

Определение местоположения мобильного объекта в системе сотовой связи в условиях многолучевого распространения сигналов

В.Т.Ермолаев^(1,2), А.Г.Флакман^(1,2), Д.Д.Н.Беван⁽³⁾, И.М.Аверин⁽²⁾

⁽¹⁾ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

⁽²⁾ Научно-техническая фирма Мера, г. Нижний Новгород, Россия

⁽³⁾ Nortel Networks, Harlow Laboratories, Harlow, United Kingdom

Рассматривается проблема определения местоположения мобильного объекта (пользователя) в системе сотовой связи на основе метода триангуляции и гауссовской модели многолучевого канала для городских условий распространения сигналов. Найдена функция плотности вероятности максимально правдоподобной оценки декартовых координат пользователя при использовании двух или трех произвольно расположенных относительно друг друга БС. Показано, что ошибка оценки местоположения пользователя зависит от расстояния между БС, взаимного расположения пользователя и БС, а также от дисперсии ошибки оценки пеленга пользователя на каждой из БС. При этом использование третьей БС обеспечивает значительное увеличение точности оценки координат пользователя.

Введение.

В последние годы растет интерес к проблеме определения местоположения мобильного объекта (пользователя), обслуживаемого системой сотовой связи. Это вызвано появлением новых видов услуг, требующих знания местоположения пользователя (например, целевая пересылка различной информации), а также требованиями со стороны специальных служб (полиции, службы спасения и т.д.) [1-3]. Так, для целевой пересылки информации (пробки на дорогах, реклама и т.п.), достаточно знать в какой соте находится пользователь, что в городских условиях соответствует точности оценки его координат от 200 м до 2,5 км. С другой стороны, для экстренных ситуаций местоположение пользователя должно быть определено с точностью не хуже 100 м при 67% вероятности [4].

Для определения местоположения пользователя применяются различные методы, которые целесообразно разделить на две основные группы. К первой из них относятся методы, основанные на использовании глобальной системы навигации и определения местоположения (GPS - Global Positioning System). Система GPS позволяет получить высокую точность оценки местоположения. Однако ее применение приводит к тому, что пользователь должен иметь дополнительное оборудование (GPS-приемник). Кроме того, достаточная точность достигается при использовании сигналов как минимум от трех спутников, что не всегда возможно в городских условиях из-за эффекта затенения.

Ко второй группе относятся методы, использующие оборудование базовых станций (БС) системы сотовой связи, а также данные о пользователе, которые могут быть получены одной или несколькими БС. Основное преимущество таких методов состоит в том, что не требуются какие-либо изменения и дополнения в оборудовании БС и пользователей. Определение местоположения пользователя может быть основано на измерении времени прихода или угла прихода сигналов на БС. Так как в перспектив-

ных системах связи планируется применение антенных решеток на БС, то наибольшее внимание привлекают методы, основанные на измерении угла прихода сигналов [5-10]. Угол прихода сигнала на БС определяет направление на пользователя (линию пеленга), а его местоположение на плоскости однозначно определяется пересечением двух линий пеленга. Исключением является случай расположения пользователя на линии, соединяющей две БС, когда необходимо привлечь третью БС.

В системах сотовой связи сигналы пользователя чаще всего принимаются одновременно двумя или тремя БС и редко четырьмя и более БС (с вероятностью менее 30% [12]). Точность пеленгации пользователя зависит от размеров антенн БС, отношения сигнал/шум и положения пользователя относительно БС. Однако имеются дополнительные факторы, увеличивающие ошибку пеленгации, и обусловленные особенностями распространения сигналов. Как правило, антенны БС расположены на высоких зданиях, а антенна пользователя – вблизи земной поверхности. Поэтому, канал распространения в городских условиях характеризуется большим числом рассеивателей, окружающих пользователя, что приводит к угловой дисперсии сигнала, наблюдаемого на БС. Другими словами, каждая из БС «видит» пользователя в некотором угловом секторе, размер которого является случайным из-за случайного числа рассеивателей и их случайного положения в пространстве. Более того, каждая отдельная реализация имеет конечное число рассеивателей. Поэтому от реализации к реализации будет наблюдаться «блуждание» центра излучения [8, 9], что ведет к ошибке пеленгации. В результате три линии пеленга, соответствующие измеренным значениям углов с помощью трех БС, в общем случае будут иметь не одну, а три точки пересечения, то есть будут образовывать некоторый пеленгационный треугольник.

В [8] предложена пространственная гауссовская модель многолучевого канала связи для городских условий, которая предполагает распределение рассеивателей вокруг пользователя по гауссовскому закону. Найдена функция плотности вероятности углов прихода рассеянных сигналов, принимаемых БС, при произвольном угловом расширении источника и оценены флуктуации его эффективного центра излучения из-за случайного числа отражателей в каждой отдельной реализации рассеивателей. Показано, что данная модель дает хорошее согласование с известными экспериментальными результатами [13].

