

基于海杂波散射特性的微弱信号检测方法^{*}

贺静波[†] 刘 忠 胡生亮

(海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

(2010 年 8 月 16 日收到; 2011 年 1 月 28 日收到修改稿)

从研究海杂波的电磁散射特性出发, 利用随机微分理论对海杂波的物理特性进行了系统地分析. 首先建立了海杂波电磁散射所满足的随机微分方程, 然后利用 Itô 公式得到了海杂波散射信号幅度和相位的扩散过程模型, 最后利用海杂波散射信号的规律给出了微弱信号检测的相关处理方法.

关键词: 随机微分方程, 海杂波, 散射, 微弱信号

PACS: 02.50.Fy, 02.50.Fz, 03.65.Nk, 05.40.Fb

1. 引言

长期以来, 对海杂波的概率密度函数人们进行了大量研究^[1-4]. 在此基础上文献[5]又探讨了在强海杂波情况下微弱信号检测问题, 从中可以看出对海杂波物理特性的研究是后续信号处理的基础. 根据文献[6]给出的海杂波物理特性, 本文尝试利用随机微分理论对其散射特性进行研究并在此基础上给出一种微弱信号检测方法.

2. 海杂波散射信号所满足的随机微分方程

海杂波的电磁散射模型可以表示为^[7,8]

$$\varepsilon_t^{(N)} = \sum_{j=1}^N a_j e^{i\varphi_t^{(j)}}, \quad (1)$$

式中 $\varphi_t^{(j)} = \Delta^{(j)} + B^{1/2} W_t^{(j)}$, $\Delta^{(j)}$ 为服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机量, $W_t^{(j)}$ 表示维纳过程. 根据 Itô 公式

$$\begin{aligned} d\varepsilon_t^{(N)} &= \sum_{j=1}^N a_j \left[i d\varphi_t^{(j)} - \frac{1}{2} (d\varphi_t^{(j)})^2 \right] e^{i\varphi_t^{(j)}} \\ &= \sum_{j=1}^N a_j \left[i B^{1/2} dW_t^{(j)} - \frac{1}{2} B dt \right] e^{i\varphi_t^{(j)}} \\ &= \sum_{j=1}^N a_j i B^{1/2} dW_t^{(j)} e^{i\varphi_t^{(j)}} - \frac{1}{2} B dt \sum_{j=1}^N a_j e^{i\varphi_t^{(j)}} \end{aligned}$$

$$= V - \frac{1}{2} B \varepsilon_t^{(N)} dt, \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} V &= \sum_{j=1}^N a_j i B^{1/2} dW_t^{(j)} e^{i\varphi_t^{(j)}} \\ &= B^{1/2} \left[i \sum_{j=1}^N a_j \cos \varphi_t^{(j)} dW_t^{(j)} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{j=1}^N a_j \sin \varphi_t^{(j)} dW_t^{(j)} \right] \\ &= B^{1/2} [i \sigma_c dW_t^{(c)} - \sigma_s dW_t^{(s)}] \\ &= B^{1/2} \sigma \left[i \frac{\sigma_c}{\sigma} dW_t^{(c)} - \frac{\sigma_s}{\sigma} dW_t^{(s)} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N a_j \cos \varphi_t^{(j)} dW_t^{(j)} &= \sigma_c dW_t^{(c)}, \\ \sigma_c^2 &= \sum_{j=1}^N a_j^2 \cos^2 \varphi_t^{(j)}, \\ \sum_{j=1}^N a_j \sin \varphi_t^{(j)} dW_t^{(j)} &= \sigma_s dW_t^{(s)}, \\ \sigma_s^2 &= \sum_{j=1}^N a_j^2 \sin^2 \varphi_t^{(j)}, \\ \sigma^2 &= \sum_{j=1}^N a_j^2. \quad (4) \end{aligned}$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 定义复维纳过程

^{*} 中国博士后科学基金(批准号:20100471795)和湖北省自然科学基金(批准号:2009CDB337)资助的课题.

