

基于脉间中断调频连续波的高空慢速单基机载 SAR 成像

夏春云, 张群, 梁颖

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 调频连续波用于高空慢速单基机载 SAR 成像时,收发隔离和远距离探测都是亟待解决的问题。结合高空慢速运动平台的特点,提出了一种脉间中断调频连续波(Inter-Pulses Interrupted Frequency-Modulated Continuous Wave, IPIFMCW)的信号模型,通过载频不同的门控信号调制多个发射信号,设置较大的脉间中断时间,将子脉冲回波差频信号在快时间域时移合成大带宽信号,实现高空慢速机载 SAR 成像。通过与脉间中断调频连续波(FMICW)的理论分析比较,说明该方法不仅解决了收发隔离难题,同时满足高空机载 SAR 远目标成像需求,避免出现距离模糊。最后结合频率变标算法(FSA)实现了基于 IPIFMCW 信号的高空慢速单基机载 SAR 成像。

关键词 脉间中断调频连续波;合成孔径雷达;高空慢速机载平台;收发隔离

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.013

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0053-05

A Study on Imaging of High-altitude Slow-speed Airborne SAR Based on Inter-pulses Interrupted FMCW

XIA Chun-yun, ZHANG Qun, LIANG Ying

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Remote-target detecting and isolation between transmitter and receiver are the problems that need to be solved when FMCW SAR is applied in high-altitude slow-speed airborne platform. A signal model of inter-pulses interrupted frequency-modulated continuous waveform (IPIFMCW) is proposed in consideration of the features of high-altitude slow-speed airborne platform. The imaging of high-altitude slow-speed airborne SAR is realized through the gating signal with different carrier frequency to modulate the transmit signal to obtain long inter-pulses interval and shifting the mixing echo of sub-pulse in fast time domain to get wide-band signal. Compared with the FMICW theory, the results show that IPIFMCW not only overcomes the problem of isolation between transmitter and receiver, but also fulfills the need of remote-target imaging for high-altitude airborne SAR and avoids range ambiguity. Finally, the imaging of high-altitude slow-speed airborne SAR based on IPIFMCW signal is realized through frequency scaling algorithm (FSA).

Key words: inter-pulses interrupted frequency-modulated continuous wave; synthetic aperture radar; high-

收稿日期:2013-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172169)

作者简介:夏春云(1989-),男,安徽庐江人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究. E-mail:772348253@qq.com.

altitude slow-speed airborne platform; isolation

调频连续波合成孔径雷达(FMCW SAR)具有体积小、重量轻、成本低、功耗低等优势,在小型平台上具有广泛的应用前景^[1-4]。FMCW 具有 100% 占空比,单基平台的发射和接收无法实现有效隔离,接收机在接收当前回波的同时,也会接收到发射机的直达波^[5-6]。

线性调频中断连续波雷达(FMICW SAR)很好地解决了调频连续波雷达收发隔离的难题,具有重量轻、体积小、机动性能强的特点,同时克服了脉冲雷达峰值功率高的特点^[7],但 FMICW SAR 较为适用于短程探测,当应用于高空慢速单基机载平台时,会带来距离模糊,导致目标的二维精确成像不理想^[8]。针对这一问题,本文结合高空慢速单基机载平台运动速度慢、对方向采样率要求低的特点,提出了一种脉间中断形式的调频连续波(IPIFMCW),建立了 IPIFMCW SAR 信号模型,通过设置较大的脉间中断时间,不仅解决了收发隔离问题,还避免了距离模糊,使其满足远距离目标成像需求。回波信号处理过程中,通过对脉间中断的各子脉冲进行时移处理,达到大带宽合成的目的。最后基于频率变标算法(FSA)分别对点目标和场景进行了仿真以验证本文分析和模型的正确性。

