

引用格式:刘明敬,陈建平.去斜调频步进信号合成原理及应用技术研究[J].电光与控制,2019,26(2):71-75. LIU M J, CHEN J P. Synthesizing of stretched chirp-step signal: theory and application techniques[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2): 71-75.

去斜调频步进信号合成原理及应用技术研究

刘明敬¹, 陈建平²

(1. 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2. 中兴通讯南京研究所, 南京 210013)

摘要:研究了去斜调频步进信号合成原理及其应用技术,分析了宽带去斜信号步进频合成原理,着重研究了该技术在应用中可能遇到的问题,借鉴 ISAR 成像原理与算法给出了残余相位补偿和系统跟踪误差补偿的解决方案,提出了系统参数设计约束和回波信噪比等系统设计的要求,梳理了去斜步进频合成处理流程。仿真分析表明,提出的算法和流程正确有效,解决了去斜调频步进信号合成从理论论证到实际应用的问题,可用于宽带/超宽带信号产生与处理。

关键词:雷达; 去斜调频步进信号; 系统参数设计; 系统误差补偿

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.015

Synthesizing of Stretched Chirp-Step Signal: Theory and Application Techniques

LIU Ming-jing¹, CHEN Jian-ping²

(1. Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China;
2. Nanjing Research Center of ZTE, Nanjing 210013, China)

Abstract: The theory and application techniques of the stretched chirp-step signal synthesizing are investigated, and the possible problems while applying this new technique to the radar system are studied thoroughly. The corresponding solutions to these problems are provided as well, including RVP compensation and system tracking error compensation. The design requirements of the system are also put forward, such as the design constraints of the system parameter and the echo SNR. On this basis, the processing procedure of stretched chirp-step signal synthesizing is presented. Simulation results demonstrate the efficiency and validity of the algorithm and the processing procedure. So the problems of how to apply the theory of this new technique are solved. This technique can also be used for the generating and processing of wideband/ultra-wideband signal.

Key words: radar; stretched chirp-step signal; system parameter design; system error compensation

0 引言

现代雷达为了获得更加丰富的目标信息,通常使用大带宽信号,线性调频信号和频率步进信号是两种常用的宽带信号。若对大带宽线性调频信号直接采样并脉压,对 A/D 采样率和信号处理单元的处理能力都提出了很高的要求,代价过于昂贵甚至无法实现。采用去斜技术可降低宽带系统对 A/D 采样率和信号处理的要求,但在大调频斜率和/或大距离观测窗口情况下,去斜后的采样速率仍太高^[1]。频率步进信号可在窄带系统上合成宽带,子信号通常采用单频率脉冲或

带宽较窄的线性调频信号,采用适当的信号处理算法实现合成距离高分辨^[2-12]。由于子脉冲带宽较窄,通常需要几十个甚至上百个脉冲才能合成需要的带宽,导致信号设计困难,出现对速度补偿的要求极高且等效数据率太低等问题。为解决去斜后系统采样率仍过高或因技术限制无法产生足够大带宽信号的问题,在去斜线性调频系统中引入频率步进的概念,等效于将同样带宽的信号持续时间延长并分次发射,然后通过信号处理的方式合成,用少数几个子脉冲合成足够大的带宽,且保持去斜后的系统采样率足够低,这就是本文要探讨的去斜调频步进合成技术。文献[13]提出了宽带调频步进信号的全去斜处理理论并进行了相应的仿真,但仅给出了频谱不重叠情况下静止目标的理论结果,未对实际应用中可能遇到的各类问题进行讨

收稿日期:2018-01-19

修回日期:2018-03-29

作者简介:刘明敬(1982—),女,湖南邵阳人,博士,高工,研究方向为雷达成像和目标识别等。

论;文献[14]提出了基于二维FFT的去斜调频步进雷达高分辨距离像合成方法和基于帧间脉冲多普勒的速度补偿方法,但计算复杂且需要利用多帧信号估计目标速度,不利于工程实现;文献[15]提出的方法和文献[13]原理一样,也仅考虑了频带不重合且目标静止的理想情况。本文在文献[13]的基础上,进一步深入阐述线性调频信号去斜处理技术原理及去斜信号的步进频合成原理,着重探讨去斜步进频在实际系统中应用可能遇到的问题,提出相应的解决方案,解决去斜调频步进信号从理论研究到实际应用的问题。

