TỐI ƯU CẤU TRÚC QUỸ ĐẠO HỆ THỐNG VỆ TINH GIÁM SÁT LIÊN TỤC KHOẢNG KHÔNG GIAN VŨ TRỤ GẦN TRÁI ĐẤT

Nguyễn Nam Quý*

Tóm tắt: *Bài báo đề xuất một cách tiếp cận mới: giám sát liên tục khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất dựa trên việc xây dựng hệ thống vệ tinh hai tầng quỹ đạo có hướng giám sát ngược nhau, trong đó, mỗi tầng vệ tinh là một hệ thống con độc lập theo mô hình Delta của J.G. Walker (Walker constellation). Mô hình hóa và phân tích bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo hệ thống vệ tinh hai tầng theo tiêu chí tổng vận tốc đặc trưng hệ thống là nhỏ nhất thành các bài toán dạng truyền thống dễ giải quyết hơn (tối ưu cấu trúc quỹ đạo hệ thống vệ tinh một tầng theo tiêu chí tổng số vệ tinh trong hệ thống là nhỏ nhất). Bài báo cũng trình bày cụ thể phương pháp giải các bài toán này. Dựa trên kết quả tính toán thành lập catalog các phương án cấu trúc quỹ đạo tối ưu của hệ thống vệ tinh hai tầng đưa ra các phân tích, đánh giá, so sánh kết quả đạt được với cấu trúc hệ thống vệ tinh một tầng truyền thống.*

Từ khóa: Thuật phóng tàu vũ trụ; Hệ thống vệ tinh; Cấu trúc quỹ đạo; Hệ thống Delta-Walker.

1. MỞ ĐẦU

Tháng 10 năm 1957 vệ tinh Sputnik-1 được tên lửa đẩy R7 phóng lên quỹ đạo thấp của Trái đất, đánh dấu kỷ nguyên chinh phục vũ trụ của loài người. Từ đó đến nay, đã có hàng ngàn vệ tinh nhân tạo được phóng lên các tầng quỹ đạo khác nhau của Trái đất, phục vụ đắc lực cho sự phát triển khoa học kỹ thuật và kinh tế xã hội. Tuy nhiên, cùng với sự phát triển lớn mạnh của ngành khoa học vũ trụ, cũng xuất hiện hàng loạt vấn đề cấp thiết liên quan tới việc giám sát hoạt động của các phương tiện không gian, các vệ tinh nhân tạo, tàu vũ trụ, đặc biệt là việc giám sát rác thải vũ trụ trôi nổi trong một khoảng không gian rộng lớn v.v. Tất cả các nhiệm vụ này, một cách trừu tượng hóa, có thể được hiểu là vấn đề toán học về tối ưu hóa cấu trúc quỹ đạo của hệ thống vệ tinh (HTVT) giám sát liên tục khoảng không gian vũ trụ cho trước có dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất [1, 5, 8, 11, 12].

Tối ưu cấu trúc HTVT được bắt đầu nghiên cứu vào những năm 60 của thế kỷ XX khi giải quyết bài toán giám sát liên tục toàn bộ bề mặt Trái đất. Mô hình đầu tiên được Vargo L.G. và Gobetz F.W. đề xuất khi tối ưu cấu trúc quỹ đạo của hệ thống vệ tinh dạng này gọi là mô hình chuỗi vệ tinh [2, 6]. Mô hình này thuận tiện cho việc tính toán tối ưu hệ thống nhưng yêu cầu tổng số vệ tinh của hệ thống lại rất lớn, điều này hoàn toàn không có lợi cả về mặt kinh tế và kỹ thuật.

Vào những năm 70, những nghiên cứu độc lập của nhà khoa học người Nga Можаев Г.В. và nhà khoa học người Mỹ Walker J.G. được đánh giá là có tính đột phá và tạo một bước phát triển mới cho lĩnh vực tối ưu hóa cấu trúc quỹ đạo của HTVT giám sát liên tục toàn bộ bề mặt của Trái đất. Walker đặt tên mô hình cấu trúc quỹ đạo của ông là "hệ thống Delta"[7], còn Можаев gọi đó là "hệ thống động học đối xứng" [10]. Mô hình này là nền tảng cho những nghiên cứu của các nhà khoa học sau này và đã được ứng dụng trong thực tế xây dựng HTVT định vị toàn cầu GPS và Glonass.

Phát triển những nghiên cứu của Можаев và Walker, Бырков Б.П. đã công bố những công trình nghiên cứu của ông, và thành lập catalog "đặc tính α" của hệ thống Delta với tổng số vệ tinh trong hệ thống nhỏ hơn 24 và với "độ bội" giám sát từ 1÷5 lần [9]. Trong catalog này, Бырков không những đưa ra cấu trúc tối ưu cho HTVT (cấu trúc có đặc tính α nhỏ nhất) mà còn tính toán đặc tính α cho tất cả các trường hợp có thể có của cấu trúc hệ

thống Delta.

Vào những năm 2000, với sự trợ giúp đắc lực của máy tính điện tử, khi nghiên cứu bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo HTVT tầng thấp được xây dựng trên cơ sở hệ thống Delta, Lang T.J. đã công bố một loạt nghiên cứu của ông, mở rộng catalog đặc tính α của hệ thống Delta với tổng số vệ tinh trong hệ thống lên tới 100 [3, 4]. Tuy nhiên, catalog này chưa liệt kê đầy đủ các trường hợp riêng và độ chính xác tính toán còn chưa cao.

Tất cả những nghiên cứu của các nhà khoa học kể trên chỉ dừng lại ở việc tối ưu hóa cấu trúc quỹ đạo của HTVT giám sát liên tục, toàn bộ bề mặt Trái đất mà không thể giám sát khoảng không gian vũ trụ, nơi diễn ra nhiều hoạt động truyền dẫn thông tin giữa các vệ tinh và đặc biệt là giám sát chuyển động của rác vũ trụ. Từ thực tế đó, đòi hỏi phải có những nghiên cứu lý thuyết mới, giải quyết bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo của HTVT có khả năng giám sát liên tục khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất. Liên quan vấn đề này, gần đây có những công bố mới của Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е. và Nguyễn Nam Quý, đề xuất phương án cấu trúc HTVT nhiều tầng, mà mỗi tầng vệ tinh được xây dựng dựa trên mô hình Delta của Walker [1, 5, 8, 11, 12].

