

利用双天线干涉检测针对 SAR 的欺骗干扰

李 晨 朱岱寅

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘 要: 该文根据欺骗干扰原理, 将动目标检测技术引入到对欺骗干扰目标的检测中, 提出了沿航迹双天线干涉对消检测欺骗干扰的方法。并在空域对消技术的基础上, 进一步提出了跨航迹双天线干涉对消检测欺骗干扰的方法。文中分别对这两种检测方法中的空域对消技术做了详细的分析, 对检测方法的适用性进行了讨论。最后利用点目标进行了仿真实验, 结果表明这两种方法都能对欺骗干扰目标进行有效的检测与识别。

关键词: 欺骗干扰; 沿航迹干涉; 跨航迹干涉; 空域对消

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1412-04

The Detection of Deception Jamming Against SAR Based on Dual-Aperture Antenna Interferometry

Li Chen Zhu Dai-yin

(College of Information Science and Technology, NUA, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, a deception jamming detection scheme derived from moving target detection is proposed, which is based on dual-aperture antenna along-track interferometric SAR. Another new scheme of deception jamming detection is also investigated on the basis of dual-aperture antenna cross-track interferometric cancellation. Both schemes are discussed respectively on its spatial cancellation algorithm and applicability in detail, and demonstrated effectively with point target simulation in detecting deception jamming.

Key words: Deception jamming; Along-track interferometry; Cross-track interferometry; Spatial cancellation

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种重要的军用侦察设备。现代军队战斗力能否提升, 一个很重要的因素是其是否具有电磁探测、武器控制、通讯和导航等系统。为了降低对方电磁系统的功效, 敌对双方都利用电子干扰手段来达到取胜对方的目的, 并同时采用抗干扰手段保护己方电子设备和系统不被敌方干扰。因此研究 SAR 的抗干扰技术在军事上具有特殊重要的意义。

国内目前研究的比较多的是对 SAR 的有源干扰, 根据干扰效果, 可将有源干扰分为压制性干扰和欺骗性干扰。压制干扰是指利用干扰机施放的大功率干扰信号, 使 SAR 收到的目标回波模糊不清, 或者完全淹没在干扰信号中, 影响 SAR 对地面真实目标成像; 欺骗干扰与压制干扰不同, 它是利用干扰机发射或转发与目标回波信号相似或相同的信号, 以较低的干扰功率使 SAR 得到错误的信息或假目标^[1]。

产生假目标的欺骗干扰有多种方式, 现有的干扰方法有虚假图像干扰^[2]、弹射式干扰^[3, 4]、散射波干扰^[5]等。针对弹射式干扰的抗干扰技术已被提出^[6], 有一定的抑制干扰效果。而对于虚假图像干扰, 现在还未出现有效的抗干扰技术。本文通过对虚假图像干扰方法的研究, 根据欺骗干扰信号产

生机理和欺骗干扰信号多普勒频率的特点, 将动目标检测技术引入到对欺骗干扰目标的检测中, 提出了沿航迹双天线干涉对消检测欺骗干扰的方法。并在空域对消技术的基础上, 进一步提出了跨航迹双天线干涉对消检测欺骗干扰的方法。

文中分别对这两种检测方法中的空域对消技术做了详细的阐述, 通过对对消系数的分析, 对检测方法的适用性进行了讨论。最后利用点目标进行了仿真实验, 结果表明, 这两种方法都能对欺骗干扰目标进行有效的检测与识别。

2 欺骗干扰信号分析

虚假图像干扰是依据 SAR 成像的基本原理, 将干扰机接收到的真实信号加上一定的幅度、延时和多普勒频率产生了干扰信号, 然后将其连同真实信号一起, 由干扰机向 SAR 发射出去。这样 SAR 接收到的回波信号中就含有干扰信号, 干扰信号经一般成像处理后会生成假目标, 假目标将叠加在 SAR 真实图像中, 并可在一定的条件下完全覆盖真实目标, 从而使对方判断失误。在不考虑转发延迟的情况下, 干扰信号与真实信号具有相同的回波相位。

假设干扰机为一点目标(i 点), 它工作的时候要在附近产生一个干扰点目标(j 点), 则 t 时刻, 雷达接收到的干扰回波频域信号为

$$\left. \begin{aligned} S_j(\omega, t) &= \exp[j(\omega - 2\pi f_0)\Delta T_{ij}(t)] S_i(\omega, t) \\ \Delta T_{ji}(t) &= T_j(t) - T_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2005-10-25 收到, 2006-04-13 改回

