

基于多挡增益的自适应光谱成像法研究

金鹏飞^{1,2,3}, 汤瑜瑜^{1,2*}, 危峻^{1,2}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为满足海洋水色遥感器大动态范围监测的需求,以推扫式成像光谱仪为例,提出一种基于多挡增益的自适应成像方法。从遥感器动态范围与信噪比的矛盾分析出发,阐述了逐像元自适应读取方法的优势,给出相应的系统设计。由海洋成像场景确定满阱电荷限制,并利用系统信噪比及动态范围约束,仿真分析得出最优挡位个数及比例。结果表明,当增益挡位为 4 挡,满阱电荷分别为 2.5 Me⁻(超低增益)、500 ke⁻(低增益)、100 ke⁻(中等增益)、20 ke⁻(高增益)时,成像效果最佳。基于此设置,光谱成像系统总动态范围可达 116 dB,典型入射辐亮度下各通道平均信噪比为 767.37。同时,利用中等分辨率大气辐射传输模型(MODTRAN)对该成像方法进行了验证,除云层的第 10 通道出现饱和外,其余均满足动态范围和信噪比要求。

关键词 成像系统; 海洋遥感; 光谱成像; 动态范围; 自适应; 多挡增益

中图分类号 P236; TN386.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1111001

Adaptive Spectral Imaging Based on a Multiple-Gain Imaging Method

Jin Pengfei^{1,2,3}, Tang Yuyu^{1,2*}, Wei Jun^{1,2}

¹Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, an adaptive multiple-gain imaging method was proposed based on a pushbroom imaging spectrometer to meet the demands of high dynamic range (DR) monitoring using an ocean color remote sensor. Further, the advantage of the pixel-by-pixel adaptive readout method was explained by analyzing the differences in case of DR and the signal-to-noise ratio (SNR), and the corresponding system design was presented. The limit of full well charge was determined based on the ocean imaging scene, and the optimal number and proportion of gains were obtained via system simulation based on the constraints associated with respect to SNR and DR. The results denote that the optimal imaging effect can be obtained when the number of gains is four and the full well charges are 2.5 Me⁻ (ultra-low gain), 500 ke⁻ (low gain), 100 ke⁻ (medium gain), and 20 ke⁻ (high gain). Based on this setting, the total DR of the spectral imaging system can become 116 dB; the average SNR of each channel under typical radiance becomes 767.37. Furthermore, the medium-resolution atmospheric radiation transfer model was used to verify this imaging mode. The conditions with respect to the channels meet the requirements of DR and SNR, except for the 10th channel of the cloud that appears to be out of saturation.

Key words imaging system; ocean remote sensing; spectral imaging; dynamic range; adaption; multiple-gain

OCIS codes 110.3055; 110.4190; 120.0280; 230.0040

1 引 言

经过近几十年的发展,海洋遥感技术在环境监测、海洋资源勘探等广阔领域,以其独特的宏观性、

时序性等优势,极大地促进了地球科学的发展。中等分辨率成像光谱仪是海洋遥感光学载荷中的重要组成部分,具有幅宽大、谱段窄、高信噪比(SNR, R_{SN})等特点,能够很好地满足海洋水色要素的反演

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-02-27; 录用日期: 2020-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(11573049)

* E-mail: tangyuyu@mail.sitp.ac.cn

需求。美国的中分辨率成像光谱仪(MODIS)、欧空局的海陆颜色仪(OLCI)以及我国天宫二号空间站上搭载的宽波段成像光谱仪都属于此类光学载荷。自然界中水体反射率较低,大洋一类水体的反射率大都不足5%。相对于水体,海岸带及云层等亮目标具有很高的反射率^[1]。光谱成像时为满足叶绿素等水色要素的反演,需尽可能提高系统信噪比。但这种方案容易出现动态范围不足,例如MODIS在海岸带及较高反射率的二类水体区域出现探测饱和,无法从中得到有效数据^[2]。随着监测需求的提高,高灵敏度大动态范围的光谱成像方法研究对于我国后续海洋载荷发展具有重要意义。