Bài báo này đề cập tới một cách tiếp cận mới: giám sát liên tục khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất dựa trên việc xây dựng HTVT hai tầng quỹ đạo có hướng giám sát ngược nhau, trong đó, mỗi tầng vệ tinh là một hệ thống con độc lập theo mô hình Delta của J.G. Walker (Walker constellation). Mô hình hóa và phân tách bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo HTVT hai tầng theo tiêu chí tổng vận tốc đặc trưng hệ thống là nhỏ nhất thành các bài toán dạng truyền thống dễ giải quyết hơn (tối ưu cấu trúc quỹ đạo HTVT một tầng theo tiêu chí tổng số vệ tinh trong hệ thống là nhỏ nhất). Bài báo cũng trình bày cụ thể phương pháp giải các bài toán này. Dựa trên kết quả tính toán, thành lập catalog các phương án cấu trúc quỹ đạo tối ưu của HTVT hai tầng đồng thời đưa ra các phân tích, đánh giá và so sánh kết quả đạt được với cấu trúc HTVT một tầng truyền thống trên cơ sở so sánh tổng vận tốc đặc trưng của hệ thống.

2. CẤU TRÚC QUỸ ĐẠO HAI TẦNG HỆ THỐNG VỆ TINH GIÁM SÁT LIÊN TỤC KHOẢNG KHÔNG GIAN VŨ TRỤ GẦN TRÁI ĐẤT

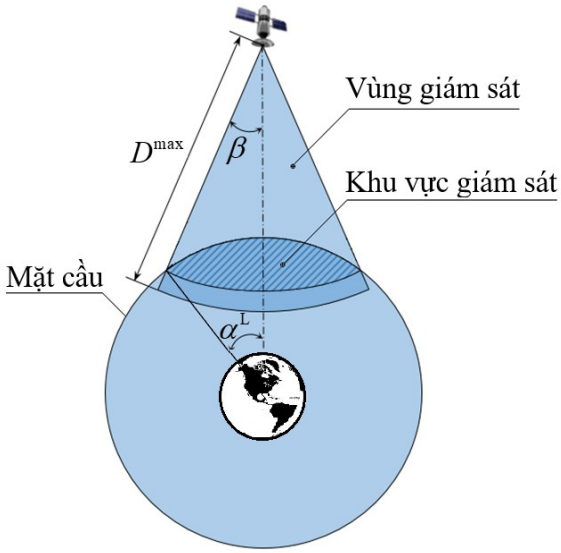
2.1. Phát biểu bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo hệ thống vệ tinh hai tầng quan sát liên tục khoảng không gian vũ trụ gần Trái đất

2.1.1. Một vài khái niệm và tiêu chí tối ưu của bài toán

Vùng giám sát của vệ tinh là khoảng không gian được giới hạn bởi mặt nón, mà đỉnh của nón là vị trí hiện tại của vệ tinh và nửa góc ở đỉnh β của nón là góc mở của thiết bị phát tín hiệu truyền dẫn (ăng-ten) được lắp đặt trên vệ tinh. Cự ly định vị D là khoảng cách từ vệ tinh tới điểm được định vị đang xét. Về lý thuyết có thể $D=\infty$, nhưng thực tế luôn tồn tại giá trị tới hạn $D^{\max}$ mà $D \le D^{\max}$ phụ thuộc vào chất lượng tín hiệu truyền dẫn và công suất phát của ăng-ten. Giả sử có mặt cầu trong không gian đồng tâm với Trái đất thì khu vực giám sát của vệ tinh trên mặt cầu đó là giao của mặt cầu và vùng giám sát hình nón (hình 1). Khu vực giám sát có thể là chỏm cầu hoặc hình vành khăn, trong giới hạn của bài báo này, ta chỉ xét vùng giám sát của vệ tinh trên mặt cầu là mặt chỏm cầu.

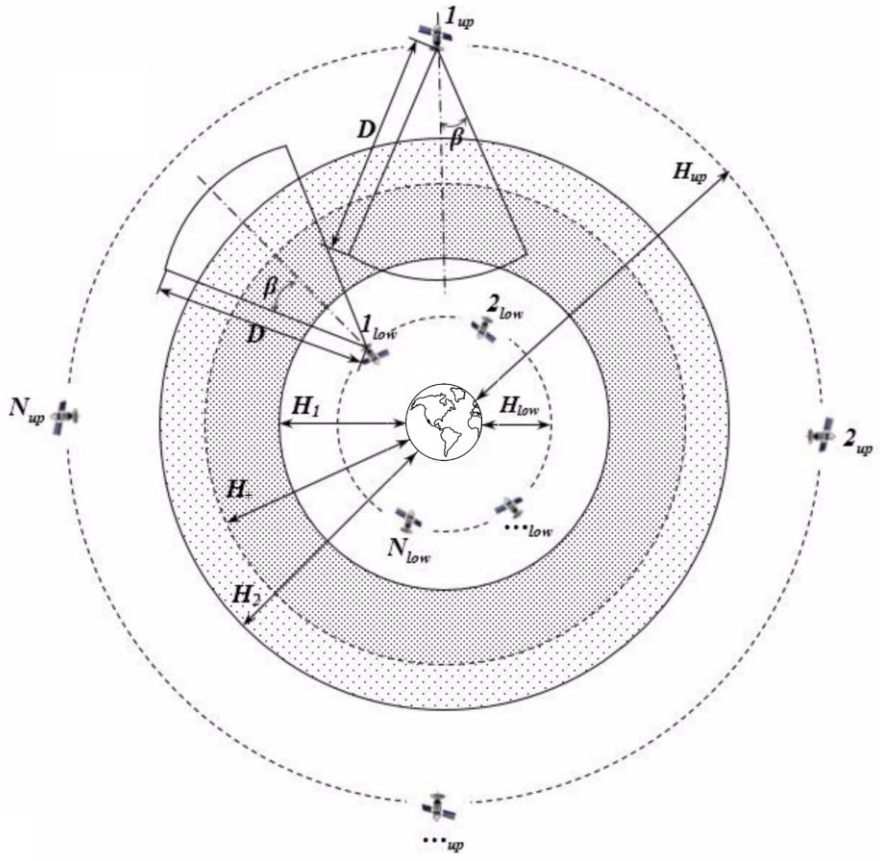
Độ bội giám sát L của HTVT là một số mà với một điểm bất kì thuộc khu vực giám sát, ở mọi thời điểm nó luôn được giám sát bởi ít nhất L vệ tinh của hệ thống.

