

多斜率步进调频连续波信号在汽车防撞雷达中的应用¹

张建辉 刘国岁 顾红 苏卫民

(南京理工大学电子工程技术研究中心 南京 210094)

摘要 该文首先介绍了工作在毫米波段的汽车防撞雷达的有关情况,然后针对其在实际工作情况下遇到的虚警问题,提出了一种新的雷达发射信号波形,即多斜率步进调频连续波信号,该波形可以容易地数字化产生,同时其相应的信号处理降低了传统的高分辨率雷达对高速宽带信号处理的要求,该文还提出了一种用于多个车辆目标检测的逐次逼近算法,仿真结果表明,该算法能够有效地去除虚假目标。

关键词 汽车防撞雷达, 步进调频连续波, 多目标检测

中图分类号 TN95

1 毫米波雷达应用于汽车防撞

随着现代社会工业化程度的高度发展,交通安全问题已成为各国亟待解决的大课题。对于公路交通事故的分析表明,80%以上的车祸是由于司机反应不及所引起的,超过65%的车辆相撞属于追尾相撞。研究同时表明:若司机能够提早1秒钟意识到有事故危险并采取相应的正确措施,则绝大多数的交通事故都可以避免^[1-3]。在这种背景下,以汽车防撞雷达为代表的自动驾驶辅助控制装置应运而生。

事实上,除雷达外,诸如超声波、红外、激光以及视频等技术均可考虑用于汽车防撞,但综合考虑而言,雷达技术最为适合。表1列出了雷达技术同其它技术的主要性能对比,表2为笔者在参阅有关文献的基础上总结出的汽车防撞雷达的一些主要工作参数^[4]。

表1 雷达技术同其它技术的性能对比表

应用技术	超声波	红外	激光	视频	雷达
长距离探测能力	低	一般	强	强	强
目标鉴别能力	低	低	一般	强	强
排除虚警能力	低	低	一般	一般	强
温度稳定性	差	一般	强	强	强
黑暗穿透能力	强	强	强	低	强
全天候穿透能力	低	低	低	低	强
硬件低成本可能性	高	高	一般	低	高
信号处理低成本可能性	高	高	高	低	高
有灰尘/烟雾笼罩时传感器的性能	一般	差	差	差	良好

表2 汽车防撞雷达主要性能参数一览表

工作频率 (GHz)	24/35/60/77/94
作用距离	150m 左右
扫描方位角	12° 左右
扫描高低角	3° 左右
距离分辨率	1m 以内
角度分辨率	2° 左右
相对速度分辨率	2km/h 左右
发射功率	毫瓦数量级
系统刷新周期	几十个毫秒

毫米波技术因为综合了微波与光波的许多优点(如分辨率高,体积小,频谱宽波束窄,抗干扰能力强,穿透能力强等),非常适合应用于汽车防撞雷达^[5]。关于汽车防撞雷达的工作频率问题,将来利用77GHz已经在国际范围内达成共识。

在实际应用中,雷达系统可以装配在车辆的前方、侧方或者后方,完成前视防撞(防追尾碰撞)、侧视防撞(防超车时两车相撞)和后视防撞(防倒车时与车后障碍物相撞)等侧重点各异的功能。无疑的,前视汽车防撞雷达(FLAR, Forward Looking Automotive Radar)的研发具有首要性。另外,前视汽车防撞雷达的功能也有高低之分,低级阶段即危险预警,高级阶段即所谓的自主智能巡航控制(AICC, Autonomous Intelligent Cruise Control)。AICC的基本思想是:雷

