

文章编号:1001-9014(2008)06-0437-05

一种应用于毫米波车流量检测雷达的 背景功率谱识别方法

张浩^{1,2}, 薛伟^{1,2}, 余稳¹, 孙晓玮¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:背景功率谱的准确识别是确保毫米波车流量检测雷达测量精度的首要问题. 本文研究了毫米波交通雷达的工作原理和回波功率性质, 并提出了一种新颖实用的背景功率谱识别算法, 该算法基于相干平均和有序统计量. 文中给出了不同实验环境下的测试结果, 结果证明了算法的有效性, 背景功率谱的识别精度有了明显提高.

关键词:毫米波雷达; 功率谱识别; 雷达信号处理; 车流量检测

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A

METHOD OF RECOGNIZING BACKGROUND POWER SPECTRUM USED IN MILLIMETER WAVE TRAFFIC FLOW DETECTION RADAR

ZHANG Hao^{1,2}, XUE Wei^{1,2}, YU Wen¹, SUN Xiao-Wei¹

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology of CAS, Shanghai 200050, China;

2. Graduate School of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: In application of the side-looking millimeter wave radar to monitor traffic flow, the key issue is to recognize background power spectrum. In this study, the traffic radar principles and echo power properties were analyzed. Then, a novel background power spectrum recognition (BPSR) algorithm was proposed which was based on order statistics and coherent averaging. Finally, test results in various environments were presented. Quantitative evaluation and comparison indicate that the algorithm is feasible and the detection performance has been noticeably improved.

Key words: millimeter wave radar; power spectrum recognition; radar signal processing; traffic flow detection

引言

作为一种新型的交通信息采集技术, 毫米波交通雷达^[1]具有全天候工作, 无检测盲区, 低安装维护成本的优点^[2], 这使得它广泛应用于智能交通系统^[3]. 但公路背景严重影响了毫米波交通雷达的性能, 背景功率谱的准确识别成为确保雷达多车道多目标检测能力的首要问题. 本文首先分析了毫米波交通雷达的工作体制与回波功率的性质. 然后在分析了前两种背景功率谱识别算法的基础上, 提出了一种基于相干平均和有序统计量的新算法, 该算法可以利用同时含有背景和车辆信息的数据完成背景

功率谱识别. 最后给出了在不同环境下的测试结果, 并与先前算法进行了详细的比较.

1 毫米波交通雷达原理与回波功率分析

毫米波车流量检测雷达安装在公路旁的支架上, 天线波束方向基本垂直于车道方向, 以消除多普勒效应的影响. 雷达波束覆盖所有行车道, 车道内雷达水平波束宽度略大于车辆长度, 如图 1(a) 所示. 当车辆经过检测区域时, 雷达回波信号会发生明显变化. 毫米波交通雷达采用的是线性调频连续波(FMCW)体制^[4], 调频信号采用三角波, 如图 1(b) 所示.

收稿日期: 2007-12-18, 修回日期: 2008-05-23

基金项目: 上海市信息化专项基金(123)资助项目

作者简介: 张浩(1983-), 男, 辽宁鞍山人, 硕士生, 主要研究方向为雷达信号处理与模式识别.

Received date: 2007-12-18, revised date: 2008-05-23

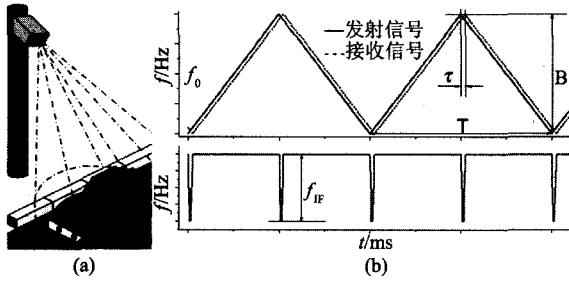


图1 (a)交通雷达安装示意图 (b)三角波调频原理图
Fig.1 (a) Installation schematic of the traffic radar (b) the signals of the triangle-wave frequency modulation

1.1 毫米波交通雷达多车道检测原理

雷达回波延迟时间 τ 远远小于三角波周期, 故中频信号 f_{IF} 可以认为是恒定的. 为了简化分析, 仅取三角波第一个周期的上升部分. 毫米波雷达的发射信号为

$$s_T(t) = A \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{\alpha}{2}t\right)t + \theta_0\right), \quad (1)$$

式中 $\alpha = 2B/T$ 为扫频斜率, B 为扫频带宽, T 为三角波周期, f_0 为载波频率, θ_0 为初始相位.

