

УДК 629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259

**Для цитирования:** Карцан И. Н. Концепция развития межспутниковой лазерной связи // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 247–259. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259.

**For citation:** Kartsan I. N. [Development concept of inter-satellite laser communication]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 2, P. 247–259. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-2-247-259.

## Концепция развития межспутниковой лазерной связи

И. Н. Карцан

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31  
Морской гидрофизический институт РАН  
Российская Федерация, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: kartsan2003@mail.ru

*Актуальность данной научно-исследовательской работы продиктована необходимостью обеспечения более высоких требований к точностным характеристикам навигационного поля, создаваемого космическими аппаратами навигационной системы ГЛОНАСС, для выполнения высоких требований по точностным характеристикам навигационных определений на длительных интервалах автономной работы космических аппаратов, выдвигаемых потребителями в настоящее время. В представленной концепции развития используются последние достижения лазерной и радиотехнической техники как для увеличения пропускной способности, помехоустойчивости передающей информации, а также уменьшения массы и энергопотребления бортовой техники, так и для проведения межспутниковых измерений дальности и синхронизации бортовых шкал времени космических аппаратов навигационных систем, в том числе и для привязки системной шкалы времени космических навигационных систем (или групповой орбитальной шкалы времени) к шкале времени Государственного эталона времени и частоты. Обеспечение точной работы системы лазерного наведения в условиях космоса считается одной из критически значимых задач, так как её полномасштабные испытания на Земле почти неосуществимы. Проанализированы ключевые экспериментальные, а также опытные работы согласно задачам построения оптических линий межспутниковой связи.*

*Ключевые слова:* космический аппарат, бортовая лазерная система, эфемериды, пропускная способность, межспутниковые измерения, линия связи.

## Development concept of inter-satellite laser communication

I. N. Kartsan

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences  
2, Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation  
E-mail: kartsan2003@mail.ru

*The relevance of this research work is dictated, among other things, by the need to ensure higher requirements for the accuracy characteristics of the navigation field created by spacecraft of the GLONASS navigation system in order to meet the high requirements for the accuracy characteristics of navigation determinations over long intervals of autonomous operation of spacecraft currently put forward*

by consumers. The presented concept of development uses the latest achievements of laser and radio engineering both to increase the throughput, noise immunity of transmitting information, as well as to reduce the mass and power consumption of onboard equipment, and to conduct inter-satellite range measurements and synchronization of onboard time scales of spacecraft navigation systems, including and for linking the system time scale of space navigation systems (or the group orbital time scale) to the time scale of the State standard of time and frequency. Ensuring the accurate operation of the laser guidance system in space is considered one of the critically important tasks, since its full-scale tests on Earth are almost impossible. Key experimental and also experimental works are analyzed according to the problems of constructing optical links of inter-satellite communication.

*Keywords:* spacecraft, onboard laser system, ephemeris, throughput, inter-satellite measurements, communication line.

## **Введение**

Уже сегодня лазеры широко используются при передаче огромных объемов данных по волоконно-оптическим кабелям. Их использование в космосе обладает еще большим потенциалом, отсутствие физической среды передачи позволит получить высокую скорость передачи информации. Другое преимущество лазеров заключается в том, что свет имеет длину волны меньше в 10 тыс. раз, чем длина волны используемых в космических коммуникациях радиоволн (или частота передачи в 10000 раз выше). Это означает, что свет лазера может распространяться более узконаправленным лучом и будет требовать меньших по размерам приемных устройств для того, чтобы получить сигнал достаточный для обработки амплитуды. Помимо увеличения уровня безопасности космических коммуникаций, использование лазерной системы передачи информации также позволит уменьшить вес, габариты коммуникационного оборудования, на доставку которого в космос тратятся немалые средства.

Деятельность по формированию оптических линий межспутниковой связи (ОЛМС) проводится с середины 1960-х гг. В 1970-х гг. в Соединенных Штатах Америки был развернут систематизированный проект исследований, нацеленный на формирование образцов бортовой техники, немного позднее интенсивная деятельность в данном направлении стартовала в Западной Европе, а также в Японии [1–6].

## **Направление улучшения применения лазерной линии связи между космическими аппаратами**

Выбор метода и схемы взаимодействия между космическими аппаратами (КА) для проведения измерений и обмена информацией по межспутниковой лазерной связной линии должен учитывать следующие факторы:

- выполнение заданных требований по точности взаимной синхронизации бортовых шкал времени (БШВ) КА;
- планирование межспутниковых лазерных измерений (МЛИ) с учетом требований к последовательности их проведения и обмена информацией между КА по лазерной линии и фактического состояния бортовых средств и указаний от центра управления системой с учетом возможных нештатных ситуаций;
- взаимодействие бортовой лазерной системы (БЛС) с наземными средствами должно в основном носить информационный характер;
- функционирование системы по целевому назначению не должно зависеть от работоспособности отдельных КА или наземных средств при срыве в отдельных сеансах взаимодействия БЛС;
- технологический цикл коррекции временной информации на борту КА должен предусматривать наличие резервных схем проведения измерений и обмена информацией по межспутниковой лазерной линии (МЛЛ) для решения задач временного обеспечения с заданными точностными характеристиками;

- обмен информацией по МЛЛ между КА о состоянии орбитальной группировки, отдельных КА и наземных средств;
- передача информации по лазерной линии;
- использование по целевому назначению КА с вышедшими из строя отдельными комплектами БЛС;
- восстановление на борту КА информации, необходимой для решения временных задач, путем ее передачи по лазерной линии или по межспутниковой лазерной линии;
- использование минимального объема оперативной памяти бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) КА для функционирования бортовых комплексов программ, взаимодействующих с БЛС.

