

空间目标监视雷达信号频率的优选准则

郝世锋 柳仲贵

(北京跟踪与通信技术研究所,北京,100096)

摘要: 随着在轨微小卫星及空间碎片数量不断增加,为保证在轨卫星的运行安全,需要对微小目标进行有效跟踪探测及稳定编目。雷达作为近地空间目标监视的主用设备,在对厘米级小目标进行探测跟踪时,其工作频率是决定其能否可靠探测关键因素,高频有利于探测小目标,并可获得相对稳定的 RCS,但高频信号的波束小、搜索能力较低,实现难度大,也使得成本过高。为适于实际工程应用,需从效费比出发,对频率进行优选。本文从目标 RCS 的角度提出一种空间目标监视雷达信号频率的优选准则,给出该准则下周长波长比 ka 的取值范围。为了更加清楚地说明该优选准则的应用,给出了直径 5 cm 和 10 cm 的目标在该准则下信号频率的取值范围,并与国外工作做了比较,证明该准则可行。

关键词: 微小目标探测;空间目标监视;雷达信号频率;优选准则

中图分类号: TN957;V19

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)S-0078-05

Optimal Selection Criterion for Signal Frequency of Space Targets Surveillance Radar

HAO Shifeng, LIU Zhonggui

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing, 100096, China)

Abstract: With the increasing number of in-orbit micro-satellites and space debris, in order to ensure the safe operation of satellites, it is necessary to carry out effective tracking, detection and stable cataloging of micro-targets. Radar is the main equipment of near-earth space targets surveillance, and at the level of centimeter target detection and tracking, its working frequency is a key factor. The higher frequency is propitious to detect small targets and the more stable RCS will be obtained, but the equipment is more difficult to be implemented. In order to be suitable for practical engineering application, it is necessary to optimize the frequency based on the cost-effectiveness ratio. In this paper, from the view of target RCS, an optimal selection criterion of space targets monitoring signal frequency is proposed, and the value range of long wavelength ratio (ka) of this criterion is given. In order to explain the application of the optimal selection criterion more clearly, the signal frequency of targets with diameter of 5 cm and 10 cm under the criterion is given.

Key words: micro-target detection; space target monitoring; radar signal frequency; optimal selection criterion

随着全球航天事业的不断发展,更小型、更经济的商业航天器入轨数量不断增加。2016 年各国共计发射 223 颗卫星,2017 年,2018 年此数字分别增长为 473,476,且在 2018 年发射的 476 颗卫星

中,约 300 颗卫星属于微卫星、纳米卫星和立方体卫星,占比 63%,微小卫星几乎占据了卫星总数的三分之二^[1-5]。随着一箭多星、微型火箭等技术的发展,未来将有更多的厘米级、公斤级的卫星在轨

收稿日期: 2019-04-10; **修订日期:** 2019-06-15

通信作者: 郝世锋,男,助理研究员, E-mail: ydjiaoydjiao@163.com。

引用格式: 郝世锋,柳仲贵. 空间目标监视雷达信号频率的优选准则[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(增刊):78-82. HAO Shifeng, LIU Zhonggui. Optimal Selection Criterion for Signal Frequency of Space Targets Surveillance Radar [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 78-82.

运行。为保证对卫星在轨安全运行,需对在轨卫星特别是微小卫星及碎片进行有效跟踪探测及稳定编目。为满足此需求,作为近地空间目标监视的主要设备——雷达^[6-9],面临的一个重要问题就是如何选择工作频率,以更有效地探测到微小在轨目标。由雷达信号相关理论可知,高频有利于探测小目标,并可获得相对稳定的雷达散射截面(Radar cross section, RCS);但相对于低频,高频信号的波束小、搜索能力较低,实现难度大,也使得成本过高。因此,在实际的工程应用中,需从效费比出发,针对既定的目标,采取一些折衷的方法,给出优选的频率范围。

本文从目标 RCS 的角度提出了一种新的频率优选准则,并给出在此准则下目标尺寸 a 与波长比 $\lambda(2\pi a/\lambda, \text{即 } ka)$ 的取值范围,同时以能够实现对 5 cm 大小目标探测的需求为例,给出该准则下满足该需求的频率范围,之后给出 10 cm 目标对应的频率范围,并与国外工作进行了对比。

