

天波超视距雷达海杂波模型修正与特性分析

关泽文* 陈建文 鲍拯
(空军预警学院 武汉 430019)

摘要: 因受电离层调制影响,传统的高频海杂波模型难以全面描述天波超视距雷达海杂波的空域非均匀性和时域非平稳性。该文首先基于传统的 Walsh 高频海杂波模型分析了洋流的影响,提出电离层子反射面模型的概念,揭示了相干处理间隔内电离层对高频信号频谱的调制机理;然后通过建立电离层等效反射面,并将其分解为多个子反射面的方式,给出可以综合反映不同海态、不同电离层状态的天波超视距雷达海杂波修正模型。最后结合数学描述,利用该文修正模型反演分析了由电离层的空域非均匀、时域非平稳引起的典型高频海杂波多普勒偏移、展宽、分裂和多径复杂现象的实测数据多普勒谱,仿真与实测数据多普勒谱验证了所提修正模型的准确性与鲁棒性。

关键词: 天波超视距雷达; 海杂波模型; 电离层子反射面模型; 电离层等效反射面

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-2881-08

DOI: 10.11999/JEIT170224

Model Modifying and Characteristics Analyzing of Ocean Clutter in Skywave Over-the-horizon Radar

GUAN Zewen CHEN Jianwen BAO Zheng
(Wuhan Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: As modulated by the ionosphere, the classical High-Frequency (HF) model of ocean clutter can not describe the HF scatterings from sea surface approvingly in view of skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR). In this paper, ocean current is taken into consideration based on the Walsh HF sea clutter model. An equivalent ionospheric reflecting screen model is established which can be resolved into several sub screens, based on which the ionospheric modulation on frequency is discussed. Incorporating with Walsh model, a normalized sea clutter model for skywave OTHR is presented. Using the presented model, the spectrums in different cases involving Doppler shift, spectrum broadening, splitting and multipath propagation are simulated, and comparing with the measured data, the model's validity and robustness are verified.

Key words: Skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR); Sea clutter model; Ionospheric sub reflecting screen; Equivalent ionospheric reflecting screen

1 引言

天波超视距雷达(OTHR)海杂波是影响慢速舰船目标检测的主要因素,其受电离层调制的影响,因此比传统的高频(HF)海杂波更加复杂多变。1955年, Crombie^[1]首次用试验的方法分析了 HF 海杂波回波多普勒谱,试验结果显示在零多普勒频率两侧各有一个很高的谱峰,运用光栅理论中的“Bragg 散射”,该谱峰得到了很好的物理解释,因此也称它们为一阶 Bragg 峰或一阶海杂波。1972年, Barrick^[2,3]运用电磁场理论推导出了一阶和二阶海杂波散射截面

积方程,从数学的角度定量描述了幅度,表达式中的变量包含了有向浪高谱、海洋表面阻抗、海面风速以及雷达工作频率等,通过和实测数据多普勒谱的比较,验证了模型的准确性。1987年 Walsh 基于归一化函数理论,将一阶 Bragg 峰描述为抽样函数平方的最大值,使 Bragg 峰的宽度有了量化描述。文献[4]和 Gill 等人^[5]考虑了雷达收发双站分离的情况,进一步完善了二阶海杂波回波谱模型。2011年, Walsh 等人^[6]推导了调频连续波(FMCW)波形的高频海杂波多普勒谱模型,该模型更加贴近当前 HF 天波超视距雷达的实际情况。

目前最为广泛应用的 HF 海杂波模型有 Barrick 模型和 Walsh 模型^[2,3,6],基于它们在不同领域已有大量公开报道的研究成果^[7-9]。然而,对于 OTHR 而言,还要考虑电离层这一传播信道对信号调制的

收稿日期: 2017-03-17; 改回日期: 2017-06-05; 网络出版: 2017-06-30

*通信作者: 关泽文 guanzewen2008@163.com

项目基金: 国家自然科学基金(61471391, 61072132)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471391, 61072132)

影响, 具体而言, 电离层是一个有耗、色散、非均匀、非平稳的传播信道^[10], OTHR 实测数据显示回波多普勒谱因电离层影响会出现多普勒偏移、展宽和谱峰分裂的情况。有关电离层的非均匀、非平稳, 已有大量研究成果表明电子浓度随高度而变化, 并在年、季、月、日、时的时间尺度上具有一定的周期性, 得出了许多具有理论研究价值和实际工程应用价值的电离层模型^[11-17]。但对于 OTHR 而言, 一段相干积累时间(CIT)通常为几十秒, 在如此短的时间尺度内, 已有的电离层模型不再适用。事实上, OTHR 目标检测在电离层方面最关心的是在 CIT 时间内电离层浓度变化导致的对回波信号调制的影响, 而应用电磁场理论进行实时地电离层精确结构监测和分析既不切实际也不必要。因此, 本文提出电离层子反射面的概念, 基于此分析电离层对 HF OTHR 回波信号频谱调制的影响, 结合 Walsh 模型, 给出修正的 OTHR 海杂波模型。最后结合复杂电离层状态下实测 OTHR 海杂波多普勒谱和数学分析, 给出所提修正海杂波模型的仿真结果, 验证修正模型的准确性和鲁棒性。

