

УДК 621.384.3

Канал наведения на основе матричного ФПУ для мобильного лазерного комплекса

Ю. В. Алексеев, Б. П. Муравьев, В. Н. Приходько, В. В. Сунцов, Р. Ш. Хисамов
ФГУП «НПО "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

Представлены результаты реализации научно-технического проекта по разработке устройства высокоточного наведения лазерного излучения — канала наведения. Дано описание конструкции прибора, структурной и оптической схем, алгоритма работы. Изложена методика проведения испытаний экспериментального образца, приведены результаты испытаний.

Разработан и успешно прошел натурные испытания экспериментальный образец канала наведения (КН) лазерного луча на источник инфракрасного (ИК) излучения (рис. 1).

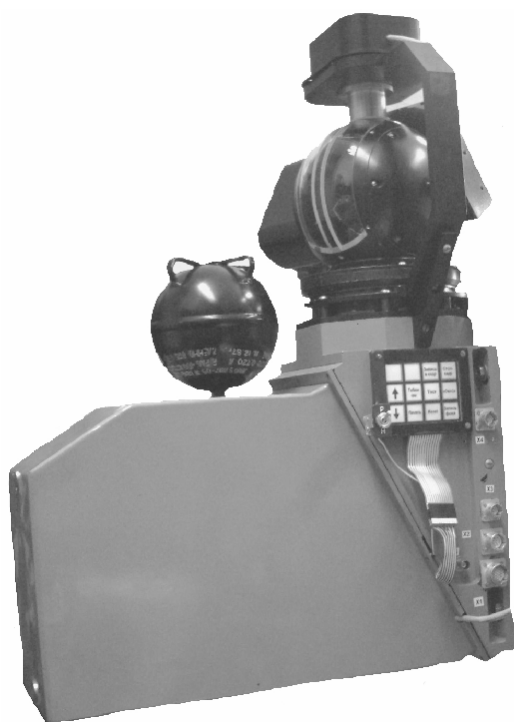


Рис. 1. Канал наведения. Общий вид

КН представляет собой прибор для быстрого и точного наведения лазерного луча на движущийся источник ИК-излучения по предварительному целеуказанию (ЦУ) от устройства управления с последующим удержанием луча на цели. КН предназначен для применения в областях науки и техники, связанных с использованием лазерного излучения, таких как оптическая связь, дальнометрия, навигация и др.

Экспериментальный образец КН проходил испытания в составе мобильного лазерного комплекса (МЛК),

в состав которого кроме КН входят канал обнаружения (КО), лазерная установка (ЛУ) и устройство управления (УУ), которое обеспечивает согласованную работу КО, КН и ЛУ.

КН выполнен в виде автономного модуля, который стыкуется с ЛУ и работает по командам УУ. Обмен данными с УУ осуществляется в стандарте RS-485.

Основные тактико-технические характеристики КН приведены ниже.

Поле обзора, град:	
азимут.....	± 90
угол места.....	+20÷-40
Угловое поле зрения, град.....	2×1,8
Элементарное поле зрения, град.....	0,01
Дальность обнаружения цели, км.....	до 5,0
Время обнаружения цели (после	
получения координат цели от УУ), с.....	0,7
Точность наведения, угл. мин, не хуже.....	3
Рабочий спектральный диапазон, мкм.....	3,5—5,0
Диаметр входного зрачка, мм.....	65
Относительное отверстие.....	1:2,7
Тип фотоприемника.....	матрица на PtSi
Система охлаждения фотоприемника.....	разомкнутая баллонная
Количество элементов разложения.....	256×256
Напряжение питания, В.....	27±10 %
Потребляемый ток, А:	
средний.....	до 3
в импульсе.....	до 15
Габаритные размеры, мм.....	650×450×200
Масса, кг.....	20

Структурная схема КН приведена на рис. 2. В состав КН входят:

оптическая система с подвижным зеркалом, позволяющим перемещать поле зрения по азимуту и углу места;

фотоприемное устройство (ФПУ) "Факел-М" с охлаждаемой матрицей формата 256×256 элементов для приема ИК-излучения и преобразования его в электрические сигналы;

компрессор видеосигналов для предварительной обработки и прореживания информации, получаемой с ФПУ;

процессор СММ 6686 GX 233-32 для окончательной обработки информации и общего управления работой прибора;

плата цифрового ввода/вывода DM 6810 для связи компрессора с процессором;

модуль электропитания составных частей КН;

датчик угла азимутальный для определения азимута зеркала;

датчик угла угломестный для определения угла места зеркала;

двигатель азимутальный для перемещения зеркала по азимуту;

двигатель угломестный для перемещения зеркала по углу места;

схема управления двигателем азимутальным;

схема управления двигателем угломестным.

