

1. В основе реализации программы лежит метод эквивалентных упрощающих преобразований структуры GERT-сети с последовательным исключением на каждом шаге одного узла сети. После приведения GERT-сети к единственной эквивалентной дуге определена эквивалентная характеристическая функция GERT-сети, являющаяся преобразованием Фурье плотности распределения выходной величины GERT-сети. Для нахождения плотности распределения вероятностей выходной величины GERT-сети используется формула обращения, при условии интерполяции эквивалентной характеристической функции многочленом Лагранжа второй степени.

2. Имитационная система реализует сетевую модель, в которой узлами являются имитационные блоки с заданными входными спецификациями, а сами узлы соединяются друг с другом дугами. Имитационные блоки-генераторы порождают продвигающиеся в модели транзакты (заявки), которые подвергаются функциональным преобразованиям в блоках модели. Заявки в модели представляются как обычные (положительные); отрицательные, которые, поступая в очередь, могут уничтожать положительные заявки; и заявки-триггеры, которые могут перемещать положительные заявки в другие блоки модели. Реализован имитационный блок трансформации заявок, в котором можно задавать вероятности превращения заявок в другие типы.

3.1. НАХОЖДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ. Предложена методика расчета характеристик космического канала связи с передачей через спутник с геостационарной орбитой, в котором задержка передачи кадров и квитанций по тракту «земля-спутник-земля» составляет четверть секунды. Это усложняет выбор длины окна n и параметров канала при передаче кадров опτικο-электронных средств в реальном масштабе времени. Методика направлена на уменьшение потерь приоритетных кадров траекторной информации или целеуказаний в реальном масштабе времени в двух режимах: 1) с прерыванием обработки текущего кадра и последующим дообслуживанием (абсолютный приоритет); 2) без прерывания обработки текущего кадра (относительный приоритет). Новизна методики заключается в том, что по сравнению с прототипом – моделью канала с оконным управлением, описанным в работе Д. Бертсекаса и Р. Галлагера «Сети передачи данных», учитывается параметр длины квитанции. Она передается в длинных кадрах по тракту «земля-спутник-земля» и влияет на характеристики системы в стационарном режиме. С использованием модели массового обслуживания M/G/1 и теорем Литтла найдены средние значения времени передачи кадра опτικο-электронной информации и его дисперсия, число кадров в канале, время пребывания кадра в канале, число кадров в очереди, время пребывания кадра в очереди, определенные для приоритетных и неприоритетных кадров. Рассматриваются изменение скорости передачи приоритетных и неприоритетных кадров в зависимости от надежности канала.

3.2. КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПОЛИГОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА. Предлагается решение задачи расчета вероятностно-временных характеристик канала передачи данных опτικο-электронных средств (ОЭС), который принимает информацию от нескольких систем полигонного измерительного комплекса (ПИК) и передает ее в центр обработки информации и выдачи управляющих команд на объекты летных испытаний. Особенностью решаемой задачи является потоковый характер принимаемой информации. Специализированный канал ОЭС принимает без пауз последовательности кадров, составляющих сообщение. Моменты времени поступления сообщений на вход канала определяются простейшим потоком событий. Длина сообщения характеризуется распределением Пуассона с интенсивностью «лямбда». Время передачи одного кадра по одной из параллельных линий канала является случайным и задается нормированным распределением Эрланга второго порядка. Определена производящая функция моментов агрегированного канала.

Время передачи сообщения от ОЭС определяется путем нахождения суммы случайного числа независимых случайных величин «дзета 1», «дзета 2», ... с одним и тем же распределением F и производящей функцией моментов $M(s)$. Здесь «дзета» есть случайное время передачи одного кадра по агрегированному каналу связи. Пусть N - целочисленная случайная величина с производящей функцией $A(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k z^k$, где P_k - вероятности на значения z в степени, равной значению индекса и не зависящая от всех «дзет». Тогда случайная сумма «дзета 1»+...+«дзета N» случайных слагаемых имеет распределение, описываемое производящей функцией моментов «омега» от $s=A(M(s))$, где $A(z)$ - производящая функция числа кадров опико-электронной информации в сообщении, а $M(s)$ - производящая функция моментов времени передачи кадра. Длина сообщения от ОЭС оценивается распределением Пуассона с параметром «лямбда». Его производящая функция равна $A(z)=\exp(\lambda(z-1))$. Находится производящая функция моментов времени передачи сообщения по агрегированному каналу. Дифференцированием этого выражения по переменной s находится математическое ожидание времени передачи сообщения и второй момент распределения времени передачи.

По формулам Поллачека-Хинчина и Литтла определяются характеристики канала передачи опико-электронной информации в стационарном режиме: среднее число сообщений в системе, среднее число сообщений в очереди, среднее время нахождения сообщения в канале, среднее время нахождения сообщения в очереди канала.