航空科学基金(05D52027)和国家自然科学基金(60502030)资助课题

其中 $S_i(\omega, t)$ 为干扰机的真实回波频域信号, $T_i(t)$ 和 $T_j(t)$ 分别为 i 点和 j 点的回波延迟, 由图 1 所示几何关系图可得

$$\begin{aligned} \Delta T_{ji}(t) &= \frac{2y_i r + r^2 + a^2 + 2a(x_i - vt)}{cR_i} \\ &= \Delta T_{ji}(t, r) + \Delta T_{ji}(t, a) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $R_i = \sqrt{h^2 + y_i^2}$ 为 i 点与雷达的垂直斜距, $\Delta T_{ji}(t, r) = (2y_i r + r^2)/(cR_i)$ 对应干扰点距离向信息, $\Delta T_{ji}(t, a) = [a^2 + 2a(x_i - vt)]/(cR_i)$ 对应干扰点方位向信息。

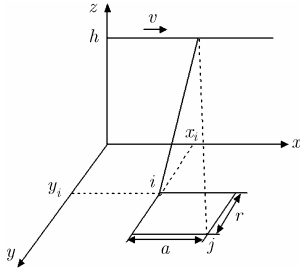


图 1 回波信号几何模型

3 沿航迹双天线干涉检测干扰目标方法

3.1 检测算法

由上节分析, 假设真实回波信号的多普勒频率为 f_{id} , 那么干扰信号的多普勒频率为

$$f_{jd} = f_{id} - f_0 \frac{d\Delta T_{ij}(t)}{dt} = f_{id} + \frac{2av}{\lambda R_i} \quad (3)$$

可见, 若干扰目标在方位向上的偏移量为 a , 那么干扰信号的多普勒频率将比真实信号增加 $2av/(\lambda R_i)$, 多普勒频率的增加量与偏移量成正比。

可以看出, 干扰目标与动目标回波信号相比, 虽然它们形成机理不同, 但它们的多普勒频率与静止真实目标的区别十分相似。径向移动速度引起附加的多普勒频率, 使动目标在 SAR 图像上发生横向走动; 真实目标信号加上附加的多普勒频率, 产生在方位向上有偏移的干扰目标。根据干扰信号的这一特点, 我们将动目标检测方法应用到对干扰目标的检测中。沿航迹双天线的检测算法实现框图如图 2 所示^[7], 其中 W_{mn} 是空域对消的权系数, 空域对消是针对 SAR 图像逐分辨单元进行的。

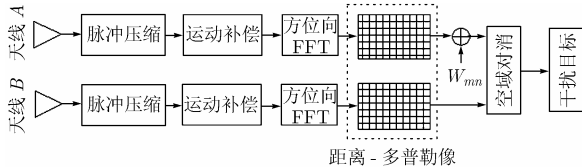


图 2 沿航迹双天线干涉检测算法流程图

3.2 空域对消^[7, 8]

图 3 表示双天线区域成像的几何关系, A, B 为沿航迹放置的两个天线, 其中 B 天线发射、接收信号, 而 A 天线

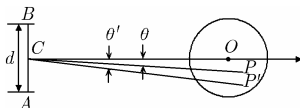


图 3 沿航迹双天线几何关系

只接收信号, 天线间距为 d ; O 为成像区参考点, 位于天线指向上; 成像区域中, 干扰机位于 P 点; 干扰机产生的干扰点位于 P' 点, PC 与 OC 的夹角为 θ 。

这里对回波信号做转台成像处理, SAR 运动补偿分两路进行, 经补偿后 A, B 两路 O 点的回波信号相位都变为零, 所以 A, B 两路 P 点信号回波的相位差为

$$\psi_{AB} = \psi_A - \psi_B = \frac{2\pi}{\lambda}(AP - BP) = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (4)$$

地面上由 P 点回来的信号, 不论是真实的还是干扰的, 其回波信号在 A, B 两路的空域相位差均为式(4)所示。但真实目标在 SAR 图像上的位置是正确的, 而干扰目标在 SAR 图像上发生偏移。图 3 中所示, 干扰机位于 P 点, 其产生的干扰目标在 SAR 图像上出现在 P' 点。

由式(4)是可知, λ, d 一定时, 空域相位差 ψ_{AB} 随方位角 θ (相对于天线指向) 而变。与 θ' 相应的空域相位差为

$$\psi'_{AB} = \psi'_A - \psi'_B = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta' \quad (5)$$