Конструктивно КН выполнен в виде блока, состоящего из основания, узла угломестного привода и узла приема излучения. Основание представляет собой несущий силовой корпус, в котором установлены азимутальный привод зеркала и токосъемники. К корпусу крепятся узлы угломестного привода и приема излучения.

Узел угломестного привода представляет собой сферический корпус, в котором установлено зеркало с угломестным приводом. Часть сферического корпуса перед зеркалом выполнена из прозрачного для ИК-излучения материала. Сверху над сферическим корпусом на кронштейне расположен азимутальный датчик.

Сбоку на сферическом корпусе расположен угломестный датчик. На тыльной стороне сферы установлена схема управления угломестным приводом.

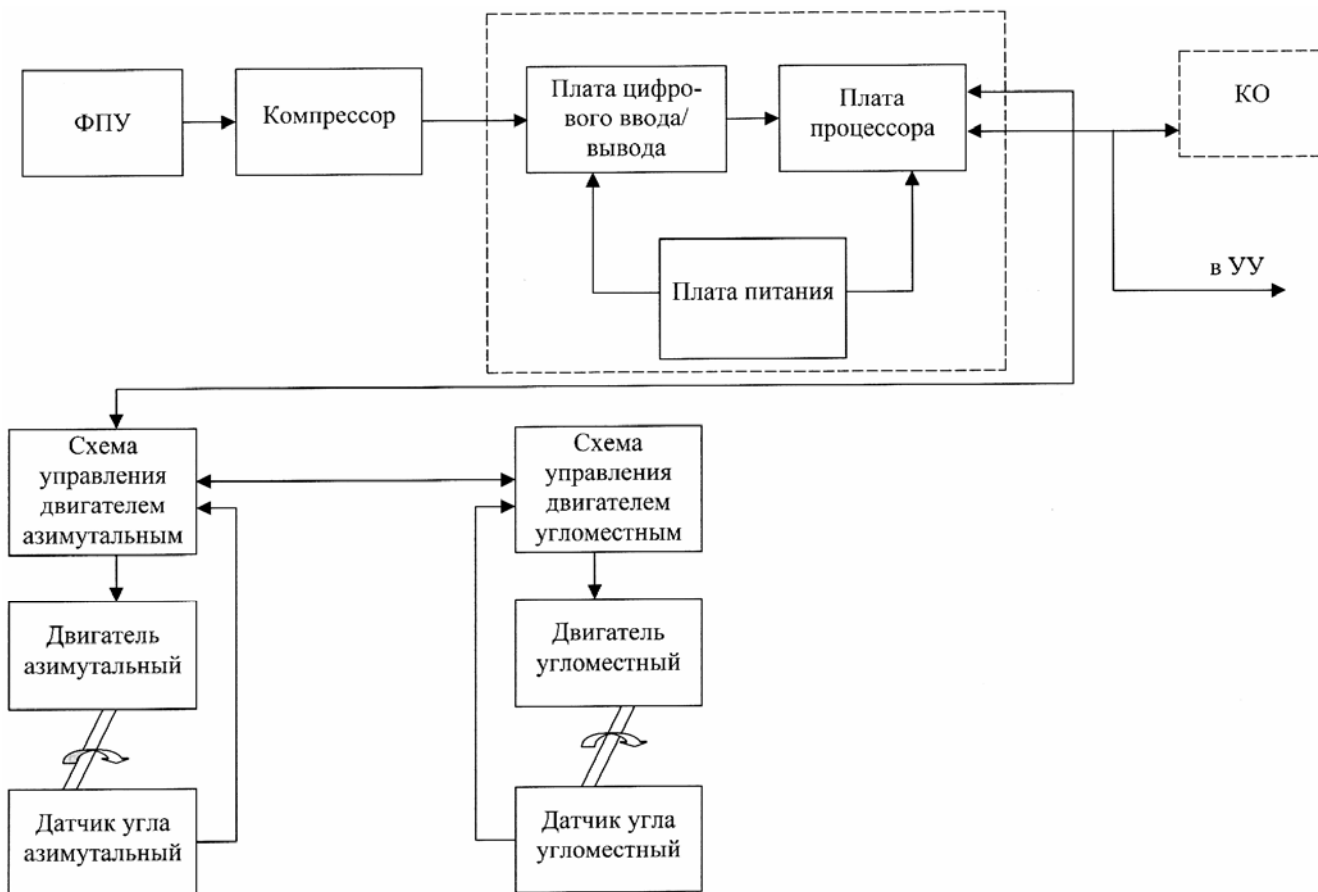


Рис. 2. Структурная схема канала наведения

Электропитание и команды управления в узел угломестного привода передаются через токосъемник.

Узел приема излучения содержит ФПУ, компрессор видеосигналов, процессор, плату цифрового ввода/вывода, модуль электропитания и схему управления азимутальным приводом. На узел приема излучения надет кожух, который прикреплен к несущему силовому корпусу. В верхней части кожуха предусмотрено отверстие, в

котором размещен входной штуцер системы охлаждения матрицы ФПУ.

На боковой стенке несущего силового корпуса установлены разъемы для подключения электропитания и кабеля связи в стандарте RS-485, а также панель управления для выбора режима работы ФПУ.

Оптическая схема КН представлена на рис. 3.

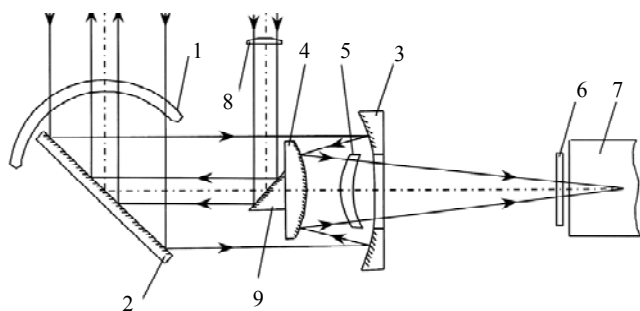


Рис. 3. Оптическая схема канала наведения

Излучение от цели проходит через защитное окно 1 сферической формы, отражается от сканирующего зеркала 2, затем поступает в объектив, состоящий из зеркал 3, 4 и линзы 5, и попадает на ФПУ 7 через спектральный фильтр 6. Сканирующее зеркало 2 имеет возможность вращаться относительно