Целью данной работы является изучение статистических характеристик определения местоположения пользователя в системе сотовой связи методом триангуляции на основе гауссовской модели многолучевого канала связи. В первом разделе рассматривается оценка местоположения пользователя при условии, что угол прихода сигнала измерен на двух БС. Получено выражение для функции плотности вероятности местоположения пользователя. Значения аргументов, максимизирующих эту функцию, соответствуют максимально правдоподобной оценке местоположения пользователя. Во втором разделе рассматривается обобщение на случай использования трех произвольно расположенных относительно друг друга БС. Наконец, в третьем разделе приводятся результаты моделирования для системы связи с гексагональной (шестиугольной) структурой сот.

1. Случай двух базовых станций.

Предположим, что для определения местоположения пользователя используются две БС, расположенные на произвольном расстоянии d друг относительно друга. Каждая БС определяет азимутальный угол (пеленг) пользователя. Оценка этого угла - случайная величина, которая подчиняется гауссовской функции плотности вероятности

и является несмещенной, то есть математическое ожидание соответствует истинному азимуту, а дисперсия зависит от отношения сигнал/шум и от угловой протяженности источника [8, 9].

Пусть первая БС (БС₁) располагается в центре декартовой системы координат (x, y) , а вторая (БС₂) - имеет координаты $(d, 0)$. Местоположение пользователя зададим координатами (x_0, y_0) или углами $(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2)$. Обозначим через φ_1 и φ_2 оценки азимута пользователя, полученные с помощью первой и второй БС, соответственно. На рис. 1 даны необходимые геометрические пояснения.

Найдем совместную функцию $P(\varphi_1, \varphi_2)$ плотности вероятности местоположения пользователя. Очевидно, что оценки углов φ_1 и φ_2 , получаемые каждой из БС, являются независимыми случайными величинами. Поэтому функция $P(\varphi_1, \varphi_2)$ может быть записана в виде произведения $P(\varphi_1, \varphi_2) = P(\varphi_1)P(\varphi_2)$, где $P(\varphi_1)$ и $P(\varphi_2)$ - одномерные функции плотности вероятности углов φ_1 и φ_2 , которые можно представить в виде [8, 9]

$$P(\varphi_{1(2)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1(2)}} \exp\left[-\frac{(\varphi_{1(2)} - \bar{\varphi}_{1(2)})^2}{2\sigma_{1(2)}^2}\right] \quad (1)$$

где $\bar{\varphi}_1, \sigma_1; \bar{\varphi}_2, \sigma_2$ - средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) оценок углов пользователя на БС₁ и БС₂, соответственно.

Таким образом, совместная функция $P(\varphi_1, \varphi_2)$ плотности вероятности равна

$$P(\varphi_1, \varphi_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left[-\frac{(\varphi_1 - \bar{\varphi}_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(\varphi_2 - \bar{\varphi}_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (2)$$

Выражение (2) определяет двумерную функцию распределения случайных величин φ_1 и φ_2 при заданных параметрах $\bar{\varphi}_1, \sigma_1; \bar{\varphi}_2, \sigma_2$. В тоже время, для двух измеренных углов φ_1 и φ_2 формула (2) определяет функцию правдоподобия по отношению к параметрам $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2$. Значения $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2$, обеспечивающие максимум функции (2), являются максимально правдоподобной оценкой угловых координат пользователя.

Нетрудно найти из (2), что $\hat{\varphi}_1 = \varphi_1, \hat{\varphi}_2 = \varphi_2$. Таким образом, измеренные углы φ_1 и φ_2 являются максимально правдоподобной оценкой угловых координат пользователя.

При определении местоположения пользователя удобнее пользоваться декартовыми координатами (x, y) . Из геометрических построений (рис. 1) можно получить, что

$$x = \frac{d \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1}, \quad y = \frac{d \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1}. \quad (3)$$

Тогда для максимально правдоподобной оценки декартовых координат пользователя будем иметь:

$$\hat{x} = \frac{d \operatorname{tg} \hat{\varphi}_2}{\operatorname{tg} \hat{\varphi}_2 - \operatorname{tg} \hat{\varphi}_1}, \quad \hat{y} = \frac{d \operatorname{tg} \hat{\varphi}_1 \operatorname{tg} \hat{\varphi}_2}{\operatorname{tg} \hat{\varphi}_2 - \operatorname{tg} \hat{\varphi}_1}. \quad (4)$$

Искомая функция $P(x, y)$ плотности вероятности координат пользователя равна

$$P(x, y) = P[\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)] \cdot J(x, y), \quad (5)$$

где $J(x, y)$ – якобиан перехода от координат (φ_1, φ_2) к координатам (x, y) . Нетрудно получить, что

$$\varphi_1(x, y) = \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \quad \varphi_2(x, y) = \arctg\left(\frac{y}{x-d}\right), \quad (6)$$

