

УДК 004.057.4

С. Ю. Шаров

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аналитическая модель гибридного канала связи с холодным резервированием

Рассматривается гибридный канал передачи данных, построенный на базе лазерного атмосферного канала, который резервируется радиоканалом. Строится математическая модель, позволяющая описать предлагаемое устройство. Кроме того, в работе предлагается комплексный анализ построенной модели, позволяющий получить основные характеристики гибридного канала с холодным резервированием. Находятся условия существования стационарного режима.

Ключевые слова: гибридный канал, лазерный атмосферный канал, радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн, математическое моделирование.

1. Введение

Лазерный атмосферный канал (англ. FSO – Free Space Optics) все активнее завоевывает рынок беспроводных устройств связи, обеспечивающих высокую пропускную способность. На больших расстояниях оптоволоконные кабели по-прежнему предпочтительнее для обеспечения высокой скорости передачи данных. Однако благодаря тому, что системы FSO значительно дешевле, а время развертывания системы намного меньше, применение этой технологии вместо волоконной оптики считается эффективным на расстояниях до 5 км.

Благодаря высокой несущей частоте, находящейся в диапазоне 300 ТГц, технология лазерных атмосферных каналов позволяет осуществлять высокоскоростную передачу данных, необходимую для таких приложений, как потоковое видео и звук, видео по запросу, конференцсвязь с использованием телевизионных каналов и т.д. Лазерный атмосферный канал может быть также широко использован для организации корпоративных сетей. Однако подобные оптические беспроводные линии подвержены сильному влиянию со стороны среды, по которой распространяется сигнал, которая в абсолютном большинстве случаев является земной атмосферой. Среди всех факторов, ослабляющих сигнал в таком канале, туман вносит наибольший вклад, т.к. размер капелек тумана сравним с длиной волны в используемом оптическом диапазоне; в то же время затухание из-за дождя относительно менее значимо для таких беспроводных оптических линий. Сравнимую высокую скорость передачи данных может обеспечить и радиоканал в миллиметровом диапазоне, работающий в диапазоне частот от 30 до 300 ГГц. Для таких радиоканалов наибольшую проблему представляют дождь, град и мокрый снег, значительно уменьшая мощность сигнала в радиоканале. Особенно важно отметить, что туман не оказывает значительного влияния на функционирование миллиметрового радиоканала, т.к. повышенная влажность вызывает затухание менее чем 5 дБ/км.

Гибридные системы связи находят широкое применение для решения проблемы последней мили и в ad-hoc сетях. Применение различных комбинаций лазерного атмосферного канала и радиоканала предлагалось во множестве областей, например, было предложено использовать гибридный канал в мобильных ad-hoc сетях [1], совместно с другими наземными и спутниковыми линиями связи, например, [2, 3]. Проведён ряд экспериментов по сбору статистики работы гибридных систем. Так, в работе [4] в течение 14 месяцев собиралась статистика для двух дублирующих друг друга каналов: FSO и миллиметрового радиоканала. «Дублирующие» в данном случае означает, что одни и те же данные одновременно передавались по двум параллельным каналам и измерялся коэффициент доступности как

для каждой линии в отдельности, так и для всего гибридного канала в целом. Согласно собранной статистике время доступности гибридного канала составило 99.93%. Это значение в большинстве случаев приемлемо для построения корпоративных сетей.

В целом рассматриваются два основных подхода для построения гибридных систем. Первый заключается в том, что все время параллельно работают обе линии, тем самым приводя к потере 50% доступной пропускной способности, вызванной дублирующей передачей данных. Во втором подходе используется механизм переключения таким образом, что большую часть времени функционирует только одна линия, тем самым позволяя уменьшить объем излишне передаваемых данных и использовать резервный канал только по мере необходимости, в случае, когда в основном канале возникают ошибки. Механизм переключения в гибридных каналах, используемый во втором подходе, обсуждался, например, в [5]. Однако во всех этих работах предложенный механизм переключения не использует пропускную способность резервного канала, если доступен основной.

В последнее время стали рассматривать и третий вариант. Предлагается механизм переключения, позволяющий увеличить полезное использование пропускной способности каналов, применяя механизм распределения нагрузки, когда оба канала доступны. Кроме того, если линия недоступна, то механизм продолжает следить за каналом до тех пор, пока связь не восстановится. В большинстве работ механизм переключения основывается на сравнении уровня полученного сигнала с пороговым значением. Однако такой механизм переключения обладает большим количеством недостатков, поэтому в последнее время появились работы, предлагающие альтернативные способы переключения.