Đặc trưng α^{L} của HTVT là góc địa tâm khu vực quan sát nhỏ nhất của vệ tinh (hình 1) sao cho HTVT đảm bảo giám sát liên tục và toàn phần mặt cầu L lần.



Hình 1. *Các tham số giám sát của vệ tinh.*

Khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất được hiểu là khoảng không gian được giới hạn bởi hai mặt cầu đồng tâm với Trái đất có độ cao tương ứng là H_1 và H_2 so với bề mặt của Trái đất (hình 2).



Hình 2. *Hệ thống vệ tinh hai tầng quỹ đạo.*

Để giám sát liên tục và toàn bộ khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất $[H_1, H_2]$ ta sử dụng HTVT hai tầng quỹ đạo, mỗi tầng quỹ đạo là một hệ thống con độc lập theo mô hình Delta. Các vệ tinh thuộc quỹ đạo tầng cao có cùng độ cao H_{up}, góc nghiêng quỹ đạo i_{up}, ăng-ten hướng xuống dưới về phía tâm Trái đất với đặc tính là như nhau $(\beta_{up}, D_{up}^{\max})$, còn các vệ tinh thuộc quỹ đạo tầng thấp – H_{low}, i_{low} nhưng ăng-ten hướng lên trên về phía xa dần tâm Trái đất với cùng đặc tính $\beta_{low}, D_{low}^{\max}$ (hình 2), sao cho:

$$\begin{cases} H_{low} < H_1 < H_2 < H_{up} \\ \beta_{low} = \beta_{up} = \beta \\ D_{low}^{\max} = D_{up}^{\max} = D^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Mô hình Delta của Walker [7] được cho bởi bộ ba tham số T, P, F, trong đó, T là tổng số vệ tinh, P là số mặt phẳng quỹ đạo (P là ước số của T), $F = 0,...,(P-1)$ là hệ số dịch chuyển pha chuyển động của các vệ tinh trong mặt phẳng liền kề, khi đó, trạng thái pha của vệ tinh thứ j sẽ được tính theo công thức:

$$\phi_j = \{\Omega_j, u_j\} : \begin{cases} \Omega_j = \Omega_1 + \dfrac{2\pi}{P}(k-1) \\ u_j = u_1 + \dfrac{2\pi}{T}\left[F(k-1) + P(l-1)\right] \end{cases} \quad (2)$$

trong đó, Ω_j, u_j tương ứng là kinh độ điểm nút lên của quỹ đạo và đối số vĩ độ của vệ tinh thứ j ($j = 1,...,T$); $k = 1,...,P$ là chỉ số mặt phẳng quỹ đạo; $l = 1,..,\dfrac{T}{P}$ là chỉ số của vệ tinh trong mặt phẳng quỹ đạo.

Nếu mô hình Delta có N vệ tinh thì trạng thái pha của hệ thống là tập hợp trạng thái pha của tất cả N vệ tinh:

$$\Phi = \Phi(N) = \{\phi_1, ..., \phi_N\} \quad (3)$$

Lúc đó, cấu trúc quỹ đạo của các tầng thấp gồm N_{low} vệ tinh và tầng cao gồm N_{up} vệ tinh được đặc trưng bởi các đại lượng:

$$\begin{aligned} s_{low} &= \{\Phi_{low}(N_{low}), H_{low}, i_{low}\} \\ s_{up} &= \{\Phi_{up}(N_{up}), H_{up}, i_{up}\} \end{aligned} \quad (4)$$

Đối với hệ thống vệ tinh một tầng, tiêu chí được sử dụng để tối ưu hóa cấu trúc quỹ đạo là tổng số vệ tinh trong hệ thống nhỏ nhất, nhưng với hệ thống vệ tinh đa tầng (hệ thống được xây dựng từ những hệ thống con có độ cao quỹ đạo khác nhau) cần phải có tiêu chí khác để lựa chọn cấu trúc quỹ đạo tốt nhất. Ví dụ, một hệ thống có ít vệ tinh hơn có thể không phải là tốt nhất do số lượng vệ tinh lớn hơn nhiều ở tầng quỹ đạo cao hơn, vì thế, đòi hỏi chi phí lớn hơn để phóng và bố trí vị trí của các vệ tinh trên quỹ đạo. Theo [5, 8, 11, 12], để tối ưu cấu trúc quỹ đạo của HTVT đa tầng có thể sử dụng tiêu chí tổng vận tốc đặc trưng của hệ thống là nhỏ nhất (vận tốc đặc trưng của hệ thống là đại lượng tượng trưng, đặc trưng cho năng lượng của hệ thống, là vận tốc cần cung cấp cho tên lửa đẩy tại thời điểm phóng, để đưa các vệ tinh (một lần đẩy có thể đưa cùng lúc nhiều vệ tinh lên quỹ đạo của hệ thống) lên quỹ đạo tròn (với độ cao quỹ đạo và góc nghiêng mặt phẳng quỹ đạo

định trước) và bố trí vị trí các vệ tinh trên quỹ đạo đó). Đối với HTVT hai tầng quỹ đạo, tổng vận tốc đặc trưng ΣV_{II} của hệ thống bằng tổng vận tốc đặc trưng tầng quỹ đạo thấp ΣV_{low} và tầng quỹ đạo cao ΣV_{up} và được tính theo công thức sau [5]:

$$\begin{aligned}\Sigma V_{\text{II}} = \Sigma V_{low} + \Sigma V_{up} = N_{low}\left(\sqrt{\frac{\mu}{R_{\text{e}}}\left(\frac{R_{\text{e}}+2H_{low}}{R_{\text{e}}+H_{low}}\right)} - \omega R_{\text{e}}\cos i_{low}\right) + \\ + N_{up}\left(\sqrt{\frac{\mu}{R_{\text{e}}}\left(\frac{R_{\text{e}}+2H_{up}}{R_{\text{e}}+H_{up}}\right)} - \omega R_{\text{e}}\cos i_{up}\right)\end{aligned} \tag{5}$$

trong đó, $R_{\text{e}} = 6371\text{km}$ là bán kính Trái đất; $\omega = 7,29\cdot 10^{-5}\,\text{s}^{-1}$ là vận tốc góc Trái đất; $\mu = 398600\text{km}^3/\text{s}^2$ là tham số hấp dẫn.

