

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.013

基于 IRife 算法的高精度 LFM CW 雷达测距方法*

张海燕 汪 润 万健中

(合肥工业大学 计算机与信息学院 合肥 230009)

摘要:为实现高精度线性调频连续波(LFMCW)雷达测距,在分析 Rife 算法的基础上,提出了基于改进 Rife(IRife)算法的 LFMCW 雷达测距方法。首先介绍了该方法的实现原理和实现步骤,然后在型号为 EP4CE55F23A7N 的 FPGA 芯片上进行方法实现,最后将该方法嵌入 LFMCW 雷达测距系统中进行现场实验验证。仿真和现场实验结果表明,在相同的信噪比条件下,相较于基于 Rife 算法的测距方法,基于 IRife 算法的测距方法均方根误差小,测距精度高,稳定性好,证明了该方法的有效性。

关键词:改进 Rife;雷达测距;线性调频连续波;FPGA

中图分类号: TN959.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 5104030

LFMCW radar ranging method with high precision based on IRife algorithm

Zhang Haiyan Wang Run Wan Jianzhong

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To achieve high precision of linear frequency modulation continuous wave (LFMCW) radar ranging, a kind of LFMCW radar ranging method is presented based on the Improved-Rife (IRife) algorithm. At first, it introduces the principles and implementation steps of this method. And then, it implements this algorithm on FPGA of EP4CE55F23A7N model. Finally, the algorithm embedded into the LFMCW radar ranging system is performed in field test. The simulation and experiment results verifying the effectiveness of this method show that IRife algorithm reveals its small root-mean-square error (RMSE) and high ranging precision and stability compared with the Rife algorithm under the condition of the same signal-to-noise ratio (SNR).

Keywords: improved-Rife; radar ranging; linear frequency modulation continuous wave; field programmable gate array

1 引 言

线性调频连续波(linear frequency modulates continuous wave, LFMCW)雷达具有无距离盲区、发射功率低、距离分辨率高、结构简单等特点,已广泛应用于电子侦察、汽车防撞、生物医学等诸多军用和民用领域^[1-3]。根据 LFMCW 雷达测距原理,通过估计规则区的信号频率来间接测量目标距离^[4]。高精度的频率估计算法对提高 LFMCW 雷达测距精度起着至关重要的作用。

目前,国内外研究人员已提出很多方法, Lee 等人^[5]

通过对能量重心法和矩形窗比值法的联合运用,提出了一种基于快速傅里叶变换(FFT)的快速频率估计算法,该算法在信噪比为 12 dB,距离在 12.450 ~ 12.470 m 的条件下,均方根误差为 0.5 mm;侯庆文等人^[6]提出一种改进的加权补偿校正相位差算法,该算法在测量距离为 22.5 m,信号信噪比为 30 dB 的条件下,均方根误差为 0.12 mm;肖玮等人^[7]提出多段同频正弦信号频谱融合的测距算法,仿真实验结果表明在 5 ~ 30 m,使测距精度可以达到 1 mm。此外,还有利用多相滤波技术测距方法^[8]、基于小波包的 24 GHz LFMCW 雷达测距方法^[9]等。以上算法原理复杂,硬件实现较难,很难应用到工程实践中。

与以上所提及的算法相比, Rife 算法^[10]虽然具有原理简单、整体精度较高和易于工程实现等优点,但在 FFT 量化频率附近的误差较大,稳定性较差^[11]。

为了满足 LFMCW 雷达测距的高精度和稳定性的需求,同时也要求硬件实现简单、处理速度快和便于工程应用,本文提出一种基于 IRife 算法的 LFMCW 雷达测距方法,并探索该算法实现于 LFMCW 雷达测距项目中,该信号处理器采用能够并行处理的 FPGA 芯片,通过 MATLAB 仿真和现场测距实验对方法进行了高精度和稳定性的验证。

2 测距原理

2.1 Rife 算法分析

Rife 算法是一种频率估计算法,即对输入信号进行一次 FFT 运算后,采用最大谱线及其相邻的次大谱线进行插值,然后利用插值的结果来估计频率, Rife 算法如图 1 所示。

