

地海杂波的随机分形模型*

陈彦辉**

谢维信

(西安电子科技大学工程学院 西安 710071) (深圳大学 深圳 518060)

【摘要】 引入时变分形曲面描述地面和海面的局部动态特征,给出了三个合理电磁散射假设;采用基尔霍夫解定性分析散射场的时域分形特性,导出了地杂波和海杂波的分形模型;分析了杂波模型的幅度分布、功率谱和参数的特性。理论分析和数据仿真表明,分形模型可有效地对地杂波和海杂波进行建模。

关键词 时变分形曲面; 地杂波; 海杂波; 分形模型

中图分类号 TN955.1

研究雷达杂波的特性对于提高雷达目标检测性能是至关重要的。传统研究主要采用统计手段提取杂波统计特性,针对不同的照射环境及雷达体制提出不同的杂波模型,如瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布和K分布。同时也有学者提出采用随机行走分析联合高斯分布的杂波,但这些模型都由数据本身和统计假设获得,不能明确描述杂波的形成机理。近年来,分形理论被引入到粗糙表面电磁散射研究领域,其研究成果表明电磁波与分形表面相互作用后散射能量的角分布保留散射面的分形特征^[1]。这些研究都集中在散射能量的空间特性上,而实际中的散射能量随时间改变,其时域特征也具有分形特征^[2]。在雷达信号处理领域中,研究成果表明大部分雷达杂波具有分形特征且与目标不同^[3],但这些研究只是采用分形理论直接分析实测数据,未能从理论上给出合适的物理机制描述和杂波的分形模型。

针对地面和海面,本文采用时变分形曲面模型和基尔霍夫解分析电磁散射场的时域分形特性,提出雷达回波的分形模型并分析和讨论其统计特性,以便采用如小波变换和时频分布等新方法对杂波进行深入研究。

1 地海杂波的时域分形模型

地面和海面通常具有大尺度相关而小尺度相似的特征,可用分形曲面进行模拟。在实际环境中,地面和海面通常相对雷达随时间发生变化,如地表上的风吹草动和海浪波动等,致使雷达回波随时间起伏而变化。为描述动态变化的地表和海面,引入动态分形曲面模型

$$f(x, y, t) = \sigma \left\{ \frac{2[1 - b^{-2\alpha}]}{M[1 - b^{-2\alpha N}]} \right\}^{\frac{1}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} b^{-\alpha n} \sum_{m=1}^M \sin \left[Kb^n \left(x \cos \frac{2m\pi}{M} + y \sin \frac{2m\pi}{M} + vt \right) + \phi_{nm}(t) \right] \quad (1)$$

式中 $\alpha = 3 - D$, D 为分维值 ($2 < D < 3$); b 为空间基频 ($b > 1$); K 为尺度因子; σ 为起伏均方高度; v 表征分形曲面随时间变化程度; $\phi_{nm}(t)$ 为随机初相位过程,其值在低频段 ($n < n_0$) 和高频段 ($n \geq n_0$) 分别为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的独立随机变量和过程,且相互独立。由于低频段谐波分量间相位稳定,使表面呈现较好的规律性,代表了表面的轮廓,而高频段谐波分量的相位时变,增加了表面的不确定性和复杂性,代表了表面的随机变化。

地海杂波(简称杂波)的实质是雷达波与地面和海面相互作用产生的电磁散射回波。分析粗糙面的电磁散射通常采用基尔霍夫解,它要求粗糙面的起伏变化不宜过大。而实际的地面和海面整体

1999年9月29日收稿

* 电子部预研基金和国家博士点基金资助项目

** 男 27岁 博士

起伏变化往往比较大,且各部分的入射角、散射角以及与雷达的距离和方位角都不同,故不能直接采用基尔霍夫解。本文做出以下假设:

假设1 地面和海面可以分成满足各个假设且具有相同分形特征的分形曲面 L 个,每个曲面都满足采用基尔霍夫解分析其电磁散射的条件。对于不同曲面,其入射场的入射角、观察点处散射场的散射角以及与观察点的距离和方位角都是相互独立且时变;不同曲面中其他原因所产生的散射场相互独立且时变,在总散射场中占较小的比例。

