



Исследование влияния элементов конструкции ИК-объектива на величину теплового фонового потока, падающего на матрицу фотоприемников

А. В. Правдивцев

Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика»,
www.rdcn.ru; apravd@gmail.com, Москва, Россия

Чувствительность тепловизионных и тепlopеленгационных станций, используемых для сбора спектрально-топологической информации, ограничена паразитными фоновыми засветками, попадающими на матрицу приемников излучения. В статье рассматривается влияние конструкции оправ оптических элементов в ИК-объективе, предназначенном для работы в диапазоне 8–12 мкм, на величину внутреннего и внешнего паразитного фонового излучения. Оптимизация конструкции оправ позволяет минимизировать паразитные засветки и обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики оптико-электронной системы, в состав которой входит ИК-объектив. В работе определены элементы конструкции, вносящие наибольший вклад в суммарный фоновый поток и оптимизирована их структура с помощью созданной цифровой модели. Рассмотрено влияние процесса охлаждения элементов конструкции на величину собственного фонового потока.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, тепловизионный канал, ИК-объектив, фотоприемное устройство, фоновое излучение, чувствительность приемника, охлаждение фотоприемников

Статья поступила в редакцию: 30.04.2019. Принята к публикации: 20.05.2019

Research of the influence of structural elements of the IR lens on the value of the thermal background flux, incident at the focal plane array

A. V. Pravdivtsev

Research Group «Constructive Cybernetics»,
www.rdcn.ru; apravd@gmail.com, Moscow, Russia

The sensitivity of thermal imaging and heat-detecting stations used to collect spectral and topological information is limited by background stray light illumination incident at the focal plane array through an IR-lens. The article discusses the influence of the design of the frames of the optical elements in the IR lens, designed to operate in the range of 8–12 microns, on the value of the internal and external background stray light radiation. Optimization of the design of the frames allows you to minimize stray light and provides high performance characteristics of the optic-electronic system, which includes an infrared lens. In this work, structural



elements that make the largest contribution to the total background flux are identified and their structure is optimized using the created digital model. The influence of the cooling process of structural elements on the value of its own background flux is considered.

Keywords: optoelectronic systems, thermal imaging channel, IR lens, photodetector, background radiation, sensitivity of the receiver, cooling of photodetectors

Received: 30.04.2019. Accepted: 20.05.2019

ВВЕДЕНИЕ

Суммарный фоновый поток, падающий на матричный приемник приемной части оптико-электронной системы, снижает его чувствительность и зашумляет полезный сигнал, поэтому при создании системы конструктор стремится минимизировать влияние паразитной засветки. Излучение фонового потока складывается из внешнего рассеянного фона и собственного излучения оптической системы. Если оптико-электронная система ИК-диапазона функционирует в режиме ограничения чувствительности из-за наличия фонового излучения, то повысить ее эффективность можно за счет снижения фонового паразитного потока, приходящего на приемник излучения. Суммарный фоновый поток включает в себя внешний поток, приходящий от внешних объектов (Φ_{out}) и рассеянный на элементах конструкции, и внутренний (Φ_{OS}), источником которого является оптическая система [1, 2]:

$$\Phi = \Phi_{\text{out}} + \Phi_{\text{OS}}.$$

На уровень фонового потока на приемнике излучения помимо прочего влияет конструкция оптической системы [3].

В данной работе рассмотрена возможность уменьшения суммарного паразитного потока путем оптимизации формы оправ в конструкции объектива, работающего в диапазоне 8–12 мкм. Для этого мы исследовали влияние конструкции оправ на общий уровень внутреннего и внешнего фонового излучения, а также определили конфигурацию оправ и их параметры, соответствующие минимальному уровню фонового излучения, попадающему на приемник. В работе не рассматривается фоновый поток от подстилающей поверхности, прошедший напрямую через оптическую систему, так как он определяется оптической схемой объектива и не зависит от формы оправ.

