

УДК 621.372

Ю.И. Лосев¹, К.М. Руккас²

¹Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Проведен анализ возможностей основных способов моделирования телекоммуникационных систем.

телекоммуникационные сети, теория массового обслуживания, теория графов, вероятностно-временные графы, фракталы

Введение

Постановка проблемы. Современные телекоммуникационные сети (ТКС) являются сложными

программно-аппаратными системами, и представляют пользователю различные услуги связи, в том числе гарантированного качества.

Однако дальнейшее развитие ТКС ограничивается отсутствием моделей, которые учитывали все факторы, влияющие на эффективность ТКС. В настоящее время используются различные методы описания ТКС, использующие различный математический аппарат. Эти методы хорошо описывают только отдельные стороны функционирования ТКС, что ограничивает использование этих методов при описании ТКС в целом.

Цель статьи. Следовательно, возникает необходимость оценить возможности различных методов формализации функционирования ТКС, использующих различный математический аппарат. Провести сравнительный анализ данных методов.

Анализ литературы. Классические работы в области моделирования ТКС опубликованы в [1 – 19]. Анализ различных моделей ТКС [2, 6, 7, 8, 25] показал, что большинство методов моделирования построены на использовании теории массового обслуживания (ТМО), теории графов, вероятностно-временных графов (ВВГ) и теории фракталов. В работах [6, 7, 11, 12, 20] подробно рассмотрены вопросы использования ТМО при построении моделей ТКС. В работах [2, 8, 61, 62] ТКС описываются при помощи теории графов. В [16] для описания ТКС используется формализм вероятностно-временных графов (ВВГ). В работах [36 – 38] проведен анализ влияния фрактальности трафика на эффективность функционирования ТКС. В данной статье проведен сравнительный анализ основных способов математического описания ТКС.

Основная часть

Рассмотрим более подробно возможности и ограничения каждого из этих способов формализации ТКС.

1. Математический аппарат теории массового обслуживания. Телекоммуникационные сети предназначены для обслуживания с необходимым качеством потока сообщений, поступающих на ее вход. Обслуживание входного сообщения, продолжается определенное время с целью его доставки от отправителя получателю. Обслуживающими приборами в этом случае являются каналы связи, обеспечивающие обмен информацией между разными абонентами. Каналы связи имеют ограниченные возможности, что приводит к образованию очередей. Таким образом, ТКС является типовой системой массового обслуживания (СМО).

Одной из важных характеристик ТКС является время задержки сообщений в процессе передачи от источника информации к потребителю. Результаты исследований времени задержки влияют на выбор методов информационного обмена, управления потоком и маршрутизацию. Поэтому важно понять природу и механизм задержки и как эта задержка зависит от характеристик ТКС.

Методической основой анализа времени задержки сообщения является ТМО. Однако ее использование часто требует соблюдения определен-

ных допущений и ограничений, поскольку без них в некоторых случаях невозможно дать количественную оценку. Такой подход позволяет получить полезные и качественные результаты. Целью теории массового обслуживания является разработка математических методов определения основных характеристик процессов массового обслуживания для количественной оценки качества функционирования системы обслуживания, в том числе и ТКС. В общем случае сообщения на вход поступает в случайные моменты времени. Время, расходуемое на обслуживание, также является случайным. Поэтому эта теория основана на теории вероятностей и случайных процессов. Основным понятием ТМО является поток сообщений. Основным типом потоков являются случайные. Случайные потоки сообщений классифицируются наличием следующих свойств: стационарность, ординарность, отсутствие последовательности. Поток, который обладает всеми свойствами, называют простейшим. Для этого потока количество сообщений, который поступают в систему на какой-либо отрезок временной оси, распределено по закону Пуассона. Реальные потоки, как правило, не являются простейшими, поскольку имеет место последовательность, неординарность и нестационарность. Однако во время исследований часто используется простейший закон. Это поясняется тем, что простейший поток является наиболее хаотическим. Если разработана система обслуживания для простейшего потока, то обслуживание этой системы каких-либо других потоков будет более надежным. Во время расчета системы массового обслуживания при условии воздействия простейшего потока система ставится в наихудшие условия. Простейший поток в ТМО играет такую же роль, что и нормальный закон распределения случайных величин в теории вероятностей. При суперпозиции потоков, которые поступили, получается поток, близкий по своим характеристикам к простейшему.