1 线性调频信号去斜处理技术^[1]

假设线性调频信号可表示为

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq 0.5 \\ 0 & |u| > 0.5 \end{cases}$; T_p 为信号脉宽; f_c 为中心频率; γ 为信号调频率。

设参考距离为 R_{ref} , 则参考信号为

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right)\right] \quad (2)$$

式中, T_{ref} 表示参考信号的脉宽, 比 T_p 大一些。

假设某目标到雷达的距离为 R_t , 雷达接收到的该目标的回波信号 $s_r(\hat{t}, t_m)$ 为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{2R_t}{c}}{T_p}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_t}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_t}{c}\right)^2\right)\right] \quad (3)$$

图1为去斜脉冲压缩的示意图,若令 $R_\Delta = R_t - R_{\text{ref}}$, 则去斜处理后的输出信号为

$$s_{if}(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{2R_t}{c}}{T_p}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)R_\Delta\right] \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c}R_\Delta\right) \cdot \exp\left(j\frac{4\pi\gamma}{c^2}R_\Delta^2\right) \quad (4)$$

设所需观测的范围为 $\left[R_{\text{ref}} - \frac{\Delta r}{2}, R_{\text{ref}} + \frac{\Delta r}{2}\right]$, 图1所示为范围两侧边缘处的回波。

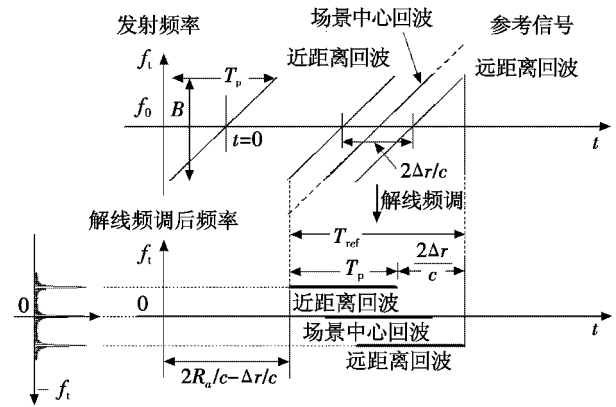


图1 去斜脉压示意图

Fig. 1 LFM signal stretching and pulse compressing

图1的下半部分为去斜后回波频率 f_i 的变化波形, 可见所有回波都变成单频脉冲信号, 脉宽仍为 T_p , 而载频值与 R_Δ 成正比, 由图可知, $f_i = -\gamma \frac{2R_\Delta}{c}$ 。因此, 对去斜后的信号做傅里叶变换, 便可在频域得到对应的各回波的 sinc 状的窄脉冲, 其分辨率为 $1/T_p$, 利用 $f_i = -\gamma \frac{2R_\Delta}{c}$ 可得距离分辨率为 $\frac{c}{2\gamma} \cdot \frac{1}{T_p} = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{B}$, 相应的时分辨率为 $1/B$, 这与匹配滤波脉冲压缩的结果一致。去斜后信号的频率范围为 $\left[-\frac{\Delta r}{c}\gamma, \frac{\Delta r}{c}\gamma\right]$, 即信号的最大频宽为 $\frac{2\Delta r}{c}\gamma = \frac{2\Delta r}{cT_p}B = \frac{\Delta r}{R_p}B$, 其中, R_p 为 T_p 所对应的距离。可见, 发射信号调频率越大, 观测距离窗越大, 去斜后的信号带宽越大, 要求的系统 A/D 采样率越高。

2 去斜调频步进信号合成原理^[13]

本节分析阐述如何将去斜处理推广到对调频步进信号的处理。假设调频步进信号的数学模型为

$$s_n(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_n t + \frac{1}{2}\gamma t^2\right)\right] \quad (5)$$

式中, $f_n = f_0 + (n-1)\Delta f$, f_0 为发射信号的载波起始频率, Δf 为频率步进量; $0 \leq [t - nT_r] \leq T_p$, $n = 1, \dots, N$, T_r 为线性调频信号的脉冲重复周期, 信号带宽为 γT_p , N 为步进脉冲的个数。

发射信号经与雷达距离为 R 处的点目标反射后的回波信号为

$$s_n(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_n(t-\tau) + \frac{1}{2}\gamma(t-\tau)^2\right)\right] \quad (6)$$

