

LFMCW雷达的距离/多普勒处理

杜川华, 龚耀寰

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】基于线性调频连续波雷达可提取目标的距离信息和多普勒频率,分析了线性调频连续波在高频雷达中的应用,推导出差频信号的表达式和利用二维快速傅里叶变换进行距离/多普勒处理的理论。提出了将距离/多普勒处理技术与自适应数字波束形成技术相结合,对杂波和干扰进行抑制的同时提取回波目标信息的方法。经计算机仿真结果表明,其方法有效可行。

关键词 距离/多普勒; 线性调频连续波; 自适应数字波束形成; 二维快速傅里叶变换

中图分类号 TN957.524; TN973.31 文献标识码 A

Range/Doppler Processing in Linear FMCW Radar

Du Chuanhua, Gong Yaohuan

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The radar used Linear frequency modulated continuous wave(LFMCW) signal can detect the information of range and Doppler of target. This paper analyzes the LFMCW signal used in HF radar, then deduces the expression of its beat frequency, and the theoretical for range/Doppler processing used two-dimensional fast Fourier transform(FFT) technique. The range/Doppler processing and the adaptive digital beamforming(ADBF) technique combined to extract the information of target echoes while control the effect of interrupt and noise. The simulation results are provided in this paper.

Key words range/Doppler; linear frequency modulated continuous wave; adaptive digital beamforming; two-dimensional fast Fourier transform

线性调频连续波(Linear Rrequency Modulated Continuous Wave, LFMCW)能实现较高的距离和多普勒频率的分辨力^[1],在各种近距离雷达、防撞雷达、未制导雷达、远距离天波、地波雷达以及飞机高度表中已得到广泛应用。例如天波超视距雷达是一种利用电离层对高频信号的反射作用自上而下进行目标探测的雷达体制,工作在3~30 MHz的高频段,能够探测超远距离(1 000~4 000 km)的运动目标,在此类高频雷达中,最基本的信号形式就是LFMCW。自适应数字波束形成(Adaptive Digital Beam Forming, ADBF)是对外部干扰和噪声进行抑制的有效手段,它是依据当前的干扰分布情况自适应地调节阵列天线的权值,使主波束基本保持不变而使波束副瓣与外干扰的分布相适应,保证所接收到的干扰和噪声的功率达到最小,较大地提高输出信噪比。本文主要针对LFMCW远距离雷达,用以下几种特殊的信号处理方式提取目标特征:

- 1) 对目标回波到达时间的处理,获取目标的距离参数;
- 2) 对接收天线阵合成波束的扫描,获取目标的方位信息;
- 3) 对目标回波的多普勒处理,获得目标的速度信息。

收稿日期:2003-07-14

作者简介:杜川华(1978-),女,硕士生,主要从事通信与雷达中的自适应信号处理和智能天线方面的研究。

1 线性调频连续波信号

FM/CW系统的发射和接收波形如图1所示。从图中得知LFMCW的发射波形幅度固定不变,但频率随时间按线性锯齿而变化,目标回波包括一个发射波形的复制波。两路传输延迟 $t_r = 2r/c$, r 为目标距离, c 为传播速度; f_0 为调频信号的起始频率, T 为调频周期, Δf 为扫频带宽。

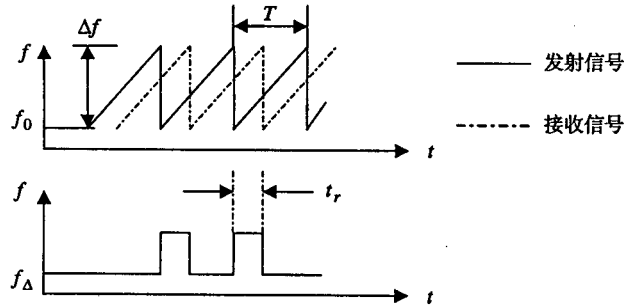


图1 在FM/CW系统中的发射和接收波形

对于静态目标而言,接收信号和发射信号间的瞬时频差 f_Δ 为一个常数,并与目标距离成正比,其公式如下

$$f_\Delta = \frac{\Delta f}{T} t_r = \frac{\Delta f}{T} \frac{2r}{c} \quad (1)$$

由式(1)可知测出频差就能算出目标距离。这种载有距离信息和频率信息的信号被称为差拍信号,又称差频。这种信息与一般雷达的中频相对应。下面从数学角度来分析采用锯齿型LFMCW信号进行距离/多普勒处理的原理^[2]。发射信号可表示为^[3]

$$u_r(t) = \exp\{j[2\pi f_0 t + \pi k(t - nT)^2 + j_0]\} \quad (2)$$

式中 k 为调频斜率, j_0 为初始相位, $n = 0, 1, 2, \dots$ 。发射信号的瞬时相位可表示为

$$P_T(t) = 2\pi f_0 t + \pi k(t - nT)^2 + j_0 \quad (3)$$

接收信号的瞬时相位相对于发射信号有一个时延 t_r ,可表示为

$$P_R(t) = P_T(t - t_r) = 2\pi f_0(t - t_r) + \pi k(t - t_r - nT)^2 + j_0 \quad (4)$$