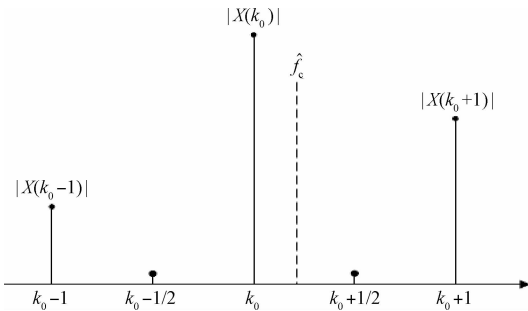


图 1 Rife 算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Rife Algorithm

根据 LFMCW 雷达测距原理可知,首先将发射信号与接收信号通过混频得到差拍信号,然后从差拍信号中提取所需要的频率信息,最后通过频率信息求得距离^[12-13]。由于混频后的差拍信号分为规则区差拍信号和非规则区差拍信号,为了满足雷达测距精度的要求,本文仅研究分析规则区的差拍信号。

设规则区的差拍信号是被高斯白噪声干扰的正弦波信号,采样后的接收信号为:

$$x(n) = s(n) + w(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $s(n) = ae^{j(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0)}$, 其中 a 、 f_0 、 ϕ_0 分别为规则区差拍信号的振幅、频率和初始相位, f_s 为采样频率, $w(n)$ 为均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声序列, N 为样本数。

将 $x(n)$ 做 N 点 FFT 运算得 $X(k) = S(k) + W(k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, 由于 FFT 后实序列频谱具有对称性,故仅分析离散频谱的前 $N/2$ 点即可,最大谱线值记为 $|X(k_0)|$,次大谱线值记为 $|X(k_0+r)|$ 。则利用 Rife

算法所得到的规则区差拍信号频率估计值^[10,14]:

$$\hat{f}_c = \frac{f_s}{N} \left(k_0 + r \frac{|X(k_0+r)|}{|X(k_0)| + |X(k_0+r)|} \right) \quad (2)$$

式中:当 $|X(k_0+1)| \geq |X(k_0-1)|$ 时, $r = 1$; 当 $|X(k_0+1)| < |X(k_0-1)|$ 时, $r = -1$ 。设 Rife 算法的频率插值为 δ , 如下式:

$$\delta = \frac{|X(k_0+r)|}{|X(k_0)| + |X(k_0+r)|} \quad (3)$$

通过文献^[10]可知,在输入噪声为零时的情况下, Rife 算法可以得到精确度很高的频率估计值;在较高的信噪比条件下,得到的频率估计均方根误差较小,性能较好;在信噪比较低的情况下,当 \hat{f}_c 位于两个离散区域中心区域时,通过 Rife 算法也能得到较精确的频率估计,然而,当 \hat{f}_c 位于量化频率点附近时, $|X(k_0+r)|$ 与 $|X(k_0)|$ 差别较大,且 $|X(k_0+r)|$ 很小,在噪声的影响下,可能会引起频率插值方向错误,从而导致 Rife 算法频率估计均方根误差较大,性能较差。

MATLAB 仿真结果表明,信噪比在 $-10 \sim 10$ dB 范围内,当 $1/4 \leq \delta \leq 1/2$ 时, Rife 算法均方根误差小,精度高,但是当 $0 \leq \delta < 1/4$ 时, Rife 算法均方根误差较大,精度低。为了解决此问题,通过仿真实验分析 Rife 算法在不同频率区域的均方根误差特性,决定对规则区的差拍信号进行 $r/4$ 倍频移,提出改进 Rife 算法。

定义 $\delta \in [1/4, 1/2]$ 为量化频率的中心区域,当通过 Rife 算法得到的频率估计结果在此区域内,则将其作为最终结果;否则,对 $x(n)$ 进行 $r/4$ 倍频移,然后利用式(2)对频移后的信号进行频率估计。此时信号如下式:

$$x_1(n) = x(n) e^{j(\frac{r}{4} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n)} \quad (4)$$

