

合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究

王盛利^{1,2}, 于 立², 倪晋麟², 张光义²

(1. 西安电子科技大学, 陕西西安 710071; 2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

摘 要: 本文根据 SAR 成像原理和地面回波信号模型, 提出了对 SAR 进行有源欺骗干扰的方法. 文中详细地讨论了有源干扰的基本原理, 分析了干扰信号模型, 并用实际 SAR 数据进行了仿真实验, 欺骗图像成功加到了真实 SAR 图像中.

关键词: SAR; 有源欺骗; 干扰; 多普勒

中图分类号: TN957. 52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1900-03

A Study on the Active Deception Jamming to SAR

WANG Sheng-li^{1,2}, YU Li², NI Jin-lin², ZHANG Guang-yi²

(1. Xidian University Xi'an, Shaanxi 710071, China; 2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

Abstract: In this paper, a method of the active deception jamming to SAR is proposed depending on the principle of SAR and the model of ground echo. The basic principle of the SAR active deception jamming and the model of the jamming signal are discussed, and the simulations on the real SAR data are made. The result is the deception figure displaying on SAR figure.

Key words: SAR radar; active deceive; jam; doppler

1 引言

从海湾战争和科索沃战争中可以看到, 合成孔径雷达 (SAR) 在军事领域越来越重要, 如何保卫地面重要目标不被对方合成孔径雷达 (SAR) 侦察到已成为目前从事干扰技术研究的一个重要领域. SAR 的对抗 (ECM) 与反对抗 (ECCM) 是电子战 (EW) 中的一个重要内容. 已有相关的专著^[1]和文章^[2]介绍合成孔径雷达对抗问题.

对合成孔径雷达的干扰可分为无源干扰和有源干扰. 无源干扰有: (1) 反 SAR 雷达的伪装网, 它可在一定程度上降低目标的显著性; (2) 角反射器, 它可形成强反射点目标. 对合成孔径雷达的有源干扰有: 噪声干扰和欺骗干扰.

从干扰进入雷达的途径来分, 有: (1) 从雷达天线主瓣进入雷达接收机; (2) 从雷达天线副瓣进入雷达接收机.

由于雷达天线主瓣角度有限, 且雷达在作合成孔径飞行时, 雷达的波束以一固定角度照射地面, 那么对于某一部干扰设备来说, 能从主瓣进入雷达的时间较短, 其大部分时间是从雷达天线副瓣进入雷达接收机. 当 SAR 欺骗干扰机位于 SAR 的成像带宽内时, 可产生从 SAR 天线主瓣进入的干扰, 否则, 只能从 SAR 天线副瓣进入.

本文讨论的目的是希望依据 SAR 成像的基本原理, 合成假目标数据, 当接收到 SAR 雷达发射信号时, 将合成的数据应答发射给 SAR 雷达, 使 SAR 雷达真实回波数据中混合有假

目标数据, 经一般 SAR 成像处理, 在 SAR 图像中形成假目标, 并可在一定条件下完全覆盖原地面真实目标或场景, 掩盖真实目标的存在.

2 SAR的回波信号模型

这里以机载 SAR 为例, 假设雷达平台距地面高度 h_0 为, 运动速度为 v_0 , 雷达平台沿 X 轴飞行, 地面上雷达波束内第 i 个点的坐标为 (x_i, y_i) , 如图 1 所示. 在 t 时刻, 此点与雷达之间的距离可表示为: $R_i^2(t) = h_0^2 + y_i^2 + (x_i - v_0 t)^2$, 若: $R_i^2(x_i, y_i) = h_0^2 + y_i^2 + x_i^2$

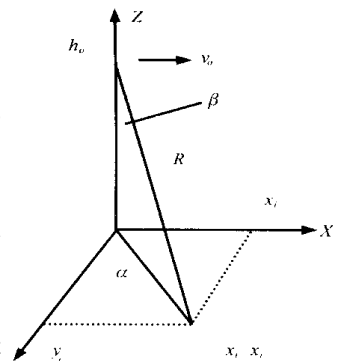


图 1

则有:

$$R_i^2(t) \cong R_i(x_i, y_i) - \frac{x_i v_0 t}{R_i(x_i, y_i)} + \frac{(v_0 t)^2}{2 R_i(x_i, y_i)} \left[1 - \frac{x_i^2}{R_i^2(x_i, y_i)} \right]$$

在正侧视条件下, 一般 $\frac{x_i^2}{2 R_i(x_i, y_i)} \ll 1$, 那么此点对雷达回波的延时为:

$$T_i(t) = \frac{2R_i(x_i, y_i)}{C} - \frac{2x_i v_a t}{CR_i(x_i, y_i)} + \frac{(v_a t)^2}{CR_i(x_i, y_i)} \quad (1)$$

若 SAR 发射的线性调频信号:

$$s(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \exp(j\pi K t^2) g(t) \quad (2)$$

式中 f_0 为发射信号载频, K 为信号的线性调频率, $g(t)$ 为门函数.