把 A 路 SAR 图像上 P' 点所在分辨单元的信号 S'_A 乘以权系数 $e^{-j\psi'_{AB}}$, 然后减去 B 路 SAR 图像上 P' 点所在分辨单元的信号 S'_B , 得到该分辨单元的空域对消输出为

$$S'_{AB} = S'_A e^{-j\psi'_{AB}} - S'_B \quad (6)$$

权系数由分辨单元的横坐标决定, 而与纵坐标无关。假设单路信号的幅度为 1, 由式(6)可见, 如果 P' 点没有干扰目标, 那么对于 P' 点所在分辨单元只有真实目标信号, 于是 $S'_A = e^{j\psi'_A}$, $S'_B = e^{j\psi'_B}$, 显然 A, B 两路空域对消后输出为零。实际上由于地面为分布目标, 考虑到多路幅相不一致, 真实目标信号不会完全抵消掉。

如果 P' 点有干扰目标, 那么我们看到的 P' 点目标是干扰目标和真实目标的叠加, 由于干扰信号实际在地面上由 P 点处发出, 所以 P' 点所在分辨单元的两路信号分别是, $S'_{Aj} = e^{j\psi'_A} + e^{j\psi'_A}$, $S'_{Bj} = e^{j\psi'_B} + e^{j\psi'_B}$, 可知 A, B 两路空域对消后输出信号不为零, 其中真实目标信号完全抵消掉, 剩下干扰信号未被抵消。

3.3 适用性分析

P' 点分辨单元的信号 A, B 两路空域对消输出信号由式(4), 式(5), 式(6)可得

$$S'_{ABj} = S'_{Aj} e^{-j\psi'_{AB}} - S'_{Bj} = e^{j\psi'_B} [e^{j(\psi_{AB} - \psi'_{AB})} - 1] \quad (7)$$

P' 点分辨单元的信号 A, B 两路空域对消输出信号幅度为

$$|S'_{ABj}| = |e^{j(\psi_{AB} - \psi'_{AB})} - 1| = 2 \left| \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta') \right] \right| \quad (8)$$

如果 C, P, P' 3 点在同一直线上, 即 $\theta = \theta'$, 此时有 $|S'_{ABj}| = 0$, 则该方法不能检测出 P' 点。此时的 P' 点实际上和 P 点是处在同一距离向上的, 由于在方位向上没有偏离, 因而就没有附加的多普勒频率, 所以不能被检测出来。因此, 该方法不能检测位于干扰机距离向上的干扰点。如果干扰机

位于干扰图像中,我们可以根据这一特点确定干扰机所处的方位向位置。

沿航迹双天线干涉检测干扰目标方法来源于动目标检测技术,如果 SAR 图像中有动目标,那么在检测到干扰目标的同时也能检测到动目标,因而有可能把动目标误认为干扰目标。对于为保护动目标而产生的干扰目标,其图像外形与动目标具有可比性,一般情况下不能对其做出正确的检测。但是对于为保护地面真实目标的干扰面目标来说,从图像外形上我们还是能够对动目标与干扰目标进行区分。

4 跨航迹双天线干涉检测干扰目标方法

4.1 检测算法

跨航迹双天线干涉法与沿航迹双天线干涉法的原理是一样的,也是分别对两路天线成像,然后将两幅 SAR 图像进行空域对消。但是跨航迹检测法中的 SAR 成像采用 RD 算法,而且两天线成像的几何关系也有所不同,因而系数数的算法也有不同。跨航迹双天线几何关系如图 4 所示。

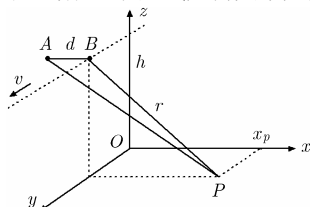


图 4 跨航迹双天线几何关系

坐标系 x 方向为距离向, y 方向为方位向。 P 点为成像区中某一点,其距离向坐标为 x_p 。 A, B 两路天线,沿 y 方向飞行,天线的连线与航迹垂直,天线间距为 d ,图中天线 A, B 位于 P 点的的孔径中心。

令 $AP = R_1$, $BP = R_2$, 则由图示参数和几何关系可知, A, B 两路 P 点信号回波的相位差为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{AB} &= \psi_A - \psi_B = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \\ R_1 - R_2 &\approx \frac{d^2 + 2dx_p}{2r} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由于在成像区域内, r 变化不大,而且天线间距固定不变,所以 A, B 两路信号回波的相位差只与该点在距离向上的坐标 x_p 有关。

