

调频连续波的一种匹配滤波处理方法¹

鲁旭东 王振荣 薛明华

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

摘 要 脉冲压缩雷达中广泛使用调频连续波形, 使用匹配滤波的处理方法。但对大时宽带宽积的任意调频连续波其匹配滤波器的设计是比较困难的。该文提出一种比较易于实现的匹配滤波处理方法, 具有较大的实用价值。

关键词 匹配滤波器, 脉冲压缩雷达, 调频连续波

中图分类号 TN713

1 引言

在脉冲压缩雷达中采用匹配滤波器对目标回波信号进行压缩。在模拟系统中, 匹配滤波器是用色散延迟线实现的, 色散延迟线的缺点是其延迟时间较短。随着数字技术的进展, 现在也使用数字相关实现匹配滤波, 数字相关的缺点是受处理能力的限制信号带宽不能太宽^[1]。然而脉冲压缩雷达的优点正在于其长的时宽和大的带宽, 上述的技术尚不能很好地满足这一点。

目前在脉冲雷达中广泛使用的波形是线性调频波, 对这种信号有一种处理方法可以较好地解决上述问题。它是将目标的回波信号先与发射信号去斜率混频, 再进行 FFT 处理, 以得到距离向的目标分布。混频后得到的信号带宽远小于发射信号的带宽, 因此便于采集处理。现代技术能产生大时宽带宽积的线性调频信号, 使用它能获得高的距离向分辨力。

实际的雷达系统常常还要求使用非线性调频波, 若仍按照线性调频的处理方式, 虽然能使回波信号的带宽降下来, 但对目标的分辨变差, 甚至可能出现虚假目标^[2,3]。当线性调频系统的线性度达不到要求时, 也会出现这种结果。

本文针对大时宽带宽积的调频连续波信号, 提出了一种匹配滤波处理方法, 能解决上述问题。

2 处理方法

雷达发射的调频连续波可写为如下形式:

$$E_S(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(\phi(t)) \quad (1)$$

式中 T 是发射信号的持续时间, 则该信号经目标反射, 接收机收到的信号为

$$E_R(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \cos(\phi(t-\tau)) \quad (2)$$

先将此信号与发射信号混频, 即相乘, 并滤去高频项, 可得中频信号

$$E_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T-\tau}\right) \cos(\phi(t) - \phi(t-\tau)) \quad (3)$$

上式余弦函数中的第二项可以在时间 t 的邻域内展开为

$$\phi(t-\tau) = \phi(t) + \phi'(t)(-\tau) + \frac{1}{2!}\phi''(t)(-\tau)^2 + \frac{1}{3!}\phi'''(t)(-\tau)^3 + \dots \quad (4)$$

因此有

¹ 1999-12-23 收到, 2000-08-24 定稿

$$\phi(t) - \phi(t - \tau) = \phi'(t)\tau - \frac{1}{2!}\phi''(t)(-\tau)^2 - \frac{1}{3!}\phi'''(t)(-\tau)^3 + \dots \quad (5)$$

一般雷达 τ 很小, 因此可以忽略上式中 τ^2 及其以上的项, 因此可得

$$\phi(t) - \phi(t - \tau) = \tau\phi'(t) \quad (6)$$

代回中频信号表达式 (3), 可得系统的中频输出为

$$E_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T - \tau}\right) \cos(\tau\phi'(t)) \quad (7)$$

上式的特点是其瞬时角频率 $\tau\phi''(t)$ 正比于延迟 τ 。在系统发射线性调频信号时, 瞬时角频率 $\tau\phi''(t)$ 是不依赖于时间的常数, 上式是一个单一频率的正弦波, 其频率正比于 τ , 因此对其作 FFT 可得到目标的距离分布。当系统发射非线性调频信号时, 上式中的瞬时角频率随时间变化, 但仍正比于 τ , 依赖于 $\phi'(t)$ 的具体形式, 对上式作 FFT 有不同的效果, 可能使目标的分辨力下降, 可能出现假目标。上式所表示的信号由于余弦中 τ 的作用, 频率比发射信号大为降低, 便于数字处理。

