



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

К.61

(09/2003)

СЕРИЯ К: ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ

**РУКОВОДСТВО ПО ИЗМЕРЕНИЮ И
ЧИСЛЕННОМУ ПРОГНОЗУ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ УСТАНОВОК
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ НА СООТВЕТСТВИЕ
НОРМАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА**

Рекомендация МСЭ-Т К.61

Рекомендация МСЭ-Т К.61

Руководство по измерению и численному прогнозу электромагнитных полей установок электросвязи на соответствие нормам воздействия на человека

Резюме

Настоящая Рекомендация предназначена операторам связи при контроле объявленного местными или национальными властями соответствия нормам воздействия электромагнитных полей. Данная Рекомендация представляет руководство по методам измерений, которые могут быть использованы для оценки этого соответствия. Рекомендация также содержит руководство по выбору численных методов, пригодных для предсказания воздействия в различных ситуациях.

Источник

Рекомендация МСЭ-Т К.61 утверждена 6 сентября 2003 года 5-й Исследовательской комиссией МСЭ-Т (2001–2004 гг.) в соответствии с процедурой, изложенной в Рекомендации А.8 МСЭ-Т.

Ключевые слова

Подверженность РЧ-облучению, РЧ-безопасность.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи. Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним с целью стандартизации электросвязи на всемирной основе.

Всемирная ассамблея по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяет темы для изучения Исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые, в свою очередь, вырабатывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соответствие положениям данной Рекомендации является добровольным делом. Однако в Рекомендации могут содержаться определенные обязательные положения (для обеспечения, например, возможности взаимодействия или применимости), и тогда соответствие данной Рекомендации достигается в том случае, если выполняются все эти обязательные положения. Для выражения требований используются слова "shall" ("должен", "обязан") или некоторые другие обязывающие термины, такие как "must" ("должен"), а также их отрицательные эквиваленты. Использование таких слов не предполагает, что соответствие данной Рекомендации требуется от каждой стороны.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на то, что практическое применение или реализация этой Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, обоснованности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, отстаиваются ли они членами МСЭ или другими сторонами вне процесса подготовки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещения об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для реализации этой Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что это может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ.

© МСЭ 2004

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких-либо средств без письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1	Область применения 1
2	Ссылки 1
3	Термины и определения 1
4	Сокращения и акронимы 3
5	Основные принципы 3
5.1	Измеряемые величины 4
5.2	Типичные ситуации 4
6	Техническое рассмотрение..... 4
6.1	Стратегия 4
6.2	Величины..... 5
6.3	Области поля 5
6.4	Затенение и рассеивание 6
6.5	Непостоянство источника 7
7	Измерения 8
7.1	Измерительный инструментарий 8
7.2	Оценка неопределенности измерения..... 10
7.3	Выбор образцов..... 11
7.4	Порядок измерений (процедуры) 11
7.5	Меры предосторожности 11
7.6	Области поля 11
7.7	Несколько источников 12
7.8	Временная и пространственная изменчивость 12
8	Соответствие нормам: обработка результатов измерения 12
8.1	Идентификация отдельных источников 12
8.2	Прерывистые источники 12
8.3	Базовые станции для систем подвижной радиосвязи..... 13
Добавление I – Расчетные методы 14	
I.1	Общее..... 14
I.2	Описание методов..... 14
I.3	Другие модели ближнего поля 15
I.4	Практические проблемы 16

Введение

Данная Рекомендация поможет операторам связи проверять объявленное местными или национальными властями соответствие нормам воздействия электромагнитных полей. Рекомендация МСЭ-Т К.52 *Руководство по соблюдению норм воздействия электромагнитных полей на человека* указывает на необходимость определения воздействия полей установок связи. Определение основано на оценке электромагнитного поля и доступности анализа. Оценка может быть сделана на основе измерений или численных предсказаний.

Данная Рекомендация устанавливает инструменты, методы и порядок действий, которые могут быть использованы, чтобы выявить соответствие нормам. Соответствие стандартам на подверженность полям радиочастотного диапазона может быть выяснено измерением силы электромагнитного поля, при этом должны использоваться калиброванные инструменты, а ошибки измерения правильно учтены.

Рекомендация МСЭ-Т К.61

Руководство по измерению и численному прогнозу электромагнитных полей установок электросвязи на соответствие нормам воздействия на человека

1 Область применения

Данная Рекомендация касается измерений, проводимых для оценки величины электромагнитного поля, с тем чтобы удостовериться, что воздействие на человека электромагнитного поля, создаваемого установкой связи в диапазоне от 9 кГц до 300 ГГц, не превышает установленные нормы. Кроме того, данная Рекомендация дает руководство по вычислительным методам, которые могут быть использованы, чтобы выяснить соответствие нормам.

Подверженность токам, возникающим вследствие соприкосновения с проводящими объектами, облучаемыми электромагнитными полями, в данной Рекомендации не рассматривается.

Воздействия вследствие применения мобильных телефонов и других излучающих устройств, используемых в непосредственной близости к телу человека, не рассматриваются. Не рассматриваются также воздействия беспроводных телефонных систем и стационарных установок в беспроводных цепях связи (например, DECT, WLAN, Bluetooth и т. д.).

2 Ссылки

Нижеследующие Рекомендации МСЭ-Т и другие источники содержат положения, которые путем ссылок на них в данном тексте составляют положения настоящей Рекомендации. На момент публикации указанные издания были действующими. Все Рекомендации и другие источники являются предметом пересмотра; поэтому всем пользователям данной Рекомендации предлагается рассмотреть возможность применения последнего издания Рекомендаций и других ссылок, перечисленных ниже. Перечень действующих на настоящий момент Рекомендаций МСЭ-Т публикуется регулярно. Ссылка на документ, приведенный в настоящей Рекомендации, не придает ему как отдельному документу статус Рекомендации.