2.1.2. Phát biểu bài toán

Cho biết giới hạn của khoảng không gian vũ trụ hình lớp cầu đồng tâm với Trái đất $[H_1, H_2]$ cần giám sát, các đặc trưng về khả năng giám sát của vệ tinh $(\beta, D^{\max})$ và độ bội giám sát L hãy xác định cấu trúc quỹ đạo tối ưu $S_{\text{II}}^{\text{opt}}$ của HTVT hai tầng quỹ đạo theo mô hình Delta (K_Δ) $S_{\text{II}} = \{s_{low}, s_{up}\}$ để hệ thống đảm bảo giám sát liên tục và toàn phần với tổng vận tốc đặc trưng là nhỏ nhất.

Bài toán có thể được phát biểu dưới dạng biểu thức toán học như sau:

Cho biết: $H_1, H_2, \text{L}, \beta, D^{\max}, K_\Delta$

Cần tìm:

$$S_{\text{II}}^{\text{opt}} = \arg\min_{\{S_{\text{II}}\}}\left[\Sigma V_{\text{II}}\left(S_{\text{II}}\right) \mid H_1, H_2, \text{L}, \beta, D^{\max}, K_\Delta\right] \tag{6}$$

2.2. Phân tách bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo hệ thống vệ tinh hai tầng giám sát liên tục khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất và phương pháp giải

2.2.1. Phân tách bài toán

Ta tạm thời phân tách khoảng không gian $[H_1, H_2]$ thành 2 lớp tiếp giáp nhau bởi mặt cầu có độ cao H_+ thỏa mãn điều kiện $H_1 < H_+ < H_2$. Các vệ tinh tầng cao (độ cao quỹ đạo H_{up}) sẽ giám sát lớp cầu dưới $[H_1, H_+]$ và ngược lại các vệ tinh tầng thấp (độ cao quỹ đạo H_{low}) sẽ giám sát lớp cầu trên $[H_+, H_2]$ (hình 1). Khi đó, H_+ sẽ trở thành một tham số của bài toán tối ưu. Với mỗi giá trị không đổi của H_+ bài toán tối ưu cấu trúc HTVT hai tầng sẽ được tách ra thành hai bài toán độc lập:

Bài toán 1: Tìm cấu trúc tối ưu quỹ đạo HTVT tầng cao đảm bảo nó giám sát liên tục và toàn bộ lớp cầu dưới.

Bài toán 2: Tìm cấu trúc tối ưu quỹ đạo HTVT tầng thấp đảm bảo nó giám sát liên tục và toàn bộ lớp cầu trên.

Cả hai bài toán này đều có chung một dạng, đó là, tìm cấu trúc tối ưu của HTVT một tầng khi biết trước khoảng không gian dạng lớp cầu mà nó cần giám sát liên tục và toàn phần. Để giải bài toán dạng này, cần giải quyết lần lượt các bài toán nhỏ sau:

Bài toán nhỏ 1: Giữa không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất, hãy xác định

vị trí mặt cầu tới hạn, tức là mặt cầu mà ở đó khu vực giám sát của hệ thống là nhỏ nhất.

Bài toán nhỏ 2: Xác định cấu trúc tối ưu của HTVT một tầng đảm bảo hệ thống giám sát liên tục và toàn phần L lần trên mặt cầu tới hạn với tiêu chí tổng số vệ tinh trong hệ thống là nhỏ nhất.

2.2.2. Phương pháp giải

Trên cơ sở phân tách thành những bài toán nhỏ hơn và dữ liệu catalog đặc trưng alpha của mô hình Delta, bài toán tối ưu cấu trúc quỹ đạo HTVT hai tầng giám sát liên tục và toàn bộ L lần khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất có thể giải theo trình tự sau đây.

1. Phân tách khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất thành những mặt cầu có độ cao H_+ ($H_1 < H_+ < H_2$). Với mỗi giá trị của H_+ tiến hành các bước sau:

1.1. Xác định giá trị tối ưu độ cao quỹ đạo của tầng thấp $H_{low}^{\text{opt}}(H_+)$ và tương ứng là giá trị tới hạn của góc địa tâm khu vực quan sát $\alpha_{low}^{\max}(H_+)$ của các vệ tinh tầng thấp. Các đại lượng này là nghiệm của hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \alpha_{low}^{\max} = \arccos\left(\dfrac{\left(R_e + H_2\right)^2 + \left(R_e + H_{low}^{\text{opt}}\right)^2 - (D^{\max})^2}{2\left(R_e + H_2\right)\left(R_e + H_{low}^{\text{opt}}\right)} \right) \\ \alpha_{low}^{\max} = \beta - \arcsin\left(\dfrac{\left(R_e + H_{low}^{\text{opt}}\right)\sin\beta}{R_e + H_+} \right) \end{cases} \tag{7}$$

1.2. Xác định giá trị tối ưu độ cao quỹ đạo của tầng cao $H_{up}^{\text{opt}}(H_+)$ và tương ứng là giá trị tới hạn của góc địa tâm khu vực quan sát $\alpha_{up}^{\max}(H_+)$ của các vệ tinh tầng cao. Các đại lượng này là nghiệm của hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \alpha_{up}^{\max} = \arccos\left(\dfrac{\left(R_e + H_1\right)^2 + \left(R_e + H_{up}^{\text{opt}}\right)^2 - (D^{\max})^2}{2\left(R_e + H_1\right)\left(R_e + H_{up}^{\text{opt}}\right)} \right) \\ \alpha_{up}^{\max} = \arcsin\left(\dfrac{\left(R_e + H_{up}^{\text{opt}}\right)\sin\beta}{R_e + H_+} \right) - \beta \end{cases} \tag{8}$$

1.3. Tìm trong catalog đặc trưng alpha của lớp cấu trúc Delta các cấu trúc quỹ đạo tối ưu của HTVT tầng thấp $s_{low}^{\text{opt}}(H_+)$ và tầng cao $s_{up}^{\text{opt}}(H_+)$ theo tiêu chí tổng số vệ tinh là nhỏ nhất và có đặc trưng alpha α^{L} không lớn hơn giá trị tới hạn của góc địa tâm khu vực quan sát tương ứng:

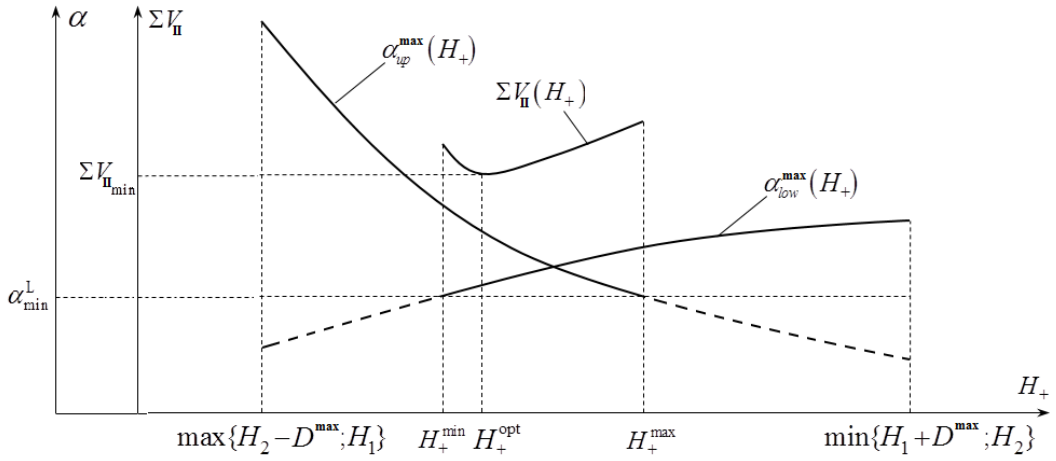
$$\begin{aligned} s_{low}^{\text{opt}}(H_+) &= \underset{s_{low}\left(H_{low}^{\text{opt}}(H_+)\right)\in K_\Delta}{\arg\min} \left[N_{low}\left(H_{low}^{\text{opt}}(H_+)\right) \middle|\, \alpha^{\text{L}}\left(H_{low}^{\text{opt}}(H_+)\right) \le \alpha_{low}^{\max}(H_+) \right] \\ s_{up}^{\text{opt}}(H_+) &= \underset{s_{up}\left(H_{up}^{\text{opt}}(H_+)\right)\in K_\Delta}{\arg\min} \left[N_{up}\left(H_{up}^{\text{opt}}(H_+)\right) \middle|\, \alpha^{\text{L}}\left(H_{up}^{\text{opt}}(H_+)\right) \le \alpha_{up}^{\max}(H_+) \right] \end{aligned} \tag{9}$$

1.4. Tính tổng vận tốc đặc trưng của từng tầng $\Sigma V_{low}(H_+)$, $\Sigma V_{up}(H_+)$ và tổng vận tốc đặc trưng của cả hệ thống $\Sigma V_{\text{II}}(H_+) = \Sigma V_{low}(H_+) + \Sigma V_{up}(H_+)$.

2. Xác định chiều cao tối ưu của mặt cầu tiếp giáp $H_+^{\text{opt}} = \arg\min_{H_+ \in [H_1, H_2]} \Sigma V_{\text{II}}(H_+)$ và tương ứng với giá trị đó là các phương án cấu trúc quỹ đạo tối ưu của các tầng thấp $s_{low}^{\text{opt}}\left(H_+^{\text{opt}}\right)$ và tầng cao $s_{up}^{\text{opt}}\left(H_+^{\text{opt}}\right)$.

3. Thành lập cấu trúc quỹ đạo tối ưu của HTVT hai tầng $S_{II}^{opt} = \left\{s_{low}^{\text{opt}}\left(H_+^{\text{opt}}\right); s_{up}^{\text{opt}}\left(H_+^{\text{opt}}\right)\right\}$.

Trên hình 3 thể hiện dạng đặc trưng của các hàm $\alpha_{low}^{\max}(H_+)$, $\alpha_{up}^{\max}(H_+)$ *và* $\Sigma V_{\text{II}}(H_+)$. Ở đây, giá trị được đánh dấu $\alpha_{\min}^{\text{L}}$ là giá trị đặc trưng alpha giám sát L lần nhỏ nhất được xác định dựa vào catalog đặc trưng alpha của cấu trúc quỹ đạo mô hình Delta.



Hình 3. *Dạng đặc trưng của các hàm* $\alpha_{low}^{\max}(H_+)$, $\alpha_{up}^{\max}(H_+)$ *và* $\Sigma V_{\text{II}}(H_+)$.

3. THÀNH LẬP CATALOG CẤU TRÚC QUỸ ĐẠO TỐI ƯU CỦA HỆ THỐNG VỆ TINH HAI TẦNG GIÁM SÁT LIÊN TỤC KHOẢNG KHÔNG GIAN VŨ TRỤ DẠNG LỚP CẦU ĐỒNG TÂM VỚI TRÁI ĐẤT

Với mỗi khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu giới hạn bởi hai mặt cầu có độ cao H_1, H_2 và các đặc trưng giám sát của vệ tinh ($\beta, D^{\max}$), độ bội giám sát L lần, ta tìm được cấu trúc quỹ đạo tối ưu của từng tầng được cho dưới dạng bộ 3 tham số cấu trúc lớp Delta T, P, F, độ cao quỹ đạo H và góc nghiêng quỹ đạo i. Để thuận tiện cho nghiên cứu thiết kế sơ bộ thuật phóng của HTVT, ta thành lập catalog điện tử các phương án tối ưu của HTVT hai tầng quỹ đạo với các điều kiện ban đầu khác nhau của $H_1, H_2, \beta, D^{\max}, \text{L}$. Sơ đồ cấu trúc của catalog được thể hiện trên hình 4.

