

编码步进调频连续波信号在汽车防撞雷达中的应用

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, 江苏南京 210094)

摘要: 本文提出了一种用于毫米波汽车防撞雷达的编码步进调频连续波信号. 这种新的发射信号具有距离高分辨率特性和良好的抗干扰能力. 本文还提出了一种用于多目标环境中的试凑逼近检测算法并通过计算机仿真证明了该算法可以有效地去除虚警. 最后, 对信号波形的优化进行了研究并给出了仿真结果.

关键词: 汽车防撞雷达; 编码步进调频连续波; 多目标检测; 波形优化

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 07-0943-04

Coded Stepped-FMCW Signal for Automotive Collision Warning Radar Applications

ZHANG Jian-hui, LIU Guo-sui, GU Hong, SU Wei-min

(RCEET, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: In this paper, a new transmit signal for mm-wave automotive collision warning radar applications is proposed. This signal, named Coded Stepped-FMCW, providing high range resolution and good anti-interference capability. A trial and error approach algorithm for multi-target detection is also suggested and its usefulness in eliminating the false target is confirmed by computer simulation. The optimization of waveform design is investigated and the simulation results is presented in the end.

Key words: automotive collision warning radar; coded stepped-FMCW; multi-target detection; waveform optimization

1 引言

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^[1,2]. 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^[3]. 毫米波技术因为综合了微波与光波的许多优点, 非常适合应用于汽车防撞雷达.

国际上对于汽车雷达的研究始于 20 世纪 60 年代, 目前已有多样机问世, 并有一些相应的实验结果和论文发表. 研究内容主要集中在两个方面, 即前视汽车雷达 (FLAR: Forward Looking Automotive Radar)^[4] 和自主智能巡航控制 (AICC: Autonomous Intelligent Cruise Control)^[5-7]. 二者的区别在于前者只需完成危险预警功能, 而后者需要通过雷达系统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. 显然, AICC 是汽车

防撞雷达发展的终极目标, 但 FLAR 的研发更具有现实性和紧迫性.

我国对于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, 为将来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, 除了美国 Eaton VORAD 技术公司研制的 VORAD 防撞雷达系统^[8,9] 曾在小范围内试运行以外, 国际上尚未有防撞雷达系统正式生产并投放市场的相关报道. 除了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, 以及空中和远处的高大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. 而频繁的虚警在实际应用中是不能接受的. 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.

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: 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; 设计出易于产生, 抗干扰性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

收稿日期: 2000-04-28; 修回日期: 2000-09-18

密结合起来,才能保证汽车防撞雷达的工作可靠性.

2 编码步进调频连续波信号特性分析

2.1 信号波形

图 1(a) 为一个周期内编码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, 每一段又由 N 个子脉冲组成, 这 N 个子脉冲的频率在 A, C, E 段依不同的步进频率 F 依次递增, 而在 B, D, F 段依次递减. 同时, 每一段发射信号中的 N 个子脉冲, 又被一个伪随机序列调制. 图 1(b) 是以 A 段信号为例, 示出的步进调频编码脉冲串波形. f_c 为载频, 即雷达的工作频率. T_p 为脉冲重复周期 PRI, 同时也是子脉冲宽度, 其值依据最大不模糊距离而定. 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, 用于后续的信号处理.

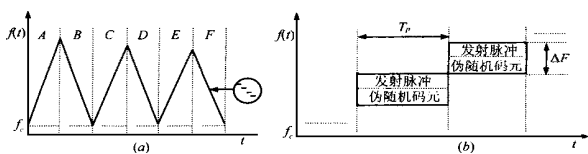


图 1 (a) 信号频率随时间变化示意图;
(b) 编码脉冲串波形示意图

2.2 测速测距原理

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, 相干解调后得到低频信号, 再对其以脉冲重复周期 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

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

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

式中: A_i 为采样幅值, (i) 为目标延时, v 为目标的相对运动速度, d 为 $t=0$ 时的初始距离, c 为光速, F_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, 依据文献 [10], 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 IDFT 进行傅立叶变换, 即可得到目标的复合距离像的幅值 $S(\phi)$ 为

$$S(\phi) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} R(i) \exp\left(\frac{j2i\phi}{N}\right) \right| = \left| \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left(\frac{-j4i}{c}\right) \right| \quad (3)$$

其中 $\phi = df_c + i(F_1 d + f_c T_p v - \frac{c\phi}{2N}) + i^2 v T_p F_1$ (4)

