

# ТЕХНОЛОГИЯ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ LTE

Часть 2. Форматы оценок координат

**Г.Фокин**, д.т.н., проф. СПбГУТ  
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича / grihafokin@gmail.com,  
**В.Григорьев**, д.т.н., проф. НИУ ИТМО,  
генеральный директор ООО "ЛИС" / vgrig@labics.ru,  
**В.Аксенов**, технический директор ООО "ЛИС" / vladaksi@labics.ru

УДК 621.396.969, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.107.7.60.70

Во второй части исследования, посвященного технологиям сетевого позиционирования LTE, представлены географические форматы оценок местоположения пользовательских устройств в различных системах координат, используемые в гетерогенных сетях четвертого поколения. Необходимость формализованного представления оценок местоположения обусловлена тем, что новые сервисы позиционирования как разновидность инфокоммуникационных услуг характеризуются измеримыми параметрами качества результирующих оценок координат. Задача преобразования оценок координат встает при комплексировании различных технологий наземного и спутникового радиотехнического позиционирования, которые на сегодняшний день доступны в гетерогенных сетях LTE. В статье описаны форматы представления оценок координат, а также проиллюстрированы примеры их преобразования.

## ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящего исследования [1] было показано, что в краткосрочной и среднесрочной перспективе в различных отраслях экономики будут востребованы оценки координат (ОК) пользовательских устройств, полученные независимыми от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) технологиями сетевого позиционирования [2], преимущественно на базе широко развернутой инфраструктуры сетей подвижной радиосвязи LTE. С точки зрения оператора и абонента сервисы позиционирования, как и другие инфокоммуникационные услуги [3], характеризуются своими параметрами качества обслуживания (QoS) результирующих оценок координат (ОК).

Основными показателями QoS сервисов позиционирования сетевых устройств являются

вертикальная точность, горизонтальная точность, а также время определения местоположения (ОМП) [4]. Вертикальная точность определяется одной координатой и не требует преобразований для представления [5]. Время, затрачиваемое на позиционирование, может быть непосредственно измерено по таймерам в плоскости пользователя или плоскости управления [6]. Что касается горизонтальной точности, то она определяется двумя координатами и для характеристики QoS-сервисов позиционирования с заданной вероятностью требует приведения используемого при ОМП географического формата в соответствие с радиусом окружности области неопределенности, или же полуосью эллипса области неопределенности [7].

Форматы описания географических областей, используемые для представления оценок координат,

специфицированы в 3GPP TS 23.032 [8], протоколы и процедуры обработки данных форматов описаны в 3GPP TS 37.355 [9] и 3GPP TS 29.572 [10] соответственно. Одним из подходов при оценке горизонтальной точности позиционирования является вычисление географической области искомого местоположения (МП), за которым следует оценка радиуса окружности в заданной эквивалентной по площади географической области, при этом наиболее используемыми фигурами для оценки горизонтальной точности являются многоугольник, эллипс и дуга эллипсоида [11].

Целью данной работы является описание форматов представления и преобразования оценок координат в гетерогенных сетях LTE, а также иллюстрация их практического использования согласно спецификациям 3GPP. Материал статьи организован следующим образом: сначала описываются географические области местоположения согласно 3GPP TS 23.032, используемые для характеристики горизонтальной точности в задачах сетевого позиционирования LTE; далее обосновывается задача преобразования оценок координат в сетях LTE; затем приводится описание используемых в этих сетях систем координат; после этого формализуются преобразования координат. Рассмотренные форматы далее используются для иллюстрации параметров QoS сервиса позиционирования LTE, представления и преобразования оценок координат и характеризующих их форматов площадей.

### ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОБЛАСТИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В СЕТЯХ LTE

При формализованном описании ОК посредством географических областей местоположения фигурами многоугольника, дуги эллипсоида и эллипса неопределенности, согласно 3GPP TS 23.032 [8], используются следующие обозначения. Вершины многоугольника обозначаются координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, N_p$ , где  $N_p$  – число вершин многоугольника. Внутренний радиус дуги эллипсоида обозначается как  $R$ , ширина дуги эллипсоида –  $\Delta R$ , а раскрывающий дугу угол в радианах –  $\alpha$ . Большая полуось эллипса обозначается как  $r_1$ , малая полуось эллипса – через  $r_2$ .

Площадь эллипса равна  $\pi r_1 r_2$ . Площадь дуги эллипсоида вычисляется как разность площадей секторов окружностей, ограниченной внешним и внутренним радиусами.

Эквивалентный радиус окружности неопределенности, соответствующий площадям многоугольника (polygon), дуги эллипсоида (ellipsoid arc) и эллипса неопределенности (uncertainly ellipse), вычисляется путем приравнивания площадей этих

геометрических фигур величине  $\pi r^2$  с последующим вычислением  $r$ . Оценка радиусов окружности неопределенности для рассмотренных выше фигур осуществляется согласно [8]:

$$r_{\text{polygon}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_p-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)}{2\pi}} \quad (1)$$

$$r_{\text{ellipsoid arc}} = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi} \Delta R (2R + \Delta R)} \quad (2)$$

$$r_{\text{uncertainty ellipse}} = \sqrt{r_1 r_2} \quad (3)$$

Для иллюстрации практического использования выражений (1)–(3) в задачах сетевого позиционирования рассмотрим далее представление и преобразование оценок координат.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ В СЕТЯХ LTE

Для представления, преобразования и комплексирования оценок координат в гетерогенных сетях LTE следует определиться с системой координат (СК) и системой единого времени (СЕВ). Интересный обзор по эволюции СЕВ представлен в цикле [12–16].

Стандарт всемирного координированного времени UTC [17] отличается на целое число секунд от атомного времени TAI (Temps Atomique International) [20] и не более чем на 0,9 с от всемирного времени UT [18], где шкала UT (Universal Time) основана на вращении Земли. Новая шкала времени UTC была введена вместо шкалы среднего времени по Гринвичу (GMT), поскольку та неравномерна и связана с суточным вращением Земли [19].

В основе измерения международного атомного времени TAI лежат электромагнитные колебания, излучаемые атомами или молекулами при переходе из одного энергетического состояния в другое [21]. Масштаб TAI равен масштабу эфемеридного времени (Ephemeris Time) с равномерной шкалой [22], основанной на определении секунды, которое не зависит от изменяющейся скорости вращения Земли.

Шкала UTC основана на двух шкалах времени: на вращении Земли и на равномерной шкале TAI [11]. Шкала времени, основанная на атомных часах, есть физическое воспроизведение шкалы ET с точностью до  $2 \cdot 10^{-12}$  с. Шкала времени, основанная на вращении Земли, определяет геоцентрическую фиксированную прямоугольную систему координат ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed). Шкалы времени ГНСС ГЛОНАСС и GPS определяются атомным временем TAI. Таким образом, мы можем наблюдать сдвиг шкал ГНСС и UTC.

