

THIẾT KẾ HỆ ẲNG TEN THU PHÁT CHO HỆ TRUYỀN TIN LASER Ở KHOẢNG CÁCH NGẮN

DESIGN OF TRANSCEIVER ANTENNA SYSTEM FOR SHORT DISTANCE LASER TRANSMISSION SYSTEM

ThS. Tạ Trung Kiên¹, TS. Lương Văn Cường^{1*}, TS. Cao Xuân Bình²

¹Viện Vật lý Kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

²Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo đã trình bày các phương án thiết kế hệ ăng ten thu phát cho hệ truyền tin laser ở khoảng cách ngắn. Dựa trên các nguyên lý quang hình, một hệ quang có thể thu gom tia laser ở khoảng cách trên 1km, lọc được nhiễu tín hiệu, với góc thu lớn đến 26° và các góc phát 6° đã được thiết kế. Hơn nữa, hệ này bảo đảm năng lượng phân bố đều trong tiết diện ngang khi sử dụng nguồn phát laser bán dẫn có dạng mảng ma trận chip 6x14. Kết quả thu được sẽ định hướng cho việc thiết kế, chế tạo hệ truyền tin laser trong thời gian tới.

Từ khóa: Laser bán dẫn; Ăng ten thu; Ăng ten phát; Truyền tin laser; Hệ quang laser.

ABSTRACT

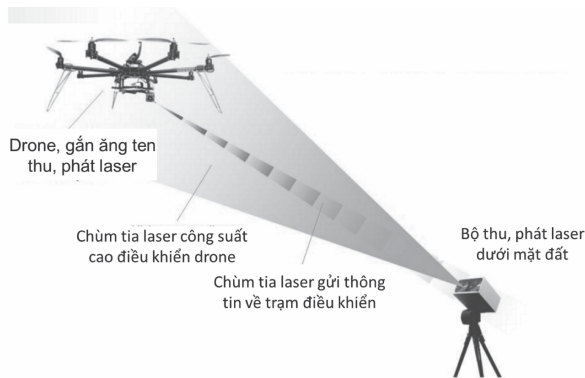
The article presented the design options of the transceiver for the laser communication. The designed optical system satisfied the technical criteria: obtaining laser energy at a distance of over 1km, filtering signal interference, and receiving a large receiving angle of up to 26°. The transmitting antenna ensures the transmission angle of 6°, at the same time creating laser beam with evenly distributed energy when using a semiconductor laser emitter in the form of a matrix array of 6x14 laser chips.

Keywords: Semiconductor laser; Receiving antenna; Transmitting antenna; Laser transmission; Optical laser system.

1. GIỚI THIỆU

Truyền tin laser là một trong những lĩnh vực truyền thông quang học, đặc biệt trong thông tin không gian và quân sự như truyền thông vệ tinh cho các hoạt động nghiên cứu vũ trụ, thu phát thông tin trong quân sự [1, 2]. Dựa trên ưu điểm như: tín hiệu laser truyền có tỷ

lệ nhiều thấp, cộng với khả năng chống nhiễu sóng vô tuyến, truyền tin laser đã được quan tâm nhiều và trở thành một trong những lĩnh vực nghiên cứu quan trọng trong truyền thông không dây [3]. Trong khoảng cách ngắn, laser bán dẫn được sử dụng như nguồn phát, ví dụ trong hệ truyền tin điều khiển drone (hình 1) [2].