4.2 适用性分析

同理,若位于 P 点的干扰机产生了位于 P' 的干扰点,设 P' 点的距离向坐标为 x'_p ,由式(7),式(9)可得 P' 点所在分辨单元对消输出信号为

$$S'_{ABj} = e^{j\psi_B} \left[e^{j\frac{2\pi d}{\lambda r}(x_p - x'_p)} - 1 \right] \quad (10)$$

可见,当 $x'_p \neq x_p$ 时,输出信号不为零;当 $x'_p = x_p$ 时,输出信号为零。即当干扰点与干扰机处在同一方位向时,干扰点与其所在分辨单元的真实目标的相位差相同,对消输出信号为零,干扰点不能被检测出来。因此该方法不能检测位于

干扰机方位向上的干扰点,如果干扰点位于干扰图像中,我们也能根据这一特点确定干扰机所处的距离向位置。另外,考虑到成像地面地势的高低起伏会给跨航迹检测带来不利的影响,跨航迹检测法适用于检测地势起伏较小的成像地面。

5 仿真实验

在仿真实验中,从点目标的角度分别研究了前述两种检测干扰目标方法的可行性。我们设计了一个 3×3 的点阵,点阵的左下角为真实目标即干扰机所处的位置,其余 8 个点均为干扰机产生的干扰点目标。根据不同的检测方法,分别模拟了 A, B 两路天线的真实信号和干扰信号,然后再对其进行检测处理。对消前后的点阵成像图如图 5,图 6 所示。图中横坐标方向为距离向,纵坐标方向为方位向。

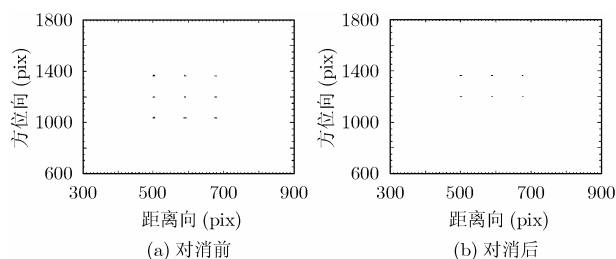


图 5 沿航迹干涉检测法仿真结果

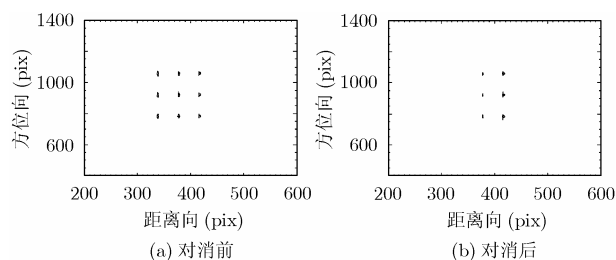


图 6 跨航迹干涉检测法仿真结果

可以看到图 5(b) 中干扰机及其同距离向上的干扰点被对消,图 6(b) 中干扰机及其同方位向的干扰点被对消,而与干扰机既不在同方位向上又不在同距离向上的 4 个干扰点在两种检测方法中均能被检测到。在图 5(b) 和图 6(b) 中均被对消的点就是真实点目标即干扰机,由此我们可以确定干扰点阵中干扰机的位置。实验结果验证了前文对检测方法适用性的分析。

仿真实验中沿航迹检测法的双天线间距 0.14m,为脉冲重复周期内飞机飞行的距离;跨航迹检测法的双天线间距 3m, SAR 图像距离向分辨率 ρ_r 为 2.05m,天线间距在 $\rho_r \sim 2\rho_r$ 内都有一定的对消效果,间距 3m 时的对消效果最好。

对点阵中的第 1 列的点作同方位向的沿航迹检测,对第 3 行的点作同距离向的跨航迹检测。对消前后的点目标归一化功率谱如图 7,图 8 所示,对消前最左边的点是真实目标,其余两点是干扰目标。可以看到两幅原图经对消处理后,与

