

8-17-2020

## Passive Radar Simulation and Evaluation System Based on Raw Signals

Xiaofeng Ai

*1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China;;2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

Yonghu Zeng

*1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China;;*

Liandong Wang

*1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China;;*

Guangyong Zheng

*1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Passive Radar Simulation and Evaluation System Based on Raw Signals

### Abstract

**Abstract:** Detection ability of the passive radar is very closely related with many factors in the real application. *A method was proposed based on the raw data and the dynamic characteristics of a specific target. In this method, the reference and the surveillance channels' signals were obtained through the actual passive radar receiving system. The direct-path signal was reconstructed by using the reference signal. The target echo was obtained by modulating the direct-path signal with the echo power, delay and Doppler parameters, which was calculated with the move and scattering characteristics of target. Adding the target echo to surveillance channel, the final monitoring information was obtained. The conventional signal processing was applied on the reference channel and surveillance channel, and the detection probability of specific target was obtained through Monte Carlo simulation.* This method can be used to evaluate detection ability of passive radar in the actual scene for specific target.

### Keywords

passive radar, simulation evaluation, raw signal, scattering characteristics

### Authors

Xiaofeng Ai, Yonghu Zeng, Liandong Wang, Guangyong Zheng, Xiaoyang Wang, and Manxi Wang

### Recommended Citation

Ai Xiaofeng, Zeng Yonghu, Wang Liandong, Zheng Guangyong, Wang Xiaoyang, Wang Manxi. Passive Radar Simulation and Evaluation System Based on Raw Signals[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1833-1840.

# 基于实测信号的无源雷达仿真评估系统

艾小锋<sup>1,2</sup>, 曾勇虎<sup>1</sup>, 汪连栋<sup>1</sup>, 郑光勇<sup>1</sup>, 王肖洋<sup>1</sup>, 王满喜<sup>1</sup>

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 洛阳 471003;

2. 国防科学技术大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 长沙 410073)

**摘要:** 无源雷达系统实际探测能力与实际应用场景中多种因素密切相关。提出了一种基于实测信号与探测目标动态特性相结合的仿真评估方法, 利用实际无源雷达接收系统获取参考通道和监视通道的环境信号, 利用参考通道重构直达波, 结合针对目标的运动特性和散射特性, 在直达波上调制回波功率、时延、多普勒信息, 得到目标回波并叠加在监视通道中得到监视信息, 对参考通道和监视通道进行常规的信号处理, 通过蒙特卡洛仿真获得针对目标的发现概率, 可用于评估实际场景中针对特定目标的无源雷达探测能力。

**关键词:** 无源雷达; 仿真评估; 实测信号; 散射特性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 08-1833-08

## Passive Radar Simulation and Evaluation System Based on Raw Signals

Ai Xiaofeng<sup>1,2</sup>, Zeng Yonghu<sup>1</sup>, Wang Liandong<sup>1</sup>, Zheng Guangyong<sup>1</sup>, Wang Xiaoyang<sup>1</sup>, Wang Manxi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China;

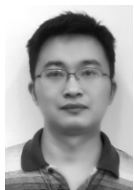
2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Detection ability of the passive radar is very closely related with many factors in the real application. A method was proposed based on the raw data and the dynamic characteristics of a specific target. In this method, the reference and the surveillance channels' signals were obtained through the actual passive radar receiving system. The direct-path signal was reconstructed by using the reference signal. The target echo was obtained by modulating the direct-path signal with the echo power, delay and Doppler parameters, which was calculated with the move and scattering characteristics of target. Adding the target echo to surveillance channel, the final monitoring information was obtained. The conventional signal processing was applied on the reference channel and surveillance channel, and the detection probability of specific target was obtained through Monte Carlo simulation. This method can be used to evaluate detection ability of passive radar in the actual scene for specific target.

