

УДК 621.391

## Разработка алгоритма повышения точности позиционирования мобильных станций на основе расчета статических параметров электромагнитного поля в неоднородной среде

К. Н. Зотов<sup>1</sup>, И. В. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>zkn2002@inbox.ru, <sup>2</sup>tk@ugatu.ac.ru

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступило в редакцию 22.12.2013

**Аннотация.** В рамках ранее разработанной концепции ситуационно-адаптивного планирования радиоресурсов в сетях связи предлагается использовать функцию позиционирования для уточнения местонахождения абонентов сети с применением материальных уравнений Максвелла и регуляризации Тихонова.

**Ключевые слова.** Регуляризация Тихонова; уравнения Максвелла; позиционирование; ситуационно-адаптивное планирование

### ВВЕДЕНИЕ

Современные системы сотовой связи являются мультисервисными системами, предоставляющими широкий спектр услуг: голосовая связь, передача видеоизображений, SMS, MMS, GPRS и др. Для передачи каждого из видов сообщений требуется соответствующий объем радиоресурсов (частотных, временных, энергетических).

В процессе функционирования систем мобильной связи возникают резкие перегрузки в отдельных ее сегментах, обусловленные перемещением абонентов, что вызывает необходимость оперативного управления радиоресурсами. Так, в случае перегрузки сети в одной части зоны обслуживания, могут быть задействованы ресурсы из менее загруженной ее части. Одним из способов управления радиоресурсами может служить ситуационно-адаптивное планирование [1].

Базовой функцией ситуационно-адаптивного планирования является позиционирование (определение местоположения) мобильных станций. Позиционирование позволяет определить локальную концентрацию абонентов в зоне обслуживания, на основе которой обеспечивается решение задачи управления незадействованными радиоресурсами в системах сотовой связи.

В рамках ситуационно-адаптивного планирования к функции позиционирования предъявляется ряд требований:

- помимо услуги навигации, позиционирование должно участвовать в решении задачи управления распределением радиоресурсов сети;
- функция позиционирования должна охватывать всех активных абонентов радиосети, независимо от использования (подключения) услуги навигации;
- функция позиционирования должна носить малозатратный характер.

На взгляд авторов, в основе алгоритма позиционирования может лежать метод триангуляций, который максимально использует внутрисистемные ресурсы без дополнительного привлечения дорогих систем глобальной навигации (ГЛОНАСС, GPS и др.).

Однако метод триангуляции в условиях города дает большие погрешности позиционирования, достигающие до тысяч метров. Эти погрешности обусловлены турбулентным, многолучевым распространением радиосигнала с ограниченной энергией. Поэтому остается актуальной задача повышения точности позиционирования МС, которая, в силу указанных требований, может быть основана на уменьшении методической погрешности, обусловленной характером распространения радиосигнала в условиях города.

В работе показана возможность использования метода регуляризации Тихонова для решения задачи повышения точности позиционирования

МС на основе расчета статических параметров электромагнитного поля в неоднородной среде.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Традиционная модель позиционирования МС использует разностно-дальномерный метод, основанный на измерении параметров временных задержек распространения сигнала радиотелефона абонента не менее чем до трех БС сети относительно их синхронизированных временных шкал и расчете дальности БС до МС и базовые углы с последующим вычислением расстояния  $R$  (рис. 1) [2]. Либо используется геометрический метод определения  $R$  по направлению наиболее сильной компоненты радиосигнала. Однако подобные способы позиционирования, как описывалось выше, приводят к большим ошибкам определения местоположения, так как не в полной мере учитывают свойства распространения электромагнитных волн в радиосреде.

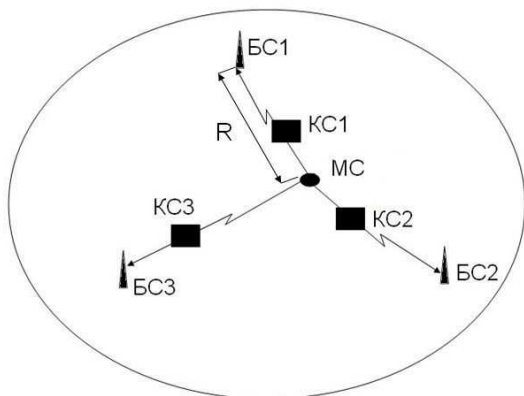


Рис. 1. Модель позиционирования

С целью повышения точности позиционирования МС в алгоритм позиционирования введем вычислительную модель канала связи (КС) (рис. 1). Для определения класса модели КС будем считать:

- рассматриваются узкополосные системы, либо широкополосные системы связи, чья широкополосность обеспечивается набором узкополосных составляющих;
- позиционирование происходит в обратном канале, представляющим слабое электромагнитное поле;
- системы радиосвязи относятся к классу открытых систем, известна возможность измерения плотности потока энергии сигнала на выходе передатчика МС и входах приемников соответствующих БС;

- считаем, что известными являются апертурные свойства приемной антенны БС, геометрические размеры антенн МС примерно не отличаются.

Тогда в качестве модели КС удобно (с точки зрения уменьшения вычислительной сложности) использовать систему, представленную материальными уравнениями Максвелла [3]:

$$\begin{aligned} D &= \epsilon_0 \epsilon(\omega) E, \\ B &= \mu_0 \mu H, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $D$  и  $B$  – электрическая и магнитная индукции,  $E$  и  $H$  – напряженности электрического и магнитного полей,  $\epsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\mu_0$  – относительная магнитная проницаемость вакуума,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $\omega$  – частота сигнала.

Следовательно, исходная модель каналов будет иметь вид, представленный на рис. 2. На рис. 2  $D$  и  $E$  – измеренные (известные) значения электрической и магнитной индукции электромагнитного поля на выходе излучателя МС, поступающий на вход КС;  $D_0$  и  $E_0$  – измеренные значения электрической и магнитной индукции электромагнитного поля вблизи приемной антенны БС;  $D^l$  и  $E^l$  – расчетные значения электрической и магнитной индукции электромагнитного поля на выходе КС;  $\theta$  – некая нескомпенсированная помеха, действующая в канале связи,  $\delta$  – модель КС (1).

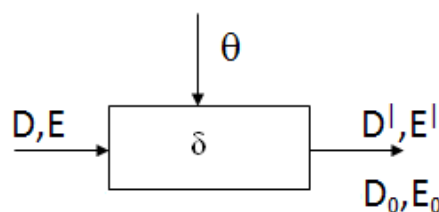


Рис. 2. Модель канала связи

Значения  $D$ ,  $E$ ,  $D_0$ ,  $E_0$  связаны с мощностью радиосигнала (соответственно на выходе и входе КС), измеряемые вблизи антенн, которые связаны с мощностью источника излучения  $P$  по следующим формулам:

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P}{4\pi\epsilon_0 c}}, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние удовлетворяющее условие ближней зоны  $r \leq \lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость света.

Расчетные значения  $D^l$  и  $E^l$  получаются из следующей формулы:

$$E = \frac{1}{R_i} \sqrt{\frac{P}{4\pi\epsilon_0\epsilon(\omega)C}}, \quad (3)$$

где  $R_i$  – искомое расстояние ( $\lambda < R_i < L_{\text{зоны}}$ ),  $\epsilon(\omega)$  – относительная диэлектрическая проницаемость, зависящая от частоты.

Следует отметить, что из-за турбулентного характера распространения радиоволн в городской среде, в общем случае, наблюдается следующее:

$$\begin{aligned} D_0 &\neq D^l \\ E_0 &\neq E^l. \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда задача позиционирования МС, будет ставиться следующим образом: исходя из известных данных  $D, E, D_0, E_0$ , известной структуры КС (1) необходимо определить  $R_i$  до соответствующих БС при условии (4) по  $i$ -му направлению.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение поставленной задачи относится к классу обратных задач, т. е. определение расстояния от МС до БС будем определять исходя из параметров канала связи – электрической и магнитной проницаемостей.

Данная задача является некорректно поставленной, так как малые изменения исходных параметров могут привести к большим изменениям искомым данным [4]. Это связано с тем, что радиосигнал является энергетически-слабым, подвержен действию различного рода искажений, включающих: шумы, помехи, флуктуационные переходы сигнала через разнородную среду (воздух, бетон, деревья, пр.). Другими словами, можно считать, что  $\epsilon$  и  $\mu$  являются неопределенными. Возможным способом решения поставленной задачи является применение регуляризации Тихонова.

Для этого случая (в рамках достаточно узкого частотного диапазона, составляющего десятки кГц) составим функционал Тихонова, который равен:

$$\begin{aligned} J = & \left| \sum_i^N (D^l - \epsilon_0 \epsilon E^l) \right|^2 + \lambda_\epsilon \left| \sum_i^N (D_0 - \epsilon_0 \epsilon E^l) \right|^2 + \\ & + \left| \sum_i^N (B^l - \mu_0 \mu H^l) \right|^2 + \lambda_\mu \left| \sum_i^N (B_0 - \mu_0 \mu H^l) \right|^2, \end{aligned} \quad (5)$$

который должен принимать наименьшее значение, обеспечивающий минимальное значение невязки между измеренными и вычисленными значениями и где  $\lambda$  – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом,  $N$  – число измерений.

Решение поставленной задачи можно осуществлять относительно  $\epsilon, \mu$ . Найдем частную производную (5) по  $\epsilon$  и по  $\mu$  приравняем ее к 0:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\epsilon} \left( \left| \sum_i^N (D^l - \epsilon_0 \epsilon E^l) \right|^2 + \lambda_\epsilon \left| \sum_i^N (D_0 - \epsilon_0 \epsilon E^l) \right|^2 \right) &= 0 \\ \frac{d}{d\mu} \left( \left| \sum_i^N (B^l - \mu_0 \mu H^l) \right|^2 + \lambda_\mu \left| \sum_i^N (B_0 - \mu_0 \mu H^l) \right|^2 \right) &= 0. \end{aligned}$$

Откуда получаем функции  $\epsilon$  и  $\mu$ :

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sum_i^N (D^l - D_0)}{\sum_i^N (\epsilon_0 E^l (1 + \lambda_\epsilon))} \\ \mu &= \frac{\sum_i^N (B^l - B_0)}{\sum_i^N (\mu_0 H^l (1 + \lambda_\mu))}. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как влияние электрической и магнитной составляющей поля на энергетику радиосигнала примерно одинаково, в дальнейшем выбор параметров регуляризации Тихонова можно рассматривать только относительно  $\epsilon$ .

Выбор параметров регуляризации Тихонова будем осуществлять исходя из проницаемости электрического и магнитного поля. При этом необходимо учитывать «физическую реализуемость» диэлектрической проницаемости, значение которой варьируется от значения сухого воздуха  $\epsilon_{\text{св}}$  до значения металла  $\epsilon_{\text{м}}$ :  $\epsilon_{\text{сухого воздуха}} \leq \epsilon(\lambda) \leq \epsilon_{\text{металл}}$ , следовательно,  $\lambda$ :

$$1 - \frac{(D^l - D_0)}{\epsilon_{\text{сухого воздуха}} \epsilon_0 E^l} < \lambda < 1 - \frac{(D^l - D_0)}{\epsilon_{\text{металл}} \epsilon_0 E^l}. \quad (8)$$

Таким образом, выбранные  $\lambda$  из множества  $\lambda_\epsilon \in [\lambda_{\epsilon 1}, \lambda_{\epsilon 2} \dots \lambda_{\epsilon n}]$ , (границы множества выбираются из (8)) будут соответствовать  $\epsilon_n$ .

Перебирая все значения параметра регуляризации для электрической и магнитной составляющих, находим такие  $\epsilon_i$  и  $\mu_j$ , при которых (5) имеет наименьшее значение, т.е. окончательное решение:

$$\epsilon^* = \min \arg (I_i(\lambda_i)), \quad (9)$$

где  $I_i(\lambda_i)$  – некий набор значений  $\lambda_\epsilon \in [\lambda_{\epsilon 1}, \lambda_{\epsilon 2} \dots \lambda_{\epsilon n}]$ , полученных из 8.

Полученное регуляризованное значение  $\epsilon_i$  и  $\mu_j$  дает возможность воспользоваться формулами расчета напряженности поля радиопередатчика в свободном пространстве [5], откуда можно получить искомое расстояние  $R_i$ .

Искомое расстояние определяется из выражения Умова-Поинтинга [3, 6, 7]:

$$\Pi = V \omega_E = V \epsilon^* \epsilon_0 E, \quad (10)$$

где  $\Pi$  – значение вектора Умова-Поинтинга,  $\omega_E$  – плотность энергии электромагнитного поля,  $E$  – значение электрической индукции,  $\epsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon^*$  – относительная диэлектрическая

проницаемость среды распространения, полученная из (7),  $V$  – скорость распространения электромагнитной волны в среде (любой), определяемая по формуле:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon^* \mu^*}} \quad (11)$$

При этом энергия, переносимая через единицу площади, равна:

$$\Pi = \frac{P}{4\pi R_i^2}, \quad (12)$$

где  $P$  – мощность излучателя,  $R_i$  – расстояние от излучателя, на котором переносится энергия.

Подставляя (11) в (10) и приравнявая (12), получаем, что  $R_i$ :

$$R_i = \frac{1}{E_0} \left( \sqrt{\frac{P \sqrt{\mu_0 \mu^*}}{4\pi \sqrt{\epsilon_0 \epsilon^*}}} \right). \quad (13)$$

Учитывая все вышеописанное, алгоритм позиционирования выглядит соответственно рис. 3.

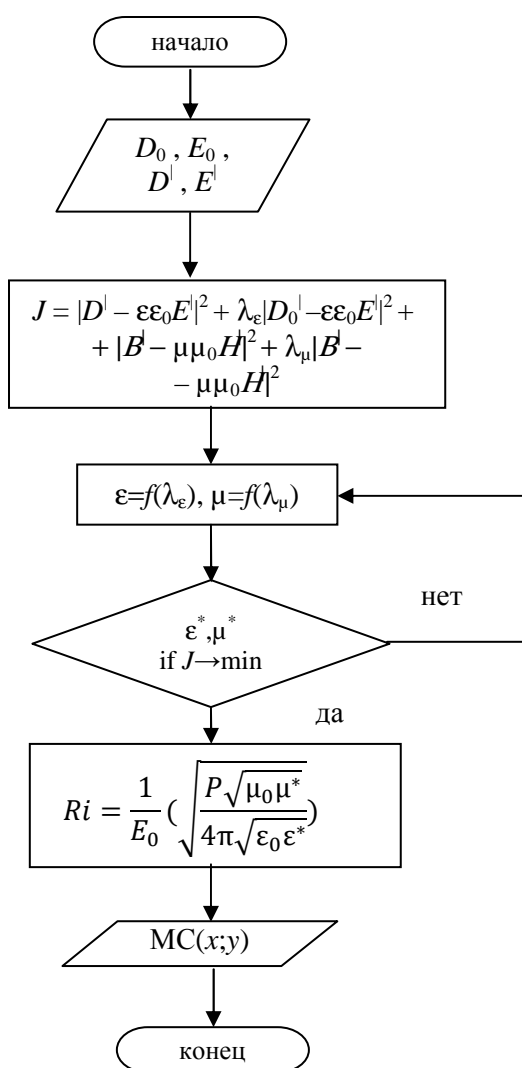


Рис. 3. Блок-схема алгоритма позиционирования

### ПРИМЕР

Рассмотрим некую систему позиционирования, состоящую из трех базовых станций сотового оператора, расположенных как показано на рис. 4, в вершинах равностороннего треугольника с координатами БС1(2500;4330,13), БС2(5000;0), БС3(0;0). Координаты приведены в метрах.

Примем за известные следующие данные:  $D_0, E_0, D^1, E^1, \epsilon_0, \mu_0, c$  (скорость света),  $P$  (мощность излучающей антенны). В результате вычисления  $R_i$ , соответствующего своему направлению МС-БС, получается некая область возможного присутствия МС (см. рис. 4).

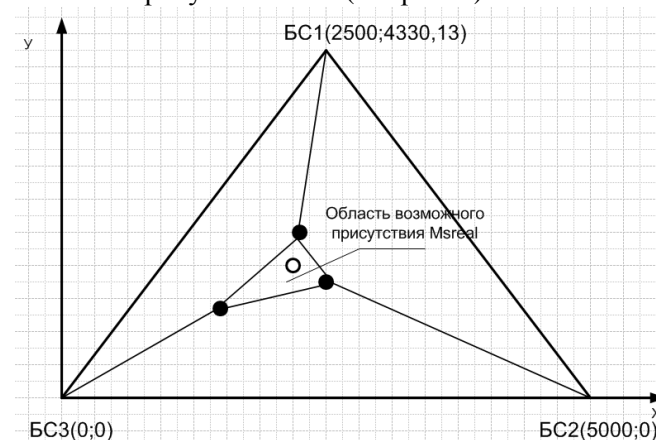


Рис. 4. Модель позиционирования

Табл. 1 содержит исходные данные исследуемой модели.

Таблица 1

Исходные данные			
	$R, \text{ м}$	$E^1, \text{ В/м}$	$D^1, \text{ Кл/м}^2$
БС1-МС	2740	$8,84531 \times 10^{-3}$	0,078
БС2-МС	2698	$9,03378 \times 10^{-3}$	0,08
БС3-МС	4001	$6,09176 \times 10^{-3}$	0,054

Примем, что  $D_0 = (D^1 - 10\%)$ , измеренные значения отличаются от вычисленных на 10 %. В табл. 2 содержатся соответствующие расчетные данные.

Таблица 2

Полученные данные			
	$D^0, \text{ Кл/м}^2$	$\lambda$	$R, \text{ м}$
БС1-МС	0,0702	1	2091
БС2-МС	0,072	0,6	2631
БС3-МС	0,0486	2,8	3952

При изменении количества итераций в (5, 6, 7) наблюдается изменение значений  $R_i$ .

В табл. 3 приведены данные исследования  $R_1$ , изменения вычисленного  $R$  между БС1-МС по указанному алгоритму. Каждому  $N$

соответствовало отклонение входных параметров от 0 до 2 % номинального значения (шумящие входные параметры).

Таблица 3

Изменение $R$ от $N$					
$R$ , м	2091	2198	2243	2370	2457
$N$ , кол-во итераций	1	2	3	4	5
$R$ , м	2548	2603	2691	2698	2700
$N$ , кол-во итераций	6	7	8	9	10

В случае, когда входящие параметры (электрическая и магнитная индукции волны/поля) «шумят» и «шум» составляет не более 2 %, площадь области возможного присутствия MSreal на рис. 4 изменяется согласно графику из рис. 5.

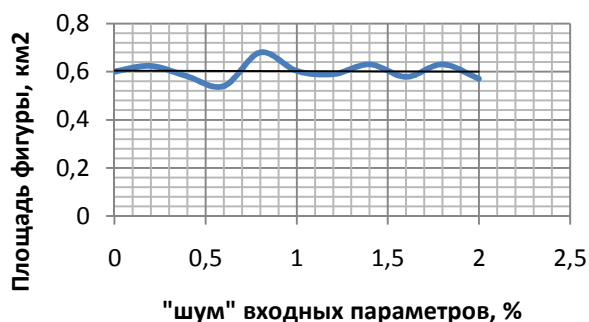


Рис. 5. Зависимость площади фигуры от изменения входных параметров системы

Однако при увеличении количества итераций до 10, согласно рис. 5, изменения площади области возможного присутствия МС становятся более стабильными и практически не претерпевают изменений (см. рис. 6).

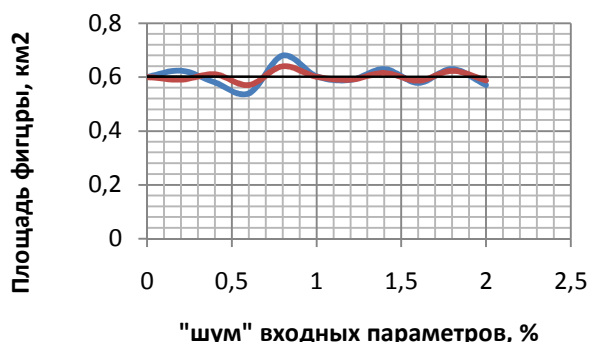


Рис. 6. Влияние количества итераций на определение площади фигуры

Результаты теоретического исследования подтверждались численным моделированием

системы вторичного уплотнения с помощью пакета MATCAD 14. В результате в синтезированной системе распространения радиосигнала в канале связи с «шумящими» входными данными и в условиях некорректности задачи были получены данные, позволяющие регуляризовать некорректность и уменьшить влияние «шума» на результат. Можно заключить, что для решения задач позиционирования, в узкополосных системах можно использовать материальные уравнения Максвелла.

Применение данного алгоритма позволяет уменьшить площадь области возможного присутствия МС (рис. 4) в 1,3 раза по сравнению с традиционной моделью позиционирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов И. В., Султанов А. Х., Блохин В. В. Сигнальные и структурные методы повышения информационной емкости телекоммуникационных систем. М.: РиС, 2006. 310 с.
2. <http://kunegin.narod.ru/>
3. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971. 648 с.
4. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
5. Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992. 416 с.
6. Караваев В. В., Сазонов В. В. Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
7. Малков Н. А., Пудовкин А. П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Тамбов: Изд. ТГТУ, 2007. 86 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Зотов Кирилл Николаевич**, преп. каф. телекоммуникац. систем. Дипл. инженер (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. систем автоматическ. управления и телекоммуникац. систем.

**Кузнецов Игорь Васильевич**, проф. той же каф. Дипл. инженер электронной техники. Д-р техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем автоматическ. управления и телекоммуникац. систем.

#### METADATA

**Title:** Development algorithm to improve the positioning accuracy of the mobile station based on the calculation static electromagnetic field parameters in inhomogeneous media

**Authors:** K.N. Zotov<sup>1</sup>, I. V. Kuznetsov<sup>2</sup>

#### Affiliation:

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** zkn2002@inbox.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), 2013, Vol. 17, No. 2 (55), pp. 14-19. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**References (English Transliteration):**

1. Signaling and structural methods to improve the information capacity of telecommunication systems. Kuznetsov IV, Sultans AH, VV Blokhin, rice, Moscow 2006, 310 pp.
2. <http://kunegin.narod.ru/>
3. Goldstein LD, grain NV, Electromagnetic Fields and Waves. Moscow, Soviet Radio, 1971. - 648 pages
4. Tikhonov and methods of ill-posed problems. Nauka, Moscow, 1979, 285 pp.
5. SI Baskakov, Electrodynamics and propagation of radio waves. Moscow High School, 1992. - 416 pages
6. Loaves VV, Sazonov VV Statistical theory of passive location. - M.: Radio and communication, 1987. - 240.
7. N. Malkov, Pudovkin, AP, Electromagnetic compatibility of radio electronic means. Ed. TGTU, Tambov, 2007. - 86 pages

**About authors:**

1. Zotov, Kirill Nikolaevichd. Postgrad (PhD) Student (UGATU, 2005).
2. Kuznetsov, Igor Vasilevich, Prof., Dept. of Telecommunication Systems. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2009).