

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО СИСТЕМАМИ СОТОВОЙ (МОБИЛЬНОЙ) СВЯЗИ

*В.И.Мордачев*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь, [mordachev@bsuir.by](mailto:mordachev@bsuir.by)

Предложена методика оценки уровня электромагнитного фона, создаваемого системами сотовой связи 2G/3G/4G/5G, на основе анализа электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой базовыми и абонентскими станциями, и прогноза территориальной плотности мобильного трафика информационного обслуживания населения этими системами.

Ключевые слова: Сотовая связь, электромагнитный фон, электромагнитная нагрузка, мобильный трафик, электромагнитная безопасность.

## ASSESSMENT OF ELECTROMAGNETIC BACKGROUND, CREATED BY SYSTEMS OF THE CELLULAR (MOBILE) COMMUNICATIONS

*V.I.Mordachev*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus  
[mordachev@bsuir.by](mailto:mordachev@bsuir.by)

A method for estimating the level of electromagnetic background generated by 2G/3G/4G/5G cellular communication systems is proposed. It based on the analysis of the electromagnetic loading on area created by base and subscriber stations, and on prediction of the area traffic capacity created by the set of information services accommodated by these systems.

Keywords: Cellular communications, electromagnetic background, electromagnetic loading, area traffic capacity, electromagnetic safety

Полномасштабное внедрение технологий 4G (LTE) и развитие систем сотовой связи (СС) ИМТ-2020 (5G) с ожидаемым глубочайшим проникновением беспроводных технологий во все сферы человеческой деятельности при существенном расширении полос частот радиоканалов (до 20-160 МГц), увеличении на 1-2 порядка скоростей передачи данных по радиоканалам (до 5-10 Гбит/с в радиоканалах базовых станций и до 100 Мбит/с при передаче данных через пользовательский интерфейс), пространственной плотности РЭС - источников электромагнитных (ЭМ) излучений (до  $10^6$  РЭС/км<sup>2</sup>), а также территориальной плотности мобильного трафика (до 10 Мбит/с/м<sup>2</sup>) может быть причиной катастрофического ухудшения ЭМ экологии среды обитания и недопустимого снижения ЭМ безопасности населения. Данное обстоятельство определяет актуальность разработки эффективных методов прогнозирования степени ЭМ загрязнения системами СС окружающей среды.

Прямой расчет интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого ЭМ полями базовых (БС) и абонентских (АС) станций СС, как правило, невозможен в силу априорной неопределенности исходных данных. Автором предлагается методика [1-5] практической оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого системами СС, на основе анализа интегральных системных характеристик сетей СС - электромагнитной нагрузки на территорию (ЭМНТ), создаваемой БС и АС, и территориальной плотности мобильного трафика информационного обслуживания населения этими системами.

В основу предлагаемой методики оценки средней интенсивности ЭМФ, создаваемой БС и АС СС в точке наблюдения (ТН) вблизи земной поверхности на высоте  $H_{OP} = 1-2$ м, положены следующие базовые понятия, модели и соотношения:

1. Под интенсивностью  $Z$  [Вт/м<sup>2</sup>] ЭМФ в ТН понимается скалярная сумма значений плотности потока мощности ЭМ полей, создаваемых источниками этих полей, расположенными в зоне их радиовидимости из ТН.

2. Под средней ЭМНТ  $B$  [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемой множеством источников рассматриваемого вида с круговой диаграммой направленности ЭМ излучения, понимается средняя суммарная эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) этих источников, приходящаяся на единицу площади территории.

3. Под территориальной плотностью  $S_{tr}$  [бит/с/м<sup>2</sup>] мобильного трафика информационного обслуживания населения понимается объем нисходящего трафика по радиоканалам БС, приходящийся на единицу площади территории.

4. Средняя суммарная интенсивность ЭМФ  $Z_{\Sigma BS}$  [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемого в ТН множеством БС, расположенных случайно равномерно по отношению к ТН во всей области радиовидимости БС из ТН, определяется соотношением:

$$Z_{\Sigma BS} = \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left( \frac{4\sqrt{e}H_{OP}}{\lambda} \right) \approx \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left( \frac{6.6 \cdot H_{OP}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - длина волны, соответствующая полосе частот ЭМ излучения БС данного вида,  $B_{TBS}$  [Вт/м<sup>2</sup>] - ЭМНТ, создаваемая БС данного вида в области размещения ТН.

5. Средняя суммарная интенсивность ЭМФ  $Z_{\Sigma MS}$  [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемого в ТН на высоте  $H_{OP} = 1-2$ м над поверхностью всем множеством АС, расположенных на высоте  $h \approx H_{OP}$  над поверхностью случайно равномерно по отношению к ТН в области радиовидимости АС из ТН, при пессимистической оценке [3] условного радиуса реактивной (ближней) зоны ЭМ излучения АС определяется соотношением:

$$Z_{\Sigma MS} = \frac{B_{TMS}}{2} \ln \left( \frac{8\pi\sqrt{e}h^2}{\lambda^2} \right) \approx \frac{B_{TMS}}{2} \ln \left( \frac{13.2 \cdot \pi h^2}{\lambda^2} \right), \quad h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi}, \quad (2)$$

где  $B_{TMS}$  [Вт/м<sup>2</sup>] - ЭМНТ, создаваемая АС данного вида в области размещения ТН.

6. При близких к круговым диаграммам направленности ЭМ излучений БС и АС создаваемые ими ЭМНТ могут быть определены через их средние территориальные плотности  $\rho_{BS}$  [БС/м<sup>2</sup>] и  $\rho_{MS}$  [АС/м<sup>2</sup>]:  $B_{TBS} = \rho_{BS}P_{eBS}$ ,  $B_{TMS} = \rho_{MS}P_{eMS}$ , где  $P_{eBS}$  и  $P_{eMS}$  - средние значения ЭИИМ БС и АС соответственно. При использовании БС с направленным ЭМ излучением (с секторной зоной обслуживания) расчет создаваемой ими средней ЭМНТ должен выполняться с учетом направленности их ЭМ излучений и фактической площади облучаемой ими территории.

При равномерном случайном распределении АС, являющихся получателями информации, по территории со средней плотностью  $\rho_{MS}$ , если каждая АС принимает поток со скоростью  $V$  [бит/с], то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения по прямым каналам БС будет равна  $S_{tr} = \rho V$  [бит/с/м<sup>2</sup>], и средняя ЭМНТ, создаваемая БС, составит [5]:

$$B_{\Sigma BS} = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N K_H L_m L_C (2^{m_{SER}} - 1) (K_{CC} + 1) R_{max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 S_{ER}}, \quad (3)$$

где  $Q = P_{AR}/P_{AI} < 1$  - системный параметр направленности ЭМ излучения БС (направленности ЭМ излучения битов передаваемой информации); здесь  $P_{AR}$  и  $P_{AI}$  - значения мощности ЭМИ БС, достигающей области наблюдения вблизи земной поверхности, для случая реальной антенны БС с избирательностью по горизонтали и вертикали, и для случая идеальной всенаправленной (изотропной) антенны БС с тем же коэффициентом усиления, соответственно; если структура радиосети регулярна с  $N_S$  секторами на каждой БС, то  $Q \approx 1/N_S$ . Соотношение (3) получено при условии, что на входе радиоприемника АС присутствует сигнал минимально необходимого уровня,

соответствующего необходимому значению защитного отношения "сигнал/(шум + внутрисетевая помеха)". В этом соотношении  $k$  – постоянная Больцмана,  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.;  $K_N$  – коэффициент шума радиоприемника;  $T_0$  – температура окружающей среды, град. ( $T_0=290\text{K}$ );  $S_{ER}$  [бит/с/Гц] – спектральная эффективность передачи информации в радиоканалах БС,  $m$  – коэффициент, характеризующий, во сколько раз реальная спектральная эффективность радиоканала ниже потенциальной;  $K_H$  – коэффициент, характеризующий необходимый запас по уровню принимаемого сигнала АС для реализации хендовера (4-10 раз);  $L_m$  – необходимый запас по уровню принимаемого сигнала АС для компенсации потерь на затухание радиоволн в зданиях (зависит от диапазона частот, а также этажа, особенностей архитектуры, материала здания и других факторов и составляет в среднем 20-100 раз);  $L_C$  – необходимый запас по уровню принимаемого сигнала АС для компенсации потерь на замирания при распространении радиоволн в "каньонах" городской застройки (связаны с многолучевостью и дифракцией, зависят от высоты и плотности застройки, высот подвеса антенн БС, высоты и характера пространственного размещения АС и т.п., и могут составлять 10-100 раз);  $R_{max}$  – радиус зоны обслуживания (сайта) БС; коэффициент  $K_{CC}$  характеризует создаваемое превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума; его величина определяется качеством частотно-пространственного планирования (ЧПП) радиосети и может принимать значения в широких пределах от 0 (внутрисетевая помеха отсутствует) до 100...1000 и даже более (при низком качестве ЧПП; при функционировании СС с завышенными уровнями полезного сигнала, что при кластерной пространственной топологии СС является причиной завышенных уровней внутрисетевой помехи).