1 基于目标 RCS 的频率优选准则

1.1 金属导体球的 RCS

空间目标形态各异,在测得目标的 RCS 后,最常用的办法就是选择一个已知精确 RCS 的定标体进行相对标定,而金属导体球因其 RCS 计算相对简单的特点在实际中非常受用,因此选择导体球作为研究对象。

导体球的后向 RCS 计算公式为^[10]

$$\sigma = \lambda^2 / \pi \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (n + 0.5) (b_n - a_n) \right|^2 \quad (1)$$

$$a_n = \frac{j_n(ka)}{h_n^{(1)}(ka)} \quad (2)$$

$$b_n = \frac{kaj_{n-1}(ka) - nj_n(ka)}{kah_{n-1}^{(1)}(ka) - nh_n^{(1)}(ka)} \quad (3)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为波数, $h_n^{(1)}(x)=j_n(x)+jy_n(x)$ 为第 1 类球汉开尔函数, $j_n(x)$ 为第 1 类球贝塞尔函数, $y_n(x)$ 第 2 类球贝塞尔函数。无量纲 RCS 是以球面积 πa^2 进行的归一化,表示为 NRCS,又称后向散射有效因子,其表达式为

$$\text{NRCS} = \frac{\sigma}{\pi a^2} = \left(\frac{2}{ka} \right)^2 \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (n + 0.5) (b_n - a_n) \right|^2 \quad (4)$$

其在瑞利区和谐振区的 NRCS 如图 1 所示。

由图 1 可看出,随着横坐标 ka 的增大, NRCS 的振荡趋势越来越小,趋近于 1,也即对于固定目标,半径 a 不变,随着 λ 的不断降低, σ 趋向于 πa^2 。对于直径 5 cm 的目标,不同频率对应的 NRCS 见图 2。

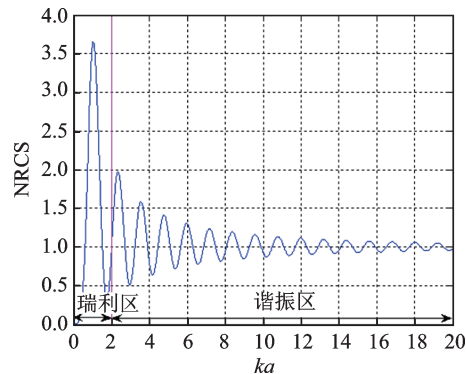


图 1 导体球的 NRCS 值(瑞利区和谐振区)

Fig. 1 NRCS value of the metal conductor ball(Rayleigh region and resonance region)

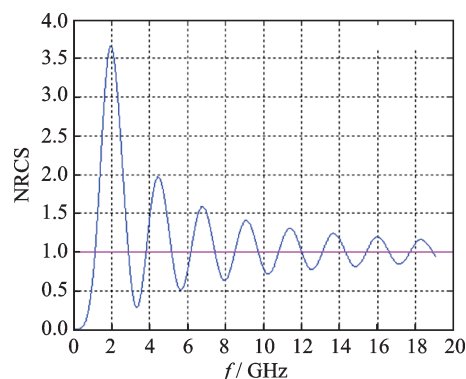


图 2 目标直径 5 cm 时频率 f 与 NRCS 的关系图

Fig. 2 NRCS versus frequency f under target diameter 5 cm

1.2 频率优选准则

1.2.1 频率优选准则

为了说明不同频率下 RCS 随导体球半径的变化情况,图 3 给出了信号频率为 $f_0=600, 1\,200, 2\,400, 4\,800, 9\,600$ MHz(分别代表 UHF, L, S, C, X 频段)下导体球半径 a 与 RCS 的对应关系。可见,对于一给定半径的导体球,较高频率对应的 RCS 并不总是大于较低频率,这意味着示例中的高频点并不最优。因此根据导体球 RCS 随着频率变化的特征,给出一种信号频率优选准则。