- [1] ITU-T Recommendation K.52 (2000), *Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields.*
- [2] IEC 61566:1997, *Measurement of exposure to radio-frequency electromagnetic fields – Field strength in the frequency range 100 kHz to 1 GHz.*
- [3] IEC 60657:1979, *Non-ionizing radiation hazards in the frequency range from 10 MHz to 300 000 MHz.*
- [4] ISO/IEC:1995, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.*

3 Термины и определения

Данная Рекомендация определяет следующие термины:

3.1 область дальнего поля: Область поля антенны, где угловое распределение поля не зависит существенно от расстояния до антенны. В области дальнего поля поле имеет характер преимущественно плоской волны, то есть однородное распределение напряженности электрического и магнитного полей в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

3.2 область ближнего поля: Область ближнего поля существует вблизи антенны или другого излучающего источника, где электрические и магнитные поля не имеют по существу характера плоской волны и значительно изменяются от точки к точке. Область ближнего поля в дальнейшем подразделяется на область реактивного ближнего поля, которая находится ближе всего к излучающему источнику и которая содержит большую часть или почти всю энергию поля, и облучаемую область, где поле излучения преобладает над реактивным полем, но не имеет характера плоской волны и сложно по структуре.

Примечание. – Для многих антенн внешняя граница реактивного ближнего поля лежит на расстоянии одной длины волны от поверхности антенны.

3.3 радиочастота (РЧ): Любая частота, электромагнитное излучение на которой используется для связи.

Примечание. – В данной Рекомендации к радиочастотам относится спектр частот от 9 кГц до 300 ГГц, указанный в Регламенте радиосвязи МСЭ-R.

3.4 удельное поглощение (SA): удельное поглощение есть показатель приращения энергии (dW), поглощаемой (рассеиваемой) элементом массы (dm), содержащейся в элементе объема (dV) при данной плотности массы (ρ_m).

$$SA = \frac{dW}{dm} = \frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV}.$$

Удельное поглощение выражается в джоулях на килограмм (J/kg).

3.5 удельная скорость поглощения (SAR): Производная по времени от приращения энергии (dW), поглощаемой (рассеиваемой) элементом массы (dm), содержащемся в элементе объема (dV) при данной плотности массы (ρ_m).

$$SAR = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV} \right).$$

SAR выражается в ваттах на килограмм (W/kg).

SAR может быть рассчитана из выражений:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho_m}$$
$$SAR = c \frac{dT}{dt}$$
$$SAR = \frac{J^2}{\rho_m \sigma},$$

где:

E – величина напряженности электрического поля в веществе в В/м,

σ – удельная проводимость вещества в Сим/м,

ρ_m – плотность массы,

c – удельная теплоемкость вещества в Дж/(кг·°C),

$\frac{dT}{dt}$ – производная от температуры по времени в °C/с,

J – величина плотности наведенного тока в А/м².

3.6 длина волны (λ): Длина электромагнитной волны, соответствующей частоте (f), и скорость (v) электромагнитной волны связаны соотношением:

$$\lambda = \frac{v}{f}.$$

В свободном пространстве (вакууме) скорость равна скорости света (c), которая составляет примерно 3×10^8 м/с.

4 Сокращения и акронимы

Данная Рекомендация использует следующие сокращения:

AF	Antenna Factor	Антенный фактор (коэффициент направленности антенны)
APC	Automatic Power Control	Автоматический контроль мощности
BCCH	Base Station Control Channel	Базовая станция контроля каналов
CF	Calibration Factor	Фактор калибровки (калибровочный коэффициент)
DTX	Discontinuous Transmission	Дискретная передача
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power	Эквивалентная мощность изотропного излучения
EM	Electromagnetic	Электромагнитный
EMC	Electromagnetic Compatibility	Электромагнитная совместимость
EMF	Electromagnetic Field	Электромагнитное поле
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения
PC	Personal Computer	Персональный компьютер
RF	Radio Frequency	Радиочастотный
RMS	Root Mean Square	Среднеквадратичное значение
SA	Specific Absorption	Удельное поглощение
SAR	Specific Absorption Rate	Удельная интенсивность поглощения
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	Универсальная подвижная система связи

5 Основные принципы

Рекомендация МСЭ-Т К.52 устанавливает процедуру для достижения соответствия электромагнитного поля нормам безопасности. Для достижения соответствия необходимы следующие шаги:

- 1) Установить подходящие нормы соответствия.
- 2) Определить, нуждается ли оценка электромагнитного поля установленного оборудования в обсуждении.
- 3) Если есть такая необходимость, она может быть выполнена расчетами или измерением.
- 4) Если оценка электромагнитного поля показывает, что соответствующие нормы могут быть превышены в области, где могут присутствовать люди, должны быть приняты меры по смягчению или ликвидации поля.

Данная Рекомендация предлагает руководство по измерениям и расчетам электромагнитных полей (шаг 3) за пределами, установленными Рекомендацией МСЭ-Т К.52. Эти более усложненные методы предсказания подверженности воздействию полей нуждаются в уточнении границ зоны, полученных использованием К.52, или для сложных ситуаций, когда К.52 могут быть недостаточны. Например, может быть полезно улучшить результаты К.52, когда К.52 показывает появление расширенной зоны или профессиональной зоны в малой степени. Измерение или более точный расчет могут помочь определить, сделано ли определение зоны правильно или является ложным из-за ограниченности метода определения К.52. Другой пример, когда необходимы измерения, представляет собой сложное составное окружение или окружение с несколькими значительными источниками электромагнитного излучения.

5.1 Измеряемые величины

Большинство документов указывают нормы безопасности в пределах базовых норм или взятых (или рассчитанных) из ссылок. Базовые нормы обращаются к фундаментальным величинам, определенным на основе физиологического отклика тела человека на электромагнитные поля. Базовые (основные) нормы применимы к ситуации, когда тело находится непосредственно в электромагнитном поле.

Базовые нормы для подверженности человека выражаются в виде удельного поглощения (SA), скорости удельного поглощения (SAR), плотности тока. Так как основные величины трудно измерить непосредственно, большинство документов предлагают нормы, взятые из ссылок, для электрического поля, магнитного поля и плотности тока. Полученные нормы применимы в ситуациях, когда присутствие человека не влияет на величину поля.

