

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306480

环境感知毫米波雷达抗干扰算法研究*

戴金洲¹ 杜磊² 沙硕¹ 姚瑶¹

(1.北京市计量检测科学研究所 北京 100029;2.中国计量科学研究所 北京 100029)

摘要:环境感知毫米波雷达是自动驾驶系统中最重要传感器之一。随着安装毫米波雷达的汽车数量快速增加,雷达间相互干扰问题日益突出,严重影响汽车的道路行驶安全。毫米波雷达的干扰类型分为同频干扰和异频干扰两种,针对毫米波雷达同频、异频干扰对雷达虚警和漏警的影响问题,本文提出了环境感知毫米波雷达的抗干扰算法。采用随机跳频和随机初始时间的抗干扰算法,降低信号碰撞概率,抑制同频干扰;通过希尔伯特变换提取包络截取干扰信号区域并采用拉格朗日插值法进行干扰缓解,抑制异频干扰对毫米波雷达检测结果的影响。仿真结果表明,上述抑制干扰的方法能够有效降低雷达的虚警和漏警率,以达到理想的抗干扰效果。

关键词:毫米波雷达;抗干扰;希尔伯特变换;拉格朗日插值

中图分类号: TN52⁺8;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Anti-interference algorithm of environment-aware millimeter wave radar

Dai Jinzhou¹ Du Lei² Sha Shuo¹ Yao Yao¹

(1. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Environment-aware millimeter wave radar (EMWR) is one of the most important sensors in autonomous driving system of car. With the rapid increase of the number of cars installed with millimeter-wave radar, the problem of mutual interference between radar is increasingly prominent, which seriously affects the road safety of cars. The interference types of millimeter wave radar can be divided into two types: Same frequency interference (SFI) and different frequency interference (DFI). Aiming at the influence of SFI and DFI of millimeter-wave radar on radar false alarm and leakage alarm, this paper proposes the anti-interference algorithm of environmental awareness millimeter-wave radar. The random initial frequency and random starting time are used to reduce the probability of signal collision to inhibit the interference. The Hilbert transformation is used to extract the envelope and gets the location of the interference signal. Furthermore, Lagrange interpolation is used to improve the accuracy of the location in DFI to reduce the effective of different frequency interference on EMWRs. The simulation results show that the above method can achieve an ideal effect.

Keywords: millimeter wave radar; anti-interference; Hilbert transformation; Lagrange interpolation

0 引言

随着雷达的普及率越来越高,每年都会有大量的雷达出现在驾驶道路上,76~81 GHz的频谱将大量被占用,多部雷达在同一时间以相同的频率发射可能会发生相互干扰,因此汽车雷达需实现在相互干扰的环境下依然能够有效的检测目标^[1]。汽车雷达间的相互干扰通常被分

为同频干扰和异频干扰两种^[2]。同频干扰的条件比较苛刻,只有在两个或者多个雷达之间的时间、波形和频率完全匹配且功率超过一定的检测门限值,同频干扰会产生虚假目标从而导致雷达的误报^[3]。异频干扰是指虽然雷达的发射参数不一致,但有部分信号落入雷达接收的带宽中,并作为真实回波信号被处理,这种干扰会增加频域噪声基底进而降低目标的信噪比,导致部分目标漏检^[4]。所以如何在复杂的电磁环境中依然能够让雷达保持正常

工作以及如何处理雷达之间相互干扰是一个急需解决的问题。

当前国内外针对车载毫米波雷达产品的抗干扰措施按照处理位置区可分为3类:基于信号源类、基于信号传输过程类、基于接收信号处理类。基于信号源类主要聚焦于信号源本身理论上生成具有很好抗干扰特性的波形并时刻保持低噪声特性。基于信号传输过程类的抗干扰一般依托于相控阵雷达技术,利用其高精度、抗干扰性强和角度分辨率高等特点。基于接收信号处理的抗干扰措施是改进信号处理算法,以此减小漏报率和误报率^[5-10]。目前,电子科技大学等科研院校采用二相调制编码域抗干扰技术对雷达抗干扰进行研究分析,虽效果明显但其计算量大,不利于平台实现^[11]。桂林电子科技大学等提出的基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的信号提取方法,在接收信号领域对干扰信号进行处理,可达到理想效果,但 EMD 迭代周期较长,耗时长,在实际使用中有瓶颈^[12-15]。本文通过分析同频干扰和异频干扰的特点,提出对应的解决方案,以达到理想的抗干扰效果。

