

文章编号 1004-924X(2018)12-2909-08

主动遥感探测海底可燃冰的正演研究

唐远河¹, 王浩轩^{1*}, 刘青松², 李存霞¹, 于涛²

(1. 西安理工大学理学院物理系, 陕西西安 710048;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119)

摘要: 本文提出利用光学成像干涉技术主动遥感探测可燃冰的温度、压强、浓度物理量。通过光纤将海面上波长为 1.65 μm 的激光传输到海底, 激发海底可燃冰, 将 CH_4 发射的 1.65 μm 附近相距很近的 10 条谱线用光纤收集传回到海面上, 经过成像干涉系统, 在 CCD 相机上得到 5 条成像干涉条纹, 选择两条相邻干涉条纹的灰度值, 利用“转动谱线测温法”和洛伦兹线型即可获得海底可燃冰 CH_4 的温度、压强、浓度等参量。实验得出 CH_4 的正演成像干涉图, 并得到 CCD 上的电子计数 1.68×10^5 远远大于拟用 CCD 噪声 400e, 系统的最大信噪比为 291, 窄带干涉滤光片可在 16° 视场内区分 CH_4 的 10 条目标谱线, CH_4 的温度和浓度探测精度分别为 1 K 和 3%。研究表明, 该成像干涉系统可用于遥感探测海底可燃冰。

关键词: 光学遥感; 可燃冰; 温度; 浓度; 压强

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.2909

Forward measurement of submarine gas hydrates by active remote sensing technology

TANG Yuan-he¹, WANG Hao-xuan^{1*}, LIU Qing-song², LI Cun-xia¹, YU Tao²

(1. Department of Physics, College of Sciences, Xian University of Technology, Xian 710048, China;

2. Xian Institute of Optics and Precision Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Xian 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: 465510221@qq.com

Abstract: In this paper, an optical imaging interferometry system was proposed for the accurate detection of the temperature, pressure, and concentration of gas hydrates. As part of this system, laser light with a wavelength of 1.65 μm , was transmitted across the sea surface through a fiber to excite gas hydrates on the sea bed. Ten spectral lines close to the 1.65 μm waves emitted by CH_4 were collected and transmitted to the sea surface through another fiber. Five image interference fringes for CH_4 were obtained on a Charge-Coupled Device (CCD) camera. Using the "rotation line temperature measurement method" and the Lorentzian line profile, and by selecting the gray values of two adjacent interference fringes, the temperature, pressure, and concentration of the CH_4 gas hydrates on the sea bed could be obtained. The forward results of the imaging interferogram for CH_4 show that the elec-

收稿日期: 2018-06-21; **修订日期:** 2018-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 611675165); 中科院西安光机所开放基金资助项目(No. LSIT201714D); 西安理工大学特色项目资助课题(No. 2015TS012)

tron count on the CCD is 1.68×10^5 , much larger than which results in the noise value of 400e. The maximum signal-to-noise ratio of the system is 291. The narrowband interference filter could distinguish 10 spectral lines in the waves emitted by CH_4 within the 16° field of view. The measuring precision of the CH_4 temperature and concentration values are 1 K and 3%, respectively. This study shows that an imaging interference system can be used in the remote sensing of seabed gas hydrates.

Key words: optical remote sensing; gas hydrate; temperature; concentration; pressure

1 引言

21 世纪能源问题成为全世界关注的焦点。煤、石油、天然气等常规能源已远远达不到社会发展的需要,科技人员正在找寻新型能源,近年来世界大国开始聚焦海底和冻土中的天然气水合物可燃冰这种储量大的清洁能源。现已探明的可燃冰储量相当于全球石油、天然气和煤炭总量的 2 倍以上,约为剩余天然气储量的 128 倍。可燃冰的开发利用,能使人类的燃料使用时间延长数百年。

鉴于可燃冰存在的极限环境,探测开发非常不易。海底模拟反射层是识别可燃冰的重要标志之一^[1],人们利用海底地震剖面与海底平行的弱反射层斜交的强异常反射来判定可燃冰的存在。海洋电磁探测技术^[2]将大地电磁测深法用于可燃冰探测,可控源电磁法^[3]结合地震资料对可燃冰矿藏的分布、性质和形态进行分析,利用核磁共振波谱法来研究甲烷、乙烷、丙烷及异丁烷水合物的核磁共振谱图,用于确定水合物的结构及分子组成、笼占有率等信息^[4]。目前,多个项目使用钻井船的保压取芯器开展了多种海底可燃冰的探测,例如,深海钻探计划使用的保压取样筒^[5]、大洋钻探计划使用保压取芯器,活塞取样器、日本研制的保温保压取样器、欧盟研发保压取样系统^[6]等。光学深海探测主要是利用深海拉曼光谱仪,在原位监测海底化学物质的变化,主要用在热硫化物出口等化学物质聚集区,即时探测化学成分的改变,为人们研究海底资源提供数据支持^[7]。本文利用成像干涉技术,提出了一种光学主动遥感探测海底可燃冰压强、温度、浓度的方法。

