



УДК 681.784.3

*Н.А. Грязнов, С.М. Панталеев, А.Е. Иванов,
Д.А. Кочкарёв, Д.С.Куликов*

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*N.A. Grjaznov, S.M. Pantaleev, A.E. Ivanov,
D.A. Kochkarev, D.S. Kulikov*

HIGH PERFORMANCE MEASUREMENT REFERENCE OBJECTS IN SPACE TO THE HYDRAULIC CENTRIFUGAL CASTING PIPES

Рассмотрены существующие подходы к лазерной локации и определены их основные недостатки. Предложен метод повышения производительности лазерной локации, базирующийся на использовании призмного сканирования, кодировании сигналов, в том числе спектрального, и применении матричного приема излучения.

ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ. ПРИЗМЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ. КООРДИНАТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ. МАТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК. КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛА.

Analysis of existing approaches to laser location ensures revealing their main limitations. The suggested usage of prism scanning, signal coding, including the spectral one, and array detection of radiation provide increase of laser location performance.

LASER LOCATION. PRISM SCANNING. COORDINATE INFORMATION. ARRAY DETECTOR. SIGNAL CODING. SPECTRAL CODING.

Одним из наиболее активно развиваемых способов сбора координатной информации является лазерная локация. В сравнении с радиочастотными методами она выигрывает по угловому разрешению при сравнимых габаритах выходных апертур либо по массогабаритным параметрам при равных требованиях к разрешению. Тем не менее все активные методы зондирования обладают естественными ограничениями, связанными со скоростью распространения излучения.

В тех случаях, когда требования к скоростям обзора пространства не позволяют дожидаться возврата импульса зондирования с дистанции, соответствующей заданному рабочему диапазону системы, приходится изыскивать средства дифференциации сигналов. В оптической области эта ситуация усугубляется малыми полями зрения приемных детекторов и высокими требованиями к сохранению плоскостности поверхности элементов, обеспечивающих угловое сканирование.

Предлагаемый метод повышения производительности лазерной локации базируется на использовании призмного сканирования, кодирования сигналов, в том числе спектрального, и применении матричного приема излучения. Данный подход может быть использован в системах лазерной локации, измерительных лазерных комплексах, в устройствах обнаружения, сопровождения, наведения, технического зрения и навигации, работающих как в нормальных условиях, так и при высоком уровне помех, плохой видимости или отсутствии освещения. Он может применяться как самостоятельно, так и в сочетании с системами аналогичного назначения, функционирующими на базе других принципов.

Авторы работы [1] предложили способ видения подводных объектов, включающий управляемое сканирование зондирующим лазерным излучением с узкой диаграммой направленности в спектральной области прозрачности воды и регистрацию интенсивности излучения, отраженного от различных точек поверхности объекта,

посредством приемника с широкой или узкой диаграммой направленности. Восстановление двумерного образа объекта при такой локации происходит по показаниям датчиков системы сканирования за счет преобразования временной зависимости интенсивности отраженного излучения в координатную.

Подобный подход обладает существенными недостатками. Во-первых, не используется информация о третьей координате (дальность), содержащаяся во времени распространения лазерного импульса до объекта и обратно, в результате чего восстанавливается лишь двумерный, плоский образ объекта вместо трехмерного. Также не оправдано использование широкой диаграммы направленности приемника, ибо увеличивает интенсивность фоновой засветки и уменьшает помехозащищенность метода, ограничивая чувствительность детектора к отраженному сигналу. Для обеспечения большого диапазона по дальности функционирования использование подобного приемника потребует значительного увеличения мощности передатчика, что нерационально с точки зрения массогабаритных и энергетических параметров.

Более стандартный подход к лазерной локации подробно рассмотрен в монографии [2]. В ней предложен способ определения положения объекта на базе сканирующего лазерного дальномера, работающего по отраженному сигналу. Для зондирования пространства формируется импульс лазерного излучения заданной длительности, которая определяется требованиями к разрешению по дальности, и расходимости, определяемой требованиями к разрешению по угловым параметрам.

С помощью сканирующих средств обеспечивают развертку оптической оси приемопередающего тракта по двум угловым координатам и формируют текущее направление зондирования, фиксируемое датчиками системы сканирования для определения углового положения лоцируемых объектов. Время прихода излучения, диффузно отраженного от объекта, регистрируется приемной системой для вычисления временного интервала, прошедшего с момента испускания импульса зондирования, по которому определяется расстояние до объекта.