3.3. КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОПИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С ВЫДЕЛЕНИЕМ КАДРОВ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ. Рассматриваются характеристики канала передачи данных опико-электронных средств траекторных измерений летательных аппаратов. Распределение времени передачи кадров через канал связи задается законом Эрланга второго порядка. Совокупный входной поток от нескольких измерительных систем характеризуется как простейший. Время передачи связывается с длиной кадра. Из общего потока в первую очередь выделяются и передаются только кадры ограниченной длины, содержащие информацию реального времени. Кадры большей длины сохраняются в отдельном накопителе и передаются в интервалах, свободных от передачи кадров реального времени.

Целью работы является нахождение влияния изменений предельной длины кадров реального времени на вероятностно-временные характеристики канала в стационарном режиме работы. Вероятность того, что время полной обработки кадра с ограничением длины не превысит r , определяется по функции распределения $F(r)=1-\exp(-\nu)(1+\nu)$, где ν - интенсивность интенсивность обработки кадров реального времени. Из этого выражения найдено преобразование Лапласа-Стилтьеса от функции распределения времени передачи кадра реального времени. Среднее число кадров реального времени в системе определяется по формуле Полячека-Хинчина для системы $M/G/1$. Средние значения времени пребывания кадра реального времени в канале и в очереди находятся по формулам Литтла.

Увеличение числа переведенных в отдельный накопитель кадров, которое характеризуется величиной $1-F(r)$, приводит к уменьшению среднего времени нахождения заявок в канале и возможности повышения входной нагрузки.

3.4. НАХОЖДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГИРОВАННОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ. Предложена методика расчета характеристик канала сети передачи данных (СПД) полигонного измерительного комплекса (ПИК), которая в отличие от аналогов обладает большей функциональностью. Канал производит передачу измерительной информации (ИИ) от антенных комплексов приема телеметрии, внешнетраекторных радиотехнических и опико-электронных станций, лазерных дальномеров, тепловизионных инфракрасных приборов, фототеодолитных станций, звукометрических батарей и т. п. ИИ от различных систем группируется в кадры, которые делятся на две равные части (пакеты), передаваемые

одновременно в параллельном режиме. Это позволяет сократить время передачи, уменьшить его вариацию, и использовать один из параллельных каналов в случае отказа другого. Длительность передачи пакета является случайной величиной. После успешного приема обоих пакетов на канала они снова формируются в кадр для передачи в центр обработки ИИ.

Моменты прихода кадров ИИ описываются пуассоновским процессом. Для планирования работы СПД ПИК оцениваются интервалы занятости и простоя и их среднеквадратические отклонения. Период простоя прерывается, если на входе канала появляется заявка на обслуживание основного потока требований. Для обеспечения гарантии окончания текущей фоновой задачи вводится режим работы с перерывами, в котором задача длительностью V должна завершиться, и только тогда передается основной поток.

Статистическая информация о работе канала передачи ИИ представляется в виде гистограмм, которые отражаются гипотетическим распределением - нормированным распределением Эрланга. Форма плотности распределения задается параметром масштаба «лямбда» и порядком распределения k . Переход от гистограммы к кривой плотности распределения осуществляется по критерию «хи-квадрат». Чем больше доступные интервалы изменения параметров в паре («лямбда», k), тем больше возможностей для аппроксимации. Однако в известных прототипах учитывалось только значение $k = 2$, что является ограничением. При условии, что время передачи кадра распределено по нормированному закону Эрланга второго, третьего и четвертого порядков, найдены производящая функция моментов времени передачи кадра ИИ по агрегированному каналу и ее дифференцированием, с последующим выполнением условия $s = 0$, первый и второй моменты этой величины. С использованием формул Поллачека-Хинчина получены: средние значения: числа кадров в системе (в канале) и в его очереди; времени пребывания кадра в системе и очереди. Для стационарного режима работы системы найдены средние значения интервалов занятости и простоя канала, а также характеристики канала в режиме с перерывами на выполнение фоновых задач. Полученные выражения для среднего времени передачи и дисперсии используются при проектировании различных базовых опорных сетей: цепи, кольца, дерева или ячеистой сети. Эти величины могут являться ограничениями в задаче оптимизации, либо использоваться для целевой функции.

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ GERT-СЕТИ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ И РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ. Используется теория аналитических функций комплексного переменного для нахождения плотности распределения выходной величины GERT-сети. Это возможно при условии, что в GERT-сети имеется один или несколько простых s - t -путей, все дуги которых связываются со случайными величинами, имеющими экспоненциальные и равномерные распределения. GERT-сеть раскладывается на две части $G1$ и $G2$. В $G1$ входят дуги, характеризующиеся равномерно распределенными случайными величинами и экспоненциальной величиной. Остальные дуги входят в часть $G2$.

