

基于星载机会源的空间目标外辐射源雷达探测技术可行性研究

蒋铁珍^{*①} 肖文书^② 李大圣^② 廖同庆^①

^①(安徽大学电子信息学院 合肥 230601)

^②(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 空间目标监视雷达通常采用有源雷达,为了充分发挥无源雷达在空间目标监视中的本身优势,该文分析了利用卫星信号作为机会源的外辐射源雷达探测空间目标的可行性。首先,从可探测时间、直达波抑制等角度分析了利用卫星信号的外辐射源雷达能够较好地探测低轨目标。同时,仿真分析了卫星信号外辐射源雷达 Ku 和 L 波段空间目标双站横截面积(Radar Cross Section, RCS),为空间目标前向散射能量的选择提供基础。最后,研究了系统增益、积累时间、辐射源选择等系统关键参数,从关键参数的分析可以看出,利用同步卫星电视的外辐射源雷达系统规模相对较小。分析结果可以大大促进卫星外辐射源雷达探测空间目标的发展。

关键词: 外辐射源雷达; 空间目标; 同步卫星电视; 全球导航系统; 可探测时间

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)06-0711-09

DOI: 10.12000/JR14080

Feasibility Study on Passive-radar Detection of Space Targets Using Spaceborne Illuminators of Opportunity

Jiang Tie-zhen^① Xiao Wen-shu^② Li Da-sheng^② Liao Tong-qing^①

^①(School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

^②(Nanjing Electronic Technique Institute, Nanjing 210039, China)

Abstract: Space target surveillance generally uses active radars. To take full advantage of passive radars, the idea of using spaceborne illuminators of opportunity for space target detection is presented in this paper. Analysis of the detectable time and direct wave suppression shows that passive radar using spaceborne illuminators of opportunity can effectively detect a Low-Earth-Orbit (LEO) target. Meanwhile, Ku and L band bi-static radar cross section of passive radars that use spaceborne illuminators of opportunity are presented by simulation, providing the basis of choosing space target forward scatter. Finally the key parameters, mainly system gain, accumulation time and radiation source selection are studied. Results show that system size using satellite TV signals as illuminators of opportunity is relatively small. These encouraging results should stimulate the development of passive radar detection of space targets using spaceborne illuminators of opportunity.

Key words: Passive radar; Space target; Satellite TV; GPS; Detectable time

1 引言

在大气层或深空中存在大量的飞行物体,尺寸分布很宽,小到微米(微克),大到数十米(数百吨)^[1,2]。现有的空间目标探测网主要布置了天基监视、光学监视、雷达监视设备,其中雷达主要包括各种地海基深空探测雷达、地海基成像雷达等^[3,4],可以看出,目前的空间目标监测雷达主要是有源雷达。与有源雷达相比,由于本身不辐射信号,外辐射源雷达具有天然的优势^[5,6],主要体现在如下几个

方面:(1)隐蔽性强;(2)生存能力强;(3)反侦察能力强;(4)系统简单、耗费低等。

基于机会照射源的外辐射源雷达技术目前的研究主要集中在以调频广播和电视作为辐射源^[7-11],部分研究院校开始关注机载、飞艇载及星载外辐射源雷达的可行性^[12,13]。为了实现对空间目标的有效探测、定轨、管理编目,空间目标探测系统将考虑以卫星信号作为机会源的外辐射源雷达的发展。近几年,以卫星信号作为机会源的外辐射源雷达的研究国内外均有报道^[14-20],文献[14-18]主要研究各种卫星信号形式作为外辐射源进行无源探测的关键技术,如 ABS-S, DVB-S, DVB-T 等,文献[19,20]探讨了利用 GPS 或北斗卫星作为辐射源的雷达探

2014-05-27 收到, 2014-11-03 改回; 2014-11-26 网络优先出版
教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123401120008)资助课题
*通信作者: 蒋铁珍 tietiezhen@163.com

测目标的可行性。本文将利用基于卫星信号作为机会源的外辐射源雷达探测空间目标，从系统关键参数、可探测时间等角度详细研究了以卫星信号作为机会源的外辐射源雷达探测空间目标的可行性。

2 不同轨道空间目标探测可行性研究

2.1 卫星信号特性

辐射源信号的有效辐射功率、频率、波束形状、信号特性(时域、频域特性及模糊函数)等的分析对于外辐射源雷达来说尤其重要。本文主要分析两类辐射源的模糊函数：同步卫星电视信号和导航卫星GPS信号。模糊函数^[6]的表达式如式(1)所示：

$$\gamma(\tau, \varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u(t - \tau)e^{j2\pi\varepsilon t} dt \quad (1)$$

式中， τ 是时延， ε 是多普勒频移。

目前GPS系统主要采用直接序列扩频调制技术，使用的扩频码包括码速率1.023 MHz的C/A码和码速率为10.23 MHz的P码，卫星信号是将

导航电文 $D(t)$ 经过两级调制后的信号。由于P码为军用加密码，无法获得，因此一般情况下只研究C/A码。C/A码码周期为1 ms，码长为1023，即一个周期有1023个码元，因此，数据码一个码元的持续时间为20 ms，包含了20个周期的C/A码。以GPS信号作为机会源的外辐射源雷达在接收信号的时候不关心导航数据 $D(t)$ 的内容^[20]，因此在仿真的时候可以直接用C/A码代表GPS信号。