1 信号模型分析与比较

1.1 FMICW 信号模型

调频中断连续波是通过门控脉冲 $g(t)$ 控制 FMCW 信号实现的,其原理见图 1。

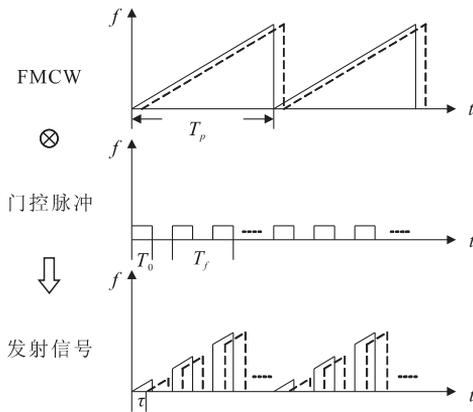


图 1 FMICW 信号时频关系

Fig.1 Spectrogram of FMICW signal

在一个周期内 FMCW 发射信号为:

$$S(t_k) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t_k + \frac{1}{2}\mu t_k^2\right)\right) \quad (1)$$

式中: t_k 为距离快时间; T_p 为扫频周期; f_c 为载频;

$\mu = B/T_p$ 为信号调频率; B 为信号带宽; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数, $0 \leq t_k \leq T_p$ 时, $\text{rect}(t/T_p) = 1$, 其余的则为 0。

周期重复的矩形门控脉冲信号 $g(t_k)$ 为:

$$g(t_k) = \sum_{n=0}^{P-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - nT_f}{T_0}\right) \quad (2)$$

式中: T_0 为门控脉冲宽度; T_f 脉冲重复周期; P 为扫频周期内门控脉冲个数, 故 FMICW SAR 发射信号为:

$$S_{IT}(t_k) = S(t_k)g(t_k) = \sum_{n=0}^{P-1} \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t_k - nT_f}{T_0}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t_k + \frac{1}{2}\mu t_k^2\right)\right) \quad (3)$$

对于 FMICW 信号, 其各项参数的选取原则如下: ①为了保证信号的发射功率, 门控脉冲宽度 T_0 应该尽量大; ②为了避免产生距离模糊^[9], 应满足 $2R_{\max}/c \leq T_f - T_0$, 其中 R_{\max} 为最远目标至雷达的距离; ③回波最大差频为 $f_{\max} = 2\mu R_{\max}/c$, FMICW SAR 系统引入了消除距离模糊的滤波器, FMICW SAR 要求脉冲重复频率 $f_r = 1/T_f > 2f_{\max}$ 。

对于高空慢速机载平台, 由于其成像距离远, 运用 FMICW SAR 成像时, 由 ③可知, 最大差频值较大, 脉冲重复时间 T_f 较小, 与 ①、②矛盾, 这将导致出现距离模糊和信号发射功率较高的问题, 因此 FMICW SAR 并不适用于高空慢速机载平台, 需寻求一种适用于高空慢速平台远距离成像时的 FMICW SAR 信号。在保证 FMCW SAR 体积小、重量轻等优势的前提下, 进一步解决 FMICW SAR 远距离探测能力差及距离模糊的问题。

1.2 IPIFMCW 信号模型

由于慢速运动平台 FMCW SAR 系统在较低的 PRF 情况下同样能够满足方向向采样率的要求, 因此, 考虑通过不同载频的门控信号分别控制多次 FMCW 信号, 形成脉间中断形式的 FMCW 信号, 然后将多次调制的脉冲信号合成一个大带宽的 FMICW SAR 信号, 脉冲中断时间内进行回波信号的接收, 以此来保证发射信号和接收信号在时间上的分离, 解决 FMCW SAR 收发隔离度受限的问题。脉间中断 FMCW 信号的发射和接收过程见图 2。

各子脉冲回波信号之间的时间宽度为 $2(R_{\max} - R_{\min})/c + T_0$, 其中 R_{\max} 为最远目标至雷达的距离, R_{\min} 为最近目标至雷达的距离。为了保证 FMCW 收发时间分离, 脉间中断 FMCW 信号参数需参照以下原则设置:

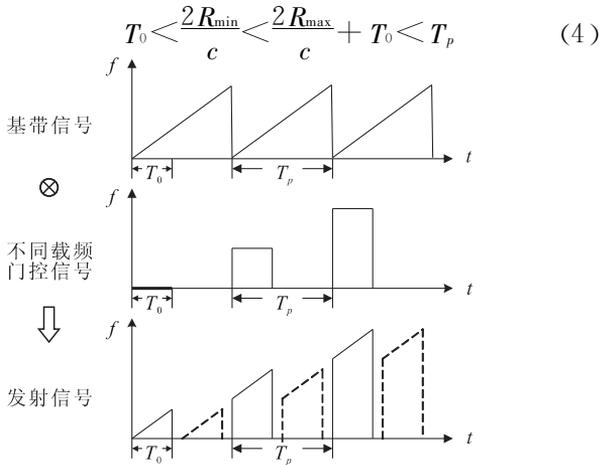


图2 脉间中断形式的 FMCW SAR 一个脉冲内的中断处理示意图

Fig.2 The sketch map of interruption processing in one pulse for inter-pulses interrupted FMCW SAR