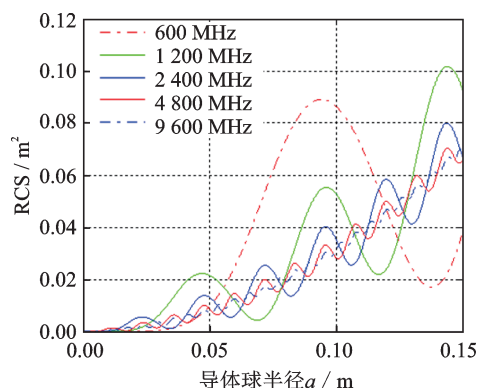


图 3 5 种频率下导体球半径 a 与 RCS 的关系图

Fig. 3 Radius a of the metal conductor ball vs. RCS under five frequencies

在该准则下所选出的频率首先需要满足两个条件,条件1是该频率下设备拟探测的最小目标(半径为 a_{\min})的RCS接近收敛值 πa_{\min}^2 ;条件2则要求按最小目标确定出的设备指标能够探测到半径大于 a_{\min} 的其他目标;之后从满足条件1,2的频率集合中,综合考虑各方面的因素(天线增益、传播损耗和造价等),根据性价比选择最终的频点。准则表述如下:

设雷达拟检测目标的半径为 $a(a \geq a_{\min})$, $f=f_0$ 下 a 对应的RCS为 σ ,其中 a_{\min} 对应的RCS以 σ_{\min} 表示,若选择雷达工作频率为 $f=f_0$,则需满足如下3个条件:

$$(1) a = a_{\min} \text{ 时, 频率 } f_0 \text{ 下 } \frac{\sigma_{\min}}{\pi a_{\min}^2} \geq 0.8;$$

$$(2) a \geq a_{\min} \text{ 时, 频率 } f_0 \text{ 下 } \frac{\sigma}{\sigma_{\min}} \geq 1;$$

(3) 所有满足条件(1)(2)的频率以集合 A_f 表示,综合考虑探测距离、传播损耗等,使得在 $f_0 \in A_f$ 时,雷达性价比最高。

1.2.2 频率优选范围

本小节给出瑞利区和部分谐振区内,在频率优选准则下 ka_{\min} 的取值范围,可据此取值范围确定频率范围。

图4给出600,1 200,2 400,4 800,9 600 MHz下 ka 与RCS的关系图。可见,图中极小值点对应的 ka 值与频率 f 无关,在 $ka < 10$ 内极小值对应的 ka 值依次为8.941,7.736,6.538,5.339,4.141,2.937和1.751。

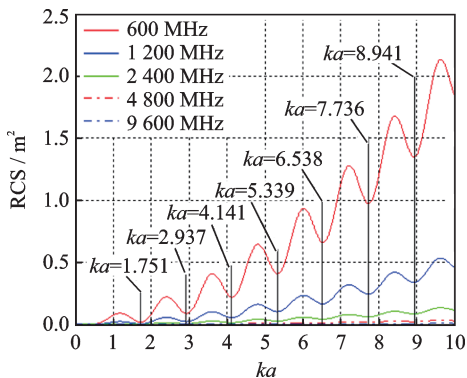


图4 5种频率下 ka 与RCS的关系图

Fig. 4 ka vs. RCS under five frequencies

由于极小值点对应的 ka 值与频率无关,因此可选择频率600 MHz下 ka 与RCS的关系图,以寻找满足准则中条件(2)的 ka_{\min} 范围,如图5所示,为了保证 $a \geq a_{\min}$ 时 $\sigma \geq \sigma_{\min}$, ka_{\min} 的范围为 $(0, 0.699] \cup [1.751, 2.014] \cup [2.937, 3.248] \cup [4.141, 4.463] \cup [5.339, 5.673] \cup [6.538, 6.899] \cup [7.736, 8.092] \cup [8.941, 10.000]$ 。

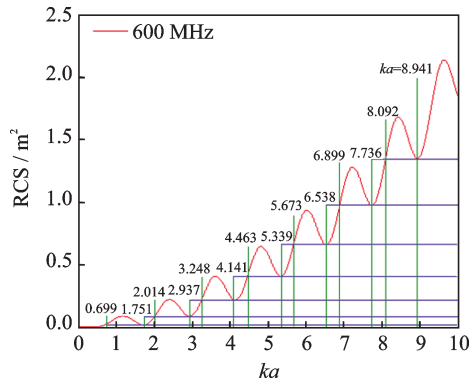


图5 满足条件2的 ka 取值范围

Fig. 5 Value range of ka that satisfies condition 2

为满足条件(1),需 $\sigma_{\min}/\pi a_{\min}^2 > 0.8$,即NRCS > 0.8 ,如图6所示。同时满足条件(1),(2)的 ka_{\min} 取值