¹ 2000-01-20 收到, 2000-07-12 定稿

达系统通过即时监测车辆间距和相对运动速度信息, 自动控制汽车的加速, 减速或者刹车, 从而自动地调整己车与前车的间距或者相对速度使之保持在一个安全的范围内^[1,2,6-8]。显然, ACC 是汽车防撞雷达发展的终极目标。国际上对于汽车防撞雷达的研究始于 20 世纪 60 年代^[9], 并很快在以德国、美国和日本为代表的发达国家内形成了一股研究热潮, 目前已有多台样机问世, 并有一些相应的实验结果和论文发表。现在德国在这一领域的研究处于领先地位。在我国, 对汽车防撞雷达的研究尚处于起始阶段, 通过为数不多的文献资料可知国内在这一课题上基本上没有较为深入和全面的理论探讨。因此, 目前首要的工作是做好理论预研方案, 为在我国高效地研制防撞雷达系统提供良好的基础。

汽车防撞雷达的思想看似简单, 但研发的难度却非常大。迄今为止, 国际上尚无一套防撞雷达系统正式生产并投放市场, 除了毫米波器件水平和系统总体成本方面的因素以外, 技术上存在的最大问题就是虚警问题。

由于汽车防撞雷达的工作环境恶劣, 虚警的产生可能起源于多种因素。邻近车道上的车辆, 车道间的护栏, 路旁的树木和各种标识牌, 以及空中和远处的建筑等物体都会对雷达系统形成干扰, 导致防撞雷达向司机发出错误警报。所以, 如何获得可以接受的低虚警率, 是汽车防撞雷达理论研究中的重点和难点。此外, 弯道和道路斜坡情况下如何正确地检测出前方危险目标也是研制汽车防撞雷达必须考虑的问题。

为了解决虚警问题, 国际上的研究者通过大量的实验研究, 已经逐渐达成共识, 即: (1) 要求防撞雷达必须具备测角能力, 目标的方位角信息对于去除虚警是必不可少的; (2) 设计出易于产生, 抗干扰性能强的复杂雷达发射信号, 配合以实时高效的信号处理和目标检测算法, 以去除虚警。只有以上两点紧密结合起来, 才能保证汽车防撞雷达的工作可靠性。

2 多斜率步进调频连续波信号及其测距测速原理

2.1 信号波形

图 1 为多斜率步进调频连续波信号的频率随时间变化的示意图, 由图可见, 信号的一个周期包含三个三角形, 又可细分为 A 到 F 六段, 而每一段又由 N 个子脉冲组成, 同时这 N 个子脉冲的频率在 A, C, E 段依不同的步进频率依次递增, 而在 B, D, F 段依次递减。图中 f_c 为载频, 即雷达的工作频率。在每个子脉冲发射完毕时, 系统对回波信号进行采样并存储之, 用于后续的信号处理。图 2 为回波信号采样示意图。图中 T_p 为脉冲重复周期 (PRI), 同时也是子脉冲宽度, 也就意味着发射信号在时域上是连续的。

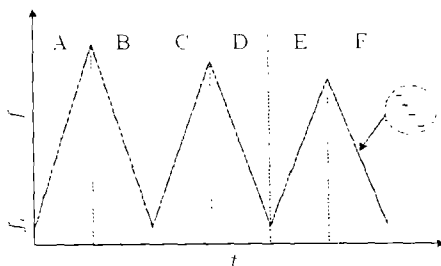


图 1 发射信号频率随时间变化示意图

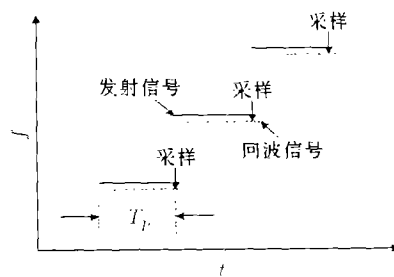


图 2 回波信号采样示意图

2.2 测距测速原理

用本文提出的发射信号可以很方便地同时测量出车辆前方雷达扫描范围内的所有目标的距离和相对运动速度。下面我们以 A 和 B 两段所组成的第一个三角形为例来说明防撞雷达的测距测速原理。

