

文章编号:1001-2486(2001)01-0048-03

用相位梯度法校正超宽带雷达系统的相位误差*

朱国富,董臻,常文革,梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 线性调频(LFM)信号体制的超宽带雷达(UWBR)系统的相位误差,会影响雷达系统脉冲压缩的结果。本文提出的相位梯度(PG)算法,能够有效地估计系统相位误差,改善脉冲压缩的性能。

关键词 相位梯度(PG),脉冲压缩,线性调频(LFM)信号

中图分类号 TN957 **文献标识码** A

Phase Gradient Algorithm for Phase Error Correction of UWBR System

ZHU Guo-fu, DONG Zhen, CHANG Wen-ge, LIANG Dian-nong

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

Abstract The phase error of UWBR(Ultra WideBand Radar) system based on LFM signal, will affect the result of the pulse compression of the radar system. The phase gradient algorithm presented in this paper can estimate the phase error of the system effectively, and improve the performance of the pulse compression.

Key words phase gradient(PG); pulse compression; LFM signal

超宽带雷达的相对带宽远远大于常规窄带雷达,因此携带了更多的信息,非常有利于目标检测和识别。由于相对带宽很大,超宽带雷达系统的研制难度很高,系统会存在一定的误差。对于线性调频信号(LFM)体制的超宽带雷达,其系统误差,特别是系统相位误差,会对脉冲压缩的结果产生很大的影响。本文提出的相位梯度法(Phase Gradient, PG),能够比较准确地估计出系统相位误差,使脉冲压缩的性能得到显著改善。

1 相位误差对 LFM 信号脉冲压缩的影响

LFM 信号经过脉冲压缩能够提高分辨率,增强信噪比。LFM 信号脉冲压缩的结果为 Sinc 函数的形式,其分辨率(半功率宽度)为 $\frac{1}{kT}$ (k 为调频斜率, T 为信号时宽),峰值旁瓣为 -13.2 dB。

如果 LFM 信号存在相位误差,就会影响脉冲压缩的结果。固定相位误差对 LFM 信号的脉冲压缩没有影响,不做考虑。根据和时间的关系,相位误差可以分为一次相位误差,二次相位误差和高次相位误差。一次相位误差对应着回波延时的误差,会造成脉冲压缩波形位置的偏移,但不会影响脉冲压缩波形的形状。

二次相位误差使 LFM 信号的调频斜率发生改变,从而影响脉冲压缩的波形。二次相位误差主要会使脉冲压缩波形发生三个方面的改变(1)主瓣峰值减小(2)主瓣展宽,分辨率下降(3)峰值旁瓣电平升高。

高次相位误差可以用成对回波理论解释^[1]。三次相位误差将使脉冲压缩的右侧旁瓣电平增高,主瓣向左侧有一些展宽。四次相位误差主要使旁瓣电平增高,对主瓣影响较小。更高次的相位误差会使积分旁瓣电平增大,对主瓣的影响可以忽略不计。

* 收稿日期:2000-06-12
基金项目:国家部委基金项目资助(7.5.3.2)
作者简介:朱国富(1972-)男,博士生。

2 相位梯度法估计相位误差

相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)^[2,3]是一种无参数的自聚焦技术,主要用于由运动误差引起的 SAR 方位向的相位误差校正。但是相位梯度算法对于估计 LFM 信号的相位误差,也是非常有效的。本文将相位梯度算法用于估计 LFM 信号体制的超宽带雷达系统的相位误差,取得了很好的效果。

将收发天线相对摆放,超宽带雷达接收的直达波信号为

$$x(t) = |x(t)| \exp\{j[\varphi(t) + \phi_e(t)]\} \quad (1)$$

(1)式中 $|x(t)|$ 和 $\varphi(t)$ 分别为直达波的幅度和相位, $\phi_e(t)$ 为系统相位误差。对于理想系统, $\varphi(t)$ 的表达式是已知的。在(1)式右端乘以 $\exp[-j\varphi(t)]$,消除直达波相位 $\varphi(t)$,得到

$$y(t) = |x(t)| \exp[j\phi_e(t)] = |y(t)| \exp[j\phi_e(t)] \quad (2)$$

(2)式就是我们的相位误差模型。现在需要解决的是如何根据雷达数据求出相位误差 $\phi_e(t)$ 的估计 $\hat{\phi}_e(t)$ 。对(2)式求导,得到相位误差的导数 $\dot{\phi}_e(t)$:

$$\dot{\phi}_e(t) = \frac{\text{Im}[y^*(t)\dot{y}(t)]}{|y(t)|^2} \quad (3)$$

其中 $\text{Im}(c)$ 代表复数 c 的虚部, $*$ 代表共轭。(3)式在最小方差的意义上,是 $\phi_e(t)$ 的最优估计。可以证明,相位梯度实际上是 $\phi_e(t)$ 的线性无偏最小方差(LUMV)估计^[4]。

