

文章编号: 0258-7025(2010)05-1322-05

# 利用直边衍射测量跟踪隐形飞行物体

龚天林 赵晶晶 丁文龙 纪宪明 张 华

(南通大学理学院, 江苏 南通 226007)

**摘要** 采用提高漫反射信号强度方式来达到反隐形的雷达,是不可能从根本上实现反隐形的。提出了一种新的雷达反隐身技术,利用直边衍射来测量跟踪隐形飞行物体。利用直边衍射现象,当激光对隐形飞行物扫描时,不但可以模拟出隐形飞行物体所在的位置及飞行速度,还可以得到其大小和形状,能够对隐形飞行物体实现全场跟踪测量。利用直边衍射原理制作的雷达还具备数据加密功能。

**关键词** 衍射;直边衍射;激光;反隐形;雷达;全场跟踪

**中图分类号** TN953 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1322

## Measuring and Tracking Stealth Flying Objects by Straight-Edge Diffraction

Gong Tianlin Zhao Jingjing Ding Wenlong Ji Xianming Zhang Hua

(School of Science, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China)

**Abstract** At present, the purpose of anti-stealth has been achieved by improving diffuse reflectance signal strength for the most advanced anti-stealth radar, while it is impossible to achieve the fundamental anti-stealth by this method. So, a new radar anti-stealth technology is proposed and by means of straight edge diffraction it can be realized in measuring and tracking stealth flying objects. When scanning the stealth flying object with laser, not only the position and the flying speed of the stealth flying object can be simulated, but also the shape and size can be obtained. Thus, it can be realized in full tracking the stealth flying objects. In addition, the radar of using the principle of straight-edge diffraction has the functions of data encryption.

**Key words** diffraction; straight edge diffraction; laser; anti-stealth; radar; full track

### 1 引 言

雷达是一种利用电磁波测定物体位置的无线电设备,当其发射的微波遇到目标后会形成回波信号。对回波信号进行适当的数据处理,就能够发现目标。反之,当设计飞行物体时,如果将其形状做一些特殊化处理,其材料采用雷达吸波特殊材料,就可以让返回的微波信号尽可能地少,能达到对雷达隐形的目的。已研究出了许多先进的雷达,如多/双基地雷达<sup>[1,2]</sup>、相控阵雷达<sup>[3]</sup>、超宽带雷达<sup>[4]</sup>、米波雷达<sup>[5]</sup>、合成孔径雷达<sup>[6]</sup>和 高频超视距后向散射雷达<sup>[7~9]</sup>等。它们的工作原理相同,都是设法提高回波信号

的强度,只是在提高强度的方式上有所差异。因此从理论上说,只要飞行物体形状设计得更好,材料更高级,仍然能达到对这种雷达隐形的目的。以这种工作原理改进的雷达,不过是隐形与反隐形技术上不断升级的竞赛,是不可能从根本上实现反隐形的。

如果工作雷达测量的不是漫反射信号,而是其他形式的信号,如激光雷达<sup>[8]</sup>,可以通过探测隐身飞行器尾部含有的碳氢化合物的尾焰气流来发现跟踪目标,这样从理论上来说,隐形飞行物将无所遁形。利用光衍射的特性,也能对隐形飞行物(暂时不考虑可以利用左手材料<sup>[10]</sup>制成的特殊形状飞行物)实现

收稿日期: 2009-06-05; 收到修改稿日期: 2009-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(10674047)、江苏省自然科学基金(BK2008183)和华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 龚天林(1967—),男,硕士,副教授,主要从事分子光谱学与分子光谱技术等方面的研究。

E-mail: gtl@ntu.edu.cn

这种不是测量反射信号方式的反隐形。对于光的衍射,由于光的波长较短,一般都是应用在与光的波长可比拟的很小的孔或狭缝,很小的屏或细丝上<sup>[11,12]</sup>,因为这样才能观察到明显的衍射现象。实际上,对于大的障碍物,也存在衍射现象,如直边衍射。本文将对如何利用直边衍射现象来跟踪测量隐形飞行物体做一点理论上的探讨。

