

УДК 621.396.721

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДВУХ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ РАДИОСИСТЕМ

А.Г. Таюрский, Г.В. Таюрская, А.Г. Дыганов

Аннотация

Обосновывается необходимость исследования близкорасположенных приемо-передающих радиосистем с бернуллиевскими потоками сигналов методами имитационного моделирования на ЭВМ, моделируются обычный алгоритм функционирования и алгоритмы, позволяющие повысить суммарную пропускную способность таких систем; приводятся наиболее интересные результаты исследования имитационных моделей систем со стационарными потоками при различных дисциплинах обслуживания. Показана возможность применения убыточной целевой функции для выбора наиболее эффективного алгоритма при заданных параметрах потока.

Существует целый ряд запросно-ответных радиосистем (САЗО), в которых запросчики создают нерегламентированный поток сигналов, поступающих на ответчик, который, в свою очередь, в соответствии с принятой дисциплиной приема запросных сигналов выдает ответный сигнал о приеме того или иного запросного сигнала. Ввиду стохастичности приема запросных сигналов запросчики работают с постоянным периодом повторения запросного сигнала. Таким образом, поток сигналов, поступающих на ответчик, является суперпозицией периодических последовательностей сигналов. Как правило, эти сигналы кодируются n -позиционным бинарным кодом [1].

При временном наложении двух сигналов на входе приемного устройства один из них теряется, который – это зависит в основном от временных факторов, определяющих вероятность того или иного состояния приемного устройства, поэтому возникает необходимость анализа функционирования таких систем с точки зрения теории массового обслуживания.

В работах [2–4] было показано, что математическими моделями таких приемо-передающих систем являются системы массового обслуживания без ожидания (т. е. системы с потерями) с бернуллиевскими потоками заявок на обслуживание и с постоянным, по крайней мере для однородных источников, временем обслуживания.

На практике встречаются случаи, когда в непосредственной близости друг от друга располагаются две или несколько систем САЗО. Это могут быть либо разноцелевые запросно-ответные системы, расположенные на одном объекте (на одном борту), либо системы, которые осуществляют селекцию сигналов в пространстве. Как правило, во время работы одного из комплексов в режиме передачи приемные каналы всех комплексов заперты вследствие большой мощности излучаемого сигнала, несмотря на достаточно большой разнос несущих частот. Поэтому переход одного комплекса из режима приема в режим передачи приводит к сбою приема сигналов в остальных комплексах. Такое взаимовлияние существенно снижает пропускную способность отдельных комплексов, а также суммарную пропускную

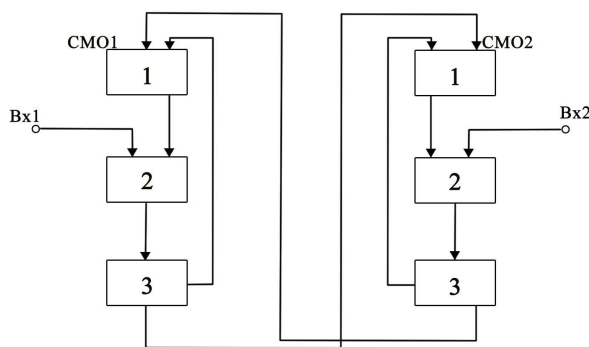


Рис. 1.

способность всей системы комплексов. Математической моделью двух взаимовлияющих друг на друга систем является комплекс, состоящий из двух систем массового обслуживания (СМО), охваченных цепями взаимных связей (рис. 1). Здесь 1 – блок, обеспечивающий парализацию входного устройства приемника, 2 – приемник, 3 – передатчик. Смысл взаимных связей заключается в том, что при работе любой системы в режиме передачи входные цепи обеих систем запираются (блокируются), и ни одна из систем в это время не может работать в режиме приема сигнала.

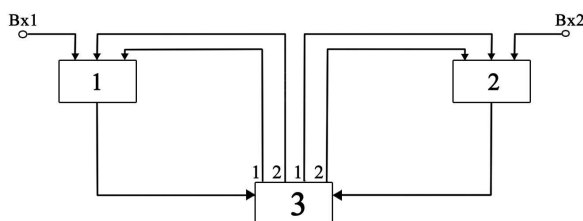


Рис. 2.

