

УДК 621.396.946

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.23

МОДЕЛЬ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ КОМАНДНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ С ФОРМИРОВАНИЕМ МАРШРУТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ПОМЕХОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАДИОКАНАЛ

А. В. Харченко^а, доктор техн. наук, доцент

И. А. Ушаков^а, адъюнкт

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Введение: при решении задач управления космическими аппаратами сетевые технологии реализуются в наземно-космических командно-информационных сетях и обладают существенными преимуществами перед технологиями, используемыми в настоящее время, с точки зрения глобальности и гибкости применения связанного ресурса космического сегмента ретрансляции в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканалы информационного обмена с космическими аппаратами. **Цель:** разработка модели и алгоритмов маршрутизации сообщений в наземно-космических командно-информационных сетях. **Результаты:** разработана математическая модель на основе неориентированного взвешенного графа, описывающая функционирование перспективной наземно-космической командно-информационной сети в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканалы информационного обмена с космическими аппаратами. Представлен обобщенный алгоритм маршрутизации сообщений в исследуемой сети, который базируется на алгоритме поиска кратчайшего пути в заданной метрике в графах с динамической структурой. Работа алгоритма основана на определении оптимального маршрута доведения информации до космического аппарата-абонента при формировании в наземно-космической командно-информационной сети «виртуального» канала. Особенностью используемого в модели алгоритма маршрутизации сообщений является его масштабируемость и возможность применения как в полностью связанной, так и в неполностью связанной наземно-космической командно-информационной сети. **Практическая значимость:** разработанная модель позволяет методом имитационного моделирования исследовать вероятностно-временные характеристики управления и информационного обмена с космическими аппаратами по сетевой технологии. Представленные результаты моделирования демонстрируют возможности повышения показателей глобальности и оперативности управления космическими аппаратами по сетевой технологии в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканалы космического сегмента ретрансляции.

Ключевые слова — управление космическими аппаратами, спутник-ретранслятор, сетевая технология, алгоритм маршрутизации.

Введение

Поддержание в готовности космических аппаратов (КА) и их эффективное применение по назначению обеспечивается системами управления КА. Состав и характеристики средств системы управления КА, а также принятая технология управления КА должны удовлетворять требованиям к управлению КА соответствующей космической системы. В зависимости от типа КА к объему операций управления и качеству их выполнения могут предъявляться различные требования, при этом общими требованиями к управлению КА являются глобальность и оперативность управления [1].

В современных условиях совершенствование технологий управления КА происходит путем перехода к новым структурам системы управления КА. Перспективным направлением развития технологий управления является переход от управления КА при их нахождении в зоне радиовидимости наземных радиоэлектронных средств к управлению через спутники-ретрансляторы (СР). Это позволит перейти от существующей

структуры системы управления КА с многопунктным наземным комплексом управления к системе управления КА с малопунктным наземным комплексом управления и космическим ретрансляционным сегментом, который реализуется с помощью космических командно-ретрансляционных систем (КРС) [2, 3].

К настоящему времени в нашей стране и за рубежом накоплен опыт использования КРС на основе высокоорбитальных геостационарных СР [4, 5]. При этом одним из направлений дальнейшего развития КРС является переход к совместному использованию в космическом ретрансляционном сегменте наряду с высокоорбитальными низкоорбитальными СР [2, 6]. Это обуславливается наличием известных недостатков и достоинств у каждого из вариантов построения КРС в отдельности. Объединение в единую структуру позволяет использовать в полной мере достоинства каждой системы и нивелировать их недостатки. Рассматриваемая наземно-космическая командно-информационная сеть (НККИС) представляет собой систему управления КА, которая в общем виде состоит из малопунктного территориально

разнесенного наземного комплекса управления (НКУ), КА-абонентов, являющихся объектами управления, и космического ретрансляционного сегмента. Совместно данные элементы образуют сетевую структуру.

Наземно-космическая командно-информационная сеть

Наземный комплекс управления, входящий в состав НККИС, включает в себя центр управления полетами (ЦУП), который формирует информационные сообщения и производит расчет маршрута передачи данных сообщений на борт КА-абонентов; сеть радиоэлектронных систем (РЭС) управления КА, которые осуществляют операции по управлению КА-абонентами и СР, входящими в состав НККИС, непосредственно при прохождении КА в зоне радиовидимости либо с ретрансляцией через космический сегмент НККИС, а также наземную систему информационного обмена.

В общем случае НККИС является неполно-связной, и в ней могут быть использованы следующие методы информационного обмена:

- ретрансляция сообщений по межспутниковым каналам, образованным бортовой ретрансляционной аппаратурой СР, входящих в состав НККИС [2];

- ретрансляция сообщений с переносом в запоминающем устройстве СР (режим электронной почты) [7];

- передача сообщений через наземную сеть РЭС управления КА [8].

