

文章编号: 1007-4619(2006)01-0071-05

基于欺骗式动目标的 SAR 干扰技术研究

李 伟, 梁甸农, 董 臻

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对军事运动目标的保护问题, 提出了基于欺骗式动目标的 SAR 干扰方法, 该方法根据收到的雷达信号, 调制不同的散射强度和位置信息, 模拟产生多个虚假的运动目标, 避免了静止场景不能干扰动目标成像的缺点。分析了雷达位置确定误差对欺骗式动目标干扰效果的影响, 给出了一种干扰机的布阵方法。仿真证明, 欺骗式动目标干扰方法可以达到保护运动目标和向被干扰雷达提供虚假信息的目的。

关键词: 动目标指示; 合成孔径雷达; 欺骗式动目标; 干扰机布阵

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

SAR Jamming Technique Based on Deceptive Moving Target

LI Wei LIANG Dian-nong DONG Zhen

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

Abstract A jamming method for SAR is proposed for the problem of protecting military moving target. This method uses received radar signal, modulates various RCS and position information, produces multi deceptive moving targets. This kind of jamming can protect moving targets, provide deceptive information to the jammed SAR, avoid the shortcoming of unable to protect moving target of stable scene. This paper discusses the configuration of jammers and the effects of the estimation error of radar's position, and lastly gives the simulation result which testifies the effectiveness of this jamming method.

Key words MTI; synthetic aperture radar; deceptive moving target; configuration of jammers

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, 同时还可以作为战场侦察的有力工具, 进行动目标指示。因此, 对其进行干扰是非常必要的。

在目前针对 SAR 的干扰方法的研究中, 主要集中于噪声干扰^[1,2]和虚假场景干扰^[3,4], 但是, 动目标指示 (MTI) 与 SAR 的结合是战场感知技术的发展趋势, 其原理是利用动目标与杂波的差异来指示出动目标^[5], 因此, 噪声干扰、虚假场景干扰

等静态干扰只能被作为杂波消除掉, 对 SAR 的动目标检测没有影响, 因此噪声干扰和虚假场景干扰在实际军事应用中并不能达到对 MTI 进行干扰的目的。

针对这种情况, 本文提出了动目标干扰技术, 使用地面干扰机转发后向散射能力更强的虚假动目标进行干扰, 从而影响被干扰雷达的 MTI 性能, 达到保护真正的军事运动目标的目的。

2 干扰原理

参考坐标系以雷达在地面的投影作为原点, 距离向和方位向分别为 r 和 a 轴。假设在 $t=0$ 时刻雷

收稿日期: 2004-06-04; 修订日期: 2004-08-09

作者简介: 李 伟 (1978—), 男, 山东省汶上县人, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士生, 主要从事 SAR 的干扰和抗干扰方面的研究工作, 已发表论文十余篇。E-mail: liweichangsha@163.com.

达刚好照射到干扰机。假设机载 SAR 沿 x 轴方向飞行,速度为 v_s ,工作方式为正侧视,高度为 H_0 ,干扰机位于测绘带内,静止不动。要实现的虚假场景也处于测绘带内,几何关系如图 1,干扰机位置为 $(0, r_0, a_0)$,目的是在地面场景中产生 N 个虚假动目标,其中第 i 个欺骗式动目标的初始位置为 $(0, r_i, a_i)$,散射系数为 σ_i ,速度为 v_i ,加速度为 a_{i0} 。

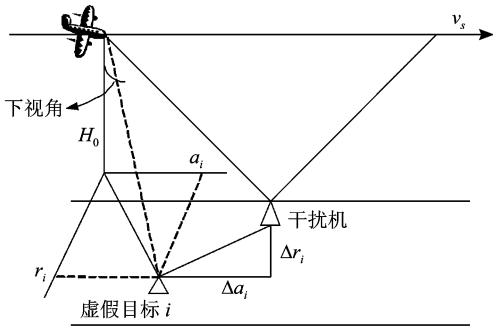


图 1 干扰几何模型

Fig 1 Jamming geometry

设 SAR 系统接收到的任意一点处的回波为:

$$\Delta\tau_i = \frac{2}{c} \left[\sqrt{H_0^2 + \left(r_i - v_r t - \frac{1}{2} a_r t^2 \right)^2 + \left(a_i - (v_s - v_a) t + \frac{1}{2} a_a t^2 \right)^2} - \sqrt{H_0^2 + r_0^2 + (a_0 - v_s t)^2} \right] \quad (4)$$

