

NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG PHỔ SẢN PHẨM ẢNH VỆ TINH QUANG HỌC ĐỘ PHÂN GIẢI CAO

Đặng Trường Giang¹, Vũ Thị Tương¹, Vũ Thị Phương Thảo², Thái Thị Bích Hồng³
Bùi Trọng Tuyên⁴, Phạm Minh Tuấn⁴, Ngô Duy Tân⁴

¹Cục Viễn thám Quốc gia

²Trường Đại học Mở - Địa chất

³Viện Khoa học và công nghệ, Bộ Công An

⁴Viện Công nghệ vũ trụ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Tóm tắt

Với số lượng và chủng loại ngày càng gia tăng của các nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh viễn thám quang học và yêu cầu ngày càng khắt khe của người sử dụng thì công tác đánh giá chất lượng ảnh viễn thám để kiểm tra, kiểm soát chất lượng ảnh nhằm cung cấp những sản phẩm có chất lượng tối ưu cho người sử dụng là nhu cầu bức thiết. Bài báo này mô tả phương pháp và xây dựng công cụ phần mềm đánh giá chất lượng phổ của sản phẩm ảnh vệ tinh viễn thám quang học có độ phân giải cao nhằm mục đích tự động hóa và tăng tốc độ đánh giá ảnh viễn thám. Kết quả thử nghiệm của công cụ tự động này với các ảnh vệ tinh có độ phân giải cao và siêu cao chứng tỏ hiệu năng và tương quan tốt với phương pháp đánh giá chủ quan.

Từ khóa: Đánh giá chất lượng ảnh; Phổ công suất; NIIRS; HSV.

Abstract

Study on spectral image quality assessment method for high-resolution remote sensing images

With the increasing volume and types of optical remote sensing satellite image data as well as higher quality image requirements of users, image quality assessment for product inspection and control is vital. This paper describes the method and tool to evaluate quality of high resolution optical remote sensing satellite data based on their data spectrum. The tool aims at automatic and time-efficient evaluation of remote sensing imagery. The results showed that using the tool for the verification of high and super high resolution satellite images demonstrates its good performance and correlation with subjective approach.

Keywords: Image quality assessment; Power spectral; NIIRS; HSV.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, dữ liệu ảnh viễn thám quang học được sử dụng tại Việt Nam ngày càng đa dạng và phong phú với các vệ tinh viễn thám quang học của Việt Nam và của nước ngoài từ độ phân giải thấp đến độ phân giải cao như VNREDSat-1, LANDSAT, SPOT,... Các thể hệ vệ tinh viễn thám khác nhau có

những đặc điểm và tính chất khác nhau khiến công tác quản lý nguồn dữ liệu đầu vào cũng như sản phẩm đầu ra ngày càng đặt ra nhiều thách thức. Tại Cục Viễn thám quốc gia đã có trạm thu ảnh SPOT4, SPOT5 từ năm 2007 và tiếp tục thu nhận ảnh VNREDSat-1 từ năm 2013. Năm 2020, Đài Viễn thám Trung ương cũng bắt đầu thu nhận ảnh vệ tinh SPOT6/7 với độ phân giải 1,5 mét. Trong bối cảnh

đó, các đơn vị quản lý và khai thác cần được hỗ trợ bởi các công cụ hiện đại để tăng cường hiệu quả công tác quản lý chất lượng đầu ra của sản phẩm ảnh viễn thám quang học, đặc biệt đối với các dữ liệu ảnh có độ phân giải cao và siêu cao. Bài báo này mô tả phương pháp và công cụ đánh giá chất lượng phổ dữ liệu ảnh vệ tinh quang học sử dụng phổ công suất của ảnh để xác định chỉ số chất lượng ảnh theo thang đánh giá NIIRS (National Image Interpretability Rating Scale), đồng thời nhóm tác giả cũng tiến hành thực nghiệm trên một số dữ liệu ảnh vệ tinh quang học có độ phân giải cao.