**Keywords:** passive radar; simulation evaluation; raw signal; scattering characteristics

## 引言

外辐射源雷达, 又称无源雷达, 具有反隐身、



收稿日期: 2015-10-20

修回日期: 2015-12-28;

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61401491);

作者简介: 艾小锋(1983-), 男, 四川安岳, 博士后, 讲师, 研究方向为双/多基地雷达目标成像与特征提取。

抗干扰等天然优势。近二十年来, 利用广播电视、通讯基站、导航和通信卫星、无线局域网络等机会照射源的无源雷达逐渐受到人们重视并成为新型探测技术的研究重点, 国内外已成功研制了多种试验系统, 获得了大量实测数据, 无源相关定位雷达的基础理论与关键技术取得了突破性进展<sup>[1-2]</sup>。在无源雷达中, 典型系统包括美国 Lockheed Martin

公司研制的“沉默哨兵”雷达系统,法国 Thales 公司研制的 HA100 雷达系统等。近年来,以数字调幅广播 DRB、数字音频广播 DAB、数字电视广播 DVB-T 等为代表的数字广播在全球逐步普及,数字广播信号具有信号覆盖范围广、作用距离远、信号样式透明、易获取和易处理等优势,因此基于数字广播信号的无源雷达引起国内外学者的广泛关注<sup>[3]</sup>。

外辐射源信号形式多样,具有很强的针对性,不同的信号需要根据其具体的信号形式、外辐射源位置等,针对特定的目标制定不同信号处理方法。每种外辐射源信号的应用场景不同,针对特定目标的无源雷达探测能力也不同,无源雷达能够随意获取外界信号,不存在单基地雷达中的保密问题,因此对民航飞机的探测常用于系统验证,特别是针对隐身目标的实际探测实验难以开展,因此建模与仿真是一个重要的研究手段<sup>[4-7]</sup>。

文献[8-11]从宏观上仿真分析了无源雷达的探测威力,具有一定的理论价值,但没有结合实际系统、环境特性、目标特性等现实因素,本文利用搭建的无源雷达接收系统,获得了实际的环境信号,然后将特定目标动态特性调制到回波通道,得到完整的无源雷达接收信号,通过后续信号处理及蒙特卡罗仿真得到目标发现距离积与检测概率的关系图,用于评价无源雷达系统针对特定目标的探测能力。整个过程在接收系统实际工作条件下完成,获得的结论更加真实可信。

## 1 目标双基地动态回波模拟

### 1.1 目标运动建模

我们可以将短时间内的目标运动近似为匀加速运动,在双基地平面内有一点目标作直线运动,如图 1 所示。

图 1 中 T 为发射站, R 为接收站, L 为基线长度,初始时刻目标所在位置的双基地角为  $\beta$ ,  $\theta_T, \theta_R$  分别为目标相对于 T 站和 R 站的方位角,

$R_T, R_R$  分别表示初始时刻目标与发射站和接收站的距离,设目标以速度  $v$ , 加速  $a$  沿与双基地角平分线夹角  $\varphi$  方向作匀加速直线运动。

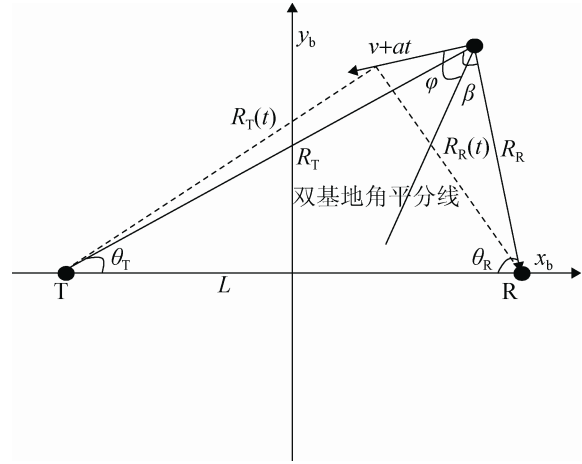


图 1 双基地雷达点目标运动几何配置示意图

通常情况仅需考虑目标二次运动项,  $t$  时刻距离和  $R(t)$  可近似表示为

$$R(t) \approx R_s + v_s t + \frac{1}{2} a_s t^2 \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} R_s &= R_R + R_T, \\ v_s &= -2v \cos \varphi \cos \left( \frac{\beta}{2} \right), \\ a_s &= v^2 \left[ \frac{\sin^2(\varphi - \beta/2)}{R_T} + \frac{\sin^2(\varphi + \beta/2)}{R_R} \right] - \\ &\quad 2a \cos \varphi \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