В исследовании использовали трехлинзовый светосильный объектив (относительное отверстие 1: 0,95; фокусное расстояние $f=80$ мм, угловое поле в пространстве предметов $2\omega=8,4^\circ$, рабочий спектральный диапазон 8,5–12 мкм). Размер чувствительной пло-

щадки микроболометрической матрицы 9,6×7,2 мм. Рассмотренная оптическая система является достаточно типичной для длиннофокусных объективов, работающих в спектральном диапазоне 8–14 мкм, поэтому результаты исследований возможности повышения его характеристик актуальны не только для конкретной оптико-электронной системы.

Для вычисления паразитного потока от внешних и внутренних источников в расчетной программе создается трехмерная модель оптической системы. В модель вводится положение и характеристики оптических элементов (включая просветляющие покрытия), а также положение и свойства элементов конструкции. Задаются внутренние источники излучения, которыми являются оптические элементы и оправы. Поток, излучаемый каждым источником, функционально связан с его геометрическими размерами и коэффициентом теплового излучения в рассматриваемом спектральном диапазоне. Расчеты выполнялись в программе Zemax OpticStudio, которая была дополнена разработанными автором пользовательскими библиотеками.

Излучение каждого источника представляется набором лучей, начало которых лежит на поверхности излучающего объекта. Лучи в модели трассируются с учетом геометрии и оптических характеристик элементов (например, при попадании луча на просветленную поверхность линзы он делится на отраженный и преломленный с учетом спектрального коэффициента отражения). Поток на фоточувствительном элементе определяется как сумма излучения от всех лучей, попавших на фотоприемное устройство. Относительная систематическая ошибка расчета распределения потока в рассмотренных примерах не превышала 0,86%, что является достаточно точным для рассмотренного применения [1].

Метод проверялся на примерах, распределение потока в которых можно рассчитать теоретически.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 1 приведена упрощенная схема конструкции рассматриваемого объектива. Цифрами обозначены примеры вариантов конструкции оправ,

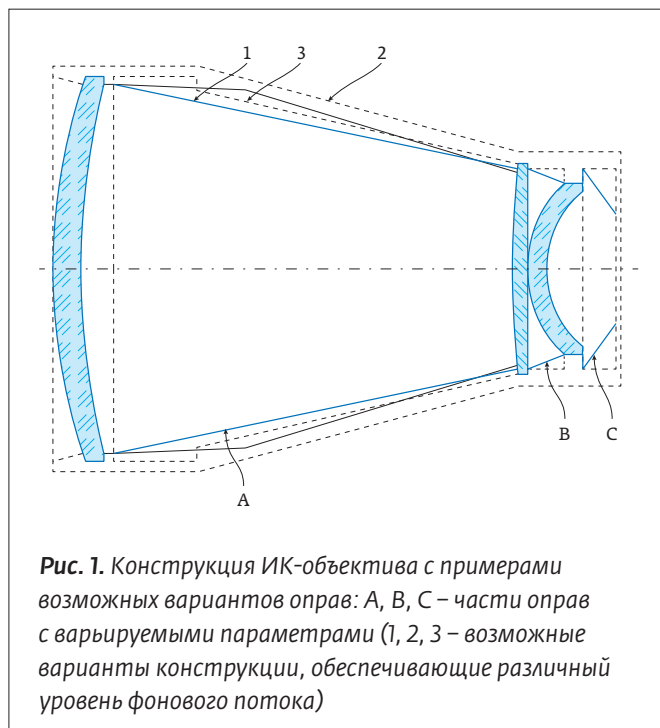


Рис. 1. Конструкция ИК-объектива с примерами возможных вариантов оправ: А, В, С – части оправ с варьируемыми параметрами (1, 2, 3 – возможные варианты конструкции, обеспечивающие различный уровень фонового потока)

буквами – области, в которых производилось изменение конструкции.

При расчете фонового потока рассматривались конструкции оправ без изломов, с изломами, были рассмотрены смешанные комбинации. Также рассматривалась «типовая» конфигурация, форма оправ для которой является типичной для подобного объектива (конструирование производилось с учетом прочности и жесткости конструкции, технологий производства, а также способа установки объектива в составе оптико-электронного комплекса). На рис. 1 данный вариант обозначен цифрой 2.

