

УДК.621.391

## БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ КАК СИСТЕМА МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

**Р.В. Киричек**, доцент кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ, к.т.н.; kirichek@sut.ru

**А.И. Парамонов**, доцент кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ, к.т.н.; alex-in-spb@yandex.ru

Предлагается модель взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети со средствами связи беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Предлагаемая модель описывает данное взаимодействие как систему массового обслуживания (СМО) для случаев известных и неизвестных координат узлов USN. Цель аналитического моделирования — выбор скорости движения БПЛА для обеспечения необходимой вероятности считывания данных с узлов сети.

**Ключевые слова:** всепроникающая сенсорная сеть, беспилотный летательный аппарат, сеть толерантная к задержкам DTN, система массового обслуживания, расписание обслуживания.

**Введение.** Развитие приложений концепции Интернета Вещей [1–3] ставит множество новых теоретических и практических задач. Одна из них — построение всепроникающей сенсорной сети (USN) [4, 5], как сети толерантной к задержкам (DTN) [6], с применением БПЛА в качестве средства доставки данных [7]. Эта задача предполагает организацию взаимодействия узлов USN со средствами связи БПЛА с учетом особенностей их движения. Узлы USN некоторым образом (в общем случае случайно) распределены по обслуживаемой территории.

Предположим, что кластеризация наземной сети отсутствует [8, 9], а БПЛА движется по некоторой заданной траектории, определяемой в соответствии с [10]. Тогда основной показатель качества функционирования такой сети, т.е. время сбора и доставки данных, будет зависеть от скорости движения летательного аппарата. Выбор скорости движения ограничен как техническими характеристиками самого летательного аппарата, так и вероятностно-временными характеристиками процесса обмена данными (сообщениями) между средствами связи БПЛА и узлами USN. Можно предположить различные варианты движения БПЛА при выполнении задачи сбора данных: движение с постоянной или изменяемой скоростью, зависящей от характера распределения узлов сети. Второй вариант является более общим и может обеспечить различные требования к взаимодействию с узлами сети. Эти требования могут быть также различны и в общем случае определены вероятностью считывания данных с узла сети.

**Постановка задачи.** Алгоритм выбора траектории движения БПЛА предполагает, что его перемещение за время обмена данными с узлом сети  $s = \tau_0 v$ , где  $\tau_0$  — продолжительность взаимодействия с одним узлом, а  $v$  — скорость движения БПЛА. Она пренебрежимо мала по сравнению с радиусом зоны обслуживания (ЗО), т.е.  $\frac{\tau_0 v}{R} \rightarrow 0$ .

При конечном  $R$  это условие выполняется для всех узлов сети, находящихся в ЗО только при  $v \rightarrow 0$  или  $\tau_0 \rightarrow 0$ , т.е. при неподвижности БПЛА в точке снятия данных или мгновенном их считывании. Если  $v > 0$ ,  $\tau_0 > 0$  и предпола-

гается такое состояние, при котором на границе ЗО (рис. 1), противоположной направлению движения, находятся узлы сети, то они не смогут быть обслужены, так как время их нахождения в зоне  $t_c$  будет равно нулю.

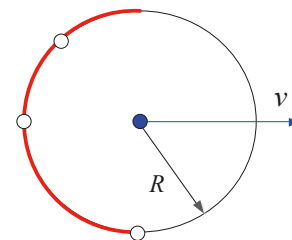


Рис. 1. Не обслуженные узлы на границе зоны обслуживания БПЛА при  $v > 0$

Исходя из времени нахождения узла в ЗО, можно определить границу области, находясь в которой узел будет обслужен при заданной скорости движения БПЛА. Минимальное время равно времени обслуживания  $\tau_0$ , следовательно, расстояние до границы:

$$S_c = v\tau_0.$$

Область, узел из которой может быть обслужен за время  $\tau_0$ , показана на рис. 2.

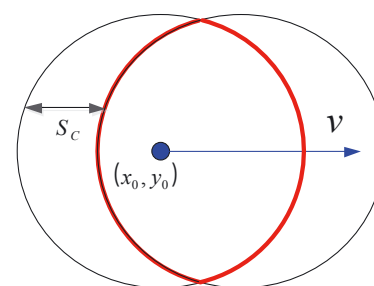


Рис. 2. Область обслуживания БПЛА при  $v > 0$

Таким образом, если в некоторый момент времени  $t$  БПЛА должен провести сеанс связи, двигаясь со скоростью  $v$ , следует выбирать узел из указанной области. Узел, лежащий левее данной области, не может быть обслужен. Приведенные рассуждения справедливы при рассмотрении одного узла. Если в радиусе действия БПЛА находится множество узлов, то на их обслуживание необходимо время большее, чем  $\tau_0$ , что требует отдельного рассмотрения.