### 1.2 目标双基地散射特性建模

目标的双基地散射模型除了与目标的姿态角有关之外,还与收发雷达的双基地角有关,因此,很难通过暗室测量的方法获得其完整的特性数据。因此,通常通过电磁计算获得目标的双基地 RCS。在根据目标几何外形进行电磁计算方面,方法大致可以分为两大类:精确方法和近似方法。精确方法用公式描述边值问题,并利用满足合适的精确边界条件的波动方程的精确解来获得问题的答案,这类方法主要有有限元法、时域有限差分法、边界积分方程法、体积分方程法、多层快速多级算法等。本

仿真系统采用商用电磁计算软件 FEKO 中的多层快速多极算法对特定目标进行建模计算, 这种算法是建立在电磁场积分方程的基础上, 其理论依据是严格的。得到的数据为不同频点、不同电波入射角、不同电波出射角对应的双基地 RCS。

电波入射角用发射站与目标连线在目标坐标系下的俯仰角和方位角来描述, 俯仰角为发射站与目标的连线和目标轴(即目标坐标系下的 x 轴)的夹角, 如图 2 中所示的  $\beta_T$ , 方位角是发射站与目标的连线在目标坐标系的 yoz 平面的投影与 y 轴的夹角, 如下图中的  $\alpha_T$ 。如果是轴对称目标, 则只需要用一个俯仰角来描述电波入射角, 不需要考虑方位角。

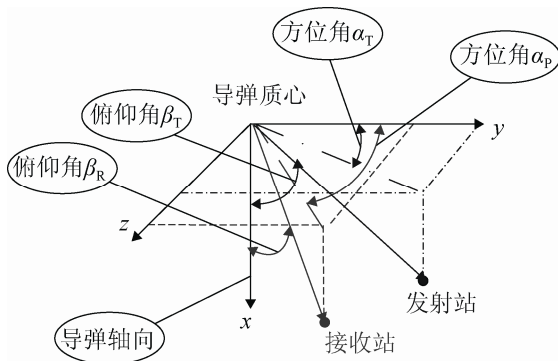


图 2 电波入射角、出射角几何示意图

电波出射角用两个角度(俯仰角和方位角)来描述, 俯仰角为接收站与目标的连线和导弹轴的夹角, 如图 2 所示中的  $\beta_R$ , 方位角为出射电磁波(即接收站与目标连线)在目标坐标系下的方位角  $\alpha_R$  与入射电磁波(发射站与目标连线)在目标坐标系下的方位角  $\alpha_T$  之差, 即  $\alpha_R - \alpha_T$ 。其中, 目标坐标系下的方位角定义同上(空间一点与目标质心的连线在目标坐标系的 yoz 平面的投影与 y 轴的夹角)。

双基地角为发射站与目标连线和接收站与目标连线的夹角。以发射站为坐标原点, 建立观测直角坐标系(即雷达站直角坐标系), 设接收站 R 在该坐标系中的坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 目标 M 在该坐标系中的坐标为  $(x_2, y_2, z_2)$ , 根据空间两直线夹角公式, 得到双基地角为:

$$\beta = \arccos \left[ \frac{x_2(x_2 - x_1) + y_2(y_2 - y_1) + z_2(z_2 - z_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right] \quad (3)$$

利用电磁计算软件得到的目标在全方位下的散射特性数据后, 结合目标运动和姿态得到各个时刻的双基地 RCS 步骤如下:

①战情设置: 设置参数包括发射机和接收机雷达站的经纬度、目标的类型、运动参数等;

②运动信息解算: 根据战情设置参数, 确定目标的位置矢量、速度矢量、姿态等, 再结合发射和接收站位置解算双基地距离和、双基地速度、双基地加速度等运动信息。

③姿态解算: 根据目标姿态、发射和接收站视线的相对关系, 进行相应的坐标变换<sup>[12]</sup>, 解算出在各个时间入射和出射视线角;

对于旋转对称目标, 入射视线的夹角是一维的, 而接收视线的夹角是二维的, 对于非旋转对称目标, 入射视线和接收视线的夹角均是二维的, 其具体解算过程可描述流程图见图 3。