Нормативная часть Рекомендации предлагает директивы по измерению величин поля (уровней из ссылок). Нормы, взятые из ссылок, могут быть превышены, если может быть показано, что при условиях воздействия SAR, SA и наведенная плотность тока ниже базовых пределов. Поэтому в Приложении I приводится руководство по выбору вычислительных процедур, которые могут быть использованы, чтобы рассчитать SAR.

5.2 Типичные ситуации

Типичные проблемы измерения близки к одному из следующих случаев:

- 1) Источник электромагнитного поля или по крайней мере некоторые его характеристики известны. Электромагнитное поле от других источников пренебрежимо мало по сравнению с рассматриваемым. Задача состоит в определении соответствующих зон для этого известного источника.
- 2) Источник электромагнитного поля неизвестен. Задача состоит в детальном изучении места или обзоре электромагнитных полей за пределами области, чтобы подтвердить, что другими электромагнитными источниками можно пренебречь.
- 3) Задача состоит в детальном определении мест соответствия нормам и, если найдено несоответствие, в определении относительного вклада источников в это несоответствие.

В случае 1 частотный спектр излучения должен быть точно известен. Передаваемая мощность, поляризация и устройство антенны могут быть известны приблизительно. Поэтому измерения могут сфокусироваться на интересующей области частотного спектра. Рекомендация МСЭ-Т К.52 должна быть использована, чтобы получить оценку напряженности поля, чтобы определить подходящий набор приборов.

В случае 2 может потребоваться исследование спектра частот поля. Альтернативой является зондирование в широком спектре, что учитывает различные частоты. Случай 3 является расширением случая 2. Если первоначальное измерение показывает несоответствие нормам, может потребоваться селективное измерение частот с использованием антенны и спектрального анализатора.

6 Техническое рассмотрение

6.1 Стратегия

6.1.1 Временная стратегия

Нормы обычно представляют собой среднеквадратичные величины (RMS) непрерывной волны, усредненной за определенный период. Например, нормы Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP) являются средними за более чем 6-минутный период при частоте ниже 10 ГГц и $68/f^{1,05}$ – минутный период для частот свыше 10 ГГц (где f – частота). Поэтому для сигнала, сильно зависящего от времени, может быть необходимым уточнение результатов измерения (постизмерительный контроль), чтобы сравнить с нормами.

6.1.2 Пространственное усреднение

Типичные нормы удельной скорости поглощения SAR делятся на две категории: локальные нормы SAR отдельных органов и средняя величина SAR всего тела. Локальные нормы уместны по отношению к облучению малыми источниками, расположенными близко к телу, такими как мобильный телефон. Средние нормы SAR для всего тела нуждаются в усреднении на основе норм, приведенных в источниках.

Для установок связи наибольшая величина поля встречается вблизи антенн в области, где поля могут существенно варьироваться в масштабе размеров человеческого тела. В этих случаях требуется пространственное усреднение, чтобы получить более точный результат.

6.2 Величины

Стандарты облучения обычно относятся к электрической или магнитной компоненте нормы плотности энергии. Они измеряются индивидуально, только если это требуется свойствами поля, относящегося к конкретной области.

6.3 Области поля

Свойства электромагнитных полей нуждаются в рассмотрении при их измерении или расчете. Например:

- измерение как электрической, так и магнитной компонент может быть необходимым;
- измерение как электрической, так и магнитной компонент может быть необходимым в неизлучающей области ближнего поля.

Поэтому важно знать границы областей, прежде чем начинать процедуру сопоставления.

6.3.1 Реактивная зона ближнего поля

Это та часть области ближнего поля, которая непосредственно примыкает к антенне и где реактивное поле преобладает. Предполагается, что эта область простирается на расстояние одной длины от антенны.

6.3.2 Реактивная – излучающая область ближнего поля

Вблизи границ реактивной зоны ближнего поля может быть определена переходная область, где составляющая излучения сравнима с реактивной составляющей. Эта внешняя область простирается на расстояние в несколько длин волн (порядка 3λ) от электромагнитного источника.

6.3.3 Излучающая зона ближнего поля (Френеля)

Область поля антенны между реактивным ближним полем и областью дальнего поля, где доминирует излучение. Хотя излучение не распространяется как плоская волна, электрическая и магнитные компоненты могут рассматриваться локально ортогональными друг другу; более того, отношение E/H может предполагаться постоянным (и почти равным Z_0 , волновому сопротивлению вакуума). Эта область существует, только если максимальный размер антенны D велик по сравнению с длиной волны λ .

6.3.4 Излучающая зона дальнего поля

Область поля, где угловое распределение поля не зависит существенно от расстояния до антенны и удельная плотность мощности излучения [W/m^2] постоянна. Внутренние границы излучающей области дальнего поля определяются соотношением между 3λ и $2D^2/\lambda$ (то есть предел равен $2D^2/\lambda$, если максимальный размер антенны велик по сравнению с длиной волны λ). В области дальнего поля компоненты поля ортогональны и распространяются как плоская волна.

Вышеуказанные области показаны на рисунке 1 (где значение D предполагается бóльшим по сравнению с длиной волны λ).

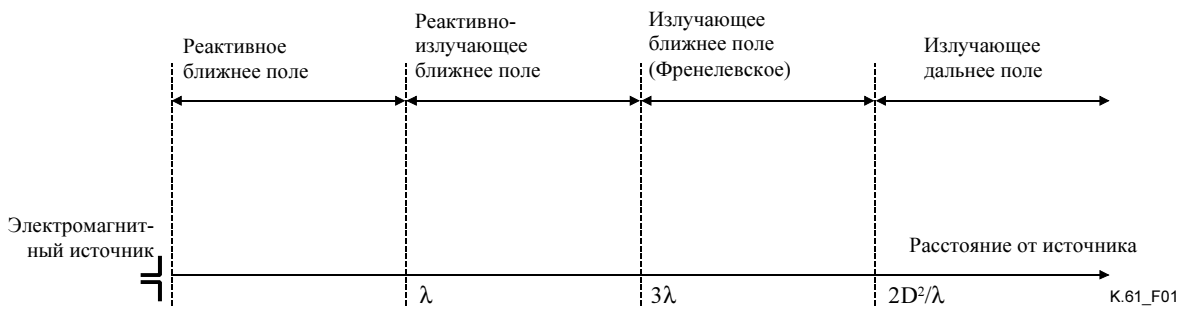


Рисунок 1/К.61 – Области поля вокруг электромагнитного источника (максимальный размер антенны D предполагается большим по сравнению с длиной волны λ)

