

УДК 543.426; 667.027.464

## СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МЕТОК ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С. А. Амброзевич<sup>1,2</sup>, А. А. Ващенко<sup>1</sup>, К. В. Коваленко<sup>1</sup>, А. Н. Лобанов<sup>1</sup>

*Изготовлен макет системы автоматического позиционирования транспортного средства на основе люминесцентных меток, содержащих внедренные в полимерную матрицу 1,3-дикетонаты тербия и европия. При возбуждении светодиодами ультрафиолетового диапазона система надежно идентифицирует наличие метки в условиях паразитной засветки солнечным излучением.*

**Ключевые слова:** люминесценция, автоматическое позиционирование, помехозащищенность, устойчивость к погодным условиям.

*Введение.* В связи со стремительно развивающейся индустрией беспилотных транспортных средств одним из существенных вопросов является выбор способа позиционирования средства. Известно определение координат транспортного средства с помощью измерения по радиоканалу расстояния до спутников Земли. Такая система реализована в смартфонах. Точность определения положения объекта составляет от 2 метров. Недостатками здесь являются недостаточная помехозащищенность к электромагнитным помехам, а также невозможность работы в туннелях и закрытых объектах, где радиоканал до спутника заблокирован.

Другим способом определения положения транспортных средств является применение RFID меток (англ. Radio Frequency IDentification, радиочастотная идентификация); точность определения положения объекта составляет порядка 10 сантиметров. Недостатком этой системы является восприимчивость к электромагнитным помехам.

Существуют системы на основе расположенных на земле люминесцентных меток, при этом источник ультрафиолетового излучения и приемник сигнала находятся на

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1; e-mail: andrewx@mail.ru.

транспортном средстве. При попадании излучения на метку они начинают люминесцировать. Сигнал люминесценции регистрируется приемным устройством. При использовании такой системы существенным фактором является устойчивость к паразитной засветке естественным светом или фарами других транспортных средств. Основным требованием, предъявляемым к люминесцентной метке, является существенно большая интенсивность ее люминесценции по сравнению с паразитной засветкой. Интенсивность люминесценции метки при возбуждении солнечным светом также должна быть существенно меньше, чем интенсивность ее люминесценции при засветке источником ультрафиолетового излучения, расположенном на транспортном средстве. Кроме этого, метка должна быть устойчива к воздействию атмосферы, влаги, осадкам, изменению температуры; она должна быть пригодной к очистке от пыли и загрязнений моющими средствами. Также должна быть продемонстрирована возможность идентификации метки при движении. В настоящей работе была поставлена задача по разработке и испытаниям макета системы позиционирования с использованием люминесцентных меток, возбуждаемых ультрафиолетовыми светодиодами, в том числе при движении метки и регистрирующего тракта друг относительно друга.

*Методика эксперимента.* Были использованы люминофоры на основе тербия и европия с полосами люминесценции 550 и 612 нм, соответственно, синтезированные в соответствии с методиками, описанными в [1, 2]. Люминофоры были введены в матрицу из фторуглеродного полимера [3], обладающего большой стойкостью к воздействию температур, света и органических растворителей; массовая концентрация люминофора в матрице составила 0.1%. Люминесцентные метки были изготовлены путем нанесения матриц с люминофорами на подложки размером  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>.

Исследование интенсивности и спектрального состава люминесценции меток было проведено на установке, в состав которой входил ПЗС-спектрометр Ocean Optics Maya 2000 Pro. В качестве источников возбуждения использовали 4 светодиода UV LED NSHU591B фирмы Nichia мощностью 4 мВт каждый, излучающие на длине волны 365 нм и подключенные к источнику питания NY1505D производства ООО «Октава Электрон Дизайн». Источник питания обеспечивал постоянную мощность излучения светодиодов с помощью системы обратной связи на основе фотодиода для контроля интенсивности излучения. Тракт регистрации излучения состоял из объектива и интерференционных полосовых светофильтров производства фирмы ФотоОптик, г. Обнинск, со средней длиной волны 550.0 и 612.3 нм и шириной полосы пропускания 14 нм на половине высоты. В фокусе объектива был расположен кремниевый фото-

диод ФД-24К, подключенный ко входу логарифмического усилителя на основе микросхемы ADL5304ACPZ производства Analog Devices, имеющего динамический диапазон 120 дБ. Усиленный сигнал оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя, также изготовленного компанией Октава Электрон Дизайн и передавался в компьютер по шине USB. Испытание помехозащищенности от паразитных засветок проводилось с помощью имитатора солнечного излучения Visico VC-1000Q. Средняя освещенность метки имитатором солнечного излучения составляла  $6.8 \cdot 10^4$  лк на расстоянии 55 см от имитатора, что соответствует максимальной освещенности в ясный солнечный день при нормальном падении солнечного света на метку на территории РФ.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Люминесцентная метка была закреплена на маятнике, который имитировал движение транспортного средства, совершая колебательное движение около точки равновесия. Измеряли временную зависимость интенсивности света, регистрируемого фотоприемником, только при засветке светодиодом 365 нм, а также при включенном имитаторе солнечного излучения.

