

УДК 004.724.2

Защищенная двухканальная система видеосвязи с использованием схемы разделения секрета и оптимизацией параметров на основе генетического алгоритма

Сагайдак Д. А., Денисова Л. А.

Актуальность исследования: потребность в защищенной передаче видеоданных от технических средств полезной нагрузки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в настоящее время возрастает в связи со сложившейся геополитической напряженностью. Одним из способов защиты от угроз, связанных с перехватом передаваемых потоков видеоданных от БПЛА на пункт управления (ПУ), является шифрование. Однако его применение требует увеличения вычислительных и аппаратных ресурсов и может вызывать задержки при воспроизведении дешифруемого потока видеоданных. Применение методов защиты информации, основанных на схемах разделения секрета (где секрет разделяется на две доли, каждая из которых передается по отдельному каналу двухканальной системы связи БПЛА) позволяет снизить потребность в вычислительных и аппаратных ресурсах БПЛА, но накладывает дополнительные условия, связанные с необходимостью использования двух каналов связи с требуемыми пропускной способностью и шириной полосы пропускания частот. **Целью работы** является повышение уровня защищенности передаваемых потоков видеоданных путем создания аналитико-имитационной методики, позволяющей определить оптимальные параметры двухканальной системы связи БПЛА, обеспечивающие уменьшение ширины полосы пропускания частот каналов связи и увеличение объема передаваемых видеоданных при синхронной передаче долей кадров этих видеоданных, полученных в результате применения схемы разделения секрета (СРС). **Используемые методы и технологии:** для решения поставленной задачи используются аналитический метод теории массового обслуживания (вычисление ширины полосы пропускания каждого из каналов двухканальной связи БПЛА) и имитационный метод оптимизации параметров двухканальной системы связи БПЛА с помощью генетического алгоритма (в среде MATLAB/Simulink/Simevents). **Новизна:** предложен аналитико-имитационный подход определения оптимальных параметров двухканальной системы связи БПЛА, включающий аналитическую оценку нижних границ доверительных интервалов ширины полосы пропускания частот каналов связи в совокупности с модельными исследованиями для оптимизации параметров двухканальной системы связи (по критериям максимизации объема передаваемых данных и минимизации ширины полосы пропускания частот каналов связи с обеспечением синхронной передачи данных по этим каналам), позволяющий повысить уровень защищенности передаваемых потоков видеоданных. **Результат:** использование представленного решения по оптимизации параметров двухканальной системы связи БПЛА позволяет оценить возможность применения СРС для обеспечения безопасности видеоданных, передаваемых от технических средств полезной нагрузки БПЛА на ПУ, а также позволяет снизить избыточность пропускных способностей используемых каналов связи, тем самым сократив ширину полосу пропускания частот системы управления БПЛА, и уменьшить издержки на содержание такой системы и повысить дальность действия БПЛА. Установлено, что полученные при помощи имитационного моделирования решения в допустимых пределах совпадают со значениями, полученными при аналитическом расчете, что подтверждает пригодность применяемых методов. **Практическая значимость:** разработанная имитационная модель может использоваться при проектировании системы связи БПЛА или включаться в состав программного обеспечения БПЛА для автоматического определения параметров системы связи при распределенной передаче видеоданных.

Библиографическая ссылка на статью:

Сагайдак Д. А., Денисова Л. А. Защищенная двухканальная система видеосвязи с использованием схемы разделения секрета и оптимизацией параметров на основе генетического алгоритма // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 3. С. 126-156. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-126-156

Reference for citation:

Sagaydak D. A., Denisova L. A. Secure two-channel video communication system using secret sharing schemes and optimization parameters based on genetic algorithm. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 3, pp. 126-156 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-126-156

ных по двум параллельным каналам. Предлагаемые решения позволят увеличить дальность действия БПЛА и сократить материально-технические затраты, связанные с содержанием каналов связи БПЛА-ПУ.

Ключевые слова: двухканальная система связи БПЛА, разделение секрета, распределенная передача видеоданных, пропускная способность канала связи, ширина полосы пропускания частот, имитационное моделирование, Парето-оптимизация, генетический алгоритм.

Введение

Применение малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стало одной из главных военно-технических особенностей специальной военной операции на Украине. В воинских подразделениях малые БПЛА в основном решают задачи ведения воздушной разведки противника в реальном времени, наведения целей для средств поражения высокоточного оружия, заброски средств поражения, корректировки огня артиллерии. В таких случаях наибольший интерес представляют БПЛА, имеющие в своем составе технические средства полезной нагрузки, используемые для удаленного видеонаблюдения и управления этими БПЛА с помощью видеосвязи. Эффективность применения БПЛА для выполнения поставленных задач обеспечивается за счет передачи по радиоканалам связи между БПЛА и пунктом управления (ПУ) достоверной, целостной, оперативной и защищенной информации. Поэтому система радиосвязи БПЛА представляет собой совокупность линий связи, по которым передается информация различного типа, объема, уровня важности и криптозащиты.

Анализ работ [1-5] показывает, что малые БПЛА обладают рядом преимуществ по сравнению с БПЛА других классов, но и имеют ряд недостатков, связанных, например, с отсутствием возможности размещения на них передающих антенн определенного размера и радиуса действия. Для управления малыми БПЛА, как правило, используется существующая связная инфраструктура систем связи (мобильные операторы связи и точки доступа Wi-Fi). Кроме того, в случае необходимости и наличия технической возможности, осуществляется доработка БПЛА, позволяющая использовать для организации связи и обмена данными между БПЛА и ПУ связную инфраструктуру с определенным заданным частотным диапазоном и шириной полосы пропускания частот. Для управления и обмена данными между БПЛА и ПУ организуется направление связи «вниз», которое включает в себя канал радиоуправления (КРУ) для передачи командно-телеметрических данных о состоянии подсистем БПЛА и управления БПЛА, а также канал радиосвязи для передачи данных от технических средств полезной нагрузки. Для малых БПЛА наибольшую часть объема данных, передаваемых по направлению связи «вниз», являются видеоданные, поступающие от оптико-электронных средств (ОЭС) в составе полезной нагрузки БПЛА на ПУ оператора и предназначенные для управления БПЛА и визуального наблюдения за окружающей обстановкой. Для организации передачи данных между БПЛА и ПУ по одному каналу связи для малых БПЛА используются технологии мультиплексирования трафиков видеоданных и командно-телеметрических данных, что, в случае применения средств радиоэлектронного подавления (РЭП) может привести к подавлению единственного канала связи и потере свя-

зи с БПЛА. Поэтому в целях противостояния РЭП в настоящее время в малых БПЛА стараются применять приемопередающее оборудование, реализующее как минимум два радиоканала связи. В работах [6-9] рассматриваются варианты использования малых БПЛА с двумя радиоканалами связи для распределенной передачи командно-телеметрических данных и данных от технических средств полезной нагрузки. При этом совместно используются сети мобильных операторов связи поколений 2G...4G, радиоканалы на основе стандартных технологии радиосвязи (RC433, RC868, сети CDMA, GSM900, GSM1800, сети 3G и 4G, сети Wi-Fi), радиоканалы цифрового видео вещания DVB, а также специально выделенные радиоканалы с различными частотными характеристиками. Необходимость применения двух радиоканалов связи обуславливается тем, что требуется обеспечить распределенную передачу командно-телеметрических данных и данных от технических средств полезной нагрузки, так как для малых БПЛА довольно распространенным способом управления остается режим ручного управления по получаемым от БПЛА видеоданным. Принимаемые оператором на ПУ видеоданные имеют большой объем, требуют обеспечения их передачи в режиме реального времени. Это в свою очередь, предполагает использование широкой полосы пропускания частот, тогда как для передачи командно-телеметрических данных, напротив, не требуется обеспечения широкой полосы пропускания частот, и кроме того, эти данные не имеют большого объема.

Отметим, что отсутствие возможности размещения на малых БПЛА большеразмерных остронаправленных антенных систем ведет к тому, что видеоданные передаются через всенаправленную антенну, либо через антенну с широким главным лепестком диаграммы направленности антенны (порядка 60-90°), и это приводит к тому, что противник может относительно легко не только вскрывать сигнально-частотные параметры данных радиоканалов, но и получать доступ к передаваемым видеоданным, осуществлять их подмену или блокировку [6].

Таким образом, в настоящее время актуальной является задача обеспечения защиты передаваемого потока видеоданных от БПЛА на ПУ. Как правило, в качестве методов защиты информации используются криптографические методы. В соответствии с данными, приведенными в работах [10-13] в БПЛА могут применяться алгоритмы шифрования в соответствии со стандартами: MIL-STD-188-181A, MIL-STD-188-183, NSA Type I, Triple DES, AES-128, а в случае организации связи с использованием стандартов, основанных на технологии Wi-Fi, возможно применение криптографических протоколов защиты, встроенных в эти стандарты (WEP, WPA, WPA2 и др.). Но для малых БПЛА, где также формируется большой объем видеоданных от технических средств полезной нагрузки и присутствует необходимость их передачи в режиме реального времени, применение криптографических алгоритмов затруднительно. Так как в составе таких БПЛА отсутствует возможность использования высокопроизводительной аппаратуры шифрования, это предопределяет использование либо низкого уровня криптозащиты, либо её полное отсутствие. А в случаях попыток применения дополнительных программно-аппаратных комплексов криптографической защиты [14] в составе малых БПЛА возникают вопросы, связанные с

дополнительным потреблением первичных источников электроэнергии [15, 16] и ограниченной грузоподъемностью таких БПЛА [17-20].

Следует отметить, что ввиду обозначенных сложностей применения криптографических алгоритмов на борту малых БПЛА и наличие у них (как минимум) двух каналов связи по направлению «вниз» от БПЛА к ПУ, наибольший интерес представляют исследования, направленные на разработку методов защиты информации, не связанных с классическими криптографическими преобразованиями. Таким образом, для обеспечения безопасности передаваемых видеоданных от БПЛА к ПУ авторами предлагается вариант применения схем разделения секрета (СРС), где ввиду наличия между БПЛА и ПУ как минимум двух каналов связи с различными пропускными способностями, разделение секрета осуществляется на две доли неравного размера. При этом передача меньшей доли секрета должна выполняться по каналу связи с меньшей пропускной способностью, а большей доли, соответственно, по каналу с большей пропускной способностью. Предполагается, что применяемые СРС предъявляют минимальные требования к вычислительным ресурсам используемого центрального процессора управления [21-23], имеют возможность встраивания в программную среду БПЛА, обладают быстроем действием, простотой применения и решают следующие задачи: минимизируют временные задержки при преобразовании защищаемой информации, обеспечивают стойкость при попытках незаконного восстановления.

В качестве примера можно указать, что для защиты видеоданных, передаваемых с БПЛА на ПУ, возможно применение СРС, созданной исследователями Moni Naor и Adi Shamir [24, 25]. В простейшем варианте данной СРС исходное чёрно-белое изображение разбивается на «теневые» изображения, которые не дают никакой информации об исходном изображении, кроме его размера (так как размеры полученных «теневых» изображений и исходного совпадают). Достоинствами такой СРС являются скорость работы, надёжность (сравнимая с надёжностью одноразового блокнота) в случае, если соблюдается случайное разбиение пикселей изображения на блоки [26]. Недостатком является то, что в результате применения данной СРС объем данных увеличивается (в два раза) и это приводит к увеличению издержек, связанных с передачей этих данных [21]. В целях сокращения подобных издержек возможно применение СРС, в которых разделение видеоданных осуществляется на неравные доли, варианты таких СРС описаны в работах [21-23, 27-29].

