

FMICW 高频地波海况监测雷达海洋回波信号 仿真模拟检验系统¹

吴光龙 朱守正 黄乐 刘锦高 殷杰羿

(华东师范大学电子工程系 上海 200062)

摘 要 该文给出一种调频中断连续波 (FMICW) 高频地波海况监测雷达的仿真模拟检验系统。该系统基于 FMICW 高频地波雷达的工作机理, 以及一阶和二阶 Bragg-Doppler 谱的反演原理, 利用直接数字合成的技术仿真出海洋雷达回波的模拟信号, 以供雷达的校准与定标之用。该系统已与 FMICW 高频地波雷达测海系统进行了联机测试, 得到了预期的效果。

关键词 FMICW, B-D 谱, 海洋监测雷达, 雷达校准与定标

中图分类号 TN951

1 引 言

海洋已成为国际高新技术竞争的重要领域。海上的任何活动, 无论是海洋开发与研究, 还是海洋环境监测、灾害预测预报和国防, 都依赖于对海洋环境要素基础数据、变化规律的掌握和预测预报, 因此迫切要求我们对海洋实现全方位、多手段的立体监测。近年来, 高频地波雷达海洋监测技术得到了国内外充分重视。在高频地波雷达对海洋的监测中, 雷达接收机接收特定距离、特定方位的海洋回波信号, 经过傅里叶变换或其它处理可得到回波信号的 Bragg-Doppler(B-D) 谱, 如图 1 所示。由 B-D 谱的反演我们可得到相应点的海况参数 (包括海洋表面流场、风场和波场等)^[1]。由于海洋回波是随机信号, 为从中得到准确的海况参数, 必须首先对高频地波海洋监测雷达系统进行实验室检验和定标, 然而在文献上很少见到相应的定标仪器的报导。

本文给出一种调频中断连续波 (FMICW) 高频地波海况监测雷达的实验室仿真模拟检验系统。该系统是为校准和定标 FMICW 高频地波雷达研制的。其工作原理如下: 根据特定的海况信息, 应用雷达海洋回波的 B-D 谱理论、AR 参数模型方法等模拟雷达对海洋表面的回波信号, 将这些模拟仿真信号调制到雷达发射机的 FMICW 信号, 并经延时一确定时间后输入雷达接收机, 考察其接收通道以及后处理的反演结果是否与模拟海况信息的参数一致, 从而可以检测雷达系统工作是否正常, 测量参数是否正确, 达到对高频地波海洋监测雷达系统的实验室定标目的。所研制的系统已与 FMICW 高频地波海洋监测雷达系统进行了联机测试, 得到了预期的效果。

2 基本原理

实验室仿真模拟检验系统是根据 FMICW 的特点, 以及一阶和二阶多谱勒谱的反演原理, 利用数字合成的技术仿真模拟一些确定海况的雷达回波信号。其工作原理涉及到 FMICW 雷达的特点、B-D 谱与雷达海洋回波的关系等。

2.1 FMICW 雷达回波信号的模拟仿真

FMICW 雷达^[2,3]兼有线性调频连续波 (FMCW) 和脉冲体制的优点。接收信号载噪比高, 检测能力强; 收发共站且便于收发天线共用; 具有较小的距离旁瓣, 可较好克服远近海面回波强弱差别大对接收机动态范围的苛刻要求; 一次测量可获得多个距离点的海况信息。但因此也带来了雷达的校准和定标的困难。FMICW 的波形如图 2 所示^[2]。

¹ 2000-06-29 收到, 2000-11-30 定稿
国家 863 计划海洋 818-01-02 项目资助

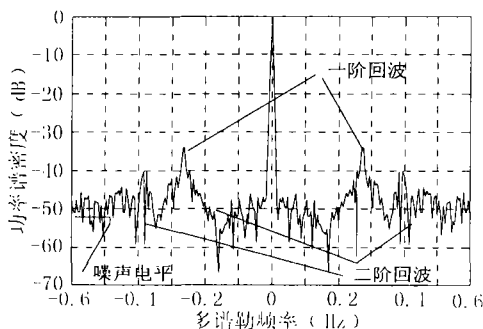


图1 归一化 Doppler 谱

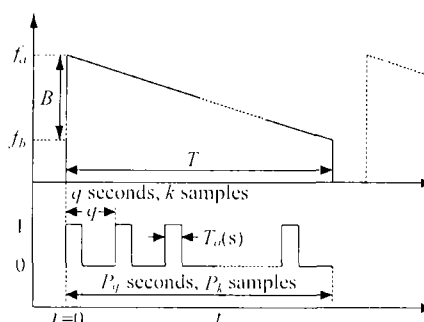


图2 调频中断连续波 (FMICW)