а якобиан перехода равен

$$J = \left| \frac{\partial(\varphi_1, \varphi_2)}{\partial(x, y)} \right| = \left| \frac{\partial\varphi_1}{\partial x} \frac{\partial\varphi_2}{\partial y} - \frac{\partial\varphi_2}{\partial x} \frac{\partial\varphi_1}{\partial y} \right| = \frac{yd}{(x^2 + y^2)[y^2 + (x-d)^2]}. \quad (7)$$

Перейдем к относительным координатам (x', y') , нормированным на расстояние d между БС: $x' = x/d$, $y' = y/d$. Принимая во внимание (2), (6), (7) из (5) найдем, что

$$P(x', y') = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left\{-\left[\arctg\left(\frac{y'}{x'}\right) - \bar{\varphi}_1\right]^2 (2\sigma_1^2)^{-1}\right\} \times \\ \times \exp\left\{-\left[\arctg\left(\frac{y'}{x'-1}\right) - \bar{\varphi}_2\right]^2 (2\sigma_2^2)^{-1}\right\} \frac{y'}{(x'^2 + y'^2)[y'^2 + (x'-1)^2]}. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет двумерную плотность вероятности $P(x', y')$ декартовых координат пользователя для случая, когда оценка угла пеленга проводится на двух БС. На рис. 2 показан вид этой функции при $\bar{\varphi}_1 = 45^\circ$, $\sigma_1 = 5^\circ$; $\bar{\varphi}_2 = 135^\circ$, $\sigma_2 = 5^\circ$, что соответствует точке $x'_0 = 0,5$, $y'_0 = 0,5$. На рис. 3 приведены контуры равного уровня вероятности, получающиеся при сечении функции плотности вероятности $P(x', y')$ горизонтальной плоскостью. Показанные группы контуров соответствуют трем положениям пользователя с координатами: $x'_0 = 0,174$; $y'_0 = 0,477$ ($\bar{\varphi}_1 = 15^\circ$, $\bar{\varphi}_2 = 170^\circ$), $x'_0 = 0,5$; $y'_0 = 0,5$ ($\bar{\varphi}_1 = 45^\circ$, $\bar{\varphi}_2 = 135^\circ$) и $x'_0 = 0,94$; $y'_0 = 0,342$ ($\bar{\varphi}_1 = 40^\circ$, $\bar{\varphi}_2 = 100^\circ$), точки 1,2,3, соответственно. СКО оценки угла прихода для всех трех случаев задавались равными $\sigma_1 = \sigma_2 = 5^\circ$.

Форма контуров равной вероятности является достаточно сложной и зависит от взаимного расположения пользователя и двух БС. Поэтому более удобно перейти к окружностям с центром в точке истинного положения пользователя (x'_0, y'_0) и определить ошибку определения местоположения пользователя как $r = \sqrt{(\hat{x}' - x'_0)^2 + (\hat{y}' - y'_0)^2}$. Тогда вероятность того, что точка со случайными координатами x и y попадает в окружность $S(r)$ радиуса r равна

$$P(r) = \iint_{S(r)} P(x', y') dx' dy'. \quad (9)$$

Функция $P(r)$ имеет смысл интегральной функции распределения ошибки определения местоположения пользователя в нормированных координатах (x', y') . Вероятность того, что ошибка определения местоположения пользователя не превышает расстояния r , равна вероятности нахождения пользователя в пределах окружности радиуса r с центром в точке (x'_0, y'_0) . Очевидно, что чем меньше значение r при заданном значении функции $P(r)$, тем точнее оценка. Отметим, что получить функцию $P(r)$ в явном виде не представляется возможным из-за сложного вида функции $P(x', y')$ в (8).

2. Случай трех базовых станций.

Предположим теперь, что для определения местоположения пользователя используются три произвольно расположенные БС. Выберем начало системы координат в точке расположения первой БС (БС₁) и будем считать, что вторая БС (БС₂) расположена на оси x . Пусть d_1, d_2, d_3 – расстояние между БС, а пользователь находится в точке с координатами (x_0, y_0) , которая определяется углами $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3$. Взаимное расположение пользователя и БС поясняется на рис. 4а.