В работе предлагается разделять передаваемые видеоданные с БПЛА (для обеспечения их безопасности) с использованием СРС, которая позволяет осуществлять разнесение передачи долей видеоданных по двум отдельным каналам связи. При этом с физической точки зрения перехват всех долей является затруднительным, так же как и восстановление исходных видеоданных без какой-либо доли [27-29]. При передаче долей кадров по каналам связи с БПЛА применяются методы многопутевой маршрутизации, позволяющие использовать несколько маршрутов, пролегающих через разные параллельные каналы связи. Но возрастающая нагрузка на канал связи, связанная с передачей большей доли, или простой канала связи, связанный с передачей меньшей доли,

могут сделать выбранные маршруты не привлекательными с точки зрения скорости передачи, надежности, отказоустойчивости [30]. Поэтому, ввиду большого объема видеоданных от технических средств полезной нагрузки БПЛА, ограниченности доступного частотного ресурса для организации радиосвязи БПЛА с ПУ и в целях выбора подходящих параметров каналов передачи больших и меньших долей, разделяемых видеоданных, возникает необходимость использования различных способов и технологий оптимизации, синхронизации и балансировки пропускных способностей каналов передачи данных [6].

Как правило, синхронизация и балансировка используются для равномерного распределения трафика данных или вычислительных задач в высоконагруженных системах [31-33], например, одной из которых может являться двухканальная система связи БПЛА, управляемого по видеосвязи или передающего видеоданные от технических средств полезной нагрузки. При передаче трафика видеоданных реального времени в двухканальной системе связи БПЛА синхронизация параллельных каналов связи может достигаться за счет выявления резервов времени передачи данных в этих каналах и путем дальнейшего выравнивания их временных характеристик [34, 35]. Но в случае значительного отличия в объемах передаваемых данных по двум параллельным каналам связи алгоритмы синхронизации, основанные на выравнивании средних значений времен передачи данных, могут быть не эффективными ввиду того, что помимо синхронизации этих каналов необходимо обеспечить их максимальную загруженность (или минимальный простой). Следует отметить, что синхронизация получаемых заявок (данных) по двум каналам связи необходима в целях исключения формирования очередей из заявок (данных) и вероятности их потери (то есть для своевременного восстановления полученного секрета); максимальная загрузка каналов связи необходима в целях использования всей ширины (пропускной способности) каналов связи; минимальный простой каналов связи необходим в целях передачи наибольших объемов данных, ввиду того, что по каналам связи передаются потоки видеоданных. Но проблема заключается в том, что оптимизация сразу по нескольким критериям требует временных и вычислительных ресурсов, так как целевые функции нескольких переменных порождают многомерное пространство поиска решений и вычислительная сложность оптимизационной задачи становится преградой к ее решению за допустимое время. А аналитическое описание и строгое решение такой задачи неосуществимо или осуществимо только с рядом допущений.

Поэтому, учитывая тот факт, что в БПЛА, как правило, центральные процессоры управления не предназначены для решения математических и оптимизационных задач и специфика применения БПЛА ограничивает вычислительные задачи по времени, ввиду необходимой оперативности их применения, авторами предлагается методика аналитико-имитационного моделирования, выполняющая многокритериальную оптимизацию двухканальной системы связи БПЛА с применением генетических алгоритмов (ГА), обладающих значительно меньшей вычислительной емкостью и позволяющих не исследуя полностью область допустимых решений, с определенной вероятностью находить гло-

бальный экстремум в однокритериальных задачах и фронт Парето в многокритериальных.

Таким образом, целью исследования является оценка возможности применения СРС для обеспечения защищенности данных в двухканальной системе связи БПЛА управляемого по видеосвязи или передающего видеоданные от технических средств ОЭС. Оценка возможности применения СРС осуществляется в соответствии с предлагаемой авторами аналитико-имитационной методикой, позволяющей определить оптимальные параметры двухканальной системы связи БПЛА, которые обеспечивают уменьшение ширины полосы пропускания частот каналов связи и увеличение объема передаваемых видеоданных при синхронной передаче этих данных по двум параллельным каналам связи.

Постановка задачи

Требуется обеспечить защищенную передачу потока видеоданных от технических средств полезной нагрузки БПЛА на ПУ, для этого предлагается использовать метод защиты информации, реализующий СРС, основанную на алгоритме префиксного кодирования массивов данных, осуществляющего разделение секрета на две доли неравного размера [21-23], что позволяет передавать видеоданные по двум каналам связи. При этом двухканальная система должна обеспечивать необходимые показатели пропускных способностей каналов связи для передачи заданного объема данных при их максимальной загрузке, а также синхронизацию получения передаваемых долей кадров.

В качестве такой системы связи рассматривается система с двумя каналами связи (DL – datalink: DL-1, DL-2) и с каналом обратной связи (SL – synchronizationlink). На рис. 1 представлена схема системы с передачей видеоданных по двум каналам связи.

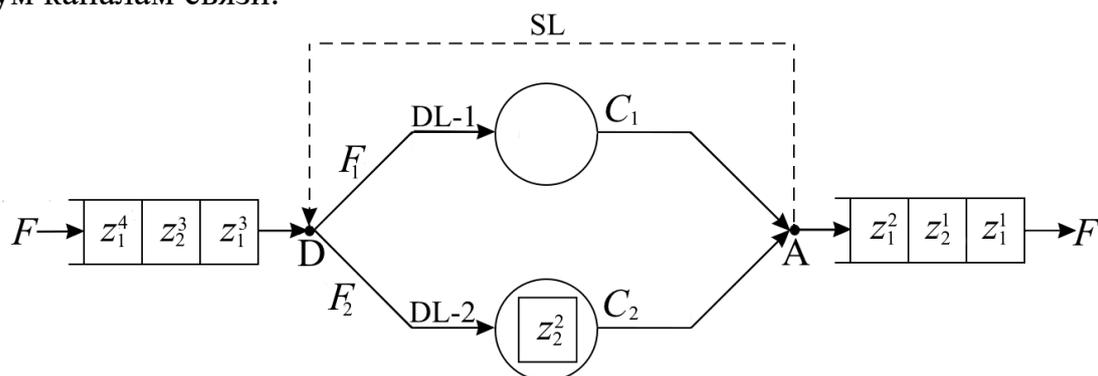


Рис. 1. Схема системы связи с передачей видеоданных по двум каналам

Разделение секрета (кадра) z^i производится на две доли z_1^i и z_2^i ($i = 1, 2, \dots$), которые в качестве заявок на обслуживание передаются по каналам связи, обладающим различными показателями пропускных способностей C_1 и C_2 . Порядок распределения заявок между каналам связи осуществляется на основе алгоритма кругового распределения RR (Round-robin), реализуемого с помо-

щью дисциплины обслуживания «первым пришел – первым обслужен» FIFO (first in – first out) [36, 37].

В точке D (distribute) осуществляется круговое распределение заявок по каналам связи DL-1 и DL-2, соответственно, входящий в систему трафик F (Мбит/с) делится на две части F_1 и F_2 , где $F=F_1+F_2$. В качестве модели трафика в системе связи рассматривается простейший пуассоновский поток.

Обратная связь SL служит для синхронизации работы каналов связи, то есть для передачи в точку D информации (сигнала) о том, что в точке сборки A (assemble) получена пара из заявок z_1^i и z_2^i , отправленных по каналам связи DL-1 и DL-2, и только после этого в системе осуществляется передача следующей пары заявок.

В рамках данной работы в двухканальной системе связи не рассматривается вопрос применения более сложных протоколов обмена (например, на транспортном уровне модели OSI [38] с применением принципа «скользящего окна» как в протоколе TCP), а используется «простой» протокол с подтверждением получения заявок [39]. Такой подход принят в целях определения минимально необходимых показатели пропускных способностей C_1 и C_2 каналов связи DL-1 и DL-2 при условии синхронной передачи по ним заявок и их максимальной загруженности.

В работе для решения поставленной задачи предлагается аналитико-имитационная методика, позволяющая определить оптимальные параметры двухканальной системы связи, обеспечивающие уменьшение ширины полосы пропускания частот каналов связи и увеличение объема передаваемых видеоданных при синхронной передаче заявок двум параллельным каналам связи.

Аналитический расчет выполняется для определения нижних границ доверительных интервалов показатели пропускных способностей C_1 и C_2 и ширины полосы пропускания частот каналов связи. Ввиду того, что при проведении данного расчета принято допущение, что в обоих каналах связи среднее время передачи заявок (занятия канала) одинаковое, то есть каналы изначально уже являются синхронными.

При имитационном моделировании одновременно предъявляется несколько критериев к функционированию двухканальной системы связи, обеспечивающие максимальную загрузку и минимальный простой каналов связи при синхронной передаче по ним заявок.

Аналитический расчет

Трафик в двухканальной системе связи (рис. 1) рассматривается в виде классического представления в качестве пуассоновского потока. Заявки, поступающие в каналы связи DL-1 и DL-2, сразу передаются на обслуживание, тогда t (среднее время занятия системы связи), проходящее от момента прихода заявок в точку D и до момента ухода их из точки A, определяется математическим ожиданием [40, 41]:

$$t = M \left[\max(t_{z_1}, t_{z_2}) \right], \quad (1)$$

где t_{z_1} , t_{z_2} – среднее время занятия каналов связи DL-1, DL-2, соответственно.

Задача оптимизации показателей пропускных способностей C_1 и C_2 сводится к задаче минимизации средних издержек (материально-технических затрат), приходящихся на период эксплуатации системы связи. Пусть затраты, связанные с показателем пропускной способности любого канала связи в расчете на время эксплуатации системы связи, составляют m у.е./кбит/с). Тогда задача может быть сформулирована так:

$$f = lt + m(C_1 + C_2) \rightarrow \min_{C_1, C_2}, \quad (2)$$

где l (у.е./с) – коэффициент, равный потерям, происходящим из-за ожидания поступления заявок на период эксплуатации системы.

На основании теоремы Шеннона при поиске точки локального минимума целевой функции (2) показатели пропускных способностей должны соответствовать условиям: $C_1 \geq F_1$, $C_2 \geq F_2$, обеспечивающим передачу заданного трафика.

В соответствии с принятым допущением, что каналы связи DL-1 и DL-2 синхронны, то есть $t_{z_1} = t_{z_2}$, следует, что среднее время занятия системы связи для передачи заявок:

$$t = M[\max(t_{z_1}, t_{z_2})] = M[t_{z_2}]. \quad (3)$$

При исследовании было установлено, что в результате разделения секрета между полученными долями сохраняется пропорция $h_1/h_2 = \gamma = const$ [21-23, 42]. Поэтому, учитывая допущение, что $t_{z_1} = h_1 / C_1 = (\gamma h_2 / \gamma C_2) = h_2 / C_2 = t_{z_2}$, то показатели пропускных способностей этих каналов связи связаны условием: $C_1 = \gamma C_2$. Тогда задачу (2) можно записать как:

$$f = lt_{z_2} + m(\gamma + 1)C_2 \rightarrow \min_{C_2}, \quad (4)$$

где C_2 должно удовлетворять ограничению $C_2 \geq F_2$.

Решение оптимизационной задачи (4) сводится к решению алгебраического уравнения:

$$\frac{df(C_2)}{dC_2} = -l \frac{h_2}{C_2^2} + m(\gamma + 1) = 0, \quad (5)$$

Условие (5) позволяет определить точку локального минимума функции (4) и найти показатель пропускной способности C_2 канала связи DL-2:

$$C_2 = \sqrt{\frac{lh_2}{m(\gamma + 1)}}. \quad (6)$$

Если полученное в (6) значение C_2 удовлетворяет ограничению $C_2 \geq F_2$, то оно является решением задачи (4), иначе решением этой задачи является наименьшее ближайшее значение C_2 , удовлетворяющее данному ограничению, т.е. значение $C_2 = F_2$ [40, 41].

В соответствии с формулой Хартли, предельное количество информации, которое может быть передано по каналу связи за время его занятия [43]:

$$I_j = t_{z_j} B_j \log_2(1 + SNR_j), \quad (7)$$

где t_{z_j} – время занятия j -го канала связи ($j = 1, 2$); B_j – ширина полосы пропускания j -го канала связи; SNR_j – отношение полезного сигнала к шуму j -го канала связи.

