

Метод измерения геометрического шума матричных фотоприёмников интеллектуальной системы обнаружения препятствий на пути движения железнодорожного состава

Ю. С. БЕХТИН¹, И. Н. ЖЕЛБАКОВ², А. С. ИГНАТОВ², П. Г. КРУГ²,
А. А. ЛУПАЧЁВ²

¹Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,
e-mail: yuri.bekhtin@yandex.ru

Предложен эмпирический метод измерения геометрического шума матричных фотоприёмников, входящих в состав разработанной интеллектуальной системы обнаружения препятствий на пути движения железнодорожного состава. В качестве эталонного калибровочного поля используется тепловое изображение шпал. Измерение геометрического шума чувствительности и темнового тока основано на выделении уровней однородности эталонного изображения. Результаты экспериментов показали преимущество предложенного метода по сравнению с традиционной двухточечной калибровкой.

Ключевые слова: безопасность железнодорожного транспорта, геометрический шум, калибровка матричных фотоприёмников.

The paper describes an empirical method for measuring the fixed pattern noise (FPN) of the IR matrix sensors of the smart system intended for detecting barriers to the movement of the train. The method exploits an image of railway sleepers as a reference image for calibration. The segmentation procedure selects the texture homogeneity levels that allow measurement of the photo-element transfer coefficients within each level. The experimental results have shown the advantage of the proposed method in comparison with the well-known 2-point FPN correction procedures.

Key words: railroad safety, fixed pattern noise, infrared sensor calibration.

В настоящее время в России и других странах интенсивно разрабатываются и внедряются различные интеллектуальные системы управления движением железнодорожного транспорта, которые применяют также для раннего обнаружения различных препятствий на железнодорожных путях с целью последующего автоматического торможения составов во избежание столкновений и катастроф [1]. Ранее была предложена базовая структура нейросетевого классификатора помех движению железнодорожного состава (локомотива) [2, 3]. Нейросетевой классификатор должен обнаруживать и распознавать препятствия, возникающие на пути движения локомотива, анализируя изображения, полученные от различных датчиков, в том числе, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне.

Одной из главных проблем неохлаждаемых матричных фотоприёмников (МФП) является геометрический шум (ГШ) [4—6], физическая природа появления которого заключается в неоднородности фоточувствительных элементов и электрических схем первичной обработки сигналов. В зависимости от физического источника неоднородности принято различать ГШ дефектов, коммутации, темнового тока и чувствительности. В частности, ГШ чувствительности обусловлен неоднородностью коэффициентов передачи каналов МФП, а ГШ дефектов появляется из-за пробоев p - n -переходов, коротких замыканий, разрывов токопроводящих шин и т. д. Физическим источником ГШ коммутации являются коммутационные помехи, проникающие через паразитные элементы от источников импульсного управляющего напряжения.

На выходе каждого фотоэлемента существует пьедестальное напряжение, значения которого случайны и распределены в относительно большом динамическом диапазоне. Это обусловлено действием ГШ темнового тока [5].

Если ГШ коммутации и дефектов можно устранить одноразовой производственной настройкой фотоприёмника [4, 5], то для устранения ГШ темнового тока и чувствительности требуется периодическое измерение параметров МФП с целью последующей калибровки. Применяемые в последнее время методы измерения и коррекции ГШ основаны на использовании средств аналогово-цифровой схемотехники и не предполагают предварительного изучения физических источников ГШ [7]. Эффективность таких методов определяется только мощностью заложенных в них алгоритмов измерения (оценивания), поскольку современный уровень развития цифровых процессоров и устройств позволяет игнорировать в той или иной степени вычислительную сложность данных методов.

Среди методов измерения ГШ выделяют следующий подход [5, 7—9], ставший классическим. Сначала при подаче на объектив МФП холодного однородного оптического поля (например, при закрытых шторах, что соответствует «низкой температуре») измеряют и записывают в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) значения ГШ темнового тока. Далее при подаче на объектив МФП тёплого однородного оптического поля (например, ладонь, что соответствует «высокой температуре») измеряют (оценивают) коэффициенты передачи каналов МФП и на их основе рассчитывают попра-

точные коэффициенты, необходимые для последующего выравнивания неоднородности вольтовой чувствительности элементов МФП. Затем происходит отображение текущего кадра тепловизионного изображения с одновременным выполнением операций подавления ГШ темнового тока (вычитания) и выравнивания вольтовой чувствительности (умножения на поправочный коэффициент).

