

УДК 629.78

М. П. Олейник, А. М. Кулабухов

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ МЕЖСПУТНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПО НАВИГАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ**

**Запропоновано спосіб наведення міжспутникової оптичної лінії зв'язку по навігаційних параметрах. Визначено залежності вимог до кутової орієнтації від параметрів оптичного терміналу і дальності зв'язку.**

*Ключові слова:* міжспутниковий оптичний зв'язок, спосіб наведення, вимоги до кутової орієнтації.

**Предложен способ наведения межспутниковой оптической линии связи по навигационным параметрам. Определены зависимости требований к угловой ориентации от параметров оптического терминала и дальности связи.**

*Ключевые слова:* межспутниковая оптическая связь, способ наведения, требования к угловой ориентации.

**A method of targeting the inter-satellite optical communication lines on navigation options. The dependence of the requirements for the angular orientation of the optical parameters of the terminal and the communication range.**

*Keywords:* inter-satellite optical communication, a way of pointing, the requirements for angular orientation.

**Введение.** Повышение эффективности спутников связи и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) связывают с созданием межспутниковых линий связи и в первую очередь с межспутниковыми оптическими линиями связи (МОЛС). Использование МОЛС позволяет увеличить скорость и объём передачи полезной информации между спутниками ДЗЗ и повысить оперативность получения информации, ограниченную количеством наземных станций. Практическая реализация экспериментальных терминалов МОЛС показала высокую эффективность их использования для передачи информации со сверхвысокой скоростью (до десятков Гбит). Успешная передача данных между спутниками в оптическом диапазоне была осуществлена в проектах SILEX (2001 г.), LUCE (2005 г.), LCT (2008 г.) и EDRS (2014–2016 гг.). Терминалы МОЛС используют длины волн видимого и ближнего ИК-диапазонов (1,6–0,5 мкм) [1]. В качестве лазерного излучателя часто используют одномодовые полупроводниковые лазеры, которые имеют малые габариты, высокий КПД (25–35 %) и значительный ресурс (до 100 тыс. ч.) [2].

Для передачи информации с высокими скоростями используют узкие лучи, что приводит к сложным алгоритмам наведения с прецизионной точностью, намного превышающей точность ориентации и стабилизации космического аппарата.

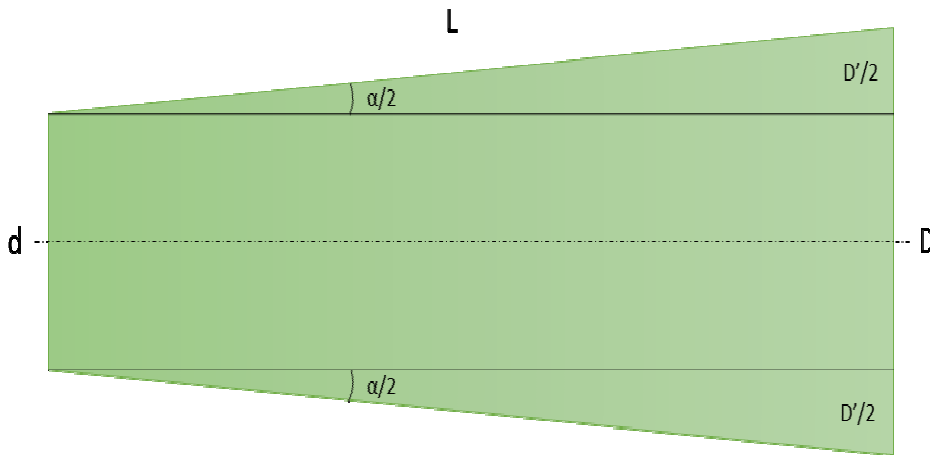
На данном этапе эту задачу решают отдельными оптическими терминалами, обладающими достаточно большими массогабаритными и энергетическими характеристиками (масса терминала ЛСТ – 35 кг, габариты – 50 × 50 × 60см, энергопотребление – 70 Вт), что исключает возможность их использования на малых космических аппаратах класса микроспутник.

**Постановка задачи.** Рассмотрим способ наведения луча МОЛС по навигационным параметрам спутников и оценим требования к точности ориентации оптического терминала в зависимости от дальности связи и параметров терминала.

**Решение задачи.** Предположим, что на фиксированный момент времени известны с определенной точностью навигационные параметры спутников, между которыми устанавливается связь (координаты и скорости). Предположим также, что спутники располагаются на одной орбите, что характерно для создания спутниковых группировок ДЗЗ.

