

## АЛГОРИТМЫ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ КАНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*В работе рассмотрены стратегии предоставления каналов в спутниковых низкоорбитальных сетях для систем навигации воздушного движения. Проанализированы стратегии с использованием очередей и резервированием каналов как для новых абонентов, так и для абонентов, которые передаются из других сот. Проведено исследование влияния стратегии на доступность каналов связи в зависимости от поступающей нагрузки в соту. Определены наиболее эффективные стратегии в зависимости от условий работы системы навигации.*

*Ключевые слова: передача обслуживания, предоставление каналов, спутниковые системы.*

**Постановка задачи.** Использование спутниковых сетей позволяет обеспечить постоянную связь между наземными станциями и воздушными платформами в любой точке земного шара, включая моря и океаны. На сегодняшний день приоритетным направлением развития спутниковой связи является использование низкоорбитальных спутниковых созвездий. Такие созвездия находят применение для организации связи в системах навигации воздушного движения. Число участников воздушного движения имеет тенденцию к возрастанию, и при этом не могут не увеличиваться риски, связанные с любыми авиаперелётами. В связи с этим требования к системам навигации воздушного движения растут, а такие системы, в свою очередь, напрямую зависят от надёжности и доступности каналов связи между конкретными воздушными платформами и координирующим центром.

Высота орбит, на которых находятся спутниковые созвездия, лежит в пределах от 160 до 2000 км, период вращения спутника вокруг Земли равен 88-160 мин. соответственно. На основании исследований [1], проводившихся на базе системы Iridium, известно, что прямая видимость между одним конкретным спутником и воздушной платформой длится не более 4-5 минут [2], что не достаточно для успешной координации воздушного движения. По истечении этого времени необходимо выполнять передачу обслуживания платформы (т.е., абонента) другому спутнику. Из этого следует, что общая надёжность системы навигации воздушного движения будет непосредственно зависеть от доступности каналов связи, т.е., фактически, в основном от процедуры передачи обслуживания между спутниками и алгоритма, по которому эта процедура будет осуществляться. Ключевым фактором работы алгоритма передачи обслуживания является стратегия выбора и предоставления каналов абонентам (воздушным платформам), которые уже обслуживаются в системе (передача обслуживания с одного спутника на другой), и новым (поступающим в систему) абонентам. Именно от стратегии предоставления и зависит значение доступности канала связи.

В данной статье рассмотрены различные стратегии предоставления каналов при передаче обслуживания в спутниковых низкоорбитальных телекоммуникационных системах и проведена оценка их эффективности в зависимости от поступающей нагрузки.

**Основное содержание.** Исходные данные для анализа и моделирования были выбраны на основе существующего описания системы Iridium [1]. В этой системе высота спутниковой орбиты приблизительно равна 781 км, наклон составляет 86,4°, период вращения равен 100 минутам. Для упрощения расчётов предположим, что траектории движения абонентов (воздушных платформ) соответствуют прямым линиям и скорость движения постоянна. Поступление новых пользователей в систему соответствует процессу Пуассона, со средним значением  $\lambda$  и интенсивностью обслуживания  $\mu$ . Поступление запросов на передачу обслуживания тоже будем считать Пуассоновским процессом со средним значением  $\lambda \cdot h$ .

Если платформа находится в соте, то среднее время занятия канала (длительности обслуживания контакта) равно  $\frac{1}{\mu}$ .

Существует большое количество различных подходов к моделированию спутниковых систем, отличающихся различными допущениями относительно мобильности обслуживаемых абонентов. Для анализа и моделирования в работе выбраны «Двухмерная модель трафика» [3], и «Приближенная модель трафика» [4].

В двухмерной модели трафика предположено, что в момент установления связи по инициативе абонента все пользователи распределены в соте равномерно, и могут двигаться с равной вероятностью в любую сторону. Также направление движения абонента остаётся постоянным до его выхода за пределы текущей соты. Учитывая все определённые допущения, можно записать:

$$\lambda_H = \frac{P_h(1-B_o)}{1-P_{hh}(1-P_f)} \lambda_o, \quad (1)$$

где  $P_h$  - вероятность того, что пользователь будет обслужен;

$P_{hh}$  - вероятность того, что для нового канала, только что поступившего в систему, потребуется хотя бы один раз совершить процедуру передачи обслуживания;

$B_o$  - вероятность отказа в обслуживании;

$P_f$  - вероятность отказа в передаче обслуживания;

$\lambda_o$  - частота поступления каналов в соту.