Технологии ускорения спутникового позиционирования A-GPS (Assisted GPS) и A-GNSS (Assisted GNSS)

используют систему координат ECEF для сбора первичных измерений и их вторичной обработки при оценке координат. Технологии сетевого позиционирования LTE используют локальную прямоугольную систему координат ET (Earth Tangential) [11]. Вспомогательные данные позиционирования для систем A-GNSS, как и результаты оценки координат, представляются в формате широты, долготы и высоты в геодезической СК WGS 84 (World Geodetic System 1984) [23].

При вычислении параметров QoS применительно к сервисам определения местоположения в гетерогенных сетях с различными технологиями радиотехнического позиционирования необходимо установить достаточность выбранного метода позиционирования с точки зрения достижимой точности. В противном случае необходим повторный выбор.

В таких сценариях может возникнуть необходимость преобразований оценок координат из одной СК в другую, в том числе, при их комплексировании.

Также необходимость преобразований оценок координат в технологиях сетевого позиционирования обусловлена тем обстоятельством, что оценки координат в сети подвижной радиосвязи получаются в среде, для описания которой лучше всего подходит система координат ET. Например, при позиционировании пользовательских устройств с использованием инфраструктуры базовых станций (БС) eNB сети LTE разностно-дальномерным методом [24] за начало системы координат целесообразно принять местоположение опорной eNB с известными координатами [25].

Таким образом, в гетерогенных сетях LTE при позиционировании устройств в сетях наземного и спутникового радиотехнического позиционирования, где оценки МП могут быть получены в различных СК, необходимо иметь инструменты представления и преобразования оценок координат WGS 84, ECEF и ET.

## Представление координат в сетях LTE Геодезическая система координат WGS 84

Точка эллипсоида представляет собой точку на поверхности Земли в СК WGS 84 [23]. За основу модели WGS 84 взят эллипсоид с большим радиусом – 6378137 м (экваториальный) и меньшим – 6356752,3142 м (полярный). Началом WGS 84 является центр масс Земли. Ось z направлена на опорный полюс, определенный международной службой вращения Земли IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) [26].

Ось x лежит в пересечении экваториальной плоскости и плоскости опорного меридиана IRM (IERS Reference Meridian) и проходит через начало координат по нормали к оси z. Опорный меридиан IRM совпадает с нулевым (Гринвичским) меридианом на период 1984 года с отклонением в 5,31 секунды (~100 м) к востоку (рис.1). Ось y дополняет геоцентрическую фиксированную систему координат ECEF до правой, то есть правосторонне направленной и перпендикулярной к оси x в плоскости экватора ось y завершает формирование системы координат ECEF.

## Представление координат в формате точки эллипсоида

Географические координаты точки  $\rho$  эллипсоида определяют ее положение на земной поверхности, которое задается широтой и долготой (рис.1). Широта определяется как угол  $\theta$  между плоскостью экватора и нормалью к касательной, проходящей через точку эллипсоида; она отсчитывается от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  в обе стороны от экватора. Широту точек, лежащих в северном полушарии (северную широту), принято считать положительной, широту точек в южном полушарии – отрицательной. О широтах, близких к полюсам, принято говорить, как о высоких, а о близких к экватору – как о низких.

Долгота определяется как угол  $\phi$  между плоскостью, проходящей через нулевой меридиан, и плоскостью, перпендикулярной плоскости экватора и проходящей через точку эллипсоида; долготу от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  к востоку от нулевого меридиана называют восточной, к западу – западной. Положительные значения долготы отсчитываются в направлении восточного полушария, отрицательные – в западном.

Координаты точки кодируются с неопределенностью не более 3 м [11]. Широта кодируется 24-мя битами: 1 бит используется для кодирования знака, а число от 0 до  $2^{23}-1$  используется для кодирования угла широты от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Долгота в диапазоне от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$  кодируется числом от  $-2^{23}$  до  $2^{23}-1$ . Скрипт 1 иллюстрирует представления формата оценок координат 3GPP [9].

## Скрипт 1. Формат представления ОК 3GPP для точки эллипсоида

```
Ellipsoid-Point: = SEQUENCE {  
  latitudeSign ENUMERATED {north, south},  
  degreesLatitude INTEGER (0..8388607),  
  degreesLongitude INTEGER (-8388608..8388607)  
}
```