Обозначим φ_1, φ_2 и φ_3 - оценки пеленга пользователя, полученные с помощью БС₁, БС₂ и БС₃, соответственно. Как и в случае двух БС, случайные величины φ_1, φ_2 и φ_3 являются независимыми и имеют гауссовскую функцию плотности вероятности. Поэтому совместную функцию плотности вероятности $P(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ можно представить в виде произведения

$$P(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = P(\varphi_1)P(\varphi_2)P(\varphi_3). \quad (10)$$

Здесь $P(\varphi_1)$, $P(\varphi_2)$ и $P(\varphi_3)$ - одномерные функции плотности вероятности оценок углов пеленга на БС₁, БС₂ и БС₃, соответственно, равные

$$P(\varphi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(\varphi_i - \bar{\varphi}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (i=1,2,3), \quad (11)$$

где $\bar{\varphi}_1, \sigma_1; \bar{\varphi}_2, \sigma_2; \bar{\varphi}_3, \sigma_3$ - средние значения и СКО оценок углов пользователя на соответствующей БС. Средние значения совпадают с истинными значениями этих углов, так как оценки является несмещенными.

Таким образом, можно записать, что

$$P(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi}\sigma_1\sigma_2\sigma_3} \exp\left[-\frac{(\varphi_1 - \bar{\varphi}_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(\varphi_2 - \bar{\varphi}_2)^2}{2\sigma_2^2} - \frac{(\varphi_3 - \bar{\varphi}_3)^2}{2\sigma_3^2}\right] \quad (12)$$

Для трех измеренных значений углов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ формула (12) определяет функцию правдоподобия по отношению к параметрам $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3$.

Если бы ошибки измерения отсутствовали, то все три линии пеленга, соответствующие трем измеренным углам $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, пересекались бы в одной точке – в точке расположения пользователя. При наличии ошибок измерения эти три пеленга, в общем случае, имеют три точки пересечения, то есть образуют некоторый пеленгационный треугольник (треугольник abc на рис. 4б). Значения параметров $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\varphi}_3$, максимизирующих функцию (12), являются максимально правдоподобной оценкой угловых координат пользователя при использовании трех БС.

Точка экстремума функции (12) совпадает с точкой экстремума её логарифма. Опуская несущественный множитель, получим, что максимально правдоподобная оценка угловых координат пользователя определяется из условия минимума функции

$$V(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3) = \frac{(\varphi_1 - \bar{\varphi}_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(\varphi_2 - \bar{\varphi}_2)^2}{2\sigma_2^2} + \frac{(\varphi_3 - \bar{\varphi}_3)^2}{2\sigma_3^2} \quad (13)$$

Однако нельзя найти экстремум функции (13), приравняв к нулю её частные производные. В самом деле, линии пеленга, соответствующие углам $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\varphi}_3$ должны пересекаться в одной точке (точка, помеченная звездочкой на рис. 4б). Следовательно, данные переменные являются зависимыми, и каждая из них может быть выражена через две другие.

Для поиска экстремума функции (13) можно использовать метод множителей Лагранжа [11], в соответствии с которым следует составить функцию Лагранжа, равную

$$\Phi(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3) = V(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3) + \lambda f(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3), \quad (14)$$

где $f(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3)$ - функция связи переменных $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3$, λ - неопределенный множитель Лагранжа. Искомые оценки $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\varphi}_3$ будут находиться из решения следующей системы 4-х нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3)}{\partial \bar{\varphi}_i} = 0, & (i=1,2,3) \\ \frac{\partial \Phi(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3)}{\partial \lambda} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Найдем функцию связи переменных $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3$. Выразим угол $\bar{\varphi}_3$ через углы $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2$. В результате из геометрических построений (рис. 4б) можно получить, что

$$\operatorname{tg} \bar{\varphi}_3 = \frac{\frac{\operatorname{tg} \bar{\varphi}_1 \operatorname{tg} \bar{\varphi}_2}{\operatorname{tg} \bar{\varphi}_2 - \operatorname{tg} \bar{\varphi}_1} - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{13} \operatorname{tg} \varphi_{23}}{\operatorname{tg} \varphi_{23} - \operatorname{tg} \varphi_{13}}}{\frac{\operatorname{tg} \bar{\varphi}_2}{\operatorname{tg} \bar{\varphi}_2 - \operatorname{tg} \bar{\varphi}_1} - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{23}}{\operatorname{tg} \varphi_{23} - \operatorname{tg} \varphi_{13}}}, \quad (16)$$

где $\varphi_{13}, \varphi_{23}$ - угловые направления на третью БС со стороны первой и второй БС, соответственно.

Максимально правдоподобную оценку декартовых координат пользователя (\hat{x}, \hat{y}) можно определить, находя минимум функции $V(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3)$ в (13), которую теперь следует записать в виде

$$V(x, y) = \frac{(\varphi_1 - \bar{\varphi}_1(x, y))^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(\varphi_2 - \bar{\varphi}_2(x, y))^2}{2\sigma_2^2} + \frac{(\varphi_3 - \bar{\varphi}_3(x, y))^2}{2\sigma_3^2}. \quad (17)$$

Здесь функции $\bar{\varphi}_1(x, y)$ и $\bar{\varphi}_2(x, y)$ определены в (6) и (7), а функция $\bar{\varphi}_3(x, y)$ равна

$$\bar{\varphi}_3(x, y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{y - y_3}{x - x_3} \right), \quad (18)$$

где x_3, y_3 - координаты третьей БС.