В приближенной модели трафика используется более простая формула для вычисления среднего количества занятых каналов (контактов в соте) по сравнению с описанной выше. Но при этом следует учитывать, что эта формула актуальна при незначительных вероятностях отказа в обслуживании новым контактам и незначительных вероятностях прерывания связи для существующих контактов.

$$E(c) \approx \frac{\lambda_o + \lambda_H}{\mu}, \quad (2)$$

где  $E(c)$  – среднее количество контактов в соте.

Рассмотрим различные стратегии предоставления каналов. Для этого примем следующие обозначения: система имеет множество однородных сот, на каждую соту выделено  $S$  каналов. Время занятия канала абонентом подчинено экспоненциальному закону со средним значением  $\mu$ . Частота появления новых контактов и контактов, переключающихся с других сот равна  $\lambda_o$  и  $\lambda_H$  соответственно. Во время моделирования будем работать с одной конкретной сотой, экстраполируя результаты на другие соты.

**Стратегия без приоритета (NPS – non-priority strategy).** В этой стратегии все каналы соты могут с равной вероятностью использоваться как новыми абонентами, так и “приходящими” с других сот, разницы в обработке запросов для обоих случаев нет. Соответственно, вероятность отказа в обслуживании для обоих случаев будет равной. Когда все  $S$  каналов заняты, то любому новому (для текущей соты) абоненту отказывается в обслуживании. Математически это можно описать следующим образом:

$$P_b = P_h = P_s = \frac{\left(\frac{\lambda_o + \lambda_H}{\mu}\right)^S}{S! \sum_{k=0}^S \frac{\left(\frac{\lambda_o + \lambda_H}{\mu}\right)^k}{k!}} \quad (3)$$

где:  $k$  - количество каналов на конкретной итерации.

**Стратегия с очередью и приоритетом (QPS – query priority strategy).** Если в соте при поступлении запроса на приём обслуживания нет свободных контактов, то запрос помещается в очередь. При этом обслуживание абонентов, занимающих каналы на момент поступления запроса, продолжается. Если канал освобождается, то происходит его занятие первым в очереди абонентом. Если же на момент выхода за пределы предыдущей соты (откуда передаётся обслуживание) в новой соте (куда передаётся обслуживание) свободных каналов нет, то в таком случае происходит отказ в дальнейшем обслуживании. Канал остаётся незанятым, если его освободил абонент и в очереди на приём обслуживания заявок не содержится. Математически стратегия описывается следующим образом:

$$P_n \begin{cases} \frac{(\lambda + \lambda h)^n}{n! \mu^n} P_0 & 1 \leq n \leq s-1 \\ \frac{(\lambda + \lambda h)^s \lambda h^{n-s}}{s! \mu^s \prod_{j=1}^{n-s} (\mu + j \mu_w)} P_0 & n \geq s \end{cases} \quad (4)$$

Новым каналам отказывается в обслуживании, когда все  $S$  каналов заняты, соответственно можно записать:

$$P_b = \sum_{n=s}^{\infty} P_n. \quad (5)$$

На итерации моделирования  $n$  вероятность отказа при передаче обслуживания можно рассчитать следующим образом:

$$P_{b2} P_n = 1 - \prod_{j=0}^{n-s} \left[ 1 - \frac{\mu_w}{(\mu + \mu_w)^2 j} \right], \quad (6)$$

соответственно, вероятность неудачной попытки передачи обслуживания можно определить так:

$$P_h = \sum_{n=s}^{\infty} P_{b2} P_n. \quad (7)$$

**Стратегия с резервированием каналов (RCS reservation channel strategy).** При использовании такой стратегии увеличивается вероятность успешной передачи обслуживания за счёт резервирования части каналов для передающихся контактов из других сот. При этом незарезервированные каналы могут использоваться и для поступающих в систему новых абонентов, и для приёма обслуживания из соседних сот. Математически вероятность отказа в обслуживании новому абоненту описывается следующим образом:

$$P_o = \left[ \sum_{j=0}^n \frac{(\lambda + \lambda h)^j}{j!} + \sum_{j=n+1}^s \frac{(\lambda h)^{j-n} (\lambda + \lambda h)^n}{j! \mu^j} \right]^{-1}, \quad (8)$$

соответственно, вероятность отказа при приёме обслуживания из других сот:

$$P_h = P_o \frac{a^s}{s!} (1-r)^n. \quad (9)$$

**Стратегия с резервированием каналов и очередью (QPS + RCS).** Эта стратегия, по сути, является комбинацией двух предыдущих стратегий. Математически такой подход можно описать следующим образом:

$$P(i) = \begin{cases} \frac{(\lambda+\lambda h)^i}{i! \mu^i} P(0) & 0 \leq i \leq s_c \\ \frac{(\lambda+\lambda h)^{s_c} \lambda h^{i-s_c}}{i! \mu^i} P(0) & s_c < i \leq s \\ \frac{(\lambda+\lambda h)^{s_c} \lambda h^{i-s_c}}{s! \mu^s \prod_{j=1}^{i-s} [s \mu + j(\mu_w)]} P(0) & s < i < \infty \end{cases}, \quad (10)$$