Таблица 1/К.61 – Основные свойства электромагнитного поля в различных областях поля

	Реактивное ближнее поле	Реактивно-излучающее ближнее поле	Излучающее ближнее поле	Излучающее дальнее поле
Внутренняя граница	0	λ	3λ	$\text{Max}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$
Внешняя граница	λ	3λ	$\text{Max}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$	∞
Удельная плотность мощности S [W/m ²]	$S \leq E H $	$S \leq E H $	$S \leq E H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0 H ^2$	$S \leq E H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0 H ^2$
$E \perp H$	нет	нет	локально	да
$Z = E/H$	$\neq Z_0$	$\neq Z_0$	$\approx Z_0$	$= Z_0$

6.4 Затенение и рассеивание

Напряженность электромагнитного поля изменяется с изменением пространственной позиции вследствие эффектов отражения и рассеивания близкорасположенными проводящими структурами. Масштаб этих изменений зависит от длины волны. Важно рассмотреть эти изменения, чтобы определить точки максимального облучения и использовать подходящее пространственное усреднение.

Так как стандарты облучения точно устанавливают нормы облучения человеческого тела, должны быть рассмотрены влияния на тело отраженных волн. Например, рисунок 2 показывает ситуацию, в которой человеческое тело будет поглощать падающую волну, порождая затененную область, что препятствует отражению, но, с другой стороны, увеличивает поле в позиции тела. Эти типы влияний, особенно при микроволновых частотах, могут привести к завышенной оценке поля во время измерений или численных расчетов вблизи отражающих объектов.

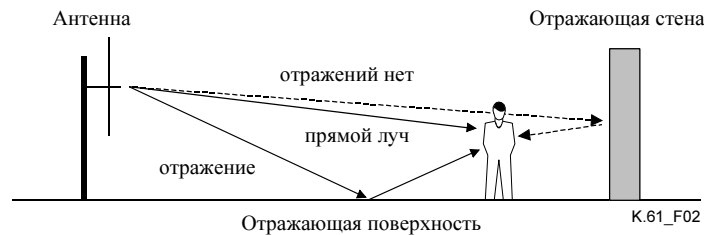


Рисунок 2/К.61 – Иллюстрация многоходовых путей облучения тела

6.5 Непостоянство источника

Телекоммуникационные источники иногда непостоянны. Непостоянство передаваемой мощности и структура антенны очень важны. Непостоянство представляет особенно трудную задачу для измерений, поскольку существующее состояние передатчика в момент измерения может быть неизвестным.

6.5.1 Непостоянство мощности

Оценка облучения должна принимать во внимание максимальную полную излучаемую мощность передатчика. Мощность, передаваемая по системе связи, может изменяться вследствие автоматического контроля мощности (APC) или изменчивости используемого канала. APC приводит в порядок выходную мощность, чтобы скомпенсировать неблагоприятные условия распространения. Непостоянство каналов делится на две категории:

- 1) Динамическое распределение каналов, когда каналы включаются или выключаются по необходимости; или
- 2) Изменения в загруженности каналов, когда количество данных, передаваемых по каналу, изменяется; однако, даже если никакой информации по каналу не передается, система остается включенной. Изменения в загруженности каналов влияет на модуляцию сигналов, однако ожидается, что этот эффект очень мал.

6.5.2 Непостоянство антенны

Хотя менее часто, чем изменение мощности, некоторые системы связи используют активные антенны, которые могут динамично изменять конфигурацию антенны.

6.5.3 Скачкообразные источники

Некоторые источники, используемые в телекоммуникациях, изменяются скачкообразно. Такие источники излучают энергию только в радиочастотном диапазоне, если в них нуждаются, чтобы передавать информацию.

Такие источники могут работать регулярным образом, передавая данные через регулярные интервалы или по определенному графику.

Такие источники могут также работать в нерегулярной манере, передавая данные, только если они активированы оператором или если накоплено достаточное количество данных, чтобы начать передачу.

7 Измерения

7.1 Измерительный инструментарий

7.1.1 Характеристики

Следующие общие характеристики измерительных устройств важны при их выборе.

7.1.1.1 Частотный спектр

Существуют два класса: широкополосный и узкополосный спектры.

- 1) Широкополосные устройства (такие как часто используемые электрические и магнитные датчики) не дают информации о частотном спектре. Тем не менее селективные измерения в широком диапазоне частот возможны при использовании маленьких широкополосных антенн (например, биконических, рожковых и т. д.) или более сложных и дорогостоящих устройств.
- 2) Узкополосные устройства обычно являются антеннами с плоским антенным фактором в ограниченной полосе (например, дипольные антенны) и могут быть использованы для частотных селективных измерений

7.1.1.2 Направленность антенны

Реакция антенны может быть изотропной или направленной.

Для изотропных устройств ожидаемая реакция не зависит от направления падения электромагнитного поля.

Для направленных устройств ожидаемая реакция зависит от направления падающей волны. Направленные устройства обычно поляризованы и имеют аксиальную симметрию в излучающей структуре. Таким образом, необходимы надлежащие повороты устройства для реконструкции поля.

7.1.1.3 Измеряемые величины

Большинство устройств измеряют либо электрическое поле, либо магнитное поле.

Выделение важно в случае области реактивного поля.

В области дальнего поля можно измерить либо электрическую, либо магнитную компоненту и определить эквивалентную удельную мощность. Однако измерительные устройства для электрической компоненты поля предпочтительны. Эквивалентная удельная мощность в области дальнего поля получается путем расчета на основании значения измеренного поля как показано в таблице 1.