При обслуживании множества узлов БПЛА можно рассматривать как СМО. На ее вход поступают заявки (узлы,

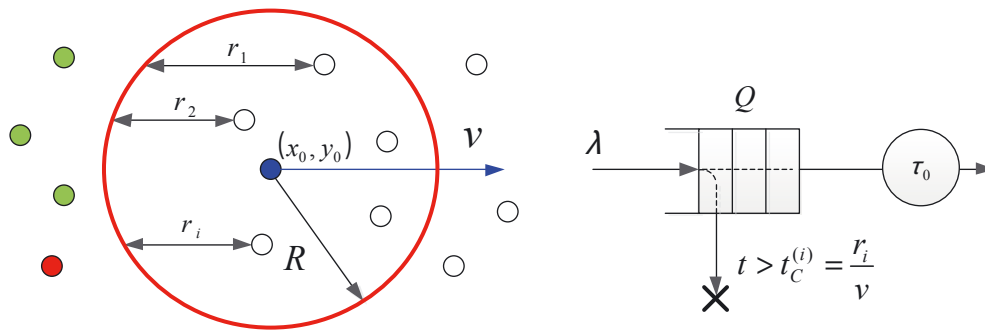


Рис. 3. БПЛА как система массового обслуживания

попадающие в ЗО), которые могут ожидать обслуживания в течение времени их пребывания в зоне доступности. Не обслуженные в течение этого времени заявки (узлы) получают отказ. Интенсивность потока зависит от радиуса ЗО, плотности узлов и скорости движения БПЛА. Для обслуживания узла БПЛА затрачивает некоторое время, в течение периода обслуживания узел должен находиться в зоне доступности (рис. 3).

Задачу обслуживания множества узлов целесообразно рассмотреть для двух типовых случаев. В первом координаты узлов известны, и на вход системы поступает детерминированный поток заявок. Оптимизация функционирования такой системы сводится к выбору правила (расписания) обслуживания узлов. Во втором случае координаты узлов не известны. На вход системы поступает случайный поток заявок. Для выбора режима работы системы требуется определить зависимость вероятности отказа в обслуживании от ее параметров.

**Решение при известных координатах узлов (детерминированный поток заявок).** Пусть в некоторый момент времени в указанной области ЗО находятся несколько узлов. Тогда при скорости перемещения  $v$  максимальное количество

узлов, которые потенциально могут быть обслужены, определяется временем перемещения БПЛА на расстояние  $R$ :

$$k_{MAX} = \left\lfloor \frac{R}{v\tau_0} \right\rfloor. \tag{1}$$

Однако это только потенциально возможное число. Например, если предположить, что все узлы лежат на левой границе указанной области, то можно обслужить только один из них (рис. 4, а). Но если они находятся на прямой, проходящей через центр ЗО и совпадающей с направлением движения БПЛА, а также расположены через интервалы  $\bar{s} = v\tau_0$ , то тогда все узлы могут быть обслужены (рис.4, б).

Разумеется, что это возможно только случае, если обслуживание начать с последнего, т.е. ближайшего к левой границе ЗО узла. Если его начать с первого (крайнего правого) узла, то число обслуженных узлов будет меньше, поскольку часть из них за время обслуживания первого и последующих узлов покинет ЗО. Таким образом, число обслуженных узлов зависит от времени их пребывания в области, т.е. от их положения и очередности обслуживания.

Пусть в области находятся  $k$ -узлов, при этом время пребывания каждого из них

$$\hat{t}_i = \frac{r_i}{v}, \tag{2}$$

где  $r_i$  — расстояние от узла до границы области  $i$ -го узла.

На обслуживание каждого из узлов требуется время  $\tau_0$ . Необходимо выбрать очередность обслуживания, при которой количество обслуженных узлов максимально. Полагаем, что обслуживание начинается в момент времени  $t_1 = 0$ , одновременно обслуживаться может только один узел. Тогда время начала обслуживания  $j$ -го узла равно  $t_j = (j - 1)\tau_0$ .

Для решения задачи требуется определить такую очередность обслуживания узлов, при которой было бы обслужено максимальное их количество. Эту задачу можно решить, сведя ее к задаче о назначениях. Решение требует время  $O(n^3)$ , что в реальной ситуации (для реального числа узлов в ЗО) вполне допустимо.

**Решение при неизвестных координатах узлов (случайный поток заявок).** При неизвестных координатах узлов на вход системы поступает случайный поток заявок (узлов). Свойства этого потока определяются свойствами сенсорного поля (размещением узлов на поверхности), радиусом обслуживания БПЛА и скоростью его движения. Сделаем следующие допущения:

- сенсорное поле представляет собой пуассоновское поле;

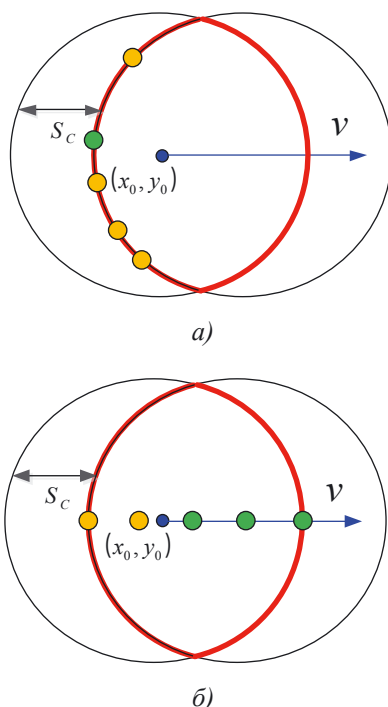


Рис. 4. Различное размещение узлов в ЗО

- будем полагать, что БПЛА движется прямолинейно с постоянной скоростью  $v$ ;
- ЗО представляет собой круг с радиусом  $R$ .

Определим функцию распределения для входящего потока заявок. Для этого рассмотрим зону обслуживания БПЛА в моменты времени 0 и  $t$ . За время  $t$  в систему поступят те заявки (узлы), которые находятся в области, изображенной на рис. 5. Согласно свойствам пуассоновского поля, вероятность того, что в некоторой области находятся  $n$  точек (узлов) определяется распределением Пуассона и зависит только от площади этой области.

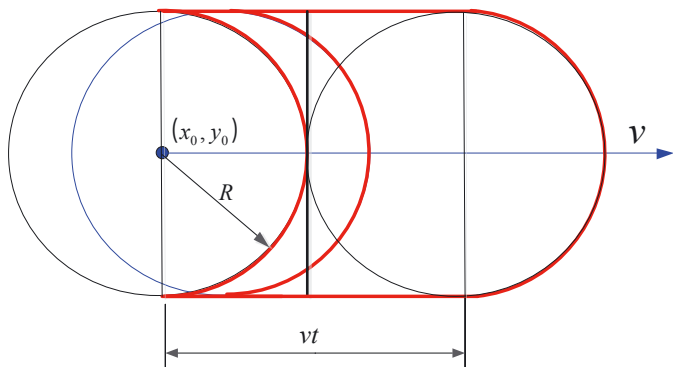


Рис. 5. Вероятность попадания  $n$  узлов в область  $S$

Вероятность того, что в области  $S$  окажутся  $m$  заявок (узлов) равна

$$p_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \tag{3}$$

где  $a = \rho S$ ;  $\rho$  — число точек (узлов) на единицу площади;  $S(t)$  — площадь области. Тогда

$$p_m(t) = \frac{(\rho S(t))^m}{m!} e^{-\rho S(t)}. \tag{4}$$

Площадь области, изображенной на рис. 10:

$$S(t) = 2Rvt. \tag{5}$$

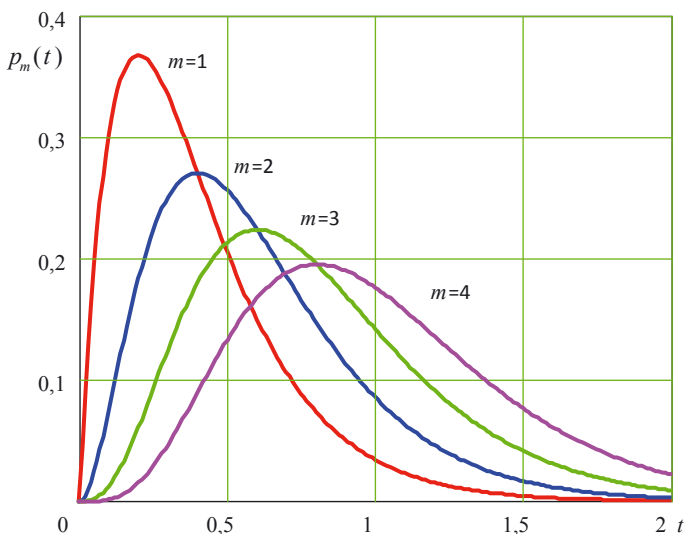


Рис. 6. Функция распределения числа заявок

Интенсивность потока, т.е. среднее число заявок за единицу времени, составит

$$\lambda = \rho 2Rv. \tag{6}$$

Далее проанализируем распределение интервала времени между заявками. Рассмотрим случайную величину  $T$  — промежуток времени между двумя соседними событиями в потоке и найдем ее функцию распределения:

$$F(t) = P(T < t). \tag{7}$$

Тогда вероятность того, что на участке времени длиной  $t$  поступят  $m$  заявок, равна

$$P(T \geq t) = 1 - F(t). \tag{8}$$

Отсюда вероятность можно вычислить по формуле:

$$P(T \geq t) = p_0(t) = e^{-\rho 2Rvt}. \tag{9}$$

Функция распределения интервала времени между заявками имеет вид (рис. 7):

$$F(t) = 1 - e^{-\rho 2Rvt}. \tag{10}$$

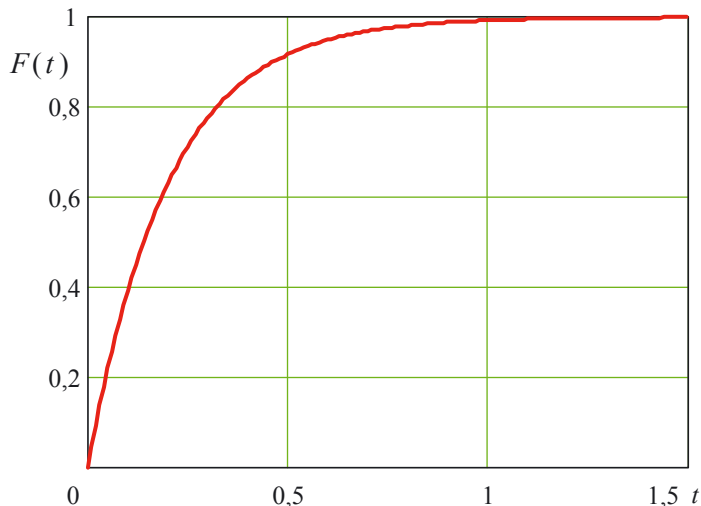


Рис. 7. Функция распределения интервала времени между заявками

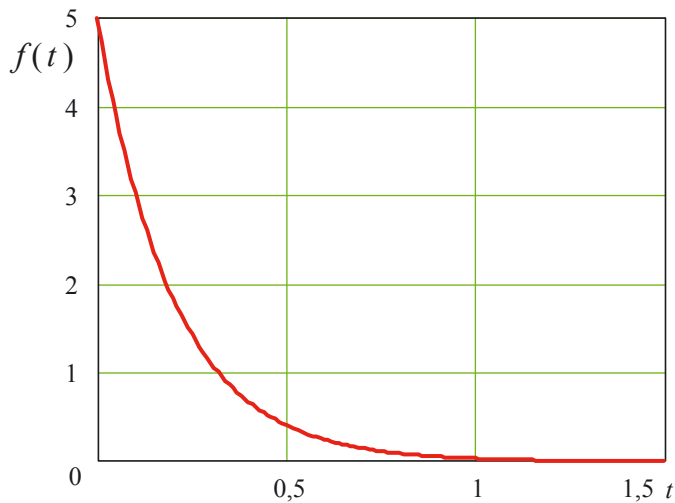


Рис. 8. Плотность вероятности интервала времени между заявками

Дифференцируя (10), найдем плотность вероятности (рис. 8):

$$f(t) = 2\rho R v e^{-\rho 2\rho R v t}. \quad (11)$$

Таким образом, на вход системы поступает простейший поток, интервалы времени между заявками в котором распределены по экспоненциальному закону со средним значением

$$\bar{a} = \frac{1}{\rho 2R v} \quad (12)$$

и дисперсией

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{4(\rho 2R v)^2}. \quad (13)$$

Если допустить, что время пребывания узла в ЗО не ограничено, то для оценки величины потерь можно применить известное соотношение [11]

$$P = \frac{1 - \rho}{1 - \rho \frac{2}{C_a^2 + C_b^2} K + 1} \rho \frac{2}{C_a^2 + C_b^2} K, \quad (14)$$

где  $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda t_0$ ;  $C_a$  — коэффициент вариации интервала

времени между заявками;  $C_b$  — коэффициент вариации времени обслуживания;  $K$  — число мест ожидания в очереди. В данном случае  $C_a = 1$ ,  $C_b = 0$ . С учетом этого

$$P = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{2K+1}} \rho^{2K}. \quad (15)$$

На рис. 9 представлена зависимость влияния плотности распределения узлов наземной сети на вероятность потерь.

Приведенные выше рассуждения показывают, что в случае, когда расположение узлов сенсорной сети может быть описано пуассоновским полем, модель взаимодействия БПЛА с USN может быть описана моделью СМО с комбинированной дисциплиной обслуживания (ожиданием и потерями), на вход которой поступает простейший поток заявок. В общем случае, при произвольном характере размещения узлов для описания качества обслуживания узлов (вероятности потерь) требуется оценить коэффициенты вариации интервалов времени между заявками (моментами

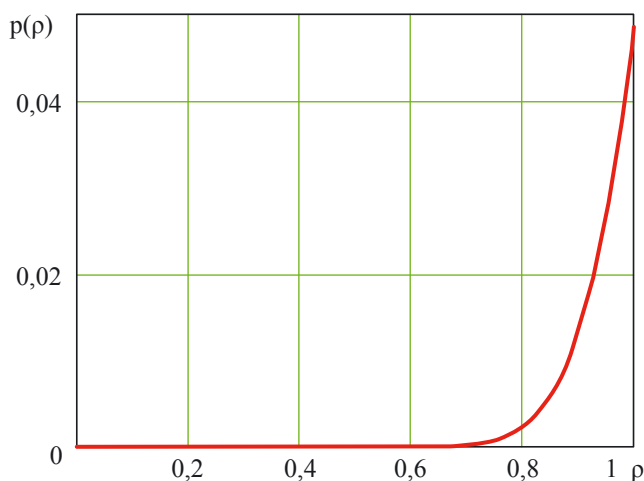


Рис. 9. Влияние плотности узлов на вероятность потерь

попадания узлов в зону действия БПЛА) и времени обслуживания заявки (передачи данных).

**Выводы.** 1. Время доставки данных пользователю в сети USN при использовании БПЛА в качестве средства доставки зависит от скорости движения летательных аппарата, времени считывания данных (времени взаимодействия с узлом сети) и плотности узлов на обслуживаемой территории.

2. Модель взаимодействия БПЛА с узлами USN может быть описана моделью СМО, характеристики которой зависят от распределения узлов по территории, времени взаимодействия с узлами сети, радиуса обслуживания и скорости движения БПЛА.

3. При известных координатах узлов USN может быть рассмотрена модель детерминированного потока заявок, оптимизацию обслуживания которого можно достичь составлением расписания обслуживания узлов сети.

4. При неизвестных координатах размещения узлов USN модель обслуживания может быть представлена как СМО с уходом заявок из очереди (ограниченном времени ожидания).

5. Задача выбора оптимальных параметров движения БПЛА должна решаться выбором параметров СМО с учетом таких целевых параметров функционирования сети, как время доставки информации (данных) и затраты энергии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N15-07-09431a «Разработка принципов построения и методов самоорганизации для летающих сенсорных сетей».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Любавич, 2011.
2. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей // Электросвязь. — 2013. — № 1.
3. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. — С. Петербург: БХВ, 2013.
4. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. — М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
5. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь. — 2005. — № 5.
6. Akyildiz I.F., Akan O.V., Chen C. et al. InterPlaNetary Internet: state-of-the-art and research challenges // Computer Networks. — 2003. — № 43.
7. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Летающие сенсорные сети // Электросвязь. — 2014. — № 9.
8. Koucheryavy A., Salim A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2009). Phoenix Park, Korea. — 2009.
9. Koucheryavy A., Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2010). Phoenix Park, Korea. — 2010.
10. Варельджан К.С., Парамонов А.И., Киричек Р.В. Оптимизация траектории движения БПЛА в летающих сенсорных сетях // Электросвязь. — 2015. — № 7.
11. Зелигер Н.Б., Чугреев О.С., Яновский Г.Г. Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений. — М.: Радио и связь, 1984.

Получено 15.05.15