2 原理

2.1 探测光路设计

可燃冰主要由 CH_4 和 H_2O 组成。本文通过

Material studio 软件初步计算出结构稳定的可燃冰,如图 1 所示。鉴于 H_2O 与 CH_4 分子之间的作用是范德瓦尔斯力,而 C-H 和 H-O 之间靠库仑力维系,后者比前者大得多,所以只要选择合适的激光光源,将 CH_4 的 C-H 键打开,就可以利用干涉成像的遥感方法来探测可燃冰所在处的温度、压强、浓度等物理量。

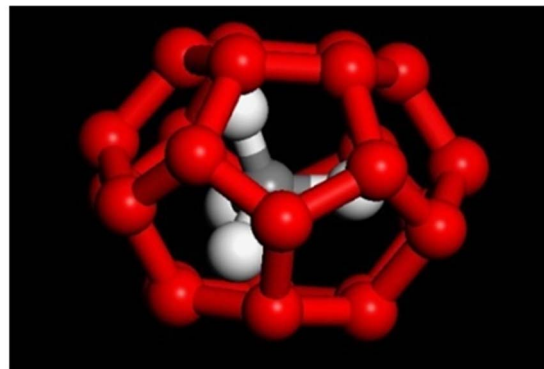


图 1 利用 Material studio 模拟计算的笼状结构可燃冰
Fig. 1 Gas hydrate cage structure calculated by Material studio

本文提出的探测可燃冰中 CH_4 的实验装置如图 2 所示。置于海面上的波长为 $1.65 \mu\text{m}$ 的激光随输入光纤引入海底,作为激发光源。当激发光源照射可燃冰时,C-H 键打开并辐射出中心波长为 $1\ 650.8 \text{ nm}$ 的 10 条谱线 ($1\ 625.3, 1\ 630.0, 1\ 635.4, 1\ 640.3, 1\ 645.5, 1\ 650.8, 1\ 655.1, 1\ 660.9, 1\ 665.2, 1\ 670.2 \text{ nm}$);使用另一根光纤将这些波长的光传输到海面,经扩束器后进入光阑,再经过菲涅尔透镜后,由光阑进入的光被调制为平行光,平行光以不同的离轴角入射法布里-珀罗型窄带滤光片,借助窄带滤光片获取光源同一系中的不同转动谱线形成干涉图,最后光经过镜头在 CCD 的靶面上成像,鉴于滤光片的透过率与谱线波长有关,通过在 CCD 上得到包含目标信息温度信息的成像干涉条纹,获取 CH_4 的

温度、压强和浓度。由于该装置采用激光器作为激发光源,通过人工辐射源激发海底 CH₄,并接收 CH₄ 所产生的辐射光来研究 CH₄ 的成像干涉条纹,所以该实验装置属于主动遥感方式。本文通过探测研究和计算机编程进行可燃冰的正演研究。通过正演模拟判定系统的正确性和可行性,为整套系统的实际探测数据反演做准备。

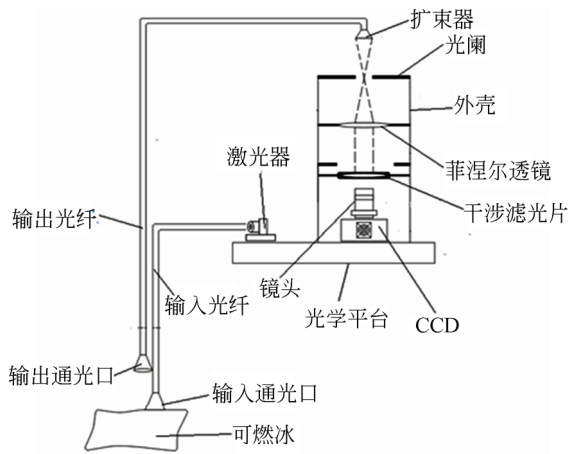


图 2 主动遥测海底可燃冰的装置图

Fig. 2 Installations for active remote sensing detection of undersea gas hydrate

2.2 激发海底可燃冰的光纤照明及透过率

在图 2 所示的装置中,激光通过单模光纤传光激发海底可燃冰。采用光纤传输波长为 1.65 μm 的激光,需要计算船上激光下潜到海底光纤的衰减。光纤传光的衰减公式为:

$$P_{out} / P_{in} = 10^{-\alpha l / 10}, \quad (1)$$

其中: P_{in} 和 P_{out} 分别是进、出光纤的有效功率, α 是光纤的衰减系数, l 是光纤长度。鉴于波长 1.65 μm 处的光纤衰减系数约为 0.3 dB/km,通过式(1)计算出光纤随传光距离的变化,如表 1 所示。这些规律不仅可以作为单模光纤的下潜深度依据,也可作为海面上选择激光光源的依据。例如将光纤绑在“蛟龙号”上,下潜到 7 km 的海底,光能还有海面上的 0.6 倍。鉴于中国南海北部陆坡东沙群岛以东海域发现可燃冰的水深范围为 550~800 m。如果本文提出将光纤引入海下 550 m 为探测目标深度,则光能还有海面上的 0.962 倍,这样的光照强度完全可以满足本文的要求。

表 1 单模光纤传光距离与衰减的关系

Tab. 1 Relationship between transmission distance and attenuation for single mode fiber

L/km	P_{out} / P_{in}
0.1	0.993
0.5	0.966
1	0.933
2	0.870
5	707
7	616

2.3 海水透过率

在主动遥测可燃冰的过程中,由于输出通光口与可燃冰有一定距离,需考虑海水对光纤输出光线的衰减^[8]。海水的吸收系数为:

$$\alpha_b(\lambda) = \alpha_{b,wo}(\lambda) + \alpha_{b,ph}(\lambda) + \alpha_{b,di}(\lambda) + \alpha_{b,og}(\lambda), \quad (2)$$

其中: $\alpha_{b,wo}(\lambda)$ 为水体的吸收, $\alpha_{b,ph}(\lambda)$ 为浮游植物的吸收, $\alpha_{b,di}(\lambda)$ 为非藻类颗粒物的吸收, $\alpha_{b,og}(\lambda)$ 为有色溶解有机物的吸收。同时,由于纯海水小范围的密度波动与非藻类颗粒物,还会对光纤输出光线有散射作用。散射系数 $\alpha_{sc}(\lambda)$ 为:

$$\alpha_{sc}(\lambda) = \alpha_{sc,w}(\lambda) + \alpha_{sc,d}(\lambda). \quad (3)$$

海水吸收系数和散射系数还与水中粒子的分布、大小、密度、温度有关,因此海水的衰减系数极为复杂。通常纯海水对紫外和红外部分表现出强烈的吸收作用,而对短波部分表现出较强的散射作用。目前,对于海水的衰减研究多集中在可见光范围内,少有 1.65 μm 附近的透过率报道。本文所涉及的海水衰减系数取 5 m⁻¹,海水的传输距离为 1 m,由此计算海水的透过率为 0.32。

2.4 探测原理

2.4.1 可燃冰各参量的探测原理

根据光谱学规律,光源的谱线线型有 3 种:高斯线型、洛伦兹线型和佛克脱线型。鉴于用波长为 1.65 μm 的激光激发 CH₄ 所在海底的水气混合物,因此需用洛伦兹线型的 CH₄ 谱线作为本系统探测可燃冰的依据。洛伦兹轮廓谱线的光谱表达式为:

$$B(\sigma) = \frac{\Gamma / 2\pi}{(\sigma - \sigma_0)^2 + \Gamma / 4}, \quad (4)$$

其中: σ 是波数, σ_0 是中心波数, Γ 为碰撞展宽的半高宽,它与压强 P 和温度 T 的关系为:

$$\Gamma = 9.470 \times 10^{18} P \sigma_0^2 \times \sqrt{\frac{2R}{\pi T} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)}, \quad (5)$$

其中: σ_L 是碰撞有效面积, R 为气体普适常数, M_1 和 M_2 分别为 CH_4 和 H_2O 的摩尔质量。

CH_4 是 5 原子分子, 光纤照明后将激发产生振转谱线, 分子转动光谱是分子最低电子态和振动态内的转动能级间电偶跃迁所产生的光谱。当 CH_4 气体达到局域平衡时, 转动谱线的强度与温度有关, 这正是利用“转动谱线测温法”的原因所在。由于不同温度会导致转动跃迁的变化, 从而使得转动跃迁的多条谱线的强度比值有差异, 通过测得的强度比值来推算出 CH_4 所在区域的热平衡温度, 也就是可燃冰所在区域的温度。根据量子力学规律, 当温度为 T_γ 、转动量子数为 L 的能级上的分子数 N_L 满足:

$$N_L \propto (2L+1) \exp[-B_v L(L+1)hc/kT_\gamma]. \quad (6)$$

同一温度 T_γ 下, 不同的转动角量子数 L_1 和 L_2 对应不同的谱线强度, 即:

$$I_1 = (C_\gamma v^4 / Q_\gamma) (2L_1 + 1) \exp[-B_v L_1(L_1 + 1)hc/kT_\gamma], \quad (7)$$

$$I_2 = (C_\gamma v^4 / Q_\gamma) (2L_2 + 1) \exp[-B_v L_2(L_2 + 1)hc/kT_\gamma], \quad (8)$$

其中: v 为振动量子数, $C_\gamma v^4 / Q_\gamma$ 在给定的转动振带后即为常数, h 为普朗克常数, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, T_γ 为热平衡状态温度, $B_v = B_c - \alpha_c(v+1/2)$, 其中 B_c , α_c 为光谱常数, 不同能级其值略有差别, 可从文献中查到。如果取两个转动量子数 L_1 和 L_2 , 式(7)与式(8)相比可得可燃冰温度:

$$T_\gamma = -\frac{B_v hc}{k} [L_1(L_1 + 1) - L_2(L_2 + 1)] \cdot \ln\left[-\frac{I_1(2L_2 + 1)}{I_2(2L_1 + 1)}\right]. \quad (9)$$

式(9)即为“转动谱线测温法”理论导出 CH_4 温度的表达式。测到 CH_4 温度后, 通过式(5)的谱线宽度获取可燃冰的压强。

在探测可燃冰中 CH_4 的浓度时, 首先将可燃冰辐射看作灰体辐射, 根据基尔霍夫定律与普朗克函数, 可燃冰被激光激发后可用灰体辐射亮度表示:

$$Z(\lambda, T, P) = (1 - e^{-K_{ab}(\lambda, T, P)d}) \cdot \frac{2c^2 h}{\lambda^5} (\exp^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)^{-1}, \quad (10)$$

其中: Z 为辐射亮度, $K_{ab}(\lambda, T, P)$ 为吸收系数, d 为吸收光程。吸收系数 $K_{ab}(\lambda, T, P)$ 可以用吸收截面和分子数密度来表示:

$$K_{ab}(\lambda, T, P) = \eta(\lambda, T, P) \cdot N, \quad (11)$$

其中: η 为吸收截面, N 为分子数密度。

某温度 T 和压强 P 下, CH_4 分子吸收截面可用谱线强度 $S(T)$ 和线型函数 $B(\lambda, T, P)$ 表示:

$$\eta(\lambda, T, P) = S(T) \cdot B(\lambda, T, P), \quad (12)$$

其中 $B(\lambda, T, P)$ 就是式(4)所示的洛伦兹线型函数。根据式(10)~式(12)可得可燃冰中 CH_4 的分子数密度表达式:

$$N = I_n \left[\frac{Z(\lambda, T, P) \exp^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \cdot \lambda^5}{2c^2 h} \right] \cdot [S(T) \cdot B(\lambda, T, P)]^{-1}, \quad (13)$$

2.4.2 窄带滤光片实现转动谱线测温

图 2 中的关键器件是法布里-珀罗窄带滤光片 FPI, 用它实现“转动谱线测温法”。FPI 不仅能获得高纯度单色光, 用在成像系统时, 考虑 3 个光学参数(滤光片的中心波长、透过半高宽、峰值透过率)对光线入射角度的依赖性, 随着入射角度的增大, 还会导致中心波长向短波方向移动, 形成干涉条纹, 峰值透过率会随之下降, 具体关系式如下^[9]:

$$\tau_\gamma(\lambda, \theta) = \frac{\tau_c}{1 + \left[\frac{2(\lambda - \lambda_c)}{\Delta\lambda_c} + \frac{\lambda}{\Delta\lambda_c} \frac{\theta^2}{n_c^2} \right]^2}, \quad (14)$$