угломестной и азимутальной осей, чем обеспечивается изменение направления визирования кадром $2 \times 1,8^\circ$ в пределах $182 \times 92^\circ$ (азимут \times угол места). Излучение лазера поступает через линзу 8 и зеркало 9 на зеркало 2, затем отражается от него и выходит через защитное окно 1. Линза 8 компенсирует действие сферического защитного окна 1, являющегося слабой отрицательной линзой. Оптические оси лазерного пучка и поля зрения ФПУ совмещены в пространстве, что обеспечивает наведение лазера на цель во всех случаях визирования цели в поле $182 \times 92^\circ$, если центр изображения цели совмещен с центром кадра.

Алгоритм работы канала наведения следующий. После завершения обработки целеуказания приводами цель оказывается в поле зрения КН. ФПУ формирует видеосигнал кадра, в котором находится цель. Видеосигнал поступает на плату компрессора, осуществляющего сжатие информации за счет использования порогового устройства, пропускающего на выход только сигналы, существенно превышающие средний уровень яркости фона. В результате этого резко сокращается объем информации, поступающей в процессор для дальнейшей обработки. Для выделения цели от фоновых образований используется размерная и амплитудная селекция. После обнаружения цели в поле кадра начинается управление приводами таким образом, чтобы изображение цели оказалось в центре кадра. Совмещение центра изображения цели с центром кадра означает, что ось лазерного луча направлена на цель. В этот момент КН выдает в УУ сообщение о завершении процесса наведения, и УУ вырабатывает команду запуска лазера.

Были проведены автономные испытания КН и получены следующие результаты:

- определены пороговая чувствительность, время и точность обработки целеуказания;
- отработана и проверена методика совмещения систем координат КО и КН;
- отработан алгоритм точного наведения центра кадра КН на источник излучения.