Учитывая (7) и на основании теоремы Шеннона-Хартли [44] для канала связи предельно допустимый показатель пропускной способности находится по формуле:

$$C_j \leq B_j \log_2(1 + SNR_j), \quad (8)$$

где C_j – показатель пропускной способности j -го канала связи.

Таким образом, в соответствии с формулами (6) и (8) для двухканальной системы связи с помощью аналитического расчета определяется минимальная ширина полосы пропускания частот каналов связи, необходимая для обеспечения передачи заявок по этим каналам с требуемыми показателями пропускных способностей:

$$B_j \geq C_j / \log_2(1 + SNR_j), \quad (9)$$

Пример. Пусть отношение размеров заявок (долей кадров потока видеоданных формата качества HD, полученных в результате применения СРС) составляет $h_1/h_2 = \gamma = const = 11,2$, где $h_1 = 0,0448$ Мбит, $h_2 = 0,0040$ Мбит. Объем информации передаваемый за единицу времени по каналу DL-1 и DL-2, соответственно составляет $F_1 = 2,021$ Мбит/с, $F_2 = 0,179$ Мбит/с. Подставляя в формулу (6) значения γ , h_2 и учитывая, что издержки составляют, например, $m = 0,01$ у.е./(Мбит/с) и в канале связи отсутствует ожидание поступления заявок ($l = 1$ у.е./с), то получим $C_2 = 0,181$ Мбит/с и $C_1 = 2,027$ Мбит/с ($C_2 > F_2$ и $C_1 > F_1$). Учитывая, что допустимое минимально приемлемое соотношение сигнал/шум для установления связи составляет от 15 дБ до 25 дБ [45], то рассчитанная по (9) ширина полосы пропускания частот для первого канала связи составляет $B_1 = 404$ кГц, а для второго $B_2 = 36$ кГц. Средние издержки на содержание системы связи по формуле (8) составляют $f = 0,0442$ у.е.

Таким образом, обеспечивая аналитическое вычисление оптимальных показателей параметров пропускных способностей каналов двухканальной системы связи, можно добиться сокращения ширины полосы пропускания частот, увеличить при этом дальность связи между БПЛА и ПУ [46] и уменьшить издержки на содержание такой системы связи (например, снижение материально-технических затрат). При помощи аналитического расчета определяются только нижние границы доверительных интервалов показателей параметров исследуемой двухканальной системы связи, без учета их взаимосвязи. Тогда как имитационное моделирование позволяет найти такие показатели параметров, которые удовлетворяли бы всем условиям выполнения имитационной модели.

Имитационное моделирование

Так как рассматривается применение нескольких критериев качества функционирования двухканальной системы связи, то задача по оптимизации этих критериев рассматривается и решается как многокритериальная, что

приводит к необходимости поиска компромиссных решений, поскольку улучшение поведения системы связи по одному критерию может приводить к ухудшению её поведения с точки зрения других критериев.

Для системы связи одновременно требуется обеспечить выполнение трех критериев – максимизация загрузки, минимизация простоя каналов связи и обеспечение их синхронизации. Поэтому задача многокритериальной оптимизации может быть сформулирована следующим образом: пусть X – вектор варьируемых параметров вектор-функции критериев $J(X) = (J_1(X), J_2(X), J_3(X))$, тогда множеством допустимых значений, включенных в X , является ограниченное и замкнутое множество $R_X \subset \{X\}$. Если вектор-функция $J(X)$ является непрерывной и ограниченной на множестве R_X , то целью оптимизации этой вектор-функции $J(X)$, является минимизация во множестве R_X каждого из показателей $J_1(X)$, $J_2(X)$, $J_3(X)$.

Ввиду того, что требуется обеспечить синхронную передачу заявок, то параметрами настройки двухканальной системы связи БПЛА являются: время занятия (обслуживания) канала связи DL-1 τ_1 , время занятия (обслуживания) канала связи DL-2 τ_2 , тогда вектор варьируемых параметров имеет следующий вид: $X = (\tau_1, \tau_2)$.

Максимальная нагрузка каналов связи двухканальной системы связи, обеспечивается следующим критерием:

$$J_1(X) = N_1 + N_2 \rightarrow \max, \quad (10)$$

где N_1, N_2 – количество переданных заявок в каналах связи DL-1 и DL-2, соответственно.

Для того, чтобы решать задачу по минимизации критерия $J_1(X)$, (10) представим в виде:

$$-J_1(X) = -(N_1 + N_2) \rightarrow \min \quad (11)$$

Минимальный простой каналов двухканальной системы связи достигается при помощи минимизации критерия:

$$J_2(X) = \sum_{i=1}^{N_1} t_{z_1}^i + \sum_{k=1}^{N_2} t_{z_2}^k \rightarrow \min, \quad (12)$$

где t_{z_1}, t_{z_2} – времена занятия заявкой канала связи DL-1 и DL-2, соответственно.

Синхронная передача заявок в двухканальной системе связи достигается при помощи минимизации критерия:

$$J_3(X) = |t_{z_1}^i - t_{z_2}^i| \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $i = \overline{1, N_1}$. N_1 – так как выполняется синхронизация по первому каналу связи.

Таким образом, целью задачи оптимизации двухканальной системы связи является нахождение таких значений варьируемых параметров τ_1, τ_2 при которых минимизируются критерии $J_i(X)$, $i = \overline{1, 3}$, указанные в (11), (12), (13).

Наиболее эффективным подходом к решению задач многокритериальной оптимизации относится Парето-оптимизация, обеспечивающая построение множества Парето-оптимальных решений, не улучшаемых одновременно по

всем рассматриваемым критериям. Тогда, если фронт Парето принадлежит множеству достижимости задачи $J(X) \rightarrow \min_{X \in R_X}$, то и соответствующее множество Парето-оптимальных решений $R^* \in R_X$ должно являться решением данной задачи [47]. Алгоритмы, решающие задачу многокритериальной оптимизации, основаны на аппроксимации множества Парето, которая осуществляется с использованием ГА [48, 49]. Главным достоинством ГА является то, что они могут применяться для решения сложных неформализованных задач, для которых не разработано специальных методов, но даже в тех случаях, для которых хорошо работают существующие методики, можно достигнуть интересных результатов сочетая их с ГА. [50, 51].

Для решения задачи многокритериальной оптимизации использовалась интерактивная среда для научных и инженерных расчетов MATLAB/Simulink/SimEvents [52-55]. В результате проведения имитационного моделирования в данной среде выполнена оптимизация параметров двухканальной системы связи с помощью Парето-аппроксимации на основе многоцелевого ГА NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) [56], который может использоваться в связке с метамоделями, что позволяет применять его в инженерных задачах при многокритериальной оптимизации [57-59].

Для построения множества Парето решений использовались специально созданные m-файлы (сценарии на языке MATLAB), выполняющие многократные вызовы модели, реализующей схему исследуемой двухканальной системы связи, приведенную на рис. 1. Для генерации множества Парето-оптимальных решений в среде MATLAB/Simulink применялись функции из инструментария Global Optimization, в частности, для применения ГА Парето-аппроксимации NSGA-II, использовалась функция *gamultiobj* [52-55].

Задание параметров функции ГА выполнялось через оператор *gaoptimset* функции *gamultiobj*. Число «особей» в популяции ГА устанавливалось в диапазоне от 100...200. Для получения результатов требовалось 10...15 последовательных поколений, не дающих улучшения целевой функции, после чего работа ГА останавливалась. При оптимизации критериев функционирования двухканальной системы связи осуществлялся поиск параметров времен занятия τ_1 , τ_2 каналов связи в DL-1 и DL-2, соответственно, доставляющих минимум принятым критериям (11), (12), (13). В качестве «особи» для ГА использовался вектор настраиваемых параметров $X = (\tau_1, \tau_2)$.

Вычисление и передача в рабочую область значений $J(X)$ выполнялись с помощью m-файла – сценария. Значения критериев $J_i(X)$ ($i = \overline{1,3}$) для каждого вектора X , полученные в результате имитационного моделирования передавались в основную ГА. На каждом этапе работы алгоритма рассматривался полученный вектор параметров X и соответствующее ему значение критерия $J(X)$. Так как начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, то для выбора лучших решений выполнялось несколько реализаций расчетов.

Для определения оптимального состояния функционирования двухка-

нальной системы связи требовалось выполнить модельные исследования этой системы со значениями вектора настраиваемых параметров, изменяющимися в диапазонах, определяемых качеством и, соответственно, параметрами трафика F , создаваемого техническими средствами полезной нагрузки БПЛА. Для проведения имитационного моделирования использовались следующие начальные параметры. Технические средства полезной нагрузки БПЛА формируют поток видеоданных формата качества HD (High Definition) с расширением 1280x720 пикселей и частотой 60 кадров/с. Трафик при передаче такого потока видеоданных составляет $F = F_1 + F_2 = 900$ МБ/час (2 Мбит/с) [60, 61]. При реализации СРС определено, что F разбивается в соотношении $F_1/F_2 = \gamma = const = 11,2$ ($F_1 = 1,837$ Мбит/с, $F_2 = 0,164$ Мбит/с) [21-23, 42]. По двухканальной системе связи БПЛА совместно с трафиком от технических средств полезной нагрузки передаются командно-телеметрические данные, объем которых не превышает 10% от общего объема передаваемых данных [62, 63]. Тогда $F = F_1 + F_2 = 2,2$ Мбит/с, $F_1 = 2,021$ Мбит/с, $F_2 = 0,179$ Мбит/с и учитывая то, что поступающие в каналы связи заявки сразу передаются на обслуживание, то для данных каналов диапазон варьируемых параметров составит $\tau_1 \in [5,092; 5,587]$ и $\tau_2 \in [0,495; 6,082]$. Вычисление значений диапазона варьируемых параметров для других форматов качества потоков видеоданных осуществляется аналогично.

Параметры для ГА задаются при помощи следующих опций в среде MATLAB/Communications Toolbox:

```
lb = [5.092 0.495];           % верхняя граница варьируемых значений критериев.
ub = [5.587 6.082];           % нижняя граница варьируемых значений критериев.

options = gaoptimset('PopInitRange',[lb;ub],'PopulationSize',200);
                                % задание параметров генетического алгоритма:
                                % диапазон варьируемых параметров;
                                % размер популяции.

options = gaoptimset(options,'PlotFcns',{@gaplotpareto,@gaplotparetodistance});
                                % задание параметров генетического алгоритма:
                                % отображения прогресса работы алгоритма;
                                % зависимости функций на множестве Парето;
                                % расстояния каждой особи от его соседей.

options = gaoptimset(options,'TolFun',1e-4,'StallGenLimit',10);
                                % задание параметров генетического алгоритма:
                                % нижняя граница целевой функции;
                                % число последовательных поколений, не дающих
                                % улучшение целевой функции, после которого
                                % останавливается алгоритм.

options.Generations = 20;       % количество генераций.

[x,fval,exitflag,output] = gamultiobj(@GoalFun1and3_s22,2,[],[],[],[],lb,
ub,options);                   % вызов функции оптимизации на основе
                                % генетического алгоритма NSGA-II.
```

Для того чтобы исследовать двухканальную систему связи, создана имитационная модель распределения заявок между её каналами связи, реализован-

ная с помощью инструментов моделирования пакета MATLAB/Simulink/SimEvents. (рис. 2). Модель собрана из библиотечных блоков SimEvents и Simulink, для настройки свойств и параметров которых используются диалоговые окна [52-55]. Схема состоит из 6 составных модулей – Generator, Gateway, DL-1, DL-2, Receiver, F1-F3.