式中, $f_n = f_0 + (n-1)\Delta f$, $0 \leq [t - nT_r - \tau] \leq T_p$, $n = 1, \dots, N$, $\tau = 2R/c$ 对应目标距离时延。选取时延 $\tau_0 = 2R_0/c$, 时间宽度为 T_{ref} 的信号为去斜参考信号

$$s_{nr}(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_n(t-\tau_0) + \frac{1}{2}\gamma(t-\tau_0)^2\right)\right] \quad (7)$$

式中, $f_n = f_0 + (n-1)\Delta f$, $0 \leq [t - nT_p - \tau_0] \leq T_p$, $n = 1, \dots, N$ 。

经去斜处理并低通滤波后的信号为

$$S_{ndc}(t) = s_n(t) * s_{nr}(t) = \exp[j2\pi(f_n(\tau - \tau_0) + \frac{1}{2}\gamma(\tau_0^2 - \tau^2) + \gamma(\tau - \tau_0)t)] = \exp[j2\pi(f_0(\tau - \tau_0) + \frac{1}{2}\gamma(\tau_0^2 - \tau^2) + \gamma(\tau - \tau_0)(t + (n-1)\Delta f/\gamma))] \quad 0 \leq t \leq T_p, n = 1, \dots, N \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 步进脉冲串中后一个子脉冲的去斜回波比前一个子脉冲的去斜回波多了一个由 $\Delta f/\gamma$ 决定的时间偏置。选取合适的 Δf 和采样率 f_s , 满足 $T = \Delta f/\gamma$, 且 $f_s \cdot T$ 为整数, 这样后一个子脉冲的去斜回波相位与前一个子脉冲的去斜回波相位完全连续。将后一个脉冲的时域回波延迟 $T_{\text{delay}} = \Delta f/\gamma$, 相邻两个子脉冲的去斜回波能够在时域完整地连接起来, 实现相参积累, 等效于每一个点目标的回波得到了更长的观测时间, 傅里叶变换后频谱分辨率提高, 即距离分辨率提高了。照此方法可将所有子脉冲的去斜回波经时间延迟后在时域相参合成, 合成后信号总长度(采样点数)为 $f_s \cdot [T_p + (N-1) \cdot \Delta f/\gamma]$, 等效带宽为 $B + (n-1)\Delta f$ 。从理论上说, 本文方法的脉冲压缩结果不会出现栅瓣, 只要保证去斜参考信号和发射信号的频率稳定性和相位相参性, 即可从理论上保证相邻子脉冲去斜回波相位的连续, 这在实际系统中是不难做到的。

3 去斜调频步进信号合成应用技术

上一节阐述了宽带去斜步进频信号合成原理, 本节深入研究宽带去斜步进频信号合成技术在实际雷达系统应用中可能出现的问题及其解决办法。

3.1 去斜处理残余相位补偿

需要说明的是, 式(8)中的第2项和第3项(残余相位项, RVP), 在实际成像过程中必须进行补偿, 即将去斜后的频域响应进行时间对齐, 残余相位补偿的理论分析和公式推导可参见文献[1], 具体的补偿方法是将去斜后的信号进行 FFT 处理变换到频域后, 乘以补偿因子, 将残余相位去除, 再通过逆变换回到时域, 完成补偿。补偿因子为