Найти аналитическое решение для максимально правдоподобной оценки координат пользователя из-за достаточно сложного вида функции связи (16) не представляется возможным. Поэтому будем искать экстремум в (17) с помощью численных методов.

3. Результаты моделирования для системы с гексагональной структурой сот.

Из результатов, полученных в предыдущих разделах, следует, что точность оценки местоположения пользователя зависит от взаимного расположения пользователя и БС, а также от дисперсии оценки пеленга пользователя на каждой БС.

Рассмотрим систему сотовой связи с гексагональной структурой сот (рис. 5), которая состоит из пяти БС: основной БС с номером 1 ($БС_1$) и четырех вспомогательных БС ($БС_2 \div БС_5$). Предположим, что положение пользователя является случайным и равновероятным в любой точке центральной соты, выделенной на рис. 5 серым цветом. Вследствие гексагональной структуры расстояние между соседними БС одинаково и равно d . Тогда в относительных координатах x' , y' расстояние между соседними БС равно единице, а сторона шестиугольника (размер соты) равна $1/3$.

Пусть сигнал, переданный пользователем, принимается основной БС и одной (или двумя) вспомогательными БС, что соответствует оценке местоположения пользователя с помощью двух (или трех) БС. Учтем, что две пары БС ($БС_1 \leftrightarrow БС_2$ и $БС_1 \leftrightarrow БС_4$) являются симметричными относительно центральной соты и одну из них можно исключить. Поэтому из всех возможных комбинаций будем рассматривать три пары БС ($БС_1 \leftrightarrow БС_2$, $БС_1 \leftrightarrow БС_3$, $БС_1 \leftrightarrow БС_5$). Рассуждая аналогично, выберем три тройки БС ($БС_1 \leftrightarrow БС_2 \leftrightarrow БС_3$, $БС_1 \leftrightarrow БС_2 \leftrightarrow БС_4$ и $БС_1 \leftrightarrow БС_4 \leftrightarrow БС_5$).

На рис. 6 приведены результаты моделирования, характеризующие точность оценки местоположения мобильного объекта с помощью двух БС. Моделировалось 10000 положений пользователя, равновероятно распределенных внутри центральной соты. Для каждого из них оценивались декартовы координаты пользователя с помощью трех пар БС ($БС_1 \leftrightarrow БС_2$, $БС_1 \leftrightarrow БС_3$, $БС_1 \leftrightarrow БС_5$). Затем вычислялся радиус r окружности в относительных координатах x' , y' , в пределах которой пользователь находится с вероятностью 90% (рис. 6а) или 67% (рис. 6б), в зависимости от СКО оценки пеленга, которая задавалась одинаковой для всех БС. Видно, что наилучшая точность определения местоположения пользователя обеспечивается парой $БС_1 \leftrightarrow БС_2$. Использование пар $БС_1 \leftrightarrow БС_3$, $БС_1 \leftrightarrow БС_5$ приводит к худшей точности, так как при выборе пары $БС_1 \leftrightarrow БС_3$ имеется наибольшее количество положений пользователя вблизи линии, соединяющей эти БС, а для пары $БС_1 \leftrightarrow БС_5$ одна из БС ($БС_5$) удалена от центральной соты. Характерное расстояние между БС составляет ~ 1000 м. При этом из рис. 6 следует, что если СКО оценки пеленга равна 6° , то точность оценки местоположения пользователя будет составлять ≈ 210 м с вероятностью 90% и ≈ 130 м с вероятностью 67%. Такая погрешность не удовлетворяет существующим требованиям [4].

Аналогичные результаты при использовании трех БС приведены на рис. 7. Координаты пользователя оценивались с помощью трех комбинаций БС ($БС_1 \leftrightarrow БС_2 \leftrightarrow БС_3$, $БС_1 \leftrightarrow БС_2 \leftrightarrow БС_4$, $БС_1 \leftrightarrow БС_4 \leftrightarrow БС_5$). На рисунках показана зависимость радиуса окружности для вероятности 90% (рис. 7а) или 67% (рис. 7б) от СКО оценки пеленга на каждой из БС. Видно, что любая из троек БС обеспечивает примерно одинаковую точность определения местоположения пользователя. При СКО оценки пеленга равной 6° , точность оценки местоположения пользователя будет составлять ≈ 150 м с вероятностью 90% и ≈ 90 м с вероятностью 67%.

Из сравнения результатов на рис. 6 и 7 следует, что использование третьей БС значительно уменьшает погрешность оценки координат пользователя (на $\approx 40\%$) и дает возможность удовлетворить требованиям [4] по точности определения координат пользователя. Представляют также интерес плотность вероятности (9) ошибки оценки местоположения пользователя для различных значений СКО оценки пеленга. Такие кривые изображены на рис. 8 для СКО равных 2° , 4° , 7° и 10° (кривые 1,2,3,4, соответственно) для наилучшей тройки БС ($БС_1 \leftrightarrow БС_2 \leftrightarrow БС_3$).

