

多视全极化合成孔径雷达图象的统计分析¹

刘国庆 黄顺吉 熊红 A. Torre* F. Rubertone*

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

*(Dept. of Remote Sensing, Alenia Spazio SPA, Rome 00131, Italy)

摘要 本文基于乘性相干斑模型,推导出多视全极化合成孔径雷达(SAR)数据的无条件分布模型——广义的 K 分布,将从中演绎出的单通道多视强度 K 分布与几种典型地表的实测数据的统计直方图和几种常用的分布模型进行比较,经验地建立了场景纹理的非均匀性与合适的统计分布模型之间的关系。此外,应用统计分析的结果,本文还提出了一个自适应的地貌类型分类方法,使分类精度得到明显提高,说明了统计分析的重要性。

关键词 极化合成孔径雷达,多视处理,相干斑,统计分析,分类

中图分类号 TN958, TN957.7

1 引言

对雷达测量数据的统计性质进行分析,有助于提供有关的先验知识,以提高实际应用的功效。对于均匀场景,我们已经知道,若单极化合成孔径雷达(SAR)的正交双通道采样被看成具有零均值和相等方差的高斯随机变量,单视 SAR 图象的强度和幅度统计可分别用指数分布和瑞利分布来表述^[1],极化测量向量服从复高斯分布^[2];对多视处理的情况,单极化通道的强度和幅度分别服从 $2N$ 个自由度的 χ^2 和 χ 分布^[1],多视极化协方差矩阵是 Wishart 分布的^[3];因为 Wishart 分布包含其它简单的理论分布作为它的特例,这种分布律是描述均匀场景 SAR 数据统计性质的最一般形式。

当雷达照射区域是非均匀的,场景的后向散射不能再被认为是稳定的。本文基于一个简单的非均匀模型,证明了多视全极化的雷达测量服从广义的 K 分布,并将从中演绎出的单通道多视强度 K 分布与几种典型地表的实测数据的统计直方图和几种常用的分布模型进行比较,经验地建立了场景的非均匀性与合适的统计分布模型之间的关系。此外,本文还依据统计分析的结果提出了自适应的地貌类型分类方案,使分类精度得到明显提高,说明了统计分析的重要性。

2 极化 SAR 的测量模型

全极化 SAR 所测量的场景中各分辨单元的散射矩阵包含四个复元素,对互易介质来说,两个互极化项是恒等的^[4]。散射矩阵中三个独立的复元素组成目标的极化测量向量 \mathbf{y}

$$\mathbf{y} = [\text{HH} \quad \text{HV} \quad \text{VV}]^T \quad (1)$$

¹ 1996-05-07 收到, 1997-04-17 定稿

该研究是在意大利 Alenia Spazio 完成的,它是电子科技大学和意大利 Alenia Spazio 在星载合成孔径雷达领域的科技合作课题的一部分

式中, 例如 HV 指用水平极化天线接收的目标对垂直极化天线发射波的散射信号, 上标 T 代表转置。平均 N 个单视极化协方差矩阵, 我们得到 N 视极化协方差矩阵 \mathbf{Y}

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^H \quad (2)$$

式中下标 i 表明 \mathbf{y}_i 是极化测量向量 \mathbf{y} 的第 i 视采样, 上标 H 指转置共轭。在均匀场景下, 向量 \mathbf{y} 和矩阵 \mathbf{Y} 分别服从复高斯分布^[1] 和 Wishart 分布^[3]。

相干 SAR 图象不可避免地带有相干斑, 它是由同一分辨单元内随机分布的许多小散射点辐射波的相干性引起的, 是一种乘性噪声^[5,6]。在多视协方差矩阵域内, 乘性相干斑模型可近似表示为^[7]

$$\mathbf{Y} = t\mathbf{X}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{X} 代表相干斑的多视协方差矩阵, t 是纹理变量, 它表征地表辐射特征, 与场景的自然起伏和均匀性有关。通常假设 t 是均值为 1 的 Γ 分布变量, 具有如下的概率密度函数 (PDF)^[6,7],

