

NGHIÊN CỨU MỐI QUAN HỆ GIỮA CÁC THAM SỐ CỦA HỆ THỐNG RA ĐA KHẨU ĐỘ TỔNG HỢP TRÊN VỆ TINH NHỎ

Lê Tiên Dung¹ và Vũ Việt Phương¹

¹ Trung tâm Vệ tinh Quốc gia, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Thông tin chung:

Ngày nhận: 19/09/2015

Ngày chấp nhận: 10/10/2015

Title:

Research on the relationship between the parameters of Synthetic Aperture Radar (SAR) system on small satellite

Từ khóa:

Ra đa, Vệ tinh nhỏ, Ra đa khẩu độ tổng hợp

Keywords:

Radar, Small satellite, Synthetic Aperture Radar

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar (SAR) can provide various advantages, especially its function as an Earth surface observation sensor, it is becoming a very important technology in the remote sensing field. Currently, the demand for employing a SAR sensor onboard a small and low-cost satellite is highly increasing. Therefore, this paper presents research on the relationship between the parameters of the SAR system to design the SAR system on small satellites at low-cost. The paper also presents the advantages and disadvantages while choosing the operational frequency and suitable small size antenna for operational frequency. Moreover, with a small SAR, high quality of image can be achieved through the implementation of transmitter with high duty cycle.

TÓM TẮT

Hệ thống Ra đa Khẩu độ Tổng hợp (RKT) có thể cung cấp rất nhiều ưu điểm khác nhau, đặc biệt là chức năng cảm biến quan sát bề mặt Trái đất nên nó đang trở thành một công nghệ rất quan trọng trong lĩnh vực viễn thám. Hiện nay, nhu cầu sử dụng cảm biến RKT trên vệ tinh nhỏ với chi phí thấp đang gia tăng mạnh mẽ. Vì vậy, bài báo trình bày nghiên cứu về mối quan hệ giữa các tham số của hệ thống RKT nhằm mục đích thiết kế hệ thống RKT trên vệ tinh nhỏ với chi phí thấp. Bài báo đã chỉ ra ưu điểm và nhược điểm khi chọn lựa tần số làm việc và sự phù hợp của ăng ten cỡ nhỏ đối với tần số làm việc. Hơn nữa, bài báo cũng phân tích và đề xuất để một hệ thống RKT nhỏ vẫn có thể cung cấp hình ảnh với chất lượng cao thông qua việc đặt chu trình làm việc của máy phát ở mức cao.

1 GIỚI THIỆU

Hệ thống cảm biến RKT là công nghệ tiên tiến nhất được sử dụng trên các vệ tinh viễn thám hiện nay, nó có nhiều ưu điểm so với việc sử dụng cảm biến quang học và hồng ngoại. Khác với các hệ thống chụp ảnh quang học và hồng ngoại sử dụng nguồn năng lượng từ mặt trời, hệ thống ra đa sử dụng nguồn năng lượng của chính nó để tiến hành chụp ảnh và do đó được gọi là hệ thống chụp ảnh chủ động. Do sử dụng nguồn năng lượng của chính

mình nên hệ thống ra đa cho phép chụp ảnh cả ngày lẫn đêm.

Với những ưu điểm riêng có cảm biến RKT trở thành một công nghệ đặc biệt phù hợp phục vụ nhiệm vụ quan sát bề mặt Trái đất với rất nhiều ứng dụng khác nhau như: theo dõi thủy văn, thăm thực vật, biển, địa chất, khí tượng... Vì vậy, nhu cầu phát triển cảm biến RKT với giá thành thấp đang gia tăng nhanh chóng. Đặc biệt là sự kết hợp giữa vệ tinh nhỏ và cảm biến RKT sẽ cung cấp một

công cụ cực kì hiệu quả để quan sát Trái đất với một chi phí hợp lý.