4 Заключение.

В настоящей работе исследованы статистические характеристики определения местоположения мобильного объекта (пользователя) в системе сотовой связи на основе метода триангуляции и гауссовской модели многолучевого канала для городских условий распространения сигналов. Найдена функция плотности вероятности для декартовых координат пользователя при оценке его пеленга с помощью двух или трех произвольно расположенных относительно друг друга БС. На основе этой функции получена максимально правдоподобная оценка координат пользователя.

Показано, что ошибка оценки местоположения пользователя зависит от расстояния между БС, взаимного расположения пользователя и БС, а также от дисперсии ошибки оценки пеленга пользователя на каждой из БС. Приведенные результаты моделирования для системы связи с гексагональной (шестиугольной) структурой сот, показывают, что использование дополнительной (третьей) БС увеличивает точность оценки координат в среднем на $\approx 40\%$. Полученные результаты показывают, что достижимая точность оценки местоположения пользователя удовлетворяет существующим требованиям.

Литература.

1. J.M. Zagami, S.A. Parl, J.J. Bussgang, and K.D. Melillo // IEEE Commun. Mag. 1998. V. 36. P. 66.
2. T.S. Rappaport, J.H. Reed, and B.D. Woerner // IEEE Commun. Mag. 1996. V. 34. P. 33.
3. A. Giordano, M. Chan, and H. Habal // Proc. IEEE PIMRC. 1995. V. 2. P. 853.
4. FCC Docket no. 94-102, "Revision of the Commissions Rules to Insure Compatibility With Enhanced 911 Emergency Calling Systems" // Tech. Rep. RM-8143, July 1996.
5. Справочник по радиолокации. Под ред. М Скольника. Том I. М.: Советское радио, 1976. 456 с.
6. O. Besson, F. Vincent, P. Stoica, and A. B. Gershman // IEEE Trans. Signal Processing. 2000. V. 48, No. 9. P. 2506.
7. S. Valaee, B. Champagne, and P. Kabal // IEEE Trans. Signal Processing. 1995. V. 43, No. 9. P. 2144.
8. D.D.N. Bevan, V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, I.M. Averin // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2004. No. 9. P. 1321.
9. D.D.N. Bevan, V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, I.M. Averin and P.M. Grant // Proc. 13-th European Signal Processing Conference, Turkey, Antalya, 2005.
10. K. Kuboi, S. Shirota, S. Sakagami, S. Aoyama, and A. Akeyama // IEEE Trans. Veh. Technol. 1992. V. 41. P. 63.
11. Воеводин В.В. Линейная алгебра. М.: Наука, 1980. 400 с.
12. Holma H., Toskala A. WCDMA FOR UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications.- John Wiley & Sons, 2004.- 481 p.
13. Pedersen K.I., Mogensen P.E., Fleury B.H. // IEEE Transaction on Vehicular Technology. 2000. V. 49, No. 2. P. 437.

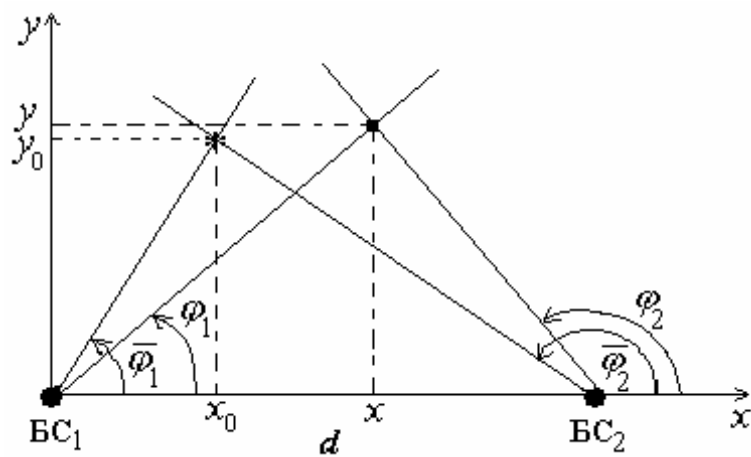


Рис. 1.

