

基于相位噪声分析的交通信息采集雷达设计

杨明辉^{①②} 许杰^{①②} 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: 为了满足智能交通领域(ITS)信息采集需要,该文设计了一种 K 波段双模式交通信息采集雷达,其两个工作模式为调频连续波(FMCW)和单频连续波(CW)模式。由于对压控振荡器(VCO)直接作为 CW 测速雷达的振荡源的研究较少,所以该文对在单频连续波(CW)模式下 VCO 的相位噪声以及雷达作用距离对测速误差的影响进行分析。此外该文还通过测速对比实验,得出在短距离应用条件下,虽然以 MMIC VCO 为振荡源的双模雷达的测速精度不如以低相位噪声锁相环振荡器(PLL)为振荡源的单一 CW 雷达,但两者相差很小。通过分析和实验可以得出,相位噪声对速度误差的影响会随着作用距离的缩短而减小。该双模雷达工作在 CW 模式并进行短距离测速时,能满足一般民用交通雷达测速精度的要求。

关键词: 双模式雷达; 相位噪声; 测速误差; 压控振荡器

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2591-05

Traffic Information Radar Design Based on Phase Noise Analysis

Yang Ming-hui^{①②} Xu Jie^{①②} Sun Xiao-wei^①

^①(Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to meet the needs of traffic information collection in Intelligent Transportation System (ITS), a design of K-band dual mode traffic information collection radar which can work in both Frequency Modulate Continual Wave (FMCW) mode and Continual Wave (CW) mode is introduced in this paper. As research about Voltage Controlled Oscillator (VCO) used as the oscillator in CW radar for velocity measurement is seldom reported, the effect of phase noise and detecting distance on velocity error in CW mode is analyzed. In addition, the short-range velocity measurement is also introduced. The experiment result shows that the velocity error of the dual mode traffic information radar with MMIC VCO is acceptable, although not as good as of the CW radar with low phase noise PLL. The analysis shows that the effect of phase noise on velocity error can be reduced by shortening the detecting distance. The dual mode radar is acceptable in velocity measurement of civilian traffic radar.

Key words: Dual mode radar; Phase noise; Velocity error; Voltage Controlled Oscillator(VCO)

1 引言

近年来,随着智能交通系统(ITS)得到越来越广泛的关注,毫米波雷达作为其重要组成部分引起了人们很大的研究兴趣,其中 K 波段毫米波雷达用作汽车防撞和交通信息采集在商业市场上已经得到了广泛的应用^[1-3]。然而现有的商业 K 波段毫米波雷达都是工作在单一模式下,对于完成 ITS 复杂而又精确的信息采集工作存在着很大的成本压力,因此研制能够工作在两个或多个模式下雷达前端具有很强现实意义和市场需求^[4-8]。

根据雷达波形的模糊函数的分析,调频连续波(FMCW)雷达的测距精度高,而单频连续波(CW)雷达的测速精度高。因此利用一套雷达前端来实现这两种雷达工作模式,则可以在测距和测速上都发挥其各自优点,而这对于交通信息采集雷达来说是很重要的。

对于 FMCW 雷达,其振荡源一般选用高线性度、宽调频带宽的压控振荡器(VCO);而对于 CW 雷达,其振荡源则一般选用低相位噪声、高频稳度的介质谐振器(DRO)或锁相振荡器(PLL),此类振荡器一般不能调频或调频带宽很小。因此只要通过模拟开关给 VCO 加载不同的调制波形并选择相应的中频信号处理电路,同一个雷达前端完全可以工作在 CW 和 FMCW 两种工作模式下。

2 K 波段双模交通雷达

该双模交通信息采集雷达主要是由高低电平的控制信号控制模拟开关来对 VCO 加载不同的调制波形来实现的。对于 FMCW 模式，调制波形是三角波，而对于 CW 模式则是固定电压，调制波形如图 1 所示。根据以上所述，本文提出的双模交通信息采集雷达原理图如图 2 所示。