Hình 1. Mô hình hệ truyền tin laser điều khiển drone

Laser bán dẫn nằm trong vùng sóng ngắn ($0,8-1,55 \mu\text{m}$), do đó có thể bị suy giảm trên quãng đường truyền qua môi trường khí quyển, đặc biệt, độ phân kỳ của laser này rất lớn và không đồng nhất theo tiết diện chùm, điều này sẽ ảnh hưởng rất lớn đến khả năng thu và xác định hướng chùm tia khi sử dụng đầu thu dạng ma trận. Để vượt qua các nhược điểm trên, trong lĩnh vực truyền thông vũ trụ, thông thường hệ kính viễn vọng: khúc xạ, phản xạ, và Catadioptrics được sử dụng như một ăng ten thu [4, 5]. Trong các hệ đó, hệ Catadioptrics được sử dụng phổ biến bởi có ưu điểm như đa năng trong thiết kế, chất lượng tốt, kết hợp các ưu điểm quang học của cả thấu kính và gương. Tuy nhiên, các hệ ăng ten trên thường thu hoặc phát chùm tia laser có góc phân kỳ rất nhỏ, sẽ không phù hợp trong những bài toán truyền tin ở khoảng cách ngắn (1-2 km), góc phân kỳ chùm tia laser theo hai chiều X và Y trong không gian lớn (đến 6°) [4-6]. Đặc biệt, khi tích hợp vào các hệ quan sát gắn lên drone, hệ ăng ten phải có kích thước nhỏ gọn, dễ dàng tháo lắp. Như vậy, cần có một hệ ăng ten thiết kế phù hợp với hệ truyền tin khoảng cách ngắn. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày phương án thiết kế hệ ăng ten thu-phát laser với góc phát lớn tới 6° . Hệ được mô phỏng trên phần mềm Zemax và được chế tạo, thử nghiệm ngoài thực địa, đảm

bảo truyền tin ở khoảng cách 1 km.

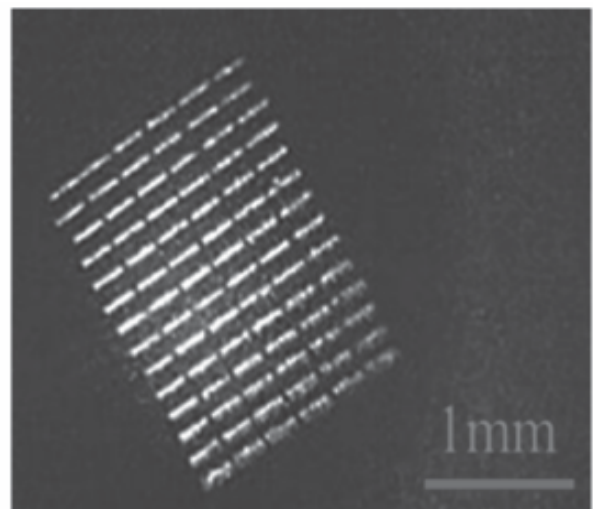
2. TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ HỆ QUANG

2.1. Các thông số cần đạt của hệ

Ăng ten cho truyền tin laser khoảng cách ngắn đến 2 km cần đạt các thông số quang sau đây: góc phát là 6° , góc thu lớn hơn 26° . Yêu cầu của hệ quang laser phát là phân bố năng lượng đều trên mặt cắt ngang của chùm tia laser, đảm bảo đầu thu laser khi dịch chuyển trong không gian (được gắn trên drone) thu được năng lượng ổn định.

2.2. Thiết kế hệ ăng ten phát

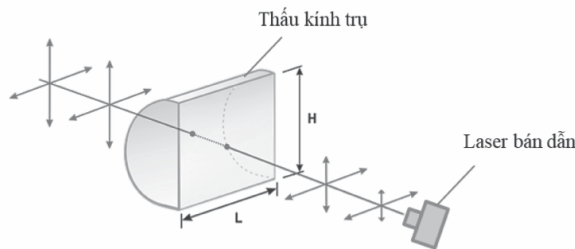
Đầu thu phát được thiết kế phù hợp với nguồn laser bán dẫn ILPI-137A [8] với các tham số như sau: Góc phát laser theo hai chiều vuông góc và song song với p-n là 30° và 12° ; Kích thước toàn mặt chip laser phát là $1,3 \times 1,4 \text{ mm}$; Số lượng ma trận chip laser theo hai chiều: 6×14 ; Phân bố năng lượng theo tiết diện ngang như trên hình 2.



Hình 2. Hình dạng ma trận chip laser bán dẫn ILPI-137A [8]



Hình 2 cho thấy năng lượng laser phân bố không đều trên tiết diện ngang, góc phân kỳ cũng khác nhau quá lớn ($30^\circ \times 12^\circ$), do đó, ngoài các linh kiện chuẩn trực chùm tia, cần có thêm hai thấu kính trụ có tiêu cự khác nhau đặt vuông góc như hình 3 [6].