1 干扰分析

同频干扰和异频干扰是接收系统中通常出现的两种干扰,其性质不同,解决的办法也有所不同。本章通过分析雷达间相互干扰的原理及其影响,推导干扰信号的回波模型并分析不同类型的干扰信号带来的影响。

1.1 同频干扰

当干扰雷达和被干扰雷达发射信号的发射参数几乎一致,且两者的起始时间非常接近时,会产生干扰现象,由于干扰信号的斜率与真实信号的斜率一致,因此当信号通过接收机接收后,经过混频,会得到一个固定频点的正弦信号,FFT 后为单峰值,即可认为在此处存在一个目标,即为假目标^[16-17]。

图1为同频干扰的示意图。此时干扰雷达的发射信号进入到正常雷达接收带宽之内,产生虚假干扰目标,但实际上这种情况发生的概率较小。

图1中,①为原始信号频率随时间的变化,②为经过混频后的信号频率,③为混频后的信号的 FFT 结果。因此,在同频干扰时,会在特定的位置产生一个虚假目标。

1.2 异频干扰

如果干扰雷达与被干扰雷达具有不同的调频斜率,则两种 chirp 会相互交叉,当两者的频率差位于被干扰雷达的中频带宽范围内时,干扰雷达的发射信号会被正常雷达接收,并将其作为目标回波处理,经过混频后,会产生一个频率在某个范围内分布信号,经过 FFT 后整个频

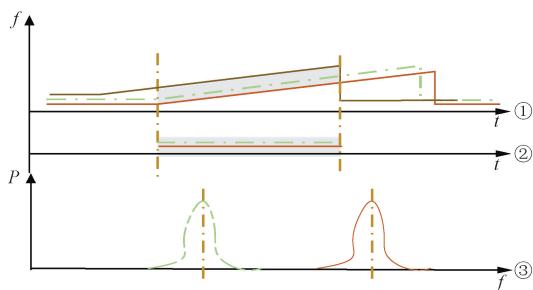


图1 同频干扰信号特征

Fig. 1 SFI signal characteristics

谱上均有分布,从而导致信号频域噪声基底的升高,降低雷达的检测概率^[18]。图2为异频干扰的示意图。

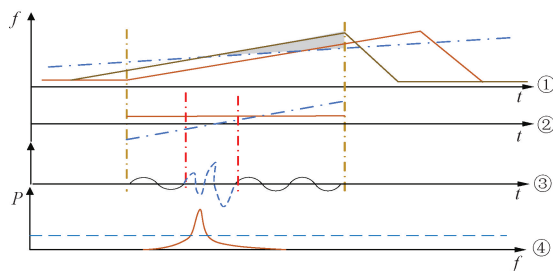


图2 异频干扰特性

Fig. 2 DFI signal characteristics

图(2)中,①为原始信号频率随时间的变化,②为经过混频后的信号频率,③为注入被雷达接收到的 ADC 信号,④为混频后的信号的 FFT 结果。因此,在异频干扰时,会在特定距离门上抬高底噪,造成信号的漏报。

2 抗干扰算法及仿真分析

第1章主要对干扰特性进行分析,本章主要对不同特性的抗干扰算法做详解和仿真,旨在不同的干扰特性采用不同的抗干扰算法并仿真分析该算法的可行性。在同频干扰中,主要采用算法降低碰撞概率,而在异频干扰中,主要是去掉或削弱干扰区域对整个 chirp 信号的影响。

2.1 同频干扰算法及仿真

同频干扰的概率非常小,只有在两个雷达几乎同时启动射频发射信号时,干扰信号才会被雷达采集,否则,干扰信号会被中频滤波抑制。同频干扰碰撞概率示意图如图3所示。

此时发生碰撞的概率为:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{t_d}{t_c}\right)^n \quad (1)$$