即第 i 个虚假动目标处的真实回波延迟可以表示为:

$$\frac{2R_i(t, a_i, r_i)}{c} = \Delta\tau_i + \frac{2R_0(t, a_0, r_0)}{c} \quad (5)$$

求得相对延迟之后,就可以根据干扰机接收到的被干扰雷达信号产生虚假欺骗目标信号,过程如下:

(1) 干扰机处回波为:

$$s_0 = \exp \left[-j2\pi f_0 \frac{2R_0}{c} \right] \times \exp \left[j\pi K \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right)^2 \right] \times g \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \quad (6)$$

(2) 求得第 i 个虚假动目标的回波形式,得到:

$$s_i = \sigma_i \exp \left[-j2\pi f_0 \left(\frac{2R_0}{c} + \Delta\tau \right) \right] \times \exp \left[j\pi K \left(\tau - \frac{2R_0}{c} - \Delta\tau \right)^2 \right] \times g \left(\tau - \frac{2R_0}{c} - \Delta\tau \right) \quad (7)$$

(3) 用 (6) 式来表示 (7) 式。设 s_0 和 s_i 的距离向傅里叶变换结果分别为 $S_0(\omega, t)$ 和 $S_i(\omega, t)$, 则有:

$$S_i(\omega, t) = S_0(\omega, t) \times \sigma_i \times \exp(-j(\omega + \omega_c)\Delta\tau_i) \quad (8)$$

(4) 累加多个虚假动目标的信号,进行调制然后发射出去。假设待实现的整幅场景中有 N 个虚

$$pp(\tau, t, r) = a(t, r) \exp \left[-j\frac{K}{2} \left(\tau - \frac{2R(t, a, r)}{c} \right)^2 \right] \times \exp \left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t, a, r) \right] \quad (1)$$

其中, c 为光速, K 为调频斜率, ω_c 为载频。雷达平台速度为 v_s , 虚假目标回波延迟为 $\tau_n = \frac{2R(t, a, r)}{c}$, $R(t, a, r)$ 为 t 时刻目标到雷达的距离。

由几何结构图 1 可得,场景中第 i 个虚假动目标距雷达的距离为

$$R_i(t, a, r) = \sqrt{H_0^2 + \left(r_i - v_r t - \frac{1}{2} a_r t^2 \right)^2 + \left(a_i - (v_s - v_a) t + \frac{1}{2} a_a t^2 \right)^2} \quad (2)$$

其中虚假目标速度为 v_i , 其在距离向的速度分量和加速度分别为 v_r 和 a_r , 方位向的速度分量和加速度分别为 v_a 和 a_a 。

而干扰机到达雷达的距离为

$$R_0(t, a, r) = \sqrt{H_0^2 + r_0^2 + (a_0 - v_s t)^2} \quad (3)$$

因此,第 i 个虚假动目标与干扰机之间的相对延迟为

假动目标,则

$$S(\omega, t) = \sum_{i=1}^N s_i(\omega, t) = \sum_{i=1}^N S_0(\omega, t) \times \sigma_i \exp(-j(\omega + \omega_c)\Delta\tau_i) \quad (9)$$

可见,在每个时刻 t 对干扰机处基带信号做距离向傅里叶变换,乘上 N 个延迟相位项,然后做距离向逆变换即可得时域信号 $s(\tau, t) = \sum_{i=1}^N s_i(\tau, t)$, 然后加上载频发射出去,即可产生 N 个模拟的虚假动目标。

上述的频域算法需要首先将信号解调然后变换到距离图像-方位信号域,然后乘以相应的延迟相位,再做距离向逆变换,进行调制后再发射出去。接收到信号后,处理流程如图 2。

3 对 SAR 的干扰试验

以机载 SAR 为例。设雷达平台飞行高度为 5km,速度为 300m/s 正侧视,对地面进行条带式成像,中心频率 1GHz 带宽为 30M,脉冲持续时间 30μs 脉冲重复频率为 1680Hz,干扰机位于测绘带