当 A 段信号发射之后, 目标回波在接收机内部经过正交双通道混频后得到低频信号, 再对其以 PRI 采样后, 得到第 i 个频率阶跃子脉冲的回波信号的采样值 $R(i)$ 可表达为

$$R(i) = A_i \exp[-j2\pi(f_c + i\Delta F_1)\tau(i)] \quad (1)$$

$$\tau(i) = 2(d + ivT_p)/c \quad (2)$$

式中 A_i 为采样幅值, $\tau(i)$ 为目标延时, v 为目标的相对运动速度, d 为 $t=0$ 时目标的初始距离, c 为光速, ΔF_1 为 A 段和 B 段信号采用的步进频率。

对整个 A 段脉冲串而言, 正交双通道输出信号的采样 $R(i)$ 可视为目标在频域响应的采样, 对这 N 个复数采样通过逆离散傅里叶变换 (IDFT), 即可得到目标的复合距离分布^[10], 其幅值 $S(\phi)$ 为

$$\begin{aligned} S(\phi) &= \left| \sum_{i=0}^{N-1} R(i) \exp\left(\frac{j2\pi i\phi}{N}\right) \right| \\ &= \left| \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left(\frac{-j4\pi i\varphi}{c}\right) \right| \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\varphi = df_c + i[\Delta F_1 d + f_c T_p v - c\phi/(2N)] + i^2 v T_p \Delta F_1 \quad (4)$$

(4) 式中的第三项, 也叫多卜勒与步进频率耦合项, 其值相对而言很小, 可以忽略不计, 例如: 对于 $f_c=77\text{GHz}$, $T_p=10\mu\text{s}$, $\Delta F=1\text{MHz}$, 计算可知耦合项的影响非常小。于是 (4) 式可写为

$$\varphi = df_c + i[\Delta F_1 d + f_c T_p v - c\phi/(2N)] \quad (5)$$

假设目标处于距离 d 处, 以相对速度 v 运动, 则 $S(\phi)$ 的峰值响应出现在 ϕ_0 处

$$\phi_0 = 2N(\Delta F_1 d + f_c T_p v)/c + k_0 N \quad (6)$$

相似地, 对于 B 段脉冲串, $S(\phi)$ 的峰值响应出现在 $\bar{\phi}_0$ 处

$$\bar{\phi}_0 = 2N(-\Delta F_1 d + f_c T_p v)/c + \bar{k}_0 N \quad (7)$$

显然, 由 (6), (7) 两式即可获得目标的距离 d 和相对速度 v

$$d = c(\phi_0 - \bar{\phi}_0)/(4N\Delta F_1) - c(k_0 - \bar{k}_0)/(4\Delta F_1) \quad (8)$$

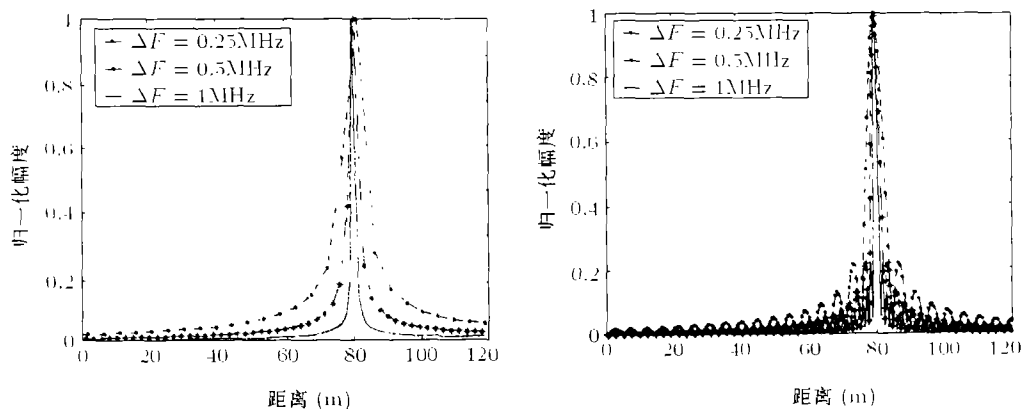
$$v = c(\phi_0 + \bar{\phi}_0)/(4Nf_c T_p) - c(k_0 + \bar{k}_0)/(4f_c T_p) \quad (9)$$

