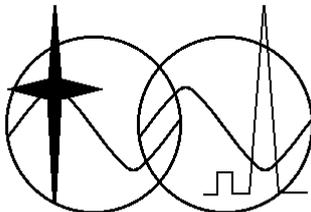


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра средств радиосвязи (СРС)



ТРАФИК, ЕМКОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Учебно-методическое пособие
для практических занятий и курсового проектирования
для студентов радиотехнических специальностей

Разработчик:
заведующий кафедрой СРС,
профессор Мелихов С.В.

Томск - 2014

Цель занятий: оценка трафика, емкости и устойчивости связи мобильных сотовых сетей.

1 Краткие теоретические сведения

1.1 Понятие трафика

При проектировании сетей сотовой мобильной связи необходимо рассчитывать *трафик (интенсивность нагрузки)* системы связи, позволяющий оценивать число обслуживаемых абонентов в соте и во всей сети в целом. Сотовые системы мобильной связи являются системами массового обслуживания со случайным потоком заявок (вызовов), случайной продолжительностью их обслуживания и конечным числом физических каналов обслуживания.

В математических моделях трафика используются следующие параметры [1]:

- средняя частота поступления вызовов $\langle \lambda \rangle$, измеряемая числом вызовов в единицу времени (*выз / ч; выз / мин; выз / с*);
- средняя продолжительность обслуживания одного вызова (разговора) $\langle T \rangle$, измеряемая в единицах времени (*ч; мин; с*);
- средняя интенсивность трафика (средняя интенсивность нагрузки) A , измеряемая в Эрлантах и равная произведению $\langle \lambda \rangle$ и $\langle T \rangle$:

$$A[\text{Эрл}] = \langle \lambda \rangle \cdot \langle T \rangle. \quad (1)$$

Например, если средняя частота вызовов $\langle \lambda \rangle = 200 \text{ выз / ч}$, а средняя продолжительность обслуживания одного вызова $\langle T \rangle = 3 \text{ мин} = 0,05 \text{ ч}$, то средняя интенсивность трафика $A = 200 \cdot 0,05 = 10 \text{ Эрл}$, то есть средняя интенсивность нагрузки равна 10 вызовам.

Иначе, 1 Эрл – это непрерывное использование одного канала связи в течение 1 часа.

Единица «Эрл» названа в честь датского математика и инженера Агнера Краупа Эрланта, который предложил использовать математический аппарат для учёта телефонной нагрузки. В 1909 году им была опубликована работа «Теория вероятностей и телефонные разговоры», в результате чего метод и стал популярным.

Обычно величину среднего трафика оценивают для «часа пик», то есть для часового интервала наибольшей нагрузки системы связи.

1.2 Некоторые вероятностные характеристики телетрафика

Поступление вызовов и продолжительность обслуживания являются случайными величинами. Теория вероятностей может быть использована для вывода соотношений, устанавливающих связь между тремя факторами: *предполагаемой нагрузкой; числом каналов; показателем качества обслуживания.*

Известно [1], что в системах связи массового обслуживания поток вызовов подчиняется распределению по закону Пуассона, то есть вероятность поступления k вызовов (k – дискретная случайная величина) за время t описывается формулой:

$$P_k = \frac{\langle \lambda \rangle \cdot t^k}{k!} e^{-\langle \lambda \rangle t}. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет рассчитать вероятность поступления какого-либо числа вызовов за определенный промежуток времени t .

Для распределения по закону Пуассона среднее значение (математическое ожидание) $\langle k \rangle$ и дисперсия случайной величины Δk одинаковы и на интервале времени t выражаются следующим образом:

$$\langle k \rangle = \Delta k = \langle \lambda \rangle \cdot t. \quad (3)$$

На рис. 1 приведено распределение вероятности поступления вызовов при $\langle \lambda \rangle \cdot t = 5$, из которого следует, что максимальная вероятность поступления вызовов наблюдается при $k = 4$ и $k = 5$, то есть наиболее вероятны 4 или 5 вызовов за время t .

