

УДК 004.942

Ю.И. Буряк, канд. техн. наук, начальник подразделения,
А.А. Скрынников, канд. техн. наук, нач. сектора,
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва.

“Алгоритмы расчета зоны покрытия антенны радиочастотного ридера при определении местоположения высокоскоростного объекта”¹

Предложен подход к решению задачи определения местоположения высокоскоростного объекта на основе использования комплекса средств радиочастотной идентификации; причем ряд пассивных радиочастотных меток размещается по пути следования объекта, а радиочастотный ридер (считывающее устройство) устанавливается на самом объекте. Разработан алгоритм расчёта зоны покрытия антенны ридера, величина которой в заданном диапазоне скоростей движения объекта гарантирует требуемое значение вероятности формирования ответного импульса от радиочастотной метки. Проведена оценка вероятности формирования ответного импульса с использованием математического аппарата статистического анализа. Приведены результаты расчетов зоны покрытия антенны в диапазоне допустимых скоростей движения объекта, а также сформированы рекомендации по выбору оптимального варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, высокоскоростные транспортные средства, точность определения местоположения.

Введение

Прослеживание технического состояния сложной технической продукции в процессах жизненного цикла сегодня является одной из самых актуальных задач повышения ее качественных характеристик (например, выявление контрафактной, фальсифицированной продукции, неаутентичных компонентов и пр.) и безопасности использования (например, движения). Наиболее эффективный метод получения элементов такого состояния, основанный на применении современных средств идентификации материальных объектов и их характеристик, в частности, радиочастотной идентификации (ридеры, радиочастотные

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-04342а

метки - РЧМ), находит широкое применение в самых различных областях: в производственных процессах, логистике и на транспорте [1-5].

В основу метода положена стандартная организационно-технологическая схема применения средств радиочастотной идентификации, предполагающая установку радиочастотных ридеров на штатных позициях производственной линии, а РЧМ непосредственно на объектах. Таким образом, при перемещении маркированного объекта по траектории сложно-разветвленного процесса производится как определение его технических характеристик, так и его местоположение.

Известная система автоматической идентификации состояния подвижного состава САИ «Пальма» [6] включает кодовый бортовой датчик и считывающую аппаратуру. Датчик хранит полную информацию о вагоне или локомотиве в закодированном виде: идентификационный номер, направление следования, дату последнего деповского ремонта, пробег, число единиц в составе. Объем памяти датчика – 128 бит. Аппаратура в масштабе реального времени регистрирует в АСУ железнодорожным транспортом факты прохождения оборудованного специальными метками подвижного состава через пикеты, установленные вдоль железнодорожных путей и оборудованные специальной аппаратурой считывания. Эффективность работы новой системы достигается за счет того, что человеческий фактор почти не задействован - информация передается автоматически из разных пунктов нахождения поезда. В рамках пилотного проекта финское транспортное агентство Liikennevirasto и компания Vilant [7] установили четыре ридера Vilant Railroad Reader в нескольких местах вдоль железнодорожных путей в районе городов Оулу и Мантсала. Ридеры были смонтированы на мачтах, размещенных на расстоянии приблизительно 2,5 метра (8,2 фута) от железнодорожного пути, чтобы они могли считывать уникальные идентификационные номера, закодированные в каждой РЧМ Ironside, прикрепленной к стенкам кузова проходящих вагонов. С помощью разработанного Vilant программного обеспечения Train Analyzer, хранящегося на резидентном сервере компании, каждый уникальный идентификационный номер увязывается с серийным номером вагона, а также с информацией об операторе, которому принадлежит вагон, и другими подробными данными. Посредством соотнесения идентификационного номера с временами считывания РЧМ предыдущим и текущим ридерами программный комплекс Vilant Train Analyzer рассчитывает скорость движения поездов. Таким образом, агентство может решать любые проблемы путем контакта с оператором.

Присущие данной схеме недостатки, прежде всего, необходимость обеспечения электропитания, средств передачи данных на перемещаемый объект, защиты от случайных/намеренных повреждений и восстановление работоспособности в случае его нарушения существенно ограничивают применимость такой схемы при построении больших территориально-распределенных транспортных, в частности, железнодорожных систем.

В этой связи рядом исследователей [8-10] предлагается модифицированная схема, включающая установку как минимум двух пассивных РЧМ на пути следования железнодорожного транспортного средства, а ридера, соответ-

ственно, на самом транспортном средстве. При считывании РЧМ ридером производится определение местоположения средства с последующей выработкой необходимых управленческих команд (например, торможение). В ряде случаев, для повышения точности управления и безопасности движения радиочастотный ридер объединяется с дополнительными датчиками, например, измерения скорости перемещения, приема навигационных сигналов со спутников и пр.

В условиях наблюдаемых тенденций [11] по проработке концептов поездов, движущихся на скоростных и высокоскоростных магистралях и в замкнутом пространстве (туннелях), традиционное использование спутниковых радионавигационных технологий [12] становится проблематичным.

В этой связи решение задачи использования технологий радиочастотной идентификации для определения местоположения высокоскоростного поезда является актуальной.