Методика расчета пропускных способностей таких систем (для случая двух подсистем) была рассмотрена в общем виде в работах [2, 4]. В терминах теории массового обслуживания (ТМО) сигналы, принадлежащие разным потокам, могут различаться только по длительности времен их обслуживания τ_1 и τ_2 . Наибольший интерес представляет случай, когда τ_1 не равно τ_2 , так как случай $\tau_1 = \tau_2$ является частным по отношению к предыдущему. Условимся индекс 2 присваивать системе с большей длительностью времени приема (обслуживания) сигналов, т. е. $\tau_1 < \tau_2$. Так как вероятность одновременного окончания приема сигналов в двух разных системах ничтожно мала, то можно считать, что в режиме передачи может находиться только одна система. Независимо от того, какая система ведет передачу, вся сложная СМО будет парализована на время этой передачи. Следовательно, можно построить упрощенную модель сложной системы с одним передающим устройством, обладающим различными временами парализации (рис. 2). Здесь 1 – приемник СМО1, 2 – приемник СМО2, 3 – передатчик.

Различие в длительностях времен обслуживания сигналов приводит к тому, что системы неравноправны, ибо система с меньшим временем обслуживания (в нашем случае – первая система) обладает с точки зрения ТМО как бы автоматически введенным приоритетом по отношению к системе с большим временем обслуживания

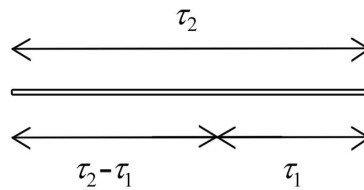


Рис. 3. Начальная $(\tau_2 - \tau_1)$ и конечная (τ_1) часть интервала времени τ_2

(в нашем случае – вторая система). Поясним сказанное: если сигнал во вторую систему поступил в то время, когда первая система была занята обслуживанием своего сигнала, то вследствие того, что обслуживание сигнала в первой системе окончится раньше, чем во второй, сигнал во второй системе не будет обслужен до конца, т. е. будет потерян. В то же время из геометрических представлений видно, что если сигнал в первой системе пришел позднее чем за время $(\tau_2 - \tau_1)$ после начала обслуживания сигнала во второй системе, то он до конца не будет обслужен, т. к. он теряется вследствие перехода второй системы в режим передачи. Таким образом, для обслуживания сигнала в первой системе до конца при условии занятости второй системы необходимо, чтобы он пришел не позднее времени $(\tau_2 - \tau_1)$. А для обслуживания сигнала во второй системе до конца необходимо, чтобы за время $(\tau_2 - \tau_1)$ не пришел ни один сигнал в первую систему.

Под начальной частью приема сигнала во второй системе будем понимать интервал времени, принадлежащий интервалу τ_2 , отсчитываемый от его начала и равный $(\tau_2 - \tau_1)$ (см. рис. 3).

Сформулируем соответствующую дисциплину обслуживания:

«Сигнал в первой системе принимается на обслуживание и обслуживается до конца, если первая система была свободна, а вторая либо свободна, либо занята обслуживанием начальной части $(\tau_2 - \tau_1)$. Сигнал во второй системе принимается на обслуживание и обслуживается до конца, если в момент его поступления обе системы были свободны, и за время обслуживания его начальной части $(\tau_2 - \tau_1)$ не поступил ни один сигнал в первую систему.»

Таким образом, сложная система может находиться в одном из шести состояний:

S_{00} – обе системы свободны от приема сигнала, вероятность этого состояния P_{00} ;

S_{10} – первая система занята приемом сигнала, вторая система либо свободна, либо занята обслуживанием начальной части сигнала $(\tau_2 - \tau_1)$, вероятность этого состояния P_{10} ;

S_{20} – вторая система занята приемом начальной части сигнала $(\tau_2 - \tau_1)$ (рис. 3), первая свободна, вероятность этого состояния P_{20} ;

S_{21} – вторая система занята обслуживанием конечной части сигнала (рис. 3), первая либо свободна, либо занята обслуживанием сигнала, поступившего на конечной части сигнала τ_2 , вероятность этого состояния P_{21} ;

S_{01} – первая система работает в режиме излучения ответного сигнала, вероятность этого состояния P_{01} ;

S_{02} – вторая система работает в режиме излучения ответного сигнала, вероятность этого состояния P_{02} .

