

文章编号: 2095-4980(2019)04-0681-06

频率步进伪码-线性调频信号处理方法及成像

刘加方^{1a,1b,2}, 张云华^{1a,1b,2}, 董晓^{1a,1b}

(1.中国科学院 a.微波遥感技术重点实验室; b.国家空间科学中心, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 伪码-线性调频(PRBC-LFM)信号具有伪随机相位编码信号和线性调频信号的优点, 是一种具有优良抗干扰性能和宽带特性的复合信号。提出一种针对宽带伪码-线性调频信号全去斜接收处理方法, 能够在较低速率采样条件下完成对宽带伪码-线性调频信号的脉冲压缩。并结合频率步进技术, 设计和实现了超大带宽的伪码-线性调频信号, 对各子脉冲信号进行脉冲压缩后在频域进行相干合成, 对合成得到的大带宽频谱进行逆傅里叶变换得到目标的高分辨力一维距离像。点目标一维距离像仿真和地面运动目标ISAR成像实验均验证了本方法的有效性。

关键词: 伪码-线性调频; 全去斜处理; 低速率采样; 步进频; 地面运动目标成像

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0681

Processing method of stepped PRBC-LFM signal and imaging

LIU Jiafang^{1a,1b,2}, ZHANG Yunhua^{1a,1b,2}, DONG Xiao^{1a,1b}

(a.Key Laboratory of Microwave Remote Sensing; b.National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pseudo-Random Binary phase Code and Linear Frequency Modulation(PRBC-LFM) has the advantages both of pseudo-random binary-phase code signal and linear FM signal, which has an excellent anti-jamming performance and broadband characteristics. A novel pulse compression method for PRBC-LFM is proposed based on dechirp receiver. The proposed method enables a low sampling rate for the wideband PRBC-LFM radar system, which simplifies the hardware system of wideband radar. Combining with stepped frequency technology, stepped PRBC-LFM signal is designed. The frequency domain synthesis method based on the pulse compression mentioned above is proposed to realize high range resolution. Computer simulation of point target's range profile and ground moving target imaging experiment are conducted to verify the efficiency of the proposed method.

Keywords: Pseudo-Random Binary phase Code and Linear Frequency Modulation; dechirp processing; low rate sampling; stepped frequency; ground moving target imaging

高分辨力雷达可以获得更加精细的目标信息, 现代雷达通常发射带宽极宽的线性调频信号来获得距离向高分辨力^[1-3]。然而随着电子战技术的发展, 现代雷达面临越来越恶劣的电磁环境, 线性调频信号由于其信号结构简单, 很容易被敌方数字射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)截获、识别, 层出不穷的新型干扰欺骗技术也对雷达系统产生严重的威胁^[4-6]。低截获概率特性以及优良的抗干扰能力成为现代雷达的一个重要发展趋势, 伪码-线性调频(PRBC-LFM)信号^[7-9]兼具伪随机相位编码信号和线性调频信号的优点, 是一种具有宽带特性、抗干扰性能和低截获能力的复合信号, 已被广泛用于多种雷达、组网雷达和微型探测中, 且近年在雷达通信一体化共享信号等研究领域备受关注。目前 PRBC-LFM 信号大多采用相关法^[10]或匹配滤波法进行处理。相关法属于模拟信号处理方法, 这种处理方法不灵活, 不适用于成像雷达, 随着数字信号处理技术的发展, 匹配滤波已经成为数字信号处理中脉冲压缩的主要方式。但在应用于高分辨力成像雷达时, 匹配滤波处理方法需要高速 A/D 转换器以及高速数据存储器, 给雷达系统实现带来很大的困难。

线性调频信号的全去斜处理方法利用一个与发射信号调频斜率相同但时宽大于发射脉宽的本振信号与回波信号进行混频将宽带回波信号转化为单频信号, 然后取下边带滤波并将采样结果进行频谱分析, 从而在低速率 A/D 采样情况下实现目标时延信息到频率信息的转换^[11]。然而这种去斜处理方法并不适用于 PRBC-LFM 复合信