因为 $r/4$ 倍量化频率是固定值,所以复指数的计算可以利用查表法来实现,可以减少计算量。在 LFMCW 雷达测距实验中,使用锯齿波调频, LFMCW 雷达距离的测量值:

$$R = K \cdot \hat{f}_c \quad (5)$$

式中: $K = cT/2B$, c 为电磁波传播的速率, T 为调频周期, B 为调频带宽。

2.2 基于 IRife 算法的测距方法步骤

1) 截取位于规则区的差拍信号 $x(n)$ 。实现方法:首先采用同步技术,记录调频信号的起始调频时刻,然后通过加窗技术截取差拍信号 $x(n)$ 。

2) 对差拍信号 $x(n)$ 做 N 点 FFT, 搜索 $X(k)$ 前 $N/2$ 点中的最大谱线值 $X(k_0)$ 和次大谱线值 $X(k_0+r)$ 。

3) 用式(3)计算 δ , 若 $\delta \in [1/4, 1/2]$, 则结合式(2)和(5)求得雷达的距离测量值 R , 即最终输出值。

4) 若 $\delta \in [0, 1/4)$, 则用式(4)对信号 $x(n)$ 进行频移, 然后对频移后的信号做 FFT 运算并重新计算 δ ; 如果频移后重新计算的 $\delta \in [1/4, 1/2]$, 则用式(2)计算频率

估计值,然后将其减去 $r/4$ 倍量化频率求得最终频率估计值 \hat{f}_e ,最后通过式(5)得出雷达的距离测量值 R ,即最终输出值。

5)若频移后重新计算的 $\delta \in [0,1/4]$,则将 r 取反,返回步骤4)。

2.3 方法性能分析

为了验证基于 IRife 算法的测距法的有效性,本文从两方面进行论证。1)通过 MATLAB 对 Rife 和 IRife 频率估计算法性能进行仿真实验,验证 IRife 算法的有效性;2)通过 LFM CW 雷达现场测距实验来证明此测距方法的有效性。

设置仿真参数:使用锯齿波调制,目标是单一静止目标,信号中心频率 $f_0 = 24$ GHz,调频周期 $T = 10$ ms,调频带宽 $B = 250$ MHz,采样频率 $f_s = 500$ kHz,FFT 点数 $N = 4\ 096$ 。

仿真结果如图2所示,由图2可知,1)在信噪比为

-10 dB 条件下,当 $\delta \in [0,1/4]$ 时,Rife 算法均方根误差在 48 ~ 295 Hz,当 $\delta \in (1/4,1/2]$ 时,均方根误差为 40 ~ 50 Hz,而 IRife 算法在 $\delta \in [0,1/2]$ 整个区间上的误差都 40 ~ 50 Hz 之间;2)在信噪比为 0 dB 条件下,当 $\delta \in [0,1/5]$ 时,Rife 算法均方根误差在 18 ~ 176 Hz,当 $\delta \in (1/5,1/2]$ 时,均方根误差为 17 Hz 左右,而 IRife 算法在 $\delta \in [0,1/2]$ 整个区间上的误差都在 18 Hz 左右;3)在信噪比为 10 dB 条件下,当 $\delta \in [0,1/10]$ 时,Rife 算法均方根误差在 8 ~ 103 Hz,当 $\delta \in (1/10,1/2]$ 时,均方根误差大约为 8 Hz,而 IRife 算法在 $\delta \in [0,1/2]$ 整个区间上的误差都在 8 Hz 左右;4) IRife 算法利用在量化频率中心区域频率估计精度高的优点,通过对规则区的差拍信号进行频移,当待测频率值处于量化频率的中心区域时才进行频率估计,在不同的信噪比条件下,IRife 算法性能都明显优于 Rife 算法。

