.

3.1.3 噪声场强

$$E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) = K_e + L_i + L_c + W_{\text{avg}} \quad (11)$$

其中: K_e 为天线系数, 单位 dB/m; L_i 为天线插入损耗,

包括阻抗失配误差等, 单位 dB; L_c 为传输电缆损耗, 单位 dB; W_{avg} 为频谱分析仪输入端口的积分带宽内噪声平均电平 (dB μ V).

系统安装完成后, 测得 L_c 为 -2dB、 L_i 为 -0.34dB.

3.2 移动测量时段与交通路线

测量时间为当地时间上午 8:30 ~ 11:30, 下午 1:00 ~ 5:00, 该时段交通载体内人流量满负荷、交通线路满负荷, 也是移动数字电视覆盖效益最高的时段. 针对上海城市交通线路的特点, 测量路线选择了三类, 即内环线高架桥上道路 (连续 29 公里)、黄浦江客渡航线和内环线高架桥下与中心城区地面道路, 测量车依照线路上车辆的正常移动速度行驶, 并每隔 2 秒记录环境中干扰噪声的平均电平.

3.3 测量数据回归

对于单变量和多变量数据, 有限组合是一种灵活与有效的概率模型工具, 能够描述任意复杂的概率分布^[13]. 有限组合概率模型参数通常是运用期望最大化 (EM) 算法获得^[12]. 本文针对测量数据的概率累积分布曲线, 运用遗传算法完成三个 Weibull 分布分量组合概率模型的参数估计, 流程如下图 2.

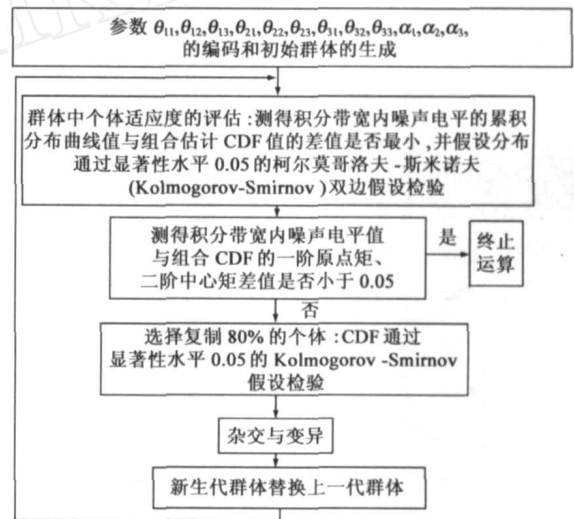


图 2 有限组合概率模型参数求取的遗传算法流程图

3.3.1 内环线高架桥上道路

高架路平均路幅宽 18 米, 设双向 4 条机动车道, 中间设隔离护栏, 两边设防撞墙及隔音板. 桥上车流量约每分钟 117 辆, 测量车在桥上以平均 40 公里/小时的速度行驶, 并采集了 2800 个测量数据.

$$f_B(x) = 0.3 \times 0.05 \times 3.9 \times (x - 45)^{2.9} \times e^{-0.05 \times (x - 45)^{3.9}} + 0.2 \times 0.44 \times 1.72 \times (x - 45)^{0.72} \times e^{-0.44 \times (x - 45)^{1.72}} + 0.5 \times 0.11 \times 1.153 \times (x - 45)^{0.153} \times e^{-0.11 \times (x - 45)^{1.153}} \quad (12)$$

式(12)表示了高架桥上数字电视频道积分带宽内噪声

电平的概率模型,其均值 49.0981dBμV、方差21.5358dB,与实测数据的相对误差分别为均值 - 1.04%和方差 4.9%。

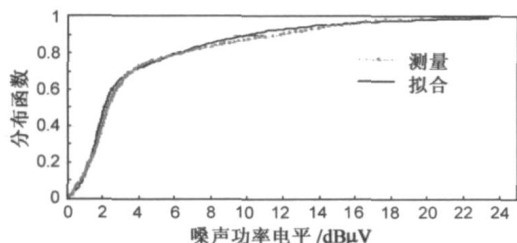


图3 高架桥上噪声功率电平的分布函数

3.3.2 黄浦江客渡航线

沿黄浦江现有 21 条客渡线路,3 条车渡线路和 9 条北外滩至徐浦大桥的摆渡线路,随着浦江两岸的开发,城市中心的水上交通既是客运通道又是游憩走廊。当时江南造船厂仍位于中心城区的浦东沿岸,所以江面上数字广播环境噪声情况亦不容忽视。当客渡船以平均 10 公里/小时的速度移动时,天线安装在距离轮船后甲板 2.5 米高度的无阻挡处,采集了 2300 个噪声结果。

$$f_R(x) = 0.65 \times 0.1 \times 1.62 \times (x - 45)^{0.62} \times e^{-0.1 \times (x - 45)^{1.62}} + 0.2 \times 0.35 \times 8.59 \times (x - 45)^{7.59} \times e^{-0.35 \times (x - 45)^{8.59}} + 0.15 \times 4.58 \times 8.46 \times (x - 45)^{7.46} \times e^{-4.58 \times (x - 45)^{8.46}} \quad (13)$$

