

文章编号: 2095-4980(2022)02-0154-05

关于 Huynen 目标参数与目标最佳极化关系的讨论

徐志明, 艾小锋*, 李永祯, 赵 锋

(国防科技大学 电子科学学院 CEMEE 国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: Huynen 目标参数和最佳极化(OPs)是极化信息处理中两个基本概念。最佳极化在 Poincare 球上的分布根据 Huynen 目标参数的特征角可以细分为“针型”、“帽型”和“叉型”三种形态, 目前尚缺乏完善的讨论。本文基于 Kennaugh 矩阵推导了目标的最佳极化, 讨论了 Huynen 目标参数与最佳极化的对应关系。然后, 基于三种最佳极化的分布形态讨论了几种典型结构目标的极化特性, 可以为雷达极化研究人员建立更清楚的概念。

关键词: Huynen 目标参数; 最佳极化; 极化散射特性; 极化叉

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020684

On discussion about the relationship between Huynen target parameters and optimum polarizations

XU Zhiming, AI Xiaofeng*, LI Yongzhen, ZHAO Feng

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Huynen Target Parameters(HTPs) and Optimum Polarizations(OPs) are two fundamental concepts in the polarization information processing field. According to the characteristic angle of HTPs, the graphical representation of OPs can be divided into three classes, needle shape, top shape, and the well-known fork shape, which has not been sufficiently discussed before. In this paper, OPs are derived based on the Kennaugh matrix. Then, the relationship between HTPs and OPs is revealed. On the basis of that, the polarization scattering characteristics of several typical structures are investigated. This paper aims to establish a clear concept about HTPs and OPs for radar polarimetry researchers.

Keywords: Huynen target parameters; optimum polarizations; polarization scattering characteristics; polarization fork

J. R. Huynen 在博士论文中最早分析了可以反映目标极化能力、奇/偶次散射、旋向和对称性几个物理特征的特征角 γ 、弹跳角 ν 、定向角 θ 和对称角 τ ^[1]。由于该参数集与目标的结构特征紧密联系, 一直以来备受雷达极化研究人员的广泛关注。法国航空航天研究院 Titin-Schnaider 在文献[2]中将参数集 $\{\gamma, \nu, \theta, \tau\}$ 称之为 Huynen 目标参数; 在文献[3]中称之为 Huynen 极化叉参数; 在文献[4]中称之为 Huynen 目标特征参数。Cameron 极化分解提出者 William L. Cameron 将该参数集称为 Huynen 分解参数^[5]。清华大学杨健教授将这些参数称之为 Huynen 目标参数^[6]。还有许多知名学者称之为 Huynen 参数^[7-8]、Huynen 欧拉参数^[9]等。在本文中, 作者沿用 Huynen 目标参数一词, 因为“目标参数”可以更宏观、统一地涵盖其表征形式、物理含义等多重内涵。

目标最佳极化是已知目标的极化散射特性, 确定发射和接收极化方式, 使得获得的目标散射接收功率最大或最小, 这种确定发射和接收的极化就被称为目标的最佳极化^[10]。已知目标的散射矩阵或 Kennaugh 矩阵(简记为 \mathbf{K}), 可以从理论上推导出该目标的最佳极化, 包括: 1 个共极化最大值 Co-Max, 1 个共极化鞍点 Co-S, 2 个共极化零点 Co-N, 2 个交叉极化最大值 X-Max, 2 个交叉极化零点 X-N 和 2 个交叉极化鞍点 X-S。这些最佳极化在 Poincare 球上的分布形态为“极化叉”或“极化树”为普遍认知。但是, 根据 Huynen 目标参数中的特征角, 分

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071475; 61890541; 61890542; 62001481)

*通信作者: 艾小锋 email:anxifu2001@163.com

布形态其实可以细分为“针型”、“帽型”和“叉型”3种类型。

最佳极化与Huynen目标参数可以通过Poincare球直观、形象地联系起来。Huynen目标参数中的特征角 γ 决定了最佳极化在Poincare球上的分布形态是“针型”、“帽型”还是“叉型”。 $2\nu, 2\tau, 2\theta$ 分别对应最佳极化围绕Poincare球三个坐标轴的旋转角度。因此，Huynen目标参数与最佳极化之间是相互确定的。本文详细推导了两者的关系，提出通过Huynen目标参数计算目标最佳极化的方法，并基于最佳极化讨论了典型结构目标的极化散射特性。