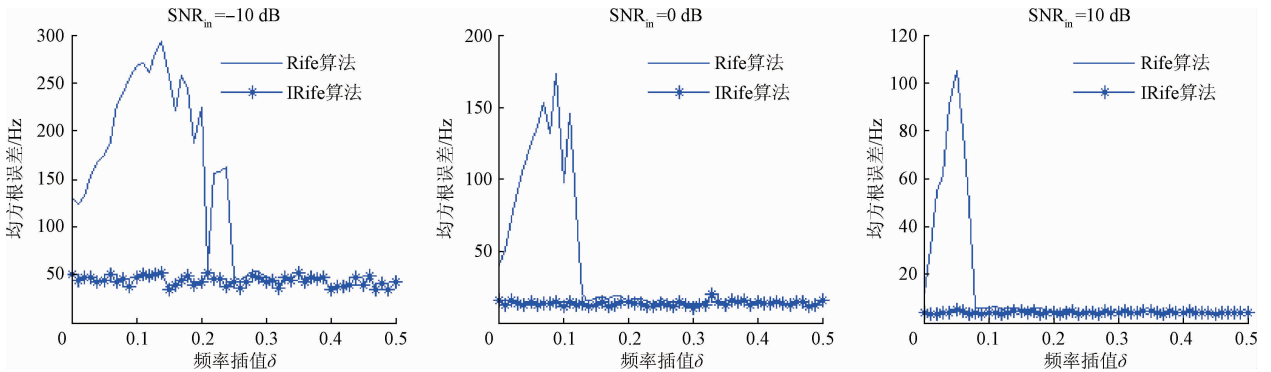


图2 两种算法均方根误差(RMS error)在不同信噪比条件下的比较

Fig. 2 The comparison of the two algorithms' RMS errors in different SNR

3 方法实现

3.1 FPGA 设计

现场实验验证基于 IRife 算法的测距法的有效性,在

信噪比为 10 dB 的条件下,现场实验设置的参数与 MATLAB 仿真设置的参数一致,在目标距离 R_0 范围 [17 610 mm,17 946 mm] 内,每间隔 42 mm 取 9 个待测点进行测距实验。通过 QuartusII 进行 Verilog HDL 语言编程,综合后得到的 RTL 设计结果如图3所示。

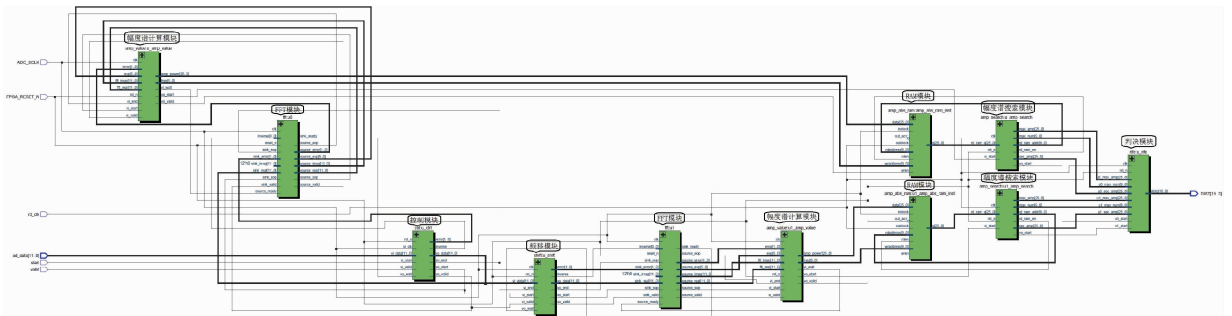


图3 RTL 设计图

Fig. 3 RTL design drawing

实验的方法实现部分主要包括 1 个控制模块、1 个 频移模块、2 个 FFT 模块、2 个幅度谱计算模块、2 个 RAM

模块,2 个幅度谱搜索模块和 1 个判决模块。

- 1) 控制模块用来控制 FFT 模块对差拍信号的规则区部分进行 FFT 运算;
- 2) 频移模块对 $x(n)$ 进行 $r/4$ 倍量化频率的频移;
- 3) FFT 模块用于完成 FFT 运算;
- 4) 幅度谱计算模块用于计算信号的幅度值;
- 5) RAM 模块用于存储幅度值;
- 6) 幅度谱搜索模块用于找出最大谱和次大谱的位置;
- 7) 判决模块根据式(2)、(3)和(5)算出最终的距离值。

3.2 FPGA 资源消耗

本次实验采用的是 Altera 公司 Cyclone IV 系列的 EP4CE55F23A7N 芯片,该芯片就有低功耗,低成本和高性能的优点^[15-16],而且该芯片的逻辑资源完全满足此次实验的需求。