$$P_t(t) = [\alpha^\alpha / \Gamma(\alpha)] t^{\alpha-1} \exp(-\alpha t), \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 是 Γ 函数, $E[t] = 1$, $\alpha = E^2[t] / \text{var}[t]$, 这里 $E[\cdot]$ 和 $\text{var}[\cdot]$ 分别指均值和方差, 参数 α 实质上反映场景的非均匀性, 所以常被称为场景的非均匀系数。当 $\alpha \rightarrow \infty$, t 是常数, 对应着均匀场景。应用乘性相干斑模型意味着矩阵 \mathbf{Y} 只是服从条件的 Wishart 分布:

$$P_{\mathbf{Y}|t}(\mathbf{Y}|t) = N^N q! |\mathbf{Y}|^{N-q} \exp\{-N \text{Tr}[\Sigma^{-1} \mathbf{Y}] / t\} / [G(N, q) t^{Nq} |\Sigma|^N], \quad (5)$$

式中 $\Sigma = E[\mathbf{X}]$, Σ^{-1} 是 Σ 的逆, $q = 3$ 是 \mathbf{y} 的维数, $\text{Tr}[\cdot]$ 是矩阵的迹, $G(N, q) = \pi^{q(q-1)/2} \cdot \Gamma(N) \cdots \Gamma(N - q + 1)$ 。

3 广义的 K 分布和非均匀场景的多视极化测量

计算 (5) 式的条件 PDF 相对于变量 t 的数学期望, 可以得到矩阵 \mathbf{Y} 的无条件 PDF

$$P_{\mathbf{Y}}(\mathbf{Y}) = \int_0^\infty P_{\mathbf{Y}|t}(\mathbf{Y}|t) P_t(t) dt \quad (6)$$

将 (4) 式和 (5) 式代入上式得到

$$P_{\mathbf{Y}}(\mathbf{Y}) = \frac{2 |\mathbf{Y}|^{N-q} (N\alpha)^{(\alpha+Nq)/2}}{G(N, q) |\Sigma|^N \Gamma(\alpha)} K_{\alpha-Nq} (2\sqrt{N\alpha \text{Tr}[\Sigma^{-1} \mathbf{Y}]}) (\text{Tr}[\Sigma^{-1} \mathbf{Y}])^{(\alpha-Nq)/2} \quad (7)$$

式中 $K_n(\cdot)$ 是修正的第二类 n 阶贝塞尔函数; 上面推导的结果是一个广义的 K 分布函数。当 $N = 1$ 时 (也就是单视极化的情况), 我们得到文献 [6] 中描述极化测量向量 \mathbf{y} 的 PDF。

要验证这样的高维函数是十分困难的, 因此在下面的试验测试中, 我们将主要讨论从 (7) 式中演绎出的单极化通道的多视强度 K 分布模型。在 (7) 式中使 $q = 1$, 我们得到多视强度 K 分布:

$$p_{y_I}(y_I) = \frac{2}{\Gamma(N) \Gamma(\alpha) y_I} \left(\frac{N\alpha y_I}{\bar{x}} \right)^{(\alpha+N)/2} K_{\alpha-N} \left(2\sqrt{\frac{N\alpha y_I}{\bar{x}}} \right) \quad (8)$$

式中 y_I 指多视强度, $\bar{x} = E[y_I]$ 。这里我们得到与文献 [8] 中相同的 K 分布。对单通道情况, (3) 式变为 $y_I = tx_I$, 这里 x_I 为单极化通道的相干斑变量, 这样我们就可利用单通道的测量数据来估计 (4) 式中描述变量 t 的 Γ 分布的 α 参数 [9]

$$\alpha = (N + 1)\alpha_I / (N - \alpha_I), \quad (9)$$

式中 $\alpha_I = E^2[y_I] / \text{var}[y_I]$ 。

4 多视极化 SAR 数据的统计分布测试

我们使用一组 NASA/JPL 机载极化 SAR 在 San Francisco 海湾采集的四视数据, 图 1 是四视 HH 强度图象, 包括 512×512 个象点, 地面分辨力是 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。我们将理论的多视强度 K 分布与实测数据的直方图和几种常用的经验分布模型作比较, 以此来确定分布模型与直方图的吻合性。试验中选择了三种典型的区域来进行统计性质分析, 它们是海洋、金门公园中的似森林区域和城市, 所用的经验分布模型是高斯、对数正态、 Γ 分布和韦布尔分布。