Cụ thể hơn, trên bảng 1 thể hiện một trang của catalog tính cho trường hợp $\text{L} = 1$, $\beta = 35^0$, $H_1 = 15000 \div 24000\text{km}$, $H_2 = 28000 \div 38000\text{km}$, dòng cuối cùng của bảng là giá trị của $D^{\max}$. Mỗi ô của bảng là 3 phương án cấu trúc quỹ đạo tối ưu của HTVT:

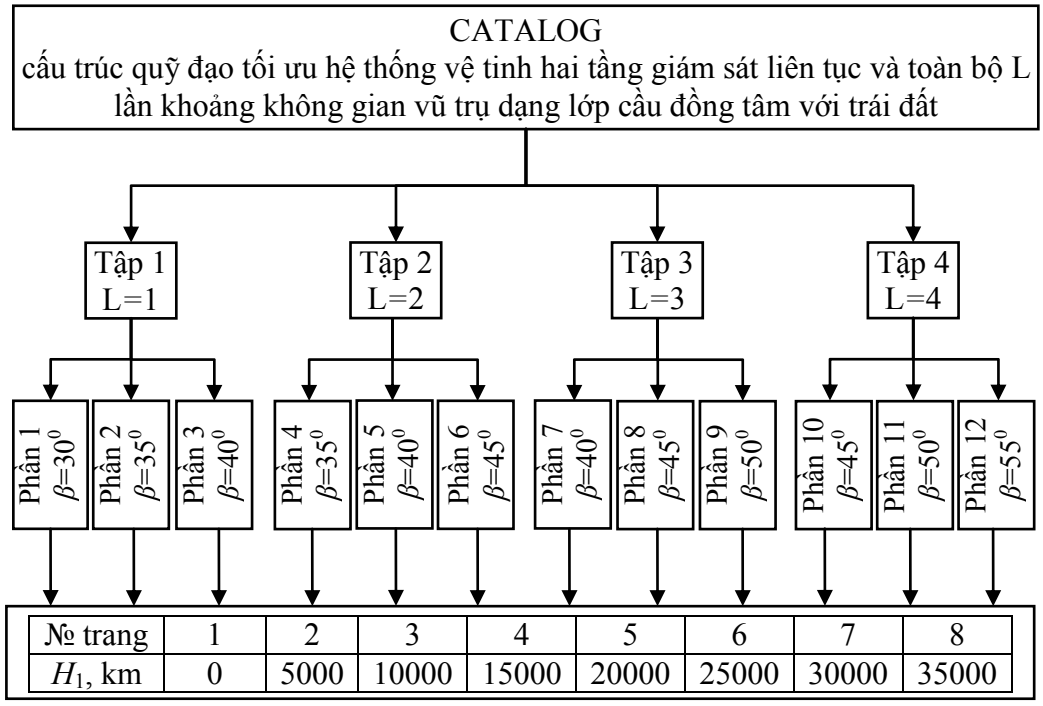
- Phương án 1: gồm dòng 1, 2 là phương án tối ưu của HTVT một tầng cao truyền thống (quỹ đạo của vệ tinh cao hơn lớp không gian cần giám sát, ăng-ten hướng xuống dưới). Trong đó, dòng 1 là giá trị tổng vận tốc đặc trưng của hệ thống, dòng 2 là các tham số cấu trúc quỹ đạo theo thứ tự $T \mid P \mid F \mid H(\text{km}) \mid i(^0)$.