假设2 每个分形曲面的 x 和 y 方向取值范围及起伏均方高度 σ 满足

$$\begin{cases} -X \leq x \leq X & X > \lambda \\ -Y \leq y \leq Y & Y > \lambda \\ \sigma < \frac{\sqrt{MN}}{4\pi} \lambda \gamma & \gamma < 0.1 \end{cases} \quad (2)$$

观察点处于远场区,距散射面中心距离为 R ,相对曲面 x 方向方位角为 θ_3 。入射波为线极化波,单位入射场 E_i 以入射角 θ_1 照射曲面,观察点的散射场 E_s 的散射角为 θ_2 。

假设3 每个分形曲面的起伏均方高度较小,可以忽略曲面内部多次散射和遮挡效应,曲面中各点入射场的入射角、观察点处散射场的散射角以及观察点的距离和方位角相同。

对于满足假设2和假设3的第 l 个分形曲面,其散射场的基尔霍夫解为

$$E_{Sl}(t) = \pm F_l \int_{-Y}^Y \int_{-X}^X \exp(iV_{xl}x) \exp(iV_{yl}y) \times \prod_{n=0}^{N-1} \prod_{m=1}^M \exp \left\{ iV_{zl} C b^{-\omega} \sin \left[Kb^n \left(x \cos \frac{2m\pi}{M} + y \sin \frac{2m\pi}{M} + vt \right) + \phi_{lmi}(t) \right] \right\} dx dy \quad (3)$$

利用第一类贝塞尔函数的性质,可得出散射场的近似表达式为

$$E_{Sl}(t) = \pm \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} b^{-\omega} \left\{ [P_n^R(t) + iP_n^I(t)] \sin(Kb^n vt) + [Q_n^R(t) + iQ_n^I(t)] \cos(Kb^n vt) \right\} + (U_n^R + iU_n^I) \right\} \quad (4)$$

可见,散射场的实虚两部在时域上都可视作随机分形信号与常值之和。根据假设1可知总散射场为 L 个独立散射场之和,考虑其他散射场的存在,通过同类项合并可得总散射场为

$$E_s(t) = \pm \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} b^{-\omega} \left\{ [P_n^R(t) + iP_n^I(t)] \sin(Kb^n vt) + [Q_n^R(t) + iQ_n^I(t)] \cos(Kb^n vt) \right\} + [E_w^R(t) + iE_w^I(t)] \right\} \quad (5)$$

式中 参数 $P_n^R(t)$ 、 $Q_n^R(t)$ 、 $P_n^I(t)$ 、 $Q_n^I(t)$ 、 $E_w^R(t)$ 、 $E_w^I(t)$ 分别为同分布、互不相关的随机过程,其统计特性与各散射场特性有关。

散射回波被雷达天线接收后形成的 I 和 Q 两支路信号与总散射场实部和虚部相对应,皆可视作随机分形信号与白噪声的合成,且分形特征相同。故杂波的分形模型可定性为

$$z(t) = \pm \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} b^{-\omega} \left\{ [A_n^I(t) + iA_n^Q(t)] \sin(Kb^n vt) + [B_n^I(t) + iB_n^Q(t)] \cos(Kb^n vt) \right\} + [W^I(t) + iW^Q(t)] \right\} \quad (6)$$

式中 $A_n^Q(t)$ 、 $B_n^Q(t)$ 、 $A_n^I(t)$ 、 $B_n^I(t)$ 以及 $W^Q(t)$ 、 $W^I(t)$ 分别为同分布且不相关的随机过程。

2 分形模型的特性分析

假定杂波某支路信号 $x(t)$ 为

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [A_n(t) b^{-\omega} \cos(Kb^n t) + B_n(t) b^{-\omega} \sin(Kb^n t)] + w(t) \quad (7)$$