Отдельной, гораздо более сложной и важной проблемой является управление трафиком, направляемым в оптический канал связи. Напомним, что существующие «классические» спутники связи на геостационарной орбите являются ретрансляторами, т. е. с зеркалами. Они получают с Земли сигнал на одной частоте и передают его со спутника на Землю на другой, но не меняя модуляцию и другие параметры самого сигнала [2; 4; 7–9].

Альтернативой является обработка информации на борту спутника, т. е. полученный от абонентского терминала радиосигнал демодулируется и декодируется до уровня IP-пакетов, направляется в маршрутизатор, который уже распределяет информацию в радиочастотный или оптический канал связи.

Данный метод позволяет гибко использовать весь доступный частотный диапазон и не требует специальных абонентских терминалов, но требует наличия на борту маршрутизатора, способного обработать пакеты на скорости до 20 Гбит/с. При этом процессор такого маршрутизатора должен работать не в строго климатизированном помещении дата-центра с узким диапазоном рабочих температур, а в условиях открытого космоса, где температуры даже при наличии мощной системы охлаждения и терморегуляции (СОТР) будут находиться в большем диапазоне температур. При этом наличие мощной СОТР, несомненно, отразится на массогабаритных параметрах спутника.

### **Расчет условий взаимной видимости высоколетящих и низколетящих космических аппаратов**

Определим:

- зону прямой видимости КА, находящегося на заданной высоте, точка надира которого принадлежит образуемой фигуре, как геометрическое место точек на поверхности Земли, для которых выполняется условие прямой видимости между высоколетящим КА (ВКА) и низколетящим КА (НКА);
- зону радиовидимости КА как часть зоны прямой видимости, получаемой с учетом ограничений, накладываемых диаграммами направленности аппаратуры, установленной на ВКА и НКА.

Для упрощения вычислений введем следующие ограничения:

- форма Земли – шар;
- ориентация бортовой аппаратуры КА – на подспутниковую точку;
- диаграмма направленности бортовой аппаратуры КА – конусного типа.

Исходя из указанных ограничений, зоны прямой видимости и радиовидимости будут представлены окружностями на поверхности Земли с центром в подспутниковой точке.

Таким образом, для описания зоны видимости достаточно одного параметра – углового радиуса из центра Земли [10–15].

На размеры зоны прямой видимости влияют высоты ВКА и НКА, а также минимальный угол места наблюдения КА.

На рис. 1 представлена геометрия задачи.

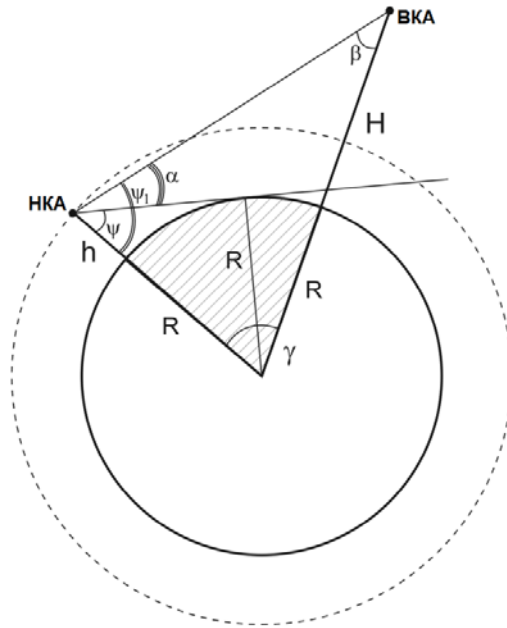


Рис. 1. Построение зоны прямой видимости НКА с КА

Fig. 1. Construction of a line-of-sight zone of a low-flying spacecraft using a spacecraft

Решение данной задачи представлено следующими соотношениями, позволяющими получить угловой размер зоны прямой видимости:

$$\sin \psi = \frac{R}{R+h}; \quad \psi = \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right); \quad \psi_1 = \alpha + \psi; \quad \psi_1 = \alpha + \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right); \quad (1)$$

$$\frac{\sin \psi_1}{R+H} = \frac{\sin \beta}{R+h}; \quad \sin \beta = \frac{R+h}{R+H} \sin \psi_1; \quad (2)$$

$$\sin \beta = \frac{R+h}{R+H} \sin\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right)\right); \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H} \sin\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right)\right)\right); \quad \gamma_3 = \pi - \beta - \psi_1; \quad (4)$$

$$\gamma_3 = \pi - \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H} \sin\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right)\right)\right) - \alpha - \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right), \quad (5)$$

где  $\gamma_3$  – центральный угол с вершиной в центре Земли, представляющий собой полуширину (угловой радиус) зоны прямой видимости;  $R$  – радиус Земли;  $h$  – высота НКА;  $H$  – высота спутника;  $\alpha$  – угол места спутника над плоскостью горизонта.