Однако для современных ТКС характерен ряд особенностей, которые крайне трудно учесть при использовании моделей ТМО. Так, например, для современных ТКС характерно скачки интенсивности трафика. Как правило, большинство приложений работают в диалоговом режиме (т.е. поток заявок зависит от предыдущих), а значит в ТКС появляется последствие. При загрузке ТКС близкой к максимальной отсутствует возможность получить точные оценки.

Современные ТКС являются мультисервисными. Это означает, что в ТКС одновременно необходимо обслуживать разнородные потоки, а такую ситуацию крайне трудно описать в терминах ТМО. Телекоммуникационная сеть передает большой объем мультимедийного трафика, в большинстве случаев появляется необходимость использовать широко-вещательную рассылку. Средствами ТМО широко-вещательную рассылку описать практически невозможно. При моделировании ТКС средствами ТМО

информационные потоки обслуживаются по заранее скоммутированным статическим каналом связи (КС). А значит, учет загрузки КС и задача выбора КС в ТМО решить практически невозможно. При использовании ТМО не учитывается тот факт, что при передаче информации в ТКС не учитываются протоколы информационного взаимодействия.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что основными ограничениями для ТМО являются:

- стационарность входного и выходного потока заявок;
- отсутствие последствий;
- ТМО дает хорошие результаты при малой нагрузке КС;
- сложность учета мультисервисности сети;
- отсутствует возможность учета широкополосного трафика;
- отсутствует возможность учета топологии ТКС;
- сложность учета использования механизмов управления очередями, механизмов профилирования и сглаживания трафика, а также работы планировщика;
- сложность учета управления доступом в ТКС входящего потока;
- сложность учета механизмов управления потоком;
- отсутствует возможность учета протоколов информационного обмена.

Между тем, несмотря на ряд существенных недостатков моделей на базе ТМО приведенных выше они продолжают оставаться наиболее распространенным средством анализа ТКС. Это обусловлено глубокой проработкой методики применения данного математического аппарата, большим количеством моделей для различных объектов в составе ТКС (ЭВМ, КС, терминалов, узлов коммутации), а также тем что, достаточно широкий класс задач может быть формализован данным математическим аппаратом.

В конечном итоге, встал вопрос о необходимости совершенствования моделей за рамками ТМО, так как данные модели не описывают с необходимой адекватностью всего спектра процессов современной ТКС. Одним из путей преодоления недостатков ТМО при описании процессов ТКС является использование теории графов.

2. Математический аппарат теории графов и сетевого анализа. Телекоммуникационную сеть характеризуется различными по форме связями, а также различными видами взаимодействия. Часто математической моделью таких сетей может служить граф. Граф можно представить как набор точек называемых вершинами, соединенных собой линиями, называемых дугами. Каждой дуге и вершине графа может соответствовать некоторое число параметров, характеризующих естественные ограничения. Например, ТКС может быть представлена в виде графа, в котором дуги соответствуют каналам связи, а вершины – узлам коммутации. Важные параметры включены в модель в виде чисел или ве-

сов, приписанных дугам и вершинам графа. Эти веса могут быть фиксированными и случайными. Так, для ТКС типичная вершина, представляющая узел коммутации, может иметь следующие веса: максимальную пропускную способность, объем запоминающего устройства и т.п. Типичная дуга может иметь следующие веса: максимальную пропускную способность, среднюю задержку передачи по каналу связи, надежность канала связи и т.п.