同步卫星电视信号用一个随机序列经过相位调制等处理后来仿真^[17]，时域表达式如式(2)所示：

$$s(t) = u(t)e^{j2\pi f_0 t} = a(t)e^{jp(t)}e^{j2\pi f_0 t} \quad (2)$$

式中 $u(t)$ 为其复包络， $p(t)$ 为相位调制函数。

图1是同步卫星电视和导航卫星信号的模糊函数。同步卫星电视：符号率为4.4 MSps，成形滤波滚降系数为0.35的DVB-S信号，带宽约为6 MHz，采样频率为13.2 MHz，即一个符号采样3个点。GPS信号：带宽约为2 MHz，基带信号采样频率设

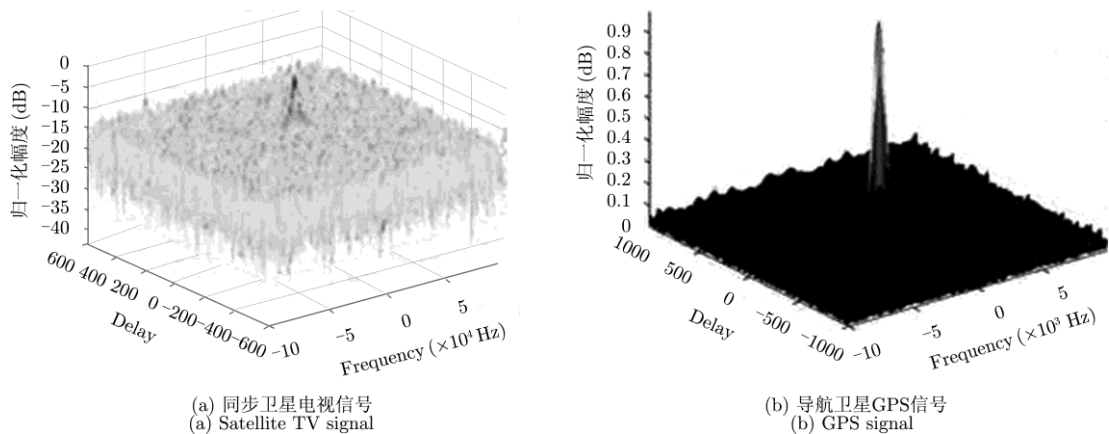


图1 卫星信号模糊函数

Fig. 1 Ambiguity function of satellite signal

为 $5 \times 1.023 \text{ MHz} = 5.115 \text{ MHz}$ ，即每个码元采样5个点，因C/A码码周期为1 ms，码长为1023，因此1 ms的时间长度内一共有5115个数据点。

通过分析可以看出，同步卫星电视和导航卫星信号都具有良好的时域和频域特性，模糊函数近似为“图钉”，是较为理想的雷达信号。

2.2 可探测时间

目标处于卫星波束覆盖区域内的时间为可探测时间，可探测时间是衡量空间目标无源探测可行性的重要因素之一。其空间几何关系如图2所示。图中， b 为辐射源的波束宽度， d 为辐射源卫星到目标所在平面的距离， L 为目标进入卫星信号覆盖范围的位置到投影平面直径的距离。

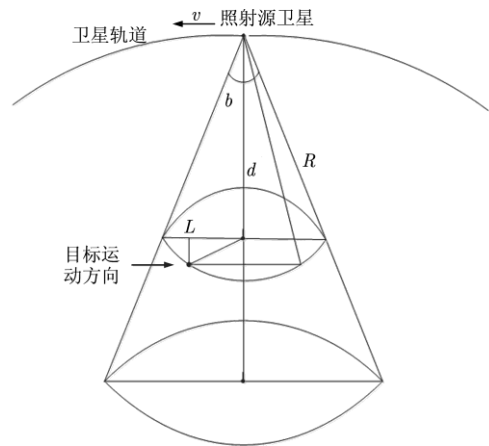


图2 可探测时间的空间几何关系

Fig. 2 Spatial relations of detectable time

辐射源波束覆盖区域的半径 r 与 d 的关系为：

$$r = d \tan(\beta/2) \quad (3)$$

对于给定轨道参数的空间目标而言，其最大运动速度为近地点速度^[6,21]，由式(4)给出：

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{\mu}{a} \cdot \frac{1+e}{1-e}} \approx \sqrt{\frac{\mu}{R_e+h}} \quad (4)$$

式中 $\mu = 3.986005 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 为地球引力常数， a 为轨道长半轴， R_e 为地球半径， h 为轨道高度。

因此，可探测时间由式(5)给出：

$$T = 2\sqrt{(d \tan(b/2))^2 - L^2} / |V_{\max} \mp V_{\maxs}| \quad (5)$$

式中， V_{\max} 为目标运动速度， V_{\maxs} 为卫星辐射源运动速度， \mp 代表目标运动方向与卫星辐射源一致或相反。从式(5)可知，当 $L=0$ 时，可探测时间最长。