从理论上分析, FMICW 可认为是由 FMCW 信号和脉冲信号组成的。其中 FMCW 信号可简单地表示为:

$$x(t) = \cos(2\pi(f_0 - \alpha t/2)t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中的 α 是频率扫描率, f_0 是初始频率。脉冲信号如式 (2) 所示:

$$g(t) = \sum_{n=0}^{P-1} \text{rect} \left[\frac{t - nq - T_0/2}{T_0} \right] \quad (2)$$

其中 $\text{rect}(t/T_0)$ 是一个脉冲宽度为 T_0 的矩形脉冲信号, 式中 T_0 是脉冲宽度, q 是脉冲的周期。那么, 单个周期 FMICW 的表达式可认为是 $x(t)g(t)$ 。如果用一个谱分布为 $F(w)$ 的信号 $f(t)$ 调制 $x(t)$, 可得到调幅信号 $x'(t)$ 为

$$x'(t) = (1 + m_{\text{am}}f(t))x(t) \quad (3)$$

式中 m_{am} 为调幅系数。当该调幅信号送入雷达接收机输入端, 与延时时间为 τ 的 FMICW 信号混频并经过低通滤波后可得到信号 $s(t)$

$$s(t) = L\{x'(t)x(t - \tau)\} = c_1(1 + m_{\text{am}})f(t) \cos[2\pi(\alpha\tau t - f_0\tau - \alpha\tau^2/2)] \quad (4)$$

一般海洋回波 B-D 谱的能量集中在低频端 (小于几 Hz), 因而从 (4) 式可见 $s(t)$ 的功率谱主要集中在频率为 $\alpha\tau$ 处。该频率对应于 FMICW 雷达在距离 $d = 0.5c\tau$ 处的海洋回波信号。实际雷达的采样是在离散时间域进行的, 因此我们可以用 $y(t)$ 来表示雷达对 $s(t)$ 的采样信号

$$y(t) = s(t)g(t - \tau) \quad (5)$$

对 $y(t)$ 进行一次傅里叶变换, 我们可得到在一个 FMICW 扫频周期中雷达测量范围内不同距离处一个时间点的海洋回波信号。这样的测量连续进行 m 次, 并对相同距离的 m 个一次傅里叶变换结果进行第二次傅里叶变换或用其它谱处理方法, 就可以获得每个距离处的海洋回波 B-D 谱 (对应于上述的调制信号 $f(t)$ 的功率谱)。我们可以通过选择不同的调制信号 $f(t)$ 来模拟仿真不同海况的雷达回波信号。

2.2 一阶 B-D 谱的模拟

根据 Barrick 的海洋一阶雷达 B-D 谱理论有^[1]

$$\sigma^{(1)}(\omega, \phi) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m'=\pm 1} S(-2m'\vec{k}_0) \delta(\omega - m'\omega_B) \quad (6)$$

式中 $m' = \pm 1$ 是 Doppler 频移的方向符号; \vec{k}_0 是雷达的波数矢量, 方向与雷达波方向一致; $S()$ 是方向波高谱; ω_B 是 Doppler 角频率, ϕ 是雷达波束的方位角。对应水深较大的远海区, Doppler 频率 f_B 为

$$f_B = 0.102\sqrt{f_0}(\text{Hz}) \quad (7)$$

其中 f_0 是雷达的工作频率, 单位为 MHz。当我们选择 FMICW 雷达的工作频率为 $f_0=7.5$ MHz 时, 由上式可知 Doppler 频率 $f_B=0.279$ Hz。所以 $f(t)$ 可选为频率为 0.279 Hz 的正弦波信号。我们用直接数字合成技术产生频率 $f=0.279$ Hz 的正弦波, 再将其调制到雷达发射的 FMICW 载波信号, 并延时时间 τ , 可模拟仿真一阶 B-D 谱的校准定标信号。

