

一种新体制雷达合成宽带可行性分析

贺志毅, 郝祖全, 汤 斌

(航天科工集团二院二十五所, 北京 100854)

摘 要: 本文分析阐述了利用脉内调频、脉间跳频技术获取距离高分辨一维成像的可行性, 导出了静止目标和运动目标的回波表达式。根据线性调频子脉冲的回波表达式, 详细分析了运动目标回波对信号处理器采样位置的要求。

关键词: 线性调频; 合成宽带; 脉冲压缩; 距离高分辨; 雷达

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0942-04

The Feasibility Study on Synthetic Wideband of a New Type Radar and The Choice Principle of Sample Points

HE Zhiyi, HAO Zuquan, TANG Bin

(No. 25 Institute of No. 2 Research academy of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: This paper analyzes the technology with intrapulse chirp and interpulse stepped frequency to obtain high-resolution range profile. The echo expressions of static and moving targets are derived. According to the echo expression of chirp subpulse signal, the sampling position requirements of signal processor are discussed.

Key words: linear FM; synthetic wideband; pulse compression; high range resolution; radar

1 引言

合成宽带雷达采用脉内调频、脉间跳频技术来获取目标的距离高分辨一维图像, 它首先在接收机中实现线性调频信号的脉冲压缩得到中等分辨力的距离回波, 然后将中等分辨力距离回波经过 I、Q 正交双通道转换为视频信号送入信号处理, 信号处理器采集存储 N 个步进跳频发射脉冲的回波信号, 通过逆傅立叶 (IDFT) 合成宽带算法获取距离高分辨一维距离图。将步进跳频和脉冲压缩技术融合在一起实现距离高分辨是一种新体制雷达的探索。

脉内调频、脉间步进跳频信号通过合理选择以满足雷达探测距离要求及距离分辨力要求, 但脉内调频、脉间步进跳频信号是否保留目标回波信号的相位信息, 该信息是否与步进跳频信号不同, 本文针对静止目标和运动目标回波进行了分析。同时运动目标回波引起脉间的回波移位, 理想脉压包络产生时移, 要保证脉间同一目标点运动回波信号的幅度具有较小的失真, 需要合理设计信号处理器的采样时刻。

2 回波信号特性分析

设雷达发射的线性调频子脉冲 (chirp) 信号的归一化包络为:

$$u(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) e^{j2\pi K t^2} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) = \begin{cases} 1, & -\frac{T_1}{2} \leq t \leq \frac{T_1}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

T_1 为脉冲宽度, K 为线性调频信号调频斜率。

其模糊函数^[2]为:

$$V(S, f_d) = \int_{-T_1/2}^{T_1/2} u(t) u^*(t - S) e^{j2\pi f_d t} dt \\ = \begin{cases} T_1 e^{j\pi[(f_d + KS)(T_1 + S) - KS^2]} \left(1 - \frac{|S|}{T_1}\right) & |S| \leq T_1 \\ \frac{\sin[\pi(KS + f_d)(T_1 - |S|)]}{\pi(KS + f_d)(T_1 - |S|)}, & |S| \leq T_1 \\ 1, & |S| > T_1 \end{cases} \quad (2)$$

其模糊图呈倾斜刀型, 该模糊函数经过简单的变换可以表示为:

$$V(S, f_d) = \int_{-T_1/2}^{T_1/2} u(t) u^*(t - S) e^{j2\pi f_d t} dt = \int_{-T_1/2}^{T_1/2} [u(t) e^{j2\pi f_d t}] u^* \# [- (S - t)] dt = u(S) e^{j2\pi f_d S} u^*(-S) \quad (3)$$

式中*号表示卷积, 从式中可见模糊函数表达了线性调频信号匹配滤波的全景输出。

2.1 线性调频子脉冲对静止目标的回波特性

当雷达发射一串载频跳变的 chirp 脉冲时, 第 i 个发射脉冲的回波表达式可表示为:

$$u(t) = \text{rect}\left(\frac{t - iT_r - S}{T_1}\right) e^{j\pi K(t - iT_r - S)^2} e^{j2\pi f_i(t - iT_r - S)} \quad (4)$$

