

高分辨率短程 X 波段 FMCW 用于测距应用的雷达系统

Phat T. Nguyen,Vinh Truong Nhat 和 Cuong PM Huynh
电信工程系 胡志明市科技
大学 越南胡志明市 tanphatnguyen9x@gmail.com,
truongnhatvinh@gmail.com, hpmcuong@hcmut.edu.vn

摘要 建立了一种调频连续波 (FMCW) 雷达系统,用于在 1 – 4.5m 范围内以高精度测量到目标的距离。提出、仿真并实现了一种利用高斯窗和高斯插值增强距离分辨率的方法。仿真结果表明,采用高斯插值法的 FMCW 雷达系统提供的测量误差小于 1mm,比传统系统小 500 倍。所提出的分辨率增强算法是在设计的 FMCW 雷达系统上实现的。

实验结果表明,所设计的雷达系统在1~4.5m范围内最大误差小于3mm。
还提出并实施了克服雷达系统非理想特性的方法。

关键词 FMCW;雷达;高斯;窗;插值。

一、引言

由于其在许多领域的广泛应用,因此对精确测量系统的需求很高,例如:用于自动化系统的运动传感器、用于工业用途和交通控制的速度和范围测量、测量与其他车辆的距离和避免障碍物的汽车碰撞警告系统碰撞、液位传感仪表,采用非接触式测量方法确定易挥发、易爆或高温液体的液位和体积……

[1]。为了构建这些系统,已经提出了许多方法,这些方法暴露了它们自己的优点和缺点。超声波系统提供高分辨率,但对测量条件 (温度、噪声……)很敏感。摄像机系统成本低、灵活性高,但实时高精度应用需要大量计算。激光系统可提供高精度,但在测量反射性差的目标时性能较差 [2]。一种优选的系统是雷达 (无线电探测和测距),它使用无线电波来探测远程物体的距离和速度。使用受温度 and 环境影响较小的微波传播,使雷达系统能够在恶劣的测量条件下提供稳定和精确的结果[3]。

雷达系统发射射频脉冲或连续波来探测目标。脉冲雷达系统发射射频脉冲,然后接收反射的射频脉冲,从中提取目标信息。另一方面,FMCW 雷达系统发射由低频调制的连续波。

锯齿波。发射和接收信号之间的频率差用于确定目标范围和速度。虽然脉冲雷达系统很复杂,需要大功率源才能准确检测目标,但 FMCW 系统通常更简单,需要的功率更低。

一些优点,例如测量的快速更新、许多条件下的稳定性……使 FMCW 雷达系统更适合许多应用,尤其是测距 [4]。

FMCW 雷达的一个重要参数是距离分辨率,它与扫描带宽成反比 [5]。提高距离分辨率意味着增加整个系统的带宽,尤其是射频前端模块,这会导致硬件设计更加复杂。另一种解决方案是使用更有效的信号处理算法。提出了许多具有信号处理算法的 FMCW 雷达。使用矩形窗口和快速傅里叶变换 (FFT) 的实时 X 波段 FMCW 雷达可提供 10 厘米的精度 [6]。另一个系统使用 Yule-Walker 自回归方法 [1] 估计频谱,可以实现小于 5mm 的分辨率,但需要 4096 点 FFT 计算和额外的自相关滤波器。这使整个系统设计复杂化并且需要大量计算。[7] 中提出的另一个分辨率为 1 毫米的系统使用频率和相位信息来获得更准确的结果。然而,由于高线性射频前端模块的要求,硬件设计具有挑战性。此外,许多使用 FMCW 雷达原理的高精度测量系统得到开发和商业化。两个最精确的系统是 Drexelbrook [8] 的电平计 DR7000 和 Paab Tekno Trading [9] 的 Reflex VG7。它们中的任何一个都通过使用 26GHz 的微波信号和 2GHz 的大带宽提供高达 3mm 的精度。在本文中,在基于 SiversIMA 的收发器 RS3400X [10] 的 X 波段 FMCW 雷达系统上提出、仿真和实现了一种插值算法,该算法在保持计算复杂性的同时提高了距离分辨率。整个雷达系统经过封装和优化,在1-4.5m 的范围内实现了高达3mm的测量精度。