2 考虑洋流影响的 Walsh HF 海杂波模型

根据 Bragg 散射原理和水动力学理论, 并考虑到洋流对一阶海杂波的多普勒频率有搬移的作用, 一阶海杂波多普勒频率为^[1]

$$f'_B = \pm \sqrt{\frac{gf_0}{\pi c}} + \frac{2v_c}{\lambda} \quad (1)$$

其中, g 为重力加速度, f_0 为雷达工作频率, c 为光速, v_c 为洋流相对于雷达的径向速度, λ 为雷达波长。

根据文献[6]可以得出单位海面的任意多普勒频率处的一阶和二阶海杂波的 RCS $\sigma_1(\omega_d)$ 和 $\sigma_2(\omega_d)$, 由于篇幅原因这里不再赘述。HF 海杂波 RCS 可写为^[18]

$$\sigma_c(\omega_d) = [\sigma_1(\omega_d) + \sigma_2(\omega_d)] \rho_p \Delta\varphi \Delta\rho \sec\alpha \quad (2)$$

其中, ρ_p 为 HF 雷达到目标海面之间的射线距离, $\Delta\varphi$ (单位为弧度)和 $\Delta\rho$ 分别为方位和距离分辨率, α 为电磁波入射角。

以上得到的是 HF 海杂波的多普勒谱模型, 为便于分析, 将其变换到时域, 同时加入相位噪声和时域的高斯白噪声得

$$s(n) = \sum_{d=1}^N \left\{ \sqrt{\sigma_c(\omega_d)} \exp \{j[2\pi f_d n T / N + w(n)]\} + N(n) \right\} \quad (3)$$

其中, $f_d = \omega_d / 2\pi$ 为多普勒频率, T 为相干积累时

间, $w(n)$ 为海杂波随机相位噪声, $N(n)$ 为高斯白噪声。

3 相干积累时间内电离层对 HF 信号的调制

OTHR 电磁波传播信道模型如图 1 所示, 其中 O 为地球球心, R 为地球半径, $\beta = L_2 / R$ 为 $\angle AOE$ 的弧度, L_1 为 EF 的一半, L_2 为 \widehat{AE} 弧长(大圆距离 L 的一半), E 为发射、接收站位置, F 为目标反射区域, G 为 EF 连线的中点, A 为大圆路径 L 中点, B 为实际电离层中折射路径的最高点, C 为等效反射面位置, D 为电子浓度变化后的等效反射面位置, Γ 和 Γ' 分别为 C 点和 D 点处的等效反射面。根据巴列特—图夫定理可知, 经过点 B 的实际传播路径对应的延时与真空中经过点 C 的虚拟路径对应的延时相同。

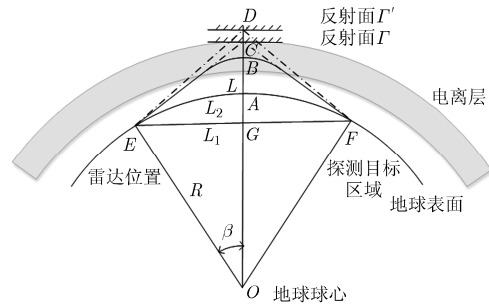


图 1 OTHR 信号传播路径模型

假设电离层中等效反射面在极短的相干积累间隔 Δt 内, 垂直运动速度为 $v(t)$ (取向上为负), 运动前反射面高度 AC 为 h , 则运动后高度为

$$h' = AD = h + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v(\tau) d\tau \quad (4)$$

其中, t_0 为初始时刻。在 t_0 和 $t_0 + \Delta t$ 时刻电磁波传播相位路径 P_1 和 P_2 分别为

$$P_1 = 2(GC^2 + L_1^2)^{1/2} = 2\left\{[(R - R \cos \beta) + h]^2 + (R \sin \beta)^2\right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$P_2 = 2(GD^2 + L_1^2)^{1/2} = 2\left\{[(R - R \cos \beta) + h']^2 + (R \sin \beta)^2\right\}^{1/2} \quad (6)$$

相位路径差为

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (7)$$

故由电离层运动引起的多普勒偏移为

$$\Delta f(t) = -2 \frac{f_0}{c} \cdot \frac{d\Delta P}{dt} \quad (8)$$

其中, c 为光速。将 $\beta = L_2 / R$ 及式(4)~式(7)代入式(8), 并考虑由于时间间隔 Δt 极短, 故可视 $v(t)$ 在此过程中为一个恒定值, 所以可得

$$\Delta f(t) = - \frac{4f_0 \left(R - R \cos \frac{L_2}{R} + h + v(t)\Delta t \right) v(t)}{c \left[\left(R - R \cos \frac{L_2}{R} + h + v(t)\Delta t \right)^2 + \left(R \sin \frac{L_2}{R} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (9)$$

式(9)表明, 在相干积累间隔内, 电离层对高频电磁波具有频谱调制的影响, 表现为与电离层等效反射面垂直向运动速度、雷达到目标区域的大圆距离 L 和等效面初始高度 h 有关的一个多普勒偏移 $\Delta f(t)$ 。