式中: t_d/t_c 为占空比, n 为干扰源的个数,则占空比约小,

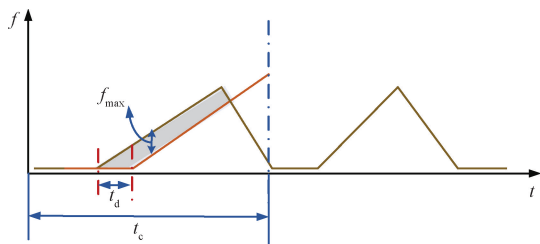


图 3 同频干扰碰撞概率

Fig. 3 The probability of the SFI

碰撞的概率越小。

一个碰撞周期内,碰撞概率随占空比和干扰源个数之间的变化关系如图 4 所示。

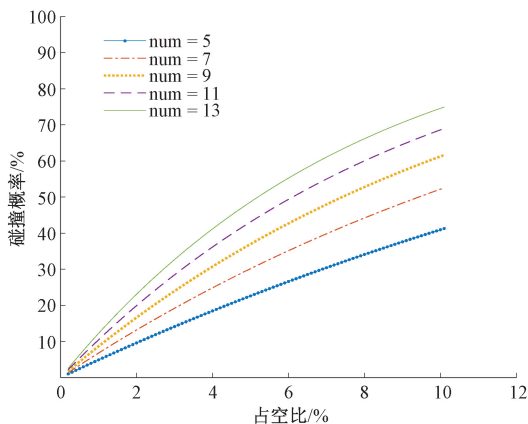


图 4 碰撞概率与占空比和干扰源个数之间的变化关系

Fig. 4 The relationship between the collision probability with the duty cycle and the number of interference sources

由图 4 可以看出,空间内目标个数越多,信号占空比越大,碰撞的概率越大,基于以上理论采用随机跳频和随机初始时间的方法,降低信号碰撞概率,当跳变频率大于中频滤波频率时,即使信号碰撞仍不会产生同频干扰。增加跳频后的碰撞概率为:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{t_d}{t_c n_f}\right)^n \quad (2)$$

其中, n_f 为跳频个数,碰撞概率与占空比和跳频个数之间的变化关系如图 5 所示。图 5 可以看出,随着跳频个数的增加,碰撞概率会降低。因此通过增加跳频个数,可以降低同频干扰的概率,达到抑制同频干扰的作用。而随机初始时间的作用是为了防止出现有信号发生碰撞后,由于信号的波形完全一致,则后续时间一直碰撞的可能性。

随着初始频率的增加,碰撞概率降低。因此,通过增加初始频率的数量,可以降低同频干扰的概率。因为信号的波形是完全一致的,所以随机初始时间是为了防止信号在后续时间发生碰撞。综上所述,上述方法可以用

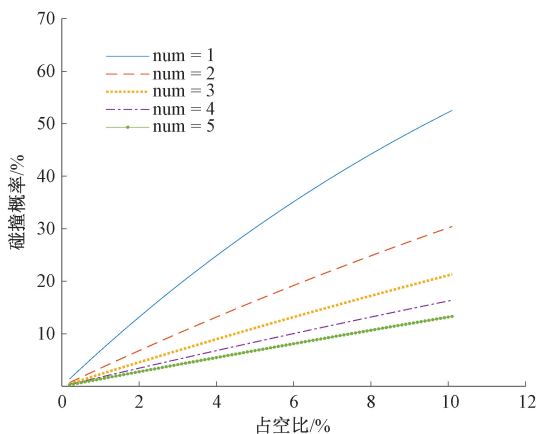


图 5 碰撞概率与占空比和跳频个数之间的变化关系

Fig. 5 The relationship between the collision probability with the duty cycle and the number of interference sources

于抑制同频干扰。

2.2 异频干扰算法及仿真

异频抗干扰算法主要有两个步骤,分别是干扰定位和干扰缓解。在异频干扰的 ADC 原始时域信号中会有一个明显的跃迁,因此可以设置一个合理的阈值,幅度超过这个阈值则标记为干扰影响,本节选择希尔伯特变换^[19]获取信号轮廓,进行干扰定位。干扰缓解指定位到干扰位置后,修复干扰区域,降低干扰能力,本节选择拉格朗日插值方法^[20]对干扰区域进行插值恢复原始 ADC 信号。