号,这种信号通过去斜处理后,宽带回波信号变为一个窄带信号而不是一个单频信号,通过频谱分析的方法无法完成对目标回波的脉冲压缩,线性调频信号去斜方法并不能直接适用于 PRBC-LFM 复合信号处理。本文针对宽带 PRBC-LFM 复合信号对系统 A/D 采样、存储和传输设备要求较高的问题,提出一种去斜接收处理方法,即利用一个与复合信号调频斜率相同但时宽大于发射脉冲时宽的本振信号与回波信号进行混频,对去斜后的窄带信号进行低速率 A/D 采样,然后对采样的窄带信号进行上采样和线性调频以恢复出原宽带回波信号,将恢复出的宽带回波信号与原发射参考信号进行匹配滤波即可完成距离向脉冲压缩,实现了在低速率采样条件下完成对宽带 PRBC-LFM 信号脉冲压缩。

频率步进雷达每个窄带子脉冲载频以一定频率间隔步进增加,接收机的瞬时带宽可以保持相对较小,显著降低对硬件处理系统要求,对接收的回波信号进行相干合成从而实现大带宽以提高距离向分辨率^[3,12-14]。结合频率步进技术和 PRBC-LFM 复合信号,设计和实现了超大带宽的 PRBC-LFM 信号。首先频率步进 PRBC-LFM 信号每个子脉冲采用全去斜接收处理进行脉冲压缩,对各子脉冲进行相应的频谱搬移后在频域完成相干合成,对合成得到大带宽频谱进行逆傅里叶变换就可以得到目标的高分辨率一维距离像。点目标一维距离像数值仿真和地面运动目标高分辨力成像实验均证明本方法是可行的。

1 伪码调相与线性调频复合信号去斜接收处理方法

PRBC-LFM 复合信号可表示为:

$$s(t) = U(t)s_{\text{LFM}}(t) = \sum_{i=0}^{P-1} e^{j\varphi_i} u(t - iT_r) e^{j\pi K t^2}, 0 < t < T_p \quad (1)$$

式中: $U(t)$ 为伪随机二相编码信号; $s_{\text{LFM}}(t)$ 为线性调频信号; T_r 为伪码码元宽度; P 为码元个数, $T_p = PT_r$ 为脉冲时间宽度; $\varphi_i = \{0, \pi\}$ 为伪随机相位; K 为线性调频信号调频率。

经距离 r 处的点目标反射后,到达接收机的回波信号为:

$$s_r(t) = U(t - \tau)s_{\text{LFM}}(t - \tau) = \sum_{i=0}^{P-1} e^{j\varphi_i} u(t - \tau - iT_r) e^{j2\pi\left(f_0(t-\tau) + \frac{1}{2}K(t-\tau)^2\right)}, 0 < t - \tau < T_p \quad (2)$$

式中 $\tau = 2r/c$ 为距离 r 处目标的距离时延。选取对应时延 $\tau_{\text{ref}} = 2r_{\text{ref}}/c$, r_{ref} 为去斜参考距离,时间宽度为 T_{ref} 的信号为全去斜参考信号:

$$s_{\text{ref}}(t) = e^{j2\pi\left(f_0(t-\tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}K(t-\tau_{\text{ref}})^2\right)}, 0 < t < T_{\text{ref}} \quad (3)$$

经混频去斜处理并低通滤波后的信号为:

$$p(t) = s_r(t)s_{\text{ref}}^*(t) = U(t - \tau) e^{j2\pi\left(f_0(\tau_{\text{ref}} - \tau) + K(\tau - \tau_{\text{ref}})t + 0.5K(\tau_{\text{ref}}^2 - \tau^2)\right)}, 0 < t - \tau < T_p \quad (4)$$

如式(4)所示,点目标回波信号经过去斜接收机与参考线性调频信号混频后,PRBC-LFM 回波信号变为中心频率为 $K(\tau - \tau_{\text{ref}})$ 的伪随机二相编码信号,带宽为随机二相编码信号 $U(t)$ 带宽 B_U , $B_U \approx 1/T_r$ 。当雷达距离向观测范围为 L 时,经过去斜接收机后回波信号带宽为 $K\Delta\tau + B_U$, $\Delta\tau = 2L/C$ 。通常情况下伪随机相位编码信号带宽 B_U 远小于 PRBC-LFM 信号带宽 B ,当雷达距离向测绘范围 $L < (B - B_U)c/2K$ 时,经过去斜接收机后,回波信号带宽将小于发射信号带宽,可以进行较低速率 A/D 采样,降低了系统 A/D 采样、存储和传输设备要求,如图 1 所示。