接收到的信号经下混去掉载频后, 信号复包络为:

$$s(t) = \exp(j\pi K t^2) g(t) \quad (3)$$

则雷达接收到地面该点的回波信号可为:

$$i(t) = A_i \exp(-j2\pi f_0 T_i(t)) \exp(j\pi K (t - T_i(t))^2) \cdot g(t - T_i(t)) \quad (4)$$

由于 SAR 接收的地面回波是许多点组成的, 故雷达接收到的地面回波模型可以表达为:

$$i(t) = \sum_i A_i \exp(-j2\pi f_0 T_i(t)) \exp(j\pi K (t - T_i(t))^2) \cdot g(t - T_i(t)) \quad (5)$$

若式(3)的傅里叶变换谱表示为 $S(f)$, 则式(4)可以表达为:

$$X_i(f, t) = A_i \exp(-j2\pi f_0 T_i(t)) \exp(j\pi K T_i(t)) S(f) \quad (6)$$

即: $X_i(f, t) = A_i \exp\left[-j2\pi f_0 T_i(t)\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_i(t)}{f}\right) S(f)$

式(5)的傅里叶变换为:

$$X_i(f, t) = S(f) \sum_i A_i \exp\left[-j2\pi f_0 T_i(t)\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_i(t)}{f}\right) \quad (7)$$

将式(1)代入, 有

$$X(f, t) = S(f) \sum_i A_i \exp\left\{-j2\pi \left[\frac{2R_i(x_i, y_i)}{C} - \frac{2x_i v_a t}{CR_i(x_i, y_i)} + \frac{(v_a t)^2}{CR_i(x_i, y_i)}\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_i(t)}{f}\right)\right\} \quad (8)$$

从上式中, 雷达回波中某点在一帧信号的频谱中, 表现为谱的相位随时间 t 变化. 信号谱的相位随时间 t 变化是方位向成像的基础, 它与雷达所发射的信号波形无关.

在上式中令:

$$X(f, t) = S(f) H(f, t) \quad (9)$$

式中:

$$H(f, t) = \sum_i A_i \exp\left\{-j2\pi \left[\frac{2R_i(x_i, y_i)}{C} - \frac{2x_i v_a t}{CR_i(x_i, y_i)} + \frac{(v_a t)^2}{CR_i(x_i, y_i)}\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_i(t)}{f}\right)\right\} \quad (10)$$

在式(10)中包含任意点目标的延时及其多普勒频率, 它与雷达发射的信号复包络形式无关, 它为地面对雷达信号的响应函数. 在一帧 SAR 图像中, 任意一点目标的距离像在上式中的 $\frac{2R_i(x_i, y_i)}{C}$ 是一与时间 t 无关的固定相位, 其相位值的大小与雷达发射信号的波长和距离有关. 决定其方位向定位的多普勒频率与距离、平台的运动速度、雷达发射信号的波长和时间都有关, 这些对 SAR 来说, 都是已知的, 故可以聚焦成像.

3 欺骗干扰原理

对 SAR 的欺骗干扰的目的是要在 SAR 的图像中形成虚假目标, 由于每一个点对应着一定的反射强度、延时和多普勒

频率, 则 SAR 干扰机必须针对每一个点产生对应的反射强度、延时和多普勒频率, 否则不能形成欺骗目标, 达不到欺骗的目的.

式(5)表明 SAR 的回波信号为雷达发射信号以不同地面反射强度加上不同的延时和多普勒频率混合而成, 故首先想到的 SAR 的欺骗干扰方法是 SAR 欺骗干扰机接收到 SAR 发射信号后, 对信号加上不同的幅度、延时和多普勒频率, 然后再发射, 但这种方法很难实现. 这是由于要合成的点很多, 每一个点都要加上幅度, 时间延时和多普勒频率, 而 SAR 所发射脉冲的时间间隔不允许做海量运算, 只能寻找其它方法来实现.