(8), (9) 两式各自的后一项由步进频率和脉冲重复周期决定。例如假设 $N=128$, $\Delta F=1\text{MHz}$, $T_p=10\mu\text{s}$, 目标在车辆前方运动时, 则当 $\phi_0 \geq \bar{\phi}_0$ 时, 取 $k_0 - \bar{k}_0 = 0$; 而当 $\phi_0 \leq \bar{\phi}_0$ 时, 取 $k_0 - \bar{k}_0 = -1$ 。

这样, 由 A, B 两段组成的一个三角形信号就同时测出了一个目标的距离和相对速度。与此同理, 另外两个三角形也可完成这一功能。

图 3(a) 是以 A 段脉冲串信号为例, 当 $d=80\text{m}$, $v=36\text{km/h}$, $N=128$, $T_p=10\mu\text{s}$, 步进频率 ΔF 分别 0.25MHz , 0.5MHz , 1MHz 时, 做 128 点 IDFT 得到的一个目标的复合距

离分布图。容易看出, 雷达的距离分辨率与整段脉冲串的总带宽 ($N\Delta F$) 成反比。步进频率越小, 距离分辨率越差。由此引发的一个问题是: 由于每个三角形信号采用的 ΔF 不同, 导致每个三角形信号测得的目标距离与相对速度之间会有一定偏差, 这会对在下文将要讨论的目标检测产生不好的影响。事实上, 我们在对复数采样 $R(i)$ 做傅里叶变换时, 可以对其做足够多点数的 IDFT, 以使得 ϕ_0 和 $\bar{\phi}_0$ 的位置更加接近实际峰值位置, 从而保证每个三角形信号测得的 d 和 v 之间的偏差达到一个实际中可以接受的程度。这样, 在进行目标检测时, 只要三个三角形信号分别测得的 d 和 v 各自比较后, 偏差均在允许误差范围之内, 我们就认为它们测得的是同一个目标。图 3(b) 是做了 1024 点 IDFT 后得到的目标复合距离分布图, 显然, 测量精度得到了改善, 图中的 ΔF 为步进频率。



(a) 做 128 点 IDFT 后得到的目标复合距离分布图 (b) 做 1024 点 IDFT 后得到的目标复合距离分布图

图 3 对回波采样信号做不同点数的 IDFT 后得到的目标复合距离分布图

容易看出, 本文提出的这种新的雷达发射信号具有下列优点: (1) 调制波形可以很容易地数字化产生, 且线性度较好; (2) 可以同时测得目标的距离和相对速度; (3) 降低了系统对瞬时带宽和对回波信号的高采样率要求; (4) 由于汽车防撞雷达的作用距离很小, 子脉冲数 N 可以取得很大, 即使脉冲重复周期很小也不会引起距离模糊, 因此可以获得很高的距离分辨率; (5) 由于发射信号采用了连续波体制, 在近程作用时发射功率小, 故收发天线的高隔离度可容易获得。

3 多目标环境中的目标检测

在有多个目标存在于防撞雷达的视野之内时, 雷达系统必须首先保证能够确定每个目标的距离和相对速度, 再依据测角功能提供的各目标相对于己车的方位角信息, 去除掉相邻车道上的干扰目标, 再对己车车道上的目标进行选择, 选定距离己车最近的目标车辆为危险目标, 一旦该目标与己车之间的间距超过了安全警戒距离, 则向司机报警。

如果用 a_s 来表示安全警戒距离, 则 a_s 可表达为

$$a_s = v_2^2 / (2b_2) - v_1^2 / (2b_1) + v_2 T_R \quad (10)$$

式中 T_R 为司机的反应时间, v_1 和 v_2 分别为目标与己车的运动速度, b_1 和 b_2 分别为目标与己车的加速度。(10) 式为德国奔驰汽车公司于 1994 年提出的经验公式^[3]。