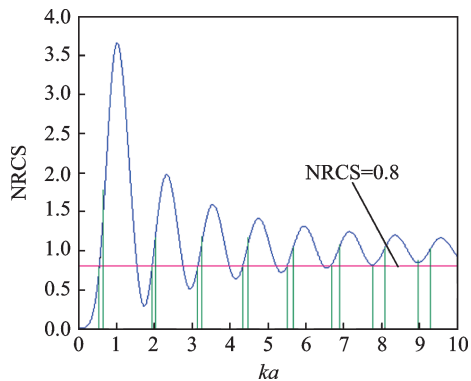


图6 条件1,2同时满足的 ka 范围

Fig. 6 Value range of ka that satisfies conditions 1 and 2

范围如图6所示,分为 $[0.558, 0.699] \cup [1.952, 2.014] \cup [3.159, 3.248] \cup [4.342, 4.463] \cup [5.512, 5.673] \cup [6.663, 6.899] \cup [7.736, 8.092] \cup [8.941, 9.281]$ 。

对于任一给定的最小目标半径 a_{\min} 来说,由于满足准则的 ka_{\min} 的取值范围有很多区间,由此得到的频率范围也位于多个频段内,为了最终确定雷达工作的频点,需综合考虑天线增益、信号传播损耗与衰减以及雷达造价等诸多因素,一般来讲,频率越低,性价比也越高,因此,在确定所选信号频率的频段之后,选择该频段内符合准则的最低频率,即达到性价比最优的准则。

2 举例分析

1.2节根据优选准则给出了 ka_{\min} 的取值范围,本节以半径 $a_{\min}=2.5$ cm和5 cm为例,给出频率 f 的选择范围,并与国外工作做了对比。

2.1 直径5 cm目标的频选结果

根据1.2.2节中的结论, $a_{\min}=2.5$ cm时,根据

ka_{\min} 得到 f 的取值范围 A_f 为 $[1.066, 1.335] \cup [3.728, 3.847] \cup [6.033, 6.203] \cup [8.293, 8.524] \cup [10.527, 10.835] \cup [12.725, 13.176] \cup [14.775, 5.455] \cup [17.076, 17.725]$ (GHz), 依次分布在 L, S, C, X, Ku 等波段, 可看出, 在该准则下, 各频段只有有限的范围适用。

为了更加清楚地表示所得结果, 选择 1 200 MHz (L 波段), 3 800 MHz (S 波段), 6 200 MHz (S 波段) 和未在结果范围内的 600 MHz (UHF 波段), 给出半径 a 与 RCS/RCS_{\min} 的关系图, 如图 7 所示。可见, 除了 600 MHz 不满足条件 (1) 外, 其余频率均满足准则的两个条件。

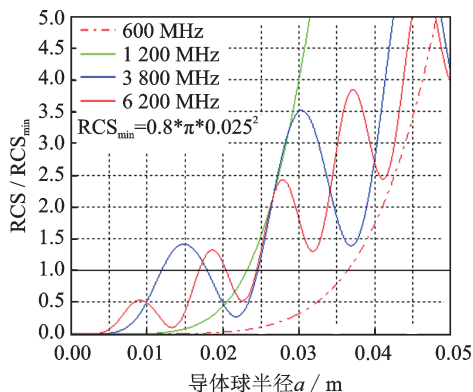


图 7 不同频率下导体球与 RCS/RCS_{\min} 的关系图

Fig. 7 Radius vs. RCS/RCS_{\min} under different frequencies

图 8 给出了 L 频段下的 1 100, 1 300, 1 500 MHz 的情况, 可见位于 $[1.066, 1.335]$ (GHz) 范围内的 1 100, 1 300 MHz 符合准则条件, 而 1 500 MHz 则不符合准则中的条件 (2)。