关于遥感器动态范围和信噪比的研究,国内外学者开展了大量工作。如王德江等^[3]分析了模拟增益对于电荷耦合器件(CCD)的动态范围及信噪比的影响,结果表明模拟增益提高1~2倍,可明显改善系统信噪比并获得较大的动态范围;郎均慰等^[4]根据系统模型分析了动态范围与信噪比之间的制约关系,选择以适当削减动态范围的方法提高信噪比;孙武等^[5]采用双积分级数成像技术,通过一次推扫获得两幅曝光量不同的图像后进行图像融合,以提高动态范围;张元涛等^[6]基于科学级互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的数字域延迟积分技术(TDI)实现高分辨率大动态范围的空间微光成像。在轨运行的载荷中,美国的可见光红外成像辐射仪(VIIRS)为兼顾晨昏区和日照区的大动态范围成像,DNB(Day/Night Band)通道(0.7 μm)采用了三挡增益的设计^[7]。这些方法的不足之处是,面对复杂多变的成像场景,很难满足高灵敏度大动态范围的监测需求,仍然未能实现逐像元自适应光谱成像。

本文在海洋三号中分辨率成像光谱仪的研制背景下,通过对系统成像模型的仿真分析,确定最优增益挡位及比例,提出基于多挡增益的自适应光谱成像方法。

2 基本原理

2.1 动态范围与信噪比的分析

系统单帧成像的前端光学系统参数确定,其动态范围仅仅取决于探测器及信息处理电路性能。动态范围利用信号电子数可表示为

$$R_D = \frac{N_{FW}}{N_{noise}}, \quad (1)$$

式中: N_{FW} 为探测器满阱电荷; N_{noise} 为探测器及信息处理电路的噪声等效电子数, $N_{noise} = \frac{D_{noise}}{G_{total}}$, G_{total}

为总的转换增益, D_{noise} 为噪声对应的数字量化输出; R_D 为动态范围。因而,提升动态范围有两个途径,一是增大探测器满阱容量,二是降低系统最小噪声。假设模数转换器(ADC)输出数字量化值为 D_{output} ,系统信号电子数为 N_{signal} ,则信号转换关系为

$$D_{output} = G_{total} \cdot N_{signal}, \quad (2)$$

通常为使探测信号值低于输出饱和限制,满阱电荷应该满足

$$N_{FW} \leq \frac{D_{sat}}{G_{total}}, \quad (3)$$

其中, D_{sat} 为饱和量化输出值。对于某一固定ADC,量化位数确定,故唯有减小增益 G_{total} ,才能增大系统的满阱电荷容量。另一方面,为了使系统能够有效监测到场景中的弱信号目标,需要提升系统的灵敏度,即对于较低的人瞳辐亮度,需要系统仍然能够达到信噪比要求。假设在最小辐亮度输入条件下信噪比要大于1,忽略探测器暗电流影响,则最小信号电子数 N_{min} 应满足

$$\begin{cases} R_{SN} = \frac{N_{min}}{\sqrt{N_{min} + N_{noise}^2}} \geq 1 \\ \sqrt{N_{min}^2 - N_{min}} \geq N_{noise} \end{cases} \quad (4)$$

总转换增益 G_{total} 的本质是光电子在某一转换电容下电压发生变化,再由ADC根据不同输入电压输出数字信号。实际上当探测器选型及工作状态明确后,最大电压以及噪声电压水平是几乎不变的。CMOS工艺下的电压上限为1~2 V,噪声电压极限为150~500 μV,因而ADC转换前的动态范围为72 dB~82 dB。所以噪声对应的数字量化输出 D_{noise} 也是确定的,要想提高灵敏度,就必须增大 G_{total} 。

同时,根据(2)式可知,提高增益会等比例压缩探测器的满阱电荷容量。因此,通过系统单帧成像模型的分析,我们可以得出两点结论:一是系统动态范围与灵敏度(信噪比)之间存在直接矛盾;二是单次信号读出的动态范围取决于电压摆幅和ADC量化位数,为二者的较小值。

2.2 自适应成像方法

推扫式成像光谱仪的工作原理是:通过飞行平台的移动,面阵探测器在一个方向完成空间扫描,在另一个方向完成光谱扫描。这种方式受限于轨道高度和空间分辨率,成像系统与场景之间存在高速运动,多次曝光和光强调制的成像方法通常难以应用^[8]。结合推扫式成像的特点及单帧成像模型的分

析,可以发现多增益自适应读取具有较大的优越性。利用这种方式,既可以保证微弱场景下的信噪比,又可以满足高亮目标的无饱和监测。

多挡增益自适应成像的大致流程如图 1 所示。成像开始后,由现场可编程门阵列(FPGA)向探测器注入积分时间、通道行数等参数,并读出暗信号帧[用于最高增益挡下的相关双采样(CDS)]。在主光