将接收到的目标回波信号和发射的信号混频,其输出为差频信号,差频信号的相位为

$$P_M(t) = P_T(t) - P_R(t) = 2\pi f_0 t_r - \pi k t_r^2 + 2\pi k t_r(t - nT) \quad (5)$$

当 t_r 为常数时(对于静态目标),差频信号是一正弦信号,其频率正比于 t_r (即目标的距离)。当目标相对于雷达有径向运动速度 v 时,差频信号的频率在变化,在此变化的频率中,必然包含了目标的距离和速度信息。此时的两路传输延迟为

$$t_r = 2(r_0 + vt)/c \quad (6)$$

式中 r_0 为 $t=0$ 时目标到雷达的距离。在处理数据时,常以一个重复周期的数据作为处理单元。将式(6)代入式(5)中,整理后可得到某个重复周期所获得的差频信号的频率为

$$f(t - nT) = \frac{dP_M(t - nT)}{2\pi dt} = \frac{2f_0 v}{c} + \frac{2kr_n}{c} - \frac{4kr_n v}{c^2} + \left(\frac{4kv}{c} - \frac{4kv^2}{c^2}\right)(t - nT) = f_{dv} + f_R(n) + f_{drv}(n) + k_n(t - nT) \quad (7)$$

式中 $r_n = r_0 + Tvn$, 为第 n 个重复周期时,目标与雷达间的相互距离, $n = 0, 1, 2, \dots$ 。 f_{dv} 是 f_0 对目标的运动速度 v 所产生的多普勒频率,称为速度多普勒频率,这是进行距离/多普勒处理所要得到的信息之一。 $f_R(n)$ 是当目标与雷达之间的距离为 r_n 时,发射信号与回波信号的差频频率又称距离差频,这是需要的另一项有用信息。在实际情况下,由于 $v \ll c$,后两项的数量级远远小于前面两项,因此可忽略。

由以上的分析可以看出,差频信号确实包含了目标的距离和多普勒信息,通过对差频信号做二维离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)可得到该信息。

2 距离/多普勒处理的基本原理及实现方案

距离/多普勒处理是用来从噪声和干扰中提取雷达目标信息的。长距离的传输将增加非期望信号的传输,还有射频干扰等,都会潜在地削弱雷达性能。另外,与雷达相关的非期望信号的能量,例如有多普勒扩展的杂波,也会限制雷达性能。因此,采用依靠数据的自适应波束形成技术与距离/多普勒处理相结合,将有效地最小化非期望信号的影响,从而准确地提取出所需要的目标信息。

距离/多普勒处理是通过观测回波频率的脉冲到脉冲间的变化,提取出非模糊的距离和多普勒信息。在本文中采用的是锯齿波调频信号,实际上也可以采用三角形调频信号来提取距离和多普勒信息,其拍频之和给出多普勒频率,拍频之差给出目标距离,在此不加以详细讨论。距离/多普勒处理的形式包括两级离散傅里叶变换,拍频信号数字化等。回波的傅里叶变换导出频率域的距离信息,可以形成一连串距离单元。对于每个距离单元而言,脉冲序列的傅里叶变换导出脉冲到脉冲间的相位变化,这种相位变化就对应于这一距离上的目标的多普勒频移。这里距离单元的概念是指在雷达照射区内相同的距离环带内为同一距离元,距离元的宽度代表距离分辨率,通常距离单元的大小与LFMCW的扫频宽度有关。

$$\Delta r = c / (2\Delta f) \quad (8)$$

式中 Δr 为每个距离单元对应的距离, c 为传播速度, Δf 为扫频宽度。

下面从数学角度上推导使用DFT进行距离/多普勒处理的原理。连续时间信号 $x(t)$ 的傅里叶变换为

$$X(f) = \int_0^{NT_r} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (9)$$

对连续时间信号 $x(t)$ 进行采样得到 $x(m, l)$, 表示第 m 个重复周期的第 l 个采样点, 如果对 $x(t)$ 采样了 N_r 个重复周期, 每个重复周期采样 N_s 个点, 那么就有 $m = 0, 1, 2, \dots, N_r$, $l = 0, 1, 2, \dots, N_s$, 因此式(9)又可表示为

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N_r-1} \sum_{l=0}^{N_s-1} x(m, l) \exp(-j2\pi f(mT_r + lT_s)) T_s \quad (10)$$

$$f = f_\Delta + f_d = l \frac{1/T_s}{N_s} + m \frac{1/T_r}{N_r} \quad (11)$$

式中 f_Δ 为距离差频信号, f_d 为多普勒频率, T_r 同图1所示的 T 为锯齿波重复周期, T_s 为采样频率的倒数, 有等式 $T_r = T_s N_s$ 。式(10)为二维的DFT。将式(11)代入到式(10)中, 化简后得到

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N_r-1} \sum_{l=0}^{N_s-1} x(m, l) \exp\left(-j2\pi \left(\frac{m^2}{N_r} + \frac{l^2}{N_s}\right)\right) T_s \quad (12)$$