Разделение состояния, когда вторая система занята приемом своего сигнала, на два подсостояния объясняется тем, что приход сигнала в первую систему позднее момента $(\tau_2 - \tau_1)$ не влияет на процесс изменения состояния комплекса в целом.

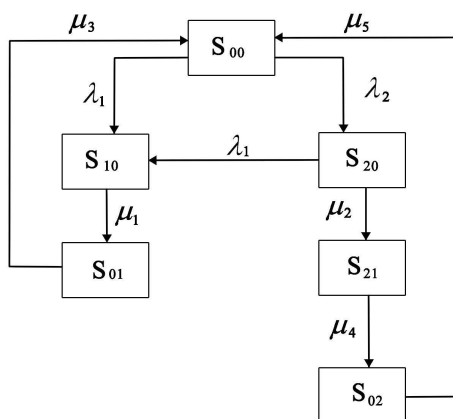


Рис. 4.

В соответствии с дисциплиной обслуживания вероятность обслуживания сигналов в первой системе определится как

$$W_{об1} = P_{00} + P_{20}.$$

Вероятность обслуживания сигналов во второй системе определится как

$$W_{об2} = P_{00}[1 - \lambda_1(\tau_2 - \tau_1)]$$

Видно, что обслуживание сигнала во второй системе будет носить двухфазный характер: сигнал с вероятностью P_{00} должен быть принят на обслуживание, а с вероятностью $[1 - \lambda_1(\tau_2 - \tau_1)]$ за время обслуживания его начальной части не поступит ни один сигнал в первую систему. Здесь $\lambda_1(\tau_2 - \tau_1) \ll 1$.

В соответствии с дисциплиной обслуживания составим размеченный граф состояний системы (рис. 4). Здесь

$$\mu_1 = \frac{1}{\tau_1}, \quad \mu_2 = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad \mu_3 = \frac{1}{\tau_{1p}}, \quad \mu_4 = \frac{1}{\tau_1}, \quad \mu_5 = \frac{1}{\tau_{2p}},$$

τ_1, τ_2 – длительности времен работы каждой системы в режиме приема соответственно (время обслуживания),

τ_{1p}, τ_{2p} – длительности времен работы каждой системы в режиме передачи (время парализации),

λ_1, λ_2 – интенсивности потоков сигналов, поступивших на каждую из систем, соответственно.

По размеченному графу составляется система уравнений для вычисления финальных вероятностей состояний, и определяются абсолютные пропускные способности.

Абсолютная пропускная способность первой системы найдется как

$$\Pi_{a1} = \lambda_1 W_{об1}.$$

Абсолютная пропускная способность второй системы будет равна

$$\Pi_{a2} = \lambda_2 W_{об2}.$$

Суммарную пропускную способность всего комплекса можно найти по формуле

$$\Pi_a = \Pi_{a1} + \Pi_{a2}.$$

Алгоритмы повышения пропускной способности систем с взаимосвязями

Рассмотренный выше алгоритм работы двух систем, расположенных в непосредственной близости друг от друга, страдает одним весьма существенным недостатком, а именно, при таком алгоритме всегда в режиме передачи будет работать только одна из приемо-передающих систем. Поэтому, естественно, возникла необходимость разработки таких алгоритмов функционирования, которые позволили бы обеим системам одновременно находиться в режиме передачи, что должно повысить суммарную пропускную способность комплекса в целом.

Ниже предлагаются два варианта таких алгоритмов, причем необходимо отметить следующее. Оба эти алгоритма, по существу, являются модификациями одного общего алгоритма. Они рассматриваются по отдельности для удобства составления программ для вычислений на ЭВМ (в частности, для избавления от некорректных операций типа деления на нуль и т. д.), а также для получения более четких рекомендаций по целесообразности применения того или иного алгоритма. Ниже мы полагаем $\tau_2 > \tau_1$ и $\tau_{2p} \geq \tau_{1p}$.