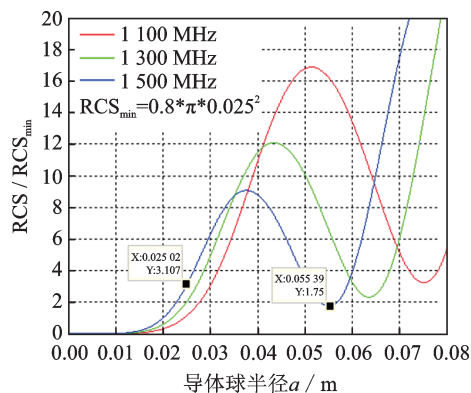


图 8 L 波段部分频率下的情况

Fig. 8 Radius vs. RCS/RCS_{\min} under L frequency

对于半径 2.5 cm 目标选择 L 波段下 1 100 MHz 或 S 波段下 3 700 MHz 结果与美国欲改进的电磁篱笆的频段选择相似。

2.2 直径 10 cm 目标的频选结果

半径 $a_{\min} = 5$ cm 时, 根据 ka_{\min} 得到的 f 取值范

围为 $[0.533, 0.668] \cup [1.864, 1.924] \cup [3.016, 3.102] \cup [4.146, 4.262] \cup [5.264, 5.417] \cup [6.362, 6.588] \cup [7.388, 7.728] \cup [8.538, 8.862]$ (GHz)。取 UHF 频段的 $f = 533$ MHz, 这与 2005 年第 4 届欧洲碎片会议上欧洲空间监视系统选择 600 MHz 相近。

3 结 论

该准则能较好的根据检测目标的大小确定雷达的工作频率, 通过与欧洲、美国空间监视系统工作频率选择的比较, 该准则同样也得到对于 5 cm 目标选择 3.7 GHz, 10 cm 目标选择 600 MHz 的工作频率的结论, 这也说明该准则的可行性。另外, 该准则给出了适合于同一尺寸目标的不同频段范围, 为了更加精准地确定信号频点, 可结合大气损耗、降雨衰减以及探测距离等因素进行最终确定。

参考文献:

- [1] 钱学森运载技术实验室. 空间态势评估报告[R]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2016: 43-45.
Qian Xuesen Carrier Technology Laboratory. Space situation assessment report 2016 [R]. Beijing: China Launch Vehicle Research Institute, 2016: 43-45.
- [2] 李明. 微小卫星发展的若干思考[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 1-5.
LI Ming. Some thoughts on the development of micro-satellites[J]. Journal of Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 1-5.
- [3] 林来兴. 小卫星越来越小, 发射量越来越多[J]. 国际太空, 2018, 475: 52-54.
LIN Laixing. Small satellites are getting smaller and their launches are getting larger[J]. Journal of International Space, 2018, 475: 52-54.
- [4] 刘进军. 卫星与网络[EB/OL]. (2019-03-01). <https://mp.weixin.qq.com/s/0dD1P3-ztKHCWFJmwp1xuQ>.
LIU Jinjun. Satellite and network[EB/OL]. (2019-03-01) <https://mp.weixin.qq.com/s/0dD1P3-ztKHCWFJmwp1xuQ>.
- [5] 周钰哲. 国外微小卫星监管措施研究[J]. 海外观察, 2018, 8: 20-22.
ZHOU Yuzhe. Research on overseas micro-satellite supervision measures[J]. Journal of Overseas Observation, 2018, 8: 20-22.
- [6] 张海成, 杨江平, 王晗中. 空间目标监视装备技术的发展现状及启示[J]. 现代雷达, 2011, 33(12): 11-14.

- ZHANG Haicheng, YANG Jiangping, WANG Hanzhong. Development and inspiration of space surveillance equipment and technique [J]. Modern Radar, 2011, 33(12): 11-14.
- [7] 赵霜, 张社欣. 美俄空间目标监视现状与发展研究[J]. 航天电子对抗, 2007, 24(1): 27-29.
- ZHAO Shuang, ZHANG Shexin. The development of US and Russia space target surveillance [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2007, 24(1): 27-29.
- [8] 蒋为. 空间目标监视环境研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(6): 9-15.
- JIANG Wei. A study on space target surveillance environment [J]. Modern Radar, 2012, 34(6): 9-15.
- [9] 汤泽滢, 黄贤锋, 蔡宗宝. 国外天基空间目标监视系统发展现状与启示[J]. 航天电子对抗, 2014, 31(2): 24-30.
- TANG Zeying, HUANG Xianfeng, CAI Zongbao. Development status and enlightenment of foreign space-based space surveillance systems [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014, 31(2): 24-30.
- [10] 黄培康, 尹红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 48-49.
- HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target characteristics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 48-49.

(编辑: 刘彦东)