同步卫星电视处于 36000 km 的同步轨道，波束宽度 $b = 6.4^\circ$ ，照射范围在地面投影为一个以波束中心为圆心，半径为 2000 km 的圆形区域。对于同步卫星电视而言，由于辐射源波束宽度较小，轨道高度高，辐射源卫星到目标所在平面的距离 d 近似等于辐射源卫星和目标的轨道高度差。根据式(5)仿真分析，表 1 给出了利用同步卫星电视作为机会源时不同轨道高度的最长可探测时间($L=0$)。

表 1 不同轨道高度目标的同步卫星电视信号可探测时间
Tab. 1 Detectable time of different orbit space target for satellite TV signal

目标轨道高度(km)	方向一致(s)	方向相反(s)	目标轨道高度(km)	方向一致(s)	方向相反(s)
200	850	369.0	34000	2980	36
400	864	370.8	34200	2992	33
600	881	372.7	34400	3004	29
800	898	374.0	34600	3016	25
1000	918	375.8	34800	3024	22
1200	930	377.0	35000	3038	18
1400	944	378.5	35200	3045	15
1600	960	379.8	35400	3058	11
1800	979	380.7	35600	3070	9
2000	990	381.8	35800	3080	4

从表 1 中可以看出，使用同步卫星电视信号可有效探测低轨道目标，可探测时间与目标运动方向关系较小，不管目标与电视卫星之间的运动方向如何，可探测时间均在 350 s 以上。

GPS 卫星天线波束宽度约为 42.6° ，目标只有处于波束覆盖范围内的区域才能被探测到。根据式(5)仿真分析，表 2 给出了利用 GPS 作为机会源时不同轨道高度的最长可探测时间($L=0$)。

表 2 不同轨道高度目标的 GPS 信号可探测时间
Tab. 2 Detectable time of different orbit space target for GPS signal

目标轨道高度(km)	方向一致(s)	方向相反(s)	目标轨道高度(km)	方向一致(s)	方向相反(s)
200	3990	1338.0	18000	10045	216
400	4080	1337.0	18200	10100	198
600	4150	1336.5	18400	10160	180
800	4220	1336.0	18600	10220	159
1000	4310	1334.0	18800	10290	140
1200	4390	1331.5	19000	10340	120
1400	4470	1328.0	19200	10400	100
1600	4530	1326.0	19400	10450	80
1800	4610	1322.0	19600	10520	60
2000	4700	1318.0	19800	10580	40

从表 2 中可以看出，使用导航卫星信号可有效实现低轨道目标的探测，可探测时间与目标运动方向关系较小，不管目标与电视卫星之间的运动方向如何，可探测时间均在 1300 s 以上。

综合上述结论，从可探测时间来看，使用同步卫星电视信号难于探测高轨道目标，可探测低轨道目标；使用导航卫星信号难于探测中轨道目标，可探测低轨道目标。

2.3 直达波抑制

在外辐射源雷达中，强直达波干扰是影响目标检测的关键因素。一般情况下，直达波抑制采用直达波抑制对目标探测的影响来分析，其影响分析的几何关系如图 3 所示。

图 3 中， d 为辐射源卫星到目标所在平面的距离， r 为辐射源波束覆盖区域的半径， D 为辐射源与接收站之间距离。图 3 中具有以下几何关系：

$$\alpha = a \tan\left(\frac{d \tan(b/2)}{D-d}\right) \quad (6)$$

α 为直达波和回波入射角差， α 的大小反映了直达波抑制对探测目标的影响大小，入射角差 α 越大，直达波抑制对目标探测的影响越小；入射角差 α 越小，直达波抑制对目标探测的影响越大。

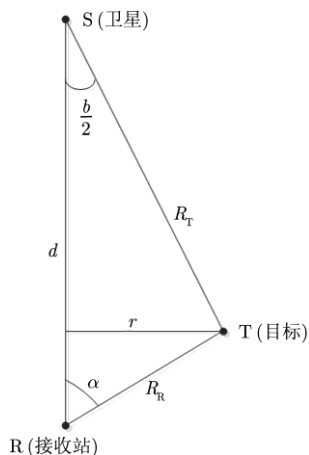


图3 直达波抑制影响分析空间几何关系

Fig. 3 Spatial relations of direct wave suppression impact analysis

图4和图5分别给出了利用同步卫星电视和导航卫星信号作为机会源探测不同轨道高度目标时，

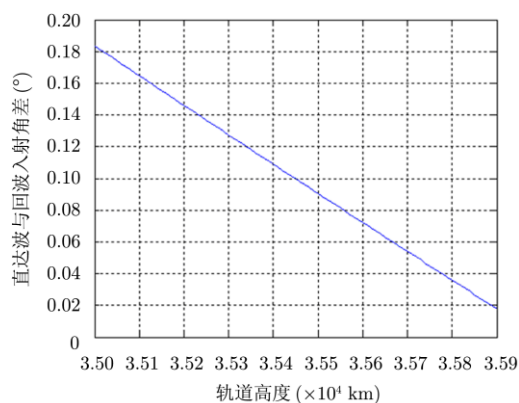
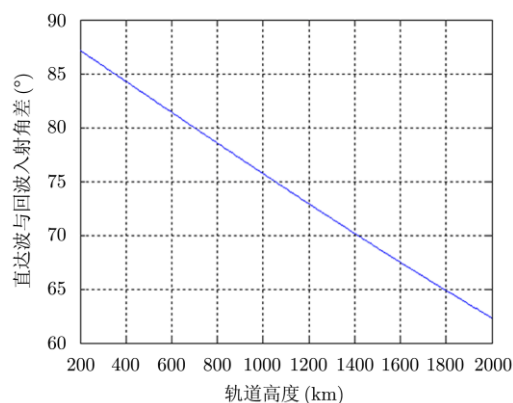
(a) 高轨道
(a) High-Earth-Orbit(b) 低轨道
(b) Low-Earth-Orbit