Алгоритм «Взаимное ожидание». Сформулируем дисциплину обслуживания, соответствующую этому алгоритму:

«Ответный сигнал в любой из систем излучается немедленно только в том случае, если другая система не была занята приемом своего сигнала. Если же в момент окончания приема сигнала в одной системе другая была занята приемом своего сигнала, то излучение ответного сигнала в этой системе задерживается до окончания приема сигнала в другой системе, и оба ответных сигнала излучаются одновременно».

Алгоритм «Ожидание первого». Этому алгоритму соответствует следующая дисциплина обслуживания:

«Ответный сигнал в первой системе излучается в любом случае немедленно по окончании приема запросного сигнала. Если обслуживание сигнала во второй системе окончилось во время приема сигнала в первой системе, то излучение ответного сигнала задерживается до конца приема сигнала в первой системе, и оба сигнала излучаются одновременно».

Реальный выигрыш в пропускной способности от применения того или иного алгоритма нетрудно оценить по методикам, приведенным в работах [2, 4], путем вычисления суммарной пропускной способности по заданным числовым параметрам потоков.

Однако размеченные графы систем, рассмотренные в работах [2, 4] страдают одним недостатком: описание процесса обслуживания сигнала во второй системе требует введения дополнительных подсостояний, а величины интенсивностей переходов из подсостояния в подсостояние допускают некоторые разночтения. Для выяснения структуры размеченного графа, наиболее соответствующей реальной физической системе, приходится использовать методы имитационного моделирования.

Опишем особенности имитационного моделирования систем с неоднородными бернуллиевскими потоками. Изложение методики производится на примере двух стационарных потоков сигналов [3, 5].

Особенностью для такой постановки задачи является формирование двух последовательностей случайных чисел, представляющих собой последовательность сигналов неоднородного потока. Каждая последовательность чисел генерируется отдельно.

Для выполнения этой операции необходимым блоком является блок генерации случайных чисел, равномерно распределенных в интервале от 0 до 1. Значение этих чисел соответствует моментам появления сигналов на интервале первого периода, равном единице.

Путем умножения всех генерированных чисел на постоянную T , в условном масштабе соответствующую длительности периода повторения сигналов, можно, при желании, перевести интервал от 0 до 1 в интервал от 0 до T .

Важным моментом в моделировании радиосистем с неоднородными потоками является необходимость различения сигналов из соответствующих потоков, то есть при приходе сигнала из первого потока время обслуживания берется τ_1 , а при поступлении сигнала из второго потока время обслуживания берется τ_2 .

Для определения принадлежности сигнала тому или иному потоку, вводятся двумерные массивы, то есть для моделируемой системы это будет $A(N_1 \times 2)$ и $B(N_2 \times 2)$. Второй столбец отводится для сигналов потока, первый столбец отводится для специального ключа, по которому будет происходить определение, из какого потока пришел сигнал.

Полученные массивы чисел необходимо сложить в один, используя, в нашем примере, модуль для сложения сигналов. Модуль складывает сигналы, записывая их друг за другом.

Для работы блока моделирования СМО важным является вопрос: какой сигнал появился раньше, а какой – позднее. Поэтому набор случайных чисел нуждается в сортировке, т. е. в расстановке от меньшего к большему. Существует много методов сортировки, из которых был выбран метод «пузырька» как один из наиболее просто реализуемых методов.

Нужно отметить, что операция сортировки занимает значительную часть длительности процесса моделирования, поэтому, чем совершеннее метод сортировки, тем меньше времени затрачивается на моделирование.

Сформированная последовательность случайных чисел поступает на блок СМО, работающий по тому или иному алгоритму, принимающему решение о том, принят на обслуживание сигнал или нет. Вне зависимости от решения СМО, каждое число, поступающее на блок, увеличивается в результате арифметической операции на величину T и отправляется в память.

Таким образом, формируются потоки сигналов на втором и последующих периодах, в точности повторяющие последовательность сигналов в первом периоде, сдвинутые на целое число интервалов T . Необходимость рассмотрения моделирования на нескольких периодах объясняется тем, что сигналы, пришедшие в конце периода, могут существенно влиять на обслуживание сигналов, пришедших в начале следующего периода (здесь нужно отметить, что на первый сигнал первого периода ничто не влияет).