1) 希尔伯特变换取雷达包络原理

对任意信号 $f(t)$, 其希尔伯特变换形式记作 $h(t) = H(f(t))$, 定义为:

$$\begin{cases} h(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \\ f(t) = \frac{-1}{\pi} \int \frac{h(\tau)}{t - \tau} d\tau \end{cases} \quad (3)$$

因此,对信号 $f(t)$ 做希尔伯特变换,等价于 $f(t)$ 与 $1/\pi t$ 做卷积运算。则希尔伯特变换器的冲击响应与频率响应分别为:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{\pi t} \\ X(jw) = \int \frac{1}{\pi t} e^{-jw t} dt = -j * \text{sign}(w) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\text{sign}(w)$ 是符号函数,综上可知,希尔伯特变换器本质是一个对输入信号所有频率的 90° 移相器。

对于雷达信号而言,发射信号为:

$$m(t) = M_i \cos(2\pi f t + \pi k t^2) \quad (5)$$

式中: M_i 为发射量化增益, f 为信号初始频率, k 为扫频斜率。

接收信号为:

$$r(t) = M_r \cos(2\pi f(t - \tau) + \pi k(t - \tau)^2) \quad (6)$$

式中: M_r 为接收量化增益, τ 为延迟时间, 则混频后的信号为:

$$s(t) = M_t M_r \cos(-2\pi f\tau - 2\pi k t \tau + \pi k \tau^2) \quad (7)$$

令:

$$\hat{t} = -2\pi f\tau - 2\pi k t \tau + \pi k \tau^2 \quad (8)$$

则有:

$$s(t) = M_t M_r \cos(\hat{t}) \quad (9)$$

经过希尔伯特变换后的信号为:

$$\hat{s}(t) = M_t M_r \cos(\hat{t} \pm \frac{\pi}{2}) \quad (10)$$

信号的包络为:

$$B(t) = \sqrt{s(t)^2 + \hat{s}(t)^2} = M_t M_r \quad (11)$$

综上, 通过对原始信号希尔伯特变换可以得到信号的包络, 供干扰定位使用。

经过希尔伯特变换获取包络后, 需要通过划定合理的门限。从包络中可以看出当雷达受到异频干扰后, 信号幅值将大幅度抬升。因此可以依据包络的中值和最大值之间的关系, 合理划定门限, 划定门限的公式为: 中值 + (最大值 - 中值) $\times n\%$, n 为相关比例系数, 在本仿真中选择比例系数为 10。

2) 拉格朗日插值原理

经过干扰定位后, 采用拉格朗日插值缓解干扰, 拉格朗日插值的原理为:

若已知 $y = f(x)$ 在互不相同的 $n + 1$ 个点 $[x_0, x_1, \dots, x_n]$ 处的函数为 $[y_0, y_1, \dots, y_n]$, 则可以构造一个过这 $n + 1$ 个点的, 次数不超过 n 的多项式 $y = P_n(x)$, 使其满足:

$$P_n(x_k) = y_k, k = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

定义插值多项式为:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k p_k(x) \quad (13)$$

则满足:

$$p_k(x_j) = \begin{cases} 1, j = k \\ 0, j \neq k \end{cases}, (j, k = 0, 1, \dots, n) \quad (14)$$

则称这 $n + 1$ 个 n 次多项式 $p_0(x), p_1(x), \dots, p_n(x)$ 为节点 $x_0, x_1, \dots, x_n$ 的 n 次插值基函数, 拉格朗日基本多项式定义为:

$$p_k(x) = \frac{(x - x_0) \cdots (x - x_{k-1})(x - x_{k+1}) \cdots (x - x_n)}{(x_k - x_0) \cdots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \cdots (x_k - x_n)} \quad (15)$$

3) 仿真分析

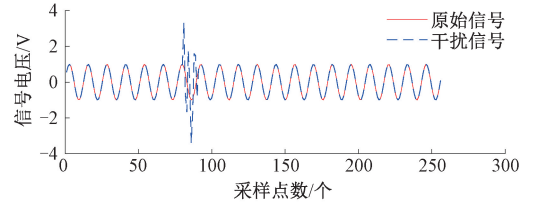
根据上述理论, 异频抗干扰算法为:

步骤(1)将信号做希尔伯特变换获取包络;