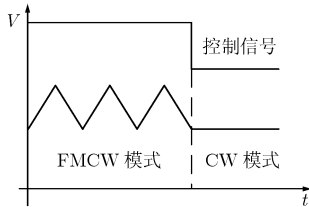


图 1 调制波形

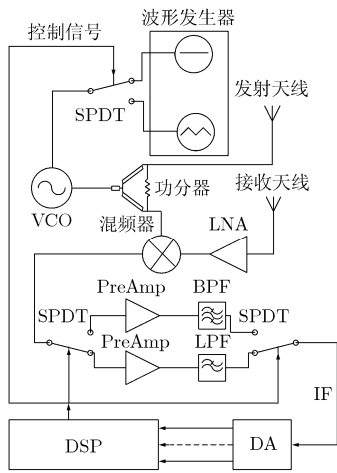


图 2 雷达前端原理图

由图 2 可见，本文提出的双模式交通信息采集雷达前端由射频前端、中频信号处理电路以及波形发生器组成。整个雷达的设计都基于小型化、低成本以及易于加工装配的考虑。因此，射频前端天线采用自行设计的平面微带阵列天线^[9]，VCO 和低噪声放大器(LNA)^[8]采用自行设计的基于 0.25 μm 工艺的 K 波段微波单片集成电路(MMIC)。混频器采用基于倒扣技术的 KCPW 环形混频器^[10]。射频前端各元件的性能参数则在表 1 中列出。雷达通过控制信号控制模拟开关来选择相应的中频信号处理电路和调制波形。在 FMCW 模式下，其中频信号处理电路呈带通特性，在 CW 模式下则呈低通特性。

表 1 射频前端主要器件性能

天线	增益: 18 dB, 波束角: $2\theta_{0.5E} = 13.4^\circ, 2\theta_{0.5H} = 9.6^\circ$
压控振荡器 (VCO)	输出功率: 10 dBm, 相位噪声: -77 dBc/Hz@100 kHz, 调频带宽: 300 MHz
低噪声放大器 (LNA)	增益: 20 dB, 噪声系数: 3 dB
混频器	变频损耗: 7 dB, 本振到射频端隔离度: 46.4 dB, 本振到中频端隔离度: 37.7 dB

该双模雷达正向安装在一个车道的上方，雷达波束与车道成一定夹角，雷达根据道路的交通情况按照一定的算法自动选择相应的工作模式。具体在各模式下的测量项目如表 2 所示。

如前所述，MMIC VCO 的相位噪声要比 PLL 和 DRO 差，所以当该双模雷达工作在 CW 模式时，需要重点分析 MMIC VCO 的相位噪声和雷达作用距离对测速精度的影响。

3 对于 CW 模式下的速度误差分析

对于 CW 雷达，其振荡源的频率稳定度与系统测速误差的关系如下式所示^[11]：

$$\sigma_k^2 = \left(\frac{c}{2}\right)^2 \cdot 2 \cdot B_2(\gamma, \mu) \cdot \sigma_y^2(\tau) \quad (1)$$

式中， $B_2(\gamma, \mu)$ 为巴纳斯第 2 偏倚函数，其中 $\gamma = \tau'/\tau$ ， τ' 为电波双向传播时间， τ 为采样时间， μ 为时域噪声模型系数， $\sigma_y^2(\tau)$ 为阿伦方差。正如式 (1) 所示，阿伦方差 $\sigma_y^2(\tau)$ 与巴纳斯第 2 偏倚函数 $B_2(\gamma, \mu)$ 直接决定了系统的测速精度。

3.1 VCO 相位噪声对测速误差的影响

式(1)中的阿伦方差 $\sigma_y^2(\tau)$ 为短期频率稳定度在时域的特征，一般可以利用相位噪声来得到。而振荡源的原始相位噪声可以用以下相对频率起伏谱密度 $S_y(f)$ 或单边相位噪声曲线 $L(f)$ 的幂率谱噪声模型表示，而 $L(f)$ 则可由 Lesson's 模型估算或者直接由频谱仪测得。

$$S_y(f) = \begin{cases} \sum_{\alpha=-2}^2 h_\alpha f^\alpha = 2(f^2/f_0^2)L(f), & 0 < f \leq f_h \\ S_y(f) = 0, & f > f_h \end{cases} \quad (2)$$

