



УДК 629.78

В. Е. Герцман, А. А. Суворов, Е. Н. Сигов

Задача идентификации источников лазерного облучения навигационных космических аппаратов

Рассматриваются математические методы, позволяющие по частоте регистрации электромагнитных импульсов определить факт целенаправленного облучения космического аппарата лазерными импульсами и оценить географические координаты наземного источника облучения.

Квантово-оптическая станция, электромагнитный импульс, лазерное излучение, определение местоположения источников излучения, ГЛОНАСС

Стандартная навигационная задача, решаемая с использованием глобальных космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, заключается в определении координат и времени потребителя, принимающего навигационные сигналы от спутников с известными координатами и бортовыми шкалами времени, синхронизированными с единой опорной шкалой.

Известна инверсия этой навигационной задачи, когда определяются координаты наземного источника и время излучения по засечкам времен приема одного излученного импульса несколькими навигационными спутниками.

В статье рассматривается малоизвестный вариант навигационной задачи, а именно определение координат наземного источника излучения в условиях, когда указанный источник на любом интервале времени облучает только один из всей группировки навигационных спутников.

Под наземным источником облучения подразумевается квантово-оптическая станция (КОС), облучающая спутник лазерными импульсами с постоянным периодом повторения (в диапазоне от 10^{-2} до 10 с) на любом из сеансов облучения. Сеанс облучения ограничен: от единиц до десятков минут. За длительный интервал времени от нескольких часов до нескольких суток может набраться значительное число сеансов облучения, проведенных данной КОС как по одному, так и по нескольким спутникам космической группировки ГЛОНАСС.

Бортовая аппаратура навигационного космического аппарата (НКА) фиксирует моменты приема электромагнитных импульсов, как от неизвестной КОС, так и от других мешающих источников естественного происхождения. Указанные моменты, привязанные к системной шкале времени ГЛОНАСС, в виде специальных информационных сообщений (СИС) передаются в наземный центр обработки информации.

В результате апостериорной обработки необходимо идентифицировать факт несанкционированного облучения с привязкой к дате и времени регистрации, определить период повторения импульсов лазерного излучения и географические координаты КОС.

Основными предпосылками для решения задачи определения координат неизвестной КОС являются:

– использование эффекта Доплера при обработке моментов регистрации импульсов в предположении, что период излучения импульсов наземной КОС строго постоянен в течение сеанса измерений;

– прецизионная система временной привязки импульсов при высокой стабильности бортовой шкалы времени (ШВ) НКА в течение сеанса измерений;

– наличие большого числа сеансов за длительный период времени по НКА, принадлежащим к разным орбитам космической группировки ГЛОНАСС.

Анализ и предварительная обработка специальных информационных сообщений. Анализ СИС с целью регистрации фактов работы КОС проводится по следующим признакам:

– регулярный характер поступления сигналов по периодичности интервалов между моментами регистрации;

– повторяемость сеансов регистрации сигналов по отношению к положению данного НКА на орбите;

– повторяемость сеансов регистрации сигналов для различных НКА по отношению к географическому району, над которым находится спутник.

По полученным признакам формируются устойчивые критерии и проводится статистический анализ гипотез о целенаправленной работе наземной КОС по аппаратам космической группировки, при этом оцениваются дата и время регистрации, частота и интервал облучения, вероятности ложной тревоги и пропуска события.

В СИС содержится следующая информация, необходимая для идентификации фактов работы наземных КОС:

– системный номер НКА (номер точки);

– дата в формате DD MM YYYY (день, месяц, год);

– время в формате hh mm ss (часы, минуты, секунды);

– номер такта регистрации N относительно целой секунды при известной длительности такта δ (микросекунды).

Для анализа СИС, поступивших в разные даты, время регистрации импульсов переводится в секунды от опорного времени и даты

$$t = \text{datetosec}(\text{DD MM YYYY hh mm ss}) + N\delta \cdot 10^{-6},$$

где datetosec – функция приведения даты и времени к числу секунд, прошедших от полуночи 5/6.01.80.

В качестве математической модели для анализа СИС примем смесь двух процессов:

– случайного поступления импульсов от внешних возмущений природного характера, при котором время поступления сигналов подчиняется закону распределения Пуассона;

– детерминированного облучения НКА наземной КОС, при котором сигналы поступают с определенной тактовой частотой с возможным кратным пропуском тактов.