式(4)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. 于是式(4)可近似为

$$\phi = df_c + i(F_1 d + f_c T_p v - \frac{c\phi}{2N}) \quad (5)$$

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

$$\phi_0 = \frac{2N(F_1 d + f_c T_p v)}{c} + k_0 N \quad (6)$$

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

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

由式(6)、(7)即可获得目标的距离 d 和相对速度 v

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

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

式(8)、(9)各自的后一项由步进频率和脉冲重复周期决定. 例如假设 $N=128$, $F_1=1\text{MHz}$, $T_p=1\mu\text{s}$, 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 $\phi_0 < \bar{\phi}_0$ 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, 另外两个三角形信号也可完成这一功能. 一个需要注意的问题是: 由于每个三角形信号采用的 F 不同, 导致每个三角形信号测得的目标距离和速度之间会有一些偏差. 事实上, 我们在对复数采样 $R(i)$ 做傅立叶变换时, 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, 就认为它们测得的是同一个目标.

图 2 是以 A 段脉冲串信号为例, 当 $d=100\text{m}$, $N=128$, $T_p=1\mu\text{s}$, 做 256 点 IDFT, 步进频率 F 分别 0.25MHz , 0.5MHz , 1MHz 时, 一个目标的复合距离像. 在图的标注中, df 代表步进频率. 容易看出, 雷达的距离分辨率与整段脉冲串的总带宽 $(N F)$ 成反比. 步进频率越大, 距离分辨率越高.

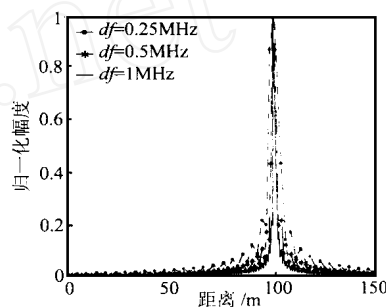


图 2 做 256 点 IDFT 得到的目标复合距离像

2.3 抗干扰性能分析

假设每辆汽车都已装备了防撞雷达, 那么相邻车道上反向行驶的车辆将有可能对己车的雷达系统施加很强的异步干扰, 从而大大影响防撞雷达系统对于目标回波信号的正确检测. 事实上, 我们之所以在发射波形中加入伪随机序列调制, 正是为了解决这一问题.

首先, 一个需要说明的假设是每辆汽车的雷达系统所采用的伪随机码序列是不同的. 这样, 干扰信号进入接收机后, 又受到本地伪随机码的附加调制, 从而导致混频后得到的采样信号序列的相位是随机离散的. 相反的, 有用的目标回波信号在接收机内部被相干解调, 得到的采样信号序列的相位是线性离散的. 于是, 经过 IDFT 处理后, 异步干扰将会被有效的抑制.

考虑最为不利的情况, 也为了简便起见, 假设干扰信号与本地的脉冲串信号是同步的. 当干扰信号和有用信号一起进入接收机, 与本地信号混频后, 得到第 i 个频率阶跃子脉冲的信号采样值 $R(i)$ 为 $R(i) = R_i + I_i$ (10)

其中, R_i 和 I_i 分别表示有用信号分量和干扰信号分量. 的表示参见 2.2 节中的讨论. I_i 可表达为

$$I_i = A_i C_i C_i \exp[-j2 (f_c + i F) i] \quad (11)$$

$$i = (d + iv T_p) / c \quad (12)$$

上式中, A_i 为干扰信号的采样幅值, C_i 和 C_i 分别表示本车雷达和干扰波配置的伪随机编码序列, i 为干扰信号的相对延迟时间, d 和 v 为假设的施放干扰的车辆的距离和相对运动速度. 图 3 为同时接收干扰信号和一个 50m 远处的目标反射信号后, 经过 IDFT 处理后得到的目标复合距离像. 采用的伪随机序列为 127 位长的 m 序列, 干扰信号和发射信号的步进频率 $F = 0.5\text{MHz}$, $N = 128$, $T_p = 1\mu\text{s}$, SIR 表示有用信号对干扰信号的功率比. 结果显示, 即使 $SIR = -15\text{dB}$ 时, 也能够检测到目标信号.