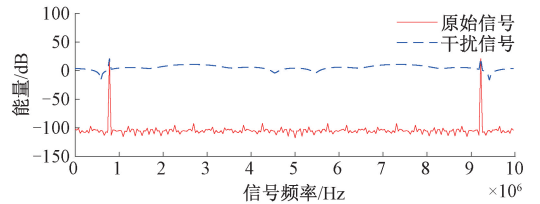
步骤(2)划定门限, 截取干扰信号范围;

步骤(3)依据非干扰信号, 构建拉格朗日基本多项式, 将干扰信号部分做插值, 缓解干扰。

图 6 为经过异频干扰后的 ADC 信号及 FFT 后的结果, 其中实线曲线表示原始信号, 虚线曲线表示干扰信号。



(a) 原始信号和干扰信号时域
(a) Original signal and interference signal time domain



(b) 原始信号和干扰信号频域
(b) Raw signal and interference signal frequency domain

图 6 原始信号和干扰信号的时域和频域结果

Fig. 6 Time domain and frequency domain of the original signal and interference signal

由图 6 可以看出, 异频干扰后的 FFT 信号相对于原始信号而言, 信噪比降低, 峰值点更不易检测出, 容易造成雷达的漏报。

经过 FFT 后的能量约为 20 dB, 假定弱目标的能量为 -10 dB 时, 若划定门限为 0 dB, 此时弱目标将不被检测到, 且由于底噪的抬高, 噪声过门限的位置将被检测到, 因此当空间中总目标个数为 N , 弱目标的个数为 N_1 , 因底噪抬升导致能检测到的点数为 N_2 , 则此时的误报率为:

$$p_2 = \frac{N_2}{N} \quad (16)$$

此时的漏报率为:

$$p_1 = \frac{N_1}{N} \quad (17)$$

根据异频抗干扰算法流程, 首先对信号做希尔伯特变换获取包络, 原始信号及希尔伯特变换包络信号如图 7 所示, 可以看出希尔伯特变换获取到的信号轮廓。根据信号轮廓划定门限, 截取干扰信号范围, 从而确定干扰信号位置。

定位到干扰位置后, 通过未被干扰的数据构建拉格朗日多项式, 将干扰部分做插值, 本文选用干扰时间段前后各 16 个点, 依据式 (15) 计算对应的参数进行插值。图 8 为干扰信号和拉格朗日插值后信号的结果, 其中虚

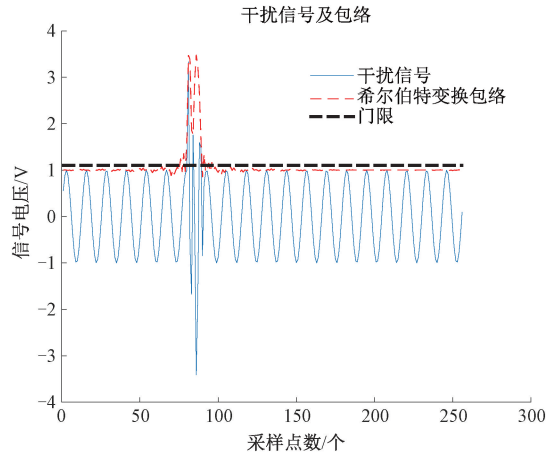


图 7 希尔伯特变换定位干扰位置

Fig. 7 Hilbert transformation positioning interference position

线为干扰信号,实线为拉格朗日插值后的信号。

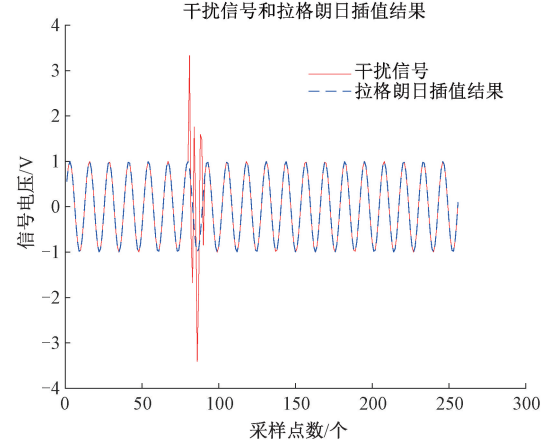


图 8 干扰信号和插值信号

Fig. 8 Interference signal and Lagrange interpolation signal

从图 8 中可以看出,经过拉格朗日插值后可以恢复为原始信号,降低干扰对雷达检测的影响。图 9 为原始信号、干扰信号和经过插值后信号的频域对比结果。实线为干扰信号的幅频曲线。点画线为原始信号的幅频曲线。虚线为拉格朗日插值修复的信号幅频曲线。