4 OTHR 海杂波修正模型

天波超视距雷达(OTHR)采用的相干积累时间(CIT)通常为几十秒, 如果在整个 CIT 内, $v(t)$ 都能保持不变, 同时考虑到 $v(t)\Delta t \ll R - R \cos(L_2/R) + h$, 则式(9)可简化为

$$\Delta f(t) \approx - \frac{4f_0 \left(R - R \cos \frac{L_2}{R} + h \right) v(t)}{c \left[\left(R - R \cos \frac{L_2}{R} + h \right)^2 + \left(R \sin \frac{L_2}{R} \right)^2 \right]^{1/2}} = -\rho v(t) \quad (10)$$

其中, $\rho \triangleq \frac{4f_0 \left(R - R \cos \frac{L_2}{R} + h \right)}{c \left[\left(R - R \cos \frac{L_2}{R} + h \right)^2 + \left(R \sin \frac{L_2}{R} \right)^2 \right]^{1/2}}$ 。

式(10)表明, 对于某一确定的探测目标区域, 即大圆距离 L 和等效面初始高度 h 确定时, $\Delta f(t)$ 与等效面的垂直运动速度 $v(t)$ 线性相关。

然而, 由于电离层的非平稳特性, 以上给出的多普勒偏移在数十秒的 CIT 过程中不再可以认为是不变的, 事实上也正因为如此, 大量的实测数据显示电离层对海杂波回波多普勒谱的调制除了表现为多普勒偏移外, 还有多普勒展宽、谱峰分裂和多径传播。

假设 CIT 长度为 T , 脉冲数为 N , 则在 CIT 内, 电离层对信号的频谱调制可表示为

$$s'(n) = s(n) \exp \left[-j2\pi \sum_{i=1}^n \rho v(i) \frac{T}{N} \right], \quad 1 \leq n \leq N \quad (11)$$

其中, $s'(n)$ 为经电离层调制后的信号。

由以上分析知, ρ 和 v 在各个相干积累时间间隔内是变化的, 所以须将它们各自视作一个变量。

令 $\Phi(n) = \exp \left[-j2\pi \sum_{i=1}^n \rho v(i) \frac{T}{N} \right]$, 则 $\Phi(n)$ 可以被视为一个具有一定变化规律的序列进行分析。由于本文关注的是电离层对信号的频率调制, 所以对 $\Phi(n)$ 进行傅里叶级数展开:

$$\Phi(n) = a_1 \exp \left[-j2\pi \rho v_1 n \frac{T}{N} \right] + a_2 \exp \left[-j2\pi \rho v_2 n \frac{T}{N} \right] + \dots \quad (12)$$

其中, $a_i = \sum_n \Phi(n) \exp(j2\pi f_i n T / N) = \sum_n \Phi(n) \cdot \exp(j2\pi \rho v_i n T / N)$ 。式(12)表明, 在垂直向做复杂运动的电离层等效反射面对回波信号的调制, 可以等效为若干个具有恒定衰减、恒定垂直向运动速度的电离层等效子反射面对回波信号调制的叠加。特别地, 当 ρ 和 v 在整个 CIT 内保持不变时(v 不变但不等于零时, 对 ρ 的影响很小, 可近似认为 ρ 不变), 即电离层等效反射面在垂直向做匀速运动时, 式(11)变为

$$s'(n) = s(n) \exp \left[-j2\pi \rho v_1 n \frac{T}{N} \right] \quad (13)$$

可见, 这时回波整体发生了多普勒偏移。

文献[19,20]中, 用 $\Phi(t) = 1.5 \sin(2\pi \cdot 0.03t)$ 作为电离层的多普勒展宽函数, 将其改写为离散形式并用欧拉公式将其变为指数形式可知, 该多普勒展宽函数可视作由两个子反射面构成等效反射面的情况, 两个子反射面的恒定幅度调制项系数分别为 $-0.75j$ 和 $0.75j$, 多普勒偏移分别为 0.03 Hz 和 -0.03 Hz。需要指出的是, 该函数具有展宽功能的前提是两个多普勒偏移分量的差的绝对值小于回波谱的多普勒分辨率。当两个多普勒偏移分量的差的绝对值大于回波谱的多普勒分辨率时, 将会出现谱峰分裂的现象。

除了多普勒偏移、谱展宽和分裂, OTHR 中还常有多径的现象发生, 这是在电离层中不同高度出现了不仅一个反射路径, 导致出现不同目标分辨单元的回波经不同的路径, 但在相同的时延后被雷达接收。假设有 q 个目标分辨单元经相同的延后被雷达接收(即有 q 个路径), 则信号可以表示为

$$s'(n) = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{p(q)} a_j^i s_i(n) \Phi_i(n) \quad (14)$$

其中, a_j^i 表示第 i 个路径的第 j 个子反射面的复幅度系数, $p(q)$ 表示第 q 个路径的子反射面个数。需要指出的是, q 个路径的时延相同, 结合图 1 分析, 其必须满足

$$\left[\left(R - R \cos \frac{L_2^j}{R} + h^i \right)^2 + \left(R \sin \frac{L_2^j}{R} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(R - R \cos \frac{L_2^j}{R} + h^j \right)^2 + \left(R \sin \frac{L_2^j}{R} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad 1 \leq i, j \leq q, i \neq j \quad (15)$$