Данный вид двухточечной калибровки целесообразно проводить до начала движения локомотива или во время его остановки, когда в качестве калибровочных полей можно использовать стационарные однородные сегменты окружающей сцены (например, стену дома, поле и т. п.). Для относительно небольших перегонов (не более 20—30 мин) такая калибровка является достаточной. Однако во время длительного движения состава происходит дрейф параметров ГШ, что приводит к ухудшению работы нейросетевого классификатора помех [10]. Вследствие этого возникает необходимость прерывания нормального («смотрящего») режима работы МФП для пересчёта параметров ГШ чувствительности и темнового тока. Для проведения двухточечной калибровки необходимо иметь однородное калибровочное поле, формируемое в процессе движения локомотива. Относительно надёжный подход заключается в использовании дополнительного блока, который создает калибровочное оптическое поле, поступающее на объектив МФП при закрытых шторах [5]. По оценкам авторов стоимость и габаритные размеры такого блока значительно увеличивают расходы на внедряемую интеллектуальную систему управления.

Альтернативой является использование методов так называемой безэталонной коррекции [9], в частности, применение «размытого» изображения после расфокусировки объектива МФП. Однако в условиях движения локомотива при быстром изменении сцен получение размытого изображения с относительно высокой степенью однородности становится проблематичным. Таким образом, необходимо найти эталонный объект, сохраняющий основные характеристики при любой скорости движения локомотива, погодной обстановки и времени суток.

В качестве такого объекта можно использовать железнодорожное полотно, которое всегда находится в фокусе объектива МФП (рис. 1, а). В России протяжённость железнодорожных путей с железобетонными шпалами в настоящее время приближается к 60 % развернутой длины главных путей [11]. При всех эпюрах шпал приняты стандартные расстояния между осями стыковых шпал: 42 см для рельсов Р65, Р75 и 44 см для рельсов Р50. Расстояния между осями остальных шпал на протяжении рельсового звена одинаковы и равны 54,6 см (эпюра 1840 шт./км) и 50,2 см (2000 шт./км). В процессе эксплуатации наибольшее допустимое отклонение расстояний между осями шпал (от указанных нормативных) не должно превышать 8 см для деревянных шпал и не более 4 см для железобетонных [11].

Последнее обстоятельство позволяет при выведении изображения шпал полотна полностью в кадр МФП (рис. 1, б) зафиксировать после бинаризации тёмные и светлые области. Фактически на входе объектива МФП появляется калибровочный объект в виде штриховой миры

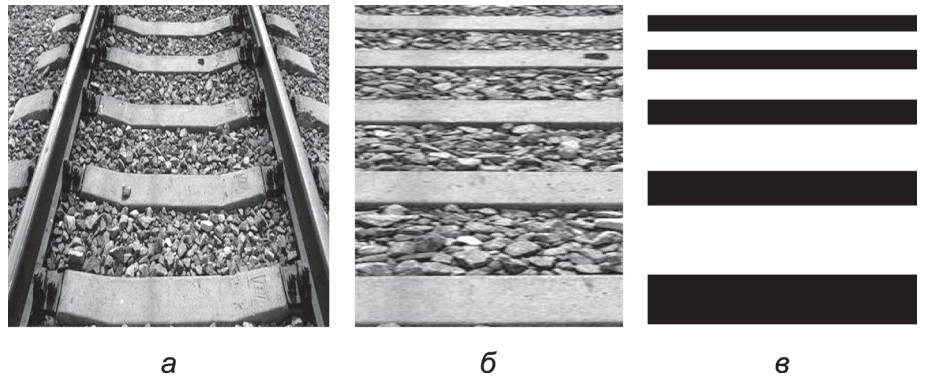


Рис. 1. Изображение железнодорожного полотна (а), его фрагмент (б) и бинаризованное изображение (в)

(рис. 1, в), которая применяется для измерения контрастно-частотных характеристик оптических приборов [4].

Расчёт ширин полос и расстояний между ними при известном угле зрения объектива МФП и стандартах эпюр шпал являются утилитарной инженерной задачей и в настоящей статье не рассматриваются.