修复后的信号的信噪比较原始干扰信号高约 50 dB 左右,可以降低异频干扰对雷达性能的影响,此时当划定门限仍为 0 dB 时,弱目标未被检测的个数为 0,因底噪抬升导致能检测到的点数为 0,因此,此时漏报率和误报率均为 0。减小雷达的漏报率,为后续雷达检测奠定基础。

当环境中同时存在同频干扰和异频干扰时,由于在传统的线性调频雷达无法去除已干扰的同频信号,此时经过混频后的信号为两个正弦信号叠加,当同时存在异频干扰时,其 ADC 信号与 FFT 后的数据如图 10 所示。

经过抗异频干扰算法后的信号及 FFT 变换结果如

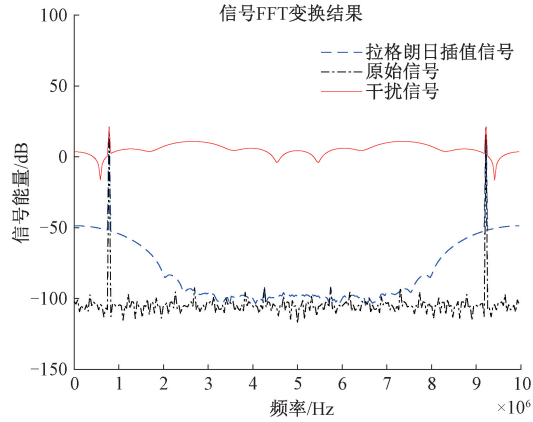


图 9 原始信号,干扰信号和插值信号频域对比

Fig. 9 FFT of original signal, interference signal and Lagrange

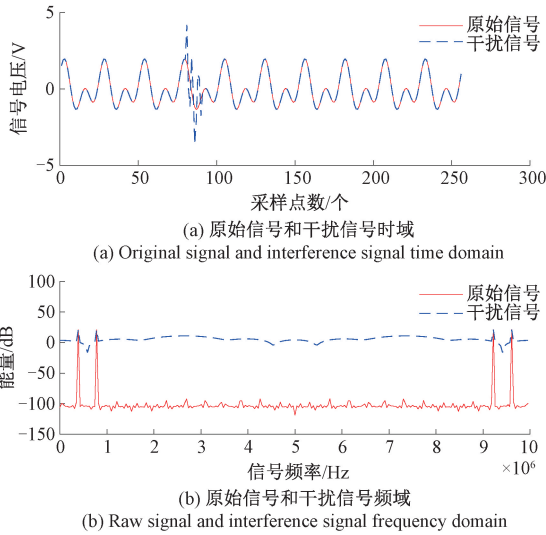


图 10 同频和异频干扰同时存在时原始信号和干扰信号的时域和频域结果

Fig. 10 FFT of original signal, interference signal and Lagrange with DFI and SFI

图 11 所示。

从图 10 和 11 中可以看出,当环境中存在同频干扰和异频干扰时,已进入雷达的同频干扰无法通过算法进行区分,而异频干扰仍能够有效抑制大约 50 dB,与当环境中仅存在异频干扰时的仿真结果一致。

为了验证实际过程中的抗干扰性能,选择国内某款毫米波雷达,并配置不同的参数,使两台雷达在工作时产生不同的频率干扰。将两台雷达的载波频率设置为 77 GHz,带宽分别为 200 和 800 MHz,帧周期分别为 55 和 65 μ s,被测雷达的采样率为 10 MHz,采样个数为 512 点。采集到的 ADC 信号及其处理结果如图 12 所示。