Целесообразность построения модели в виде графа зависит от физической природы изучаемого объекта. Наиболее очевидна целесообразность использования графа при решении задач связности. Так, в общем случае, нас может интересовать задача доставки информации из любой точки в любую. В этом случае необходимо установить существует ли, по крайней мере, один путь из любой вершины в любую другую. Данная задача является структурной задачей. Чаще интересует не возможность доставки, а величина возможного потока. Чтобы включить данную информацию, следует рассматривать взвешенные графы. Задача определения максимального потока между точками известна как задача о максимальном потоке. Обобщение этой задачи состоит в том, чтобы найти максимальное значение потоков нескольких товаров, которые одновременно могут быть переданы при обмене между несколькими парами точек. Эта задача известна как задача о многотоварном максимальном потоке. Обе эти задачи являются задачами анализа. Задана система (ТКС) и ее модель в виде графа. Можно попытаться проанализировать граф и найти максимальное значение потока. Другой важной задачей является поиск кратчайшего пути между двумя (несколькими или всеми) точками графа, а также поиск кратчайшего пути с учетом различных ограничений.

При помощи графов можно также решать задачи синтеза. Предположим, что заданы множество станций и требования к величине максимального потока. Нужно построить оптимальную систему, удовлетворяющую этим требованиям. Одним из возможных критериев оптимальности может минимум стоимости. Предыдущие задачи о связности и максимальном потоке тесно связаны с группой задач о живучести или надежности. Речь идет о системе, которая работает в среде, способствующей возникновению условий для повреждений и поломок оборудования. Следствием этого является нарушение связи. При заданных критериях функционирования необходимо построить систему, в которой возможные нарушения работы были минимальны. Как задача синтеза, так и задача анализа могут быть сформулированы и как детерминированная, и как вероятностная.

Обычно данную информацию можно доставить разными по качеству путями. Неудачный выбор пути может привести к тому, что будут заблокированы другие потоки, которые в противном случае могли быть обслужены. Такая группа задач называется задачами нахождения кратчайшего пути доставки информации.

Во многих системах величины поступающих в сеть потоков зависят от времени. Может оказаться, что все возможные пути между двумя некоторыми узлами уже заняты, и увеличить поток между ними невозможно. Таким образом, абоненту придется ждать освобождения канала. Время ожидания может служить важным параметром, характеризующим систему. Типичной задачей анализа является определение среднего времени ожидания и изучения влияния на него структуры сети и алгоритмов поиска пути доставки информации.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что с помощью теории графов успешно решаются следующие задачи анализа ТКС [2, 8]:

- задачи маршрутизации [2, 8];
- задачи поиска кратчайших путей [2];
- задачи поиска максимального потока [2];
- задача распределения ресурсов сети [2];
- синтез глобальной структуры сети [8];
- задачи оценки надежности передачи сообщений [8];
- задача поиска маршрута для доставки информации с заданными параметрами качества;
- задачи многопутевой маршрутизации;
- задачи маршрутизации широкополосной рассылки;
- задачи оптимизации сетей с выигрышами и проигрышами [8].

В настоящее время, теория графов является одним из основных математических аппаратов применяемых для анализа поведения ТКС на сетевом уровне. Высока методологическая проработанность, простота, наглядность – основные качества моделей построенных на базе математического аппарата теории графов.

Вместе с тем у моделей теории графов есть ряд существенных недостатков, которые затрудняют использование теории графов для моделирования современных ТКС. Первоначально построенная на математике линейного программирования теория графов оперирует заведомо детерминированными связями и стационарными потоками. Во-первых, это приводит к невозможности создания моделей сети с нестационарными потоками. Во-вторых, введение в теорию графов элементов вероятности хотя и позволило описать ряд статистических процессов, но в тоже время нельзя распространить результаты такого моделирования на широкий класс стохастических процессов в сетях [2]. Кроме того, в моделях ТКС, построенных при помощи теории графов, практически невозможно учесть особенности алгоритмов информационного взаимодействия. Как отмечалось ранее, современные ТКС являются мультисервисными, а значит, оптимизацию распределения ресурсов сети необходимо производить по нескольким параметрам, что крайне сложно сделать при помощи графов. Следовательно, основными ограничениями теории графов являются:

- в основе моделей ТКС на основе графов лежит теория линейного программирования;
- невозможность работы с нестационарными потоками;
- сложность учета очередей, использования механизмов управления очередями, механизмов профилирования и сглаживания трафика, а также работы планировщика;
- сложность учета управления доступом в ТКС входящего потока;
- сложность учета механизмов управления потоком;
- сложность учета мультисервисности ТКС;
- невозможность учета протоколов информационного взаимодействия.