首先使用 Quartus II 软件建立工程,然后经过编译得到 FPGA 资源消耗情况如表 1 所示,FPGA 芯片还有很多未使用的资源,便于后期的优化改进。

表 1 FPGA 资源消耗表

Table 1 Resource consumption of FPGA

Processing status	Fitting successful
Device	EP4CE55F23A7N
Total logic elements	13208/55856 (24%)
Total memory bits	1147264/2396160 (48%)
Embedded Multiplier 18-bit elements	36/154 (24%)

3.3 FPGA 结果分析

现场实验中,对 LFM CW 雷达的回波信号进行 AD 采样,AD 芯片的采样时钟(ADC_SCLK)设置为 500 kHz,图 4 和 5 中的 AD_DATA 为 AD 采样的数据。

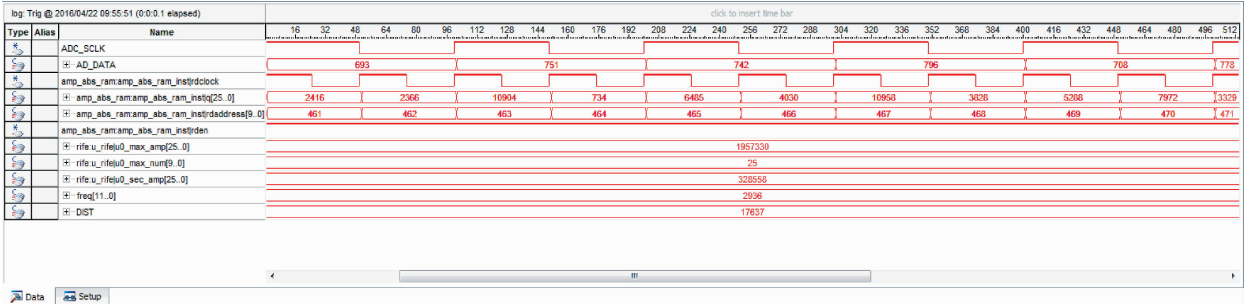


图 4 基于 Rife 算法的测距法的时序结果

Fig. 4 Timing result based on the ranging method of Rife algorithm

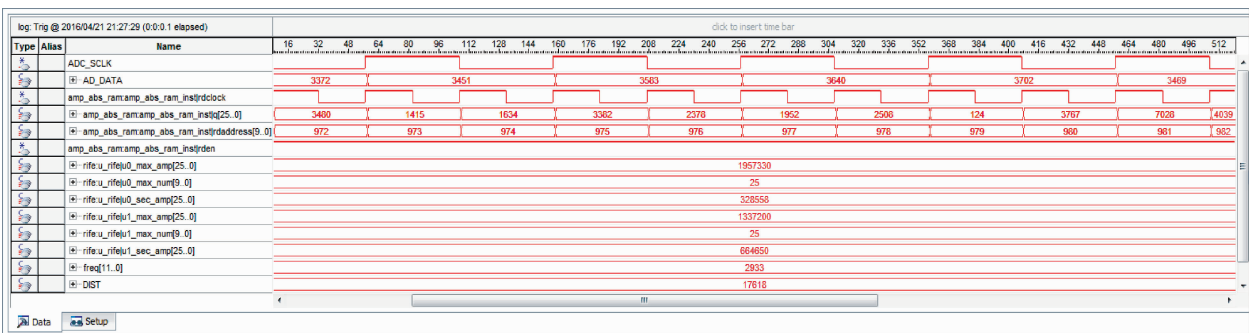


图 5 基于 IRife 算法的测距法的时序结果

Fig54 Timing result based on the ranging method of IRife algorithm

通过 SignalTap II 抓取信号,基于 Rife 算法的测距法信号时序结果如图 4 所示,基于 IRife 算法的测距法时序结果如图 5 所示,其中 $u0_max_num$ 、 $u0_max_amp$ 、 $u0_sec_amp$ 分别为频移前最大谱线值的位置、最大幅度值、次大幅度值、 $u1_max_num$ 、 $u1_max_amp$ 、 $u1_sec_amp$ 分别为频移后最大谱线值的位置、最大幅度值、次大幅度值,

freq 和 DIST 分别是估计频率值和距离值。

实验结果如图 4 和 5 所示,在实际距离为 17 610 mm 时,基于 Rife 算法的测距法估计距离为 17 637 mm,误差为 27 mm;基于 IRife 算法的测距法估计距离为 17 618 mm,误差为 8 mm。同时,通过此方法现场测得 9 组待测距离点的测距结果,如表 2 所示。