其中: θ 为光束入射角, n_c 为滤光片的有效折射率, $\Delta\lambda_c$ 为中心波长透过半高宽, τ_c 是峰值透过率, $\Delta\lambda$ 是透过半高宽, λ_c 是滤光片的中心波长。由式(14)可以标定入射光角度与滤光片透过率的关系。另外, 窄带滤光片的透过率较低, 就意味着有相当一部分光会被反射回来, 而这一部分光如果在同轴光学系统中来回反射的话, 会产生有害的多光束干涉现象, 引起成像质量下降。在本文的探测仪器中, 通过使干涉仪或滤光片后的成像系统倾斜一定的角度来消除这一影响。窄带滤光片的入射光角度与透过谱线波长的关系如下^[10]:

$$\sin \theta = n_c \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (15)$$

CH_4 在 1.65 μm 附近的 10 条波长有一定差距, 通过式(15)在 CCD 上呈现不同的干涉条纹, 通过任意两条干涉条纹的强度比值, 即可获取 CH_4 的温度。

图 3 是在 HITRAN08 数据库提取的 CH_4 带在 275 K, 55 atm 时的谱线, 其中相邻一对 PQ 谱线间隔太窄, 光学滤光片无法实现如此窄的带宽^[11], 因此, 希望能够将一对 PQ 谱线滤出, 这样

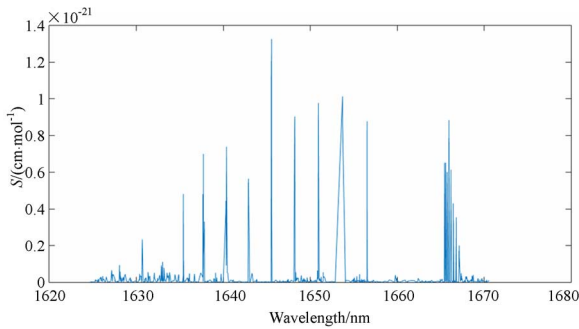


图 3 HITRAN08 数据库中提取的 CH₄ 的 1 650.8 nm 附近的 10 条谱线强度
Fig. 3 Ten spectral line intensities near 1 650.8 nm extracted by CH₄ from HITRAN08 database

就需要窄带滤光片的带宽(Full Width Half Maximum, FWHM)在 4 nm 内。从式(14)中可以看出中心波长随入射角的增大而减小,因此需要选择波长最长的谱线作为中心波长,即 1 650.8 nm。根据以上分析,窄带滤光片的中心波长 $\lambda_c = 1\ 650.8\ \text{nm}$, FWHM=4 nm, 峰值透过率=0.35, 才能分辨探测 1 650.8 nm 附近的 10 条谱线,可见本系统的视场角为 16°。

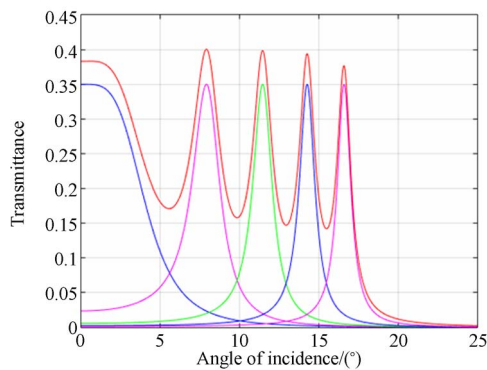


图 4 FPI 滤光片透过率随不同入射角的廓线
Fig. 4 Transmittance profiles of FPI filter with different incident angles

2.4.3 系统整体透过率

假设可燃冰的辐射强度为 I_0 , 通过海水进入输出光纤通过口时的光强为 I_1 , 经过光纤到达图 2 所示的扩束器时光强为 I_2 , 通过菲涅尔透镜后的光强为 I_3 , 通过滤光片后的光强为 I_4 。2.2 与 2.3 节中给出光纤和海水的透射率分别为 0.962, 0.32。当菲涅尔透镜的接收半宽为 55 mm 时, 透过率为 0.92^[12]。滤光片的峰值通过率为 0.35。

则系统整体透过率为 $I_4 = 0.962 \times 0.32 \times 0.92 \times 0.35 \times I_0 = 0.10 I_0$ 。

2.4.4 红外 CCD 的响应

图 2 所示系统需成像在 1.65 μm 波段附近, 这里拟用美国 Princeton Instruments 的红外 CCD 探测器相关参数模拟探测可燃冰, 该红外 CCD 探测器的总像素为 320 \times 320, 单像素为 30 $\mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$, 1.65 μm 附近的量子效率为 0.63, 数模转换为 61 electrons/count, 读出噪声为 400e, 满阱电荷为 $1 \times 10^6\ \text{e}$ 。因为 CCD 的仪器响应度对探测系统是一个很重要的参数, 其表示如下^[13]:

$$R = \frac{A\Omega q\tau}{4\pi C_{\text{ADU}}}, \quad (16)$$

其中: A 是仪器入射光瞳面积, Ω 是单像素立体角, q 是量子效率, τ 是整体光学系统的透过率, C_{ADU} 是数模转换因子。

3 CH₄ 信息的正演研究

图 2 所示系统的正演就是在计算机上对研究内容进行物理建模, 考虑激光器、光纤传输公式(1)、CH₄ 吸收和散射规律(式(2)和(3))、FPI 随入射角变化(式(14)和(15))、面阵 CCD 探测器响应(式(16))及圆环状干涉条纹等诸多因素, 得到一个正演公式。正演公式就是 CCD 上第 m 行第 n 列像素上的观测信号电子计数值^[13], 即:

$$N_{m,n,k} = I_{T-\lambda_1} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n} \cdot t + I_{T-\lambda_2} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n} \cdot t + I_{T-\lambda_{10}} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n} \cdot t + I_{b(N_{\text{noise}})} = t \sum_{i=1}^{10} I_{T-\lambda_i} \cdot \tau_{\text{trans}} \cdot F_{f(m,n)} \cdot R_{m,n}. \quad (17)$$

其中: $I_{T-\lambda_i}$ 是同一温度下不同波长的光强值, 以光子计数为单位; τ_{trans} 为系统透过率, 即激光器发出的光经过图 2 系统到达 CCD 接收器之间的光强透过率; F_f 是滤光片透过率; $R_{m,n}$ 为 (m, n) 像素响应度; t 为 CCD 的曝光时间。从式(17)可以看出, CCD 上某处的值是由 10 条谱线所对应的值叠加而成。

将 CCD 上第 m 行 n 列的像素点与 CCD 中心距离 $r(m, n)$ 和图 2 所示镜头焦距满足的关系, 及将图 2 所示各分系统的各变量值代入式(17), 便能获得 CCD 上某一像素的电子计数值, 再利用计算机编程对 m 和 n 做循环赋值, 便可获得整幅

模拟图像,如图 5 所示。由图 5 可见,CCD 上可知的最大电子计数为 1.68×10^5 ,远大于拟用 CCD 的噪声 $400e$ 。图中所用参数如下:温度

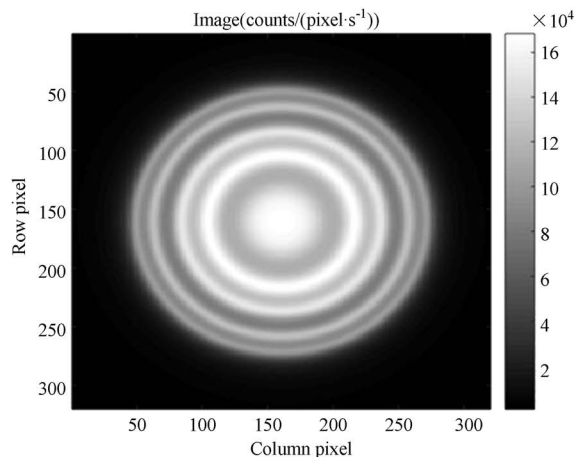


图 5 遥感探测海底可燃冰的正演结果

Fig. 5 Forward results of gas hydrate using proposed active remote sensing detection system

已知阵列探测器成像的信噪比表达式为:

$$SNR = \frac{dbt}{\sqrt{dbt + bN_D t + \eta_R}}, \quad (18)$$

其中: d 表示每个像素每秒接收到的电子数, b 为一个 bin 中像素的个数, t 为曝光时间, N_D 为暗电流, η_R 为读出噪声。根据图 5 可知,最大电子计数为 1.68×10^5 , $b=1$, $t=300$, $\eta_R=400$,带入式(18)中可得,信噪比以第 160 列为中心呈对称分布,与正演干涉图的剖面分布趋势一致,最大信噪比为 294。

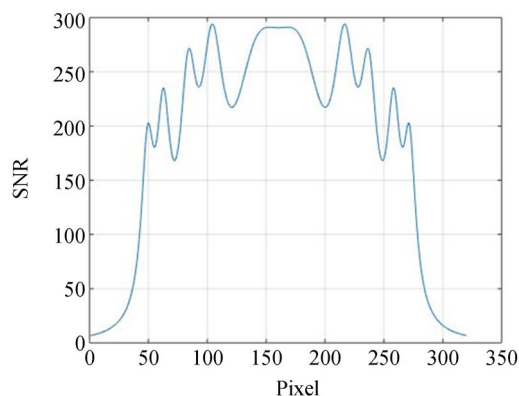
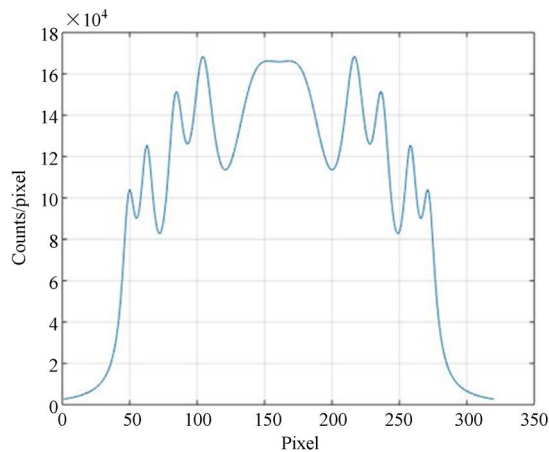