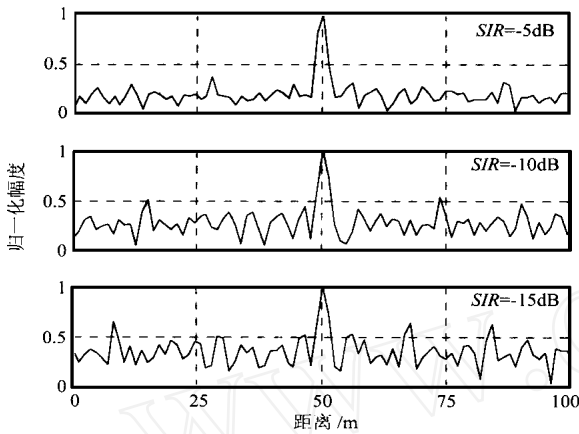


图 3 不同 SIR 时目标的复合距离像

3 多目标环境中的目标检测

对于防撞雷达系统而言, 足够大的扫描方位角是必需的. 虽然扫描方位角的增大使得进入雷达接收机的干扰信号增多, 但是, 为了全面地评估车辆前方潜在的险情, 防撞雷达应该具有 10 甚至更大的扫描方位角, 以确保其工作可靠性. 在有多个车辆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预设的警戒距离, 则向司机报警.

针对本文提出的新的信号体制, 笔者提出用试凑逼近算法来检测危险目标, 能够有效地去除虚警. 下面举例说明试凑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可能目标与第二个三角形发现的可能目标两两相比(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.

实际上, 上述的试凑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, 现将式(6)变换为 v 和 d 的表达式如下:

$$v = - (F / P) d + Q \quad (13)$$

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

式(13)所表达的直线如图 4 中 LA 所示, LA 的斜率由步进频率 F 决定, 而截距 Q 由不同目标对应的 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. 图 4 示出的是存在一个目标时的曲线交叉图. 当有多个目标存在时, 依据式(13)绘出的各条直线相互交叉, 许多交叉点都对应着可能的目标, “交叉寻找”算法正是为了找到那些公共的交叉点, 而其余的交叉点则被视为虚假目标去除之. 因此, 在多目标环境下, 发射多个不同斜率的三角形信号, 能够确保有效地去除虚警. 另外, 对于非异步干扰的地表物体形成的杂波干扰而言, 要想使防撞雷达系统形成虚警, 就必须保证干扰物体的雷达散射特性至少在发射信号的一个周期内几乎保持不变. 在如此苛刻的条件下, 地物杂波干扰形成的虚警也将得到很大程度的抑制.

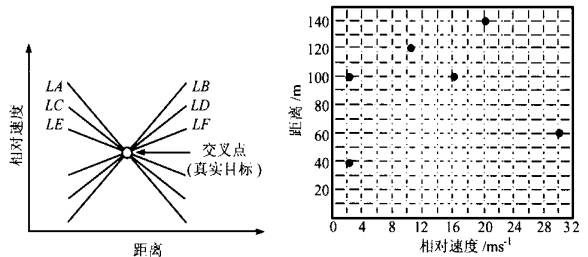


图 4 “交叉寻找”示意图 图 5 多目标检测算法仿真结果

图 5 为假定了六个目标时, 应用上述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. 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, $f_c = 77\text{GHz}$, $T_p = 1\mu\text{s}$, $N = 128$, 同时对采样信号做 256 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.

4 波形的优化

如前所述, 雷达系统发射一个正负步进调频的三角形信号即可无模糊地分辨单个目标, 但是不能同时检测多个目标. 因此, 必须在发射信号中附加上其它的特殊辅助信号, 从而达到正确分辨多个目标的目的. 事实上, 本文提出的这种编码步

进调频连续波信号,可以在权衡系统实时处理运算量和系统扫描刷新率的基础上,灵活地选取发射信号的形式.图6列出了这种雷达信号的几种不同发射形式.值得注意的是在信号(a)和信号(b)中,c段对应的是恒定频率脉冲串,也就是说,在这一段,所有N个子脉冲的发射频率都是相同的.系统对于该段信号的回波处理与在2.2节中所述的信号处理过程是相同的,只不过在处理中,步进频率F的值为0.于是,式(6)可写为

