

LFM 脉冲雷达距离维快速搜索处理算法*

张 军, 占荣辉

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对脉冲雷达近距离目标遮挡问题, 从理论上分析了雷达最小作用距离不受限于脉冲宽度。在此基础上, 以 Chirp 脉冲为例, 提出了一种适合远近距离全程目标的快速搜索处理算法。该算法只需发射一种宽脉冲波形, 而不必根据距离的变化改变脉宽, 从而有效缩短了搜索时间, 大大提高了搜索效率。仿真结果表明了理论分析的正确性和算法的有效性。

关键词: 距离遮挡; Chirp 脉冲压缩; 快速搜索

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A

A Fast Range Search Algorithm for LFM Pulsed Radar

ZHANG Jun, ZHAN Rong-hui

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A common issue in pulsed radar is the eclipsing effect for near range target. Firstly, theoretical analysis is presented to show that the radar's minimum operating range is not subject to pulse width, and then by using Chirp pulse as an example, a fast search algorithm suitable for both near and far range target is proposed. Compared with conventional search algorithms, which need multiple search wave form to cover the entire range domain, the presented algorithm needs only one single search mode, and thus reducing search time. Finally, simulation results validate the correctness of the theoretical analysis and effectiveness of the processing algorithm.

Key words: range eclipse; chirp pulse compression; fast search

在很多功率受限的应用条件下, 雷达必须发射宽脉冲以保证足够的能量实现对远距目标的探测。如远程天基雷达, 其能量由太阳能电池板提供, 峰值功率有限; 又如弹载制导雷达, 由于弹径尺寸等因素的限制, 其发射功率也会比较有限。在这种情况下, 雷达需发射宽脉冲以提高平均发射功率。

很明显, 采用宽脉冲会带来这样两个问题: 首先, 会导致距离分辨率 ($\Delta R = c\tau/2$, 其中 c 为光速, τ 为脉宽) 下降, 不利于高分辨探测; 其次, 由于存在距离遮挡问题, 雷达的最小作用距离 ($R_{\min} = (T_r + \xi_s)c/2$, ξ_s 为收发开关转换时间, 一般可忽略) 变大^[1-4], 此时为了实现对远近距目标的全程探测, 必须改变发射波形, 相应地也就增加了搜索时间。

第一个问题(即作用距离和距离分辨率之间的矛盾)较容易解决, 采用宽带压缩波形(如线性调频 LFM 等)即可。本文主要侧重于第二个问题的解决, 文中针对应用较为广泛的 LFM 波形, 提出了一种对远近距全程范围内的目标进行快速搜索的数字信号处理新算法, 并给出了相应的理论分析和仿真实验结果。

1 遮挡条件下的距离方程

如图 1(a) 所示, 假设脉冲雷达发射的脉宽为 τ , 重复周期为 T_p , 则在热噪声环境、无遮挡条件下(图 1(b) 所示), 雷达作用距离 R 与信噪比 SNR 之间的关系满足^[5]

$$SNR = \frac{P_t \cdot \tau \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{R^4 \cdot (4\pi)^3 \cdot K \cdot T \cdot F \cdot L} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 航空科学基金资助项目(20070188012); 国家部委预研基金资助项目

作者简介: 张军(1973-), 男, 副教授, 博士。

式中, P_t 为发射脉冲峰值功率; G 为天线增益; λ 为信号波长; σ 为雷达目标散射截面积; K 为常数; T 为开尔文温度; F, L 分别为噪声系数和系统损耗。

显然, 当距离 $R < R_{\min}$ 时存在距离遮挡, 此时被遮挡的时间为 $\tau - 2R/c$ (图 1(c) 阴影部分所示), 剩余脉冲宽度 $\tau' = 2R/c$, 于是有

$$\begin{aligned} SNR' &= \frac{P_t \cdot \tau' \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{R^4 \cdot (4\pi)^3 \cdot K \cdot T \cdot F \cdot L} \\ &= \frac{2P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{R^3 \cdot (4\pi)^3 \cdot c \cdot K \cdot T \cdot F \cdot L} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)即为遮挡区内信噪比与距离的关系式, 可见此时接收机的信噪比仅与距离的 3 次方成反比。