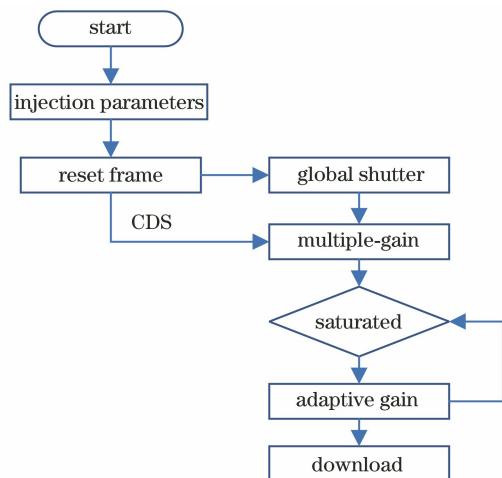


图 1 多增益自适应成像流程图

Fig. 1 Flowchart of adaptive imaging based on multiple-gain

学系统及光栅作用下,成像至探测器焦平面,分别读出每一行像元在多挡增益下的数字输出值(DN值)。通过FPGA内置随机存储器(RAM)存储每一挡增益的数据,然后判断是否饱和,选取不饱和挡位中增益最高的那一挡,以两位增益码后加十四位数值码的形式存储下传。

3 仿真分析

3.1 满阱电荷的范围限制

多挡增益设计首先要明确增益挡位的个数以及比例,这两参数将会影响系统的信噪比与动态范围。由于目前探测器类型主要为光子探测器,故可以基于量子效率计算出信号电子数,即

$$N_s(\lambda) = \frac{A_d T_{int} \sin \theta}{4F^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_0(\lambda) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \rho(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (5)$$

式中: A_d 为像元面积; T_{int} 为积分时间; F 为光学系统 F 数; $E_0(\lambda)$ 为大气层顶太阳光谱辐射照度; $\tau_0(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$ 、 $\rho(\lambda)$ 、 $\eta(\lambda)$ 分别为系统光学效率、大气透过率、地表反照率、探测器量子效率。载荷相关参数及要求如表 1 所示。

表 1 载荷参数设置及信噪比要求

Table 1 Parameter setting and signal to noise ratio requirements of payload

Band /nm	Main optical efficiency /arb. units	Grating efficiency /arb. units	Quantum efficiency /arb. units	SNR(typical) /arb. units
B1: 375.0–395.0	0.085509	1	0.55	≥260
B2: 402.0–422.0	0.266243	1	0.74	≥500
B3: 433.0–453.0	0.358966	1	0.85	≥500
B4: 467.5–482.5	0.463363	1	0.91	≥500
B5: 482.5–497.5	0.479922	1	0.92	≥500
B6: 510.0–530.0	0.516239	1	0.94	≥500
B7: 555.0–575.0	0.562384	1	0.95	≥500
B8: 607.0–627.0	0.539584	1	0.95	≥500
B9: 630.0–650.0	0.531985	1	0.93	≥500
B10:657.5–672.5	0.522113	1	0.91	≥440
B11:676.0–686.0	0.491244	1	0.88	≥340
B12:702.5–717.5	0.468914	1	0.83	≥360
B13:740.0–760.0	0.431699	1	0.75	≥320
B14:812.5–827.5	0.379597	1	0.57	≥200
B15:845.0–885.0	0.409370	1	0.46	≥230

载荷空间分辨率为 100 m,轨道为太阳同步轨道,高度为 782 km。可见近红外探测器像元尺寸为 30 μm,积分时间为 14.5 ms,量化位数 14 bit。载荷光学系统 F 数为 2.85,实际光谱分辨率为 2.16 nm(单行像元)。考虑到数据量问题,采用星上可编程模式,根据海洋观测需求设置默认通道 15 个。其中

各通道分别在 4 种特殊情况下的单行不饱和电子数如图 2 所示。可以发现,海洋水色的信号电子数在 $2.47 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$ 之间,因而最高增益的满阱电荷不能低于这个范围。同时,要想使得云层等高亮目标不饱和,最低增益的满阱电荷必须高于 $2.25 \times 10^6 e^-$ 。