Примером существенного изменения зоны прямой видимости в зависимости от высоты НКА может выступать видимость между КА на геостационарной орбите (ГСО) и низколетящими КА по сравнению с наблюдением КА на ГСО с поверхности Земли [16–19].

На рис. 2 заштрихованной областью показана зона прямой видимости КА ГСО с поверхности Земли.

На рис. 3 показана зона прямой видимости КА ГСО космических аппаратов системы низколетящих КА, использующих круговые орбиты с высотой  $\approx 1400$  км.

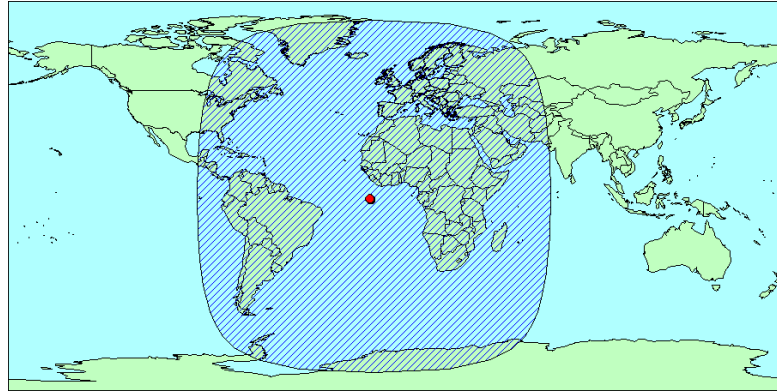


Рис. 2. Зона прямой видимости КА ГСО поверхности Земли

Fig. 2. The line-of-sight area of the spacecraft on the geostationary orbit of the Earth's surface

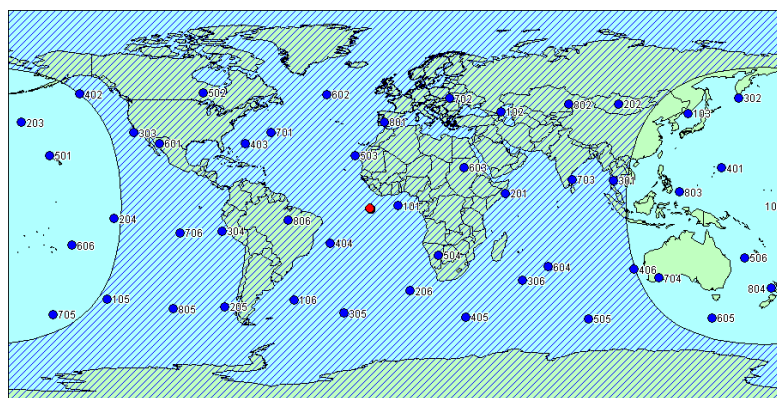


Рис. 3. Зона прямой видимости КА ГСО и НКА

Fig. 3. The zone of sight of a spacecraft in geostationary orbit and a low-flying spacecraft

Точками с подписями условного номера обозначены подспутниковые точки НКА на некоторый момент времени. КА, чьи подспутниковые точки попадают в заштрихованную область, находятся в прямой видимости с КА ГСО [20; 21].

Точкой без номера на рис. 2 и 3 обозначена точка стояния КА ГСО (11° з. д.).

Расчеты проводились для угла места = 0°.

На рис. 3 видно, что подавляющее большинство НКА имеют прямую видимость с геостационарным КА.

Введем ограничения на диаграмму направленности (ДН) бортовой антенны ВКА.

При этом возникает три угловых коридора, зависящих от ширины ДН бортовой антенны КА, геометрия задачи в которых будет различная.

Данные коридоры разделяются углами  $\beta_h$  и  $\beta_3$  (рис. 4):

$$\beta_h = \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H}\right); \quad (6)$$

$$\beta_3 = \arcsin\left(\frac{R}{R+H}\right). \quad (7)$$

Рассмотрим каждый из случаев.

1. Ширина ДН аппаратуры ВКА находится в диапазоне  $\beta_{КА} \in [\beta_h; \pi]$  (широкая ширина ДН).

В этом случае решение совпадает с решением задачи расчета зоны прямой видимости (рис. 1).

Данная постановка задачи соответствует случаю, когда организуется линия связи НКА – ВКА, например, использующих ГСО, ширина ДН аппаратуры на борту ВКА перекрывает высоту полета НКА.

2. Ширина ДН аппаратуры ВКА находится в диапазоне  $\beta_{КА} \in (\beta_3; \beta_h)$  (средняя ширина ДН). Геометрия задачи представлена на рис. 5.