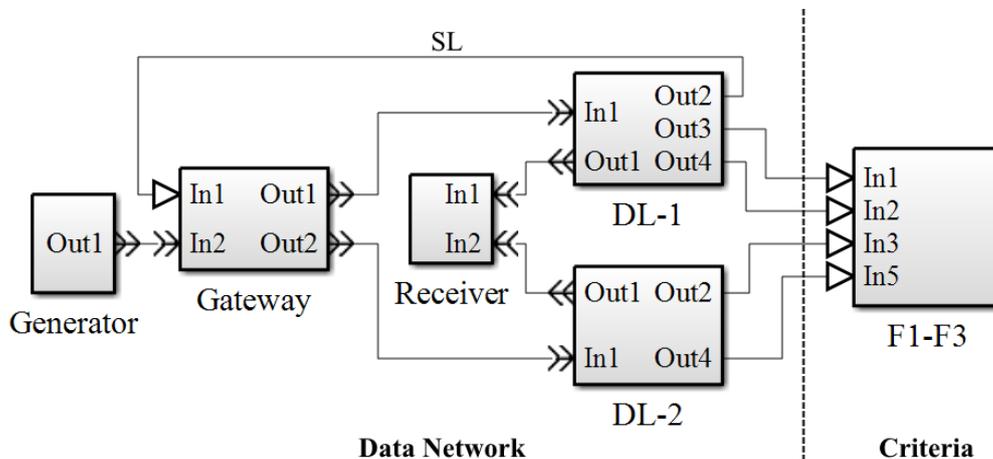


Рис. 2. Модель системы связи с распределенной передачей заявок по двум каналам в среде MATLAB/SimEvents

Источником заявок в модели является блок Time-Based Entity Generator из составного модуля формирования заявок – Generator (рис. 3). Закон распределения и время между возникновением поступающих заявок заданы в параметрах блока генерации случайных чисел Event-Based Random Number. Сгенерированные заявки поступают в блок очереди FIFO Queue и ожидают обслуживания. Очередь обслуживания не имеет ограничения по емкости.

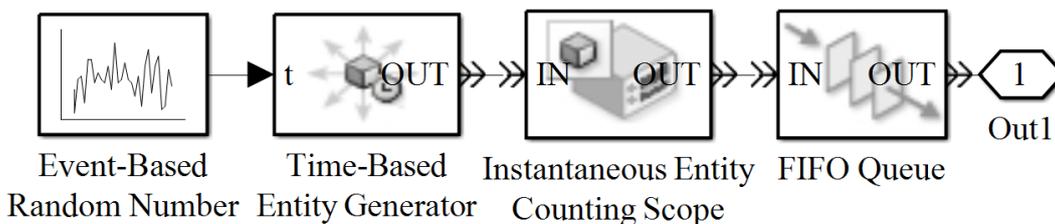


Рис. 3. Структура составного модуля формирования заявок – Generator

В составном модуле распределения заявок – Gateway (рис. 4) осуществляется циклическое распределение заявок по составным модулям DL-1 и DL-2 с помощью алгоритма Round-robin.

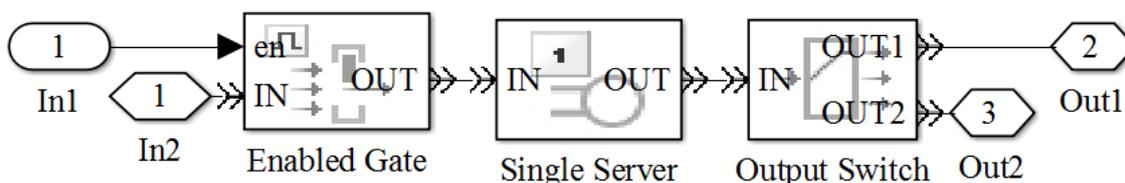


Рис. 4. Структура составного модуля распределения заявок – Gateway

Блок Enabled Gate, на основании управляющего сигнала на порту In1, выполняет блокировку поступления в составные модули DL-1 и DL-2 заявок, до тех пор, пока отправленная ранее пара заявок не будет обслужена. Блок Single Server – вспомогательный блок, который отправляет заявку на обработку блоку Output Switch, который служит для выбора необходимого канала связи. Параметр Switching criterion блока Output Switch, задан как Round-robin.

В составных модулях обработки заявок DL-1 и DL-2, являющихся моделями двух параллельных каналов связи, осуществляется обработка поступивших в них заявок. Составной модуль DL-1 (рис. 5) имеет идентичную структуру с составным модулем DL-2, за исключением того, что в нем имеется вывод Out2, выполняющий передачу управляющего сигнала о том, что в блоке Single Server на обслуживании находится заявка. Вывод Out2 составного модуля DL-1 соединен с входом In1 составного модуля распределения заявок Gateway (см. рис. 2).

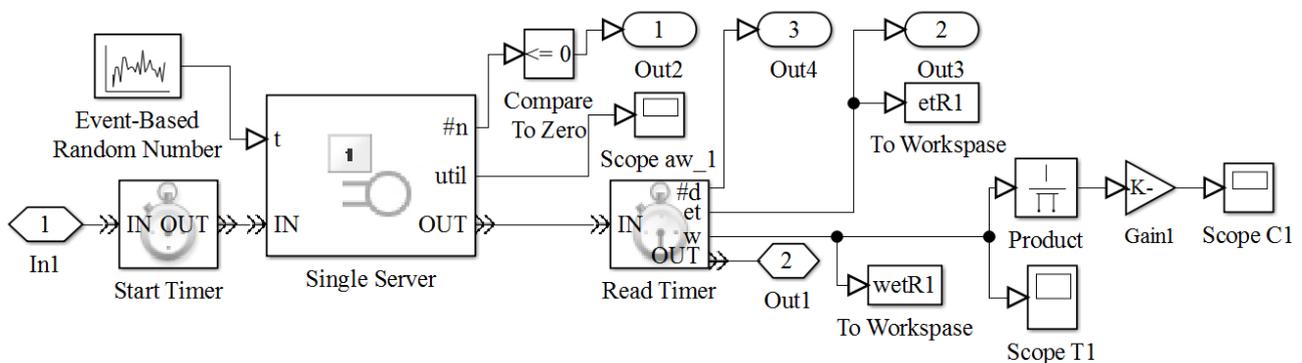


Рис. 5. Структура составного модуля обработки заявок – DL-1

Так как трафик рассматривается в виде классического представления в качестве пуассоновского потока, то время между последовательными поступлениями заявок и время их обслуживания, будучи случайными величинами, при моделировании систем массового обслуживания количественно описываются экспоненциальным распределением. Плотность вероятности длительности пауз между генерациями заявок $p(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, где λ – интенсивность потока, $\tau = 1/\lambda$ – среднее время занятия канала (обслуживания заявки). Следовательно, в свойствах блоков Event-Based Random Number составных модулей DL-1 и DL-2 параметры Distribution заданы как Exponential, а параметры Mean заданы, как τ_1 и τ_2 , соответственно, и изменяются в рамках заданных диапазонов. Для учета времени пребывания заявок в каналах связи используются блоки Start Timer и Read Timer показания которых передаются в рабочую область MATLAB для организации синхронной передачи заявок.

Составной модуль объединения заявок – Resciever (рис. 6) ожидает поступления заявок из составных модулей обслуживания заявок DL-1 и DL-2.

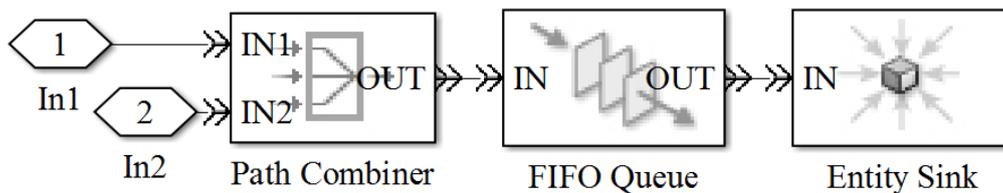


Рис. 6. Структура составного модуля объединения заявок для завершения их обслуживания – Receiver

Блок Path Combiner служит для объединения заявок в одну очередь с дисциплиной обслуживания FIFO. Блок Entity Sink служит для завершения обслуживания заявок.

Составной модуль передачи параметров F1-F3 выполняет передачу оптимизируемых значений критериев $J_1(X)$, $J_2(X)$, $J_3(X)$ в программную область MATLAB, для последующей их обработки и принятия решения ГА о необходимости дальнейших генераций или оптимальности полученного решения.

При помощи ГА найдено множество Парето решений, на котором минимизируются критерии $J_1(X)$, $J_2(X)$. Графики характеристик двухканальной системы связи для $J_1(X)$, $J_2(X)$ приведены на рис. 7, рис. 8.

Для решения задачи многокритериальной оптимизации выбраны основные частные критерии $J_1(X)$, $J_2(X)$, характеризующие максимальную загрузку и минимальный простой каналов связи двухканальной системы, и задача оптимизации рассматривалась как двухкритериальная. Для основных критериев $J_1(X)$, $J_2(X)$ было получено множество Парето-оптимальных решений. Затем, для окончательного выбора решения в качестве дополнительного вводился критерий $J_3(X)$ обеспечивающий синхронизацию каналов связи, минимальное значение, которого отыскивалось среди множества Парето-решений, полученных по критериям $J_1(X)$, $J_2(X)$.

Результат оптимизации для одной из реализаций решения двухкритериальной задачи с использованием критериев $J_1(X)$, $J_2(X)$ приведен на рис. 9, на котором выполнено отображение плоскости параметров (множества Парето решений) на критериальную плоскость (множества Парето векторных решений). Точки, соответствующие минимумам критериев $J_1(X)$, $J_2(X)$, соединены прямой, являющейся отображением фронта Парето на плоскость параметров системы связи. Видно, что «особи» ГА, расположены вокруг фронта Парето.

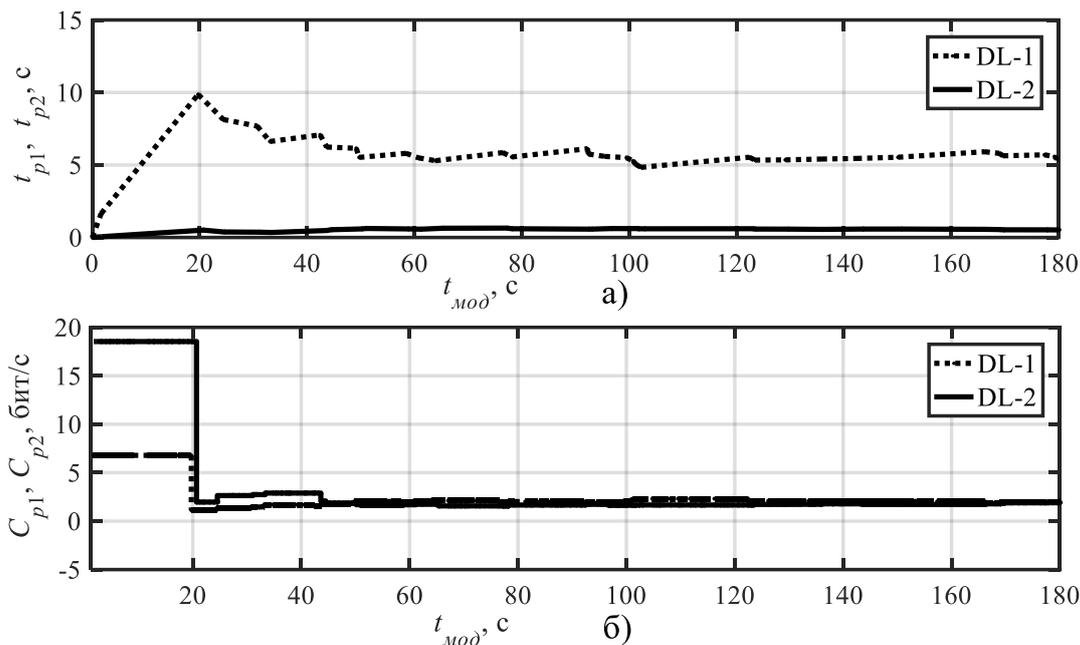


Рис. 7. Характеристики двухканальной системы связи при $J_1(X) \rightarrow \min$:
 а) изменение времени пребывания заявок в каналах связи;
 б) изменение показателей пропускных способностей каналов связи