## 2 装置模型

图 1 为利用直边衍射现象测量跟踪隐形飞行物体的装置模型方框图。从地面上发出一束激光,让激光在空中扫描,卫星接收器接收激光光强信号。在卫星上装备光电转换装置,将接收到的二维空域激光光强信号转换为与光强成正比的一维时域电信号。卫星将该电信号发射回地面,由地面接收器接收,送计算机进行信号分析,数据处理。

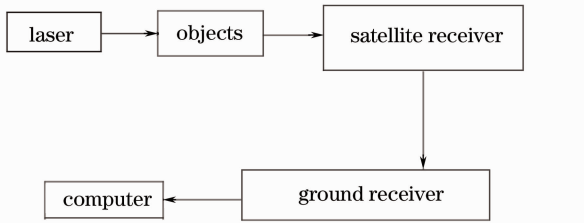


图 1 利用直边衍射反隐身技术模型方框图

Fig. 1 Block diagram of a model about anti-stealth technology by straight-edge diffraction

图 1 还可以改成另外一种模式,将激光置于卫星(也可以是在高空中能自由飞行的其他物体,如无人驾驶飞机)上,让激光在卫星上进行空中扫描,由地面接收器接收。

这两种工作模式的原理相同。本文以图 1 的装置模型为例进行讨论。

## 3 工作原理

### 3.1 直边衍射的光强分布

设激光的光振幅为

$$u(x_0, y_0) = A \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{w_0^2}\right), \quad (1)$$

式中  $A$  为常系数,  $w_0$  为激光的束腰半径,  $x_0$ - $y_0$  为束腰所在平面。

设安装在卫星上的光屏所在平面为  $x_i$ - $y_i$ , 当没有衍射障碍物时,激光在自由空间中传播,卫星接收到的光强分布为

$$I(x_i, y_i) = \left(\frac{A}{w}\right)^2 \exp\left(-2 \frac{x_i^2 + y_i^2}{w^2}\right), \quad (2)$$

式中  $w^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda d}{\pi w_0^2}\right)^2\right]$  表示激光在平面  $x_i$ - $y_i$  处的光斑半径,  $\lambda$  为激光的波长,  $d$  为激光到卫星的距离。

设衍射障碍物所在平面为  $x$ - $y$ , 激光的光斑半径相对于隐形飞行物较小。当激光扫描到衍射障碍物时,先讨论一种简单的、激光光斑相对于障碍物的位置,如图 2 所示。图中圆为光斑的大小,  $y$  轴通过圆的直径,阴影部分表示光斑附近的部分障碍物,则隐形飞行物的透射率函数可表达为

$$t(x, y) = \text{step}(x). \quad (3)$$

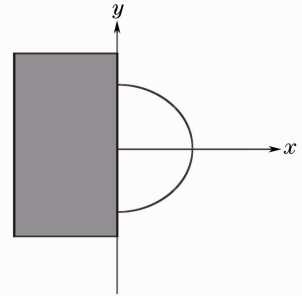


图 2 激光光斑相对于障碍物的位置

Fig. 2 Location of laser spot relative to objects

根据 Fraunhofer 衍射积分公式,在满足  $\frac{k}{2d_i\sqrt{\sigma}}x_i \rightarrow 0, \frac{k}{2d_i\sqrt{\sigma}}y_i \rightarrow 0$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ) 的区域,卫星接收到的光信号光场复振幅分布为

$$U'(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda d_i} \frac{A}{w'} \frac{\pi}{2\sigma} \exp\left[-\frac{k^2}{4d_i^2\sigma}(x_i^2 + y_i^2)\right], \quad (4)$$

式中

$$w' = \sqrt{w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda d_0}{\pi w_0^2}\right)^2\right]}, \sigma = \frac{1}{w'^2} + \frac{jk}{2R}, R = d_0 \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda d_0}\right)^2\right]$$

为波前曲率半径,  $d_0$  为激光到障碍物的距离,  $d_i$  为障碍物到卫星的距离,  $d_i = d - d_0$ 。

光强分布为

$$I'(x_i, y_i) = U'(x_i, y_i) \cdot U'^*(x_i, y_i), \quad (5)$$

从(4)式可见,有衍射障碍物时卫星接收到的光强分布与没有衍射障碍物时虽然具有相同的形式,都属于高斯分布,但由于直边衍射的衍射效率低,两者光强的大小应该有明显的区别。选取参数  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $w_0 = 1 \text{ mm}$ ,  $A^2 = 1 \text{ W}$ ,  $d_0 = 10 \text{ km}$ ,  $d_i = 100 \text{ km}$  时,根据(2)式和(5)式做光强的径向分布图,如图 3 所示。可以看出,没有衍射障碍物和有衍射障碍物时卫星接收到的光强分布相差较大,约有 3 倍的差距,明暗对