Bảng 1. *Cấu trúc quỹ đạo tối ưu của HTVT hai tầng khi L =1 và β=35⁰.*

H_2,km / H_1,km	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000
28000	823 78|39|32|42783|72.4 383 49|49|22|300|67.7 473 1|1|1|4|3251|53.8 46|23|18|300|67.4 ≈1183 ≈112|-|-|43448|74 418 52|26|21|755|68.1 507 13|13|5|3505|58.4 46|23|18|42|67.4 ≈1763 ≈166|-|-|43950|81 646 73|73|67|2772|80.8 680 18|6|2|3721|56.6 56|28|23|2977|67.6 >2621 >246|-|-|44320|- 911 99|99|46|4714|73.5 874 14|7|4|3578|54.0 79|79|36|4917|72.9 >3368 >316|-|-|44587|- ≈1406 ≈148|-|-|46600|78 1076 22|22|6|3837|58.3 89|89|41|7008|74.1	653 62|31|26|4415|68.6 367 47|47|21|300|66.5 462 10|10|7|3626|47.9 46|23|18|300|67.4 910 86|43|36|4491|7|74.3 367 47|47|21|300|66.5 462 10|10|7|3626|47.9 46|23|18|300|67.4 ≈1337 ≈126|-|-|45535|78 499 59|59|27|1808|68.0 568 13|13|5|3651|58.4 51|51|23|1905|66.8 ≈1989 ≈187|-|-|46003|81 713 79|79|36|3800|72.9 755 17|1|7|7|3842|85|5.5 64|32|27|4010|68.5 >2785 >261|-|-|46352|- 1020 109|109|51|5725|73.7 938 17|1|7|7|3840|7|55.5 81|8|1|87|5992|74.2	516 49|49|22|4534|7|67.7 359 46|23|18|300|67.4 457 1|1|1|4|3506|7|53.8 44|22|17|300|65.6 756 71|71|65|4629|4|81.5 359 46|23|18|300|67.4 457 1|1|1|4|3506|9|53.8 44|22|17|300|65.6 1017 96|48|41|4703|7|4.5 388 48|24|19|808|68.7 485 1|1|1|4|3554|7|53.8 46|23|18|830|67.4 ≈1476 ≈139|-|-|47612|77 586 66|66|6|2853|8|1.3 635 17|1|7|7|4015|0|55.5 52|26|21|3025|68.1 >2200 >206|-|-|48051|- 783 85|85|39|4823|7|3.6 824 14|7|4|3866|3|54.0 73|73|67|4990|80.8 >2938 >275|-|-|48380|- ≈1133 ≈119|-|-|6733|7|8 996 17|1|7|7|4019|3|55.5 86|43|36|7022|74.3	431 41|41|18|4647|6|5.4 343 44|22|17|300|65.6 450 1|1|1|4|3686|3|53.8 43|43|19|300|68.1 590 56|28|23|4757|5|7.6 343 44|22|17|300|65.6 450 1|1|1|4|3686|2|53.8 43|43|19|300|68.1 826 78|39|32|4845|2|72.4 343 44|22|17|300|65.6 450 1|1|1|4|3686|5|53.8 43|43|19|300|68.1 1134 107|107|50|4914|3|73.8 441 52|26|21|1870|68.1 547 1|1|1|4|3700|2|53.8 51|51|23|1892|66.8 ≈1627 ≈153|-|-|49681|78 655 72|72|66|3889|7|9.3 696 14|7|4|4023|9|54.0 61|61|28|4026|68.2 >2374 >223|-|-|50094|- 871 93|93|43|5841|7|2.8 881 16|8|5|4107|9|56.5 76|38|31|6056|74.1	380 36|18|13|4750|4|68.5 336 43|43|19|300|68.1 443 1|1|1|4|3305|5|53.8 42|21|16|300|69.2 485 46|23|18|4876|1|67.4 336 43|43|19|300|68.1 443 1|1|1|4|3305|5|53.8 42|21|16|300|69.2 692 65|65|59|4977|8|79.6 336 43|43|19|300|68.1 443 1|1|1|4|3305|5|53.8 42|21|16|300|69.2 913 86|43|36|5059|2|74.3 372 46|23|18|853|6|7.4 470 1|1|1|4|3847|6|53.8 44|22|17|866|6|5.6 998 ≈119|-|-|51238|7|8 518 59|59|27|2923|6|8.0 594 13|13|5|4100|5|58.4 52|26|21|3009|6|8.1 ≈1793 ≈168|-|-|51743|8|1 719 78|39|32|4920|7|2.4 768 17|1|7|7|4318|6|55.5 64|32|27|5120|6|8.5	339 32|32|28|4843|4|73.8 329 42|21|16|300|69.2 434 1|1|1|4|4002|5|53.8 41|41|18|300|65.4 381 41|41|18|4985|1|65.4 329 42|21|16|300|69.2 434 1|1|1|4|4002|6|53.8 41|41|18|300|65.4 464 44|22|17|5215|9|65.6 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4002|5|53.8 41|41|18|300|65.4 624 59|59|27|5323|9|68.0 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4009|2|53.8 41|41|18|300|65.4 839 79|79|36|5411|9|72.9 349 43|43|19|893|6|8.1 463 1|1|1|4|4009|3|53.8 43|43|19|893|6|8.1 1106 104|52|45|5483|1|73.6 475 54|27|22|2986|6|7.3 572 1|1|1|4|4150|5|53.8 52|26|21|2996|6|8.1	283 27|9|5|4926|7|59.9 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4109|1|53.8 41|41|18|300|65.4 381 36|18|13|5084|7|68.5 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4109|2|53.8 41|41|18|300|65.4 519 49|49|22|5443|4|67.7 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4277|4|53.8 41|41|18|300|65.4 715 67|67|6|5544|0|78.9 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4277|4|53.8 41|41|18|300|65.4 904 85|85|39|5626|5|73.6 391 46|23|18|1972|6|7.4 506 1|1|1|4|4277|5|53.8 46|23|18|1972|6|7.4	241 23|23|14|5000|8|58.7 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4272|5|53.8 41|41|18|300|65.4 326 31|31|9|5175|1|60.9 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4272|5|53.8 41|41|18|300|65.4 413 39|39|17|5321|5|68.8 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4277|5|53.8 41|41|18|300|65.4 519 49|49|22|5443|4|67.7 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4445|1|53.8 41|41|18|300|65.4 715 54|27|22|5668|0|67.3 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4445|1|53.8 41|41|18|300|65.4 904 73|73|67|5762|2|80.8 332 41|41|18|928|6|5.4 447 1|1|1|4|4445|2|53.8 41|41|18|928|6|5.4	210 20|10|7|5066|1|56.8 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4521|5|53.8 41|41|18|300|65.4 273 26|26|16|5256|6|59.5 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4450|5|53.8 41|41|18|300|65.4 372 35|35|13|5418|2|74.7 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4450|5|53.8 41|41|18|300|65.4 445 42|21|16|5554|3|69.2 320 41|41|18|300|65.4 434 1|1|1|4|4451|5|53.8 41|41|18|300|65.4 781 73|73|67|5762|2|80.8 332 41|41|18|928|6|5.4 447 1|1|1|4|4452|5|53.8 41|41|18|928|6|5.4	178 17|1|7|7|5123|2|55.5 305 39|39|17|300|6|8.8 433 13|13|5|4806|8|58.4 38|1|9|1|4300|6|7.3 242 23|23|1|4|5329|5|58.7 305 39|39|17|300|6|8.8 433 13|13|5|4802|5|58.4 38|1|9|1|4300|6|7.3 316 30|10|6|5506|4|60.6 305 39|39|17|300|6|8.8 433 13|13|5|4802|5|58.4 38|1|9|1|4300|6|7.3 392 37|37|16|5656|8|66.4 305 39|39|17|300|6|8.8 433 13|13|5|4802|5|58.4 38|1|9|1|4300|6|7.3 487 46|23|18|5783|8|67.4 305 39|39|17|300|6|8.8 433 13|13|5|4802|5|58.4 38|1|9|1|4300|6|7.3 647 61|61|28|5890|2|68.2 305 39|39|17|300|6|8.8 433 13|13|5|4802|7|58.4 38|1|9|1|4300|6|7.3
36000										
34000										
32000										
30000										
28000										
D^{max},km	30000	31000	32000	33000	34000	35000	36000	37000	38000	39000

- Phương án 2: gồm dòng 3, 4 là phương án tối ưu của HTVT một tầng thấp truyền thống (quỹ đạo của vệ tinh thấp hợp lớp không gian cần giám sát, ăng-ten hướng lên trên). Trong đó, dòng 3 là giá trị tổng vận tốc đặc trưng của hệ thống, dòng 4 là các tham số cấu trúc quỹ đạo theo thứ tự $T \mid P \mid F \mid H(\mathrm{km}) \mid i(^0)$.

- Phương án 3: gồm dòng 5, 6, 7 là phương án tối ưu của HTVT hai tầng. Trong đó, dòng 5 là giá trị tổng vận tốc đặc trưng của hệ thống, dòng 6 là tham số cấu trúc quỹ đạo của tầng cao theo thứ tự $T_{up} \mid P_{up} \mid F_{up} \mid H_{up}(\mathrm{km}) \mid i_{up}(^0)$, dòng 7 là tham số cấu trúc quỹ đạo của tầng thấp theo thứ tự $T_{low} \mid P_{low} \mid F_{low} \mid H_{low}(\mathrm{km}) \mid i_{low}(^0)$.