где:

$$P(0) = \left\{ \sum_{i=0}^{s_c} \frac{(\lambda+\lambda h)^i}{i! \mu^i} + \sum_{i=s_c+1}^s \frac{(\lambda+\lambda h)^{s_c} \lambda h^{i-s_c}}{i! \mu^i} + \sum_{i=s+1}^{\infty} \frac{(\lambda+\lambda h)^{s_c}}{s! \mu^s} * \frac{\lambda h^{i-s_c}}{\prod_{j=1}^{i-s} [s \mu + j(\mu_w)]} \right\}^{-1}. \quad (11)$$

Соответственно, получим вероятности:

$$P_b = \sum_{i=s_c}^s P(i), \quad (12)$$

$$P_h = \sum_{k=0}^{\infty} P(s+k) P_{fhk}, \quad (13)$$

$$P_{fhk} = 1 - \left( \frac{\mu_w}{\mu s + \mu_w} \right) \prod_{i=1}^k \left\{ 1 - \left( \frac{\mu_w}{\mu s + \mu_w} \right) \frac{1}{(2)^i} \right\}. \quad (14)$$

$P_{fhk}$  – вероятность того, что будет отказано в обслуживании каналу, который занимает в очереди позицию  $k+1$ .

**Стратегия с резервированием каналов для передачи обслуживания и очередями для новых и «старых» контактов.(QPS(Handoff+New) + RCS(Handoff)).**

Такою стратегию необходимо рассматривать в контексте нескольких сот [3], каждая из которых имеет по  $S$  каналов. Используются две очереди  $Q_h$  и  $Q_b$ , для передающихся из других сот и новых контактов соответственно. Размер очередей –  $M_h$  и  $M_b$  соответственно. Контакт, который передаётся из соседней соты, попадает в очередь  $Q_h$  при условии занятости всех каналов  $S$ . Новый контакт, поступающий в эту соту, становится в очередь  $Q_b$ , если все незарезервированные каналы ( $S-S_c$ ) заняты. Контакт, находящемуся в очереди  $Q_h$ , отказывается в обслуживании в том случае, если его время ожидания истекло, и свободные каналы в текущей соте не появились. Работа по такой стратегии представляет собой Марковский процесс. Математическое описание представлено ниже:

$$P_b = \sum_{i=S_c}^{S+M_b} P(i, M_b), \quad (15)$$

$$P_h = \sum_{j=0}^{M_h} P(S+M_h-j). \quad (16)$$

**Результаты моделирования.** Предположим, что трафик от пользователей (контактов) в каждой соте соответствует распределению Пуассона. Также предположим, что:

- длительность одного контакта равна 1 минуте, и подчинена экспоненциальному закону;
- среднее время нахождения в очереди равно 5-ти минутам, и подчинено экспоненциальному закону;
- абоненты, у которых время ожидания в очереди истекло, удаляются из очереди;
- в каждой соте имеется по 10 каналов;

- ограничений по длине очереди нет;
- время моделирования – 10 000с.

На рис. 1 и рис. 2 приведенные результаты моделирования, которые показывают вероятность отказа в обслуживании в зависимости от поступающей нагрузки на систему при передаче контакта из соседней соты и поступлении нового контакта в соту без использования каких-либо стратегий предоставления каналов.

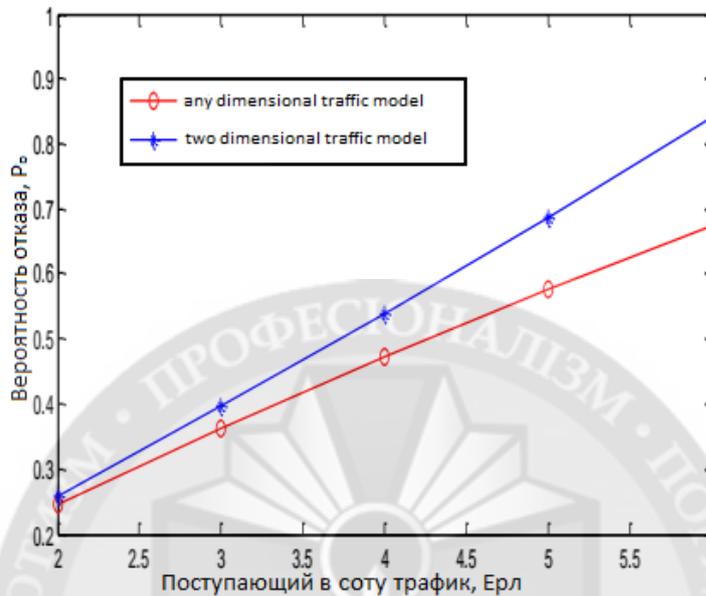


Рис. 1. Зависимость вероятности отказа для новых контактов от нагрузки на систему

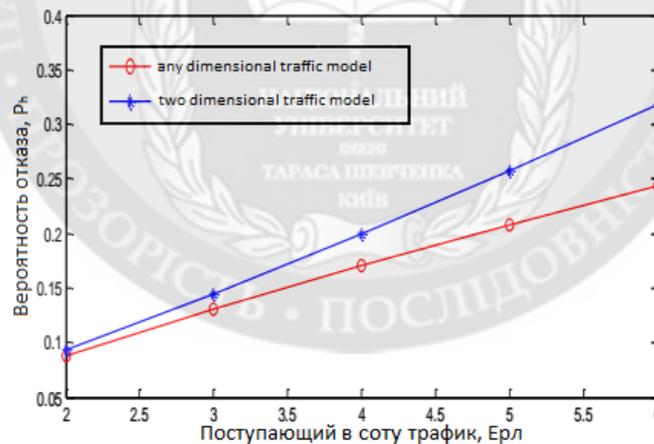


Рис. 2. Зависимость вероятности отказа при передаче обслуживания от нагрузки на систему

На рисунках видно, что более высокие значения вероятностей отказа в обслуживании показала двухмерная модель трафика, потому она была выбрана для дальнейшего моделирования.

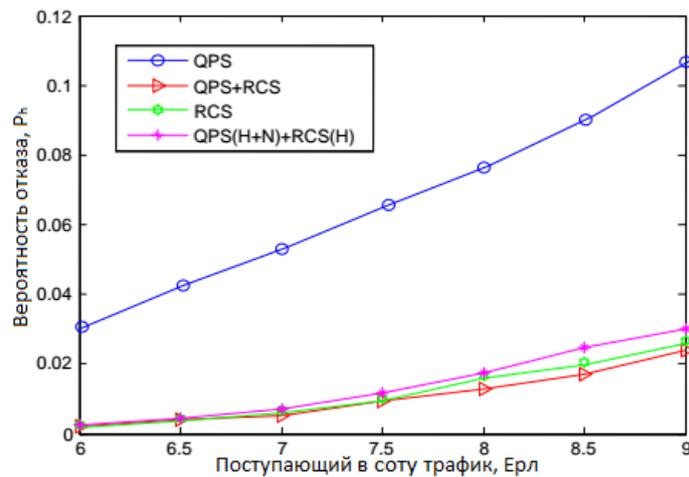


Рис. 3. Зависимость вероятности отказа при передаче обслуживания от поступающей нагрузки на систему для различных стратегий предоставления каналов

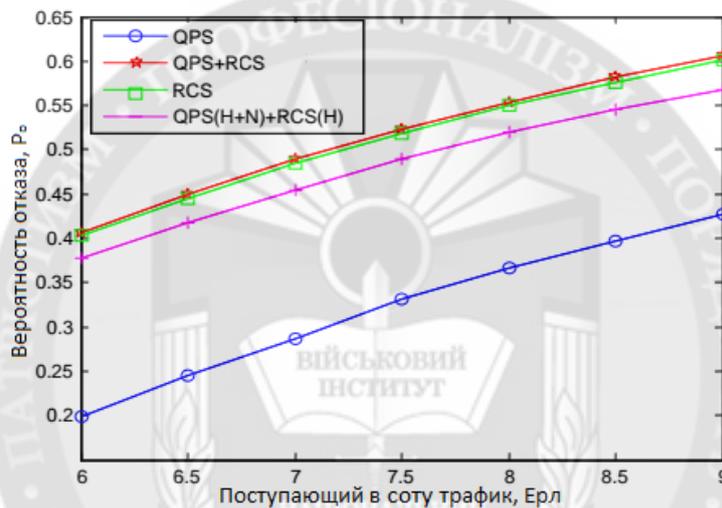


Рис. 4. Зависимость вероятности отказа при запросе на обслуживание от поступающей нагрузки на систему для различных стратегий предоставления каналов

На рис. 3 и рис.4 видно, что применение даже самой простой очереди для передачи обслуживания позволяет существенно понизить вероятность отказа в обслуживании. При этом нельзя выделить некоторую универсальную стратегию, которая показывала бы низкие вероятности как при передаче «старых» контактов, так и при поступлении новых. В значительной степени выделяется стратегия **QPS**, которая показывает более высокие значения вероятностей отказа при передаче обслуживания по сравнению с другими стратегиями. Однако, эти значения вероятностей отказа ниже, чем без использования какой-либо стратегии (**NPS**), и вероятность отказа для новых контактов существенно ниже по сравнению с другими стратегиями. Стратегии **QPS+RCS**, **RCS**, **QPS(H+N) + RCS(H)** по показаниям примерно одинаковы, они показывают вероятность отказа при передаче обслуживания в соту 0.03 при нагрузке в 9 Эрланг. При этом вероятность отказа в обслуживании новым контактам практически соответствует случаю **NPS** при сходных значениях поступающей в соту нагрузки.

**Заключение.** Процедура передачи обслуживания является «узким местом» при обеспечении доступности каналов связи для спутниковой системы навигации воздушного движения. Контакт с воздушной платформой, единожды поступившей в систему, в среднем около 6-8 раз передаётся из одной соты в другую [1]. Соответственно, на одно новое подключение приходится 6-8 подключений, передающихся из других сот. Таким образом,

основываясь на результатах моделирования, приведенных на рис. 3, наиболее продуктивным решением будет применение таких стратегий, как **QPS+RCS**, **RCS**, **QPS(H+N) + RCS(H)**, так как они обеспечивают наиболее низкую вероятность отказа в обслуживании при передаче обслуживания между сотами. При этом между собой их показатели значительных различий не имеют, и выбор конкретной стратегии будет обусловлен такими факторами, как цена оборудования, и т.д.

В случае, если же соотношение между количеством поступающих в систему контактов, и количеством передающихся из других сот будет не более  $\frac{1}{3} - \frac{1}{4}$ , то целесообразным будет применение стратегии QPS, которая является своего рода компромиссом между относительно сложными **QPS+RCS**, **RCS**, **QPS(H+N) + RCS(H)**, и отсутствием стратегии вообще (случай NPS, рис. 1 - 2).

В целом же, применение какой либо стратегии необходимо, так как позволяет уменьшить использование ресурсов, необходимых на организацию дополнительных каналов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Fantacci E. D. Re, R. Handover queuing strategies with dynamic and fixed channel allocation techniques in low earth orbit mobile satellite systems / E. D. Re, R. Fantacci, G. Giambene // IEEE Trans. Commun, vol. 47, issue 1, (1999) Jan, pp. 89–102.
2. Papapetrou E. Satellite handover techniques for LEO networks / E. Papapetrou, S. Karapantazisny, G. Dimitriadis and F. N. Pavlidou // Int. J. Satell. Commun. Network. vol. 22, (2004), pp. 231–245.
3. Zeng Q. Handoff in Wireless Mobile Networks / Q. Zeng and D. P. Agrawal // Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Cincinnati, Edited by Ivan Stojmenovic John Wiley & Sons, Inc (2002), pp. 1-26.
4. Zeng Q. Performance analysis of a handoff scheme in integrated voice/data wireless networks / Q.-A. Zeng and D. P. Agrawal // Proc. IEEE VTC 2000 Fall, vol. 4, (2000) September, pp. 1986–1992.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Міночкін Д.А., Кушніренко І.А.

#### АЛГОРИТМИ НАДАННЯ КАНАЛІВ У СУПУТНИКОВИХ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

*У роботі розглянуті стратегії надання каналів в супутникових низькоорбітальних мережах для систем навігації повітряного руху. Проаналізовано стратегії з використанням черг і резервування каналів як для нових абонентів, так і для абонентів, які передаються з інших сот. Проведено дослідження впливу стратегії на доступність каналів зв'язку в залежності від навантаження, що надходить в соту. Визначено найбільш ефективні стратегії в залежності від умов роботи системи навігації.*

*Ключові слова:* передача обслуговування, надання каналів, супутникові системи.

Ph.D. Minochkin D.A., Kushnirenko I.A.

#### ALGORITHMS OF SATELLITE CHANNEL PROVIDING IN LEO SYSTEMS

*The paper discusses the strategy of low earth orbit satellite channels in networks for navigation systems, air traffic management. Strategies are analyzed using redundant lines and channels for new subscribers and to subscribers which are transferred from other cells. The influence of the selected strategy on the availability of communication channels, depending on the incoming traffic in a cell, is analyzed. The most effective strategies depending on the operating conditions of the navigation system are presented.*

*Keywords:* handover, providing channels, satellite systems.