Для рассмотрения вопросов наведения терминала МОЛС необходимо знать угол расходимости лазерного излучения, а также зону неопределенности, в которой находится спутник на данный момент времени.

Найдем угол расходимости лазерного излучения. На рис. 1 приведена схема расходимости оптического луча в зависимости от расстояния и диаметра линзы, где  $\alpha$  – угол расходимости лазерного излучения;  $D$  – полный диаметр расходимости лазерного излучения;  $D'$  – приращение диаметра расходимости лазерного излучения;  $d$  – диаметр излучающей антенны.



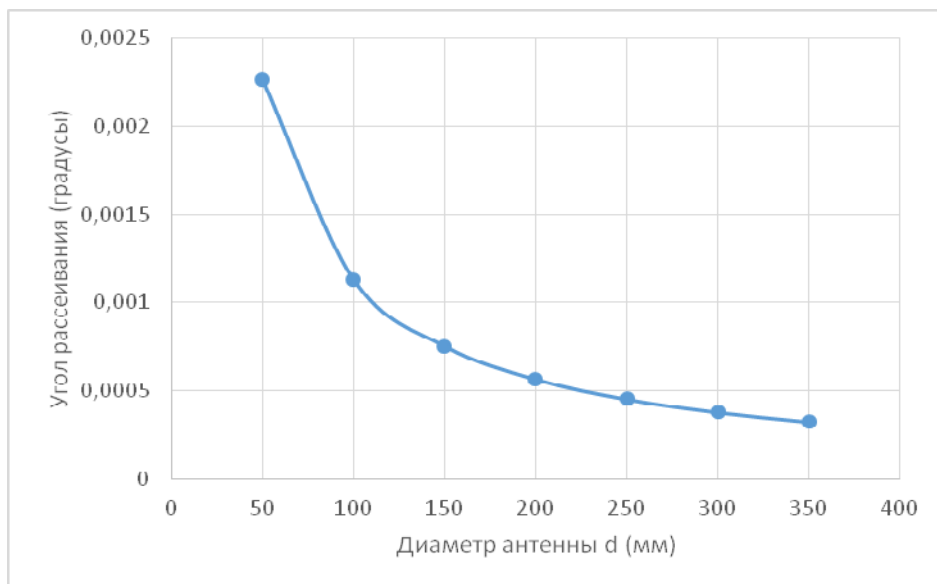
**Рис. 1. Приращение диаметра лазерного излучения**

Угол расходимости лазерного излучения зависит от длины волны и диаметра излучающей антенны. Для определения угла расходимости лазерного излучения в дальней зоне (рис. 1) при круглой апертуре воспользуемся формулой:

$$2\alpha = 2 \cdot 1,22 \frac{\lambda}{d}, \tag{1}$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $d$  – диаметр излучающей антенны.

График зависимости угла расходимости лазерного излучения от диаметра передающей антенны показан на рис. 2.



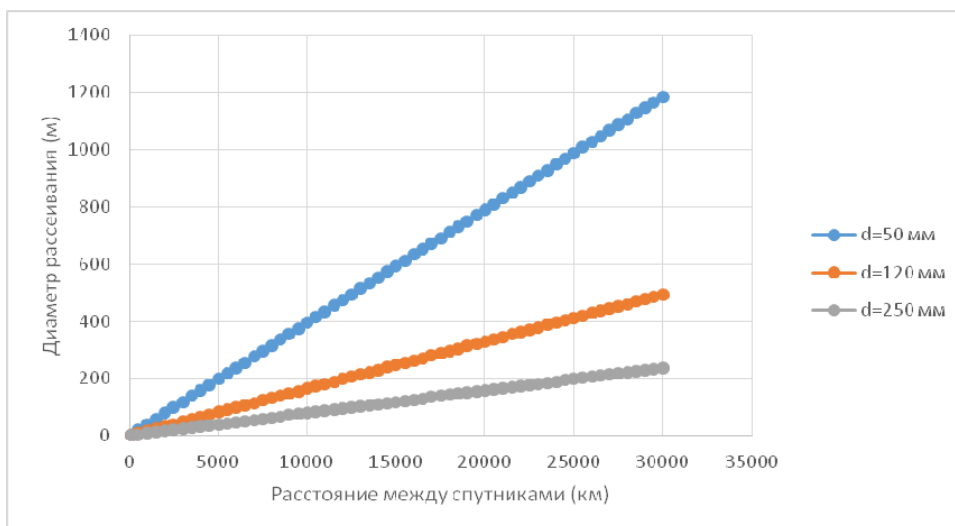
**Рис. 2. График зависимости угла расходимости от диаметра антенны**