Наиболее эффективным способом описания протоколов информационного взаимодействия являются вероятностно-временные графы.

3. Математический аппарат вероятностно-временных графов. Вероятностно-временные графы являются расширением дискретных марковских цепей. Основное назначение ВВГ моделирование алгоритмов (протоколов) обмена данными. Алгоритм обмена данными, положенный в основу того или иного протокола, можно представить набором некоторых состояний и возможных переходов из одного состояния в другое. При этом каждый из возможных переходов можно охарактеризовать вероятностью перехода, зависящей от структуры передаваемых данных и качества КС. Кроме того, на изменение состояния обычно требуется некоторое время. Следовательно, алгоритм обмена данными может быть представлен в виде графа, в котором вершины обозначают выделенные состояния, а дуги – возможные переходы и характеризуются вероятностью перехода и временем изменения состояния. В рамках аппарата производящих функций проводится построение ВВГ, описывающего анализируемый процесс. Каждая дуга ВВГ характеризуется вероятностью ее выбора P и временем перехода τ . При этом вид функции дуги $f(P, \tau)$ должен быть таким, чтобы при нахождении произведений функций вероятности умножались, а время суммировалось. Такая функция для каждой дуги имеет вид $f(P, \tau) = PZ^\tau$, где Z – параметр [34].

Производящая функция $F(Z)$, соответствующая ВВГ в целом, является суммой функций всех путей, соединяющих начальную и конечные вершины графа. Для ее получения исходный ВВГ подвергают последовательным эквивалентным преобразованиям, проводимым по определенным правилам. Эквивалентные преобразования обычно проводят до тех пор, пока не будет получена функция, характеризующая переход из начального в конечные состояния. Из полученной производящей функции находят среднее время и дисперсию среднего времени выполнения исследуемого процесса [34]:

$$\tau_{cp} = \frac{dF(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} ;$$

$$\sigma^2 = \frac{d^2F(Z)}{dZ^2} \Big|_{Z=1} + \frac{dF(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} - \left(\frac{dF(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} \right)^2 .$$

Поскольку в рассмотренном методе дуги ВВГ характеризуются вероятностями перехода, необходимо знать выражения для их определения. Применительно к передаче данных эти вероятности должны зависеть от качества КС и характера ошибок в нем. По характеру распределения различают два вида ошибок: некоррелированные и коррелированные [35]. Большинство моделей, описывающих коррелированные ошибки, разработаны на базе цепей Маркова, например, модели Гильберта, Беннета и Фройлиха. Достаточно широко применяются также модели, основанные на статистике ошибок в реальных КС [7]. Для каналов с некоррелированными ошибками часто применяют простейшую модель ошибок (модель Пуассона). В ней свойства КС как источника ошибок задаются вероятностью искажения единичного элемента кодовой комбинации – P_0 .

При помощи ВВГ можно решать следующие задачи анализа ТКС:

- оценка вероятностно-временных характеристик протоколов информационного взаимодействия;
- оценка вероятностно-временных характеристик сетевых устройств;
- моделирование поведения абонентов сети (входного трафика сети);
- моделирование механизмов управления очередями, механизмов профилирования и сглаживания трафика, а также работы планировщика;
- моделирование механизмов управления доступом в ТКС;
- моделирование механизмов управления трафиком ТКС.

К ограничениям данного способа представления ТКС следует отнести:

- невозможность учета топологии ТКС;
- невозможность учета типа трафика ТКС. Одним из эффективных способов учета сложного характера трафика ТКС является использование фракталов.