其中 f_h 是测量相位噪声时所用的上限截止频率， h_α 是常数，由被测源的噪声特性所决定。对于每个被测源，一般含有以上 2-4 种幂率谱噪声为主。

表 2 双模雷达的测量项目

工作模式	交通情况	车流量	平均车速	每辆车的车速	车型	车辆存在	车道占有率
CW	畅通	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FMCW	拥堵	✓	✓	×	✓	✓	✓

阿伦方差 $\sigma_y^2(\tau)$ 与相对频率起伏谱密度 $S_y(f)$ 的关系如下^[12]:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_y(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (3)$$

当 $2\pi f_h \tau \gg 1$ 并且 $\gamma \ll 1$ 时, 由式(3)可得到 5 个幂率谱噪声模型对应的阿伦方差如表 3 所示^[12]。

表 3 幂率谱噪声对应的阿伦方差

噪声类型	α	$\sigma_y^2(\tau)$
随机游动调频噪声	-2	$(2\pi^2 \tau h_{-2})/3$
闪烁调频噪声	-1	$2(\ln(2))h_{-1}$
白噪声调频噪声	0	$h_0/(2\tau)$
闪烁调相噪声	1	$\frac{(1.0385 + 3 \ln(2\pi f_h \tau))h_1}{(2\pi)^2 \tau^2}$
白噪声调相噪声	2	$\frac{3f_h h_2}{(2\pi)^2 \tau^2}$

在表 3 的 5 个幂率谱噪声中, 白噪声调频噪声 ($\alpha = 0$) 主要为谐振回路的品质因数 Q 所决定的宽带噪声, 闪烁调频噪声 ($\alpha = -1$) 则主要为振荡器内的谐振回路噪声和有源器件噪声, 这两个幂率谱噪声都主要分布在谐振回路频带内。因此 $L(f)$ 包含了以上两个幂率谱噪声, 在低 Q 值情况下, 其曲线由 3 部分组成, 如图 3 所示^[13]。其曲线系数 K 与 $h_{(n)}$ 的关系根据式(2)可得

$$h_{(n)} = (2/f_0^2)K_{(n-2)}, \quad n = -1, 0, 2 \quad (4)$$

因此根据式(4)和表 3, 就能计算出阿伦方差 $\sigma_y^2(\tau)$ 。

由以上分析可见, 在 MMIC VCO 设计中, 减少白噪声调频噪声和闪烁调频噪声是减少测速误差的关键。而 HEMT (High Electron Mobility Transistor) 技术在偏离载频 10 kHz-1 MHz 范围内

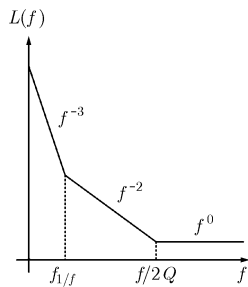


图 3 在低 Q 值情况下的单边相位噪声曲线 $L(f)$

引起的调频噪声是最小的, 所以在该双模雷达中的 MMIC VCO 设计选择了 $0.25 \mu\text{m}$ PHEMT (P- High Electron Mobility Transistor) 工艺。最终, 该双模雷达的 MMIC VCO 相位噪声在 100 kHz 时为 -77 dBc/Hz 。用频谱仪 Anritsu MS2668C 测得的功率谱密度如图 4 所示。

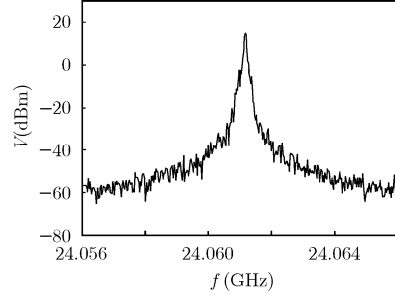


图 4 MMIC VCO 的功率谱

3.2 探测距离对测速误差的影响

除了 VCO 的相位噪声外, 探测距离也是影响测速误差的一个重要因素。在式(1)中, 探测距离对测速误差的影响表现在 $B_2(\gamma, \mu)$ 上。当 $2\pi f_h \tau \gg 1$ 并且 $\gamma \ll 1$, $B_2(\gamma, \mu)$ 的值如表 4 所示^[11]。由于 $\gamma = \tau'/\tau$ 与探测距离成正比关系, 所以通过表 4, 可以得知探测距离越短, 测速误差越小。

