

## 一种新的无源压制性 SAR 干扰方法

孙光才 白雪茹 周峰 邢孟道 保铮  
(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文针对 SAR 成像的特性, 提出了一种基于旋转角反射器的无源 SAR 压制性干扰新方法, 该方法利用旋转角反射器所产生的微多普勒调制, 在方位上形成干扰条带, 利用旋转角反射器的排列形成距离向压制干扰, 这样可以有效地遮盖所保护的目标。同时, 文中详细地论述旋转角反射器关键参数的选择方法, 并在此基础上提出一种最佳旋转角反射器布阵方案。仿真和实测数据的处理结果证明该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 旋转角反射器; 微多普勒调制; 压制性干扰

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)03-0610-04

## A New Passive Barrage Jamming Method for SAR

Sun Guang-cai Bai Xue-ru Zhou Feng Xing Meng-dao Bao Zheng  
(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the character of SAR imaging procedure, this paper proposes a new passive SAR barrage jamming approach, utilizing the rotating angular reflectors. This method makes use of micro-Doppler modulation induced by rotating angle reflectors in order to form jamming strips along azimuth and arrays of rotating angle reflectors to interfere SAR imaging in the range direction. Then, the targets can be covered effectively. In addition, the selection of the key parameter of the rotating angular reflectors is discussed in detail, and then a project of reflectors array is proposed. The results for both simulated and experimental data have proved the validity of this method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR); Rotating angular reflector; Micro-Doppler modulation; Barrage jamming

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)成像具有全天时、全天候、远距离和宽绘制带等优点, 它可以大大地提高雷达的信息获取能力。如何保护己方目标不受敌方的 SAR 识别和提高己方 SAR 的抗干扰能力, 是目前从事干扰技术研究和 SAR 成像技术研究的重要课题<sup>[1,2]</sup>。

所谓 SAR 的压制性干扰是指用类噪声或宽带干扰信号遮盖或淹没有用信号, 阻止雷达检测目标信息<sup>[3]</sup>。压制性干扰可以分为有源压制性干扰和无源压制性干扰<sup>[4]</sup>。一般的有源压制性干扰很难有效, 而瞄准式有源压制性干扰在电子侦察的协作下可以分析出 SAR 的信号形式, 然后对 SAR 雷达信号进行全频段干扰, 利用目标和平台之间信息, 进行相干压制性干扰。无源压制性干扰往往是利用角反射器或者锡箔条等雷达散射截面较大的干扰目标放置在重要目标的周围, 使重要目标隐藏在强干扰目标的旁瓣中, 从而达到了 SAR 干扰的目的。相对于瞄准式有源压制性干扰, 无源压制性干扰不需要电子侦察手段的辅助, 也无需知道目标和平台

之间的精确相对运动信息, 因此, 该方法的实现比较容易, 干扰比较有效。但是传统的无源压制性干扰会遇到抗干扰信号处理和干扰覆盖有限的难题, 对于角反射器的干扰可以通过数字聚集等方法进行抑制<sup>[5]</sup>, 即对 SAR 数据进行两维解线频调处理, 然后滤除强干扰频率即可恢复干扰所覆盖的目标。并且若保护大范围的目标, 传统方法需要的无源设备比较多。本文提出了一种无源压制性干扰的新方法, 它只需要具有强散射特性的旋转角反射器组成反射器阵就可以在 SAR 图像中对大片区域进行压制性干扰。同时, 本文在研究该方法可行性的基础上, 分析了实施该种干扰的有效方案。这在 SAR 对抗工程应用中具有一定的参考价值。

### 2 SAR 成像原理和干扰信号模型

SAR 成像的几何模型如图 1 所示, 雷达平台的运动速度为  $v$ , 斜视角为  $\theta_0$ , 合成孔径中心位置为  $x_c$ , 慢时间为  $t_m$ , 并以与雷达航迹平行的场景中心线为  $x$  轴, 垂直方向为  $y$  轴, 场景中心为  $O$  点建立坐标。  $(x_0, y_0)$  为场景中任意一目标点,  $R_b$  为雷达航线到场景点  $(x_0, y_0)$  的最近距离。