经反射后, 雷达的接收信号为

$$s_R(t) = k_1 A \sin\left\{2\pi\left[f_0 + \frac{\alpha}{2}(t-\tau)\right](t-\tau) + \theta_0 + \varphi_0\right\}, \quad (2)$$

式中 k_1 为衰减系数, φ_0 为附加相位. 当反射点到雷达的距离为 R 时, $\tau = 2R/c$, c 为光速.

经过混频滤波^[5]后, 信号可表示为

$$s_{IF}(t) = A_{IF} \cos\psi_{IF}, \quad (3)$$

式中 $\psi_{IF} = 2\pi\left(f_0\tau - \frac{\alpha}{2}\tau^2 + \alpha\tau \cdot t\right) + \varphi_{IF}$ 为信号瞬时相位. 接收到的中频信号为

$$f_{IF} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi_{IF}}{dt} = \alpha\tau = \frac{4RB}{Tc}. \quad (4)$$

可见, 中频信号正比于反射点到雷达的距离. 由于不同的行车道到雷达的距离各不相同, 所以不同车道的信息就分布到了不同的频率段内.

1.2 毫米波交通雷达车辆目标检测原理

雷达采用数字分析技术处理回波信号, 经 ADC 采样后得到的信号为

$$S_{IF}(n) = S_{IF}(nT_s) = A_{IF} \cos(\omega_{IF}n + \varphi_{IF}), \quad (5)$$

式中 $\omega_{IF} = 2\pi\alpha\tau/f_s$, $f_s = 1/T_s$ 为采样频率. 用 $N = 2^n$ 点矩形窗 $w(n) = u(n) - u(n - T/T_s)$ 截取信号, 求得的快速傅里叶变换为

$$S_{samp}(k) = S_{IF}(k) * W(k). \quad (6)$$

由于正负频段的功率谱严格对称, 可舍去负频部分, 得到的回波信号功率幅度为

$$P_R(k) = \frac{1}{N} |S_{samp}(k)|^2 = \frac{A_{IF}^2}{4N} \left(\frac{\sin \frac{2k\pi - N\omega_{IF}}{2}}{\sin \frac{2k\pi - N\omega_{IF}}{2N}} \right)^2, \quad (7)$$

式中 $A_{IF} = k_1 k_2 A^2 / 2$, k_2 为混频系数, 为常量. 可见, 各个频率点处的回波功率幅度只与衰减系数 k_1 相关. 由于反射表面的性质不同, 衰减系数 k_1 也不相同. 如果雷达检测区域内不存在金属防护栏, 当有车辆存在时, 回波功率很强, 否则, 回波功率较弱. 根据这一原理, 可以在不同车道对应的频率段内通过分析回波功率的强弱变化完成车辆目标的检测.

1.3 回波功率分析

回波功率通常包含车辆回波功率 P_v , 背景回波功率 P_b 和白噪声功率 P_n . 频率点 k 处的回波功率可以表示为

$$P_R(k) = P_v(k) + P_b(k) + P_n(k). \quad (8)$$

假设白噪声符合 $N(0, \sigma^2)$ 的高斯分布, 则噪声功率 $P_n(k) = \sigma^2$ 为很小的恒定值, 可以忽略. 这样, 回波功率仅由运动着的车辆产生的动态功率和相对静止的公路背景产生的静态功率组成.

如果背景回波完全来自路面, 那么背景杂波符合高斯模型, 背景功率分布符合指数分布

$$f(P) = \frac{1}{P_c} \exp\left(-\frac{P}{P_c}\right), \quad (9)$$

式中 $P_c = 2\sigma_c^2$, σ_c 为高斯分布的均方根.