2 LFM 回波采样与脉冲压缩

2.1 LFM 回波采样分析

LFM 脉冲雷达在每个重复周期内发射一个 Chirp 脉冲, 设脉冲重复周期为 T_p , 脉冲宽度为 τ 。定义 t_k 为以第 k 个周期开始时间 $t = kT_p$ 为起点的时间变量, 则第 k 个周期的发射信号可表示为

$$e_k(t_k) = \begin{cases} A \cos(\pi K t_k^2 + 2\pi f_0 t_k + \varphi_k), & 0 \leq t_k \leq \tau \\ 0, & \tau < t_k \leq T_p \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, \infty) \quad (3)$$

式中, f_0 为发射信号的频率, φ_k 为第 k 个周期的发射信号相位, A 为发射信号的幅度, K 为频率调制斜率。显然, 第 k 个发射脉冲信号的频率

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d(\pi K t_k^2 + 2\pi f_0 t_k + \varphi_k)}{dt_k} = f_0 + K t_k, \quad 0 \leq t_k \leq \tau \quad (4)$$

变化范围为 $[f_0, f_0 + K\tau]$, $B = K\tau$ 为调制带宽。

为方便分析, 先假定目标为点目标, 且与雷达之间相对静止。同时假定目标的距离 R 大于遮挡距离并小于雷达的最大作用距离, 即 $c\tau/2 < R < c(T_p - \tau)/2$ 。在此条件下, 每个周期经过时迟的目标回波仍然全部落在本周期内, 保证能对回波进行相参接收处理, 则第 k 个周期的回波信号可以表示为

$$r_k(t_k) = \begin{cases} U \cos[\pi K (t_k - 2R/c)^2 + 2\pi f_0 (t_k - 2R/c) + \varphi_k], & 2R/c \leq t_k \leq 2R/c + \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中, U 为回波信号的幅度。经过相参混频(抵消掉随机初始相位 φ_k), 放大后中频回波信号可以表示为

$$s_k(t_k) = \begin{cases} S \cos[\pi K (t_k - 2R/c)^2 + 2\pi f_l t_k - 2\pi f_0 2R/c], & 2R/c \leq t_k \leq 2R/c + \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中, S 为信号的幅度, f_l 表示中频频率, $f_l > B$ 。由于接收机噪声(记为 $\varepsilon_k(t_k)$)的存在, 实际的中频回波信号可记为

$$x_k(t_k) = s_k(t_k) + \varepsilon_k(t_k) \quad (7)$$

对信号 $x_k(t_k)$ 进行中频采样, 采样间隔为 Δt ($\Delta t \leq 1/B$); 且对于每个周期, 采样从 $t_k = \tau$ 时刻开始, 至 $t_k = T_p$ 结束, 则单个脉冲周期的采样点数为 $N = (T_p - \tau) / \Delta t$ 。

记 $n\tau = \tau / \Delta t$, 则实际得到的采样信号为

$$\{x_k(n) | n = n\tau, n\tau + 1, \dots, n\tau + N - 1; k = 0, 1, \dots\} \quad (8)$$

在搜索与粗跟踪模式中, 定义遮挡区采样信号的值为零, 即

$$\{x_k(n) = 0 | n = 0, 1, \dots, n\tau - 1\} \quad (9)$$

此外, 为方便 FFT 处理, 需使 $T_p / \Delta t = n\tau + N$ 等于或向上靠近 2 的整数次幂 N_F , 这可通过对采样信号补零处理来实现, 即

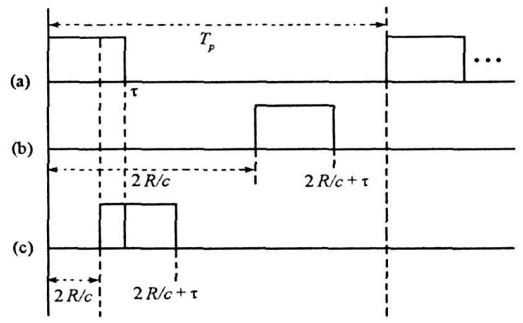


图 1 脉冲发射波形与回波表示

Fig. 1 Illustration of radar pulse and return

$$\{x_k(n) = 0 \mid n = n_\tau + N, \dots, N_F - 1\} \quad (10)$$

通过补零将输出采样信号延伸到遮挡区,其目的是实现遮挡区内、部分遮挡的目标信号的检测与定位,这是数字脉冲压缩信号处理灵活性的表现。

对于距离 $R \geq c\tau/2$ 的非遮挡目标,回波信号 $s_k(n)$ 经采样后占据的采样点数为

$$N_T = \tau/\Delta t \quad (11)$$

信号的实际起始点以及采样的起始点序号均为

$$nr = n'_T = \text{INT}[2R/(c\Delta t)] \quad (12)$$

目标回波信号对应的采样点集为 $\{s_k(n) \mid n \in [nr, nr + N_T - 1]\}$ 。将 $2R/c = nr\Delta t$ 、 $t_k = n\Delta t$ 代入式(6),得到采样后的目标回波信号为

$$s_k(n) = \begin{cases} S \cos(\pi K(\Delta t)^2(n - nr)^2 + 2\mathcal{F}_i n \Delta t - 2\mathcal{F}_o nr \Delta t), & nr \leq n \leq nr + N_T - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