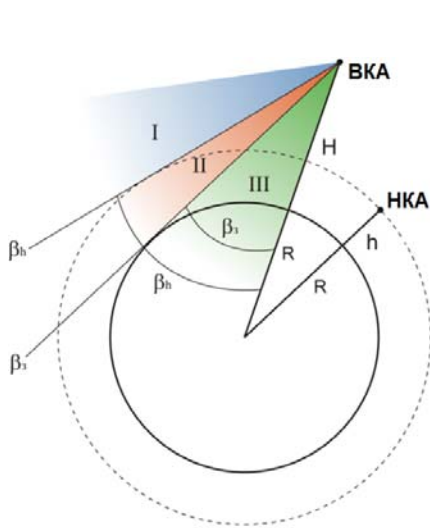


Рис. 4. Угловые коридоры ширины ДН бортовой аппаратуры ВКА

Fig. 4. Angular corridors of the width of the radiation pattern of the onboard equipment of a high-flying spacecraft

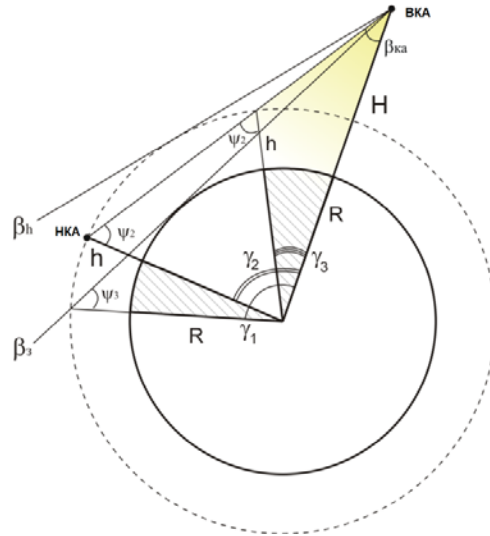


Рис. 5. Геометрия построения зоны радиовидимости II типа

Fig. 5. Geometry of type II radio visibility area

Решение производится с помощью соотношений:

$$\frac{\sin \beta_3}{R+h} = \frac{\sin \psi_3}{R+H}; \quad \psi_3 = \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_3\right); \quad (8)$$

$$\gamma_1 = \pi - \psi_3 - \beta_3; \quad \gamma_1 = \pi - \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_3\right) - \arcsin\left(\frac{R}{R+H}\right); \quad (9)$$

$$\frac{\sin \psi_2}{R+H} = \frac{\sin \beta_{КА}}{K+h}; \quad \psi_2 = \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_{КА}\right); \quad (10)$$

$$\gamma_2 = \pi - \psi_2 - \beta_{КА}; \quad \gamma_2 = \pi - \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_{КА}\right) - \beta_{КА}; \quad (11)$$

$$\gamma_3 = \pi - \beta_{КА} - (\pi - \psi_2) = \psi_2 - \beta_{КА}; \quad (12)$$

$$\gamma_3 = \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_{КА}\right) - \beta_{КА}. \quad (13)$$

3. Ширина ДН аппаратуры КА находится в диапазоне  $\beta_{КА} \in [0; \beta_3]$  (узкая ширина ДН). Геометрия задачи представлена на рис. 6.

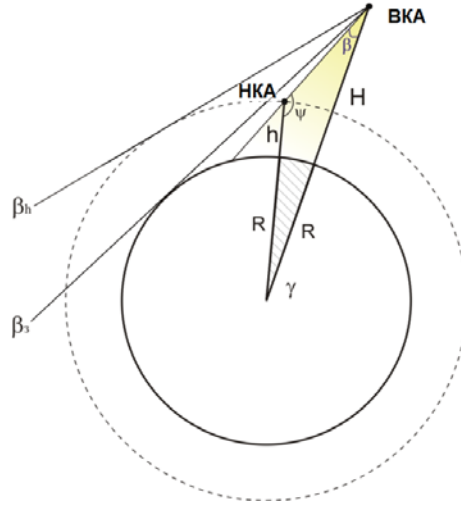


Рис. 6. Геометрия построения зоны радиовидимости III типа

Fig. 6. Geometry of type III radio visibility area

Решение производится с помощью соотношений:

$$\frac{\sin \psi}{R+H} = \frac{\sin \beta_{KA}}{R+h}; \quad \psi = \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_{KA}\right); \quad (14)$$

$$\gamma_{KA1} = \pi - \beta_{KA} - \psi; \quad \gamma_{KA1} = \pi - \beta_{KA} - \arcsin\left(\frac{R+H}{R+h} \sin \beta_{KA}\right). \quad (15)$$

В случае введения дополнительных ограничений на диаграмму направленности аппаратуры, расположенной на НКА, рассмотрим коррективы, которые необходимо внести в построение зоны радиовидимости (ЗРВ).

Рассмотрим 2 случая:

- 1) антенна НКА направлена от центра Земли;
- 2) антенна НКА направлена к центру Земли.

В первом случае геометрия задачи представлена на рис. 7, а решение задачи находится с помощью выражений:

$$\psi = \pi - \beta_{ЛПС}; \quad \frac{\sin \psi}{R+H} = \frac{\sin \beta}{R+h}; \quad \beta = \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H} \sin \psi\right); \quad (16)$$

$$\gamma_{ЛПС1} = \pi - \beta - \psi = \beta_{ЛПС} - \beta; \quad (17)$$

$$\gamma_{ЛПС1} = \beta_{ЛПС} - \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H} \sin \psi\right). \quad (18)$$

Примером второго случая может быть решение навигационной задачи для КА на ГСО.

В данном случае навигационные КА будут выступать в качестве НКА, у которых ориентация бортовой аппаратуры – к центру Земли.