如果在检测区域内存在防护栏等稳态大散射体, 则该频率点的杂波分布符合莱斯模型, 信号功率的概率密度函数(PDF)为

$$f(P) = \frac{1}{P_0} \cdot \exp\left(-\frac{A^2 + P}{P_0}\right) \cdot I_0\left(\frac{2A\sqrt{P}}{P_0}\right), \quad (10)$$

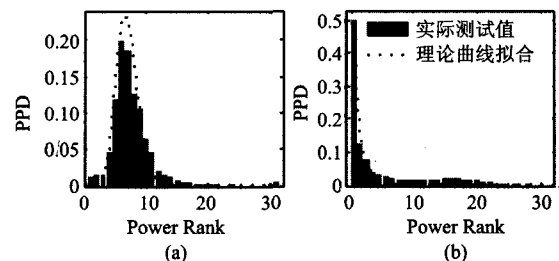


图2 防护栏处 (a) 和路面区域 (b) 回波功率概率密度函数实际测试值与理论曲线拟合
Fig.2 Power Probability Density (PPD) of guardrail (a) and road surface (b) echo power and their fitting curves

式中 P_0 为分布功率, A^2 为稳态功率, $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数. 如果车道间的金属防护栏与车辆到雷达的距离相同, 两者回波功率的中频频率便落在了同一频段内, 造成了功率混叠. 当金属防护栏的高度可以与车辆高度相比拟时, 防护栏会在某些频段内拥有很强的回波功率, 这严重损害了车流量检测的准确性.

2 毫米波交通雷达背景功率谱识别算法

2.1 传统频域相干平均算法

由于公路背景相对稳定, 在短时间内, 可假定背景回波功率保持不变, 值为 P_{b0} . 而车辆回波功率却是变化较快的随机变量. 假设车辆回波功率密度函数 $f(P_v)$ 是一个恒定值, 如果统计时间内共有 M 个数据点, 其中包含车辆回波功率的点数 N , 在频率点 k 处, 传统频域相干平均算法^[6]可表示为

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [P_v(k, i) + P_b(k, i) + P_n(k, i)] \approx \lambda f(P_v) + P_{b0}(k), \quad (11)$$

式中 $\lambda = N/M$ 定义为车道占有率. 利用传统算法得到的结果与车道占有率这个未知量相关. 无论 M 取何值, 都不会降低车辆回波功率对背景功率谱估计的影响. 由于车辆回波功率通常远大于道路回波功率, 可比拟于金属防护栏回波功率, 所以传统算法的计算值会大于真实值.

2.2 基于阈值的相干平均算法

为了减小车辆回波功率对背景功率谱识别的影响, 阈值相干平均算法根据统计经验设定了固定的功率阈值 P_{th} , 并对回波功率进行了如下预处理

$$P_R(k, i) = P_R(k, i) \cdot g(P_R(k, i)) \quad (12)$$

当 $P_R(k, i) > P_{th}$ 时, $g(P_R(k, i)) = 0$. 否则, g

($P_R(k, i)$) = 1. 预处理过程相当于降低了车道占有率, 可使背景功率谱识别的准确性得到较大提高. 但实际上 $f(P_v)$ 并非恒定值. 由于路面回波功率远小于阈值, 低于阈值的车辆回波功率同样会对背景功率谱识别造成影响, 导致计算值大于真实值. 而金属防护栏回波功率通常可与功率阈值相比拟, 由于大量超过阈值而被置零的数据存在, 此处的计算值会小于真实值.