④数据获取: 获取各时刻点的收发视线角后, 在电磁计算数据结果中查找该视线角下的 RCS, 组成目标动态 RCS 序列。

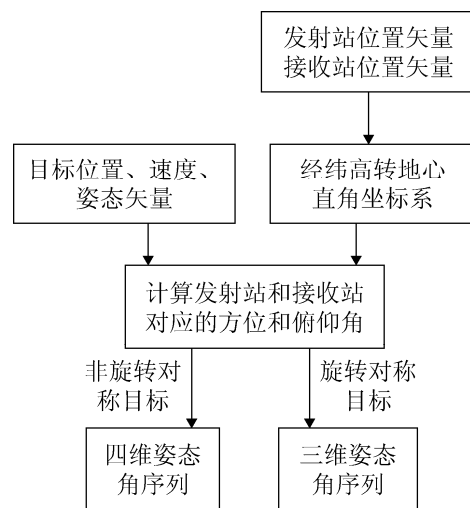


图 3 目标姿态解算流程图

### 1.3 目标双基地回波模拟

双基地条件下,接收站监视通道接收目标信号的功率应该为<sup>[13]</sup>:

$$P_{rs} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r(\Delta\varphi) \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot (R_T R_R)^2 \cdot L_s} \quad (4)$$

式中:  $P_t$  为雷达发射功率;  $G_t$  为发射天线增益;  $\Delta\varphi$  为 R 站和目标连线与接收波束中心指向之间的夹角;  $G_r(\Delta\varphi)$  为接收天线增益;  $\lambda$  为载频波长;  $\sigma$  为目标的双基地 RCS, 随着电波入射角和出射角变化;  $L_s$  为综合损耗。

接收站参考通道接收直达波信号的功率为:

$$P_{rd} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot L^2 \cdot L_s} \quad (5)$$

此处假定参考天线对准发射天线, 增益最大, 其余参数同上, 综合损耗近似相等。因此, 目标回波功率亦可表示如下:

$$P_{rs} = P_{rd} \frac{L^2}{4\pi G_r} \cdot \frac{G_r(\Delta\varphi)\sigma}{(R_T R_R)^2} \quad (6)$$

其中,  $P_{rd}$ ,  $G_r$ ,  $L$  可以事先获得, 而  $G_r(\Delta\varphi)$ 、 $R_T R_R$ 、 $\sigma$  需根据目标的位置和姿态实时计算获得。

对于接收站而言, 目标散射回波的时延为

$$t_d = \frac{R_s + v_s t + \frac{1}{2} a_s t^2}{c} \quad (7)$$

其中:  $c$  为光速。

其多普勒频率为

$$f_d = \frac{v_s + a_s t}{\lambda} \quad (8)$$

假设已经从参考通道获得的重构信号为  $S_r(t)$ , 在不存在观测目标情况下, 则监视通道的信号可以表示如下<sup>[14]</sup>:

$$S_s(t) = \sum_{n=0}^{N_c} A_{cn} S_r(t - \tau_{cn}) + N(t) \quad (9)$$

式中:  $N_c$  为目标个数;  $A_{cn}$  为目标对应的幅度,  $\tau_{cn}$  为目标对应的时延,  $N(t)$  为监视通道热噪声。

在获得直达波信号和监视通道信号后, 监视通道信号中不包括我们关心的特定目标, 因此首先对直达波信号进行幅度、时延、多普勒调制可得对应的目标回波, 再叠加到监视通道的信号中, 得到最

终的监视信号,

$$S_{st}(t) = S_s(t) + \sum_{m=1}^{N_t} A_{tm} S_r(t - \tau_{tm}) e^{j2\pi f_{dm} t} \quad (10)$$

其中:  $N_t$  分别为目标个数;  $A_{tm}$  分别为目标对应的幅度,  $\tau_{tm}$  分别目标对应的时延,  $f_{dm}$  为目标多普勒, 分别可由式(6), (7), (8)计算获得。