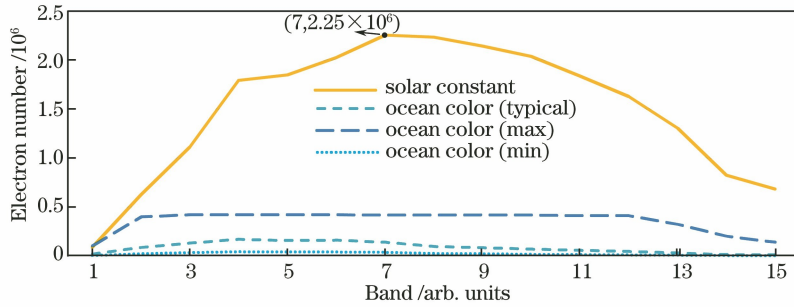


图 2 4 种特殊情况下的信号电子数

Fig. 2 Signal electron number in four special cases

3.2 挡位设定的约束

除了满足成像场景的动态范围,信噪比也是挡位设定所要考虑的因素。在某一挡增益不饱和的情况下,读出噪声电子数 N_{read} 确定,随着信号电子数 N_{signal} 的增加,信噪比增加。极限情况下, N_{read} 小到忽略不计,信噪比为 $\sqrt{N_{\text{signal}}}$,即为光子噪声限。这种情况下,需考虑最低信号是否满足信噪比要求。当系统出现多挡增益时,还需考虑某一增益下的满阱信号被划分到下一级增益条件下后被读出的情况,即高增益下的信号,低增益下的噪声。假设满阱电荷 2.5 Me^- ,单挡动态范围(最大满阱电荷/最高增益下的噪声电子数)为 $5000:1$,等比例划分成 3 挡,可以发现挡位转换处有明显的信噪比下降,如图 3 所示。

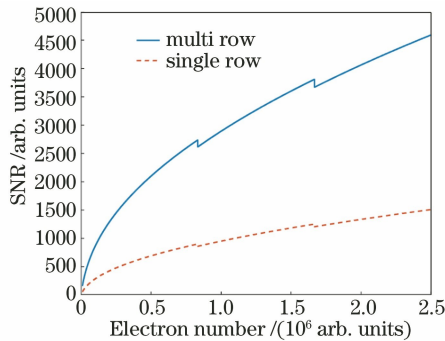


图 3 单行和多行累加的 SNR

Fig. 3 SNR of single row and multi rows

因而,除了满足典型输入辐亮度下的信噪比要求,还要满足以下约束,即

$$\left\{ \begin{aligned} R_D(\lambda, k) &= \frac{N_{\text{FW}}(\lambda, k)}{N_{\text{noise}}(\lambda, k)} = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{noise}}} \\ \frac{N_{\text{signal}}(\lambda, k-1)}{\sqrt{N_{\text{signal}}(\lambda, k-1) + N_{\text{noise}}^2(\lambda, k)}} &\geq R'_{\text{SN}}(\lambda, k) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: V_{max} 和 V_{noise} 为探测器工艺限制下的最大电压和噪声电压; $N_{\text{FW}}(\lambda, k)$ 和 $N_{\text{noise}}(\lambda, k)$ 分别为第 k 挡增益的满阱电荷和噪声电子数; $R_D(\lambda, k)$ 和 $R'_{\text{SN}}(\lambda, k)$ 分

别为第 k 挡增益的动态范围、信噪比要求。由于挡位交界处的信噪比缺少量化要求,这里以低增益挡位的噪声电子数小于高增益挡位光子噪声的四分之三为标准。当满足此标准时,即使正好处于交界处,信噪比仍然不小于原信噪比的 80%。

3.3 挡位及比例的确定

出于工程实现以及定标的考虑,将挡位之间满阱电荷的比例设为等比例。假定在探测器最大电压 1.5 V 和均方根噪声电压 $300 \mu\text{V}$ 的情况下,设置 1~7 挡(坐标轴 Stage),比例为 2~7(坐标轴 Ratio),计算典型水色辐亮度输入下的各通道平均信噪比。根据图 4 可以发现,挡位设置越多,信噪比越高。但增益超过 4 挡时,信噪比几乎不会变化,其值约为 $760:1$ 。这是因为随着挡位划分得越细,高增益挡位对应的噪声电子数越少(即较小积分电容,较小的噪声),从而信噪比提高。但挡位超过一定程度时,噪声变化数量相对于信号电子数已经微乎其微,接近于光子噪声极限。