2.3 基于有序统计量的相干平均算法

为尽量消除车辆功率对背景功率谱识别的影响, 我们提出了一种基于有序统计量的频域相干平均算法. 该算法的基本思想如下: 将不同时刻的回波功率按照幅度升序排列, 得到有序回波功率 P_{Ros} ; 当雷达检测区域内存在车辆时, 回波功率幅度较大, 排序后处于末端, 所以需舍弃部分末端数据以消除车辆回波功率的干扰; 同时也要舍弃部分始端数据以消除背景功率起伏的影响. 该算法可表述如下

$$\frac{1}{M_u - M_d + 1} \sum_{i=M_d}^{M_u} P_{Ros}(k, i) \approx \frac{1}{M_u - M_d + 1} \sum_{i=M_d}^{M_u} P_{vos}(k, i) + P_{b0}(k), \quad (13)$$

式中 M_d, M_u 为有序统计量的有效数据起点与终点, P_{vos} 为有序回波功率的车辆回波部分. 将有效数据区间进行归一化, 可得到归一化有效数据起始位置 $a = M_d/M$ 与归一化有效数据容量 $b = (M_u - M_d + 1)/M$, 则有序统计算法又可表述为

$$\frac{1}{bM} \sum_{i=aM}^{(a+b)M} P_{Ros}(k, i) \approx \frac{1}{bM} \sum_{i=aM}^{(a+b)M} P_{vos}(k, i) + P_{b0}(k) \quad (14)$$

根据 Greenshields 等人的交通流理论^[7, 8], 车速 v 与车道占有率 o 的关系为



(a)

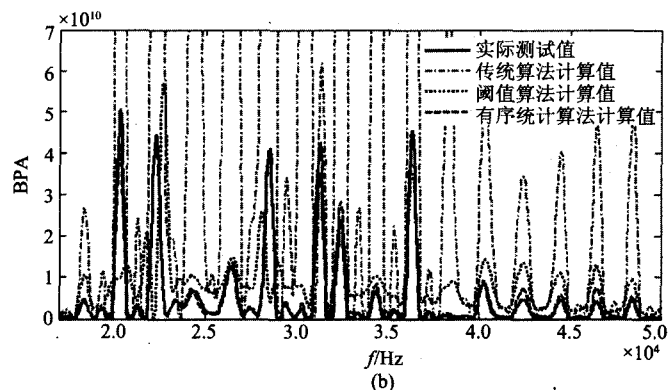


图3 (a)上海市 A20 市域高速公路测试点的实验条件 (b)该测试环境下三种算法计算值与真实值的比较图
Fig.3 The left photo (a) shows test conditions at A20 city expressway in Shanghai and the right figure (b) shows comparisons of the three algorithms with actual values on Background power Amplitude(BPA)

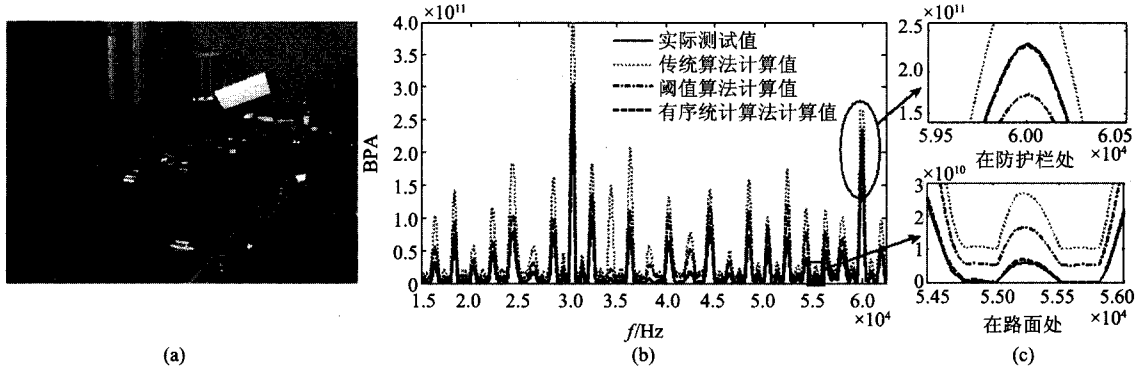


图4 北京市健翔桥测试点 (a) 和三种算法计算值与真实值的整体 (b) 与局部 (c) 比较图
 Fig.4 Testing environment at Jianxiang bridge in Beijing (a) and comparisons of calculated values of the three algorithms and actual value in whole frequency range (b) and at details(c)

$$\frac{v}{v_f} + \frac{o}{o_j} = 1 \quad (15)$$

式中, v_f 为自由车速, o_j 为极限车道占有率. 临界低速 v_c 时定义临界车道占有率为 o_c . 若 a, b 满足条件

$$\begin{cases} \frac{[1 + (a+b)M](a+b)}{1+M} = \alpha \left(\frac{o_j}{o_c}\right)^2 \\ \frac{(aM+1)a}{M+1} = \alpha \left(\frac{o_c}{o_j}\right)^2 \\ \alpha = \left(1 - \frac{o_j + o_c}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (16)$$