图4 利用卫星电视的直达波和回波入射角差分布

Fig. 4 Angle difference of satellite TV signal

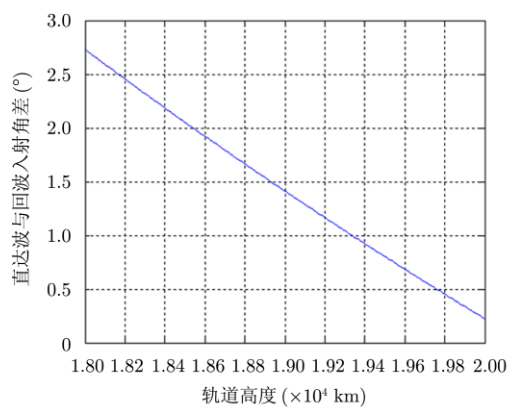
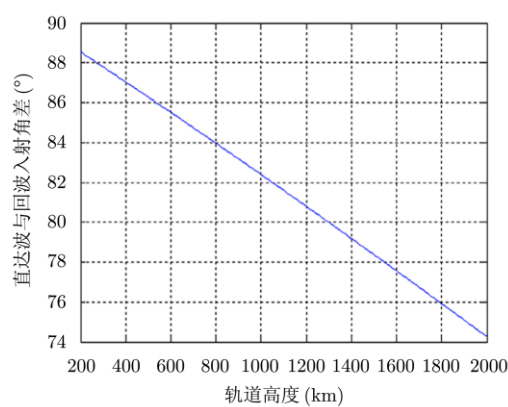
(a) 中轨道
(a) Middle-Earth-Orbit(b) 低轨道
(b) Low-Earth-Orbit

图5 利用导航卫星的直达波和回波入射角差分布

Fig. 5 Angle difference of GPS signal

直达波和回波入射角差的分布。

从图4,图5中可知,利用同步卫星电视信号进行空间目标无源探测时:高轨道目标的直达波与回波角差较小,在 0.5° 以内;而低轨道目标的直达波与回波角差较大,约在 60° 以上。利用导航卫星信号进行空间目标无源探测时:中轨道目标的直达波与回波角差较小,在 3° 以内;而低轨道目标的直达波与回波角差较大,约在 70° 以上。因此,从直达波抑制的影响来看,使用同步卫星电视信号难于探测高轨道目标,可探测低轨道目标,使用导航卫星信号难于探测高轨道目标,可探测低轨道目标。

2.4 辐射源数

由于同步卫星电视信号发射张角很小,对于某一颗卫星附近的的目标,只能使用一颗卫星作为照射源。而对于地面接收站附近的低轨道目标,我国上空的电视直播卫星的波束都能够覆盖到,这样就可以自主地选择最适合的卫星作为照射源。

若采用 GPS 卫星作为照射源探测 GPS 卫星附近目标，由于不能同时利用多颗卫星探测同一个目标，因此无法对目标定位。若探测近地轨道目标，目标与卫星之间距离可使目标能够同时被多颗卫星的波束覆盖，从而实现目标定位。

3 空间目标双站 RCS

空间目标外辐射源雷达为双基地体制雷达，辐射源、目标、接收站之间的相对位置关系如图 6 所示，图中 A 表示接收站的位置，L 为辐射源卫星至接收站距离，即基线长度，h 表示轨道高度， R_e 表示地球半径， R_T 为目标至辐射源的距离， R_R 为目标至接收站的距离。

从图 6 中可以看出，空间目标外辐射源雷达主要接收目标的前向散射能量。空间目标无源探测时的 RCS 与有源探测时不同，为确定空间目标无源探测雷达的规模，需分析空间目标的前后向散射能量。本文主要针对方板、圆柱体分析了同步卫星电视信号 Ku 波段和 GPS 信号 L 波段的前向和后向散射能量。

图 7 是 Ku 波段，入射角(即入射波方向与方板法向或圆柱体轴线方向的夹角)为 0° ，尺寸为 1 m 的方板和长度为 1 m，直径为 0.2 m 的圆柱体的双站 RCS 仿真结果。

图 8 是 L 波段，入射角为 0° ，尺寸为 1 m 的方板和长度为 1 m，直径为 0.2 m 的圆柱体的双站 RCS 仿真结果。

从图 7，图 8 中可以看出，尺寸为 1 m 的方板，Ku 波段前向 RCS 基本上在 40 dBsm 以上，L 波段前向 RCS 约在 20 dBsm 以上；长度为 1 m、直径为 0.2 m 的圆柱体，Ku 波段前向 RCS 约在 30 dBsm 以上，L 波段前后向 RCS 与入射角有关。