本文结构如下:第二节介绍了调频连续波雷达的工作原理,第三节提出了一些分辨率增强方法及其模拟结果,第四节介绍了雷达系统和测量结果,第五节是结论。

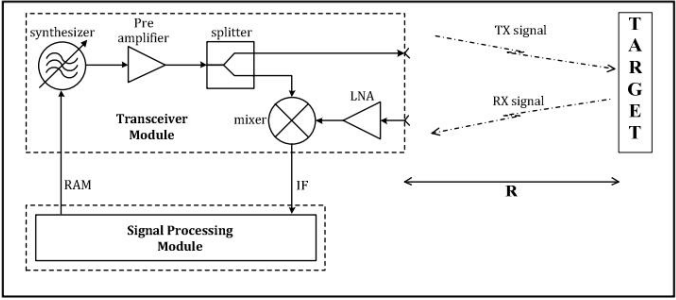


图 1. FMCW 雷达系统。

二、 FMCW雷达工作原理

A. FMCW 雷达工作原理图 1 显示了 FMCW 雷达系统的架构,其中包含收发器和信号处理模块。

收发模块收发微波信号,产生携带目标信息 (距离和速度)的中频信号。信号处理模块使用中频信号中的信息来计算距离和速度的测量结果。

收发模块由合成器、功率放大器、低噪声放大器和混频器组成,传输频率随时间变化的连续信号,通常在一组带宽内进行线性扫描[4]。来自目标的反射信号被放大并与参考信号 (从发射信号分离)混合,从而生成 IF 信号。该 IF 信号的频率f与行进信号从雷达系统到目标的往返时间成正比:

如果

$$F_{\text{中}} = \frac{\text{体重}}{T_c} \cdot \frac{2}{c} \tag{1}$$

式中R为目标距离, c为微波信号在自由空间传播的速度, BW为扫频带宽, T为发射信号频率扫过带宽的时间。

在信号处理模块中,IF信号被转换为数字信号,然后使用FFT进行处理,从中确定频率f。 IF频率根据频域中的最大频谱峰值确定。确定f的准确值对于雷达系统的距离分辨率至关重要,因为频率分辨率在对时限信号T 应用 FFT 后,

如果

等于1/T [4]。因此,距离分辨率受限于:

$$\Delta f_{\text{射频}} \approx \frac{c}{2 \cdot \text{体重} \cdot \text{体重} \cdot \text{体重} \cdot \text{体重}} = \frac{c}{2 \cdot \text{体重} \cdot \text{体重} \cdot \text{体重} \cdot \text{体重}} \tag{2}$$

该方程表明距离分辨率受雷达系统扫描带宽的限制。

B. 收发器 RS3400X

在线性 FMCW 雷达中,很难设计一个在整个带宽上线性扫描频率的宽带系统。优选的选择是构建一个系统,其中频率扫描由一组离散频率生成。

在这种情况下,使用 IF 信号相位的特性而不是频率 [4]。这项工作中使用的 RS3400X 收发器就是按照这个原理设计的。

在这种相位测量方法中,发射和接收信号在采样时间总是具有相同的频率,但接收信号的相位延迟了与信号从雷达到目标的往返行程时间成正比的时间量。相位差定义为:

$$s = \cos(\phi) \approx \frac{2R}{c} = \text{因为 } 2 \pi F_{\text{射频}} \frac{2R}{c} \tag{3}$$

在哪里 f_{射频}是射频信号的频率, λ 是个射频信号的波长。 f逐步增加跨带(BW),从f到f + BW。上式可改写为:

$$s_{\text{射频}} = \left(\cos^2 \left(2 \pi f_{\text{射频}} \frac{2R}{c} + \frac{n}{N-1} \text{体重} \right) \right) \frac{2R}{c} \tag{4}$$

其中N是频率点的数量, n表示每个唯一的测量值, n = 0, 1, ..., N-1。

将 FFT 应用于s(n);余弦函数定义为:

$$s_{\text{射频}} = \frac{1}{2} \delta \left(\frac{2R \cdot \text{BW}}{c} \right) \delta \left(\frac{2R \cdot \text{BW}}{c} \right) \tag{5}$$

m 为正值时,右边第一项= 2. /边在m R BW c处有一个峰值,其中m 义为:是最大频谱峰值所在的位置。因此,测距函数定

$$R \approx \frac{c}{2 \cdot \text{体重}} \tag{6}$$

在两种扫频方案 (线性和步进)中,距离分辨率相同,等于c BW / (2) 。

RS3400X 的参数设置如下: f = 9250 – 10750MHz,BW = 1500 MHz,N = 1024,此收发器的距离分辨率等于 10cm。因此,如果在 10cm 范围内有多个目标,则 IF 信号的 FFT 在测量范围内只有一个峰值,而不是多个峰值。换言之,FMCW 雷达系统在这种情况下只能探测到一个目标。