Особенности применения технологии радиочастотной идентификации для определения местоположения высокоскоростного поезда.

Технология радиочастотной идентификации предполагает следующую схему взаимодействия ридера и РЧМ: антенна ридера излучает в окружающее пространство электромагнитный сигнал определенной мощности на установленной частоте в течение некоторого диапазона времени. РЧМ воспринимает энергию излучения, проводит необходимые преобразования и выдает ответный сигнал, который принимается антенной ридера. По результатам его обработки ридер идентифицирует РЧМ и сохраняет в своей памяти записанную в ней информацию. Если ридер перемещается относительно РЧМ, может возникнуть ситуация, при которой отсутствует возможность идентификации РЧМ, а именно: время нахождения РЧМ в поле действия ридера не позволяет собрать достаточное количество энергии его излучения для формирования ответного сигнала и РЧМ формирует ответный сигнал уже после выхода из поля действия ридера.

В силу того, что время попадания РЧМ в поле действия антенны ридера носит случайный характер, а время ее нахождения переменное, то зона покрытия ридера должна иметь размер, гарантирующий формирование ответного импульса от РЧМ во всем диапазоне скоростей движения объекта и с заданным значением вероятности.

Таким образом, формулируется задача определения размера зоны покрытия ридера, гарантирующего формирование ответного импульса от РЧМ с заданным значением вероятности во всем диапазоне скоростей движения объекта.

Для решения данной задачи необходимо реализовать следующую последовательность действий:

- сформировать различные варианты нахождения РЧМ в поле действия антенны ридера;
- рассчитать вероятность формирования отклика РЧМ в интервале скоростей движения объекта.

Алгоритм расчёта зоны покрытия антенны радиочастотного ридера, гарантирующей формирование ответного импульса от РЧМ с заданным значением вероятности

Рассмотрим объект, движущийся со скоростью v . На объекте установлена антенна, образующая на поверхности земли зону покрытия длиной D . По пути следования установлена РЧМ (см. рис. 1).

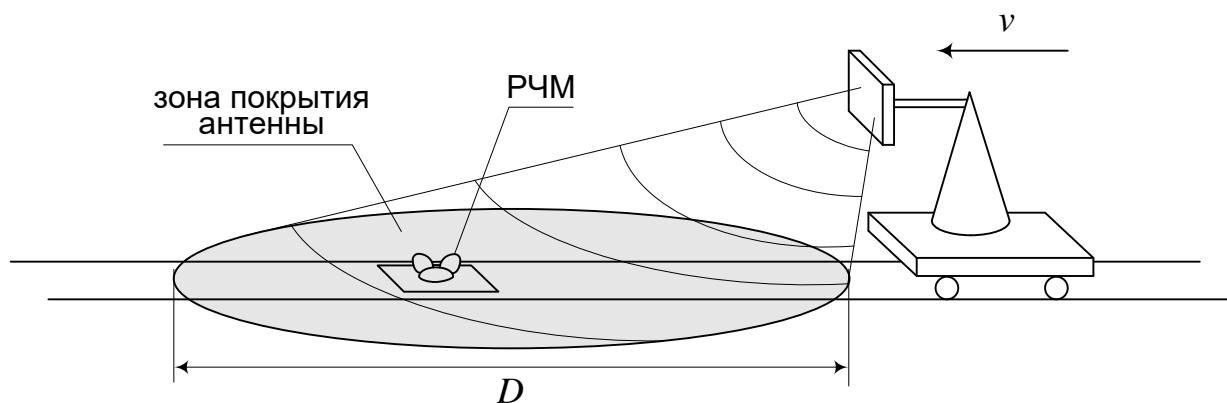


Рис. 1.

Для обнаружения метки антенна периодически в течение t_r излучает пачку из n импульсов, а затем в течение t_p ($t_p < t_r$) ожидает отклик РЧМ, после чего цикл длительностью t_c повторяется (см. рис. 2).

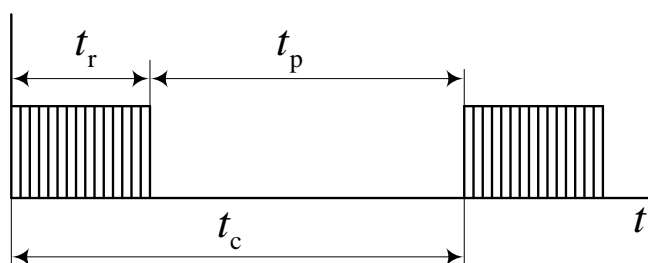


Рис. 2.

РЧМ при попадании в зону покрытия антенны принимает зондирующие импульсы. Число принятых импульсов зависит от времени нахождения РЧМ в зоне покрытия, которое определяется скоростью v и длиной D зоны покрытия. При этом в силу влияния сложного переотражения радиоволн, изменения ориентации РЧМ при движении объекта каждый из импульсов пачки принимается РЧМ меткой с некоторой вероятностью. После приёма зондирующих импульсов РЧМ формирует ответный импульс.