Недостаток классического способа лазерной локации, как было указано, связан с ограничени-

ем на максимальную частоту следования лазерных импульсов f при заданном диапазоне дальностей L , что не позволяет совместить высокую производительность обзора пространства с высоким угловым разрешением.

Это связано с неоднозначностью определения расстояния до лоцируемых объектов на частоте более $c/2L$ (c — скорость света в рабочей среде) в том случае, когда следующий импульс излучения посылается, не дожидаясь прихода отраженного сигнала с максимальной дальности. Учитывая тот факт, что современные лазерные излучатели способны реализовать угловую расходимость в доли миллирадиан при пиковой мощности импульса, обеспечивающей предельные дальности локационной системы в десятки километров, это ограничение — весьма существенно. Так, для максимальной дальности в 10 км, угловой расходимости в 1 мрад и поля зрения в 1 ср время полного обзора даже при оптимальной организации сканирования превышает одну минуту, что не позволяет говорить об оперативном сборе информации.

Задачей проведенной разработки было повышение производительности лазерной локации или сокращение времени обзора пространства при одновременном увеличении рабочей дальности и поля зрения с сохранением однозначности определения дальности до обнаруживаемых объектов. Для решения указанной задачи в первом варианте способа высокопроизводительной лазерной локации предлагается использовать матричный прием излучения, при котором каждому элементу линейки приемников соответствует свой поддиапазон расстояний до объекта.

Сканирование пространства во всех вариантах производится при помощи двух сканаторов, осуществляющих повороты совмещенных осей оптических пучков передающего и приемного каналов в ортогональных направлениях (рис. 1). В остальном алгоритм работы полностью аналогичен классическому способу лазерной локации, описанному выше.

Матричный прием излучения реализуется за счет равномерной и однонаправленной скорости строчной развертки, на несколько порядков (как минимум, более десяти раз) превышающей допустимые скорости кадровой развертки. В качестве примера подобных средств можно привести

зеркальный призмный дефлектор, число граней N которого определяется требуемым полем зрения локатора в данном направлении (не превышает $720^\circ/N$).

Кадровая развертка может осуществляться сканаторами любого типа, обеспечивающими необходимые апертурные характеристики, диапазон и скорость развертки. Алгоритм сканирования в направлении, перпендикулярном направлению строчной развертки, позволяет в широких пределах варьировать размер зоны обзора, направление и плотность заполнения кадра.

Равномерная угловая скорость строчной развертки ω (при использовании зеркального призмного дефлектора она равна удвоенной скорости вращения) приводит к линейному по времени увеличению углового рассогласования между осью передающей и приемной систем $\Delta\alpha = \omega t$. При использовании частоты следования импульсов лазерного излучения f выше допустимой по критерию предельной дальности $c/2L$ введем понятие интервала однозначности по дальности — $s = c/2f$ (период однозначности по времени при этом составит $T = 1/f$).

Для решения проблемы неоднозначности определения дальности в этом случае используется линейка приемников с расстоянием между соседними приемниками d , не превышающим $F\omega/f$, где F — эффективное фокусное расстояние приемной системы (граничный вариант $d = F\omega/f$). Число приемников N выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемый диапазон дальностей, т. е. не менее $2LF\omega/cd$ (в граничном варианте — $N = 2Lf/c$). Первый приемник линейки, точнее, центр его стороны, максимально

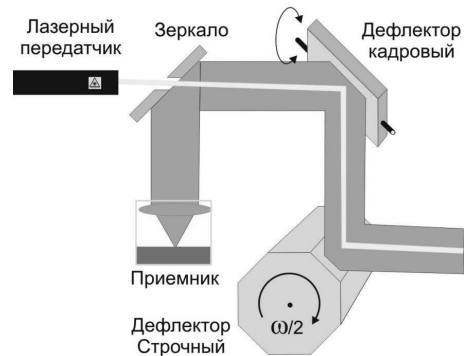


Рис. 1. Оптическая схема высокопроизводительного способа лазерной локации

удаленной от остальных приемников линейки, размещается на оси приемной системы, совпадающей с осью передающей системы, а последний ориентируется в направлении строчного сканирования (рис. 2).

