

使用线性调频脉冲串信号的新雷达工作模式¹

汤振宇 王贞松

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 针对 LFM 信号高距离分辨率与宽带宽的矛盾, 本文提出了一种新的线性调频子脉冲串 (LFM burst) 信号雷达工作模式。在回波信号处理时, 对其先进行子脉冲内匹配压缩, 再对各个子脉冲进行脉冲间相参合成, 进一步提高雷达的距离分辨率。LFM burst 工作模式在不增加系统瞬时带宽的条件下, 可以成倍地提高雷达的距离分辨率; 相反如果雷达距离分辨率的要求不变, 则可以有效降低系统的瞬时带宽。本文提出并论证了 LFM burst 模式的工作原理, 分析了它带来的优点, 同时还对多目标回波和动目标多普勒特性进行了讨论。

关键词 线性调频子脉冲串, 匹配滤波, 相参合成, 距离分辨率, 系统带宽
中图分类号 TP951

1 引 言

现代雷达发展趋势很重要的一个方面是高距离分辨率。最常用的就是用线性调频 (LFM) 脉冲信号作为雷达发射信号^[1-5]。它的距离向分辨率是与信号带宽成反比的, 整个系统必须达到所期望的高分辨率所要求的宽带宽。这就带来了两个问题: 一方面带宽增宽, 使得进入系统的噪声功率增大; 另一方面, 宽带宽信号要求采样率的提高, 信号的数据率增大, 给实时处理带来困难。而且技术上的限制也使系统带宽难以进一步提高。针对这种情况, 又提出了以频率阶跃脉冲串信号作为雷达信号, 采用相参积累实波束驻留期内的回波信号获得距离向分辨率^[1,6]。频率阶跃的发射波形取消了对高瞬时带宽和对反射信号近似稳态采样的高采样速率要求。但是它要求脉冲数 n 很大, 这样使得脉冲重复周期 (PRI) 变小, 对应最大不模糊距离变小。如果雷达作用距离很长, 回波不能在一个 PRI 里收到, 将引起距离模糊。而且每一个脉冲的脉宽变窄, 由于发射机峰值功率的限制, 雷达发射能量将明显下降, 使雷达的距离作用范围变小。

为了解决上述矛盾, 我们提出了一种新的雷达工作模式: 线性调频脉冲串 (LFM burst)。它有效地解决了雷达高距离分辨率和宽带宽要求的矛盾。

2 LFM burst 工作模式的原理和优点

2.1 雷达的一般线性调频信号工作模式

雷达常用的信号形式是线性调频信号 (LFM), 用匹配滤波器对 LFM 信号实现脉冲压缩, 提高输出信噪比和距离分辨率^[1-5]。最后输出函数为 sinc 函数形式:

$$y(t) = Tw_0 \text{sinc}[\pi Bw_0(t - 2R/c)] \exp[j(-4\pi R/\lambda)], \quad (1)$$

其中, $Bw_0 = k_r Tw_0$ 是带宽。可见时间分辨率是 $1/Bw_0$, 距离分辨率是 $c/2Bw_0$ 。

¹ 1998-11-06 收到, 1999-03-13 定稿

国家自然科学基金 (NFNS, 69896250-2) 和星载合成孔径雷达项目资助

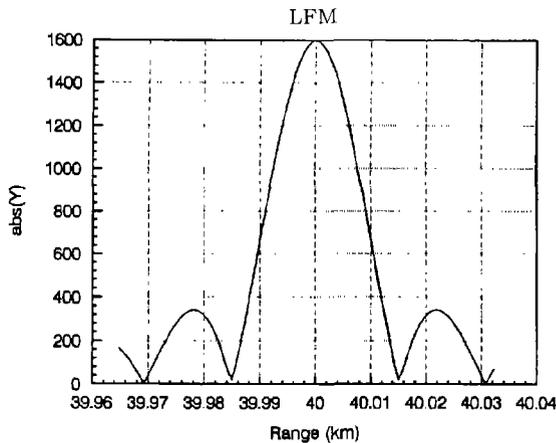


图 1

为了便于比较, 给出它的输出波形如图 1 所示。其参数为: 载频 $f_0 = 3\text{GHz}$ 、脉宽 $Tw_0 = 8\mu\text{s}$ 、带宽 $Bw_0 = 10\text{MHz}$ 、抽样率 $f_s = 200\text{MHz}$ 。做了 16384 点的 FFT。据理论计算得距离向时间分辨率 $t_r = 0.1\mu\text{s}$, 斜距分辨率 $\rho_r = 15\text{m}$, 与计算仿真结果相同。