[†] E-mail: jbh_1979@sina.com

$$d\xi_t = \frac{1}{\sqrt{2}}(idW_t^{(c)} - dW_t^{(s)}), \quad (5)$$

满足

$$\begin{aligned} |d\xi|^2 &= dt, \\ (d\xi)^2 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

则

$$V = B^{1/2} \sigma d\xi_t. \quad (7)$$

最终得到

$$d\varepsilon_t^{(N)} = -\frac{1}{2}B\varepsilon_t^{(N)}dt + B^{\frac{1}{2}}\sigma d\xi_t. \quad (8)$$

定义 $\Psi_t \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \varepsilon_t^{(N)}$ 可得

$$d\Psi_t = -\frac{1}{2}B\Psi_t dt + B^{\frac{1}{2}}\sigma d\xi_t. \quad (9)$$

3. 微弱信号检测方法

极坐标系下 $\Psi_t = R_t e^{i\theta_t}$, 令 $R_t = \sqrt{z_t}$ 则

$$dR_t = \frac{dz_t}{2z_t^{1/2}} - \frac{(dz_t)^2}{8z_t^{3/2}}. \quad (10)$$

记 $dz_t = Bb_{(z)}dt + (2B)^{\frac{1}{2}}\sigma_{(z)}dW_t^{(R)}$, $(dz_t)^2 = 2B\sigma_{(z)}^2 dt$, 则(10)式为

$$\begin{aligned} dR_t &= \frac{B}{4R_t^3}(2R_t^2 b_{(z)} - \sigma_{(z)}^2)dt \\ &\quad - \left(\frac{B}{2R_t^2}\right)^{\frac{1}{2}}\sigma_{(z)}dW_t^{(R)}. \end{aligned} \quad (11)$$

同时根据 Itô 公式 $d(X_t Y_t) = X_t dY_t + Y_t dX_t + dX_t dY_t$

和 $de^{i\theta_t} = e^{i\theta_t} \left[id\theta_t - \frac{1}{2}(d\theta_t)^2 \right]$ 可得到

$$d\Psi_t = e^{i\theta_t} \left[iR_t d\theta_t + dR_t + idR_t d\theta_t - \frac{1}{2}R_t (d\theta_t)^2 \right]. \quad (12)$$

因此

$$\begin{aligned} (d\Psi_t)^2 &= e^{i2\theta_t} \left[(dR_t)^2 - (R_t)^2 (d\theta_t)^2 \right. \\ &\quad \left. + i2R_t dR_t d\theta_t \right] \\ &= e^{i2\theta_t} \left(\frac{B\sigma_{(z)}^2}{2z_t} - z_t \sigma_{(\theta)}^2 \right) dt, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} |d\Psi_t|^2 &= (dR_t)^2 + (R_t)^2 (d\theta_t)^2 \\ &= \left(\frac{B\sigma_{(z)}^2}{2z_t} + z_t \sigma_{(\theta)}^2 \right) dt. \end{aligned} \quad (14)$$

在强海杂波环境下进行微弱信号检测时只须计算(14)式的理论值和实测值即可, 显然当存在目标回波信号时(14)式的理论值与实测值相关性较小, 只有海杂波散射信号的情况下它们相关性较大.

4. 实验与结果分析

实验中采用舰载某型号雷达(出于保密原因, 具体型号略去), 该雷达为舰载对海警戒雷达(I 和 Q 双通道, 满足算法要求); 实验海域为舟山某海域, 实验对象为风浪 5 级情况下的某无人小艇. 实验测得的数据如图 1 所示.

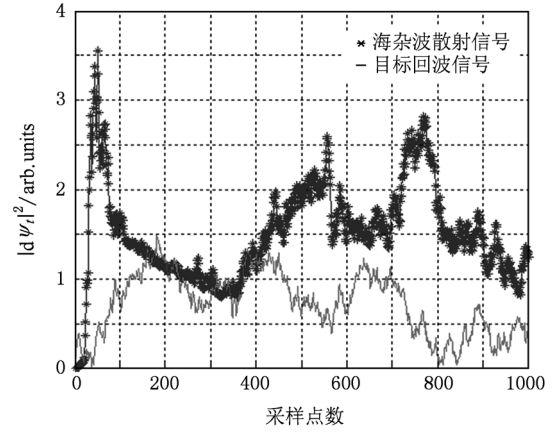


图1 海杂波和目标回波信号数据

图中横坐标为采样点数, 采样间隔为 1 ms, 从图 1 中可以看出目标回波信号淹没在海杂波散射信号中. 该海杂波数据结果与国外文献[9]中给出的实验数据符合. 只有海杂波散射信号时, 利用(14)式计算 $|d\Psi_t|^2$ 的理论值, 同时根据实际数据计算 $|d\Psi_t|^2$, 得到它们的曲线如图 2 所示.