式中 S 为双程延迟时间, 经匹配滤波(脉冲压缩)后, 由模糊函数表达式令 $f_d = 0$, 可以得到静止点目标的回波表达式:

$$y(t) = e^{-j2f_i S} \text{rect}\left(\frac{t}{2T_1}\right) e^{jKSt} (T_1 - |t|) \frac{\sin[PKt(T_1 - |t|)]}{PKt(T_1 - |t|)} \quad (5)$$

式中 $t = t - iT - S$, 可见匹配滤波后的输出信号落在 $[iT + S - T_1, iT + S + T_1]$ 之间。

对于延续目标 $A(t)$, 假定它由多个距离维的散射中心所构成, 其冲击响应回波可以近似表示为:

$$A(t) = \sum_m A_m \delta(t - S_m) \quad (6)$$

式中 m 为散射点数, A_m 为第 m 个散射点的幅度, S_m 为第 m 个散射点的双程延迟时间, 延续目标的系统输出响应为:

$$y_d(t) = \sum_m A_m e^{-j2f_i S_m} \text{rect}\left(\frac{t - S_m}{2T_1}\right) e^{jKt_m T_1} (T_1 - |t - S_m|) \frac{\sin[HKt_m(T_1 - |t - S_m|)]}{HKt_m(T_1 - |t - S_m|)} \quad (7)$$

式中 $t_m = t - iT - S_m$, 上式表明延续目标的系统输出可近似为多散射点输出相干叠加的结果, 各个散射点的有用相位信息均包含在 $e^{-j2f_i S_m}$ 中, 而目标的幅度信息包含在 sinc 函数之中。对上述系统输出响应进行采样难以保证采样点 $t_s = iT + S_m$, 因此一些散射点的采样值将受到 sinc 函数的加权, 权值的大小与采样点的位置有关。

2.1.2 性调频子脉冲对运动目标的回波特性

对于静止目标, chirp 子脉冲的回波经脉压后能够获取与步进跳频信号完全相同的严格线性相位关系, 保证了回波信号能够通过合成宽带处理的方法来获取距离高分辨力。

对于匀速运动目标, 各个发射脉冲回波的双程延迟时间为时变的, 回波延迟时间可表示为:

$$S(t) = \frac{2R}{c} - \frac{2V_t}{c} t \quad (8)$$

式中 c 为光速, V_t 为目标与雷达间的相对速度。以第一个发射的步进跳频脉冲的 $-T_1/2$ 为计时起点, 则第 i 个发射脉冲的起始时刻为 $iT - T_1/2$ 。这时单位幅度点目标的第 i 个发射脉冲的回波经脉压处理后可得输出为:

$$y(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{2T_1}\right) (T_1 - |t|) \frac{\sin[P(Kt + f_{di})(T_1 - |t|)]}{P(Kt + f_{di})(T_1 - |t|)} \# e^{-j2f_i \frac{2R}{c}} \# e^{j2f_i \frac{2R}{c}} \# e^{jP[(Kt + f_{di})(T_1 - |t|) - Kt^2]} \quad (9)$$

式中 $f_{di} = f_i(2V_t/c) = (2V_t/K)$, f_i 为第 i 个跳频点的载波频率, $t = t - iT - (2R/c) + (2V_t/c)t$ 。由于目标运动及脉压处理所引入的附加相位项为 $e^{jP[(Kt + f_{di})(T_1 - |t|) - Kt^2]}$ 。从上式可见, 脉压输出类似于 sinc 函数包络, 其峰值点位于 $t = -f_{di}/K = -(f_{di}/B)T_1$ 处, 函数包络的最大时宽为 $2T_1$, 分辨力约为 $1/B$, 目标回波包络幅度大于 -4dB 的区间为 $[t - \frac{1}{2B}, t + \frac{1}{2B}]$ 。当回波采样点的选取确保在回波包络幅度大于 -4dB 的