Постановка задачи. Пусть выходное изображение МФП, обработанное с учётом ГШ чувствительности и темнового тока по результатам предварительной двухточечной калибровки, представимо в матричном виде

$$Y(t) = K(t) X(t) + C(t) - C(0) + \Xi(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ — наблюдаемый кадр изображения с номером t , $t = 1, 2, \dots, T$; T — число калибровочных кадров, по которым выполняют измерения коэффициентов передачи, для текущего кадра $Y = [y_{ij}]_{i,j=1}^{N,M}$; $N \times M$ — размер кадра МФП; $K(t)$ —

«приведённый» двумерный массив коэффициентов передачи (вольтовой чувствительности) фотоэлементов матрицы

МФП, $K = [k_{ij}]_{i,j=1}^{N,M}$, изменяется стохастически от кадра к кад-

ру относительно начальной оценки $K(0)$ на этапе предварительной калибровки; $X(t)$ — оригинал (неискажённое изображение или эталон для задач калибровки), оценку которого также надо получить через оценки коэффициентов пере-

дачи $K(t)$, $X = [x_{ij}]_{i,j=1}^{N,M}$; $C(t)$ — пьедестальные напряжения

на выходе фотоэлементов, обусловленные действием тем-

нового тока чувствительности; $\Xi = [\xi_{ij}]_{i,j=1}^{N,M}$ — погрешность из-

мерения, обусловленная другими, неучтёнными в (1) факторами, например тепловым шумом фотоэлемента, погрешностью квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП), шумами электронного тракта и др.

Смысл термина «приведённый» состоит в том, что элементы матрицы $K(t)$ определяют по истинным значениям коэффициентов передачи фотоэлементов, поделённым на их оценки $K(0)$ при предварительной калибровке. Другими словами, разброс значений $K(t)$ относительно условной единицы может оказаться существенно меньше исходного технологического разброса $K(0)$ вольтовой чувствительности

фотоэлементов МФП, особенно в начальный момент работы в смотрящем режиме.

Поставим задачу измерений пьедестальных напряжений $C(t)$ на выходе фотоэлементов и их вольтовой чувствительности $K(t)$ по эталонным изображениям шпал железнодорожного полотна, представленным в виде мир, как показано на рис. 1, в. При этом среднее квадратическое отклонение чувствительности отдельных фотоэлементов матрицы МФП от среднего значения их чувствительности для обнаружения перепадов температур на 0,2 К при температуре 300 К не должно превышать 0,05 % [5].

Метод измерения. Зная скорость движения локомотива и расстояние между шпалами железнодорожного полотна, можно сформировать и записать в ОЗУ две последовательности изображений, соответствующих тёмной и светлой засветкам железнодорожного полотна, т. е. шпалам и пространствам между ними. Иначе говоря, при соответствующем развороте объектива МФП все элементы матрицы оказываются засвеченными двумя оптическими полями с разными температурами. Однако степень однородности сформированных таким образом искусственных оптических полей не будет высокой из-за различий в условиях формирования кадров на выходе МФП. Это представление вполне оправданно, поскольку освещённость кадра неоднородна и зависит от времени суток. Например, в солнечную погоду может оказаться, что дальние по отношению к локомотиву фрагменты железнодорожного пути освещены ярче, чем ночью, когда прожектор локомотива ярче освещает ближние участки полотна. Таким образом, метод измерения должен учитывать неоднородность оптического калибровочного поля, что предполагает дополнительную сегментацию изображений.

Представим текущий кадр любой последовательности в виде суммы непересекающихся сегментов [12]:

$$Y = \bigcup_{l=1}^L Y^{(l)},$$

где $Y^{(l)}$ — сегмент кадра, состоящий из точек $y_{ij}^{(l)}$, $i = \overline{1, I^{(l)}}$, $j = \overline{1, J^{(l)}}$, принадлежащих одному и тому же уровню однородности с номером l , $l = \overline{1, L}$, L — число уровней однородности.

Для задания числа уровней однородности возможны два подхода. При первом подходе число L определяется как количество прямоугольных сегментов, соответствующих удвоенному количеству шпал, попавших в объектив МФП. По результатам экспериментов с болометром с матрицей 240×320 элементов при рельсах Р65, Р75 установлено, что не всегда число уровней однородности оказывается достаточным для измерения геометрического шума МФП с приемлемой погрешностью.