因此，对于空间目标外辐射源雷达，基于同步卫星电视信号的外辐射源雷达探测尺寸为 1 m 的空间目标时，RCS 取 30 dBsm，基于导航卫星信号的外辐射源雷达探测尺寸为 1 m 的空间目标时，RCS 取 10 dBsm；尺寸为 10 m 的目标，根据尺寸为 1 m 目标的 RCS，可计算出尺寸 10 m 目标的 RCS 分别为 50 dBsm 和 30 dBsm。

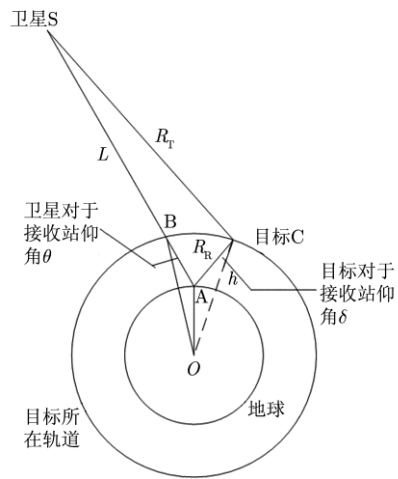


图 6 辐射源、目标、接收站空间几何关系

Fig. 6 Spatial relations between emitter, target and receiver

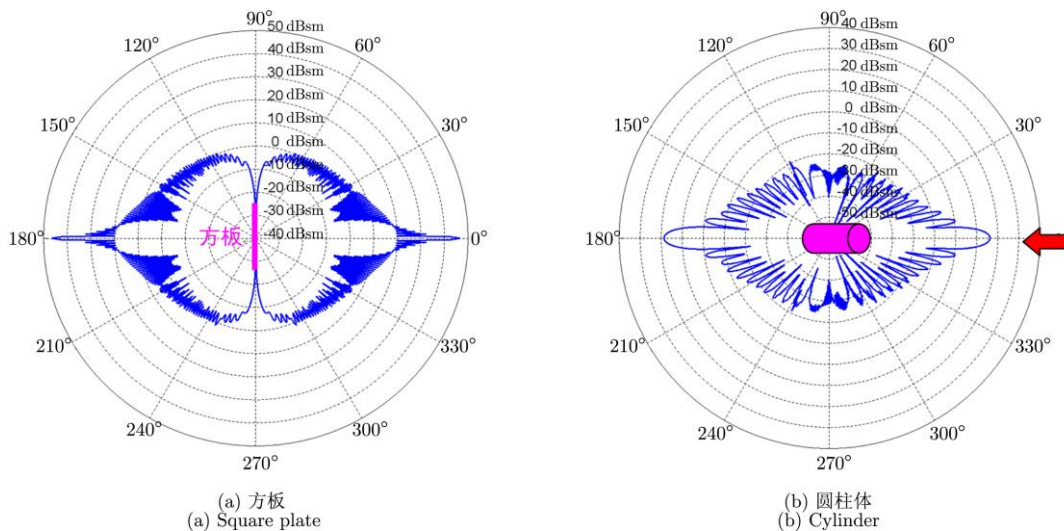


图 7 Ku 波段双站 RCS

Fig. 7 Ku-band bistatic RCS

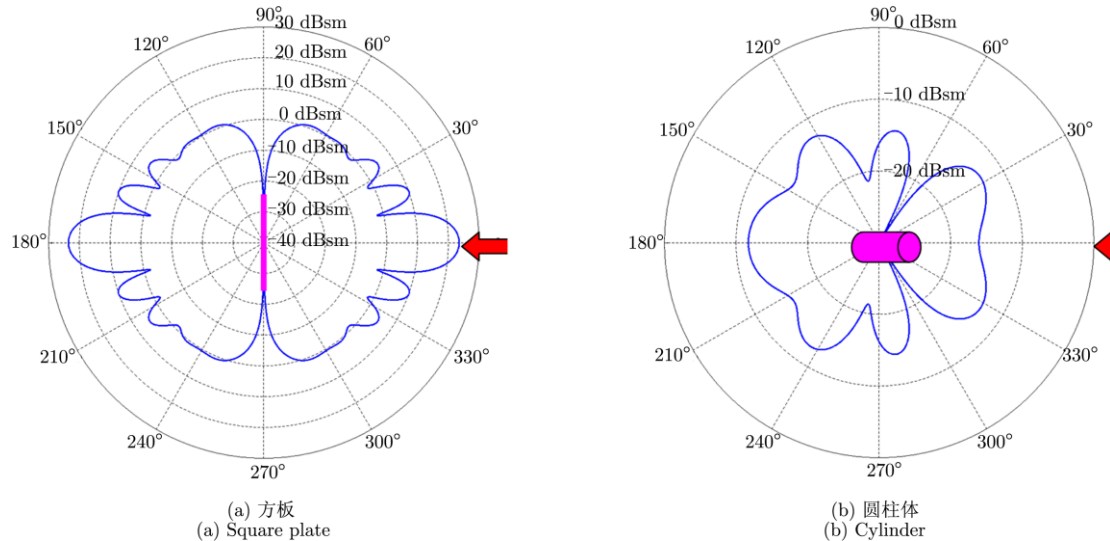


图8 L波段双站 RCS

Fig. 8 L-band bistatic RCS

4 系统关键参数设计

4.1 系统增益

根据双基地雷达方程,系统增益 G 包含两部分:接收天线增益 G_r (单位: dB)和时间积累增益 T (单位: s),系统增益 G 的计算公式如下:

$$G = G_r T = \frac{(4\pi)^3 K T_s \cdot L_s \cdot \text{SNR} \cdot (R_T R_R)^2}{\text{ERIP} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma} \quad (7)$$