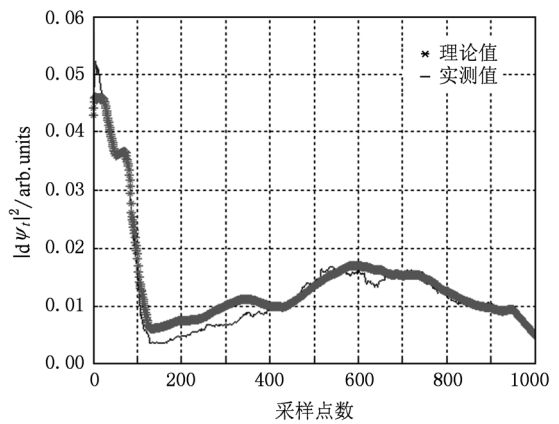
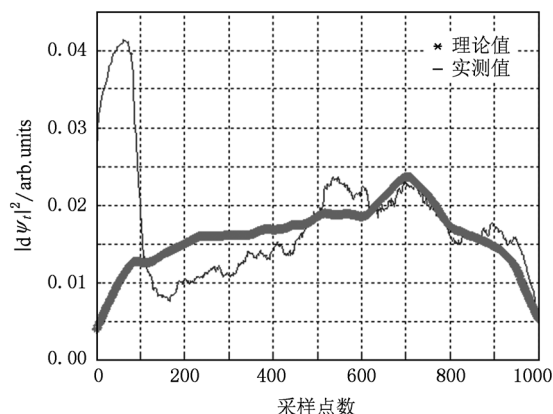


图2 海杂波散射信号 $|d\Psi_t|^2$ 值

从图 2 中可以看出两者相关性很强(相关系数 0.99). 当存在目标回波信号时, $|d\Psi_t|^2$ 的理论值和实测值曲线如图 3 所示.

图3 存在回波信号时 $|d\Psi_t|^2$ 值

从图3中可以看出两者相关性弱(相关系数0.12). 比较图2和3可以得出结论:利用(14)式可以实现海杂波环境下的微弱信号检测.

5. 结 论

研究了海杂波的散射特性,建立了海杂波散射信号所满足的随机微分方程,推导得到了其扩散系数所满足的确定性方程,在此基础上给出了强海杂波背景下微弱信号检测方法,并通过实验验证了该方法的正确性.

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Jiang B, Wang H Q, Li X, Guo G R 2006 <i>Acta Phys. Sin.</i> 55 3985 (in Chinese) [姜斌、王宏强、黎湘、郭桂蓉 2006 物理学报 55 3985]</p> <p>[2] Lin S H, Zhu H, Zhao Y G 2004 <i>J. Sys. Electron.</i> 26 178 (in Chinese) [林三虎、朱红、赵亦工 2004 系统工程与电子技术 26 178]</p> <p>[3] Haykin S, Li X B 1995 <i>Proc. IEEE</i> 83 95</p> | <p>[4] Lo T, Leung H 1993 <i>IEEE Proc. F</i> 140 243</p> <p>[5] Xing H Y, Jin T L 2010 <i>Acta Phys. Sin.</i> 59 140 (in Chinese) [行鸿彦、金天力 2010 物理学报 59 140]</p> <p>[6] Field T R, Tough R J A 2003 <i>Proc. R. Soc. Lond. A</i> 459 2169</p> <p>[7] Jakeman E, Tough R J A 1988 <i>Adv. Phys.</i> 37 471</p> <p>[8] Field T R 2005 <i>J. Math. Phys.</i> 46 063305</p> <p>[9] Jakeman E 1980 <i>J. Phys.</i> 13 31</p> |
|---|---|

Detection of weak signal based on the sea clutter scattering^{*}

He Jing-Bo[†] Liu Zhong Hu Sheng-Liang

(Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(Received 16 August 2010; revised manuscript received 28 January 2011)

Abstract

Sea clutter scattering is analyzed in the paper. The stochastic differential equations are given for the physical quality of sea clutter. The diffusion process model is built by using Ito formula. These processes are represented as Ito stochastic differential equations, which enables the identifying their stochastic volatilities with certain free functions that serve as calibrating the model. Finally the correlation detection method is used to detect weak signal from sea clutter.

Keywords: stochastic differential equation, sea clutter, scattering, weak signal

PACS: 02.50.Fy, 02.50.Fz, 03.65.Nk, 05.40.Fb

^{*} Project supported by China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20100471795) and the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (Grant No. 2009CDB337).

[†] E-mail: jbh_1979@sina.com