Bài báo sẽ trình bày về những đặc điểm của RKT phù hợp với vệ tinh nhỏ đồng thời nghiên cứu mối quan hệ giữa các tham số của hệ thống RKT, đặc biệt là mối liên hệ giữa kích thước ăng ten, tần số hoạt động và chu trình làm việc của máy phát nhằm mục đích thiết kế hệ thống RKT trên vệ tinh nhỏ với chi phí thấp. Những kết quả, kiến nghị và hướng nghiên cứu tiếp theo cũng sẽ được trình bày trong phần cuối của bài báo.

2 LÝ THUYẾT RA ĐA KHẨU ĐỘ TỔNG HỢP

Nguyên lý cơ bản của hệ thống chụp ảnh ra đa là sử dụng ăng ten đặt trên máy bay hoặc vệ tinh phát ra các sóng điện từ có bước sóng từ 1 mm tới 1 m (hay có tần số từ 300GHz tới 300MHz) tới bề mặt trái đất sau đó nhận lại năng lượng phản xạ của các sóng này sau khi đã tương tác với bề mặt trái đất bằng ăng ten thu. Thông thường ăng ten của máy thu cũng là ăng ten máy phát. Máy thu sử dụng cường độ của năng lượng phản xạ thu được, sự phân cực của sóng điện từ cũng như thời gian truyền sóng để tạo ra ảnh ra đa. Cường độ và tính chất của năng lượng điện từ tán xạ ngược tới máy thu của hệ thống ra đa sẽ cho biết các thông tin về kích thước, hình dạng, cấu trúc và đặc tính điện từ của bề mặt hoặc các đối tượng trên bề mặt. Có thể nói ra đa là hệ thống chụp ảnh dựa vào khoảng cách được đo bằng thời gian truyền tín hiệu đi và nhận lại tín hiệu phản hồi từ mục tiêu, đối tượng càng gần với ăng ten sẽ được ghi nhận trên ảnh trước, đối tượng ở xa ăng ten sẽ được ghi nhận sau. Cũng chính vì nguyên nhân này nên hệ thống ra đa luôn chụp nghiêng và về một phía của vật mang (máy bay hoặc vệ tinh) vì nếu như ăng ten được đặt ở chính giữa và các búp sóng ra đa được phát ra về cả hai phía thì sẽ không thể phân biệt được những đối tượng có khoảng cách đến ăng ten bằng nhau nhưng nằm về hai phía của ăng ten.

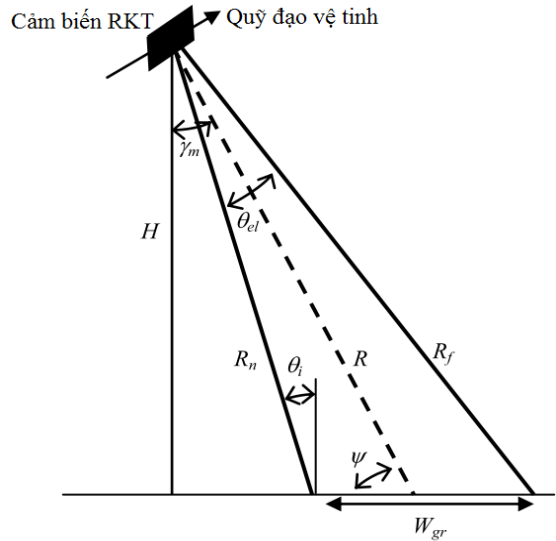
Sơ đồ hình học hệ thống RKT được thể hiện như Hình 1, trong đó H là độ cao cơ sở giữa mặt đất với quỹ đạo bay (quỹ đạo vệ tinh), R là cự li trung bình (trong trường hợp tổng quát được coi là cự li giữa vệ tinh tới mục tiêu quan sát), R_n và R_f là cự li gần nhất và xa nhất từ vệ tinh tới vùng quan sát, γ_m là góc quan sát, ψ là góc lã, θ_i là góc tới và W_{gr} là chiều rộng vùng quan sát trên mặt đất. Góc nửa công suất theo hướng cự li θ_{el} tính theo công thức:

$$\theta_{el} = 0.886 \frac{\lambda}{W} \quad (1)$$

Trong đó λ là bước sóng hoạt động của ra đa và W là độ rộng ăng ten.