比强烈。因此,完全可以从光强的大小上将衍射障碍物和没有衍射障碍物时的光强分布区分开来。所以,只要光强的大小发生了突变,就可以确认发现了障碍物。辅助以普通雷达,就可以确定该障碍物是否是隐形物体。

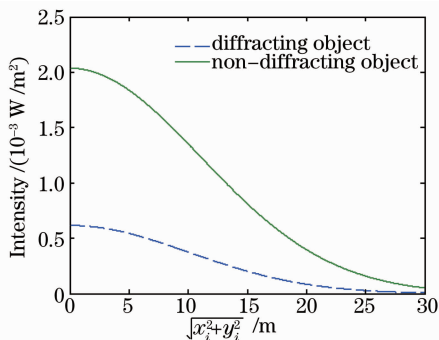


图 3 光强的径向分布

Fig. 3 Radial intensity distribution

### 3.2 隐形飞行物的位置、飞行速度、形状和大小

#### 3.2.1 隐形飞行物的位置

由于地面接收器得到的是与光强成正比的一维时域电信号,该信号并不能直接显示与坐标位置 $(x_i, y_i)$ 的关系,因此,首先将此一维信号转换为二维信号,确定与光强对应的坐标值。

设光屏上均匀分布着 $m$ 行 $n$ 列像素,则每帧图片的光强分布可以用一 $m$ 行 $n$ 列的矩阵来描述,由于像素的位置是固定的,则矩阵中的每一个元素对应的坐标位置 $(x_i, y_i)$ 也是确定的。为了描述问题的方便,这里假设该矩阵为一 $5 \times 5$ 矩阵,且转换为一维信号的方式为:设 $a_{ij}$ 为 $5 \times 5$ 矩阵中的一个元素,传送回的地面接收器的第一个数据为 $a_{11}$ ,第二个为 $a_{12}$ ,及 $a_{13}, a_{14}, a_{15}$ ,第一行的数据传输完后,接着传输第二行的数据, $a_{21}, a_{22}, \dots$ 。依次类推,构成地面接收器接收到的一维信号。反推,则可以将这 $m \times n$ 个一维数据直接按顺序分解成 $m$ 行 $n$ 列的矩阵形式,得到每个数据所对应的坐标位置 $(x_i, y_i)$ 。

虽然像素的位置在光屏上是固定的,但得到的实际上是像素之间相对的坐标关系,因此每个数据所对应的坐标位置 $(x_i, y_i)$ 都需要减去一个偏移量。例如,物面坐标系的原点位置与光屏所在平面坐标系的原点位置都在光轴上,设光屏的中心位置为坐标原点。理想情况下,光轴正好通过光屏的中心,但一般情况下,并不能保证光轴正好通过光屏的中心,而是会出现一定程度的偏移。若设该偏移量为 $(x'_i, y'_i)$ ,则实际的坐标位置应为 $(x_i - x'_i, y_i - y'_i)$ ,相应的,(4)式应调整为

$$U'(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda d_i} \frac{A}{w'} \times \frac{\pi}{2\sigma} \exp\left\{-\frac{k^2}{4d_i^2\sigma} [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2]\right\}. \quad (6)$$

为简单起见,这里不考虑吸收和散射对光强的影响,也不考虑光电转换系数。根据卫星传回的数据,从(6)式可以看出,至少需要拟合三个参量,隐形物体距激光的距离 $d_0$ 及坐标位置的偏移量 $(x'_i, y'_i)$ 。