SAR 欺骗干扰机相对于 SAR 来说, 是一点目标, 当它不进行干扰时, SAR 所接收到此点的信号可以表示为:

$$i(t) = A_o \exp(-j2\pi f_0 T_o(t)) \exp(j\pi K (t - T_o(t))^2) \cdot g(t - T_o(t)) \quad (11)$$

它的频谱可以表示为:

$$X_o(f, t) = S(f) A_o \exp\left[-j2\pi f_0 T_o(t)\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_o(t)}{f}\right) \quad (12)$$

我们所设计的 SAR 欺骗干扰机可以看作是对式(12)响应的一个系统, 若这系统的响应函数为 $H_o(f, t)$, 则 SAR 接收到的干扰信号 $Y_o(f, t)$ 为:

$$Y_o(f, t) = X_o(f, t) H_o(f, t) \quad (13)$$

SAR 所接收到的信号为式(7)所表示的地面回波和式(13)SAR 欺骗干扰机所发射信号之和, 即:

$$Y(f, t) = X(f, t) + Y_o(f, t) \quad (14)$$

从这里我们可以明显看出来, 此时 SAR 图像不再仅仅是地面真实目标的图, 还存在欺骗干扰的影响, 若保证 $H_o(f, t)$ 按 SAR 响应函数来设计, 就会在 SAR 图像出现你所需要的图像. 为了保证欺骗干扰信号能在 SAR 中成像, 就必须与真实的 SAR 的回波信号接近, 故必须测量 SAR 所发射信号的各种参数, 使在不同 t 的条件下, 式(12)中的 $S(f)$ 相同; 为了保证你所需要的图像覆盖原真实图像, 可以加大 SAR 欺骗干扰机的发射功率, 利用 SAR 接收机的动态范围, 使原真实地面响应为弱小信号, 在 SAR 图像不能出现原真实图像. 如果地面有强散射点的存在, 在 SAR 图像有可能显示出来, 但也面目全非.

4 干扰信号分析

若干扰机到 SAR 平台的距离为 R_o , 则 SAR 接收到干扰机点回波的延时 $T_o(t)$ 为:

$$T_o(t) = \frac{2R_o}{C} - \frac{2x_o v_a t}{CR_o} + \frac{(v_a t)^2}{CR_o} \quad (15)$$

则, 式(12)可表示为:

$$X_o(f, t) = S(f) A_o \exp\left\{-j2\pi \left[\frac{2R_o}{C} - \frac{2x_o v_a t}{CR_o} + \frac{(v_a t)^2}{CR_o}\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_o(t)}{f}\right)\right\} \quad (16)$$

设干扰机的响应函数 $H_o(f, t)$ 为:

$$X_o(f, t) = S(f) B_i \exp\left[-j2\pi (f_o i - f_d t)\right] \left(1 + \frac{j\pi K T_o(t)}{f}\right) \quad (17)$$

式中: B_i 为模拟目标中某点的信号强度.

则 SAR 接收到的干扰信号 $Y_o(\cdot, t)$ 为:

$$Y_o(\cdot, t) = S(\cdot) A_o \sum_i B_i \exp \left\{ -j2 \left(f_o(i + o) - (f_{di} + f_{do})t + k_o t^2 \right) \left(1 + \frac{\cdot}{o} \right) \right\} \quad (18)$$

$$\text{式中: } f_{do} = f_o \frac{2x_o v_o}{CR_o}, \quad k_o = \frac{v_o^2}{CR_o}, \quad o = \frac{2R_o}{C}$$

从这里可以看出, 欺骗干扰机发射的信号被 SAR 接收后必须考虑雷达平台运动对欺骗干扰信号频谱的影响, 它会使得信号频谱偏移 f_{do} ; 同时, 距离向的延时要考虑 o 的影响. 式(18)的时域表达式为:

$$y_o(\cdot, t) = A_o \sum_i B_i \exp \left\{ -j2 \left(f_o(i + o) - (f_{di} + f_{do})t + k_o t^2 \right) \right\} \cdot s \left[\left(i + o \right) - \frac{f_{di} + f_{do}}{f_o} t + \frac{k_o}{f_o} t^2 \right] \quad (19)$$