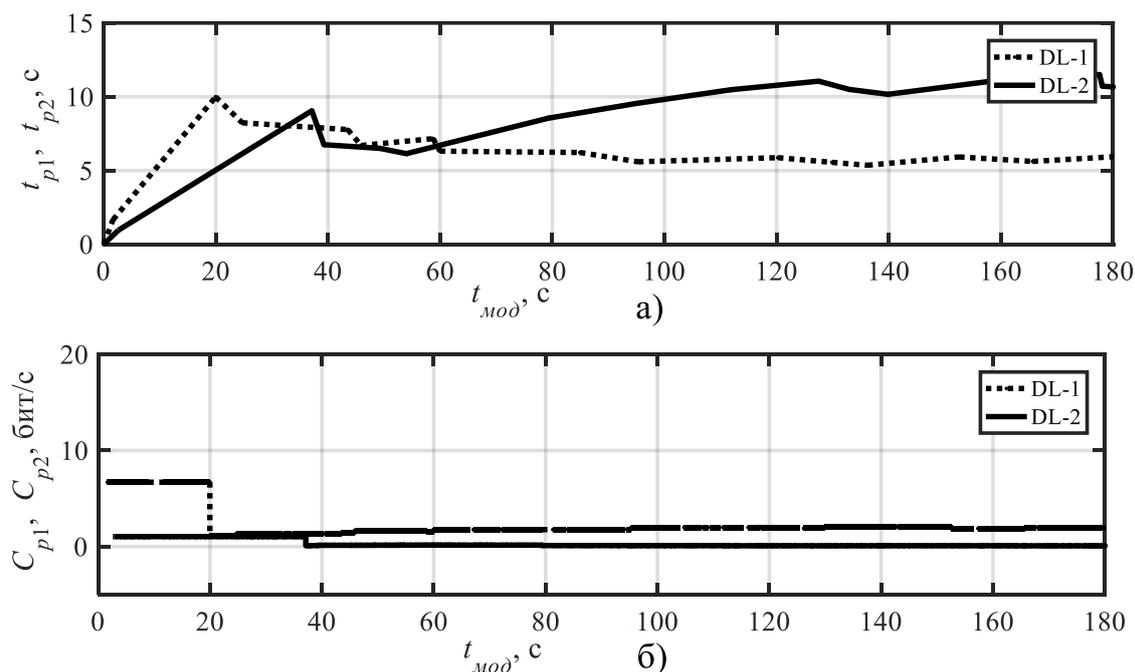


Рис. 8. Характеристики двухканальной системы связи при $J_2(X) \rightarrow \min$:
 а) изменение времени пребывания заявок в каналах связи;
 б) изменение показателей пропускных способностей каналов связи

Целью оптимизации являлось получение минимальных показателей пропускных способностей C_1, C_2 при выполнении условия синхронизации, т.е. при $t_{p1} = t_{p2}$. В результате привлечения критерия $J_3(X)$ из множества точек Парето-оптимальных решений выбрано единственное, соответствующее минимуму

критерия $J_3(X)$, которое обозначено на рис. 9, а кружком и стрелкой показан соответствующий ему выделенный элемент множества Парето-оптимальных решений (рис. 9, б).

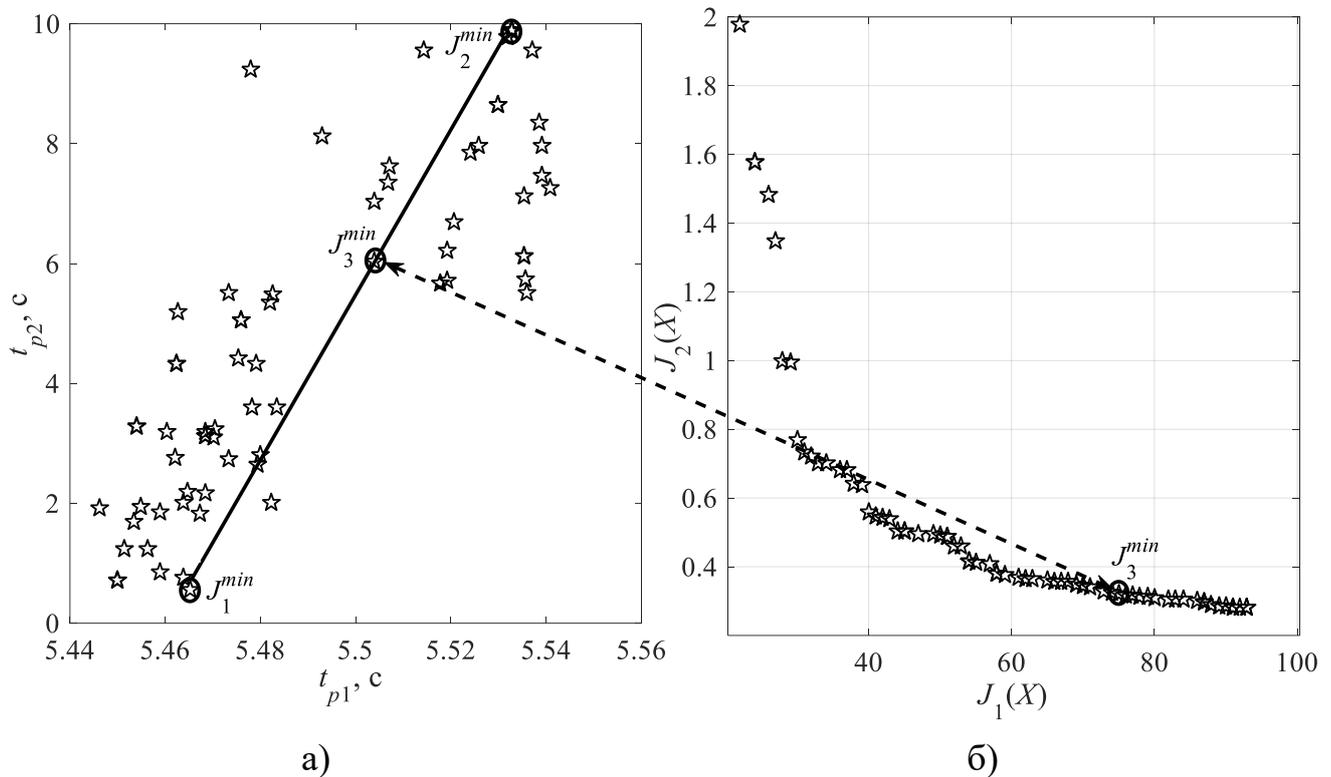


Рис. 9. Отображение параметрического пространства в критериальное при оптимизации параметров двухканальной системы связи с помощью ГА: а) множество Парето-решений на параметрической плоскости; б) множество Парето для критериев $J_1(X)$, $J_2(X)$

В проведенном имитационном моделировании при заданных параметрах ГА и $J_3(X) \rightarrow \min$ синхронизация каналов связи DL-1 и DL-2 достигается при значении времен занятия каналов связи $t_p = t_{p1} = t_{p2} = 5,5$ с. График $J_3(X)$ и графики времен занятия каналов связи DL-1 и DL-2 приведены на рис. 10. Точка пересечения графиков времен занятия каналов связи DL-1 и DL-2 (рис. 10 б) соответствует моменту синхронизации.

Процесс настройки синхронизации с помощью ГА при привлечении критерия $J_3(X)$ отображен на рис. 11.

Из рис. 11, а видно, что с привлечением критерия $J_3(X)$ ГА течение 80 с. осуществляет настройку параметров двухканальной системы связи. Таким образом, обеспечивая синхронную передачу данных с минимально необходимыми показателями пропускными способностями $C_1 = 2,0384$ Мбит/с, $C_2 = 0,186$ Мбит/с. Значение финансовых (или материально-технических) издержек, описываемых формулой (4), при подстановке показателя пропускной способности C_2 , тех же $m = 0,01$ у.е./(Мбит/с) и $l = 1$ у.е./с, будет составлять $f = 0,0464$ у.е.

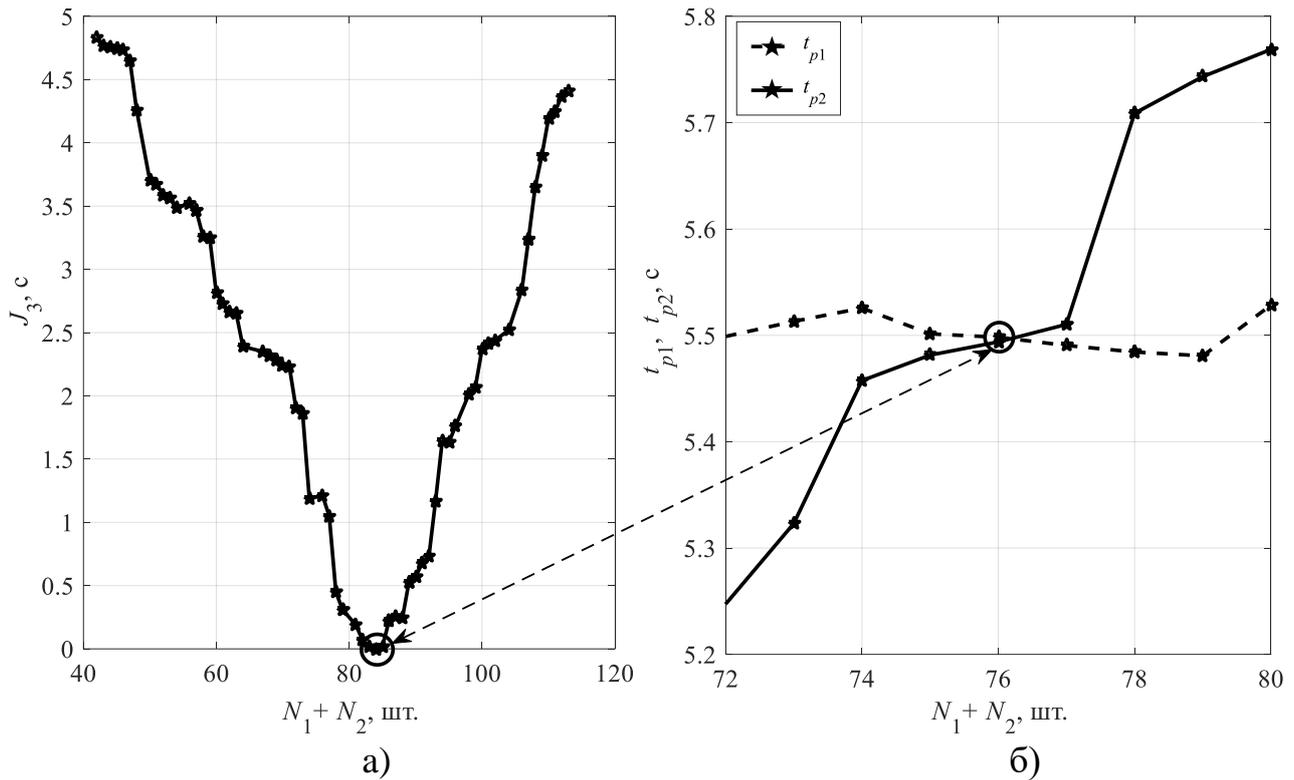


Рис. 10. Характеристики при синхронизации каналов связи: а) график функции $J_3(X)$; б) графики длительности занятия каналов связи DL-1 и DL-2