$$S_c(f) = \exp[-j(\pi f_i^2/\gamma)] \quad (9)$$

因此, 宽带去斜后残余相位补偿和脉冲压缩处理流程如图 2^[1] 所示。

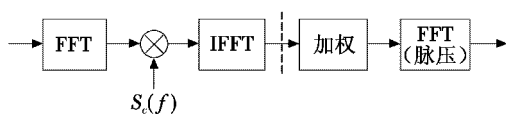


图2 去斜后残余相位补偿和脉冲压缩处理流程

Fig.2 RVP compensating and pulse compressing of stretched LFM signal

3.2 系统参数设计约束

宽带去斜步进频的系统参数主要有子信号带宽 B 、时宽 T_p , 去斜后采样率 f_s , 子脉冲个数 N , 频率步进量 Δf , 合成带宽 B_c 。由于子信号带宽 B 、时宽 T_p , 去斜后采样率 f_s 和合成带宽 B_c 容易确定, 因此设计约束主要体现在 Δf 的选择上。选取 Δf 有 3 种可能方案: 1) $\Delta f > B$, 将导致合成的时域信号不连续, 无法得到好的脉冲压缩结果; 2) $\Delta f = B$, 理论上这是最好的选择, 但在实际雷达系统中, 由于发射的子脉冲线性调频信号不可能是理想的矩形脉冲, 一般都会有一定的上升沿和下降沿, 这样会导致两个相邻脉冲在拼接时存在一个过渡带, 产生附加的幅度和相位误差, 从而对子脉冲相参合成的效果产生影响; 3) $\Delta f < B$, 此时必须满足 $\Delta f/\gamma \cdot f_s$ 为整数, 以保证时域信号在连接处的相位是连续的, 但如果直接将重合部分时域信号同相叠加, 将改变合成信号的时域幅度特性, 因此需要采用适当的信号拼接算法保证信号幅度相位的平稳。为了避免边缘区域信号的幅相误差, 可以考虑将每个子脉冲保留信号中间部分采样点进行拼接, 以获得最佳合成效果。综合考虑实际系统情况, 本文推荐选用第 3 种方案。

3.3 系统跟踪误差补偿

上述去斜步进频合成原理的推导基于以下两个前提: 1) 在一组步进频子脉冲中, 去斜参考信号的时延(距离)与目标中心的时延(距离)差保持不变, 以确保每个散射点在不同子脉冲回波中去斜后的单频信号频率一致; 2) 同一个散射点在不同子脉冲回波中去斜后的单频信号相位连续, 这是由去斜参考信号和发射信号的频率稳定性和相位相参性来保证的。在实际系统中, 后者通常可以做到, 但前者只有当目标静止时不难实现, 当目标运动时, 系统跟踪误差的存在导致二者之间的时延差在不同子脉冲之间变化, 于是同一个散射点在不同子脉冲去斜回波中的信号频率不一致, 无法实现相参积累。在有系统跟踪误差情况下, 为了使同一个散射点在不同子脉冲去斜回波中的信号频率一致且相位连续, 可借鉴 ISAR 成像中的运动补偿算法, 即首先对不同子脉冲去斜回波傅里叶变换后得到低分辨一维像, 对一组(帧内)一维像序列进行包络对齐和相位补偿处理, 将补偿后的一维像序列逆傅里叶变换回时域即可实现同一个散射点去斜回波的相参化处理, 具体的包络对齐和相位补偿算法可参见文献[1]。

3.4 系统信噪比要求

理论上说, N 个子脉冲回波的相参积累可提高最终合成的高分辨一维像的信噪比, 但由于系统跟踪误差的存在, 要求对低分辨一维像序列进行运动补偿处理, 此时要求低分辨一维像信噪比满足运动补偿算

法的要求。在 ISAR 成像处理中,为了保证运动补偿的精度,一般要求一维像信噪比不低于 20 dB,相应的在本系统中,低分辨一维像(脉压后)信噪比应不低于 20 dB。

3.5 去斜调频步进信号合成处理流程

由上述论述可得,实际系统中,去斜调频步进信号合成高分辨处理流程如图 3 所示。

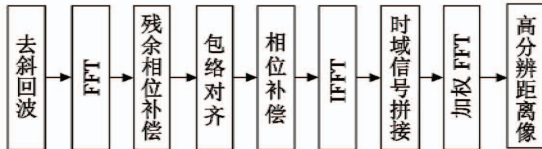


图 3 去斜调频步进信号合成高分辨处理流程

Fig. 3 Stretched chirp-step signal synthesizing process

4 仿真与分析

仿真目标由 5 个散射点组成,与采样波门中心的距离为 $[-3, -1, 0, 2, 5]$,单位 m,散射系数均为 1,所用的系统参数和目标运动参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数和目标运动参数

Table 1 Simulation parameters

载频/ GHz	带宽/ MHz	时宽/ μs	采样 率/ MHz	步进 量/ MHz	脉 冲 数	合成 带宽/ MHz	跟踪 误差/ m	速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
3.5	300	200	10	240	3	780	5	2000	10