由图 1 可知道, 在  $t_m$  时刻, 目标点  $(x_0, y_0)$  到天线相位中心的瞬时斜距可以表示为

$$R_m = \sqrt{R_b^2 + (x_0 - x_c - vt_m)^2} \quad (1)$$

利用泰勒公式对上式展开,并忽略三次以上相位项,可以得到

$$R_m \approx R_0 - \sin \theta_0 vt_m + \frac{(vt_m)^2 \cos^2 \theta_0}{2R_0} + \frac{(vt_m)^3 \sin \theta_0 \cos^2 \theta_0}{2R_0^2} \quad (2)$$

其中  $X = x_0 - x_c$ ,  $R_0 = \sqrt{R_b^2 + X^2}$ ,  $\sin \theta_0 = X/R_0$ 。在已知雷达的发射信号和雷达平台的运动参数,经过距离向和方位向匹配滤波处理,场景中的该点能很好地聚焦在所在的位置。

但是若场景中的点  $(x_0, y_0)$  处存在旋转的角反射器时,图像中就会出现干扰,严重的会使真实的目标点被掩盖,甚至整个图像都会受到影响。若场景点  $(x_0, y_0)$  处存在旋转角反射器,其几何关系如图 2。若旋转角反射器的半径为  $r$ , 旋转角速度为  $\omega$ , 起始角度为  $\eta_0$ , 那么在  $t_m$  时刻,角反射器的坐标位置为  $(x_0 + r \cos(\eta_0 + \omega t_m), y_0 + r \sin(\eta_0 + \omega t_m))$ , 考虑到角反射器半径较小,对应的瞬时斜距为

$$\begin{aligned} R_m &= \sqrt{(R_b + r \sin(\eta_0 + \omega t_m))^2 + (X + r \cos(\eta_0 + \omega t_m) - vt_m)^2} \\ &\approx R_0 - \frac{Xvt_m + r \cos(\eta_0 + \omega t_m)vt_m}{R_0} + \frac{(vt_m)^2 \cos^2 \theta_0}{2R_0} + \\ &\quad \frac{(vt_m)^3 \sin \theta_0 \cos^2 \theta_0}{2R_0^2} + \frac{R_b r \sin(\eta_0 + \omega t_m) + Xr \cos(\eta_0 + \omega t_m)}{R_0} \\ &\quad + \frac{r^2}{2R_0} \end{aligned} \quad (3)$$

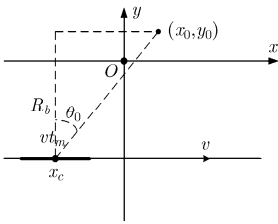


图 1 静止点目标的 SAR 成像几何模型

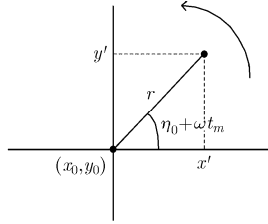


图 2 旋转角反射器的几何关系

其中第 1 项为常数项,它与式(2)中的第 1 项相同;第 2 项为慢时间  $t_m$  的一次项,它比式(2)中的第 2 项多了一项  $-r \cos(\eta_0 + \omega t)vt_m/R_0$ , 当角反射器的旋转半径尺寸较小时(分米级以下),上式的值较半个波长要小得多,其导致的相位误差远小于  $\pi/16$ , 该项可以忽略;式(3)中的最后一项同样因为较半波长小得多,可以忽略;第 3、4 项与式(2)中的第 3、4 项相同;式(3)较式(2)主要多出第 5 项,这一项可以简化为式(4)

$$\begin{aligned} &\frac{R_b r \sin(\eta_0 + \omega t) + Xr \cos(\eta_0 + \omega t)}{R_0} \\ &= r \sin(\eta_0 + \theta_0 + \omega t) = r \sin(\eta'_0 + \omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\eta'_0 = \eta_0 + \theta_0$ , 这一项的物理意义在于,旋转角反射器的旋转量在斜距上的分量会引起斜距的微变,使方位向产生频率调制。在应用成像算法后,存在旋转角反射器的像素点会在方位向存在散焦,形成干扰条带,下一节将主要论述这

一内容。

### 3 旋转角反射器的微多普勒调制实现无源压制性干扰原理

为了研究旋转角反射器的旋转项  $r \sin(\eta'_0 + \omega t)$  所引起的相位扰动,在此暂时称其为扰动项。本节将研究扰动项的相位信号特性以及如何将它应用到 SAR 干扰中。在此,分析式(4)所引起的相位误差

$$\Delta \varphi = -4\pi r \sin(\eta'_0 + \omega t)/\lambda = -2\pi B \sin(\eta'_0 + \omega t) \quad (5)$$