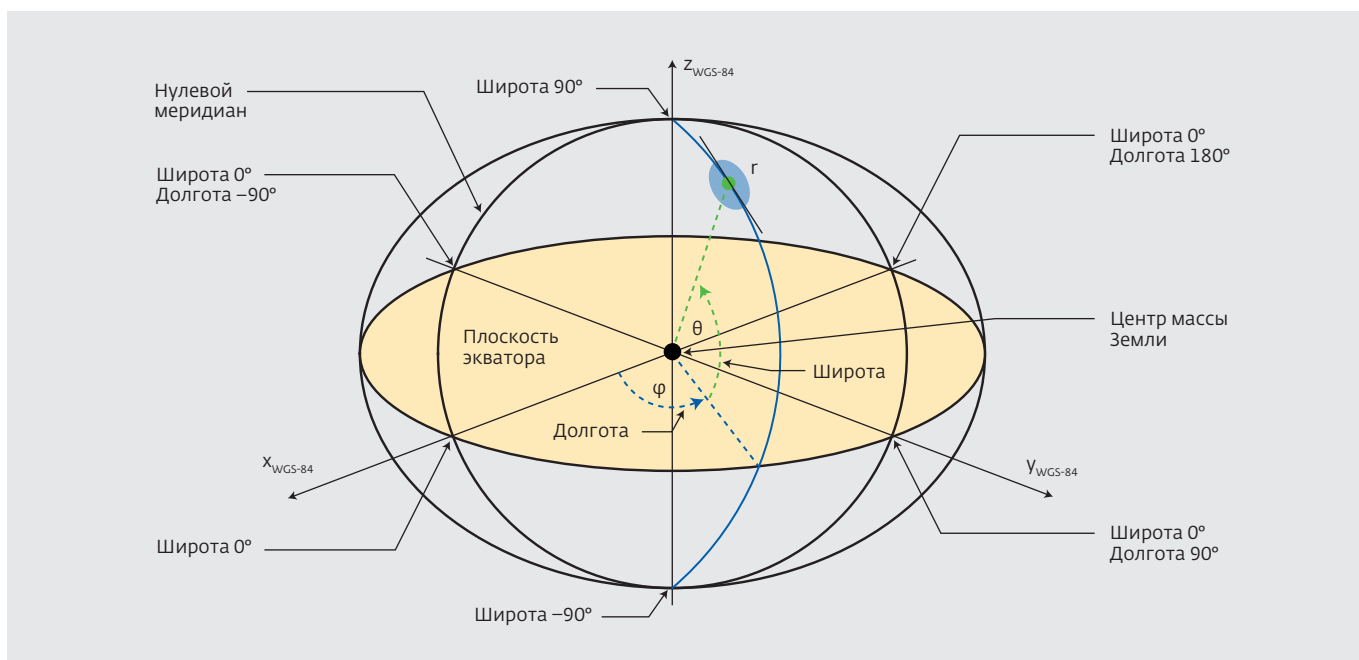


Рис.1. Точка эллипсоида в геодезической СК WGS 84

### ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ ПРЯМОУГОЛЬНАЯ СК ECEF

В WGS-84 координаты определяются набором переменных  $(\theta, \varphi, h)^T$  широты  $\theta$ , долготы  $\varphi$  и высоты  $h$ . В прямоугольной СК координаты определяются набором переменных  $(x, y, z)^T$ . Геодезическая эллипсоидальная СК WGS-84 связана с эллипсоидом Земли WGS-84. Геоцентрическая прямоугольная ECEF и геодезическая эллипсоидальная WGS-84 СК согласованы друг с другом. Центры этих систем совмещены, ось  $z$  прямоугольной СК проходит вдоль малой оси эллипсоида, оси  $x$  и  $y$  совпадают.

Рис.2 иллюстрирует соотношения между переменными локальной прямоугольной ET и геоцентрической прямоугольной ECEF СК. Геоцентрическая СК ECEF имеет начало координат в центре эллипсоида Земли WGS-84. Ось  $x_{ECEF}$  лежит на пересечении плоскостей экватора и Гринвичского меридиана. Ось  $y_{ECEF}$  лежит в плоскости экватора и повернута на  $90^\circ$  на восток от оси  $x_{ECEF}$ . Ось  $z_{ECEF}$  системы координат ECEF совпадает с осью  $z_{WGS-84}$  вращения эллипсоида Земли WGS-84. Система координат ET имеет начало на поверхности эллипсоида Земли WGS-84. Если провести касательную плоскость к поверхности эллипсоида Земли WGS-84 в точке начала координат ET, то ось  $x_{ET}$  будет направлена на восток, ось  $y_{ET}$  будет направлена на север, ось  $z_{ET}$  будет направлена вверх; при этом широта начала координат ET будет определяться углом  $\theta_{ET}$ , а долгота будет определяться углом  $\varphi_{ET}$  [11].

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ В СЕТЯХ LTE

Преобразование геодезических координат  $(\theta, \varphi, h)^T$  WGS-84 в прямоугольные ECEF осуществляется с использованием [11]:

$$x_{ECEF} = N \cos(\theta) \cos(\varphi) \quad (4)$$

$$y_{ECEF} = N \cos(\theta) \sin(\varphi) \quad (5)$$

$$z_{ECEF} = \left(\frac{b}{a}\right) N \sin(\theta) \quad (6)$$

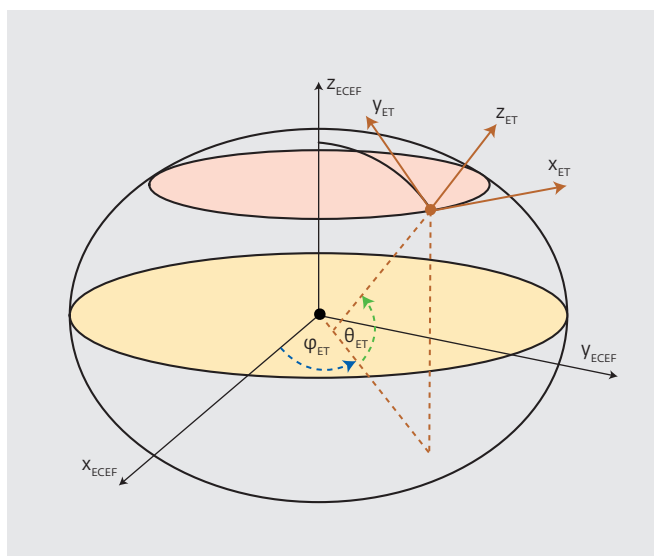


Рис.2. Прямоугольная ET и геоцентрическая ECEF СК

**Таблица 1.** Константы эллипсоида Земли WGS-84

Параметр	Значение
Большая полуось, a	6378137,0 м
Малая полуось, b	6356752,3142 м
Знаменатель сжатия, 1/α	298,257223563
Эксцентриситет, e	0,081819190842622

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\theta)}}, \quad (7)$$

где табл.1 содержит константы эллипсоида Земли WGS-84.

При преобразовании начала координат локальной СК ET в ECEF получаются координаты

$(x_{ECEF}^{ET}, y_{ECEF}^{ET}, z_{ECEF}^{ET})^T$ . Для преобразования координат из СК ECEF в ET используют [11]:

$$x_{ET} = -\sin(\phi^{ET_{system}})(x_{ECEF} - x_{ECEF}^{ET_{system}}) + \cos(\phi^{ET_{system}})(y_{ECEF} - y_{ECEF}^{ET_{system}}) \quad (8)$$

$$y_{ET} = -\sin(\theta^{ET_{system}})\cos(\phi^{ET_{system}})(x_{ECEF} - x_{ECEF}^{ET_{system}}) - \sin(\theta^{ET_{system}})\sin(\phi^{ET_{system}})(y_{ECEF} - y_{ECEF}^{ET_{system}}) + \cos(\theta^{ET_{system}})(z_{ECEF} - z_{ECEF}^{ET_{system}}) \quad (9)$$

$$z_{ET} = h. \quad (10)$$

Обратное преобразование координат из ET в ECEF осуществляется с использованием выражений [11]:

$$x_{ECEF} = x_{ECEF}^{ET_{system}} - \sin(\phi^{ET_{system}})x_{ET} - \sin(\theta^{ET_{system}})\cos(\phi^{ET_{system}})y_{ET} \quad (11)$$

$$y_{ECEF} = y_{ECEF}^{ET_{system}} + \cos(\phi^{ET_{system}})x_{ET} - \sin(\theta^{ET_{system}})\sin(\phi^{ET_{system}})y_{ET} \quad (12)$$

$$z_{ECEF} = z_{ECEF}^{ET_{system}} + \cos(\theta^{ET_{system}})y_{ET}. \quad (13)$$

Преобразование из прямоугольных геоцентрических ECEF в геодезические координаты WGS-84 осуществляется по [11]:

$$\theta = \text{sign}(z_{ECEF}) \arccos\left(\frac{x_{ECEF}^2 + y_{ECEF}^2}{M^2}\right) \quad (14)$$

$$\phi = \text{atan2}\left(\frac{y_{ECEF}}{x_{ECEF}}\right) \quad (15)$$

$$h = z_{ET} \quad (16)$$

$$M = \sqrt{x_{ECEF}^2 + y_{ECEF}^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 z_{ECEF}^2}. \quad (17)$$

## ПРИМЕР ПАРАМЕТРОВ QoS-СЕРВИСА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ LTE

Представление параметров QoS-сервиса определения местоположения в сетях LTE служит для установления достаточности выбранного метода позиционирования с точки зрения достижимой точности. Скрипт 2 иллюстрирует пример декодирования форматов, согласно [8], и вычисления параметров QoS для точки эллипсоида с эллипсом неопределенности [27]. Неопределенность оценок координат представлена радиусом окружности с площадью, равной площади эллипса. Для вычисления радиуса окружности неопределенности используется (3).