Рассматриваемая структура системы управления КА включает N узлов сети передачи данных, образующих множество L мощностью N , причем

$$N = N_{\text{ЦУП}} + N_{\text{РЭС}} + N_{\text{СР}} + N_{\text{КА}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ЦУП}}$ — количество (мощность подмножества) ЦУП $L_{\text{ЦУП}}$, входящих в состав наземного сегмента НККИС (в частном случае $N_{\text{ЦУП}} = 1$); $N_{\text{РЭС}}$ — количество (мощность подмножества) РЭС $L_{\text{РЭС}}$, входящих в состав наземного сегмента НККИС; $N_{\text{СР}}$ — количество (мощность подмножества) спутников-ретрансляторов $L_{\text{СР}}$, входящих в состав инфокоммуникационной сети в качестве узлов ретрансляции данных; $N_{\text{КА}}$ — количество (мощность подмножества) КА-абонентов $L_{\text{КА}}$, входящих в состав инфокоммуникационной сети в качестве оконечных узлов приема-передачи информации.

Система управления КА должна быть способна выполнять задачи в условиях воздействия внешних мешающих факторов. При этом воздействия могут быть оказаны на РЭС управления КА и космические узлы ретрансляции. К внешним мешающим факторам относятся источники по-

мех, которые попадают в зону радиовидимости узлов ретрансляции в периоды проведения сеансов передачи информации.

Представим систему источников помех множеством Z с мощностью подмножества M . Математическая модель НККИС на сетевом уровне представляет собой неориентированный взвешенный граф $G(A; B)$, имеющий $N + M$ вершин, образующих множество $|A| = \{a_i\}$, $i = \overline{1, N + M}$, и множество ребер B . Каждая из вершин множества A соответствует узлам ретрансляции системы, источникам помех или средствам приема специальной информации, а множество ребер B соответствует радиоканалам между узлами НККИС и внешним мешающим факторам, которые воздействуют на узлы ретрансляции.

Неориентированный граф $G(A; B)$, представленный на рис. 1, включает в себя два частных графа $G'(L; J)$, $G''(Z + L; W)$. При этом граф $G'(L; J) \subset G(A; B)$ определяет структуру и состав системы управления КА с НККИС, граф $G''(Z + L; W) \subset G(A; B)$ определяет влияние источников помех на функционирование рассматриваемой системы управления КА, причем $L \cup Z = A$, а $J \cup W = B$.

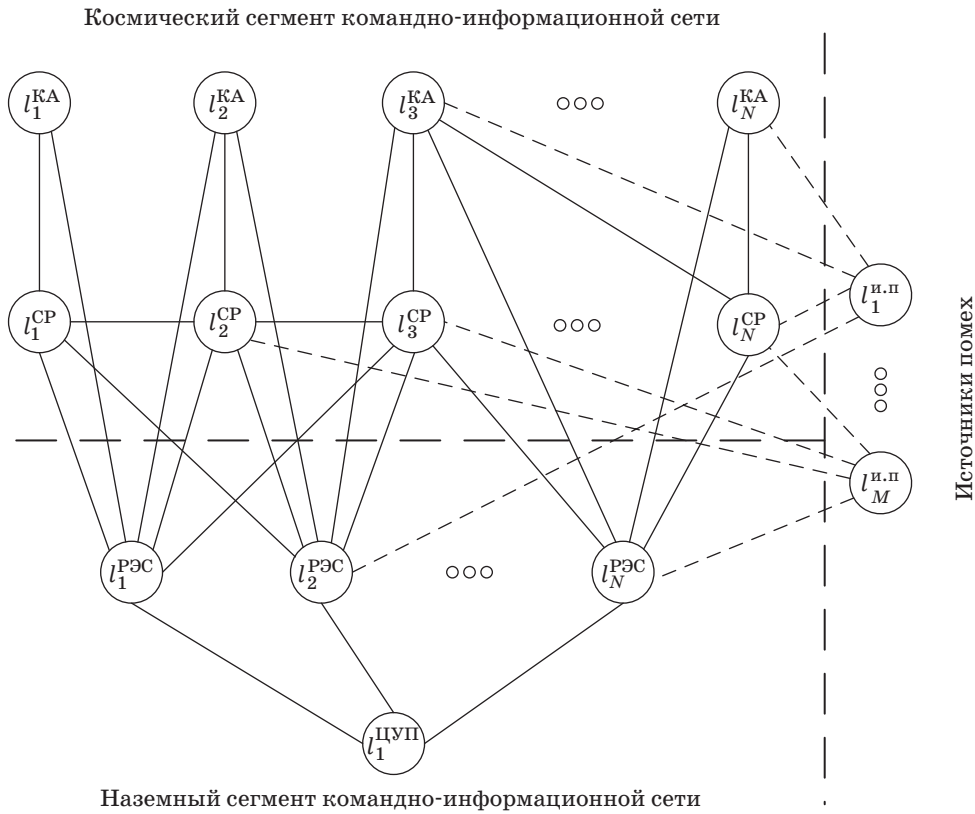
Вследствие движения КА и СР по орбитам их взаимное положение и, следовательно, взаимное положение узлов сети относительно зон радиовидимости других узлов непрерывно изменяется. Непрерывно изменяется во времени и состояние графа $G(A; B)$. В каждый текущий момент времени t каждому ребру j_i , входящему в состав множества $J = \{j_i\}$, $i = \overline{1, N^2}$, поставлена в соответствие пара