假设过程 $A_n(t)$ 和 $B_n(t)$ 的均值皆为 $m_n(t)$ ，若令 $A'_n(t)=A_n(t)-m_n(t)$ ， $B'_n(t)=B_n(t)-m_n(t)$ ，那么 $A'_n(t)$ 和 $B'_n(t)$ 为零均值的随机过程且相互独立。若令

$$\begin{cases} x_f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [m_n(t)b^{-\alpha} \cos(Kb^n t) + m_n(t)b^{-\alpha} \sin(Kb^n t)] \\ x_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [A'_n(t)b^{-\alpha} \cos(Kb^n t) + B'_n(t)b^{-\alpha} \sin(Kb^n t)] \end{cases} \quad (8)$$

可见，信号 $x(t)$ 主要是由快变化的零均值的分形噪声 $x_n(t)$ 和慢变化的分形信号 $x_f(t)$ 构成。如果 $x_f(t)$ 的平均周期比较长，那么在相对较短的时间内，信号可视为快变化的随机过程与常值的迭加结果，相应的杂波振幅有时近似服从莱斯分布；在相对较长时间内，则近似服从K分布。信号 $x(t)$ 的自相关函数可以视为 $x_f(t)$ 、 $x_n(t)$ 和 $w(t)$ 三者的自相关函数之和，随时延下降缓慢，这与实测数据较为吻合^[3]。由式(7)可知参数 $A_n(t)$ 和 $B_n(t)$ 决定式中各分量功率谱的形状，在 $n < n_0$ 时因其变化缓慢致使相应功率谱近似为冲激函数，而在 $n \geq n_0$ 时因其变化较快使得谱近似为常值。参数 N 影响着信号的频率分量数目，由于 N 变大，信号所含大频率正弦信号的数目增加，而对于这些大频率信号，其幅值非常小，可以近似为零，因此 N 值适当即可。信号的频率主要集中在低频区，其值与 K 和 b 有关，相应的幅值与 b 和 α 有关， α 主要控制幅值下降率。对于信号的功率谱而言，当 K 变大时因主要分量的频率变大造成谱宽变大，但功率的下降率变小；当 b 变大时，谱宽加大而功率下降率变小；当 α 变大时几乎不影响谱宽，但功率的下降率变大。

3 数据仿真与实验分析

1) 幅度特性 分别以入射角 30° 和 3° 照射起伏较小且照射面较大的模拟表面进行散射仿真。图1是在某时刻所有分形曲面的散射场的参数 $P_n^R(t)$ 的幅度分布，直接反映了表面各组成部分的散射特性。图2是不同入射角的总散射场中参数 $P_n^R(t)$ 的幅度分布，直接影响杂波的幅度分布。在假设中所有分形曲面是相互独立的，因此参数 $P_n^R(t)$ 可视为独立随机过程。将图1和图2中的分布曲线与高斯分布曲线进行比较易知，两种入射角的分布曲线首尾两部分都比高斯分布宽，但大入射角的相差较大。这主要是分形曲面数目不可能非常大且散射过程不可能处处相近，无法满足中心极限定理。