## 2 无源雷达探测能力评估建模

### 2.1 评估指标模型

根据公式(4), 双基地接收机在最小可检测信噪比条件下, 目标最大发现距离积可表示为:

$$(R_T R_R)_{\max}^2 = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r(\Delta\varphi) \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 K T_e B_n \left(\frac{S}{N}\right)_{\min} L_s} \quad (11)$$

式中:  $T_e$  为接收系统的等效噪声温度;  $B_n$  为接收机噪声带宽, 通常认为用接收机信号带宽代替;  $(S/N)_{\min}$  为检测需要的接收机最小信噪比;  $K$  为波耳兹曼常数,  $K=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

本文采用目标检测概率和距离积的关系曲线作为评估指标, 由信号检测理论可知, 目标检测概率  $P_d$  一般可写为:

$$P_d(P_{fa}, \lambda) = \int_{\sqrt{2 \ln(P_{fa}^{-1})}}^{\infty} z \exp\left\{-\left[\lambda + \frac{z^2}{2}\right]\right\} I_0[z\sqrt{2\lambda}] dz \quad (12)$$

式中:  $P_{fa}$  表示虚警概率, 当接收机匹配于反射信号时, 可以证明  $\lambda$  等于信噪比 SNR。

由式(11)可知, 雷达接收天线口面处的回波信噪比与距离积成平方关系, 而信噪比和检测概率之间的关系服从上面的讨论, 所以我们在得到了各次蒙特卡罗的发现距离积之后, 经过高阶多项式曲线拟合可以得到目标检测概率和距离积的关系曲线。

### 2.2 评估流程

综合上述建模过程, 可以得到基于目标动态特性与实测数据相结合的无源雷达探测能力评估流程, 如图 4 所示。首先事前获得系统的参数, 包括发射站、接收站位置、信号频率、直达波功率、天线方向图、目标双基地散射特性数据库等; 然后设

定针对目标的轨迹和姿态, 并进行参数解算, 得目标回波幅度、时延、多普勒参数; 最后对直达波进行参数调制, 叠加到监视通道中, 得到含目标回波的监视信号, 经信号处理检测出点迹后计算评估指标, 直到仿真结束。

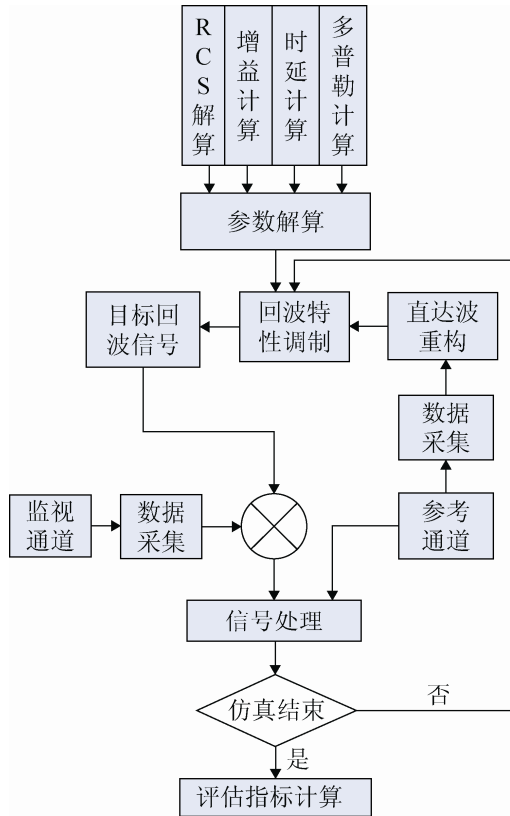


图 4 探测能力评估流程

### 3 仿真实验与结果分析

#### 3.1 实测数据获取及处理

随着电子技术和数字信号处理技术的发展, 目前许多雷达装备都采用全数字化处理, 在中频时进行直接 A/D 采样, 然后通过数字信号处理进行后面的杂波对消、相关检测、积累等处理。我们采用模块化软件化思想, 设计了无源雷达接收与处理系统, 系统框图如图 5 所示, 分接收天线、多通道接收机、数据采集模块、数据存储与信号处理模块。信号处理采用 CPU+GPU 并行架构<sup>[14]</sup>, 满足实时处理需求。