Chiều rộng vùng quan sát trên mặt đất W_{gr} theo góc chiếu θ_{el} được tính theo công thức:

$$W_{gr} = \frac{\theta_{el} R}{\cos \theta_i} \quad (2)$$



Hình 1: Sơ đồ hình học hệ thống RKT

Trong hệ thống RKT, công suất thu trung bình P_{RX-ave} tính theo công thức sau:

$$P_{RX-ave} = \frac{P_{TX-ave}}{4\pi R^2} G \sigma \frac{\partial A}{4\pi R^2 \beta} \quad (3)$$

Trong đó P_{TX-ave} là công suất phát trung bình, σ là tiết diện ra đa mục tiêu, A là diện tích ăng ten của RKT, β là tổn hao máy thu, ∂ là hiệu suất ăng ten và G là hệ số khuếch đại ăng ten tính theo công thức:

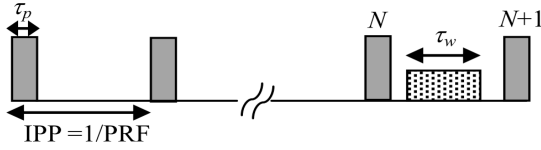
$$G = 4\pi \frac{\partial A}{\lambda^2} \quad (4)$$

Công suất phát trung bình P_{TX-ave} được xác định như sau:

$$P_{TX-ave} = P_T \tau_p PRF = P_t d_T \quad (5)$$

Trong đó P_t là công suất phát đỉnh, τ_p là độ rộng xung phát, PRF là tần số lặp xung, d_T là chu trình làm việc của máy phát.

Xung phát với tần số lặp xung của nó được minh họa như Hình 2. Trong hình này IPP là khoảng thời gian giữa các xung, τ_w là thời gian nhận phản hồi từ đối tượng, N hay $N+1$ tương ứng các xung phát.



Hình 2: Minh họa PRF và τ_w

Để tránh sự không rõ ràng giữa hướng phương vị và hướng cự li, các khái niệm giới hạn PRF tối thiểu (PRF_{min}) và PRF tối đa (PRF_{max}) được đưa ra và tính toán như sau:

$$PRF_{min} = \frac{2v_{st}}{L} \quad (6)$$

$$PRF_{max} = \frac{q}{2\tau_p + \tau_w} = \frac{1}{2\tau_p + \tau_f - \tau_n} \quad (7)$$

Trong đó L là độ dài ăng ten, v_{st} là vận tốc của vệ tinh, τ_f và τ_n được xác định tương ứng bằng $2R_f/c$ và $2R_n/c$ với c là vận tốc ánh sáng.

Bằng cách thay (4) vào (3) chúng ta được:

$$P_{RX-ave} = \frac{P_{TX-ave} G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 \beta} \quad (8)$$

Tổng mức năng lượng tín hiệu E mà hệ thống RKT thu thập được là:

$$E = P_{RX-ave} t_A \quad (9)$$

Trong đó t_A là thời gian hình thành khẩu độ tổng hợp và được tính theo công thức sau:

$$t_A = \frac{\lambda R}{2v_{st} \rho_{az}} \quad (10)$$

Với việc kết hợp (8), (9), (10) chúng ta có được:

$$E = \frac{P_{TX-ave} G^2 \sigma \lambda^3}{2(4\pi)^3 R^3 \beta v_{st} \rho_{az}} \quad (11)$$

Tập âm của máy thu RKT được xác định như sau:

$$N = kT_0 F \quad (12)$$

Trong đó k là hằng số Boltzmann ($k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$), T_0 là nhiệt tạp âm máy thu tính theo thang Kenvil, F là hệ số tạp âm máy thu. Khi đó tỉ số tín trên tạp của hệ thống RKT sẽ là:

$$SNR = \frac{E}{N} = \frac{P_{TX-ave} G^2 \sigma \lambda^3}{2(4\pi)^3 R^3 \beta v_{st} \rho_{az} kT_0 F} \quad (13)$$