其中, 上标 i, j 分别表示 q 个路径中的任意两个。式 (15) 表明, 在实际情况中, 如果能够有实时、准确可信的电离层数据, 可通过电磁场理论计算不同路径的等效反射面的高度 $h^i, 1 \leq i \leq q$ 。

综合以上分析, OTHR 的海杂波模型可以表示为式 (14) 的形式, 其可以模拟由电离层引起的多普勒偏移、展宽、多径, 以及受洋流影响的海杂波多普勒谱。

5 海杂波多普勒谱电离层影响因素分析及模型仿真验证

5.1 电离层等效反射面高度及大圆距离对回波多普勒谱的影响

由式 (11) 可知, 电离层等效反射面的高度 h 和大圆距离 L 可影响参数 ρ , 从而进一步影响电离层对回波谱的调制。假设 OTHR 工作频率 $f_0 = 13.9$ MHz, 地球半径 $R = 6371$ km, 光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s, 高度 h 取 [90, 240] km (略高于实际电离层对 HF 电磁波起反射作用的高度), 大圆距离 L 取 [1000, 4000] km, ρ 随 h 与 L 的变化如图 2 所示。由图可见, 由 h 和 L 引起的 ρ 的变化很小, 通常在应用中, 可以近似取 $\rho = 0.1853$ 。

5.2 洋流的影响

考虑存在洋流影响的某一分辨单元实测数据, 其多普勒谱如图 3(a) 所示, 其中一阶和二阶海杂波区域整体略向正多普勒频率方向偏移 0.06 Hz, 但一阶海杂波多普勒频率向负多普勒频率方向偏移 0.03 Hz, 所以该图为典型具有洋流的海杂波多普勒谱, 另外, 正多普勒频率处的一阶海杂波功率高于另一个近 20 dB, 且二阶海杂波功率 (以两个以一阶海杂波谱峰中间的连续带的均值为代表) 比噪声高约 26 dB。仿真参数设置为: 带宽 $B' = 30$ kHz, $\Delta\rho = c/2B' = 5000$ m, $f_0 = 13.9$ MHz, $\Delta\varphi = 0.5^\circ$, $\alpha = 0$, 海面浪高谱采用 Pierson-Moscowitz 谱^[21], 风向角 $\theta_w = -30^\circ$, 风速 $v_w = 5$ m/s, $v_c = -0.3$ m/s, 相干积累时间间隔 (T/N) 取 0.26 s, CIT 长度 $T = 26$ s, 不考虑电离层的影响 (即本处不考虑一阶和二阶海杂

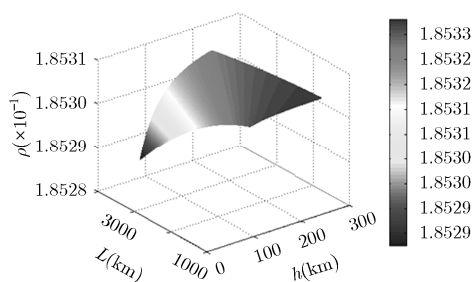


图 2 高度 h 和大圆距离 L 对参数 ρ 的影响

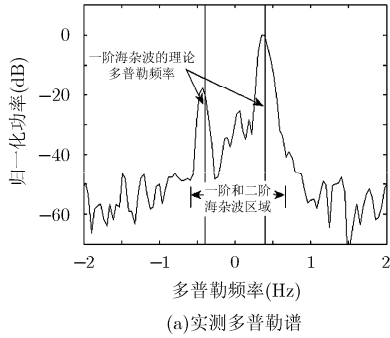
波整体区域的偏移, 该问题将在 5.3.1 中进行分析), 模拟多普勒谱如图 3(b) 所示。由图可见, 仿真多普勒谱中一阶海杂波多普勒频率也向负多普勒频率方向偏移 0.03 Hz, 与实测多普勒谱中的参数一致。

5.3 电离层等效反射面的运动对回波多普勒谱的影响

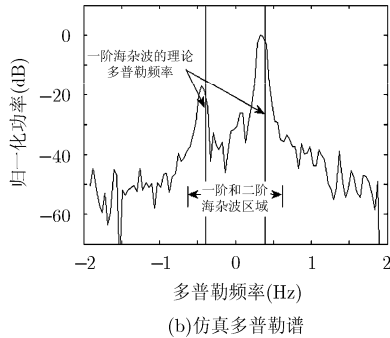
5.3.1 多普勒偏移 考虑存在多普勒偏移现象的某一分辨单元实测数据, 其多普勒谱如图 4(a) 所示, 其中一阶和二阶海杂波区域整体向正多普勒频率方向偏移约 0.07 Hz, 与一阶海杂波偏移一致, 所以为典型的由电离层引起的多普勒偏移的情况, 另外, 正多普勒频率处的一阶海杂波功率高于另一个近 20 dB, 且二阶海杂波功率比噪声高约 25 dB。仿真参数设置为: $\theta_w = -15^\circ$, $v_w = 13$ m/s, $v_c = 0$ m/s, $h = 200$ km, 其仅由一个垂直向运动速度为 $v = 0.5$ m/s 的子反射面构成, 其他参数与 5.2 节中保持一致, 模拟多普勒谱如图 4(b) 所示。由图可见, 仿真多普勒谱中一阶和二阶海杂波区域整体向正多普勒频率方向偏移约 0.07 Hz, 与一阶海杂波偏移一致, 正多普勒频率处的一阶海杂波功率高于另一个 19 dB, 二阶海杂波功率比噪声高约 25 dB, 与实测多普勒谱中的参数一致。