不管信号的形式如何, 从上式可以看到, 延迟 τ 始终是信号相位的一个比例项, 与相位的其它部分是可分离的。可以将这个中频信号作一个尺度变换, 即令 $t = \theta(u)$, 代入上式, 可得

$$E_0(u) = \text{rect}\left(\frac{u - \tau'}{U - \tau'}\right) \cos(\tau\phi'(\theta(u))) \quad (8)$$

将中频信号变为了 u 的函数, 如果这个尺度变换使得上式余弦中的 $\phi'(\theta(u))$ 恰好为 u 的一次函数, 则得到的 $E_0(u)$ 就是一个频率与延迟 τ 成正比的正弦信号, 对 $E_0(u)$ 作 FFT, 就可以得到目标的距离分布。因此现在的目标是寻求一个尺度变换关系 $t = \theta(u)$, 使得中频信号作此尺度变换后变为一个正弦波。观察 (7) 式, 只要在信号的持续时间内, $\phi'(t)$ 是 t 的单值函数, 则这个关系很容易找到, 它就是 $u = \phi'(t)$, 将它代入 (7) 式, 可得到变换后的中频信号:

$$E_0(u) = \text{rect}\left(\frac{u - \tau'}{U - \tau'}\right) \cos(\tau u) \quad (9)$$

可见它是角频率为 τ , 以 u 为自变量的正弦函数, 对其作 FFT, 就得到目标的距离分布。上式中 U 是 u 的持续时间。

可以分析此方法的分辨力。根据傅里叶分析, 持续时间为 U 的单一频率的正弦波其频谱为 sinc 函数形状, 主瓣宽度约为 $1/U$ 。上式中正弦波的频率为 $\tau/(2\pi)$, 因此有 τ 的分辨力为 $2\pi/U$, 又因为 $\tau = 2R/C$, 因此有距离分辨力为 $2\pi C/(2U)$ 。而由变换关系 $u = \phi'(t)$, 可知 U 等于信号的扫频带宽 $2\pi B$, 所以可得系统分辨力为 $C/(2B)$, 只与系统的带宽有关。

归纳本方法的处理过程是: 将接收到的调频连续波信号与发射信号混频, 得到中频信号, 将此中频信号按 $u = \phi'(t)$ 作尺度变换, 变换后的信号通过一组滤波器组就得到目标的距离分布。

模拟系统中要作任意形式的尺度变换是困难的, 因此应采用数字处理。若对 $E_0(u)$ 作数字 FFT, 则只需知道 $E_0(u)$ 在 $N+1$ 个均匀时刻的离散值, 而根据变换关系, $E_0(u)$ 在此 $N+1$ 个时刻上的值对应于原信号 $E_0(t)$ 在相应时刻上的值。因此数字处理的过程是: 根据关系 $u = \phi'(t)$, 确定 $N+1$ 个等间隔点 u_n 对应的 $N+1$ 个时刻 t_n , 对回波中频信号按此 $N+1$ 个 t_n 时刻采样, 采样所得序列作 FFT, 就得到目标的距离分布。实际上由变换关系 $u = \phi'(t)$, 因为 $\phi'(t)$ 是发射波形的瞬时频率, 可知各采样时刻 t_n 恰好将信号的频率划分为等间隔的 N 份, 见图 1。

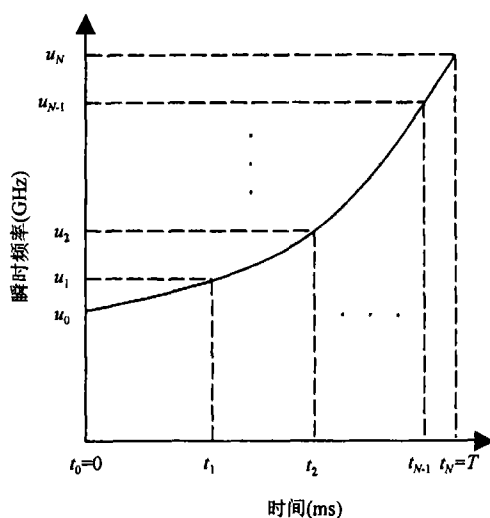


图 1 由发射信号扫频特性确定采样时刻

图中的曲线是发射波形的瞬时频率特性曲线。因此由信号的频率曲线可以求得采样时刻 t_n 。

前面的讨论假定发射信号的频率特性曲线在信号持续时间内是单值的,即要求信号的扫频特性单调。就这种处理方法而言,信号的扫频特性可以是不单调的。当扫频特性不单调时,意味着扫频频率有重复的地方,采样时可以不采样频率重复的段,且可以证明这样作不损失系统的分辨力,分辨力仍只取决于扫频带宽。