Полученные базовые соотношения (1)-(3) обеспечивают возможность оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого радиосетями СС на обслуживаемой территории, непосредственно на основе анализа ЭМНТ, создаваемой БС и АС, либо на основе прогноза средней территориальной плотности беспроводного трафика информационного обслуживания населения в периоды наибольшей нагрузки и данных о размерах сайтов в рассматриваемой радиосети СС, не прибегая к сложному и трудоемкому анализу радиоэлектронной обстановки. Данная методика верифицирована с использованием опубликованных результатов измерений ЭМФ [4] и может быть использована при анализе ЭМФ, создаваемого РЭС различных радиослужб.

#### Литература

1. V.Mordachev. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations // Proc. of the 9th Intern. Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC 2013), Cagliari, Sardinia, Italy, July 1-5, 2013, p.590-595.
2. V.Mordachev. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface // Proc. of Int. Symp. "EMC Europe 2014", Gothenburg, Sweden, Sept. 1-4, 2014, pp.1275-1280.
3. Мордачев В.И. Оценка динамического диапазона уровней электромагнитных полей сотовых телефонов с учетом границ ближних зон их излучений // Доклады БГУИР, №6(100), 2016, с.73-79.
4. Мордачев В.И. Верификация модели наихудшего случая для оценки средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого базовыми станциями сотовой связи // Доклады БГУИР, №1(111), 2018, с.12-18.
5. Мордачев В.И. Оценка уровня электромагнитного фона, создаваемого беспроводными системами информационного обслуживания населения, на основе прогноза территориальной плотности трафика // Доклады БГУИР, №2(120), 2019, с.39-49.

# ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, СОЗДАВАЕМОГО СИСТЕМАМИ СОТОВОЙ (МОБИЛЬНОЙ) СВЯЗИ

*Мордачев Владимир Иванович*

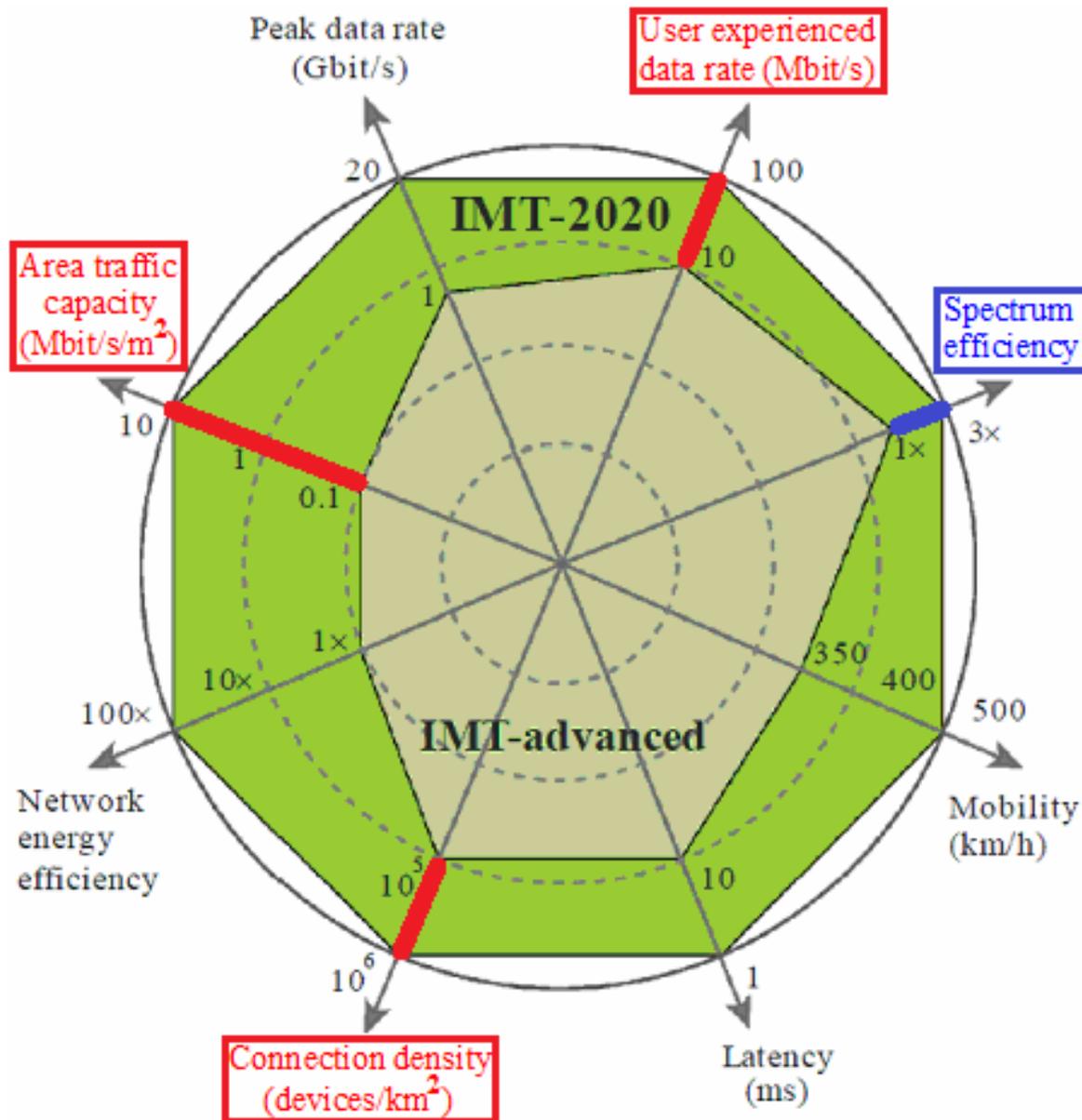
Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

[mordachev@bsuir.by](mailto:mordachev@bsuir.by)

[www.emc.bsuir.by](http://www.emc.bsuir.by)

## Декларируемые параметры 5G (Res. ITU-R M.2083, Rep. ITU-R M.2135 )



### Внедрение 4G/5G:

1. Пространственная плотность РЭС с излучением возрастет в 10-100 раз!

2. Территориальная плотность беспроводного трафика обслуживания населения возрастет в 100-1000 раз!

3. Скорости передачи информации по радиоканалам абонентских станций возрастут в 10-100 раз!

Спектральная эффективность передачи информации по радиоканалам увеличится только в 3 раза!

### Вывод:

Следует ожидать существенного увеличения “электромагнитного загрязнения” среды обитания!

## Особенности 4G/5G/6G... по сравнению с 1G/2G (NMT/GSM)

- ❑ **“Инфраструктурные”**: появление огромного числа нано- и пико-БС, точек доступа в помещениях и вне помещений в местах массового скопления людей, в перспективе – в каждой комнате, на каждой стене и опоре освещения и т.п.
- ❑ **“Радиочастотные”**: значительное расширение диапазона частот сотовой связи (СС): от 0.5-2 ГГц к 0.5-100 ГГц.
- ❑ **“Сервисные”**: Расширение объемов и конвергенция услуг, преобладание режимов передачи данных с максимальной мощностью ЭМИ мобильных (абонентских) станций (МС) при резком сокращении доли услуг телефонии.
- ❑ **“Пользовательские”**: многофункциональность и возможность внешнего управления использованием МС, изменение характера взаимодействия “Пользователь-МС”: мобильный телефон у головы абонента перестает быть главной опасностью.

### ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ АВТОРА:

- Главную опасность приобретает электромагнитный фон (ЭМФ), создаваемый всей совокупностью радиопередатчиков (стационарных и мобильных), функционирующих в сетях СС 4G/5G/6G...
- Традиционные методы оценки и обеспечения безопасности СС на основе определения СЗЗ и ЗОЗ для БС, а также принятых методик оценок SAR МС, видимо, недостаточны для решения проблемы электромагнитной безопасности и электромагнитной экологии этих систем.
- Желательна ревизия подходов к оценке и нормированию характеристик электромагнитной безопасности и электромагнитной экологии этих систем.

## Цель работы:

Предложить новую методику оценки интенсивности электромагнитного фона, создаваемого базовым и абонентским оборудованием СС, основанную на анализе ее интегральных системных характеристик на обслуживаемой территории

- Средней электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой ее БС и МС, и/или
- Средней территориальной плотности трафика (Area Traffic Capacity) информационного беспроводного обслуживания населения этими системами

## Основные понятия и определения (1)

### Интенсивность $Z_{\Sigma}$ ЭМ фона в точке наблюдения (ТН):

скалярная сумма значений  $Z_i$  плотности потока мощности (ППМ) электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых в ТН у земной поверхности:

*Совокупная интенсивность ЭМФ в ТН :*

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N Z_i \left[ \frac{Вт}{м^2} \right]$$

### Примечание:

прямой расчет интенсивности ЭМФ даже в отдельной ТН при большом числе слагаемых нереален в силу высокой трудоемкости и априорной неопределенности (отсутствия корректных исходных данных) !

## Основные понятия и определения (2)

Выход – в косвенной оценке интенсивности ЭМФ, создаваемого радиооборудованием СС, на основе анализа ее системных характеристик на обслуживаемой территории !

Системные характеристики СС, однозначно связанные с интенсивностью ЭМФ:

1. Средняя электромагнитная нагрузка на территорию (ЭМНТ)  $B$  [Вт/м<sup>2</sup>], создаваемая размещенными на ней источниками электромагнитных полей (ЭМП), определяется средней суммарной территориальной плотностью энергии ЭМП этих источников, достигающей земной поверхности.
2. Территориальная плотность  $S_{tr}$  [бит/с/м<sup>2</sup>] трафика (АТС - Area Traffic Capacity) беспроводного информационного обслуживания населения - объем нисходящего трафика по радиоканалам БС, приходящийся на единицу площади территории – связана с ЭМНТ !!!

## Основные понятия и определения (3)

### 1. Средняя ЭМНТ $B$ [Вт/м<sup>2</sup>],

**Средняя ЭМНТ, создаваемая множеством источников ЭМП с круговой диаграммой направленности излучения:** средняя суммарная эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) этих источников, приходящаяся на единицу площади территории:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^M P_{ei}}{S}$$

$S$  – площадь анализируемой территории, на которой расположены  $M$  источников ЭМП;

$P_{ei}$  – ЭИИМ  $i$ -го источника в направлении на ТН.

При равенстве ЭИИМ источников создаваемая ими ЭМНТ определяется как произведение их ЭИИМ  $P_e$  [Вт] и средней территориальной плотности  $\rho$  [ист./м<sup>2</sup>]:

$$B = \rho \cdot P_e$$

## Основные понятия и определения (4)

### 2. Территориальная плотность трафика (АТС) $S_{tr}$ [бит/с/м<sup>2</sup>]

**Территориальная плотность беспроводного трафика информационного обслуживания населения (Area Traffic Capacity):** объем нисходящего трафика по радиоканалам БС СС, приходящийся на единицу площади территории:

$$S_{tr} = \frac{\sum_{j=1}^J V_{tr BS j}}{S}$$

$S$  – площадь анализируемой территории, на которой расположены  $J$  БС СС;

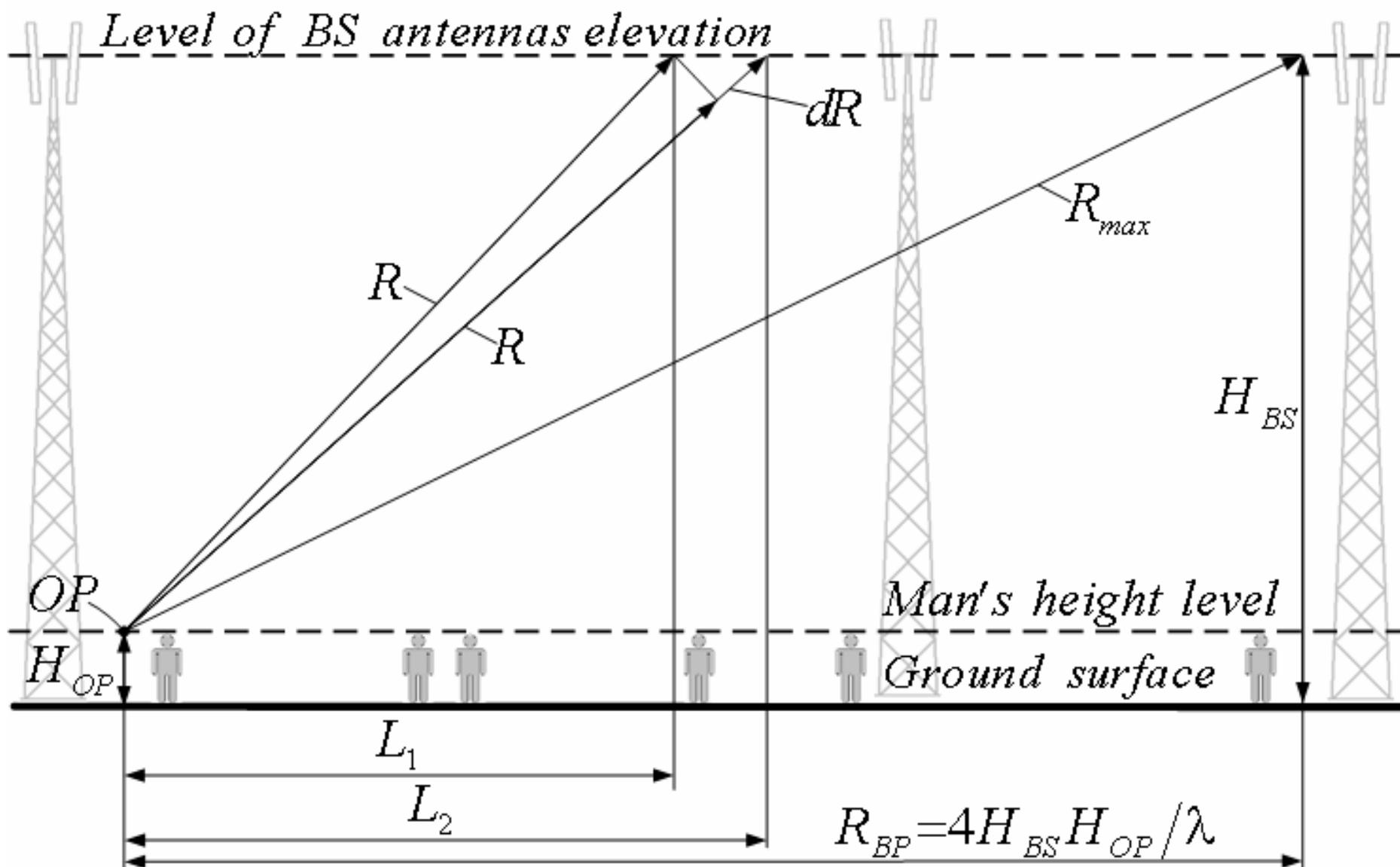
$V_{tr BS j}$  – объем нисходящего трафика  $j$ -й БС.