在所选择的测试区域, 我们首先计算出各极化通道强度数据的均值和方差, 然后画出四视强度 K 分布和四种经验模型的分布曲线, 并用均方根 (RMS) 误差法来测量分布函数与统计直方图的吻合程度, 最小的 RMS 误差值决定着与直方图吻合最好的统计分布模型。表 1 给出测试结果; 对 HH 强度数据的拟合曲线分别在图 2 到图 4 中给出。

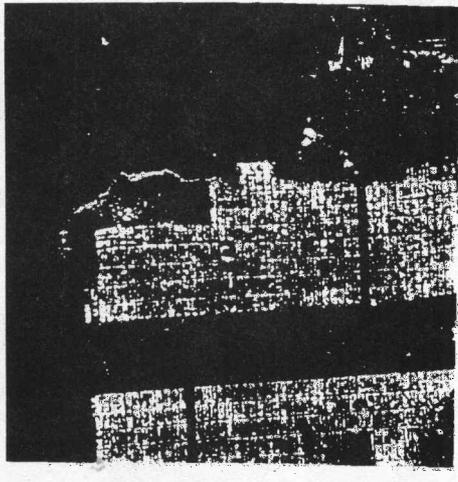


图 1 L 波段四视 HH 强度图象

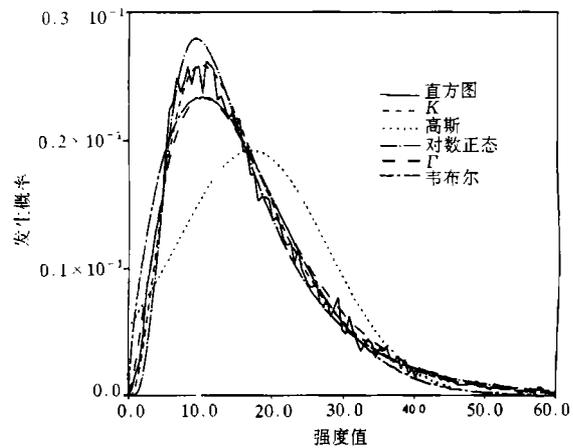


图 2 海洋区域模型拟合测试

表 1 中的测试结果清楚地表明: (1) 高斯分布对所有讨论的情况都不太合适, (2) K 分布对海洋区域的测量数据优于其它分布模型, (3) 对数正态模型总是最好地匹配城市区域的测量数据, (4) 从类森林区域的测量数据的统计性质依赖于所考虑的极化通道, 这可能是由这类区域的复杂的散射结构所造成的, (5) 对海洋和类似森林区域, Γ 分布函数是对最佳匹配模型的一个很好的近似。

表 2 列出三个测试区域的每个极化通道的强度测量的非均匀系数。我们从中知道, 三个地表类型的非均匀性皆与极化通道有关。不同区域的非均匀系数的比较说明: 城市区域具有最大的非均匀系数 (三个通道的平均 $\alpha = 1.56$), 海洋区域表现出相对均匀的特点 (三个通道的平均 $\alpha = 11.08$)。因此我们得出以下结论: (1) 纹理 Γ 分布的 α 参数精确表示了场景的非均匀性,

测定该参数有助于选择合适的分布来表征实际的雷达测量, (2) 从海洋这样的相对均匀区域测量的数据具有较高的 α 值, 能够用 K 分布来表述, (3) 城市这样的强非均匀区的测量数据具有很低的 α 值, 用对数正态分布来表述其统计特性较为合适, (4) 要经验地表征类似森林区域的统计特性, Γ 模型是个合适的选择。