区间时, 引起的回波相位项变化为 $e^{jP[(Kt + f_{di})(T_1 - |t|) - Kt^2]}$ 可

见采样时刻 t 的选择, 不仅影响回波的幅度, 而且也影响相位。

当对每个回波的采样时刻为 $t = t_s = iT + (2R/c)$ 时, $t = (2V_t/c)t$, 脉冲回波采样所引起的偏移时间为 $(2V_t/c)t$, 从而可以得到各跳频点由于运动和脉压所产生的相位变化量为 $P[(KT_1 + f_{di})t + f_{di}T_1]$, 式中 f_{di} 为中心频点所对应的多普勒频率, 在跳频带宽较小而载频又很高的条件下, 可以认为 N 个跳频点所对应的多普勒频率近似相等。式中常数相位项 $f_{di}T_1$ 对合成宽带处理没有贡献, 可以忽略, 而 $P(KT_1 + f_{di})t = P(KT_1 + f_{di})(2V_t/c)t$ 为线性相位项, 该项将造成合成宽带处理结果距离像的移位。

3 运动目标回波采样点位置的选取

当每个发射脉冲的回波采样点固定不变时, 会引起脉间回波信号相位的线性偏移。目标的不断运动而回波采样点在各个回波的位置保持不变也会造成信号采样幅度的加权效应, 根据式(9), 回波信号的幅度包络具有 sinc 函数的形式。如果脉压信号的带宽 $B = KT_1$ 较大, 即脉压信号的距离分辨力 $1/B$ 较高, 当雷达与目标间高速运动时, 在一个合成宽带的 N 个跳频点内, 则会出现雷达与目标间的最大距离变化量 $NV_t T > 1/B$, 这时发生目标回波移出采样点的现象, 这时合成宽带处理不仅会出现较大的信噪比损失, 而且也会引起合成距离分辨力的降低。

由式(9)可知, 目标的真实位置因多普勒效应而产生了耦合时移, 因此运动目标回波输出信号的峰值幅度位置为:

$$t = -f_{di}/K = t - iT - \frac{2R}{c} + \frac{2V_t}{c} iT \quad (10)$$

从而可以得到目标的真正峰值位置为:

$$t = iT + \frac{2R}{c} - \frac{2V_t}{c} iT - \frac{f_{di}}{B} T_1 \quad (11)$$

如果保证每个回波信号的采样值均能采到回波信号的峰值幅度, 需要保证采样时刻为 $t_s = iT + (2R/c) - (2V_t/c)t - (f_{di}/B)T_1$, 这样脉间采样点移动大小可由雷达与目标间的速度决定。要保证脉间精确的移位, 一方面要设法得到雷达与目标间的相对速度, 另一方面信号处理的软硬件设计要支撑这种处理。如信号处理采用定点采样, 即保证第 i 个目标采样的起始时刻为 $t_s = iT + \frac{2R}{c} - \frac{f_{di}}{B} T_1$, 那么 N 个回波信号的采样将会引入两方面的误差。一方面目标运动及脉压处理所引入的附加相位项为 $e^{jP[f_{di}t]}$, 这一误差很小可以忽略不计; 另一方面定点采样将会引入回波信号采样的幅度调制。当第 i 个目标采样的起始时刻为 $t_s = iT + (2R/c) - (f_{di}/B)T_1$ 时, 将 $t = t_s$ 代入式(10), 有 $t = t_s - iT - \frac{2R}{c} - \frac{2V_t}{c} iT = \frac{2V_t}{c} iT - \frac{f_{di}}{B} T_1$, 将 t 代入公式(9)可以得到第 i 个点的幅度值。假定雷达与目标速度为 V_t , 脉冲重复周期为 $T = 150\mu\text{s}$, 脉冲宽度为 $T_1 = 10\mu\text{s}$, 起始载频为 $f_0 = 35\text{GHz}$, 跳频间隔为 $\Delta f = 12\text{MHz}$, 跳频点数为 $N = 16$ 点, 经过计算可以得到 $V_t = 4\text{km/s}$, $V_t = 2\text{km/s}$, $V_t = 1\text{km/s}$ 时, 各采样点所得到的同一目标回波幅度值如图 1 所示:

从图中可见各个采样点受到了式(9)中 sinc 函数包络加

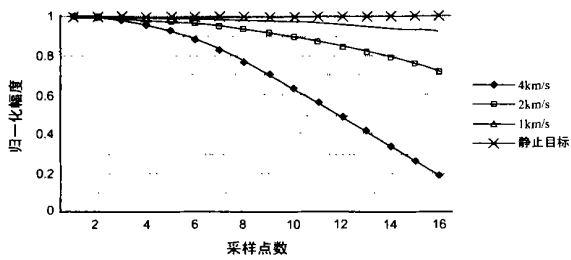


图1 脉间采样点固定时采样幅度与速度间关系

权的大小,对于静止目标, N 个脉冲回波的采样点处于 $t_s = iT + \frac{2R}{c}$ 位置,则采到目标回波信号的 N 个峰值点。当 N 个采样点偏离 $t_s = iT + \frac{2R}{c}$ 位置为固定值且处于 sinc 函数包络范围内时,采到的 N 个幅度值保持不变,但幅度值受到 sinc 函数包络的加权。对于运动目标,每个回波信号的采样时间位置不变,由于目标移动,造成回波脉压后回波包络的移动,从而引起各个采样点采到的回波幅度不同。雷达与目标速度越大,回波采样点所受到的 sinc 函数包络幅度加权也就越大,从图中可见当目标速度为 4km/s 时,如果第一个回波采样点采到最大值,那么第十六个回波采样点的幅度将会小于 0.2 倍的最大幅度,这么大的幅度加权,将会造成合成距离象性能下降。

如果认为雷达与目标速度为 2km/s 时,在 N 个回波采样中引起的 sinc 函数幅度加权是处于允许的临界状态,那么雷达与目标速度大于 2km/s 则需要进行补偿。当雷达与目标速度大于 2km/s 时,具体的补偿办法为在前 $N/2$ 个采样点采样时刻为 $t_s = iT + (2R/c) - (f_{di}/B)T$ 保持不变,对后 $N/2$ 个点进行的补偿运算为采样点延时 NV_iT/c ,即后 $N/2$ 个点的采样时刻为 $t_s = iT + (2R/c) - (f_{di}/B)T - NV_iT/c$ 。当雷达与目标速度大于 2km/s 时,后 $N/2$ 个点进行补偿得到幅度加权特性如图 2 所示。

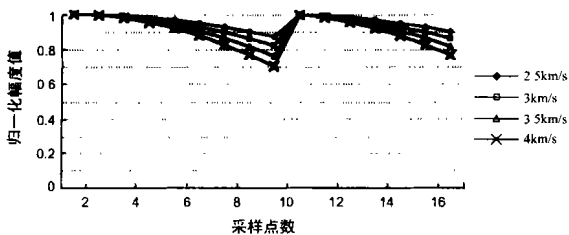


图2 脉间采样点分组移位时采样幅度与速度间关系

可见每过 $N/2$ 个发射周期采样点在时间上移动 NV_iT/c (在距离上移动 $NV_iT/2$),可以保证雷达与目标间相对速度为 4km/s 时,目标回波在所有 16 个采样点的幅度大于 0.7。

雷达与目标间的运动会引起点目标回波在脉间产生移动,因此需要根据运动情况来控制采样点的位置,脉间采样点的控制可分为三种情况,其位置关系示意如图 3。图中的箭头位置为各脉冲回波的采样点,(a)表示在一个合成宽带周期内(N 个脉冲),脉间采样点间隔为固定值情况。由于目标的运动,各个回波周期的采样幅度受到了 sinc 函数的加权。这种采样方式每 N 个回波周期为一个脉组,脉组间的采样点位置根

据雷达与目标间的速度而改变。(b)为脉间采样点根据雷达与目标的运动情况进行调整,保证回波信号的采样具有相同的幅度。(c)为一个脉组内分段延时采样的情况。

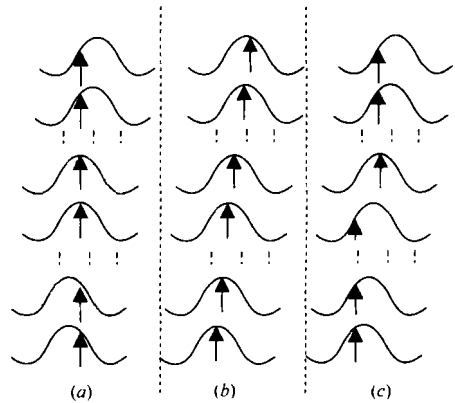


图3 三种采样方式示意图

图中示出了三种采样方式,在低速时可采用图(a)采样方式;在高速时可采用图(c)采样方式,当信号处理软硬件均能支持脉间精确移位时,也可采用图(b)的采样方式。

4 仿真及试验结果

目标的运动会影响合成宽带回波信号的一次相移和二次相移,一次相移引起合成宽带处理结果产生距离移位,二次相移影响分辨力和峰值幅度,图 4 给出在跳频间隔为 12MHz ,跳频点数为 16 条件下不同速度所造成的合成结果的失真。