$$\phi_0 = [(2Nf_c T_p v) / c] + k_0 N \quad (14)$$

由上式可以计算出目标的相对运动速度为

$$v = (c - k_0 N) / (2Nf_c T_p) \quad (15)$$

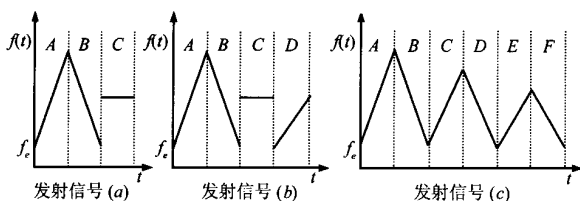


图6 编码步进调频连续波信号的几种发射形式

显然,恒定频率信号段的作用就是测量出每个目标的相对运动速度,然后在多目标检测算法中,与其它信号段发现的可能目标做比较.容易理解,图6所示的各种发射信号都具备多目标分辨能力,但是由于各自在多目标检测时约束条件的不同,导致其相应的检测性能也各不相同.事实上,在目标数目达到一定程度时,交叉寻找算法自身处理所产生的虚警是不可避免的.针对图6所示出的各种发射信号,分别采用试凑逼近算法进行多目标检测仿真,最后拟合出的由算法自身处理产生的虚警变化曲线如图7所示.仿真实验时,在信号(a)中,步进频率为1MHz(A段和B段)和0(C段);在信号(b)中,步进频率为1MHz(A段和B段),0(C段)和0.5MHz(D段);在信号(c)中,步进频率为1MHz(A段和B段),0.5MHz(C段和D段)和0.25MHz(E段和F段).

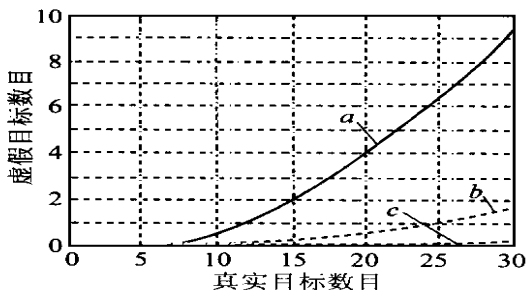


图7 不同发射信号形式对应的虚警变化特性

5 结束语

通过论文中的理论分析和仿真实验容易看出,编码步进调频连续波发射信号的优点在于:调制波形可以很容易的数字化产生,系统的自校正容易实现,降低了常规的高分辨雷达系统对瞬时带宽和对回波信号的高采样率要求,距离-速度联

合分辨率高,抗干扰能力强,多目标检测算法适合于实时处理等.当然,在研制防撞雷达系统过程中,诸如正交双通道相位误差和傅立叶变换后峰值检测的恒虚警处理误差等影响因素也应该有相应的考虑.此外,如何利用这种发射信号,尽量在不增加系统复杂程度和成本的情况下配合天线装置获取目标的方位角信息,也是有待进一步研究的工作.

参考文献:

- [1] H Rohling, et al. Experiences with an experimental car controlled by a 77 GHz radar sensor [A]. Proc. of 1998 Inter. Radar Symposium [C], Munich, 1998:345 - 354.
- [2] C David Wang, et al. Processing methods enhance collision warning systems [J]. Microwaves & RF, 1997, 36(3):72 - 82.
- [3] Wassim G Najm. Comparison of alternative crash avoidance sensor technologies [J]. SPIE, 2344:62 - 72.
- [4] Paul Ganci, et al. Forward looking automotive radar sensor [J]. SPIE, 2592:60 - 65.
- [5] P L Lowbridge. Low cost millimeter-wave radar systems for intelligent vehicle cruise control applications [J]. Microwave Journal, 1995, 38(10):20 - 33.
- [6] Hermann Winner, et al. Adaptive cruise control system aspects and development trends [D]. SAE Paper 961010, 1996.
- [7] LARS H. Eriksson. High performance automotive radar [J]. IEEE AES Magazine, 1995, 10(12):13 - 18.
- [8] Jerry D Woll. VORAD collision warning radar [A]. Proc. of Inter. Conf. On Radar [C], Washington, 1995:369 - 372.
- [9] Jerry D Woll. Vehicle collision warning system with data recording capability [D]. SAE paper 952619, 1995.
- [10] Donald R Wehner. High Resolution Radar [M]. 2nd edition. Artech House, inc., 1995.

作者简介:



张建辉 男. 1973年出生, 1995年毕业于长春光学精密机械学院电子工程系, 1998年获南京理工大学通信与电子系统专业硕士学位, 现为南京理工大学通信与信息系统专业博士生. 研究方向为毫米波雷达系统、无线通信和高速数字信号处理技术.



刘国岁 男. 1933年出生, 1953年毕业于张家口通信工程学院. 现为南京理工大学教授兼电子工程技术研究中心总工程师, 博士生导师. 主要从事噪声雷达理论与应用、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项研究. 著书两本, 在国内外发表论文 100 余篇.