试验系统信号处理流程如图 6 所示, 主要包括杂波对消、相关处理、积累检测、点迹参数提取等<sup>[3]</sup>。

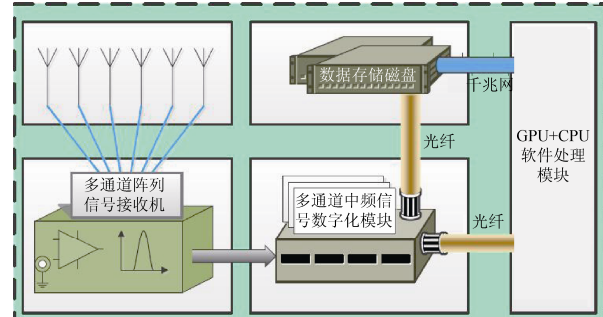


图 5 无源雷达接收处理系统框图

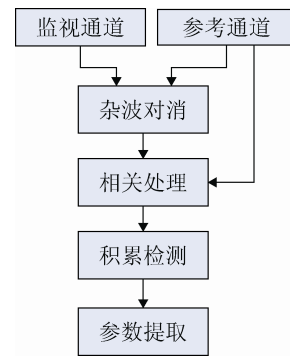


图 6 信号处理流程框图

无源雷达系统利用洛阳电视台的广播电视信号, 参考通道和监视通道接收信号的频谱如图 7 所示, 选择的信号中心频率为 682 MHz, 带宽为 7.56 MHz, 是数字电视地面广播(DTTB)信号<sup>[15]</sup>。经过标定得到电视塔位置, 接收天线位置, 并观测洛阳北郊机场起降的飞机, 该功能已经实现, 证明该系统具备正常的探测功能, 但是系统的实际探测能力还有待于进一步验证分析。

#### 3.2 评估结果分析

根据发射塔和接收天线位置构成双基地雷达观测场景, 通过 STK 软件生成一条目标航迹, 先按照两部单基地雷达解算分别解算目标的距离、速度, 以及雷达视线在目标坐标系中的俯仰方位角, 然后将各自的距离、速度求和得到双基地距离和、双基地速度, 如图 8(a), (b)所示, 并转化为时延和多普勒; 最后再将两个站视线角度转换到目标坐标系的入射俯仰角、接收方位和俯仰角, 如图 8(c)、图 8(d)、图 8(e)所示, 用于查找目标的双基地 RCS, 目标的散射特性如图 8(f)所示, 结合天线方向图、当前的距离积可得功率调制参数。