Диаметр лазерного излучения (рис. 1) на определенном расстоянии  $L$  можно вычислить по формуле:

$$D = d + 2 \operatorname{tg} \alpha L, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр лазерного излучения;  $L$  – расстояние, на котором определяется этот диаметр.

Построим график зависимостей диаметра рассеивания лазера от расстояния между спутниками при разных диаметрах излучающей антенны  $d = 50$  мм,  $d = 120$  мм,  $d = 250$  мм при длине волны  $\lambda$ , равной 0,81 мкм (рис. 2).



**Рис. 3. Зависимость диаметра лазерного излучения от расстояния между спутниками**

Найдем зону неопределённости, в которой может находиться спутник.

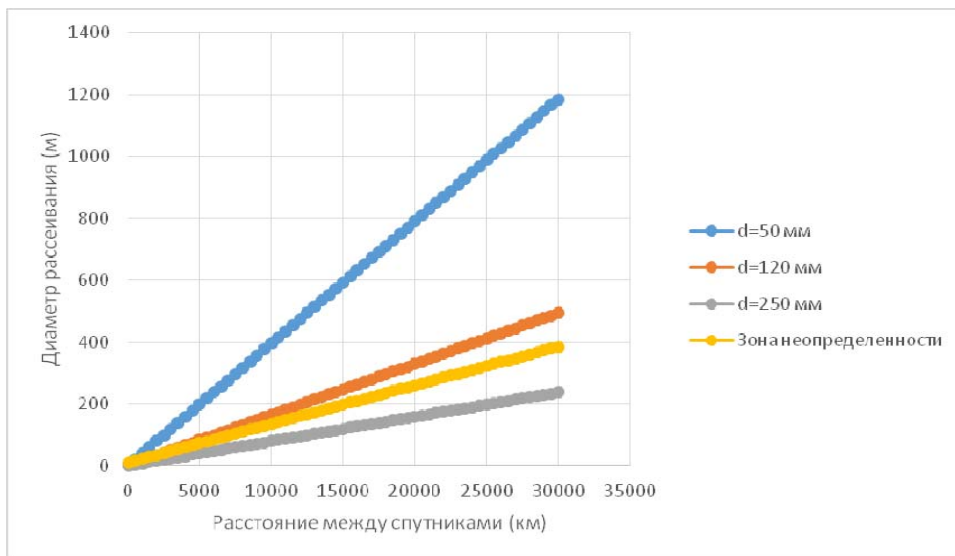
Сначала рассмотрим спутники в момент времени  $t_0$ , в случае, когда неопределённость координат спутника зависит только от погрешности определения координат GPS  $\Delta S_1$ , которая может составлять 10–15 м. Таким образом, диаметр рассеивания лазерного излучения уже на расстоянии в 5 тыс. км для антенны диаметром 250 мм будет больше чем диаметр зоны неопределённости положения спутника. Это означает, что при организации МОЛС в этом случае не требуется режим поиска и захвата цели.

Спутники движутся с большой скоростью и с течением времени ошибка определения координат накапливается. Рассмотрим случай организации МОЛС между двумя низкоорбитальными спутниками, которые находятся на одной орбите. Пусть скорость движения спутника  $V$ , а погрешность скорости, которую дает GPS,  $\Delta V$ . Тогда погрешность определения координат  $\Delta S$ :

$$\Delta S = \frac{\Delta V S}{V} + \Delta S_1, \tag{3}$$

где  $\Delta V$  – погрешность скорости определения координат;  $V$  – скорость движения спутника;  $S$  – расстояние, на котором определяется погрешность;  $\Delta S_1$  – погрешность стационарного режима.

Для наглядности построим на одном графике (рис. 4) зависимости зоны неопределенности координат спутника и диаметра рассеивания лазерного излучения на разных расстояниях, при  $\Delta V = 100$  м/с.