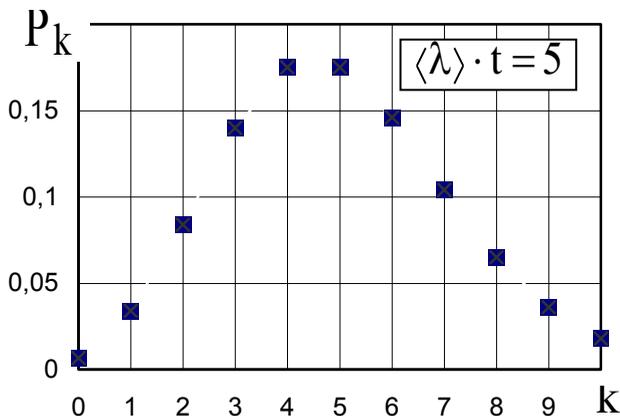


Рис. 1. Распределение Пуассона вероятности поступления вызовов

Продолжительность обслуживания одного вызова (или длительность занятости канала связи) τ является непрерывной случайной величиной, зависящей от времени. Ее плотность вероятности (плотность распределения вероятностей) характеризуется экспоненциальным законом ($\tau \geq 0$):

$$\varpi(\tau) = \frac{1}{\langle T \rangle} e^{-\tau/\langle T \rangle}. \quad (4)$$

Для экспоненциального закона распределения среднее значение (математическое ожидание) $\langle \tau \rangle$ совпадает со средней продолжительностью обслуживания одного вызова $\langle \tau \rangle = \langle T \rangle$, а дисперсия $\Delta \tau = \langle T \rangle^2$.

На рис. 2 приведены зависимости $\varpi(\tau)$ при нормированном значении средней продолжительности обслуживания одного вызова $\langle T \rangle = 1$.

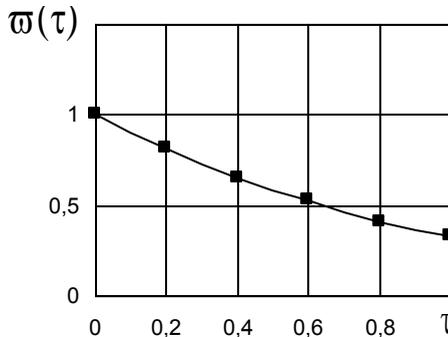


Рис. 2. Экспоненциальный закон изменения плотности вероятности длительности занятости канала при $\langle T \rangle = 1$

1.1.3 Математические модели трафика

Для систем сотовой мобильной связи разработаны три математические модели трафика:

- модель системы с отказами (модель Эрланга B), в которой рассчитывается вероятность отказа, то есть вероятность поступления вызова в тот момент, когда все каналы заняты; при этом вызов аннулируется;

- модель системы с ожиданием (модель Эрланга C), в которой рассчитывается вероятность отказа с задержкой, то есть вероятность того, что поступивший вызов не обслуживается немедленно, а ставится в очередь;

при этом ожидание освобождения какого-либо канала происходит неопределенно долгое время, после чего вызов обслуживается в течение любого интервала времени;

- модель системы с ограниченным временем ожидания (модель Эрланга А или модель Пуассона), в которой рассчитывается вероятность отказа с учетом ограниченного времени ожидания, не превышающего среднего времени обслуживания (разговора); если за это время хотя бы один канал освободился, вызов занимает его на освободившуюся часть среднего времени обслуживания, после чего сбрасывается.

При расчетах емкости систем сотовой мобильной связи обычно используют модель Эрланга В [1]. Это связано, во-первых с тем, что при малых вероятностях отказа модели Эрланга В и С дают достаточно близкие результаты, а во-вторых при вероятности отказа $P_{отк} > 0,1$ сравнительно небольшое возрастание трафика ($A > 40$) приводит к резкому росту вероятности отказа, то есть к резкому ухудшению качества обслуживания. Поэтому расчет емкости систем мобильной связи проводят для малых значений вероятности отказа ($P_{отк} \leq 0,1$).

Для модели Эрланга В вероятность отказа (то есть вероятность поступления вызовов в момент, когда все каналы заняты) определяется выражением:

$$P_{отк} = \Psi(A, N) = \frac{A^N / N!}{\sum_{n=0}^N (A^n / n!)} , \quad (5)$$

где N – число каналов; $A = \langle \lambda \rangle \cdot \langle T \rangle$ – трафик.