2.3 二阶 B-D 谱的模拟

根据 Barrick 二阶 B-D 谱理论有^[4]

$$\sigma^{(2)}(\omega, \phi) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m, m'=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma|^2 s(m\vec{k}_1) s(m'\vec{k}_2) \delta(\omega - m\sqrt{gk_1} - m'\sqrt{gk_2}) dpdq \quad (8)$$

方程中 $\Gamma = \Gamma_H + \Gamma_{EM}$ 是耦合系数, 其中 Γ_H 是流体动力学耦合系数, Γ_{EM} 为电磁耦合系数。有向波高谱 $S()$ 描述了海洋表面波的能量与波长的关系。在本文中我们采用 Pierson-Moscowitz 模型:

$$S(f, \theta) = S(f)g(\theta) \quad (9)$$

其中 $S(f)$ 为无向波高谱, $g(\theta)$ 为天线方向因子。

当给定风速和 $g(\theta)$ 后可得到有向波高谱, 从 (8) 式可计算出的雷达散射的二阶功率谱, 经逆傅里叶变换可获得散射场的时域信号。然而用这样的方法因缺少相位信息而与实际雷达回波信号相差太大。为此, 我们假设对于雷达测得的数据可以看成是一个各态历经平稳的随机过程, 认为在一个时间段内测得的海洋雷达回波数据是一个平稳随机过程在有限时间内的一个样本。要从一个观察时间有限的样本中得出时域信号函数估计, 可采用 AR 参数模型, 其数学表达式为

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) + w(n) \quad (10)$$

式中 $a(k)$ 是模型参量, 也就是雷达接收信号的数学统计期望, 我们在这里取作 IFFT 处理的结果。 $x(n)$ 是输出序列, 即仿真的雷达回波信号 $f(n)$ 。 $w(n)$ 为零均值且方差为 σ^2 的白噪声。

当选择 FMICW 雷达工作在 7.5 MHz, 假定海面风速为 10 m/s, 风向与雷达波束成 90° 夹角, 所仿真的二阶 B-D 谱见图 3, 经过上述方法处理后得到的时域仿真信号如图 4 所示。

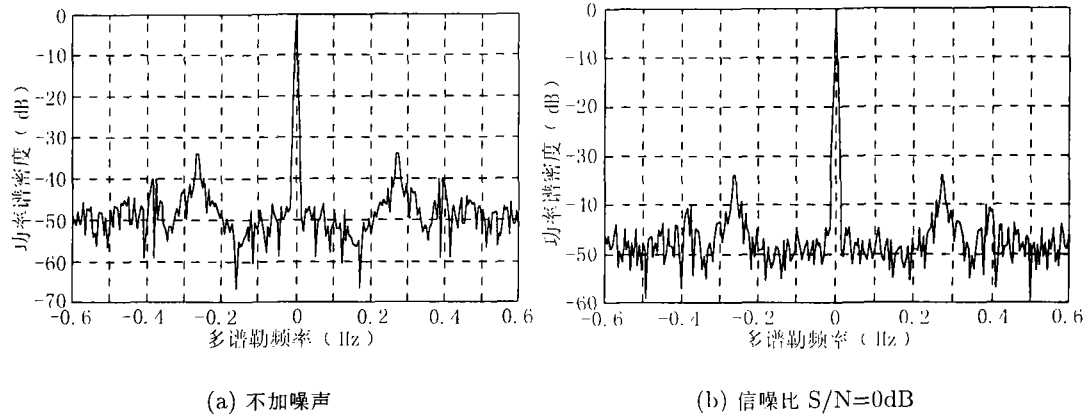


图 3 模拟仿真信号的 Bragg-Doppler 谱 (雷达工作频率 7.5MHz , 风速为 10m/s , 风向与雷达波束成 90°)