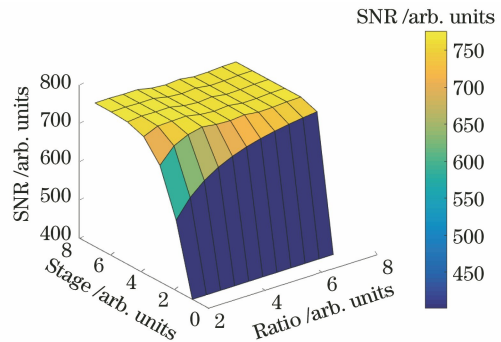


图 4 SNR 随挡位及比例的变化

Fig. 4 SNR changes with stages and ratio

挡位个数低于 3 个时,平均信噪比会受比例影响。随着比例的增加,信噪比略有变大,然后几乎不变。主要原因在于:典型辐亮度下的各通道信号电子数偏低,即大多处于高增益或者中等增益的挡位;随着挡位个数增多,高增益挡位的满阱电荷已经

变得足够小,比例变化带来的影响几乎可以忽略。

分析挡位个数和比例这两方面因素对于信噪比的影响可知:1)对于相同的动态范围,多增益设置下的信噪比要高于单一增益;2)随着挡位个数和比例的增加,信噪比会趋于一个极限值。另外,仿真分析设定的挡位个数及比例较多,但实际受限于探测器面积、读出时间以及存储资源,实际挡位个数一般不超过4个。

根据整体约束条件[(6)式]可知,挡位之间比例设置太大将导致下一级满阱电荷较小,容易无法满足挡位转换处的信噪比要求。相反,比例设置太小导致增益转换重叠区过大,整体动态范围缩小。因此,仿真实验中将不满足要求情况下的信噪比置为0,可得如图5所示的结果。当挡位个数为2~4,比例为2~5.5时,设计满足成像要求。

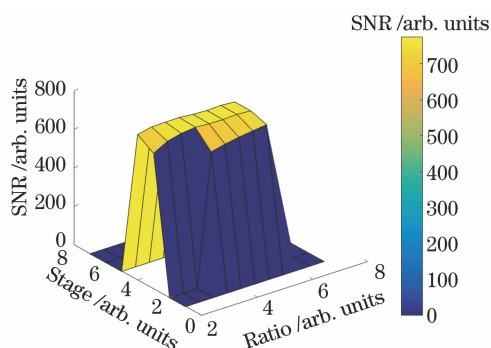


图5 条件约束后的挡位及比例

Fig. 5 Stages and ratio after constraint

在以上分析结果的基础上,计算每个可行方案中最大满阱电荷/最高增益下的噪声电子数的整体动态范围。如图6所示,挡位个数为4,增益比例为5.5时,动态范围最大(831875 : 1,118 dB)。综上所述,可以认为挡位和增益比例的最优设置分别为4挡增益,每挡之间为5倍。那么,4挡增益的满阱电

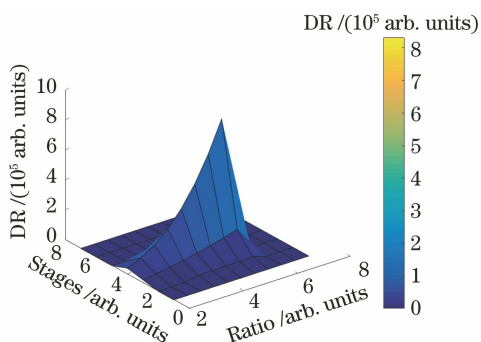


图6 条件约束后可行方案的动态范围

Fig. 6 Dynamic range of feasible scheme after condition constraint

荷分别为 2.5 Me⁻ (超低增益)、500 ke⁻ (低增益)、100 ke⁻ (中等增益)、20 ke⁻ (高增益)。基于此设置,最大满阱电荷为 2.5 Me⁻,最高增益(20 ke⁻)对应的噪声电子数为 4 个。那么,光谱成像系统总动态范围可达(2500000:4,116 dB)左右,各通道平均信噪比为 767.37。

4 设计验证

最终获得的参数设置是以典型水色输入辐亮度下的信噪比为参考的,但海洋成像场景下对于潮间带、海面溢油等目标的监测也不容忽视。为验证多挡增益成像方法及参数设置是否同样满足其他目标的监测需求,必须模拟出场景下不同目标的入瞳辐亮度。入瞳辐亮度既包括目标自身反射的辐射,也包括大气辐射及周围环境的干扰。大气辐射组成成分较为复杂,主要包括大气程辐射等部分。MODTRAN 是常用的仿真工具,根据地物反射率数据输入,可以仿真出不同成像条件的大气参数及入瞳辐亮度。出于简化考虑,这里仅以地物类型为变量,表 2 为成像条件及默认参数设置,表中 FWHM 表示半峰全宽。