**Скрипт 2.** Вычисление параметров QoS для точки эллипсоида с эллипсом неопределенности

```
positionFormat='ELLIPSOID_POINT_WITH_UNCERTAINTY_ELLIPSE';
positionFormatDescription=[3 0 400 400 25 15 130 39];
% Вычисление параметров QoS для эллипса неопределенности
if(positionFormat == 'ELLIPSOID_POINT_WITH_UNCERTAINTY_ELLIPSE')
    % Этап 1 – декодирование формата, распаковка формата
    codedShape = positionFormatDescription(1); % номер закодированной фигуры МП
    codedEllipsoidPoint(1) = positionFormatDescription(2); % знак широты
    codedEllipsoidPoint(2) = positionFormatDescription(3); % угол широты
    codedEllipsoidPoint(3) = positionFormatDescription(4); % долгота
    codedUncertaintySemiMajor = positionFormatDescription(5); % большая полуось
    codedUncertaintySemiMinor = positionFormatDescription(6); % малая полуось
    codedOrientationSemimajor = positionFormatDescription(7); % угол большой полуоси
    confidence = positionFormatDescription(8); % доверительный интервал/вероятность
    % вычисление значимых переменных
    uncertaintySemiMajor = 10^(1.1*codedUncertaintySemiMajor-1);
    uncertaintySemiMinor = 10^(1.1*codedUncertaintySemiMinor-1);
    % Этап 2 – вычисление точности, область неопределенности
    areaEllipsoidPointWithUncertaintyEllipse = ...
        pi*uncertaintySemiMajor*uncertaintySemiMinor;
    equivalentUncertaintyRadiusEllipsoidPointWithUncertaintyEllipse = ...
        sqrt(areaEllipsoidPointWithUncertaintyEllipse/pi);
    accuracyCodeEllipsoidPointWithUncertaintyEllipse = ...
        min([127 ceil(log(equivalentUncertaintyRadiusEllipsoidPointWithUncertainty
        Ellipse/10 + 1)/log(1.1))]);
    % Этап 3 – отчет
    AccuracyCode = accuracyCodeEllipsoidPointWithUncertaintyEllipse;
end
```

Параметр positionFormat содержит имя входного формата отчета, параметр positionFormatDescription –



3GPP-формат точки эллипсоида с эллипсом неопределенности [10] и включает следующие закодированные поля: номер формата закодированной фигуры codedShape, знак широты codedEllipsoidPoint(1), широту codedEllipsoidPoint(2), долготу codedEllipsoidPoint(3), большую полуось codedUncertaintySemiMajor, малую полуось codedUncertaintySemiMinor, ориентацию codedOrientationSemiMajor большой полуоси (угол, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке), доверительную вероятность confidence. В результате выполнения скрипта получается закодированное значение AccuracyCode = 20, что оказывается между малой 15 и большой 25 полуосью эллипса неопределенности.

### ПРИМЕР ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ В СЕТЯХ LTE

Скрипт 3 [27] иллюстрирует преобразования геодезических координат  $(\theta, \varphi, h)^T$  WGS-84 в прямоугольные координаты ET и обратно по формулам (4)–(17) для сценария использования четырехугольника в качестве географической области при определении местоположения и включает процедуры кодирования и декодирования форматов согласно [8].

Переменная positionFormatDescription содержит формализованное 3GPP описание многоугольника. Для этого используется последовательность следующих полей: число формата многоугольника (5), число вершин многоугольника (4), закодированные: знак широты первой вершины многоугольника (0), широта первой вершины (418), долгота первой вершины (-210), знак широты второй вершины (0), широта второй вершины (376), долгота второй вершины (188), знак широты третьей вершины (1), широта третьей вершины (418), долгота третьей вершины (209), знак широты четвертой вершины (1), широта четвертой вершины (376) и, наконец, закодированная долгота четвертой вершины многоугольника (-189).