1 Huynen目标参数与最佳极化的关系

已知目标的 \mathbf{K} 矩阵，得到接收功率 P 和接收天线极化状态 \mathbf{g}_r 和发射天线极化状态 \mathbf{g}_i 的关系为：

$$P = \mathbf{g}_r^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{g}_i = \mathbf{g}_{i0}^T \cdot \mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{g}_{i0} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{K} = \mathbf{O}_3(2\theta) \cdot \mathbf{O}_2(2\tau) \cdot \mathbf{O}_1(-2\nu) \cdot \mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{O}_1(2\nu) \cdot \mathbf{O}_2(-2\tau) \cdot \mathbf{O}_3(-2\theta) \quad (2)$$

$\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \mathbf{O}_3$ 为旋转矩阵：

$$\mathbf{O}_1(2\nu) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(2\nu) & \sin(2\nu) \\ 0 & 0 & -\sin(2\nu) & \cos(2\nu) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{O}_2(2\tau) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\tau) & 0 & -\sin(2\tau) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(2\tau) & 0 & \cos(2\tau) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{O}_3(2\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta) & -\sin(2\theta) & 0 \\ 0 & \sin(2\theta) & \cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_0(\gamma) = \frac{\mu^2}{4 \cos^4 \gamma} \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 2\gamma & 2 \cos 2\gamma & 0 & 0 \\ 2 \cos 2\gamma & 1 + \cos^2 2\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin^2 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin^2 2\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(1)、式(2)和式(6)，得到

$$P = \mathbf{g}_r^T \cdot \mathbf{O}_3(2\theta) \cdot \mathbf{O}_2(2\tau) \cdot \mathbf{O}_1(-2\nu) \cdot \mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{O}_1(2\nu) \cdot \mathbf{O}_2(-2\tau) \cdot \mathbf{O}_3(-2\theta) \cdot \mathbf{g}_i \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mathbf{g}_i = \mathbf{O}_3(2\theta) \cdot \mathbf{O}_2(2\tau) \cdot \mathbf{O}_1(-2\nu) \mathbf{g}_{i0} \\ \mathbf{g}_r = \mathbf{O}_3(2\theta) \cdot \mathbf{O}_2(2\tau) \cdot \mathbf{O}_1(-2\nu) \mathbf{g}_{i0} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)建立了由 \mathbf{K} 矩阵求得的最佳极化与 \mathbf{K}_0 对应的最佳极化之间的几何关系：由 \mathbf{K}_0 矩阵求得的最佳极化分别围绕Poincare球的三个坐标轴旋转 $2\nu, 2\tau, 2\theta$ 角度得到 \mathbf{K} 矩阵对应的最佳极化。特别地，当 $\gamma=0^\circ$ 时，根据式(3)和式(6)可知，参数 ν 可以取任意值。因此，已知目标 \mathbf{K} 矩阵，求目标的最佳极化问题可以转化为求解 \mathbf{K}_0 矩阵的最佳极化。

根据式(1)，共极化接收时，接收功率 P 建模为：

$$P = [1, a, b, c] \cdot \mathbf{K}_0 \cdot [1, a, b, c]^T \quad (9)$$

其中变量 a, b, c 满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 。

交叉极化接收时，接收功率 P 建模为：

$$P = [1, -a, -b, -c] \cdot \mathbf{K}_0 \cdot [1, a, b, c]^T \quad (10)$$

分别求式(9)和式(10)的极值得到表1。

表 1 K_0 矩阵最佳极化
Table 1 Optimum polarization of K_0

optimum polarization	characteristic angle	$[a,b,c]$	characteristic angle	$[a,b,c]$
Co-N	$\gamma \in [0, \pi/4]$	$(-\cos 2\gamma, 0, \pm \sin 2\gamma)$		
Co-Max	$\gamma \in [0, \pi/4)$	$(1, 0, 0)$	$\gamma = \pi/4$	$(a^2+b^2=1, c=0)$
Co-S	$\gamma \in (0, \pi/4)$	$(-1, 0, 0)$		
X-N	$\gamma \in [0, \pi/4)$	$(\pm 1, 0, 0)$	$\gamma = \pi/4$	$(a^2+b^2=1, c=0)$
X-Max	$\gamma \in (0, \pi/4]$	$(0, 0, \pm 1)$	$\gamma = 0$	$(0, b^2+c^2=1)$
X-S	$\gamma \in (0, \pi/4)$	$(0, \pm 1, 0)$		