*Результаты эксперимента.* Зависимость интенсивности детектируемого фотодиодом сигнала от времени при облучении меток только светодиодом 365 нм приведена на рис. 2 слева. Постоянная засветка во временном интервале от 0 до 80 с соответствует неподвижной метке. Следующие узкие максимумы соответствуют случаям, когда маятник приведен в движение с различными скоростями. Видно, что с увеличением скоро-

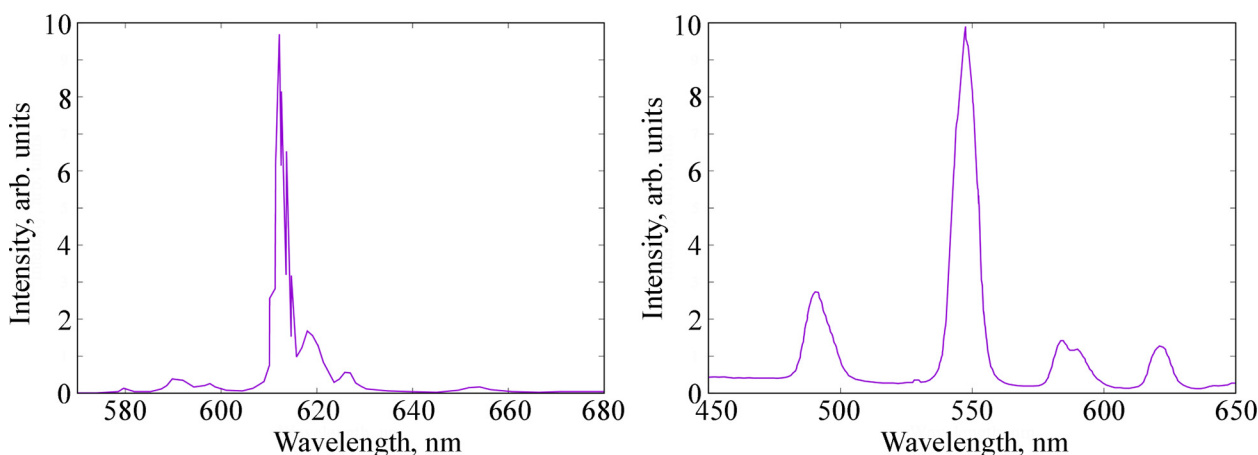


Рис. 1: Спектры фотолюминесценции метки на основе соединения европия (слева) и тербия (справа) при возбуждении излучением 365 нм.

сти движения маятника интенсивность сигнала уменьшается, что связано с конечным временем интегрирования регистрирующей аппаратуры. Также из указанного рисунка следует, что амплитуда зарегистрированного сигнала в случае люминофора, излучающего в области 612 нм, на 10 дБ превышает указанный показатель для люминофора, излучающего в области 550 нм.

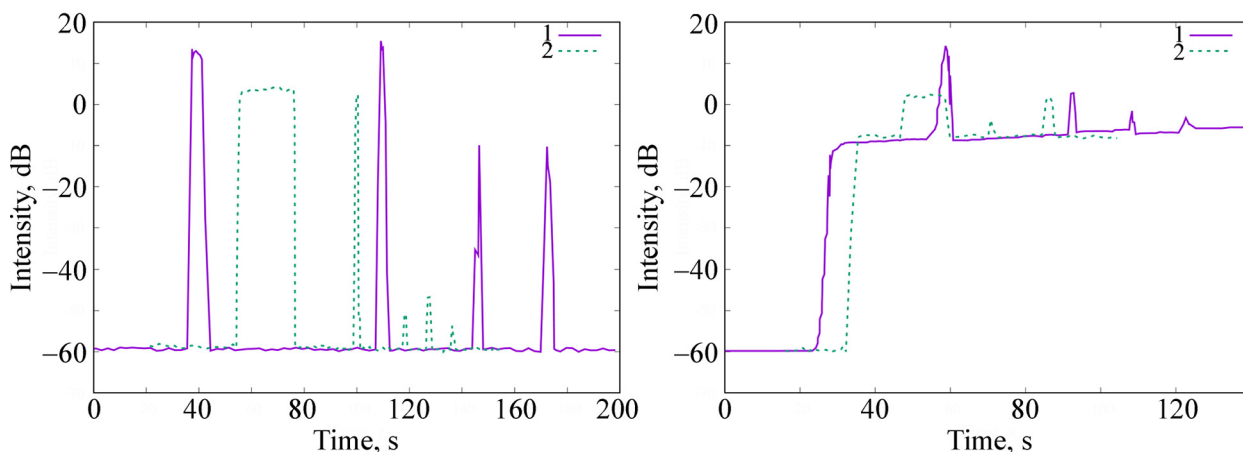


Рис. 2: Зависимость интенсивности свечения меток, излучающих в области 612 нм (1) и 550 нм (2), от времени при возбуждении источником света с длиной волны 365 нм и мощностью 16 мВт (слева), а также при дополнительной засветке имитатором солнечного света (справа).