**Скрипт 3.** Преобразование из геодезической СК WGS 84 в прямоугольную СК и обратно

```
positionFormatDescription=[5 4 0 418 -210 0 376 188 1 418 209 1 376 -189];
% преобразование координат WGS84 <-> ET
% этап 1 – распаковка формата и декодирование
majorAxis = 6378137.0; % большая ось эллипсоида Земли в СК WGS84
minorAxis = 6356752.314; % малая ось эллипсоида Земли в СК WGS84
f = 1 - minorAxis/majorAxis;
eSquared = 2*f*f*f;
N_p=positionFormatDescription(2);
for i=1:N_p % распаковка вершин многоугольника соты
    CellPosition(3*i-2) = positionFormatDescription(3*i);
    CellPosition(3*i-1) = positionFormatDescription(3*i+1);
```

```
    CellPosition(3*i) = positionFormatDescription(3*i+2);
end
% декодирование данных многоугольника для
% представления вершин в формате широты и долготы
for i=1:N_p
    % широта i-й вершины
    CellLatLong(1,i) = (1-2*CellPosition(3*i-2))*
    CellPosition(3*i-1)*(pi/2)/2^23;
    % долгота i-й вершины
    CellLatLong(2,i) = CellPosition(3*i)*(2*pi)/2^24;
end
% этап 2 – преобразование к северо-восточной прямоугольной СК
for i=1:N_p % сначала преобразование к геоцентрической прямоугольной СК
    % переменная преобразования СК
    N = majorAxis/sqrt(1-eSquared*(sin(CellLatLong(1,i)))^2);
    % координата x i-й вершины многоугольника в геоцентрической прямоугольной СК
    CellXYZ(1,i) = N*cos(CellLatLong(1,i))*cos(CellLatLong(2,i));
    % координата y i-й вершины многоугольника в геоцентрической прямоугольной СК
    CellXYZ(2,i) = N*cos(CellLatLong(1,i))*sin(CellLatLong(2,i));
    % координата z i-й вершины многоугольника в геоцентрической
    % прямоугольной СК (и автоматически, в СК WGS 84)
    CellXYZ(3,i) = N*(minorAxis/majorAxis)^2*sin(CellLatLong(1,i));
end
for i=1:N_p % затем преобразование к северо-восточной прямоугольной СК,
% поворот вокруг начала СК – первой вершины многоугольника соты
% координата x i-й вершины многоугольника в прямоугольной СК
    polygonXY(1,i) = -sin(CellLatLong(2,i))*(CellXYZ(1,i)-CellXYZ(1,1))+...
    cos(CellLatLong(2,i))*(CellXYZ(2,i)-CellXYZ(2,1));
% координата y i-й вершины многоугольника в прямоугольной СК
    polygonXY(2,i) = -sin(CellLatLong(1,i))*cos(CellLatLong(2,i))*(CellXYZ(1,i)-...
    CellXYZ(1,1))-sin(CellLatLong(1,i))*sin(CellLatLong(2,i))*(CellXYZ(2,i)-...
    CellXYZ(2,1))+cos(CellLatLong(1,i))*(CellXYZ(3,i)-CellXYZ(3,1));
end
% этап 3 – копирование в новый многоугольник для обратного преобразования
% на этом этапе могут осуществляться дополнительные преобразования,
% например, масштабирование
    polygonNewXY = polygonXY;
% этап 4 преобразование прямоугольных (x,y,z) координат в геодезические
% WGS 84 (широта, долгота и высота); сначала выполняется переход от
% прямоугольной к геодезической СК; первая вершина берется за начало СК
for i=1:N_p
    NewCellXYZ(1,i) = CellXYZ(1,i)-sin(CellLatLong(2,i))*polygonNewXY(1,i)-...
    sin(CellLatLong(1,i))*cos(CellLatLong(2,i))*polygonNewXY(2,i);
    NewCellXYZ(2,i) = CellXYZ(2,i)+cos(CellLatLong(2,i))*polygonNewXY(1,i)-...
    sin(CellLatLong(1,i))*sin(CellLatLong(2,i))*polygonNewXY(2,i);
    NewCellXYZ(3,i) = CellXYZ(3,i)+cos(CellLatLong(1,i))*polygonNewXY(2,i);
end
% затем выполняется перевод в широту и долготу WGS 84 в радианах
for i=1:N_p
    N = sqrt(NewCellXYZ(1,i)^2+NewCellXYZ(2,i)^2+(NewCellXYZ(3,i)*majorAxis^2/minorAxis^2)^2);
    NewCellLatSign(1,i) = sign(NewCellXYZ(3,i));
    NewCellLatLong(1,i) = NewCellLatSign(1,i)*
    acos(sqrt((NewCellXYZ(1,i)^2+NewCellXYZ(2,i)^2)/N^2));
```

```

NewCellLatLong(2,i)=atan2(NewCellXYZ(2,i),NewCellXYZ(1,i));
end
% этап 5 – кодирование многоугольника
codedShape = 5; % код многоугольника 3GPP
encodedPolygon = [codedShape N_p];
% последовательное кодирование и добавление
% вершин в многоугольник encodedPolygon
for i=1:N_p
    if (NewCellLatSign(1,i)>0.0)
        thisCodedPolygonCornerPoint(1,1) = 0; % код для Севера
    else
        thisCodedPolygonCornerPoint(1,1) = 1; % код для Юга
    end
    if (abs(NewCellLatLong(1,i))>=pi/2) %
        thisCodedPolygonCornerPoint(2,1) = 2^23-1;
    else
        thisCodedPolygonCornerPoint(2,1) = floor((2^24/pi)*abs(NewCellLatLong(1,i)));
    end
    if (NewCellLatLong(2,i)>=pi)
        NewCellLatLong(2,i) = -pi;
    elseif (NewCellLatLong(2,i)<-pi)
        NewCellLatLong(2,i) = -pi;
    end
    thisCodedPolygonCornerPoint(3,1) = floor((2^23/pi)*NewCellLatLong(2,i));
    % динамическое добавление вершины многоугольника
    encodedPolygon = [encodedPolygon thisCodedPolygonCornerPoint(1,1) ...
        thisCodedPolygonCornerPoint(2,1) thisCodedPolygonCornerPoint(3,1)];
end

```

Результат примера содержит переменную CellLatLong со значениями широты и долготы четырех вершин многоугольника в геодезической СК WGS-84, а также переменную CellXYZ со значениями координат четырех вершин многоугольника в прямоугольной СК ECEF. Координаты ET в переменной polygonXY получаются из координат ECEF при условии, что первая вершина многоугольника принимается за начало координат ET.

```

CellLatLong = 1.0e-04 *
    0.7827    0.7041   -0.7827   -0.7041
   -0.7865    0.7041    0.7827   -0.7078
CellXYZ = 1.0e+06 *
    6.3781    6.3781    6.3781    6.3781
   -0.0005    0.0004    0.0005   -0.0005
    0.0005    0.0004   -0.0005   -0.0004
polygonXY = 1.0e+03 *
    0    0.9507    1.0008    0.0502
    0   -0.0498   -0.9918   -0.9419

```

Далее рассмотрим используемые для представления оценок координат форматы площадей GAD (Geographical Area Description).

## Представление форматов площадей 3GPP

3GPP TS 23.032 [8] предусмотрено девять форматов площадей GAD для представления оценки координат:

1. точка эллипсоида;
2. точка эллипсоида с кругом неопределенности;
3. точка эллипсоида с эллипсом неопределенности;
4. многоугольник;
5. точка эллипсоида с высотой;
6. точка эллипсоида с высотой и эллипсоидом неопределенности;
7. дуга эллипсоида;
8. точка эллипсоида высокой точности с эллипсом неопределенности;
9. точка эллипсоида высокой точности с высотой и эллипсом неопределенности.

**Точка эллипсоида** представляет собой точку на поверхности эллипсоида Земли WGS 84 и характеризуется широтой и долготой (рис.1). На практике данный формат может использоваться для характеристики МП объекта на поверхности или близко к поверхности Земли.

**Точка эллипсоида с кругом неопределенности** показана на рис.3. Данная точка, как и предыдущая, характеризуется широтой и долготой, которые задают центр круга неопределенности с радиусом  $r$ . Данный формат характеризует набор точек эллипсоида, находящихся внутри круга на расстоянии, не превышающем  $r$ . На практике данный формат может использоваться для характеристики МП объекта на поверхности или близко к поверхности Земли в том случае, если имеется неопределенность в оценке координат.

**Точка эллипсоида с эллипсом неопределенности** представлена на рис.4. Данная точка, как и предыдущая, характеризуется широтой и долготой, которые задают центр эллипса неопределенности. Эллипс характеризуется большой  $r_1$  и малой полуосью  $r_2$ , а также углом наклона (ориентации)  $\alpha$  между направлением на север и большой полуосью эллипса; угол  $\alpha$  лежит в пределах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и измеряется по часовой стрелке от направления на север. На практике данный формат может использоваться для характеристики МП объекта на поверхности или близко к поверхности Земли, если имеется неопределенность в оценке координат. Отличие эллипса от круга неопределенности заключается в дополнительной информации о разбросе вероятностных оценок координат, которая характеризуется уже не только по величине радиусом  $r$ , но и по направлению  $\alpha$  с учетом длин  $r_1$  и  $r_2$ .