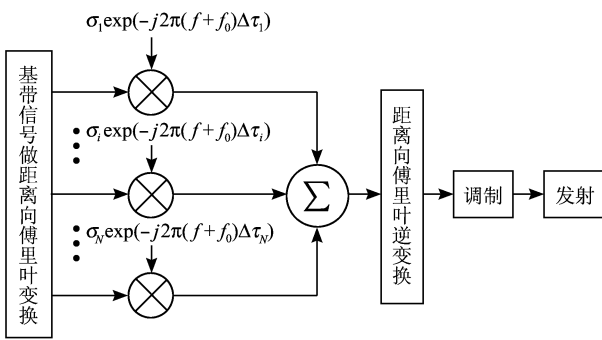


图 2 干扰信号产生框图

Fig 2 Diagram of producing jamming signal

近端, 真实动目标速度为 15m/s 位于图像中心, 横坐标为方位向位置, 纵坐标为距离向位置, 虚假动目标 1 与真实目标方位向位置相同, 距离向位置不同, 速度为 10m/s 而虚假动目标 2 与真实目标具有相同的距离向位置和不同的方位向位置, 速度为 20m/s 它们的速度均与雷达平台速度方向相同, 成像效果显示如图 3、图 4。

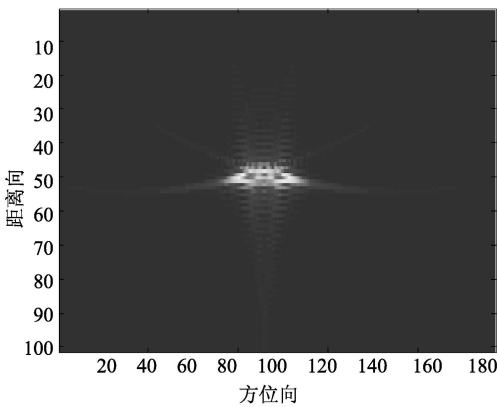


图 3 真实动目标成像效果

Fig 3 Image of real moving target

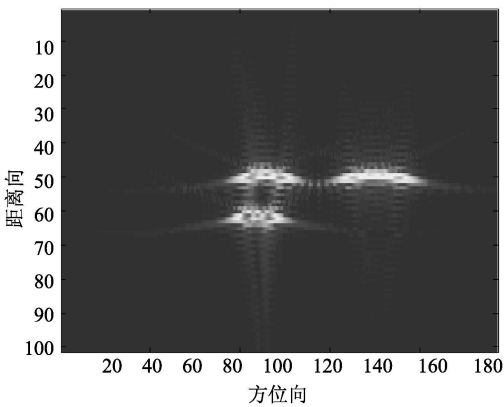


图 4 受到欺骗干扰后成像效果

Fig 4 Image under deceptive jamming

使用 STAP 进行检测时, 地面场景被剔除, 但是虚假动目标与地面真实动目标一起被呈现出来, 并且虚假目标散射强度较强, 且实际实施干扰时假目标数目较多, 一方面假目标压制了真实目标, 另一方面真目标和假目标具有相同的脉内特性, 难于区分。因此, 可以取得很好的干扰效果。

在实际实施时, 遇到的几个主要问题是雷达位置的确定、定位误差的影响和干扰机的布阵。

3.1 测向法雷达定位

无源定位方法主要有测向定位、测时差定位和测向测时差定位方法、多普勒频率差定位和相位变化率定位方法, 测向定位方法作为使用最早、使用最多的定位方法, 并且, 干扰侦察机 (电子支援系统) 的测向精度通常可以达到 0.3° ; 国外的一些预警设备的测向精度已经达到 0.1° 以上, 可靠度相当高, 同时实现起来也最为简单, 因此, 本文以测向法为例来对被干扰雷达进行定位。