**Этот параметр определяет ЭМНТ, создаваемую СС !**

**Он особенно важен в сетях 3G/4G/5G/6G... , где объем нисходящего трафика передачи данных в 10-100 раз и более превышает объем трафика в обратном направлении!**

## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого БС СС (1)

Пространственная модель анализа ЭМФ, создаваемого БС:



## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого БС СС (2)

Средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого ЭМ излучениями БС СС в точке наблюдения (ТН) у земной поверхности (на верхней границе СЗЗ или на высоте человеческого роста):

$$Z_{\Sigma BS} = \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left( \frac{4\sqrt{e}H_{OP}}{\lambda} \right) \approx \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left( \frac{6.6 \cdot H_{OP}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}$$

где  $H_{op}$  – высота ТН над земной поверхностью ( $H_{op} \ll H_{BS}$ ),  $\lambda$  – длина волны ЭМ излучения БС,  $B_{TBS}$  – средняя ЭМНТ, создаваемая БС СС на рассматриваемой территории.

**Компоненты ЭМФ БС, создаваемого в ТН:**

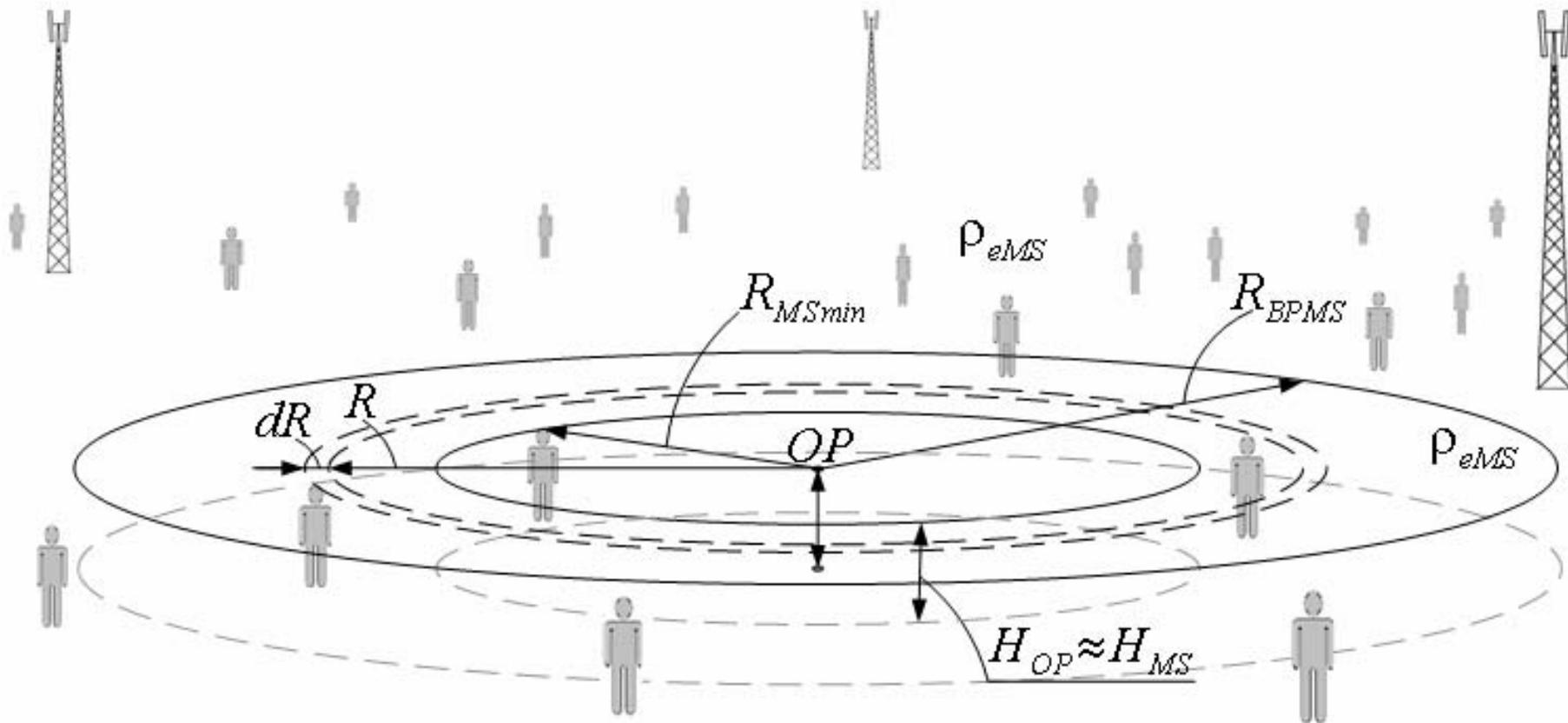
$$Z_{\Sigma 1BS} = \frac{B_{TBS}}{2} \ln \left( \frac{4H_{OP}}{\lambda} \right), \quad Z_{\Sigma 2BS} = \frac{B_{TBS}}{4}; \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}$$

$Z_{\Sigma 1BS}$  – составляющая, создаваемая БС из “breakpoint” окрестности ТН, для которых характерно свободное РРВ между БС и ТН;

$Z_{\Sigma 2BS}$  – составляющая, создаваемая БС вне “breakpoint” окрестности ТН, для них характерно интерференционное РРВ между БС и ТН.

## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого МС (1)

### Пространственная модель анализа ЭМФ, создаваемого МС:



Размещение МС относительно ТН и число МС в зоне свободного РРВ радиуса  $R_{BPMS}$  являются случайными, средняя территориальная плотность МС  $\rho_{eMS}$  [МС/м<sup>2</sup>] постоянна.

Принимается в расчет наличие у МС ближней области реактивного поля (отсутствия излучения на расстояниях  $R \leq R_{min} \approx \lambda/2\pi$ );  $R_{min} \ll R_{MSmin}$

## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого МС (2)

Средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого ЭМ излучениями МС СС на высоте  $H_{OP} \approx H_{MS} = h$ :

$$Z_{\Sigma MS} = \frac{B_{TMS}}{2} \ln \left( \frac{8\pi\sqrt{e}h^2}{\lambda^2} \right) \approx \frac{B_{TMS}}{2} \ln \left( \frac{13.2 \cdot \pi h^2}{\lambda^2} \right),$$

$$H_{OP} \approx H_{MS} = h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}, \quad B_{TMS} = \rho_{MS} \cdot P_{eMS}$$

Компоненты ЭМФ МС, создаваемого в ТН:

$$Z_{\Sigma 1MS} = \frac{B_{TMS}}{2} \ln \left( \frac{8\pi h^2}{\lambda^2} \right), \quad Z_{\Sigma 2MS} = \frac{B_{TMS}}{4}, \quad h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}}$$

$Z_{\Sigma 1MS}$  – составляющая, создаваемая МС из “breakpoint” окрестности ТН, для которых характерно свободное РРВ между МС и ТН;

$Z_{\Sigma 2MS}$  – составляющая, создаваемая МС вне “breakpoint” окрестности ТН, для них характерно интерференционное РРВ между МС и ТН.