对于距离 $R < c\tau/2$ 的遮挡区内目标,回波信号 $s_k(t_k)$ 经采样后所得样点数为

$$N'_T = 2R/(c\Delta t) < N_T = \tau/\Delta t \quad (14)$$

起始采样点序号 $n'_T = nr$, 实际起始点序号为 $nr = N'_T < nr$ 。采样后遮挡区内目标的回波信号可以表示为

$$s_k(n) = \begin{cases} S \cos(\pi K(\Delta t)^2(n - nr)^2 + 2\mathcal{F}_i n \Delta t - 2\mathcal{F}_o nr \Delta t), & nr \leq n \leq nr + N'_T - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

构造一个有效长度为 N_T 的复离散时间序列

$$h(n) = \begin{cases} \exp[-j\pi K(\Delta t)^2 n^2], & 0 \leq n \leq N_T - 1 \\ 0, & N_T \leq n \leq N_F - 1 \end{cases} \quad (16)$$

对 $h(n)$ 进行周期延拓后的序列 $h(n - m)$ ($0 \leq m \leq (T_p - \tau)/\Delta t - 1$) 定义为

$$h(n - m) = \begin{cases} \exp[-j\pi K(\Delta t)^2(n - m)^2], & m \leq n \leq N_T + m - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

即 $h(n - m)$ 由序列 $h(n)$ 右移 m 位,并在右边去掉 m 个零点、左边补充 m 个零点得到,有效长度仍为 N_T ,总长度为 N_F 。

2.2 LFM 数字脉压处理

下面分析如何利用序列 $h(n)$ 、 $x_k(n)$ 对每个周期的目标回波信号进行数字脉冲压缩处理。

由于目标的距离 R 未知,必须在 $0 \leq n \leq (T_p - \tau)/\Delta t$ 范围内对 nr 进行搜索,根据目标函数最大值处的 n 值对 nr 进行估计。计算

$$y_k(n) = \sum_{m=0}^{N_F-1} x_k(m) \exp(-j2\mathcal{F}_i m \Delta t) h(m - n), \quad 0 \leq n \leq (T_p - \tau)/\Delta t - 1 \quad (18)$$

式中, $x_k(m) \exp(-j2\mathcal{F}_i m \Delta t)$ 相当于数字零中频 I 、 Q 处理。先不考虑噪声序列 $\varepsilon_k(n)$ 的影响,则对于遮挡区外的目标,有

$$y_k(n) \approx \frac{N_T S}{2} \text{Sa}[\pi(n - nr)B\Delta t] \exp[-j\pi K(\Delta t)^2(n^2 - n_r^2) - j2\mathcal{F}_o nr \Delta t] \quad (19)$$

显然, $|y_k(n)|$ 在 $n = nr$ 时(即匹配滤波器 $h(n)$ 的延时与信号的延时一致时)取得最大值 $N_T S/2$ 。在噪声背景下,脉冲压缩的幅度和相位可能会受到影响,最大值点的位置也可能在 nr 附近发生移动,影响测距精度。

对于遮挡区内的目标,脉冲压缩后的峰值点依然出现在 $n = nr$ (而不是 $n = n'_T = nr$),即仍可以通过峰值点的序号估计目标的距离,但幅度降为 $N_T |S|/(2\rho)$ ($\rho = \tau/(2R/c) > 1$, τ/ρ 为脉冲回波未被遮挡的部分对应的的时间宽度)。由于近距情况下 $|S|$ 的增长比例远大于 ρ ,对信号检测没有影响,仍可以通过脉压结果进行距离与角度测量。

根据卷积定理,式(18)的时域卷积可以通过频域的乘积实现,即

$$y_k(n) = \text{IFFT}\{\text{FFT}[x_k(n) \exp(-j2\mathcal{F}_i n \Delta t)] \text{FFT}[h(n)]\} \quad (20)$$