为解决上述高距离分辨率和宽信号带宽的矛盾, 在线性调频信号模式和频率阶跃模式的基础上, 我们提出了一种新的雷达工作模式, 考虑用线性调频脉冲串 (LFM burst) 作为雷达发射信号。

2.2 LFM burst 工作模式的原理

线性调频脉冲串 (LFM burst) 工作模式的原理如下: 雷达在原来的一个脉冲重复周期 ($T_3 = 1/\text{PRF}_0$) 里把原来脉宽为 Tw , 带宽为 Bw 的 LFM 信号分为 n 个线性调频子脉冲发射, 第一次在脉宽 $T_1 = Tw/n$ 时间里发射线性调频信号: $x_0(t) = A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k_r t^2)]$, 带宽为 $\Delta f = f_1 - f_0 = k_r T_1$ 。这称之为一个 LFM 子脉冲。假设目标距离是 R , 延时是 $2R/c$ 。过了 $T_2 = 1/\text{PRF}$ 时间, 其中 $T_2 > 2R/c + \tau_r$, (τ_r 是回波持续时间), 再发射第二个 LFM 子脉冲。依此类推, 在原来的一个脉冲重复周期 ($T_3 = 1/\text{PRF}_0$) 里发射 n 次 LFM 子脉冲信号, 使得总脉宽 $Tw = nT_1$, 且每一次起始频率都是上次中止频率, 由于调频斜率相同, 这样就保证了总带宽 $Bw = n\Delta f$ 。它的发射和接收信号的时序关系如图 2(假设 $n = 2$)。其中图 2(a) 是发射信号时序, 图 2(b) 是接收信号时序。

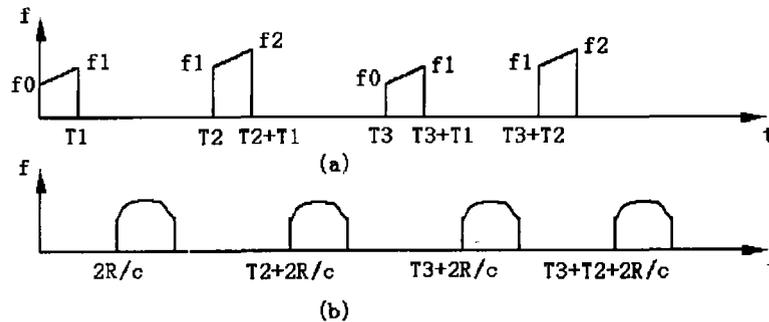


图 2

(a) 发射信号时序 (b) 接收信号时序

设雷达在原来一个脉冲重复周期 ($1/\text{PRF}_0$) 里第 i 次的发射信号为

$$x_i(t) = \exp[j(2\pi f_i t + \pi k_r t^2)], \quad iT_2 \leq t \leq iT_2 + T_1, \quad (2)$$

其中假设信号幅度为 1, $f_i = f_0 + i\Delta f$, $\Delta f = k_r T_1$, $i = 0 : (n-1)$ 。目标的回波延时是: $\tau(t) = 2(R - V_i t)/c$, 假设目标速度 $V_i = 0$ 。不失一般性, 可假定目标对雷达信号的散射系数