如图 5, C 为被干扰雷达, A 和 B 分别为侦察接收机, 坐标分别为 $A(H_1, r_1, a_1)$, $B(H_2, r_2, a_2)$, $C(H, r, a)$, A 和 B 坐标已知, θ_1 和 θ_2 为方位角, φ_1 和 φ_2 为俯仰角, $\varphi_1, \varphi_2, \theta_1$ 和 θ_2 中任意 3 个参数组合在一起构成的方程组可以求得 C 点坐标, 且各测量误差均为零均值、且彼此不相关的高斯白噪声, 标准差分别为 $\sigma_{\varphi_1}, \sigma_{\varphi_2}, \sigma_{\theta_1}$ 和 σ_{θ_2} 。采用测量精度较高的测量子集 $1^{[6]}$ 以得到 C 点坐标 (H, r, a) :

$$H = \frac{a_2 \tan \theta_2 - a_1 \tan \theta_1 + r_1 - r_2}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \cdot \frac{\tan \theta_1 \tan \varphi_1 - a_1 \tan \theta_1 \tan \varphi_1 + H_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_1} \quad (10)$$

$$r = \frac{a_2 \tan \theta_2 - a_1 \tan \theta_1 + r_1 - r_2}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \cdot \frac{\tan \theta_1 + r_1 - a_1 \tan \theta_1}{\sin \theta_1} \quad (11)$$

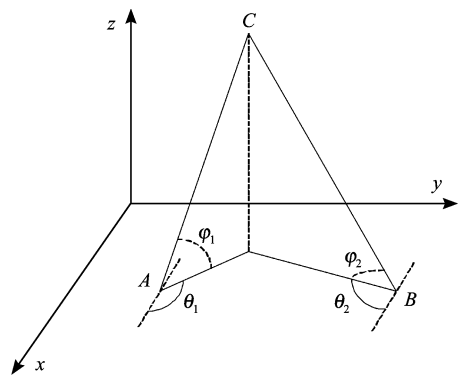


图 5 测向定位中雷达与侦察接收机的几何关系图

Fig 5 Geometry of position locating with direction measurement

$$a = \frac{a_2 \tan \theta_2 - a_1 \tan \theta_1 + r_1 - r_2}{\tan \theta_2 - \tan \theta_1} \quad (12)$$

这样就较为准确地得到被干扰雷达的位置。

在进行具体实施干扰的时候,因为被干扰雷达可能处于机动工作之中,因此,很难实时知道雷达平台位置,这时就要使用无源定位方法对雷达定位。

3.2 定位误差的影响

由于前面对雷达平台定位的精度影响,在产生干扰信号时使用的雷达位置与真实值存在偏差,导致产生的虚假场景目标单元的位置与期望位置之间存在偏差,因此,需要考虑这个偏差对于虚假场景目标位置的影响。

载机位置误差范围与虚假场景目标位置的偏移之间的关系如下面的公式所示, $\Delta\tau_i$ 为干扰机与虚假干扰单元之间相对位置对应的转发延迟。 d_r , d_a , dH_0 分别为测得的雷达平台位置与实际值之间的偏差。由(4)式可得,

$$d(\Delta\tau_i) = \frac{2}{c} \left[\frac{\left(r_i - v_r t - \frac{1}{2} a_r t^2 \right)}{R_i(t, r_i, a_i)} + \frac{r_0}{R_0(t, r_0, a_0)} \right] d_r + \frac{2}{c} \left[\frac{\left(a_i - (v_s - v_a) t + \frac{1}{2} a_a t^2 \right)}{R_i(t, r_i, a_i)} + \frac{(a_0 - v_s t)}{R_0(t, r_0, a_0)} \right] d_a + \frac{2}{c} \left[\frac{H_0}{R_i(t, r_i, a_i)} + \frac{H_0}{R_0(t, r_0, a_0)} \right] dH_0 \quad (13)$$

图 6 显示了在测向误差为 0.3° 时雷达平台的 3 个坐标的偏移导致地面干扰场景目标出现的位移量之间的变化关系。图中横坐标为位置偏差,纵坐标为位置偏差造成的干扰点位置的偏移。这样看来,如果侦察机测向精度可以达到 0.3° 之内,则对雷达的测量偏差对于虚假场景的目标位置的影响很小,