2. Đánh giá chất lượng ảnh viễn thám quang học dựa trên phổ công suất ảnh

Đánh giá chất lượng ảnh dựa trên phổ công suất ảnh viễn thám là một phương pháp đánh giá chất lượng khách quan, tức là không cần sự quan sát và đánh giá bằng mắt người. Đặc điểm của phương pháp này là xây dựng mô hình toán học có khả năng dự đoán chất lượng của hình ảnh tương đối chính xác và cũng tự động, đặc biệt là mô phỏng lại các dự đoán chất lượng của một người quan sát.

Mô hình đánh giá chất lượng ảnh dựa trên phân tích phổ công suất được thể hiện trong nghiên cứu [5] và được các tác giả ứng dụng để xây dựng mô hình đánh giá chất lượng ảnh vệ tinh viễn thám quang học trong vùng quang phổ nhìn thấy. Cách tiếp cận phổ công suất này không phụ thuộc vào các hình dạng của đối tượng (như dạng đường thẳng hoặc sóng hình sin), không yêu cầu tách biệt các cạnh rìa. Đây là một lợi thế rất lớn để ứng dụng phương pháp này nhằm đánh giá tự động chất lượng ảnh vệ tinh viễn thám quang học.

Ưu điểm của phương pháp này như sau:

- Đánh giá trực tiếp trên dữ liệu ảnh.
- Tốc độ xử lý nhanh và khách quan, do vậy có thể tích hợp vào hệ thống tự động.
- Tương đối tương đồng với đánh giá bằng mắt thường.
- Có thể phát hiện suy giảm chất lượng ảnh nhờ phổ công suất.

3. Mô tả phương pháp đánh giá chất lượng dựa trên phổ công suất của ảnh

3.1. Biến đổi Fourier trên ảnh và phổ công suất chuẩn hóa

Giả định ảnh vệ tinh với kích thước $[M \times M]$ điểm ảnh, $g(x,y)$ là giá trị độ xám của điểm ảnh với tọa độ điểm ảnh theo vị trí hàng và cột là $[x,y]$ (với $x,y: [0, M-1]$). Phép biến đổi rời rạc Fourier của ảnh $G(u,v)$ sẽ như sau:

$$G(u,v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \exp\left[-2\pi i y \frac{v}{M}\right] \exp\left[-2\pi i x \frac{u}{M}\right] g(x,y) \quad (1)$$

Trong đó, u, v trong khoảng $[-M/2, M/2]$

Công suất phổ của điểm ảnh $g(x,y)$ trong không gian 2 chiều được định nghĩa là bình phương của $G(u,v)$.

Để đơn giản hóa quá trình so sánh phổ giữa các ảnh vệ tinh, chúng ta cần tạo dạng phổ công suất trong không gian 1 chiều (1 D). Cách tạo ra một dạng phổ công suất 1-D là lấy trung bình công suất chứa trong các dải tần số, trong đó tần số không gian được tính theo khoảng cách đến góc, tần số không gian được xác định bằng công thức:

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2} / M \quad (2)$$

Tại tần số (vị trí gốc hay DC) thì năng lượng tại vị trí này được tính như sau:

$$\mu^2 = |G(0,0)|^2 / M^4 \quad (3)$$

Phổ công suất của ảnh sẽ được chuẩn hoá nhằm loại trừ ảnh hưởng độ sáng từ ảnh sang ảnh trong hệ thống chụp ảnh. Điều này được thực hiện bằng cách chia phổ công suất 2-D cho năng lượng phổ tại điểm gốc. Phổ 1-D cũng có thể được sử dụng để phát hiện nhiễu, xác định phương sai nhiễu đối với nhiễu trắng và phát hiện mờ ảnh.