На оправы было нанесено поглощающее покрытие с коэффициентом отражения, равным 1%. При расчете фонового потока учитывались характеристики просветляющих покрытий, нанесенных на оптические элементы [4], и значения коэффициента поглощения в материале линз. Каждой конфигурации был сопоставлен набор оптических характеристик оправ. Размер расчетного массива, таким образом, включал в себя 160 расчетных конфигураций, над каждым расчетным массивом осуществлялось 30 розыгрышей. При расчете принимались начальные условия, согласно которым температура оптической системы составляет 20 °С.

По результатам численного эксперимента были вычислены суммарные величины внутреннего потока от линз и конструкции оправ, оценка которых определялась значением математического

ожидания $M[\Phi_{OS}]$. Согласно алгоритму вычислений каждый из трех блоков расчетных конфигураций упорядочивался по возрастанию значения $M[\Phi_{OS}]$. Таким образом, результаты выстраивались в ряд $M_i[\Phi_{OS}]$, где i – номер значения в ряду. Оптимальной, с точки зрения минимизации внутреннего фонового потока, являются конфигурация оправ с меньшим порядковым номером i в ряду, так как именно она создавала в оптико-электронной системе паразитный поток меньшего значения.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты были проанализированы, определены зависимости собственного фонового потока в виде функции координат. Анализ показал, что доля величины внутреннего фонового потока от линз незначительна и мало меняется при варьировании вида конструкции, а основной вклад вносят оправы. Для анализа была использована нормированная величина потока Φ'_{OS} (Φ'_{OS} – нормированный на максимальную величину ($\max(M[\Phi'_{OS}]) = 5,3 \times 10^{-3}$ Вт) фоновый поток от объектива). На рис. 2 приведены график изменения $M[\Phi'_{OS}]$ для каждой из расчетных конфигураций. По оси абсцисс отложены номера конфигураций. Анализ рис. 2 показывает, что величина внутреннего фонового потока, приходящего на приемник, действительно зависит и от формы оправ. Фоновый поток для случая объектива с «типовой» оправой в 1,42 раза больше значения для наилучшего среди рассмотренных вариантов.

Изменяемые части оправ по росту их вклада в общий фоновый поток располагаются следующим образом: С, В, А (см. рис. 1). То есть чем ближе оправа расположена к чувствительной плоскости фотоприемного устройства, тем больший вклад она вносит. Но если расположить оправы по величине изменения фонового потока, вносимого ими, то среди рассмотренных вариантов порядок будет другим: А, В и С. Причем обнаружено, что изменение формы оправы А влияет на вклад теплового потока гораздо сильнее прочих в рассмотренной схеме конструкции оптико-электронной системы.

При анализе рис. 2 можно выделить три области с существенно отличающимся уровнем фонового потока. Первая область соответствует минимальному потоку: проявляется в случае, когда в конструкции оправы отклонения радиусов оправ от световых высот минимальны (набор значений получен варьированием формы второй оправы).

Конструкция с «типовой» оправой лежит по уровню потока в области 3 (на графике значение выделено белой точкой), что доказывает неопти-

мальность ее формы по сравнению с другими вариантами. На рис. 1 приведены три варианта оправы, соответствующие конструкциям с минимальным значением потока в трех диапазонах, указанных на рис. 2 для третьего диапазона приведена конструкция «типичного» объектива.

Для данных вариантов был рассмотрен паразитный поток от внешнего протяженного источника. На рис. 3 приведено нормированное изменение внешнего потока в зависимости от формы оправ. Для сравнения величины внешнего потока отсортированы в соответствии с увеличением собственного фонового потока ОС, аналогично рис. 2 (конфигурации с минимумом собственного потока имеют меньший номер). Из сравнения рисунков 2 и 3 видно, что среди рассмотренных конфигураций варианты с минимальным внутренним фоновым потоком также обеспечивает минимальный уровень фона от рассмотренного внешнего источника. Были рассмотрены геометрические параметры оправ с точки зрения минимизации потока от внешнего протяженного источника и определены их формы, отрицательно сказывающиеся на функционале оптико-электронной системы. Это происходило за счет увеличения потока от внешнего источника (иногда они приводили к росту

засветки от внешнего фонового излучения более чем в 4,3 раза).