将表 1 中由 K_0 求取的最佳极化用 Poincare 球进行图像化表征, 如图 1 所示。图 1 中最佳极化的分布形态根据特征角 γ 可以划分为 3 种类型: “针型”、“帽型”和“叉型”。当 $\gamma=0^\circ$ 时, Co-Max 和 Co-N 分别位于 Poincare 球大圆直径的两个端点, 此时将最佳极化的分布称之为“针型”; 当 $\gamma=45^\circ$ 时, 两个 Co-N 位于 Poincare 球大圆直径的两个端点, Co-Max 不再是单独的一个点, 而是与两个 Co-N 垂直的大圆极化轨道, 此时将最佳极化的分布称之为“帽型”; 当 $0^\circ < \gamma < 45^\circ$ 时, 两个 Co-N 和 Co-Max 构成一个“叉型”结构, 因此将这种最佳极化的分布称之为“叉型”。

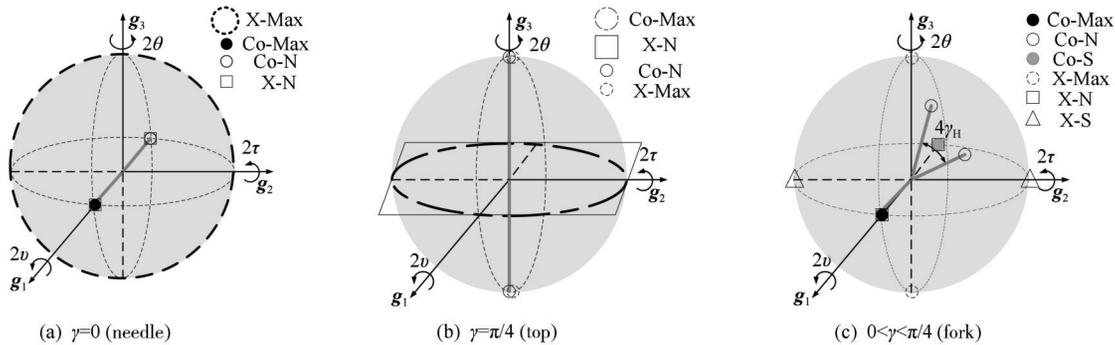


Fig.1 Graphical representation of target optimum polarizations
图 1 目标最佳极化三维表征

2 典型结构极化散射特性分析

2.1 基于 Huynen 目标参数的最佳极化计算方法

由第 1 节可知, 目标的最佳极化与 Huynen 目标参数是一一对应的。通过 K 矩阵求出 Huynen 目标参数后就可以得到目标的最佳极化。具体步骤如下: 1) 通过目标的 K 矩阵求解出目标的 Huynen 参数, 求解方法可参考文献 [1]; 2) 根据表 1 和 Huynen 参数中的特征角, 求解对应 K_0 矩阵的最佳极化; 3) 根据式(8), 由 K_0 矩阵求得的最佳极化分别围绕 Poincare 球的 3 个坐标轴旋转 $2v, 2\tau, 2\theta$ 角度最终得到目标的最佳极化。

以文献[11]中的算例进行验证, 已知目标的散射矩阵为 $[2i, 0.5; 0.5, -i]$, i 为虚数单位。根据该散射矩阵求得对应的 Huynen 目标参数为: $\gamma=30.94^\circ, \nu=45^\circ, \theta=0^\circ, \tau=22.5^\circ$ 。