表 2 MODTRAN 参数设置

Table 2 Parameter setting of MODTRAN

Parameter	Setting
Spectral range	350–920 nm (28740–10840 cm ⁻¹)
Atmospheric path	A vertical or sloping path from an elevation to space
Boundary temperature /K	300
Volume fraction of CO ₂ /10 ⁶	380
Ozone content /(10 ⁻³ g · cm ⁻²)	0.642
Water vapor content /(g · cm ⁻²)	2.92
Visibility /km	23
Observation height /km	100
FWHM /cm ⁻¹	1
Atmospheric type	Mid latitude summer
Aerosol	Marine type
Observation azimuth /(°)	0
Revolution time /d	180
Solar altitude angle /(°)	60
Observation zenith angle /(°)	180
Cloud pattern	Cumulus
Cloud bottom height /km	0.66
Cloud top height /km	3.0

从 USGS 光谱数据库选择的 19 类 (MODTRAN 设置的厚云模式算 1 类) 以海洋目标为主的地物数据, 其中包括一类水体、二类水体、海面溢油、滩涂、植被等类型。假设地物为朗伯体, 入瞳辐照度 $E(\lambda)$ 满足

$$\begin{cases} E(\lambda) = \pi \cdot L(\lambda) \\ E(\lambda) = E_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \rho(\lambda) \sin(\theta) \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $L(\lambda)$ 为入瞳辐亮度。由此, (5) 式可以变换成

$$N_s(\lambda) = \frac{A_d T_{int}}{4F^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \pi L(\lambda) \tau_0(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda. \quad (9)$$

以 MODTRAN 计算得出的入瞳辐亮度 $L(\lambda)$ 作为输入, 易得多挡增益成像方法下不同地物的动态范围及信噪比, 从而验证该设计。

如图 7 所示, 积云和雪由于具有强反射性, 其动

态范围最高, 其次是混凝土、植被, 滩涂以及水体所需的动态范围最小。分别对各类型地物的通道最大最小信号电子数求平均, 可得: 积云和雪 (2 类) 的平均动态范围为 $7.62 \times 10^4 \sim 2.55 \times 10^6 e^-$, 主要处于超低增益挡; 混凝土以及砂石 (3 类) 平均动态范围为 $2.71 \times 10^4 \sim 6.33 \times 10^5 e^-$, 主要处于低增益和中等增益挡; 植被 (5 类) 的平均动态范围为 $1.88 \times 10^4 \sim 2.69 \times 10^5 e^-$, 主要处于中等增益挡; 滩涂及水体 (9 类) 的平均动态范围为 $1.72 \times 10^4 \sim 1.70 \times 10^5 e^-$, 主要处于中等增益和高增益挡。从定性的角度来看, 海洋目标的入瞳辐亮度主要处于中等增益挡 (100 ke⁻) 和高增益挡 (20 ke⁻)。除了厚云的第 10 通道出现饱和外, 超低增益挡 (2.5 Me⁻) 能够满足绝大多数目标的动态范围。