按照本文提出的算法和流程进行仿真,分别采用包络相关法和多普勒中心跟踪法完成包络对齐和相位补偿处理,脉压时采用海明加权,得到的结果如图 4 和图 5 所示。其中:图 4a~图 4c 分别为 3 个子脉冲去斜回波幅度曲线,图 4d 为合成后去斜回波幅度曲线;图 5a 为第 1 个子脉冲对应的的低分辨一维距离像,图 5b 为无跟踪误差时的理想合成高分辨一维距离像,图 5c 和图 5d 分别为有 5 m 系统跟踪误差时,是否补偿跟踪误差的合成高分辨一维距离像,为显示清晰,图 5 均为目标区域局部放大图。由两图可见:1) 带宽合成后,不仅信号分辨率得到了提高,信号幅度也获得了相参积累的增益;2) 跟踪误差补偿处理可显著改善合成高分辨距离像的性能,达到了接近理想带宽合成的效果。

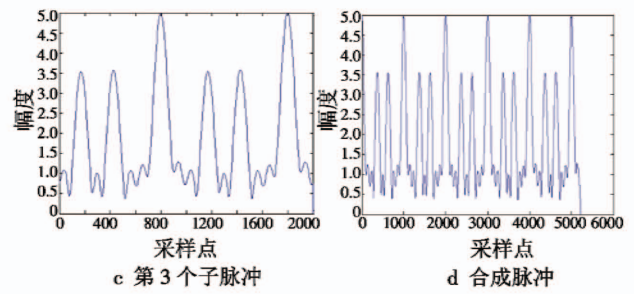
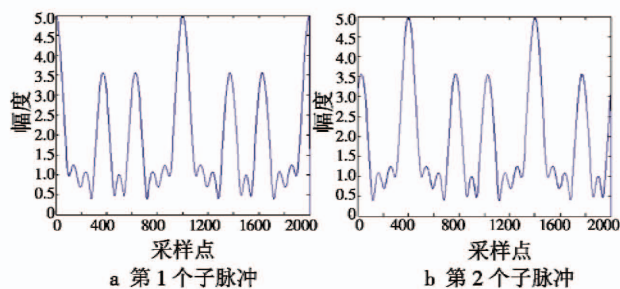


图 4 带宽合成前后原始回波数据

Fig. 4 Echo curves of stretched chirp-step signal before and after synthesizing

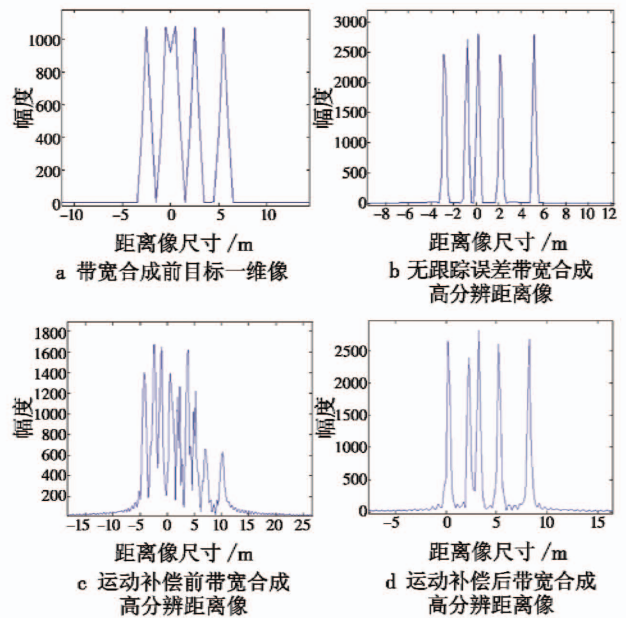


图 5 带宽合成前后一维距离像

Fig. 5 HRRPs of stretched chirp-step signal before and after synthesizing

5 结论

当 LFM 信号带宽很大和/或观测距离窗很大时,去斜后系统采样率仍过高,或因技术限制无法产生足够大带宽的 LFM 信号时,将线性调频去斜技术与频率步进相结合形成去斜步进频技术,可用少数几个 LFM 子脉冲合成足够大的带宽,同时保持去斜后的系统采样率足够低,解决上述难题。本文在分析宽带去斜信号步进频合成原理的基础上,深入研究了该技术在雷达系统应用中可能遇到的问题,借鉴 ISAR 成像技术中的残余相位补偿和运动补偿算法解决了去斜步进频合成处理中的残余相位补偿和系统跟踪误差补偿问题,基于信号处理的需求提出了系统参数设计约束和回波信噪比等对系统的设计要求,梳理了去斜步进频合成处理流程并进行了相应的仿真分析。仿真结果表