可以看出,由于信噪比的影响,实际信号的能量要弱

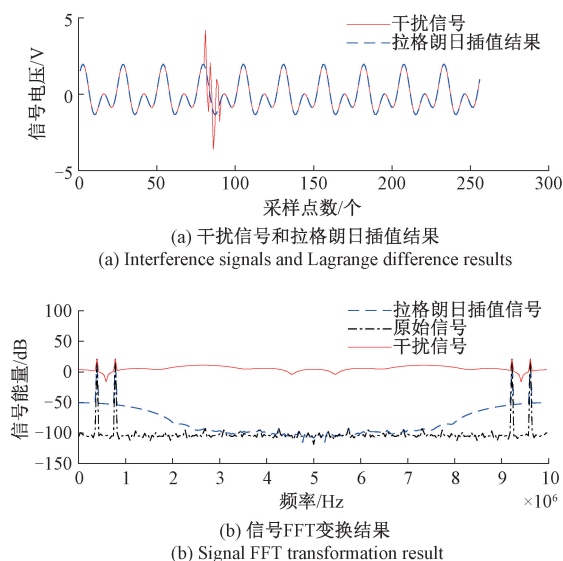


图 11 干扰信号和插值信号时域对比及
与原始信号间的频域对比

Fig. 11 ADC of interference signal and Lagrange signals and FFT of original signal

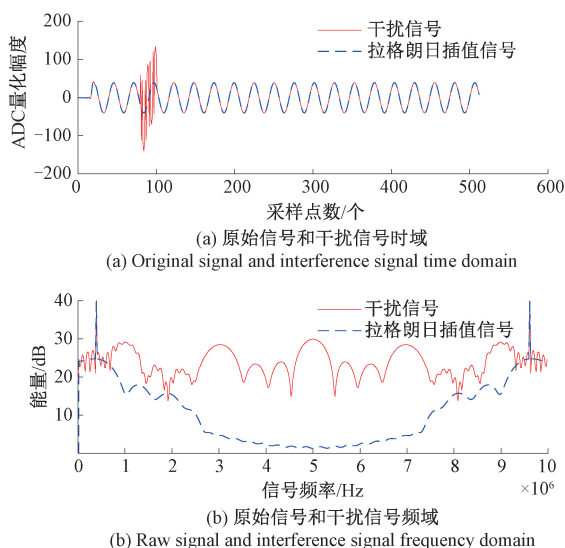


图 12 某款毫米波雷达的抗干扰结果

Fig. 12 The result of anti-interference
based on certain type radar

于仿真信号的能量。算法处理后的信噪比比于干扰前提高了 30 dB 左右,当划定门限为 30 dB 时,仍能够清晰区分目标和噪声。

综上,通过希尔伯特变换获取幅度信息后进行干扰定位,再通过拉格朗日插值方法对于干扰区域进行插值恢复原始 ADC 信号,可以修复干扰区域,达到抑制异频干扰的目的。

3 结 论

本文主要对 76~81 GHz 的毫米波雷达工作时干扰特性和抗干扰算法进行研究,主要从同频干扰和异频干扰两种不同的干扰类型进行分析,同频干扰中选择随机初始频率和随机初始时间的方法降低同频碰撞的可能性。异频干扰中提出希尔伯特变换与拉格朗日插值相结合的方法,对接收的 ADC 信号进行信号处理去除异频干扰,并通过理论仿真验证该方法的实用性。本文中仅在一定程度上降低了同频干扰的概率,但当雷达被同频干扰时,雷达将无法分别干扰或真实存在的目标,所以后续需开展有效消除同频干扰的影响的方法,例如采用相位调制信号等。

参考文献

- [1] HASCH J, TOPAK E, SCHNABEL R, et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60 (3): 845-860.
- [2] NOZAWA T. An anti-collision automotive FMCW radar using time domain interference detection and suppression[C]. IET International Conference on Radar System, 2017:1-5.
- [3] LIM S, LEE S, CHOI J H, et al. Mutual interference suppression and signal restoration in automotive FMCW radar systems [J]. IEICE Transactions on Communications, 2018(10):10-15.
- [4] 刘昊,段发阶,李杰,等. 基于空域变换的叶尖定时信号预处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (7): 218-229.
- LIU H, DUAN F J, LI J, et al. Preprocessing method of blade tip timing signal based on spatial transformation[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2022, 43 (7): 218-229.
- [5] 胡泰洋,邵晓浪,肖孟煊,等. 一种线性调频连续波探测抗雷达辐射源干扰方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8):253-260.
- HU T Y, SHAO X L, XIAO M X, et al. Methods of anti-radar emitter signal jamming for linear frequency modulated continuous wave detector[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2022, 43(8): 253-260.
- [6] 郇浩,陶然,李元硕,等. 基于变换域和时域联合处理的雷达同频干扰抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2012,34(12):2978-2984.
- HUAN H, TAO R, LI Y SH, et al. Co-channel interference suppression for homo-type radars based on joint transform domain and time domain[J]. Journal of