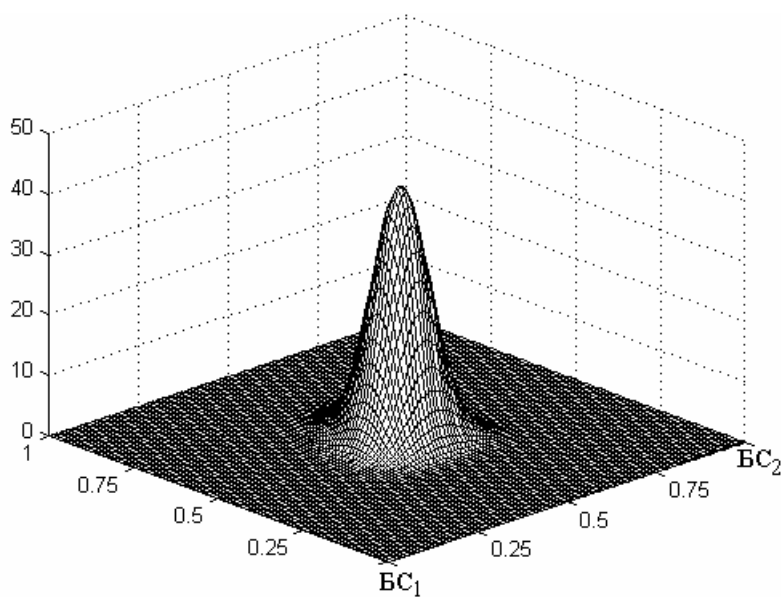


Рис. 2. Совместная плотность вероятности декартовых координат пользователя.

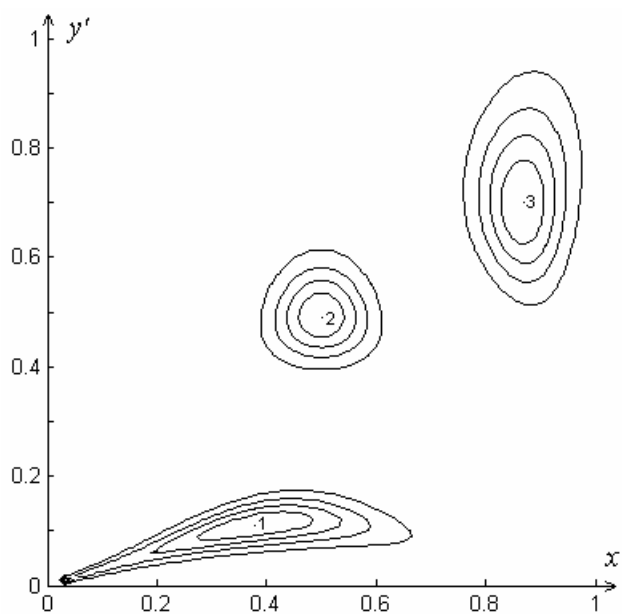


Рис. 3. Контуры равной вероятности

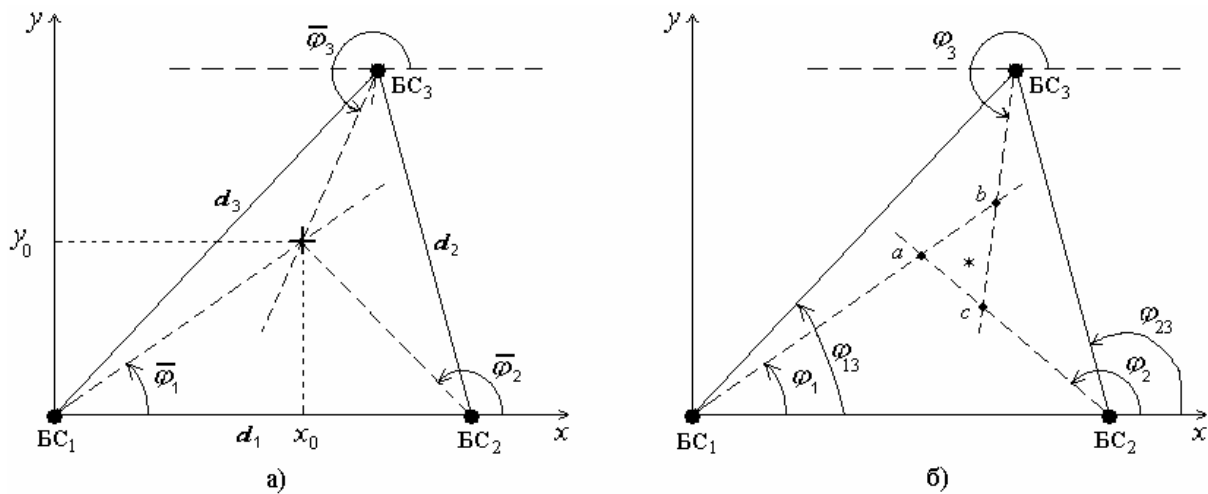


Рис. 4.

