

ПРОБЛЕМА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И СПОСОБ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Л. С. Восков, С. В. Цыганов

Рассмотрена проблема взаимного влияния современных беспроводных вычислительных сетей WLAN (IEEE 802.11) и WPAN (IEEE 802.15) при их функционировании в едином диапазоне частот в системах автоматизации промышленных предприятий. Предложен универсальный метод решения задачи с помощью оценки энергетической составляющей. В качестве примера рассмотрены два частных случая оценки с помощью устройства стандарта IEEE 802.15.4.

Ключевые слова: автоматизация, беспроводная сеть, взаимное влияние.

ВВЕДЕНИЕ

Создание современных высокотехнологичных предприятий требует внедрения беспроводных вычислительных сетей. Эффективность данного подхода проявляется в возможности объединения всех управляющих, обслуживающих и контролирующих приборов в единую вычислительную сеть, что, в свою очередь, обеспечивает целостный механизм контроля производства продукции на предприятии с помощью средств вычислительной техники.

С расширением зоны сбора информации и управления техническими средствами предприятия неизбежно встает вопрос о расширении кабельной сети вычислительного комплекса. Однако такое расширение не всегда возможно, в особенности для процессов автоматизации подвижных устройств. Примером подобных процессов являются процессы автоматизации складских помещений ("умная палета"), автоматизации системы управления и диспетчеризации подвижных effекторов и систем сбора статистики (интраполистика на предприятии), а также ERP-системы. В данных случаях прибегают к замене проводных участков вычислительных сетей беспроводными участками [1]. Эффективной заменой проводного участка вычислительной сети предприятия является стандарт беспроводной связи IEEE 802.11 Wi-Fi — данный стандарт позволяет при небольших финансовых затратах обеспечить хорошую зону покрытия сетью и достичь высокого уровня мобильности.

Классические средства контроля безопасности и средства оценки протекающих на предприятии процессов, такие как датчики температуры, задымления, возгорания и т. п., базируются на основе проводной кабельной сети. Современные

тенденции развития заключаются в переходе от проводных решений к беспроводным, функционирующими по стандартам связи IEEE 802.15, в частности к датчикам-элементам сенсорных сетей IEEE 802.15.4 ZigBee [2, 3].

Разворачивание современной беспроводной сенсорной сети IEEE 802.15 на предприятии, где уже внедрены беспроводные сети IEEE 802.11, приведет к ухудшению номинальных характеристик как вновь развертываемой сенсорной сети, так и беспроводной сети, уже внедренной в производственный процесс. Причиной является тот факт, что рассмотренные стандарты беспроводной связи работают в одном диапазоне частот ISM 2,4 ГГц. Чтобы улучшить качественные показатели беспроводных сетей при их совместном функционировании, необходимо минимизировать взаимное влияние и кросс-помехи беспроводных сетей [4, 5]. В настоящее время задача минимизации взаимного влияния сегментов беспроводной сети IEEE 802.11 и сенсорной сети класса IEEE 802.15 в рамках единого комплекса беспроводных сетей не решена.

Суть предлагаемой методики состоит в том, что для минимизации взаимного влияния необходимо провести энергетический анализ спектра частот и разместить приемопередающие устройства, входящие в комплекс беспроводных сетей, по частотным каналам с минимальным уровнем взаимного шума и, следовательно, с уменьшенной вероятностью ошибок при передаче. Исходными данными для проведения энергетического анализа спектра частот диапазона ISM 2,4 ГГц служит оценочное устройство стандарта IEEE 802.15.4, выступающее в роли датчика энергетической составляющей.

АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА НОМЕРА КАНАЛА: ТИПОВОЙ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ

Для решения задачи минимизации взаимного влияния существует типовой алгоритм автоматического выбора номера канала, рассмотренный в [6, 7]. Типовой алгоритм состоит из последовательных этапов запуска приемника, сбора данных об уровне шумов в радиочастотном эфире на момент проведения оценки, проведения анализа и преобразования данных, а также выбора оптимального номера канала и последующем запуске передающей части устройства на данном частотном канале.