Этот эффект особенно важен при работе с неоднородными потоками сигналов и приоритетными дисциплинами обслуживания. Проведенные ранее эксперименты показали, что для выяснения полной картины достаточно 4–5 периодов. По истечении заданного числа периодов подсчитывается либо относительная, либо абсолютная пропускная способность в этом цикле моделирования. Далее поступает команда на генерацию нового набора случайных чисел того же количества, что и предыдущий, но имеющий другой качественный состав. Число таких циклов выбирается из тех соображений, чтобы при достаточно коротком времени моделирования получить достаточно точный результат.

После окончания заданного числа циклов вступает в действие блок обработки статистических результатов. Происходит расчет $m(\Pi_a, \Pi_o)$ – математического

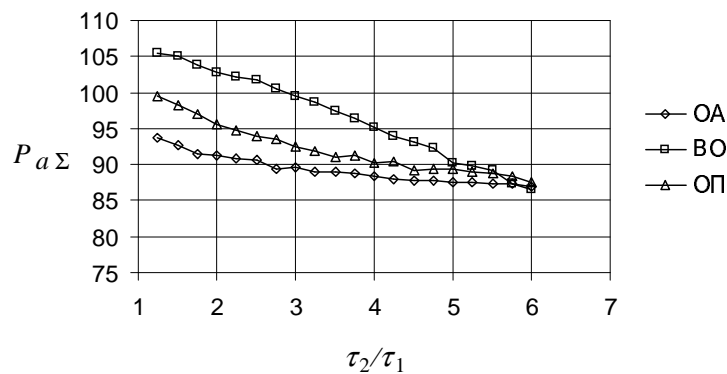


Рис. 5. Зависимость суммарной пропускной способности радиосистем от отношения времен приема радиосигнала при различных дисциплинах обслуживания. Параметры потока: $\lambda_1 = 150$, $\lambda_2 = 50$

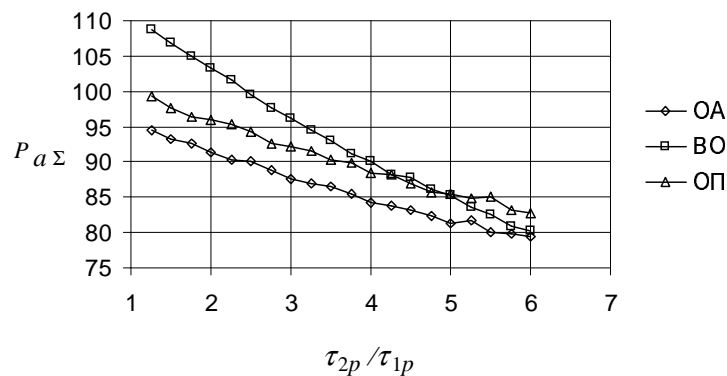


Рис. 6. Зависимость суммарной пропускной способности радиосистем от отношения времен передачи радиосигнала при различных дисциплинах обслуживания. Параметры потока: $\lambda_1 = 150$, $\lambda_2 = 50$

ожидания абсолютной и относительной пропускных способностей как арифметического среднего за выбранное число циклов.

Из рис. 5–8 видно, что при различных соотношениях длительностей времен обслуживания сигналов существуют зоны временных соотношений, при которых пропускная способность по одному из алгоритмов выше, чем по другим. Это дает обоснование для выбора того или иного алгоритма в целях обеспечения наибольшей пропускной способности.

Более гибким является выбор с использованием убыточной целевой функции L_y , определяющей суммарный штраф за потерю сигналов.