Hình 3. Nguyên lý biến đổi vết của chùm tia laser khi đi qua thấu kính trụ

Kính trụ được đặt trước đầu phát laser sao cho mặt biên song song với tiếp xúc p-n của laser bán dẫn, khi đó thấu kính trụ chỉ đóng vai bản mặt song song; Mặt đáy vuông góc với tiếp xúc p-n có vai trò như là một thấu kính. Như vậy, theo hướng song song với tiếp xúc p-n, góc phân kỳ của chùm tia laser được giữ nguyên (12°). Trong khi đó, theo hướng vuông góc với tiếp xúc p-n, góc phân kỳ của chùm tia laser được biến đổi từ 30° giảm tới gần 12° . Sau khi truyền qua thấu kính trụ, chùm tia laser tiếp tục đi qua hệ vật kính để tiếp tục biến đổi góc phân kỳ về 6° . Khoảng cách tiêu cự của thấu kính trụ và khoảng cách từ thấu kính trụ đến đầu phát laser bán dẫn được tính theo các công thức trong [9]. Như vậy, khi sử dụng thấu kính trụ sẽ đảm bảo góc mở chùm tia theo hai hướng song song và vuông góc với tiếp xúc p-n của laser bán dẫn là bằng nhau. Tuy nhiên, sử dụng thấu kính trụ cuối cùng cũng không thể cho phân bố trường laser cũng như góc phân kỳ đều tuyệt đối theo khoảng cách hướng tâm mà có sai số nhất định. Sai số đó có thể thay đổi và xác định lớn hay nhỏ phụ thuộc vào nhu cầu của thiết bị và độ nhạy của đầu thu. Bên cạnh đó, nhận thấy rằng laser bán dẫn ILPI-137° có dạng ma trận

là tổ hợp 6x14 chip bán dẫn rất nhỏ, xếp cạnh nhau. Do vậy, có thể coi chúng là vật phát sáng có kích thước là 1,3x1,4 mm, có thể xem là đều theo hai trục trên tiết diện ngang và đặt tại mặt phẳng tiêu diện của hệ vật kính. Trên cơ sở đó, hệ ăng ten phát cũng có thể thiết kế như một hệ vật kính được ghép từ các thấu kính cầu. Để phân bố năng lượng của từng vị trí theo mặt cắt ngang của chùm tia là tương đối đều nhau, các góc phát của các chip riêng rẽ phải chồng lấn lên nhau, khoảng cách từ các chip đến bề mặt thấu kính sẽ được tối ưu trên phần mềm Zemax. Tuy nhiên, để dễ dàng khẳng định sai số của hệ quang, một hệ ăng ten phát sử dụng thấu kính trụ sẽ được mô phỏng và so sánh.

2.3. Tính toán hệ ăng ten thu

Hệ quang thu được dùng để nhận bức xạ từ đầu phát laser, lọc phổ bức xạ laser khỏi nhiễu nền, hội tụ chùm bức xạ laser vào bề mặt thu của APD và biến đổi bức xạ quang thành tín hiệu điện cho bảng mạch xử lý tín hiệu. Để thu được các bức xạ laser từ đầu phát thì trường nhìn của hệ quang thu phải bao trùm góc mở của chùm laser. Do góc mở của chùm laser phát là 6° , chúng tôi đặt ra yêu cầu trục của thiết bị bay (drone) có góc dao động là 10° nên trường nhìn của hệ quang phải lớn hơn 26° . Bỏ qua ảnh hưởng yếu tố nhiễu động khí quyển đến sự tán xạ của chùm tia laser khi truyền trong môi trường không khí, đường kính hiệu dụng nhỏ nhất để đầu thu có thể thu được tín hiệu xung laser tại cự ly L có thể được tính sơ bộ theo công thức sau [7]:

$$E_{thu} = \frac{E_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}{e^{\alpha L}} \left(\frac{D_{eff}}{D_L} \right)^2$$

Trong đó: E_0 là năng lượng xung laser phát ra; E_{thu} là năng lượng bức xạ nhỏ nhất của chùm tia laser mà đầu thu có thể thu được đối với mỗi bước sóng và độ rộng xung cho trước;

τ_1, τ_2 là hệ số truyền qua của hệ quang phát và thu; D_{eff} là đường kính hiệu dụng hệ quang thu; α là hệ số suy hao trong khí quyển; D_L là đường kính vết laser tại cự ly L .