Геометрия такой задачи представлена на рис. 8, а ее решение определяется:

$$\frac{\sin \beta}{R+h} = \frac{\sin \beta_{ЛПС}}{R+H}; \quad \beta = \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H} \sin \beta_{ЛПС}\right); \quad (19)$$

$$\gamma_{ЛПС2} = \pi - \beta_{ЛПС} - \beta; \quad \gamma_{ЛПС2} = \pi - \beta_{ЛПС} - \arcsin\left(\frac{R+h}{R+H} \sin \beta_{ЛПС}\right). \quad (20)$$

В зависимости от расчетной задачи, все рассмотренные варианты могут учитываться при построении ЗРВ.

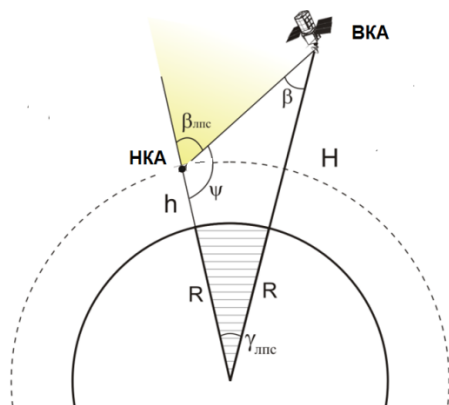


Рис. 7. Геометрия построения ЗРВ при ориентации бортовой антенны НКА в противоположную сторону от центра Земли

Fig. 7. The geometry of the radio visibility area when the onboard antenna of a low-flying spacecraft is oriented in the opposite direction from the center of the Earth

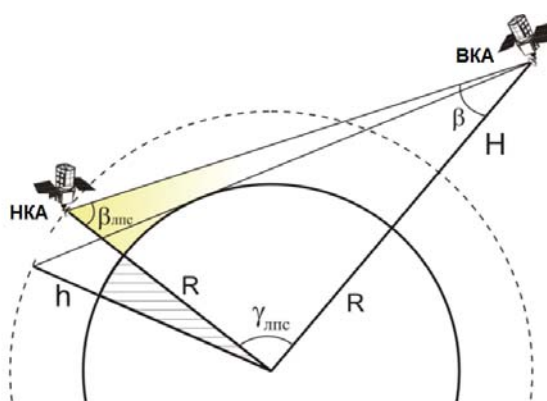


Рис. 8. Построение ЗРВ при ориентации антенны НКА на центр Земли

Fig. 8. Construction of the radio visibility zone when the antenna of a low-flying spacecraft is oriented to the center of the Earth

Обобщенная зона ЗРВ, учитывающая диаграммы направленности антенн, расположенных на ВКА и НКА, получается в процессе пересечения трех множеств:

- зоны прямой видимости;
- ЗРВ с ограничением на ДН бортовой антенны КА II и III типов;
- зоны радиовидимости с ограничением на ДН бортовой антенны НКА.

Таким образом, методика анализа обобщенной ЗРВ следующая.

1. Производится расчет угла  $\gamma_3$ , определяющий зону прямой видимости при заданном угле места.
2. Производится расчет углов  $\gamma_{КА1}$  и  $\gamma_{КА2}$  при наложении ограничений на ДН аппаратуры КА.
3. Производится расчет углов  $\gamma_{НКА1}$  и  $\gamma_{КА2}$  при наложении ограничений на ДН аппаратуры НКА.
4. Анализируются обобщенные углы  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , где  $\gamma_1 = \min(\gamma_{КА1}; \gamma_{НКА1})$ ,  $\gamma_2 = \min(\gamma_{КА2}; \gamma_{НКА2})$ .

Отметим также, что передатчики для лазерной связи являются новыми потребителями энергии на борту, а их КПД не превышает 25 %, т. е. возникает задача утилизации и сброса в космос



оставшихся 75 % затраченной энергии, что является хотя и не критической, но, тем не менее, требующей инженерного решения задачей [22–28].

Есть еще один аспект наличия межспутниковых линий связи в группировке Starlink, который, возможно, не привлек пока внимания специалистов SpaceX. Это внедрение ISL, что позволит абоненту сети выходить в интернет с территории другой страны или передавать информацию с одного терминала на другой, минуя какие-либо наземные узлы связи [29–32].

### Заключение

Таким образом, анализ программ в области космической лазерной связи позволяет сделать вывод о том, что уже создана элементная и промышленная база для среднескоростных (сотни Мбит/с) линий связи на основе полупроводниковых лазеров диапазона 0,8–0,9 мкм. Подтверждена возможность функционирования линии связи между двумя КА при предельно узких диаграммах направленности, что открывает широкие возможности по их практическому внедрению. Начата разработка нового поколения аппаратуры связи на основе волоконных усилителей и твердотельных лазеров с пропускной способностью порядка единиц Гбит/с. Активно развиваются новые направления использования космических лазерных средств, такие как связь при межпланетных перелетах, высокоскоростная связь по линии Космос – Земля и Космос – Космос.

Однако в наше время все еще недостаточно внимания уделяется системе ориентации космического аппарата и оптического передающего устройства на цель, хотя это является важной составляющей обеспечения межспутниковой лазерной связи.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме No 0555-2021-0005.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the state assignment on topic No. 0555-2021-0005.