Число потерянных сигналов i -го потока равно

$$\lambda_i - \Pi_{ai} = \lambda_i(1 - W_{обi}).$$

Введем штрафы за потерю сигналов b_i , тогда

$$L_y = \sum_{i=1}^2 \lambda_i b_i (1 - W_{обi}) \Rightarrow \min$$

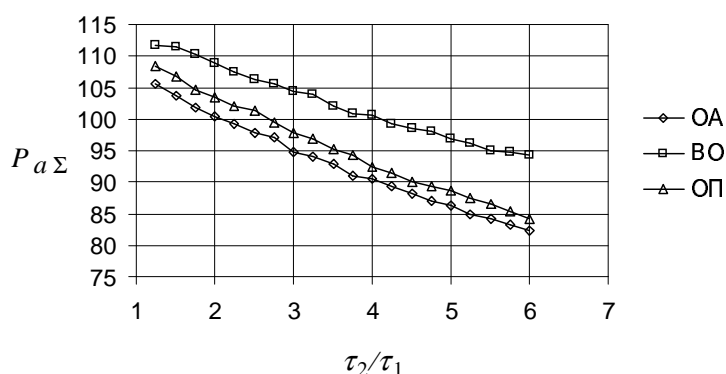


Рис. 7. Зависимость суммарной пропускной способности радиосистем от отношения времен приема радиосигнала при различных дисциплинах обслуживания. Параметры потока: $\lambda_1 = 50$, $\lambda_2 = 100$

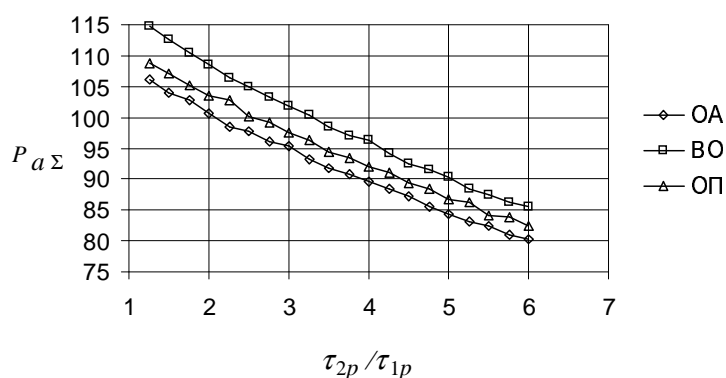


Рис. 8. Зависимость суммарной пропускной способности радиосистем от отношения времен передачи радиосигнала при различных дисциплинах обслуживания. Параметры потока: $\lambda_1 = 50$, $\lambda_2 = 100$

где b_i – штраф в условном стоимостном масштабе: деньги, энергетические затраты на посылку повторного сигнала, стоимость задержки информации.

Эту функцию можно упростить и привести к виду

$$L_y = \sum_{i=1}^2 b_i W_{об_i} \Rightarrow \max$$

По величине целевой функции можно определить целесообразность выбора того или иного алгоритма функционирования сложной системы.

Summary

A.G. Tayurskii, G.V. Tayurskaya, A.G. Dyganov. The carrying capacity increasing for two near-located receive-transmit radiosystems.

It is proven the necessity for study the near-located receive-transmit radiosystems with Bernoulli signal flows by means of imitation modeling. The usual algorithm for working as well as algorithm increasing a total carrying capacity is simulated for such systems. The most

interesting obtained results are described for imitation models with stationary flows at different service disciplines. The possible application of the unprofitable criterion function is shown for choosing the most effective algorithm at given flow parameters.

Литература

1. *Романов И.М., Нежметдинов Т.К., Кобчиков А.Б., Нугманов И.С.* Введение в теорию проектирования асинхронных импульсных радиосистем. – М.: Сов. радио, 1971. – 239 с.
2. *Тяурский А.Г.* Дифференциация приема радиосигналов в системах с неоднородными потоками: дис. . . . канд. физ.-мат. наук. – Казань: Казан. гос. ун-т, 1972. – 120 с.
3. *Тяурский А.Г., Дыганов А.Г.* Имитационное моделирование радиотехнических и электронных систем массового обслуживания: учеб. пособие. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2003. – 115 с.
4. *Тяурский А.Г., Тяурская Г.В., Шафигуллин Р.Н.* Алгоритмы повышения пропускных способностей близкорасположенных приемо-передающих радиосистем // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1991. – Вып. 19. – С. 17–31.
5. *Шрайбер Т.Дж.* Моделирование на языке GPSS. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.

Поступила в редакцию
14.03.06

Тяурская Галина Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: gal_tayurskaya@mail.ru

Дыганов Александр Геннадьевич – ассистент кафедры теоретической и экспериментальной физики филиала Казанского государственного университета в г. Зеленодольске.