Xét với một khu vực phẳng, σ xác định như sau:

$$\sigma = \frac{\sigma^0 \rho_r \rho_{az}}{\cos \psi} \quad (14)$$

Trong đó σ^0 là tiết diện ra đa mục tiêu trên mỗi đơn vị diện tích, ρ_r và ρ_{az} tương ứng là độ phân giải cự li nghiêng và độ phân giải phương vị. Từ các phương trình (4), (13), (14) ở trên ta nhận được:

$$SNR = \frac{P_{TX-ave} A^2 \partial^2 \sigma^0 \rho_r}{8\pi R^3 \lambda k T_0 F \beta v_{st} \cos \psi} \quad (15)$$

Trong cơ sở thiết kế hệ thống RKT trên vệ tinh, thuật ngữ tiết diện ra đa tạp âm tương đương, σ_{NE}^0 , được sử dụng phổ biến khi SNR trong (13) bằng 1, do đó ta có:

$$\sigma_{NE}^0 = \frac{8\pi R^3 \lambda k T_0 F \beta v_{st} \cos \psi}{P_{TX-ave} A^2 \partial^2 \rho_r} \quad (16)$$

Để đạt được ρ_r trong một bức ảnh chụp bởi hệ thống RKT phải thực hiện nén xung trong tiến trình lọc thích ứng, kết quả là ρ_r có thể được tính như sau:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (17)$$

Trong đó B là dải thông xung phát. Độ phân dải cự li mặt đất ρ_{rg} được tính như sau:

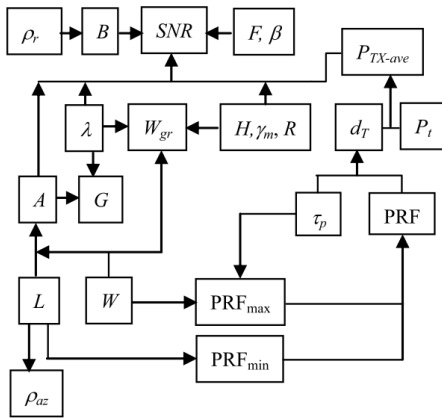
$$\rho_{rg} = \frac{\rho_r}{\cos \psi} \quad (18)$$

Độ phân giải phương vị ρ_{az} được tính theo (19), nhận được thông qua một ăng ten được tổng hợp và xử lý nhất quán giá trị pha của các tín hiệu quay về từ rất nhiều xung liên tiếp.

$$\rho_{az} = \frac{L}{2} \quad (19)$$

3 MỐI QUAN HỆ GIỮA CÁC THAM SỐ HỆ THỐNG RKT

Trên cơ sở lý thuyết RKT, mối quan hệ giữa các tham số của hệ thống RKT được minh họa như ở Hình 3. Dựa trên mối quan hệ giữa các tham số của hệ thống RKT và kết quả phân tích mối liên hệ giữa chúng, nghiên cứu đề xuất các phương án phù hợp nhằm hướng tới việc thiết kế hệ thống RKT trên vệ tinh nhỏ.



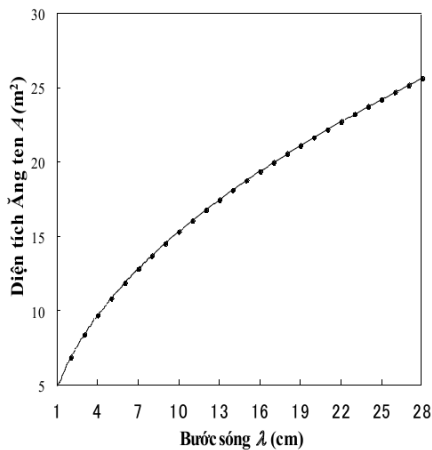
Hình 3: Mối liên hệ giữa các tham số của hệ thống RKT