Hệ được tính toán dựa trên một bộ tham số được lựa chọn từ đầu phát laser và đầu thu định hướng như sau: $E_0 = 0,05 \text{ mJ}$; đầu thu photodiode là loại APD S8890 có $E_{\text{thu}} = 6.10^{-10} \text{ J}$; các đại lượng $\tau_1 = 0,9$; $\tau_2 = 0,9$; $\alpha = 0,5 \text{ km}^{-1}$ [7]; $L = 1 \text{ km}$, và theo công thức (1) $D_{\text{eff}} \approx 3 \text{ mm}$. Như vậy, đường kính hiệu dụng của hệ quang thu phải lớn hơn 3 mm để đảm bảo đầu thu thu được tín hiệu xung laser tại cự ly 1 km. Để đảm bảo việc thu tín hiệu xung laser chính xác, tránh ảnh hưởng của nhiễu sáng gây ra bởi môi trường xung quanh thì trong ống ten thu phải đặt thêm một phin lọc sáng, phin lọc này chỉ cho phép ánh sáng trong dải hẹp đi qua. Đối với hệ quang trên thì phin lọc sẽ phải đặt ở ngoài cùng của hệ quang. Đối với đầu thu photodiode là loại APD S8890 có đường kính $\phi = 0,5 \text{ mm}$, hệ quang thu phải có trường nhìn 26° . Nếu đầu thu đặt tại mặt phẳng tiêu diện của hệ thì khi đó tiêu cự của hệ sẽ bằng $\phi/(2 \cdot \tan 130) = 1,08 \text{ mm}$. Tiêu cự quá nhỏ như vậy khiến cho việc thiết kế và gia công chế tạo hệ quang là rất khó. Do đó, phương án hợp lý là mặt phẳng đầu thu sẽ được đặt tại diafram thị độ của hệ quang. Sơ đồ hệ quang được thể hiện trên hình 7.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG, THẢO LUẬN

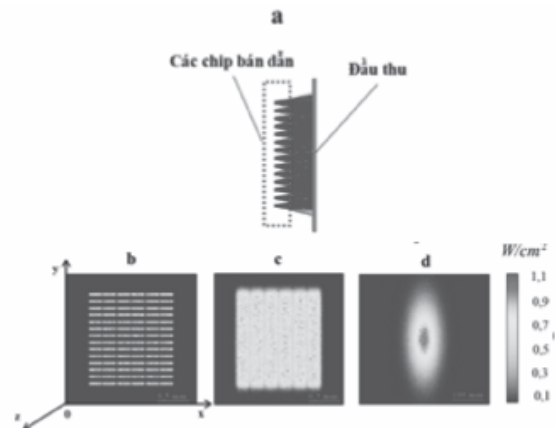
3.1. Kết quả mô phỏng hệ ống ten phát

Hệ ống ten phát được mô phỏng trên phần mềm Zemax ở chế độ không tuần tự (Non-Sequential Component).

a) Phân bố năng lượng của chùm tia bán dẫn

Sơ đồ mô phỏng phân bố năng lượng

của chùm tia laser bán dẫn được chỉ ra trên hình 4.