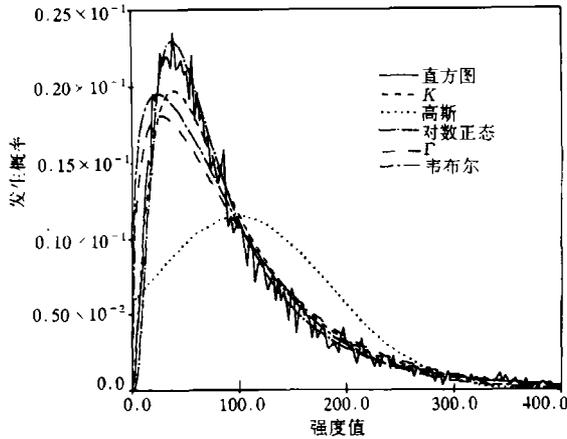


图 3 类似森林区域模型拟合测试

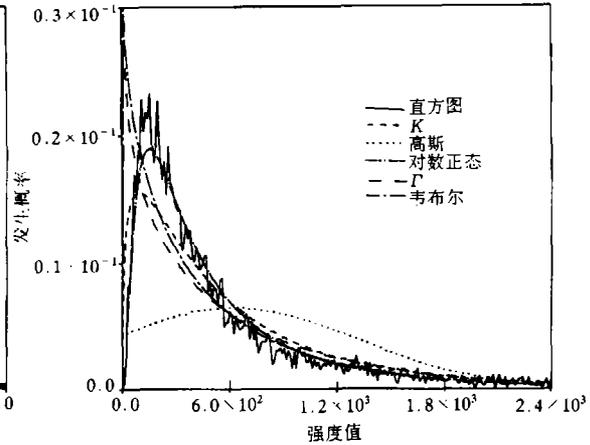


图 4 城市区域模型拟合测试

表 1 模型拟合的 RMS 误差 ($\times 10^{-3}$) (4 视强度数据)

	通道	K	高斯	对数正态	Γ	韦布尔	第一	第二
海洋	HH	0.81	4.05	1.09	1.07	1.46	K	Γ
	HV	1.31	5.24	1.58	1.38	1.89	K	Γ
	VV	0.82	3.27	1.07	0.88	1.21	K	Γ
公园	HH	0.87	3.84	0.78	1.68	1.79	对数正态	K
	HV	4.43	6.39	3.04	2.66	1.68	韦布尔	Γ
	VV	1.21	3.91	1.39	1.30	1.38	K	Γ
城市	HH	1.34	3.63	0.75	2.57	2.56	对数正态	K
	HV	1.59	5.83	1.41	2.61	2.22	对数正态	K
	VV	1.09	3.57	0.87	1.72	1.69	对数正态	K

表 2 场景纹理非均匀参数估计 (4 视强度数据)

地貌类型	海洋			公园			城市		
	HH	HV	VV	HH	HV	VV	HH	HV	VV
α 估计值	8.81	10.69	13.75	2.61	1.96	2.09	1.24	1.70	1.75

5 自适应的分类方法

SAR 数据在地表分类的许多应用^[2,9]表明分类的精度与地表类型很有关系 (或者与测量数据的统计特性有关), 所以不能期望单个分布模型能适应场景中每个地表类型。因此有必要利用自适应的分布模型进行分类。作为 SAR 数据统计分析的一个应用, 我们提出一个自适应最大似然 (ML) 分类方法, 该方法根据特定场景的非均匀性自适应地选取分布模型。

对利用全极化信息的分类中, 我们用 Wishart 分布和对数域的多变高斯分布来构造 ML 分类判别式分别应用于相对均匀和强非均匀的场景; 对单极化通道的分类, 我们将 Γ 分布和对数

正态分布分别应用于相对均匀和强非均匀的场景。对给定的采样点，它所处的局部场景的非均匀性由 α 值的大小来衡量。我们可使用一个滑动窗来估计局部区域的 α 值，合适地选取 α 值的门限可控制使用某个分布模型的频率。针对利用全极化 SAR 数据和利用 HH 强度数据的图象分类，采用上述自适应 ML 分类方法，其精度测试结果分别列在表 3 和表 4 中。

表 3 利用全极化数据的分类精度

α 门限	海洋	公园	城市	总精度
0.0	98.80	89.33	73.83	87.32
2.4	99.05	87.81	82.83	89.90
∞	98.00	82.42	85.72	88.71

表 4 利用 HH 强度数据的分类精度

α 门限	海洋	公园	城市	总精度
0.0	91.53	69.51	69.78	76.94
2.4	91.27	69.95	78.55	79.92
∞	84.21	68.69	81.96	78.29