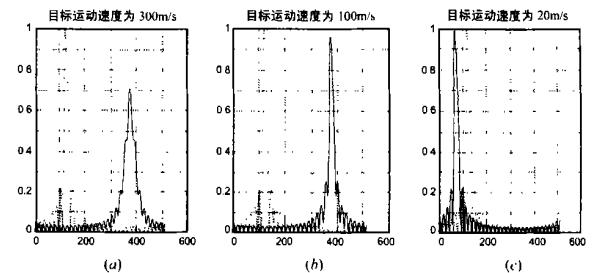


图4 运动速度与 IFFT 处理结果的关系

图 4 中(a)、(b)及(c)分别为速度为 300m/s 、 100m/s 和 20m/s 时,合成宽带处理后所得到的结果。

采用脉内调频、脉间跳频技术研制完成了雷达原理样机,该样机线性调频带宽为 24MHz ,跳频间隔 12MHz ,16 点跳频。在首都机场进行了地面跟踪试验,获取了大量的实测结果,图 5 为跟踪升空飞机时所获得的距离高分辨结果。

图 5(a)为波音 777 的实测数据处理结果,图 5(b)为麦道 82 的实测数据处理结果,从图中可清楚的看出波音 777 在距离维有多个强散射点存在,而麦道 82 飞机的强散射点只有一个,麦道 82 飞机的尾部发动机存在强反射,压制了其它散射点。

5 结论

脉内调频、脉间步进跳频信号,通过合成宽带处理获取距离高分辨一维成像信号,在理论上和技术途径上均是可行的。

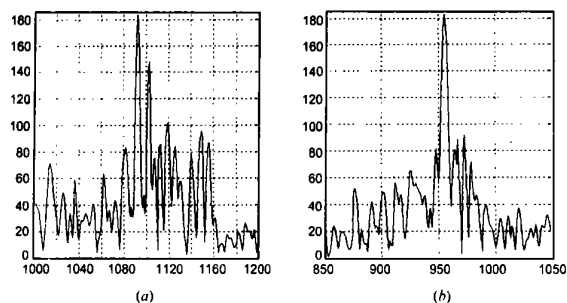


图 5 外场试验实测结果

对于高速运动的目标回波信号, 信号处理器需采取必要的措施来确保对回波信号的有效采样. 合理的设计雷达系统参数和信号处理器的软硬件设计, 能够保证系统满足实际工程的需要. 试验结果表明用该方法能够获得距离维高分辨力.

参考文献:

- [1] 郑学和. 高分辨力雷达导引头多维信息提取技术研究 [D]. 北京: 航天二院, 1998.
- [2] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [3] A W 里海捷克. 雷达分辨理论[M]. 董士嘉, 译. 北京: 科学出版社, 1973.

- [4] D R Wehner. High Resolution Radar [M]. US: Artch House, 1987.
- [5] 龙腾, 毛二可, 何佩琨. 调频步进频雷达信号分析与处理 [J]. 电子学报, 1998, 26(12): 84-88.
- [6] 贺志毅, 郝祖全, 朱淮城. 某雷达高距离分辨原理及其目标射频模拟 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 37-41.
- [7] 丁鹭飞, 张平, 等. 雷达系统 [M]. 西安: 国防工业出版社, 1980.

作者简介:



贺志毅 男, 1961 生于北京, 研究员, 博士, 主要研究方向为毫米波雷达系统, 主持负责了两个雷达工程项目的研制, 曾发表学术论文多篇.



郝祖全 男, 1937 生于四川, 研究员, 博导, 主要研究方向为航天雷达系统, 主持了多个航天雷达系统项目的研制.