5.3.2 多普勒展宽 考虑存在多普勒展宽现象的某一分辨单元实测数据, 其多普勒谱如图 5(a) 所示, 其中一阶海杂波两个谱峰的 3 dB 宽度为 0.08 Hz (大于多普勒分辨率), 但未分裂, 一阶海杂波和二阶海杂波区域未发生明显偏移, 所以为典型的由电离层引起的多普勒展宽的情况, 另外, 正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个高约 17 dB, 二阶海杂波功率较噪声高约 29 dB。仿真参数设置为: $\theta_w = -10^\circ$, 电离层等效反射面等效为两个复幅度系数分别为 $a_1 = -0.7j$, $a_2 = 0.7j$, 垂直向运动速度分别为 $v_1 = 0.18$ m/s, $v_2 = -0.18$ m/s 的两个子反射面, 其他参数与 5.3.1 节中一致, 模拟多普勒谱如图 5(b) 所示。由图可见, 仿真多普勒谱中一阶和二阶海杂波区域整体向正多普勒频率方向偏移约 0.07 Hz, 与一阶海杂波偏移一致, 一阶海杂波两个谱峰的 3 dB 宽度为 0.08 Hz, 正多普勒频率处的一阶海杂波功率高于另一个 15 dB, 二阶海杂波功率比噪声高 22 dB, 与实测多普勒谱中的参数一致。

5.3.3 多普勒分裂 考虑存在多普勒分裂现象的某一分辨单元实测数据, 其多普勒谱如图 6(a) 所示, 其中一阶和二阶海杂波区域整体未发生偏移, 两个一阶海杂波各自分裂为两个谱峰且对称于对应的一阶海杂波的理论多普勒频率, 所以为典型的多普勒

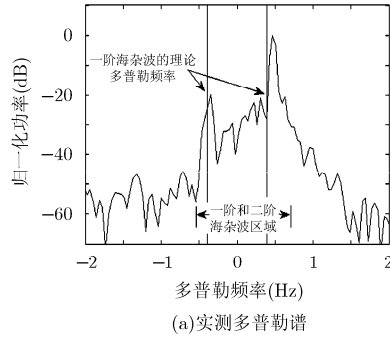


(a) 实测多普勒谱

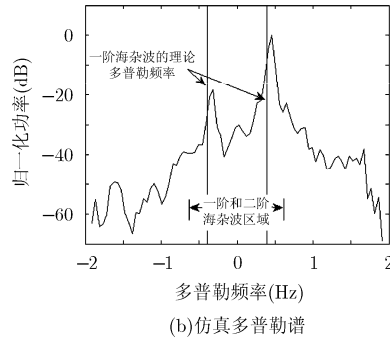


(b) 仿真多普勒谱

图 3 洋流对海杂波多普勒谱的影响

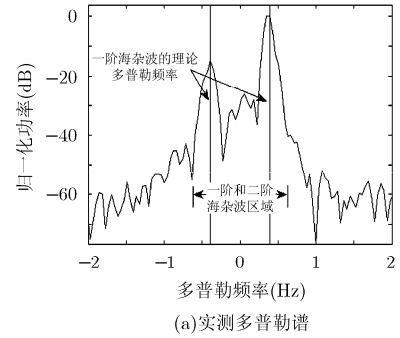


(a) 实测多普勒谱

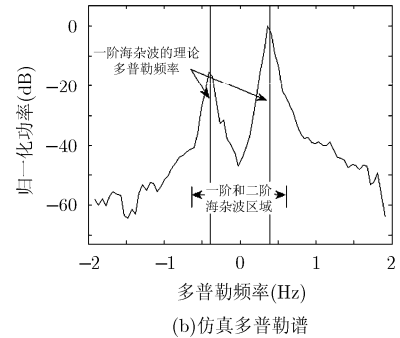


(b) 仿真多普勒谱

图 4 电离层引起的海杂波多普勒偏移



(a) 实测多普勒谱



(b) 仿真多普勒谱

图 5 电离层引起的海杂波多普勒展宽

分裂的情况，另外，正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个高约 5 dB，二阶海杂波功率较噪声高约 25 dB。仿真参数设置为： $\theta_w = -4^\circ$ ， $v_1 = 0.5 \text{ m/s}$ ， $v_2 = -0.4 \text{ m/s}$ ，其他参数与 5.3.1 节中一致，模拟多普勒谱如图 6(b)所示。由图可见，仿真多普勒谱中一阶海杂波各自分裂为两个谱峰且对称于对应的一阶海杂波的理论多普勒频率，正多普勒频率处的一阶海杂波功率高于另一个 3 dB，二阶海杂波功率比噪声高 23 dB，与实测多普勒谱中的参数一致。

5.4 多径传播

由于多径传播情况的发生可能会伴随本节中前文描述的其他情况，表现形式复杂多变。本节结合实测数据，分别对伴随多普勒偏移的多径传播情况和伴随多普勒偏移和分裂的多径传播情况下的实测多普勒谱进行分析，然后给出应用本文所提的修正海杂波模型的仿真结果，进一步验证模型的准确性和鲁棒性。