Для оценки выигрыша от применения решений было проведено сравнение внутреннего фонового потока с внешним фоновым потоком, рассчитанным на основе данных [5-7]. За характеристический коэффициент мы приняли отношение фонового потока от внешнего источника к фоновому потоку от неба – Φ_{OS}/Φ_{B0} . Оказалось, что для подобранной конструкции с оптимальной конфигурацией параметров оправ этот коэффициент был равен 19,0. А вот для типичной конструкции величина оказалась гораздо выше и составила 27,1. Это подтвердило наши предположения о том, что типовая конструкция оправ объектива вносит дополнительный паразитный тепловой поток, попадающий на приемную площадку измерительной ИК-матрицы и тем самым снижает эффективность всего оптико-электронного комплекса. Если в качестве фонового внешнего источника взять не излучение неба, а излучение для подстилающей поверхности Земли при температуре 20 °С, то эти коэффициенты составляют соответственно 0,98 и 1,4. Из этих данных следует, что потенциальная чувствительность ИК-системы (для случая приемника, функционирующего в режиме ограничения чувствительности фоном) также воз-

Средство измерений энергетических и пространственных параметров лазерного излучения СИЭПХ-2
 Свидетельство об утверждении типа RU.C.37.314.B №65349 (рег. №66833-17)

Оptionальная конфигурация **Интерактивное программирование**



РАЗРАБОТЧИК И ИЗГОТОВИТЕЛЬ **ООО "ЛАМЕТ"** www.lamet.ru
 125371, Москва, Волоколамское шоссе, 112, к.1, стр.3
 Тел. +7 (495) 490-90-10 E-mail info@lamet.ru

ЛАЗЕРЫ И МЕТРОЛОГИЯ
LAMEI
 LASERS & METROLOGY

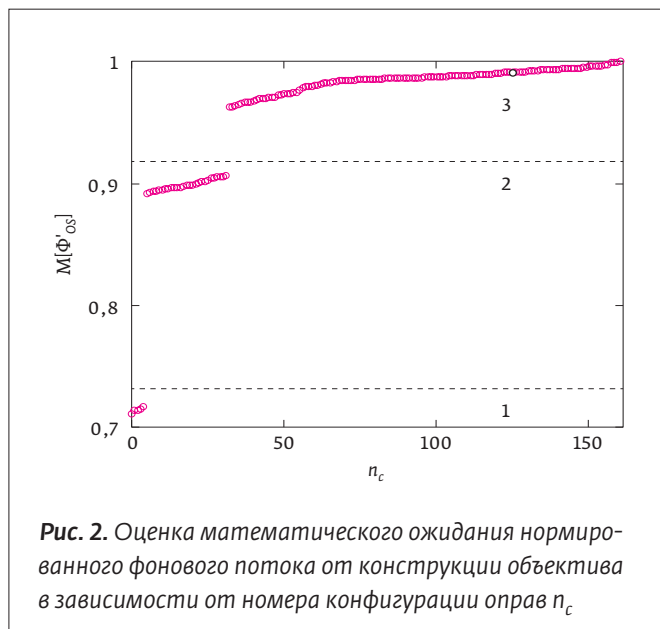


Рис. 2. Оценка математического ожидания нормированного фонового потока от конструкции объектива в зависимости от номера конфигурации оправ n_c

