

УДК 621.391

## **Методика идентификации помех, действующих в канале передачи информации робототехнических систем**

**Осипов Н.А., Шавин А.С.\*, Тарасов А.Г.\*\***

*Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,  
Ждановская ул., 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.*

*\*e-mail: [shavin88@mail.ru](mailto:shavin88@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [Atol-77@mail.ru](mailto:Atol-77@mail.ru)*

### **Аннотация**

В статье представлена методика идентификации помех, действующих в канале передачи информации робототехнических систем, основанная на решении задачи классификации. Признаками, описывающих искажающее воздействие помех, выбраны оценки случайных величин, которые характеризуют, сколько раз передавалась каждая важная и технологическая команда, с учетом вынужденных повторений; классификатором является линейный дискриминант Фишера, усиленный алгоритмом Bagging. Методика позволяет обеспечить дополнительной диагностической информацией о помехах канале передачи информации робототехнических систем. Данная информация необходима для выяснения причин нештатных ситуаций при управлении робототехническими системами.

**Ключевые слова:** робототехническая система, канал передачи информации, электромагнитные помехи, идентификация помех, линейный дискриминант Фишера.

## **Введение**

В настоящее время робототехника является одним из важнейших направлений научно-технических и прикладных исследований, охватывает все больше направлений деятельности человека как в гражданской, так и военной сферах, а также в особых условиях работы (радиация, работа в космосе, при аномально высоких и низких температурах, при высоких перегрузках и т.д.). Для решения многих задач, таких как картирование, разведка и мониторинг, ликвидация последствий аварий и стихийных бедствий использование группы роботов оказывается более эффективным по экономическим и техническим показателям, чем одиночных роботов. Для решения подобных задач широкое распространение получили мультиагентные робототехнические системы (МАРС), которые представляют собой распределенные децентрализованные системы. Одной из главных тенденций современного развития мобильной робототехники является постепенный переход от дистанционно-управляемых к полуавтономным, а в перспективе и к автономным МАРС, что позволит устранить основные недостатки дистанционно-управляемых систем. Для достижения высоких показателей работоспособности автономных систем необходимо обеспечить широкополосные, помехозащищенные и криптостойкие средства обмена информацией повышенной пропускной способности.

Проблемная ситуация, связанная с искажением информации в каналах связи МАРС, определяется следующими факторами:

- воздействием случайных помех, характерных для условий функционирования МАРС;
- угрозой преднамеренного силового электромагнитного воздействия на каналы связи;
- необратимостью процессов последствий аварий и стихийных бедствий;
- тяжестью последствий от нештатных и аварийных ситуаций, инициируемых искажением передаваемой информации в робототехнических системах (РТС) военного назначения.

Анализ развития РТС в развитых странах показывает, что основное внимание в настоящее время уделяется созданию робототехнических средств повышенной автономности. В связи со спецификой решаемых задач РТС должны быть способны работать в реальной обстановке при частичном или полном отсутствии исходной информации о среде функционирования. В условиях воздействия электромагнитных излучений, различных по природе возникновения и характеру искажающего воздействия, для повышения автономности РТС с позиций передачи информации необходимо решить две задачи: обеспечить достоверную передачу важной и технологической информации и распознавание причины искажения передаваемой информации.

### **Методика идентификации помех**

Разработка и внедрение технологий военной робототехники — одно из приоритетных направлений, используемых при создании новых и модернизации

существующих образцов военной техники как за рубежом, так и в России [1, 2].

В области развития технологий и технических средств военной робототехники проводятся широкомасштабные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, которые направлены на повышение дальности действия, помехозащищенности каналов управления и связи, совершенствование систем технического зрения и навигации, создание интеллектуальных систем обработки информации и управления, обеспечивающих необходимый уровень автономности мобильных роботов для их группового применения в составе перспективных систем вооружения. Анализ существующих образцов дистанционно-управляемых мобильных роботов показал, что они из-за применения проводных каналов связи не обладают необходимой подвижностью на сильно пересеченной местности, насыщенной искусственными заграждениями и водными преградами, и по показателям автономности не соответствуют современным требованиям. Обеспечить достоверность передачи информации по беспроводным каналам связи в составе МАРС предлагается путем применения неравномерного помехоустойчивого кода, сущность которого заключается в следующем. На множестве всех сообщений необходимо определить две группы сообщений: важные и технологические. Важными являются сообщения, искажение которых может привести к опасным последствиям, например применение вооружения РТС. Все сообщения передаются кодовыми словами циклического кода, причем каждое важное сообщение передается двумя следующими друг за другом кодовыми комбинациями циклического кода. При этом важное сообщение, которое является информационной частью первой кодовой комбинации, содержит нечетное число единиц, а

информационная часть второй кодовой комбинации является инверсией по отношению к информационной части первой кодовой комбинации [3]. При таком способе кодирования необнаруженная ошибка в важном сообщении является практически невероятным событием.

В условиях воздействия электромагнитных излучений, различных по природе возникновения и характеру искажающего воздействия, возникают задача обеспечения достоверной передачи информации и задача идентификации причины искажения передаваемой информации.

Одним из подходов к решению задачи идентификации источников электромагнитных помех является построение системы, принцип действия которой основан на использовании набора специализированных датчиков, способных фиксировать импульсные помехи с параметрами, превышающими уровень, приближенный к нормируемым значениям. Система способна решать следующие задачи:

- мониторинг электромагнитной обстановки;
- оценку уровней электромагнитных помех в широком диапазоне частот;
- предупреждение о превышении допустимого уровня помехи;
- идентификацию источника помех для разработки технических и организационных мероприятий, исключающих возможность появления помех, превышающих допустимый уровень.

В свою очередь, обработка информации, полученной от многочисленных датчиков, осуществляется регистратором данных, который анализирует принятую информацию и выполняет идентификацию помехи и источника помех.

Для идентификации помех, искажающих информацию в канале связи более гибким и рентабельным (с точки зрения аппаратной реализации) является подход, основанный на использовании методов теории распознавания образов. А в качестве признаков необходимо рассматривать не параметры электромагнитных излучений, а признаки, характеризующие искажающий эффект на процесс передачи информации. При этом передача информации должна осуществляться с высокой достоверностью, чтобы при оценивании признаков, характеризующих искажающий эффект, исключить прохождение ошибочных сообщений к получателю информации.

В виду того, что в настоящее время разработаны и изучены модели воздействия различных помех: случайных и преднамеренных, фоновых и импульсных, задача распознавания причины искажения информации может быть сформулирована как задача идентификации помех, искажающих информацию в канале связи. Задача идентификации помех заключается в следующем. Имеется множество ситуаций, разделенных по определенным признакам на классы. Задано конечное множество ситуаций, для которых известно, к каким классам они относятся. Это множество называется обучающей выборкой. Классовая принадлежность остальных ситуаций не известна. Требуется построить или выбрать алгоритм, способный идентифицировать произвольную ситуацию из исходного множества.

Для успешного решения задачи идентификации помех, искажающих передаваемую информацию при решении задач МАРС, необходимо определить конечное число классов помех, определить признаки, значения которых характеризуют каждый класс, сформировать обучающую и тестовую выборки,

выбрать классификатор, способный идентифицировать признаки из тестовой выборки с наименьшим числом ошибок. С учетом особенностей предназначения и условий эксплуатации МАРС предлагается рассмотреть три класса электромагнитных помех.

Первый класс помех: аддитивный белый гауссов шум (АБГШ) со среднеквадратичным напряжением до 0,2 В, вызванный флуктуационными процессами в самом канале связи. АБГШ является неотъемлемой частью процесса передачи информации. В рамках предлагаемой методики действие помехи первого класса является штатной ситуацией для процесса информационного взаимодействия МАРС. Искажающее воздействие помехи класса 1 определяется выражением

$$P_e(V_{ng}) = (P(0) + P(1)) \left( 0,5 - \Phi_0 \left( \frac{w_1 + w_2}{V_{ng}} \right) \right) + 2P(o.c.) \left( \Phi_0 \left( \frac{w_1 + w_2}{V_{ng}} \right) - \Phi_0 \left( \frac{w_1 - w_2}{V_{ng}} \right) \right),$$

где  $P(1)$  – вероятность события, заключающегося в появлении «1» на приемной стороне,  $P(0)$  – вероятность события, заключающегося в появлении «0» на приемной стороне,  $P(o.c.)$  – вероятность события, заключающегося в отсутствии сигнала на приемной стороне,  $w_1$  – амплитуда выходного сигнала,  $w_2$  – верхняя или нижняя граница зоны нечувствительности интерфейса,  $V_{ng}$  – значение амплитуды АБГШ,  $V_{ng} = \sqrt{N}$ ,  $N$  – средняя мощность помехи.

Второй класс помех: индустриальная помеха (ИП), представляющая собой совокупность фоновых шума и случайных ИП [4]. Фоновый шум является суммой большого числа флуктуационных помех от различных источников. Источниками ИП являются наводки от силовых цепей переменного тока, работа электроприводов, контакторов, инверторов, конверторов. Фоновый шум действует постоянно, а значения амплитуды напряжения распределены по нормальному закону. ИП

действуют в моменты времени согласно закону Пуассона, значения амплитуды импульсов распределены по нормальному закону. Искажающее воздействие помехи класса 2 определяется выражением:

$$P_e = (P(0) + P(1))(\phi(x; \mu)(1 - \phi(x; \mu))) \left( 0,5 - \Phi_0 \left( \frac{w_1 + w_2}{\sqrt{\sigma_{\text{АБГШ}}^2 + \sigma_{\text{ИП}}^2}} \right) \right) + 2P(o.c.)(\phi(x; \mu)(1 - \phi(x; \mu))) \left( \Phi_0 \left( \frac{w_1 + w_2}{\sqrt{\sigma_{\text{АБГШ}}^2 + \sigma_{\text{ИП}}^2}} \right) - \Phi_0 \left( \frac{w_1 - w_2}{\sqrt{\sigma_{\text{АБГШ}}^2 + \sigma_{\text{ИП}}^2}} \right) \right)$$

где  $\tau$  – длительности информационного сигнала,  $\sigma_{\text{ИП}}$  – среднее квадратическое напряжение ИП,  $\sigma_{\text{АБГШ}}$  – среднее квадратическое напряжение АБГШ,  $\lambda$  – средняя частота следования импульсов помехи,  $\mu = \lambda \tau$  – параметр закона Пуассона.

Третий класс помех: преднамеренное воздействие сверхкороткими электромагнитными импульсами [5], источниками которых являются дистанционно управляемые малогабаритные генераторы. Наибольшую опасность представляют электромагнитные воздействия, близкие по своим параметрам к полезному сигналу, передаваемому по каналам связи. Искажающее воздействие помехи класса 3 определяется выражением:

$$P_e(V_m) = (P(0) + P(1)) \left( 0,5 - \Phi_0 \left( \frac{w_1 + w_2}{V_n \sqrt{\tau_n f_n}} \right) \right) + 2P(o.c.) \left( \Phi_0 \left( \frac{w_1 + w_2}{V_n \sqrt{\tau_n f_n}} \right) - \Phi_0 \left( \frac{w_1 - w_2}{V_n \sqrt{\tau_n f_n}} \right) \right),$$

где  $V_n$  – амплитуда импульса,  $\tau_n$  – длительность импульса помехи,  $f_n$  – частота следования импульсов помехи.

Конечное множество классов помех  $\mathbf{V}$  состоит из трех элементов:

$$\mathbf{V} = [V_1, V_2, V_3]$$



где  $V_1$  – имя первого класса помех,  $V_2$  – имя второго класса помех,  $V_3$  – имя третьего класса помех.

Признаки, характеризующие класс помех, формируются следующим образом. Время  $T$ , за которое происходит информационный обмен между роботами в составе МАРС, а также с пунктом управления МАРС, разбивается на равные интервалы  $t_j$ . На каждом интервале  $t_j$  оцениваются случайная величина  $I_t$ , характеризующая, сколько раз передавалось каждое технологическое сообщение с учетом переспросов, и случайная величина  $I_v$ , показывающая, сколько раз передавалось каждое важное сообщение с учетом переспросов. Случайные величины  $I_t$  и  $I_v$  оцениваются выборочным средним и выборочной дисперсией. Таким образом, за время  $t_j$  формируется вектор признаков  $Pr_j$ , по которому производится идентификация помех:

$$Pr_j = \begin{bmatrix} Pr_{j1} \\ Pr_{j2} \\ Pr_{j3} \\ Pr_{j4} \end{bmatrix},$$

где  $Pr_{j1}$  – выборочное среднее случайной величины  $I_t$ ;

$Pr_{j2}$  – дисперсия случайной величины  $I_t$ ;

$Pr_{j3}$  – выборочное среднее случайной величины  $I_v$ ;

$Pr_{j4}$  – дисперсия случайной величины  $I_v$ .

Для анализа способа неравномерного помехоустойчивого кодирования и решения задачи идентификации была разработана модель канала связи с неравномерной помехоустойчивой защитой в программном пакете Simulink [6, 7].

Модель позволяет исследовать искажающее воздействие трех классов помех, определенных выше. Ключевыми конструкциями модели являются два цикла с постусловием. В теле внутреннего цикла декодируются все передаваемые сообщения, а в теле внешнего цикла – важные сообщения. Число итераций во внутреннем цикле является случайной величиной  $I_t$ , а число итераций во внешнем цикле – случайной величиной  $I_v$ . Случайные величины  $I_t$  и  $I_v$  оцениваются выборочным средним и выборочной дисперсией за время  $t_j$ , в результате чего формируется вектор признаков  $\mathbf{Pr}_j$ .

Из результатов имитационного моделирования, в котором вектор  $\mathbf{Pr}_j$  формировался за время  $t=3$  с при скорости передачи информации 19,2 кбит/с, были сформированы обучающая выборка  $N_{learn}=100$  и тестовая выборка  $N_{test}=100$ , обладающие следующими свойствами: достаточностью, разнообразием, равномерностью.

При разработке методики идентификации помех, искажающих информацию в каналах связи между роботами в составе МАРС, а также с пунктом управления МАРС, были проанализированы следующие классификаторы: решающее дерево, линейный дискриминант Фишера, метод ближайших соседей, а также их совместное применение с усиливающими алгоритмами *Boosting* и *Bagging* [8]. Сравнительный анализ алгоритмов идентификации представлен в табл.1. Для оценки качества идентификации используется показатель  $E_r$  – вероятность ошибки тестовой идентификации, определяемая выражением:

$$E_r = \frac{N_{er}}{N_{test}},$$

где  $N_{er}$  – число ошибок идентификации в тестовой выборке,  $N_{test}$  – объем тестовой выборки.

Моделирование проводилось для полудуплексного многоточечного последовательного симметричного канала связи со следующими характеристиками:

- амплитуда выходного сигнала 5 В;
- верхняя и нижняя границы зоны нечувствительности интерфейса  $\pm 0,2$  В;
- вероятности появления «0»: 0,495, вероятности появления «1»: 0,495

При проведении исследований моделировалось воздействие помех со следующими параметрами:

- класс 1: среднеквадратичное напряжение АБГШ 0,2 В;
- класс 2: среднеквадратичное напряжение ИП 5 В, среднеквадратичное напряжение АБГШ 0,2 В,  $\mu = 0,5$ ;
- класс 3: амплитуда импульса 5 В, длительность импульса помехи  $10^{-7}$  с, частота следования импульсов помехи 2,5 МГц.

Классификацию с наименьшим числом ошибок продемонстрировал метод линейного дискриминанта Фишера, усиленный алгоритмом Bagging.

Таблица 1

#### Сравнительный анализ классификаторов

Алгоритмы идентификации	Оценка вероятности ошибки тестовой идентификации		
	Без алгоритма усиления	Алгоритм усиления идентификации Boosting	Алгоритм усиления идентификации Bagging
Решающее дерево	0,21	0,11	0,11
Метод ближайших соседей	0,22	0,12	–
Линейный	0,19	0,1	0,03

Алгоритмы идентификации	Оценка вероятности ошибки тестовой идентификации		
	Без алгоритма усиления	Алгоритм усиления идентификации Boosting	Алгоритм усиления идентификации Bagging
дискриминант Фишера			

Линейный дискриминант Фишера – это алгоритм классификации, основанный на принципе максимума апостериорной вероятности и допущении о равенстве ковариационных матриц всех классов.

Процесс идентификации линейным дискриминантом Фишера происходит в два этапа. Ими являются:

1) обучение: оценивание математических ожиданий для всех классов, вычисление общей ковариационной матрицы [8];

2) идентификация вектора признаков  $\mathbf{Pr}_j$  по формуле

$$a(\mathbf{Pr}_j) = \arg \max_{V_i \in \mathbf{V}} \left( \ln(P(V_i)) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i)^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i) + \mathbf{Pr}_j^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i) \right). \quad (1)$$

Здесь  $P(V_i)$  – априорная вероятность класса  $V_i$ ;

$\boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i)$  – оценка математических ожиданий вектора признаков для каждого

$$V_i \in \mathbf{V}, \quad \boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i) = \frac{1}{N_{V_i}} \sum_{m=1}^{N_{learn}} \mathbf{Pr}_m, \quad \text{где } N_{V_i} - \text{число ситуаций класса } V_i \text{ в}$$

обучающей выборке;

$\boldsymbol{\Sigma}$  – общая ковариационная матрица,

$$\boldsymbol{\Sigma} = \frac{1}{N_{learn}} \sum_{m=1}^{N_{learn}} (\mathbf{Pr}_m - \boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i)_m)(\mathbf{Pr}_m - \boldsymbol{\mu}(\mathbf{V}_i)_m)^T.$$

Bagging (улучшающее объединение) – это алгоритм усиления классификатора. Сущность алгоритма заключается в следующем. Обучающая выборка  $N_{learn}$ , состоящая из 100 строк, разделяется на  $k$  подмножеств  $N^{(1)}_{learn}, \dots, N^{(k)}_{learn}$  с таким же числом строк при помощи равномерной случайной выборки с возвратом. Затем  $k$  одинаковых базовых классификаторов обучаются на этих подмножествах. Результаты обучения базовых классификаторов усредняются или выбирается результат на основании большинства голосов. Схема алгоритма представлена на рис. 1.

В предлагаемой методике идентификации помех, искажающих информацию в каналах связи между роботами в составе МАРС, а также с пунктом управления МАРС, базовым классификатором предлагается использовать линейный дискриминант Фишера. А по алгоритму Bagging определяются комбинированные результаты оценивания математических ожиданий и вычисления общей ковариационной матрицы.

Обучение алгоритма идентификации должно происходить на этапе заводских испытаний МАРС.

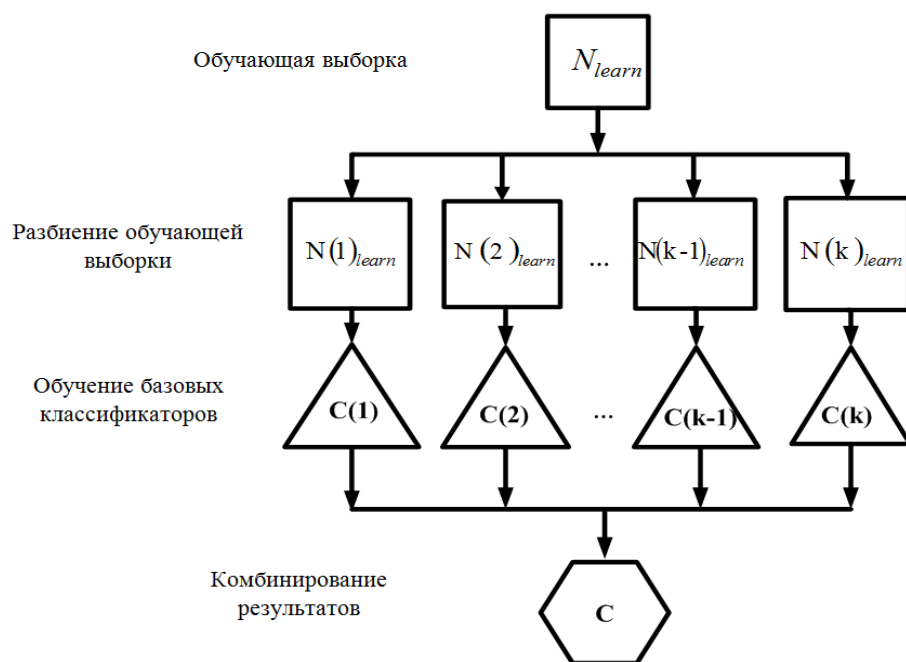


Рис. 1. Схема алгоритма Bagging

В процессе применения по назначению МАРС предлагается идентифицировать помехи в каналах связи по следующей методике:

1. Формирование вектора признаков искажающего воздействия помех за время  $t_j$ . Вектор признаков формируется в декодере канала связи с неравномерным помехоустойчивым кодированием [3]. Число повторений важных команд и число повторений технологических команд с учетом переспросов при обнаружении ошибок оцениваются выборочным средним и выборочной дисперсией. Таким образом, формируется вектор, который необходимо идентифицировать.

2. Идентификация вектора признаков, характеризующего искажающее воздействие помех. Процесс идентификации состоит из двух этапов. Укажем их.

2.1. Обучение классификатора. Обучающая выборка формируется с использованием моделей помех и программной модели канала связи с неравномерной помехоустойчивой защитой. В процессе обучения используется

алгоритм Bagging, за счет которого получаются комбинированные результаты оценивания математических ожиданий и вычисления общей ковариационной матрицы.

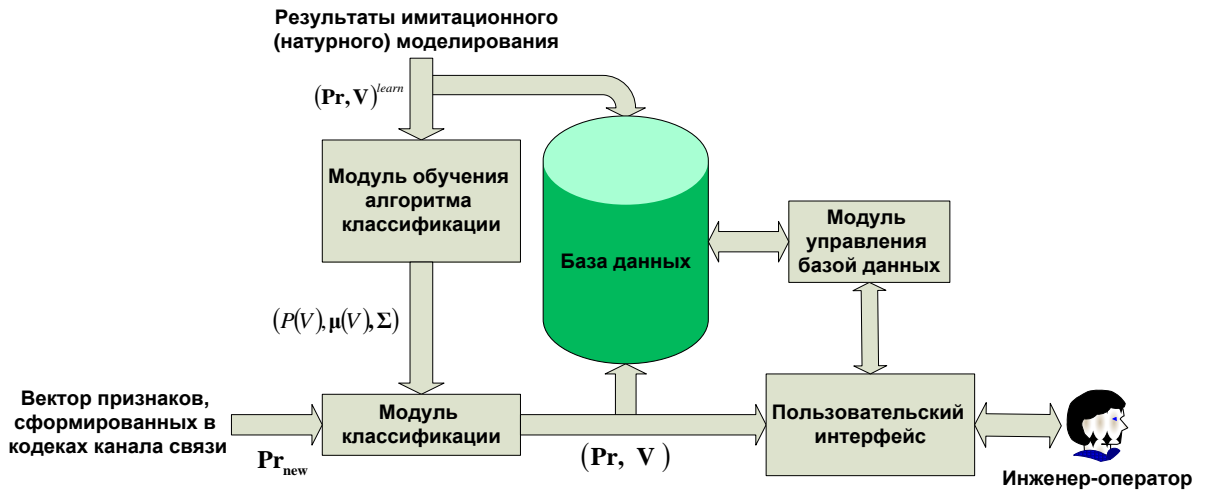
2.2. Классификация сформированного вектора признаков по формуле (1) и определение, к какому классу помех относится искажающее воздействие. Таким образом, происходит идентификация помехи, действующей в канале связи.

3. Сигнализация оператору на пункт управления МАРС о результатах идентификации помех.

Предложенная методика основана на решении задачи классификации, отличающая от известных тем, что в качестве признаков, описывающих искажающее воздействие помех, используются оценки числа вынужденных повторений важных и технологических команд; классификатором является линейный дискриминант Фишера, усиленный алгоритмом Bagging.

### **Предложение по реализации методики идентификации помех**

Методика идентификации помех реализуется в интеллектуальной системе распознавания причин искажений передаваемой информации и является сегментом системы поддержки принятия решения (СППР). Схема интеллектуальной системы распознавания причин искажений передаваемой информации представлена на рисунке 2.



*Рис. 2 Схема интеллектуальной системы распознавания причин искажений передаваемой информации*

Входными данными для разрабатываемой СППР являются четыре группы информационных потоков: технологическая информация, служебная информация, диагностическая информация, информация об искажениях передаваемой информации.

Выходными данными функционирования СППР являются результаты решения двух основных задач:

- выбор наилучшего решения из множества возможных альтернатив;
- упорядочение возможных решений по предпочтительности.

СППР, анализируя входную информацию, выдает предложения по устранению причин нештатной ситуации. Создание СППР оператора пункта управления МАРС является актуальным и перспективным решением, позволяющим повысить автономность РТС благодаря оперативной локализации различных помех в каналах связи между роботами в составе МАРС, а также с пунктом управления МАРС и своевременному принятию решений по их устранению.



## **Заключение**

Обмен информацией между роботами в составе МАРС, а также с пунктом управления МАРС для повышения автономности должен осуществляться по беспроводным каналам связи, которые никак не защищены от воздействия различного рода помех. При этом искажение информации может произойти как по причине отказов аппаратуры системы передачи данных, так и по причине действия помех в каналах связи. Применение разработанной методики идентификации помех совместно со способом неравномерного помехоустойчивого кодирования позволяет локализовать причину искажения информации в канале передачи информации и исключить возможность прохождения недостоверной информации. Благодаря этому повышается достоверность передаваемой информации в каналах связи, что позволяет повысить устойчивость функционирования мультиагентных робототехнических систем.

## **Библиографический список**

1. Тарасов А.Г. Перспективы создания робототехнических средств и комплексов подготовки и пуска ракет космического назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2014. Т. 6. № 6. С. 72-75.
2. Тарасов А.Г., Минаков Е.П., Боровской Е.П. Развитие структуры автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения с целью автоматизации процессов устранения нештатных ситуаций // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 6. С. 16-21.

3. Кузнецов А.Б., Попов В.Д., Шавин А.С., Иванов А.А. Способ передачи информации с использованием помехоустойчивого кодирования. Патент РФ № 2553068 от 15.05.2015.

4. Шавин А.С. Модель ошибки в каналах связи автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50091>

5. Баталов Л.В., Жуковский М.И., Киричек Р.В., Лазарев Б.Н. Механизмы и последствия преднамеренных электромагнитных воздействий на передачу данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2(78). С. 103–108.

6. Шавин А.С. Имитационная модель канала связи автоматизированной системы подготовки и пуска с неравномерной помехоустойчивой защитой // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении. (ИТУ-2014). 2014, Санкт-Петербург, С. 539–543.

7. Осипов Н.А., Шавин А.С., Тарасов А.Г. Модели каналов передачи информации автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения в среде Simulink // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62255>

8. Воронцов К.В. Математические методы обучения по прецедентам. - М.: МФТИ, 2008. – 141 с.