三、分辨率增强方法

A. FFT、加窗和频谱插值

所需的信号频率f,因此位置
如果
目标是通过离散时间 IF 信号应用窗口函数和 FFT 来确定的。所需范围来自频域中离散频谱的最大峰值。因此,FMCW 雷达的距离分辨率与 FFT 计算的频率分辨率成正比。为了提高确定信号频率的准确性,提出了补零和插值等方法。在零填充方法中,在应用 FFT 之前将零添加到时域中的信号以提高频率分辨率。因此,当填充更多零时,系统精度会提高,但如果添加如此多的零以获得非常高的精度,它就会变得不那么有吸引力(因为计算量大)。另一种解决方案是在执行 FFT 后使用插值方法从一组离散的频谱峰值构建信号频谱。

传统的方法是通过时域信号应用矩形窗口和FFT来提取所需的频率信息,然后找到得到的信号频谱的最大峰值。只有当所需频率是 FFT 频率分辨率的 k (其中 k 是整数)倍时,此方法才能提供准确的结果。在这种情况下,信号频谱的主瓣正好代表了所需的频率。相反,如果期望频率不大于FFT频率分辨率的k倍,则在实际期望频率峰值的两侧可能会出现两个频谱峰值,从而导致错误的测量结果。为了更准确地确定频率,使用插值算法以及其他类型的窗口。使用 Hann 和 Gaussian 窗对 IF 信号应用 FFT 会产生具有宽主瓣的频谱,其中包含两个以上的频谱峰值,有助于准确插值。下面将介绍和比较使用拉格朗日插值和高斯插值的几种类型窗口的插值方法。

1) 拉格朗日插值

安 th 度拉格朗日插值法使用n th
度插值函数p(x),它通过精确函数f(x) [12]的所有指定的n+1 个离散点:

$$p(x) = \sum_{j=1}^{n+1} f(x_j) \prod_{k=1, k \neq j}^{n+1} \frac{x - x_k}{x_j - x_k}$$

1x之间的任意点x的值,从N+1 个已知点插值并由下式 x_{N+1} 可给出:

$$p(x) = \sum_{j=1}^{n+1} f(x_j) \prod_{k=1, k \neq j}^{n+1} \frac{x - x_k}{x_j - x_k} \tag{8}$$

其中() lx是由以下定义的拉格朗日多项式:

$$l_x(x) = \frac{\prod_{k=1, k \neq j}^{n+1} (x - x_k)}{\prod_{k=1, k \neq j}^{n+1} (x_j - x_k)} \tag{9}$$

在n = 2 的情况下,二阶拉格朗日插值是:

$$p(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} f(x_1) + \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} f(x_2) + \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} f(x_3) \tag{10}$$

将 (10) 转换为范围形式:

$$p(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} f(x_1) + \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} f(x_2) + \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} f(x_3) \tag{11}$$

其中R0为准确距离, Y 为距离R对应的谱峰值, Y YR = () .插值精确距离R0定义为:

$$R_0 = \frac{Y_1 + Y_3}{2} \frac{\Delta R}{Y_2 - Y_3} \tag{12}$$

其中Y2是最大峰值的值, Y1、Y3是最大峰值左右的值, R2是最大峰值对应的距离, ΔR是距离分辨率。

2) 高斯插值

高斯插值使用由下式给出的高斯函数:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{13}$$

f () 0 ∞ →在谱中导致d = 0, (13) 重写为:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{14}$$

取 (14) 两边的对数:

$$\ln[G(x)] = \ln\left[\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}\right] - \frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \tag{15}$$

这是2 次拉格朗日插值的常见形式:

$$\ln[Y] = \ln\left[\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}\right] - \frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \tag{16}$$

其中Y是与R对应的离散谱峰的值, R0是确切的距离。插值精确距离R0定义为:

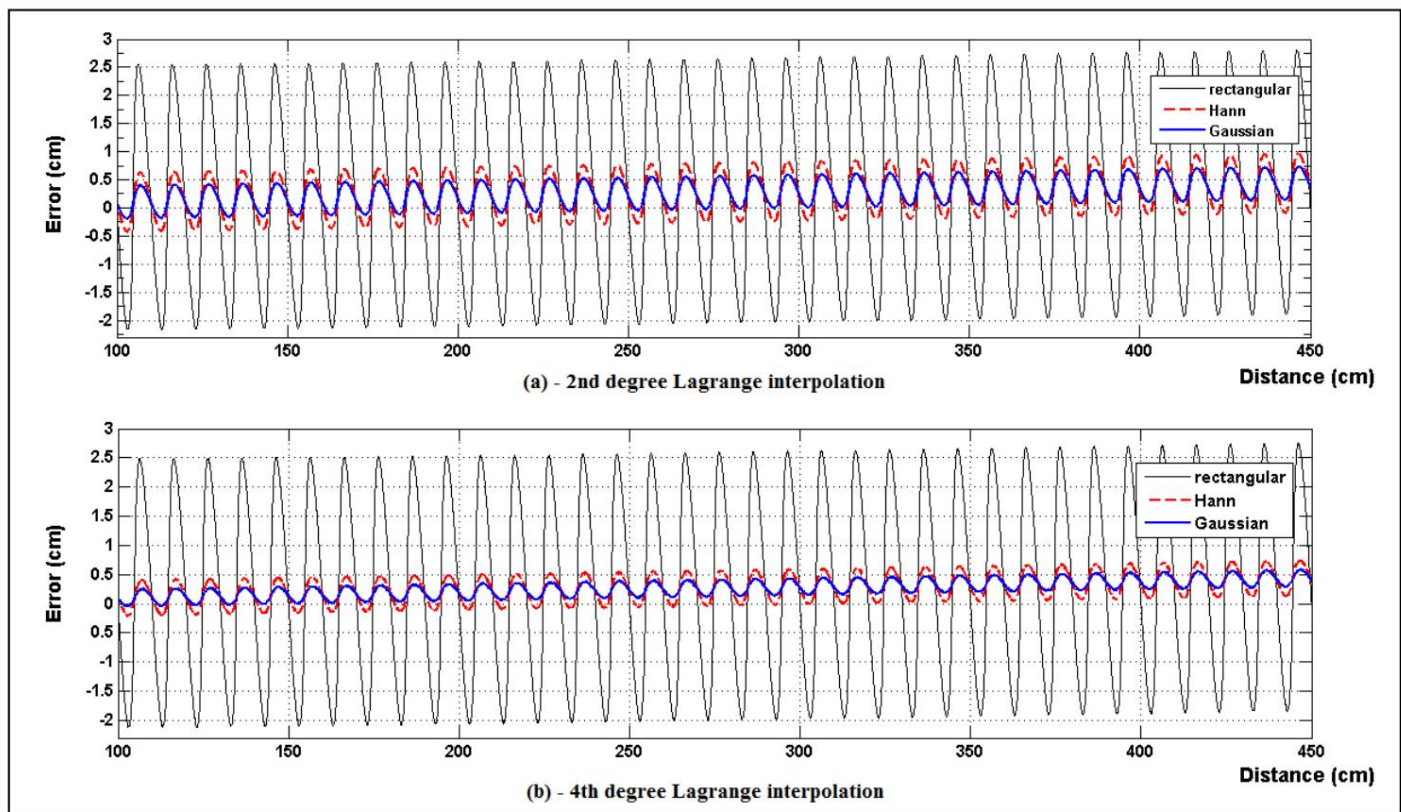


图 2. 2nd (a) 和 4th (b) 度拉格朗日插值的模拟误差。

$$RR = +2 \frac{\ln(\frac{Y_2}{Y_1})}{2 \ln(\frac{Y_2}{Y_1}) - \ln(\frac{Y_3}{Y_1})} \Delta R \quad (17)$$

其中 Y_2 是最大峰值的值, Y_1 、 Y_3 是最大峰值左右的值, R_2 是最大峰值对应的距离, ΔR 是距离分辨率。

B. 模拟结果

在这一部分中,展示了 2 次、4 次拉格朗日插值和高斯插值在各种类型窗口下的模拟结果并相互比较。目的是在设计的 FMCW 雷达系统上找到最有效的插值方法。仿真参数为收发器 RS3400X 的真实参数,用于以下部分: $BW = 1500$ MHz, $N = 1024$ 。