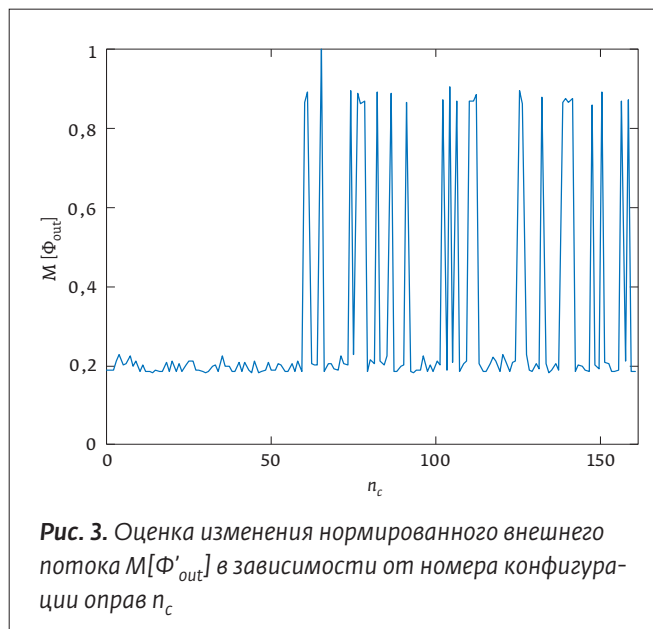


Рис. 3. Оценка изменения нормированного внешнего потока $M[\Phi'_{out}]$ в зависимости от номера конфигурации оправ n_c

растает при оптимизации конструкции оправ оптического тракта за счет минимизации ее собственного внутреннего фонового излучения.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПРАВЫ

Анализ полученных данных показал, что самый большой вклад в суммарный внутренний фоновый поток дает оправа С. Поэтому, если рассматривать охлаждение как способ уменьшения собственного фонового излучения, именно ее следует охлаждать в первую очередь. Охлаждение оправы С на 10 градусов позволит снизить тепловой фоновый поток, идущий от нее, на 8%, а при снижении температуры на 40 градусов выигрыш составит почти 20%.

Величина собственного фонового потока данной оптической системы после оптимизации конструкции оправ и охлаждения зоны С составит 64% по сравнению с неоптимизированным вариантом.

Следует отметить, что наличие градиента температуры может повлиять на оптические свойства объектива, так что охлаждение всей системы может оказаться более выгодным с точки зрения конструирования итоговой конструкции.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенной работы были сформулированы выводы для конструирования ИК-объектива в диапазоне длин волн 8–14 мкм, действительные для эксплуатации оптико-электронного комплекса:

1. Конструкция оправ элементов оптической системы влияет на общий уровень суммарного фонового излучения, попадающего на измерительную матрицу. Потенциальная чувстви-

тельность ИК-системы (при функционировании в режиме ограничения чувствительности фоном) существенно возрастает при оптимизации конструкции оправ оптической системы за счет минимизации его суммарного фонового излучения.

2. Использование оптимальной конструкции оправ по отношению к типичной конструкции объектива поможет уменьшить собственный фоновый поток объектива в 1,42 раза. Неоптимальная конструкция оправ, наоборот, может увеличить внешний поток в 4,3 раза.
3. Использованная методика позволяет определить вклад каждой из частей конструкции в общий поток, а значит на ее основе нужно формулировать технические требования к параметрам систем охлаждения отдельных элементов. Это будет способствовать дополнительному снижению суммарного фонового потока.
4. Минимальный поток при использовании данного ИК-объектива соответствует конструкции, в которой оправы расположены наиболее близко к диаметру светового пучка. Однако данный результат вступает в противоречие с рекомендацией по уменьшению внешнего фонового излучения, опубликованной в работе [8], которая с этой целью предлагает, наоборот, увеличивать внутренние диаметры по сравнению с диаметрами световых пучков.
5. Рекомендуется использовать данный подход при конструировании оптических систем для диапазона 8–14 мкм.