В виду громоздких вычислений по приведенной формуле, на практике пользуются ее представлением в виде таблицы (см. табл. 1) [1,2].

1.2 Оценка емкости сотовых систем мобильной связи

Так как функция $P_{отк} = \psi(A, N)$ зависит от трафика A и числа каналов N , то при известных двух параметрах всегда можно найти третий.

Например, исходя из величины вероятности отказа $P_{отк}$ и числа каналов в одной соте N_{1c} по данным табл. 1 определяется величина трафика на одну соту A_c . Далее, по среднему числу вызовов, которые делает абонент сотовой сети в единицу времени $\langle \lambda_1 \rangle$, и по средней

величине продолжительности разговора $\langle T_1 \rangle$ определяется график одного разговора:

$$A_1 = \langle \lambda_1 \rangle \cdot \langle T_1 \rangle. \quad (6)$$

Далее определяется число абонентов, которые могут быть обслужены в одной соте:

$$m_{1c} = \frac{A_c}{A_1}. \quad (7)$$

После чего определяется емкость сотовой системы связи, то есть число абонентов, которые могут быть обслужены в M сотах с принятой в начальных условиях вероятностью отказа $P_{отк}$:

$$m_{Mc} = m_{1c} \cdot M. \quad (8)$$

Таблица 1

Модель Эрланга В (система с отказами)

Число каналов N	Вероятность отказа $P_{отк} = \psi(A, N)$				
	0,002	0,01	0,02	0,05	0,1
	A – трафик (Эрл)				
1	0,002	0,01	0,02	0,05	0,11
2	0,07	0,15	0,22	0,38	0,60
3	0,25	0,46	0,60	0,90	1,27
4	0,54	0,87	1,09	1,52	2,05
5	0,90	1,36	1,66	2,22	2,88
6	1,33	1,91	2,28	2,96	3,76
7	1,80	2,50	2,94	3,74	4,67
8	2,31	3,13	3,63	4,54	5,60
9	2,85	3,78	4,34	5,37	6,55
10	3,43	4,46	5,08	6,22	7,51
11	4,02	5,16	5,84	7,08	8,49
12	4,64	5,88	6,61	7,95	9,47
13	5,27	6,61	7,40	8,83	10,47
14	5,92	7,35	8,20	9,73	11,47
15	6,58	8,11	9,01	10,63	12,48
16	7,26	8,88	9,83	11,54	13,50
17	7,95	9,65	10,66	12,46	14,52
18	8,64	10,44	11,49	13,39	15,55
19	9,35	11,23	12,33	14,31	16,58
20	10,1	12,0	13,2	15,3	17,6
25	13,8	16,1	17,5	20,0	22,8
30	17,6	20,3	21,9	24,8	28,1
35	21,6	24,6	26,4	29,7	33,4
40	25,6	29,0	31,0	34,6	38,8

Таблица 1 (продолжение)

Число каналов N	Вероятность отказа $P_{отк} = \psi(A, N)$				
	0,002	0,01	0,02	0,05	0,1
	<i>A</i> – трафик (Эрл)				
45	29,7	33,4	35,6	39,6	44,2
50	33,9	37,9	40,3	44,5	49,6
55	38,1	42,4	44,9	49,5	55,0
60	42,4	47,0	49,6	54,6	60,4
65	46,7	51,5	54,4	59,6	65,8
70	51,0	56,1	59,1	64,7	71,3
75	55,3	60,7	63,9	69,7	76,7
80	59,7	65,4	68,7	74,8	82,2
85	64,1	70,0	73,5	79,9	87,67
90	68,6	74,7	78,3	85,0	93,2
95	73,0	79,4	83,1	90,1	98,6
100	77,5	84,1	88,0	95,2	104,1
110	86,5	93,5	97,7	105,5	115,1
120	95,5	103,0	107,4	115,8	126,1
130	104,6	112,5	117,2	126,1	137,1
140	113,7	122,0	127,0	136,4	148,1
150	122,9	131,6	136,8	146,7	159,1
200	169,2	179,7	186,2	198,5	214,3

1.3 Оценка устойчивости связи мобильных сотовых систем

Связь между двумя мобильными станциями (МС) в сотовых системах организуется по составному каналу, содержащему трассы (пролеты):

$$МС_1 - БС_1 - ЦС - БС_2 - МС_2,$$

где БС – базовая станция;

ЦС – центральная станция системы (контроллер).