7.1.2 Выбор приборов

Выбор устройств для измерения электромагнитного поля определяется рядом факторов, например:

- существующими стандартами (например, пределы измерения могут быть зависимы от частоты);
- числом и характеристиками источников электромагнитного излучения;
- областью поля (то есть реактивного ближнего поля, излучающего ближнего поля, дальнего поля), в которой делаются измерения.

Выбор измерительного оборудования тесно связан с порядком измерений. Точность результатов измерений зависит от процедуры измерений так же как и от характеристик измерительных приборов.

Измерения проводят с не менее чем 95% доверительным интервалом (то есть интервалом $\pm 2\sigma$) или равным 4 дБ, что полагается достаточным, чтобы установить соответствие.

Если неопределенность измерения превышает 4 дБ, пределы измерения следует уменьшить наполовину от минимальной величины, при которой неопределенность превышает 4 дБ, так что соответствие дается выражением:

$$X_{meas} \leq X_{lim} - \frac{1}{2}(U - 4),$$

где:

- U – неопределенность измерения;
- X_{lim} – предельная величина; и
- X_{meas} – измеренная величина.

7.1.3 Требования калибровки

7.1.3.1 Фактор калибровки (коэффициент калибровки)

При широкополосном зондировании фактор калибровки (коэффициент калибровки) определяется из следующей формулы:

$$CF = \frac{E_{ref}}{E_{meas}}.$$

Это отношение между ожидаемой контрольной напряженностью электрического поля (E_{ref}) и величиной (E_{meas}), читаемой на персональном компьютере РС или на экране прибора. Этот коэффициент является функцией, главным образом, частоты и, если присутствует нелинейность, напряженности поля. CF определяется как функция частоты. Для каждой частоты величина CF должна быть известна с неопределенностью менее 1 дБ. Ошибки из-за частотной интерполяции учтены этой величиной.

7.1.3.2 Антенный фактор (коэффициент направленности антенны)

Антенный фактор (AF) определяется для антенн и частотного селективного зондирования как отношение:

$$AF = \frac{E_{ref}}{V} [m^{-1}],$$

где E_{ref} [В/м] – напряженность электрического поля при зондировании и V [В] – величина измеренного напряжения на анализаторе спектра. Этот коэффициент в основном является функцией частоты, но при наличии нелинейности может зависеть также от напряженности поля. AF определяется как функция частоты, для каждой частоты величина AF должна быть известна с распределенной неопределенностью (то есть 95% репрезентативной выборки) менее чем 2 дБ. Максимальная приемлемая неопределенность включает в себя также ошибку вследствие частотной интерполяции (когда необходимо).

7.1.3.3 Изотропность

Пробы изотропности почти всегда полезны при определении соответствия нормам для установок связи. Изучение изотропности обычно производится с помощью трехосевых антенных систем, где три оси взаимно ортогональны. Отклонение от идеальной изотропной реакции определяется изотропным тестом. Отклонение вызывает изотропную ошибку и в общем случае является функцией направления падающей волны. Его можно оценить:

- измерением разницы косинуса реакции от каждой оси, если они ясно идентифицируются в пространстве, и сигналом от каждой оси, если они имеются в распоряжении; или
- сопоставлением полного пробного отклика, если невозможно четко определить положение каждой оси или отдельные сигналы осей не доступны.

Значение отклонения от изотропного результата должно быть менее 1 дБ.

7.1.3.4 Линейность

Требуется линейный отклик на амплитуду поля: ошибка из-за нелинейности будет означать, что антенный или калибровочный факторы являются функцией напряженности поля. Таким образом, тест на линейность должен быть отправной точкой процесса зондирования. Тест выполняется в возможно широком действующем диапазоне частот проверкой соотношения между излучаемой мощностью и электрическим полем или измеренным напряжением. Соотношение линейно в логарифмическом масштабе: отклонение в частоте должно иметь такое же отклонение величины

измерения в любой точке. Если условие не выполняется, возможна ошибка из-за нелинейности, и необходимы следующие действия:

- в определении параметров процесса: CF или AF должны быть измерены при различной амплитуде испытательной волны и при этом получены различные результаты;
- при обзоре результатов: разница из-за силы поля может быть контролируема, если расширить диапазон измерений или принять во внимание различные факторы при различных амплитудах поля (когда это возможно).

Сопоставление линейности при различных частотах может быть полезным. Максимальное приемлемое отклонение из-за нелинейности отклика равно 1 дБ.

7.1.3.5 Импульсный сигнал

Вследствие модуляции и мультимедийного доступа цифровые подвижные радиосистемы осуществляют импульсную передачу. Поэтому, когда осуществляют определение параметров с помощью непрерывной испытательной волны, необходимо проверить, что испытание не вносит изменений в определяемые характеристики.

Если расхождение CF и AF, как это было определено испытаниями импульсной и непрерывной волной, менее, чем допустимая неопределенность, измерительные приборы могут быть использованы без оглядки на тип сигнала, который следует измерять.

7.1.3.6 Объединение сложных сигналов

Проверка правильности объединения сигналов различной частоты является важной задачей при неселективных широкополосных пробах. Это означает проверку того обстоятельства, что результат измерения дается среднеквадратичным значением по формуле:

$$E_{rms} = \sqrt{\sum_i E_i^2}.$$

Испытания могут быть легко выполнены с помощью двух радиочастотных источников: результаты должны соответствовать условию:

$$20 \log_{10} \left\{ \frac{E_{mes} - \sqrt{E_1^2 + E_2^2}}{E_{mes}} \right\} < 0,5 \text{ dB},$$

где:

E_{mes} – измеренное электрическое поле;

E_1 и E_2 – реальные величины поля,

или быть менее допустимой неопределенности электрического поля или напряжения.

7.1.3.7 Осевое отклонение

Отклик на падающую вдоль оси волну с поперечной поляризацией определяется в испытании. Небольшое осевое отклонение может иметь значительное влияние на измерение напряженности электрического поля, когда оно определяется среднеквадратичной величиной трех ортогональных компонент.