Phổ công suất trong không gian 2 chiều (2-D) được chuẩn hóa $P(u, v)$ được xác định như sau:

$$P(u, v) = \frac{|G(u, v)|^2}{\mu^2 M^2} \quad (4)$$

$P(u, v)$ và các thước đo chất lượng ảnh thu được từ đó có thể so sánh trực tiếp với các ảnh với độ sáng trung bình khác nhau. Chuyển đổi $P(u, v)$ sang tọa độ cực thì ta có:

$$P(\rho, \theta) = \frac{|G(\rho, \theta)|^2}{\mu^2 M^2} \quad (5)$$

Trong đó:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right)$$

3.2. Mô hình hóa hệ thống thị giác của con người (HVS)

Các nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra rằng việc đưa mô hình hệ thống thị giác của con người (HVS - Human Vision System) vào các kỹ thuật xử lý hình ảnh thường dẫn đến các kết quả định lượng chặt chẽ các cảm nhận tương đối của con người. Do đó, để hướng tới mục tiêu là tạo ra mối tương quan khách quan của đánh giá chất lượng hình ảnh, mô hình HVS được kết hợp trong đánh giá IQM dựa trên phổ công suất.

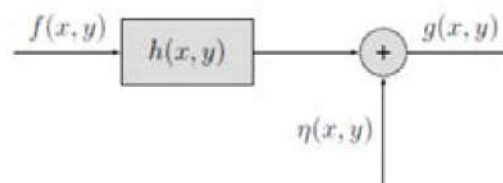
Dựa trên [6, 7] mô hình MFT - HSV kết hợp hàm điều biến (Modulation Transfer Function - MFT) và mô hình hệ thống thị giác - HSV được mô tả bằng $A(T\rho)$ được định nghĩa như sau:

$$A(T\rho) = (0.2 + 0.45)e^{-0.18T\rho} \quad (6)$$

Trong đó hằng số T xác định tần số không gian của đỉnh hàm mô phỏng mô hình HVS đối với tần số Nyquist không gian của ảnh và $T\rho$ chính là số đơn vị chu kỳ (vạch)/độ mà mắt nhìn thấy. Các nghiên cứu thực nghiệm xác định được: $T \approx 51.1$ [5].

3.3. Lựa chọn bộ lọc nhiễu và khôi phục ảnh

Khi vệ tinh hoạt động trên quỹ đạo và thực hiện các thao tác chụp ảnh các đối tượng trên mặt đất thì quá trình tạo ảnh (thu nhận được) và nâng cao chất lượng ảnh được mô hình như sau [8]:



Hình 1: Mô hình tạo ảnh của hệ thống quang học

Mô hình trên được mô tả bằng phương trình sau đây:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + \eta(x, y) \quad (7)$$

Trong đó:

$g(x, y)$: ảnh thu nhận được

$f(x, y)$: ảnh gốc ban đầu

$h(x, y)$: hàm tạo ảnh (PSF - Point Spread Function)

$\eta(x, y)$: nhiễu

Như vậy chúng ta có thể nhận thấy, ảnh thu nhận có chất lượng suy giảm so với ban đầu do hai yếu tố: ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài và bản thân quá trình tạo ảnh của hệ thống thiết bị chụp ảnh.

Trong miền tần số (biến đổi Fourier) mô hình tạo ảnh (hay mô hình suy giảm) được mô tả như sau:

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v) \quad (8)$$

Trong miền rời rạc và tại bước thực hiện thứ i thì các hàm ước lượng như sau:

Ảnh gốc ước lượng:

$$\hat{F}_i(u, v) = \frac{G(u, v)\hat{H}_i^*(u, v)}{|\hat{H}_i(u, v)|^2 + \tau/|\hat{F}_i(u, v)|^2} \quad (9)$$

Trong đó là hệ số nhiễu và cần phải được lượng hóa một cách tin cậy để khôi phục dữ liệu ảnh.

Bộ lọc Wiener có ưu điểm tốc độ xử lý nhanh và đảm bảo hiệu quả lọc được nhiễu ngẫu nhiên, do vậy bộ lọc tuyến tính này có thể được sử dụng trong hệ thống IQM. Bộ lọc Wiener được mô tả như sau:

$$F(\rho) = \left[\frac{2\pi k \sigma_s^2 \exp(-\frac{\rho^2}{\sigma_g^2})}{2\pi k \sigma_s^2 \exp(-\frac{\rho^2}{\sigma_g^2}) + k_1(k^2 + \rho^2)^{1.5}|N(\rho)|^2} \right]^{k_2} \quad (10)$$

Trong đó, các hằng số có tác dụng tăng ảnh hưởng của bộ lọc lên phổ công suất hình ảnh. Các tham số khác được xác định như sau:

σ_g^2 : phương sai của hàm MTF.