对混频去斜后的信号进行低速率 A/D 采样后,对采样的数字信号 $p(t)$ 进行上采样至原宽带信号的奈奎斯特(Nyquist)采样频率,然后对上采样后的信号 $p'(t)$ 进行线性调频,即利用调频斜率相同但时宽大于发射脉冲时宽的线性调频信号,对上采样后的信号进行线性频率调制以恢复出原宽带 PRBC-LFM 信号。

$$s_{\text{recovery}}(t) = p'(t)s_{\text{ref}}(t) = U(t - \tau) e^{j2\pi\left(f_0(t-\tau) + \frac{1}{2}K(t-\tau)^2\right)} = s_r(t), 0 < t - \tau < T_p \quad (5)$$

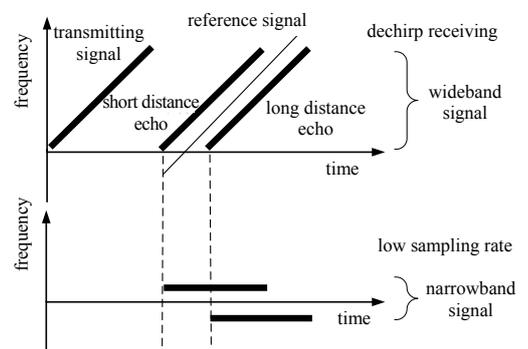


Fig. 1 Diagram of dechirp receiver
图 1 全去斜接收示意图

将线性调制后恢复出的宽带回波信号 $s_{\text{recovery}}(t)$ 与发射信号 $s(t)$ 进行匹配滤波,即可得到目标距离向脉冲压缩后的一维距离像,PRBC-LFM 信号全去斜接收处理框图如图 2 所示。与传统方法相比较,实现了在低速率采样条件下完成对宽带 PRBC-LFM 信号脉冲压缩。

2 点目标仿真分析

为了验证本文 PRBC-LFM 信号全去斜接收处理方法的有效性,对点目标进行模拟。仿真参数选择如下:载波频率 $f_0=33$ GHz,脉冲宽度 $T_p=20 \mu\text{s}$,调频率 $K=10^{13}$ Hz/s,发射信号带宽 200 MHz,伪码码元宽度 $T_r=0.2 \mu\text{s}$,接收机 A/D 采样率为 50 MHz。雷达距离向观测范围为 [1 700 m, 2 300 m], 3 个点目标分别位于 1 800 m,2 002 m,2 020 m 处。去斜参考距离选为 2 000 m,由上文分析可知,当 $L < (B - B_U)c / 2K = 2925$ m 时,本方法所需的采样率将低于 Nyquist 采样率,而距离向测绘宽度 $L=600$ m,按照本文所提处理方法,经过去斜接收机后回波信号带宽仅为 $K\Delta\tau + B_U = 45$ MHz,对接收机采样率要求大大降低。

图 3(a)为 PRBC-LFM 复合信号去斜处理后信号时频图,从图中可以看出经过全去斜接收机后,回波信号变为一个窄带信号,可以用低速率 A/D 对窄带信号进行采样,仿真中发射信号带宽为 200 MHz,而 A/D 采样率仅为 50 MHz;图 3(b)为上采样和线性调频后恢复的原宽带 PRBC-LFM 复合回波信号,从图中可以看出,通过在数字域进行上采样及线性调频后,采样得到的 50 MHz 窄带信号能够几乎无失真地恢复出原 200 MHz 宽带的回波信号。图 4(a)和图 4(b)分别为本文所提 PRBC-LFM 去斜接收处理方法和 Nyquist 采样率下匹配滤波处理得到的点目标一维距离像结果,从图中可以看出,本文所提方法与 Nyquist 采样率下匹配滤波脉冲压缩结果几乎相同,然而本文所提方法仅采用了 50 MHz 采样率,而传统匹配滤波方法采样率至少为 Nyquist 采样率(即 200 MHz),因此本文方法对系统 A/D 采样、存储和传输设备要求较低。