根据雷达方程,为了保证雷达发射机功率最小, T_0 应尽量取大。同时为了保证方位向采样率满足奈奎斯特采样率的要求,设计的子脉冲应同时满足:

$$\frac{1}{nT_p} > f_d \quad (5)$$

式中 n 为子脉冲个数。实际上,由于慢速机载平台对方位向采样率要求不高, T_p 可以取得很大,满足方位向采样率的要求。

由上述分析可知, IPIFMCW SAR 信号的各项参数选取原则如下:①为了使信号的工作比尽量大

$$s(t_k, k) = \sum_{k=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - kT_p}{T_0}\right) \exp(j2\pi(f_c + f_c(k)(t_k - kT_p))) \exp(j\pi\mu(t_k - kT_p)^2) \quad (8)$$

式中: t_k 为距离快时间; T_0 为子脉冲宽度; T_p 为 FMCW 脉冲宽度; μ 为信号调频率; f_c 为载波频率。

接收的 IPIFMCW SAR 点目标回波子脉冲表达式为:

$$s_r(t_k, t_m, k) = \sum_{k=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - kT_p - 2R_i/c}{T_0}\right) \exp(j2\pi(f_c + f_c(k))\left(t_k - kT_p - \frac{2R_i}{c}\right)) \exp(j\pi\mu\left(t_k - kT_p - \frac{2R_i}{c}\right)^2) \quad (9)$$

式中: R_i 为点目标至雷达的距离; 正侧视模式下, $R_i = \sqrt{R_0^2 + v^2(t_k + t_m)^2}$; t_m 为方位慢时间; R_0 是目标至雷达的最近距离。对各个子脉冲进行“dechirp”处理,参考信号选择为条带中心距离 R_{ref} 处的回波时延为:

$$s_{ref}(t_k, t_m, k) = \sum_{k=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - kT_p - 2R_{ref}/c}{T_{ref}}\right) \exp(j2\pi(f_c + f_c(k))\left(t_k - kT_p - \frac{2R_{ref}}{c}\right) + j\pi\mu\left(t_k - kT_p - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2) \quad (10)$$

式中参考距离 R_{ref} 为雷达与条带中心之间的距离。

混频后,差频信号输出为:

$$s_{if}(t_k, t_m, k) = \sum_{k=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - kT_p - 2R_i/c}{T_0}\right) \exp\left(-j\left(\frac{4\pi}{c}\mu\left(t_k - kT_p - \frac{2R_{ref}}{c}\right)R_\Delta + \frac{4\pi}{c}(f_c + f_c(k))R_\Delta - \frac{4\pi}{c}\mu R_\Delta^2\right)\right) \quad (11)$$

式中 $R_\Delta = R_i - R_{ref}$, 由于子脉冲是通过载频不同的门控信号调制 FMCW 信号得到的,各子脉冲间隔时间相同,故将各个子脉冲回波差频信号在快时间域进行时移即可完成 IPIFMCW SAR 回波差频信号的大时宽合成,相当于完成了 IPIFMCW SAR 发射信号的大带宽合成,各子脉冲回波差频信号时移 $\Delta t(k)$ 为:

$$\Delta t(k) = k(T_p - T_0) \quad (12)$$

整个回波差频信号时移处理过程见图 3。

回波信号经“dechirp”处理之后得到 n 个与目标距离信息有关的单频信号,对 n 个单频信号进行时移,即将 n 个单频信号的频谱进行拼接^[10-11],时移后差频信号表示为:

以保证较小的信号发射功率,门控脉冲宽度 T_0 应该尽量大;②为了避免产生距离模糊,最远目标回波时延 $\tau_{max} \leq T_p - T_0$, 由于高空慢速机载平台对 PRF 的要求较低,可以使中断间隔 $T_p - T_0$ 较大,不产生距离模糊,满足远目标成像要求;③由于脉间中断时间较大,通常情况下,在一个脉冲重复周期内能够接收完目标回波,系统无需引入消除距离模糊的低通滤波器。