为 1。接收机对每个脉冲串的子脉冲回波都分别进行接收, 并通过混频滤波去掉载频 f_0 , 并对每个子脉冲用各自对应的匹配滤波器处理:

$$h_i(t) = \exp[j(2\pi i \Delta f t - \pi k_r t^2)], \quad (3)$$

则每个脉冲串的对输出波形为

$$y_i(t) = \frac{\sin[\pi k_r (T_1 - |t - 2R/c|)(t - 2R/c)]}{\pi k_r (t - 2R/c)} \exp\{j[2\pi i \Delta f (t - 2R/c) - 4\pi R/\lambda]\}. \quad (4)$$

将原来一个脉冲重复周期 ($1/\text{PRF}_0$) 里 n 次 LFM 回波都经各自对应的匹配滤波处理后, 再把它们进行子脉冲间相参合成处理^[3-5,7-9], 则

$$y(t) = \sum_{i=0}^{n-1} y_i(t) = \frac{\sin[\pi k_r (T_1 - |t - 2R/c|)(t - 2R/c)]}{\pi k_r (t - 2R/c)} \cdot \frac{\sin[\pi n \Delta f (t - 2R/c)]}{\sin[\pi \Delta f (t - 2R/c)]} \exp\{j[\pi(n-1)\Delta f (t - 2R/c) - 4\pi R/\lambda]\}. \quad (5)$$

对 (5) 式进行分析, 由于在 $|t| = 2R/c$ 附近, $|t - 2R/c| \ll T_1$, $\Delta f = k_r T_1$, 且 $Bw = n\Delta f$. 可近似认为:

$$y(t) = Tw \sin c[\pi Bw(t - 2R/c)] \exp\{j[\pi(n-1)\Delta f (t - 2R/c) - 4\pi R/\lambda]\}. \quad (6)$$

由最后输出的 (6) 式可以看出: LFM burst 工作模式的距离向时间分辨率可以达到 $t_r = 1/n\Delta f = 1/Bw$, 则距离分辨率 $\rho_r = c/(2n\Delta f) = c/(2Bw)$.

2.3 LFM burst 工作模式的优点——距离分辨率的提高

在 LFM burst 工作模式下, 如果雷达的 LFM burst 信号在每个脉冲串的子脉冲里, 发射脉冲宽度 T_1 与一般 LFM 的脉宽一样, $T_1 = Tw_0$, 且瞬时带宽是 $\Delta f = Bw_0$, 保持不变, 也与一般的 LFM 信号一样. 每个脉冲串的发射时间间隔 $T_2 = 1/\text{PRF} = 1/n \text{PRF}_0$, 相当于 PRF 比原来提高 n 倍. 由 (6) 式可知: 雷达最后可获得距离分辨率为 $\rho_r = c/(2n\Delta f) = c/2nBw_0$. 与 (1) 式结果比较, 可知雷达的距离分辨率提高了 n 倍. 也即: 雷达在保持瞬时带宽不变的情况下, 可以将距离分辨率提高 n 倍. 这是因为由 LFM burst 工作模式的原理, 可知 LFM burst 信号是先利用脉冲压缩原理, 对每个脉冲串的子脉冲的 LFM 信号进行脉冲内压缩, 然后利用各个脉冲串的子脉冲间的相位信息, 进行脉冲串的子脉冲间的相参合成, 进一步提高雷达的分辨率. 最后雷达图像的分辨率原则上可以提高 n 倍.

例如当脉冲串的数目 $n = 2$ 时, 最后输出波形如图 3(a) 所示. 其参数为: 每次发射脉宽 $T_1 = 8\mu\text{s}$ 、瞬时带宽 $\Delta f = 10\text{MHz}$ 、抽样率 $f_s = 200\text{MHz}$. 也做 16384 点 FFT. 理论算得距离向时间分辨率 $t_r = 0.05\mu\text{s}$, 斜距分辨率 $\rho_r = 7.5\text{m}$, 与计算仿真结果相同. 当脉冲串的数目 $n = 4$ 时, 所用参数与 $n = 2$ 时相同, 最后输出波形如图 3(b) 所示. 理论算得距离向时间分辨率 $t_r = 0.025\mu\text{s}$, 斜距分辨率 $\rho_r = 3.75\text{m}$, 与仿真结果相同.

