

对目标速度跟踪的 ZFFT 方法*

许耀昌

(北京航空学院)

根据闭环控制的原理,对单个目标实现速度跟踪的关键在于形成一个能时刻套住目标的速度门.使用模拟式跟踪环可以完成这一任务.一种可能的方法是在距离门中放后面用鉴频器和自动频率控制(AFC)环路来实现.这种方法是以窄带中放的通带构成速度门.当目标径向速度变化时,鉴频器输出的误差信号经低通滤波器后加到压控振荡器(VCO)上,调整VCO的振荡频率去跟踪信号的多普勒频率.这相当于误差信号控制一个速度门在频率轴上连续地移动,从而构成一个闭环的速度跟踪环路.另一种可能的方法是在中放输出端接一个多普勒滤波器组,用它覆盖预期的多普勒频移范围,通过比较相邻滤波器的输出来实现对目标的速度跟踪.这相当于用多个速度门排列在频率轴上的某个区间;而比较相邻滤波器输出的过程则等效于前一种方法中的速度门移动.若采用距离门分割的多通道接收机配合多普勒滤波器组,则后一种方法可以同时跟踪多个目标的速度.但是模拟式信号处理系统中,由于形成窄带的多普勒滤波器组比较困难,体积、重量也较大,因此一般采用前一种方法.但前一种方法的精度和响应速度不够理想.利用数字信号处理也可完成上述任务.数字信号处理设备有体积小、重量轻、精度和可靠性高等优点,已日益引起人们的重视.图1就是利用快速傅里叶变换(FFT)方法实现速度跟踪的简化方框图.

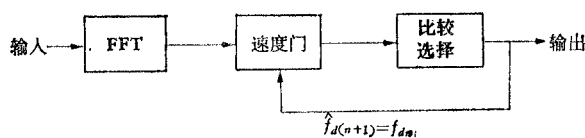


图1 用FFT实现速度跟踪的方框图

Fig. 1 Block diagram of velocity tracking by using FFT

在进行信号处理时,我们以从前一帧信号得到的目标的多普勒频率(代表目标的径向速度) f_{d_n} 为中心,并在考虑到目标的机动飞行和通过路线等因素造成的径向速度变化的情况下,再以一次处理时间间隔内,对应于目标径向速度的最大可能变化范围的多普勒频率变化范围为依据,在频域中设置速度门,然后比较落入速度门的FFT输出幅度 $|X(k)|$,就可得出新的多普勒频率 $f_{d(n+1)}$ (见图2).

当目标作机动飞行时,文献[1]给出的数据,采用Singer模型,可得出图3所示的试验结果.

* 1983年1月5日收到.

我们的模拟试验表明,用 FFT 法可对目标径向速度进行跟踪,但尚有不足之处. 首先,当 FFT 点数一定后,分析频率的位置也就固定不变了. 这样,当目标多普勒频率 f_a 位于分析频率之间时,会造成较大的测速误差,同时也将损失一定的增益,这对信号检测不

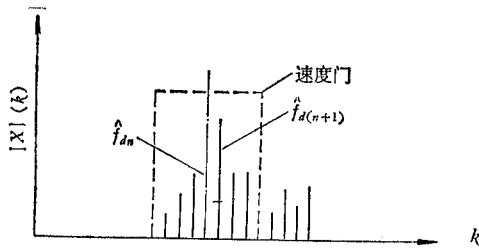


图2 信号频谱和速度门

Fig. 2 Signal spectrum and the velocity gate

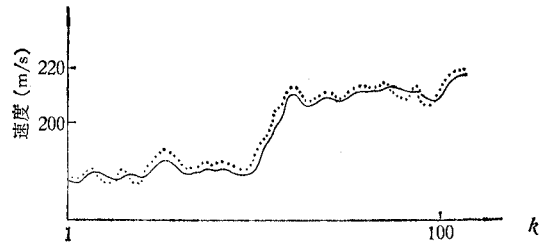


图3 用 FFT 实现速度跟踪时的试验结果

——假设目标的速度变化,……计算机模拟试验结果
Fig. 3 Results of the computer-simulation experiment by using FFT. ——velocity variations of the supposed target,experimental results of the computer-simulation

利. 要克服这一缺点,需要增加录取信号的时间或通过补零的方法延长数据以加密谱点,这些都要使处理点数增多,设备量会相应增大. 另一方面对实时处理来讲,也带来了困难. 事实上,只需对落入速度门内的目标附近一小段谱感兴趣,其它频率区间上谱点的计算都是不必要的浪费. 这就启发我们采用频谱细化的快速傅里叶变换 (Zoom FFT 技术简称 ZFFT).

ZFFT 算法有两个突出的优点: (1) 它可以对被分析频率区间内的一小段谱进行谱分析; (2) 通过乘以不同的调制因子,使得可以在被分析频率区间内任意选取这一小段谱,这相当于使 FFT 分析谱线的位置可以移动. 这两点正好弥补了 FFT 法跟踪时的不足,这也是我们采用 ZFFT 法实现速度跟踪的根据.

1. 用 ZFFT 实现速度跟踪

按照 ZFFT 的原理,可以构成图 4 所示的速度跟踪方案.

跟踪过程如下: 利用上一帧处理得出的 \hat{f}_{a_n} 产生调制因子,来控制目标谱移入速度门内(即移入低通滤波器通带内),经滤波和同步取样后,再用 FFT 求出速度门内的一段谱,通过比较选出新的 $\hat{f}_{a_{(n+1)}}$,再用它产生下一帧信号的调制因子. 如此循环下去,即可实现对目标的速度跟踪. 图 4 中低通滤波器可起到速度门的作用,它可用有限冲击响应(FIR)数字滤波器来实现,以保证线性相位和便于采用快速卷积.