**Точка эллипсоида с эллипсом неопределенности высокой точности**, в отличие от предыдущего случая, характеризуется повышенной точностью

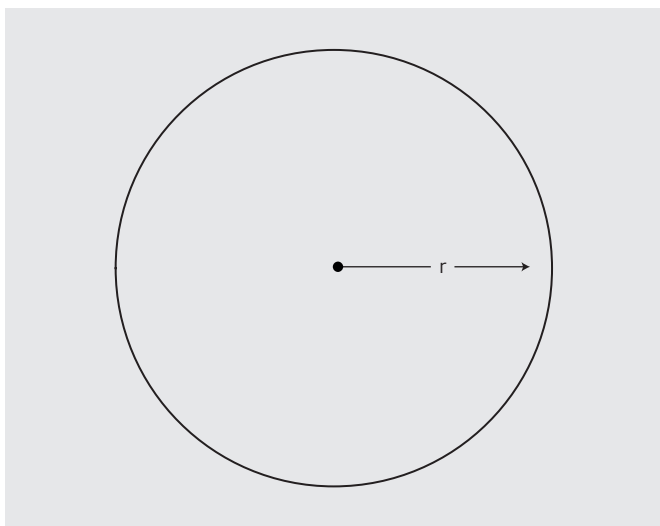


Рис.3. Круг неопределенности

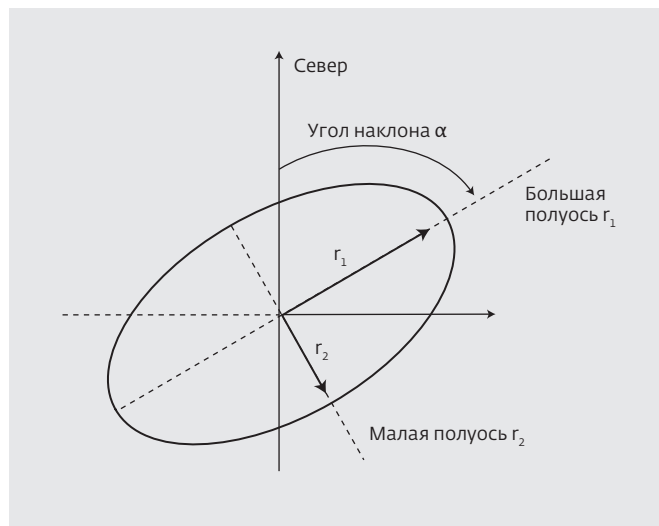


Рис.4. Эллипс неопределенности

параметров широты, долготы и длин большой  $r_1$  и малой  $r_2$  полуосей, а также угла  $\alpha$ ; формат специфицирован в 3GPP TS 29.572 [10].

**Многоугольник** (рис.5) представляет собой произвольную фигуру, которая характеризуется упорядоченным набором точек – вершин (в приведенном на рисунке примере вершины от А до Е). Минимальное число вершин равно 3; максимальное – 15. Вершины соединяются в порядке их задания соединительными линиями; при этом последнюю вершину линия должна соединять с первой. Набор вершин должен удовлетворять следующим условиям: соединительная линия не должна пересекать другие соединительные линии; две последовательные вершины не должны быть диаметрально противоположными точками эллипсоида (данное условие ограничивает длину соединительных линий расстоянием в 20000 км).

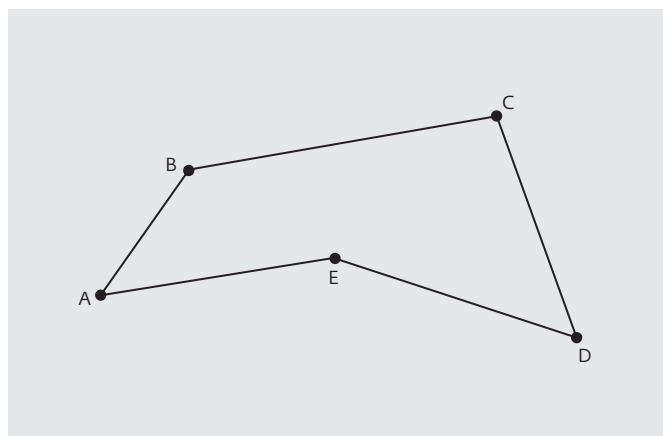


Рис.5. Многоугольник

**Формат точки эллипсоида с высотой** показан на рис.6. В отличие от точки эллипсоида (рис.1) данный формат дополнительно характеризуется высотой относительно поверхности Земли.

**Точка эллипсоида с высотой и эллипсоидом неопределенности** (рис.7) характеризуется координатами точки эллипсоида с высотой и параметрами эллипсоида неопределенности: большой полуосью  $r_1$ , малой полуосью  $r_2$ , вертикальной полуосью  $r_3$  и углом ориентации  $\alpha$ . Данный формат характеризует набор точек пространства, ограниченного эллипсоидом неопределенности с центром в точке эллипсоида с высотой, задаваемой широтой, долготой и высотой. На практике данный формат может использоваться для характеристики МП объекта в пространстве, если имеется неопределенность в оценке горизонтальных координат на плоскости и вертикальных по высоте. Отличие эллипсоида