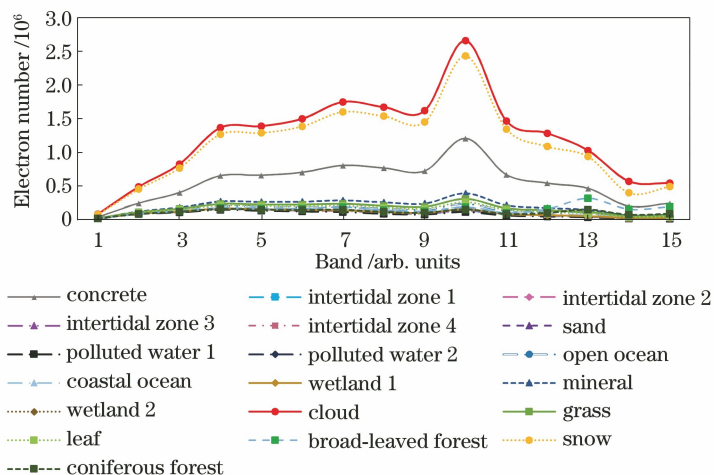


图 7 各地物类型的信号电子数

Fig. 7 Number of signal electron number of various ground object types

如图 8 所示, 最下面的实线为典型水色辐亮度输入条件下的信噪比要求。由于信噪比与信号大小

相关, 这里只选择与典型水色辐亮度相近的几种水体类型作为实验对象。可以发现所有类型均符合信

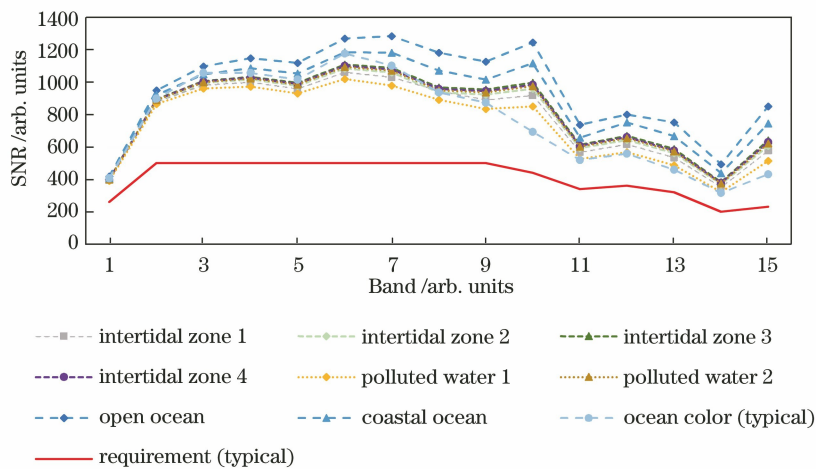


图 8 几种水体类型的信噪比

Fig. 8 SNR of several water types

噪比要求,这说明该方法不但具有较大的动态范围,对于辐射信号较弱的海洋目标也有足够的灵敏度。

5 结 论

由于成像场景的特殊性,动态范围与灵敏度始终是海洋水色遥感器设计的重要问题之一。在信噪比与动态范围的分析基础上,结合推扫式成像的特点,提出一种基于多挡增益的自适应光谱成像方法,并根据模型仿真确定了系统增益参数。根据仿真计算,系统总动态范围可达 116 dB。在典型辐亮度条件下,各通道平均信噪比为 767.37,能够满足绝大多数海洋成像场景。以上均为数值仿真结果,实际成像效果有待进一步验证。另外,考虑到目前工程实现,系统设计中增益挡位是按等比例仿真分析的,非等比情况还需要后续研究。

参 考 文 献

- [1] Zhang K L, Bai Z G, Wang L L. Review, present situation and prospect of the development of ocean color satellite in China [J]. *Satellite Application*, 2018(5): 24-27.
张可立, 白照广, 王丽丽. 我国海洋水色卫星发展回顾、现状及展望[J]. *卫星应用*, 2018(5): 24-27.
- [2] Hu C M, Feng L, Lee Z, et al. Dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6045-6062.
- [3] Wang D J, Kuang H P. Experimental study of the effects on signal noise ratio and dynamic range caused by analog gain for CCD [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 077208.
王德江, 匡海鹏. 模拟增益对电荷耦合器件信噪比与动态范围影响的实验研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 077208.
- [4] Lang J W. Research of information acquisition system for high resolution space-borne push-broom hyperspectral imagers based on CMOS detector [D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2014: 32-40.
郎均慰. 基于 CMOS 图像传感器的高分辨率航天推扫成像光谱仪信息获取技术研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014: 32-40.
- [5] Sun W, Han C S, Jin X F, et al. HDR imaging method of overcoming full well limitation for push-broom remote sensing cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 944-950.
孙武, 韩诚山, 晋学飞, 等. 推扫式遥感相机超满阱大动态范围成像 [J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(4): 944-950.
- [6] Zhang Y T, Chai M Y, Sun D X, et al. Digital TDI technology based on global shutter sCMOS image sensor for low-light-level imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0911001.
张元涛, 柴孟阳, 孙德新, 等. 全局快门 sCMOS 图像传感器数字 TDI 微光成像技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0911001.
- [7] Lee T E, Miller S D, Turk F J, et al. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(2): 191-199.
- [8] Zhou W. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 638-642.
周望. 基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的研究 [J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 638-642.