式(13)是江面轮渡航线上数字电视频道积分带宽内噪声电平的概率模型,其均值 47.7434dBμV、方差 5.3297dB,与实测数据的相对误差分别为均值 - 0.29%和方差 4.94%。

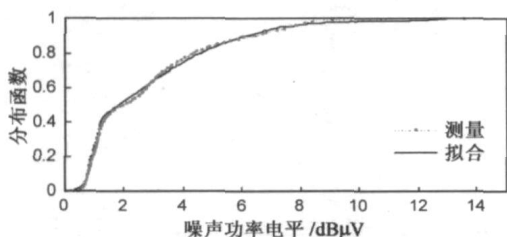


图4 江面船上噪声功率电平的分布函数

3.3.3 高架桥下与地面道路的机动车道

上海地面道路一般为四车道,而高架桥下的六车道地面道路中间建造有一般宽度为 0.8~2 米的绿化带隔离反向行驶车辆。机动道上车流量约每分钟 16 辆,测量车以平均 20 公里/小时的速度行驶在机动车道上,测得 2200 个噪声电平数据。

$$f_{UB}(x) = 0.62 \times 0.16 \times 4.16 \times (x - 45)^{3.16} \times e^{-0.16 \times (x - 45)^{4.16}} + 0.18 \times 0.12 \times 8.3 \times (x - 45)^{7.3} \times e^{-0.12 \times (x - 45)^{8.3}} + 0.2 \times 0.08 \times 1.58 \times (x - 45)^{0.58} \times e^{-0.08 \times (x - 45)^{1.58}} \quad (14)$$

PDF(14)是地面道路上数字电视频道积分带宽内噪声电平的概率模型,其均值 46.9822dBμV、方差 3.2629dB,与实测数据的相对误差分别是均值 - 0.07%和方差 - 0.7%。

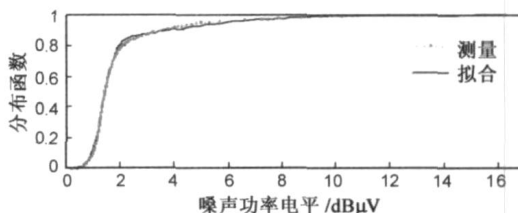


图5 地面道路上噪声功率电平的分布函数

3.4 结果分析与模型比较

通过式(1)、(3)和(11)容易获得与上述三类交通路线噪声功率模型相似的噪声系数分布函数。高架桥两侧密集的楼群墙面与隔音板反射噪声波,使得桥上噪声系数的均值高,且离散性大。江面航线上水面对噪声波的反射,也使船上天线终端的噪声系数较地面道路高,且离散性较地面道路大。下表 1 中列出了上海市中心城区中心频率 730MHz、7.61MHz 带宽信道内交通线上的噪声系数值及其双侧十分位数的绝对差值和 K 倍方差 (K)。

表 1 上海市中心城区噪声系数值

噪声系数 (dB/ KT ₀ B)	F _a (dB)	上侧 10 分位数		下侧 10 分位数	
		差值 (dB)	K	差值 (dB)	K
桥上道路	47.27	6.1582	0.286	3.2853	0.153
江面航线	45.91	3.3566	0.63	1.9852	0.373
地面道路	45.15	1.9398	0.5945	1.0389	0.318

3.4.1 噪声系数模型的比较

相比时域噪声模型有助于接收系统抗噪性能的研发^[5,7]而言,频域噪声模型能够直接地应用于电波传播的覆盖规划。人口密度、环境、交通工具、流量与速度等各种复杂因素导致噪声变量难以很好地符合常规概率分布模型,相对仅给出噪声系数中位数和分布曲线的模型而言^[3,6,11],利用噪声系数的组合分布函数可以精确地算得噪声系数的所有特征数,如原点矩、中心矩、分位数、众数等。由于持续的高幅度脉冲干扰,城市中心区域繁忙交通线路上的噪声电平幅度分布曲线与典型图^[8]相差悬殊,而且实际环境中噪声的脉冲分量与白噪声分量组成比也是一个随机变量,所以本文给出的组合分布函数更便于覆盖规划的实际应用。组合分布函数模型因涉及多参数的组合估计,故曲线拟合的算法复杂和智能性强,并且其特征数的求取也难以沿用手工或查表的方法。