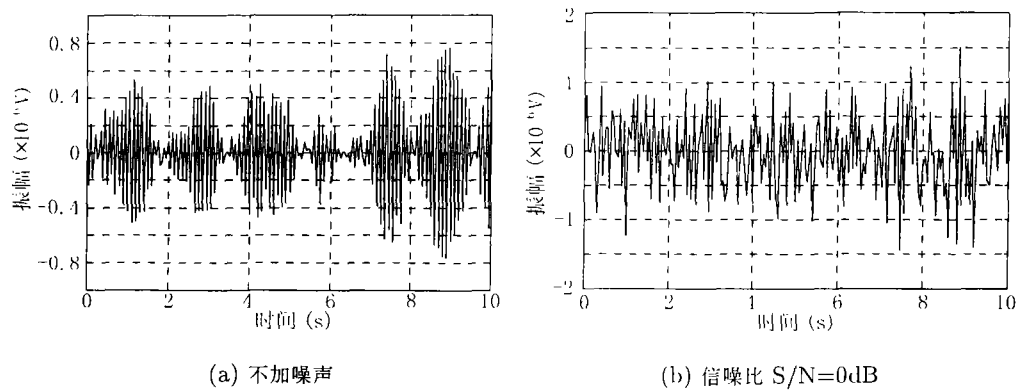


图 4 模拟海洋雷达回波信号 (雷达工作频率 7.5MHz , 风速为 10m/s , 风向与雷达波束成 90°)

2.4 雷达海洋回波信号仿真模拟检验系统

该仿真模拟检验系统是由海洋回波信号模拟仿真信号发生器、延时线、调制器等几个部分组成。其中海洋回波信号模拟仿真信号发生器基于上述理论直接用数字合成技术产生各种仿真信号; 延时线的延迟时间为 $800\mu\text{s}$; 雷达发射机产生的 FMICW 信号经过延时线延迟后与所选择的仿真信号由调制器调制, 输出的已调信号可供雷达的检验与定标。具体框图如图 5 所示。

3 仿真检验实例

本仿真模拟检验系统与武汉大学研制的 FMICW 高频地波海况监测雷达系统进行联机测试, 其测试系统框图如图 6 所示。接收机采集到的数据经过两次 FFT 变换, 得到 B-D 谱。

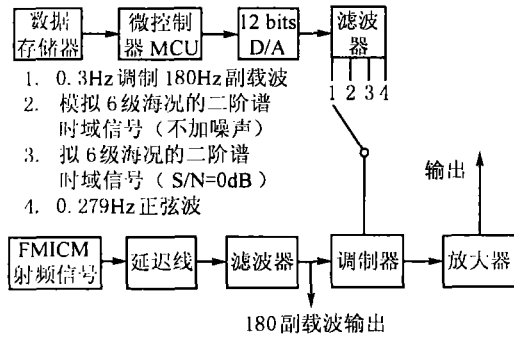


图 5 海洋回波信号模拟仿真系统框图

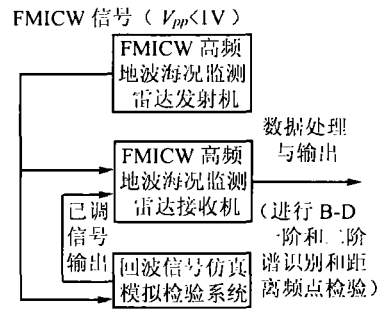


图 6 联机测试框图

图 7 所示为雷达接收机的输出信号经过一次傅里叶变换的结果。由于本信号发生器选择的延时线为 $\tau=800\mu\text{s}$ ，所对应的距离 $d = 0.5\tau c = 120\text{km}$ (c 为光速)。从图 7 可以看出，输出信号的一次傅里叶变换最大值正好对应于距离为 120km 处，与预期结果一致。该测试结果可以用来判断雷达接收机的通道工作状态是否正常，还可以用来判断雷达的距离信息是否准确。

雷达接收机输出的信号经两次傅里叶变换后所得到的 120km 处仿真模拟一阶 Bragg-Doppler 谱如图 8 所示。从图中可以看出，一阶 B-D 谱的频率分别对应于 $\pm 0.28\text{Hz}$ ，与设计的数字合成频率一致。