采用麦夸特(Marquardt)法进行最小二乘法非线性拟合,用 Matlab 软件编程。拟合时采用的卫星传回数据是根据(4)式计算得到的,由于没有一个坏的数据,因此拟合的结果非常理想。(4)式中输入的 $d_0 = 10$  km,拟合得到的数据同样是 $d_0 = 10$  km,且 $x'_i = 3.8481 \times 10^{-17}$  m,  $y'_i = 1.4813 \times 10^{-17}$  m。设计的程序仅仅循环计算了 5 次,约 5 s 就给出了计算结果。若初始参数设置得当,计算的时间会更短。

得到了隐形飞行物距激光的距离 $d_0$ ,根据激光光线的方位角,就可以计算出隐形飞行物的坐标位置。

#### 3.2.2 隐形飞行物的飞行速度、形状和大小

只要设计一电子伺服系统,能够保持在直边衍射状态的情形下,让激光跟踪扫描隐形飞行物体,就可以获得隐形飞行物的飞行速度、形状和大小。

让激光对隐形飞行物上的某一定点跟踪扫描,设 $t$ 时刻隐形飞行物所在位置为 $(x, y, z)$ , $t + \Delta t$ 时刻所在位置为 $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ ,只要 $\Delta t$ 时间足够短,则隐形飞行物的飞行速度为

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{k}. \quad (7)$$

对隐形飞行物的形状扫描时,激光输出孔径运行的轨迹,就是隐形飞行物的形状,而根据几何关系,可以算出隐形飞行物的大小。

## 4 讨 论

### 4.1 激光照射到衍射障碍物上的一般情形

当激光扫描到衍射障碍物时,有可能出现不是如图 2 所示的情形,而是出现不透光,激光全部被障碍物挡住、或如图 4 所示的一般情形。对于前者,当接收到的光强信号突变为零时,只需要让激光继续跟踪扫描,直到出现直边衍射。对于后者,(4)式和(6)式还需做相应的调整。

如图 4 所示,设障碍物的直边部分与 $x$ 轴的夹角为 $\alpha$ ,相交于点 $(x_1, 0)$ ,则(4)式应修正为

$$U''(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda d_i} \frac{A}{w'} \sqrt{\frac{\pi}{\sigma}} \exp\left\{-\frac{k^2}{4d_i^2\sigma} [(x_i \cos \alpha - y_i \sin \alpha)^2 + (x_i \sin \alpha + y_i \cos \alpha)^2]\right\} \times \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\sigma}} - \int_0^{x_1} \exp(-\alpha x^2) dx\right], \quad (8)$$

(6)式修正为

$$U''(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda d_i} \frac{A}{w'} \sqrt{\frac{\pi}{\sigma}} \exp\left\{-\frac{k^2}{4d_i^2\sigma} \{[(x_i - x'_i) \cos \alpha - (y_i - y'_i) \sin \alpha]^2 + [(x_i - x'_i) \sin \alpha + (y_i - y'_i) \cos \alpha]^2\}\right\} \times \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\sigma}} - \int_0^{x_1} \exp(-\alpha x^2) dx\right], \quad (9)$$

这样,数据拟合时还需要多拟合  $\alpha$  和  $x_1$  这两个参量。

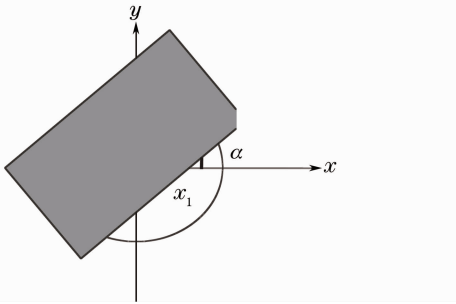


图 4 激光光斑相对于障碍物的一般位置

Fig. 4 General location of laser spot relative to objects

图 2 属于图 4 的特殊情形。当  $\alpha = \pi/2$  且  $x_1 = 0$  时,图 4 变化为图 2,(9)式还原为(6)式。

#### 4.2 直边衍射雷达的数据加密功能

利用直边衍射,可以全方位测量跟踪隐形飞行物体,因此,它也是一种雷达。根据它的工作原理,利用直边衍射制作的雷达具有相当强势的数据加密功能,使卫星传回来的光强数据只能为我方使用。首先,卫星接收光屏上像素的分布完全由我方设置,他方即使得到了卫星传回来的一维光强信号,但没有像素的分布图,得不到光强所对应的坐标,从上万个数据(图 2 中卫星上的光斑半径超过 2 m)中是不可能拟合出隐形飞行物体所在位置的;其次,可以通过地面遥控随时让部分像素工作,部分像素休息,改变像素的分布;最后,还可以通过改变激光光强参数的方式来达到数据加密的目的。