表 2 实验结果
Table 2 Experimental results

组数	实际距离/mm	δ	测量结果/mm		绝对误差/mm	
			Rife 算法	IRife 算法	Rife 算法	IRife 算法
1	17 610	0	17 637	17 618	27	8
2	17 652	0.06	17 805	17 659	153	7
3	17 694	0.12	17 702	17 701	8	7
4	17 736	0.18	17 746	17 743	10	7
5	17 778	0.24	17 785	17 784	7	6
6	17 820	0.30	17 826	17 826	6	6
7	17 862	0.36	17 869	17 869	7	7
8	17 904	0.42	17 910	17 910	6	6
9	17 946	0.48	17 951	17 951	5	5
均方根误差/mm $\sigma = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n}}$, 式中 ε_i 表示测量绝对误差					52.17	6.61

1) 当 R_0 位于 17 610 ~ 17 694 mm 区域内, 此时 $\delta \in [0.02, 0.12]$, 基于 Rife 算法的测距法误差在 8 ~ 153 mm, 基于 IRife 算法的测距法误差在 7 ~ 8 mm, 基于 Rife 算法的测距法误差远大于基于 IRife 算法的测距法误差。

2) 当 R_0 位于 17 694 ~ 17 946 mm 区域内, 此时 $\delta \in [0.12, 0.48]$, 基于 Rife 算法的测距法误差在 5 ~ 10 mm, 基于 IRife 算法的测距法误差在 5 ~ 7 mm 之间, 两种测距法误差基本保持同一水平。

3) 基于 Rife 算法的测距法均方根误差为 52.17 mm, 基于 IRife 算法的测距法均方根误差为 6.61 mm。综上, 基于 IRife 算法的测距法精度更高, 性能更优, 验证了方法的有效性。

4 结 论

频率估计是 LFMCW 雷达测距中的一项重要内容, 为了提高 LFMCW 雷达测距精度, 本文在介绍了 Rife 算法的基础上, 通过仿真实验分析 Rife 算法在不同频率区域的均方根误差特性, 然后对规则区的差拍信号进行频移, 保证待估计频率处于量化频率的中心区域内, 提出了基于 IRife 算法的高精度测距方法。

现场实验表明, 在信噪比为 10 dB 的条件下, 当 $0 \leq \delta < 1/4$ 时, 相较于基于 Rife 算法的测距法, 基于 IRife 算法的测距法的误差更小, 精度更高, 而且通过 9 组实验得出, 基于 Rife 算法的测距法均方根误差为 52.17 mm, 而基于 IRife 算法的测距法均方根误差为 6.61 mm, 验证了方法的有效性。同时本文测距方法硬件实现简单, 性能稳定, 易于 LFMCW 雷达测距工程实践。

参考文献

[1] 杜雨谔, 张容权, 杨建宇. 毫米波 LFMCW 雷达加速运

动目标回波检测与加速度-速度估计[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 348-351.

DU Y M, ZHANG R Q, YANG J Y. Detection in millimeter LFMCW radar target echo and acceleration-velocity estimation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(5): 348-351.

[2] 朱文涛, 郑纪彬, 苏涛, 等. 线性调频连续波信号的检测和参数估计[J]. 电子与信息学报, 2013(7): 1562-1568.

ZHU W T, ZHENG J B, SU T, et al. Detection and parameter estimation of linear frequency modulation continuous wave signal [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013(7): 1562-1568.

[3] 张海洋, 赵长明, 杨苏辉, 等. 线性调频连续波激光雷达信号处理研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(S2): 17-20.

ZHANG H Y, ZHAO CH M, YANG S H et al. Research on signal processing of linear frequency modulated continuous wave laser radar [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(S2): 17-20.

[4] 曹延伟, 程翥, 皇甫堪, 等. 多频连续波雷达两种测距算法研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 789-792.

CAO Y W, CHENG ZH, HUANG F K, et al. The research on two algorithms for multiple frequency CW radar ranging [J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2005, 27(5): 789-792.