5.4.1 伴随多普勒偏移的多径传播 考虑某一分辨单元实测数据，其多普勒谱如图 7(a)所示，其中出现了 4 个明显的一阶海杂波谱峰，依据同一路径中两个一阶海杂波谱峰的分布特性，可以将其划分到路径 1 和路径 2 中，并且路径 2 的海杂波向负多普勒频率方向偏移了 0.16 Hz，路径 1 的海杂波无明显偏移，所以为典型的伴随多普勒偏移的多径传播的情况。另外，路径 1 中正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个高约 6 dB，路径 2 中正多普勒频率处

的一阶海杂波功率较另一个低约 4 dB，两个路径综合下二阶海杂波功率较噪声高约 30 dB(无法区分两个路径下各自的一阶海杂波功率)。不失一般性，仿真参数设置为：传播路径两个，对应的两个等效反射面均由一个子反射面构成，各自的电离层等效反射面高度 h^1, h^2 和大圆距离的一半 L_2^1, L_2^2 必须满足式 (15)。取一组解 $L_2^1 = 1200 \text{ km}$ ， $h^1 = 120 \text{ km}$ ， $L_2^2 = 1180 \text{ km}$ ， $h^2 = 209 \text{ km}$ ， $\theta_w^1 = -5^\circ$ ， $\theta_w^2 = 20^\circ$ ， $v_w^1 = v_w^2 = 15 \text{ m/s}$ ，其他参数均与 5.3.1 节中的一致， $v^1(t) = 0 \text{ m/s}$ ， $v^2(t) = -4.5 \text{ m/s}$ ， $a^1 = -0.7j$ ， $a^2 = 0.9j$ (符号中上标表示对应路径)，模拟多普勒谱如图 7(b)所示。由图可见，仿真多普勒谱中也出现 4 个明显的一阶海杂波谱峰，划分路径后，路径 1 中一阶海杂波无多普勒偏移，正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个高 2 dB，路径 2 中一阶海杂波向负多普勒频率方向偏移了 0.21 Hz，正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个低 8 dB，与实测多普勒谱中的参数一致。

5.4.2 伴随多普勒偏移和分裂的多径传播 为更充分地说明多径的复杂性，考虑某一分辨单元实测数据，其多普勒谱实测数据多普勒谱如图 8(a)所示，其中出现 6 个明显的谱峰，且由左至右第 2、第 3 和第 5、第 6 个谱峰分别靠近，所以判断为存在两个路径，路径 1 未发生多普勒偏移、展宽等情况，而路径 2 中海杂波向正多普勒频率方向偏移了 0.34 Hz 并且两个一阶海杂波分别分裂为两个谱峰，所以

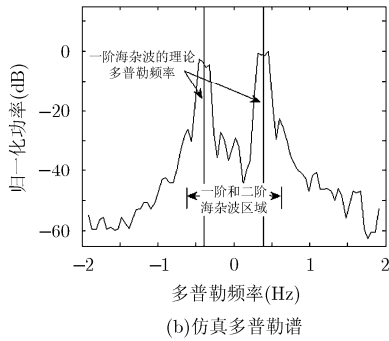
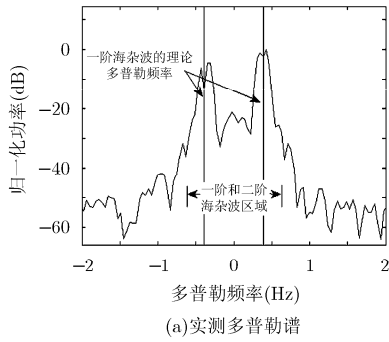


图 6 电离层引起的海杂波多普勒分裂

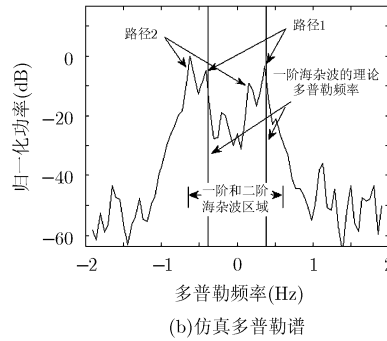
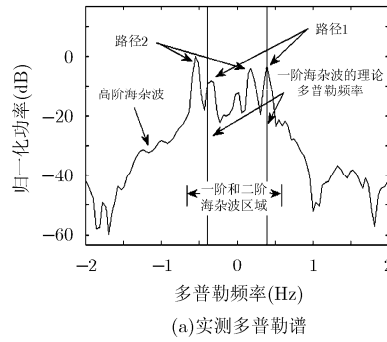