3.4.2 城市 UHF 频段交通线路噪声统计模型的应用

国际电信联盟在无线电噪声模型中推荐^[3]：

$$F_{am} = b - 12.3 \lg f, \quad 200\text{MHz} < f < 900\text{MHz} \quad (15)$$

其中 F_{am} 是噪声系数的中位数, 对应于商业区、居住区和乡村, 截距 b 分别取值为 40.0、35.9 和 30.5^[11]。若仍然采用上述模型, 即在 -12.3 的对数频率斜率关系不变的条件, 可以获得对应于高架桥上道路、江面航线和地面道路的 b 值分别为 80.7、80.2 和 79.8。如果采用中国台湾高雄市水平极化接收方式下六个频点噪声系数测量值^[6]估计方程(15)中的截距, 则最小 b 值是 75.35 (山坡)、最大 b 值是 95.34 (都市); 而在港口环境下, 六个频点的平均 b 值是 80.0。已颁中国数字电视地面广播标准 (GB20600) 中建议信号频谱特征是 7.6MHz 带宽, 因此, 根据接收系统的抗噪能力, 并以噪声分布的上侧分位数 ($F_a + K$) 选取规划的噪声系数, 将会有效地提高数字电视地面广播覆盖率。

4 结论

数字电视广播的信道谱特性是类噪声、宽频带与低平坦功率信号, 而交通线路上各类发动机点火系统发出的脉冲干扰波也具有宽带谱特性; 所以交通线路噪声系数模型的确立有利于移动数字电视地面广播系统的规划。本文通过对上海市中心城区内三类交通线路上噪声平均功率的测量分析, 说明同一频道同一地区不同类型的交通线路上环境噪声模型存在一些差异。另外, 上海市中心城区交通线路的噪声系数模型为工程师们建立各地区 UHF 频段的交通环境噪声模型提供了一定的参考。为了确保移动数字电视地面广播达到 90% 或更高覆盖率的要求, 本文提供了实际工程中确定频道平均噪声功率的噪声系数均值及其上侧十分位数 K 倍方差的 K 值。

参考文献:

- [1] International Telecommunication Union Recommendation ITU-R P. 372-6, Radio Noise[S].
- [2] Takumi Makinouchi, Hiroshi Masaki, Hiroyoshi Suzuki, et al. Inquiry into radio noise conditions on the real road[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 21(11): 794 - 797.
- [3] International Telecommunication Union Recommendation ITU-R P. 372-8, Radio Noise[S].
- [4] Wilfred R. Lauber, Jean M. Bertrand. Statistics of motor vehicle ignition noise at VHF/UHF[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(3): 257 - 259.
- [5] Manuel García Sánchez, Leandro de Haro, Miguel Calvo Ramón, et al. Impulsive noise measurement and characterization in a UHF digital TV channel[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(2): 124 - 135.
- [6] Ming-Hui Chang, Kerr Huang Lin. A comparative investigation on urban radio noise at several specific measured area and its application for communications[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2004, 50(3): 233 - 243.
- [7] David Middleton. Non-gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class A and class B noise models[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 45(4): 1129 - 1149.
- [8] A Wagstaff, N Merricks. Man-made noise measurement programme[J]. IEE Proceedings on Communication, 2005, 152(3): 371 - 377.
- [9] 郑紫微, 杨知行, 朱义胜, 潘长勇. 不同数字电视地面广播传输系统在多径衰落信道下的性能比较[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 425 - 428.
Zheng Zi-wei, Yang Zhi-xing, Zhu Yi-sheng, Pan Chang-yong. Performance comparison of digital television terrestrial broadcasting transmission systems over multipath fading channels[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 425 - 428. (in Chinese)
- [10] Jos éLago Fern ández, John Salter. Modelling impulsive interference in DVB-T—statistical analysis, test waveform and receiver performance[R]. EBU Technical Review, 2004. 1 - 15.
- [11] Oded Bendov, Yiyang Wu, Charles W. Rhodes, et al. Planning factors for fixed and portable DTTV reception[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2004, 50(3): 209 - 223.
- [12] Mario A T Figueiredo, Anil K Jean. Unsupervised learning of finite mixture models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(3): 381 - 396.
- [13] Hassan Hajji. Statistical analysis of network traffic for adaptive faults detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(3): 1053 - 1063.

作者简介:



王仲园 女, 1963 年生于上海, 上海交通大学电子工程系博士生, 就职于上海文广新闻传媒集团技术管理部, 主要从事广播电视制作传输的系统测量工作。

E-mail: zhongywang@bt. sh. cn



金荣洪 男, 1963 年生于江苏省江阴市, 博士, 上海交通大学电子工程系教授, 博士生导师。主要从事现代通信天线理论和设计、数字波束形成技术、多波束天线、数值分析技术等领域的研究工作。

耿军平 男, 1972 年生于陕西省宝鸡县。上海交通大学电子工程系教师, 现在主要从事移动终端多天线、智能天线和电磁兼容等方面的研究工作。