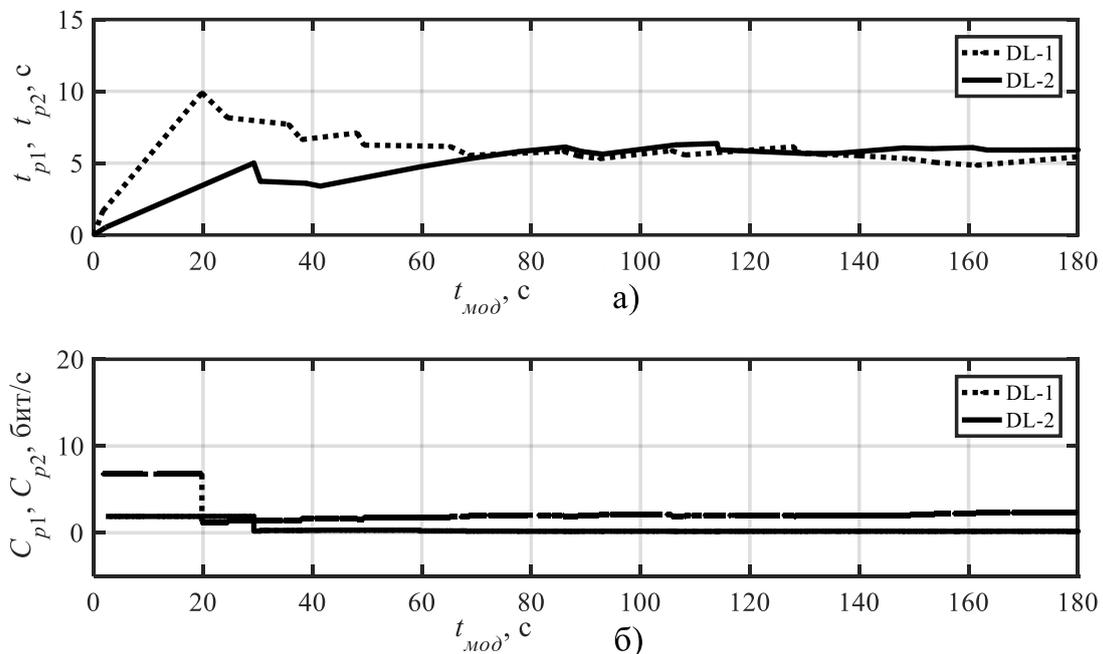


Рис. 11. Характеристики двухканальной системы связи при $J_3(X) \rightarrow \min$:
 а) изменение времени занятия каналов связи; б) изменение пропускных способностей каналов связи

Учитывая допустимое минимально приемлемое соотношение сигнал/шум для установления связи от 15 дБ до 25 дБ, получено, что ширина полосы пропускания частот для первого канала связи составляет $B_1 = 406$ кГц, а для второго, соответственно, $B_2 = 37$ кГц.

В таблице 1 приведены параметры двухканальной системы связи, полученные при помощи аналитического расчета и имитационного моделирования для разных форматов качества входящих потоков видеоданных. Видно, что значения, полученные при помощи имитационного моделирования, в допустимых пределах совпадают со значениями, полученными при аналитическом расчете, что подтверждает пригодность применяемых методов используемых в предлагаемой авторами методике.

Таблица 1 – Сравнение параметров.

Формат качества	Параметры системы связи								$f(C_1^a, C_2^a)$, у.е.	$f(C_1^u, C_2^u)$, у.е.
	C_1^a , Мбит/с	B_1^a , кГц	C_1^u , Мбит/с	B_1^u , кГц	C_2^a , Мбит/с	B_2^a , кГц	C_2^u , Мбит/с	B_2^u , кГц		
LQ	0,975	194	1,064	212	0,087	18	0,095	19	0,026	0,027
SD	1,669	332	1,797	358	0,149	30	0,160	32	0,036	0,037
HD	2,027	403	2,038	406	0,181	36	0,182	37	0,044	0,046
FullHD	5,278	1050	5,454	1085	0,472	94	0,487	97	0,072	0,074
2K	27,55	5480	30,82	6130	2,46	490	2,75	547	0,317	0,351
4K	88,12	17526	90,31	17962	7,85	1562	8,07	1606	0,976	1,163

$C_1^a (C_1^u)$ – показатель пропускной способности канала связи DL-1, полученный аналитическим (имитационным) подходом;
 $B_1^a (B_1^u)$ – ширина полосы пропускания частот канала связи DL-1, полученная аналитическим (имитационным) подходом;
 $C_2^a (C_2^u)$ – показатель пропускной способности канала связи DL-2, полученный аналитическим (имитационным) подходом;
 $B_2^a (B_2^u)$ – ширина полосы пропускания частот канала связи DL-2, полученная аналитическим (имитационным) подходом;
 $f(C_1^a, C_2^a) (f(C_1^u, C_2^u))$ – значение затрат (финансовых или материально-технических или иных) направленных на реализацию двухканальной системы связи БПЛА.

Выводы

В статье предложена аналитико-имитационная методика определения оптимальных параметров двухканальной системы связи БПЛА, позволяющая повысить уровень защищенности передаваемых потоков видеоданных между БПЛА и ПУ. Данная методика включает в себя аналитическую оценку нижних границ доверительных интервалов ширины полосы пропускания частот каналов связи и модельные исследования для оптимизации параметров системы связи (по критериям максимизации объема передаваемых данных и минимизации

ширины полосы пропускания частот каналов связи с обеспечением синхронной передачи данных по этим каналам).

Представленное решение по оптимизации параметров двухканальной системы связи БПЛА позволяет оценить возможность применения СРС для обеспечения безопасности видеоданных, передаваемых от технических средств полезной нагрузки БПЛА на ПУ, а также способствует уменьшению показателей пропускных способностей используемых каналов связи. Это в свою очередь позволит сократить ширину полосы пропускания частот системы управления БПЛА и уменьшить издержки на содержание такой системы.

Установлено, что полученные при помощи имитационного моделирования решения в допустимых пределах совпадают со значениями, полученными при аналитическом расчете, что подтверждает пригодность применяемых методов. Среднее расхождение между показателями целевой функции f , полученными с помощью имитационного моделирования, и показателями, полученными аналитическим расчетом, составляет 14 %. Это позволяет сделать вывод о том, что полученные аналитическими расчетами значения могут результативно использоваться в качестве нижних границ критериев двухканальной системы связи БПЛА

Разработанная имитационная модель может использоваться при проектировании системы связи БПЛА или включаться в составе программного обеспечения БПЛА для автоматического определения параметров системы связи при распределенной передаче видеоданных по двум параллельным каналам. Предлагаемые решения в случае сокращения полосы пропускания частот позволят увеличить дальность действия БПЛА.

В дальнейшем представляется перспективным проведение дополнительных аналитических и имитационных исследований, направленных на изучение характеристик двухканальной системы связи БПЛА, где в отношении долей кадров потока видеоданных при разделении их с помощью СРС не выполняется условие $h_1/h_2 \neq \text{const}$. Это позволит использовать СРС, где разделение секрета осуществляется с применением алгоритмов, содержащих в себе датчики случайных чисел, что повышает уровень защищенности передаваемых видеоданных.

Литература

1. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 27.05.2024).

2. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59–65. – URL: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 27.05.2025).

3. Митрофанов Д. Г., Шишков С. В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1(195). С. 28–40.

4. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 2015. № 6 (14). – URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата обращения 27.05.2024).

5. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6 (14). – URL: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (дата доступа 27.05.2024).

6. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.

7. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиоперехватной связи с беспилотными летательными аппаратами // Сибирский аэрокосмический журнал. 2012. Т. 13. № 2. С. 86–91.

8. Винокуров А. В. Анализ уязвимостей комплексов с беспилотными летательными аппаратами и классификация угроз безопасности циркулирующей в них информации // I-methods. 2016. Т. 8. № 1. – С. 5–9.

9. Гель В. Э., Евдокимов Е. В. Обоснование принципов построения канала управления, телеметрии и информационных каналов малогабаритных БПЛА // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. 2016. № 1. С. 69–73.

10. Белов С. Г., Крайлюк А. Д., Меркулов В. И., Чернов В. С. Информационные системы беспилотных комплексов стратегической и оперативной воздушной разведки США // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 1. С. 28–42.

11. Слюсар В. И. Передача данных с борта БПЛА: Стандарты НАТО // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. № 3 (101). С. 80–87.

12. Самойленко Д. В., Финько О. А., Еремеев М. А. Распределённая обработка и защита информации в группировке комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 4. С. 93–100.

13. Самойленко Д. В., Финько О. А. Обеспечение целостности информации в группе беспилотных летательных аппаратов в условиях деструктивных воздействий нарушителя // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 5-6 (107-108). – С. 20–27.

14. Митрашук В. В., Баранова М. П. Программно-аппаратный комплекс защиты телеметрии и телеуправления, специализированного беспилотного летательного аппарата // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. № 5. – С. 585–598.

15. Халютин С. П., Жмуров Б. В. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2010. Т. 1. – С. 425–429.

16. Капелько К. В., Хозулин Э. Ю. Алгоритм оптимизации параметров комбинированной системы электроснабжения электрических беспилотных летательных аппаратов // Вестник ТГТУ. 2022 № 1. – С. 46–54.

17. Карякин В. В. Беспилотные летательные аппараты – новая реальность войны // Проблемы национальной стратегии. 2015. № 3 (30). – С. 130–145.
18. Шаталов Н. В. Особенности классификации БПЛА самолетного типа // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 29. – С 34–39.
19. Каршов Р. С. Классификация беспилотных летательных аппаратов // Проблемы науки. 2016. № 11. – С.10–13.
20. Безруков С. И., Гумелёв В. Ю., Пархоменко А. В., Филиппов Д. А. Классификация беспилотных летательных аппаратов (в контексте современных войн в арабском мире) // Оригинальные исследования (ОРИС). 2020. Т. 10. № 4. С. 66–81.
21. Sagaydak D. A., Faizullin R. T. Model secret sharing schemes in systems transmit video // Computer Optics. 2013. Vol. 37. No. 1. P. 105–112.
22. Файзуллин Р. Т., Сагайдак Д. А. Приложение алгоритма префиксного кодирования массива данных в схеме разделения секрета потока видеоданных // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-2(25). С. 136–140.
23. Михеев В. В., Сагайдак Д. А., Свенч А. А., Файзуллин Р. Р. Алгоритмы обработки информации при передаче и хранении данных, основанные на процедуре разделения секрета // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2012. № 5(27). С. 82–87.
24. Shamir A. How to share a secret // Communications of the ACM. 1979. Vol. 22. No. 11. P. 612–613.
25. Naor M., Shamir A. Visual cryptography // Proceedings EUROCRYPT94. 1995. Vol. 950. P. 1–12.
26. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы и исходный код на С. – М.: Вильямс, 2016. – 842 с.
27. Лавров Д. Н. Схема разделения секрета для потоков данных маршрутизируемой сети // Математические структуры и моделирование. 2002. № 10. С. 192–197.
28. Ефимов В. И., Файзуллин Р. Т. Система мультиплексирования разнесенного TCP/IP трафика // Математические структуры и моделирование. 2002. № 10. С. 170–171.
29. Лавров Д. Н., Дулькейт В. И., Михайлов П. И., Свенч А. А. Анализ надежности алгоритма разделения секрета в сетевых потоках // Математические структуры и моделирование. 2003. № 12. С. 146–154.
30. Гусс С. В., Лавров Д. Н. Подходы к реализации сетевого протокола обеспечения гарантированной доставки при мультимаршрутной передаче данных // Математические структуры и моделирование. 2018. № 2(46). С. 95–101.
31. Багинян А., Долбилов А., Кашунин И., Кореньков В. Балансировка трафика в высоконагруженных системах с помощью протокола TRILL // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 14–19.
32. Денисова, Л. А. Событийное моделирование цифровой системы регулирования // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 261–265.
33. Перепелкин Д. А. Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных

сетей с балансировкой нагрузки // Информационные технологии. 2015. Том 21. № 8. С. 602–610.

34. Эйдус Г. С., Марков В. В., Венедиктов М. Д. Асинхронные адресные системы связи. – М.: Связь, 1968. – 272 с.