σ_s^2 : phương sai của ảnh.

ρ : tần số không gian.

$|N(\rho)|^2$: phổ công suất nhiễu.

k : hằng số thực nghiệm.

3.4. Hệ số tỷ lệ định hướng

Phổ công suất của ảnh được tính toán không phụ thuộc vào tỷ lệ của ảnh, đặc biệt đối với ảnh vệ tinh quang học thường chụp các đối tượng cụ thể trên mặt đất. Do vậy, cần phải bổ sung vào IQM trọng số tỷ lệ của ảnh. Hệ số tỷ lệ này chính là phép chiếu của điểm ảnh lên mặt đất. Hệ số tỷ lệ được định nghĩa như sau:

$$S(\theta_1) = \frac{f}{2Dq} \quad (11)$$

Trong đó:

q : kích thước điểm ảnh.

f : tiêu cự của hệ thống quang học.

D : khoảng cách nghiêng.

3.5. Chỉ số tổng hợp đánh giá chất lượng ảnh

Từ [5], mô hình đánh giá chất lượng ảnh phân tích phổ công suất của ảnh như sau:

$$= \frac{1}{M^2} \sum_{\theta=-180^\circ}^{180^\circ} \sum_{\rho=0.01}^{0.5} S(\theta_1) F(\rho) A^2(T_\rho) P(\rho, \theta) \quad (12)$$

Trong đó:

M : kích thước của ảnh tính số theo lượng điểm ảnh (ảnh được coi là ảnh vuông)

$S(\theta_1)$: hệ số tỷ lệ định hướng của ảnh.

$F(\rho)$: toán tử lọc nhiễu

$A^2(T_\rho)$: hàm truyền đạt HVS, đây là hàm điều biến mô phỏng hệ thống thị giác của con người với là hằng số

$P(\rho, \theta)$: độ sáng chuẩn hoá của phổ công suất

ρ, θ : tần số không gian trong tọa độ cực.

Các tham số đầu vào của mô hình cần được cung cấp gồm:

- Ảnh vệ tinh với kích thước vuông
- Cửa sổ lọc hình vuông.
- Định dạng ảnh: 8 hoặc 16 bits
- Số lượng kênh phổ: 1 hoặc 3 kênh.
- Độ phân giải mặt đất của ảnh vệ tinh.

Đầu ra của mô hình cho phép tính toán chỉ số IQM. Công suất phổ thể hiện qua chỉ số IQM thể hiện chất lượng thông tin mà ảnh cung cấp. Trong [9], các tác giả đã khảo sát với tập dữ liệu lớn giữa chỉ số IQM và chỉ số NIIRS. NIIRS là Thang điểm đánh giá chất lượng ảnh quốc gia Hoa Kỳ (The National Imagery Interpretability Rating Scale - NIIRS) sử dụng các thang điểm đánh giá như sau:

Bảng 1. Mức điểm NIIRS và mức độ chi tiết khi thành lập bản đồ với tỉ lệ tương ứng

STT	Mức điểm NIIRS	Tỉ lệ bản đồ/ Giới hạn độ phân giải
1	NIIRS 1	1:100.000/(10 - 20 m)
2	NIIRS 2	1:50.000/(5 - 10 m)
3	NIIRS 3	1:25.000/(2.5 - 5 m)
4	NIIRS 4	1:10.000/(1 - 2 m)
5	NIIRS 5	1:5.000/(0.5 - 1 m)

Theo đó, chỉ số IQM sẽ được chuyển hoá thành chỉ số thang đo NIIRS bằng hàm hồi quy có dạng:

$$NIIRS = a * \log_{10} IQM + b \quad (13)$$

Trong đó, a và b là hai hằng số thực nghiệm. Trong [5], sử dụng bộ dữ liệu của [10] để đánh giá độ chính xác của IQM, tương quan giữa IQM và NIIRS (xác định bằng chuyên gia) là rất cao tới 0.93. Các giá trị thực nghiệm a và b được xác định như sau:

$$a=1.6092; b=8.6849$$

Tóm lại, phương pháp IQM dựa trên phân tích phổ công suất được mô tả tóm tắt như sau:

- IQM tính toán chất lượng hình ảnh dựa trên phổ công suất trong miền tần số không gian hai chiều (2-D) của ảnh vệ tinh. Phổ năng lượng chứa thông tin về độ sắc nét, độ tương phản và thể hiện chi tiết của hình ảnh và đây là các cấu phần tạo thành “chất lượng ảnh vệ tinh”. Với ảnh đã tăng cường chất lượng hay ảnh gốc, phương pháp này vẫn đánh giá so sánh. Thông thường ảnh tăng cường hẳn nhiên cho chỉ số cao hơn.

- Phổ công suất được chuẩn hóa bằng độ sáng của ảnh vệ tinh và được cân bằng bởi chức năng phản hồi trực quan và hệ số tỷ lệ định hướng.

- Trong trường hợp dữ liệu ảnh bị suy giảm chất lượng do nhiễu hoặc tác động không mong muốn thì bộ lọc nhiễu sẽ có tác dụng loại bỏ nhiễu và khôi phục dữ

liệu gốc (trong bài báo này nhóm tác giả sử dụng bộ lọc Wiener).

- Yếu tố chất lượng hình ảnh đầu ra cơ bản, “IQM” là tổng các giá trị phổ công suất 2-D có trọng số. Trọng số của thị giác sắp xếp chỉ số IQM với những gì một người coi là ‘chất lượng’.

- Để chuyển đổi IQM sang giá trị Thang đánh giá khả năng giải đoán hình ảnh quốc gia (NIIRS), nhóm tác giả sử dụng phương trình hồi quy IQM - NIIRS đã được thiết lập trước đó.

Đây là phương pháp rất hữu hiệu với điều kiện Việt Nam do tính đơn giản và tốc độ tính toán nhanh.

4. Thử nghiệm đánh giá chất lượng phổ dữ liệu ảnh vệ tinh viễn thám độ phân giải cao và siêu cao

4.1. Dữ liệu và quá trình thử nghiệm

Để tiến hành xây dựng phương pháp cũng như thực nghiệm đánh giá phương pháp, nghiên cứu đã thử nghiệm phương pháp đánh giá tự động ở các mức tỉ lệ như sau:

- Tỉ lệ 1/25.000 độ phân giải 2.5 m: dữ liệu VNREDSAT-1 độ phân giải 2.5 m.

- Tỉ lệ 1/10.000 độ phân giải 1.5 m: dữ liệu SPOT6,7 độ phân giải 1.5 m

- Tỉ lệ 1:5.000 độ phân giải 0.5 m: dữ liệu Pléiades độ phân giải 0.5 m.

Các khu vực thực nghiệm được phân bố cả ở vùng đồng bằng đô thị, vùng ven biển, vùng núi nhằm khảo sát thử nghiệm nhiều khu vực.

Quá trình thực nghiệm được tiến hành như sau:

- Thành lập bình đồ ảnh 3B.

- Đánh giá bằng phương pháp phân tích phổ công suất.

- Đánh giá kết quả bằng phương pháp đánh giá chuyên gia.

Phương pháp đánh giá chuyên gia được nhóm tác giả sử dụng để đối chiếu với kết quả đánh giá tự động. Phương pháp chuyên gia đánh giá chất lượng ảnh dựa trên hệ thống NIIRS đánh giá mức độ chi tiết của ảnh. Hệ thống thang điểm NIIRS [1] được xây dựng và phát triển từ những năm 1990 và là một trong những cơ sở đánh giá chất lượng ảnh và đầu thu của Hoa Kỳ, Anh, NATO, Canada.

4.2. Kết quả thử nghiệm

Dưới đây là ví dụ một số kết quả thực nghiệm tại một số khu vực trọng điểm.