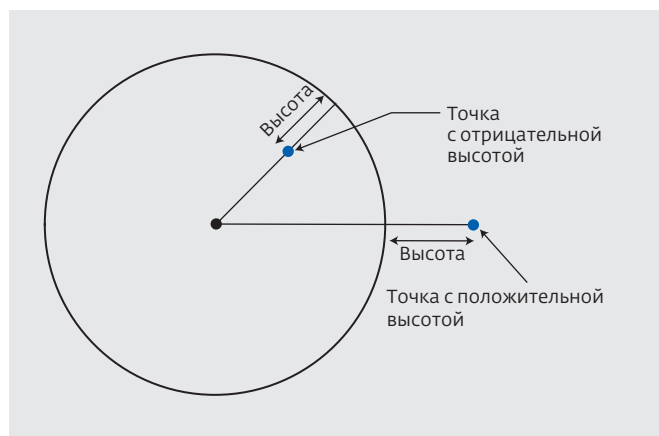
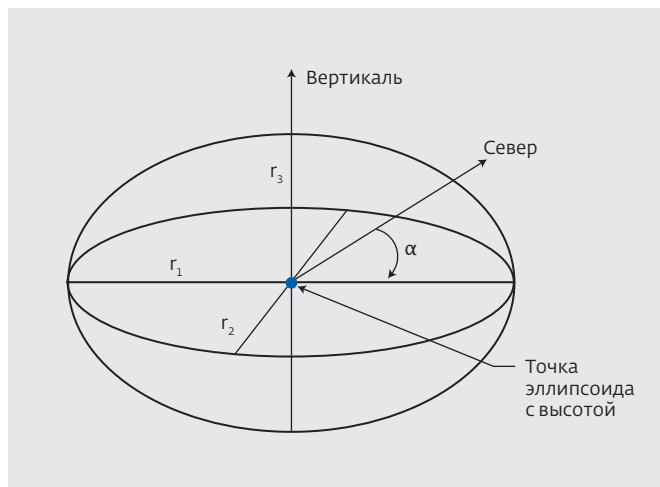
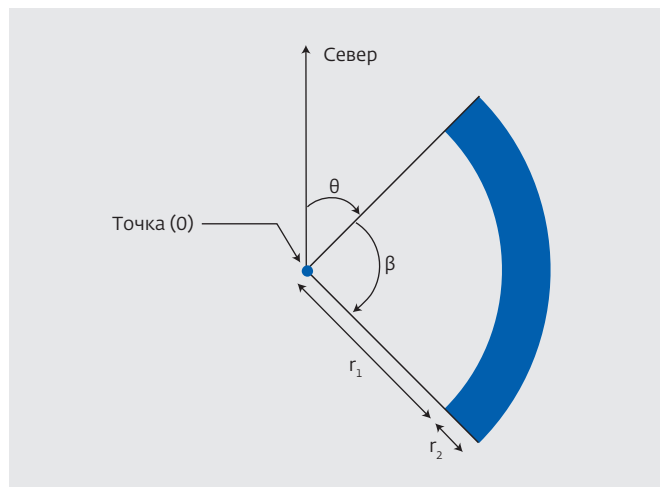


Рис.6. Точка эллипсоида с высотой





**Рис.7.** Точка эллипсоида с высотой и эллипсоидом неопределенности



**Рис.8.** Дуга эллипсоида

от эллипса неопределенности заключается в дополнительной информации о разбросе вероятностных оценок координат, которая характеризуется уже не только на плоскости по величине большой  $r_1$  и малой  $r_2$  полуосей эллипса с его ориентацией  $\alpha$ , но также и вертикальной полуосью  $r_3$  по высоте.

**Точка эллипсоида с высотой и эллипсоидом неопределенности высокой точности**, в отличие от предыдущего случая, характеризуется повышенной точностью параметров широты, долготы, высоты и длин большой  $r_1$ , малой  $r_2$  и вертикальной  $r_3$  полуосей, а также угла ориентации  $\alpha$ ; формат специфицирован в 3GPP TS 29.572 [10].

**Дуга эллипсоида** представлена на рис.8 и характеризуется координатами точки (0) эллипсоида, внутренним радиусом  $r_1$ , радиусом неопределенности  $r_2$ , углом сдвига  $\theta$  между направлением на север и ориентацией сектора дуги эллипсоида, центральным углом сектора дуги  $\beta$ . Угол сдвига  $\theta$  лежит в пределах от  $0^\circ$  до  $359,999^\circ$ ; центральный угол  $\beta$  – от  $0,000...1^\circ$  до  $360^\circ$ . Данный формат может использоваться для оценки МП в секторе соты.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФОРМАТОВ ПЛОЩАДЕЙ 3GPP

Преобразование форматов площадей 3GPP в контексте технологий определения местоположения есть преобразование одного геометрического формата представления оценок координат в другой. Необходимость подобных преобразований определяется следующими обстоятельствами. Во-первых, по требованиям некоторых систем безопасности, например E-911, результаты оценки координат должны быть представлены в формате точки эллипсоида с кругом

неопределенности. Во-вторых, свои требования по формату представления оценок координат могут предъявлять различные службы услуг геолокации. В-третьих, производители оборудования сети радиодоступа (E-UTRAN) и ядра сети (EPC) поддерживают ограниченный набор форматов оценок координат, поэтому для их представления и комплексирования может потребоваться преобразование форматов. Таким образом, корректное функционирование подсистем технологий позиционирования гетерогенной сети LTE должно предусматривать возможность преобразования различных форматов представления оценок координат. Несмотря на гибкость, обеспечиваемую возможностями преобразования форматов, само преобразование может привести к искажению данных позиционирования. В [27] иллюстрирован пример преобразования формата точки эллипсоида с эллипсом неопределенности в точку эллипсоида с окружностью неопределенности [28]. Данное преобразование используется при позиционировании по требованию службы E-911 с использованием метода A-GPS. Ниже представлены исходные данные:

```
% инициализация переменных и параметров
positionFormatDescription=[3 0 400 400 25 15 130 39]
confidenceAfterTransformation=0.95
```

Результат преобразования из [27] представлен ниже:

```
encodedEllipsoidPointWithUncertaintyCircle =
1 0 400 400 32
```

В качестве исходных данных в переменной positionFormatDescription инициализирован 3GPP формат точки эллипсоида с эллипсом неопределенности. Данный формат содержит следующие закодированные параметры в порядке их представления: номер формата (3), знак широты (0), широта (400), долгота (400), большая полуось эллипса неопределенности (25), малая полуось эллипса неопределенности (15), угол поворота эллипса неопределенности (130), доверительная вероятность (39). Для выполнения преобразования из одного формата в другой также инициализируется значение доверительной вероятности после преобразования форматов confidenceAfterTransformation = 0,95. Результат преобразования записывается в переменную encodedEllipsoidPointWithUncertaintyCircle. Данный формат содержит следующие параметры: номер формата (1), знак широты (0), широта (400), долгота (400), точность оценки координат (32). Из приведенного примера следует, что закодированное значение точности оценки координат больше большой и малой полуосей исходного эллипса неопределенности, что объясняется тем фактом, что доверительная вероятность формата представления оценок координат после преобразования выше, чем в исходном формате.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные форматы представления и инструменты преобразования оценок координат в гетерогенных сетях LTE являются стандартизированными спецификациями 3GPP и рекомендуются к использованию для создания аппаратно-программного комплекса системы интеллектуальной навигации на основе сети технологической радиосвязи LTE.

## Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00528). <https://rscf.ru/project/22-29-00528/>

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Фокин Г., Григорьев В., Авдонин И.** Технология сетевого позиционирования LTE. Часть 1. Архитектура // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 4. С. 34-41.
2. **Фокин Г.А.** Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
3. **Тихвинский В.О., Терентьев С.В.** Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS. М.: ЭкоТрендз, 2007. 395 с.
4. **Фокин Г.А.** Технологии сетевого позиционирования. СПб: СПбГУ, 2020. 558 с.
5. **Фокин Г.А.** Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 2. С. 3-9.
6. **Фокин Г.А.** Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13-21.
7. **Фокин Г.А.** Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 12. С. 4-17.
8. PP TS 23.032. Universal Geographical Area Description (GAD). Version 17.2.0. Dec. 2021.
9. PP TS 37.355. LTE Positioning Protocol (LPP). Version V17.0.0 Mar. 2022.
10. PP TS 29.572. 5G System. Location Management Services. Stage 3. Version 17.5.0. Jun. 2022.
11. **Zekavat R., Buehrer R.M.** Handbook of position location: Theory, practice and advances. 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
12. **Lombardi M.A.** First in a series on the evolution of time measurement: celestial, flow, and mechanical clocks [Recalibration] // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2011. Vol. 14. No 4. PP. 45-51.
13. **Lombardi M.A.** The evolution of time measurement, Part 2: quartz clocks [Recalibration] // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2011. Vol. 14. No 5. PP. 41-48.
14. **Lombardi M.A.** The evolution of time measurement, part 3: atomic clocks [Recalibration] // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2021. Vol. 14. No 6. PP. 46-49.
15. **Lombardi M.A.** The evolution of time measurement, Part 4: the atomic second [Recalibration] // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2012. Vol. 15. No 1. PP. 47-51.
16. **Lombardi M.A.** The evolution of time measurement, Part 5: radio controlled clocks [Recalibration] // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2012. Vol. 15. No 2. PP. 49-55.
17. **Lewandowski W., Thomas C.** GPS time transfer // Proceedings of the IEEE. 1991. Vol. 79. No 7. PP. 991-1000.
18. **McCarthy D.D.** Astronomical time // Proceedings of the IEEE. 1991. Vol. 79. No 7. PP. 915-920.
19. **Arias E.F., Guinot B., Quinn T.J.** Rotation of the Earth and Time scales // Proceedings of the ITU-R Special Rapporteur Group Colloquium on the UTC Time Scale. 2003.
20. **Barnes J.A.** The development of an international atomic time scale // Proceedings of the IEEE. 1967. Vol. 55. No 6. PP. 822-826.

21. **Thomas C.** Stability and accuracy of International Atomic Time TAI // Tenth European Frequency and Time Forum EFTF 96 (IEE Conf. Publ. 418). 1996. PP. 520–527.
22. **Clemence G.M.** The Concept of Ephemeris Time // Journal for the History of Astronomy. 1971. Vol. 2. PP. 73–79.
23. Doc 9674 AN/946. Руководство по Всемирной геодезической системе – 1984 (WGS-84). ИКАО. [Электронный ресурс]. URL: <http://ggspb.org/normativnaya-baza/files/rukovodstvo-po-vsemirnoi-geodezicheskoi-sisteme-1984.pdf> (дата обращения 11.10.2022).
24. **Аксенов В.О., Фокин Г.А.** Программный модуль определения местоположения устройств с использованием опорных сигналов позиционирования и разностно-дальномерного метода в сетях мобильного широкополосного беспроводного доступа (МШБД). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617911, 26.04.2022. Правообладатель ООО "Лаборатория инфокоммуникационных сетей". Заявка № 2022616359 от 11.04.2022.
25. **Аксенов В.О., Фокин Г.А.** Программный модуль формирования опорного сигнала позиционирования базовой станцией мобильного широкополосного беспроводного доступа (МШБД). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617913, 26.04.2022. Правообладатель ООО "Лаборатория инфокоммуникационных сетей". Заявка № 2022616361 от 11.04.2022.
26. International Earth Rotation and Reference Systems Service [Электронный ресурс]. URL: [https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home\\_node.html](https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html) (дата обращения 11.10.2022).
27. **Аксенов В.О., Фокин Г.А.** Программный модуль комплекса функций представления и преобразования форматов оценок координат при позиционировании в сетях мобильного широкополосного доступа (МШБД). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617912, 26.04.2022. Правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Лаборатория инфокоммуникационных сетей". Заявка № 2022616360 от 11.04.2022.
28. **Wigren T., Anderson M., Kangas A.** Emergency Call Delivery Standards Impair Cellular Positioning Accuracy // 2010 IEEE International Conference on Communications. PP. 1–6.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Белоус А.И., Солодуха В.А.

## ОСНОВЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ. СТАНДАРТЫ, КОНЦЕПЦИИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 482 с.,  
ISBN 978-5-94836-612-8

Цена 1600 руб.

Эта книга фактически представляет собой научно-практическую энциклопедию по современной кибербезопасности. Здесь анализируются предпосылки, история, методы и особенности киберпреступности, кибертерроризма, киберразведки и киберконтрразведки, этапы развития кибероружия, теория и практика его применения, технологическая платформа кибероружия (вирусы, программные и аппаратные трояны), методы защиты (антивирусные программы, проактивная антивирусная защита, кибериммунные операционные системы). Впервые в мировой научно-технической литературе приведены результаты системного авторского анализа всех известных уязвимостей в современных системах киберзащиты — в программном обеспечении, криптографических алгоритмах, криптографическом оборудовании, в микросхемах, мобильных телефонах, в бортовом электронном оборудовании автомобилей, самолетов и даже дронов. Здесь также представлены основные концепции, национальные стандарты и методы обеспечения кибербезопасности критических инфраструктур США, Англии, Нидерландов, Канады, а также основные международные стандарты. Фактически в объеме одной книги содержатся материалы трех разных книг, ориентированных как на начинающих пользователей и специалистов среднего уровня, так и специалистов по кибербезопасности высокой компетенции, которые тоже найдут здесь для себя много полезной информации.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru); [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ



**МФЭС**

# 2022

**22 - 25 ноября**

Москва, ВДНХ, павильоны № 55, 57

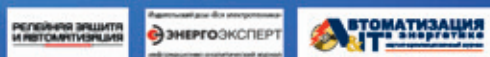
Международный форум «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» (МФЭС) – одно из самых масштабных отраслевых событий в электроэнергетике, направленное на объединение профессионального сообщества для обсуждения и решения приоритетных задач электросетевого комплекса с целью повышения его надежности и эффективности

К участию в деловой программе и демонстрации новейших разработок в выставочной зоне делового общения приглашаются научные, проектные, строительные, эксплуатационные организации электросетевого комплекса России и других стран, производители электротехнического оборудования, элементов ЛЭП, разработчики и производители средств автоматизации, связи, диагностики оборудования и ЛЭП, учета электроэнергии, разработчики и производители программного обеспечения, образовательные учреждения и отраслевые СМИ

## Задачи Форума

- ◆ Объединить усилия лидеров отрасли по развитию электросетевого комплекса, повышению его надежности и эффективности
- ◆ Определение ключевых направлений импортозамещения
- ◆ Перспективное взаимодействие по осуществлению оптимизации и автоматизации бизнес-процессов, а так же согласованной работы IT-систем
- ◆ Разработка стандартных пакетных решений по «интеллектуализации» и информативности отрасли

## Генеральные информационные партнеры:



## Информационная поддержка Форума:



Организатор:  
АО «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»



Телефон: +7 (495) 640-20-80  
E-mail: exhibit@twest.ru