**Рис. 4. Зона неопределенности координат спутника и диаметр рассеивания лазера**

Для использования метода наведения оптических терминалов по навигационным данным зона неопределённости координат спутника должна быть меньше зоны рассеивания лазерного излучения. Как видно на рис. 4, этому условию удовлетворяют антенны передатчика диаметром менее 130 мм.

Уменьшение габаритов антенны терминала позволяет использовать предлагаемый способ наведения МОЛС на микроспутниках. Однако использование малых антенн приводит к снижению информационных характеристик МОЛС, а именно – скорости передачи. Эти вопросы предполагается рассмотреть в последующих исследованиях.

Кроме этого, определенные требования к габаритам предъявляет конструкция микроспутника, для которой габариты антенны должны быть не более 100 мм.

Найдем требования к угловой ориентации низкоорбитального спутника для наведения МОЛС. Рассмотрим случай создания МОЛС для группировки низкоорбитальных спутников ДЗЗ, расположенных равномерно на одной орбите. Необходимым условием создания оптической межспутниковой связи является то, что линии связи должны проходить за пределами атмосферы Земли, как показано на рис. 5. Исходя из этого условия, найдем количество спутников, которые можно расположить на разных орбитах (табл. 1).

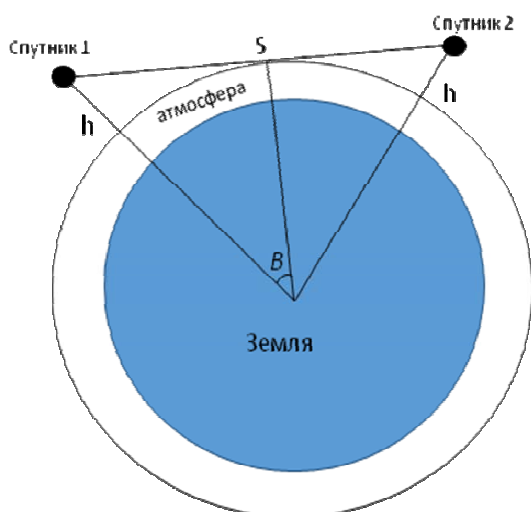


Рис. 5. Способ наведения МОЛС

Таблица 1

Количество спутников на орбите

Высота	Количество спутников	Расстояние между спутниками
600 км	9	4770 км
700 км	8	5420 км
800 км	7	6230 км

Таким образом, исходя из табл. 1, расстояние между спутниками может быть в пределах 4,7–6,2 тыс. км. На этом расстоянии угол неопределённости координат спутника будет составлять 0,014 угл. сек., а угол рассеивания лазерного излучения с антенной диаметром 100 мм – 5 угл. сек. Следовательно, точность ориентации терминалов МОЛС для обеспечения оптической связи должна быть не больше угла расходимости лазерного излучения, а именно 4 угл. сек. Данная точность может быть обеспечена использованием звездного датчика для измерения ориентации и пьезокерамическими приводами терминала МОЛС.

**Выводы.** Предложен способ наведения терминалов МОЛС по навигационным параметрам для низкоорбитальной группировки спутников ДЗЗ, который позволяет существенно упростить алгоритм наведения МОЛС.

Проведённые расчеты показали, что реализация предложенного метода может быть обеспечена малыми габаритами терминалов МОЛС, с несущественным снижением скорости передачи данных, что позволит использовать их на малых космических аппаратах массой до 100 кг.

Определены требования к точности ориентации терминалов МОЛС для обеспечения связи спутников ДЗЗ на низкой орбите. Расчеты показали, что для обеспечения функционирования сети МОЛС на низких орбитах точность ориентации терминала должна быть не хуже 5 угл. сек., что может быть обеспечено измерениями малогабаритного звёздного датчика и пьезокерамическими приводами.

### Библиографические ссылки

1. Методичне забезпечення систем керування і зв'язку. Моделювання і оптимізація складних процесів і систем: Звіт про НДР (заключн.) / Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара. № ДР 0114U000189; Інв. № 0716U002490. – Д., 2015. – 166 с.
2. **Крюкова И.В.** Проблемы создания аппаратуры для межспутниковых и атмосферных оптических линий связи / И.В. Крюкова, Н.Н. Чуковский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Прибостроение». – 2007. – № 19 – С. 2–15.
3. **Гавриленко С.В.** Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи / С.В. Гавриленко, Н.Н. Феоктистов, Д.К. Хегай // Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 3. – С. 54–60.

*Надійшла до редколегії 12.05.2016.*