1) 拉格朗日插值图 2(a) 演示了具

有各种类型窗口的 2 次拉格朗日插值。使用步进频率而不是连续频率会增加与目标范围相对应的误差。当目标很远时,这个错误会变得很严重。但是,它很容易通过补偿消除。消除后,使用矩形窗、汉恩窗和高斯窗时的最大误差会周期性地重复,分别约为 23.6mm、5.3mm 和 3mm。与非插值情况相比,使用高斯窗口时的误差提高了约 16 倍。

图 2(b) 显示了具有各种类型窗口的 4 次拉格朗日插值。矩形窗口的最大误差约为 23mm,略小于 2 度拉格朗日插值。然而,使用汉恩窗和高斯窗,结果得到了显著改善。

Hann 和 Gaussian 窗的最大误差约为

分别为 3.1 毫米和 1.5 毫米。使用高斯窗进行四阶拉格朗日插值,与二阶拉格朗日插值相比,误差提高了约 2 倍,与未插值的情况相比,误差提高了 30 倍以上。

2) 高斯插值

为了与拉格朗日插值进行比较,使用相同参数模拟使用高斯窗的高斯插值。图 3(a) 和图 3(b) 分别显示了常规方法和高斯插值方法的模拟结果。误差因目标范围而异,并重复每个 10 厘米的固有范围分辨率。当目标位置是固有距离分辨率的倍数时,误差为零。当目标正好位于两个谱峰的中心时,非插值方法产生最大误差,而所提出的方法在该位置给出零误差。此外,插值方法的误差纹波比非插值方法小 500 倍以上,这意味着该方法显著提高了距离分辨率。

由于通过 FFT 结果的曲线与高斯插值曲线的相似性,得到了非常小的误差。

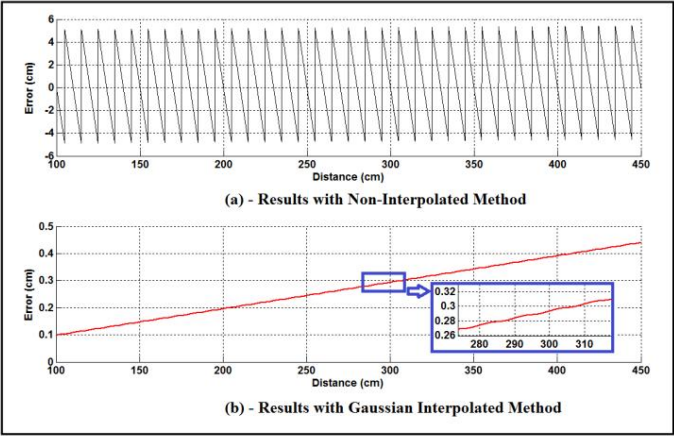


图 3 传统和高斯插值方法的模拟误差。



图 4. 完整的 FMCW 雷达系统。

在插值方法的模拟结果中,使用高斯插值和高斯窗的方法的误差波动最小,误差距离最小。下一节将选择这种方法在真实的 FMCW 雷达系统上实现。

四. FMCW雷达系统和测量结果

A. FMCW 雷达系统图 4 显示

了完整的 FMCW 雷达系统和用于测量目标位置的设置。收发器 RS3400X (图 4 (b)) 是 SiversIMA 制造的 X 波段雷达 [10]。它产生从 9.25 GHz 到 10.75 GHz 的阶跃频率,具有高稳定性。最大步数为 1500,每步的最小空闲时间为 50us。因此,收发器的一个周期持续75ms,这有助于雷达系统在实时测量中快速响应。

RS3400X 附带一个控制板来管理收发器的操作。控制板的ADC具有每采样 16位输出的高分辨率,保证了数字信号在处理前的高保真度。收发器通过串行端口接口 (图 4 (e)) 与计算机通信 (图 4 (f))。建立了一个程序来控制