4. Математический аппарат теории фракталов. Математический аппарат ТМО обладает огромным значением для проектировщиков ТКС системных аналитиков и очень полезен при планировании ресурсов и предсказания производительности. Однако во многих реальных случаях результаты, полученные на основании ТМО, существенно отличаются от фактически наблюдаемой производительности. Это связано с тем, что ТМО применима и дает хорошие результаты в том случае, если трафик данных подчиняется распределению Пуассона. В последние годы ряд исследований показал, что во многих ситуациях характер трафика ближе к самоподобному, чем к пуассоновскому.

Концепция самоподобия тесно связана с получившим большую известность понятием фракталов и теорией хаоса. Одним из основных свойств фракталов является самоподобие. В самом простом случае небольшая часть фрактала содержит информацию обо всем фрактале. Основными свойствами фрактальных процессов являются: медленно убывающая дисперсия; долгосрочной зависимости и флуктуационном характере спектра мощности таких процессов. На интуитивном уровне это означает, что число событий на заданном временном интервале может зависеть от числа событий, поступивших в весьма удаленные от него интервалы времени.

Основным направлением исследований в этой области является прогнозирование поведения характеристик сети (задержек трафика, длины очереди пакетов, эффективной пропускной способности сети и т.д.) в долгосрочной перспективе путем анализа тенденции изменения этих характеристик за краткий период времени. Отметим, что фрактальный анализ может быть применен только по отношению к трафику, имеющему свойство самоподобия, степень которого может быть оценена по коррелированности значений параметров трафика в широком временном диапазоне. Применение данного математического аппарата позволяет строить эффективные модели прогнозирования поведения параметров трафика в сети, а на основе этих прогнозов осуществлять высокоэффективное управление ТКС.

В качестве недостатков данного методического аппарата можно отметить:

- необходимость формирования объектов сети в виде элементов данного математического аппарата, что не позволяет использовать готовые модели в качестве исходных при решении задач управления ТКС;
- у большинства типов трафика фрактальность может изменяться со временем. Фрактальность трафика в некоторые моменты времени может исчезать, а затем появляться вновь. Некоторые типы трафика могут обладать мультифрактальностью, что значительно усложняет построение фрактальных моделей трафика;
- не до конца понятно как фрактальность трафика на различных уровнях протоколов влияет на эффективность ТКС;
- на сегодняшний день не существует единой методики, позволяющей точно оценить фрактальность трафика;
- нет методики суммирования (агрегирования) фрактальных трафиков. Следовательно, возникает сложность определения фрактальности агрегированного трафика. Из проведенного анализа способов формализации ТКС можно сделать следующие выводы.

Выводы

В данной работе проанализированы возможности и ограничения различных подходов к анализу процессов в ТКС (ТМО, ВВГ и теория графов). Из проведенного анализа видно, что каждый из рассмат-

риваемых методов моделирования, хорошо подходит для построения частных моделей ТКС. И ни один из рассматриваемых методов моделирования не подходит разработки комплексной модели ТКС. Проведенный анализ показал, что каждый из формализмов дополняет возможности других по моделированию ТКС. Так, ТМО хорошо подходит для оценки времени доставки сообщений, теория графов для решения задач маршрутизации потоков, ВВГ – для оценки вероятностно-временных характеристик протоколов информационного взаимодействия, фрактальные модели – для оценки характеристик сетевого трафика. Поэтому для разработки комплексной модели ТКС необходимо разработать комплексную методику оценки ТКС, которая включит в себя все достоинства рассмотренных методов описания ТКС.