式中:

K 为波尔兹曼常数,为 1.38×10^{-23} ;

T_s 为系统噪声温度,取 500 K;

L_s 为系统损耗,根据不同频段雨衰损耗,同步卫星电视信号取 10 dB,导航卫星信号取 3 dB^[6];

SNR 为检测信噪比,取 12 dB;

ERIP 为辐射源有效辐射功率,同步卫星电视信号取 50 dBW^[15],导航信号取 29 dBW^[17];

λ 为波长;

σ 为空间目标 RCS,根据空间目标双站 RCS 分析,同步卫星电视信号取 50 dBsm(相当于空间目标尺寸 10 m),导航卫星信号取 30 dBsm(相当于空间目标尺寸 10 m)。

目标、辐射源、接收站空间几何关系如 6 所示,因此 R_R 与轨道高度 h ,目标仰角 δ 的关系为^[21]:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 90^\circ - \delta - \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos \delta\right) \\ R_R &= (R_e + h) \frac{\sin \beta}{\cos \delta} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

R_T 与 R_R ,目标仰角 δ ,辐射源卫星仰角 θ 的关系为:

$$R_T = \sqrt{R_R^2 + L^2 + 2R_R L \cos(\theta + \delta)} \quad (9)$$

系统增益需求的最大值在最高轨道及最低仰角处取值,低轨道空间目标的轨道高度一般低于 2000 km,仰角一般取 30° 以上。

表 3 和表 4 分别给出了利用同步卫星电视和导航卫星信号 3 种情况下的增益需求:(1)目标仰角为 30° ,卫星仰角为 90° ,轨道高度为 200~2000 km;(2)卫星仰角为 90° ,轨道高度为 1000 km,目标仰角为 $30^\circ \sim 90^\circ$;(3)轨道高度为 1000 km,目标仰角为 30° ,卫星仰角为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。

表3 同步卫星电视信号系统增益需求

Tab. 3 System gain demand for satellite TV signal

情况 1		情况 2		情况 3	
轨道高度 (km)	Gain (dB)	目标仰角 ($^\circ$)	Gain (dB)	卫星仰角 ($^\circ$)	Gain (dB)
200	46.5	30	59.4	30	59.37
400	52.0	40	57.8	40	59.30
600	55.0	50	56.5	50	59.24
800	57.5	60	55.6	60	59.16
1000	59.0	70	55.0	70	59.09
1200	60.6	80	54.6	80	59.02
1400	61.5	90	54.0	90	58.95
1600	62.5	-	-	-	-
1800	63.8	-	-	-	-
2000	64.0	-	-	-	-

表 4 导航卫星信号系统增益需求

Tab. 4 System gain demand for GPS signal

情况 1		情况 2		情况 3	
轨道高度 (km)	Gain (dB)	目标仰角 (°)	Gain (dB)	卫星仰角 (°)	Gain (dB)
200	59.5	30	72.2	30	72.88
400	65.0	40	70.6	40	72.78
600	68.2	50	69.4	50	72.65
800	70.2	60	68.5	60	72.53
1000	72.0	70	67.9	70	72.40
1200	73.5	80	67.6	80	72.28
1400	74.8	90	67.5	90	72.15
1600	75.8	-	-	-	-
1800	76.5	-	-	-	-
2000	77.0	-	-	-	-

通过上述分析可知，利用同步卫星电视信号探测低轨道空间目标时，系统的增益需求主要与目标的轨道高度和仰角有关，与同步卫星电视的仰角无关。利用同步卫星电视信号探测轨道高度 2000 km 以下、尺寸 1 m 以上空间目标时，要求系统增益不低于 64 dB。

利用导航卫星信号探测低轨道空间目标时，系统的增益需求主要与目标的轨道高度和仰角有关，与导航卫星的仰角无关。探测轨道高度 2000 km 以下、尺寸 1 m 以上空间目标时，要求系统增益不低于 77 dB，比利用同步电视卫星大约增加 13 dB，说明相对而言，利用同步电视卫星探测低轨道空间目标更有利。

4.2 积累时间

积累时间的选择影响空间目标无源探测雷达接收阵面口径、测速精度及数据率。积累时间越长，接收阵面口径越小，测速精度越高，但数据率越低，影响空间目标定轨。根据现有空间目标监视雷达定轨的方法，选择积累时间在 4~5 s 以内，对空间目标定轨的影响较小，从数据率要求来看，积累时间最大可取 4 s。同时，积累时间的选取还受到距离分辨率、多普勒分辨率及角度分辨率的影响。采用常规积累算法，要求在积累时间内：