4.2.1. Thử nghiệm trên ảnh độ phân giải siêu cao Pléiades (0.5 m).

Kết quả đánh giá chất lượng phổ tự động NIIRS:

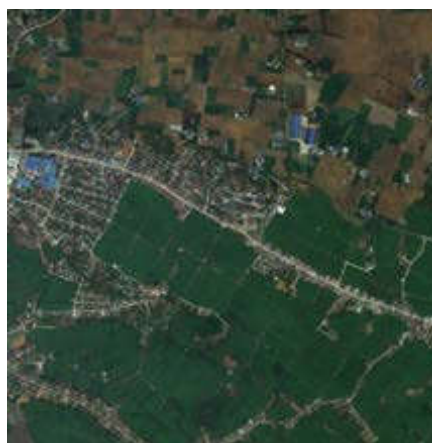
IQM	NIIRS	Mã (Codes)	Độ tương phản (Constrast)
0.100918E-02	3.86	RED	0.13671
0.100908E-02	3.86	GREEN	0.13671
0.100911E-02	3.86	BLUE	0.13671

Theo đó, kết quả NIIRS là 3.86 cho 3 kênh, độ tương phản 0.13671, giá trị IQM trung bình là 0.100910E-02.



Hình 2: Ảnh Pléiades khu vực Mộc Châu

So sánh với kết quả đánh giá bằng phương pháp chuyên gia, NIIRS là 5. Để thử nghiệm tính khách quan của phương pháp tự động, tiến hành tăng cường lại chất lượng ảnh và tiến hành đánh giá lại.



Hình 3: Ảnh Pléiades khu vực Mộc Châu (sau khi xử lý lại)

Kết quả đánh giá lại chất lượng phổ tự động NIIRS:

IQM	NIIRS	Mã (Codes)	Độ tương phản (Constrast)
0.179056E-02	4.26	RED	0.19626
0.131663E-02	4.05	GREEN	0.15273
0.970439E-03	3.84	BLUE	0.13860

Theo đó, kết quả NIIRS là 4.08 cho 3 kênh, độ tương phản 0.16088, giá trị IQM trung bình là 0.139192E-02 vẫn lệch 1 điểm so với đánh giá chuyên gia.

Như vậy phương pháp tính tự động dựa trên phổ công suất của ảnh khá phụ thuộc vào mức độ tương phản của ảnh. Nếu mức độ tương phản cao, phương pháp sẽ cho ra kết quả có chất lượng cao hơn.

4.2.2. Thử nghiệm trên ảnh độ phân giải cao SPOT6/7 (1.5 mét).



Hình 4: Ảnh SPOT6/7 khu vực TP. Hồ Chí Minh

Nghiên cứu

Kết quả đánh giá chất lượng phổ tự động NIIRS:

IQM	NIIRS	Mã (Codes)	Độ tương phản (Constrast)
0.158516E-02	4.18	RED	0.11749
0.158483E-02	4.18	GREEN	0.11749
0.158432E-02	4.18	BLUE	0.11752

Theo đó, kết quả NIIRS là 4.18 cho 3 kênh, độ tương phản 0.11749, giá trị IQM trung bình là 0.158486E-02.

So sánh với kết quả đánh giá bằng phương pháp chuyên gia, NIIRS là 4. Như vậy, kết quả tự động và đánh giá chủ quan là trùng khớp.

4.2.3. Thực nghiệm trên ảnh độ phân giải cao VNREDSat-1 (2.5 mét).



Hình 5: Ảnh VNREDSat-1 khu vực TP. Hồ Chí Minh

Kết quả đánh giá chất lượng phổ tự động NIIRS:

IQM	NIIRS	Mã (Codes)	Độ tương phản (Constrast)
0.144648E-02	4.12	RED	0.30291
0.627374E-03	3.53	GREEN	0.23128
0.800142E-03	3.70	BLUE	0.24000

Theo đó, kết quả NIIRS trung bình là 3.67 cho 3 kênh, độ tương phản 0.24694, giá trị IQM trung bình là 0.811479E-03.

So sánh với kết quả đánh giá bằng phương pháp chuyên gia, NIIRS là 3.

Kết quả tự động và đánh giá chủ quan là tương đồng.