由上述分析可知, IPIFMCW 用于高空慢速机载平台 SAR 成像时,结合平台运动速度较慢的特点,能够解决单基机载平台发射和接收无法隔离的难题,同时其远距离探测能力强,无距离模糊影响。

2 IPIFMCW SAR 成像方法

图 2 中,每个子脉冲具有相同的调频斜率和子带宽 B_0 ,各个子脉冲的载频 $f_c(k)$ 可表示为:

$$f_c(k) = \left(k + \frac{1}{2}\right) B_0 \quad (6)$$

式中: $k=0, 1, \dots, (n-1)$, n 为子脉冲个数。

不同载频的门控信号 $f(t_k)$ 可以表示为:

$$f(t_k) = \sum_{k=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - kT_p}{T_0}\right) \exp(j2\pi f_c(k)(t_k - kT_p)) \quad (7)$$

经载频不同的门控信号调制后,发射的子脉冲信号表达式为:

$$s_{if}(t_k, t_m, k) = \sum_{k=0}^{n-1} \text{rect}\left(\frac{t_k - kT_0 - 2R_i/c}{T_0}\right) \exp\left(-j\left(\frac{4\pi}{c}\mu\left(t_k - kT_0 - \frac{2R_{ref}}{c}\right)R_{\Delta} + \frac{4\pi}{c}(f_c + f_c(k))R_{\Delta} - \frac{4\pi}{c^2}\mu R_{\Delta}^2\right)\right) \quad (13)$$

对于完成大带宽合成处理之后的回波差频信号,其载频为发射 FMCW SAR 信号的载频 f_c , 因此,回波差频信号可进一步表示为:

$$s_{if}(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_i/c}{T_P}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}\mu\left(t_k - \frac{2R_{ref}}{c}\right)R_{\Delta} - j\frac{4\pi}{c}f_c R_{\Delta} + j\frac{4\pi}{c^2}\mu R_{\Delta}^2\right) \quad (14)$$

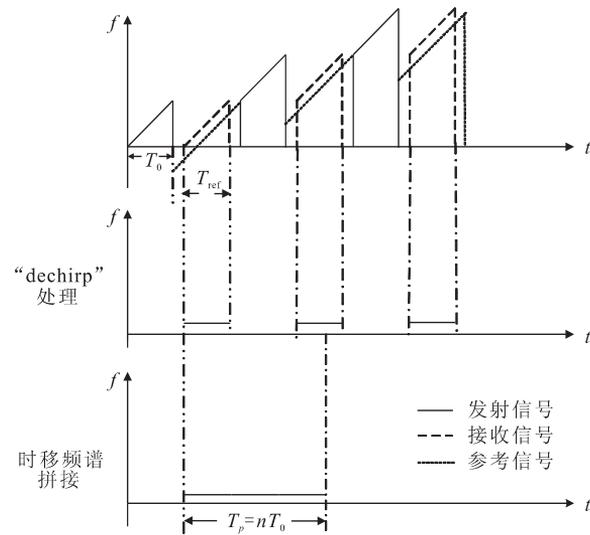


图3 IPIFMCW SAR 回波信号时移处理过程

Fig.3 Time-shifting process for the echo of IPIFMCW SAR

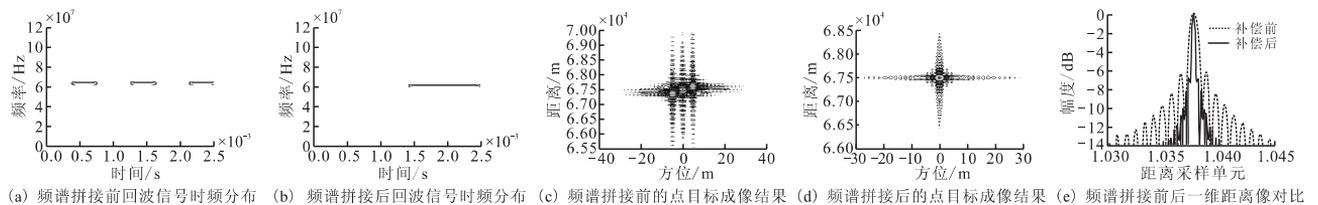


图5 脉间中断 FMCW SAR 点目标成像处理实验

Fig.5 Simulation of point target for IPIFMCW SAR

图 5(a)为进行时移前各子脉冲回波信号的时频分布图,图 5(b)为完成时移之后各子脉冲完成了频谱拼接的时频分布图,说明时移之后完成了信号的大时宽合成,使信号连续,便于后续的二维成像处理;图 5(c)、(d)分别为频谱拼接前后的点目标二维等高线图,比较可以看出,时移之后完成了频谱拼接,可以很好地对点目标进行二维成像;图 5(e)为频谱拼接前后的点目标一维距离像对比,可以看出频谱拼接后一维距离像与频谱拼接前一维距离像提高了 3 倍,说明时移后合成了大时宽信号,实现一维高分辨距离成像。为了进一步验证 IPIFMCW SAR

对完成时移频谱拼接的回波差频信号采用改进的 FS 算法进行成像^[3],具体成像流程见图 4。

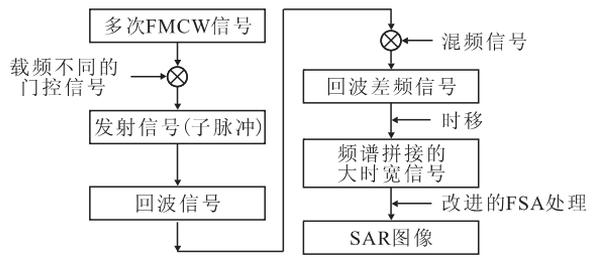


图4 IPIFMCW SAR 成像处理流程

Fig.4 Flow chart of imaging of IPIFMCW SAR

3 仿真实验

假设高空慢速机载平台运动速度 $v = 30 \text{ m/s}$, 方位向分辨率 ρ_a 要求为 1 m , 最大作用距离为 70 km , 发射信号带宽为 175 MHz , 测绘带宽为 10 km , FMCW 脉冲宽度 $T_p = 1 \text{ ms}$, 可见, 脉冲重复频率 $\text{PRF} > f_d = v/\rho_a = 30 \text{ Hz}$, 脉冲重复时间可以很大。如果运用 FMCW SAR 成像时, 由于 $f_r > 2f_{\text{max}}$, 可得 $T_f = 1/f_r < 5.0816 \text{ ns}$, 同时需满足 $2R_{\text{max}}/c \leq T_f - T_0$, 计算出 T_0 为负值, 显然不能够满足平台成像要求, 因此机载平台使用 IPIFMCW SAR 成像, 根据设计原则, IPIFMCW 子脉冲宽度为 $T_0 = 0.33 \text{ ms}$, 子脉冲个数 $n = 3$ 。IPIFMCW SAR 对点目标的成像处理仿真见图 5。

信号模型的有效性, 利用该方法对特定场景进行成像, 图 6 为该模型对场景的成像处理仿真。图 6(a)为原始的成像区域场景图, 利用本文提出的 IPIFMCW SAR 信号模型对该场景进行成像, 图 6(b)为频谱拼接前的场景二维成像图, 图 6(c)为频谱拼接后的场景二维成像图, 比较可以看出, 频谱拼接前的场景二维成像图分辨率较低, 不能实现场景二维精确成像, 对 IPIFMCW SAR 回波差频信号进行时移, 完成频谱拼接后的场景二维成像图分辨率较高, 能够实现二维精确成像, 成像效果与原始场景 SAR 图像基本一致, 与理论分析吻合。

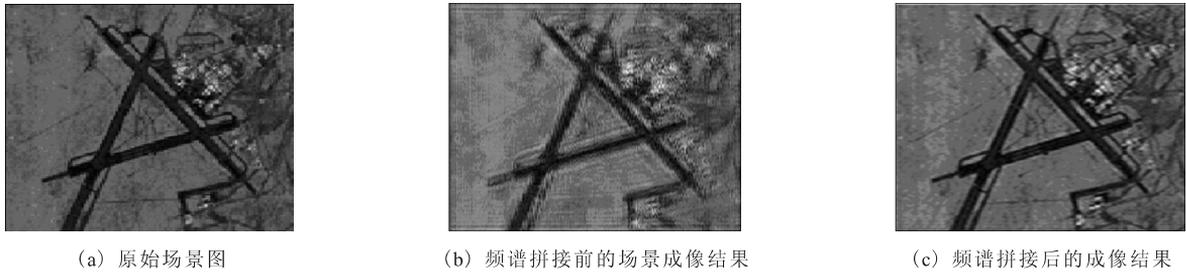


图6 脉间中断 FMCW SAR 场景成像处理实验

Fig. 6 Simulation of scene targets for IPIFMCW SAR

4 结语

本文结合高空慢速运动平台对方位向采样率要求低的特点,提出了一种基于脉间中断调频连续波(IPIFMCW)的高空慢速单基机载平台 SAR 成像方法,建立了 IPIFMCW SAR 信号模型,该信号模型很好地克服了 FMCW 应用于单基机载平台 SAR 成像时存在的远距离探测能力差和距离模糊问题,能够满足远距离目标成像需求,通过改进的 FS 算法分别对该模型点目标和场景回波信号进行了仿真,仿真结果证明了方法的可行性。

参考文献(References):

- [1] 梁毅,郭亮,邢孟道,等.一种斜视 FMCW SAR 的等效正侧视处理方法[J].电子学报,2009,37(6):1159-1164.
LIANG Yi, GUO Liang, XING Mengdao, et al. An equivalent side-looking method for squint FMCW SAR[J]. Acta electronica sinica, 2009, 37(6): 1159-1164. (in Chinese)
- [2] 江志红,赵懿,皇甫堪,等.调频连续波 SAR 的研究进展[J].现代雷达,2008,30(2):20-24.
JIANG Zhihong, ZHAO Yi, HUANGFU Kan, et al. Development of FMCW SAR [J]. Modern radar, 2008, 30(2): 20-24. (in Chinese)
- [3] 梁毅.调频连续波 SAR 信号处理[D].西安:西安电子科技大学,2009.
LIANG Yi. Signal processing of FMCW SAR [D]. Xi'an: Xidian university, 2009. (in Chinese)
- [4] 梁颖,田韵,张群,等.基于多相位变换的 FMCW-ISAR 微多普勒特征提取方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(2):74-78.
LIANG Ying, TIAN Yun, ZHANG Qun, et al. An extracting method of micro Doppler features in FM-CW-ISAR based on polynomial phase transform [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(2): 74-78. (in Chinese)

- [5] 杨建宇. LFM CW 雷达信号模糊函数分析[J]. 信号处理, 2002, 18(1): 39-42.
YANG Jianyu. Ambiguity function of LFM CW radar signal[J]. Signal processing, 2002, 18(1): 39-42. (in Chinese)
- [6] 刘春波,陈伯孝,陈多芳,等.线性调频中断连续波的参数选择与综合处理[J].系统工程与电子技术,2007,29(10):1615-1618.
LIU Chunbo, CHEN Baixiao, CHEN Duofang, et al. Parameters determining and synthesis processing of linear frequency modulated interruptive-continuous wave[J]. Systems engineering and electronics, 2007, 29(10): 1615-1618. (in Chinese)
- [7] 侯海平,杨俭,曲长文. FMCW 用于单基机载 SAR 的成像研究[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(2): 115-119.
HOU Haiping, YANG Jian, QU Changwen. Research on FMCW in monostatic airborne SAR imaging[J]. Radar science and technology, 2011, 9(2): 115-119. (in Chinese)
- [8] 江志红, HUANGFU Kan, WAN Jianwei. A chirp transform algorithm for processing squint mode FMCW SAR data[J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2007, 4(3): 377-381.
- [9] 万显荣,杨子杰,张景伟.高频地波雷达距离混叠与距离模糊研究[J].电波科学学报,2009,24(5):891-893.
WAN Xianrong, YANG Zijie, ZHANG Jingwei. Range aliasing and range ambiguity of HF surface wave radar [J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(5): 891-893. (in Chinese)
- [10] Lord Richard T, Ingg Michael R. High resolution SAR processing using stepped-frequencies[C]//IEEE geoscience and remote sensing symp. Rondebosch, South Africa:[s.n.], 1997: 489-491.
- [11] Smith R L. Micro synthetic aperture radar using FM/CW technology [D]. Utah: Brigham young university, 2002.

(编辑:徐楠楠)