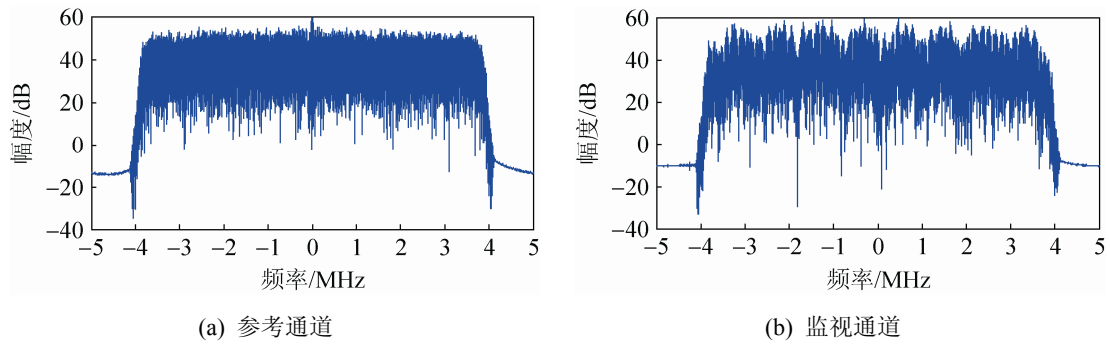


图 7 实测信号频谱

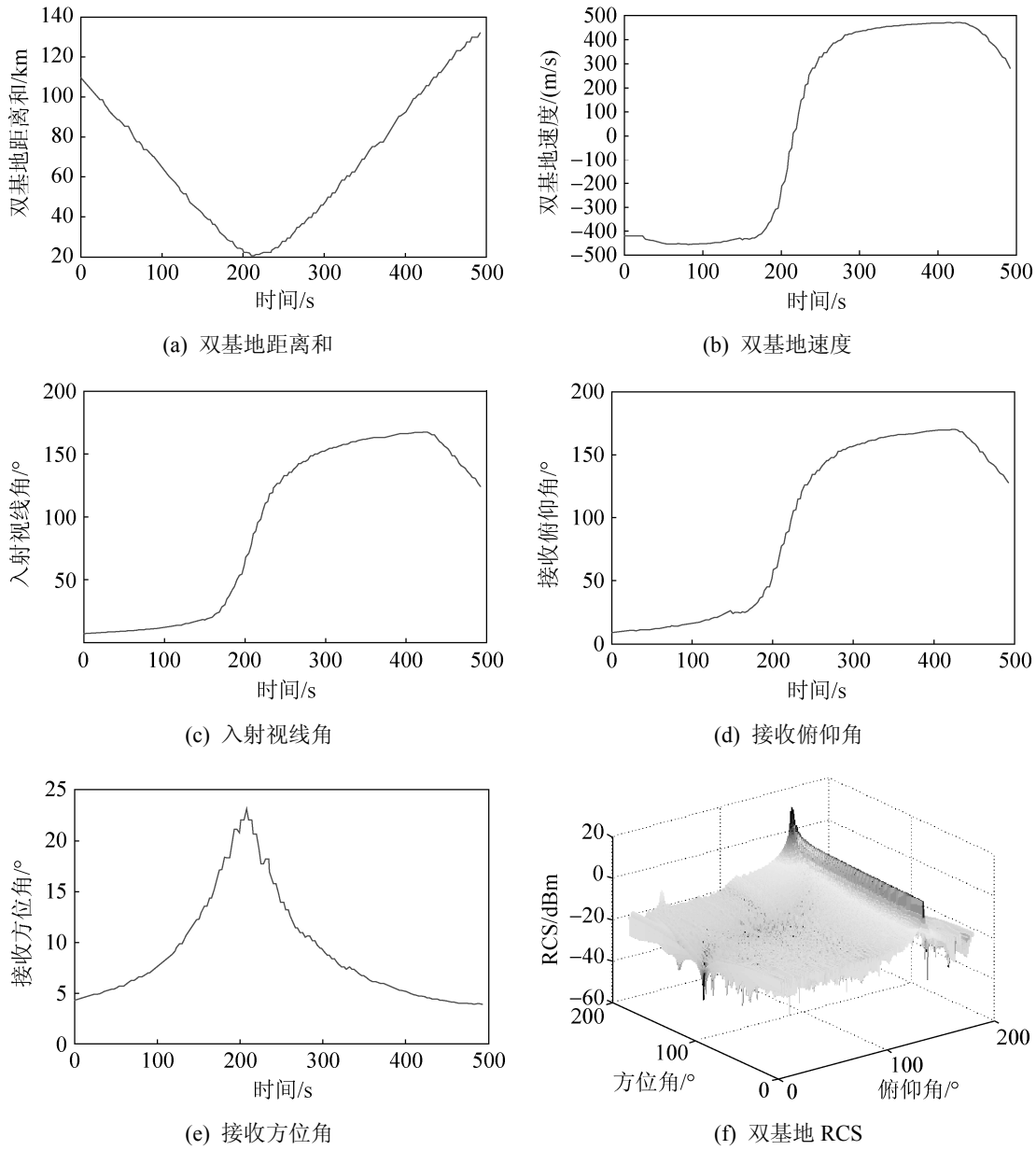


图 8 战情解算和目标特性

根据我们选定的天线,通过计算可得天线方向图模型,如图 9 所示,实际中我们仅考虑主瓣内目



标探测。

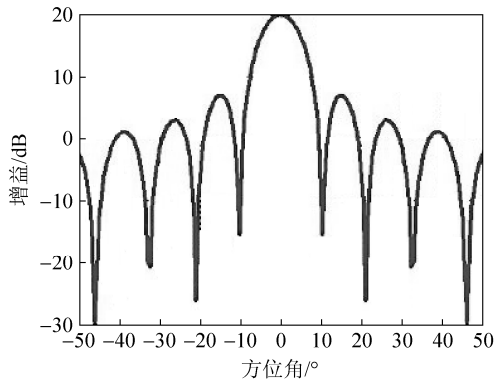


图 9 天线方向图

按照设定战情运行一次, 信号处理结果如图 10 所示, 为积累检测的点迹。可以看出针对设定的目标在一定的距离和多普勒范围内能够检测出来, 同时存在大量的杂波。

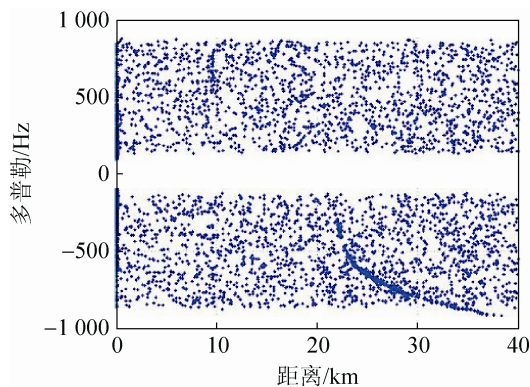


图 10 信号处理结果

我们通过 1 000 次蒙特卡洛仿真, 将检测的点与设定的目标真实位置点对比, 得到真实目标的检测概率, 用于计算评估指标, 如图 11 所示。可以看到在设定的战情条件下, 检测概率随距离积的变化规律总的趋势是单调的, 但由于目标 RCS 存在起伏和环境变化。可以看到目标在距离积为  $350 \text{ km}^2$  时, 目标发现概率为 0.4%, 在  $300 \text{ km}^2$  发现概率达到 54.4%, 以此可作为该无源探测雷达系统对设定目标的探测能力。同时通过上面的评估流程证明了本文仿真评估系统的有效性。

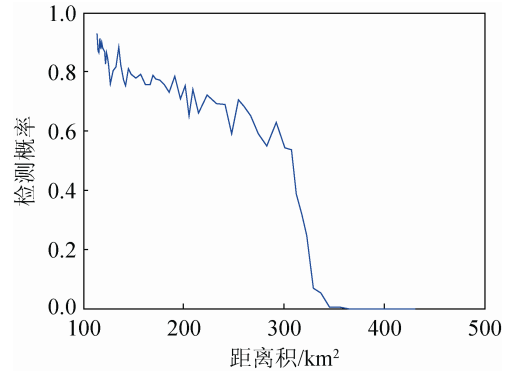


图 11 距离积-检测概率曲线