图 6 遥感探测系统信噪比

Fig. 6 Signal to noise ratio of remote sensing detection system

通过上述正演过程获得的电子计数来判定是否达到实际购买 CCD 的探测阈值、系统的信噪比

$T=275$ K,波长 $\lambda=1\ 650.8$ nm,曝光时间 $t=300$ s,系统透过率 $\tau_{trans}=0.1$,CCD 的量子效率 $\eta=0.63$ 。



(见图 6)、响应度、调制传递函数等信息。通过正演模拟,判定系统的正确性和可行性,为整套系统的实际探测数据反演做准备。遥感探测的反演需要与正演相结合来研究。实际探测得到的数据需要与正演数据进行比较,取最小二乘法的差值为 0,则正演的结果就是反演探测的值。

4 探测精度分析

4.1 可燃冰温度的探测精度

从成像干涉图的正演结果来分析海底可燃冰的温度探测精度,如果发现 CH_4 的温度改变,导致 CCD 上能探测得到的电子计数变化,就可以判定出该装置的温度探测精度。利用 MATLAB 编程,温度变化范围为 1 K,即 $\Delta T=1$ K,观察正演图像的变化。从图 7 可见,当温度变化 1 K 时,正演图像仍能较为清晰分辨出不同温度下的强度值,CCD 上电子计数变化约为 1.8×10^4 ,远大于拟用 CCD 的读出噪声 $400e$,这就可认为本系统的测温精度可达 1 K。

4.2 可燃冰中 CH_4 浓度的探测精度

在探测过程中, CH_4 浓度变化也会导致辐射强度变化,这种变化体现在 CCD 上所得干涉图的可区分的电子计数上。利用 MATLAB 编程,在可燃冰所处环境压强与温度无明显变化的情况

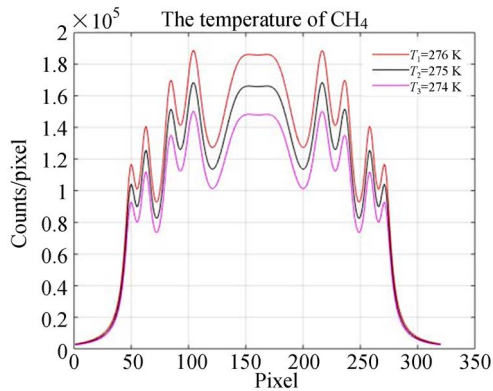


图 7 温度间隔为 1 K 的正演结果

Fig. 7 Forward result of gas hydrate with temperature interval of 1 K

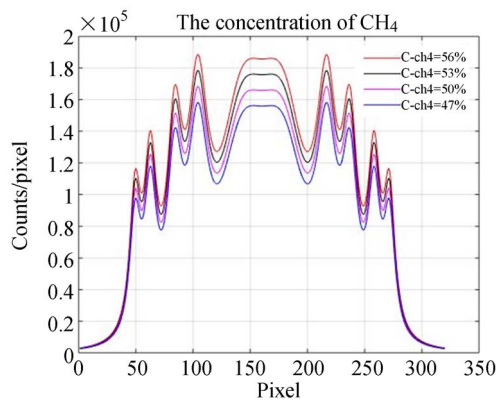


图 8 浓度变化量为 3% 时的正演结果

Fig. 8 Forward result of gas hydrate with concentration interval of 3%

下,由图 8 可见,其浓度变化量为 3% 时,CCD 电子计数的变化量约为 0.9×10^4 ,远大于读出噪声 $400e$,也就是说本系统对 CH_4 的浓度探测精度为 3%。