Время τ , в течение которого объект проходит путь, равный длине зоны покрытия, находится из соотношения

$$\tau = D / v. \quad (1)$$

Совместим начало временного интервала τ с моментом T_0 попадания РЧМ в зону покрытия антенны. Т.к. зондирование проводится с постоянной

длительностью цикла t_c независимо от движения объекта, то момент времени T_0 будет величиной случайной, распределённой равномерно в интервале от 0 до t_c (см. рис. 3). Функция распределения случайной величины T_0 имеет вид:

$$F_0(t_0) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_0 < 0; \\ t_0 / t_c & \text{при } t_0 \in (0, t_c); \\ 1 & \text{при } t_0 > t_c. \end{cases}$$

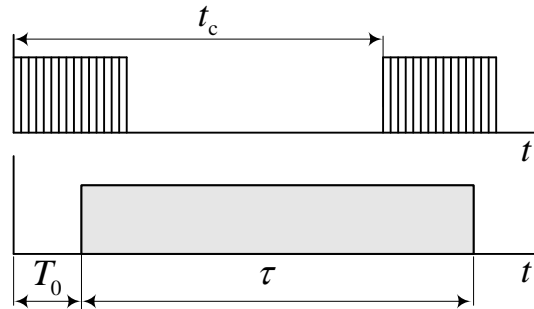


Рис. 3.

Чувствительность РЧМ определяется экспериментально. Так как длина t_c перекрытия временных интервалов t_r и τ будет случайной величиной, изменяющейся в пределах от 0 до t_r , то чувствительность представляется зависимостью вероятности появления отклика от длины перекрытия t_c .

Отклик – бинарная случайная величина Y , принимающая значения 0 и 1:

$$Y = \begin{cases} 0 & \text{при отсутствии отклика от РЧМ;} \\ 1 & \text{при наличии отклика от РЧМ.} \end{cases}$$

Характеристика чувствительности представляется функцией $P(Y=1) = F(\beta^T t_c)$, где $\beta = (\beta_1, \beta_2)$ – вектор параметров. Наиболее часто используют функцию стандартного нормального распределения, в этом случае модель принято называть пробит. моделью, и функцию логистического распределения, тогда модель принято называть логит. моделью [13].

В случае, когда скорость движения объекта относительно небольшая, интервал τ может накрыть (полностью или частично) несколько периодов зондирования, тогда вероятность получения отклика от РЧМ будет определяться как вероятность получения отклика от хотя бы одной пачки зондирующих импульсов, а вероятность получения отклика от конкретной пачки определяется по зависимости $P(Y=1)$. Например, если интервал τ накрывает две пачки зондирующих импульсов с интервалами перекрытия $T_c^{(1)}$ и $T_c^{(2)}$ соответственно (см. рис. 4), то вероятность получения отклика от первой пачки равна $p_1 = P(T_c^{(1)})$, а от второй пачки $p_2 = P(T_c^{(2)})$. Тогда вероятность получения хотя бы одного отклика будет равна $p_s = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)$.

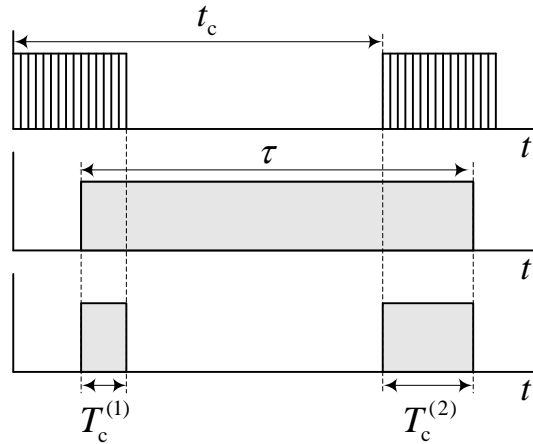


Рис. 4.

При увеличении скорости v уменьшается длительность интервала τ . При $\tau \leq t_p$ перекрытой может быть не более одной пачки зондирующих импульсов. Поэтому с увеличением скорости снижается вероятность формирования РЧМ ответного импульса.

В этой связи возникает задача обоснования требуемой длины покрытия D , при которой в заданном диапазоне скоростей движения $v < v_{\max}$ вероятность формирования РЧМ ответного импульса не была бы меньше заданной величины.

Рассмотрим решение этой задачи при достаточно высокой скорости движения, определяемой из условия $\tau \leq t_c + t_r$. В этом случае возможно получение отклика не более чем от двух пачек зондирующих импульсов.

Найдём закон распределения случайных величин $T_c^{(1)}$ и $T_c^{(2)}$ – длины перекрытия первой и второй пачки импульсов соответственно.

Случайная величина $T_c^{(1)}$ принимает значения

$$T_c^{(1)} = \begin{cases} t_r - T_0 & \text{при } T_0 < t_r; \\ 0 & \text{при } T_0 > t_{\text{rad}}. \end{cases}$$

Таким образом, случайная величина $T_c^{(1)}$ – смешанная. При $T_c^{(1)} = 0$ функция распределения $F(t_c^{(1)})$ имеет разрыв на величину $P(T_c^{(1)} = 0)$, а на участке $(0, t_r)$ функция распределения $F(t_c^{(1)})$ непрерывна.