由式(12)看到, 如果离散信号 $x(m, l)$ 是差频信号的采样信号, 那么对它做DFT确实可以将原信号中所带有的距离和多普勒信息分离并提取出来。为加快运算速度, 采用了快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)。

3 仿真结果

根据以上原理进行了计算机Matlab仿真。用于做ADBDF和距离/多普勒仿真处理的输入信号采用的是256个天线阵元信号。通过延迟线, 把256个垂直的单极天线阵元输出进行某种幅度加权后相加, 然后被组合成为8个32阵元的子阵, 每个子阵相当于一个接收通道。对于每个接收通道, 取64个重复周期, 每个重复周期进行64次采样(共有4 096个采样点)。对这些采样数据先作ADBDF, ADBDF输出的数据再作距离/多普勒处理, 即二维FFT。因此, 距离/多普勒处理的输出结果包括 64个时延单元(也即距离单元)和64个多普勒频率单元。海宁(Hanning)加窗用来控制FFT输出的副瓣。

图2为直接对差频采样信号进行距离/多普勒处理的三维立体显示结果, 还未采用ADBDF。LFMCW的扫频带宽为10 kHz; 重复周期为16 ms; 采样频率为2 000 Hz; 每个距离单元对应的距离为15 km; 64个距离单元, 可探测距离0~960 km; 其坐标 f_d 是与目标速度相联系的多普勒频率, 变化范围在 ± 30 Hz, 坐标 r 为探测的距离范围; 坐标 a 为信号相对幅度。信号噪声比0 dB, 杂波噪声比20 dB。图中期望目标的多普勒频率是10 Hz, 距离在600 km左右; 由于未采用ADBDF, 可看到有较高的噪声和很强的零频杂波, 这对目标检测是

很不利的。

图3为采用ADBF得到的仿真结果，即先对差频信号作ADBF，ADBF输出的数据再做距离/多普勒处理。ADBF采用的是QR分解的采样矩阵求逆(SMI)算法，其他的技术指标与图2的相同。比较图2和图3，由于采用了ADBF，有效的抑制了干扰，提高输出信噪比，可有效的检测到目标信号。同时还采用了杂波对消技术MTI(Moving Target Indication)，低频杂波被很好的抑制掉了， $r-f_d$ 输出的动态范围也得到了有效控制，使得对目标信号的检测更易实现。该仿真结果进一步说明对ADBF的输出数据进行距离/多普勒处理有效可行。从以上的对比图中，由于考虑的只是相对幅度的大小，因此对绝对幅度的处理便于对比观察信号与噪声、杂波、干扰的相对强度。

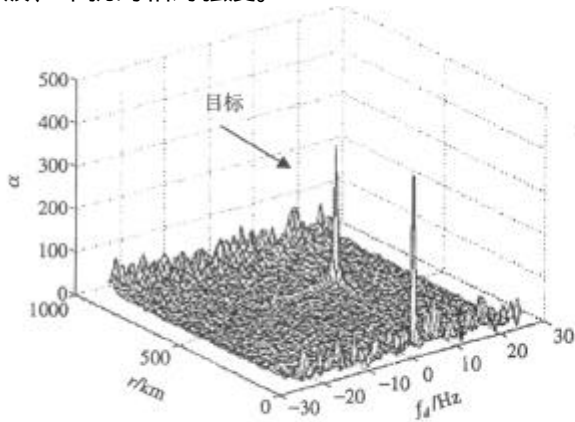


图2 未采用ADBF的 $r-f_d$ 结果图

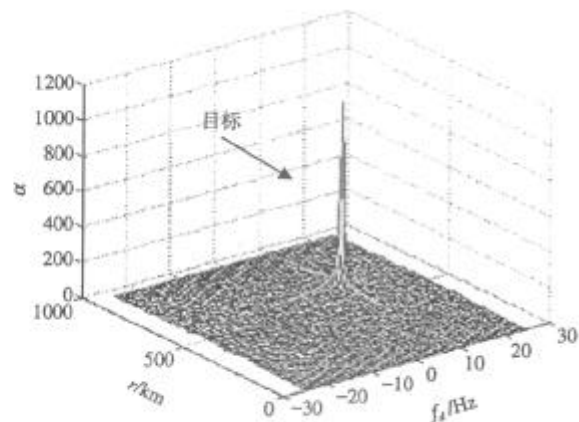


图3 采用MTI、ADBF的 $r-f_d$ 结果图

4 结束语

本文给出了LFMCW的距离/多普勒处理的原理，证明了将距离/多普勒处理技术与自适应数字波束形成技术相结合的实现方法，通过计算机Matlab仿真，其结果进一步证明了该方法的有效性，它对近距离和远距离的雷达系统都适用。

参 考 文 献

- [1] Lloyd J, Griffiths. Time-domain adaptive beamforming of HF backscatter radar signals[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1976, 24(5): 707-720
- [2] Washburn T W, Sweeney L E. An on-line adaptive beamforming capability for HF backscatter radar[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1976, 24(5): 721-732
- [3] 冀振元, 孟宪德. 高频雷达中LFMCW信号的分析[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(12): 14-16

编辑 刘文珍