Список литературы

1. Ябных Г.А., Столяров Б.А. Оптимизация информационно вычислительных сетей. – М.: Радио и связь, 1987..
2. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей; Пер. с англ. – М.: Мир, 1984..
3. Авен О.И., Гурин Н.Н., Коган Я.А. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. – М.: Наука, 1982.
4. Бутрименко А.В. Разработка и эксплуатация сетей ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1981. (ББК 32.97, Б93) Ст.КБ № 621.397Э Б93 1442333.
5. Якубайтис Э.А. Информационно вычислительные сети. – М.: Финансы и статистика, 1984.
6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания; Пер. с англ. И.И. Грушко; Под ред. В.И. Неймана. – М.: Машиностроение, 1979.
7. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями; Пер с англ. – М.: Мир, 1979.
8. Будко П.А. Выбор пропускных способностей каналов при синтезе сети связи в условиях изменяющейся нагрузки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2000. – Т. 3, № 3-4. – С. 68-72.
9. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешиов А.П. Сети коммутации пакетов / Под ред. В.И. Семинихина. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с., ил.
10. Фрэнк Г., Фриш И. Сети связи и потоки: Пер. с англ. – М.: Связь, 1978. – 448 с.
11. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ. В 2 ч.: Пер. с англ. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – Ч. 1. – 336 с.
12. Шварц М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Жожикашвили. – М.: Радио и связь, 1981. – 336 с.
13. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
14. Захаров Г.П. Методы исследования сетей передачи данных. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
15. Информационные сети и их анализ: Сборник / Под ред. А.Д. Харкевич, В.А. Гармаи. – М.: Наука, 1972. – 220 с.
16. Дэвис Д., Барбер Д., Прайс У. Вычислительные сети и сетевые протоколы. – М.: Мир, 1982.
17. Лазарев В.Г., Лазарев Ю.В. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 216 с.
18. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. – М.: Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.
19. Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В. Системы и сети передачи информации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2001. – 336 с.
20. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание (теория и приложения) / Пер. с фр. под ред. И.Н. Коваленко. – М.: Мир, 1965. – 302 с.
21. Будко П.А., Федоренко В.В. Управление в сетях связи. Математические модели и методы оптимизации: монография. – М.: Изд. физико-математической литературы, 2003. – 228 с. – ISBN 5-94052-064-2.
22. Пороцкий С. Моделирование алгоритма маршрутизации транспортной АТМ сети // ISSN 0013-5771. Электросвязь. – 2000. – № 10. – С. 16-19.
23. Оптимизация пропускной способности звеньев Ш-ЦСИС при ограниченных сетевых ресурсах [Текст] / С.А. Турко, Л.А. Фомин, П.А. Будко, С.Н. Зданевич, Н.Н. Гахов // Электросвязь. – 2002. – № 2. – С 17-19. – ISSN 0013-5771.
24. Куракин С.А. Проблемы маршрутизации информационных потоков при проектировании глобальных сетей телекоммуникаций // ISSN 0013-5771. Электросвязь. – 1997. – № 8. – С. 15-17.
25. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей: Монография. – М.: Машиностроение, 2004. – 216 с.
26. Будко П.А. Выбор пропускных способностей каналов при синтезе сети связи в условиях изменяющейся нагрузки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2000. – Т. 3, № 3-4. – С. 68-72.
27. Столлингс В. Современные компьютерные сети. 2-е изд. – С.-Пб.: Питер, 2003. – 784 с.
28. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. – М.: Мир, 1981.
29. Басакер Р.Г., Саати Т.Л. Конечные графы и сети. – М.: Наука, 1974.
30. Данциг Г.Л. Линейное программирование и его применение и обобщение. – М.: Прогресс, 1966. – 344 с.
31. Форд Л.Р., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. – М.: Мир, 1966.
32. Френк Г., Фиш И. Сети, связь и потоки. – М.: Связь, 1978.
33. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. – М.: Мир, 1974.
34. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев, А.Г. Бердников, Э.Ш. Гойхман, Б.Д. Сизов; Под. ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
35. Емельянов Г.А., Шварцман В.О. Передача дискретной информации и основы телеграфии: Учебник для вузов. – М.: Связь, 1973. – 384 с.
36. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов / Под ред. Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО НЭО «Эко-Перспектива», 2006. – 348 с.
37. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телеграфии и ее приложения. – С.-Пб.: БХВ_Петербург, 2005. – 288 с.
38. Шелухин О.И., Тенякиев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях: Монография / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.

Поступила в редколлегию 3.08.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.А. Демидов, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.