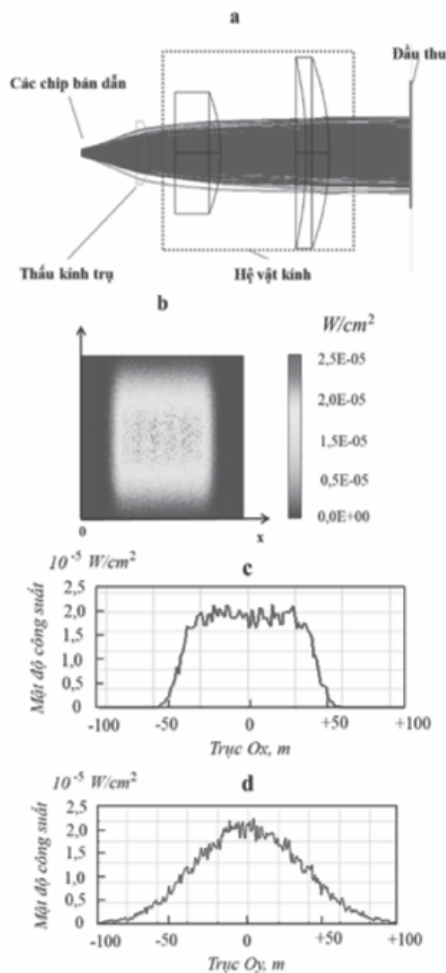
Hình 4. Phân bố năng lượng của chùm tia laser bán dẫn: a – Sơ đồ mô phỏng; b – Vết laser tại cự ly 0,05 mm; c – Vết laser tại cự ly 0,5 mm; d – Vết laser tại cự ly 1000 mm và mật độ công suất được thể hiện tương ứng theo bảng màu (W/cm^2); xOz – Mặt phẳng song song với tiếp xúc p-n; yOz – Mặt phẳng vuông góc với tiếp xúc p-n.

Nhận thấy rằng ở cự ly rất ngắn 0,05 mm (hình 4b), ngay tại bề mặt của laser bán dẫn, vết laser phân bố rời rạc theo đúng hình dạng các hàng, cột giống như vị trí phân bố các chip bán dẫn. Với khoảng cách 0,5 mm (hình 4c) các góc phát của các chip bán dẫn có sự chồng lấn lên nhau dẫn tới vết laser có dạng kẻ sọc. Theo mặt phẳng vuông góc với tiếp xúc p-n (mặt phẳng yOz) các góc phát lớn (30°) của chip bán dẫn chồng lấn lên nhau làm cho năng lượng phân bố đều dọc theo trục Oy . Theo mặt phẳng song song với tiếp xúc p-n (mặt phẳng xOz), các góc phát nhỏ (12°) của chip bán dẫn chưa đủ chồng lấn lên nhau nên hình ảnh vết có dạng kẻ sọc. Tuy nhiên, ở cự ly lớn trên 1000m (hình 4d) các góc phát theo các hướng Ox, Oy có sự đan xen chồng lấn, vết laser lúc này có dạng elip dẹt, năng lượng phân bố có dạng Gauss.

b) Phân bố năng lượng của chùm tia laser khi đi qua hệ sử dụng thấu kính trụ



Sơ đồ mô phỏng phân bố năng lượng của chùm tia laser sau khi đi qua hệ thấu kính trụ và vật kính được chỉ ra trên hình 5.