Соответственно, на первый приемник приходит сигнал из ближней зоны, с расстояния, не превышающего интервал неоднозначности для выбранной частоты следования импульсов. На последний приемник сигнал приходит из дальней зоны с дистанции, отличающейся от максимальной дальности локации на расстояние, не превышающее интервал неоднозначности. Расчет дальности z осуществляется по формуле $z = cnd/2F\omega + c\Delta t/2$, где Δt — временной интервал между моментом генерации последнего импульса лазерного передатчика и моментом регистрации отраженного излучения, а n — номер приемника, на который поступил отраженный импульс.

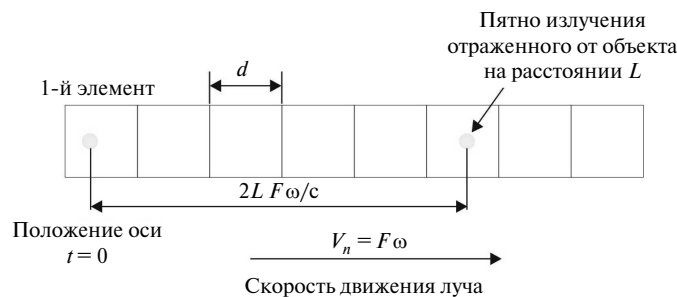


Рис. 2. Схема перемещения изображения объекта по линейке приемников в высокопроизводительном способе лазерной локации

Для случая, когда использование линейки приемников неоправданно затратно или неудобно с технической точки зрения, предлагается второй вариант высокопроизводительной лазерной локации с кодированием сигналов передатчика для устранения неоднозначности. Требуемая длительность последовательности неповторяющихся сигналов определяется отношением максимальной дальности к интервалу однозначности. Исключение ошибки, возникающей при отражении от объекта, находящегося за пределами рабочего диапазона дальностей, обеспечивается угловыми габаритами приемника, соответствующими смещению на максимальной дальности.

Кодирование сигналов осуществляется варьированием временной задержки между двумя импульсами, излучаемыми спектрально разнесенными лазерными генераторами и выведенными на общую оптическую ось передатчика с помощью дихроичного светоделителя. Аналогичным образом спектрально разделяются каналы приемной системы, в которой два приемника регистрируют времена прихода отраженных импульсов на соответствующих длинах волн излучения (рис. 3).

Определение дальности до объекта в этом случае осуществляется по формуле $z = c\Delta t/2$, где Δt — временной интервал между моментом генерации импульса на некой выбранной длине волны излучения из числа последних N импульсов, кодировка сигнала которого совпадает с кодировкой пришедшего сигнала, и моментом прихода отраженного излучения на той же длине волны.

В частном случае, когда класс объектов локации существенно ограничен по габаритам и скорости перемещения, с учетом того, что вероятностью появления двух объектов в зоне поиска можно пренебречь, алгоритм повышения производительности локации кодированием сигналов может быть упрощен до использования одного лазерного излучателя, генерирующего спаренные импульсы с варьируемым интервалом между ними, и одного приемника.

Таким частным случаем является лазерная локация в космическом пространстве, когда даже на нижних орбитах можно смело пренебречь вероятностью появления второго объекта на том же направлении сканирования, а габариты существующих объектов ограничены десятками метров. В этом случае можно задать минимальный временной интервал между зондирующими импульсами, превышающий 300 м, что обеспечит надежное разделение сигналов и их дифференциацию от результатов множественного отражения.

Дело в том, что самый крупный объект на нижней орбите, каковым является Международная космическая станция, не превышает 100 м по самой протяженной координате. Именно ее сложная архитектура и может приводить к разбиению импульса зондирования на несколько отраженных от разных элементов станции сигналов. Подобное ограничение по габаритам позволяет существенно упростить оптическую схему метода.

На рис. 4 приведена конструкция наземного макета для обработки технологии космической

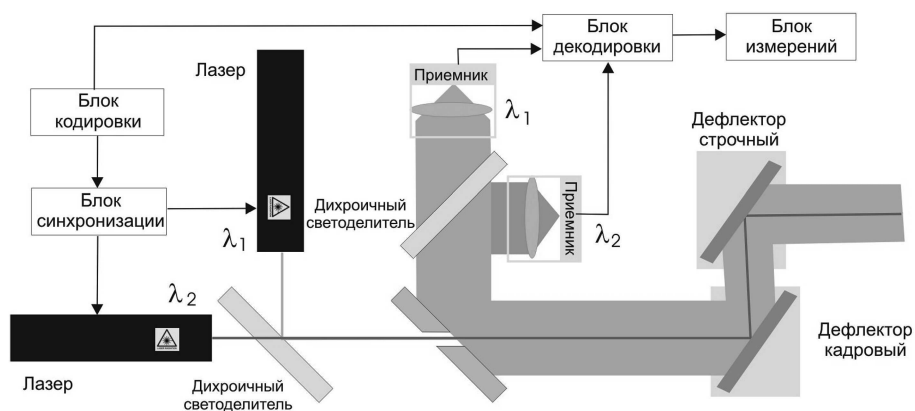


Рис. 3. Схема высокопроизводительного способа лазерной локации со спектральной кодировкой зондирующих импульсов

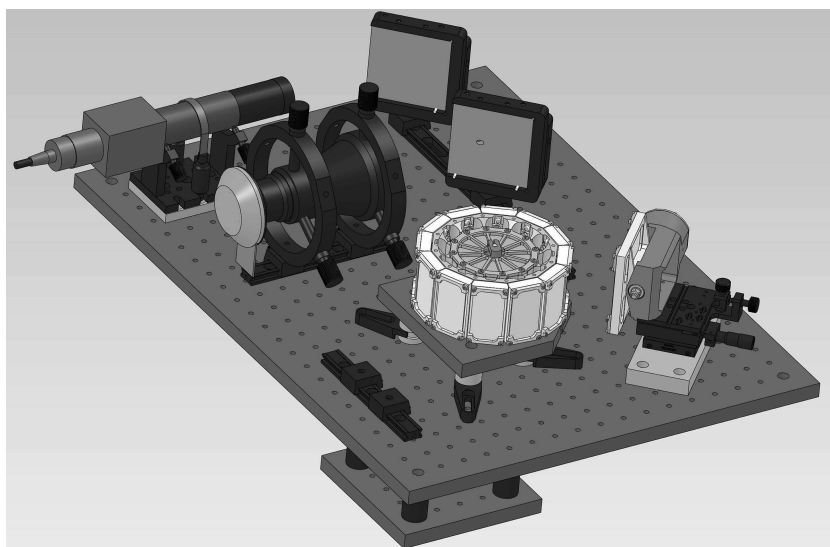


Рис. 4. Конструкция наземного макета космического варианта высокопроизводительного способа лазерной локации

лазерной локации, способной существенно повысить надежность определения относительных координат МКС и космических аппаратов, предполагающих осуществление стыковки как на стадиях полета, маневрирования, так и на этапе сближения.

Подобный подход открывает широкие перспективы развития технологии лазерной локации, в том числе в области космической техники.

Однако эта система имеет свои существенные ограничения. Любой импульсный лазерный локатор имеет мертвую зону на малых расстояниях до объекта, обусловленную конечным временем распространения света и конечной длительностью лазерного импульса. Можно идти по пути уменьшения длительности импульса, но это серьезно усложняет систему, поскольку мощные лазеры со сверхкороткими импульсами находятся в стадии отработки прототипов. Их применение не снимает проблемы в целом, а просто уменьшает размеры мертвой зоны.

Другой возможный подход — использование малогабаритных лазерно-телевизионных систем, работающих на принципе триангуляции. Современное развитие техники позволяет уже сейчас строить системы с точностью определения координат в единицы мм на расстояниях 10 м в реальном масштабе времени. Комбинирование лазерного локатора и лазерно-телевизионной системы определения координат объектов позволяет решить задачу стыковки в полном объеме без увеличения массогабаритных характеристик устройства.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 16.518.11.7054 от 12 мая 2011 г. по мероприятию 1.8 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы». В работе использовался лазерный трекер API Radian, входящий в состав оборудования ЦКП ЛОТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2397510. Способ видения подводных объектов и устройство для его реализации [Текст] / В.В. Бузовера [и др.].

2. Матвеев, И.Н. Лазерная локация [Текст] / И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов.— М.: Машиностроение, 1984.— 272 с.

ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич — кандидат физико-математических наук, начальник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-294-47-36
gna@rtc.ru

ПАНТАЛЕЕВ Стефан Милчев — ведущий инженер 61 отдела федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-41-36
pantaleev@lrc.ru

ИВАНОВ Андрей Евгеньевич — конструктор 63 отдела федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-41-36
a.ivanov@rtc.ru

КОЧКАРЁВ Дмитрий Алексеевич — электроник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-45-21
kochdim83@mail.ru

КУЛИКОВ Дмитрий Сергеевич — конструктор 63 отдела федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, Россия
(812)-552-41-36
ds.koolikov@rtc.ru