Для проверки адекватности предлагаемой модели были рассмотрены несколько реальных выборок СИС с двух групп НКА ГЛОНАСС на сеансе наблюдения длительностью несколько суток:

– НКА, которые заведомо не подвергались воздействию лазерного облучения КОС;

– НКА, которые подвергались воздействию лазерного облучения КОС с известными характеристиками.

Анализ реальных СИС, поступивших от НКА, которые не подвергались облучению, показывает, что процесс случайного поступления импульсов от внешних возмущений можно считать пуассоновским со средней плотностью числа событий за единицу времени $\alpha = (5 \dots 10)E-05$ и рассчитывать вероятности поступления случайных импульсов по следующим формулам [1]:

$$p_0(T) = e^{-\alpha T}, p_i(T) = e^{-\alpha T} \frac{(\alpha T)^i}{(i)!},$$

$$p_{k \geq 2}(T) = 1 - p_0(T) - p_1(T),$$

где T – интервал времени, в течение которого регистрируются события; $p_i(T)$ – вероятность того, что на интервале длительностью T зарегистрировано ровно i импульсов; $p_{k \geq 2}(T)$ – вероятность того, что на интервале длительностью T зарегистрировано не менее двух импульсов.

Результаты расчетов показывают, что вероятность ложной тревоги для значений параметра α , близких к полученным опытным данным, при отслеживании появления двух и более импульсов подряд на интервале до 600 с не превосходит $2E-03$.

Вероятность пропуска импульсов лазерного облучения целиком зависит от частоты работы неизвестной КОС. Анализ характеристик существующих наземных КОС показывает, что частота работы лежит в диапазоне от 0.5 до 100 Гц, поэтому вероятность пропуска 10 и более лазерных импульсов на скользящем интервале длительностью от 60 до 120 с близка к нулю.

Очевидным признаком работы КОС является наличие участков со скважностью поступления импульсов, кратной некоторой константе.

Методика идентификации сигналов неизвестных КОС строится следующим образом:

1. На скользящем интервале длительностью $T = 100$ с подсчитывается число поступивших импульсов imp :

$$\tau_1 = t_0 + (i-1)T, \tau_2 = \tau_1 + T (i=1, 2, \dots),$$

$$\text{imp}(i) = \text{find}(\tau_1 \leq t < \tau_2),$$

где i – номер интервала; t – время регистрации импульса; find – процедура подсчета числа импульсов.

2. Если число поступивших импульсов не меньше заданного значения $k_{gm} = 10$, то строится гистограмма для скажностей \mathbf{dt} и определяются значения \mathbf{dt} , соответствующие пяти старшим членам гистограммы:

$$\begin{aligned} \mathbf{dt} &= \text{diff}(\mathbf{t}), \mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_n] \in [\tau_1, \tau_2), \\ \mathbf{x} &= [0 : \frac{\min(\mathbf{dt})}{4} : \max(\mathbf{dt})], \\ \mathbf{p} &= \text{hist}(\mathbf{dt}, \mathbf{x}), \\ [\mathbf{p}_{\text{sort}}, \mathbf{x}_{\text{sort}}] &= \text{sort}(\mathbf{p}), \\ \mathbf{y} &= \mathbf{x}_{\text{sort}}(\max : (\max - 4)), \end{aligned}$$

где diff – процедура получения последовательных разностей; hist – процедура построения гистограммы массива \mathbf{dt} на сетке \mathbf{x} ; sort – процедура сортировки массива \mathbf{p} по возрастанию с соответствующей сортировкой ячеек сетки \mathbf{x} ; \mathbf{y} – значения массива \mathbf{dt} , соответствующие пяти старшим членам гистограммы.

Здесь и далее стандартные процедуры обработки данных соответствуют языку технических расчетов MatLab® [2], жирным шрифтом обозначаются массивы.

3. Если значение скажности, соответствующее максимуму гистограммы, является наименьшим общим делителем для последующих трех или четырех (по мере убывания гистограмм) значений скажности, то интервал соответствует участку работы наземной КОС и частота облучения оценивается следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &= \text{rem}(\mathbf{y}(2:5), \mathbf{y}(1)), \\ \left. \begin{aligned} f_{\text{kos}} &= \frac{1}{\mathbf{y}(1)} \\ T_{\text{begin}} &= \text{sectodate}(\tau_1) \\ T_{\text{end}} &= \text{sectodate}(\tau_2) \end{aligned} \right\} \text{если } \mathbf{m}(1:4) = 0, \end{aligned}$$

где $\text{rem}(a, b)$ – процедура нахождения остатка от деления a на b ; f_{kos} – частота облучения КОС; $T_{\text{begin}}, T_{\text{end}}$ – границы интервала работы КОС; $\text{sectodat}(\text{sec})$ – функция приведения числа секунд, прошедших от полуночи 5/6.01.80, к текущей дате и времени.