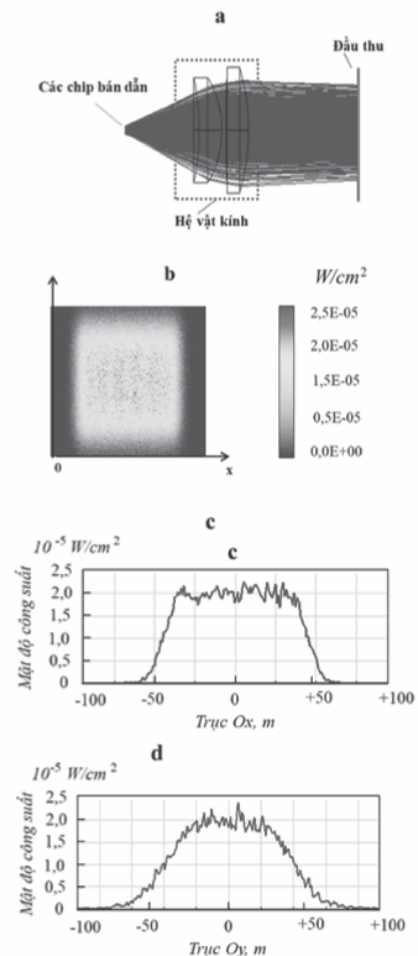


Hình 5. Hệ thấu kính trụ và vật kính với góc phát 3° : a – Sơ đồ mô phỏng; b – Vết laser (104×112 m) ở cự ly 1000 m và mật độ công suất được thể hiện tương ứng theo bảng màu (W/cm^2); c – Phân bố năng lượng theo trục Ox qua tâm vết laser tại cự ly 1000 m; d – Phân bố năng lượng theo trục Oy qua tâm vết laser tại cự ly 1000 m.

Vết laser có dạng hình chữ nhật với kích thước vết laser tại cự ly 1000 m (hình 5b) đạt 104×112 m (lấy theo mức năng lượng từ $0,4 \cdot 10^{-5} W/cm^2$), góc phát laser đạt được là $6^\circ \times 6,4^\circ$.

c) Phân bố năng lượng của chùm tia laser khi đi qua hệ không sử dụng thấu kính trụ

Sơ đồ mô phỏng phân bố năng lượng của chùm tia laser sau khi đi qua hệ vật kính thường được chỉ ra trên hình 6.



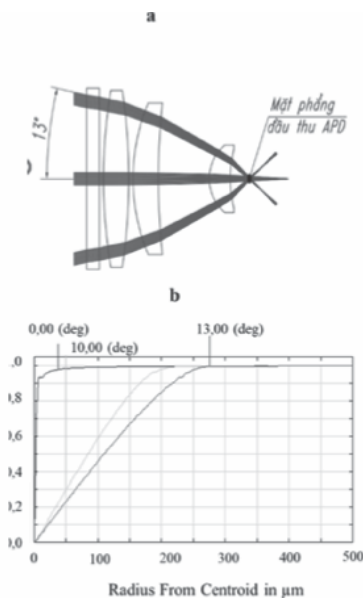
Hình 6. Hệ thấu vật kính với góc phát 3° : a – Sơ đồ mô phỏng; b – Vết laser (106×110 m) ở cự ly 1000 m và mật độ công suất được thể hiện tương ứng theo bảng màu (W/cm^2); c – Phân bố năng lượng theo trục Ox qua tâm vết laser tại cự ly 1000 m; d – Phân bố năng lượng theo trục Oy qua tâm vết laser tại cự ly 1000 m.

Nhận thấy rằng, tuy hệ ăng ten phát chỉ sử dụng hai thấu kính cầu đơn giản (Hình 6a), tuy nhiên kích thước vết và năng lượng

chùm tia laser tại cự ly 1000 m đều đạt được chất lượng tương đương với hệ ăng ten sử dụng một thấu kính trụ với hệ vật kính gồm hai thấu kính cầu (Hình 6b). Kích thước vết laser tại cự ly 1000 m cũng đạt 106x110 m (lấy theo mức năng lượng từ $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^2$), góc phát laser đạt được là $6,1^\circ \times 6,3^\circ$. Như vậy, hệ quang thiết kế đạt yêu cầu.

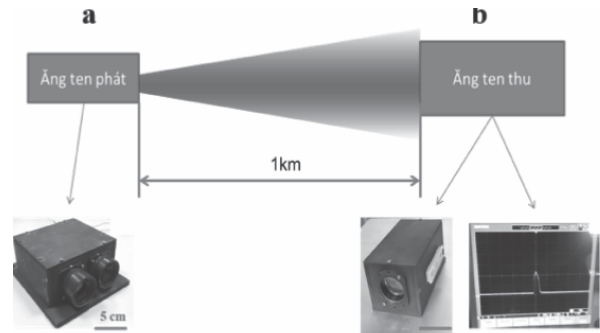
3.2. Kết quả mô phỏng và gia công hệ ăng ten thu

Sơ đồ hệ quang được thể hiện trên hình 7. Mặt phẳng đầu thu sẽ được đặt tại diafram thị độ của hệ quang. Hệ gồm 3 thấu kính đơn và phin lọc sáng được đặt ở ngoài cùng. Mặt phẳng đầu thu được đặt ở vị trí diafram thị độ để thu được tất cả các góc từ 0° đến 26° . Hình 7b cho thấy hơn 90% năng lượng nằm trong vòng tròn bán kính 0,25 mm. Như vậy, hệ quang thiết kế đảm bảo yêu cầu, chùm tia laser với các góc tới từ 0° đến 26° đều hội tụ vào bề mặt đầu thu APD.