利用本文方法求得目标的最佳极化为: 共极化最大值: $(\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$; 共极化鞍点: $(-\sqrt{2}/2, 0, -\sqrt{2}/2)$; 共极化零点: $(-1/3, \sqrt{7}/3, -1/3), (-1/3, -\sqrt{7}/3, -1/3)$; 交叉极化最大值: $(0, 1, 0), (0, -1, 0)$; 交叉极化零点: $(\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2), (-\sqrt{2}/2, 0, -\sqrt{2}/2)$; 交叉极化鞍点: $(\sqrt{2}/2, 0, -\sqrt{2}/2), (-\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$; 上述最佳极化的计算结果与文献[11]一致, 验证了本文 Huynen 目标参数与最佳极化的关系推导以及利用 Huynen 目标参数计算目标最佳极化的可行性。

2.2 基于最佳极化的典型结构极化散射特性分析

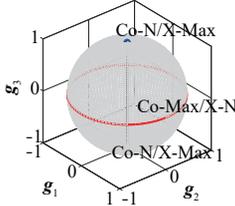
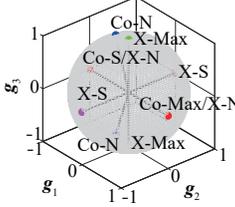
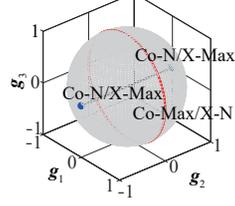
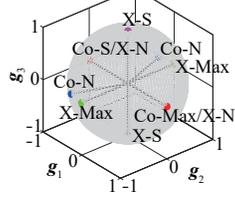
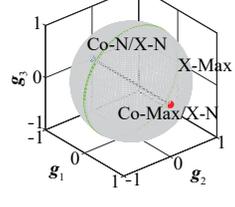
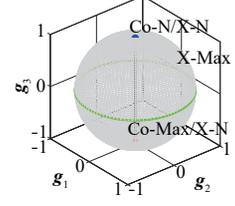
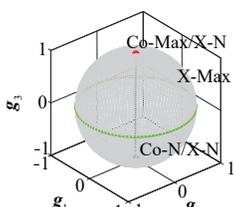
典型结构体如平板(球体、三面角)、圆柱体、二面角、窄二面角、偶极子、螺旋体的极化散射特性对于目标精细结构的解译具有重要意义。本节求解了以上典型结构 Huynen 目标参数和最佳极化, 并对其极化散射特性进行了分析。

如表 2 所示, 平板、球体、三面角、二面角结构类型的目标, 最佳极化的分布为“帽型”, 即对应于共极化最大值的极化方式不止一种, 而是位于一个大圆极化轨道上。其中二面角结构的最佳极化可以由平板(球体、三面角)结构的最佳极化绕 g_1 轴旋转 $2\nu=90^\circ$ 得到。圆柱体和窄二面角的最佳极化为“叉型”。窄二面角结构的最佳极化同样可以由圆柱体结构的最佳极化绕 g_1 轴旋转 $2\nu=90^\circ$ 得到。偶极子和螺旋体的最佳极化为“针型”。共极化最

大值和零点分别位于大圆直径的两个端点，交叉极化最大值位于与该直径垂直的大圆极化轨道。从偶极子和螺旋体的 Huynen 目标参数可以看出，左/右螺旋体的最佳极化分别可以由偶极子的最佳极化绕 g_2 轴旋转 $2\tau=\mp 90^\circ$ 得到。

表 2 典型结构目标的 Huynen 目标参数与最佳极化

Table 2 Huynen target parameters and optimum polarizations of typical structures

structure type	sinclair matrix	Huynen target parameters	optimum polarizations	graphical representation
plate、sphere、trihedral	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[\gamma=45^\circ, \nu=0^\circ, \theta=\forall, \tau=0^\circ]$		top
cylinder	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{bmatrix}$	$[\gamma=35.3^\circ, \nu=0^\circ, \theta=0^\circ, \tau=0^\circ]$		fork
dihedral	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$[\gamma=45^\circ, \nu=45^\circ, \theta=0^\circ, \tau=\forall]$		top
narrow dihedral	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1/2 \end{bmatrix}$	$[\gamma=35.3^\circ, \nu=45^\circ, \theta=0^\circ, \tau=0^\circ]$		fork
dipole	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$[\gamma=0^\circ, \nu=\forall, \theta=0^\circ, \tau=0^\circ]$		needle
left helix	$\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{bmatrix}$	$[\gamma=0^\circ, \nu=\forall, \theta=\forall, \tau=-45^\circ]$		needle
right helix	$\begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & -1 \end{bmatrix}$	$[\gamma=0^\circ, \nu=\forall, \theta=\forall, \tau=45^\circ]$		needle