频率估计的基本关系式为: $\hat{f}_{a_{(n+1)}} = \hat{f}_{a_n} + \Delta f_{a_n}$, 式中 \hat{f}_{a_n} 为处理上一帧信号得到的多普勒频率. 根据 ZFFT 原理可知,它对应 ZFFT 输出谱的中心位置. Δf_{a_n} 为 ZFFT 输出谱中通过比较选择得出的谱峰位置同中心频率 \hat{f}_{a_n} 之差.

调制因子序列由 \hat{f}_a 控制生成. 若输入序列有 N 点,则可能的 \hat{f}_a 也只有 N 个. 由于调制因子序列是以 N 为周期的,这样可以先将调制因子序列 $\exp[-j2\pi n\hat{f}_a/f_r]$ 算好,并预先存贮起来,使用时只需用 \hat{f}_a 控制读出顺序即可.

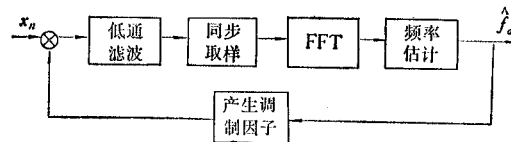


图 4 用 ZFFT 进行速度跟踪的方框图

Fig. 4 Block diagram of velocity tracking by using ZFFT

2. 用 ZFFT 进行速度跟踪的计算机模拟

模拟条件为：脉冲重复频率 $f_r = 80\text{kHz}$ ，一帧时间 $T_E = 3\text{ms}$ ，载机与目标的相对加速度可看成缓慢变化的一阶马尔柯夫过程，天线双向方向性图假定为 $\sin c$ 型，射频波长 $\lambda = 2\text{cm}$ ，输入信噪比为 3:1，一帧取样点数为 240，补零至 512，谱线间隔为 $\Delta F = 156\text{Hz}$ ，目标回波模型为 $S(n) = \left[\sin c \left(\frac{n}{256} \right) \right]^2 \exp[j2\pi n f_d T]$ 。

设 $f_d = 17\text{kHz}$ ， $f_d T = 0.21$ ，噪声为高斯分布的伪随机序列 $W(n)$ ，方差为 0.36。回波的总模型为 $r(n) = S(n) + W(n)$ ，一阶马尔柯夫过程可由高斯随机数形成。根据 Singer 模型，目标的机动加速度可用一阶马尔柯夫过程表示，即： $\dot{a}(t) = -\frac{1}{\tau}(a) + w(t)$ ，式中 τ 为相关时间常数， $w(t)$ 是均值为零、方差为 σ_w^2 的白噪声。离散化后，经推导可得：

$$a[(n+1)T] = e^{-\frac{T}{\tau}} a[nT] + N[(n+1)T],$$

这里 $N[(n+1)T]$ 为高斯分布的随机序列。根据文献 [1]，可取 $\tau = 20\text{s}$ ，在计算机上模拟试验的结果可用图 5 所示的曲线表示。图 5 中的实线代表目标径向速度的变化，虚线代表用 ZFFT 法的试验结果。

试验结果表明，在信噪比为 3:1 的情况下，目标作机动飞行时，采用 ZFFT 方法可以对目标进行良好的速度跟踪，且跟踪精度可以比 FFT 方法高 A 倍， A 为所用的 Zoom 因子的数值。理论分析和计算机模拟试验表明，适当选取 Zoom 因子的数值 A 和滤波器的阶数，那么 ZFFT 的计算量可以比 FFT 少（参看文献 [3]，[4]），因此本文提出的方法在

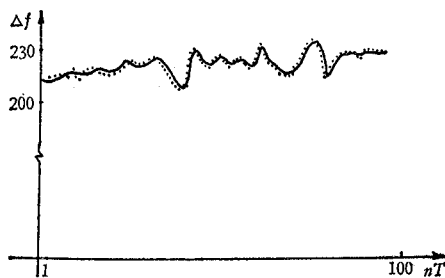


图 5 用 ZFFT 进行速度跟踪的试验结果

——假设目标的速度变化 计算机模拟的试验结果

Fig. 5 The results of the computer-simulation experiment by using ZFFT ——velocity variations of the supposed target experimental results of the computer-simulation

工程设计上是有一定的现实意义的。

参 考 文 献

- [1] 柴田实·穗坂三四郎, カルマン・フィルタを用いた航空機用追尾レーダの精度向上について, 雷达电子学译丛, 1980年, 第1期, 第12—27页.
- [2] S. B. Bowling AD-A0 42817, 1977.
- [3] E. A. Hoyer and R. F. Stork, The Zoom FFT Using Complex Modulation, IEEE ICASSP, 1977,

pp. 78—81.

[4] 许耀昌、李光沐, Zoom FFT法提高分辨力的程序设计,北京航空学院科研报告 BH-B652.

[5] R. A. Singer, Maneuver Model Selection for Real Time Tracking, Hawaii 4th Conference on System Science, 1971.

A METHOD OF ZFFT FOR TRACKING TARGET VELOCITY

Xu Yaochang

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

A method of digital signal processing for tracking the velocity of moving target in the application to radar system is given. The tracking accuracy of velocity of this method can be improved by the use of ZFFT. The method of ZFFT mentioned above has been proved to be valid through the experiments carried out in the computer.