式中  $B = 2r/\lambda = r/(\lambda/2)$ ,  $B$  的含义是角反射器与半波长的可比关系,并称其为角反射器的尺寸影响因子。接下来我们对相位项  $e^{j\Delta \varphi}$  进行展开,采用第一类 Bessel 函数<sup>[6]</sup>对其进行展开,可以得到如下式

$$\exp\{-j2\pi B \sin(\eta'_0 + \omega t)\} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(B) \exp\{-jk\omega t\} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} J_k(B) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(j(k\tau - 2\pi B \sin(\eta'_0 + \tau))) d\tau \\ &= \exp(-jk\eta'_0) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi+\eta'_0}^{\pi+\eta'_0} \exp(j(k\tau - 2\pi B \sin(\tau))) d\tau \\ &= \exp(-jk\eta'_0) J'_k(B) \end{aligned} \quad (7)$$

$$J'_k(B) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(j(k\tau - 2\pi B \sin \tau)) d\tau \quad (8)$$

$$J'_{-k}(B) = (-1)^k J'_k(B) \quad (9)$$

因为  $\eta'_0$  是初始转角,可暂时不考虑它的影响。从式(6)可以看出,扰动相位被展开为一系列的单频信号。此时旋转角反射器的方位向信号在距离向处理和相位中心校正以后可以表示为

$$\begin{aligned} s(t_m) &= A_a g(t_m) \exp(-j\varphi_0 - j\pi\gamma t_m^2) \\ &\quad \cdot \sum_{k=-k_m/2}^{k_m/2} J_k(B) \exp\{-jk\omega t_m\} \end{aligned} \quad (10)$$

方位维信号聚焦后可以表示为

$$s(t_m) = \sum_{k=-k_m/2}^{k_m/2} A_k \operatorname{sinc}\left(t_m + \frac{k\omega}{2\pi\gamma}\right) \quad (11)$$

其中  $A_k$  为方位维匹配滤波后的系数,  $\gamma = 2v^2 \cos^2 \theta_0 / \lambda R_0$  为多普勒调频率。式(11)中的一组 Sinc 函数为一簇窄脉冲信号,这意味着 SAR 图像将在方位向存在干扰条带。为研究干扰的严重程度,在此作出  $J'_k(B)$  随参数  $k$ ,  $B$  的变化图。图 3 反映了  $J'_k(B)$  关于参数  $k$  和  $B$  的幅值变化情况,其中图 3(b) 是图 3(a) 的横向归一化的图。从图中可以看出,对特定的旋转角反射器的尺度影响因子  $B$ , 功率谱的延伸情况为  $k_m = 12B$  (考虑到双边情况),  $k_m$  表示谱散开的最大频点位置;而且  $B$  越大,功率谱散布的越严重,但是幅值越小。基于此我们可以布置角反射器阵列,对 SAR 进行压制性干扰。

### 4 旋转角反射器的参数及阵形分析

上节论述了旋转角反射器的干扰原理,本节将对旋转角反射器应用于实际情况的参数进行分析。先从较小的场景入

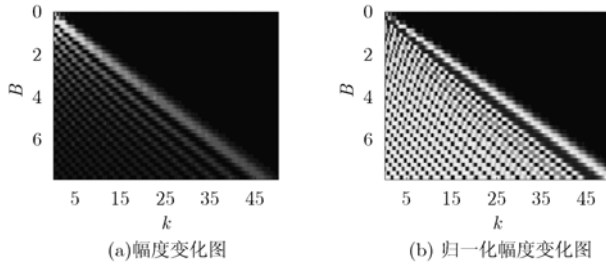


图3  $J'_k(B)$  随参数  $k$  和  $B$  的幅度变化图阵的几何位置示意图

手, 下面从频域进行推导, 此推导建立在方位向 Dechirp 处理<sup>[7]</sup>的基础上。

对于旋转角反射器所产生的扰动相位项, 由式(11)可知

$$\Delta f_{\text{distr}} = k_m \omega / (2\pi) \quad (12)$$

将  $k_m = 12B$ ,  $B = 2r/\lambda$  代入其中, 可以得到

$$\Delta f_{\text{distr}} = 12r\omega / (\pi\lambda) \quad (13)$$

由于此项表示的扰动相位项是 SAR 图像的干扰范围,  $\Delta f_d$  为 SAR 成像的有效带宽。在此定义方位向孔径覆盖率为  $m\%$ , 那么就可以得到下式