$$d_{ij}(t) = \{t_{ij}^{\text{оэк}}(t), \Delta t_{ij}^{\text{в}}\}, \quad (2)$$

где $t_{ij}^{\text{оэк}}(t)$ — время до момента начала очередной зоны взаимной радиовидимости между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами в момент времени t ; $\Delta t_{ij}^{\text{в}}$ — длительность очередной зоны взаимной радиовидимости между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами [4].

Пара $d_{ij}(t)$ однозначно определяет влияние баллистического положения i -го (l_i) и j -го (l_j) ($l_i, l_j \in L$; $i, j = \overline{1, N}$, $i \neq j$) узлов ретрансляции НККИС на возможность передачи информации между ними в момент времени t . Множество пар $d_{ij}(t)$ представим матрицей $\mathbf{D}(t) = \|d_{ij}(t)\|$, $i, j = \overline{1, N}$, причем при $i = j$ будем полагать $d_{ij} \langle \infty \rangle$, что физически означает невозможность ретрансляции сообщения узлом самому себе.

В связи с наличием в НККИС разных типов СР с различной бортовой ретрансляционной аппаратурой скорость передачи информации в радиоканалах между узлами НККИС может отличаться, что непосредственно влияет на время передачи



■ **Рис. 1.** Неориентированный взвешенный граф системы управления космическим аппаратом с НККИС

сообщения. Каждому радиоканалу НККИС l_i из множества $J = \{j_i\}, i = 1, N^2$ в соответствие поставлена пара

$$q_{ij} = \langle q_{ij}^{п.к}, q_{ij}^{о.к} \rangle,$$

где $q_{ij}^{п.к}$ — скорость передачи информации от i -го (l_i) к j -му (l_j) узлу; $q_{ij}^{о.к}$ — скорость передачи информации в обратном канале от j -го (l_j) к i -му (l_i) узлу.

Пара q_{ij} однозначно определяет скорость передачи информации между i -м (l_i) и j -м (l_j) ($l_i, l_j \in L; i, j = \overline{1, N}, i \neq j$) узлами ретрансляции НККИС. Полученное множество пар q_{ij} представлено матрицей $Q = \|q_{ij}\|, i, j = \overline{1, N}$, причем при $i = j$ полагается $q_{ij} < \infty$ так же, как и для $d_{ij}(t)$, что означает невозможность ретрансляции сообщения узлом самому себе.

Каждому ребру w_i , входящему в состав множества $W = \{w_i\}, i = \overline{1, N \cdot M}$, сопоставлен в соответствие вес $u_{ij}(t)$, однозначно определяющий влияние i -го источника помех $z_i \in Z, i = \overline{1, M}$ на j -й узел ретрансляции $l_j \in L; j = \overline{1, N}$ в момент t . Полученное множество весов представим матрицей влияния

$$U(t) = \{u_{ij}(t)\}, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}.$$

Данные множества графа $G(A; B)$ в совокупности составляют множество взвешенных ребер и определяют влияние системы внешних воздействий и баллистического положения узлов системы управления КА на передачу в ней сообщений в момент времени t :

$$G(A, B \{U(t), Q \langle q_{ij}^{п.к}, q_{ij}^{о.к} \rangle, D \langle t^{ож}(t), \Delta t^B \rangle \}).$$

Возможные маршруты передачи сообщения между узлом-отправителем и узлом-получателем сообщения за допустимое время доведения сообщения $\Delta T_{\text{дов max}}$ представлены множеством $\Theta = \{\theta_i\}, i = \overline{1, \eta}$, где η определяет общее количество маршрутов. При этом под маршрутом передачи сообщения понимается множество

$$\theta_i = \langle l_j, \Omega_j^k, t_j \rangle, j = \overline{1, \xi}, \quad (3)$$

где $l_j \in L$ — узел НККИС, на который необходимо передать сообщение в момент времени t_j ; $\Omega_j^k \in \Omega$ — необходимый для передачи сообщения метод информационного обмена; ξ — количество узлов в i -м маршруте ($\xi \leq \xi_{\text{max}}$). Множество $\Omega = \{\Omega^НУ, \Omega^СМ, \Omega^ПП\}$ представляет собой совокупность используемых в НККИС трех методов информационного обмена с КА: непосредственного

управления (НУ), сетевого метода (СМ), ретрансляции с переносом (РП).

Таким образом, задача поиска оптимального маршрута по заданному критерию в системе управления КА с НККИС представлена в виде

$$\mathfrak{J}\left\langle S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle, G(L, B\langle U(t), Q\langle q_{ij}^{п.к}, q_{ij}^{о.к} \rangle) \right\rangle, \quad (4)$$

$$D\langle t^{ожк}(t), \Delta t^B \rangle \Big|_{\zeta} \rightarrow \theta_i^{\zeta},$$

где $\mathfrak{J}(\cdot)$ — функционал, определяющий из множества возможных маршрутов передачи $S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle$ сообщения Θ маршрут θ_i^{ζ} , оптимальный по заданному критерию ζ ; $S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle$ — сообщение, поступившее на передачу в момент времени t_0 на узел $l_s \in L$, предназначенное КА-абоненту; $l_{a\bar{6}} \in L$; $G(\cdot)$ — взвешенный граф системы управления КА с НККИС, однозначно определяющий условия передачи в ней сообщения S .

Для определения матриц влияния $U(t)$ в любой момент времени t каждому элементу $z_i, i = \overline{1, M}$ сопоставлено положение источника помех

$$I(t) = \left\| z_i(X_i(t), Y_i(t), Z_i(t), V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t)) \right\|, i = \overline{1, M}.$$

Для определения матрицы передачи $D\langle t^{ожк}(t), \Delta t^B \rangle$ в любой момент времени t каждому элементу $l_i, i = \overline{1, N}$ из множества L сопоставлено его положение и вектор скорости: $l_i(x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$. Предполагается, что на каждом узле НККИС имеется альманах системы, и положение узлов

$$\Psi(t) = \left\| l_i(X_i(t), Y_i(t), Z_i(t), V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t)) \right\|, i = \overline{1, N}.$$

Рассмотрим критерии оптимальности маршрутов передачи сообщений $S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle$ в НККИС с динамической маршрутизацией информационных потоков с использованием различных режимов передачи сообщения. Эти критерии могут быть различными в различных условиях обстановки, характеризующихся отсутствием или наличием системы внешних воздействий.

При отсутствии системы внешних воздействий $Z=0, |A|=N$ на передачу сообщения в графе $G(\cdot)$ влияет только орбитальное положение узлов КРС в момент времени t и скорость передачи информации между узлами НККИС. В данном случае в качестве критерия оптимальности маршрута ζ целесообразно выбрать минимум времени доведения сообщения до КА-абонента, которое будет складываться из задержек сообщения между узлами маршрута, обусловленных временем передачи сообщения по радиоканалу между i -м (l_i) и j -м

(l_j) узлом. Тогда целевая функция, определяющая длину маршрута передачи сообщения, имеет вид

$$T_{\text{дов}}^i = \Phi(\theta_i) = \sum_{n=2}^{\xi} (t_n^i - t_{n-1}^i). \quad (5)$$

Маршрут, оптимальный по критерию минимума времени доведения сообщения, определяется исходя из условия

$$\min_i T_{\text{дов}}^i = \min_i \Phi(\theta_i) \rightarrow \theta_n^{\xi}, i = 1, \eta, \quad (6)$$

где $t_n^i - t_{n-1}^i$ определяет задержку информационного сообщения в маршруте при его передаче между текущим (l_n) и предыдущим (l_{n-1}) узлами.

При использовании критерия оптимальности (6) для передачи сообщений на КА-абонент будут выбираться маршруты с минимальным временем доведения сообщения. Данный подход обеспечивает максимальную оперативность информационного обмена в выбранной структуре системы управления КА с НККИС, но не обеспечивает максимальную устойчивость управления при воздействии на узлы ретрансляции НККИС. Так, радиоэлектронное подавление одного из узлов на маршруте соответствует минимуму времени доведения сообщения, что приведет к потере сообщения, которое не будет доведено до КА-абонента.

В случае воздействия на НККИС системы внешних воздействий целесообразно использовать минимум времени доведения сообщения с учетом ограничений на используемые методы информационного обмена и ограничений на узлы ретрансляции, находящиеся под воздействием, оказывающим влияние, не позволяющее выполнить передачу сообщения. Данные ограничения вводятся матрицами влияния $U(t)$. В случае невозможности выполнения ретрансляции через узел, находящийся под воздействием факторов, мешающих передаче сообщения, сообщение должно быть передано через другой узел ретрансляции по обходным «виртуальным» каналам, на которые система внешних воздействий не оказывает влияние или оказывает значительно меньшее влияние, позволяющее выполнить передачу сообщения.

Кроме того, если система внешних воздействий оказывает существенное влияние на систему управления КА с НККИС и не позволяет выполнять информационный обмен с КА-абонентом с приемлемой оперативностью (при $\Delta T_{\text{дов}}^i \text{ max}, \eta=0$), возможно использование комплексной целевой функции, позволяющей учитывать как вероятность подавления узлов ретрансляции КРС, так и время доведения сообщения:

$$R_{\text{дов}}^i = \frac{T_{\text{дов}}^i}{p^i}, \quad (7)$$

где $T_{\text{дов}}^i$ — суммарное время доведения сообщения по маршруту θ_i [7]; p^i — вероятность передачи сообщения по маршруту θ_i .

Поскольку в системе управления КА для увеличения устойчивости информационного обмена, как правило, используется обратная связь [2, 9], время передачи сообщения между узлами l_{n-1} и l_n на маршруте представлено в виде

$$t_{\Pi} = t_{\Pi n}, \quad (8)$$

где t_{Π} — время одного цикла передачи информации; n — количество циклов передачи сообщения до получения предыдущим узлом от текущего узла положительной квитанции, которое является случайной величиной.

Время одного цикла передачи информации

$$t_{\Pi} = \frac{V_S}{q_{ij}^{\text{п.к}}} + \frac{S_{ij}}{v_{\text{св}}} + \tau_S + \frac{V_{\text{кв}}}{q_{ij}^{\text{о.к}}} + \frac{S_{ji}}{v_{\text{св}}} + \tau_{\text{кв}},$$

где V_S — объем одного передаваемого пакета сообщения S ; $q_{ij}^{\text{п.к}}$ — скорость передачи информации от i -го (l_i) к j -му (l_j) узлу; S_{ij} — расстояние между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами; $v_{\text{св}}$ — скорость распространения радиоволн в пространстве; τ_S — аппаратная задержка при обработке пакета сообщения S ; $V_{\text{кв}}$ — объем передаваемой квитанции; $q_{ij}^{\text{о.к}}$ — скорость передачи информации в обратном канале от j -го (l_j) к i -му (l_i) узлу; S_{ji} — расстояние между j -м (l_j) и i -м (l_i) узлами; $\tau_{\text{кв}}$ — аппаратная задержка при обработке квитанции.

Для выполнения расчетов времени передачи сообщения принято, что расстояние между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами ретрансляции за время передачи сообщения не изменяется, аппаратная задержка при обработке пакета сообщения S и квитанции также одинаковы и равны τ . Тогда время одного цикла передачи информации рассчитывается как

$$t_{\Pi} = \frac{V_S}{q_{ij}^{\text{п.к}}} + \frac{V_{\text{кв}}}{q_{ij}^{\text{о.к}}} + 2 \left(\frac{S_{ij}}{v_{\text{св}}} + \tau \right).$$

Время передачи сообщения t_{Π} является непрерывной случайной величиной с плотностью распределения вероятности $f(t_{\Pi})$. В общем случае t_{Π} зависит от дальности между предыдущим и текущим узлами и характеристик радиоканалов КРС физического и канального уровней, к которым относятся отношение сигнал/помеха, определяемое дальностью связи и положением узла l_n относительно источников помех; вид используемой в радиоканале обратной связи; используемые методы помехоустойчивого кодирования и структура сигнала. Поскольку подавление узла l_n представляет собой событие, при котором время передачи сообщения t_{Π} между узлами l_{n-1} и l_n превысит время их взаимной радиовидимости

$\Delta t_{n-1,n}^B$, то вероятность передачи сообщения можно определить в виде

$$p_n = P(t_{\Pi} < \Delta t_{n-1,n}^B) = \int_0^{\Delta t_{n-1,n}^B} f_{n-1,n}(t_{\Pi}) dt_{\Pi}, \quad (9)$$

где $f_{n-1,n}(t_{\Pi})$ — плотность распределения вероятности времени передачи сообщения по радиоканалу между узлами l_{n-1} и l_n .

Тогда целевая функция (7) для комплексного критерия оптимальности маршрута сообщения в НККИС, функционирующей в условиях воздействия радиопомех, имеет вид

$$R_{\text{дов}}^i = \Phi_2(\theta_i) = \frac{\sum_{n=2}^{\xi} (t_n - t_{n-1})^i}{\prod_{n=2}^{\xi} p_n^i}. \quad (10)$$

Маршрут, оптимальный по критерию минимума комплексной целевой функции, определяется исходя из условия

$$\min_i R_{\text{дов}}^i = \min_i \Phi_2(\theta_i) \rightarrow \theta_n^{\xi}, \quad i = 1, \eta. \quad (11)$$

Критерий оптимальности (11) позволяет учесть потери при возможном недоставлении сообщения до КА-абонента.

Обобщенный алгоритм маршрутизации передаваемой информации в НККИС

Для реализации в НККИС рассмотренного метода информационного обмена, использующего различные режимы ретрансляции сообщений, узел l_s , на который поступило сообщение $S \langle l_s, l_{\text{аб}}, t_0 \rangle$, должен выполнить определение его маршрута в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рис. 2. Определение оптимального маршрута включает следующие операции.

1. На основании альманаха системы $\Psi(t)$ спрогнозировать положение всех узлов космического ретрансляционного сегмента и определить матрицу передачи

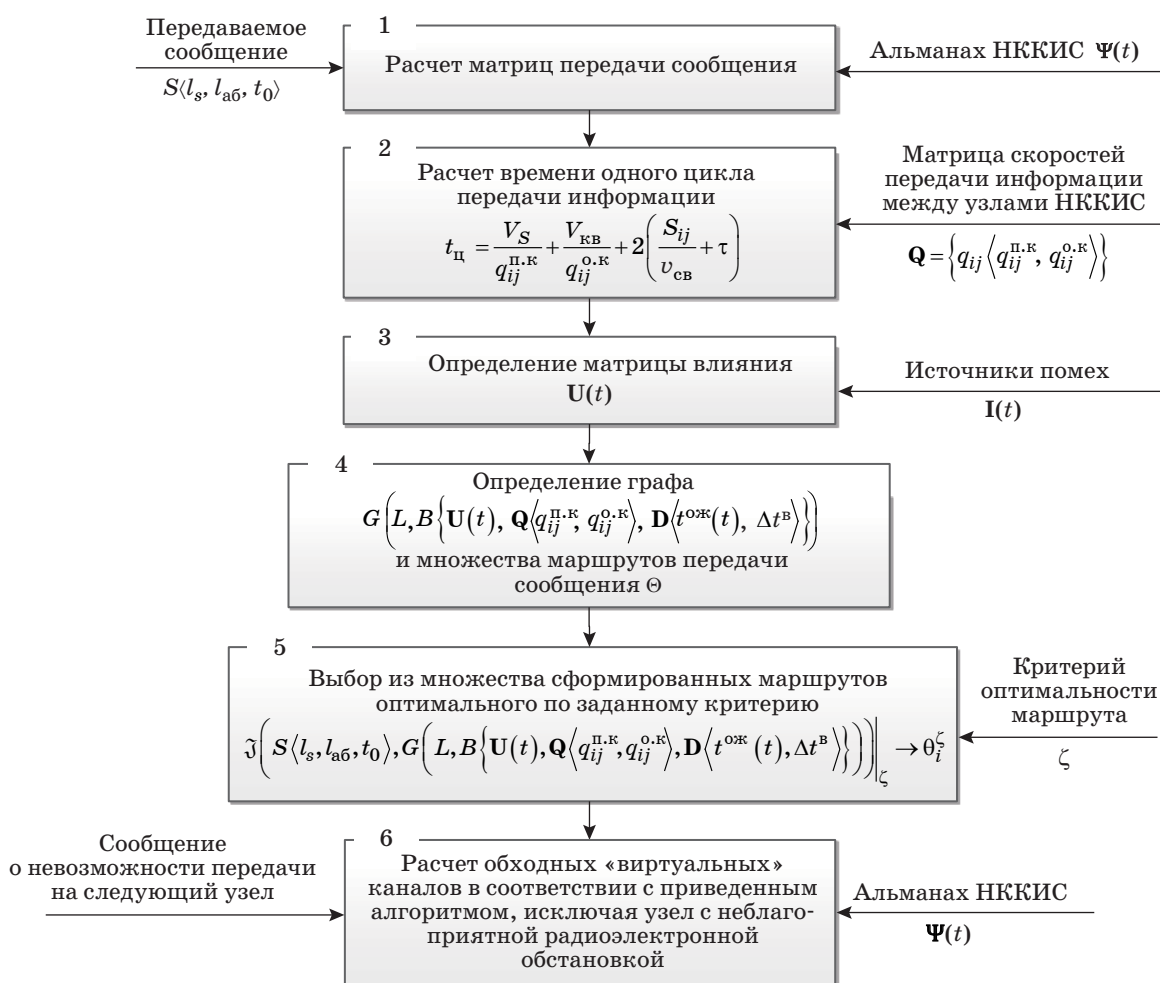
$$\mathbf{D}(t) = \left\{ d_{ij} \left\langle t^{\text{ож}}(t), \Delta t^B \right\rangle \right\}, \quad i, j = \overline{1, N}.$$

2. На основании матрицы

$$\mathbf{Q} = \left\{ q_{ij} \left\langle q_{ij}^{\text{п.к}}, q_{ij}^{\text{о.к}} \right\rangle \right\}, \quad i, j = \overline{1, N}$$

выполнить расчет времени одного цикла передачи информации.

3. Из альманаха системы $\Psi(t)$, данных о положении источников помех $I(t)$ определить матрицу влияния $\mathbf{U}(t)$ на интервале времени, мак-



■ Рис. 2. Обобщенная схема алгоритма формирования маршрута сообщения

симально возможном для передачи сообщения $\Delta T_{\text{дов max}}$. Элементы $u_{ij}(t)$ матриц $U(t)$ в каждый момент времени t определяют воздействие системы внешних воздействий на все узлы НККИС.

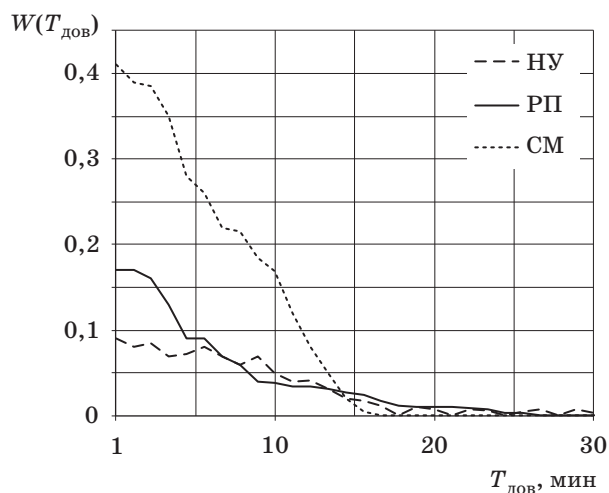
4. Используя полученную матрицу передачи $D(t)$ и матрицы влияния $U(t)$, однозначно определяющие состояние НККИС на интервале времени $\Delta T_{\text{дов max}}$, сформировать взвешенный граф $G(L, B)$, с помощью которого определить множество маршрутов Θ . Данное множество включает в себя маршруты со временем доведения, не превышающим $\Delta T_{\text{дов max}}$. Если получено пустое множество ($\eta=0$), то передать сообщение за время, меньшее $\Delta T_{\text{дов max}}$, невозможно.

5. Согласно выбранному критерию ζ из множества Θ определить оптимальный маршрут $\theta_i^\zeta = \langle l_j, \Omega_j^k, t_{ji}^\zeta \rangle, j = \overline{1, \xi}$, имеющий минимальный суммарный вес, который в общем случае может включать в себя различные методы информационного обмена между узлами в маршруте. Дополнить сообщение $S\langle l_s, l_{ab}, t_0 \rangle$ служебной ин-

формацией, определяющей его маршрут, и в момент времени t_2^ζ передать его на узел l_2^ζ , используя метод информационного обмена Ω_2^ζ . Таким образом, узел l_2^ζ , приняв сообщение и обработав его служебную информацию, располагает данными о следующем узле l_3^ζ в маршруте, времени передачи информации на него t_3^ζ , а также методе информационного обмена с ним Ω_3^ζ .

6. При определении на одном из узлов, входящих в выбранный маршрут передачи сообщения, невозможности дальнейшей передачи в связи с неудовлетворительной радиоэлектронной обстановкой на его борту, используя данные об альманахе системы $\Psi(t)$, произвести расчет обхода данного узла ретрансляции.

Имитационная модель НККИС была разработана и реализована в виде специального программного комплекса в соответствии с общим подходом к моделированию спутниковых радиосетей [10]. Модель позволяет определить время



■ **Рис. 3.** Плотность распределения вероятности доведения информации до КА-абонента через НККИС тремя методами

доставки сообщений в НККИС с заданной баллистической структурой орбитальной группировки. Для этого с привязкой к реальному времени моделируется динамическая топология орбитальной

ной группировки сети, определяется положение СР и зон радиовидимости для РЭС. В дальнейшем результаты, полученные для интересующих интервалов времени и районов расположения абонентов, подвергаются статистической обработке. Одним из полученных результатов (рис. 3) является плотность вероятности времени доведения информации в НККИС.

Заключение

Рассмотренный сетевой алгоритм маршрутизации сообщений представляет собой алгоритм поиска кратчайшего пути в заданной метрике в графах с динамической структурой, который является базовым для управления передачей сообщений при информационном обмене с КА в НККИС. В основе алгоритма лежит определение оптимального маршрута доведения сообщения до КА-абонента при формировании в НККИС «виртуального» канала с возможностью использования принятых в НККИС различных методов ретрансляции. Алгоритм является масштабируемым и может использоваться как в полносвязной, так и в неполносвязной НККИС.

Литература

1. **Кравец В. Г.** Автоматизированные системы управления космическими полетами. — М.: Машиностроение, 1995. — 256 с.
2. **Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф.** Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. — М.: Изд-во МГУЛ, 2003. — 200 с.
3. **Мальцев Г. Н., Стогов Г. В., Терехов А. В.** Перспективы создания комплексов управления космическими аппаратами на базе ключевых технологий // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 2–5.
4. **Бартенев В. А.** и др. Спутниковая связь и вещание: справочник/ В. А. Бартенев, Г. В. Болотов, В. Л. Быков и др. / под ред. Л. Я. Кантора. — М.: Радио и связь, 1997. — 528 с.
5. **Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В.** Спутниковые сети связи. — М.: Альпина Паблицер, 2004. — 536 с.
6. **Мальцев Г. Н.** Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 1. С. 33–39.
7. **Моторин Н. М.** Исследование вероятностно-временных характеристик передачи сообщений в низкоорбитальной спутниковой системе связи в режиме «электронная почта» // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 29–31.
8. **Галькевич А. И.** и др. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных/ А. И. Галькевич, С. О. Владимиров, В. М. Дубровский и др. / под ред. А. И. Галькевича. — Тамбов: Юлис, 2011. — 169 с.
9. **Вейцель В. А.** и др. Радиосистемы управления/ В. А. Вейцель, А. С. Волковский, С. А. Волковский и др. / под ред. В. А. Вейцеля. — М.: Дрофа, 2005. — 416 с.
10. **Важенин Н. А.** и др. Имитационное моделирование спутниковых радиосетей/ Н. А. Важенин, Ю. М. Галантерник, А. А. Каплунов и др. / под ред. Н. А. Важенина. — М.: Изд-во НИИ ТП, 1993. — 80 с.

UDC 621.396.946

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.23

Model of Ground-Space Command Information Network with Data Path Formation under External Interference on Radio Channels

Kharchenko A. V.^a, Dr. Sc., Tech, Associate Professor, shoora1@ya.ru

Ushakov I. A.^a, Post-Graduate Student, kadet.ilia@yandex.ru

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: When solving the problems of spacecraft control, networking technologies are implemented in ground-space command information networks, having significant advantages over the technologies currently in use, due to their globality and flexibility in using connected resources of a space relay segment under external interference affecting the radio channels of information exchange with the spacecrafts. **Purpose:** Our goal is to develop a model and algorithms for routing messages in ground-space command-information networks. **Results:** A mathematical model has been developed based on an undirected weighted graph. The model describes the operation of a prospective ground-space command information network under external interference effects on the radio channels of information exchange with the spacecrafts. The message routing algorithm in the network is based on the search for the shortest path in a given metric in graphs with a dynamic structure. The algorithm determines the optimal route of carrying the information to the spacecraft subscriber when a “virtual” channel is formed in the network. A peculiar feature of the model used in the message routing algorithm is its scalability. It can be used in either a full mesh or partial mesh network. **Practical relevance:** The developed model allows you to use simulation for studying the probabilistic and temporal characteristics of spacecraft control and data exchange on the base of network technology. The presented simulation results demonstrate the ways to achieve higher scores in the globality and speed of spacecraft control with networking under external interference on the radio channels of the space relay segment.

Keywords — Spacecraft Control, Relay Satellite, Networking Technology, Routing Algorithm.

References

1. Kravets V. G. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia kosmicheskimi poletami* [Automated Space Flight Control System]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 256 p. (In Russian).
2. Galanternik Iu. M., Gorish A. V., Kalinin A. F. *Komandno-izmeritel'nye sistemy i nazemnye kompleksy upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Command and Measuring Systems and Ground-Based Spacecraft Control]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi universitet lesa Publ., 2003. 200 p. (In Russian).
3. Mal'tsev G. N., Stogov G. V., Terekhov A. V. The Prospects of Spacecraft Control System Creation on the Basis of Key Technologies. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 5, pp. 2–5 (In Russian).
4. Bartenev V. E., Bolotov G. V., Bykov V. L. *Sputnikovaia sviaz' i veshchanie* [Satellite Communications and Broadcasting]. Ed. by L. Ia. Kantor. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1997. 528 p. (In Russian).
5. Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. *Sputnikovye seti sviazi* [Satellite Communication Network]. Moscow, Al'pina Publ., 2004. 536 p. (In Russian).
6. Mal'tsev G. N. Network Information Technologies in Modern Satellite Communication Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2007, no. 1, pp. 33–39 (In Russian).
7. Motorin N. M. Investigation of Probability-Timing Features of Low Earth Orbit Satellite Message Exchange System in E-Mail Mode. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 5, pp. 29–31 (In Russian).
8. Gal'kevich A. I., Vladimirov S. O., Dubrovskii V. M. *Nizkoorbital'naia kosmicheskaia sistema perdonal'noi sputnikovoi sviazi i peredachi dannykh* [Low-Orbit Space System for Personal Satellite Communication and Data Transmission]. Ed. by A. I. Gal'kevich. Tambov, Iulis Publ., 2005. 169 p. (In Russian).
9. Veitsel' V. A., Volkovskii A. S., Volkovskii S. A. *Radiosistemy upravleniia* [Control Radio Systems]. Ed. by V. A. Veitsel'. Moscow, Drofa Publ., 2005. 416 p. (In Russian).
10. Vazhenin N. L., Galanternik Iu. M., Kaplunov A. A. *Imitatsionnoe modelirovanie sputnikovyykh radiosetei* [Simulation of Satellite Radio]. Ed. by N. L. Vazhenin. Moscow, Nauchno-issledovatel'skii institut tochnykh priborov Publ., 1998. 80 p. (In Russian).