Показатели качества, используемые для выбора номера канала, определяются для каждого сетевого стандарта. Для устройств IEEE 802.11 таким показателем является отсутствие рабочих станций данного (и только данного) беспроводного сетевого стандарта на оцениваемом частотном канале. Для устройств IEEE 802.15.4 такой показатель — это минимальный уровень амплитудной характеристики энергетической составляющей на данном канале, а для устройств IEEE 802.15.1 — алгоритм выбора оптимального номера канала вообще не реализуется, что является следствием используемого алгоритма частотных скачков (FHSS) при передаче данных в радиочастотном эфире.

Основными недостатками типового алгоритма являются его применимость только к отдельному беспроводному сетевому стандарту в отдельности и невозможность реализации для нескольких сетевых стандартов одновременно, а также привязанность к конкретному оценивающему устройству конкретного оцениваемого сетевого стандарта. Однако не все сетевые стандарты позволяют получать реальные данные о состоянии радиочастотного эфира в диапазоне частот, где ведется передача.

Интеллектуальный алгоритм уменьшения взаимного влияния базируется на методике выбора оптимальных номеров каналов для всех сетевых стандартов в целом. Под интеллектуальностью алгоритма понимают возможность оценки радиочастотного эфира и принятия решения без участия человека. Выбор номеров каналов должен учитывать и внешнюю операционную обстановку, не зависящую непосредственно от организуемой гетерогенной беспроводной сети. UML-диаграмма деятельности интеллектуального алгоритма представлена на рис. 1.

Сбор данных — оценка состояния радиочастотного эфира по частотным каналам — производится оценивающим устройством, затем полученные данные преобразуются с целью соответствия параметрам стандарта, для которого производится оценка. После проведения оценки выбирается

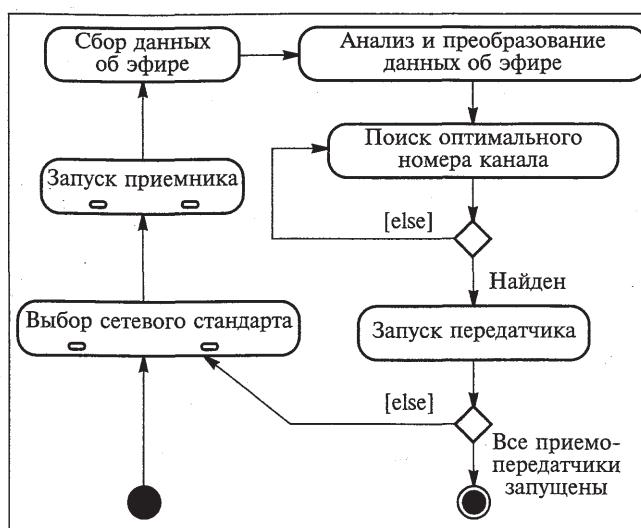


Рис. 1. Интеллектуальный алгоритм выбора номеров каналов

частотный канал с минимальным уровнем амплитуды шумов, и далее приемопередающее устройство рассматриваемого стандарта запускается на выбранном частотном канале. После этой операции выполняется переход на следующую итерацию.

Представленный алгоритм позволяет организовать передачу данных с уменьшенной вероятностью ошибок, поскольку оперирует реальными данными, полученными от устройств, оценивающих текущую операционную обстановку. Данную итерационную последовательность можно инициировать как на этапе инициализации беспроводного сетевого шлюза, так и в процессе его работы в случае, когда требуется регулярная подстройка под операционную обстановку в эфире либо когда изменение операционной обстановки признается потенциально непредсказуемым.

Для реализации данного алгоритма разработана универсальная модель сбора, анализа и преобразования данных о состоянии радиочастотного эфира — модель оценки состояния радиочастотного эфира. При разработке принято во внимание то обстоятельство, что параметры как оценивающего устройства, так и оцениваемого стандарта передачи данных могут варьироваться, т. е. модель должна быть универсальной для стандартов частотного диапазона ISM.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАДИОЧАСТОТНОГО ЭФИРА БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Для возможности оценки состояния радиочастотного эфира необходимо наличие в системе хотя бы одного оценочного устройства, функционирующего в рассматриваемом частотном диапазоне.

В качестве критерия взаимного влияния будем использовать амплитудную энергетическую характеристику $E(f, \Delta f)$ паразитных сигналов (шумов, помех или конкурирующих станций) на канале с центральной частотой f и шириной Δf . Энергетическая характеристика описывается математическим законом:

$$E(f, \Delta f) = \int_{f - \frac{\Delta f}{2}}^{f + \frac{\Delta f}{2}} e(f) df. \quad (1)$$

Мгновенное значение амплитуды e снимается с входного каскада приемопередающего устройства. Энергетическая составляющая $E(f, \Delta f)$ представляет собой усредненное значение энергетических составляющих за единицу времени оценки. Такое решение позволяет избежать влияния случайных ошибок, вызванных непредсказуемостью радиоканала при проведении подсчетов, т. е. позволяет получить реальную картину происходящего в эфире за указанный промежуток времени.

Для каждого беспроводного сетевого стандарта набор значений частот $\{f\}$, а также ширина частотного канала Δf уникальны. Энергетическую картину с точки зрения каждого конкретного используемого стандарта беспроводной связи получают по методике аппроксимации полученных показаний $E(f, \Delta f)$ оценочных приборов к конкретному стандарту связи.

В общем случае оценочное устройство является дискретным, поэтому в качестве исходных данных о состоянии физической среды передачи данных (радиочастотного эфира) имеется набор дискретных значений, соответствующих частотам оценочного устройства:

$$E(f_M, \Delta f_M) = \{E_M\}; \quad M = \overline{M_1, M_2}; \\ f_M = f_{M_1} + (M - M_1)\Delta f_M, \quad (2)$$

где M — набор номеров частотных каналов с границами в M_1 и M_2 ; f_M — центральная частота частотного канала с номером M ; Δf_M — полоса частот, занимаемая одним приемопередающим устройством и равная шагу его частотной сетки.

В качестве результата требуется получить набор дискретных значений (3) по соответствующим частотам стандарта связи, применительно к которому производится оценка состояния радиочастотного эфира:

$$E(f_K, \Delta f_K) = \{E_K\}; \quad K = \overline{K_1, K_2}; \\ f_K = f_{K_1} + (K - K_1)\Delta f_K, \quad (3)$$

где Δf_K — шаг частотных каналов по стандарту устройства связи, для которого производится оценка состояния радиочастотного эфира.

Частотные сетки стандартов связи различны, т. е. имеет место несоответствие значений, входящих в наборы центральных частот $\{f_M\}$ и $\{f_K\}$ частотных каналов приемопередающих устройств, также различны значения ширины Δf_M и Δf_K каждого из частотных каналов. Таким образом, можно говорить о необходимости решения задачи для проведения оценки состояния радиочастотного эфира:

$$E(f_{K_i}, \Delta f_K) = \frac{\Delta f_M}{\Delta f_K} F(E(f_{M_j}, \Delta f_M)), \\ M_j = \overline{M_{j_1}, M_{j_2}}. \quad (4)$$

Зависимость (4) представляет собой нормированную функциональную зависимость от набора значений (2) и носит дискретный характер. Функциональная зависимость должна обеспечить вычисление значения энергетической составляющей для значений из множества $\{f_K\}$ через дискретные значения энергетической составляющей от аргументов из множества $\{f_M\}$ при неравных значениях Δf_M и Δf_K .

Для выяснения характера зависимости $F(E(f_{M_j}, \Delta f_M))$ необходимо рассмотреть различные случаи соотношения интервалов Δf_M и Δf_K . Для каждого из случаев будут иметь место различные значения переменных, по которым производятся дальнейшие вычисления. Графическая интерпретация общего случая — (характерно для значений $\Delta f_K \geq 2\Delta f_M$) — представлена на рис. 2. В этом случае имеет место перекрытие интервалом Δf_K одного или более кратных участков Δf_M .

Для значений $\Delta f_K < 2\Delta f_M$ происходит вырождение по причине того, что не происходит перекрытия ни одного целого кратного интервала Δf_M . В данных случаях интервал частот оцениваемого диапазона вырождается в правый Δf_R и левый Δf_L некратный участок — вырождение 1-го вида

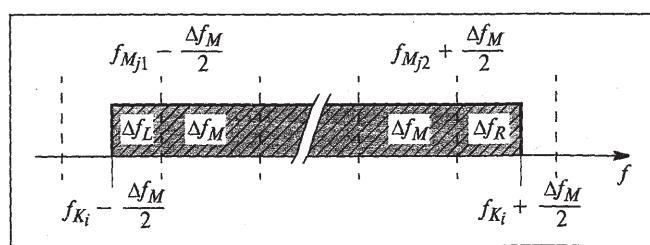


Рис. 2. Графическая интерпретация для общего случая

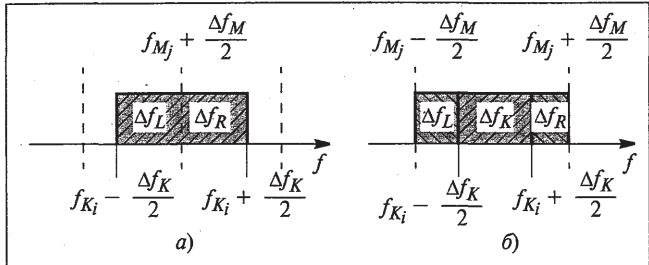


Рис. 3. Вырождения 1-го (а) и 2-го (б) видов

(рис. 3, а); либо в участок, находящийся посередине кратной зоны — вырождение 2-го вида (рис. 3, б).

Исходя из вышеизложенного, расчет значений энергетической составляющей в общем случае следующий:

$$F(E(f_{M_j}, \Delta f_M)) = \sum_{M_j=M_{j_1}}^{M_{j_2}} E(f_{M_j}, \Delta f_M) + \\ + \int_{f_{M_{j_1}} - \frac{\Delta f_M}{2}}^{f_{M_{j_2}} + \frac{\Delta f_M}{2} + \Delta f_R} e \cdot df + \int_{f_{M_{j_1}} - \frac{\Delta f_M}{2} - \Delta f_L}^{f_{M_{j_2}} + \frac{\Delta f_M}{2}} e \cdot df. \quad (5)$$

Среди неизвестных значений в выражении (5) выступают интегральные суммы значения энергетической составляющей по некратным участкам слева Δf_L и справа Δf_R . Для поиска данных значений необходимо применить аппроксимационный алгоритм. Схемотехнические особенности стандартной схемы оценки энергетической составляющей, а именно наличие полевого транзистора, работающего на границе режима отсечки, позволяет говорить о необходимости проведения экспоненциальной интерполяции. Однако из-за малых расхождений уровня амплитуды энергетической составляющей при плавном изменении частоты, обусловленной физическими законами распространения радиоволн и гармоническими процессами, целесообразнее применить интерполяционный процесс 2-го порядка как наиболее простой и точный алгоритм.

Тогда справедливо следующее выражение для приближенных вычислений:

$$\begin{cases} f_{M_j} + \Delta f_B \\ \int e \cdot df \approx \tilde{E}(f_{M_j}, \Delta f_M, \Delta f_A, \Delta f_B); \\ f_{M_j} + \Delta f_A \\ -\frac{\Delta f_M}{2} \leq x_1 \leq x_2 \leq \frac{\Delta f_M}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

Доказано, что используя соотношения (5) и (6) для функциональной зависимости, выражение (4) для общего случая можно переписать в виде (7),

для вырождения 1-го вида — в виде (8), для вырождения 2-го вида — в виде (9):

$$E_0(f_{K_i}, \Delta f_K) \approx \frac{\Delta f_M}{\Delta f_K} \left(\sum_{M_j=M_{j_1}}^{M_{j_2}} E(f_{M_j}, \Delta f_M) + \right. \\ \left. + \tilde{E}\left(f_{M_{(j_1-1)}}, \Delta f_M, \left(\frac{\Delta f_M}{2} - \Delta f_L\right), \frac{\Delta f_M}{2}\right) + \right. \\ \left. + \tilde{E}\left(f_{M_{(j_2+1)}}, \Delta f_M, -\frac{\Delta f_M}{2}, \left(\Delta f_R - \frac{\Delta f_M}{2}\right)\right)\right); \quad (7)$$

$$E_1(f_{K_i}, \Delta f_K) \approx \frac{\Delta f_M}{\Delta f_K} \left(\tilde{E}\left(f_{M_j}, \Delta f_M, \frac{\Delta f_M}{2} - \Delta f_L, \frac{\Delta f_M}{2}\right) + \right. \\ \left. + \tilde{E}\left(f_{M_{(j+1)}}, \Delta f_M, -\frac{\Delta f_M}{2}, \Delta f_R - \frac{\Delta f_M}{2}\right)\right); \quad (8)$$

$$E_2(f_{K_i}, \Delta f_K) \approx \frac{\Delta f_M}{\Delta f_K} \tilde{E}\left(f_{M_j}, \Delta f_M, \left(-\frac{\Delta f_M}{2} + \Delta f_L\right), \right. \\ \left. \left(\frac{\Delta f_M}{2} - \Delta f_R\right)\right). \quad (9)$$

Рассмотрим пример применения данной модели для расчета в конкретных случаях.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАНДАРТОВ IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА-УСТРОЙСТВА СТАНДАРТА IEEE 802.15.4

Данные случаи являются частными случаями рассматриваемой методики оценки энергетической составляющей. Рассмотрим набор исходных данных согласно спецификации и RFC используемых стандартов. Данный набор значений представлен в таблице.

Рассмотрим пары стандартов: 1) IEEE 802.15.4 и 802.11; 2) IEEE 802.15.4 и 802.15.1.

Для первой пары в случае оценки стандарта IEEE 802.11 имеем $\Delta f_K > 2\Delta f_M$. Делаем вывод, что имеет место общий случай без вырождений, поэтому расчет энергетической составляющей про-

Набор значений для используемых стандартов

Значение	Стандарт IEEE		
	802.15.4	802.11	802.15.1
Центральная частота, МГц	$f_{M_1} = 2405$	$f_{K_1} = 2412$	$f_{K_1} = 2402$
Номер 1-го частотного канала	$M_1 = 11$	$K_1 = 1$	$K_1 = 1$
Номер последнего частотного канала	$M_2 = 26$	$K_2 = 13$	$K_2 = 79$
Полоса пропускания, МГц	$\Delta f_M = 5$	$\Delta f_K = 22$	$\Delta f_K = 1$
Шаг сетки частот, МГц	—	$\delta f_K = 5$	$\delta f_K = 1$

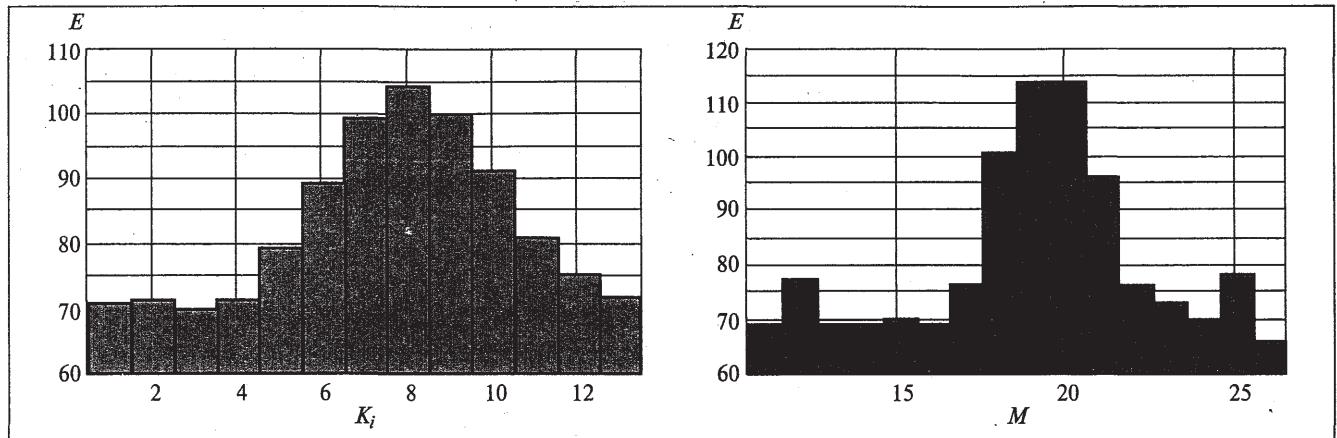


Рис. 4. Результат для стандарта IEEE 802.11 с использованием IEEE 802.15.4

изводится по (7). Результат расчета для данного случая в среде MathCad приведен на рис. 4. Результаты расчета показывают, что на частотном канале 8 передачу ведет базовая станция, поэтому при расположении приемопередающих устройств рассматриваемого стандарта следует выбрать канал с наименьшим уровнем энергии — для рассматриваемого случая это канал 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью автоматизации процессов необходимо уменьшать число ошибок при передаче по сетям с использованием беспроводных сетевых стандартов IEEE 802.11, 802.15.1 и 802.15.4. Рассмотренная методика уменьшения взаимного влияния позволяет достичь максимальной пропускной способности и минимального уровня ошибок при обмене данными как по стандарту беспроводной сети IEEE 802.11, так и по стандартам сенсорных сетей IEEE 802.15 в рамках единого вычислительного комплекса предприятия. Таким образом, современные беспроводные сенсоры стандарта IEEE 802.15, внедряемые на предприятия, не будут ухудшать качество работы уже развернутой сети IEEE 802.11 и в то же время не будут становиться “слабым звеном” вследствие подавления их сигнала уже существующими беспроводными комплексами. Данная методика показала увеличение почти в два раза зоны покрытия сетью IEEE 802.15.4, а также увеличение пропускной способности на 10 % и 15 % для сетей IEEE 802.11 и IEEE 802.15.1 соответственно.

Рассмотренный алгоритм интеллектуального частотного разбиения позволяет оценивать вероятность появления ошибок для сетевых стандартов группы IEEE 802.11, IEEE 802.15 в диапазоне ISM. Алгоритм позволяет добиться хорошего результата, так как оперирует реальными данными, полученными от устройств, оценивающих текущую операционную обстановку. Использование

интеллектуального алгоритма позволяет провести интеллектуализацию производства с использованием нескольких современных телекоммуникационных стандартов, функционирующих в одном диапазоне частот без ухудшения их количественных и качественных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Финогеев А. Г. Беспроводные технологии передачи данных для создания систем управления и персональной информационной поддержки / А. Г. Финогеев. // Всерос. конкурсн. отбор обзорно-аналитич. статей по приорит. направлению “Информационно-телекоммуникационные системы”. — 2008. <<http://www.ict.edu.ru>>
2. Жданов В. С. Проблемы и задачи проектирования беспроводных сенсорных сетей // Информационные, сетевые и телекоммуникационные технологии / Сб. науч. трудов: / Под ред. В. С. Жданова. — М.: МИЭМ, 2009. — 311 с.
3. Восков Л. С. Беспроводные сенсорные сети и прикладные проекты // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2009. — № 2, 3. С. 44–49.
4. Golmie N. Coexistence in Wireless Networks. — Cambridge: Cambridge University Press, 2006. <<http://www.cambridge.org>>
5. Pollin S., Ergen M., Dejonghe A., Perre L. Distributed cognitive coexistence of 802.15.4 with 802.11. — University of California, Berkeley. <<http://wow.eecs.berkeley.edu>>
6. Zhang F. Effective Algorithms And Protocols For Wireless Networking: A Dissertation for the degree of Doctor Of Philosophy. Texas A&M University. — Texas, 2008. <<http://txspace.tamu.edu>>
7. Tan S. Heterogeneous Networks and Services: A dissertation for the degree of Doctof of Philosophy. Technical Universty of Denmark. — Schultz DocuCenter, 2006. <<http://orbit.dtu.dk>>

Работа выполнена на кафедре “Вычислительные системы и сети” Московского государственного института электроники и математики.

Леонид Сергеевич Восков — канд. техн. наук, профессор;

т (499) 125-06-73

E-mail: voskov@narod.ru

Сергей Викторович Цыганов — аспирант.

т (499) 760-44-07

E-mail: svts@yandex.ru