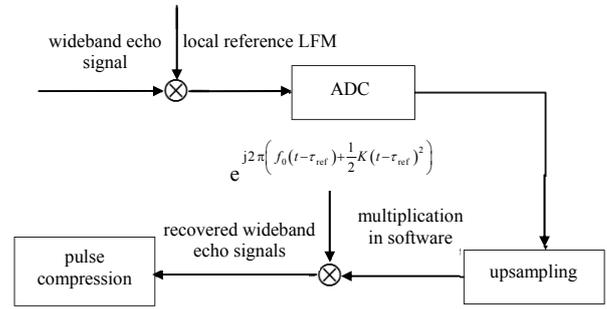


Fig.2 Processing diagram of PRBC-LFM signal
图 2 伪码-线性调频信号全去斜接收处理框图

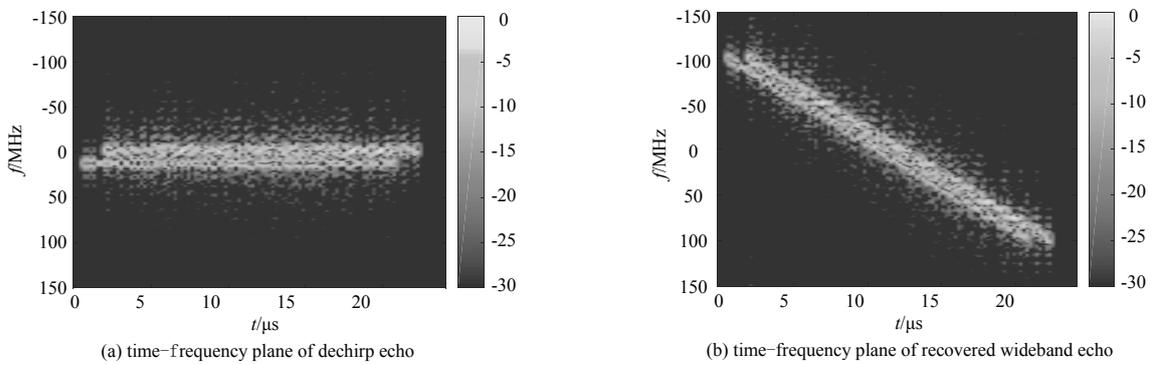


Fig.3 Time-frequency distribution plane of proposed method
图 3 本文处理方法仿真时频图

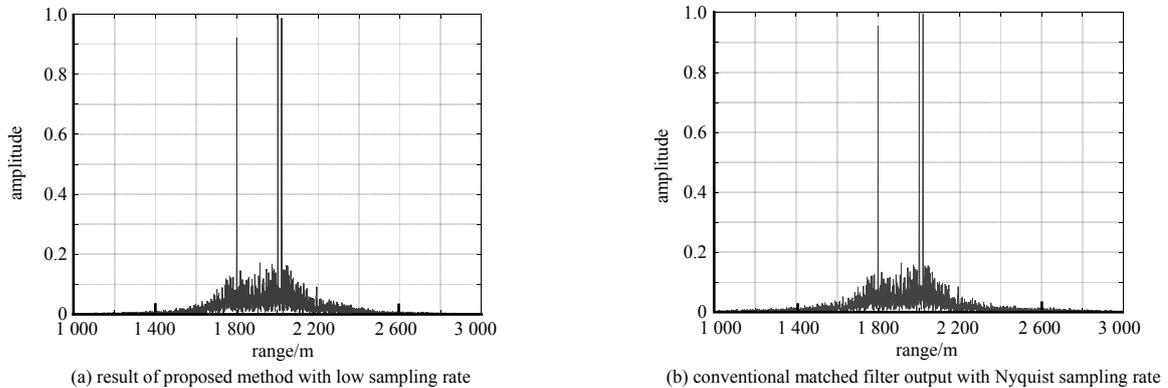


Fig.4 Simulation results of proposed method and traditional matched filter method
图 4 本文方法与传统匹配滤波压缩方法仿真结果

3 地面运动目标 ISAR 成像实验

地面运动目标成像实验用来进一步验证本文所提方法的有效性, 结合频率步进技术, 提出频率步进 PRBC-LFM 信号, 实现了超大带宽 PRBC-LFM 复合信号。首先频率步进 PRBC-LFM 信号每个子脉冲采用全去斜接收处理进行脉冲压缩, 对各子脉冲进行相应的频谱搬移后在频域完成相干合成, 对合成得到的大带宽频谱进行逆傅里叶变换就可以得到目标的高分辨力一维距离像。

频率步进 PRBC-LFM 雷达发射第 i 个子脉冲为:

$$s_i(t) = s(t - iT_r) e^{j2\pi f_i t}, 0 \leq t - iT_r \leq T_p \quad (6)$$

式中: $s(t)$ 为 PRBC-LFM 信号; $f_i = f_0 + i\Delta f$ 为子脉冲载频; f_0 为载频初始值; Δf 为频率步进量。其回波信号可表示为:

$$s_{ir}(t) = \sum_{p=1}^P \sigma_p s(t - iT_r - \tau_p) e^{j2\pi f_i (t - \tau_p)}, 0 \leq t - iT_r - \tau_p \leq T_p \quad (7)$$