Результаты расчетов по предлагаемой методике для сеансов измерений, соответствующих реально зарегистрированным импульсам по двум отечественным наземным КОС, приведены на рис. 1 и 2, из которых видно:

– на рис. 1 скажность принятых импульсов группируется на значениях 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, что соответствует частоте работы КОС 1.25 Гц;

– на рис. 2 скажность принятых импульсов группируется на значениях 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, что соответствует частоте работы КОС 100 Гц.

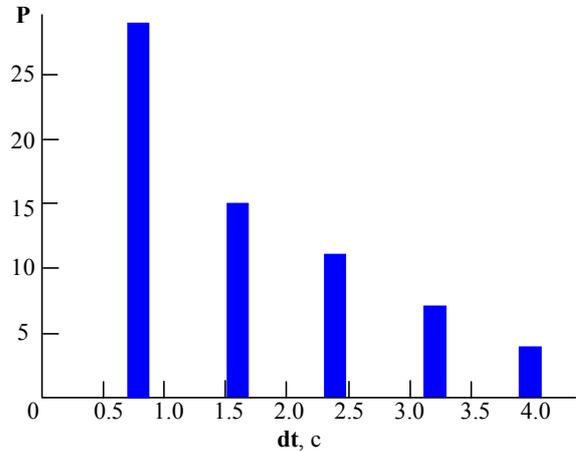


Рис. 1

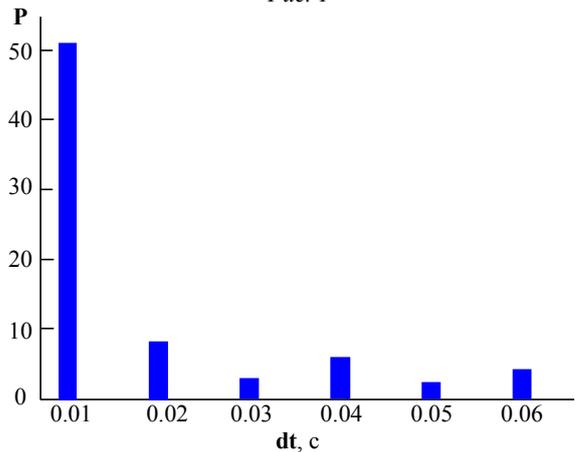


Рис. 2

Единственной информацией для определения географических координат КОС, содержащейся в СИС, является изменяющийся сдвиг τ длительности интервала между моментами регистрации импульсов \mathbf{dt} относительно номинального значения, кратного периоду излучения КОС: $T_{\text{nom}} = 1/f_{\text{kos}}$. Указанный сдвиг является аналогом эффекта Доплера вследствие изменения скорости движения спутника относительно КОС и оценивается следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \text{rem}(\mathbf{dt}, T_{\text{nom}}), \\ \tau &= \begin{cases} \mathbf{y} - T_{\text{nom}}, & \text{if } |\mathbf{y} - T_{\text{nom}}| < \epsilon, \\ \mathbf{y}, & \text{if } |\mathbf{y}| < \epsilon, \end{cases} \end{aligned}$$

где ϵ – максимально возможный сдвиг при движении спутника относительно неподвижной точки на поверхности Земли.

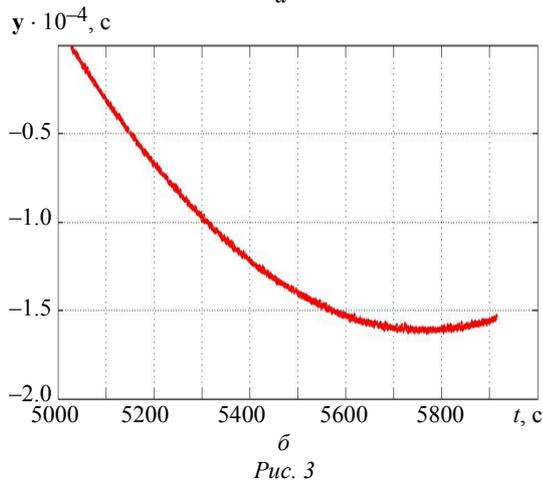
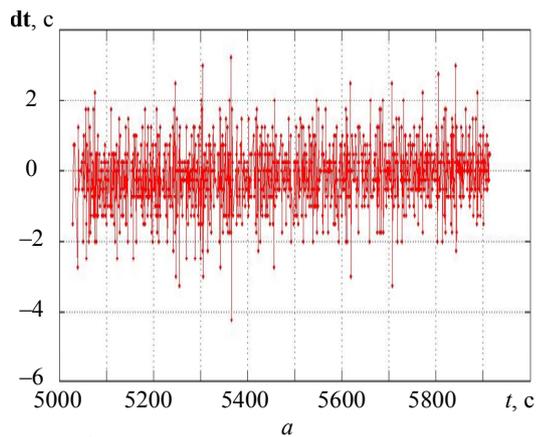


Рис. 3

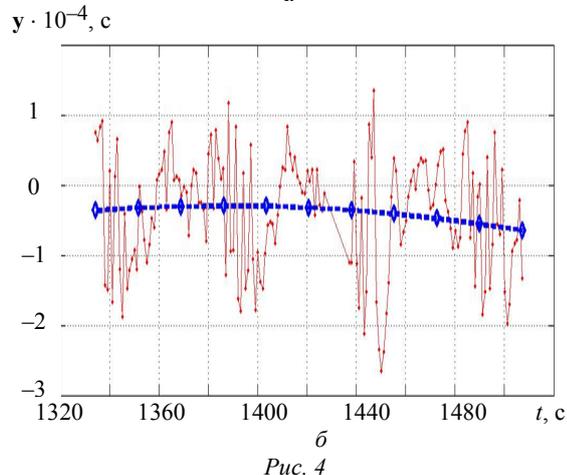
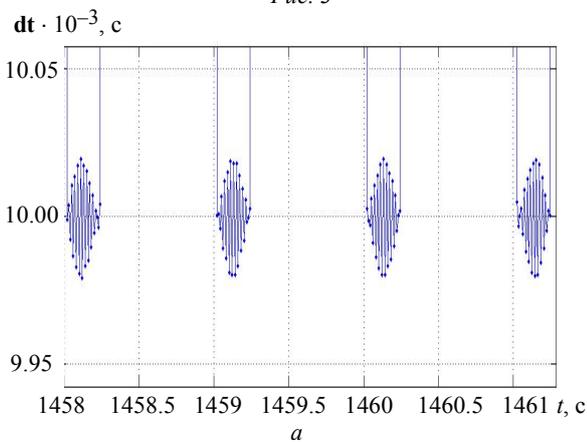


Рис. 4

На рис. 3 приведены графики изменения во времени величин dt (рис. 3, а) и y (рис. 3, б), полученные по реальным СИС для КОС с частотой излучения импульсов 1.25 Гц. Импульсы от этой КОС идут практически непрерывно на интервале порядка 15 мин. На рис. 4 приведены аналогичные графики для КОС с частотой излучения импульсов 100 Гц. Импульсы от этой КОС идут пачками на интервале порядка 3 мин.

Определение географических координат неизвестных КОС. По результатам предварительной обработки СИС определяется время регистрации на борту НКА импульсов от наземной КОС $t = [t_1, t_2, \dots, t_n]$ и приращение номинального периода следования импульсов за счет скорости движения НКА (аналог интегрального доплеровского сдвига) $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}]$. Уравнения, связывающие эти величины с координатами навигационного спутника и координатами наземной КОС, имеют вид

$$\tau_k = \frac{\Delta D_k(x_0, y_0, z_0)}{c} + 2\varepsilon_\tau,$$

$$k = (i-1)(N_{i-1}-1) + j-1 \quad (j=2, \dots, N_i, i=1, 2, \dots, M),$$

$$\Delta D_k(x_0, y_0, z_0) = |\mathbf{R}_0 - \mathbf{R}_{sv}(t_{ij})| - |\mathbf{R}_0 - \mathbf{R}_{sv}(t_{i1})|,$$

$$\mathbf{R}_0 = \|x_0 \ y_0 \ z_0\|, \mathbf{R}_{sv} = \|x_{sv} \ y_{sv} \ z_{sv}\|, \quad (1)$$

где i – номер сеанса измерений; M – число сеансов измерений; j – номер измерения внутри сеанса; N_i – число измерений внутри сеанса; ε_τ – шумовая погрешность определения момента регистрации импульса; $x_{sv} \ y_{sv} \ z_{sv}$ – известные координаты спутника в геоцентрической относительной системе координат [3] (в расчетах использовались высокоточные апостериорные эфемериды в формате SP3*); x_0, y_0, z_0 – неизвестные координаты КОС в той же системе; $|\mathbf{R}|$ – модуль вектора.

Координаты КОС определяются решением нелинейной системы уравнений (1) методом последовательных приближений. В каждом приближении система уравнений линеаризуются относительно решения, полученного на предыдущем приближении. В качестве нулевого приближения выбираются координаты центра возможного региона, в котором может быть расположена неизвестная КОС. Приближения считаются до тех пор, пока модуль разности оценок координат КОС, полученных на последовательных шагах, не становится меньше заданного значения:

* The Extended Standard Product 3 Orbit Format, <http://www.ngs.noaa.gov/orbits/sp3c.txt>.

$$\hat{\mathbf{R}}_0^p = \hat{\mathbf{R}}_0^{p-1} + \mathbf{K}_p \cdot \mathbf{Y}_p, p = 1, 2, \dots,$$

$$\mathbf{K}_p = \text{inv}\{\mathbf{H}_{p-1}\}, \mathbf{H}_p = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{R}}_0^p),$$

$$\mathbf{Y}_p = \boldsymbol{\tau} \cdot c - \Delta D_{p-1},$$

где p – номер шага приближений; inv – процедура псевдообращения матрицы;

$$\mathbf{H}_p = \frac{\partial}{\partial x_0, y_0, z_0} \Delta D_k = \begin{pmatrix} \mathbf{N}(t_{12}) - \mathbf{N}(t_{11}) \\ \dots \\ \mathbf{N}(t_{1N_i}) - \mathbf{N}(t_{11}) \\ \dots \\ \mathbf{N}(t_{M2}) - \mathbf{N}(t_{M1}) \\ \dots \\ \mathbf{N}(t_{MN_m}) - \mathbf{N}(t_{M1}) \end{pmatrix}$$

– матрица частных производных (первый индекс – номер сеанса, второй индекс – номер точки внутри сеанса);

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{R}_{sv} - \hat{\mathbf{R}}_0^p}{|\mathbf{R}_{sv} - \hat{\mathbf{R}}_0^p|}$$

– орт направления от КОС на НКА; $\Delta D_p = |\hat{\mathbf{R}}_0^p - \mathbf{R}_{sv}(t_{ij})| - |\hat{\mathbf{R}}_0^p - \mathbf{R}_{sv}(t_{i1})|$ – вектор расчетных значений приращения периода следования зарегистрированных импульсов.

Сходимость оценки координат в методе последовательных приближений, а также погрешности указанной оценки определяются топологией двумерной поверхности, характеризующей квадратичный критерий отличия прогнозируемых значений доплеровского сдвига от измеренных:

$$R2(\varphi, \lambda) = \left| \boldsymbol{\tau} \cdot c - \left\{ |\mathbf{R}(\varphi, \lambda) - \mathbf{R}_{sv}(t_{ij})| - |\mathbf{R}(\varphi, \lambda) - \mathbf{R}_{sv}(t_{i1})| \right\} \right|^2.$$

Минимум указанного критерия соответствует искомой оценке широты и долготы $\varphi_{\text{kos}}, \lambda_{\text{kos}}$ источника излучений.

На рис. 5 приведен вид двумерной поверхности $R2(\varphi, \lambda)$ над плоскостью «широта\долгота» (latitude\longitude). Сетка по широте и по долготе представлена в линейной мере в соответствии со следующими формулами:

$$B = (\varphi_{\text{kos}} - \varphi) R_{\text{earth}},$$

$$L = (\lambda_{\text{kos}} - \lambda) \cos(\varphi_{\text{kos}}) R_{\text{earth}},$$

где R_{earth} – радиус Земли, км; φ, λ – широта и долгота, рад.

Минимум квадратичной поверхности $R2(\varphi, \lambda)$ находится над точкой (0,0). Эта точка соответствует координатам КОС, для которой были обработаны результаты шести сеансов измерений при длительности каждого порядка 15 мин. Распределение сеансов по НКА для разных орбитальных плоскостей следующее: 4 сеанса – НКА третьей плоскости, 1 сеанс – НКА первой и 1 сеанс – НКА второй плоскостей. Этим объясняется несимметричность поверхности $R2(\varphi, \lambda)$. Расчеты координат КОС по измерениям, полученным в этих сеансах, показали отличия от действительных координат станции в пределах 15 км.