车辆产生的动态功率 $\sum_{i=aM}^{(a+b)M} P_v(k, i) \rightarrow 0$, 公路背景的静态功率为

$$P_{b0}(k) \approx \frac{1}{bM} \sum_{i=aM}^{(a+b)M} P_{Ros}(k, i) \quad (17)$$

3 背景功率谱识别算法实际测试结果

利用本课题组研制的侧向安装毫米波车流量检测雷达, 我们在不同背景条件的公路上进行了大量现场测试. 测试点之一位于上海市 A20 市域高速公路. 公路环境为单向四车道, 无防护栏, 如图 3(a) 所示. 当车道占有率为 20.4% 时, 测得的三种背景功率谱识别算法的计算值与真实值的比较图如图 3(b) 所示. 选取了适当的阈值后, 阈值算法的计算值仍会略大于真实值. 有序统计算法得到的计算曲线几乎与实际测量曲线重合. 在车道占有率较大时, 传统算法几乎丧失了背景功率谱识别的能力.

另一测试点设于北京市健翔桥, 该测试点的背景环境复杂, 测试区域包含七条行车道, 并且在第二三车道和第六七车道之间分别存在高约 1m 的金属防护栏, 如图 4(a) 所示. 当车道占有率为

10.6% 时, 三种算法的计算值与真实值的比较如图 4(b, c) 所示. 当车道占有率较低时, 传统算法的误差要小于车道占有率较高时. 阈值算法的计算值在路面反射区域内大于真实值, 而在存在防护栏的反射区域要小于真实值. 有序统计算法得到的结果与真实值很接近, 性能明显好于其他两种算法.

为了定量评估算法性能, 我们应用了绝对平均误差 (MAPE), 该误差可用下式计算

$$MAPE(a, b, o) = \frac{1}{L_u - L_d + 1} \sum_{k=L_d}^{L_u} \left| \frac{P_{b0}(a, b, o, k) - P_{ac}(k)}{P_{ac}(k)} \right| \quad (18)$$

式中 L_d, L_u 分别为有效频率区间的起始位置与终止位置, $P_{ac}(k)$ 为频点 k 处实际测量的背景功率值.

在图 4(a) 的测试环境下, 自由车速为 60km/h, 临界低速为 12km/h, 并测得 $o_j = 64.1\%$. 根据式 (16) 算得 $a = 0.338, b = 0.190$. 在车道占有率为 13.8% 时, 有序统计算法的 MAPE 与 a, b 之间的关系如图 5 所示. 当 $a \in (0.3, 0.4)$ 时, 有序统计算法的 MAPE 基本保持恒定, 不同的 a, b 值对计算结果

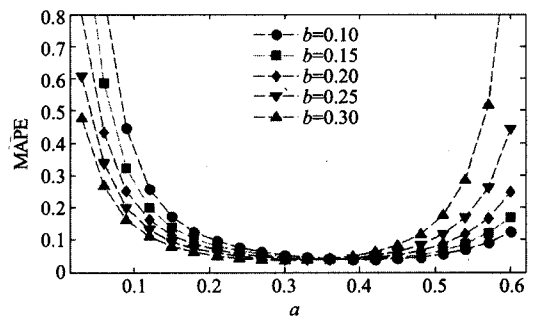


图5 有序统计算法的绝对平均误差与归一化有效数据起始位置和归一化有效数据容量的关系
 Fig.5 MAPE of OS-based BPSR algorithm versus a and b