$$\Delta f_{\text{distr}} = \Delta f_d m\% \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)中, 整理后得到

$$r\omega = \frac{\Delta f_d \lambda \pi}{12} m\% \quad (15)$$

式(15)的意义在于, 它提供了对旋转角反射器的实际参数选择的标准。结合式(6)可知, 角反射器旋转半径  $r$  不宜过大, 不然成本会提高; 角速度也不宜过高, 不然干扰峰值就会在几个相对离散的地方出现, 容易被对方提取出来, 从而重现被隐藏的目标。因此在实际的选择过程当中, 要综合考虑场景的覆盖率和目标的重要性, 选择合适的参数, 使对方受到干扰的同时自身的成本也较低。

上面是从多普勒域进行分析的, 它是建立在方位向 Dechirp 处理上。下面从时域进行分析, 显然这种分析要复杂一些, 但是由于 SAR 方位信号具有时频对称性, 两者的分析结果应该是一样的。采用方位向匹配脉压后, 具有频率为  $f_0$  的单频扰动信号被聚焦在  $t_0 = f_0/\gamma$  处, 其中  $\gamma = 2v^2 \cdot \cos^2 \theta_0 / (\lambda R_0)$ , 由于相位扰动项的最大覆盖范围为  $f_{0\text{max}} = k_m \omega / (2\pi)$ , 将  $k_m = 12B$ ,  $B = 2r/\lambda$  代入其中可以得到扰动项在时域中的干扰范围为

$$\Delta t_m = \frac{12r\omega}{\pi\lambda\gamma} \quad (16)$$

在此同样可以定义孔径覆盖率为  $m\%$ , 它在时域的意义为

$$m\% = \Delta t_m / T_a \quad (17)$$

其中  $T_a$  表示 SAR 的合成孔径时间, 经过整理可以有

$$m\% = \frac{12r\omega}{\pi\lambda\Delta f_d} \quad (18)$$

式(18)与式(15)是一致的, 这体现了 SAR 的时频对称性。式(18)是时域分析的结果, 它们对于大场景也是成立的。

为了实现对多方向的 SAR 侦察进行压制性干扰, 我们

可以采用角反射器阵列来实现。如图4所示提出了一种阵列, 它借用了棋盘上棋子所列的阵势, 可以实现角反射器的最少化。虚线为分辨单元网格, 黑点为角反射器, 这种布置能对8个方向的侦察进行干扰对抗, 因此是典型的八卦阵列。这样就形成了距离向依靠布阵, 方位向依靠旋转角反射器进行压制性干扰的体制。在实际应用中, 角反射器的 RSC 远高于场景点, 可以用5, 6个分辨单元为基础布阵。

## 5 仿真数据与实测数据处理结果及其分析

在仿真数据中 SAR 雷达工作在正侧视, SAR 到场景中心的最短距离为 8km, 载机速度为 100m/s, 发射信号带宽为 180MHz, 信号脉宽为 10 $\mu$ s, 重复频率为 400Hz, 波长为 0.0313m。

如图5所示, “o”代表目标, “\*”表示旋转的角反射器, 从上到下角反射器的编号为6-1, 表1给出了它们的半径。从表中可以看出, 从上到下半径依次增大。角反射器的旋转速度为  $\omega = 5\pi$ , 旋转角反射器的散射系数为目标散射系数的100倍。