КН размещался на поворотном устройстве, обеспечивающем поворот оси визирования по азимуту и углу

места с точностью не менее $5'$. На расстоянии 5 м от КН было установлено сферическое зеркало, в фокусе которого находилась выходная диафрагма абсолютно черного тела (АЧТ) на температуру 300°C . Изменение интенсивности выходного потока АЧТ достигалось путем смены выходных диафрагм.

За величину пороговой чувствительности принимается минимальный уровень облученности входного зрачка, при котором обеспечивается вероятность обнаружения не менее 0,95. Она составила $3,2 \cdot 10^{-10}$ Вт/см².

Определение времени отработки целеуказания производилось путем подачи в КН координат цели с регистрацией следующих параметров обработки команды:

- исходного положения линии визирования КН;
- заданных координат;
- погрешности обработки целеуказания;
- динамических параметров (путь и время разгона, равномерного движения и торможения).

Результаты приведены в таблице.

Результаты определения параметров обработки целеуказания

Наименование параметра	По азимуту	По углу места
Исходное положение, град	0	0
Заданные координаты, град	45	5,51
Погрешность отработки ЦУ, угл. мин	± 3	± 6
Время отработки ЦУ, с	0,34	0,32
Путь разгона, град	7,29	0,7
Время разгона, с	0,06	0,02
Путь равномерного движения, град	33,14	4,55
Время равномерного движения, с	0,1	0,1
Путь торможения, град	4,57	0,26
Время торможения, с	0,18	0,2

Для совмещения систем координат каналов обнаружения и наведения КО устанавливался на поворотном устройстве. Имитатор цели устанавливался так, чтобы он находился в поле зрения КО и КН одновременно. С помощью поворотного устройства КО ориентировался таким образом, чтобы цель оказалась в центре поля зрения КО. Нахождение цели в центре поля зрения контролировалось по координатам цели, выдаваемым КО в УУ. Затем положение КО в пространстве фиксировалось, и направление от КО к имитатору цели считалось имеющим нулевые азимут и угол места. Положительным направлением азимута считается направление вправо от нулевого, а угла места — вверх от нулевого.

Затем на имитатор цели направлялся КН таким образом, чтобы цель оказалась приблизительно в центре кадра КН. Нахождение цели в центре кадра контролировалось визуально по монитору, подключенному к видеовыходу КН. В данном положении КН с помощью специальной программы снимались показания азимутального и угломестного датчиков, которые при дальнейшей работе использовались программами обработки данных в качестве поправочных коэффициентов.

Исследования показали, что методика совмещения систем координат каналов обнаружения и наведения

обеспечивает их взаимное функционирование и необходимую точность обработки целеуказания.

Наведение центра кадра КН на источник излучения выполняется в два этапа по следующему алгоритму.

Сначала по целеуказанию от УУ оптическая ось КН направляется на цель с ошибкой наведения в пределах $\pm 0,5^\circ$, обусловленной погрешностью определения координат цели каналом обнаружения. В процессе обработки ЦУ положение приводов контролируется с помощью угловых датчиков. После обработки ЦУ изображение цели появляется в кадре КН, и дальнейшее наведение заключается в том, чтобы вывести изображение цели в центр кадра. При этом правильность наведения контролируется по положению энергетического центра изображения цели, а не по угловым датчикам.

Для перемещения зеркала по азимуту и углу места в приборе используются двигатели ДБМ (двигатель бесконтактный моментный), конструкция которых позволяет регулировать создаваемый ими вращательный момент.

Для управления двигателями используются микроконтроллеры Atmega 163 с соответствующим программным обеспечением. Программное обеспечение микроконтроллеров реализует алгоритм пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления двигателями, согласно которому на основании сигнала ошибки формируется оптимальное управляющее воздействие на двигатель с учетом динамических свойств системы и воздействия внешних возмущающих факторов.