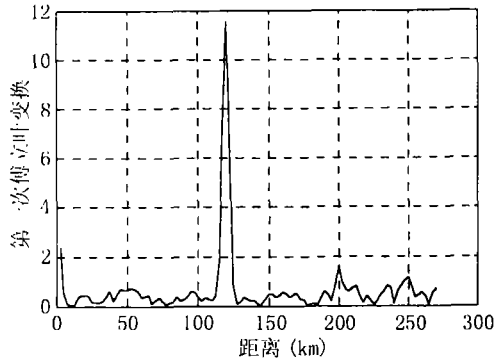


图 7 雷达输出信号的一次 FFT

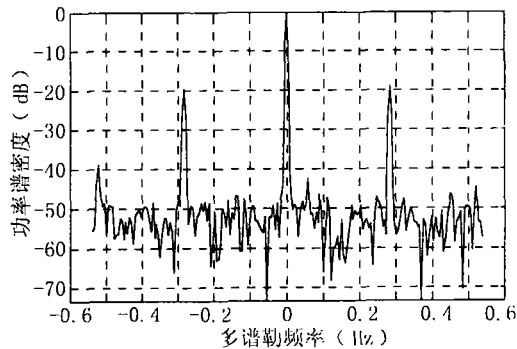


图 8 测得一阶 B-D 谱

图 9 和图 10 给出的分别是测得的 6 级海况 (风速 10m/s，海流与雷达方向正交) 的仿真模拟 B-D 谱。其中图 10 是在信号中人为加入随机噪声，信噪比 S/N 为 0dB 的情况。测试结果可以判断一阶和二阶 B-D 谱的反演结果是否正确。

4 结 论

本文给出一个 FMICW 高频地波海洋监测雷达海况回波信号仿真模拟检验系统，并用该系统与实际 FMICW 雷达进行了成功的闭环联机测试。测试结果表明系统的设计是成功的。该系统可用于高频地波海洋监测雷达系统的实验室定标与检验。

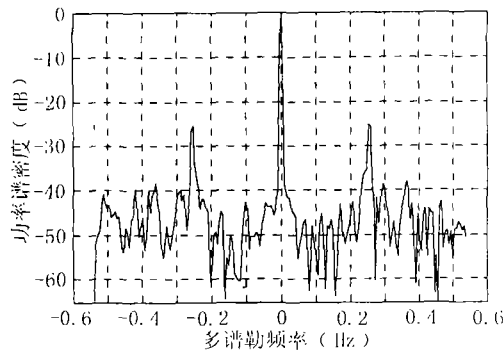


图 9 测得的二阶 B-D 谱 (不加噪声)

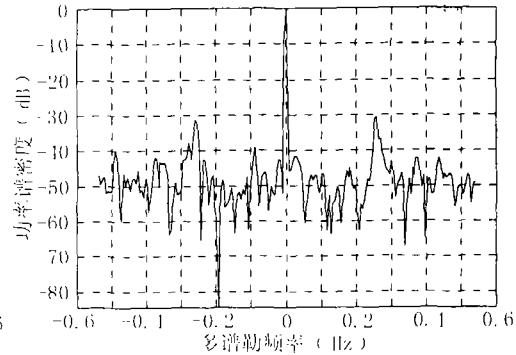


图 10 测得的二阶 B-D 谱 (S/N=0dB)

参 考 文 献

- [1] S. K. Srivastava, J. Walsh, An analysis of the second-order doppler return from the ocean surface. IEEE J. of Oceanic Engineering, 1985, 10(4), 443-445.
- [2] R. Khan, B. Gamberg, Target detection and tracking with a high frequency ground wave radar, IEEE J. of Oceanic Engineering, 1994, 19(4), 540-548.
- [3] R. H. Khan, Ocean-clutter model for high-frequency radar, IEEE J. of Oceanic Engineering, 1991, 16(2), 181-188.
- [4] R. Howell, J. Walsh, Measurement of ocean wave spectra using narrow-beam HF radar, IEEE J. of Oceanic Engineering, 1993, 18(3), 296-305.

AN OCEAN ECHO SIGNAL SIMULATION SYSTEM FOR VERIFICATION AND CALIBRATION OF FMICW HIGH FREQUENCY GROUND WAVE RADAR

Wu Guanglong Zhu Shouzheng Huang Le Liu Jingao Yin Jieyi

(Dept. of Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract An ocean echo signal simulation system for verification and calibration of FMICW high frequency ground wave radar is presented in this paper. It is based on the principle of FMICW radar and inversion of Bragg-Doppler(B-D) spectrum. The ocean echo signals are simulated with the digital synthesis techniques. They are used for calibration of the sea-state ocean radar. The system has been tested on an FMICW radar system, the surveillance results are favorably anticipated.

Key words FMICW, B-D spectrum, Sea-state monitoring radar, Radar calibration

吴光龙: 男, 1974 年生, 硕士生, 主要研究方向有计算电磁学、天线、数字信号处理等。

朱守正: 男, 1949 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向有天线与电波传播、海洋遥感、电磁兼容、计算电磁学及其应用等。

黄乐: 男, 1978 年生, 硕士生, 主要研究方向有计算电磁学、天线、遗传算法等。