Во втором подходе число уровней рассчитывается как

$$L = (y_{\max} - 1) / \Delta, \quad (2)$$

где $y_{\max} = 2^p$ — максимальный размах входного сигнала, p — разрядность представления данных входного АЦП устройства обработки; Δ — параметр, определяющий интервал для уровней однородности.

Использование соотношения (2) позволяет повысить число уровней однородности для обеспечения измерений ГШ темнового тока и чувствительности с приемлемой погрешностью. В последнем случае для классификации точек кадра необходимо проверить выполнение условия их принадлежности интервалу для какого-либо уровня однородности:

$$y_{ij} \in [X_{\min}^{(l)}, X_{\max}^{(l)}], \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M},$$

где $X_{\min}^{(l)}, X_{\max}^{(l)}$ — нижняя и верхняя границы интервала для уровня однородности с номером l , $l = \overline{1, L}$.

При значительном отклонении коэффициента передачи какого-либо фотоэлемента от калибровочного наблюдаемый отсчёт y_{ij} , $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$, может принадлежать другому интервалу, не соответствующему «правильному» значению калибровочного поля сегмента y_{ij} , $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$. Для уменьшения ошибок классификации предлагается выполнить проверку принадлежности текущего пиксела сегменту, проанализировав его окрестности. Пусть в малом окне размером $q \times q$ (например $q = 3; 5$) относительно текущего пиксела наблюдается n_l точек, принадлежащих данному уровню однородности с номером l , и $n_{\bar{l}}$ точек, принадлежащих

другим уровням, при этом $n_l + n_{\bar{l}} = q^2 - 1$. Тогда будем полагать, что текущая точка y_{ij} , $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$, принадлежит уровню однородности l , $l = \overline{1, L}$, если выполняется условие $n_l \geq n_{\bar{l}}$. Для измерения пьедестальных напряжений, как и в случае классической двухточечной калибровки, можно использовать последовательность кадров при низкой температуре с учётом результатов предварительной калибровки:

$$\hat{c}_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [y_{ij}(t) + c_{ij}(0)], \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M},$$

где $\hat{c}_{ij}$ — элементы нового массива $C(0)$ из (1).

Последовательности кадров при высокой температуре формируются на основе полученных оценок пьедестальных напряжений.

Для оценок коэффициентов передачи необходимо вычислить средние значения пикселей для каждого уровня однородности по совокупности кадров наблюдений при высокой температуре:

$$B_{ij}^{(l)} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T y_{ij}^{(l)}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}.$$

Затем находятся уровни однородности как средние по множествам точек, соответствующих сегментам изображения:

$$B^{(l)} = \frac{1}{I^{(l)} J^{(l)}} \sum_{i=1}^{I^{(l)}} \sum_{j=1}^{J^{(l)}} B_{ij}^{(l)}, \quad l = \overline{1, L}.$$

Тогда оценки коэффициентов передачи фотоэлементов смотрящей матрицы рассчитываются согласно выражению

$$\hat{k}_{ij} = B_{ij}^{(l)} / B^{(l)}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}, \quad l = \overline{1, L}.$$

Результаты измерений в виде новых массивов оценок записываются в ОЗУ и используются при работе МФП в смотрящем режиме.

Результаты экспериментальных исследований. Для оценки эффективности предложенного метода измерения ГШ темнового тока и чувствительности были проведены испытания на измерительном стенде [13], в состав которого входят следующие элементы:

МФП со спаренными линейками элементов форматом 4×288 (или 8×144 , если каждую линейку фотоэлементов считать независимой);

оптико-механический блок (ОМБ), формирующий тепловое изображение для МФП в виде равномерно нагретого поля со степенью однородности $(1,5 \pm 0,5) \%$, а также в виде изображений, синтезированных из тепловых фотоснимков железнодорожного полотна со степенью однородности $(7,0 \pm 0,5) \%$;

базовый модуль аналогового ввода-вывода и submodule аналого-цифрового ввода (14 разрядов), размещенные в корпусе персонального компьютера и подключенные к шине PCI;

персональный компьютер типа IBM PC (процессор Celeron 3,2 ГГц, ОЗУ 2 Гб, операционная система WINDOWS XP).