При обработке ЦУ сигнал ошибки определяется по угловым датчикам, быстрое действие которых не накладывает ограничений на скорость перемещения приводов. В первом варианте КН использовались абсолютные 12-разрядные датчики угла ЛИР-458А. Они позволяют определить абсолютное положение привода с точностью 5,3 угл. мин. Этого вполне достаточно для обработки ЦУ (точность наведения $\pm 0,5^\circ$). Для точного наведения лазерного луча на цель (с ошибкой не более 3 угл. мин) в качестве сигнала ошибки использовалось отклонение энергетического центра изображения цели от центра кадра КН. В процессе испытаний выяснилось, что при таком подходе низкая кадровая частота ФПУ КН (50 Гц) накладывает принципиальные ограничения на скорость перемещения приводов в режиме точного наведения. Во-первых, сигнал ошибки в принципе не может обновляться быстрее 50 раз в секунду. Во-вторых, для определения точного положения цели при достаточно большом времени экспозиции кадра (20 мс) приводы во время экспозиции должны быть остановлены, иначе вместо изображения цели в кадре получится траектория ее движения за эти 20 мс. В-третьих, должен быть предусмотрен промежуток времени для остановки приводов после перемещения. С учетом этих обстоятельств был принят следующий алгоритм точного наведения. В течение одного кадра (20 мс) приводы стоят

неподвижно за счет своих фрикционных свойств. Определяется сигнал ошибки как отклонение энергетического центра неподвижного изображения цели от центра кадра. В начале следующего кадра в течение 3—5 мс применяется управляющее воздействие на двигатели приводов, рассчитанное согласно алгоритму ПИД регулирования с учетом сигнала ошибки. Оставшееся время кадра (15—17 мс) необходимо для полной остановки приводов. Далее процесс повторяется. Таким образом, управляющее воздействие на двигатели корректируется в зависимости от сигнала ошибки через каждые 40 мс и применяется в течение 3—5 мс, остальное время (35—37 мс) непроизводительно тратится на ожидание остановки приводов и экспозицию. С учетом этих обстоятельств был сделан вывод, что при низкой кадровой частоте ФПУ изложенный алгоритм точного наведения не может обеспечить высоких динамических параметров.

В модернизированном варианте КН, несмотря на низкую кадровую частоту, удалось существенно улучшить динамические параметры наведения за счет применения угловых датчиков приращений ЛИР-158А, которые обладают существенно большим разрешением — 0,1 угл. мин, но не являются абсолютными датчиками.

В результате серьезных схемотехнических и программных доработок удалось использовать эти датчики как квазиабсолютные с первоначальной привязкой к абсолютному положению по сигналу референтной метки и последующим аппаратным суммированием приращений с учетом знака, реализованным на ПЛИС ЕРМ3064АТС44-10. Обработка ЦУ производится так же, как и в первом варианте. После обработки ЦУ и появления в кадре КН изображения цели определяется ошибка наведения как отклонение энергетического центра изображения цели от центра кадра. Дальнейшее наведение производится согласно алгоритму ПИД регулирования, сигнал ошибки при этом определяется по угловым датчикам. Так как угловые датчики в данном варианте обеспечивают достаточно высокую точность определения координат и не накладывают ограничений на скорость перемещения приводов, точное наведение выполняется с максимальной эффективностью за минимальное время. После остановки приводов проверяется правильность наведения по положению изображения цели, в случае необходимости выполняется дальнейшая коррекция. В ходе испытаний КН была подтверждена высокая эффективность данного алгоритма.

Проводились натурные испытания КО и КН в составе мобильного лазерного комплекса.

В ходе эксперимента КО и КН испытывались в составе МЛК по согласованной программе и методикам. Материальная часть располагалась на двух постах на расстоянии 500 м:

на посту № 1 — КО, КН, УУ, ЛУ;

на посту № 2 — источник излучения, устройство регистрации лазерного излучения, система обработки и накопления информации.

В качестве источника излучения, по которому производилось обнаружение и удержание цели, использовалась галогенная лампа накаливания типа КГ-220-1000-7 (кварцевая галогенная, 220 В, 1000 Вт). Высокая температура нити и кварцевый баллон лампы обеспечивают достаточный уровень излучения как в УФ-, так и в ИК-спектре.

Работа комплекса происходила в следующей последовательности:

- проверка готовности к работе КО, КН и ЛУ устройством управления;
- после получения сигнала готовности всех систем перевод комплекса в рабочий режим;
- включение источника излучения;
- обнаружение источника излучения каналом обнаружения и передача координат в УУ;
- отработка целеуказания каналом наведения по команде УУ;
- выведение изображения цели в центр кадра КН;
- запуск лазера по команде УУ и регистрация попадания луча лазера в цель.