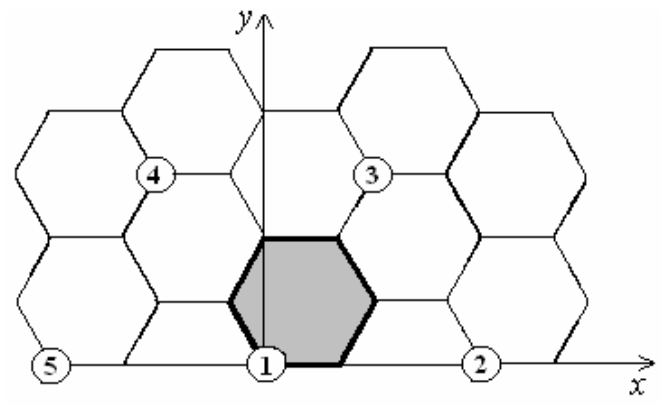


Рис. 5 Гексагональная структура системы сотовой связи

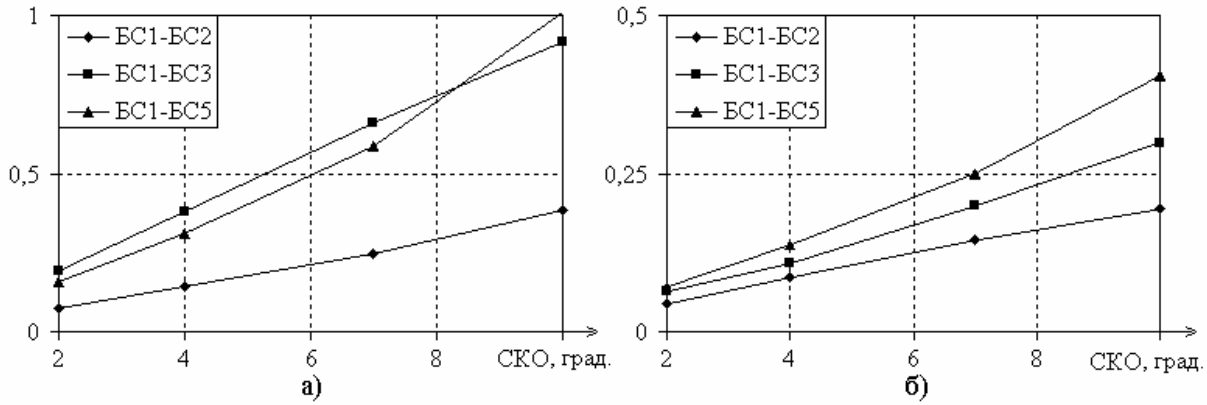


Рис. 6.

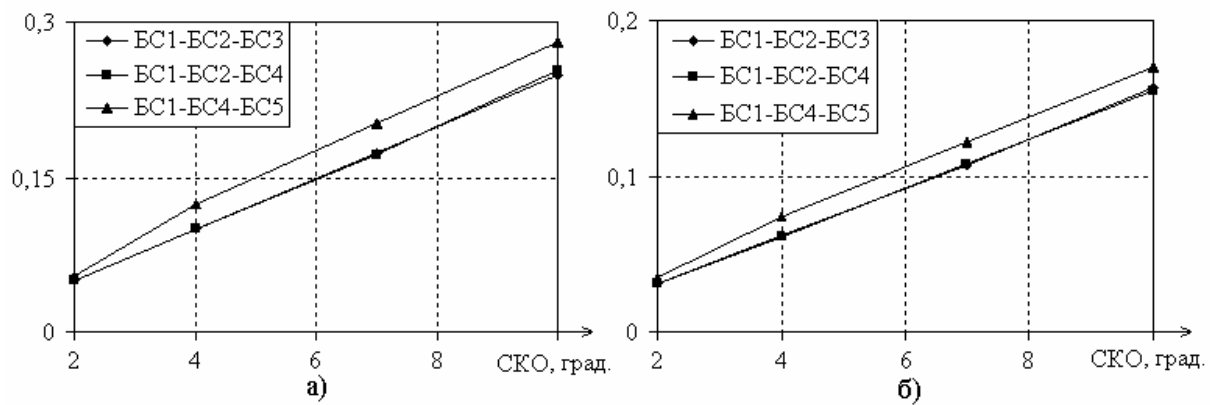


Рис. 7.

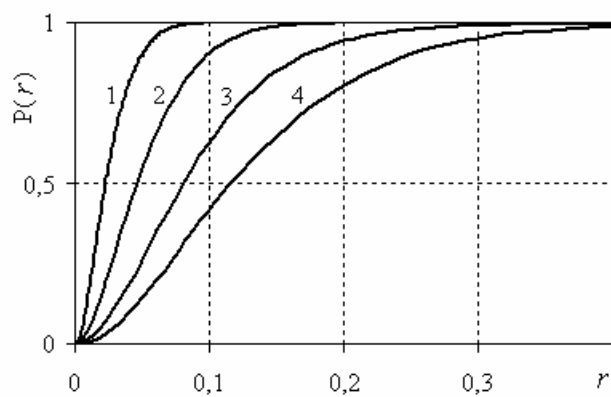


Рис. 8.