图 7 多径伴随多普勒偏移的海杂波多普勒谱

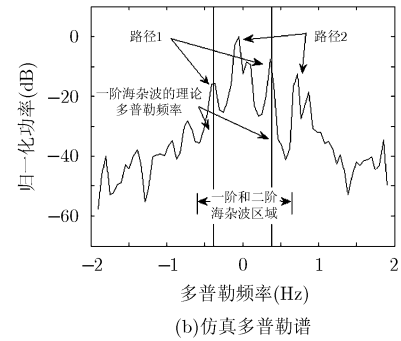
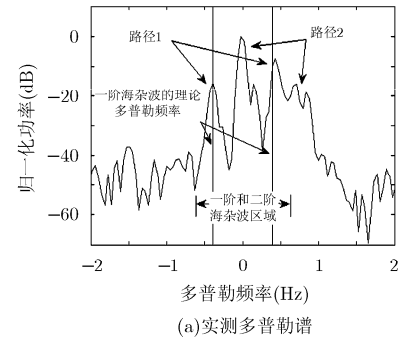


图 8 多径伴随多普勒偏移、分裂的海杂波多普勒谱

该情况属于伴随多普勒偏移和分裂的多径传播。另外，路径 1 中正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个高约 7 dB，路径 2 中正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个低约 14 dB，两个路径综合下二阶海杂波功率较噪声高约 15 dB。不失一般性，仿真采用两个等效反射面，其中代表路径 1 的等效为一个子反射面，代表路径 2 的等效为两个子反射面，参数设置： $\theta_w^1 = -20^\circ$, $\theta_w^2 = 24^\circ$, $v_w^1 = v_w^2 = 5$ m/s, $v^1(t) = 0$ m/s, $v_1^2(t) = 7$ m/s, $v_2^2(t) = 9.5$ m/s, $a^1 = -0.4j$, $a_1^2 = 0.64j$, $a_2^2 = 0.4j$ (下标表示对应子反射面)，其他参数均与 5.3.1 节中的一致，模拟多普勒谱如图 8(b)所示。由图可见，仿真多普勒谱中出现 6 个一阶海杂波谱峰，划分路径后，路径 1 中海杂波无多普偏移，正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个高 8 dB，路径 2 中海杂波向正多普勒频率方向偏移了 0.38 Hz，且两个一阶海杂波分别分裂为两个谱峰，正多普勒频率处的一阶海杂波功率较另一个低 12 dB，两个路径综合下二阶海杂波功率较噪声高 20 dB，与实测多普勒谱中的参数一致。

以上分别给出了多种典型情况下 OTHR 实测海杂波多普勒谱和本文提出的修正 OTHR 海杂波模型的仿真多普勒谱，多种情况下多普勒谱中特征参数的比较验证了本文模型的准确性和鲁棒性。

6 结束语

本文基于 Walsh HF 海杂波模型，提出了电离

层反射面模型，并给出了能够反映多种复杂海态、电离层调制影响的海杂波修正模型。结合数学分析，利用该模型解释并反演了由电离层的空域非均匀特性和时域非平稳特性导致的海杂波多普勒偏移、展宽、分裂和多径的复杂现象，与多种典型情况下的实测数据进行了对比分析，结果表明本文提出的修正 OTHR 海杂波模型具有良好的一致性和鲁棒性，同时有以下结论：

(1) 洋流和电离层等效反射面在垂直向做匀速运动都可以引起的海杂波多普勒偏移。但两者又有所区别，洋流对一阶海杂波有作用，而电离层等效反射面的运动对包含一阶海杂波在内的整个海杂波均有作用。

(2) 电离层等效反射面在垂直向的运动和多径的情况均可以引起海杂波多普勒谱峰分裂，整体上看，多普勒谱可以视为若干子海杂波多普勒谱的叠加。但两者又有所区别，与电离层等效反射面在垂直向运动对应的若干子海杂波多普勒谱具有极强的相似性，因为它们仅是一个海面分辨单元的后向散射信号经剧烈运动的电离层调制的结果，但与多径对应的若干子海杂波多普勒谱是不同海面分辨单元的后向散射信号经不同电离层调制的结果。相比之下，由于多径现象中子多普勒谱对应的海况、电离层状况均不同，所以多普勒谱更加复杂多变。