Hình 4. *Sơ đồ catalog các phương án tối ưu cấu trúc quỹ đạo hệ thống vệ tinh hai tầng.*

Catalog này cho phép so sánh (theo tiêu chí tổng vận tốc đặc trưng của hệ là nhỏ nhất) cấu trúc quỹ đạo của HTVT giám sát liên tục và toàn phần khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất ở các phương án khi hệ thống chỉ có một tầng theo cách tiếp cận truyền thống và hệ thống hai tầng quỹ đạo theo đề xuất của bài báo. Điều này được thể hiện trên bảng 1, với các ô có nền màu xanh là hệ thống 2 tầng tốt hơn, các ô có nền màu trắng là hệ thống một tầng thấp tốt hơn còn ô có nền màu vàng là hệ thống một tầng cao tốt hơn. Phù hợp với giá trị ban đầu của các tham số đầu vào mà ta có sự lựa chọn cấu trúc quỹ đạo cho hệ thống một cách hợp lý ở dạng một tầng hay hai tầng quỹ đạo. Từ bảng 1 có thể thấy, phương án cấu trúc hệ thống hai tầng quỹ đạo tốt hơn là một tầng khi lớp không gian vũ trụ cần giám sát có bề dày lớn, giới hạn H_1 nhỏ hơn và cự ly giám sát không xa. Phương án một tầng cao tốt hơn khi khoảng không gian cần giám sát có bề dày mỏng, cự ly giám sát của vệ tinh lớn, H_1 lớn hơn nhưng H_2 lại nhỏ.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên mô hình cấu trúc Delta của Walker, bài báo đã đưa ra phương pháp xây dựng cấu trúc quỹ đạo tối ưu của HTVT hai tầng giám sát liên tục và toàn bộ khoảng không gian

vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất theo tiêu chí tổng vận tốc đặc trưng của hệ thống là nhỏ nhất. Tùy thuộc vào các điều kiện ban đầu về kích thước của lớp không gian vũ trụ cần giám sát và đặc trưng thiết bị giám sát lắp đặt trên vệ tinh mà cấu trúc hai tầng quỹ đạo thể hiện tốt hơn hay kém hơn cấu trúc một tầng truyền thống.

Nghiên cứu này đề xuất một cách tiếp cận mới, mang tính lý thuyết, trong việc giải quyết bài toán giám sát khoảng không gian vũ trụ dạng lớp cầu đồng tâm với Trái đất, là bài toán cơ bản bước đầu cần giải quyết trong quá trình thiết kế sơ bộ thuật phóng của HTVT, đặc biệt với các HTVT mini (nanosatellite) yêu cầu tổng số vệ tinh trong hệ thống lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Daniele Mortari, Yury N. Razoumny, Oleg E. Samusenko, Viktoria D. Novikova, Nguyen Nam Quy, "*The Algorithm for Solving the Task of Choosing the Optimal Two-Tier Satellite Constellation for Continuous Coverage of the Spherical Layer of Near-Earth Space*", Published by UNIVELT, Inc., USA, Advances in the Astronautical Sciences, 2020, vol.170, pp.463-473.

[2]. Gobetz F.W., "*Satellite networks for global coverage*", Advances in astronautical sciences, Vol. 9(1963), pp. 134-156.

[3]. Lang T.J., "*Optimal low earth orbit constellations for continuous global coverage*", AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Victoria, BC, Aug. 16-19 1993, No. 597, 17 p.

[4]. Lang T.J., "*Walker Constellations to Minimize Revisit Time in Low Earth Orbit*", 13-th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Ponce, Puerto Rico, 9–13 February, 2003, paper AAS 03-178.

[5]. Razoumny Yu.N., "*Fundamentals of the Route Theory for Satellite Constellation Design for Earth Discontinuous Coverage Part 3: Low-Cost Earth Observation with Minimal Satellite Swath*", Acta Astronautica, 2016, vol. 129, pp. 447–458.

[6]. Vargo L.G., "*Orbital patterns of satellite systems*", The Journal of the Astronautical Sciences, Vol. 7, № 4(1960), pp.78-86.

[7]. Walker J.G., "*Satellite Constellations*", Journal of the British Interplanetary Society, Vol. 24(1984), pp. 369–384.

[8]. Yury N. Razoumny, Oleg Samusenko, Nguyen Nam Quy, "*Satellite Constellation Design for Near Earth Space Coverage Basing on Two-Tier Satellite Structures*", Advances in the Astronautical Sciences, 2017, Vol. 161, pp. 1142-1149.

[9]. БырковБ.П., "*Каталогсистемынепрерывногомногократногообзорасферы*", т.1-т.5, Москва, 1977.

[10]. МожаевГ.В., "*Задачаонепрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы*",I. Космические исследования, 1972, т. 10, вып. 6, с. 833–840.

[11]. Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, "*Анализ оптимальных вариантов двухъярусных спутниковых систем непрерывного обзора сферического слоя околоземного космического пространства*", Вестник Московского авиационного института, 2018, Т.25, № 3, с.171-181.

[12]. Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, "*О задаче оптимизации орбитальной структуры многоярусных спутниковых систем непрерывного обзора околоземного пространства*", Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2018, №4(697), с. 61-72.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF ORBITAL STRUCTURE OF SATELLITE CONSTELLATIONS TO PROVIDE CONTINUOUS COVERAGE OF NEAR-EARTH SPACE SPHERICAL LAYER

In the paper, a completely new approach: continuous monitoring of near-Earth space spherical layer based on the construction of two-tiers orbiting satellite constellation with opposite viewing directions, in which each the satellite tier is an independent subsystem that follows the "Delta-system" model of WalkerJ.G. (Walker constellation) is proposed. Modeling and analyzing the problem of optimizing the structure of two-tiers satellite constellations in orbit according to the criterion of the total system characteristic velocity is the smallest into the more traditional problems which are easier to solve - optimizing the system structure one-tier satellite constellation according to the criteria that the total number of satellites in the system is the smallest. In this article, methods of solving these problems are also presented. Based on the results of the calculation and establishment of the catalog of the optimal orbital structure plans of the two-tier satellite constellation, the analysis, evaluation and comparing the achieved results with the satellite constellation structure traditional one-tier are made.

Keywords: Spacecraft ballistics; Satellite constellation; Orbital structure; Walker constellation.

Nhận bài ngày 21 tháng 6 năm 2020
Hoàn thiện ngày 18 tháng 8 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 15 tháng 10 năm 2020

Địa chỉ: Học viện Kỹ thuật quân sự.
*Email: sky_moscow@mail.ru.