式中 σ_p 和 τ_p 为距离向第 p 个目标的反射系数和回波时延。

对各个子脉冲下变频后的基带信号采用上述的全去斜处理方法完成脉冲压缩, 得到子脉冲基带信号频谱 $S_i(f)$, 对 $S_i(f)$ 进行频谱搬移, 搬移量为 $(i-1)\Delta f$, 当子脉冲信号带宽 B 大于频率步进量 Δf 时, 频谱搬移后会有部分频谱重叠, 需要进行去重叠处理, 对去重叠后的 N 个子脉冲信号进行相干叠加就可以得到合成后的大带宽信号, 合成大带宽信号为 $B + (N-1)\Delta f$ 。

如图 5 所示, 频率步进 PRBC-LFM 信号 ISAR 成像实验成像目标为北京地铁 13 号线, 雷达以正侧视方式观测列车, 实验系统参数如表 1 所示。系统工作于 Ka 波段, 合成总带宽达到 2 GHz。

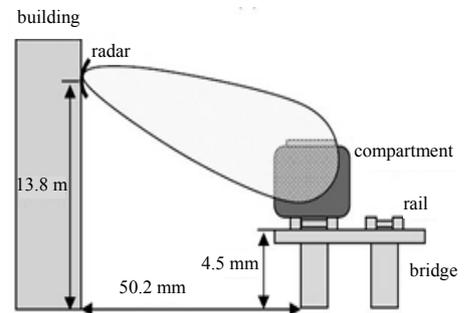


Fig.5 Configuration of experimental
图 5 成像几何关系

表 1 地面运动目标成像实验系统参数

Table 1 Parameters of ground moving target imaging experimental system

carrier frequency	frequency step/ MHz	subpulse number	subpulse bandwidth/ MHz	pulse width/ μm	duration of PN code/ μm	PRF/Hz	A/D sampling rate/ MHz
Ka band	100	20	110	11	0.1	600	50

在地面运动目标成像实验中, 雷达保持静止不动, 目标(北京地铁 13 号线)近似匀速直线运动, 因此可以等效地用 SAR 成像算法来成像^[15]。首先采用上述的全去斜接收处理方法, 对去斜接收机接收的回波进行距离向脉冲压缩, 然后对各个子脉冲进行频谱搬移, 在频域进行相干合成, 对合成的大带宽频谱进行逆傅里叶变换就可以得到合成后的高分辨力目标一维距离像, 再进行方位压缩就可以得到目标的二维图像。

图 6(a)~(b)分别给出了北京地铁 13 号线光学图像和基于本文方法的高分辨力 ISAR 成像实验结果, 本实验系统中 A/D 采样率仅为 50 MHz, 远小于发射信号带宽 110 MHz, 相比于采用传统匹配滤波处理方法, 以不低于 Nyquist 采样率 110 MHz 对回波信号采样, 本文方法大大降低了系统 A/D 采样率和数据存储率。从图中可以看出, 列车最暗的部分是车厢与车厢之间的连接处, 以此为标志可以清晰地看到列车被分成 6 车厢, 每节车厢长度和列车总长度也可以大致估算出来, 与实际列车情况相吻合。

4 结论

本文提出一种 PRBC-LFM 信号全去斜接收处理方法, 实现了低于奈奎斯特采样下对宽带 PRBC-LFM 信号的脉冲压缩, 降低了系统 A/D 采样、存储和传输设备要求, 以点目标一维距离像仿真结果验证了方法的有效性。在 PRBC-LFM 信号全去斜接收处理基础上, 结合步进频技术, 提出宽带频率步进 PRBC-LFM 信号模型和基于全去斜接收处理的频域相干合成方法, 并通过高分辨力地面运动目标 ISAR 成像结果进一步验证了所提方法, 实现了通过频率步进获得超大信号带宽从而提高距离向分辨力的目的。值得指出的是, PRBC-LFM 信号在雷达通信一体化中具有巨大潜力, 后期工作将围绕全去斜接收处理方法在雷达通信一体化共享信号处理方面开展深入研究。

