

文章编号: 1007-4619(2007)02-0171-06

一种捷变调频斜率极性和限幅相结合的 SAR 抗干扰方法

李 伟, 梁甸农, 董 臻

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对合成孔径雷达 (SAR) 系统面临的场景散射等干扰无法使用传统时、空、频域技术抑制的问题, 提出了一种基于线性调频 (LFM) 信号调频斜率极性捷变和限幅过程相结合的抗干扰方法。该方法首先在慢时间域捷变雷达发射信号的调频斜率极性, 其次在接收脉冲后首先对转发的干扰信号进行匹配、限幅, 然后在逆滤波之后正常成像。仿真验证了捷变方法的抗干扰性能。

关键词: 抗干扰; 合成孔径雷达; 调频斜率极性捷变; 限幅处理

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

SAR Anti-jamming Method Based on Jittering Slope Polarity of LFM and Thresholding

LI Wei LIANG Dian-nong Dong Zhen

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

Abstract Corresponding to the problem of being unable to remove terrain scattered jamming from the domains of time space and frequency, this paper proposes an anti-jamming method based on jittering slope polarity of Linear Frequency Modulated (LFM) signal and limiting processing. This method first jitters chip rate polarity of LFM signal transmitted by the radar in slow-time domain, then does match-filters for the jamming signals hidden in the radar echoes. Since jamming is more powerful than radar echo, the next process of limiting will lower the amplitude of jamming greatly. After limiting process, limited echoes are inversely match-filtered, so jamming and real radar echo are all back to the original time domain, then the next normal imaging process can be implemented which will also provide the real radar echo more gain than jamming, so SJR (Signal-to-Jamming Ratio) is further enhanced. Simulation results testify the anti-jamming performance of the method.

Key words anti-jamming; synthetic aperture radar; jittering chip rate polarity; limiting process

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种高分辨率成像雷达, 具有全天候成像的优点, 通过选择合适的雷达波长可以穿透一定的隐蔽物成像。特别是近年来出现的分布式小卫星 SAR 系统, 可以减小单个卫星载荷, 提供优良基线, 完成高分辨率、大测绘带成像以

及干涉测高、动目标检测等任务^[1]。这些 SAR 系统的优良性能引发了人们对其干扰技术的研究热潮。

在 GOJ 提出 SAR 和电子战的问题^[2]之后, Dumper 等研究了针对 SAR 的噪声干扰技术^[3], 随后又出现了对微调参数干扰技术^[4,5]、欺骗干扰技术^[6-8]和场景散射干扰技术^[9]的研究。其中, 欺骗干扰、场景散射干扰等相干干扰最难对付。相干干扰通常是根据侦察的雷达发射脉冲信息, 调制相

收稿日期: 2006-03-23; 修订日期: 2006-06-09

作者简介: 李 伟 (1978—), 男, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生。主要从事 SAR 的干扰和抗干扰方面的研究工作, 已发表文章 20 余篇。E-mail: liwei_xian@yahoo.com.cn

位进行转发,或自主产生与真实雷达信号相同的干扰信号,使得干扰信号也可实现距离和方位向脉冲压缩,获得处理增益,因此,干扰功率需求小。尤其是场景散射干扰,不直接对准雷达天线辐射,而是通过照射某个场景区域,使反射波进入雷达接收天线,导致该场景中每个单元都是干扰辐射源,导致传统空域抗干扰技术^[10, 11]在抑制掉干扰信号的同时将雷达真实回波阻止在接收机之外,现有的抑制场景散射干扰的解卷积方法,要求从干扰机旁瓣获得直达干扰信号信息,这在 SAR 中很难得到满足,因此,需要分析现有干扰技术以研究相应抗干扰手段。