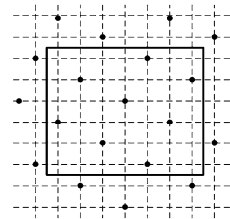


图4 全向干扰的旋转角反射器布阵示意图的几何位置示意图

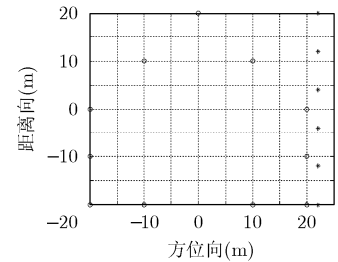


图5 仿真目标和旋转角反射器的几何位置示意图

表1 角反射器的尺寸

角反射器 标号	1	2	3	4	5	6
半径(m)	0.2	0.1	0.05	0.025	0.0125	0.00625

图6为仿真数据的成像结果, 由于旋转角反射器的多普勒调制, 它们在方位向产生了干扰条带, 目标点完全淹没在干扰之中。并从第4个角反射器的散布情况来看, 它的覆盖率正好与式(13)相符合。(此仿真的  $\Delta f_d = 233.4564\text{Hz}$ ,  $m\% = 20.56\%$ , 仿真覆盖率结果为  $m'\% \approx 21.63\%$ )。而和其在同一个距离单元上的目标也正好被覆盖了。同时, 考虑到干扰峰值被滤去的情况, 图7为数字聚焦处理后的结果, 图中虽然部分强干扰被抑制了, 但是干扰带还依然存在, 从该图中可以看出, 目标仍然被淹没于干扰中, 很难分辨。因此, 本文所提出的无源压制性干扰方法很难利用干扰抑制方法消除, 并且若各个旋转角反射器的转速不同, 该干扰更难以抑制。

图8为某次机载 SAR 试验中所录取的机场实测数据。

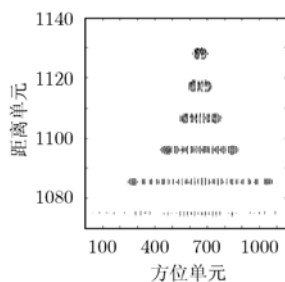


图6 仿真数据 SAR 成像结果

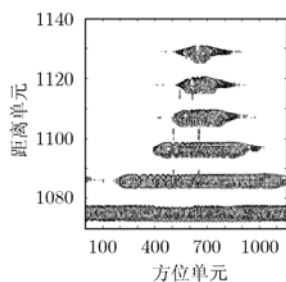


图7 数字聚焦处理后的结果

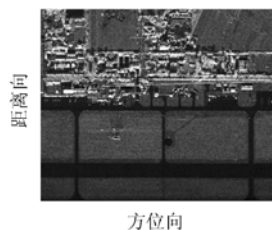


图8 某机场 SAR 成像结果

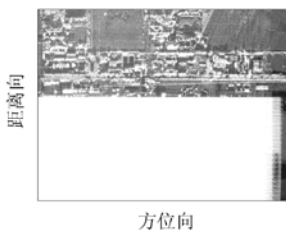


图9 旋转角反射器的干扰结果

图9为旋转角反射器沿距离向摆列的干扰 SAR 图像,从该图中可以看出旋转角反射器完全遮盖了机场的重要信息。图9的角反射器间隔为5m,实际应用中还可以减小间隔,设置不同的角反射器的参数,摆成有效干扰阵列,对敌方 SAR 感兴趣的重点区域进行遮盖。

## 6 结束语

本文从 SAR 成像的信号模型出发,分析了旋转角反射器在 SAR 成像中的特性,说明了旋转角反射器所产生的微多普勒效应在方位向可以形成有效的干扰带。并且文中通过详细的分析给出了旋转角反射器的参数选择准则以及最佳的全向干扰角反射器阵形。同时仿真和实测数据处理的结果证实了本文所提方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 李兵, 洪文. 合成孔径雷达噪声干扰研究[J]. 电子学报, 2005, 32(12): 2035-2037.  
Li Bing and Hong Wen. Study of noise jamming to SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 32(12): 2035-2037.
  - [2] 邹猛. 对合成孔径雷达的干扰样式及功率分析[J]. 电子对抗技术, 2005, 20(6): 21-23.
  - [3] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999, 第6章.
  - [4] 刘明敬, 谢辉程. 对合成孔径雷达的干扰技术研究[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2006, 16(3): 8-10.
  - [5] 邹鲲, 李伟, 梁甸农. SAR 系统抗点源干扰算法[J]. 现代雷达, 2005, 27(11): 1-3.  
Zou Kun, Li Wei, and Liang Dian-nong. Point-source jamming suppression algorithm for SAR system. *Modern Radar*, 2005, 27(11): 1-3.
  - [6] 严镇军. 数学物理方程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002: 82-123.
  - [7] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1824-1828.  
Xing Meng-dao and Bao Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(12): 1824-1828.
- 孙光才: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像及其干扰研究。  
白雪茹: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为 ISAR 成像及其干扰研究。  
周峰: 男, 1980年生, 讲师, 研究方向为雷达成像及其干扰研究。  
邢孟道: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和模式识别等。  
保铮: 男, 1927年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 中国电子学会会士, 研究方向为雷达系统和现代信号处理等。