4 KẾT QUẢ VÀ ĐỀ XUẤT

Thông thường các vệ tinh viễn thám có quỹ đạo có độ cao lớn hơn 500 km do vậy trong nghiên cứu này (tham khảo [6]) đề xuất một số giá trị của tham số đầu vào như sau: $R = 550$ km, $\eta = 0.6$, $T_0 = 290^0$ K, $F = 2$ dB, $\beta = 3$ dB, $v_{st} = 7600$ m/s, $\sigma_{NE}^0 = -21$ dB, $\rho_{rg} = 2$ m và $L = 4$ m. Đề công suất phát thấp ta lựa chọn $\gamma_m = 21^0$. Các tần số hoạt động được lựa chọn tương ứng lần lượt với các băng tần L,C, X là: 1.27 GHz ($\lambda = 24$ cm), 5.3 GHz ($\lambda = 5.7$ cm) và 9.65 GHz ($\lambda = 3.1$ cm).

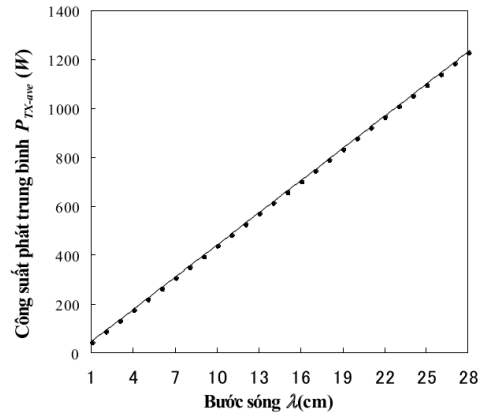
Để tìm ra tần số hoạt động phù hợp với hệ thống vệ tinh cỡ nhỏ ta giả thiết rằng $P_{TX-ave} = 30$ W. Khi đó theo (16) ta có mối quan hệ giữa A và λ được thể hiện như Hình 4.

Từ Hình 4 ta thấy rằng để đạt được cùng một giá trị σ_{NE}^0 thì các ăng ten nhỏ phải sử dụng các tần số có bước sóng ngắn.



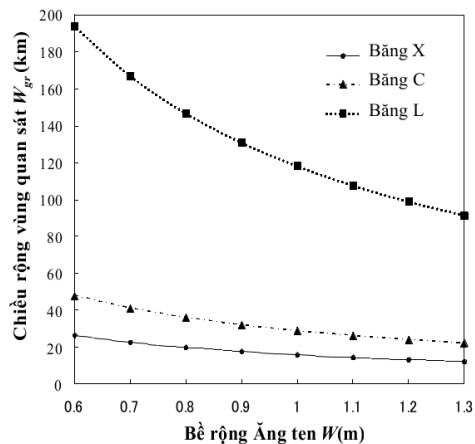
Hình 4: Mối quan hệ giữa A và λ

Như vậy, với cùng một công suất phát trung bình P_{TX-ave} , trong hệ thống vệ tinh cỡ nhỏ với kích cỡ ăng ten gấp nhiều hạn chế, việc sử dụng các tần số hoạt động có bước sóng ngắn sẽ giúp cho ăng ten đạt hiệu suất cao hơn. Tiếp tục xét theo (16) ta thấy khi vệ tinh sử dụng ăng ten cỡ nhỏ hoạt động ở dải tần số cao thì để tăng được tiết diện ra đa tạp âm tương đương σ_{NE}^0 thì P_{TX-ave} nên ở mức thấp. Do vậy, cần phân tích mối quan hệ giữa P_{TX-ave} và bước sóng λ , mối quan hệ này được biểu diễn như Hình 5.



Hình 5: Mối quan hệ giữa P_{TX-ave} và λ

Đến đây ta thấy rằng việc chọn lựa tần số hoạt động trong 3 băng tần L, C và X được quy hoạch cho vệ tinh đã trở nên dễ dàng. Tuy nhiên, không phải đơn giản như vậy, lựa chọn băng tần cao thì có lợi về công suất phát và hiệu quả sử dụng ăng ten nhưng sử dụng băng tần cao cũng có nghĩa là W_{gr} sẽ hẹp lại. Dựa trên (1) và (2), mối quan hệ giữa bề rộng của ăng ten và W_{gr} được thể hiện như Hình 6.