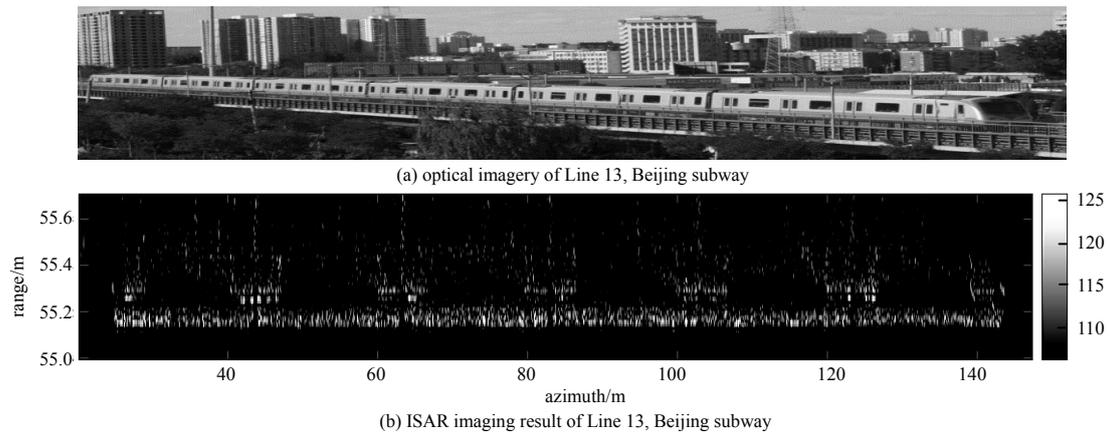


Fig.6 High resolution imaging results of proposed method
图6 基于本文方法的高分辨率成像实验结果

参考文献:

- [1] LEVANON N, MOZESON E. Radar signals[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [2] WEHNER D R. High resolution radar[M]. Norwood: Artech House, 1995.
- [3] 梁美彦, 曾邦泽, 张存林. 频率步进太赫兹雷达的一维高分辨距离像[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 336-339. (LIANG Meiyuan, ZENG Bangze, ZHANG Cunlin. One-dimensional high range resolution profile of terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3): 336-339.)
- [4] SCHLEHER D C. Electronic warfare in the information age[M]. Norwood: Artech House, 1999.
- [5] 张锡熊. 21世纪雷达的“四抗”[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(1): 1-6. (ZHANG Xixiong. “Four countering” of radar in the early of the 21st century[J]. Radar Science and Technology, 2003, 1(1): 1-6.)
- [6] 李源, 彭定之, 陈惠连. 逆合成孔径雷达抗干扰能力分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009, 7(2): 99-102. (LI Yuan, PENG Dingzhi, CHEN Huilian. Jamming study for inverse synthetic aperture radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009, 7(2): 99-102.)
- [7] 曾德国, 熊辉, 龙柯宇, 等. 伪码-线性调频复合信号快速参数估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 891-894. (ZENG Deguo, XIONG Hui, LONG Keyu, et al. Fast parameter estimation approach of reconnaissance signal combined PRBC and LFM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(5): 891-894.)
- [8] 王佩, 祝俊, 唐斌. 伪码-线性调频复合信号参数估计理论性能分析[J]. 电子与信息学报, 2015, 38(2): 472-477. (WANG Pei, ZHU Jun, TANG Bin. Theoretical performance analysis for parameter estimation of hybrid modulated signal combining Pseudo-Random Binary-phase Code and Linear Frequency Modulation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 38(2): 472-477.)
- [9] NGWAR M, WIGHT J. Phase coded linear frequency modulated waveform for low cost marine radar system[C]// Radar Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2010: 1144-1149.
- [10] 刘静, 赵惠昌, 周新刚, 等. 伪码与线性调频复合调制信号分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(10): 1217-1222. (LIU Jing, ZHAO Huichang, ZHOU Xingang, et al. The analysis of combination of chirp modulation and pseudonoise phase modulation signal[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(10): 1217-1222.)
- [11] CAPUTI W J. Stretch: a time-transformation technique[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1971, 7(2): 269-278.
- [12] 金胜, 朱天林. 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, 2010, 34(6): 1126-1130. (JIN Sheng, ZHU Tianlin. Dechirp-based method for synthesizing high resolution range profile(HRRP) via stepped-frequency waveforms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 34(6): 1126-1130.)
- [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. (JIANG Bitao, ZHANG Yunhua, JIANG Jingshan. De-chirp processing method for wide-band stepped-frequency chirp signals[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(3): 225-230.)
- [14] 张云华, 李海滨, 伍捷. 步进频率线性调频脉冲信号的子孔径处理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(1): 1-6. (ZHANG Yunhua, LI Haibin, WU Jie. Subaperture processing method for stepped-frequency chirp signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(1): 1-6.)

(下转第 708 页)