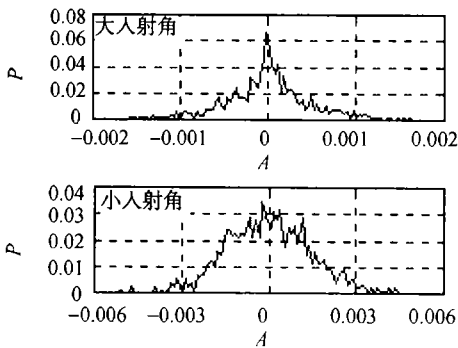


图1 参数 $P_n^R(t)$ 的幅度分布曲线

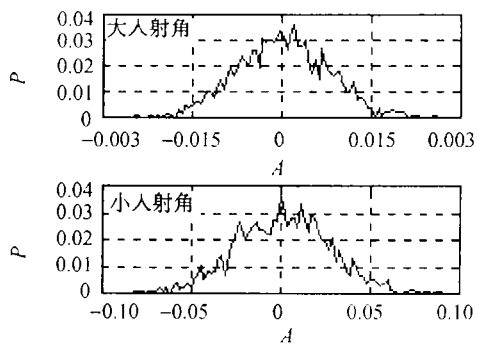
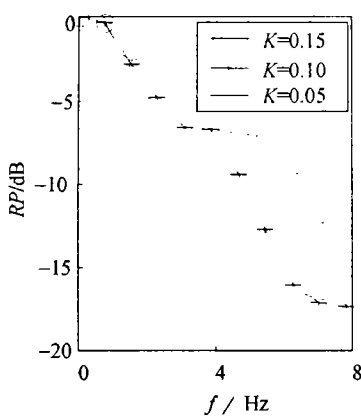
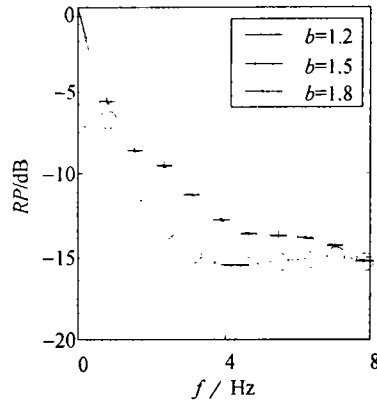
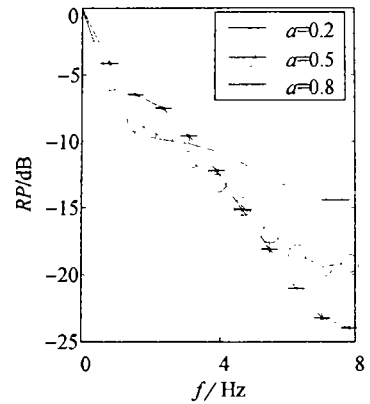


图2 参数 $P_n^R(t)$ 的幅度分布曲线

2) 频谱分析 图3~图5分别是不同 K 、 b 和 α 值的相对功率谱。相对功率是指各频率的功率与零频(非常接近零的频率)功率的比值。由图中可以看出当 K 变大时，其相对功率谱的谱宽也加大而相对功率下降率变小；当 b 变大时，其谱宽加大而相对功率变化率减小；当 α 变大时几乎不影响谱宽，但相对功率的下降率变大。

图3 不同 K 值的相对功率谱图4 不同 b 值的相对功率谱图5 不同 α 值的相对功率谱

4 结束语

本文引入时变分形曲面模型,结合地面和海面的实际特性,提出三个合理假设:采用基尔霍夫解定性分析散射场的时域分形特性,并导出杂波的分形模型且进行了简要的分析。该模型能较好地反映杂波的分形特性和统计特性,为杂波特性分析和建模提供新的思路和方法。

参 考 文 献

- 1 Lin N, Lee H P. Scattering from fractal surface. *J Modern Optics*, 1995, 42(1): 225~241
- 2 谢文录, 陈彦辉, 谢维信. 动态分形表面的电磁散射. *电子学报*, 1998, 26(12): 49~51
- 3 谢文录, 陈彦辉, 谢维信. 雷达杂波的分形特性研究. *系统工程与电子技术*, 1999, 21(1): 41~44
- 4 Falconer K J. *Fractal geometry: mathematical foundation and applications*. New York: Wiley, 1990: 147~253

Random Fractal Model for Terrain and Sea Clutter

Chen Yanhui

Xie Weixin

(School of Electronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

(Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract The time-variant fractal surface is adopted to describe regional dynamical feature of terrain and ocean surface. Under three rational assumptions on electromagnetic scattering, the time domain property of scattering field is analyzed qualitatively by applying Kirchhoff solution, and the fractal model of clutter from terrain and ocean surface is deduced. The amplitude distribution, power spectrum and parameters of the returns are discussed in brief. Theoretical analysis and simulated results prove that the fractal model matches the clutters from terrain and ocean surface effectively.

Key words time-variant fractal surface; terrain clutter; sea clutter; fractal model