我们注意到，仅利用 Γ 分布模型时 (α 门限为 0.0)，在城区的分类精度很低，而当 α 门限取为 ∞ 时，仅利用对数正态分布，虽然在城区的分类精度有很大的提高，但在海洋和公园区域的分类却变差，尤其是在公园区域利用全极化数据的分类和在海洋区域利用 HH 强度数据的分类。我们在第 4 节的统计分布测试中已经知道， Γ 分布模型对城市区域的各极化通道的雷达观测数据不合适，对数正态分布模型对海洋区域的 HV 和 VV 数据不合适，这些统计分析的结果同分类的结果是一致的。利用自适应的分布模型对地貌类型进行分类，可得到比较好的结果。例如对于利用 HH 强度数据的分类，取 α 门限为 2.4，在城区的分类相对于只用 Γ 分布的分类精度提高了近 9%，其它两个地表类的分类精度几乎不变，总的精度因此提高约 3%。

6 结束语

本文研究了多视全极化 SAR 图象的统计特性。基于乘性相干斑模型，证明了多视全极化 SAR 数据服从广义的 K 分布，并将从中演绎出的单通道多视强度 K 分布与实测数据的统计直方图和几种常用的分布模型进行比较，在海洋这样相对均匀的区域得到验证，并因而经验地建立了场景纹理的非均匀系数与合适的统计分布模型之间的关系。此外，本文根据统计分析的结果提出的自适应分类方法及其试验结果有力地说明了统计分析的重要性。

参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle. J. of Optical Society of America, 1976, 66(11): 1145-1148.
- [2] Lim H, Swartz A A, *et al.* Classification of earth terrain using polarimetric SAR images. J. of Geophysical Research, 1989, 94(B6): 7049-7057.
- [3] Goodman N R. Statistical analysis based on a certain multivariate complex Gaussian distribution (An introduction). Annals of Mathematical Statistics, 1963, 34(1): 152-177.
- [4] Ulaby F T, Elachi C. (Ed.) Radar Polarimetry for Geoscience Application, MA: Artech House INC, 1990, Ch.2.
- [5] Lee J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 17(1): 24-32.
- [6] Novak L M, Shtin M B, Cardullo M J. Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data. IEEE Trans. on AES, 1989, AES-25(2): 150-165.
- [7] Liu Guoqing, Huang Shunji, Torre A, Rubertone F. Optimal Speckle Reduction in Multi-look Polarimetric SAR Imagery. Proc. IGARSS'95, Firenze, Italy: July 1995, 664-666.
- [8] Ulaby F T, Dobson M C. Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain, MA: Artech House INC, 1989, Ch. 3.

- [9] 刘国庆. 极化合成孔径雷达成像的理论分析及应用研究: [博士论文]. 成都: 电子科技大学, 1996.

STATISTICAL ANALYSIS OF MULTI-LOOK POLARIMETRIC SAR IMAGERY

Liu Guoqing Huang Shunji Xiong Hong A. Torre* F. Rubertone*

(College of Electron. Eng., Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China, Chengdu 610054)

*(Dept. of Remote Sensing, Alenia Spazio SPA, Rome 00131, Italy)

Abstract With a multiplicative speckle model, the unconditional density function of the multi-look polarimetric synthetic aperture radar (SAR) data is derived, and the result is shown to be a generalized K -distribution. The multi-look intensity K -distribution is particularly compared with histograms of physical radar measurements of several typical terrain types and several empirical distributions. The relationship between the heterogeneity coefficient of the scene texture and the proper statistical distribution model is experimentally established. In addition, based on the results of the statistical analysis, an adaptive classification scheme is presented, and the improved classification shows the importance of the statistical analysis.

Key words Polarimetric SAR, Multi-look processing, Speckle, Statistical analysis, Classification

刘国庆: 男, 1965年生, 博士, 副教授, 目前正从事机载 SAR 的实时信号处理, 利用 SAR 和极化 SAR 数据的自动目标检测、分类和识别, 以及软件电台等方面的研究.

黄顺吉: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会雷达专业常务委员和信号处理专业副主任委员, 美国 IEEE 高级会员. 目前主要从事星载和机载 SAR 成像处理系统、SAR 和极化 SAR 的目标识别、SAR 数据的军事应用、非线性信号处理等方面的研究.

熊红: 女, 1967年生, 硕士, 讲师, 现从事大天线阵微波成像系统、高速数据采集和信号处理等方面的研究.