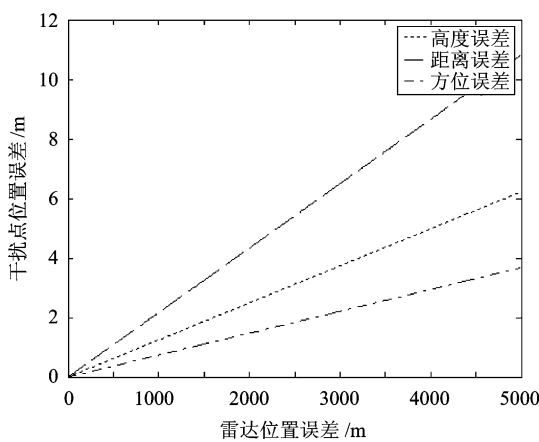


图 6 欺骗式动目标位置偏移与雷达平台位置误差的关系

Fig 6 Relation between position deviation of jamming and radar platform

几乎可以不予考虑。

3.3 干扰机布阵方法

使用单个干扰机时,如果欺骗式动目标位置和干扰机没有同时位于雷达波束覆盖范围之内,则干扰机发出的针对某个位置的欺骗式动目标的干扰信号是不能得到预期的效果的。在实际中,由于通常要求产生多个欺骗式动目标,干扰机与各目标的位置不同,因此,受到雷达波束照射的时刻也不同,同时受到雷达波束照射的时间有限。这时得到的欺骗式动目标在 SAR 图像中的数据长度小于一个孔径,从而不能达到预期的成像效果,用公式表示为:设虚假点与干扰机的方位向距离为 d 一个完整的孔径的脉冲个数为 $\frac{L_s}{v}$ PRF,则得到的数据长度为一个完整合成孔径长度的 $\frac{L_s - d}{L_s}$ 。可见,欺骗式动目标距干扰机的方位向

位置越近,得到的数据长度越长,成像效果较好;随着欺骗式动目标的方位位置远离干扰机,成像效果在变差,在与干扰机的方位位置相差接近一个孔径时,所成图像通常不能实现较好的干扰效果。如图 7,其中干扰机与干扰点位置相距接近一个孔径。图 8、图 9 中干扰机位于场景中心,4 个点均为虚假干扰点,这时干扰机与虚假点位置相距不超过半个孔径。

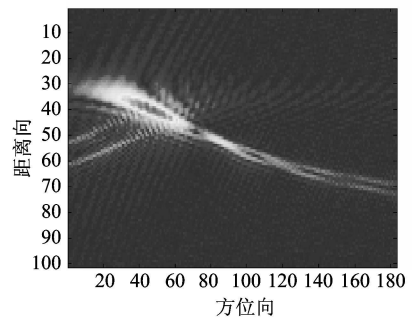


图 7 距离 $L_s/2 < d < L_s$

Fig 7 $L_s/2 < d < L_s$

可见,对于单个干扰机来说,它产生的有关某个干扰点的被雷达接收到的数据的长度小于一个合成孔径,数据长度根据干扰点与干扰机之间的距离而定。因此,要产生一系列逼真的欺骗式动目标,就需要若干个干扰机前后配合工作,它们的作用是在同一个区域产生虚假干扰。本文采用的干扰机布阵方法,即沿雷达平台各个可能的飞行轨道方向,每隔一定距离布置一个干扰机,且该距离小于一个合成孔径的长度,前后两个干扰机协同工作,几何布置图如图 10。