35. Шибанов А. П., Кравчук Н. В., Башев А. В., Шибанова О. А. Синхронизация каналов компьютерной сети при передаче трафика реального времени // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 22. С. 53–57.

36. DNS Round Robin // The Technology chronicle [Электронный ресурс]. 26.11.2023. – URL: <https://thetechnologychronicle.blogspot.com/2013/11/dns-round-robin.html> (дата обращения 20.04.2024).

37. Цыбаков Б. С., Папантони-Казакос П. Наилучшая и наихудшая дисциплины передачи пакетов // Проблемы передачи информации. 1996. Т. 32 (4). С. 72–92.

38. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 992 с.

39. Мизина И. А., Кулешова А. П. Протоколы информационно-вычислительных сетей. – М.: Радио и связь, 1990. – 504 с.

40. Zadorozhnyi V., Sagaydak D. Optimization of message transmission when implementing the secret sharing scheme // Informational technologies and mathematical modelling (ITMM-2021). 2022. С. 137–144.

41. Задорожный В. Н., Сагайдак Д. А. Оптимизация передачи сообщений, разделяемых на разные доли, передаваемые по двум разным каналам // Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2021. Т. 1. – С. 59–80.

42. Сагайдак Д. А. Программа, реализующая алгоритм префиксного кодирования видеоинформации, основанного на примитивизации дельта-кода Элиаса в схеме разделения секрета с принципиально малой частью секрета // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. №2013661611, 2013.

43. Шавенько Н. К. Основы теории информации и кодирования. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК. 2012. – 126 с

44. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс. 2003. – 1104 с.

45. Чернов Ю. А. Надежность радиовещания // Электросвязь. 2015. № 2. С. 15–21.

46. Охват цифровыми технологиями. Ноябрь 2011 года. Сектор развития электросвязи. Обеспечение доступности телевидения. Отчет. // ITUCOUNCIL [Электронный ресурс]. 22.05.2024. – URL.: https://www.itu.int/en/ITU-D/Digital-Inclusion/Persons-with-Disabilities/Documents/Making_TV_Accessible-Russian.pdf (дата обращения 22.05.2024).

47. Подивинский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач: – М.: Физматлит, 2007. – 265 с.

48. Карпенко А. П., Митина Е. В., Семенихин А. С. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной

оптимизации // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана). 2012. № 4. С. 1–36.

49. Денисова Л. А. Многокритериальная оптимизация на основе генетических алгоритмов при синтезе систем управления. Монография. Омск.: ОмГТУ, 2014. – 170 с.

50. Макаренко С. И. Интеллектуальные информационные системы. Учебное пособие. – Ставрополь: СФ МГТУ им. М. А. Шолохова. 2009. – 206 с.

51. Кузюрин Н. Н., Мартишин С. А., Храпченко М. В. Генетические алгоритмы в задаче поиска часто встречающихся комбинаций. // Труды Института системного программирования РАН. 2004. Т. 6. С. 109–136.

52. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

53. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.

54. SimEvents Documentation// MathWorks [Электронный ресурс]. 10.02.2024. – URL: <https://ch.mathworks.com/help/simevents/> (дата обращения 10.02.2024).

55. Simulink: software for numerical simulation of continuous processes // MathWorks [Электронный ресурс]. 10.02.2024. – URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink/> (дата обращения 10.02.2024).

56. Deb K., Prapat A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. No. 6 (2). P. 182–197.

57. Diaz-Manriquez A., Toscano G., Barron-Zambrano J H., Tello-Leal E. A review of surrogate assisted multiobjective evolutionary algorithms // Computational Intelligence and Neurosci. 2016. Vol. 2016. P. 1–14.

58. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. Automatic parametric synthesis of a control system using the genetic algorithm // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. No. 1. P. 149–156.

59. Викулов Е. О., Леонов Е. А., Денисова Л. А. Автоматизированное распределение больших объемов данных высоконагруженных система // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 3. С. 146–149.

60. Зеленин С. А., Орлов В. Г. Развитие технологий телевидения высокой четкости // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2013. Т. 13. № 5. С. 155–158.

61. Сколько трафика расходует 1 минута видео в YouTube? // Дзен. Статьи [Электронный ресурс]. 26.11.2023. – URL: <https://dzen.ru/a/X1srH9XhXTDeKaOw?experiment=948515> (дата обращения 20.04.2024).

62. Как рассчитать объем потребляемого сервером трафика// ColoCat [Электронный ресурс]. 22.04.2024. – URL: <https://www.colocat.ru/texts/traffic.html> (дата обращения 22.04.2024).

63. Что такое служебный трафик// Я ИТ специалист или Жизнь ИТшника [Электронный ресурс]. 22.04.2024. – URL: <http://www.denaie.ru/?p=2874> (дата обращения 22.04.2024).

References

1. Rostopchin V. V. *Udarnyebespilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaja oborona – problemy i perspektivy protivostojaniya*. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. *Bespilotnaya aviaciya* [Unmanned aircraft], 2024. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostojaniya (accessed 27 may 2024) (in Russian).
2. Samojlov P. V., Ivanov K. A. Threats of using small-sized UAVs and determining the most effective way to deal with them. *Young scientist*, 2017, no. 45. Available at: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (accessed 27 May 2024) (in Russian).
3. Mitrofanov D. G., Shishkov S. V. Innovative approach to the detection of small-sized. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2018, no. 1 (195), pp. 28-40 (in Russian).
4. Eremin G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. Small-sized drones – a new problem for air defense. *Otvaga*, 2015, no. 6 (14). Available at: <http://otvaga2004.ru/armiya-ivpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (accessed 27May 2024) (in Russian).
5. Eremin G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. *Organization of a system for dealing with small-sized. Communication and Security* Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2020-01/05-Makarenko.pdf> (accessed 27May 2024) (in Russian).
6. Makarenko S. I. *Protivodejstvie bespilotnym letatel'nyim apparatam. Monografija* [Counteracting unmanned aerial vehicles. Monography]. St. Petersburg, High technology, 2020. 204 p. (in Russian).
7. Boev N. M. Analiz komandno-telemetricheskoj radiolinii svyazi s bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Analysis of command-telemetric radio communication line with unmanned aerial vehicles]. *Sibirskij aerokosmicheskij zhurnal*, 2012, vol. 13, no 2, pp. 86–91 (in Russian).
8. Vinokurov A. V. Analiz uyazvimostej kompleksov s bespilotnymi letatel'nymi apparatami i klassifikaciya ugroz bezopasnosti cirkuliruyushchej v nih informacii [Analysis of vulnerabilities of complexes with unmanned aerial vehicles and classification of threats to the security of information circulating in them]. *I-methods*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 5–9 (in Russian).
9. Gel V. E., Evdokimov E. V. Obosnovanie principov postroeniya kanala upravleniya, telemektrii i informacionnyh kanalov malogabaritnyh BPLA [Justification of the principles of constructing a control channel, telemetry and information channels of small-sized UAVs]. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series Natural and Technical Sciences*, 2016, no. 1, pp. 69–73 (in Russian).
10. Belov S. G., Krylyuk A. D., Merkulov V. I., Chernov V. S. Information systems of unmanned strategic and operational air reconnaissance complexes of USA. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2020, no. 1, pp. 28-42 (in Russian).

11. Slusar V. I. Peredacha dannyh s borta BPLA: Standarty NATO [The data transfer from UAV Board: NATO Standards]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2010, vol. 101, no. 3, pp. 80-87 (in Russian).

12. Samoylenko D. V., Finko O. A., Ereemeev M. A. Distributed processing and data protection in the group of complexes with unmanned aerial vehicles. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2017, no. 4, pp. 93-100 (in Russian).

13. Samoylenko D. V., Finko O. A. Providing integrity information group unmanned aerial vehicles under destructive impact pursue. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2017, no. 5-6 (107-108), pp. 20-27 (in Russian).

14. Mitrashchuk V. V., Baranova M. P. Programmno-apparatnyi kompleks zashchity telemekhaniki i teleupravleniya spetsializirovannogo bespilotnogo letatel'nogo apparata [Hardware and software complex for protecting telemetry and telecontrol of a specialized unmanned aerial vehicle]. *Journal of Siberian Federal University. Technics and technology*, 2019, no. 5, pp. 585–598 (in Russian).

15. Khalyutin S. P., Zhmurov B. V. Algorithm for determining the composition and parameters of primary sources of UAV electricity. *Proceedings of the International. Symposium Reliability and Quality*, 2010, vol. 1, pp. 425–429 (in Russian).

16. Kapelko K. V., Khozulin E. Yu. Algoritm optimizatsii parametrov kombinirovannoy sistemy elektrosnabzheniya elektricheskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Algorithm for optimizing the parameters of a combined power supply system for electric unmanned aerial vehicles]. *Transaction of the TSTU*, 2022, no. 1, pp. 46–54 (in Russian).

17. Karyakin V. V. Bespilotnye letatel'nye apparaty – novaya real'nost' vojny [Unmanned aerial vehicles - a new reality of war]. *Problems of national strategy*, 2015, no. 3 (30), pp. 130–145 (in Russian).

18. Shatalov N. V. Osobennosti klassifikatsii BPLA samoletnogo tipa [Features of the classification of aircraft-type UAVs]. *Prospects for the development of information technologies*, 2016, no. 29, pp. 34–39 (in Russian).

19. Karshov R. S. Klassifikatsiya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Classification of unmanned aerial vehicles]. *Problems of Science*, 2016, no. 11, pp. 10–13 (in Russian).

20. Bezrukov S. I., Gumelev V. Yu., Parkhomenko A. V., Filippov D. A. Klassifikatsiya bespilotnykh letatel'nykh apparatov (v kontekste sovremennykh voyn v arabskom mire) [Classification of unmanned aerial vehicles (in the context of modern wars in the Arab world)]. *Original research (ORES)*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 66–81 (in Russian).

21. Sagaydak D. A., Faizullin R. T. Model secret sharing schemes in systems transmit video. *Computer Optics*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 105–112 (in Russian).

22. Faizullin R. T., Sagaydak D. A. Application of a prefix encoding algorithm for a data array in a video data stream secret sharing scheme. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1-2(25), pp. 136–140 (in Russian).

23. Mikheev V. V., Sagaydak D. A., Svench A. A., Faizullin R. R. Algoritmy obrabotki informatsii pri peredache i hranenii dannykh, osnovannye na procedure razdelenii sekreta [Algorithms for processing information during data transmission

and storage, based on the secret sharing procedure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2012, no 5 (27), pp. 82–87 (in Russian).

24. Shamir A. How to share a secret. *Communications of the ACM*, 1979, vol. 22, no. 11, pp. 612–613 (in United Kingdom).

25. Naor M., Shamir A. Visual cryptography. *Proceedings EUROCRYPT'94*, 1995, vol. 950, pp. 1–12 (in Germany).

26. Schneier B. *Protocols, algorithms and source code in C*. New York: Wiley Interscience, 1996. 758 p. (in USA).

27. Lavrov D. N. Skhema razdeleniya sekreta dlya potokov dannyh marshrutiziruemoj seti [Secret sharing scheme for data flows of a routed network]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2002, no. 10, pp. 192–197 (in Russian).

28. Efimov V. I., Faizullin R. T. Sistema mul'tipleksirovaniya raznesennogo TCP/IP trafika [TCP/IP traffic multiplexing system]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2002, no. 10, pp. 170–171 (in Russian).

29. Lavrov D. N., Dulkeit V. I., Mikhailov P. I., Svench A. A. Analiz nadezhnosti algoritma razdeleniya sekreta v setevykh potokah [Analysis of the reliability of the secret sharing algorithm in network flows]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2003, no. 12, pp. 146–154 (in Russian).