由式(18)到式(19)可知, 为使欺骗干扰在距离向有合适的延时, 必须知道 SAR 发射信号的载频, 故在对 SAR 进行干扰之前, 还要做一些前期工作, 如 SAR 的工作频率、信号波形等. SAR 欺骗干扰的基本工作过程是要确定 SAR 的工作频率, 以此频率确定假目标的响应函数, 这些响应函数事先形成, 并存储, 当接收 SAR 信号时, 通过下混, 傅里叶变换得到 SAR 信号的频谱, 再与存储的响应函数在频域相乘, 并进行反傅里叶变换就可得到欺骗干扰信号, 然后再上混发射. 这里对不同时刻的脉冲信号要与不同的响应函数相乘, 由于处理的速度问题, 干扰信号要比实际 SAR 信号延迟一个或数个脉冲周期, 而 SAR 发射信号的波形在每个周期里都是相同, 否则不能聚焦, 故延迟一个或数个脉冲周期是与没有延时的效果一样的, 采用这样的工作方式, 可对欺骗干扰机周围的目标都可以保护.

在式(9)中, 我们可以看到信号时间 t 的二次项的大小不仅与平台速度有关, 还和该点目标与平台之间的距离有关; 在高分辨 SAR 中, 为了得到清晰的图像, 对不同的距离的时间 t 的二次项都要补偿, 若仍用式(17)响应函数进行干扰, 就会产生干扰图像的模糊, 故为了达到更好的干扰效果, 响应函数中必须考虑时间 t 的二次项, 则考虑时间 t 的二次项的响应函数 $H_{os}(\cdot, t)$ 为:

$$H_{os}(\cdot, t) = \sum_i B_i \exp \left\{ -j2 \left(f_o(i - f_{di}t + k_i t^2) \left(1 + \frac{\cdot}{o} \right) \right) \right\} \quad (20)$$

SAR 接收到的干扰信号 $Y_{os}(\cdot, t)$ 可为:

$$Y_{os}(\cdot, t) = S(\cdot) A_o \sum_i B_i \exp \left\{ -j2 \left(f_o(i + o) - (f_{di} + f_{do})t + (k_i + k_o)t^2 \right) \left(1 + \frac{\cdot}{o} \right) \right\} \quad (21)$$

从上式中可以看出, SAR 接收到的欺骗干扰信号中含有因 SAR 平台运动和 SAR 欺骗干扰相对于 SAR 平台相对位置而产生的距离延时、多普勒频率和时间的二次项等固有参数, 故在设计响应函数时要考虑这些, 要有一定的覆盖范围.

5 仿真实验

我们以 3 米 SAR 实际数据进行了仿真实验研究. 雷达的工作频率在 X 波段, 线性调频信号的带宽是 70MHz. 图 2 为没有欺骗目标的 SAR 图像, 设计了一正方形图形作为欺骗目标, 与原数据混合, 得到图 3 为加有欺骗目标的 SAR 图像; 这里证明了用本文的方法可以对 SAR 进行欺骗干扰.



图 2 原 SAR 图像

图 3 加入欺骗干扰 SAR 图像

6 结束语

前文介绍了一种对 SAR 进行欺骗干扰的方法, 该方法首先要确定被干扰 SAR 的工作带宽和频率, 以此频率计算出虚假目标的每一帧信号的频谱, 并存储在处理设备中; 在工作时, 与接收到的 SAR 信号在频域相乘, 再变换到时域向 SAR 发射. 文中对此方法进行了仿真, 假目标出现在 SAR 图像.

对 SAR 进行欺骗干扰的意义是: 使 SAR 不能对地面真实目标成像, 从而掩护了真实目标; 也可以在没有目标区域产生虚假目标, 使对方判断失误; 此方法若与物理伪装相结合, 会取得更佳结果.

参考文献:

- [1] Walter W Gaj. Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Boston, London: Artech house, 1993.
- [2] 陈宁, 张杰儒. 合成孔径雷达干扰技术研究[J]. 航天电子对抗, 1997, (4): 45 - 48.

作者简介:



王盛利 男, 1957 年生于江苏, 1978 年考入南京理工大学(原华东工程学院), 毕业后分配在南京无线电九厂工作, 1991 年硕士研究生毕业后, 在南京电子技术研究所从事雷达总体, 信号处理以及相关的技术工作, 现为高级工程师, 同时为西安电子科技大学博士研究生.



于立 男, 1975 年生于江苏, 1997 年毕业于华中理工大学, 一直在南京电子技术研究所从事信号处理及计算机仿真工作, 现为工程师.