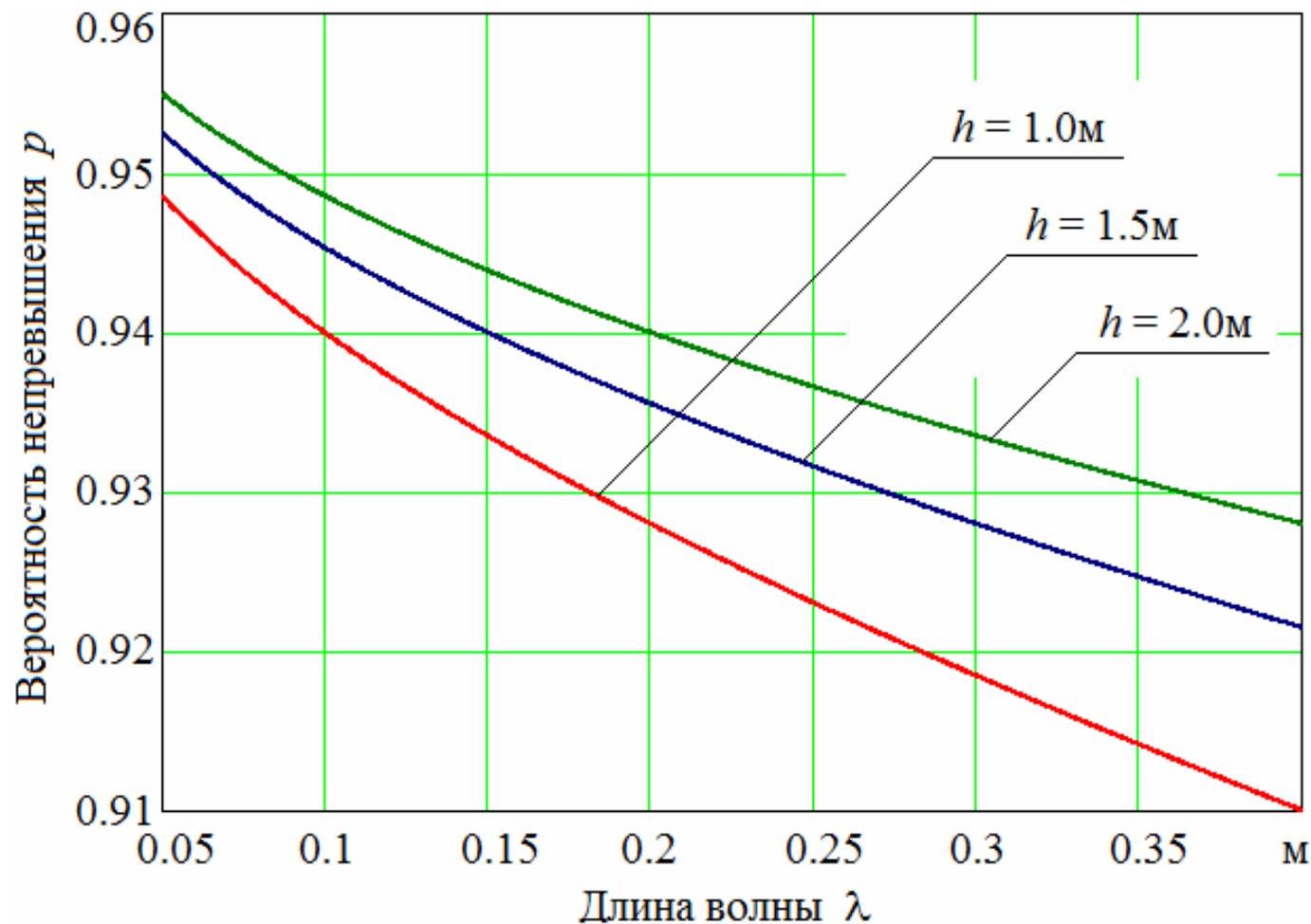
### **ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ:**

**В связи со спецификой вероятностных характеристик ансамбля ЭМП МС в ТН (изменчивостью, случайностью, наличием преобладающего по уровню ЭМП, возможностью высоких уровней ЭМП при приближении МС к ТН) нормирование предельно допустимых характеристик ЭМФ, создаваемого МС, целесообразно осуществлять как по предельно допустимому уровню (ПДУ), так и по вероятности его превышения (непревышения) в произвольный момент времени.**

***Нормирование характеристик ЭМП по допустимой вероятности превышения заданного уровня в заданных процентах мест и времени – стандартная процедура защиты радиосистем от радиопомех!***

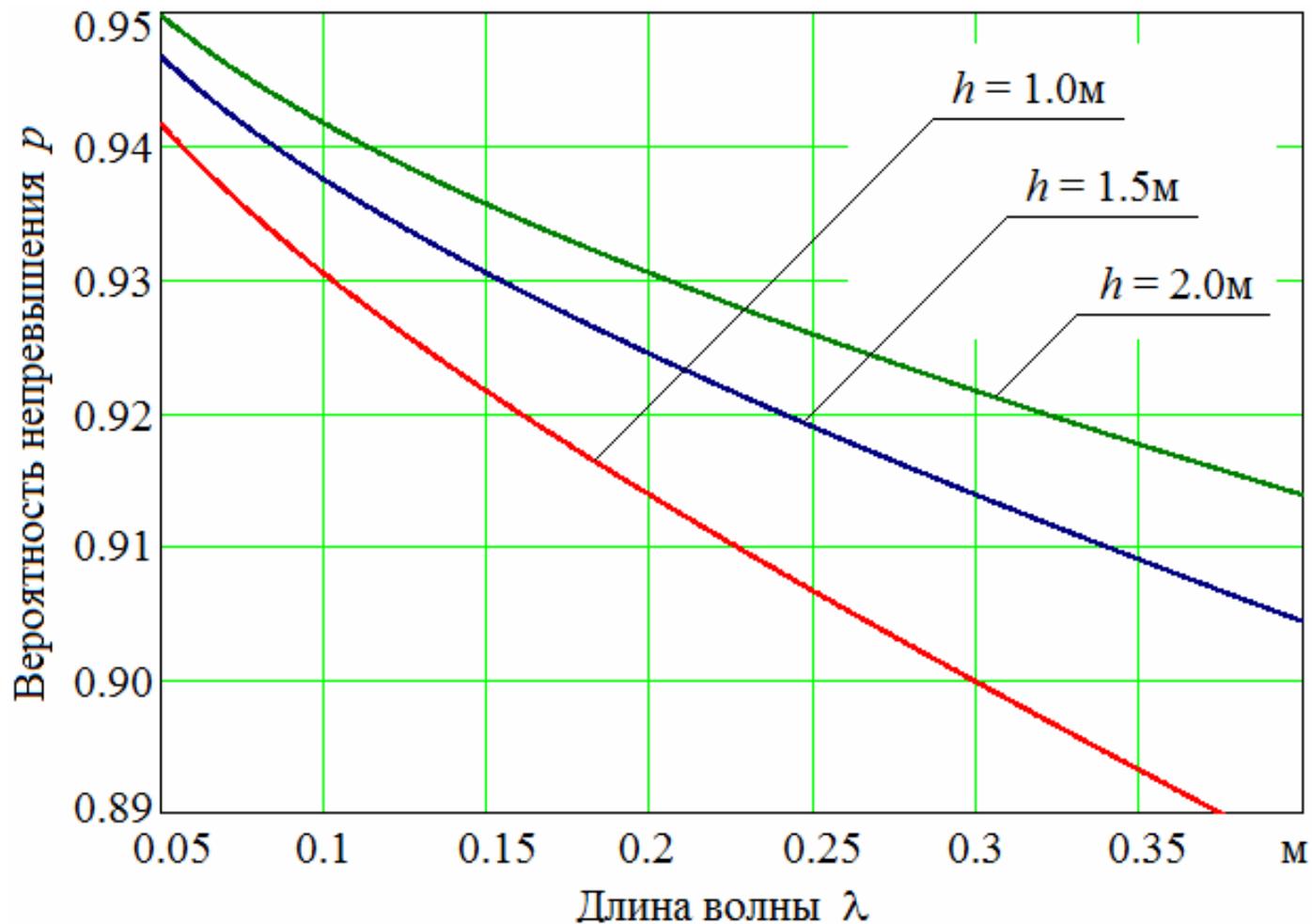
## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого МС (4)

При условном радиусе  $R_{min} \approx \lambda/2\pi$  ближней зоны ЭМИ МС вероятность  $p$  непревышения среднего значения интенсивности ЭМФ от всей совокупности МС СС (0.9 – 3 ГГц) преобладающим ЭМП ближайшей МС не ниже 0.9 !!!



## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого МС (5)

При традиционно определяемом условном радиусе  $R_{min} \approx \lambda/2$  ближней зоны ЭМИ полуволнового вибратора МС вероятность  $p$  непревышения среднего значения интенсивности ЭМФ от всей совокупности МС СС преобладающим ЭМП МС также не ниже 0.9 !!!



## Оценка интенсивности ЭМФ, создаваемого МС (6)

**Нормирование на уровне  $p = 0.9$  вероятности не превышения ПДУ ЭМП в ТН уровнем преобладающего ЭМП МС может быть признано недостаточным!**

В частности, при защите радиосистем многих радиослужб используют более жесткие нормативы ( $p \geq 0.95 \dots 0.99$ )!