[5] LEE M S, KIM Y H. Design and performance of a 24 GHz switch-antenna array FMCW radar system for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2290-2297.

[6] 侯庆文, 陈先中, 王小攀, 等. 改进的 FMCW 信号加权

- 补偿校正相位差法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 721-726.
- HOU Q W, CHEN X ZH, WANG X P, et al. Improved phase-difference algorithm with weighted compensation and correcti-on for FMCW signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instru-ment, 2010, 31(4):721-726.
- [7] 肖玮, 涂亚庆, 刘良兵, 等. 多段同频正弦信号频谱融合的 LFMCW 雷达测距算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 94-103.
- XIAO W, TU Y Q, LIU L B, et al. LFMCW radar range algorithm based on spectra fusion of multisection cofrequency sinusoids[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1):94-103.
- [8] 陈曦, 许建中, 陈自力. 利用多相滤波技术提高 LFMCW 引信测距精度[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(5): 16-19, 24.
- CHEN X, XU J ZH, CHEN Z L. Ranging accuracy improving of LFMCW fuze with polyphase filtering technology[J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(5): 16-19, 24.
- [9] 谭晓衡, 周帅, 黄振林. 基于小波包的 24 GHz LFMCW 雷达测距方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 522-525.
- TAN X H, ZHOU SH, HUANG ZH L. New ranging method for 24 GHz LFMCW radar based on wavelet packet[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 522-525.
- [10] 詹启东, 涂亚庆. 基于 Rife 法的线性调频连续波雷达测距算法及实现[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 748-752.
- ZHAN Q D, TU Y Q. Analysis and implementation of rife-ba sed ranging algorithm for linear frequency modulated conti-nuous wave radar [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(5):748-752.
- [11] 钱云襄, 刘渝, 黄慧慧. 线性调频连续波信号参数估计算法[J]. 现代雷达, 2006, 28(3): 40-43.
- QIAN Y X, LIU Y, HUANG H H. Parameters estimation of LFMCW signals [J]. Modern Radar, 2006, 28(3): 40-43.
- [12] 于卫东, 涂亚庆, 詹启东, 等. 基于改进 Rife 算法的 LF MCW 雷达测距方法及实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 550-557.
- YU W D, TU Y Q, ZHAN Q D, et al. Ranging method of LF MCW radar based on improved Rife algorithm and its implementation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 550-557.
- [13] 吴礼, 彭树生, 肖泽龙, 等. 提高毫米波近程探测雷达测距精度的方法研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 301-305.
- WU L, PENG SH SH, XIAO Z L, et al. Method for improving ranging accuracy of short-range millimeter wave radar[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 301-305.
- [14] 王旭东, 刘渝, 邓振森. 基于修正 Rife 算法的正弦波频率估计及 FPGA 实现[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4): 621-624.
- WANG X D, LIU Y, DENG ZH M. Modified Rife algorithm for frequency estimation of sinusoid and implementation in FPGA [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(4): 621-624.
- [15] 史永盛, 熊焱. 基于 FPGA 和 Quartus II 的音频信号分析仪设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(12): 49-52.
- SHI Y SH, XIONG X. Design of audio-frequency analyzer based on FPGA and Quartus II[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(12): 49-52.
- [16] 胡亚平. FPGA 与 CPU 高速接口的实现[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(4): 66-68.
- HU Y P. Implementation of high-speed interface between FP-GA and CPU [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(4): 66-68.

作者简介



张海燕, 1968 年出生, 硕士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向是雷达信号处理, 智能信息处理。

E-mail: WJL1968@aliyun.com

Zhang Haiyan was born in 1968, M. Sc., associate professor, M. Sc. supervisor.

Her main research area is radar signal processing, and intelligent information processing



汪润(通讯作者), 1990 年出生, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向是雷达信号处理。

E-mail: wangrun678@126.com

Wang Run (Corresponding author) was born in 1990, M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research area is radar signal processing.



万健中, 1995 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院通信工程专业学生。

E-mail: 952008770@qq.com

Wan Jianzhong was born in 1995, a student of Communication Engineering major of the School of Computer and Information in Hefei University of Technology.