Условия интегрирования формулы обращения (для вычисления плотности распределения) выполняются, когда: 1) в GERT-сети есть дуга, характеризующаяся нормальным распределением с дисперсией больше 0,75. Эта дуга должна либо выходить из узла-источника, либо граф может быть преобразован к эквивалентной форме; 2) плотность достаточно растянута по оси x , и контроль значений характеристической функции за пределами интервала интегрирования, показывает, что ошибка усечения находится в допустимых пределах. Трудности возникают тогда, когда путь от узла-источника к узлу-стоку составляют дуги, характеризующиеся экспоненциальным или равномерным распределением (или обоими типами распределений), характеристические функции которых относительно медленно сходятся к нулю. Тогда значительное

увеличение пределов интегрирования с целью уменьшения ошибки усечения приводит к неприемлемо большому времени вычислений.

Рассматривается нахождение плотности распределения вероятностей выходной величины GERT-сети G_1 , составленного из дуг s-t-пути, когда он состоит из: 1) одной случайной величины, описываемой равномерным распределением; 2) нескольких равномерно распределенных случайных величин; 3) нескольких случайных величин, задаваемых равномерными распределениями и экспоненциальным распределением. Плотность распределения вероятностей $fG_1(x)$ GERT-сети G_1 , равная сумме вычетов от комплекснозначной функции, однозначно определяемой характеристиками каналов, находится через разложение функции $\exp(zx)\Phi(z)$ в ряд Лорана в окрестности бесконечно удаленной точки. В общем случае, функция $\Phi(z)$ имеет полюс n-й кратности в точке $z=0$ (устраняемая особая точка) и простой полюс. Плотность $fG_2(x)$ получается численным методом интегрирования выражения $\exp(-itx)$ «хи» $G_2(t)$, интерполированного многочленом Лагранжа 2 степени. Итоговая плотность $f(x)$ есть смесь распределений по вероятности: $f(x)=pfG_1(x)+qfG_2(x)$, $p+q=1$. Погрешность вычисления значений плотности $f(x)$ определяется погрешностью численного метода нахождения плотности $fG_2(x)$.

5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ. При проведении летных испытаний авиационной и ракетно-космической техники актуальной является задача обеспечения своевременной передачи измерительной информации (ИИ) реального времени к центрам ее сбора (ЦС). При движении летательные аппараты (ЛА) переходят из зоны слежения одних измерительных пунктов (ИП) в зоны сопровождения других ИП. Поэтому трафик в канальной инфраструктуре динамически меняется. Целью исследований является нахождение: 1) распределений времени передачи кадров; 2) распределений величин полос пропускания отдельных каналов. Изменения трафика реального времени обуславливает необходимость пересчета задержки передачи ИИ и ее вариации по каждому пути из от ИП-а до ЦС. Рассматривается решение следующих задач.

ЗАДАЧА I. Полный расчет распределения времени передачи кадра ИИ до ЦС.

ЗАДАЧА II. При удалении ЛА в направлении от ЦС путь передачи ИИ удлиняется за счет добавления одного или нескольких последовательно соединенных каналов. Выполняется частичная корректировка расчетов на основе данных предварительных вычислений.

ЗАДАЧА III. При приближении ЛА к ЦС путь передачи ИИ сокращается за счет исключения одного или нескольких последовательно соединенных каналов. Также выполняется частичная корректировка расчетов.

В соответствии с критерием согласия «хи-квадрат» эмпирические распределения могут быть аппроксимируются нормированным распределением Эрланга с учетом постоянной составляющей длительности передачи. Для отражения изменения задержки кадров используются значения порядка распределения $k=2$ и параметра интенсивности «мю» в интервале $(0,1-2)$, выражаемые в миллисекундах, что согласуется с измерениями задержек в реальных каналах. Определяется эквивалентная производящая функция моментов времени передачи кадра по множеству каналов на пути от источника информации до ЦС. Время передачи кадра по N последовательно соединенным каналам находится через сумму вычетов по всем N полюсам второго порядка после выполнения комплексного преобразования $z=-s$.

Решение ЗАДАЧ I, II, III выполняется по единой методике с использованием стековой организации вычислений. В первой и второй из них результаты вычислений записываются в вершину стека (операция PUSH). При решении ЗАДАЧИ III ставшие ненужными данные (вследствие исключения каналов) наоборот извлекаются из вершины стека (операция POP).

Для множества виртуальных путей от источников ИИ до ЦС, проложенных в общем физическом канале, определяется суммарная полоса пропускания канала. Для

каждой точки плотности распределения вероятностей времени передачи кадра однозначно определяется скорость передачи в Мбит/с. Направление оси скорости передачи противоположно направлению оси времени передачи кадра. Наименьшим значениям времени передачи соответствуют наибольшие значения скорости передачи кадра ИИ. Для нахождения плотности распределения вероятностей величины совокупной полосы пропускания физического канала используется формула обращения с интерполяцией многочленом Лагранжа действительной и мнимой частей эквивалентной характеристической функции выходной случайной величины GERT-сети.