В дальнейшем планируется расширить исследование по данному направлению на объединение результатов, полученных в [3] (совместное варьирование у оправ и формы, и оптических свойств), а также провести дополнительную оптимизацию формы оправ. Планируется расширить количество исследованных оптических систем для последующего формирования обобщенных рекомендаций к конструированию.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор благодарит Андрея Викторовича Макаренко за полезные обсуждения в процессе подготовки и написания работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко А. В., Правдивцев А. В., Юдин А. Н. Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009; 12: 28–37.
2. Pravdivtsev A. V., Akram M. N. Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing. *Infrared Physics & Technology*. 2013; 60(September): 306–311.
3. Правдивцев А. В. Анализ влияния конструкции оправ на величину теплового излучения оптических систем. Сборник докладов Международной конференции «Прикладная Оптика-2012», Санкт-Петербург. 2012; 1: 230–234.
4. Гайнутдинов И. С., Шувалов Н. Ю., Сабиров Р. С., Иванов В. А., Гареев Р. Р., Мирханов Н. Г. Просветляющие покрытия на подложках из германия и кремния в окнах прозрачности ИК области спектра 3–5 и 8–12 мкм. *Оптический журнал*. 2009; 76(5); 68–72.
5. Кузнецик О. П., Захарич М. П. Статистические характеристики яркости неба в области 0,5–12 мкм. Архив ВИНТИ, № . 1980; 2495: 47.
6. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Volume 1. Sources of Radiation* / Ed. by G. J. Zissis; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers – Bellingham, 1993.
7. Mahulikar S. P., Potnuru S. K., Rao G. A. Study of sunshine, skyshine, and earthshine for aircraft infrared detection. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009; 11: 045703.
8. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В. *Источники и приемники излучения*. – С-Пб.: Политехника. 1991.

REFERENCE

1. Makarenko A. V., Pravdivtsev A. V., Yudin A. N. Metod ocenivaniya vnutrennego parazitnogo izlucheniya opticheskikh traktov infrakrasnykh sistem. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2009; 12: 28–37.
2. Pravdivtsev A. V., Akram M. N. Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing. *Infrared Physics & Technology*. 2013; 60(September): 306–311.
3. Pravdivtsev A. V. Analiz vliyaniya konstrukcii oprav na velichinu teplovogo izlucheniya opticheskikh sistem. Sbornik докладов Mezhdunarodnoj konferencii «Prikladnaya Optika-2012», Sankt-Peterburg. 2012; 1: 230–234.
4. Gajnutdinov I. S., Shuvalov N. YU., Sabirov R. S., Ivanov V. A., Gareev R. R., Mirhanov N. G. Prosvetlyayushchie pokrytiya na podlozhkah iz germaniya i kremniya v oknah prozrachnosti IK oblasti spektra 3–5 i 8–12 mkm. *Opticheskij zhurnal*. 2009; 76(5); 68–72.
5. Kuznechik O. P., Zaharich M. P. Statisticheskie harakteristiki yarkosti neba v oblasti 0,5–12 mkm. *Arhiv VINITI*, № . 1980; 2495: 47.
6. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Volume 1. Sources of Radiation* / Ed. by G. J. Zissis; The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers – Bellingham, 1993.
7. Mahulikar S. P., Potnuru S. K., Rao G. A. Study of sunshine, skyshine, and earthshine for aircraft infrared detection. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009; 11: 045703.
8. Ishanin G. G., Pankov E. D., Andreev A. L., Pol'shchikov G. V. *Istochniki i priemniki izlucheniya*. – S-Pb.: Politekhnik. 1991.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphera.ru

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА
ТЕХНОЛОГИЯ
БИЗНЕС

Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru

www.photonics.ru научно-технический журнал
ФОТОНИКА

Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru

www.j-analytics.ru
Аналитика
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

Отраслевой научно-технический журнал

СТАНКОИНСТРУМЕНТ
НАУКА | ПРОЕКТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО

Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru

NANOINDUSTRY
НАНОИНДУСТРИЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru

LAST MILE
**ПЕРВАЯ
МИЛЯ**

Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru

25–29 | 05 | 2020

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
www.metobr-expo.ru



2020

21-я международная
специализированная
выставка

МЕТАЛЛОБРАБОТКА

Реклама 12+



«Оборудование,
приборы и инструменты
для металлообрабатывающей
промышленности»

При поддержке:

- Совета Федерации Федерального Собрания РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ
- Союза машиностроителей России

Под патронатом ТПП РФ

Организаторы:

