In summary, this work provides a useful tool for design and optimization of future networks using predictive feedback control law thereby avoiding transfer instability.

**References**

1. Биковцев І.С, Дем’янчук В.С., Клименко В.О. та ін. Якість та ефективність системи організації повітряного руху / [І.С. Биковцев, В.С. Дем’янчук, В.О. Клименко В.О. та ін.]. – К.: ДП ОПР, 2010. – 316 с.

2. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks (5th Edition). – Prentice Hall, 2011. – 962 p.

3. McCarthy J., DiSario R., Saraoglu H. A Recursive Algorithm For Fractionally Differencing Long Data Series // Journal of Modern Applied Statistical Methods . – May, 2003, Vol. 2, No. 1. – PP. 272-278.

4. Kokoszka P.S., Taqqu M.S. Parameter Estimation for Infinite Variance Fractional ARIMA //The Annals of Statistics, Vol. 24, pp. 1880-1913, 1996.

5. Виноградов Н.А. Анализ потенциальных характеристик устройств коммутации и управления сетями новых поколений / Н.А. Виноградов // Зв’язок.– 2004. – №4. – с. 10-17.

6. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.

004.732:004.057.4:004.057.2

**Амирханов Э. Д.,** аспирант *(Национальный авиационный университет)*

## ОЦЕНИВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ СТАТИСТИКАХ ДЛИНЫ ПАКЕТОВ ДАННЫХ

**Амірханов Е. Д. Оцінювання продуктивності спеціалізованих бездротових мереж при довільних статистиках довжини пакетів даних.** Розглянута задача оцінки продуктивності спеціалізованих бездротових мереж, в яких число діючих станцій змінюється по випадковому закону і не може з достатньою достовірністю контролюватися в процесі передачі даних. Для отримання асимптотичних характеристик тривалості передачі запропоновано використовувати інформаційно-ентропійні міри модельних розподілів. Розглянуто вплив ключових і додаткових параметрів ефективності в даних умовах функціонування мережі і дані оцінки взаємної кореляції ключових параметрів ефективності.

***Ключові слова:*** БЕЗДРОТОВА МЕРЕЖА, САМОПОДІБНИЙ ТРАФІК, ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНА МІРА, ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА ЕНТРОПІЯ, ПАРАМЕТРИ ЕФЕКТИВНОСТІ

**Амирханов Э. Д. Оценивание производительности специализированных беспроводных сетей при произвольных статистиках длины пакетов данных** Рассмотрена задача оценки производительности специализированных беспроводных сетей, в которых число действующих станций изменяется по случайному закону и не может с достаточной достоверностью контролироваться в процессе передачи данных. Для получения асимптотических характеристик длительности передачи предложено использовать информационно-энтропийные меры модельных распределений. Рассмотрено влияние ключевых и дополнительных параметров эффективности в рассматриваемых условиях функционирования сети и даны оценки взаимной корреляции ключевых параметров эффективности.

***Ключевые слова:*** БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ, САМОПОДОБНЫЙ ТРАФИК, ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНАЯ МЕРА, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ, ПАРАМЕТРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ

**Amirkhanov E.D. Estimation of productivity of the specialized wireless networks at the arbitrary statistics of length of data packets.** The problem of estimation of productivity of the specialized wireless networks is considered, in which the number of the operating stations changes on a casual law and cannot with sufficient authenticity be controlled in the process of data communication. For the receipt of asymptotic descriptions of duration of transmission it is suggested to use the information and entropy measures of the model distributing. Influencing of key and additional parameters of efficiency is considered in the examined operating conditions of network and estimations of mutual correlation of key parameters of efficiency are given.

***Keywords:*** WIRELESS NETWORK, SELF SIMILAR TRAFFIC, INFORMATION AND ENTROPY MEASURE, DIFFERENTIAL ENTROPY, PERFORMANCE INDICATORS

**I. Введение.** Специализированные беспроводные сети широко применяются в системах критичного применения, в специальных подразделениях силовых структур, для обеспечения спасательных работ в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) самого разного характера. Сети такого назначения имеют децентрализованную систему контроля и управления. Организация общего центра управления сопряжена со значительными затратами времени, а обеспечить требуемые мобильность, надежность и безопасность работы такого центра в условиях ЧС практически невозможно.

В специализированных беспроводных сетях используют самые разные архитектуры, технологии и стандарты, поэтому такие сети являются гетерогенными по определению. Однако основой специализированных беспроводных сетей, как правило, являются сети стандартов IEEE 802.11. Исчерпывающее изложение принципов построения сетей стандарта IEEE 802.11 разных модификаций, методов аппаратной реализации и оценка производительности даны в работе [1]. За основу анализа временных характеристик работы сети взяты модели равномерного [2] или геометрического [3] распределений вероятностей отправки пакета каждой станцией сети. Предполагается, что все станции в сети являются статистически однородными. Под этим подразумевается одинаковое вероятностное распределение длин пакетов, выбираемых каждой станцией из очереди. В случае смешанной (гетерогенной) сети предлагается каждому устройству предоставлять в трафике примерно равный временной интервал.

В рассматриваемых здесь специализированных беспроводных сетях данные предположения выполняются не в полной мере. Трафик сети, как правило, является разнородным (речь, видео, данные) и самоподобным по своей природе [4]. Его статистические характеристики уже не могут быть описаны распределениями экспоненциального семейства. В этом случае используются распределения с так называемыми «тяжелыми хвостами» (Парето, Вейбулла, гамма- и бета-распределения).

Для оценивания характеристик производительности гетерогенных беспроводных сетей, в которых циркулирует разнородный самоподобный трафик, необходимо применять непараметрические методы. В качестве нижнего порога производительности можно получать некие асимптотические сравнительные оценки, например, информационно-энтропийные меры рассматриваемых вероятностных распределений.

Исследованию данного вопроса и посвящена представленная работа.

**II. Информационно-энтропийные характеристики сетевого трафика.** Согласно моделям, предложенным в [2, 3], непрерывный временной интервал, на котором происходит передача данных, разбивается на виртуальные слоты. В каждом слоте может вообще не быть пакета (ни одна из станций сети не ведет передачу), или один пакет (одна и только одна станция ведет передачу), или иметь место коллизия, когда передавать пытаются две или более станций.

Пусть в начале каждого слота $t_k$ $j$-я станция пробует отправить пакет. Вероятность попытки обозначим $p_{kj}$. Если попытка оказалась неудачной, после некоторого интервала отсрочки $\tau_d(n_{\text{tr}})$ она повторяется. Общая длительность интервала отсрочки не зависит от числа попыток передачи $n_{\text{tr}} = 0, 1, 2, \ldots$ вплоть до наступления события успешной передачи. Величина $\tau_d(n_{\text{tr}})$ выбирается из геометрического распределения с параметром $\tau_d(0)$, т.е.

$\tau_d(n_{\text{tr}})=0,1,2,\dots$ с соответствующими вероятностями $\tau_d(0)$, $\tau_d(0)\left[1-\tau_d(0)\right]$, $\tau_d(0)\left[1-\tau_d(0)\right]^2$, …

Шкала времени – дискретная, а каждый тип слота представляет собой целое число коротких (элементарных) интервалов. Поскольку станция делает попытку передачи в начале слота, вероятность коллизии и число повторных попыток не зависят от длительности пакета. Как отмечалось выше, наиболее общей мерой для вероятностных распределений, по крайней мере, принадлежащих к одному типу (в рассматриваемом случае – к дискретному типу), является энтропия. Приведем сравнительные энтропийные характеристики модельных распределений [6].

1. Геометрическое распределение неразрывно связано с биномиальным. Отличие состоит в том, что биномиальная случайная величина определяет вероятность $m$ успехов в $n$ испытаниях, а геометрическая – вероятность $n$ испытаний до первого успеха (включая первый успех).

2. Равномерно распределённая на $\left[-a,a\right]$ случайная величина имеет наивысшую энтропию среди всех случайных величин, распределённых на $\left[-a,a\right]$.

3. Показательное распределение с параметром λ имеет наибольшую энтропию среди всех распределений, определённых на полуоси $\left[0,\infty\right]$ с математическим ожиданием λ.

4. На всей прямой $\left[-\infty,\infty\right]$, среди всех распределений с фиксированными математическим ожиданием и дисперсией, наибольшей энтропией обладает нормальное распределение.

Информационная энтропия геометрического распределения

$$H_G(x)=-\log_2 p-\frac{q}{p}\log_2 q$$

Дифференциальная информационная энтропия гауссовского распределения

$$H_N(x)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right]\ln\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right]\right\}dx=\log_2\left(\sigma\sqrt{2\pi e}\right).$$

Энтропия дискретного источника всегда положительна. Дифференциальная энтропия $H(x)$ в отличие от энтропии источников дискретных сообщений может принимать положительные, отрицательные и нулевые значения может быть отрицательной [5]. Дифференциальная энтропия в отличие от обычной энтропии дискретного источника не является мерой собственной информации, содержащейся в ансамбле значений случайной величины. Она зависит от масштаба $x$ и может принимать отрицательные значения. Информационный смысл имеет не сама дифференциальная энтропия, а разность двух дифференциальных энтропий, чем и объясняется ее название.

Дифференциальная энтропия не меняется при изменении всех возможных значений случайной величины $x$ на постоянную величину. Действительно, масштаб $x$ при этом не меняется, и справедливо равенство

$$h(x+C)=-\int_{-\infty}^{\infty}w(x+C)\mathbf{log}\,w(x+C)d(x+C)=-\int_{-\infty}^{\infty}w(x)\mathbf{log}(x)d(x)$$

Из этого следует, что $H(x)$ не зависит от математического ожидания случайной величины, т.к. изменяя все значения $x$ на $C$, мы тем самым изменяем на $C$ и ее среднее, то есть математическое ожидание.

Дифференциальная энтропия аддитивна, то есть для объединения $x \cup y$ независимых случайных величин $x$ и $y$ справедливо равенство: $H(x \cup y) = H(x) + H(y)$.

Доказательство этого свойства аналогично доказательству свойства аддитивности обычной энтропии.

Для сравнения результатов моделей [2] и [3] рассмотрим информационные характеристики модельных распределений.

В случае геометрического распределения проводим независимые повторные испытания до появления "успеха". Для вычисления энтропии $H_G(x)$ составим диаграмму состояний с вероятностями «успеха» $p < 1$ и «неуспеха» $q < 1$. Очевидно, $p + q = 1$.

Система находится в исходном состоянии $s_0$. При достижении успеха она переходит в невозвратное (поглощающее) состояние $s_f$ (рис. 1). Таким образом, случайный процесс является не транзитивным (не переходящим в предыдущее состояние).

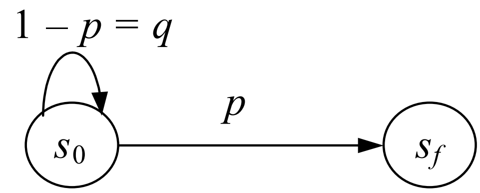


Рис. 1. Состояния системы

Граф переходов имеет следующий вид (рис. 2).

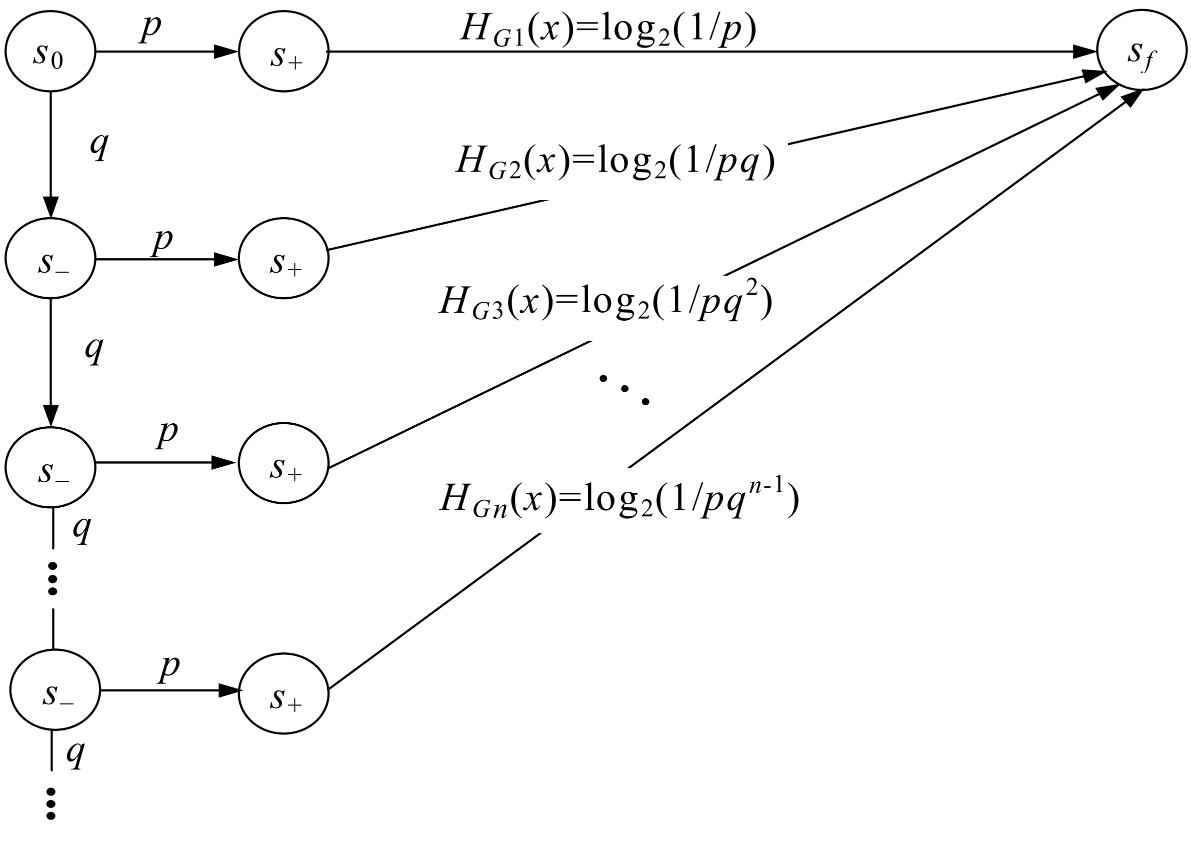


Рис. 2. Граф переходов

На рис. 2 $s_+$ – переходное состояние при успехе испытания; $s_-$ – переходное состояние при неуспехе испытания; $H_{Gi}(x)$, $i = 1, 2, \ldots, n, \ldots$ – энтропия распределения при достижении успеха на $i$ -м шаге.

Тогда текущая энтропия геометрического распределения может быть рассчитана по следующим формулам:

$$H_G(x) = -p\log_2 p - pq\log_2(pq) - pq^2\log_2(pq^2) - \ldots - pq^{n-1}\log_2(pq^{n-1}) - \ldots =$$
$$= -\left(1+q+q^2+\ldots+q^{n-1}+\ldots\right)p\log_2 p - pq\left(1+2q+3q^2+\ldots+nq^{n-1}\right)\log_2 q;$$

$$1+q+q^2+\ldots+q^{n-1}+\ldots = \frac{1}{1-q};$$

$$1+2q+3q^2+\ldots+nq^{n-1}+(n+1)q^n =$$
$$= 1+q+q^2+\ldots+q^{n-1}+\ldots+q+2q^2+\ldots+(n-1)q^{n-1}+nq^n\ldots =$$
$$= \frac{1}{1-q}+q\left(1+2q+3q^2+\ldots+nq^{n-1}\right)=\ldots=\frac{1}{1-q}+q\frac{1}{1-q}+q^2\frac{1}{1-q}+\ldots=\frac{1}{(1-q)^2};$$

$$H_G(x) = -\log_2 p - pq\frac{1}{(1-q)^2}\log_2 q = -\log_2 p - \frac{q}{p}\log_2 q.$$

Была рассчитана зависимость энтропии геометрического распределения от вероятности $p$ успешной передачи данных одной из станций. Полученные результаты представлены в виде графика на рис. 3.

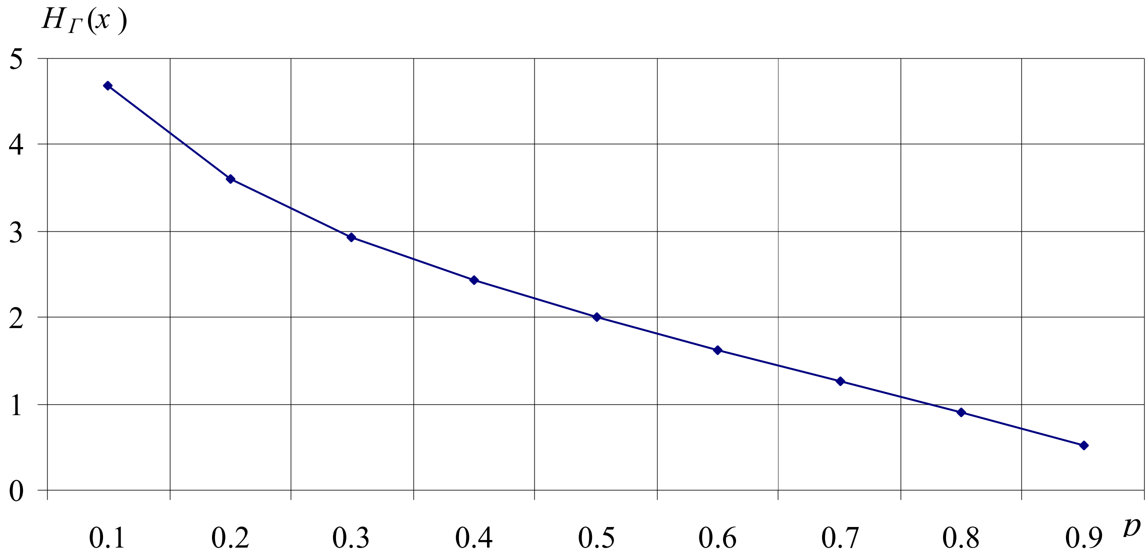


Рис. 3. Зависимость энтропии геометрического распределения от вероятности успеха $p$