- (1) 距离变化小于距离分辨率；
- (2) 多普勒频率变化小于多普勒频率分辨率；
- (3) 角度变化小于角度分辨率。

同步卫星电视信号的带宽为 6 MHz，距离分辨率约为 50 m，导航卫星信号的带宽为 2 MHz，距离分辨率约为 150 m；当积累时间取 4 s 时，多普勒频率为 0.25 Hz。

图 9 给出了 4 s 时间内，在轨空间目标的多普勒频率变化率。

分析可知，当积累时间取 4 s 时，存在跨距离单元、跨多普勒单元检测的问题，但可通过优化积累算法来解决这一问题，因此，空间目标无源探测雷达积累时间取 4 s。

图 10 给出不同轨道高度的距离变化。由图 10 可知，积累时间取 4 s 时，无论利用同步卫星电视信号，还是利用导航卫星信号，都存在跨距离单元检测的问题，可通过优化积累算法解决。

4.3 辐射源选择

可用于空间目标无源探测雷达的辐射源有同步卫星电视信号和导航卫星信号，利用这两种辐射源探测低轨道空间目标时，各有优缺点，具体情况如表 5 所示。

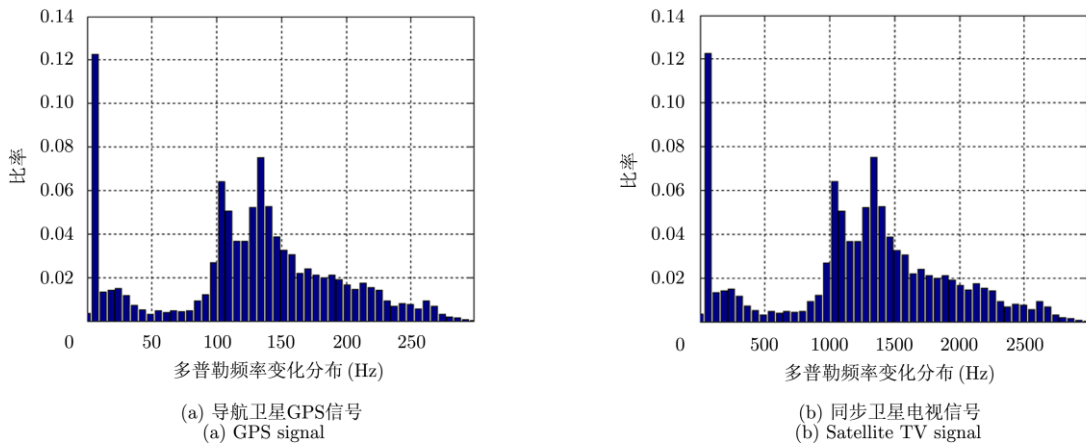


图 9 4 s 内在轨空间目标的多普勒频率变化分布
Fig. 9 Doppler change distribution in 4 seconds

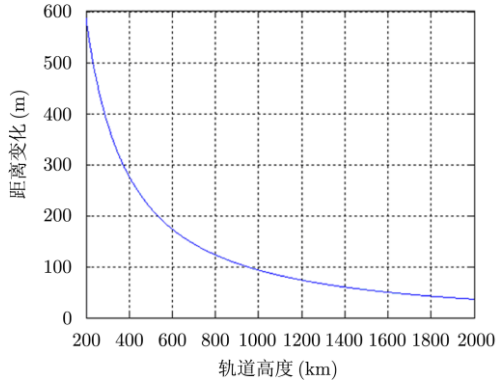


图 10 4 s 内不同轨道高度空间目标距离变化分布

Fig. 10 Distance change distribution in 4 seconds

表 5 同步卫星电视信号和导航卫星信号性能对比表
 Tab. 5 Disadvantages of satellite TV signal and navigation satellite signal

	同步卫星电视信号	全球导航系统信号
频率	Ku 波段, 12 GHz 左右	L 波段, 1.5 GHz 左右
轨道高度	约 36000 km	约 20000 km
ERIP	50 dBW	29 dBW
到达地面有效的功率	约-144 dBW	约-142 dBW
传输损耗	有雨衰, 传输损耗约 5~10 dB	传输损耗小
前向 RCS	约 ≥ 30 dBsm, 与入射角无关	约 ≥ 20 dBsm, 与入射角有关
带宽	6 MHz	2 MHz
可探测时间	350 s 以上	1300 s 以上
直达波与回波入射角差	较大, 不影响直达波对消	较大, 不影响直达波对消
可用辐射源数量	1 个左右	2 个以上, 存在同频干扰

根据上述结论可知, 同步卫星电视信号虽然传输损耗较大, 但由于前向 RCS 较大, 综合探测能力比导航卫星信号大 10 dB 以上; 同时, 由于同步卫星电视信号带宽宽, 利用同步卫星电视信号探测空间目标时, 测距精度较高, 更有利于空间目标定轨; 此外, 利用导航卫星信号探测空间目标时, 存在同频干扰, 影响空间目标探测。因此, 综合来看, 利用同步卫星电视信号探测低轨道空间目标优于导航卫星信号。

5 结束语

本文从可探测时间、直达波抑制、辐射源数分析了卫星外辐射源雷达探测空间目标的可行性。分析结

果显示, 利用导航卫星和同步卫星电视能够较好地探测低轨道空间目标。同时针对利用导航卫星和同步卫星电视的外辐射源雷达系统设计问题, 重点针对系统增益、积累时间进行了设计, 积累时间选择 4 s, 而从系统增益看, 外辐射源雷达最好选择同步卫星电视作为外辐射源雷达的辐射源。因此, 外辐射源雷达可利用同步卫星电视信号探测低轨道空间目标。