3 应用实例

本文提出的方法可以用来补偿线性调频系统中的扫频非线性问题。脉冲压缩雷达中广泛采用线性调频波,但信号源作不到绝对的线性调频,只能达到一定的线性度,这使系统的分辨力降低。若已知这种信号源的扫频特性曲线,就可以用上述方法进行补偿。图 2 是一个计算机仿真的例子,但系统中的各参数是某实际系统中使用的。

图 2(a) 是未补偿的两个目标的结果,图 2(b) 是按本方法处理得出的结果。可见本方法确实取得了良好的效果。

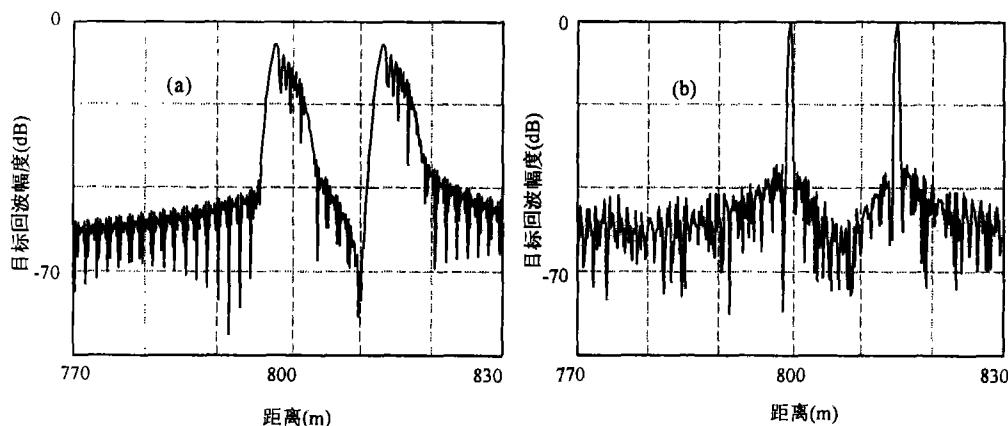


图 2 线性调频系统仿真结果

4 结 论

本文提出了一种匹配滤波处理方法。用这种方法对大时宽带宽积的调频信号进行匹配滤波,可以降低系统对硬、软件的处理要求,具有很好的实用价值。

需要注意的是,在(5)式中所作的近似在距离很远且调频信号相位的二次导数与一次导数可比拟时会引起误差。若要减小误差,仍可根据前面的讨论,采用稍复杂的方法予以解决。

参 考 文 献

- [1] M. I. Skolnik, Radar Handbook, McGRAW-HILL Publishing Company, 1990, 10.6-10.15.
- [2] 宋景唯, 线性度对线性调频雷达距离分辨力的影响, 电子科技大学学报, 1992, 21(2), 121-126.
- [3] 扬丛笑, 阎自让, 发射机非线性失真对脉冲压缩雷达的影响, 火控雷达技术, 1999, 28(2), 16-22.

A MATCHED FILTERING METHOD FOR FREQUENCY MODULATED CONTINUOUS WAVE

Lu Xudong Wang Zhenrong Xue Minghua

(Dept. of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Frequency Modulated Continuous Wave(FM-CW) is widely used in pulse compression radars and the matched filtering technique is its main processing method. But for large time-band production systems and arbitrary FM-CW, how to design a matched filter is a difficult task. This paper proposes a general matched filtering processing method, which avoids the difficulty of designing matched filter and has practical applications.

Key words Matched filter, Pulse compression radar, FM-CW

鲁旭东: 男, 1970 年生, 硕士生, 微波成像, 散射、辐射测量。
王振荣: 男, 1941 年生, 研究员, 微波成像, 散射、辐射测量。
薛明华: 男, 1953 年生, 高工, 微波成像, 散射、辐射测量。