Для проведения экспериментов разработана компьютерная программа, которая обеспечивает: синхронизацию с оптико-механической системой сканирования; измерение выбранным методом и компенсацию постоянной составляющей на выходе элементов МФП (ГШ темнового тока); измерение и запись выходного сигнала и ГШ без учёта пьедестальных напряжений, а также расчёт отношения сигнал-шум для вольтовой чувствительности элементов МФП выбранным методом измерений; замену выходных сигналов неисправных элементов МФП; выполнение режима работы временной задержки и накопления сигнала (ВЗН); формирование изображения на экране дисплея компьютера после реализации любой из перечисленных выше функций в соответствии с законом сканирования ОМБ; запись в файл в формате электронной таблицы кадра (кадров) следующих изображений: исходного (необработанного), после компенсации постоянной составляющей элементов МФП, после компенсации разброса вольтовой чувствительности элементов МФП, после интерполяции или замены выходных сигналов неисправных элементов МФП, после обеспечения выполнения режима работы ВЗН; формирование и запись протоколов испытаний.

В данной статье представлены результаты экспериментов, выполненных двумя методами измерений. Первый метод основан на классической двухточечной калибровке (используется в качестве эталонного). Второй метод — на синтезировании изображения железнодорожного полотна. Число уровней однородности $L = 12$; МФП был подключен к компьютеру и синхронизирован через плату ввода-вывода, тактовая частота 4,0 МГц, время накопления 25,0 мкс, число выборок по линейкам (столбцам) матрицы 1024 с числом усреднений 4. Измерения проводили с напряжениями смещений АЦП, которые были разными для двух методов измерений и равны 1,0482 и 1,067 мкВ для соответствующих методов.

Для кадров при низкой и высокой температуре измерялись и записывались соответствующие напряжения на выходе каждого фотоэлемента в виде протоколов испытаний, которые затем подвергались статистической обработке. Установлено, что относительная погрешность измерений ГШ темнового тока вторым методом относительно первого не превосходит 15 %. Относительная погрешность измерений коэффициентов передачи (вольтовой чувствительности) фотоэлементов не превышает 10 % для второго метода по отношению к первому. Таким образом, учитывая проблему увеличения временного интервала работоспособности теплового канала интеллектуальной системы обнаружения препятствий на пути движения железнодорожного состава, полученные результаты калибровки по неоднородному оптическому полю можно считать вполне приемлемыми. Другими словами, исходную неоднородность вольтовой чувствительности (30–50) %, при которой нейросетовой классификатор и другие алгоритмы обнаружения и классификации объектов, например корреляционно-экстремальные, теряют работоспособность, удастся снизить до 10 %. Тогда применение нейросетового классификатора приводит к меньшей погрешности результатов измерений по сравнению с корреляционно-экстремальными алгоритмами обнаружения и классификации объектов [10, 11]. Кроме того, после применения результатов измерения коэффициентов передачи фотоэлементов для калибровки МФП, предложенный метод обеспечивает уверенное обнаружение перепадов температур на 0,18 К при температуре 275 К.

Данное утверждение было также проверено имитационным моделированием. На рис. 2, а приведены зависимости среднего квадратического значения погрешности оценивания искаженного изображения от номера кадра при использовании предложенного метода (кривая 1) и на основе только результатов предварительной двухточечной калибровки (кривая 2). На рис. 2, б показано количество R пикселей, оцененных нейросетовым классификатором с 10%-й относительной погрешностью. Из рис. 2 следует, что предложенный метод позволяет в несколько раз увеличить временной интервал между двухточечными калибровками. В частности, для болометра с периодом работоспособности 20–30 мин удается обеспечить его приемлемую работу в течение 2 ч.