(3) 受电离层等效反射面垂直向匀速运动或受洋流影响时，一阶和二阶海杂波的多普勒频率范围

的大小不变,但在海杂波多普勒谱频率偏移、谱峰展宽、分裂以及多径现象中,均有所展宽。

子等效面模型的提出,使得电离层对 OTHR 信号的频谱调制层面上有了方便简洁的数学描述,所得的修正 OTHR 海杂波模型,对 OTHR 海态监测、海面低可探测舰船目标检测等领域的理论研究和工程应用都具有重要意义。本文未讨论电离层对 OTHR 信号幅度的调制,如何从时域、空域的角度综合考虑电离层中的电子浓度模型,利用电磁场和统计的理论方法,给出随时间、空间变化的 HF 信号衰减模型,有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] CROMBIE D. Doppler spectrum of sea echo at 13.5 MHz[J]. *Nature*, 1955, 175(4): 681-682. doi: 10.1038/175681a0.
- [2] BARRICK D. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1972, 20(1): 2-10. doi: 10.1109/TAP.1972.1140123.
- [3] BARRICK D. Remote sensing of sea state by radar[C]. *IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment*, Rhode Island, USA, 1972: 186-192. doi: 10.1109/OCEANS.1972.1161190.
- [4] HISAKI Y and TOKUDA M. "VHF and HF sea echo Doppler spectrum for a finite illuminated area"[J]. *Radio Science*, 2001, 36(3): 425-440. doi: 10.1029/2000RS002343.
- [5] GILL E, HUANG W, and WALSH J. On the development of a second-order bistatic radar cross section of the ocean surface: A high-frequency result for a finite scattering patch [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(4): 740-750. doi: 10.1109/JOE.2006.886228.
- [6] WALSH J, ZHANG J, and GILL E. High-frequency radar cross section of the ocean surface for an FMCW waveform[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(4): 615-626. doi: 10.1109/JOE.2011.2161706.
- [7] 刘玉鑫. 高频地波雷达海面风场反演研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2015: 7-20.
LIU Y X. Experimental research on the inversion of wind fields over the sea with HF radar[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2015: 7-20.
- [8] 蔡文涵. 船载 HFSWR 海杂波截面积方程研究与仿真[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2015: 6-42.
CAI W H. A study and simulation of the sea clutter high-frequency radar cross sections for a moving platform[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2015: 6-42.
- [9] 丁峰, 李吉宁, 杨龙泉, 等. 高频天/地波雷达海面风向、洋流反演试验研究[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(4): 755-759. doi: 10.13443/j.cjors.2015091001.
DING F, LI J N, YANG L Q, *et al.* The experimental research on remote the wind direct and radial current in HF hybrid sky-surface wave radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(4): 755-759. doi: 10.13443/j.cjors.2015091001.
- [10] HOU C Y, KE G, and FU Y L. The sky-wave radar detection performance computing based on the dynamic ionospheric model[J]. *Neurocomputing*, 2015, 151, 1305-1315. doi: 10.1016/j.neucom.2014.10.073.
- [11] BILITZA D. International reference ionosphere 2000: Examples of improvements and new features[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(3): 757-767. doi: 10.1016/S0273-1177(03)00020-6.
- [12] 蔚娜, 柳文, 鲁转侠, 等. F₁ 层未充分发展时的电离层剖面反演[J]. *地球物理学报*, 2016: 59(3): 778-790. doi: 10.6038/cjg20160302.
WEI N, LIU W, LU Z X, *et al.* The electron density profile inversion for incompletely developed case of F₁ layer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016: 59(3): 778-790. doi: 10.6038/cjg20160302.
- [13] 牛瑞朝, 郭承军, 张奕然. 顾及二阶项影响的电离层延迟模型研究[J]. *计算机工程*, 2016: 42(1): 300-303. doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.01.053.
NIU R C, GUO C J, and ZHANG Y R. Study of ionospheric delay model considering second-order effects[J]. *Computer Engineering*, 2016: 42(1): 300-303. doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.01.053.
- [14] BAKER D and LAMBERT S. Range estimation for SSL HFDF system by means of a multi-quasi parabolic ionosphere model[J]. *IEE Proceedings H-Microwaves, Antennas and Propagation*, 1989, 136(2): 120-125. doi: 10.1049/ip-h-2.1989.0022.
- [15] 冯静, 倪彬彬, 赵正予, 等. 利用高频天波返回散射反演电离层水平不均匀结构[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3135-3147. doi: 10.6038/cjg20160901.
FENG J, NI B B, ZHAO Z Y, *et al.* Reconstruction of horizontally-inhomogeneous ionospheric structure using HF skywave backscattering ionograms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(9): 3135-3147. doi: 10.6038/cjg20160901.
- [16] 张佳智. 混合传播模式下目标定位修正方法研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2016: 8-18
ZHANG J Z. Research on target location correction methods under the mixes propagation mode[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2016: 8-18.
- [17] DYSON P and BENNETT J. A model of the vertical distribution of the electron concentration in the ionosphere and its application to oblique propagation studies[J]. *Journal of Atmospheric & Terrestrial Physics*, 1988, 50: 251-262. doi: 10.1016/0021-9169(88)90074-8.

- [18] MARESCA J and BARNUM J. Theoretical limitation of the sea on the detection of low Doppler targets by over-the-horizon radar[J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1982, 30(5): 837-845. doi: 10.1109/TAP.1982.1142910.
- [19] 罗欢, 陈建文. 天波超视距雷达电离层相位污染典型校正方法综合性能评估[J]. *宇航学报*, 2013, 34(2): 262-269. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.02.016.
- LUO H and CHEN J W. Performance evaluation of ionospheric phase contamination correction approaches for over-the-horizon radar[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(2): 262-269. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.02.016.
- [20] 游伟, 何子述, 陈绪元, 等. 基于三次相位建模的天波雷达污染校正[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(5): 875-880. doi: 10.13443/j.ejors.2015.05.016.
- YOU W, HE Z S, CHEN X Y, *et al.* Skywave radar decontamination based on the cubic phase model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(5): 875-880. doi: 10.13443/j.ejors.2015.05.016.
- [21] 马宏伟. 高频雷达海杂波特性研究与仿真分析[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2011: 10-12.
- MA H W. Research and simulation analysis for sea cluster character of high frequency radar[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2011: 10-12.
- 关泽文: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为天波超视距雷达信号处理研究.
- 陈建文: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 从事天波超视距雷达信号处理、机载预警雷达信号处理、阵列信号处理等研究.
- 鲍 拯: 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 从事天波超视距雷达信号处理、阵列信号处理等研究.