## 5 结 论

提出了一种新型的、可以全场测量跟踪隐形飞行物体的理论模型。当激光对隐形飞行物体扫描

时,可以模拟计算出隐形飞行物体的形状、大小、所在位置及飞行速度。利用直边衍射原理制作的雷达具有数据加密功能,能够保证卫星传回来的光强数据只能被我方使用。但是,利用直边衍射原理制作的雷达也有一丝缺陷。虽然目前的大多数隐形飞行物都几乎全是由尖锐如刀的线条构成,但线条之间的连接部分不一定也是直边,因此利用直边衍射原理制作的雷达对这部分细节的描绘会出现一定的误差,但总的轮廓不会受到影响。

## 参 考 文 献

- Bai Songhao, Lü Shanwei, Qiu Lan. Measuring precision analysis of bistatic radar [J]. *Modern Radar*, 2004, **26**(8): 22~24  
白松浩, 吕善伟, 裘 岚. 双基地雷达测量定位精度分析[J]. 现代雷达, 2004, **26**(8): 22~24
- Zhang Jianxin, Zhang Yongshun, Qu Jinghua *et al.*. Analysis of counter-stealth position in bistatic/multistatic radar [J]. *Control Technology of Tactical Missile*, 2007, (1): 68~70  
张建新, 张永顺, 曲靖华 等. 双/多基地雷达反隐身定位分析[J]. 战术导弹控制技术, 2007, (1): 68~70
- Chen Li, Pan Yichun, Zheng Kai. Progress of the phased-array radar[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, **29**(5): 13~17  
陈 立, 潘谊春, 郑 凯. 相控阵雷达的发展[J]. 舰船电子工程, 2009, **29**(5): 13~17
- Su yi, Kuang Gangyao, Guo Shengtao *et al.*. Ultra-wide band radar signal processing and experiment [J]. *J. Electronics and Information Technology*, 1997, **19**(6): 768~772  
粟 毅, 匡纲尧, 郭盛桃 等. 超宽带雷达信号处理技术和实验研究[J]. 电子科学学报, 1997, **19**(6): 768~772
- Chen Baixiao, Hu Tiejun, Zheng Ziliang *et al.*. Method of altitude measurement based on beam split VHF radar and its application [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(6): 1021~1025  
陈伯孝, 胡铁军, 郑自良 等. 基于波瓣分裂的米波雷达低仰角测高方法及其应用[J]. 电子学报, 2007, **35**(6): 1021~1025
- Wu Yirong, Zhu Minhui. The developing status and trends of synthetic aperture radar [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2000, **15**(2): 121~123  
吴一戎, 朱敏慧. 合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J]. 遥感技术与应用, 2000, **15**(2): 121~123
- Liu Falai. Radar stealth and anti-stealth [J]. *Avionics Technology*, 1995, (4): 27~34  
刘发来. 雷达隐身与反隐身 [J]. 航空电子技术, 1995, (4): 27~34

- 8 Zhao Xiaohua, Qu Liang. Analysis of radar countermeasures against stealth technology [J]. *Modern Radar*, 2007, **29**(3): 17~18  
赵小华, 渠 亮. 雷达反隐身技术的浅析[J]. *现代雷达*, 2007, **29**(3): 17~18
- 9 Han Lei, Wang Zirong. Radar stealth and anti-stealth technology [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2006, **29**(2): 34~38  
韩 磊, 王自荣. 雷达隐身与反隐身技术[J]. *舰船电子对抗*, 2006, **29**(2): 34~38
- 10 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- 11 Fu Wenyu, Liu Zhengqi. Diffraction of Gaussian beam by a filament [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(3): 61~62  
付文羽, 刘正岐. 高斯光束照射下的单丝衍射[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(3): 61~62
- 12 Sun Changku, Ye Shenghua. *Laser Measuring Technology* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001. 82  
孙长库, 叶声华. *激光测量技术* [M]. 天津: 天津大学出版社, 2001. 82