Связь на трассах БС₁ – ЦС – БС₂ осуществляется соединительными цифровыми радиорелейными линиями (РРЛ) или волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС).

Неустойчивость связи оценивается для худшего случая: когда две МС находятся на границах сот, т.е. наиболее удалены от базовых станций.

Неустойчивость связи для двух МС характеризуется *допустимым процентом превышения заданной вероятности ошибок в цифровом канале* (процентом времени нарушения связи), который равен:

$$T_n [\%] = 2T_{cot} [\%] + 2T_{PPЛ} [\%], \quad (9)$$

где T_{cot} – неустойчивость связи, обусловленная помехами в соте;

$T_{PPЛ}$ – неустойчивости связи, обусловленная помехами в соединительных РРЛ.

В соответствии с общепринятой методикой:

$$2T_{cot} = 0,9T_n; \quad 2T_{PPЛ} = 0,1T_n. \quad (10)$$

Из (10) следует:

$$T_{cot} = 0,45T_n; \quad T_{PPЛ} = 0,05T_n. \quad (11)$$

Показатели T_{cot} и $T_{PPЛ}$ в (11) обусловлены совокупностью помех, действующих, соответственно, в соте и в РРЛ.

Для показателя соты:

$$T_{cot} = T_{cot\ зам} + T_{cot\ меш} + \hat{T}_{cot\ меш}, \quad (12)$$

где $T_{cot\ зам}$ – неустойчивость связи, обусловленная замираниями радиосигнала на трассе МС – БС, принимается равной

$$T_{cot\ зам} = 0,8T_{cot}; \quad (13)$$

$T_{cot\ меш}$ – неустойчивости связи, обусловленная воздействием мешающих сигналов от других сот данной системы связи с той же частотной группой, принимается равной

$$T_{cot\ меш} = 0,1T_{cot}; \quad (14)$$

$\hat{T}_{cot\ меш}$ – неустойчивости связи, обусловленная воздействием мешающих сигналов от других систем радиосвязи, принимается равной

$$\hat{T}_{cot\ меш} = 0,1T_{cot}. \quad (15)$$

С учетом (11):

$$T_{cot\ зам} = 0,8 \cdot 0,45T_n = 0,36T_n; \quad (16)$$

$$T_{cot\ меш} = 0,1 \cdot 0,45T_n = 0,045T_n; \quad (17)$$

$$\hat{T}_{cot\ меш} = 0,1 \cdot 0,45T_n = 0,045T_n. \quad (18)$$

Как следует из (16) – (18) наибольшую опасность для срыва связи между двумя МС представляют замирания сигнала в сотах.

Для исключения влияния на устойчивость связи *быстрых релеевских замираний* в системе GSM используются «медленные» скачки по частоте при передаче каждого следующего кадра цифровой последовательности (при длительности кадра $T_k = 4,615\text{мс}$ за 1 секунду про-

исходит $1/T_{\kappa} \approx 217$ скачков). В связи с этим быстрые релейевские замирания не учитываются при проектировании систем стандарта GSM.

Медленные замирания обусловлены эффектом тени, который вызывается различными препятствиями (зданиями, холмами, лесными массивами и пр.), нарушающими LOS между БС и МС. Медленные замирания подчиняются *логарифмически-нормальному закону распределения* и должны быть учтены при определении *медианной мощности сигнала БС на входе приемника МС*.

Поскольку логарифмически-нормальный закон распределения соответствует нормальному закону распределения случайной величины, выраженной в децибелах, то для определения медианной мощности сигнала БС на входе приемника МС пользуются *гауссовой функцией ошибок (интегральной функцией распределения нормального закона)* $P(\hat{x})$.

В табл. 2 [1,2] приведены численные значения функции $P(\hat{x})$, характеризующие вероятность того, что случайная величина x , распределенная по нормальному закону, не превышает некоторое значение \hat{x} . Заметим, что зависимость $P(\hat{x})$ в координатах \hat{x} , $P(\hat{x})$ имеет линейный вид, если по оси $P(\hat{x})$ применен гауссов масштаб.

Значение \hat{x} связано с необходимой медианной мощностью сигнала от БС в антенне приемника МС $P_{Am}(r, f)$, реальной чувствительностью приемника МС $P_{c\text{ ex }o}$ и среднеквадратическим значением медленных замираний Z следующим образом [3]:

$$\hat{x} = \frac{P_{c\text{ ex }o}[\text{дБ Вм}] - P_{Am}(r, f)[\text{дБ Вм}]}{Z[\text{дБ}]} \quad (19)$$

Примерные зависимости глубины медленных замираний от частоты для различной плотности застройки приведены на рис. 3.

Для обеспечения заданной неустойчивости связи $T_{\text{cot зам}}$ необходимо из данных табл. 2 по значению $P(\hat{x}) = T_{\text{cot зам}}$ найти значение \hat{x} , а затем с использованием (19) рассчитать необходимую медианную мощность сигнала от БС в антенне приемника МС:

$$P_{Am}(r, f)[\text{дБ Вм}] = P_{c\text{ ex }o}[\text{дБ Вм}] - \hat{x}Z[\text{дБ}]. \quad (20)$$

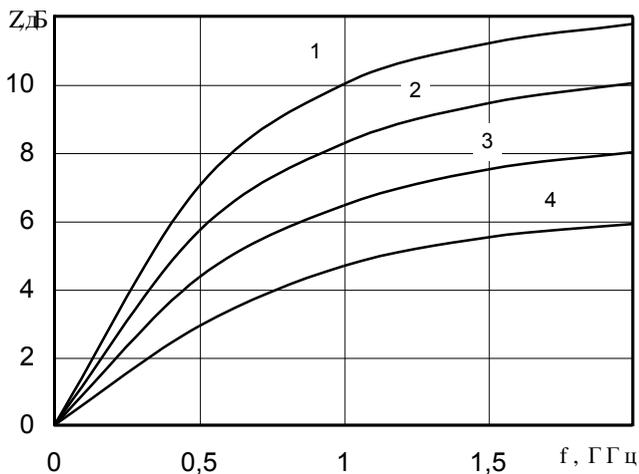


Рис.3 Зависимости среднеквадратических величин медленных замеров:
 1 – большой город (площадь 500-900 км²); 2 – средний город (100-500 км²);
 3 – малый город (25-100 км²); 4 – сельская местность

Таблица 2

Гауссова функция ошибок

\hat{x}	$P(\hat{x}), \%$				
	-0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08
-4,50	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
-4,40	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004
-4,30	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006
-4,20	0,0013	0,0012	0,0011	0,0011	0,0009
-4,10	0,0021	0,0019	0,0017	0,0016	0,0015
-4,00	0,0032	0,0029	0,0027	0,0025	0,0023
-3,90	0,0048	0,0044	0,0041	0,0037	0,0034
-3,80	0,0072	0,0067	0,0062	0,0057	0,0052
-3,70	0,0108	0,0100	0,0092	0,0085	0,0078
-3,60	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012
-3,50	0,023	0,022	0,020	0,019	0,017
-3,40	0,034	0,031	0,029	0,027	0,025
-3,30	0,048	0,045	0,042	0,039	0,036
-3,20	0,069	0,064	0,060	0,056	0,052
-3,10	0,097	0,090	0,085	0,079	0,074
-3,00	0,135	0,126	0,118	0,111	0,104
-2,90	0,187	0,175	0,164	0,154	0,144
-2,80	0,26	0,24	0,23	0,21	0,20

Таблица 2 (продолжение)