## 4 结论

现有无源雷达系统可用信号很多, 不同信号应用场景不同, 取得的效果也不同。本文利用实际的无源雷达信号接收与处理系统获得了直达波和周围环境信号, 然后结合特定目标的双基地散射特性、运动特性得到特定目标动态回波, 提出了一套评估流程, 用于评价无源雷达系统针对特定目标的实际探测能力。在实际应用过程中, 可以多选择几个布站位置接收信号进行仿真评估, 得到不同位置下的目标检测概率曲线, 通过选择相同检测概率条件下具有最大探测距离积的位置作为优化部署位置。论文仅选取了 DTTB 信号作为外辐射源信号做了实验, 实际上该流程适应于其它信号, 只是目标特性数据需重新获得。另外本文选用的评估指标为距离积-发现概率曲线, 实际中还有其它指标, 后续中将添加。

## 参考文献:

- [1] 杨光平. 外辐射源雷达关键技术研究 [J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 5-9.
- [2] 宋杰, 何友, 蔡复青, 等. 基于非合作雷达辐射源的无源雷达技术综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2151-2156.
- [3] Tao Shan, Shengheng Liu, Yimin Zhang, et al. Efficient Architecture and Hardware Implementation of Coherent Integration Processor for DVB-based Passive Bistatic Radar [J]. IET Radar Sonar & Navigation (S1751-8784), 2015, 9(7): 1-10.
- [4] 王国玉, 汪连栋, 肖顺平, 等. 雷达电子战系统数学仿真与评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