对 $\dot{\phi}_e(t)$ 积分,就可以得到相位误差的估计 $\hat{\phi}_e(t)$:

$$\hat{\phi}_e(t) = \int \dot{\phi}_e(t) dt \quad (4)$$

将直达波信号(1)式和 $\exp[-j\hat{\phi}_e(t)]$ 相乘,就可以消除估计的相位误差。

可以看出,相位梯度法校正超宽带 LFM 信号相位误差主要分为 4 步:

- (1) 从数据中消除 LFM 信号的相位,获得相位误差模型;
- (2) 用相位梯度法求出相位误差的导数;
- (3) 积分求出相位误差的估计;
- (4) 从数据中除去估计的相位误差。

重复相位误差的估计和消除过程,每次迭代,直达波信号的相位就更接近理想相位,相位误差也越来越小,算法趋向于收敛。当相位误差小于设定的门限值的时候,迭代终止。

3 实验结果

用相位梯度法估计超宽带雷达系统的相位误差的方法,在实际系统的应用中证明是十分有效的。雷达系统的信号为低频超宽带 LFM 信号,采用零中频正交解调接收方案,理想信号的表达式为 $s(t) = \exp(j\pi kt^2)$ 。为了减小各种射频干扰的影响,实验在微波暗室中进行。由于 LFM 信号的持续时间比较长,发射和接收采用独立的天线。为了准确提取系统本身的误差,尽量避免引入其它误差源,我们将收发天线相对摆放,测量雷达的直达波,而没有采取测量标准目标回波的方法。为了提高信噪比,减小系统噪声的影响,对信号接收做了脉冲积累, N 次脉冲积累能够改善信噪比 $10\log N$ (dB),实验中 $N = 64$ 。

为了验证算法的有效性,我们将相位校正以后的信号和理想信号做相关运算,用脉冲压缩的结果来评估相位校正的质量。图 1 是相位校正前的脉冲压缩结果,可以看出相位误差主要是三次误差,造成脉冲压缩右侧旁瓣电平增高,主瓣向左侧有一些展宽。图 2 是用相位梯度法经过 4 次迭代、相位校正后的脉冲压缩结果,从图可以看出,波形已经非常接近 Sinc 函数,相位校正的效果是非常明显的。

4 结束语

由于超宽带雷达的设计非常复杂,会使系统存在一定的误差,特别是相位误差,严重影响脉冲压缩的结果。本文提出的相位梯度法,能够比较准确地估计相位误差,消除相位误差的影响,提高超宽带雷

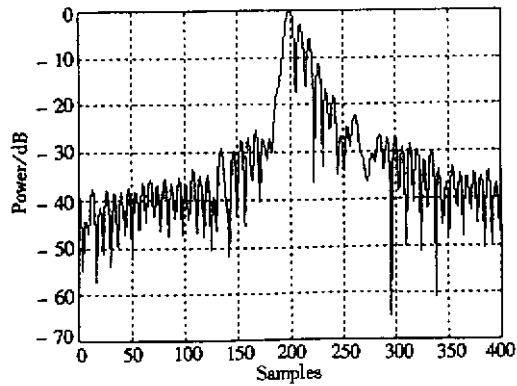


图 1 相位校正前结果

Fig. 1 Result before phase correction

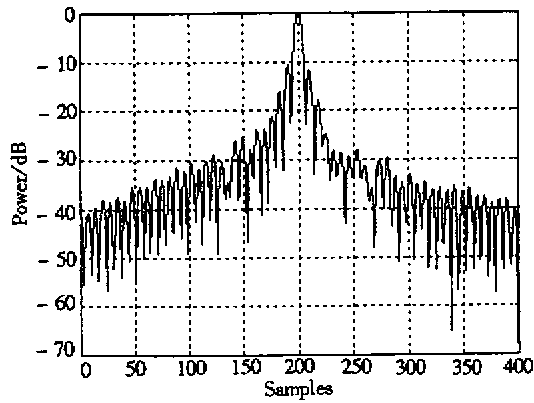


图 2 相位校正后结果

Fig. 2 Result after phase correction

达系统脉冲压缩的性能。

参考文献：

- [1] 张澄波 . 综合孔径雷达原理、系统分析与应用 [M]. 北京 科学出版社 ,1989 .
- [2] Eichel P H , Ghiglia D C , Jakowatz C V . Jr. Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correctior [J]. OPTICS LETTERS ,1989 , 14(1).
- [3] WAHL D E , EICHEL P H , GHIGLIA D C , JAKOWATA C V . JR. Phase Gradient Autofocus - A Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correctior [J]. IEEE TRANS. ON AES , 1994 , 30(3).
- [4] Eichel P H , Jakowata C V Jr. Phase-gradient algorithm as optimal estimation of the phase derivativ [J]. OPTICS LETTERS ,1989 ,14(20).