### Библиографические ссылки

1. Гавриленко С. В., Феоктистов И. И., Хегай Д. К. Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 54–60.
2. Карцан И. Н., Жукова Е. С., Карцан Р. В. Баллистическое и временное обеспечение космических аппаратов на различных орбитах // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-2(26). С. 19-24.
3. Жуков А. О., Карцан И. Н. Перспективы повышения измерительной информации для определения параметров орбиты космических аппаратов // Решетневские чтения : Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем ак. М. Ф. Решетнева. В 2-х ч. Красноярск, 11–15 ноября 2019 года / Под ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. Ч. 1. С. 300–302.
4. Management of processes of space debris capture and processing into fuel / M. E. Barkova, V. O. Kuznetsova, A. O. Zhukov, I. N. Kartsan // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St. Petersburg, 03–06 марта 2021 года. Krasnoyarsk : IOP Publishing Ltd, 2021. P. 42086. DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042086.
5. Методика аналитического оценивания точности наведения космического аппарата-робота при итерационном терминальном управлении в условиях действия случайных возмущений / В. В. Бурмистров, М. Ю. Зоткин, М. М. Макаров, В. И. Миронов // Тр. Воен.-космич. акад. им. А. Ф. Можайского. 2019. № 667. С. 16-25.
6. Хартов В. В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2011. № 3(9). С. 3–10.

7. Amanor D. N., Edmonson W. W., Afghah F. Intersatellite Communication System Based on Visible Light // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Piscataway, New Jersey : IEEE, 2018. Vol. 54, No 6. P. 2888-2899. DOI 10.1109/TAES.2018.2832938.
8. Controlling a Non-Linear Space Robot using Linear Controllers / A. W. I Mohamed, C. M. Saaj, A. Seddaoui et al. // Collection of conference materials 5th CEAS Conference on Guidance, Navigation and Control (EuroGNC) (Milano, 3rd – 5th April 2019). Milano, 2019.
9. Inter-satellite laser communication system based on double Risley prisms beam steering / Shaowen Lu, Min Gao, Yan Yang et al. // Applied Optics. Washington : The Optical Society (OSA), 2019. Vol. 58, No 27. P. 7517-7522. DOI 10.1364/AO.58.007517.
10. Моделирование оперативности доставки информации орбитальной группировки дистанционного зондирования земли / М. К. Бондарева, А. Н. Дементьев, А. О. Жуков и др. М., 2023.
11. Артюшенко В. М., Кучеров Б. А. Информатизация управления группировкой космических аппаратов // Прикладная информатика. 2013. № 6(48). С. 006–014.
12. Пичугин С. Б. Абонентские и межспутниковые тракты в низкоорбитальных сетях связи // Радиопромышленность. 2019. № 3. С. 48–54. DOI 10.21778/2413-9599-2019-3-48-54.
13. Пичугин С. Б., Назаров А. А., Крымов В. С. Алгоритм маршрутизации в спутниковой сети связи // Сб. тез. 9-й Белорус. зимней школы-семинара по теории массового обслуживания. Минск : Белорус. гос. ун-т, 1993. С. 87.
14. Бондарева М. К., Васьков С. В., Салов В. В. Комплексирование методов верификации навигационных решений при навигационно-баллистическом обеспечении управления космическими аппаратами // Тр. Воен.-космич. акад. им. А. Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 49–56.
15. Навигационный контроль космического мусора / И. Н. Карцан, А. О. Жуков, Д. Г. Кузнецов и др. // Российская наука, инновации, образование – РОСНИО-2022 : сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч. конф. Красноярск, 2022. С. 83–89.
16. Seddaoui A. H., Saaj C. M. Control for a Controlled Floating Robotic Spacecraft // Collection of conference materials International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS) (Madrid, June 4–6, 2018). Madrid, 2019.
17. Жуков А. О., Карцан И. Н. Оценки функциональных характеристик радиотехнической системы // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах. 2021. С. 114–117.
18. Новоселова Н. В., Гурина Л. А. Тенденции развития спутниковых систем на современном этапе // Совершенствование тактики действий спасательных воинских формирований (СВФ) МЧС России : сб. материалов XXXII Междунар. науч.-практ. конф. «Предотвращение. Спасение. Помощь». Химки, 2022. С. 116–121.
19. Бобров С.Р. Информационная поддержка разработки кубсатов в различных университетах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики : в 3 т. Красноярск, 2022. Т. 1. С. 930–933.
20. Карцан И. Н. Качественные параметры радионавигационных систем // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах : сб. тез. II Всерос. науч.-практ. конф. М., 2021. С. 109–113.
21. The hardware and software implementation of the adaptive platform for an onboard spacecraft control system / I. N. Kartsan, A. O. Zhukov, A. O. Platonov, S. V. Efremova // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference “Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019”. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. С. 33071.
22. Ходыкина А. А., Корчевская О. В. Состояние и перспективы развития нанотехнологий в России // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракет.-космич. систем ак. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. С. 672–674.