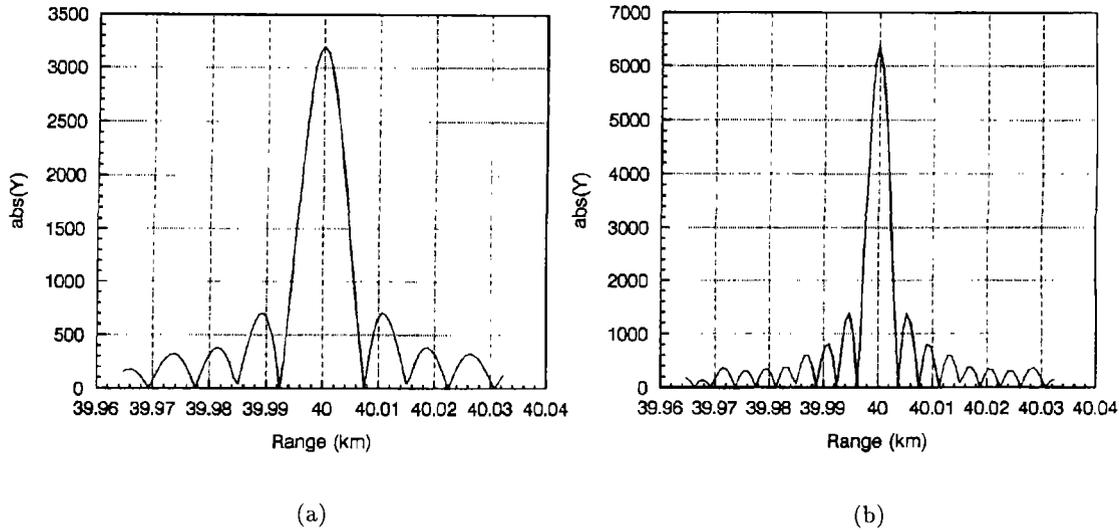


图 3

将图 3(a) 与图 1 比较, 可见距离分辨率提高了 2 倍。图 3(b) 与图 1 比较, 距离分辨率提高了 4 倍。可见在保持瞬时带宽 Δf 不变的情况下, LFM burst 工作模式可以将距离分辨率提高 n 倍。同时因为 $P_t T_1 = P_{av} T_2$, 如果要求雷达的平均发射功率 P_{av} 不变, 由于 $T_2 = 1/\text{PRF} = n/\text{PRF}_0$, 所以峰值功率 P_t 可降低为 $1/n$ 。又由于总脉宽 $T_w = n T_{w0}$, 通过信号处理后, 由 (6) 式可知: 输出信号功率比 LFM 模式下输出信号功率增加 n 倍。可见 LFM burst 最后输出信噪比与一般的 LFM 工作模式相同。而峰值功率 P_t 的降低能有效降低对雷达发射机和发射天线的峰值功率要求, 降低了对系统的要求。

2.4 LFM burst 工作模式的优点——降低系统瞬时带宽

在 LFM burst 工作模式下, 当 LFM burst 信号的总带宽 $B_w = B_{w0}$, 与一般 LFM 工作模式时信号的带宽相同, 而系统瞬时带宽为 $\Delta f = B_w/n = B_{w0}/n$ 时, 比较 (6) 式和 (1) 式可知, LFM burst 工作模式与一般 LFM 工作模式的距离分辨率相同, 但系统的瞬时带宽 Δf 降低为 $1/n$ 。