上式共需进行 2 次 N_F 点 FFT 运算以及 1 次 N_F 点 IFFT 运算, 并根据 IFFT 的结果取前 $(T_p - \tau) / \Delta t$ 点为有效数据。

3 仿真与结果分析

(1) 仿真一: 遮挡区内外 SNR 随 R 的变化关系分析

设 $\tau = 100\mu\text{s}$, $\alpha_s = 5\text{ns}$, $f_0 = 35\text{GHz}$, $G = 35\text{dB}$, $\sigma = 10\text{m}^2$, $P_t = 100\text{W}$, $F = 6.5\text{dB}$, $L = 6\text{dB}$, $K = 1.38\text{e}10$, $T = 290\text{K}$ 。此时, $R_{\text{min}} = 15\text{km}$, 遮挡区内外信噪比可通过式 (1) 和式 (2) 计算得到, 结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 对于近距离目标, 尽管因为遮挡的影响导致部分能量损失, 但由于目标距离较近, 信噪比却是提高的(事实上, 当目标与雷达不断靠近时, 有效的脉冲宽度随距离 R 线性递减, 而回波功率却按 R 的 4 次方关系递增); 换句话说, 近距离目标虽然会受遮挡影响但却更容易满足检测要求, 这就打破了传统观点中的最小作用距离的约束: 即在理想条件下, 雷达的最小探测距离只受限于收/发开关转换时间(一般远小于脉冲宽度), 而不受限于脉冲宽度。

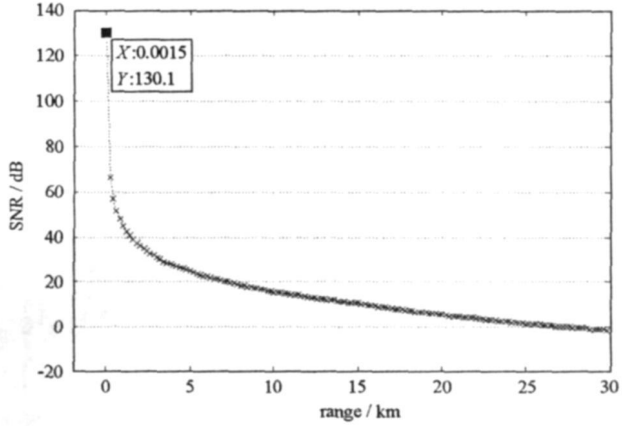


图 2 遮挡区内外目标距离与 SNR 之间的关系

Fig. 2 Range-SNR curve for target both in and outside eclipse region

(2) 仿真二: 遮挡区内外脉冲压缩结果比较

设 $S = 1$, $\tau = 100\mu\text{s}$, $B = 10\text{MHz}$, $\Delta t = 1/(3B)$ 。当 $R = 30\text{km}$ 时, 目标在遮挡区外, 脉冲压缩结果如图 3 所示。其他条件不变, 当 $R = 12\text{km}$ 时得到的结果如图 4 所示。