Уровень ЭМФ МС  $Z_p$ , не превышаемый с вероятностью  $p$ , связан со средней ЭМНТ  $B_{TMS}$ , создаваемой МС, простым соотношением:

$$Z_p \approx \frac{B_{TMS}}{4(1-p)}, \quad p > 0.9$$

**В РБ в 2010 году введен вероятностный критерий защиты населения на социально-значимых объектах – определена минимальная вероятность  $p=0,99$  не превышения совокупным уровнем ЭМФ от МС & БС установленного ПДУ ЭМП  $10 \text{ мкВт/см}^2$ .**

**Уровень ЭМФ МС  $Z_{\Sigma(p=0,99)}$ , не превышаемый с вероятностью  $0,99$ , для СС диапазона UHF:**

$$Z_{\Sigma(p=0.99)} = \pi B_{TMS} \ln(2R_{BP}/\lambda) \approx 25 B_{TMS}$$

## Практическая оценка ЭМФ, создаваемого СС (1)

### Важные обстоятельства:

1. При равномерном распределении МС по территории вклад их ЭМИ в суммарную интенсивность ЭМФ, создаваемого системами СС, мал, и им можно пренебречь.
2. В местах массового скопления МС, где их территориальная плотность превышает среднюю в 100-1000 раз (места отдыха, торговые центры, бизнес-центры общественный транспорт, общественные мероприятия (спортивные, политические, культурные и т.п.) и т.п.), вклад ЭМИ МС в интенсивность ЭМФ, создаваемого системами СС, оказывается определяющим !

### Факторы, требующие внимания:

1. Не во всех случаях БС можно считать равными по ЭИИМ и с круговой ДН ЭМИ. В ряде ситуаций, каждый сектор ЭМИ БС следует считать самостоятельной БС со своими характеристиками ЭМИ, отличающимися от х-к ЭМИ других БС.
2. Частотная зависимость, присутствующая в формулах для оценки интенсивности ЭМФ, требует отдельного учета вклада в ЭМФ излучений БС разных полос частот.

## Примеры оценки средней ЭМНТ, создаваемой БС СС (1)

### Пример 1: БС с круговыми ДН ЭМИ и одинаковой ЭИИМ:

При равенстве ЭИИМ БС и их равномерном распределении по территории создаваемая ими ЭМНТ равна произведению их ЭИИМ  $P_e$  [Вт] и их средней территориальной плотности БС  $\rho$  [БС/м<sup>2</sup>]:

$$B = \rho \cdot P_e$$

### Пример 2: БС с круговыми ДН ЭМИ и различными ЭИИМ:

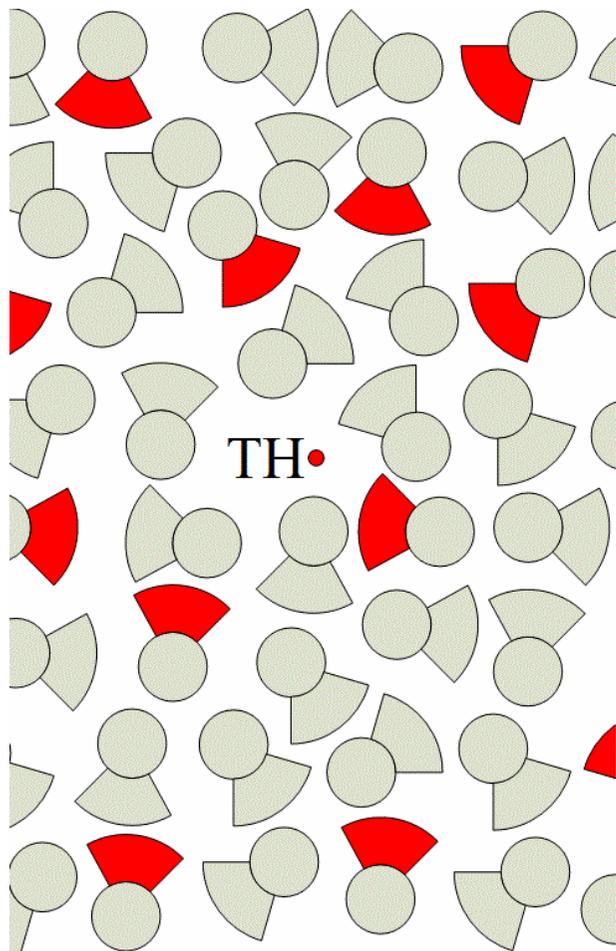
$$B = \frac{\sum_{i=1}^M P_{ei}}{S}$$

$S$  – площадь анализируемой территории, по которой равномерно распределены  $M$  БС;

$P_{ei}$  – ЭИИМ  $i$ -й БС.

## Примеры оценки средней ЭМНТ, создаваемой БС СС (2)

**Пример 3:** идентичные БС с секторными антеннами равной ширины  $\Delta\alpha$  главного лепестка ДН по азимуту, одинаковой ЭИИМ  $P_{em}$  в главных лепестках ДН и равными ЭИИМ  $P_{esb}$  в боковых/задних лепестках, распределенные по территории со средней территориальной плотностью  $\rho$  [БС/м<sup>2</sup>].



При равновероятной ориентации БС по отношению к ТН:

$$B = \frac{\rho(P_{em}\Delta\alpha + P_{esb}(2\pi - \Delta\alpha))}{2\pi};$$

При  $\Delta\alpha \geq \pi/3$ :

$$B \approx \frac{\rho P_{em} \Delta\alpha}{2\pi} = Q\rho P_{em}, \quad Q \approx \frac{\Delta\alpha}{2\pi}.$$

$Q$  - системный параметр направленности ЭМИ БС

## Примеры оценки средней ЭМНТ, создаваемой БС СС (3)

**Пример 4:** если заданы нормированная ДНА БС  $G_j(\alpha)$  в горизонтальной плоскости и ЭИИМ  $P_{ej}$  в главном лепестке каждой из  $M$  БС, равномерно распределенных по площади  $S$ , имеющих равновероятную азимутальную ориентацию, то

$$B = \frac{\sum_{j=1}^M Q_j P_{ej}}{S}, \quad Q_j = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} G_j(\alpha) d\alpha}{2\pi} \approx \frac{\Delta\alpha}{2\pi}, \quad P_{eaj} = Q_j P_{ej}$$

$Q_j = E_{ARj} / E_{AIj} < 1$  – системный параметр направленности ЭМИ  $j$ -й БС;

$E_{ARj}$ ,  $E_{AIj}$  – значения энергии ЭМИ  $j$ -й БС, достигающей верхней границы СЗЗ, для случая антенны БС с направленностью ЭМИ, и для случая идеальной всенаправленной антенны БС с тем же коэффициентом усиления, соответственно.

$P_{eaj}$  – средняя ЭИИМ реальной БС (усреднение по азимуту);

При ширине  $\Delta\alpha$  ДНА по азимуту  $Q \approx \Delta\alpha / 2\pi$ .

## Примеры оценки средней ЭМНТ, создаваемой БС СС (4)

### Пример 5: анализ по регистрационным данным (исх.данные)

Регистрационные данные БС (из части 1 санитарного паспорта РТ объекта)						
Сектор излучения	A	B	C	A	B	C
Азимут максимального излучения, град.	55	220	290	55	220	290
Высота установки антенны над поверхностью земли, м	25	25	25	25	25	25
Диапазоны частот (средние значения длины волны $\lambda$ [м])	GSM900 / GSM1800 (0,32 / 0,17)			UMTS (0,14)		
Количество каналов	4/4	4/4	3/3	4	4	3
Мощность передатчика (МП) с учетом затухания в комбайнере и фидере, Вт/канал	15/15	10/10	15/15	30	25	25
МП каналов суммарная $P_{\Sigma}$ [Вт]	60/60	40/40	45/45	120	100	75
Коэффициент усиления антенны $G$ [дБи]	17/18	17/18	17/18	18	18	18
Ширина ДН антенны по половинной мощности в гориз. плоскости, $\Delta\alpha$ [град.]	65/60	65/60	65/60	65	65	65
Результаты анализа (предварительные)						
Суммарная ЭИИМ по азимуту максимального излучения, $P_e = P_{\Sigma} G$ [кВт] <sup>1</sup>	3,0/3,8	2,0/2,5	2,3/2,8	7,6	6,3	4,7
Системный $Q$ - параметр направленности излучения БС <sup>2</sup>	0,18/0,17	0,18/0,17	0,18/0,17	0,18	0,18	0,18
Средняя ЭИИМ БС $P_{ea} = Q \cdot P_e$ [Вт]	540/650	360/430	410/480	1370	1130	850
Средняя ЭМНТ $B_j$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая сектором БС, при $\rho_{БС} = 1$ БС/км <sup>2</sup>	0,00054/ /0,00065	0,00036/ /0,00043	0,00041/ /0,00048	0,00137	0,00113	0,0085
Средняя ЭМНТ $B_j$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая сектором БС, при $\rho_{БС} = 10$ БС/км <sup>2</sup>	0,0054/ /0,0065	0,0036/ /0,0043	0,0041/ /0,0048	0,0137	0,0113	0,085

<sup>1</sup>: при расчете ЭИИМ коэффициент усиления антенны подставляется в единицах, а не в дБи.