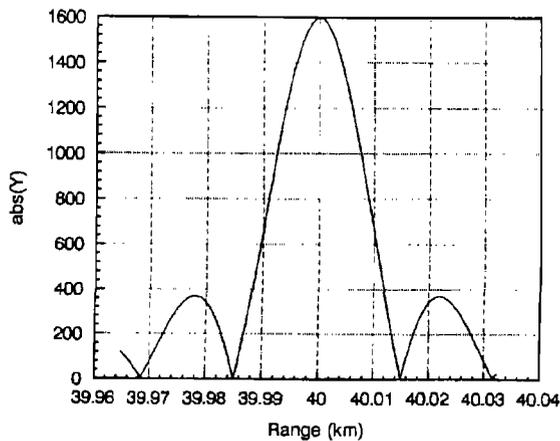


图 4

例如当脉冲串的数目 $n = 2$ 时, 最后输出波形如图 4 所示。其参数为: 总脉宽 $T_w = 8\mu\text{s}$ 、总带宽 $B_w = 10\text{MHz}$ 、每次发射脉宽 $T_1 = T_w/n = 4\mu\text{s}$ 、系统瞬时带宽 $\Delta f = B_w/n = 5\text{MHz}$ 、抽样率 $f_s = 200\text{MHz}$ 。同样做 16384 点 FFT。理论算得距离向时间分辨率 $t_r = 0.1\mu\text{s}$, 斜距分辨率 $\rho_r = 15\text{m}$, 与仿真结果相同。

比较图 1、图 4, 可见它们的距离分辨率都达到 $1/B_w$, 与一般的 LFM 工

作模式相同。但是 LFM burst 工作模式让系统的瞬时带宽 Δf 降为 Bw/n 。这样对发射机、接收机的瞬时带宽要求降低为 $1/n$ ，降低了对系统的要求。同时对接收信号的采样频率也可以降低 n 倍，数据率也降低为 $1/n$ ，更容易做到实时处理。(附注：例中的抽样率 f_s 保持不变是为了便于进行比较。) 更重要的是，接收机的热噪声功率随瞬时带宽减少也降低为 $1/n$ ，当 n 个脉冲串相参合成处理时，噪声是非相干叠加。而且 LFM burst 就是把原来一次发射的 LFM 信号分为 n 次发射，因为 $P_t T_1 = P_{av} T_2$ ，由于发射脉冲宽度 T_1 是原来脉宽的 $1/n$ ，每个脉冲串的发射时间间隔 $T_2 = 1/PRF = n/PRF_0$ ，相当于 PRF 比原来提高 n 倍。可见如果雷达的平均发射功率 P_{av} 不变，峰值功率 P_t 也不变。这样雷达的输出信噪比就能提高 n 倍。

3 多目标回波与信号处理

在 LFM burst 工作模式下，对于多目标的情况，则回波信号是由纵向距离为 $cT_1/2$ 内的多散射点的回波相干叠加形成^[1,6,8,9]。假设纵向距离单元 $cT_1/2$ 内共有 n 个散射中心，则第 i 个脉冲串信号的回波为

$$s_i(t) = \sum_{p=1}^n B_{ip} \exp\{j[2\pi f_i(t - 2R_p/c) + \pi k_r(t - 2R_p/c)^2]\}, \quad (7)$$

其中 B_{ip} 是第 p 个散射中心反射回波的幅度， R_p 是第 p 个散射中心的距离。对 (7) 式所示回波进行匹配滤波、相参合成处理时，由于各散射点的相位变化量不同，可以将不同高分辨单元的散射点分离开来，最后得到多目标的合成距离像。可知，为获得不失真的多散射点目标的一维距离像，每个脉冲串的子脉冲的持续时间 T_1 需要大于目标最大纵向长度 L 的回波延时，以使目标上的所有散射中心回波能够等权叠加，即要求 $cT_1/2 > L$ 。

图 5(a) 是在保持瞬时带宽不变的情况下，对 3 个点目标的模拟。其参数与图 3(a) 的相同。可见 LFM burst 工作模式在保持瞬时带宽不变的情况下，可以有效提高雷达距离分辨率。图 5(b) 是在保持雷达距离分辨率不变的情况下，对 3 个点目标的模拟，其参数与图 4 的相同。可见 LFM burst 工作模式在保持雷达距离分辨率不变的情况下，可以有效降低系统的瞬时带宽。

