

Н. В. Барышников, В. Б. Бокшанский,
И. В. Животовский

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СВЕТОВОЗВРАЩАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассмотрено измерение световозвращательных характеристик оптико-электронных приборов. Предложен метод измерения показателя световозвращения с помощью виртуальных измерительных диафрагм. Проведен ряд тестовых экспериментальных измерений показателя световозвращения, подтверждающих возможность использования виртуальных измерительных диафрагм, позволяющих повысить точность измерений показателя световозвращения.

В современных условиях все большее развитие получают технические средства обеспечения информационной безопасности. Среди них важную роль играют лазерные локационные системы, предназначенные для дистанционного обнаружения оптических и оптико-электронных средств (ОЭС) наблюдения.

Разработка таких локационных систем основывается на исследовании световозвращательных характеристик лоцируемых ОЭС. Знание этих характеристик позволяет корректно провести светоэнергетический расчет и определить предельную дальность, на которой можно обнаружить ОЭС с заданной вероятностью. Поэтому разработка аппаратуры и методов экспериментальных исследований отражательных характеристик ОЭС является актуальной задачей.

Экспериментальным исследованиям отражательных характеристик уделялось большое внимание. В частности, в работе [1] приведено описание экспериментальной установки (рис. 1) для исследования основных отражательных характеристик: показателя световозвращения R , индикатрисы ретроотраженного излучения I , пеленгационной характеристики $R(\psi)$. Отмечено, что наиболее важной характеристикой является показатель световозвращения, поэтому особый интерес в настоящее время проявляется к усовершенствованию методов и аппаратуры для его измерения.

Известно, что показатель световозвращения оптико-электронного прибора (ОЭП) в некотором направлении распространения ретроотраженного излучения представляет собой следующее отношение:

$$R(\theta, \alpha) = \frac{I_3(\theta, \alpha)}{E_3} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{ср}} \right], \quad (1)$$

где $I_3(\theta, \alpha)$ — энергетическая сила света, отраженного от ОЭП, т.е. индикатриса отражения; θ, α — углы, характеризующие направление ин-

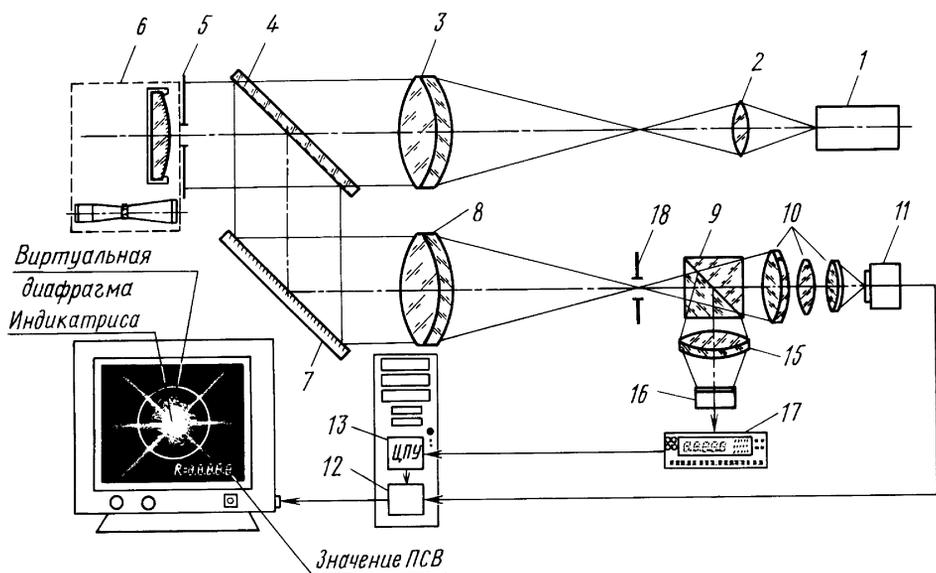


Рис. 1. Функциональная схема лабораторной установки для измерения светоотражательных характеристик:

1 — источник излучения; 2 — формирующая оптическая система; 3 — объектив коллиматора; 4 — светоделительная пластина; 5 — апертурная диафрагма; 6 — эталонный световозвращатель в виде сферического зеркала или инспектируемый ОЭП; 7 — глухое зеркало; 8 — объектив коллиматора; 9 — светоделительный кубик; 10 — проекционная оптическая система; 11 — ПЗС-матрица; 12 — плата видеоввода; 13 — микропроцессор; 14 — видеомонитор; 15 — конденсор; 16 — приемник излучения; 17 — цифровой вольтметр; 18 — измерительная диафрагма

дикатрисы отражения от оси; E_3 — энергетическая освещенность входного зрачка ОЭП.

Реально можно измерить величину показателя световозвращения, усредненную по некоторому конечному телесному углу Ω :

$$\bar{R} = \frac{\int_{\Omega} I_3(\theta, \alpha) d\theta d\alpha}{E_3 \Omega} = \frac{\bar{I}_3}{E_3}. \quad (2)$$

Измерения показателя световозвращения могут проводиться как в полевых условиях (дистанционные измерения), так и в лабораторных, имитирующих отражение от ОЭП и прием отраженного излучения при дальности $L \rightarrow \infty$. При дистанционных измерениях значения показателя световозвращения усредняются по телесному углу

$$\Omega = \pi \left(\frac{D}{2L} \right)^2, \quad (3)$$

где D — диаметр входного зрачка приемной системы; L — расстояние от излучателя до ОЭП.

При лабораторных измерениях с использованием установки, функциональная схема которой изображена на рис. 1, телесный угол Ω задается при помощи диафрагмы 18:

$$\Omega = \pi \left(\frac{d}{2f'} \right)^2, \quad (4)$$

где d — диаметр усредняющей измерительной диафрагмы; f' — фокусное расстояние приемного коллиматора.

Для увеличения динамического диапазона измеряемых показателей световозвращения необходимо использовать набор измерительных диафрагм разных диаметров. Телесный угол усреднения Ω в данном случае задается дискретно. Как правило, требуемая точность выставки измерительной диафрагмы составляет 0,05 мм. Поэтому юстировка измерительной диафрагмы, позволяющая совместить центр диафрагмы с центром индикатрисы, является достаточно трудоемкой операцией.

В большинстве случаев в лабораторных условиях измерение показателя световозвращения осуществляется путем непосредственного сравнения сигнала, отраженного от исследуемого световозвращателя (СВ), с сигналом от эталонного отражателя с известным показателем световозвращения [1]. Таким отражателем может служить, например, сферическое зеркало, показатель световозвращения которого с высокой точностью может быть определен по формуле

$$R_{\text{эт}} = \rho \frac{r_{\text{эт}}^2}{4}, \quad (5)$$

где ρ — коэффициент отражения по интенсивности от поверхности сферы; $r_{\text{эт}}$ — радиус образующей сферы.

Напряжение сигнала, пропорциональное потоку, отраженному исследуемым СВ и прошедшему через измерительную диафрагму, регистрируется фотоприемником:

$$U_{\text{СВ}}^{\text{изм}} = \bar{I} \frac{\pi d^2}{4 f'^2} \tau S(\lambda), \quad (6)$$

где \bar{I} — усредненная по телесному углу Ω сила света, отраженного от СВ; τ — коэффициент пропускания по интенсивности оптического тракта СВ — фотоприемника; $S(\lambda)$ — абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника.

Сигнал, пропорциональный освещенности E входного зрачка СВ, регистрируется при установке на место ОЭП эталонного СВ в виде сферического зеркала с известным ПСВ $R_{\text{эт}}$:

$$U_{\text{эт}}^{\text{изм}} = E R_{\text{эт}} \frac{\pi d^2}{4 f'^2} \tau S(\lambda). \quad (7)$$

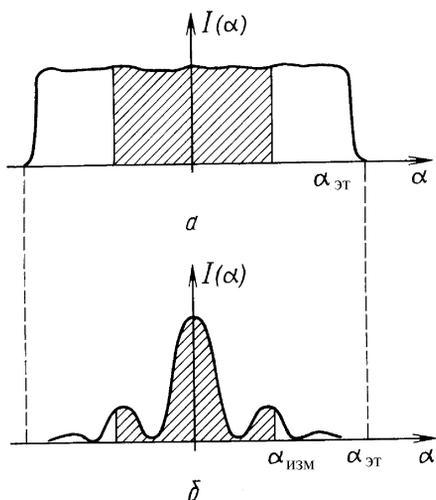


Рис. 2. Примерный вид индикатрисы эталонного СВ и лоцируемого ОЭП:

a — индикатриса эталонного СВ; δ — индикатриса ОЭП; $\Omega = \pi\alpha^2$

можно задать любой размер диафрагмы и рассчитать поток излучения, прошедший через нее. Для этого необходимо также зарегистрировать с помощью одноплощадочного приемника излучения напряжения сигналов $U_{эт}^{max}$ и $U_{СВ}^{max}$, соответствующие интегральным потокам ретроотраженного излучения от эталонного и от инспектируемого СВ. Значения $U_{эт}^{изм}$ и $U_{СВ}^{изм}$, входящие в формулу (8), можно рассчитать по следующим выражениям (рис. 2):

$$U_{эт}^{изм} = \frac{U_{эт}^{max} \Phi_{эт}(\Omega_{изм})}{\Phi_{эт}(\Omega_{эт})} = U_{эт}^{max} \frac{\int_{\Omega_{изм}} I_{эт}(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega_{эт}} I_{эт}(\Omega) d\Omega}, \quad (9)$$

$$U_{СВ}^{изм} = \frac{U_{СВ}^{max} \Phi_{СВ}(\Omega_{изм})}{\Phi_{СВ}(\Omega_{ОЭП})} = U_{СВ}^{max} \frac{\int_{\Omega_{изм}} I_{СВ}(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega_{ОЭП}} I_{СВ}(\Omega) d\Omega}.$$

Процесс обработки двумерных массивов можно значительно упростить, учитывая, что эталонный световозвращатель в виде сферического зеркала имеет сечение индикатрисы ретроотражения, представляющее собой равномерно засвеченный круг. Тогда рассчитываемое микропроцессором напряжение $U_{эт}^{изм}$, соответствующее ретроотраженному излучению сигнала от эталона и измерительному углу усреднения,

Расчетную формулу для определения показателя световозвращения СВ получим из выражений (6) и (7):

$$\bar{R}_{СВ} = \frac{U_{СВ}^{изм}}{U_{эт}^{изм}} R_{эт}. \quad (8)$$

Задать угол усреднения $\Omega_{изм}$ можно виртуально, без использования реальных механических элементов. В этом случае необходимо зарегистрировать двумерное пространственное распределение отраженного излучения, соответствующее индикатрисе, и ввести его в компьютер в цифровом виде. Далее, используя методы компьютерной обработки двумерных массивов,

определяется выражением

$$U_{\text{ЭТ}}^{\text{ИЗМ}} = \frac{U_{\text{ЭТ}}^{\text{МАХ}} \Omega_{\text{ИЗМ}}}{\Omega_{\text{ЭТ}}}, \quad (10)$$

где расходимость излучения $\Omega_{\text{ЭТ}}$ при отражении от эталонного СВ с апертурной диафрагмой $D_{\text{СВ}}$ рассчитывается следующим образом:

$$\Omega_{\text{ЭТ}} = \frac{\pi}{4} (2\alpha_{\text{ЭТ}})^2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{2D_{\text{СВ}}}{r_{\text{ЭТ}}} \right)^2. \quad (11)$$

Окончательно, подставляя формулы (9), (10) в выражение (8), получаем выражение для расчета показателя световозвращения при задании угла усреднения виртуальным методом:

$$\bar{R}_{\text{СВ}} = \frac{U_{\text{СВ}}^{\text{МАХ}}}{U_{\text{ЭТ}}^{\text{МАХ}}} \frac{\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ИЗМ}})}{\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ОЭП}})} \frac{\Omega_{\text{ЭТ}}}{\Omega_{\text{ИЗМ}}} R_{\text{ЭТ}}. \quad (12)$$

В этом выражении показатель световозвращения эталона $R_{\text{ЭТ}}$ известен априори или рассчитывается по формуле (5); напряжения сигналов $U_{\text{СВ}}^{\text{МАХ}}$ и $U_{\text{ЭТ}}^{\text{МАХ}}$ от всей индикатрисы ОЭП и от эталонного СВ соответственно получают с приемника излучения; телесные углы $\Omega_{\text{ИЗМ}}$, $\Omega_{\text{ЭТ}}$ рассчитывают по выражениям (4), (11); отношение $\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ИЗМ}})/\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ОЭП}})$ вычисляется микропроцессором путем обработки зарегистрированной индикатрисы ОЭП.

Вычисление показателя световозвращения проводится по алгоритму, представленному на рис. 3. Исходными измерительными данными для расчета показателя световозвращения являются изображение индикатрисы ОЭП, показатель световозвращения эталонного СВ и напряжения, соответствующие сигналам, получаемым с приемника излучения, от эталонного СВ и от контролируемого ОЭП. Изображение индикатрисы, введенное в ЭВМ с помощью платы видеоввода, оцифровывается, в результате чего формируется матрица $[M_{ij}]$ градаций яркости изображения индикатрисы. Для повышения точности измерений необходимо учитывать влияние фоновых засветок. В данном алгоритме реализована функция вычитания фона. Вначале находится среднее значение F градаций яркости фона для части кадра, в которой отсутствует индикатриса, и вычитается из исходного двумерного массива, соответствующего изображению индикатрисы: $[N_{ij}] = [M_{ij}] - F$. Для правильного расчета показателя световозвращения центр виртуальной диафрагмы необходимо точно совместить с энергетическим центром индикатрисы. Задача нахождения энергетического центра индикатрисы математически представляет собой задачу нахождения центра тяжести

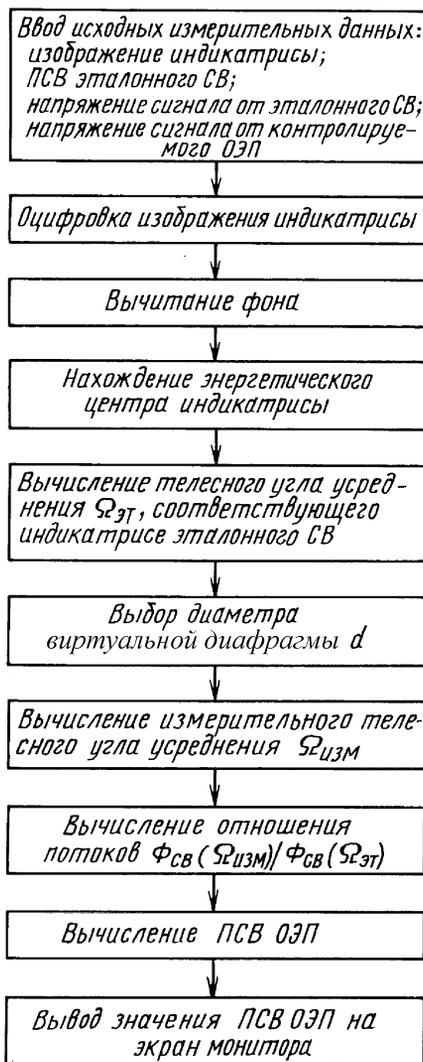


Рис. 3. Алгоритм обработки измерительной информации

тела. Тогда координаты энергетического центра индикатрисы вычисляются следующим образом:

$$x = \frac{\sum_i \sum_j (N_{ij}j)}{\sum_i \sum_j (N_{ij})}, \quad y = \frac{\sum_i \sum_j (N_{ij}i)}{\sum_i \sum_j (N_{ij})}.$$

На следующем шаге рассчитывается по выражению (11) расходимость излучения $\Omega_{\text{эТ}}$ при отражении от эталонного СВ. Диаметр d виртуальной измерительной диафрагмы должен соответствовать диапазону измеряемого показателя световозвращения по ОСТ 3-5192-82. Из-

мерительный телесный угол усреднения $\Omega_{\text{ИЗМ}}$ вычисляется по выражению (4). На следующем шаге алгоритма вычисляется отношение потока $\Phi_{\text{СВ}}\Omega_{\text{ИЗМ}}$, ограниченного телесным углом $\Omega_{\text{ИЗМ}}$, к потоку $\Phi_{\text{СВ}}\Omega_{\text{ОЭП}}$, ограниченному телесным углом $\Omega_{\text{ОЭП}}$, охватывающим всю индикатрису. Телесный угол $\Omega_{\text{ОЭП}}$ выбирается оператором исходя из изображения индикатрисы. Значения матрицы $[N_{ij}]$ пропорциональны дискретному распределению силы света $I(\Omega)$ по телесному углу Ω . Тогда отношение потоков

$$\frac{\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ИЗМ}})}{\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ОЭП}})} = \frac{\int_{\Omega_{\text{ИЗМ}}} I_{\text{СВ}}(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega_{\text{ОЭП}}} I_{\text{СВ}}(\Omega) d\Omega}$$

вычисляется как отношение просуммированных значений матрицы $[N_{ij}]$ в областях, соответствующих телесным углам $\Omega_{\text{ИЗМ}}$ и $\Omega_{\text{ОЭП}}$. Таким образом, отношение потоков рассчитывается по выражению

$$\frac{\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ИЗМ}})}{\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ОЭП}})} = \frac{\sum_i \sum_{\Omega=\Omega_{\text{ИЗМ}}}^j (N_{ij})}{\sum_i \sum_{\Omega=\Omega_{\text{ОЭП}}}^j (N_{ij})}$$

Согласно вычисленным данным рассчитывается показатель световозвращения по выражению (12). Вычисленное значение показателя световозвращения ОЭП и изображение индикатрисы выводятся на экран монитора (рис. 4).

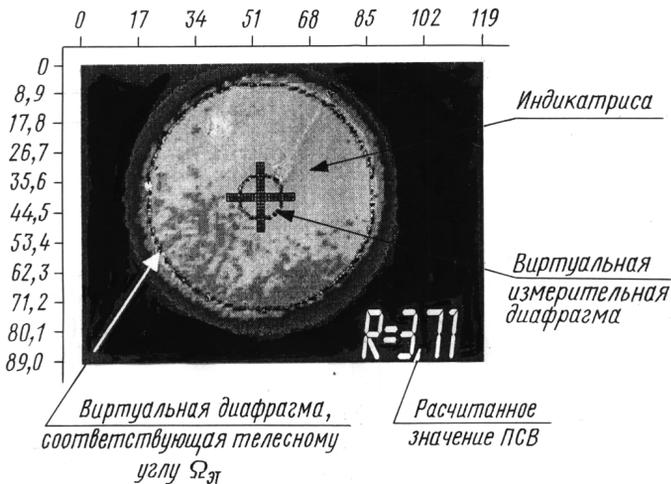


Рис. 4. Результаты экспериментальных измерений (ПСВ — показатель световозвращения)

По представленному алгоритму была реализована программа в математическом пакете Mathcad. Для реализации предлагаемого метода и алгоритма обработки измерений на существующей установке (см. рис. 1) в МГТУ им. Н.Э. Баумана был проведен ряд экспериментальных измерений показателя световозвращения эталонного СВ. В качестве эталонного СВ был взят отражатель в виде сферического зеркала, ограниченный апертурной диафрагмой диаметром $D_{\text{СВ}} = 46$ мм, с радиусом образующей сферы $r_{\text{эт}} = 20$ м и коэффициентом отражения $\rho = 0,04$. Показатель световозвращения этого отражателя согласно выражению (5) составляет $4 \text{ м}^2/\text{ср}$. Изображение индикатрисы регистрировалось с помощью прибора с зарядной связью (ПЗС), оцифровывалось и обрабатывалось согласно представленному алгоритму. На рис. 4 показано изображение индикатрисы эталонного СВ, на котором нанесены диафрагма с угловым размером, рассчитанным по выражению (11) и составляющим $2\alpha_{\text{эт}} = 16'$, ограничивающая всю индикатрису, и виртуальная измерительная диафрагма с угловым размером $2\alpha_{\text{изм}} = 3,5'$, рассчитанным по выражению (4) (диаметр виртуальной диафрагмы составляет $d = 1,6$ мм). Напряжения $U_{\text{эт}}^{\text{max}}$, соответствующее сигналу от всей индикатрисы эталонного СВ, и $U_{\text{СВ}}^{\text{max}}$, соответствующее сигналу от всей индикатрисы ОЭП (в данном случае — индикатрисы самого эталонного СВ), составили 1380 мВ. Подставляя рассчитанные по алгоритму значения $\Omega_{\text{изм}} = 7,9 \cdot 10^{-7}$ ср, $\Omega_{\text{эт}} = 1,7 \times 10^{-5}$ ср, $\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{изм}})/\Phi_{\text{СВ}}(\Omega_{\text{ОЭП}}) = 4,38 \cdot 10^{-2}$ в выражение (12), получаем, что показатель световозвращения составляет $R = 3,71 \text{ м}^2/\text{ср}$. Результаты измерений показателя световозвращения эталонного СВ по предложенному алгоритму приведены ниже:

Теоретическое значение показателя световозвращения	$4 \text{ м}^2/\text{ср}$
Экспериментальное значение показателя световозвращения	$3,71 \text{ м}^2/\text{ср}$

Дополнительно было проведено сравнение отношений напряжений $U_{\text{эт}}^{\text{изм}}$, соответствующих сигналам от эталонного СВ для различных диаметров d реальных измерительных диафрагм, с рассчитанными отношениями напряжений $U_{\text{эт}}^{\text{изм}}$, соответствующих сигналам для тех же диаметров d виртуальных измерительных диафрагм. Результаты сравнений приведены в таблице.

Как видно из таблицы, значения отношений напряжений для реальных и виртуальных измерительных диафрагм хорошо согласуются, что подтверждает возможность использования виртуальных измерительных диафрагм вместо физических.

Отношения напряжений	Физические измерительные диафрагмы	Виртуальные измерительные диафрагмы
$\frac{U_{\text{изм}}^{\text{эт}5}}{U_{\text{изм}}^{\text{эт}1,6}}$	9,54	9,71
$\frac{U_{\text{изм}}^{\text{эт}1,6}}{U_{\text{изм}}^{\text{эт}0,5}}$	9,66	8,67

Примечание: $U_{\text{эт}5}^{\text{изм}}$, $U_{\text{эт}1,6}^{\text{изм}}$ и $U_{\text{эт}0,5}^{\text{изм}}$ — напряжения, соответствующие сигналам от эталонного СВ для $d = 5; 1,6$ и $0,5$ мм соответственно.

Проведенные тестовые эксперименты и их результаты показали целесообразность применения виртуальных диафрагм при измерении показателя световозвращения. По сравнению с ранее известной лабораторной установкой для измерения показателя световозвращения ОЭП модернизированная установка позволяет повысить производительность и точность измерений путем введения виртуальной диафрагмы и микропроцессорного управления при расчете показателя световозвращения и угла усреднения, тем самым исключая влияние субъективной визуальной юстировки. В данной установке может применяться более мелкая градация углов усреднения или диаметров виртуальных измерительных диафрагм, что также позволит повысить точность измерения показателя световозвращения и информативность отражательных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников Н. В., Карасик В. Е. Лабораторные исследования пространственно-частотных характеристик оптических световозвращающих систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". Спец. выпуск "Лазерные и оптико-электронные приборы и системы". – 1998. – С. 11–15.

Статья поступила в редакцию 27.06.2002

Николай Васильевич Барышников родился в 1956 г., окончил в 1980 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры "Лазерные и оптико-электронные системы" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области лазерной локации и лазерных систем видения.

N.V. Barishnikov (b. 1956) graduated from the Bauman Higher Technical School in 1980. Ph. D. (Eng.), ass. professor of "Laser and Optical-and-Electronic Systems" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 publications in the field of the laser location and laser imaging systems.