表 4 各幂率谱噪声对应的 $B_2(\gamma, \mu)$

α	$B_2(\gamma, \mu)$
-1	$\frac{\ln 2}{4} \cdot [-2\gamma^2 \ln \gamma + (1 + \gamma)^2 \ln(1 + \gamma) + (1 - \gamma)^2 \ln \gamma - 1]$
0	6γ
2	$2/3$

根据表 3、表 4 以及图 3, 可得到测速误差的表达式为

$$\sigma_k^2 = \frac{c^2}{2} \cdot \frac{10^{P_{1/f}/10}}{f_0^2} \left\{ f_{1/f}^3 (\ln 2)^2 [-2\gamma^2 \ln \gamma + (1 + \gamma)^2 \cdot \ln(1 + \gamma) + (1 - \gamma)^2 \ln |\gamma - 1|] + \frac{f_{1/f}^2}{\tau} \cdot 6\gamma + \frac{f_h f_{1/f}^2}{\pi^2 \tau^2 f_{2Q}^2} \right\} \quad (5)$$

其中 $P_{1/f}$ (dBc/Hz) 为在 $f_{1/f}$ 的相位噪声值。

根据以上分析, 测速误差可以计算如下。根据图 4 的功率谱, 可以得到 $K_{-3} = 10^{7.3}$, $K_{-2} = 10^{1.2}$, $K_0 = 10^{-12.5}$ 以及 $f_h = 100 \text{ MHz}$ 。如果探测距离为 100 m, 采样率为 24 kHz, 可得该双模雷达的测速

误差为

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_{k(-1)}^2 + \sigma_{k(0)}^2 + \sigma_{k(2)}^2} = \sqrt{2.1609 + 2.855 + 0.1446} = 2.27 \text{ m/s} = 8.17 \text{ km/h} \quad (6)$$

对于本文所提出的正向安装在车道上方的双模交通信息采集雷达来说, 其典型的作用距离为 10 m, 此时其测速误差则为

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_{k(-1)}^2 + \sigma_{k(0)}^2 + \sigma_{k(2)}^2} = \sqrt{0.0304 + 0.2855 + 0.1446} = 0.679 \text{ m/s} = 2.44 \text{ km/h} \quad (7)$$

根据以上计算, 可得到探测距离与测速误差的关系如图 5。如图 5 和式(6), 式(7)所示, 随着探测距离的减小, 测速误差减小, 同时白噪声调频噪声和闪烁调频噪声对测速误差的影响逐渐减弱, 而白噪声调相噪声对测速误差的影响则在短距离速度测量中占据重要地位。此外, 由于 $B_{2(1)}$ 为常数, 所以对于该双模雷达来说, 通过减小探测距离来减小测速误差有个极限值为 1.87 km/h。因此在短距离速度测量中, 减小白噪声调相噪声是减小测速误差的一个重要途径。由式(7)可见, 当探测距离为 10 m 时, 该双模交通信息采集雷达的测速误差为 2.44 km/h, 满足实际交通测速要求。另由式(5)所得的相位噪声-速度误差关系图(图 6)可见, 在探测距离为 10 m 时减小相位噪声对减小测速误差效果不明显。所以对于工作在 CW 模式的双模雷达来说, 当用于短距离测速时, 其测速误差与应用低相位噪声振荡源的 CW 雷达差别不大。