明,本文提出的算法简单成熟,流程正确有效,使去斜步进频合成可应用于实际雷达系统,且非常适合于实时处理,便于工程实现,可用于宽带/超宽带信号的产生与处理。

参考文献

- [1] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 龙腾,毛二可,何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报,1998,26(12):84-88.
- [3] 李昞,龙腾. 步进频雷达目标去冗余算法[J]. 电子学报,2000,28(6):60-63.
- [4] 毛二可,龙腾,韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报,2001,22(s):16-24.
- [5] 贺志毅,郝祖全,汤斌. 一种新体制雷达合成宽带可行性分析[J]. 电子学报,2003,31(6):940-943.
- [6] LORD R T. Aspects of stepped-frequency processing for low frequency systems[D]. Cape Town:University of Cape Town,2000.
- [7] LEVANAN N, MOZESON E. Nullifying ACF grating lobes in stepped-frequency train of LFM pulses[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems,2003,39(2):694-703.
- [8] JING W, YANG L, TENG L. Processing method base on synthetic spectrum using stepped-frequency chirps[C]//

- IET International Radar Conference,2009:1-4.
- [9] ZHANG L, GAO Z Z. Stepped-frequency waveform processing for moving target based on genetic-CLEAN algorithm[C]//The 2nd International Conference on Signal Processing Systems,2010:18-21.
- [10] ZHAO X N, LIU H B, LIU Q B, et al. Parameters design and signal processing algorithm research in clutter based on the stepped frequency waveforms[C]//The 11th International Conference on Signal Processing,2012:1900-1904.
- [11] ZHAO L Z, FU X J, WU J T, et al. A novel range profiles splicing approach in stepped-frequency radars[C]//IET International Radar Conference,2013:1-5.
- [12] NGUYEN L. Signal processing techniques for stepped frequency ultra-wideband radar[J]. Proceedings of SPIE,2014. doi:10.1117/12.2053026.
- [13] 江碧涛,张云华,姜景山. 宽带调频步进信号的全去斜处理方法[J]. 测试技术学报,2008,22(3):225-230.
- [14] 张忠传,牟善祥,徐光进,等. 基于 Stretch 处理的毫米波调频步进雷达信号处理技术研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2010,34(1):121-125.
- [15] 金胜,朱天林,邓振森,等. 基于去斜的步进频合成高分辨距离像新方法[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(6):1126-1130.

(上接第70页)

的问题。通过 SysGen 在 FPGA 上实现算法,仿真验证了 GPF 算法是可行的,且对比 PF 具有更好的实时性。将四元数离散方程作为状态方程,算法分为采样调节粒子、采样粒子、权值计算、均值协方差计算和 Cholesky 分解 5 个模块,通过采用非标准化的权值计算四元数平均值和协方差阵,并且改写协方差阵计算公式,实现流水线高斯粒子滤波算法,仿真结果表明了本设计的有效性,且提出了并行化设计方案,利用 FPGA 剩余资源进一步提升运行速率。但上述实现均采用模拟航迹进行仿真,对于真实无人机姿态估计的具体实现及工程应用(例如,真实 IMU 产生的数据导入 FPGA,产生的姿态估计结果用于机载控制系统)仍需要大量的板级调试工作。

参考文献

- [1] HONG S, DJURIĆ P M, BOLIĆ M. Simplifying physical realization of Gaussian particle filters with block-level pipeline control[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Pro-

- cessing,2005,4:575-587.
- [2] 王宁,王从庆. 高斯粒子滤波器及其在非线形估计中的应用[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(s):132-135.
- [3] OSHMAN Y, CARMI A. Attitude estimation from vector observations using a genetic algorithm embedded quaternion particle filter[J]. Journal of Guidance, Control & Dynamics,2006,29(4):879-891.
- [4] STEVENS B L, LEWIS F L, JOHNSON E N. Aircraft control and simulation:dynamics, controls design, and autonomous systems[M]. 3rd ed. Hoboken:John Wiley & Sons,2015.
- [5] 周翟和. 惯性组合导航系统中线性/非线性混合粒子滤波技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [6] 王佳辉,王义平,薛雅丽. 基于 System Generator 的简化粒子滤波算法设计及硬件实现[J]. 电光与控制,2018,25(5):100-105.
- [7] MARKLEY F L. Attitude estimation or quaternion estimation[J]. Journal of the Astronautical Sciences,2004,52(1/2):221-238.