Huynen 目标参数具有不确定性, 即对应于同一个散射矩阵具有多组 Huynen 目标参数集与之对应。由表 2 可以看出, 由于平板(球体、三面角)、螺旋体结构的最佳极化围绕 \mathbf{g}_3 轴旋转是没有变化的, 所以 θ 可以取任意值。同理, 二面角的 τ 可以取任意值。又由于 $\gamma=0^\circ$ 时, 参数 ν 可以取任意值, 所以偶极子和螺旋体的参数 ν 也是不确定的。从目标结构解译的角度来看, Huynen 目标参数的不确定性是不利的。

3 结论

本文从 Kennaugh 矩阵出发, 重点讨论了 Huynen 目标参数与目标最佳极化的关系。基于两者在 Poincare 球上的几何表征关系, 提出了利用 Huynen 目标参数估计目标最佳极化的方法。因此, 估计 Huynen 目标参数可以同时实现目标的极化特征提取和信号增强、干扰或杂波抑制等。通过本文, 雷达极化研究人员可以更清楚 Huynen 目标参数与最佳极化的物理意义, 为极化特征提取、目标识别、杂波抑制奠定基础。

参考文献:

- [1] HUYNEN J R. Phenomenological theory of radar targets[D]. Delft, Netherlands:Delft University of Technology, 1970.
- [2] C Titin-Schnaider. Polarimetric characterization of bistatic coherent mechanisms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(5):1535–1546. doi:10.1109/TGRS.2008.916078.
- [3] TITIN-SCHNAIDER C. Physical meaning of bistatic polarimetric parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,48(5):2349–2356. doi:10.1109/TGRS.2009.2038063.
- [4] TITIN-SCHNAIDER C. Characterization and recognition of bistatic polarimetric mechanisms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013,51(3):1755–1774. doi:10.1109/TGRS.2012.2208118.
- [5] CAMERON W L,RAIS H. Derivation of a signed cameron decomposition asymmetry parameter and relationship of cameron to Huynen decomposition parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011,49(5): 1677–1688. doi: 10.1109/TGRS.2010.2090529.
- [6] 杨健,曾亮,马文婷,等. 目标极化散射特征提取的研究进展[J]. 电波科学学报, 2019,34(1):12–18. (YANG Jian,ZENG Liang, MA Wenting,et al. Recent advances on extraction of polarimetric scattering features of radar target[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019,34(1):12–18. doi:10.13443/j.cjors.2018091501.)
- [7] TOUZI R. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007,45(1):73–84. doi:10.1109/TGRS.2006.886176.
- [8] MARINO A,CLOUDE S R,WOODHOUSE I H. A polarimetric target detector using the Huynen fork[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,48(5):2357–2366. doi:10.1109/TGRS.2009.2038592.
- [9] DALLMANN T,HEBERLING D. Technique for Huynen–Euler decomposition[J]. Electronics Letters, 2017,53(13):877–879. doi: 10.1049/el.2017.1597.
- [10] 庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999. (ZHUANG Zhaowen, XIAO Shunping, WANG Xuesong. Radar polarization information processing and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.)
- [11] YANG J,YAMAGUCHI Y,YAMADA H,et al. Simple method for obtaining characteristic polarization states[J]. Electronics Letters, 1998,34(5): 441–443. doi:10.1049/el:19980364.

作者简介:

徐志明(1995–), 男, 山东省潍坊市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取 .email:zhimingxu@nudt.edu.cn.

艾小锋(1983–), 男, 四川省安岳市人, 副研究员, 主要研究方向为双基地雷达成像、特征提取 .email: anxifu2001@163.com.

李永祯(1977–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为极化雷达与电子对抗.

赵 锋(1978–), 男, 南京市人, 教授, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.