5 结 论

可燃冰的储量大、燃烧效率高,是当今解决能源短缺的有效途径之一。本文设计了一种主动成像干涉系统用于探测海底可燃冰的温度、压强与浓度等参量,通过光纤传输、洛伦兹 CH_4 发光模型、法布里-珀罗型滤光片、CCD 及其响应等模型,得到该探测系统的正演方程。利用 MATLAB 对正演方程模型编程,得到探测系统的正演干涉图。正演结果表明,拟用 FPI 可以在 16° 角视场内将 CH_4 谱线的 10 条目标谱线的干涉条纹区分开来,得到 CCD 上的 5 条干涉条纹,干涉条纹的最大电子计数值为 1.68×10^5 ,最大信噪比为 291,测温精度为 1 K, CH_4 浓度探测精度为 3%,由此表明本文所述探测系统可用于海底可燃冰的探测。

参考文献:

- [1] MILKOV A. V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(1-2):29-42.
- [2] 盛堰,邓明,魏文博,等. 海洋电磁探测技术发展现状及探测天然气水合物的可行性[J]. *工程地球物理学报*, 2012,9(2):127-133.
SHENG Y, DENG M, WEI W B, et al.. Development status of marine electromagnetic detection technology and feasibility of detecting natural gas hydrate [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2012,9(2):127-133. (in Chinese)
- [3] HESTHAMMER J, STEFATOS A, BOULAENKO M, et al.. CSEM technology as a value driver for hydrocarbon exploration[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2010, 27(9):1872-1884.
- [4] KVAMME B, GRAUE A, ASPENES E, et al.. Kinetics of solid hydrate formation by carbon dioxide; Phase field theory of hydrate nucleation and magnetic resonance imaging[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2004, 6(9):2327-2334.
- [5] 戴金岭,许俊良,宋淑玲,等. 天然气水合物钻探取样技术现状与实施研究[J]. *西部探矿工程*, 2011, 23(1):89-92.
DAI J L, XU J L, SONG SH L, et al.. Research on current situation and implementation of natural gas hydrate drilling sampling technology[J]. *West-china Exploration Engineering*, 2011, 23(1):89-92. (in Chinese)
- [6] 张志冰. 海水中甲烷浓度原位地球化学探测系统的研发与应用[D]. 北京:中国地质大学,2013.
ZHANG ZH B. *Development and Application of In Situ Geochemical Detection System for Methane*

- Concentration in Seawater[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)
- [7] 刘庆省, 郭金家, 杨德旺, 等. 小型高灵敏度水下拉曼光谱系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 8-13.
LIU Q SH, GUO J J, YANG D W, *et al.*. Small high sensitivity water pullman spectroscopy system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 8-13. (in Chinese)
- [8] 葛城显, 吴振森, 白靖, 等. 微粗糙光学表面与多个镶嵌粒子差值散射场特性[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 268-275.
GE CH X, WU ZH S, BAI J, *et al.*. Difference field scattering properties between multiple inlaid redundant particles and slightly rough optical surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 268-275. (in Chinese)
- [9] 俞侃, 刘文, 黄德修, 等. 角度调谐滤光片的膜系优化设计算法[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1287-1291.
SHU K, LIU W, HUANG D X, *et al.*. Optimum design algorithm for angle tuning filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(9): 1287-1291. (in Chinese)
- [10] 顾培夫, 李海峰, 章岳光, 等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进[J]. 光学学报, 2003, 23(3): 377-380.
GU P F, LI H F, ZHANG Y G, *et al.*. Properties of wavelength division multiplexed thin film filters for incidence of incidence and improvements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 377-380. (in Chinese)
- [11] 魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 884-890.
WEI H L, DAI C M. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 884-890. (in Chinese)
- [12] 马兴龙, 郑宏飞. 菲涅尔透镜的透射率优化方法[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(3): 482-487.
MA X L, ZHENG H F. An optimization method for Fresnel lens transmittance[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(3): 482-487. (in Chinese)
- [13] 唐远河, 王淑华, 崔进, 等. 被动遥测矿井 CO 气体温度及浓度的正演研究[J]. 物理学报, 2016, 65(18): 184201.
TANG Y H, WANG SH H, CUI J, *et al.*. Research on forward measurement of CO gas temperature and concentration in passive remote measurement mine[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(18): 184201. (in Chinese)

作者简介:



唐远河(1965—),女,四川蓬溪人,教授,博士生导师,1988年和1991年于陕西师范大学物理系分别获得学士、硕士学位,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事被动遥感探测大气风场、强光选通成像、微光增强成像和太阳光直接照明等技术的研究。E-mail: ltp1801@163.com



王浩轩(1994—),男,陕西西安人,硕士研究生,2016年于西安科技大学获得学士学位,主要从事遥感探测方面的研究。E-mail: 465510221@qq.com