В процессе испытаний проводилась автоматическая регистрация параметров работы аппара-

ратуры. Параллельно осуществлялась видеозапись кадров ФПУ КН.

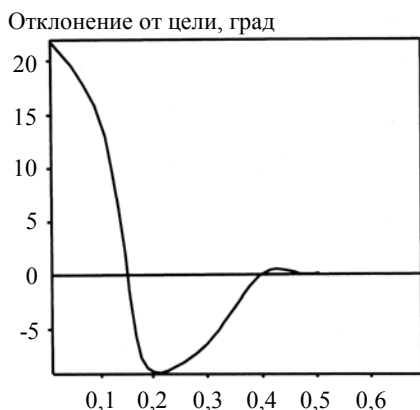
По полученным результатам комплексно оценивалась работа МЛК.

Было проведено 15 циклов испытаний с положительным результатом.

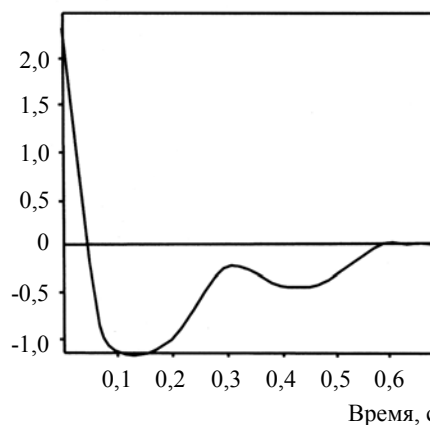
На рис. 4 приведены кадры, отражающие процесс отработки ЦУ каналом наведения и захвата цели. Приведены результаты обработки данных типичного эксперимента, зарегистрированных устройством управления:

дата, время 19.02.02, 14:35
 наименование эксперимента пуск 8
 время излучения, с 2
 время отработки ЦУ, с 0,4

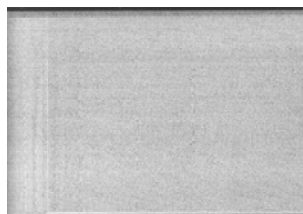
Азимутальный привод



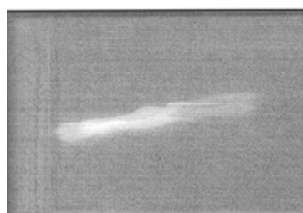
Угломестный привод



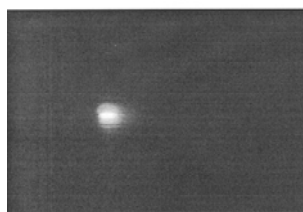
время отработки захвата, с.....	0,6
ошибка наведения по азимуту,	
угл. мин.....	0,9
ошибка наведения по углу места,	
угл. мин.....	1,2



Кадр 195.
Отработка ЦУ,
цель не в поле зрения КН



Кадр 197.
Отработка ЦУ,
цель в поле зрения КН



Кадр 207.
ЦУ отработано, отработка
захвата цели "маленьким"
кадром



Кадр 212.
Захват отработан

Рис. 4. Кадры видеозаписи отработки целеуказания и захвата цели

На рис. 5 представлены траектории отработки ЦУ азимутальным и угломестным приводами.

Рис. 5. Траектории отработки целеуказания приводами

Таким образом, показана принципиальная возможность создания канала наведения на базе МФПУ, выполненного на основе PtSi, формат матрицы 256×256 элементов. Рассматривается возможность применения МФПУ на основе InSb, обладающего намного большей

чувствительностью и быстродействием, что позволит существенно повысить дальность действия КН и сократить время наведения.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

The pointing channel on the basis of array photodetecting device for the mobile laser complex

Y. V. Alekseev, B. P. Muravyov, V. N. Prihodko, V. V. Suntsov, R. Sh. Hisamov
FSUE «NPO "State Institute of Applied Optics"», Kazan, Russia

The results of realization of the scientific and technical project on the development of the device of high-precision pointing of laser radiation — the pointing channel are presented in this report. You can find here the description of the device design, its structural and optical arrangements, and operation algorithm. The testing technique of an experimental sample is stated, the testing results are presented.