Видно, что при задании более высокой вероятности успеха энтропия распределения снижается, следовательно, потребный ресурс для обмена данными уменьшается. Однако это достигается только при уменьшении вероятности коллизий в сети. Достичь этого можно, например, ценой ограничения такого ключевого параметра эффективности, как максимальная длительность передаваемых пакетов.

Для сравнения рассчитана зависимость дифференциальной энтропии от среднеквадратического отклонения интервала передачи от максимально допустимого. Результаты расчетов показаны на рис. 4 в виде графика. Наблюдается монотонный рост энтропии, следовательно, рост потребного ресурса обмена данными.

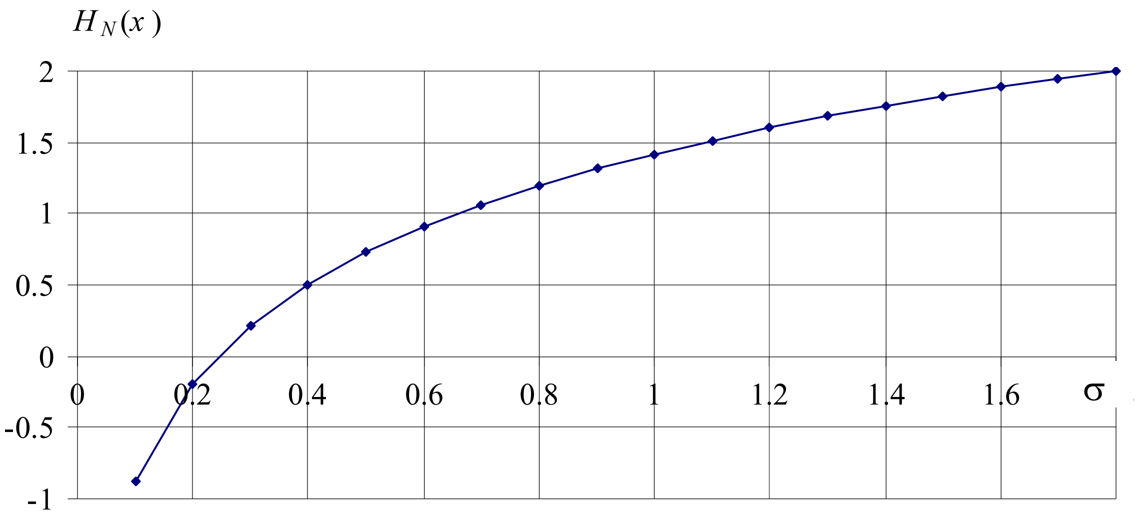


Рис. 4. Зависимость энтропии гауссовского (нормального) распределения от среднеквадратического отклонения $\sigma$

Отметим, что при расчете энтропийных мер можно использовать разные параметры модельных распределений. При этом сравнительные оценки, основанные на энтропии, будут достаточно универсальными и наглядными.

**III. Заключение.** Информационно-энтропийные меры, которые предлагается применять для оценки производительности беспроводных компьютерных сетей, являются достаточно универсальными и дают наглядное представление о ключевых параметрах эффективности функционирования сетей. Рассчитывая обычную или дифференциальную энтропию для модельных распределений интенсивности разнородного сетевого трафика, можно получать обобщенные сравнительные характеристики эффективности функционирования сетей в широком диапазоне статистических параметров

Для оценивания производительности сетей, в частности, беспроводных сетей, необходимо найти функциональные или статистические связи между параметрами трафика и характеристиками сети. Эта задача представляет предмет дальнейших исследований.

Литература

1. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера. – 2005. – 592 с.
2. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – Nr. 18(3), March, 2000. – PP. 535 – 547.
3. Cali F., Conti M., Gregory E. Tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit // IEEE/ACM Transactions on Networking. – Nr. 8(6), December, 2000. – PP. 785 – 799.
4. Столлингс В. Современные компьютерные сети. 2-е издание. – СПб.: Питер, 2003. – 783с.
5. Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
6. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. – М.: Высшая школа. – 1989. – 320 с.