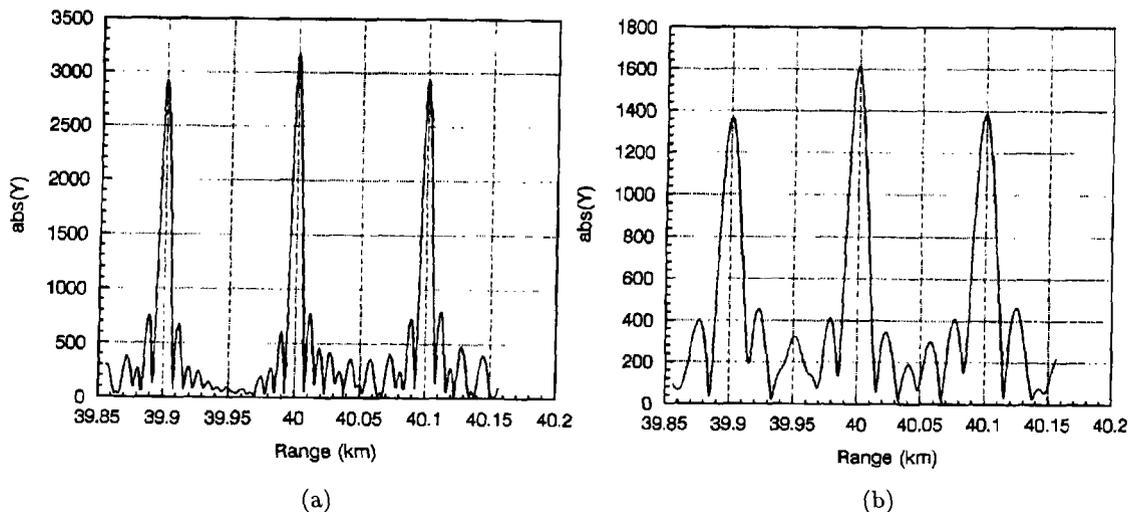


图 5

4 LFM burst 工作模式下动目标的多普勒特性

在 LFM burst 工作模式下, 考虑运动目标的情况. 假设目标速度是 V_t , 以第一个发射脉冲串的子脉冲为时间起点, 由于目标速度 V_t 远小于光速 c , 可以将回波包络出现的时刻近似为 $2R/c - 2V_t i T_2 / c$ ^[1,3,6,9], 则第 i 个脉冲串的目标回波经过混频、匹配滤波处理后, 结果为

$$y_i(t) = \frac{\sin[\pi k_r(T_1 - |t - 2R/c + 2V_t i T_2/c|)(t - 2R/c + 2V_t i T_2/c)]}{\pi k_r(t - 2R/c + 2V_t i T_2/c)} \times \exp\{j[2\pi i \Delta f(t - 2R/c) - 2\pi f_0 2R/c + 2\pi(f_0 + i \Delta f)2V_t i T_2/c]\}. \quad (8)$$

对 (8) 式进行分析, 其中 $f_{di} = (f_0 + i \Delta f)2V_t/c$ 是多普勒频移. 由于运动目标的多普勒效应, 脉压输出峰值不是出现在目标位置, 而是具有多普勒效应耦合的时间误差. 耦合时移为

$$\Delta \tau_i = f_{di}/k_r = [(f_0 + i \Delta f)/k_r](2V_t/c). \quad (9)$$

可见, 耦合时移对不同的脉冲串还是变化的, 这相当于对各个脉冲串的幅度非均匀加权, 所以最后脉压输出将偏离目标的真实距离.

另外, 对 (8) 式的相位进行分析, 其中第一项是脉间相参合成所需要有效相位变化, 第二项是常数, 所以主要考虑第三项的影响. 其中的 $2\pi f_0(2V_t/c)i T_2$ 是线性相位变化量, 将使目标合成像产生“距离游动”, 游动的高分辨距离单元数为 $2V_t f_0 n T_2 / c$. 当对回波进行速度补偿时, 若以距离游动不超过半个距离分辨单元为条件, 则补偿速度误差须满足:

$$V_t \leq c/(4f_0 n T_2). \quad (10)$$

而 $2\pi i \Delta f(2V_t/c)i T_2$ 是二次相位变化量, 将导致合成像的失真, 幅度下降和主瓣展宽. 设在相参处理间隔 $n T_2$ 内二次相位变化不超过 $\pi/2$ 为合成像不失真条件, 则目标速度 V_t 应满足:

$$V_t \leq c/(8n^2 \Delta f T_2). \quad (11)$$

(11) 式也可作为合成像不失真时补偿速度误差的要求. 由 (10) 式和 (11) 式可见, 在距离分辨率一定的情况下, 增大瞬时带宽 Δf , 减少相参处理脉冲个数 n 将有利于进行速度补偿.