收发器,处理信号并显示测距测量结果。

为了构建完整的 FMCW 雷达,RS3400X 通过 90 度公对母 SMA 连接器 (图 4 (d)) 与 X 波段高增益喇叭天线 (图 4 (c)) 连接。

连接器必须具有输入/输出匹配的高质量连接器,以最大限度地减少射频信号在天线辐射之前的反射功率。为了扩大雷达的范围,连接器的低插入损耗也是必要的。因为所提出的雷达的误差距离取决于使用两个最大相邻频谱峰值的幅度的高斯插值,所以雷达在距离方面的性能取决于接收信号的功率。因此,要实现远距离高精度雷达系统,不仅需要优化算法,还需要高发射功率。

FMCW 雷达分辨率的“硬”限制为 $c/2BW$ 这意味着如果有多个目标或目标分布在 $\pm c/2BW$ 范围内,则天线处接收到的信号幅度等于感兴趣范围内所有目标的总反射信号幅度。在这种情况下,任何 DSP 算法都无法产生准确的结果。因此,假设在感兴趣的范围内只有一个目标进行测量。

此外,在测量之前,必须关注和校准距离偏移量。信号从上变频混频器的输出传输到目标并反射到下变频混频器的输入所需的总时间是信号在电路和自由空间中传播时间的两倍。因此,在 FFT 之后计算的结果必须减去该距离偏移量,该距离偏移量对应于信号在内部电路中传播的时间。由于收发器的 PCB 布局、连接器和天线的特性……在这项工作中,通过将目标设置在天线末端 (零距离参考点)来测量距离偏移量。然后启动雷达获取结果。该偏移量在测量中保持不变,并被减去以获得最终结果。

B. 测量结果

测量设置如图 4 所示:收发模块和喇叭天线连接在一起并封装在一个 25x20x10cm3 的塑料盒中 (图 4(a))。然后雷达系统通过串行端口接口由计算机连接和控制。构建了一个程序来控制雷达并执行用于增强距离分辨率的算法。连续三个测量结果取平均值得出最终结果。

该系统放置在一个 30 厘米厚的表面上,天线指向目标。目标是位于雷达系统前面的一块 50x50cm2 扁平铝 (图 4(g))。

图 5 显示了目标放置在距离雷达 305.5cm 处使用增强方法前后的中频信号频谱:蓝色条是没有插值的离散频谱,红线是应用高斯插值后的结果。在此图中,计算出的目标位置为 306.1cm,与未插值的位置 (310cm)相比有了很大提高。

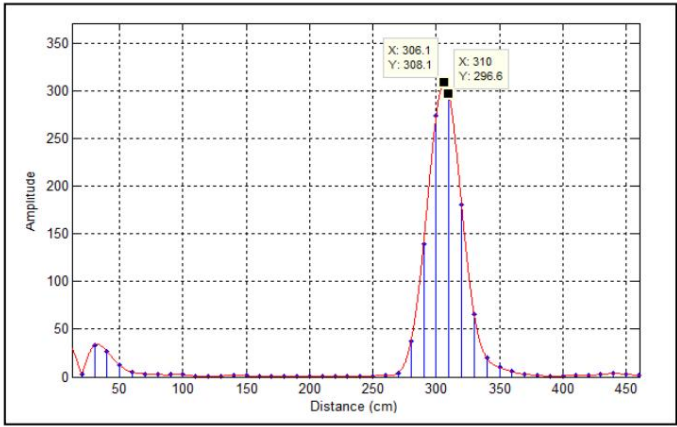


图 5. 中频信号频谱。

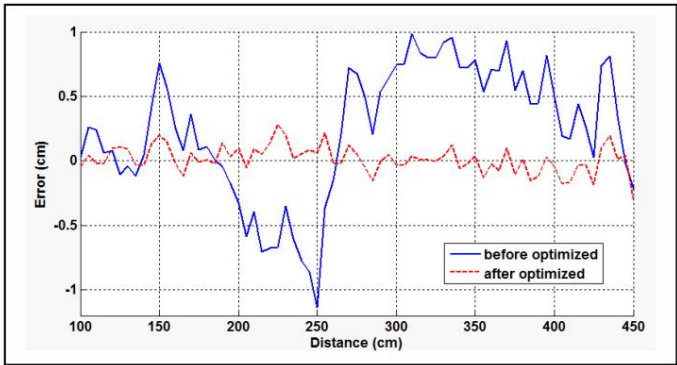


图 6 调频连续波雷达优化前后的测量误差。

图 6 展示了雷达的误差与测量距离的关系。实线是没有优化的误差，虚线是有优化的误差。从多次没有优化的实践中得出结论，在1到4.5m的测量范围内，结果保持不变，产生的最大误差在10mm左右。误差是由多种因素造成的，例如：雷达系统的特性（收发器、喇叭天线、连接器……）、环境、目标的特性和测量中的随机误差……