针对天线级和信号处理级抗干扰手段受到限制的问题,人们提出了从系统参数出发抗干扰的思想。普通雷达采用频率分集、频率捷变等各种主动改变信号形式的方法,其中,频率分集技术由于只是在每个脉冲内使用多个频段的信息,而在不同慢时刻还是采用了相同的脉冲,因此容易被复制,抗干扰性能极为有限。在针对 SAR 的信号形式抗干扰技术研究中, Soumekh^[12]提出了微调信号幅度和调频斜率的方法。其中微调信号幅度带来的抗干扰能力的提升很小,其主要的功能是迷惑对方电子侦察设备;另外,微调调频斜率大小对带宽影响较大,会影响成像处理增益,因此调频斜率的可变化范围很小,只能带来很低的抗干扰性能。

针对传统抗干扰方法受到的限制,本文提出了一种捷变 LFM 信号调频斜率极性和限幅相结合的抗干扰方法,从系统自身信号参数出发,秉承普通雷达信号捷变的思想,并和限幅过程相结合,抑制干扰。

2 捷变调频斜率极性抗干扰原理

2.1 捷变调频斜率极性方法原理

SAR 是二维脉冲压缩系统,通过距离向的大带宽和方位向的合成孔径获得二维高分辨率,同时通过距离向和方位向的匹配滤波获得高处理增益。

在 SAR 对抗中,相干干扰技术根据侦获得到的雷达脉冲来分析参数、保存相位,才能产生干扰信号,因此,可以用诱骗等方法来获得干扰机的信号产生方式,即干扰信号和雷达发射脉冲之间的关系。获得了干扰信号与雷达信号的关系之后,从而可以考虑捷变技术。但是, SAR 信号处理过程的方位向相干压缩处理使得无法使用慢时间域的频率捷变技术,即使在快时间域捷变频率,也必须保证不同慢时刻的脉冲拥有相同或接近相同的频率成分。

在信号形式捷变方法中,不同慢时刻发射的信号之间的正交性决定着信号捷变方法的抗干扰性能。在 SAR 中正交信号多用来增大测绘带,抑制模糊,且其形式包括编码、采用极性相反的调频率极性等。其中,调频斜率极性正负捷变是一种最为容易实现的正交信号形式,这种方法在相邻的慢时刻之间随机选择或按规律改变调频率的正负极性,在接收到回波之后首先使用干扰机转发的脉冲对雷达回波进行匹配压缩,这时雷达信号就会由于调频斜率相反而无法完成匹配压缩,这就进一步提高了干扰的幅度,此处使用限幅的方法可以降低干扰的幅度;限幅之后,对干扰信号进行逆滤波,得到第一次干扰抑制后的距离方位图像,然后对其进行正常成像,正常成像中使用雷达匹配信号进行距离压缩时,干扰信号会由于调频斜率极性相反而无法完成压缩,进一步提高了信干比。

与微调信号幅度和调频斜率的方法相比,调频斜率极性捷变方法由于首先对干扰匹配结果限幅,然后进行正常的匹配滤波,两次降低了干扰的幅度,从而提高了抗干扰性能。同时,捷变规律可以在实际中由侦察到的干扰机的信号产生方式而定,具有很强的灵活性。

2.2 限幅过程原理

使用调频斜率极性正负在相邻慢时刻捷变的方法,会由于后续处理的不同而得到不同结果。

(1) 第一种处理方法为直接成像法

成像过程中包含直接对雷达接收回波进行距离向匹配滤波的过程,由于干扰根据前面某个脉冲的调频斜率产生,因此,干扰信号无法实现距离向压缩,也就无法获得全部处理增益,而雷达有用回波可以进行理想的匹配压缩,因此,真实场景或目标信息便显现出来。

SAR 系统是二维匹配滤波处理系统,发射信号通常为线性调频信号,形式通常可以表示为:

$$s(t) = \exp\left\{j2\pi\left[\omega_c t + \frac{1}{2}kt^2\right]\right\} \quad (1)$$