参考文献

- [1] Wang Jie-juan. The current development and characteristics analysis of foreign space based space surveillance[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2006, 17(4): 33-37.
- [2] Zhou Yan-ping. Acquisition probability model of noncooperative maneuvering target detection in space[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 639-643.
- [3] Zhang Hai-cheng, Yang Jiang-ping, and Wang Han-zhong. Development and inspiration of space surveillance equipment and technique[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(12): 11-14.
- [4] Pei Zhen-ning, Ye Wei, Qu Wei, et al. The performance analysis of a passive radar based on GPS signal[J]. *RADAR & ECM*, 2012, 32(2): 9-12.
- [5] Ma Jian-guo, Cao Ke-jing, Zhang Lei, et al. Passive detection of marine targets based on GPS signals reflected from sea surface[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(5): 987-991.
- [6] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. Third Edition, Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 18-68.
- [7] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. *雷达学报*, 2012, 1(2): 109-123.
Wan Xian-rong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109-123.
- [8] 卢开旺, 杨杰, 祁小庆, 等. 基于多频段 DVB-T 信号的无源 ISAR 成像研究[J]. *现代雷达*, 2014, 36(4): 24-30.
Lu Kai-wang, Yang Jie, Qi Xiao-qing, et al. A study on passive ISAR imaging based on multi-channel DVB-T signals[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(4): 24-30.
- [9] 唐慧, 万显荣, 陈伟, 等. 数字地面多媒体广播外辐射源雷达目标探测实验研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(3): 575-580.
Tang Hui, Wan Xian-rong, Chen Wei, et al. Experimentation on target detection with passive radar based on digital terrestrial multimedia broadcasting[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 575-580.
- [10] Wang Qing, Han Bo, and Zhang Xu. Future complex heterogeneous multi-illuminator compatible oriented broadband cognitive passiveradar[C]. 2013 8th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), SriLanka, 2013: 80-82.

- [11] Edrich M and Schroeder A. Multiband multistatic passive radar system for airspace surveillance: a step towards mature PCL implementations[C]. 2013 International Conference on Radar, Xi'an, 2013: 218-223.
- [12] Hassoy S O. Airborne passive radar application: interactions with space[C]. 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Turkey, 2013: 151-154.
- [13] 王志纲, 董鹏曙, 吴琼. 飞艇载无源雷达的外辐射源选择[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1): 8-12.
Wang Zhi-gang, Dong Peng-shu, and Wu Qiong. Study on selection of external transmitters for airship-borne passive radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2014, 12(1): 8-12.
- [14] Polonen Keijo and Koivunen Visa. Control symbol based fluctuating target detection in DVB-T2 passive radar systems[C]. 2013 IEEE Radar Conference, Canada, 2013: 1-5.
- [15] Yu Xiao-fei, Wang Ming-yang, Wang Tian-yun, et al. Design and implementation of an experimental ABS-S based passive radar[C]. 2013 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Hangzhou, 2013: 1-4.
- [16] Tam'as Pet'o, Levente Dud'as, and Rudolf Selle. DVB-T based passive radar[C]. 2014 24th International Conference Radioelektronika, Czech, 2014: 1-4.
- [17] 金威, 吕晓德, 向茂生. 基于 DVB-S 信号的外辐射源雷达的模糊函数及分辨特性分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 380-386.
Jin Wei, Lu Xiao-de, and Xiang Mao-sheng. Ambiguity function and resolution characteristic analysis of DVB-S signal for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 380-386.
- [18] Lu Hong-chao, Wang Tian-yun, Liu Chang-chang, et al. Sparse passive radar imaging based on direct broadcasting satellite[C]. 2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, 2012: 1852-1855.
- [19] 范梅梅, 廖东平, 丁小峰. 基于北斗卫星信号的无源雷达可行性研究[J]. 信号处理, 2010, 26(4): 631-636.
Fan Mei-mei, Liao Dong-ping, and Ding Xiao-feng. Feasibility research of passive radar based on beidou navigation and position system[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(4): 631-636.
- [20] 黄磊. 基于 GPS 的外辐射源雷达关键技术研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2013.
Huang Lei. Key technology research for GPS based passive radar[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [21] 马林, 肖文书. 空间碎片普测雷达的体制选择[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2863-2867.
Ma Lin and Xiao Wen-shu. System analysis on space debris surveillance using general survey radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(12): 2863-2867.

作者简介



蒋铁珍(1977-), 女, 江苏南通人, 中科院上海微系统所博士, 安徽大学电子信息工程学院高级工程师, 研究方向为新体制雷达系统及雷达信号处理。

E-mail: tietiezhen@163.com

肖文书(1977-), 男, 湖南人, 南京大学博士, 南京电子技术研究所高级工程师, 研究方向为雷达系统设计。

E-mail: simon_shawnju@163.com

李大圣(1980-), 男, 江苏南京人, 南京电子技术研究所工程师, 研究方向为电磁仿真与计算。