改善测量结果的解决方案是在目标和环境特性不变的情况下测量偏移误差。偏移量是通过在相同条件下取多次测量的平均值，然后为每个距离范围创建误差表来确定的。测量目标时，雷达系统在误差表中查找相应的误差，并从插值结果中减去该值，得到最终结果。图 6 中的虚线表明，在 1 到 4.5m 的测量范围内，最大误差仅为 3mm。

为了提高雷达系统的性能，必须精确地确定偏移误差，因此需要增加系统内存来存储误差表。这种权衡可以通过将偏移误差确定为范围和其他变量的函数来解决。这项任务需要对雷达硬件和特性有广泛的了解，这将进一步研究。

五. 结论

本文提出了一个完整的短距离 X 波段 FMCW 雷达系统，该系统具有高精度的距离测量能力，使用所提出的信号处理算法来提高距离分辨率。所提出的基于高斯插值和高斯窗的算法在真实雷达系统上进行了仿真和实现。所提出算法的仿真结果表明，与仅使用 FFT 的传统方法相比，距离分辨率提高了 500 多倍。设计的 FMCW 雷达系统可以测量 1 到 4.5m 范围内的目标，最大误差为 3mm。需要一个发射/接收模块来增加发射功率，因此雷达系统的测量范围。该雷达系统在越南发现了许多高精度非接触式测距应用。

致谢

这项工作得到了胡志明理工大学 T-ĐĐT-2013-70 项目的支持。

参考

[1] 陈海;严丽;王新民,“基于 FMCW 雷达的 A Level 测量系统的数字信号处理”,控制与自动化,2007 年。ICCA 2007 年。IEEE 国际会议,第 2843,2847 页,2007 年 5 月 30 日-2007 年 6 月 1 日。

[2] 马卡乔利,L.;斯巴拉,E.乌尔巴尼,L.加蒂,房车; Sorrentino, R.,“基于 FMCW 雷达的精确室内测距系统”,智能车辆研讨会 (IV),2011 年 IEEE,第 981,986 页,2011 年 6 月 5-9 日。

[3] MI Skolnik,雷达手册,第 3 版。纽约:麦格劳-希尔,2008。

[4] FMCW 雷达传感器应用说明, Siver IMA Co.,瑞典,2012 年。

[5] Ayhan, S.;帕尔,P.凯瑟,T.保利,M. Zwick, T.,“具有附加相位评估的扩展 FMCW 雷达系统的频率估计算法”,微波会议 (GeMIC),2011 年,第 1,4 页,2011 年 3 月 14-16 日。

德语

[6] 申东勋;李志勋; Seong-Ook Park,“实时 FMCW 短程雷达系统”,合成孔径雷达 (AP SAR),2011 年第三届国际亚太会议,第 1,4 页,2011 年 9 月。

[7] 齐国庆,“FMCW 雷达船用液位计量系统中的数字信号处理”,信号处理,1996.,第三届国际会议,第 1 卷,第 7 页,第 10 卷,10 月 14-18 日1996 年。

[8] DR7000 系列液位雷达,用于测量液体、浆料和固体的距离、液位和体积, Ametek Drexelbrook Co.,美国,2013 年。

[9] Reflex VG7 26GHz FMCW 雷达液位计, Paab Tekno Trading Co.,瑞典,2012 年。

[10] FMCW 收发器 RS3400X/00, Siver IMA 公司,瑞典,2012 年。

[11] 高孝贤;郑开文; Hsuan-Jung Su,“FMCW 雷达的距离分辨率改进”,雷达会议,2008 年。EuRAD 2008.欧洲,第 352,355 卷,2008 年 10 月 30-31 日 [12] J.-P. Berrut 和 LN Trefethen,“重心拉格朗日插值”,SIAM Rev.,第 46 卷,第 3 期,第 501-517 页,2004 年。

[13] M. Gasior 和 JL Gonzalez,“通过抛物线和高斯插值提高 FFT 频率测量分辨率”,欧洲核子研究中心,瑞士日内瓦,2004 年 2 月。