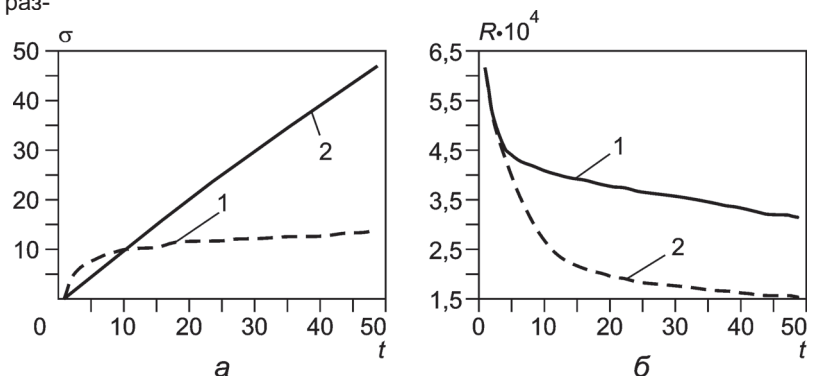


Рис. 2. Зависимости среднего квадратического значения σ погрешности (а), измеренные в градациях серого для восьмиразрядных изображений, и количества R пикселей (б), оцененных нейросетовым классификатором, от номера t кадра при использовании предложенного метода (1) и по результатам предварительной двухточечной калибровки (2); параметр t масштабирован с коэффициентом 150

Заключение. Проведённые эксперименты показали, что при неоднородности синтезированного оптического калибровочного поля около 7 % погрешность измерения вольтовой чувствительности составляет не более 10 %. При этом погрешность измерения ГШ темнового тока остается на прежнем уровне. Вопросы, касающиеся выбора интеллектуальной системой момента времени и алгоритма формирования оптического поля с заданной степенью однородности ($7,0 \pm 0,5$ %), относятся к работе нейросетевого классификатора и являются предметом другой статьи.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.574.21.0047 от 19 июня 2014 г., уникальный идентификатор RFMEFI57715X0200).

Л и т е р а т у р а

1. **Астратов О. С., Филатов В. Н.** Видеодатчики в системе обеспечения безопасности движения на железнодорожном переезде // Датчики и системы. 2015. № 2. С. 33—37.
2. **Bekhtin Yu., Krug P., Zhelbakov I., Lupachev A.** The Neural Network Classifier for Train Barriers Recognition // 4th Intern. Conf. Mechanical Eng., Materials and Energy. 4th ICMEME 2014. Singapore, 2014.
3. **Bekhtin Yu., Krug P., Lupachev A., Ostroukh A., Pavelyev S., Zhelbakov I.** Identification of Barriers to the Movement of the Train // Intern. J. Signal System Control and Eng. Appl. 2014. V. 7. N. 3. P. 52—60.
4. **Hudson R.D.** Infrared systems engineering (Book Style). N.Y.: John Wiley & Sons, 1969.
5. **Кругликов С. В.** Методы и средства подавления структурных помех многоэлементных фотоприемников // Аналитический обзор № 4628 за 1970—1987 гг. М., 1989.

6. **Norton P., Campbell D., Horn S.** Third generation of infrared imagers // Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 226—235.

7. **Joseph D., Collins S.** Modeling calibration and correction of nonlinear illumination-dependent fixed pattern noise in logarithmic CMOS image sensor // IEEE Trans. Inst. and Mea. 2002. V. 51. N. 5. P. 996—1001.

8. **Milton A. F., Barone F. R., Kruer M. R.** Influence of non-uniformity on infrared focal plane array performance // Opt. Eng. 1985. V. 24. N. 5. P. 855—862.

9. **Ratliff B. M., Hayat M. M., Hardi R. C.** An algebraic algorithm for non-uniformity correction in focal plane arrays // J. Opt. Soc. of America. 2002. V.19. N. 9. P. 1737—1745.

10. **Eismann M. T., Schwartz C. R.** Focal plane array non-linearity and non-uniformity impacts to target detection with thermal infrared imaging spectrometers // Proc. SPIE. 1997. V. 3063. P. 164—173.

11. **Смолева С. В., Овчинников В. В.** Верхнее строение пути: Учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во Дальневосточного государственного института путей сообщения, 2011.

12. **Bekhtin Yu. S., Gurov V. S., Guryeva M. N.** Algorithmic Supply of IR Sensors with FPN using Texture Homogeneity Levels // Proc. 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro, June 15—19, 2014. P. 252—255.

13. **Бехтин Ю. С., Баранцев А. А., Соляков В. Н., Медведев А. С.** Аппаратно-программный комплекс цифровой обработки сигналов многорядных матричных фотоприемных устройств // Прикладная физика. 2007. № 3. С.77—82.

Дата принятия: 09.12.2015.