- Electronics & Information Technology, 2012, 34(12): 2978-2984.
- [7] LI F Y, XU J, ZHANG X. Pulse jamming suppression for airborne radar based on joint time-frequency analysis [C]. IET International Radar Conference, 2013: 1-4.
- [8] 张海燕, 汪润, 万健中. 基于 IRife 算法的高精度 LFM CW 雷达测距方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 251-256.
- ZHANG H Y, WANG R, WAN J ZH. LFM CW radar ranging method with high precision based on IRife algorithm [J]. Journal of Electric Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 251-256.
- [9] 任明秋, 严革新, 朱勇, 等. 复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1277-1282.
- REN M Q, YAN G X, ZHU Y, et al. Study on radar anti-jamming performance test method in complex electromagnetic environment [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2016, 37(6): 1277-1282.
- [10] ELGMEL S A, SORAGHAN J J. Using EMD-FrFT filtering to mitigate very high power interference in chirp tracking radars [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(4): 263-266.
- [11] ZHAO Z, SHI X Q. FM interference suppression for PRC-CW radar based on adaptive STFT and time-varying filtering [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(2): 219-223.
- [12] 陈磊, 陈殿仁, 刘颖. 一种新的线性调频脉冲信号参数估计算法[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 207-213.
- CHEN L, CHEN D R, LIU Y. A new chirp signal parameter estimation algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(2): 207-213.
- [13] CHEN S Y, TAGHIA J, KUHN AU U, et al. Automotive radar interference mitigation based on a generative adversarial network [C]. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2020: 728-730.
- [14] MUN J, HA S, LEE J. Automotive radar signal interference mitigation using RNN with self attention [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2020: 3802-3806.
- [15] UYSAL F. Phase-coded FMCW automotive radar: System design and interference mitigation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(1): 270-281.
- [16] SKARIA S, AL-HOURANI A, EVANS R J, et al. Interference mitigation in automotive radars using pseudo-random cyclic orthogonal sequences [J]. Sensors, 2019, 19(20): 4459.
- [17] 辛守庭, 岳玉霞, 李利军, 等. 基于机器学习的无人机载 LiDAR 数据处理系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 39-45.
- XIN SH T, YUE Y X, LI L J, et al. Research on UAV LiDAR data processing system based on machine learning [J]. Journal of Electric Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 39-45.
- [18] 简黎, 雷李华, 李东升, 等. 基于小波包络提取法的白光干涉测量系统[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(9): 586-610.
- JIAN L, LEI L H, LI D SH, et al. White light interference measuring system based on the wavelet envelope extraction method [J]. Micronanoelectron Technol, 2015, 52(9): 586-610.
- [19] 范延滨, 潘振宽, 王正彦. 小波理论算法与滤波器组[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- FAN Y B, PAN ZH K, WANG ZH Y. Wavelet Theory Algorithm and Filter Group [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [20] 马蕾, 赵雨虹. 针对汽车防撞雷达的信号处理[J]. 电子技术与软件工程, 2018(14): 82-83.
- MA L, ZHAO Y H. Signal processing for automobile anti-collision radar [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(14): 82-83.

作者简介



戴金洲(通信作者), 2007 年于中科院声学所获得硕士学位, 现为北京市计量检测科学研究院高级工程师, 主要研究方向智能交通设备计量检测。

E-mail: daijz@bjil.cn

Dai Jinzhou (Corresponding author)

received M. Sc. degree from the Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences in 2007. He is now a Senior Engineer at Beijing Institute of Metrology. His main research interests include intelligent transportation equipment measurement and metrology.