7.2 Оценка неопределенности измерения

Неопределенности измерения при измерениях полей являются результатом ошибок системы приборов, калибровки и измерения, экстраполяции, интерполяции и суммарных алгоритмов, использованных, чтобы определить среднюю величину поля. Для оценки и выражения неопределенностей см. руководство [4].

7.3 Выбор образцов

7.3.1 Размер датчиков

Если измерения производятся в ближней зоне, размер датчика должен быть меньше, чем длина волны при наивысшей рабочей частоте.

7.3.2 Область частот

Общие положения: используйте широкий спектр, где возможно (это проще и быстрее), но часто требуются селективные измерения (главным образом, когда невозможно определить один главный источник и когда результаты измерения нуждаются в уточнении по сравнению со среднеквадратичным значением).

Селективные измерения обычно необходимы в случаях:

- сложных составных источников с разными пределами;
- сложных составных источников, по отношению к которым рекомендована различная измерительная техника (например, в случае постизмерительного контроля для GSM и др.);
- если необходимо определять относительный вклад различных источников.

7.3.3 Направленность

Предпочитаются непрямые пробные измерения.

7.4 Порядок измерений (процедуры)

Перед выполнением измерений потенциально опасных электромагнитных полей должна быть сделана приближенная оценка, описанная в Рекомендации МСЭ-Т К.52. Она позволяет оценить ожидаемую напряженность поля, границы зон и поэтому поможет в выборе подходящих измерительных приборов и порядка измерений.

7.5 Меры предосторожности

Персонал должен принять соответствующие предосторожности во время измерений. Если измерения выходят за пределы зоны, необходимо следовать предосторожностям, определяемым Рекомендацией МСЭ-Т К.52. А также должны быть соблюдены меры предосторожности против косвенных эффектов, таких как прикосновение к токоведущим проводникам.

7.6 Области поля

Что измеряется (E или H), зависит от того, где (в реактивной или излучающей зоне поля) вы находитесь, и от полного сопротивления поля.

- Реактивное ближнее поле: измеряются обе компоненты E и H или рассчитывается удельная интенсивность поглощения SAR.
- Реактивное излучающее ближнее поле: в случае отсутствия данных о полном сопротивлении поля, измеряются обе компоненты – E и H; в случае наличия данных о полном сопротивлении поля можно измерять только одну компоненту поля в зависимости от полученных стабильных результатов:

Измеряется только компонента E, если $\frac{E}{H} > Z_0 = 120 \times \pi [\Omega]$ Ом, то есть большое волновое сопротивление электромагнитного поля.

Измеряется только компонента H, если $\frac{E}{H} < Z_0 = 120 \times \pi [\Omega]$ Ом, то есть низкое волновое сопротивление поля.
- Излучающее ближнее поле: измеряется только компонента E, предполагается, что волновое сопротивление равно волновому сопротивлению вакуума (Z_0) (разница мала по сравнению с неточностью измерения).
- Излучающее дальнее поле: измеряется только компонента E.

При измерении в точках, близких к источнику, предпочтительно определять SAR (удельную интенсивность поглощения) вместо измерений поля.

7.7 Несколько источников

Влияние нескольких источников, работающих на различных частотах, должно рассматриваться согласно ICNIRP или применимого стандарта на экспонирующее РЧ излучение, как правило, в форме взвешенной суммы, где доли всех отдельных источников пропорциональны исходя из предела, применимого к частоте этого источника.

7.8 Временная и пространственная изменчивость

Многочисленные отражения могут порождать не однородное распределение поля. Серия измерений должна быть проведена в кубическом объеме со стороной порядка 2 м. Измерения вблизи металлических объектов должны быть сделаны на расстоянии, по крайней мере в 3 раза превышающем длину объекта, в случае множественного источника область измерения должна быть разделена на клетки порядка одного квадратного метра, а измерения выполнены индивидуально в каждой клетке. В ближней зоне излучателя могут существовать большие градиенты поля. Измерения должны быть проведены достаточно близко друг к другу, чтобы точно определить границы зоны соответствия техническим условиям.

В областях, где ожидается временная изменчивость источника, измерения нуждаются в проведении за увеличенный период времени. Например, в случае изменчивости канала измерения должны быть сделаны во время пика его использования.

7.8.1 Средние временные и пространственные значения

Первоначальные измерения в точках сетки или вблизи излучателя, как описано в 7.8, дают максимальные значения величин поля. Эти величины представляют наиболее безопасную оценку облучения. Можно определять зону соответствия нормам на основе этих безопасных величин. Если желательна более усовершенствованная оценка, может быть использовано пространственное усреднение, как это описано в 6.1.2.

8 Соответствие нормам: обработка результатов измерения

8.1 Идентификация отдельных источников

Пробы, используемые при внешних измерениях поля для определения соответствия нормам, должны быть, как правило, изотропны, ненаправленны и неполяризованы. К тому же они не должны производить значительного рассеивания первоначального электромагнитного поля и приводить к значительному взаимодействию датчика с полем. Однако такие пробы не могут видоизменяться между различными источниками.

Частотно-селективные или направленные измерения нуждаются в идентификации вкладов отдельных источников. Например, комбинация антенны и спектрального анализатора позволяет более точные измерения индивидуальной частоты, направления и поляризации компонент поля. Однако это делает измерения более сложными, когда необходимо измерить и суммировать три поляризации по отдельности. Также в сложных условиях рассеивания может быть необходимо измерение полей в различных направлениях. Возможно также использование комбинации антенны и анализатора спектра, чтобы проверить частоту и происхождение излучений, измеряемых при изотропном зондировании.

8.2 Прерывистые источники

Ни изотропное широкополосное зондирование, ни спектральный анализатор не могут измерить длительность работы прерывистого источника. Пробы измеряют максимальную величину поля (пик), тогда как спектральный анализатор измеряет максимум спектральной плотности в частотной области. Чтобы получить среднее время работы, длительность прерывистой передачи определяется из эксплуатационных требований системы.