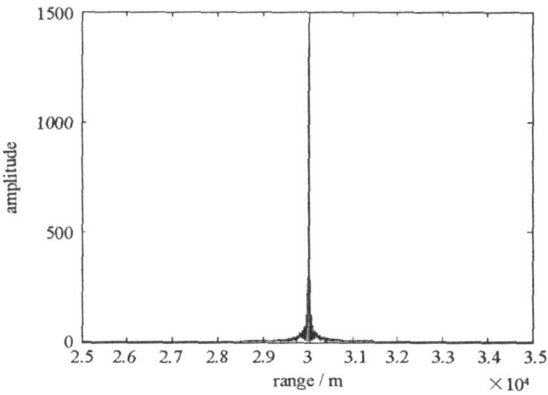


图 3 遮挡区外目标脉冲压缩幅度

Fig. 3 Amplitude of compressed pulse without range eclipse

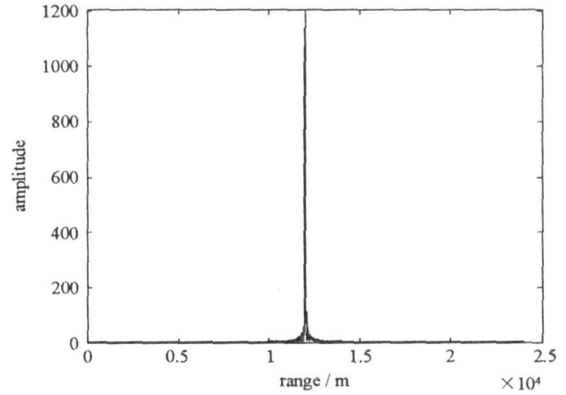


图 4 遮挡区内目标脉冲压缩幅度

Fig. 4 Amplitude of compressed pulse with range eclipse

由此可见, 在信号幅度相同的情况下, 与无遮挡情况相比, 遮挡区的目标回波经脉冲压缩后仍能在实际的距离处出现峰值, 只不过此时峰值的幅度比无遮挡目标有所下降。在本实例中, 两者幅度相比为

$$\frac{1500}{1200} = 1.25 = \frac{\tau}{2R/c} = \frac{100 \times 10^{-6}}{2 \times 12 \times 10^3 / (3 \times 10^8)} = \rho \quad (21)$$

这也验证了前文中理论分析的正确性。不过, 由图 2 中的结果可以清楚地看出, 随着距离的减小, SNR 实际上是提高的。这就说明, 在近距离段, 尽管由于脉冲遮挡的影响, 导致能量出现部分损失, 但同样满足检测要求。

参考文献:

- [1] Liu Z Q, Li G X, Li H M. Research on Cone Tooth Spherical Gear Transmission of Robot Flexible Joint[C]//ASME, 1990, 26(5): 56- 60.
- [2] Yang S C, Chen C K, Li K Y. A Geometric Model of a Spherical Gear with a Double Degree of Freedom[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002: 219- 224.
- [3] Yang S C. A Rack-cutter Surface Used to Generate a Spherical Gear with Discrete Ring-involute Teeth[C]//Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2005: 14- 20.
- [4] 潘存云. 渐开线球齿齿轮齿廓曲面方程的推导[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(4): 93- 98.
- [5] Litvin F L, Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory [M]. Cambridge University Press, 2004.
- [6] Liu C C, Tsay C B. Contact Characteristic of Beveloid Gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37: 333- 350.
- [7] Litvin F L, Fuentes A, Hayasaka K. Design, Manufacture, Stress Analysis, and Experimental Tests of Low-noise High Endurance Spiral Bevel Gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41: 83- 118.
- [8] Tsay C B. Helical Gears with Involute Shaped Teeth: Geometry, Computer Simulation, Tooth Contact Analysis, and Stress Analysis[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1998, 110: 482- 491.
- [9] Litvin F L, Fuentes A, Gonzalez-perez I, et al. Modified involute Helical Gears: Computerized Design, Simulation of Meshing and Stress Analysis [C]//Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2003: 3619- 3655.

(上接第 117 页)

由理论分析和仿真结论容易推知,对于功率确定的雷达,不管对于远距目标还是近距目标,只要发射的脉冲宽度满足远距离探测要求,也一定同时满足近距离遮挡区的目标探测要求。这就意味着,在雷达与目标逐渐接近的过程中,不需采用多种发射波形就能对远距、近距目标进行全程搜索,缩短了搜索时间,大大提高了搜索效率。

4 结束语

本文对近距离遮挡条件下雷达作用距离进行了分析,并导出了该条件下的距离方程,指出雷达的最小作用距离不受限于脉冲宽度。以此为理论基础,提出了一种适用于 LFM 脉冲雷达快速距离搜索的数字处理算法,并对其进行了计算机仿真。实验结果表明:尽管由于距离遮挡的影响,近距目标的回波会损失部分能量,但随着距离的减小,信噪比实际上是提高的;因此,无论是对于远距目标还是近距目标,只需发射一种波形即可完成对全程段的目标进行搜索,而不必根据距离的变化改变发射波形,大大提高了搜索速度。这就为制导武器系统赢得了宝贵的反应时间,对高速目标特别是机动目标的探测具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Barton D K. Radar Evaluation Handbook[M]. Boston: Artech House, 1991.
- [2] 王红,毕红葵,张尉. 脉冲雷达 R_{min} 范围内目标距离的确定[J]. 现代雷达, 2002, 24(1): 74- 76.
- [3] 陈勇,柯长海. 线性调频雷达最小作用距离范围内目标距离的测量[J]. 电子工程师, 2006, 32(8): 8- 9.
- [4] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [5] Mahafza B R, Elsherbeni A Z. Matlab Simulation for Radar System Design[M]. New York: Chapman & Hall/CRC Press LLC, 2004.