Hình 7. Hệ quang ăng ten thu: a – Sơ đồ hệ quang; b – Đồ thị phân bố năng lượng trên mặt phẳng ảnh.

Sau khi thiết kế, hệ quang ăng ten thu, phát được gia công chế tạo và kiểm tra thử nghiệm như trên hình 8.



Hình 8. Hình ảnh hệ quang ăng ten phát góc 6° (a) và hệ quang kênh thu thử nghiệm (b)

Trên hộp thử nghiệm ăng ten thu phát có gắn tấm giá mang cá để giá kính ngắm. Tấm giá sẽ được hiệu chỉnh sao cho trục tấm giá trùng với trục của hai ăng ten thu phát để đảm bảo khi ở cự ly xa, hai ăng ten thu phát sẽ ở trên cùng một trục ngắm trong quá trình thử nghiệm ngoài thực địa. Hệ quang thu phát cấu trúc gọn nhẹ, đơn giản. Với cự ly thử nghiệm 1 km, hệ đã phát và thu được xung laser.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở phân bố năng lượng của laser bán dẫn không đều trên tiết diện ngang của chùm tia, bài báo đã nghiên cứu thiết kế hệ quang thu và phát có các tham số phù hợp với cự ly truyền tin quang đến 2 km. Sơ đồ thiết kế được thực hiện bằng phần mềm Zemax cho thấy phân bố năng lượng tương đối đều. Các tham số kỹ thuật đã đạt được theo nhu cầu mong muốn, có thể thu được năng lượng laser tại khoảng cách trên 1 km, lọc được nhiễu tín hiệu, góc thu lớn đến 26° . Hệ ăng ten phát đảm bảo các góc phát 6° , đồng thời tạo được chùm tia laser có năng lượng phân bố đều khi sử dụng đầu phát là laser bán dẫn có dạng mảng ma trận 6×14 chip laser. Hệ cơ khí giá lắp căn chỉnh

được bố trí hợp lý, làm giảm sự phức tạp trong việc căn chỉnh và giảm giá thành sản phẩm. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để tiếp tục nghiên cứu chế tạo hệ thống truyền tin laser với cự ly xa hơn. ❖

Ngày nhận bài: **23/5/2023**

Ngày phản biện: **12/6/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Toyoshima M. et al.; *Ground-to-satellite laser communication experiments*. //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2008. – T. 23. – №. 8. – C. 10-18.
- [2]. Sofka J. et al.; *Laser communication between mobile platforms*. //IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2009. – T. 45. – №. 1. – C. 336-346.
- [3]. Ricklin J. C. et al.; *Atmospheric channel effects on free-space laser communication*. // Journal of Optical and Fiber Communications Reports. – 2006. – T. 3. – №. 2. – C. 111-158.
- [4]. Yang H. et al.; *Optimum design for optical antenna of space laser communication system*. //2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems. – IEEE, 2006. – T. 3. – C. 2016-2019.
- [5]. Yan P., She W., Zhang H.; *Optimal design of the laser communication optical system*. // Advanced Optoelectronics for Energy and Environment – Optica Publishing Group, 2013. – C. ASa3A. 45.
- [6]. Yu J. et al.; *Optimization of beam transformation system for laser-diode bars*. // Optics express. – 2016. – T. 24. – №. 17. – C. 19728-19735.
- [7]. Балашов.И.Ф.; “Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров”. Санкт-Петербург, 2000.-16с.
- [8]. Semiconductor Emitters // АО - НИИ «Полус» - <https://niipolyus.ru/>.
- [9]. Бокшанский В. Б. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 96 с.