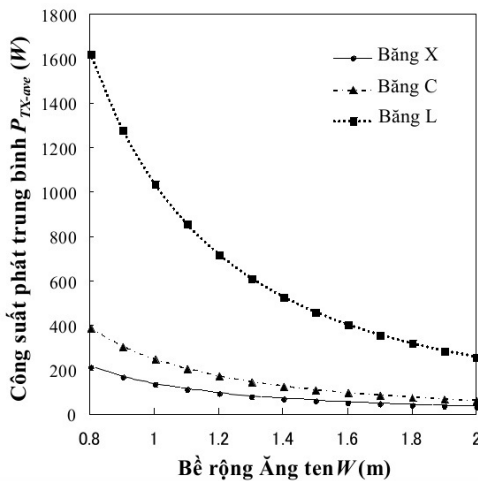


Hình 6: Mối quan hệ giữa W và W_{gr}

Theo Hình 6, khi hệ thống sử dụng cùng một ăng ten thì ở tần số càng cao chiều rộng vùng quan sát của hệ thống càng giảm.

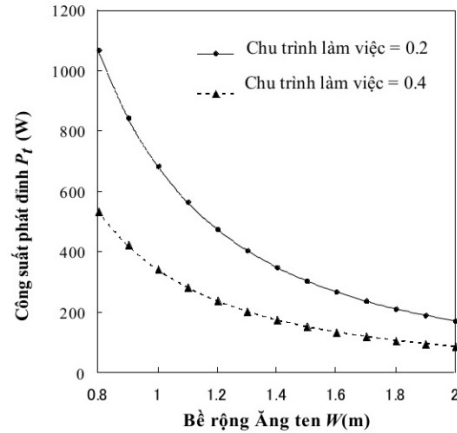
Đối với vệ tinh cỡ nhỏ, kích thước ăng ten có nhiều giới hạn, mối liên hệ giữa bề rộng ăng ten với chiều rộng vùng quan sát đã được trình bày ở trên. Xét đến chiều dài ăng ten, theo (19), để hệ thống có độ phân giải phương vị ρ_{az} cao thì chiều dài ăng ten phải nhỏ, điều này là rất phù hợp với yêu cầu kích thước ăng ten cho vệ tinh nhỏ. Tuy nhiên, với độ phân giải cự li lại khác, muốn độ phân giải cự li tiến tới như độ phân giải phương vị thì ta cần xem xét đến các yếu tố khác.

Theo (17) và (18), để đạt được yêu cầu trên thì dải thông xung phát B phải lớn. Điều này tương đương với việc để đạt được σ_{NE}^0 không đổi thì cần phải tăng P_{TX-ave} . Theo (5), P_{TX-ave} có thể tăng bằng cách tăng P_t . Để tăng P_t thì trong quá trình chế tạo phân cứng phải thêm vào các bộ khuếch đại công suất, thế nhưng điều đó sẽ làm tăng kích thước và khối lượng vệ tinh do đó cần một phương pháp khác hiệu quả hơn. Xét tổng quát, trong quá trình thiết kế hệ thống luôn mong muốn hệ thống có P_t ở mức thấp, có nghĩa là P_{TX-ave} cũng ở mức thấp. Từ (16) ta thấy rằng để giảm P_{TX-ave} thì phải tăng kích cỡ ăng ten, mối quan hệ giữa chúng được chỉ ra như Hình 7.



Hình 7: Mối quan hệ giữa W và P_{TX-ave}

Do vậy, yêu cầu đặt ra là phải làm như thế nào để P_{TX-ave} tăng mà vẫn giữ P_t thấp. Theo (5), ta thấy rằng để P_{TX-ave} tăng mà vẫn giữ P_t thấp thì chu trình làm việc của máy phát d_T phải tăng. Hình 8 chỉ ra rằng khi d_T tăng 2 lần thì P_t giảm 2 lần.