针对本文提出的新的信号体制, 笔者提出用逐次逼近算法来检测目标, 能够有效地去除虚警。下面我们举例说明逐次逼近算法检测多目标的概念。

现以 A 和 B 两段组成的第一个三角形为例，假设前方有三个车辆目标，如前文所述，每个目标都会分别在 A 段和 B 段贡献出一个 ϕ_0 和 $\bar{\phi}_0$ ，于是三个目标就会在 A 段和 B 段贡献出三个 ϕ_0 和三个 $\bar{\phi}_0$ ，这三对 ϕ_0 和 $\bar{\phi}_0$ 两两组合，便可计算出九对 d 和 v ，也就是说防撞雷达发现了九个可能的目标。同理，在另外的两个三角形信号中，也各自发现了九个可能的目标。事实上，三个真实的目标会在每个三角形中都出现，于是，我们先将第一个三角形发现的九个可能目标与第二个三角形发现的九个可能目标两两相比（即每两个可能目标的 d 和 v 都各自做比较），这样比较之后，可以去除掉绝大多数的假目标，然后将第一个和第二个三角形信号中都出现的目标保留下来，我们认为它们是真实目标的可能性更大。接下来再将这些目标去和第三个三角形信号发现的九个可能目标做比较，再将“匹配”的目标保留下来，认为它们就是真实存在的目标。最后应用 (10) 式所示的数学模型对这些目标进行实时监测。

实际上，上述的逐次逼近算法体现的就是一种“交叉寻找”的思想。如前文所述，我们在对从 A 到 F 每一段的脉冲串的 $R(i)$ 做 IDFT 后得到的 ϕ_0 由目标的距离 d 和相对速度 v 决定，现将 (8) 式变换为 v 和 d 的表达式如下：

$$v = -\Delta F d / P + Q \tag{11}$$

其中 $P = f_c T_p$, $Q = (c\phi_0 - k_0 N) / (2NF_c T_p)$ 。

(11) 式所表达的直线如图 4 中 LA 所示，LA 的斜率由步进频率 ΔF 决定，而截距 Q 由不同的目标所产生的不同的 ϕ_0 决定。同理，可以依次绘出 LB 到 LF。于是这六条直线的交叉点便决定了一个真实目标。实际上，两条直线即一个三角形信号即可决定一个目标，但在实际的高速公路交通情况中，防撞雷达扫描范围内的目标会有很多个，这时如果只发射一个三角形信号，则假目标的数目就将十分惊人，这是容易理解的。所以，我们发射多个不同斜率的三角形信号，以确保有效地去除虚警。

当然，发射三角形数目的多少也要同时权衡系统的有关指标而定。比如应考虑到数字信号处理的实时运算量和系统的刷新率等。

图 5 为我们假定了六个目标时，应用上述的目标检测算法所得到的仿真结果。结果能够说明，这个算法是有效的。这六个目标的距离分别为：40m，100m，100m，140m，60m，120m；相对速度分别为：2m/s，2m/s，16m/s，20m/s，30m/s，10m/s。此外， $f_c = 77\text{GHz}$ ， $T_p = 10\mu\text{s}$ ， $N = 128$ ，采用三个三角形信号，每个三角形信号中采用的步进频率分别为 0.25MHz，0.5MHz 和 1MHz，同时对采样信号做 1024 点 IDFT。在比较过程中，距离允许误差设置为 1m，相对速度允许误差设置为 0.2m/s。最后，取三个三角形信号分别测得的各个真实目标的 d 和 v 的平均值做为最终的测量结果。