<sup>2</sup>: для  $N$ -секторных БС при отсутствии данных о ДН антенн  $Q$  - параметр может быть принят  $Q \approx 1/N$ .

## Пример оценки ЭМФ, создаваемого БС СС

### Пример 5: анализ по регистрационным данным (результаты)

Расчетный параметр	GSM900	GSM1800	UMTS
<b>Территориальная плотность БС <math>\rho_{\text{БС}} = 1 \text{ БС/км}^2</math></b>			
Средняя ЭМНТ $B_{\Sigma}$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая всеми секторами БС, при $\rho_{\text{БС}} = 1 \text{ БС/км}^2$	0,0013	0,0016	0,0034
Средняя интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma\text{BS}i}$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая всеми секторами БС	$Z_{\Sigma\text{BS}1} = 0,0024$	$Z_{\Sigma\text{BS}2} = 0,0034$	$Z_{\Sigma\text{BS}3} = 0,0076$
<b>Средняя суммарная интенсивность ЭМФ</b> $Z_{\Sigma\text{BS}} = Z_{\Sigma\text{BS}1} + Z_{\Sigma\text{BS}2} + Z_{\Sigma\text{BS}3}$ [Вт/м <sup>2</sup> ]	<b>0,0134 Вт/м<sup>2</sup> / 1,34 мкВт/см<sup>2</sup></b>		
<b>Территориальная плотность БС <math>\rho_{\text{БС}} = 6 \text{ БС/км}^2</math></b>			
Средняя ЭМНТ $B_{\Sigma}$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая всеми секторами БС, при $\rho_{\text{БС}} = 6 \text{ БС/км}^2$	0,0079	0,0094	0,020
Средняя интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma\text{BS}i}$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая всеми секторами БС	$Z_{\Sigma\text{BS}1} = 0,014$	$Z_{\Sigma\text{BS}2} = 0,02$	$Z_{\Sigma\text{BS}3} = 0,046$
<b>Средняя суммарная интенсивность ЭМФ</b> $Z_{\Sigma\text{BS}} = Z_{\Sigma\text{BS}1} + Z_{\Sigma\text{BS}2} + Z_{\Sigma\text{BS}3}$ [Вт/м <sup>2</sup> ]	<b>0,080 Вт/м<sup>2</sup> / 8,0 мкВт/см<sup>2</sup></b>		
<b>Территориальная плотность БС <math>\rho_{\text{БС}} = 10 \text{ БС/км}^2</math></b>			
Средняя ЭМНТ $B_{\Sigma}$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая всеми секторами БС, при $\rho_{\text{БС}} = 10 \text{ БС/км}^2$	0,013	0,016	0,034
Средняя интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma\text{BS}i}$ [Вт/м <sup>2</sup> ], создаваемая всеми секторами БС	$Z_{\Sigma\text{BS}1} = 0,024$	$Z_{\Sigma\text{BS}2} = 0,034$	$Z_{\Sigma\text{BS}3} = 0,076$
<b>Средняя суммарная интенсивность ЭМФ</b> $Z_{\Sigma\text{BS}} = Z_{\Sigma\text{BS}1} + Z_{\Sigma\text{BS}2} + Z_{\Sigma\text{BS}3}$ [Вт/м <sup>2</sup> ]	<b>0,134 Вт/м<sup>2</sup> / 13,4 мкВт/см<sup>2</sup></b>		

## Практическая оценка ЭМФ, создаваемого СС (2)

### Важные обстоятельства:

1. Предлагаемая методика оценки интенсивности ЭМФ СС на основе прямого расчета средней ЭМНТ является пессимистической (“оценка наихудшего случая” / “worst-case estimation”), поскольку
  - направленность ЭМИ БС в вертикальной плоскости не учитывается;
  - модель распространения радиоволн в свободном пространстве используется для всей окрестности “breakpoint”, определенной только с учетом отражения радиоволн от плоской земной поверхности, без учета отражения от стен и крыш зданий;
  - эти оценки выполняются для периодов наибольшей нагрузки (“business hour”), которые различны для различных территорий (районы деловой активности, спальные районы, территории массовых мероприятий и т.п.).
2. В сетях СС 3G/4G/5G
  - объем трафика передачи данных в 10-100 раз и более превышает объем трафика мобильной телефонии, объем нисходящего трафика (от БС к МС) в 5-10 раз и более превышает объем восходящего трафика (от МС к БС),
  - эти объемы фиксируются, информация доступна и может быть использована!

## Оценка ЭМФ по территориальной плотности трафика (1)

При равномерном случайном распределении МС по территории со средней плотностью  $\rho$  [МС/м<sup>2</sup>], если каждая МС принимает поток со скоростью  $V$  [бит/с], то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения по прямым каналам БС будет равна  $S_{tr} = \rho V$  [бит/(с·м<sup>2</sup>)], и создаваемая БС СС средняя ЭМНТ  $B$  [Вт/м<sup>2</sup>] составит

$$B = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N K_H L_m L_C (2^{m S_{ER}} - 1) (K_{CC} + 1) R_{max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 S_{ER}}$$

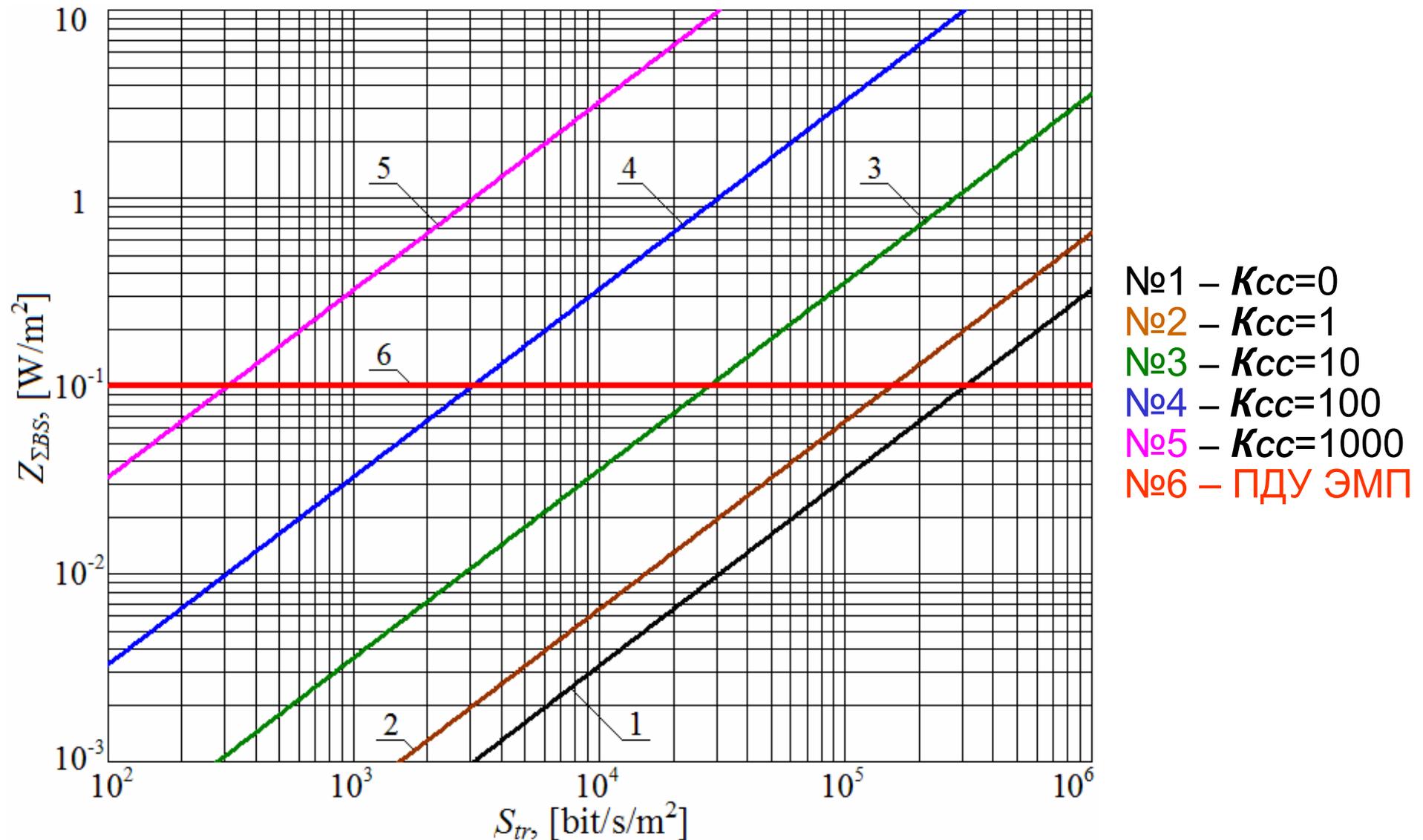
- $k$  – постоянная Больцмана,
- $K_N$  – коэффициент шума радиоприемника;
- $T_0$  – температура окружающей среды  $T_0=290\text{K}$ ;
- $S_{ER}$  – спектральная эффективность радиоканала БС [бит/с/Гц],
- $m$  – коэффициент, характеризующий, во сколько раз реальная спектральная эффективность радиоканала ниже потенциальной;
- $K_H$  – коэффициент, характеризующий необходимый запас по уровню принимаемого сигнала МС для реализации хендвера (4-10 раз);
- $Q$  – системный параметр направленности ЭМИ БС;