Hình 8: Mối quan hệ giữa W và P_t khi d_T thay đổi

Như vậy, theo cách này sẽ giúp ta đạt được yêu cầu đặt ra, tuy nhiên trong quá trình thiết kế hệ thống thực tế cần phải xem xét mức tăng d_T hợp lý vì d_T tăng cũng có nghĩa là tạo ra những thay đổi với τ_p và PRF kéo theo ảnh hưởng tới IPP và τ_w như minh họa trên Hình 2. Dựa trên những phân tích và đánh giá mối liên quan giữa các tham số như ở trên, nghiên cứu đề xuất các tham số thiết kế đối với hệ thống RKT trên vệ tinh cỡ nhỏ được thể hiện chi tiết như Bảng 1 ứng với các yêu cầu ban đầu: $W = 1$ m, $\sigma_{NE}^0 = -21$ dB, $P_t \approx 350$ W.

Bảng 1: Đề xuất các tham số kỹ thuật hệ thống RKT trên vệ tinh cỡ nhỏ

Tham số	Giá trị
Tần số (GHz)	9.65 (Bảng X)
Độ cao quỹ đạo (km)	510
Góc quan sát ($^\circ$)	21
Độ rộng xung (MHz)	209
σ_{NE}^0 (dB)	-21
Độ phân giải phương vị (m)	2
Độ phân giải cự li (m)	2
Chiều rộng vùng quan sát (km)	16
Kích thước ăng ten (m)	4 x 1
Công suất phát đỉnh (W)	342
Công suất phát trung bình (W)	137
Nhiệt tạp âm máy thu (K)	290
Sai số hình học (dB)	2
Tồn hao hệ thống (dB)	2
Hiệu suất ăng ten	0.6
Chu trình làm việc máy phát	0.4

5 KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Nghiên cứu đã chỉ ra mối quan hệ giữa các tham số phục vụ nhiệm vụ thiết kế chế tạo hệ thống RKT trên vệ tinh cỡ nhỏ. Những phân tích đã được thực hiện, đề xuất đưa ra sử dụng băng tần X, việc

lựa chọn băng tần này phù hợp với một ăng ten nhỏ gọn, có công suất phát trung bình ở mức thấp phù hợp với mục tiêu thiết kế. Nghiên cứu đã đề xuất phương pháp đạt được độ phân giải tốt với P_t thấp bằng việc lựa chọn chu trình làm việc của máy phát d_T một cách hợp lý.

Hướng phát triển tiếp theo là dựa trên kết quả đạt được, thực hiện mô phỏng hệ thống nhằm phục vụ các đánh giá và thử nghiệm các thuật toán xử lý ảnh của hệ thống.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ và tạo điều kiện nghiên cứu của Trung tâm Vệ tinh Quốc gia, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. M.A. Richards. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. IEEE A&E Systems Magazine, vol.22, no.9, pp.5-29, Sept. 2007.

2. R. Birk, W. Camus, E. Valenti and Jr.W. McCandless. Synthetic aperture radar imaging systems. IEEE AES Systems Magazine, vol.10, pp.15-23, Nov. 1995.
3. A. Freeman, W.T.K Jhonson, B. Huneycutt, R. Jordan, S. Hensley, P. Siqueira and J. Curlander. The "myth" of the minimum SAR antenna constraint. IEEE Trans. on Geosciences and Remote sensing vol.38, no.1, pp.320-324, Jan. 2000.
4. M.I Skolnik. Radar Handbook Third Edition. McGraw-Hill, USA, 2008.
5. J.C. Henderson and A.J. Lewis. Principles & Applications of Imaging Radar: Manual of Remote Sensing. Third Edition, Volume 2, John Wiley and Sons, USA, 1998.
6. D.L. Bickel, B.C. Brock and C.T. Allen. Spaceborne SAR Study: LDRD'92 Final Report, 1993. Trục tuyến tại: http://www.ittc.ku.edu/publications/documents/Bickel1993_SAND93-731.pdf