8.3 Базовые станции для систем подвижной радиосвязи

Предпочтительный метод измерений радиочастотного электромагнитного поля (РЧ ЭМП) передатчиков базовых станций систем подвижной радиосвязи заключается в том, чтобы удостовериться, что все радиоканалы заняты во время измерения. Это может быть установлено из знания действий применяемой системы или из изучения сигнала с помощью комбинации антенны и спектрального анализатора. Если измерения при всех занятых каналах невозможны, тогда должна применяться процедура экстраполяции, пример которой приведен в 8.3.1.

8.3.1 Примеры процедуры экстраполяции

Этот пункт показывает пример процедуры экстраполяции для многоканальной подвижной беспроводной системы. Экстраполяция основана на измерении напряженности поля E_{BCCH} базовой станции контроля каналов. Последующие шаги основаны на численном и статистическом анализе уменьшения мощности. Это характеризуется введением коэффициента затухания α . Возможны следующие действия:

- благоприятное предположение: полный трафик ($\alpha_{\text{traf}} = 1$);
- измерение напряженности электрического поля от различных беспроводных систем;
- проверка числа несущих (n_c) для каждой беспроводной системы;
- определение α_{APC} и α_{DTX} как статистических, так и экспериментальных величин (<1): они являются коэффициентами затухания благодаря стратегии, осуществляемой, чтобы понизить излучаемую мощность, то есть APC – автоматический контроль мощности и DTX – дискретная передача;
- полная излучаемая мощность для каждой системы P_{ext} экстраполируется от мощности базовой станции контроля каналов P_{BCCH} посредством следующего выражения:

$$P_{\text{ext}} = P_{\text{BCCH}} + (n_c - 1) \times P_{\text{BCCH}} \alpha_{\text{APC}} \times \alpha_{\text{DTX}}$$

- таким образом, полная напряженность электрического поля, относящаяся к каждой системе передачи, получается как квадратный корень из вышеприведенной формулы для мощности:

$$E_{\text{ext}} = E_{\text{BCCH}} \sqrt{1 + (n_c - 1) \times \alpha_{\text{APC}} \times \alpha_{\text{DTX}}}$$

Для универсальной мобильной системы связи (UMTS) могут быть предложены другие подходы в соответствии с характеристиками сигналов. Для аналоговых систем мощность, излучаемая одной несущей, просто умножается на число несущих.

Последним шагом является расчет полной эквивалентной напряженности электрического поля E_{TOT} , которая сравнивается с нормой. E_{TOT} получается как среднеквадратичное значение суммы вкладов от каждой системы передачи (обозначаемых индексом k):

$$E_{\text{TOT}} = \sqrt{\sum_k E_k^2} \leq E_{\text{lim}}(f)$$

и где различные пределы (нормы) определяются для различных частот:

$$\rho_E = \sqrt{\sum_k \frac{E_k^2}{E_{\text{lim}_k}^2}} \leq 1$$

Неопределенность: если умеренное приближение (например, полный трафик, $\alpha_{\text{traf}} = 1$) принято в последующих действиях, напряженность поля, полученная в них, сравнивается с нормой.

Добавление I

Расчетные методы

I.1 Общее

В настоящем Добавлении содержится руководство по выбору расчетного метода, необходимого для определения потенциально опасных уровней электромагнитного поля. Существует несколько методов, полезных для определения соответствия облучения нормам:

- 1) Конечно-разностный во временной области (FDTD);
- 2) Конечно-разностный во временной области и в нескольких регионах (MR/FDTD);
- 3) Модель отслеживания лучей;
- 4) Гибрид методов отслеживания лучей и конечно-разностного FDTD;
- 5) Модели антенны ближнего поля, такие как метод моментов (MOM) и числового электромагнитного кода (NEC).

Выбор подходящего числового метода зависит от следующих факторов:

- 1) Зоны поля, где требуется расчет подверженности воздействию поля;
- 2) Параметра, который требуется рассчитать (SAR – удельная интенсивность поглощения против параметров поля);
- 3) Топологии места, где определяется воздействие поля.

Критерии выбора суммированы в таблице I.1:

Таблица I.1/ К.61 – Выбор расчетной техники

Зона поля	Топология	Рассчитываемая величина	Подходящая расчетная техника
Ближнее поле	Открытая	Поля	FDTD, MOM
Ближнее поле	Открытая	SAR	FDTD
Ближнее поле	Закрытая, многократные отражения	Поле	FDTD, MOM,
Ближнее поле	Закрытая, многократные отражения	SAR	FDTD, MR/FDTD
Дальнее поле	Открытая	Поле	Отслеживание лучей, MOM
Дальнее поле	Многократные отражения (сложное городское окружение)	Поле	Отслеживание лучей

I.2 Описание методов

Более детальное описание различных методов дано в следующих пунктах.

I.2.1 FDTD – конечно-разностный метод во временной области

Метод FDTD наиболее употребим для определения подверженности воздействию поля вблизи антенны или в тесных помещениях со сложной отражающей обстановкой. Алгоритм FDTD – наиболее широко распространенный вычислительный метод для моделирования SAR [B3]. Метод FDTD предлагает большую гибкость в моделировании неоднородных структур анатомических тканей и органов.

Метод FDTD может быть использован, чтобы предсказать величины поля в сложной отражающей обстановке, включая условия на границе, или чтобы предсказать SAR посредством точного определения диэлектрических свойств и размеров человеческого тела и подходящих граничных условий для закрытого и открытого пространства (таких как время запаздывания и плотно прилегающие слои).

Синусоидальная форма волны обычно используется в качестве источника возбуждения в точке питания антенны, чтобы выполнить вычисления. Сигналу позволяется распространяться и взаимодействовать с объектами, моделируемыми в вычислительном поле посредством численных итераций. Алгоритм FDTD повторяет распространение поля в пространстве и времени до тех пор, пока условия в вычислительном пространстве не достигнут устойчивого синусоидального состояния. Полное поле в выбранных местах ткани может быть рассчитано, чтобы определить SAR. Чтобы поддерживать численную стабильность расчетных алгоритмов, следует использовать условие Куранта, которое дает минимальное соотношение для выбора временных и пространственных шагов при расчете. Скорость итерации и ожидаемые расчетные ошибки относятся к параметрам, используемым в условии Куранта.