## Оценка ЭМФ по территориальной плотности трафика (2)

$$B = \frac{8\pi^2 kT_0 K_N K_H L_m L_C (2^{mS_{ER}} - 1) (K_{CC} + 1) R_{max}^2 S_{tr} Q}{\lambda^2 S_{ER}}$$

- $L_m$  – необходимый запас по уровню принимаемого сигнала МС для компенсации потерь на затухание радиоволн в зданиях (14-20 дБ или 25-100 раз);
- $L_C$  – необходимый запас по уровню принимаемого сигнала МС для компенсации потерь на замирания при РРВ в "каньонах" городской застройки (17-20 дБ или 50-100 раз);
- $R_{max}$  – радиус зоны обслуживания БС, на границе которой требуется максимальная энергия на бит передаваемой информации;
- $K_{CC}$  – параметр внутрисетевой ЭМС, отражающий превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума приемника МС; при отсутствии этой помехи  $K_{CC}=0$ , при низком качестве обеспечения внутрисетевой ЭМС  $K_{CC} > 100$ ;
- $S_{tr}$  – территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения (АТС - area traffic capacity) [бит/с/м<sup>2</sup>].

## Оценка ЭМФ по территориальной плотности трафика (3)



Зависимости  $Z_{\Sigma BS}(S_{tr})$ , полученные для  $R_{max}=100$ м и различных  $K_{cc}$  при  $Q=1/3$ ,  $S_{EP}=5$ ,  $K_N=5$ ,  $T_0=290$ К,  $\lambda=0.15$ м,  $K_H L_m L_C=100000$  (50дБ)

## Заключение

1. Предложены простые соотношения, обеспечивающие возможность интегральной оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого радиосетями СС на обслуживаемой территории, не прибегая к сложному и трудоемкому анализу радиоэлектронной обстановки, двумя способами:
  - a) на основе прямого анализа ЭМНТ, создаваемой БС и МС, либо
  - b) на основе прогноза средней территориальной плотности беспроводного трафика информационного обслуживания населения в периоды наибольшей нагрузки и данных
    - о размерах сайтов в радиосети СС и ее системных параметрах – спектральной эффективности радиоканалов  $S_{ER}$  и направленности ЭМИ БС  $Q$  ;
    - об обеспечиваемом в сети запасе  $K_H L_m L_C$  на компенсацию потерь при РРВ в городских каньонах, РРВ внутрь помещений и организацию хендовера ;
    - о качестве частотно-пространственного планирования сети СС (обеспечения внутрисетевой ЭМС) – о параметре  $K_{CC}$  .
2. Данная методика оценки ЭМФ верифицирована с использованием опубликованных результатов измерений и может быть использована при анализе ЭМФ, создаваемого современными системами СС.

**Спасибо за внимание!**

## Научные публикации автора по теме (1)

### На русском языке:

1. Мордачев В.И. Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая электромагнитными излучениями базовых станций сотовой связи.- Доклады БГУИР, №6(68), 2012, с.116-123.
2. Мордачев В.И. Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая абонентскими станциями сотовой связи.- Доклады БГУИР, №7(69), 2012, с.25-33.
3. Мордачев В.И. Электромагнитная нагрузка на территорию в неоднородной радиоэлектронной обстановке.- Доклады БГУИР, №8(70), 2012, с.23-31
4. Мордачев В.И. Электромагнитный фон, создаваемый базовым и абонентским радиооборудованием сотовых радиосетей.- Доклады БГУИР, №1(95), 2016, с.38-44.
5. Мордачев В.И. Оценка динамического диапазона уровней электромагнитных полей сотовых телефонов с учетом границ ближних зон их излучений.- Доклады БГУИР, №6(100), 2016, с.73-79.
6. Мордачев В.И. Верификация модели наихудшего случая для оценки средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого базовыми станциями сотовой связи.- Доклады БГУИР, №1(111), 2018, с.12-18.
7. Мордачев В.И. Оценка уровня электромагнитного фона, создаваемого беспроводными системами информационного обслуживания населения, на основе прогноза территориальной плотности трафика.- Доклады БГУИР, №2(120), 2019, с.39-49.
8. Мордачев В.И. Частотннезависимые пределы значений системных параметров сотовой связи при интерференционном распространении радиоволн в городской застройке.- Доклады БГУИР, №8(126), 2019 (принята к опубликованию).

Статьи находятся в открытом доступе на сайте: <https://doklady.bsuir.by/jour/index>

## Научные публикации автора по теме (2)

### In English:

1. V.Mordachev, The Compelled Environmental Risk at Occurrence of the Overall Electromagnetic Field Created by the Mobile and Fixed Radio Equipment, Proc.of the 11-th Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2012", Rome, Italy, Sept. 17-21, 2012, 6 p.
2. V.Mordachev. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations, Proc. of the 9th Intern. Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC 2013), Cagliari, Sardinia, Italy, July 1-5, 2013, p.590-595.
3. V.Mordachev. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface, Proc. of Int. Symp. "EMC Europe 2014", Gothenburg, Sweden, Sept. 1-4, 2014, pp.1275-1280.
4. V.Mordachev. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Near Ground Surface Created by Heterogeneous Radioelectronic Environment, Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Int. Symp. Electrom. Compat. and EMC Europe, Dresden, Germany, Aug. 16-22, 2015, pp. 1147-1152.
5. V.Mordachev. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications, Proc. of the 2016 Int. Symp. "EMC Europe 2016", Wroclaw, Poland, September 5-9, 2016, p.590-595.
6. V.Mordachev. System-Level Estimation of Prevailing Levels of EM Fields of Mobile Phones Considering Near-Field Zone Limitations of Their Antennas, Proc. of the 2017 Int. Symp. "EMC Europe 2017", Angers, France, Sept. 4-8, 2017, 6p. (paper No.64).
7. V.Mordachev. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates, Proc. of the 2018 Int. Symp. "EMC Europe 2018", Amsterdam, The Netherlands, Aug. 27-30, 2018, p.202-207.
8. V.Mordachev. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity, Proc. of the 2019 Int. Symp. "EMC Europe 2019", Barcelona, Spain, Sept. 2-6, 2019, p.82-87.