В данной работе рассматривается гибридная система, в которой лазерный атмосферный канал (ЛАК) резервируется с помощью радиоканала. Это позволяет приблизить систему к классу операторской надежности. В работе представлена аналитическая модель подобного гибридного канала. Разработанная модель позволяет проанализировать большинство интересующих характеристик и получить комплексную картину работы системы в целом, при этом нет необходимости иметь в наличии реальное устройство.

Остальная часть работы организована следующим образом. Следующий раздел посвящен описанию предлагаемой математической модели. Далее проводится ее комплексный анализ, рассчитываются основные характеристики системы. В конце работы приводятся полученные численные результаты и дается их краткий анализ.

2. Математическая модель гибридного беспроводного канала связи с холодным резервом

В данном разделе построена и исследована стохастическая модель, описывающая функционирование гибридного канала связи. Модель представляет собой систему массового обслуживания типа М/М/1 с двумя возможными скоростями обслуживания.

Входящий поток заявок в систему – стационарный пуассоновский с параметром λ . Число мест для ожидания не ограничено.

При использовании k -й скорости (k -го режима) время обслуживания заявки распределено экспоненциально с параметром μ_k , $k = 1, 2$. При этом полагаем, что $\mu_1 > \mu_2$. Время использования k -й скорости ограничено и характеризуется абсолютно непрерывной случайной величиной ξ_k , имеющей плотность гиперэкспоненциального распределения второго порядка:

$$F_k(t) = p_k \gamma_1^k e^{-\gamma_1^k t} + (1 - p_k) \gamma_2^k e^{-\gamma_2^k t}.$$

Если время первого режима завершается (ЛАК становится недоступным), текущее обслуживание заявки (передача пакета) прерывается и система переходит на второй режим работы (использование радиоканала). Сразу после перехода на второй режим обслуживание пакетов не производится. Система должна выждать время Q_2 , и если за это время второй режим работы не завершился ($\xi_2 > Q_2$), то по истечении времени Q_2 начинается обслуживание заявки (передача пакета) на второй скорости (по радиоканалу). При этом

предполагаем, что заявка, обслуживание которой по оптическому каналу было прервано, обслуживается заново.

По истечении времени работы второго режима (когда ЛАК-канал вновь становится доступным) система, продолжая обслуживать заявки во втором режиме, наблюдает доступность оптического канала по времени. И если ЛАК доступен в течение определенного времени, то по истечении этого времени система переходит на первый режим работы (оптический канал). При этом заявка, в ходе обслуживания которой произошла смена режима, обслуживается заново на новой скорости. Время, которое должен превысить период доступности ЛАК, определяется всякий раз, когда ЛАК становится доступным, из экспоненциального распределения с параметром Q_1 .

3. Стационарное распределение вероятностей состояний системы

Предположим, что система функционирует в стационарном режиме. Условия существования стационарного режима будут получены позже.

Предполагаем, что система может находиться в следующих четырех состояниях:

- 1 – работа в первом режиме (использование ЛАК),
- 1' – переключение с первого режима на второй (с оптического на радиоканал),
- 2 – работа во втором режиме (использование радиоканала),
- 2' – переключение со второго на первый режим (с радиоканала на оптический).

Будем наблюдать поведение системы в моменты завершения обслуживания и моменты окончания и смены режимов работы. Обозначим через t_n n -й такой момент, $n \geq 1$. Под состоянием системы в момент t_n будем понимать вектор

$$X_n = \{i_n, m_n, m'_n\},$$

где i_n – число заявок в системе в момент времени $t_n + 0$, m_n – состояние обслуживающего прибора в момент $t_n - 0$, m'_n – состояние обслуживающего прибора в момент $t_n + 0$. Здесь мы полагаем, что состоянию (i, m, m') соответствует завершение обслуживания заявки, $m \in \{1, 2, 2'\}$.

Введем стационарные вероятности состояний системы:

$$\pi(i, m, m') = \lim_{n \rightarrow \infty} P \{i_n = i, m_n = m, m'_n = m'\}, \quad i \geq 0, \quad m, m' \in \{1, 1', 2, 2'\}.$$

Пусть также

$$f_i^{(k)} = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-\mu_k t} \left(p_k e^{-\gamma_k^{(1)} t} + (1 - p_k) e^{-\gamma_k^{(2)} t} \right) \mu_k dt$$

– вероятность того, что за время обслуживания заявки в режиме k в систему поступит i заявок,

$$g_i^{(k)} = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-\mu_k t} \left(p_k \gamma_k^{(1)} e^{-\gamma_k^{(1)} t} + (1 - p_k) \gamma_k^{(2)} e^{-\gamma_k^{(2)} t} \right) dt$$

– вероятность того, что за время обслуживания заявки в режиме k время использования режима истекает (оптический канал становится недоступным, если использовался режим 1 ($k = 1$)), или доступным, если использовался режим 2 ($k = 2$) и за неполное время обслуживания в систему поступит i заявок,

$$h_i^{(1)} = \int_0^{Q_2} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \left(p_2 \gamma_2^{(1)} e^{-\gamma_2^{(1)} t} + (1 - p_2) \gamma_2^{(2)} e^{-\gamma_2^{(2)} t} \right) dt$$

– вероятность того, что время переключения с первого режима на второй меньше, чем Q_2 , и за время переключения в систему поступит i заявок,

$$h_i^{(2)} = \frac{(\lambda Q_2)^i}{i!} e^{-\lambda Q_2} \left(p_2 e^{-\gamma_2^{(1)} Q_2} + (1 - p_2) e^{-\gamma_2^{(2)} Q_2} \right)$$

– вероятность того, что время переключения с первого режима на второй больше, чем Q_2 , и за время переключения в систему поступит i заявок,

$$r_i = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-Q_1 t} \mu_2 e^{-\mu_2 t} dt$$

– вероятность того, что за время обслуживания заявки при переключении со второго режима на первый в систему поступит i заявок,

$$m_i = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-Q_1 t} Q_1 e^{-\mu_2 t} dt$$

– вероятность того, что за время обслуживания заявки при переключении со второго режима на первый это переключение завершается и за неполное время обслуживания в систему поступит i заявок.

Заметим, что за время переключения со второго режима на первый заявки как поступают в систему, так и уходят из нее. Поэтому для удобства будем полагать, что в каждый момент завершения такого переключения с вероятностью

$$\alpha = p_1 \frac{\gamma_1^{(1)}}{\gamma_1^{(1)} + Q_1} + (1 - p_1) \frac{\gamma_1^{(2)}}{\gamma_1^{(2)} + Q_1}$$

система начинает использовать первый режим работы, а с дополнительной вероятностью $1 - \alpha$ остается работать во втором режиме. Уточним, что величина α есть вероятность того, что начавшееся время первого режима больше, чем время переключения, и, таким образом, с этой вероятностью система может переключиться на первый режим работы.

Далее, используя введенные выше вспомогательные вероятности, составим уравнения равновесия для стационарных вероятностей $\pi(i, m, m')$ состояний системы для $i \geq 0$:

$$\begin{aligned} \pi(i, 1, 1) = & \sum_{k=1}^{i+1} (\pi(k, 1, 1) + \pi(k, 2', 1) + \pi(k, 1', 1)) f_{i-k+1}^{(1)} + \\ & + (\pi(0, 1, 1) + \pi(0, 2', 1) + \pi(0, 1', 1)) s_1 f_i^{(1)}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \pi(i, 1, 1') = & \sum_{k=1}^i (\pi(k, 1, 1) + \pi(k, 2', 1) + \pi(k, 1', 1)) g_{i-k}^{(1)} + \\ & + (\pi(0, 1, 1) + \pi(0, 2', 1) + \pi(0, 1', 1)) v_i^{(1)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\pi(i, 1, r) = \sum_{k=0}^i \pi(k, 1, 1') h_{i-k}^{(r)}, \quad r = 1, 2, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \pi(i, 2, 2) = & \sum_{k=1}^{i+1} (\pi(k, 2, 2) + \pi(k, 2', 2) + \pi(k, 1', 2)) f_{i-k+1}^{(2)} + \\ & + (\pi(0, 2, 2) + \pi(0, 2', 2) + \pi(0, 1', 2)) s_2 f_i^{(2)}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \pi(i, 2, 2') = & \sum_{k=1}^i (\pi(k, 2, 2) + \pi(k, 2', 2) + \pi(k, 1', 2)) g_{i-k}^{(2)} + \\ & + (\pi(0, 2, 2) + \pi(0, 2', 2) + \pi(0, 1', 2)) v_i^{(2)}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \pi(i, 2', 2') = & \sum_{k=1}^{i+1} (\pi(k, 2', 2') + \pi(k, 2, 2')) r_{i-k+1} + \\ & + (\pi(0, 2', 2') + \pi(0, 2, 2')) \frac{\lambda}{\lambda + Q_1} r_i, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \pi(i, 2', 1) = & \sum_{k=1}^i (\pi(k, 2', 2') + \pi(k, 2, 2')) m_{i-k} \alpha + \\ & + (\pi(0, 2', 2') + \pi(0, 2, 2')) \left(\frac{\lambda \alpha}{\lambda + Q_1} m_{i-1} + \frac{Q_1 \alpha}{\lambda + Q_1} I_{\{i=0\}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \pi(i, 2', 2) = & \sum_{k=1}^i (\pi(k, 2', 2') + \pi(k, 2, 2')) m_{i-k} (1 - \alpha) + \\ & + (\pi(0, 2', 2') + \pi(0, 2, 2')) \left(\frac{\lambda(1 - \alpha)}{\lambda + Q_1} m_{i-1} + \frac{Q_1(1 - \alpha)}{\lambda + Q_1} I_{\{i=0\}} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $I_{\{A\}}$ — функция-индикатор события A ,

$$\begin{aligned} s_m = & p_m \frac{\lambda}{\lambda + \gamma_m^{(1)}} + (1 - p_m) \frac{\lambda}{\lambda + \gamma_m^{(2)}}, \quad m = 1, 2, \\ v_i^{(m)} = & s_m g_{i-1}^{(m)} I_{\{i>0\}} + (1 - s_m) I_{\{i=0\}}, \quad i \geq 0. \end{aligned}$$

Заметим, что из системы (1) – (8) можно непосредственно исключить равенства (3). Для вычисления стационарных вероятностей $\pi(i, m, m')$, $i \geq 0$, $m, m' \in \{1, 1', 2, 2'\}$ (за исключением $\pi(i, 1', r)$, которые могут быть вычислены по формулам (3)) применим матрично-аналитический подход, который основан на идее сенсорных цепей Маркова (см., например, [6]). Близкие алгоритмы изложены в работе [7].

Введем в рассмотрение векторы стационарных вероятностей

$$\bar{\pi}_i = (\pi(i, 1, 1), \pi(i, 1, 1'), \pi(i, 2, 2), \pi(i, 2, 2'), \pi(i, 2', 2'), \pi(i, 2', 1), \pi(i, 2', 2)).$$

Тогда систему уравнений (1) – (8) можно переписать в векторно-матричной форме

$$\bar{\pi}_i = \sum_{k=0}^{i+1} \bar{\pi}_k P_{k,i}, \quad i \geq 0,$$

где матрицы $P_{i,l}$, $i \geq 0$, $l \geq \min\{i-1, 0\}$, имеют вид

$$P_{0,l} = \begin{bmatrix} A_l & O_{3 \times 3} \\ O_{2 \times 4} & B_l \\ C_l & O_{2 \times 3} \end{bmatrix},$$

$P_{i,l} = Y_{l-i+1}$ для $l \geq i-1$, где

$$Y_l = \begin{bmatrix} f_l^{(1)} & g_{l-1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{f}_l^{(1)} & \bar{g}_{l-1}^{(1)} & \bar{f}_l^{(2)} & \bar{g}_{l-1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_l^{(2)} & g_{l-1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_l & \alpha m_{l-1} & (1 - \alpha) m_{l-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_l & \alpha m_{l-1} & (1 - \alpha) m_{l-1} \\ f_l^{(1)} & g_{l-1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_l^{(2)} & g_{l-1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad l \geq 0, \quad (9)$$

$$A_l = \begin{bmatrix} s_1 f_l^{(1)} & v_l^{(1)} & 0 & 0 \\ y_l^{(1)} & \bar{g}_l^{(1)} + h_0^{(1)}(v_l^{(1)} - g_l^{(1)}) & y_l^{(2)} & \bar{g}_l^{(2)} + h_0^{(2)}(v_l^{(2)} - g_l^{(2)}) \\ 0 & 0 & s_2 f_l^{(2)} & v_l^{(2)} \end{bmatrix},$$

$$B_l = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\lambda + Q_1} r_l & \frac{\lambda \alpha}{\lambda + Q_1} m_{l-1} + \frac{Q_1 \alpha}{\lambda + Q_1} I_{\{l=0\}} & \frac{\lambda(1-\alpha)}{\lambda + Q_1} m_{l-1} + \frac{Q_1(1-\alpha)}{\lambda + Q_1} I_{\{l=0\}} \\ \frac{\lambda}{\lambda + Q_1} r_l & \frac{\lambda \alpha}{\lambda + Q_1} m_{l-1} + \frac{Q_1 \alpha}{\lambda + Q_1} I_{\{l=0\}} & \frac{\lambda(1-\alpha)}{\lambda + Q_1} m_{l-1} + \frac{Q_1(1-\alpha)}{\lambda + Q_1} I_{\{l=0\}} \end{bmatrix},$$

$$C_l = \begin{bmatrix} s_1 f_l^{(1)} & v_l^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_2 f_l^{(2)} & v_l^{(2)} \end{bmatrix}, \quad l \geq 0,$$

$$y_i^{(m)} = (s_m f_i^{(m)} - f_{i+1}^{(m)}) h_0^{(m)} + \bar{f}_{i+1}^{(m)}, \quad m = 1, 2, \quad i \geq 0.$$

В (9) полагаем, что $g_{-1}^{(1)} = g_{-1}^{(2)} = \bar{g}_{-1}^{(1)} = \bar{g}_{-1}^{(2)} = m_{-1} = 0$.

Отметим, что известные алгоритмы, основанные на идее сенсорных цепей Маркова, предполагают, что счетная компонента цепи Маркова, описывающей поведение системы (в нашем случае компонента i_n цепи $X_n, n \geq 1$), совершает переход не более чем на единицу влево за один шаг.

Сенсорная цепь Маркова $\chi_n, n \geq 1$ для цепи $X_n, n \geq 1$ строится следующим образом. Значения счетной компоненты i_n ограничиваются некоторым фиксированным числом $N^* \geq 0$. Состояние сенсорной цепи совпадает с состоянием цепи $X_n, n \geq 1$, если $i_n = \overline{0, N^*}$. Когда состояние компонента i_n цепи $X_n, n \geq 1$ становится больше, чем N^* , компонента i_n сенсорной цепи принимает значение N^* , а конечные компоненты этой цепи изменяют состояние так же, как и соответствующие компоненты цепи $X_n, n \geq 1$.

Зафиксируем целое число $N^* \geq 0$ и для цепи Маркова $X_n, n \geq 1$ построим сенсорную цепь $\chi_n, n \geq 1$ с пространством состояний $\{0, 1, \dots, N^*\}$ счетной компоненты i_n .

Обозначим через $P_{i,l}^{(N^*)}, i, l = \overline{0, N^*}$ матрицы одношаговых вероятностей переходов сенсорной цепи $\chi_n, n \geq 1$. Нетрудно видеть, что

$$P_{i,l}^{(N^*)} = P_{i,l}, \quad i = \overline{0, N^*}, \quad l = \overline{0, N^* - 1}.$$

Определим матрицы $P_{i,l}^{(N^*)}$ при $l = N^*$. Для этого необходимо проследить переходы исходной цепи $X_n, n \geq 1$ в области $i_n > N^*$ от момента, когда значение компонента i_n стало больше, чем N^* , и до момента, когда i_n вновь вернется в состояние N^* . Решив систему матричных уравнений для $P_{i,l}^{(N^*)}$, можно вычислить стационарные вероятности $\pi(i, m, m')$.

4. Стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени

Под состоянием системы в произвольный момент времени $t \geq 0$ будем понимать состояние процесса $\bar{X}_t = \{i_t, m_t\}, t \geq 0$, где i_t — число заявок в системе в момент времени t, m_t — состояние обслуживающего прибора, $m_t \in \{1, 1', 2, 2'\}$.

Стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени определяется как предельное распределение процесса $\bar{X}_t, t \geq 0$. Процесс $\bar{X}_t, t \geq 0$, является полурегенерирующим процессом с вложенным процессом марковского восстановления $\{i_n, t_n\}, n \geq 1$ (см. [7]). На основании результатов работы [7] достаточным условием существования стационарных вероятностей

$$p(i, m) = \lim_{t \rightarrow \infty} P \{i_t = i, m_t = m\}, \quad i \geq 0, \quad m \in \{1, 1', 2, 2'\}$$

является существование стационарного распределения вложенной цепи Маркова $X_n, n \geq 1$, а стационарные вероятности $p(i, m), i \geq 0$, состояний системы в произвольный момент времени могут быть выражены через $\pi(i, m, m')$.

5. Характеристики производительности системы

Вычислив стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени, находим характеристики производительности:

- доля времени, в течение которого система работает в r -м режиме

$$q_r = \sum_{i=0}^{\infty} p(i, r), \quad r \in \{1, 1', 2, 2'\},$$

- среднее число заявок в системе при ее работе в r -м режиме

$$L_r = \sum_{i=0}^{\infty} ip(i, r), \quad r \in \{1, 1', 2, 2'\},$$

- среднее число заявок в системе в произвольный момент времени

$$L = L_1q_1 + L_{1'}q_{1'} + L_2q_2 + L_{2'}q_{2'},$$

- среднее время пребывания заявки в системе (вычисляется по формуле Литтла)

$$T = L/\lambda.$$

6. Численные результаты математического моделирования

В данном разделе приведены численные результаты аналитического моделирования, проведенного с помощью программного комплекса, разработанного автором, а также представлен анализ полученных результатов.

Моделирование гибридного канала, работающего в режиме холодного резерва, проводилось для следующих входных параметров:

Т а б л и ц а 1

Значения параметров математической модели, использовавшихся для получения численных результатов

Параметр	Значение
Пропускная способность оптического канала	1024 Mbps
Пропускная способность радиоканала	512 Mbps
Время переключения Q_1	10 с
Время переключения Q_2	1 с
Средняя длина пакета	1024 байта
Средний интервал между пакетами	0.5–2 мс

На рис. 1 представлен график зависимости среднего времени ожидания пакета в очереди от λ . Из графика легко видеть, что если интенсивность пакетов для передачи приближается к средней пропускной способности системы, то задержка в передаче пакетов резко возрастает. В то же время если интенсивность входного потока относительно невелика, то задержка практически не зависит от λ .

7. Заключение

В работе проведено комплексное математическое исследование беспроводной гибридной системы связи, включающей лазерный атмосферный канал и резервный радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн. Приведены численные результаты, полученные с помощью разработанной модели, а также проведен их анализ. Показано, что адекватной моделью гибридного канала является система массового обслуживания с двумя обслуживающими приборами, обладающими разными скоростями обслуживания. Исследован стохастический процесс, описывающий состояния системы и условия его эргодичности. Разработан

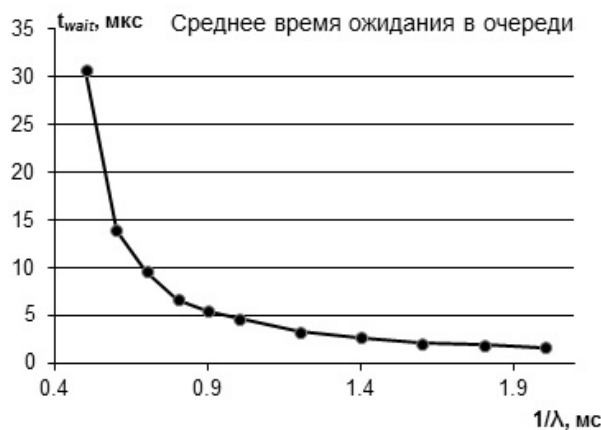


Рис. 1. Зависимость среднего времени ожидания пакета в очереди от λ

алгоритм вычисления стационарных вероятностей состояний марковского процесса и характеристик производительности гибридной системы.

Литература

1. *Derenick J., Thorne C., Spletzer J.* On the deployment of a hybrid free-space optic/radio frequency (FSO/RF) mobile ad-hoc network // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 2005. — P. 3990–3996.
2. *Вишневский В.М., Кузнецов С., Лаконцев Д., Поляков С.* Гибридное оборудование на базе радио- и лазерной технологии. Первая миля. <http://www.mostkom.ru/articles/article7/article7.htm>
3. *Bloom S., Hartley W.S.* The Last-Mile Solution: Hybrid FSO Radio. <http://www.systemsupportolutions.com/whitepapers.html>
4. *Kim I., Kovervaar E.* Availability of Free Space Optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems. // Optical wireless communication. — 2005. — V. IV.
5. *Nadeem F., Geiger B., Leitgeb E., Awan M.S., Kandus G.* Evaluation of Switch over Algorithms for Hybrid FSO-WLAN systems // Wireless VITAE. — 2009. — P. 565–570.
6. *Grassman W., Heyman D.* Equilibrium distribution of block-structured Markov chains with repeated rows. // Journal of applied probability. — 1990. — V. 27. — P. 57–576.
7. *Семенова О.* Устойчивый алгоритм расчета стационарного распределения системы обслуживания ВМАР/SM/1 с марковским потоком сбоев и двумя режимами работы // Автоматика и вычислительная техника. — 2004. — № 1. — С. 75–84.

Поступила в редакцию 05.03.2014.