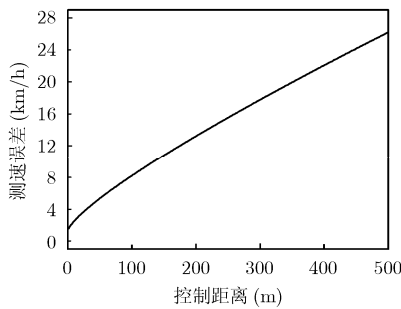


图 5 探测距离与速度误差关系

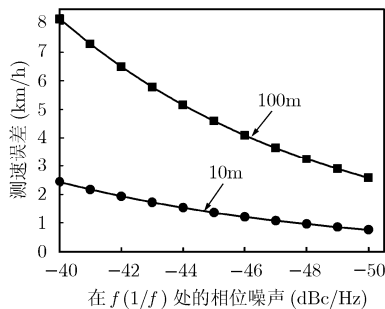


图 6 相位噪声与速度误差关系

4 双模交通信息采集雷达的外场实验

对于该双模交通信息采集雷达, 由于其 FMCW 模式已有成熟的分析和实验, 所以外场实验主要测试其测速性能。外场实验与雷达实际应用场景一样, 即将该雷达安装在车道上方, 使雷达工作在 CW 模式, 测量车道上车辆的速度, 目标车辆的速度为 16 km/h。实验得到的雷达中频信号时域和频域信号如图 7 和图 8 所示。

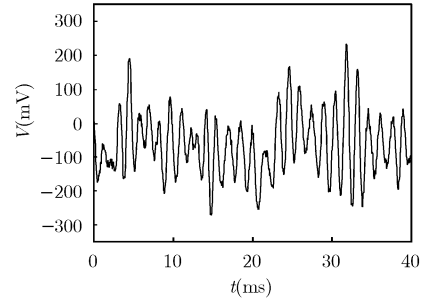


图 7 雷达工作在 CW 模式时的中频信号时域波形

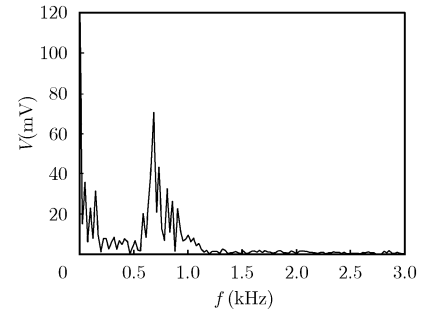


图 8 雷达工作在 CW 模式时的中频信号频域波形

如图 8 所示, 幅度最大的频率值为 700 Hz。根据多普勒原理, 可计算得到目标测量的速度为

$$V = \frac{f_d C}{2f_0} = 15.75 \text{ km/h} \quad (8)$$

可见由式(8)得到的速度值与实际值在实验误差内是符合的。

为与低相位噪声、高频稳度的振荡源的射频前端作比较, 我们以 K 波段低相位噪声锁相环作为振荡源设计了另一个单一模式的 CW 雷达。其工作频率与本文提出的双模式交通信息采集雷达工作在 CW 模式时一样, 其余射频前端构成也相同。该锁相环的相位噪声在 1 kHz 时为 -67 dBc/Hz, 如图 9 所示。

设置两雷达的作用距离为 10 m, 20 m, 30 m, 都工作在 CW 模式, 测量目标汽车的速度(同一距离汽车速度相同, 不同距离汽车速度不同), 汽车与雷达照射方向成 45°, 两雷达测得的速度如表 5 所示。

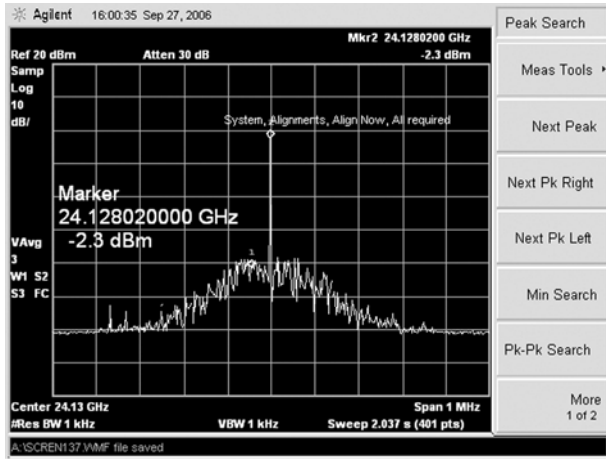


图 9 锁相环的相位噪声

表5 两个雷达测得的速度

雷达类型	10 m	20 m	30 m
以PLL为振荡源的CW雷达	20.6 km/h	25.5 km/h	35.8 km/h
双模交通信息采集雷达	21.3 km/h	24.9 km/h	36.9 km/h