23. Development of methods for equivalent transformation of gert networks for application in multi-version software / M. V. Saramud, P. V. Zelenkov, I. V. Kovalev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. С. 012015.
24. Пасынков А. А., Свешникова А. С., Титов О. Г. Анализ и сравнение методов прогнозирования запусков спутников различных типов на низкую околоземную орбиту // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 2 (67). С. 1–15. DOI: 10.18698/2541-8009-2022-02-767.
25. Сторожев Ю. А., Олейников Е. П. Глобальная навигационная спутниковая система // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов VII Междунар. науч.-практич. конф., посвященной Дню космонавтики: в 3 т. Красноярск, 2021. Т. 2. С. 164–166.
26. Елпатов А. С., Романцов Е. А. Сравнение отечественных и зарубежных космических аппаратов оптического наблюдения // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики: в 3 т. Красноярск, 2021. Т. 3. С. 84–86.
27. Войко Л. Ю. Система радиосвязи в качестве полезной нагрузки малых автоматических космических аппаратов // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практич. конф. 2021. № 1–1. С. 69–70.
28. Романов И. А. Космические аппараты в исследованиях планет солнечной системы // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов VI Междунар. науч.-практич. конф., посвященной Дню космонавтики. В 3-х т. / под общей ред. Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2020. С. 657–659.
29. Iurov K. L., Iurkin I. O. Prospects for using «starlink» system on merchant ships // Актуальные проблемы транспортной отрасли в России и за рубежом : Материалы IV Всерос. студенч. науч.-практич. конф. на ин. яз. Новосибирск, 2023. С. 138–144.
30. Ракитина М. С., Зарайченков М. М. Развитие спутникового интернета starlink // Достижения современной науки и образования : Материалы VIII междунар. междисциплинар. Конф.. Таганрог, 2022. С. 43–44.
31. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255.
32. Заворин К. Н. Comparative analysis of starlink and oneweb satellites // Актуальные вопросы современной науки глазами молодых исследователей : сб. статей VI Междунар. науч.-практич. конф. Омск, 2021. С. 223–227.

## References

1. Gavrilenko S. V., Feoktistov N. N., Hegay D. K. [Modern stage features of optical channels development of intersatellite communication]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2008, No. 3 (51), P. 54–60 (In Russ.).
2. Kartsan I. N., Zhukova E. S., Kartsan R. V. [Ballistic and time maintenance of space vehicles in various orbits]. *Proceedings of TUSUR University*. 2012, No. 2-2(26), P. 19–24 (In Russ.).
3. Zhukov A. O., Kartsan I. N. [Prospects for increasing the measurement information to determine the parameters of the spacecraft' orbit]. *Materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2019, P. 300–302 (In Russ.).
4. Barkova M. E., Kuznetsova V. O., Zhukov A. O., Kartsan I. N. [Management of processes of space debris capture and processing into fuel]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, P. 42086. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042086.
5. Burmistrov V. V., Zotkin M. Yu., Makarov M. M. et al. *Analytical estimation of the guidance accuracy of a spacecraft-robot under iterative terminal control under the action of random disturbances* [Analytical estimation of the guidance accuracy of a spacecraft-robot under iterative terminal control under the action of random disturbances]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2019, No. 667, P. 16–25 (In Russ.).
6. Khartov V. V. [Next step of automated spacecraft development for fundamental space research]. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkin*. 2011, No. 3(9), P. 3–10 (In Russ.).

7. Amanor D. N., Edmonson W. W., Afghah F. [Intersatellite Communication System Based on Visible Light]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2018, Vol. 54, No. 6, P. 2888-2899. DOI: 10.1109/TAES.2018.2832938.
8. Mohamed A. W. I, Saaj C. M., Seddaoui A., Eckersley S. Controlling a Non-Linear Space Robot using Linear Controllers. *Collection of conference materials 5th CEAS Conference on Guidance, Navigation and Control*. 2019.
9. Shaowen Lu, Min Gao, Yan Yang et al. [Inter-satellite laser communication system based on double Risley prisms beam steering]. *Applied Optics*. 2019, Vol. 58, No. 27, P. 7517–7522. DOI: 10.1364/AO.58.007517.
10. Bondareva M. K., Dementiev A. N., Zhukov A. O. et al. *Modelirovaniye operativnosti dostavki informatsii orbital'noy gruppировки distantsionnogo zondirovaniya zemli* [Simulation of the efficiency of information delivery of the orbital constellation of remote sensing of the earth]. Moscow, Expert and Analytical Center, 2023, P. 261. DOI: 10.55469/9785904670825.
11. Artuschenko V., Kucherov B. [Informatization of control for spacecraft constellation]. *Journal of applied informatics*. 2013, No. 6(48), P. 006–014 (In Russ.).
12. Pichugin S. B. [Subscriber and inter – satellite paths in leo communications networks]. *Radio industry*. 2019, No. 3, P. 48–54. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-3-48-54 (In Russ.).
13. Pichugin S. B., Nazarov A. A., Krymov V. S. *Algoritm marshrutizatsii v sputnikovoy seti svyazi* [Routing algorithm in a satellite communication network]. *Sbornik tezisev 9-y Belorusskoy zimney shkoly-seminara po teorii massovogo obsluzhivaniya* [Collection of abstracts of the 9th Belarusian winter school-seminar on the theory of queuing]. Minsk, 1993, P. 87.
14. Bondareva M. K., Vas'kov S. V., Salov V. V. *Kompleksirovaniye metodov verifikatsii navigatsionnykh resheniy pri navigatsionno-ballisticheskoy obespechenii upravleniya kosmicheskimi apparatami* [Integration of methods for verifying navigation solutions in the navigation and ballistic support of spacecraft control]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2022, No. 683, P. 49–56 (In Russ.).
15. Kartsan I. N., Zhukov A. O., Kuznetsov D. G. et al. [Navigation control of space debris]. *Rossiyskaya nauka, innovatsii, obrazovaniye. Sbornik nauchnykh statey po materialam Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Russian science, innovations, education. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific conference]. Krasnoyarsk, 2022, P. 83–89. DOI: 10.47813/rosnio.2022.3.83-89.
16. Seddaoui A. H., Saaj C. M. Control for a Controlled Floating Robotic Spacecraft // *Collection of conference materials International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. 2019.
17. Zhukov A. O., Kartsan I. N. Otsenki funktsional'nykh kharakteristik radiotekhnicheskoi sistemy [Evaluation of the functional characteristics of the radio system]. *Tekhnologii polucheniya i obrabotki informatsii o dinamicheskikh ob"ektakh i sistemakh* [Technologies for obtaining and processing information about dynamic objects and systems]. 2021, P. 114–117.
18. Novoselova N. V., Gurina L. A. [Current trends in satellite systems]. *V sbornike: Sovershenstvovaniye taktiki deystviy spasatel'nykh voinskiykh formirovaniy (SVF) MCHS Rossii. XXXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Predotvrashcheniye. Spaseniye. Pomoshch'"* [In the collection: Improving the tactics of rescue military units (SVF) EMERCOM of Russia. XXII International Scientific and Practical Conference "Prevention. The rescue. Help"]. Khimki, 2022, P. 116–121.
19. Bobrov S. R. [Informational support of cubesat development at various universities] *Materialy VIII Mezhdunar. nauch. konf. "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials VIII Intern. Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2022, P. 930–933 (In Russ.).
20. Kartsan I. N. [Qualitative parameters of radio navigation systems]. *Sbornik tezisev konferentsii II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection of conference abstracts of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2021, P. 109–113 (In Russ.).
21. Kartsan I. N., Zhukov A. O., Platonov A. O., Efremova S. V. [The hardware and software implementation of the adaptive platform for an onboard spacecraft control system]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, P. 33071. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033071.