在实际应用中, 对动目标的采样数据必须进行速度修正. 分析 (8) 式, 可见其幅度误差中由于 $(2V_t/c)i T_2 \ll (2R/c)$, 所以影响几乎可以忽略, 主要需要考虑的是对相位误差的补偿. 第 i 个脉冲串的速度修正因子为

$$\xi = \exp\{-j[2\pi(f_0 + i \Delta f)2\tilde{V}_t i T_2/c]\}, \quad (13)$$

其中 \tilde{V}_t 是对目标速度的估值. 经过速度修正后, 再对子脉冲进行匹配压缩, 结果为

$$y_i(t) = \frac{\sin[\pi k_r(T_1 - |t - 2R/c + 2V_t i T_2/c|)(t - 2R/c + 2V_t i T_2/c)]}{\pi k_r(t - 2R/c + 2V_t i T_2/c)} \times \exp\{j[2\pi i \Delta f(t - 2R/c) - 2\pi f_0 2R/c + 2\pi(f_0 + i \Delta f)(2(V_t - \tilde{V}_t)i T_2/c)]\}. \quad (14)$$

所以只要对目标速度能精确估计, 就能很好地消除相位误差. 最后对 n 个子脉冲进行脉冲间相参合成, 得到最后处理结果就与 (6) 式相同.

假设目标速度 $V_t = 200\text{m/s}$, 其余参数与图 3 所用参数相同。当对目标运动精确补偿后, 也即 $\hat{V}_t = V_t = 200\text{m/s}$, 结果与图 3 几乎完全相同, 旁瓣峰值比主瓣差 -13.10dB 。图 6(a) 是对目标速度估值相差 5% 时的压缩结果, 可见旁瓣峰值比主瓣差 -10.56dB 。图 6(b) 是对目标速度估值相差 -5% 时的压缩结果, 旁瓣峰值比主瓣差 -10.71dB 。而当对目标速度估值相差 10% 时, 旁瓣峰值比主瓣差 -8.25dB 。可见如果对目标速度估计有误差, 将引起最后压缩结果中旁瓣峰值的升高, 但压缩效果并不会发生改变, 也即 LFM burst 模式在考虑动目标多普勒特性时同样能正常工作。而且反过来, 可以将最后压缩结果中旁瓣峰值与主瓣的差值作为对目标速度估计的判断准则, 通过迭代法, 找到目标的真实速度, 实现更准确的补偿。