Вероятность того, ширина первого интервала перекрытия равна нулю определяется выражением:

$$P(T_c^{(1)} = 0) = P(T_0 > t_r) = \frac{t_p}{t_c}.$$

Случайные величины $T_c^{(1)}$ и $T_c^{(2)}$ – функционально связанные, т.к.

$$T_c^{(2)} = \begin{cases} 0 & \text{при } T_0 + \tau < t_c; \\ T_0 + \tau - t_c & \text{при } t_c < T_0 + \tau < t_c + t_r; \\ t_r & \text{при } T_0 + \tau > t_c + t_r. \end{cases} \quad (2)$$

Случайная величина $T_c^{(2)}$ также смешанная. Вероятности $P(T_c^{(2)} = 0)$ и $P(T_c^{(2)} = t_r)$ равны:

$$P(T_c^{(2)} = 0) = 1 - \frac{\tau}{t_c} \quad \text{при } \tau < t_c;$$

$$P(T_c^{(2)} = t_r) = \frac{\tau - t_r}{t_c} \quad \text{при } \tau < t_r.$$

Расчет вероятности получения отклика РЧМ с заданным уровнем надежности в интервале движения поезда

Рассмотрим в качестве примера решение задачи при следующих условиях: $t_r = 30$ мс, $t_p = 100$ мс; зависимость $P(t_c)$ вероятности получения отклика РЧИ от длины перекрытия пачки импульсов имеет вид логистической функции

$$P(t_c) = \frac{1}{1 + e^{-(t_c - a)/k}},$$

где $a = 23,0$ мс, $k = 1,81$ мс. Зависимость $P(t_c)$ приведена на рис. 5.

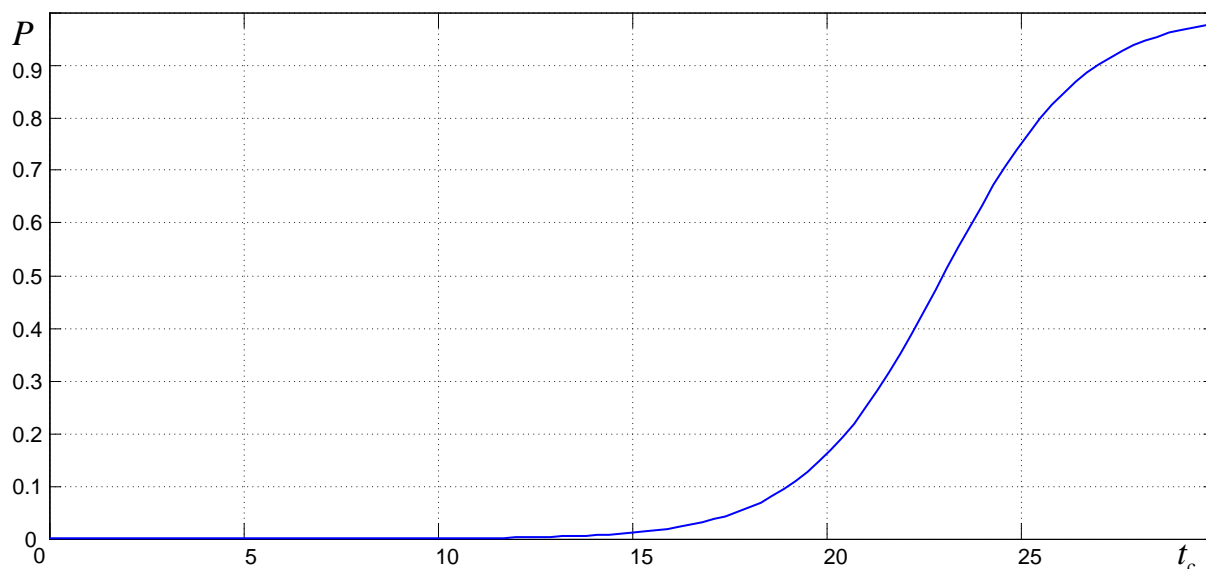


Рис. 5.

Пусть длина зоны покрытия $D = 10$ м. Зададимся требуемым уровнем надёжности, например, при скорости движения до 125 м/с с вероятностью не ниже 0,95 частота появления хотя бы одного отклика должна быть не менее 0,9. При любом $\tau > t_r$ функция распределения $F(t_c^{(1)})$ будет иметь вид (см. рисунок 6):

$$F(t_c^{(1)}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_c^{(1)} < 0; \\ 0.7 & \text{при } t_c^{(1)} = 0; \\ 0.7 + t_c^{(1)} / 30 & \text{при } 0 < t_c^{(1)} \leq 30; \\ 1 & \text{при } t_c^{(1)} > 30. \end{cases}$$