Như vậy, với các kết quả thử nghiệm cho các ảnh viễn thám quang học có độ phân giải cao và siêu cao thì kết quả đánh giá tự động và đánh giá chủ quan có tính tương quan thể hiện khả năng ứng dụng trong thực tiễn. Tuy nhiên, để khắc phục một số khác biệt giữa hai phương pháp cần hiệu chỉnh hơn nữa các mô hình, đặc biệt là các tham số thực nghiệm.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày mô hình và kết quả thử nghiệm đánh giá tự động chất lượng ảnh vệ tinh viễn thám với độ phân giải cao và siêu cao. Với ưu điểm là tính đơn giản, tốc độ tính toán nhanh và đặc biệt đã đưa mô hình thị giác người vào quá trình đánh giá chất lượng ảnh. Đây là phương pháp hỗ trợ rất quan trọng để kiểm tra, quản lý sản phẩm viễn thám. So sánh với phương pháp đánh giá chuyên gia, phương pháp tự động thường có chỉ số NIIRS thấp hơn hoặc tương đương cho phép phát hiện những dữ liệu chưa đạt chuẩn. Tuy nhiên, để ứng dụng và thích nghi được với nhiều chủng loại ảnh vệ tinh khác nhau thì cần phải hiệu chỉnh một số tham số thực nghiệm để tăng độ tin cậy của kết quả đánh giá chất lượng ảnh tổng hợp với bộ dữ liệu lớn và đầy đủ ở tại Việt Nam.

Lời cảm ơn: Tác giả xin chân thành cảm ơn đề tài cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường “Nghiên cứu, xây dựng công cụ đánh giá chất lượng phổ của sản phẩm viễn thám quang học độ phân giải cao và siêu cao bằng mô hình toán học phục vụ công tác kiểm tra và nghiệm thu sản phẩm”, mã số TNMT.2017.08.03, do Đài Viễn thám trung ương - Cục Viễn thám quốc gia thực hiện, đã cho phép sử dụng các kết quả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. The Imagery Resolution Assessments and Reporting Standards (IRARS) Committee (1996). *Civil NIIRS Reference Guide*. USA.
- [2]. Lương Chính Kế (2013). *Nghiên cứu xây dựng các quy trình công nghệ hiệu chỉnh và chuẩn hóa dữ liệu ảnh vệ tinh quang học đa thời gian, đa đầu thu, đa độ phân giải nhằm nâng cao chất lượng hình ảnh*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ TN&MT.
- [3]. Nguyễn Văn Hùng (2014). *Nghiên cứu đề xuất biện pháp quản lý chất lượng các loại ảnh viễn thám đang được sử dụng phổ biến hiện nay*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ TN&MT.
- [4]. Nghiêm Văn Tuấn (2018). *Nghiên cứu xây dựng phương pháp kiểm định và hiệu chỉnh chất lượng ảnh viễn thám quang học của Việt Nam*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ TN&MT.
- [5]. Norman B. Nill, Brian Bouzas (1992). *Objective image quality measure derived from digital image power spectra*. Optical Engineering, 31(4).
- [6]. K. N. Ngan, K. S. Leong, and H. Singh (1989). *Adaptive cosine transform coding of images in perceptual domain*. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-37 (11), 1743 - 1750.
- [7]. John A. Saghri, Patrick S. Cheatham, Ali Habibi (1989). *Image quality measure based on a human visual system model*. Optical Engineering, 28(7), 287813.
- [8]. Jalobeanu A., Blanc-Féraud L., and Zerubia J., (2002). *Hyperparameter estimation for satellite image restoration using a MCMC maximum-likelihood method*. Pattern Recognition.
- [9]. Jame J. Burke, H. L. Snyder (1981). *Quality metrics of digitally derived imagery and their relation to interpreter performance*. Proceedings Volume 0310, Image Quality; 25th Annual Technical Symposium, San Diego, United States.
- [10]. A. Weber (1981). *The USC image processing institute database*. University of Southern California Tech. Rep. USCIPI-1060, Los Angeles, CA.
- BBT nhận bài: 18/01/2021; Phản biện xong: 06/02/2021; Chấp nhận đăng: 29/3/2021