表1 三种算法在不同车道占有率下的绝对平均误差对比
Table 1 MAPE comparisons of the three BPSR algorithms in different lane occupancy

车道占有率	绝对平均误差		
	传统算法	阈值算法	有序统计算法
0%	0.004	0.005	0.058
2.0%	0.148	0.135	0.042
4.6%	0.798	0.202	0.053
8.9%	0.923	0.257	0.047
11.7%	1.542	0.213	0.051
14.8%	1.887	0.324	0.048
20.2%	2.501	0.369	0.046
24.6%	2.027	0.239	0.048
56.2%	5.451	0.875	0.332
62.9%	5.567	0.775	1.467

影响很小. 测试结果与式(16)得到的理论结果符合较好. 当有效数据的起始点向整个数据区间的两端靠近, 有序统计算法的 MAPE 变大, 算法性能会下降.

同样的测试环境中, 在不同的车道占有率下, 表1对三种背景功率谱识别算法的 MAPE 作了对比. 可以看出, 传统算法的误差与车道占有率的变化趋势基本一致. 阈值算法的误差在正常车道占有率范围内波动相对较大. 在未达到公路通行能力极限时, 有序统计算法的精度基本上不受车道占有率的影响, 算法的精度有了大幅度提高, 算法性能远好于其它两种方法. 在堵车的情况下, 阈值算法通过回波功率预处理过程, 可以较好地抑制高车道占有率对背景功率谱识别的影响, 计算结果可以较好地描述真实值. 而此时有序统计算法的误差会增加, 算法性能下降. 这是因为在堵车的情况下, 车道占有率很大, 车辆在雷达检测区域中移动速度较慢, 部分车辆回波功率会被视为背景回波功率, 一同进入到背景识别算法中. 一种较为有效的解决方法是实时监控车道占有率. 当车道占有率过大时, 根据车道占有率再次调整归一化参数 a , b 的值.

4 结语

本文分析了侧向安装毫米波车流量检测雷达的工作原理与回波功率的性质, 并提出了一种基于有序统计量的频域相干平均背景功率谱识别算法. 文中给出了算法的思想理论和实际测试结果, 二者的一致性证明了算法的有效性. 另外, 文中对该算法的性能与传统频域相干平均和阈值相干平均背景功率谱识别算法进行了详细比较. 在正常的交通状况下, 有序统计算法可以精确识别背景功率谱, 性能远好于其它两种方法.

REFERENCES

- [1] Sang Jin Park, Tae Yong Kim, Sung Min Kang, et al. A novel signal processing technique for vehicle detection radar [C]. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, 2003, 1: 607—610.
- [2] LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo, WU Wen. FMCW short-range radar of 3mm wave band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (娄国伟, 李兴国, 吴文. 3mm 波段 FMCW 近程雷达的研究. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(2): 117—119.
- [3] JIANG Tie-Zhen, WU Hu, WU Kai, et al. Threshold design method of CFAR for millimeter-wave collision warning radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (蒋铁珍, 武虎, 吴凯, 等. 毫米波汽车防撞雷达恒虚警率门限设定方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(3): 217—220.
- [4] Stove A G. Linear radar and signal processing [J]. *IEE Proceedings-F*, 1992, 139(5): 343—350.
- [5] SHENG Huai-Mao, LI Yu-Fang, XIA Guan-Qun, et al. Research on IF filter used in FMCW millimeter-wave radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (盛怀茂, 李玉芳, 夏冠群, 等. FMCW 毫米波雷达中频滤波器的研究. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(6): 473—476.
- [6] Egorouchkina K, Braecklein M, Pang L, et al. Comparison of two different methods for coherent averaging in online ECG analysis [C]. *Computers in Cardiology*, 2005, 463—466.
- [7] Greenshields B D. A study of traffic capacity [C]. *Highway Res. Board Proc.*, 1935, 14, 448—477.
- [8] CHEN De-Wang, ZHANG Jun-Ping, TANG Shu-Ming, et al. Freeway traffic stream modeling based on principal curves and its analysis [J]. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 2004, 5(4): 246—258.