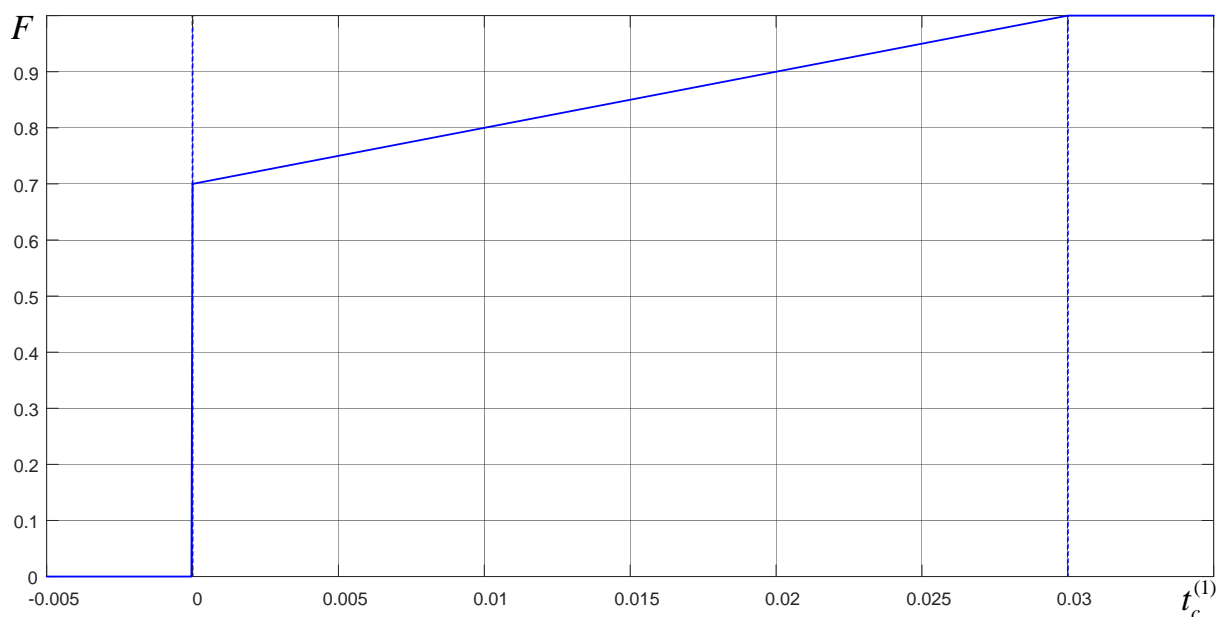


Рис. 6.

Функция распределения $F(t_c^{(2)})$ зависит от τ (т.к. $T_c^{(2)}$ в соответствии с (2) зависит от τ), а время τ в свою очередь определяется скоростью v (см. (1)). Рис. 7 иллюстрирует зависимость поведения функции распределения $F(t_c^{(2)})$ при различных значениях скорости v .

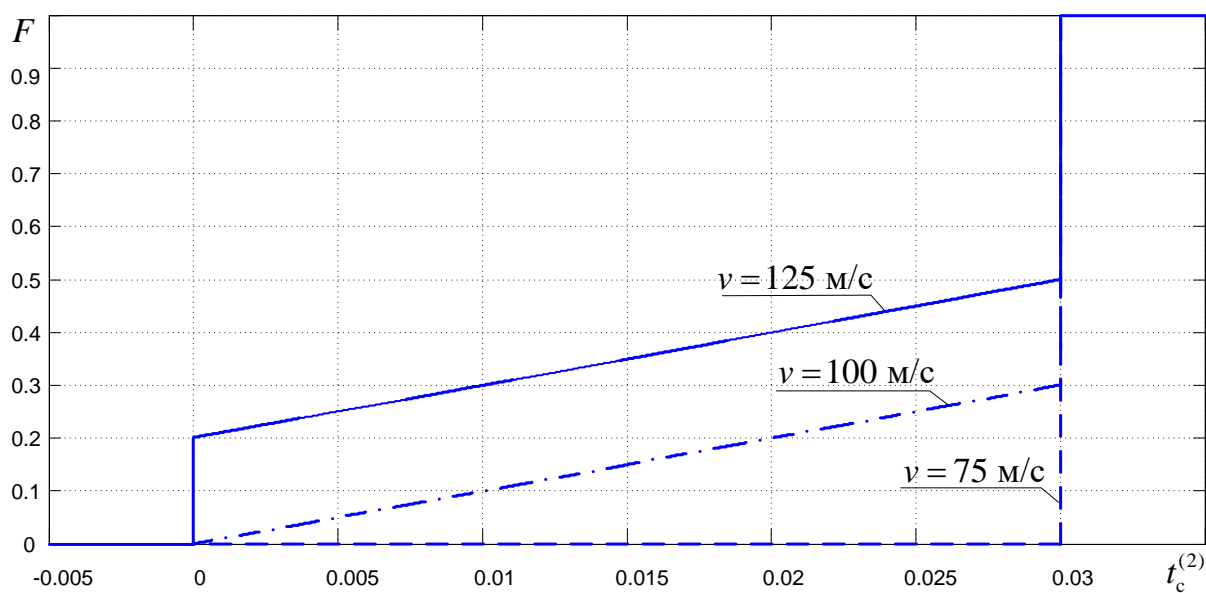


Рис. 7.

Зная $F(t_{cov}^{(1)})$ и $F(t_{cov}^{(2)})$ можно найти законы распределения частоты получения отклика на соответствующую пачку импульсов и, следовательно, закон распределения частоты получения хотя бы одного отклика.

Так, при $\tau = t_c + t_r = 130$ мс возможно перекрытие не более двух пачек зондирующих импульсов. Это соответствует скорости 76,92 м/с (276,92 км/ч.). В этом случае закон распределения частоты $F(p_s)$ будет иметь вид, представленный на рисунке 8. Как видно из рисунка 8, с надёжностью 0,95 (см. квантиль уровня 0,05) частота получения хотя бы одного отклика будет равна 0,9795.

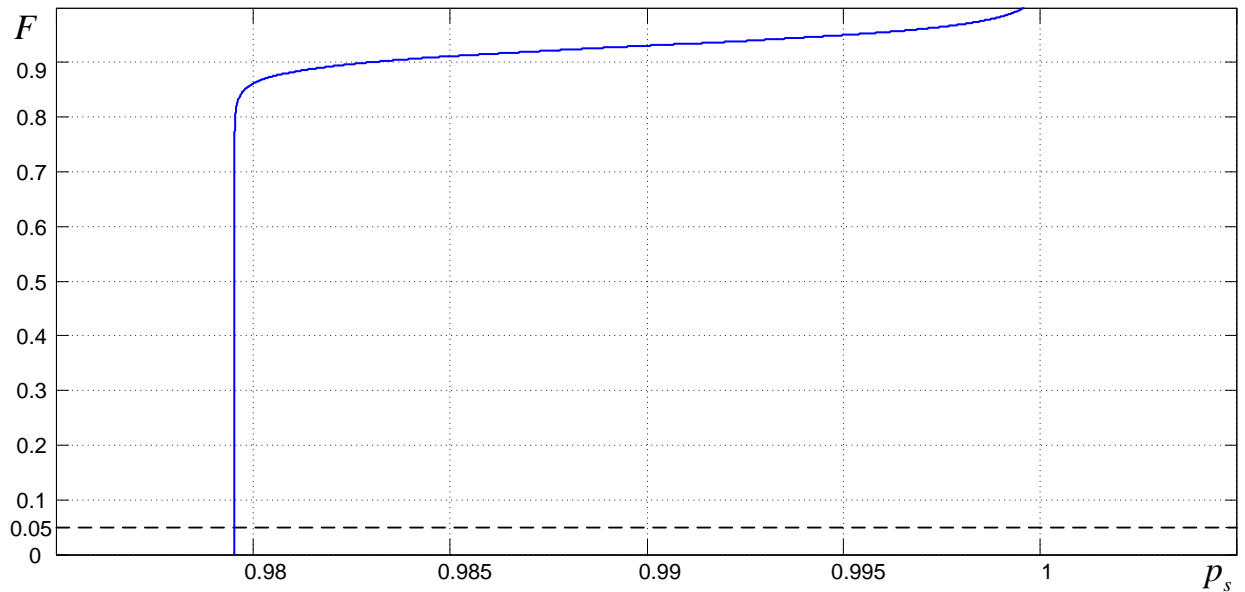


Рис. 8.

При увеличении скорости объекта v до 85 м/с значение частоты получения хотя бы одного отклика с надёжностью 0,95 снижается до 0,9012 (см. рис. 9). Таким образом, длина зоны покрытия $D = 10$ м не обеспечивает требуемую надёжность при скоростях более 85 м/с.

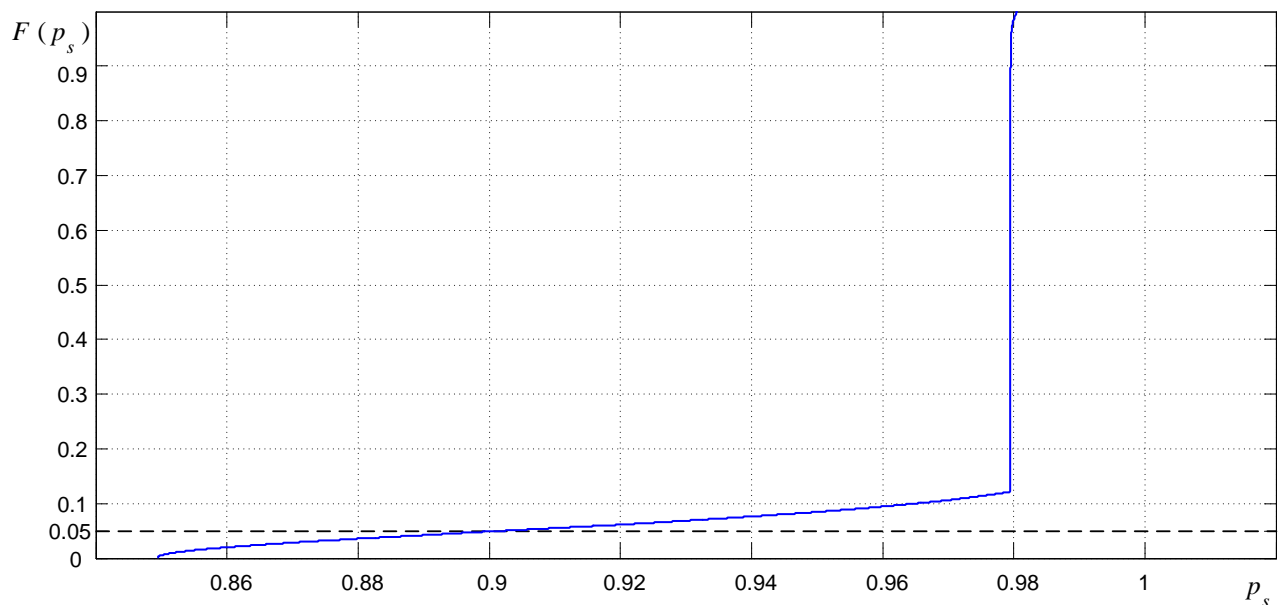


Рис. 9.

Аналогичным образом можно построить зависимость квантили уровня 0,05 частоты получения хотя бы одного отклика при различных значениях скорости v и длине зоны покрытия D .

Для максимальной заданной скорости $v = 125$ м/с эта зависимость будет иметь вид, представленный на рисунке 10. Как видно из рисунка 10, длина зоны покрытия D при заданных значениях t_r , t_c должна быть не меньше 14,7 м.

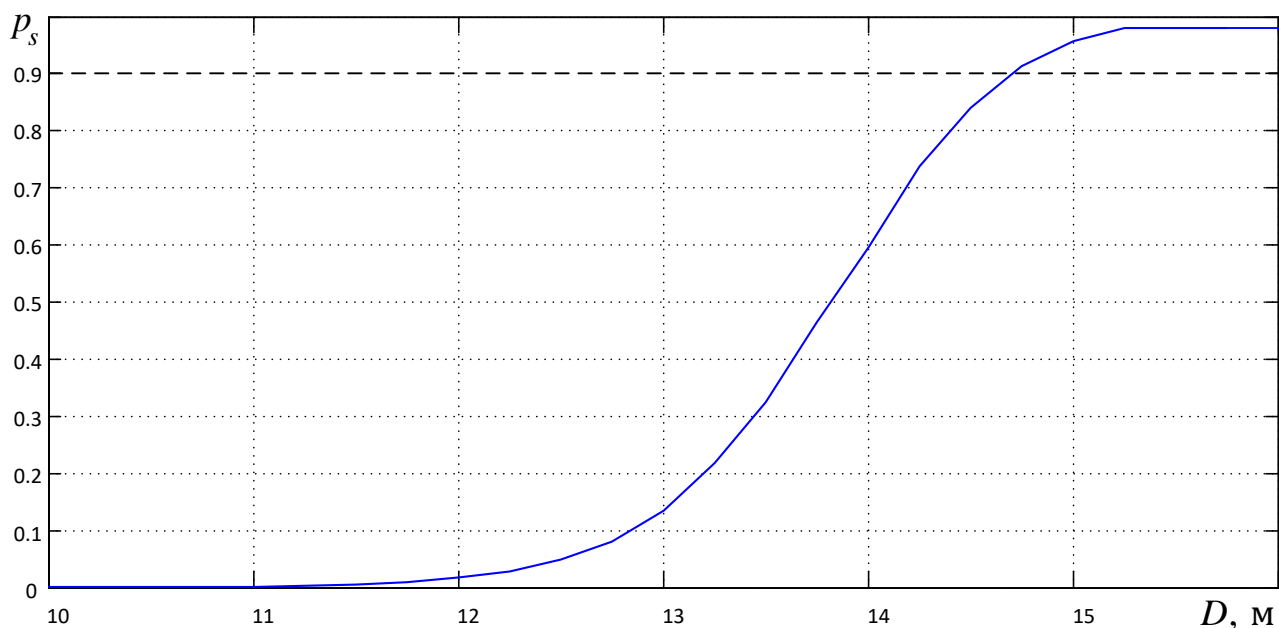


Рис. 10.

Очевидно, что с изменением значения максимальной скорости движения изменится и требуемое значение длины D зоны покрытия. На рисунке 11 представлены результаты расчётов при варьировании значения максимальной скорости от 80 до 150 м/с.

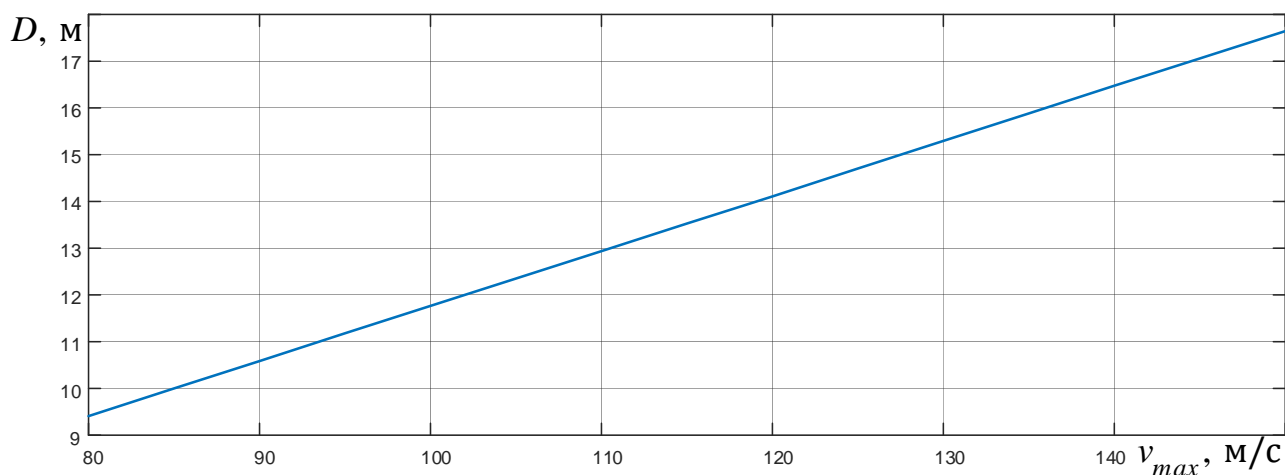


Рис. 11.

Таким образом, разработанные алгоритмы позволяют рассчитать требуемое значение длины D зоны покрытия антенны ридера при задании максимальной скорости движения объекта и уровня надёжности получения отклика антенны.

Заключение.

Предложен подход к решению одной из задач повышения эффективности управления движением высокоскоростного транспорта, перемещающегося в туннеле, посредством комплексного использования средств радиочастотной идентификации для определения его местоположения. Разработан алгоритм расчёта зоны покрытия антенны ридера, величина которой в установленном

диапазоне скоростей движения объекта гарантирует получение ответного отклика от каждой радиочастотной метки, расположенной на пути его следования. Проведена оценка вероятности формирования ответного отклика от радиочастотной метки с использованием математического аппарата статистического анализа. Приведены результаты расчетов зоны покрытия антенны в диапазоне допустимых скоростей движения объекта и уровня надежности получения ответного отклика, а также сформированы рекомендации по выбору заданного варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.

Список литературы

1. **Буряк Ю.И.** Обеспечение безопасности поставок и эксплуатации промышленной продукции за счет организации непрерывного мониторинга их технических характеристик /Автоматизация в промышленности, № 12, 2009, стр. 7-11

2. **Легкий Н.М.** Активная радиочастотная идентификация в системах позиционирования подвижных объектов // Наука и техника транспорта, 2010, № 2, с.41-45

3. **Легкий Н.М.** Управление перевозочным процессом на основе информации о местоположении транспортного средства // Наука и техника транспорта, 2009, № 3, с.38-40

4. **Буряк Ю.И., Амирханян В.Г., Калинин В.Л.** Разработка программно-технологической платформы для обеспечения контроля за состоянием сложных объектов при построении территориально-распределенных автоматизированных информационных систем производственного назначения //Вестник компьютерных и информационных технологий, 2012г, № 8 , стр. 23 - 28

5. **Буряк Ю.И., Скрынников А.А.** Разработка модели классификатора движущихся в составе группы объектов на базе использования средств радиочастотной идентификации// Мехатроника, автоматизация, управление.-2014.-№3.-С.42-48

6. **Федоров В.Г.** Система радиочастотной идентификации САИД «Пальма» на железнодорожном транспорте// Автоматизация в промышленности. – 2006. - №3, С.53 – 54

7. Финское транспортное агентство использует RFID для отслеживания состояния транспортных вагонов . <http://www.idexpert.ru/reviews/4318/> дата обращения 06.06.2017

8. Способ и система прицельной остановки железнодорожных транспортных средств: пат. 2397094 Рос. Федерация: МПК⁵¹ В62L 25/00 / Н.М. Легкий – №2009109737/11; заявл. 18.03.2009; опубл. 20.08.2010 Бюл.№23.

9. Система для определения местонахождения поездов с проверкой в режиме реального времени достоверности оценки положения: пат. 2584957 Рос. Федерация: МПК⁵¹ В62L 25/02 / А. Сайтто, П. Беллофьоре, А. Болле – №2013105692/11; заявл. 12.07.2011; опубл. 20.05.2016 Бюл.№14.

10. Способ и система радиочастотной идентификации железнодорожного транспорта: пат. 2499714 Рос. Федерация: МПК⁵¹ В62L 25/02 / М.Д. Рабинович и др. – №2012107106/11; заявл. 27.02.2012; опубл. 27.11.2013 Бюл.№33.

11. Материалы сайта <https://hyperloop-one.com/#our-story/> дата обращения 06.06.2017

12. **Легкий Н.М., Линьков В.И., Охинченко А.П.** Использование спутниковых радионавигационных технологий для повышения безопасности движения поездов на скоростных и высокоскоростных магистралях // Научные технологии, №8, 2010, с.20-24

13. **Буре В.М., Парилкина Е.М.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 416 с.