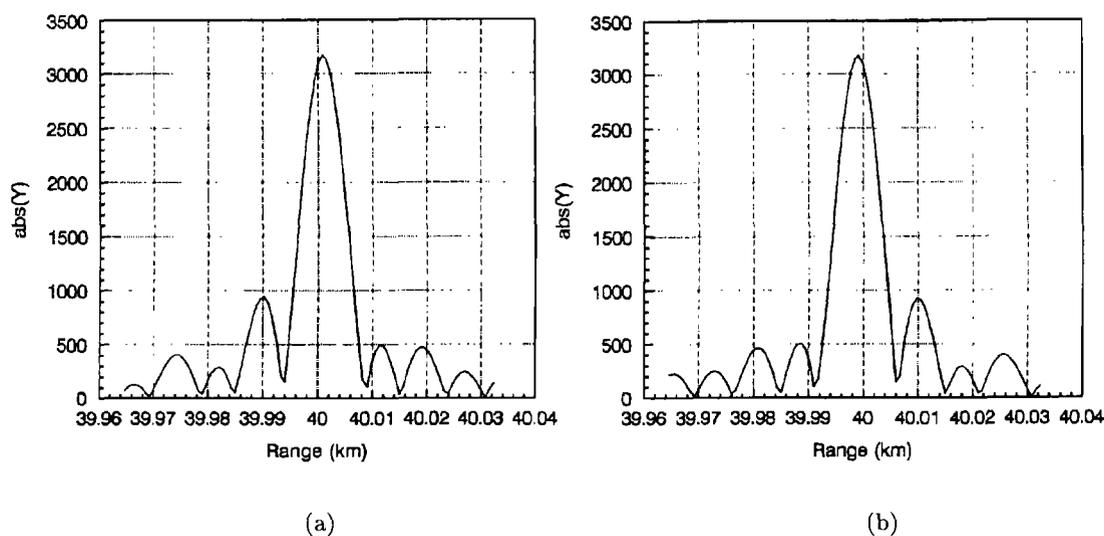


图 6

5 结束语

本文提出了对雷达信号的一种新的处理方法——线性调频子脉冲串 (LFM burst) 工作模式。它吸收了一般线性调频模式和频率阶跃脉冲串模式的优点, 同时克服了它们各自的缺点, 有效地解决了雷达距离分辨率和带宽的矛盾。理论和仿真结果都证明了这种新工作模式的有效性, 相信可应用于未来的雷达系统中。本文同时进一步深入地探讨了在 LFM burst 工作模式下, 多目标的回波特性和动目标多普勒特性, 提出了此模式下, 多目标信号处理与速度补偿等概念。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M I, Radar Handbook 2nd ed., New York: McGraw-Hill Inc. 1990, Chapter 21.
- [2] Mudukutore A S, Chandrasekar V, Keeler J J. Pulse compression for weather radars. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1998, GRS-36(1): 125-142.
- [3] Oppenheim A V. Application of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, Inc. 1978, 244-260.

- [4] Zhimin Zhang, Zhensong Wang. The Coded Transmitting Pulses and Range Ambiguity Reduction of Spaceborne SAR. *Microwave Remote Sensing for Earth Observarion*. Beijing: Science Press, 1995, 158-167.
- [5] Mitchell R L. *Radar Signal Simulation*. Dedham, Masschusetts: Artech House, 1976, 52-58.
- [6] Wehner D R. *High-Resolution Radar*. London: Artech House Boston. 1995, Chapter 5.
- [7] Dorey J, Garnier G, Auvray G. RIAS, Synthetic Impulse and Antenna Radar. *International Conference on Radar*, Paris: 1989, 556-562.
- [8] 张庆文, 保铮. 综合脉冲与孔径雷达时空三维匹配滤波及性能分析. *电子科学学刊*, 1994, 16(5): 481-489.
- [9] 郑学合, 阮文杰. chirp 子脉冲步进频率雷达信号的探讨. 北京宇航学会航天电子技术专业委员会第三届年会, 江西, 庐山: 1997. 9, 50-57.

A NEW OPERATION MODE OF RADAR WITH LFM BURST SIGNAL

Tang Zhenyu Wang Zhensong

(Institute of Ecletronics, Academia Sinica, 100080)

Abstract In order to overcome the conflicts between high range resolution and wide bandwidth of Linear Frequency Modulated (LFM) signal, a new operating mode of radar is suggested. The radar signal is a series of LFM signal-LFM burst. When the echoes return, every burst was compressed with matched filter first. Integration was accomplished later among these bursts to improve the range resolution. LFM burst mode can raise the radar range resolution several times without widening the system bandwidth. On the other hand, the system bandwidth can decrease greatly with the same range resolution. The paper not only brought out the operating theory of this new LFM burst mode, but also concluded its properties. Multi-objects echo and Doppler property of the moving objects are analyzed in detail as well.

Key words Linear frequency modulated burst, Matched filter, Integration of burst, Range resolution, System bandwidth

汤振宇: 男, 1973 年生, 硕士生, 研究方向包括: 数字信号处理、通信与遥感、雷达技术、合成孔径雷达技术.

王贞松: 男, 1945 年生, 研究员, 博士生导师, 从事专业为雷达成像系统、电波传播、通信与电子系统.