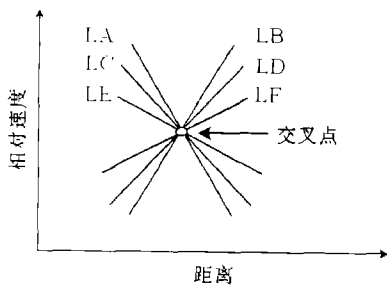


图 4 “交叉寻找”示意图

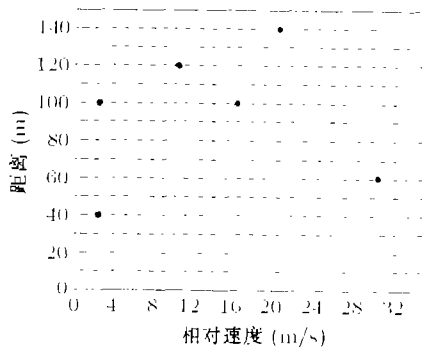


图 5 多目标检测仿真结果

4 结 束 语

汽车防撞雷达是市场前景广阔的高科技产品,但由于其技术复杂,知识密集,涉及面广,故研制出性能优良,成本低廉的产品难度很大。如何获得低的虚警率是理论研究中必须解决的一个问题。本文针对这一问题,提出了一种新的雷达发射波形,分析和仿真验证了此波形在去除虚警方面的有效性。

参 考 文 献

- [1] H. Rohling, M.-M. Meinecke, M. Klotz, R. Mende, Experiences with an experimental car controlled by a 77GHz radar sensor. In: Int. Radar Symposium 98, Munich, Germany: 1998, 345-354.
- [2] J. D. Woll, VORAD collision warning radar. In: IEEE Int. Radar Conference, Alexandria, VA 1995, 369-372.
- [3] W. Ulke, R. Adomat, K. Butscher, Radar based automotive obstacle detection system, SAE Trans., J. of Passenger Cars, 1994, 103(sec.6), 1224-1236
- [4] W. Nagy, J. Wilhelm, System and parametric tradeoffs of forward looking automotive radar systems. In: IEEE 1996 National Radar Conference, Ann Arbor, Michigan, 1996, 19-26.
- [5] P. L. Lowbridge, Low cost millimeter-wave radar systems for intelligent vehicle cruise control applications, J. of Microwave, 1995, 38(10), 20-33.
- [6] H. Winner, S. Witte, W. Uhler, B. Lichtenberg, Adaptive cruise control system aspects and development trends, SAE Trans., J. of Passenger Cars, 1996, 105(sec.6), 1412-1421.
- [7] J. Detlefsen, E. Schmidhammer, T. Troll, Collision warning radar using PN-code-modulation and wavefront reconstruction, In: Int Radar Symposium 98, Munich, Germany. 1998, 363-370.
- [8] L. H. Eriksson, B-Olof, A high performance automotive radar for automatic AICC. IEEE AES Systems Magazine, 1995, 10(12), 13-18.
- [9] D. M. Grimes, T. O. Jones, Automotive radar: A brief review, Proc. IEEE, 1974, 62(6), 804-822.
- [10] D. R. Welmer, High Resolution Radar, London, Boston, Artech House, 2nd edition, 1995, Chapter 5.

MULTI-SLOPE STEPPED-FMCW WAVEFORM APPLIED FOR AUTOMOTIVE COLLISION WARNING RADAR

Zhang Jianhui Liu Guosui Gu Hong Su Weimin

(RCEET, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract In this paper, automotive collision warning radar systems which operate on millimeter wave band is introduced first, then a new radar transmit waveform, which can be called multi-slope stepped-FMCW waveform, applied for those systems to solve the false alarm problem is proposed. The new waveform is easy to be generated digitally and its signal processing reduces the high-speed and wide-band signal processing requirement compared with conventional high resolution radar. An error approach algorithm for multiple vehicle target detection is suggested and its usefulness in eliminating the false target is confirmed by computer simulation.

Key words Automotive radar, Stepped-FMCW, Multi-target detection

张建辉: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为毫米波雷达系统和高速数字信号处理技术。

刘国岁: 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, 长期从事噪声雷达理论与应用的研究。近年来从事随机信号理论与应用、神经网络与模糊系统和近代信号处理技术等多项研究工作。

顾红: 男, 1967年生, 副教授, 主要从事雷达系统及雷达信号处理方面的研究工作。

苏卫民: 男, 1962年生, 副教授, 主要从事阵列信号处理方面的研究工作。