调频率极性捷变方法中,信号形式为:

$$s(t) = \exp\left\{j2\pi\left[\omega_c t + \frac{1}{2}(-1)^{\text{present}}kt^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中, $(-1)^{\text{present}}$ 表示当前脉冲的调频率极性,与干扰信号的极性相反。而数字射频存储器根据前面一个(或几个)脉冲信号进行存储, $(-1)^{\text{present}}$ 为干扰机使用的脉冲的调频率极性,由此得到的干扰脉冲

信号形式为:

$$s_j(t) = [s(t)]_{\text{previous}} = \exp\left\{j2\pi\left[\omega_c t + \frac{1}{2}(-1)^{\text{previous}} kt^2\right]\right\} \quad (3)$$

雷达接收处理机用于正常成像的距离向压缩信号为:

$$s'(t) = \exp\left\{j2\pi \cdot \frac{1}{2}(-1)^{\text{present}} kt^2\right\} \quad (4)$$

该调频率极性与当前慢时刻雷达回波相匹配,而与干扰信号不同,因此在雷达回波匹配过程之后,干扰信号的匹配结果仍为线性调频信号,没有压缩,而雷达回波得到了匹配压缩,因此,目标幅度得到提高,取得了一定的抗干扰效果。

(2) 第二种处理方法是限幅

首先获得干扰机数字射频存储器所使用的脉冲的信息,即掌握干扰机是利用前面第几个脉冲来产生干扰信号的;然后使用该脉冲的调频斜率对雷达回波进行距离向匹配压缩,这样,干扰首先被压缩,获得较高增益,雷达回波由于没有匹配,处理后仍为线性调频信号,增益低,这时对场景数据进行限幅,限幅门限通常取为均值的两倍,仿真中则可根据所设置场景和干扰把该门限计算出来;限幅以后,干扰得到了一定程度的抑制,这时对回波使用干扰匹配信号进行逆滤波,得到了干扰被抑制过的“原始数据”,然后在后续正常成像过程中,使用雷达真实匹配信号进行二维匹配压缩,再次获得信干比的提高,其中雷达回波获得的增益要高于干扰。第一次的限幅和第二次的匹配滤波增益之差相联合提供了良好的抗干扰性能。

同时,调频率极性的捷变并没改变信号的方向多普勒特性,干扰信号与雷达真实信号具有相同的多普勒特性,这也是正交信号捷变和随机初相捷变方法之间的区别。对干扰进行二维压缩再限幅的方法获得的增益提高与仅仅进行距离向压缩然后限幅相比,所得抗干扰效果相同。

调频斜率极性捷变和限幅相结合的方法的处理过程如下:

① 捷变调频斜率极性。根据侦察机获得的干扰机转发信息捷变极性,并接收雷达回波信号,则接收信号包含真实回波和干扰信号:

$$r(t) = s(t) + s_j(t) \quad (5)$$

② 匹配干扰信号。即距离压缩,匹配使用的信号根据干扰信号产生,为 $p_j^*(-t)$,匹配过程为:

$$r''(t) = r(t) * p_j^*(-t) = (s(t) + s_j(t)) * p_j^*(-t) \quad (6)$$

③ 限幅。匹配滤波以后,确定门限对匹配压缩后的数据限幅。

④ 逆匹配滤波。不改变匹配信号,进行第二步的逆操作,回到原始回波域。

⑤ 正常成像。此过程包含距离和方位向的二维匹配滤波、距离迁移校正等过程。其中的距离压缩过程可表示为:

$$r''(t) = r'(t) * p_j(t) = r(t) = (s(t) + s_j(t)) * p_j(t) \quad (7)$$

$$r'''(t) = r''(t) * p^*(-t) \quad (8)$$

式中, $p^*(-t)$ 为真实雷达回波匹配信号。

基于调频斜率极性捷变的抗干扰流程如图 1 所示。

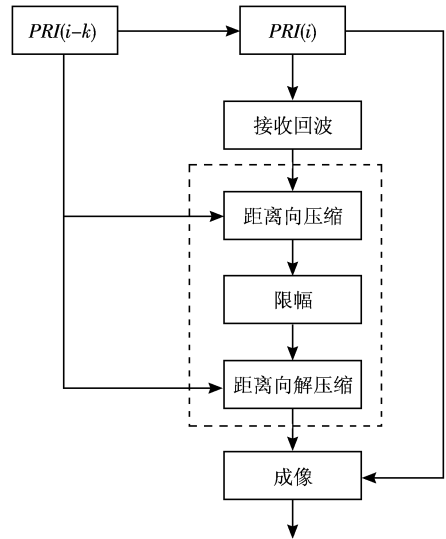


图 1 捷变调频率极性抗干扰流程

Fig 1 Diagram of anti-jamming technique of jittering slope polarity

图 1 中 $PRI(i-k)$ 指干扰机产生转发信号所使用的脉冲,而 $PRI(i)$ 指雷达当前发射脉冲。虚线框内为限幅流程,与不采用极性捷变和采用极性捷变但不限幅这两种方法的不同之处就在此,限幅过程会带来抗干扰性能的提高,而仅仅捷变极性的方法处理流程中没有限幅步骤,从而也就无法通过限幅提高抗干扰性能。

3 仿真实验

3.1 仿真

仿真中,雷达工作于 1GHz 雷达平台,卫星距地面高度为 700km,发射带宽为 50MHz,雷达信号脉

冲调频斜率的极性随机跳变,干扰信号调频斜率总与前一慢时刻雷达发射脉冲保持一致,雷达距离向压缩增益为 25dB,方位向压缩处理增益为 20dB。图 2 为原始目标成像,共有 4 个目标,呈矩形分布。图 3 为受到干扰时的图像,目标已经无法看到,干扰目标显现出来,共有 4 个,呈菱形中心对称分布。各图中纵横坐标均以地面场景中某一固定点为原点。仿真中使用了多个不同的干信比(干扰信号比:JSR)取值,用以证明本方法的性能。

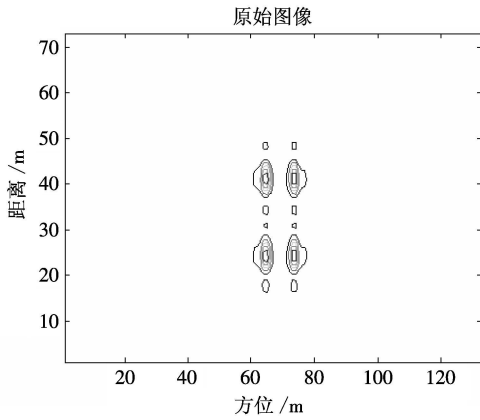


图 2 原始图像
Fig 2 Original image

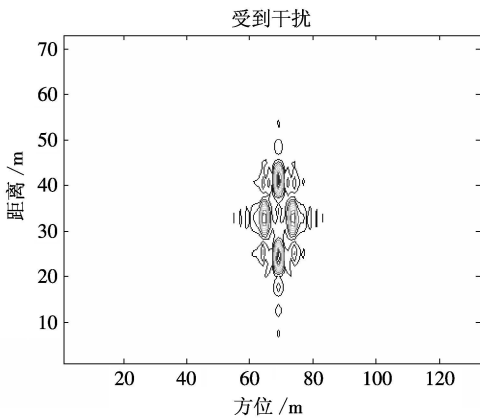


图 3 接收端干信比 35dB
Fig 3 Image with JSR = 35dB

(1) 若采用微调调频斜率的方法,微调量为正负 20%时,可得到如下干扰抑制结果。

调频率微调的方法是指在每个慢时刻采用不同的调频率,每个慢时刻的调频率相对于基准调频率有一个随机微调量,接收端干信比为 35dB 时仿真结果如图 4 所示,目标被干扰淹没,无法检测,这时,降低干信比到 26dB,如图 5 所示。实验证明,若微调量太小,则无法取得理想的抗干扰效果;如果微调

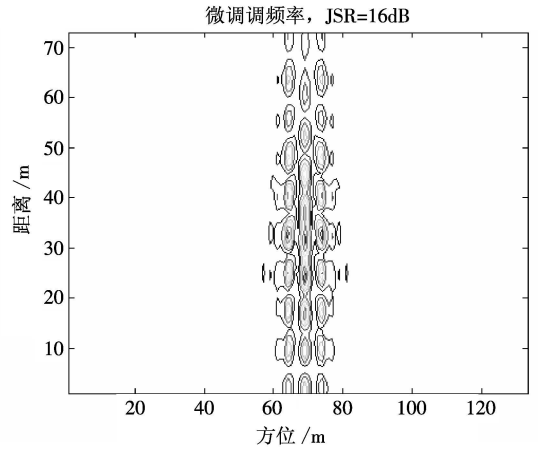


图 4 接收端干信比为 35dB
Fig 4 Changing slope changed slope with JSR = 35dB

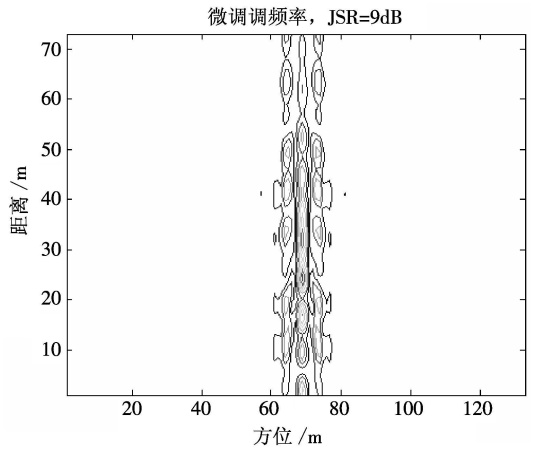


图 5 接收端干信比为 26dB
Fig 5 Changing slope swiftly when JSR = 26dB

量过大,则会导致带宽变化过多,出现能量损失或压缩增益不足的情况。采用调频率微调的方法取得的抗干扰非常有限。

(2) 若使用调频斜率正负极性捷变的方法,又可以根据对接收回波的处理方法的不同而分为两种,一是直接对雷达接收信号使用正确的匹配信号进行成像处理,接收端干信比为 38dB 时,可以得到图 6 所示的抗干扰结果。可见,直接使用雷达信号进行匹配滤波时,由于获得的信干比提高有限,而干扰信号幅度远高于真实雷达回波,因此,真实目标仍然被干扰掩盖。这种方法的抗干扰性能受到接收机端干信比大小的限制。

(3) 限幅处理性能,在干扰信号和雷达信号具有相同调频率极性的条件下,限幅过程所得结果表征着限幅过程所能达到的最差性能,如图 7 所示。

在干扰信号和雷达信号的调频率极性相同时,

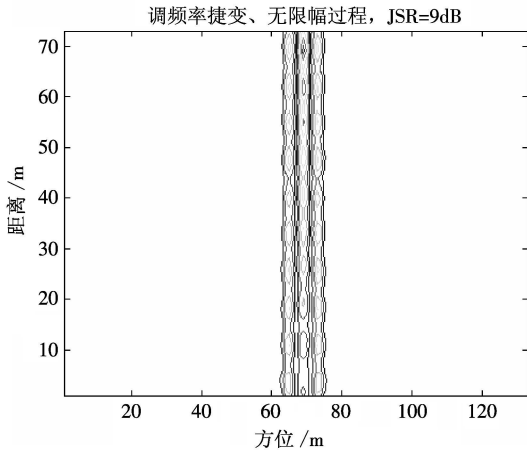


图 6 直接进行匹配滤波

Fig 6 Result of direct match-filtering

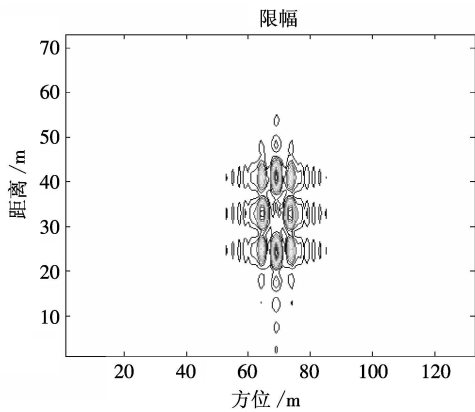


图 7 干扰信号和雷达信号具有相同调频率极性

Fig 7 Jamm ing and Radar signal have the same polarity of chirp rate

距离向匹配压缩后干扰信号幅度仍远高于雷达回波信号幅度,因此,限幅可以被用来抑制干扰。但是与调频率极性相反的情况相比,此时的干扰抑制性能较低。在仿真过程中,由于可较精确地确定门限,因此,可获得理想的干扰抑制比,但实际中得到的性能会有所降低(见图 7),干扰目标的幅度仍远高于真实目标幅度。

(4) 第二种回波处理方法即限幅法,首先对干扰信号匹配滤波,然后在逆滤波之后对真实雷达回波信号进行匹配滤波。

在接收端干信比为 35dB 时,由图 8 可知,使用限幅的方法仍可以抑制干扰,检测到目标,接收端干信比为 38dB 时,限幅法抗干扰结果如图 9 所示,仍然可以通过检测算法将目标检测出来。使用限幅的方法可以获得的信干比提高高于雷达的距离向压缩增益,性能远优于直接进行匹配滤波的结果。

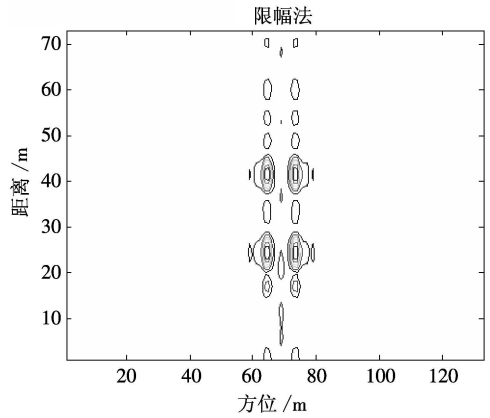


图 8 接收端干信比变为 35dB 时抗干扰结果

Fig 8 Jittering ECCM when JSR =35dB

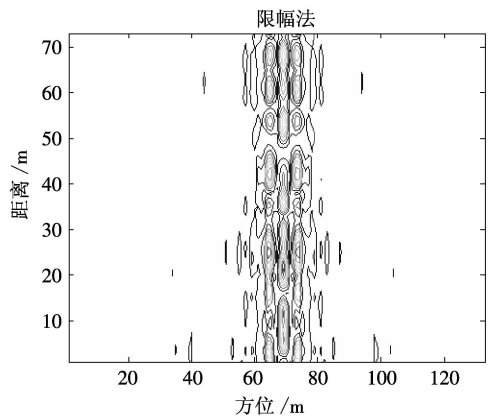


图 9 接收端干信比为 38dB 时抗干扰结果

Fig 9 Jittering ECCM when JSR =38dB

3.2 性能分析

由仿真知:

(1) 采用调频斜率极性正负捷变的方法获得的抗干扰性能远优于微调信号幅度和微调调频率的方法。

(2) 极性捷变和限幅相结合的方法的抗干扰性能优于仅使用极性捷变的方法。通过侦察可以确认干扰使用的是前面某个脉冲,然后在当前脉冲中使用极性相反的调频斜率,即首先使用干扰使用的调频斜率产生信号对干扰进行聚焦,然后限幅,削弱干扰影响,然后做逆匹配滤波,再使用正确的调频斜率信号进行脉冲压缩,从而获得比单纯使用匹配滤波更好的效果;实际中,欺骗干扰机总是转发前一个(或若干个)脉冲内容,因此,根据干扰机转发时使用的脉冲对雷达回波进行匹配滤波,干扰的幅度会在原来的基础上增强,但目标由于失配而无法完成压缩,所以会变得模糊,幅度增加很小,因此,可以使

用限幅过程抑制干扰。

(3) 考虑最坏情况,若无法获得干扰机 DRFM 使用的脉冲信息,则可以通过随机捷变调频率极性获得很高的抗干扰性能。同时,处理过程中信干比的提高程度与系统的距离向处理增益、接收机端干信比的大小有关,距离向处理增益越大,信干比提高程度越高;接收机端干信比越高,限幅处理得到的信干比提高程度越高。

(4) 限幅的方法同样可以用来抑制微调频率斜率干扰,因此,具有较广的应用范围。

4 结 论

采用传统的时、空、频域抗干扰技术已经无法抑制 SAR 系统面临的所有干扰,针对这个问题,本文从系统角度出发,借鉴 SAR 中采用正交信号抑制模糊、增大测绘带的思想,研究了捷变调频率极性与限幅过程相结合的抗干扰方法,获得了良好的抗干扰性能。

参 考 文 献 (References)

- [1] Gerhard Krieger, Hauke Fiedler, Alberto Moreira, Bi- and Multistatic SAR: Potentials and Challenges[A]. EUSAR2004 [C]. Ulm, May 2004.
- [2] GOJW W. Synthetic Radar and Electronic Warfare[M]. Artech House 1989.
- [3] Dumper K, Cooper P S, Wons A F, et al. Spaceborne Synthetic Aperture Radar and Noise Jamming[A]. Radar 97[C]. Oct 14- 16 1997.
- [4] Li W, Liang D, Fang X. Some Jamming Techniques on Multi-Satellite SAR System[A]. EUSAR2004[C]. Ulm, May 2004.
- [5] Wu Y R, Hu D H. A New Noise Jamming Approach to SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(11): 1664- 1667. [吴一戎,胡东辉. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(11): 1664- 1667.]
- [6] Wang S L, Yu L, Ni J L, et al. A Study on the Active Deception Jamming to SAR[J]. Acta Electronic Sinica, 2003, 31(12): 1900- 1903. [王盛利,于立,倪晋麟等. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1900- 1903.]
- [7] Li W, Liang D N, Dong Z. A Study of SAR Deceptive Scene Jamming Technique Based on Bistatic Location[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(4): 53- 56. [李伟,梁甸农,董臻. 基于双站定位的 SAR 场景欺骗干扰技术研究[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(4): 53- 56.]
- [8] Li W, Liang D N, Dong Z. A New Jamming Method on Parasitic Spaceborne SAR System[A]. IGARSS[C], Korea, 2005.
- [9] Hu D H, Wu Y R. The Scatterwave Jamming to SAR[J]. Acta Electronic Sinica, 2002, 30(12): 1882- 1884. [胡东辉,吴一戎. 合成孔径雷达散射波干扰研究[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1882- 1884.]
- [10] Ender J H G. Anti-jamming Adaptive Filtering for SAR Imaging[A]. Proceedings of Int Radar Symp[C]. Germany, 1998.
- [11] W Li, K Zou, Liang D. Anti-jamming Technique Based on Sampling Reconstruction in Parasitic Spaceborne SAR System[A]. IEEE International Radar Meeting[C], 2005.
- [12] Soumekh M. SAR-ECCM Using Phase-Perturbed LFM Chirp Signals and DRFM Repeat Jammer Penalization[A]. International Radar Conference[C]. IEEE, 2005.