30. Guss S. V., Lavrov D. N. Podhody k realizacii setevogo protokola obespecheniya garantirovannoj dostavki pri mul'timarshrutnoj peredache dannyh [Approaches to the implementation of a network protocol for ensuring guaranteed delivery for multi-route data transmission]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2018, no. 2(46), pp. 95–101 (in Russian).

31. Baginyan A., Dolbilov A., Kashunin I., Korenkov V. Balansirovka trafika v vysokonagruzhennykh sistemah s pomoshch'yu protokola TRILL [Equal cost multi pathing in high power systems with TRILL]. *T-Comm*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 14–19 (in Russian).

32. Denisova L. A. Sobytijnoe modelirovanie cifrovoj sistemy regulirovaniya [Event-based modeling of a digital regulation system]. *Omsk Scientific Vestnik*, 2011, no. 3 (103), pp. 261–265 (in Russian).

33. Perepelkin D. A. Konceptual'nyj podhod dinamicheskogo formirovaniya trafika programmno-konfiguriruemykh telekommunikacionnykh setej s balansirovkoj nagruzki [Conceptual approach to dynamic traffic generation of software-defined telecommunication networks with load balancing]. *Informatsionnyye tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 602–610 (in Russian).

34. Eidus G. S., Markov V. V., Venediktov M. D. Asinhronnye adresnye sistemy svyazi [Asynchronous addressable communication systems]. Moscow, Communication, 1968, 272 p. (in Russian).

35. Shibanov A. P., Kravchuk N. V., Bashev A. V., Shibanova O. A. Sinhronizaciya kanalov komp'yuternoj seti pri peredache trafika real'nogo vremeni [Synchronization of computer network channels when transmitting real-time traffic]. *Vestnik of Ryazan state radioengineering university*, 2007, no. 22, pp. 53–57 (in Russian).

36. DNS Round Robin. *The Technology chronicle*. 26 November 2023. Available at: <https://thetechnologychronicle.blogspot.com/2013/11/dns-round-robin.html> (accessed 26 November 2023).

37. Tsybakov B. S., Papantoni-Kazakos P. Nailuchshaya i naihudshaya discipliny peredachi paketov [The best and worst disciplines for packet transmission]. *Problems of Information Transmission*, 1996, vol 32 (4), pp. 72–92 (in Russian).

38. Olifer V. G, Olifer N. A. *Computer networks. Principles, technologies, protocols* [Textbook for universities]. St. Petersburg, Peter, 2016. 992 p. (in Russian).

39. Mizina I. A., Kuleshova A. P. [Protocols of information and computer networks]. Moscow, Radio and Communications, 1990, 504 p. (in Russian).

40. Zadorozhnyi V., Sagaydak D. Optimization of message transmission when implementing the secret sharing scheme. *Informational technologies and mathematical modelling (ITMM-2021)*, 2022, pp. 137–144 (in Russian).

41. Zadorozhny V. N., Sagaydak D. A. Optimizaciya peredachi soobshchenij, razdelyaemyh na raznye doli, peredavaemye po dvum raznym kanalam [Optimization of message transmission, divided into different shares, transmitted through two different channels]. *Control systems, information technologies and mathematical modeling. Materials of the III All-Russian scientific and practical conference with international participation. In 2 volumes*, 2021, vol. 1, pp. 59–80 (in Russian).

42. Sagaydak D. A. Programma, realizuyushchaya algoritm prefiksnogo kodirovaniya videoinformacii, osnovannogo na primitivizacii del'ta-koda Eliasa v skheme razdeleniya sekreta s principial'no maloj chast'yu sekreta [A program that implements a prefix coding algorithm for video information based on the primitivization of the Elias delta code in a secret sharing scheme with a fundamentally small part of the secret]. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia. No. 2013661611, 2013.

43. Shavenko N. K. Osnovy teorii informacii i kodirovaniya. Uchebnoe posobie [Fundamentals of information theory and coding. Tutorial]. Moscow, MIIGAiK, 2012, 126 p. (in Russian).

44. Sklyar B. *Cifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. Moscow, Williams, 2003, 1104 p. (in Russian).

45. Chernov Yu. A. Nadezhnost' radioveshchaniya [Reliability of radio broadcasting]. *Electrosvyaz*, 2015, no. 2, pp. 15–21 (in Russian).

46. Digital inclusion. November 2011. Telecommunication Development Sector. Ensuring accessibility of television. Report. *ITU COUNCIL*. 22 May 2024. Available at: https://www.itu.int/en/ITU-D/Digital-Inclusion/Persons-with-Disabilities/Documents/Making_TV_Accessible-Russian.pdf (accessed 22 May 2024).

47. Podivinsky V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nyh zadach* [Pareto-optimal solutions to multicriteria problems]. Moscow, Fizmlit Publ., 2007, 265 p. (in Russian).

48. Karpenko A. P., Mitina E. V., Semenikhin A. S. Populyacionnye metody approksimacii mnozhestva Pareto v zadache mnogokriterial'noj optimizacii [Population methods for approximating the Pareto set in a multicriteria optimization problem]. *Science and Education: Scientific Publication: Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no 4, pp. 1–36 (in Russian).

49. Denisova L. A. *Mnogokriterial'naya optimizaciya na osnove geneticheskikh algoritmov pri sinteze sistem upravleniya. Monografija* [Multicriteria optimization based on genetic algorithms in the synthesis of control systems. Monograph.]. Omsk, Omsk State Technical University, 2014, 170 p. (in Russian).

50. Makarenko S. I. *Intellektual'nye informacionnye sistemy. Uchebnoe posobie* [Intelligent information systems. Tutorial]. Stavropol. SF MGGU im. M. A. Sholokhova, 2009, 206 p. (in Russian).

51. Kuzyurin N. N., Martishin S. A., Khrapchenko M. V. *Geneticheskie algoritmy v zadache poiska chasto vstrechayushchih kombinacij* [Genetic algorithms in the problem of searching for frequently occurring combinations]. *Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2004, vol 6, pp. 109–136 (in Russian).

52. Anufriev I. E., Smirnov A. B., Smirnova E. N. *MATLAB 7* [MATLAB 7]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 1104 p. (in Russian).

53. Shtovba S. D. *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems using MATLAB]. Moscow, Hot Line-Telecom Publ., 2007. 288 p.

54. SimEvents Documentation. *MathWorks* 26 November 2023. Available at: <https://ch.mathworks.com/help/simevents/> (accessed 26 November 2023).

55. Simulink: software for numerical simulation of continuous processes. *MathWorks* 26 November 2023. Available at: URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink/> (accessed 26 November 2023).

56. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, no. 6 (2), pp. 182-197.

57. Diaz-Manriquez A., Toscano G., Barron-Zambrano J H., Tello-Leal E. A review of surrogate assisted multiobjective evolutionary algorithms. *Comput. Intelligence and Neurosci*, 2016, vol. 2016, pp. 1–14.

58. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. Automatic parametric synthesis of a control system using the genetic algorithm. *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 1, pp. 149–156 (in Russian).

59. Vikulov E. O., Leonov E. A., Denisova L. A. *Avtomatizirovannoe raspredelenie bol'shih ob'emov dannyh vysokonagruzhennyh sistema* [Automated distribution of large volumes of data from highly loaded systems]. *Dynamics of systems, indicators and machines*, 2014, no. 3, pp. 146–149 (in Russian).

60. Zelenin S. A., Orlov V. G. *Razvitie tekhnologij televideniya vysokoj chetkosti* [Development of high-definition television technologies]. *Fundamental problems of radio-electronic instrument making*, 2013, vol. 13, no. 5, pp. 155–158 (in Russian).

61. How much traffic does 1 minute of YouTube video consume? *Zen. Articles*. 26 November 2023. Available at: <https://dzen.ru/a/X1srH9XhXTDekaOw?experiment=948515> (accessed 26 November 2023).

62. How to calculate the amount of traffic consumed by a server. *ColoCat*. 26 November 2023. Available at: <https://www.colocat.ru/texts/traffic.html> (accessed 26 November 2023).

63. What is service traffic. *I am an IT specialist or the Life of an IT specialist*. 26 November 2023. Available at: <http://www.denaie.ru/?p=2874> (accessed 26 November 2023).

Статья поступила 17 мая 2024 г.

Информация об авторах

Сагайдак Дмитрий Анатольевич – аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления». Омский государственный технический университет. Область научных интересов: защита информации, автоматизация процессов, мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. E-mail: sagaydak.dmitriy@gmail.ru

Денисова Людмила Альбертовна – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления». Омский государственный технический университет. Область научных интересов: оптимизация процессов. E-mail: denisova@asoiu.com

Адрес: 644050, Россия, г. Омск, Мира пр., д. 11.

Secure two-channel video communication system using secret sharing schemes and optimization parameters based on genetic algorithm

D. A. Sagaydak, L. A. Denisova

Problem statement. The need for secure transmission of video data from the technical means of the payload of unmanned aerial vehicles (UAVs) is currently increasing due to the current geopolitical tensions. One of the ways to protect against threats related to the interception of transmitted video data streams from the UAV to the control panel (CP) is encryption. However, its application requires an increase in computing and hardware resources and can cause delays in the playback of the decrypted video data stream. The use of information protection methods based on secret sharing schemes (where the secret is divided into two shares, each of which is transmitted via a separate channel of a two-channel UAV communication system) reduces the need for computing and hardware resources of the UAV, but imposes additional conditions associated with the need to use two communication channels with the required bandwidth and width frequency bandwidth. **Purpose.** Increasing the level of security of transmitted video data streams by creating an analytical and simulation technique that allows determining the optimal parameters of a two-channel UAV communication system, ensuring a decrease in the bandwidth of communication channels and an increase in the volume of transmitted video data during synchronous transmission of fractions of frames of these video data obtained as a result of the use of a secret separation scheme (SSS). **Methods and technologies used.** To solve this problem, the analytical method of queuing theory is used (calculating the bandwidth of each of the UAV two-channel communication channels) and a simulation method for optimizing the parameters of a two-channel UAV communication system using a genetic algorithm (in the MATLAB/Simulink/Simevents environment). **Novelty.** An analytical and simulation approach is proposed for determining the optimal parameters of a two-channel UAV communication system, including an analytical assessment of the lower bounds of the confidence intervals of the bandwidth of communication channels in conjunction with model studies to optimize the parameters of a two-channel communication system (according to criteria for maximizing the volume of transmitted data and minimizing the bandwidth of communication channels with synchronous data transmission over these channels), which allows to increase the level of security of the transmitted video data streams. **Result.** The use of the presented solution for optimizing the parameters of a two-channel UAV communication system makes it possible to evaluate the possibility of using SSS to ensure the safety of video data transmitted from the technical means of the UAV payload to the control unit, and also reduces the redundancy of the bandwidth of the communication channels used, thereby reducing the bandwidth of the UAV control system, and reduce the cost of maintaining such a system and increase the range of the UAV. It is established that the solutions obtained using simulation coincide within acceptable limits with the values obtained during analytical calculation, which confirms the suitability of the methods used. **Practical significance.** The developed simulation model can be used in the design of the UAV communication system or included as part of the UAV software to automatically determine the parameters of the communication system

during distributed transmission of video data over two parallel channels. The proposed solutions will increase the range of the UAV and reduce the logistical costs associated with the maintenance of UAV-CP communication channels.

Key words: two-channel UAV communication system, secret sharing, distributed video data transmission, communication channel bandwidth, frequency bandwidth, simulation modeling, Pareto optimization, genetic algorithm.

Information about Authors

Dmitriy Anatolyevich Sagaydak – Postgraduate at the Department of Automated Information Processing and Control Systems. Omsk State Technical University. Field of research: information security, process automation, monitoring of information resources; collection and processing of information. E-mail: sagaydak.dmitriy@gmail.ru

Lyudmila Albertovna Denisova – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor at the Department of Automated Information Processing and Control Systems. Omsk State Technical University. Area of scientific interests: process optimization. E-mail: denisova@asoiu.com

Address: Russia, 644050, Omsk, Mira prospekt, 11.