根据这个实验可以证明, 本文提出的以 MMIC VCO 为振荡源的双模交通信息采集雷达在近距离测速时, 其测得的速度与以低相位噪声锁相环为振荡源的 CW 雷达相比相差不大。

5 结束语

本文提出的双模交通信息采集雷达, 能工作在 CW 和 FMCW 模式。当该双模雷达工作在 CW 模式并进行短距离测速时, 其测速性能与以低相位噪声锁相环为振荡源的 CW 雷达相比相差不大, 能满足一般民用交通雷达测速精度的要求。

参 考 文 献

[1] Katz A, Guida A, Mack S, and Heitmann J. Affect of weather on the performance of Ka-band traffic radar. Sarnoff Symposium, Princeton, NJ, April 28-30, 2008 IEEE, 2008: 1-4.

[2] Xue Wei and Sun Xiao-wei. Target detection of vehicle volume detecting radar based on Wigner-Hough Ttransform. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2007, 21(11): 1513-1523.

[3] Russell M E and Arthur C. Millimeter -wave radar sensor for automotive intelligent cruise control (ICC). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(12): 2444-2453.

[4] Miranda S L C, Baker C J and Woodbridge K. Comparison of scheduling algorithms for multifunction radar. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(6): 414-424.

[5] Robertson M and Brown E R. Integrated radar and communications based on chirped spread -spectrum. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Pennsylvania Convention Center, Philadelphia, Pennsylvania, June 8-13, 2003: 611-614.

[6] Conn M, Koenig F, Goldman G, and Adler E. Waveform generation and signal processing for a multifunction radar system. IEEE Radar conference, Wyndham Philadelphia at Franklin Plaza, Philadelphia, Pennsylvania, April 26-29, 2004: 161-165.

[7] Li Zhao-long and Wu Ke. 24 GHz radar front-end for FMCW and spread spectrum radar applications. Radio and Wireless Symposium 2006 IEEE, San Diego, CA, January 17-19, 2006: 351-354.

[8] Cui B, Zhang J, and Sun X W. Single layer microstrip antenna arrays applied in millimeter-wave radar front-end. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2008, 22(1): 3-15.

[9] 王闯, 钱蓉, 孙晓玮. 高增益 K 波段 MMIC 低噪声放大器. 半导体学报, 2006, 27(7): 1285-1289.

Wang Chuang, Qian Rong, and Sun Xiao-wei. K-band monolithic low noise amplifier wit high gain. *Chinese Journal of Semiconductor*, 2006, 27(7): 1285-1289.

[10] 王闯, 钱蓉, 喻筱静, 等. 基于倒扣技术的 Ka 波段环形混频器. 固体电子学研究进展, 2007, 27(1): 46-48.

Wang Chuang, Qian Rong, and Yu Xiao-jing. Low cost Ka-band rat-race mixer with flip-chip. *Research & Progress of SSE Solid State Electronics*, 2007, 27(1): 46-48.

[11] Barnes J A, et al. Characterization of frequency stability. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1971, 20(2): 105-120.

[12] Rutman J and Walls F L. Characterization of frequency stability in precision frequency sources. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(7): 952-960.

[13] Drucker E. Model PLL dynamics and phase-noise performance. *Microwaves & RF*, 2002, 2000(2): 73-82.

杨明辉: 男, 1981 年生, 博士生, 从事射频系统集成和毫米波成像技术研究。

许 杰: 男, 1984 年生, 博士生, 从事射频系统集成和毫米波成像技术研究。

孙晓玮: 女, 1958 年生, 博士生导师, 从事微波毫米波集成、混合集成电路及其相关的微波通信与雷达系统。