干扰目标相比,真实点目标的幅度下降 30~40dB,对消效果十分明显,因而可以将干扰点目标识别检测出来。

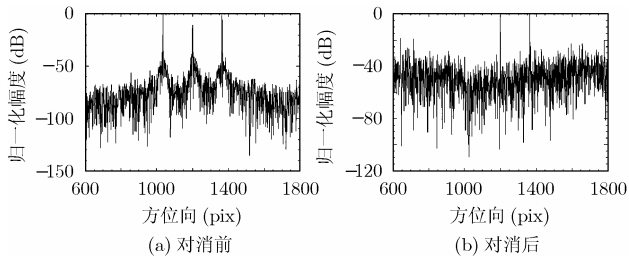


图7 (沿航迹)真实目标所在方位向剖面图

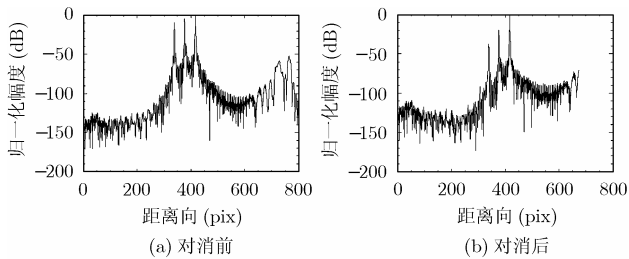


图8 (跨航迹)真实目标所在距离向剖面图

6 结束语

本文通过对虚假图像干扰方法的研究,提出了两种针对虚假图像干扰的干扰检测方法。基于文中对这两种方法适用性的分析,可做出如下小结。(1)对于干扰检测方来说,在实际中可将两种方法结合起来,以提高欺骗干扰目标检测的准确率,在一定情况下还可以确定干扰机的位置;然而对于干扰方,在设计面积比较大的干扰图像时,应尽量避免使干扰机处于干扰图像之中,并提高干扰机的发射功率,以掩盖地面真实目标,使对方雷达不能对地面目标成像。(2)干扰信号对消后的幅度同干扰机与干扰点的相对位置有关,在跨航迹检测法中比较明显。由图8(b)可以看出,干扰点离干扰机越远,对消后的干扰信号幅度越大。因此,干扰方在设计面积比较小的干扰图像时,应该尽量使干扰图像出现在干扰机的附近,以降低小面积干扰目标被检测到的风险。(3)沿航迹检测法的提出主要利用了干扰信号附加的多普勒频率。对于其他的欺骗干扰方法,如果干扰信号与真实信号相比也有附加的多普勒频率,也可以利用沿航迹检测法对其进行检测,例如弹射式干扰。

由于虚假图像欺骗干扰信号与真实回波信号相似,经过成像处理后能够取得很高的增益,与噪声信号的处理增益相比要高出很多,因而本文仅从干扰检测方的角度,研究如何对 SAR 图像中的干扰目标进行检测,进行对消处理的是两路天线的复数 SAR 图像。在实际应用中,还需要根据具体情况考虑噪声对检测的影响,我们将在以后的工作中进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 刘玉山, 许创杰. 雷达对抗及反对抗. 北京: 电子工业出版社, 1996: 42-45.
- [2] 王盛利, 于立, 倪晋麟, 张光义. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究. 电子学报, 2003, 31(11): 1900-1902.
Wang Sheng-li, Yu li, Ni Jin-lin, and Zhang Guang-yi. A study on the active deception jamming to SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(11): 1900-1902.
- [3] 甘荣兵, 王建国, 何川. 对合成孔径雷达的弹射式干扰性能分析. 信号处理, 2003, 19(增刊): 382-385.
- [4] 甘荣兵, 王建国, 何川. 一种改进的对 SAR 的弹射式干扰方式. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 256-258.
Gan Rong-bing, Wang Jian-guo, and He Chuan. An Improved Rebound Jamming to SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(2): 256-258.
- [5] 胡东辉, 吴一戎. 合成孔径雷达散射波干扰研究. 电子学报, 2002, 30(12): 1882-1883.
Hu dong-hui, Wu Yi-rong. The scatter-wave jamming to SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(12): 1882-1883.
- [6] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双路对消抑制合成孔径雷达的弹射式干扰. 信号处理, 2005, 21(1): 27-30.
- [7] 陈瑞岳. 机载雷达地面动目标指示技术研究. [硕士学位论文], 南京: 南京航空航天大学, 2000.
- [8] 朱岱寅, 朱兆达. 机载干涉 SAR/ISAR 对地面慢速目标成像研究. 电子与信息学报, 2003, 25(5): 585-591.
Zhu Dai-yan and Zhu Zhao-da. Studies of ground slow-moving target imaging by airborne interferometric SAR/ISAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(5): 585-591.

李 晨: 女, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

朱岱寅: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为雷达工程、雷达信号处理。