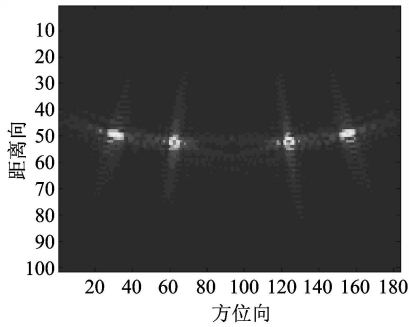


图 8 干扰机与干扰点距离 $d < L_s / 2$
Fig 8 $d < L_s / 2$

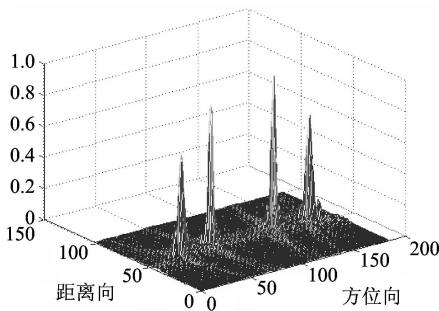


图 9 信号幅度随 d 的变换关系图
Fig 9 Relation between jamming amplitude and d

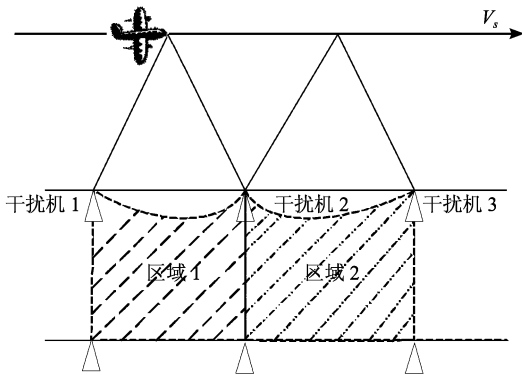


图 10 布阵干扰方法示意图
Fig 10 Configuration of jammers

在干扰机 2 受到主波束照射之前,区域 1 的欺骗式动目标信息由干扰机 1 发射,随着载机运动, SAR 开始照射到干扰机 2,这时则由干扰机 2 发射区域 1 的虚假目标场景信息,随着雷达波束向右偏离干扰机 2,雷达也就得到了区域 1 的一个完整的合成孔径的数据;同时,干扰机 2 处于雷达波束范围之内时,也在发射区域 2 内欺骗式动目标的虚假信息,直到干扰机 2 不在雷达波束范围之内为止,下一段时间则由干扰机 3 产生区域 2 中欺骗式动目标的

虚假信息。

举例:雷达天线主波束宽度通常为 $1 \sim 6^\circ$,若 SAR 距测绘带中心距离 $R = 5000\text{m}$,波束宽度取 6° ,则干扰站站距约为 526m ,并随不同雷达的不同波束宽度而有所改变,且干扰机的布置都要求沿雷达航迹方向布置。在实现了布阵以后,干扰机之间协同工作,即一个干扰机在另外一个干扰机关闭的同时开始工作,这样可以保证收集到的干扰信号的强度的均匀性。

上面针对了一种理想的情况对布阵原理进行了论述,实际中,可能遇到的问题有雷达航线不是直线,存在偏航,速度不稳定,不知道雷达测绘带准确位置,待保护区域远小于一个合成孔径长度等,这时就要在被保护区域周围放置若干干扰机用于发射同一欺骗式动目标信息,并且沿可能的航迹方向的相邻两干扰机之间的距离不能超过一个合成孔径长度。

4 结 论

MTI 作为 SAR 的一种重要功能,对其干扰是必须的,虚假场景干扰与运动目标具有不同特性,无法对运动目标形成保护作用,本文正是从这个问题出发,阐述了虚假动目标的信号形式、产生过程以及应该注意的关键问题等,最后的仿真证明了这种动目标干扰方法的有效性和可行性。

参 考 文 献 (References)

- [1] GOJW W. Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Boston: London: Artech house 1993
- [2] Dumper K, Cooper P S, Wons A F, et al. Spaceborne Synthetic Aperture Radar and Noise Jamming [A]. International Radar Meeting [C], 1997.
- [3] Wang S L, Yu L, Ni J L, et al. A Study on the Active Deception Jamming to SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31 (12): 1900-1902 [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):1900-1902]
- [4] Li W, Liang D, Fang X. Some Jamming Techniques on Multi-Satellite SAR System [A]. EUSAR [C], 2004.
- [5] Guo H W. Research on Technology of SAR Detection and Imaging of Ground Moving Targets [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2003 [郭汉伟.合成孔径雷达地面运动目标检测与成像技术研究 [D].长沙:国防科技大学,2003]
- [6] Sun Z K, Zhou Y Y, He L X. Single/multi Observers Active and Passive Location Techniques [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1996 [孙仲康,周一宇,何黎星.单多基地有源无源定位技术 [M].北京:国防工业出版社,1996]