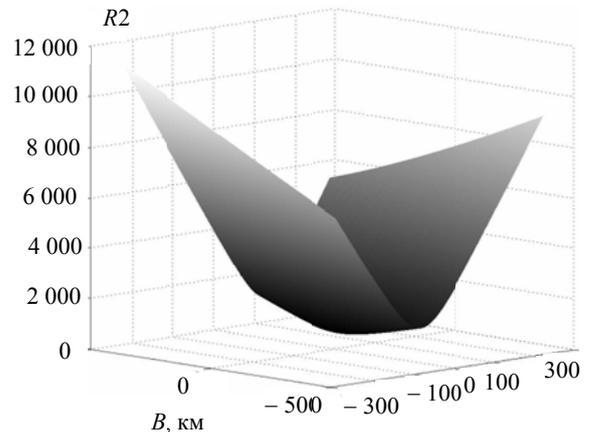


Рис. 5

Таким образом, представлена методика, позволяющая идентифицировать факт несанкционированного облучения НКА и определить на фоне естественных помех моменты регистрации лазерных импульсов, частоту работы неизвестной квантово-оптической станции и ее географические координаты.

Результаты обработки данных, полученных в реальных сеансах работы КОС по НКА ГЛОНАСС, подтвердили эффективность созданных алгоритмов. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программных функций MatLab® и в виде полнофункционального программного комплекса на языке C++.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970.
2. Иглин С. Математические расчеты на базе MatLab. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
3. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. М., 2008.

V. E. Hertzman, A. A. Suvorov, E. N. Sigov

THE PROBLEM OF LASER SOURCES IDENTIFICATION THAT IRRADIATE NAVIGATION SPACECRAFTS

The mathematical methods which allows to determine the fact of targeted laser irradiation are considered. The algorithm of the geographic coordinates estimation for ground-based illumination source is proposed

Quantum-optical station, electromagnetic pulse, laser irradiation, irradiation source position determination, GLONASS

УДК 004.932.2, 004.67

С. А. Кулаков, Г. В. Разумовский

Система учета проезда железнодорожных вагонов

Приводится описание системы распознавания номеров вагонов, ее состав и описание отдельных алгоритмов. Обсуждаются преимущества применения алгоритма определения границ вагонов в системе распознавания номеров вагонов. Отмечается возможность повышения вероятности распознавания номеров вагонов за счет применения совокупности алгоритмов, основанных на получении косвенных данных из дополнительных систем.

Алгоритм распознавания номеров вагонов, определение границ вагонов, натурный лист, трекинг

В настоящее время в области компьютерного зрения одной из актуальных задач является автоматизированное распознавание номеров железнодорожных (ж/д) вагонов, контейнеров, автомобилей и т. п. Необходимость таких систем обусловлена сложностью «ручного» визуального контроля за процессом перевозки грузов, а также их автоматизированного учета в системах логистики и управления технологическими процессами. Однако существует ряд факторов, усложняющих создание таких систем. Среди них можно выделить: возможность нефиксированного положения распознаваемых символов, их различный размер и цвет в пределах одного изображения; наличие помех, мешающих выделению символов на изображении (например, цемент, просыпанный на номер вагона, или подтеки нефти на номерах цистерн и т. п.); расположение объекта на плохо освещенном участке считывания номеров.

В случае распознавания номеров ж/д вагонов следует учитывать, что кроме основного номера на вагоне может располагаться еще и контрольный номер, нанесенный существенно меньшим шрифтом и расположенный в его нижней части,

причем его цвет может отличаться от цвета основного номера. Таким образом, в пределах одного изображения символы, требующие распознавания, могут быть изображены существенно отличающимися друг от друга цветами. Ситуация может осложняться неоднородностью освещения при съемке вагона, что приводит к изменению цвета как в пределах одной последовательности символов (номера), так и в пределах одного символа.

Традиционно задача определения номеров ж/д вагонов решается в несколько этапов:

1. Обнаружение состава и разбиение его на вагоны.
 2. Группировка набора кадров, относящихся к одному и тому же вагону.
 3. Локализация номера в кадре.
 4. Распознавание номера.
 5. Проверка правильности распознанного номера подсчетом его контрольной суммы и, по возможности, сравнением номера с данными натурного листа.
 6. Фиксация события проезда вагона в базе данных.
-