\hat{x}	$P(\hat{x}), \%$				
	-0,00	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08
-2,70	0,35	0,33	0,31	0,29	0,27
-2,60	0,47	0,44	0,41	0,39	0,37
-2,50	0,62	0,59	0,55	0,52	0,49
-2,40	0,82	0,78	0,73	0,69	0,66
-2,30	1,07	1,02	0,96	0,91	0,87
-2,20	1,39	1,32	1,25	1,19	1,13
-2,10	1,79	1,70	1,62	1,54	1,46
-2,00	2,28	2,17	2,07	1,97	1,88
-1,90	2,87	2,74	2,62	2,50	2,39
-1,80	3,59	3,44	3,29	3,14	3,01
-1,70	4,46	4,27	4,09	3,92	3,75
-1,60	5,48	5,26	5,05	4,85	4,65
-1,50	6,68	6,43	6,18	5,94	5,71
-1,40	8,08	7,78	7,49	7,21	6,94
-1,30	9,68	9,34	9,01	8,69	8,38
-1,20	11,51	11,12	10,75	10,38	10,03
-1,10	13,57	13,14	12,71	12,30	11,90
-1,00	15,87	15,39	14,92	14,46	14,01
-0,90	18,41	17,88	17,36	16,85	16,35
-0,80	21,19	20,61	20,05	19,49	18,94
-0,70	24,20	23,58	22,97	22,36	21,77
-0,60	27,43	26,76	26,11	25,46	24,83
-0,50	30,85	30,15	29,46	28,77	28,10
-0,40	34,46	33,72	33,00	32,28	31,56
-0,30	38,21	37,45	36,69	35,94	35,20
-0,20	42,07	41,29	40,52	39,74	38,97
-0,10	46,02	45,22	44,43	43,64	42,86
0,00	50,00	49,20	48,40	47,61	46,82

2 Задачи

2.1 Определить вероятность поступления в один канал связи двух, трех, четырех, пяти вызовов за время 6 мин, если средняя частота поступления вызовов 40 вызов/ч.

Ответ: 0,146; 0,195; 0,195; 0,156.

2.2 Используя экспоненциальный закон плотности распределения вероятности занятости канала связи, построить зависимость вероятности занятости канала связи от продолжительности обслуживания одного абонента τ_1 , если средняя продолжительность обслуживания вызовов каналом связи равна $\langle T \rangle$. Объяснить полученный результат.

Ответ:

$\tau_1 / \langle T \rangle$	0	0,25	0,5	1	2	5
$P_{отк}$	0	0,22	0,39	0,63	0,86	0,99

2.3 Определить число абонентов, которое может быть обслужено сотовой системой связи NMT-450 при вероятности отказа из-за занятости всех каналов 5% , если: система имеет 20 базовых станций, у каждой из которых 20 частотных каналов; средняя продолжительность разговора абонентов $\langle T \rangle = 3 \text{ мин}$; каждый абонент делает в среднем 1 вызов за 2 часа.

Ответ: приблизительно 12240 абонентов.

2.4 Определить число абонентов, которое может быть обслужено сотовой системой связи GSM-900 при вероятности отказа из-за занятости всех каналов 5% , если: система имеет 20 базовых станций, у каждой из которых 12 частотных каналов и 8 временных каналов; средняя продолжительность разговора абонентов $\langle T \rangle = 3 \text{ мин}$; каждый абонент делает в среднем 1 вызов за 2 часа.

Ответ: приблизительно 76160 абонентов.

2.5 При двух значениях вероятности отказа $P_{отк} = 0,05$ и $P_{отк} = 0,1$ найти минимальное число базовых станций стандарта GSM-900, имеющих 19 частотных каналов связи, для города, в котором число абонентов равно 100000, средняя продолжительность разговора абонентов $\langle T \rangle = 2 \text{ мин}$, каждый абонент делает в среднем 2 вызова за 1 час.

Ответ: $N_{BC}(P_{отк} = 0,05) \approx 45$; $N_{BC}(P_{отк} = 0,1) \approx 42$.

2.6 Определить величину необходимой медианной мощности сигнала от БС стандарта GSM-900 в антенне приемника МС, имеющего чувствительность -105 дБм, если необходимо обеспечить неустойчивость связи $T_n \leq 5\%$ в «большом» городе.

Ответ: $P_{Am}(r, f) \approx -114 \text{ дБВт}$.

3 Рекомендуемая литература

1. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
2. Беллами Дж. Цифровая телефония: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Берлина, Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 640 с.
3. Сорокин А.С. Системы связи с подвижными объектами: Методические указания и индивидуальные задания для выполнения курсового проекта. – М.: Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), кафедра систем радиосвязи (СРС), 2002. – 30 с.