Результаты аналогичного эксперимента при совместном облучении метки светодиодом 365 нм и имитатором солнечного излучения приведены на рис. 2 справа. Интенсивность излучения метки как минимум на 10 дБ превышает уровень сигнала, вызванного имитатором солнечного излучения. Это обеспечивает помехозащищенность системы при наличии естественной засветки.

Влияние длительного воздействия излучением 365 нм на люминесцентные метки представлено на рис. 3 слева. При непрерывном возбуждении в течение суток интенсивность люминесценции упала примерно на 6%. Воздействие излучением с солнечным спектром (рис. 3, справа) в течение суток не привело к существенному изменению люминесцентных свойств метки. По всей видимости это связано с тем, что деградация происходит преимущественно под действием ультрафиолетовой части спектра.

Повышенная помехозащищенность связана с узкополосным свечением люминофора и наличием соответствующего узкополосного оптического фильтра в канале регистрации интенсивности люминесценции метки. Регистрируемый детектором сигнал помехи

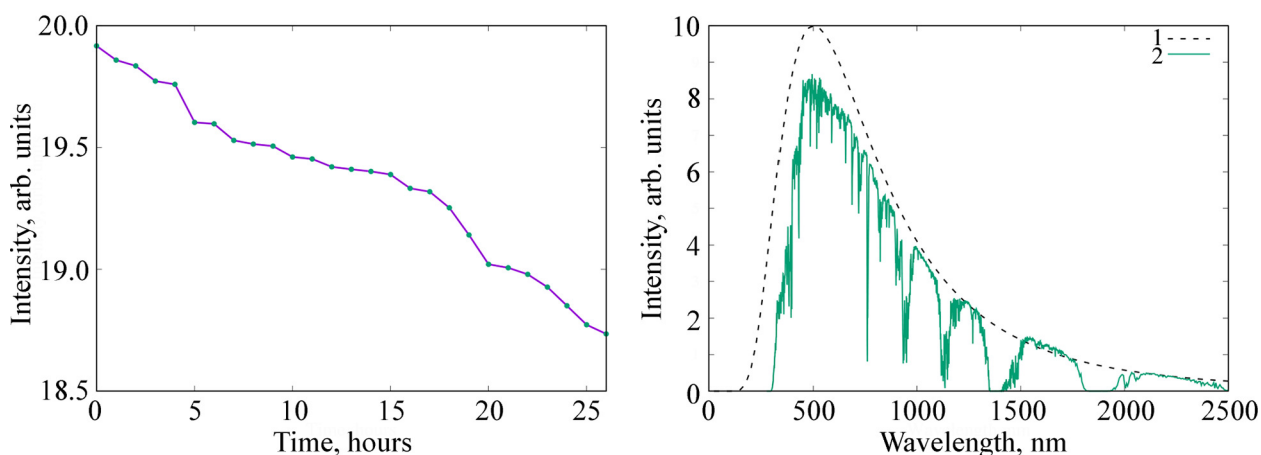


Рис. 3: Слева: зависимость интенсивности полосы люминесценции метки на основе европия в области 612 нм от времени облучения излучением 365 нм мощностью 16 мВт. Справа: 1 – спектр свечения абсолютно черного тела при температуре 6000 К; 2 – спектр солнечного излучения у поверхности земли [4].

состоит из двух частей, одна из которых связана с попаданием отраженного от метки солнечного света. Другая определяется люминесценцией метки, возникающей под воздействием ультрафиолетовой части солнечного света, попадающего в полосу возбуждения люминофора. Введение узкополосного люминофора и светофильтра существенным образом уменьшает первую компоненту помехи; вторая компонента в этой схеме не может быть устранена. Тем не менее, эксперимент показывает, что уже устранение первой компоненты достаточно для того, чтобы обеспечить требуемую помехозащищенность.

*Заключение.* Показано, что система на основе люминесцентных меток, состоящих из перфторуглеродных матриц, в которые внедрены люминесцентные материалы на основе 1,3-дикетонатов тербия и европия, обеспечивает уверенную идентификацию люминесцентных меток в условиях воздействия атмосферных факторов. Полезный сигнал превышает величины паразитного сигнала как минимум на 10 дБ, что обеспечивает надежность системы.

Изготовление образцов люминесцентных меток на основе матрицы из перфторуглеродов с внедренными люминесцентными материалами выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-02-00222. Измерение люминесцентных характеристик и определение помехозащищенности системы выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-72-20088-п.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. Zairov, N. Shamsutdinova, S. Podyachev, et al., *Tetrahedron* **72**(19), 2447 (2016). DOI: 10.1016/j.tet.2016.03.068.
- [2] И. В. Тайдаков, Б. Е. Зайцев, А. Н. Лобанов и др., *Журнал неорганической химии* **58**(4), 473 (2013). DOI: 10.7868/S0044457X1304020X.
- [3] И. В. Тайдаков, А. Н. Лобанов, В. М. Коршунов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**(12), 3 (2019).
- [4] C. A. Gueymard, *Solar energy* **76**(4), 423 (2004). DOI: 10.1016/j.solener.2003.08.039.

Поступила в редакцию 27 апреля 2022 г.

После доработки 20 мая 2022 г.

Принята к публикации 23 мая 2022 г.