22. Khodykina A. A., Korchevskaya O. V. [State and prospects of nanotechnology development in Russia]. *Materialy XXVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2022, P. 672–674 (In Russ.).
23. Saramud M. V., Zelenkov P. V., Kovalev I. V. et al. Development of methods for equivalent transformation of gert networks for application in multi-version software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, P. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012015.
24. Pasyнков A. A., Sveshnikova A. S., Titov O. G. [Analysis and comparison of methods for predicting launches of satellites of various types into low earth orbit]. *Politechnical student journal*. 2022, No. 2 (67), P. 1–15. DOI: 10.18698/2541-8009-2022-2-767 (In Russ.).
25. Storozhev Y. A., Oleynikov E. P. [Global navigation satellite system] *Materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials VII Intern. Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2021, P. 164–166 (In Russ.).
26. Elpatov A. S., Romatsov E. A. [Comparison of domestic and foreign optical observation spacecraft]. *Materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials VII Intern. Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2021, P. 84–86 (In Russ.).
27. Voyko L. Y. *Sistema radiosvyazi v kachestve poleznoy nagruzki malykh avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Radio communication system as a payload of small unmanned spacecraft] *Materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya"* [Materials of the reports of the International scientific-practical conference "Electronic means and control systems"]. 2021, No. 1-1, P. 69–70.
28. Romanov I. A. [Spacecraft in the exploration of the planets of the solar system]. *Materialy VI Mezhdunar. nauch. konf. "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials VI Intern. Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2020, P. 657–659 (In Russ.).
29. Iurov K. L., Iurkin I. O. [Prospects for using starlink system on merchant ships]. *Aktual'nyye problemy transportnoy otrasli v Rossii i za rubezhom. Materialy IV Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii na inostrannykh yazykakh* [In the collection: Actual problems of the transport industry in Russia and abroad. Materials of the IV All-Russian student scientific-practical conference in foreign languages]. Novosibirsk, 2023, P. 138–144.
30. Rakitina M. S., Zaraychenkov M. M. *Razvitiye sputnikovogo interneta starlink* [Starlink Satellite Internet Development]. *Dostizheniya sovremennoy nauki i obrazovaniya. Materialy VIII mezhdunarodnoy mezhdistsiplinarnoy konferentsii* [Achievements of modern science and education. Materials of the VIII International Interdisciplinary Conference]. Taganrog, 2022, P. 43–44.
31. Pehterev S. V., Makarenko S. I., Kovalsky A. A. [Descriptive model of starlink satellite communication system]. *Systems of control, communication and security*. 2022, No. 4, P. 190–255 (In Russ.).
32. Zavorin K. N. [Comparative analysis of starlink and oneweb satellites]. *Aktual'nyye voprosy sovremennoy nauki glazami molodykh issledovateley. Sbornik statey VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Topical issues of modern science through the eyes of young researchers. Collection of articles of the VI International Scientific and Practical Conference]. Omsk, 2021, P. 223–227.

© Карцан И. Н., 2023

---

**Карцан Игорь Николаевич** – доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН. E-mail: kartsan2003@mail.ru.

**Kartsan Igor' Nikolaevich** – Dr. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Senior Researcher, Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, E-mail: kartsan2003@mail.ru.

---