I.2.2 Конечно-разностный метод MR/FDTD

Алгоритм MR/FDTD [B4] преодолевает неэффективность метода FDTD для геометрии, которая включает протяженные разбросанные регионы. В методе MR/FDTD проблема пространства делится на несколько независимых субрегионов, распределенных в ином свободном пространстве. Поля в субрегионах определяются с помощью использования локализованных сеток FDTD.

I.2.3 Отслеживание лучей

Отслеживание лучей полезно при расчете полей в больших открытых пространствах и в городских условиях, включающих многочисленные отражения. Простая двухлучевая модель использована в Рекомендации МСЭ-Т К.52. Эта модель точна для открытой неограниченной области над плоской землей. Более сложные условия с отражениями, которые включают отражения от зданий, флуктуации рельефа земли и т. п., требуют сложных многолучевых алгоритмов. Главный недостаток лучевого метода заключается в том, что это техника существенно дальнего поля. Предположим, что размеры отражателя велики по сравнению с длиной волны. Лучевой метод не подходит для расчета больших длин волн, когда важной является дифракция. Лучевое отслеживание не дает возможности расчета SAR.

I.2.4 FDTD/ отслеживание лучей

Гибрид FDTD и техники лучевого отслеживания [B5] пытается сочетать преимущества обоих методов. Эти методы используют лучевое трассирование, чтобы рассчитать падающее поле и FDTD, чтобы рассчитать SAR (удельную скорость поглощения) в теле.

I.2.5 MOM

Метод моментов (MOM) [B2] полезен для расчета силы поля, излучаемого антеннами или другими типами тонкопроволочных проводящих структур, и для расчета полей, рассеянных тонкопроволочными металлическими структурами. Использование MOM для расчета рассеяния поля от проводящих плоских поверхностей требует, чтобы такие поверхности были представлены проволочной сеткой. MOM используется при расчетах ближнего и дальнего поля. Геометрия и детали конструкции антенны и геометрия рассеивающего объекта должны быть известны. MOM не используется для определения проникновения поля сквозь диэлектрические тела и поэтому не подходит для определения SAR. Возможно коммерческое и некоммерческое осуществление MOM.

I.3 Другие модели ближнего поля

Алгоритмы трассирования лучей наиболее полезны для определения воздействия полей достаточно далеко от источника излучения, где поля отражаются от зданий и где неровности местности существенны. В большинстве случаев применения установок связи поле падает до величины ниже предельной в нескольких метрах от источника. Поэтому требуется точный расчет ближнего поля антенны. В дополнение к MOM, описанному в I.2.5, существует несколько других методов рассчитать поле, если известны геометрия конструкции и детали антенны. Такие методы могут также принимать в расчет рассеяние от объектов вблизи антенны.

I.4 Практические проблемы

Главная практическая проблема в применении сложных расчетных методов, таких как лучевое трассирование или NEC, состоит в том, что геометрия нуждается в точном определении. На практике наибольшие препятствия к использованию даже простой двухлучевой модели есть недостаток адекватной информации об антенне и облучаемом окружении. Например, имеющиеся в распоряжении данные о местности могут иметь ограниченное разрешение. Другой пример – структура антенны, предусмотренная изготовителем, эффективна только для дальней области поля. Вблизи антенны свойства могут сильно изменяться, выигрыш в качестве уменьшаться и распределение полей измениться. Возможное решение в этом случае состоит в том, чтобы рассчитать модель антенны, используя MOM, если конструкция антенны известна.

Библиография

- [B1] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, Vol. 79, No. 4, pp. 494-522, 1998.
- [B2] HARRINGTON (R.F.): Field Computation by Moment Methods, *Wiley-IEEE Press*, April 1993.
- [B3] KUNZ (K.S.), LUEBBERS (R.J.): The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, *CRC Press*, 2000.
- [B4] JOHNSON (J.M.), RAHMAT-SAMII (Y.), MR/FDTD: A Multiple-Region Finite-Difference – Time-Domain Method, *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 101-105, Vol. 14, No. 2, February 1997.
- [B5] BERNARDI (P.), CAVAGNARO (M.), PISA (S.), PIUZZI (E.): Human Exposure to Radio Base Station Antennas in Urban Environment, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 11, November 2000.
- [B6] BERNARDI (P.), CAVAGNARO (M.), D'ATANASIO (P.), DI PALMA (E.), PISA (S.) and PIUZZI (E.): FDTD, Multiple-Region/ FDTD, Ray-Tracing/FDTD: a Comparison on their Applicability for Human Exposure Evaluation, *International Journal on Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, pp. 579-593, Vol. 15, 2002.
- [B7] MUR (G.): Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the time-Domain electromagnetic Field Equations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 23(4), pp. 377-382, November 1981.
- [B8] FARAONE (A.), YEW-SIOW TAY (R.), JOYNER (K.H.), BALZANO (Q.): Estimation of the Average Power Density of Cellular Base Station Collinear Array Antennas, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 3, May 2000.

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия В	Средства выражения: определения, символы, классификация
Серия С	Общая статистика электросвязи
Серия D	Общие принципы тарификации
Серия E	Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы
Серия F	Нетелефонные службы электросвязи
Серия G	Системы и среда передачи, цифровые системы и сети
Серия H	Аудиовизуальные и мультимедийные системы
Серия I	Цифровая сеть с интеграцией служб
Серия J	Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов
Серия K	Защита от помех
Серия L	Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	TMN и техническое обслуживание сетей: международные системы передачи, телефонные, телеграфные, факсимильные и арендованные каналы
Серия N	Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ
Серия O	Требования к измерительной аппаратуре
Серия P	Качество телефонной передачи, телефонные установки, сети местных линий
Серия Q	Коммутация и сигнализация
Серия R	Телеграфная передача
Серия S	Оконечное оборудование для телеграфных служб
Серия T	Оконечное оборудование для телематических служб
Серия U	Телеграфная коммутация
Серия V	Передача данных по телефонной сети
Серия X	Сети передачи данных и взаимосвязь открытых систем
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура, аспекты межсетевого протокола (IP) и сети следующих поколений
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи