

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СИГНАЛА В ЗАДАЧАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

А. В. Киреев^{1*}, Г. А. Фокин¹

¹ СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

* Адрес для переписки: kireyev@list.ru

Аннотация

Позиционирование объектов в мобильных сетях является важной прикладной задачей, выгодной как в коммерческом, так и в практическом смысле. Сценарии использования этой технологии постоянно расширяются и видоизменяются. Задача позиционирования в мобильных сетях связи решается множеством методов, в статье будут рассмотрены алгоритмы измерения времени прихода сигналов. **Предмет исследования.** Статья посвящена анализу методов позиционирования в мобильных сетях, а также зависимости точности позиционирования от числа источников без прямой видимости. **Метод.** Рассмотрены основные математические зависимости работы методов. Проведено моделирование процессов распространения сигналов в мобильных сетях, позволившее сравнить отношение сигнал-шум при различном количестве базовых станций. **Основные результаты.** Проведено сравнение ряда популярных алгоритмов позиционирования посредством измерения времени прихода сигналов, выявлена зависимость точности позиционирования от числа базовых станций без прямой видимости, сделаны необходимые выводы. Результаты статистически подтверждены границей Крамера-Рао. **Практическая значимость.** Разработанное программное обеспечение позволяет анализировать и моделировать различные структуры мобильной сети и позиционирования объектов.

Ключевые слова

имитационное моделирование, время прихода сигнала, метод наименьших квадратов.

Информация о статье

УДК 621.396

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 11.10.17, принята к печати 01.12.17.

Ссылка для цитирования: Киреев А. В., Фокин Г. А. Измерение времени прихода сигнала в задачах позиционирования в мобильных сетях при отсутствии прямой видимости // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 4. С. 36–41.

MEASUREMENT OF THE SIGNAL TIME IN POSITIONING OBJECTS IN MOBILE NETWORKS WITH NON-LINE-OF-SIGHT

A. Kireev^{1*}, G. Fokin¹

¹ SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

* Corresponding author: kireyev@list.ru

Abstract—Positioning of objects in mobile networks is an important task, beneficial both in commercial and in practical sense. Scenarios for this technology are constantly expanding. The task of positioning in mobile communication networks is solved by a variety of methods, the article considers algorithms for measuring the arrival time of signals. **Research subject.** The article is devoted to the analysis of positioning methods in mobile networks, as well as the dependence of positioning accuracy on the number of sources with non-line-of-sight. **Method.** The main mathematical dependencies of the methods work are considered, Modelling of signal propagation processes in mobile networks, which allowed to compare the signal-to-noise ratio with different number of base stations is carried out. **Core results.** Comparison of a number of popular positioning algorithms by measuring the arrival time of signals is made, the dependence of the positioning accuracy on the number of base stations without line-of-sight is revealed, the necessary conclusions are drawn. The results are statistically confirmed by the Cramer-Rao bound. **Practical relevance.** Developed software allows analyzing and simulating various mobile network structures and positioning of objects.

Keywords—Simulation time, arrival time, least squares method.

Article info

Article in Russian.

Received 11.10.17, accepted 01.12.17.

For citation: Kireev A., Fokin G.: Measurement of the signal time in positioning objects in mobile networks with non-line-of-sight // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 4. pp. 36–41 (in Russian).

Позиционирование абонентов в мобильных сетях является коммерчески выгодной задачей для различных прикладных задач, как, например, мониторинг движения транспортных средств, грузов и других геоинформационных услуг. Возможные сценарии использования технологий локализации постоянно расширяются [1]. В настоящей работе представлен анализ точности алгоритма позиционирования, основанного на времени прихода сигнала, в зависимости от наличия/отсутствия прямой видимости. Корректность полученных зависимостей подтверждена границей Крамера-Рао.

Существует множество методик для локализации абонента посредством измерения времени прихода сигнала. Первый алгоритм – LS (*Least squares*) МНК (метод наименьших квадратов), базирующийся на рядах Тейлора первого порядка, является итеративным численным методом и требует начального приближения. Второй алгоритм WLS (*Weight least squares*) – линейный МНК с дополнительной оценкой параметров (весовыми коэффициентами) обладает аналитическим решением. Третий рассматриваемый алгоритм ML (*Maximum*

likelihood) – метод максимального правдоподобия тоже требует начального приближения и не имеет аналитического решения. Далее будет приведено аналитическое обоснование метода МНК.

Допустим, что абонентская станция (АС) передает радиосигнал к базовой станции (БС). Координаты БС известны и определяются вектором p :

$$p_b = [x_b \ y_b]^T, b \in \{1, 2, \dots, B\},$$

где B – это число базовых станций. Определим $M < B - 1$ как число БС, которые принимают $L = \{1, 2, \dots, M\}$ отраженных сигналов от АС. Пусть τ_b – время прихода сигнала от АС к b -й БС:

$$\tau_b(x, y, l_b) = \frac{1}{c} \sqrt{\tilde{x}_b^2 + \tilde{y}_b^2} + l_b,$$

где $\tilde{x}_b = x - x_b$ и $\tilde{y}_b = y - y_b$ – расстояния между b -й БС и АС, $p = [x \ y]^T$ – вектор координат АС подлежащих оценке, l_b – дополнительная дальность распространения для отраженного сигнала.

Метод наименьших квадратов – классический метод приближения в двумерном пространстве основанный на ряде Тейлора первого порядка. Представим отдельное измерение расстояний между b -й БС и АС $d_b[i]$ используя выражение [2]:

$$d_b[i] = d_b(x, y, x_b, y_b) + e_b[i]; i \in \{1, 2, \dots, N\},$$

где $d_b(x, y, x_b, y_b)$ – фактические значения расстояний, которые зависят от действительного местоположения (x, y) АС и (x_b, y_b) БС, $e_b[i]$ – ошибка измерения на каждом i -м отсчете, N – количество измерений.

Пусть $\check{p} = [\check{x} \ \check{y}]^T$ – предполагаемая оценка местоположения АС, чьи элементы определяются выражениями $\check{x} = x - \delta_x, \check{y} = y - \delta_y$, где (δ_x, δ_y) соответствующие пары ошибок оценки предполагаемого местоположения. Далее выразим ряд Тейлора $d_b[i]$ как:

$$d_b[i] \approx d_{b,i}(\check{x}, \check{y}) + \dot{d}_{b,i}(\check{x})\delta_x + \dot{d}_{b,i}(\check{y})\delta_y + e_b[i], \quad (1)$$

где $\dot{d}_{b,i}(\check{x})$ и $\dot{d}_{b,i}(\check{y})$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{d}_{b,i}(\check{x}) &= \frac{d}{dx} d_{b,i}(x, y, x_b, y_b) \text{ при } x = \check{x}, y = \check{y}; \\ \dot{d}_{b,i}(\check{y}) &= \frac{d}{dy} d_{b,i}(x, y, x_b, y_b) \text{ при } x = \check{x}, y = \check{y}. \end{aligned}$$

Для всех N измерений в векторном виде выражение (1):

$$\mathbf{d}_b \approx \Delta\delta + \check{\mathbf{d}}_b + \mathbf{e}_b, \quad (2)$$

где $\delta = [\delta_x \ \delta_y]^T, \mathbf{e}_b = [e_b[1] \ e_b[2] \ \dots \ e_b[N]]^T$, а $\Delta \in \mathbb{R}^{N \times 2}, \mathbf{d}_b \in \mathbb{R}^{N \times 1}, \check{\mathbf{d}}_b \in \mathbb{R}^{N \times 1}$, определяются как:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \dot{d}_{b,1}(\check{x}) & \dot{d}_{b,1}(\check{y}) \\ \dot{d}_{b,2}(\check{x}) & \dot{d}_{b,2}(\check{y}) \\ \vdots & \vdots \\ \dot{d}_{b,N}(\check{x}) & \dot{d}_{b,N}(\check{y}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d}_b = [d_b[1] \quad d_b[2] \quad \dots \quad d_b[N]]^T,$$

$$\check{\mathbf{d}}_b = [d_{b,1}(\check{x}, \check{y}) \quad d_{b,2}(\check{x}, \check{y}) \quad \dots \quad d_{b,N}(\check{x}, \check{y})]^T.$$

Если допустить одинаковую дисперсию \mathbf{e}_b , то в первом приближении решение линейной модели с помощью МНК может быть представлено как:

$$\hat{\delta}_{\text{МНК}} = \arg \min_{\delta} \|\Delta \delta - (d_b - \check{d}_b)\| = (\Delta^T \Delta)^{-1} \Delta^T (d_b - \check{d}_b),$$

где $\|\hat{\delta}_{\text{МНК}}\|$ норма Эвклида. Подставим $\hat{\delta}_{\text{МНК}}$ в выражения для Δ и $\check{\mathbf{d}}_b$, таким образом выражение для $\hat{\delta}_{\text{МНК}}$ становится рекурсивной функцией, при которой $\|\hat{\delta}_{\text{МНК}}\|$ должно стремиться к 0 ($\check{p} + \delta_{\text{МНК}} \approx p$).

Для количественной оценки решений (1), (2) в программной среде Matlab разработана имитационная модель сети в составе 7 БС и 1 АС с возможностью корректировки отношения сигнал/шум, а также особенности отраженных сигналов (в результате отсутствия прямой видимости). Помимо рассмотренного метода МНК, были реализованы МНК с весовыми коэффициентами и метод максимального правдоподобия. Полученные результаты позволяют проанализировать среднеквадратическую ошибку (СКО) точности позиционирования АС в зависимости от числа БС без прямой видимости и сравнить их с границей Крамера-Рао [3, 4] (рис.). Необходимо отметить что в данном случае моделировались случаи при которых в составе семи действующих БС варьировалось число БС без прямой видимости.

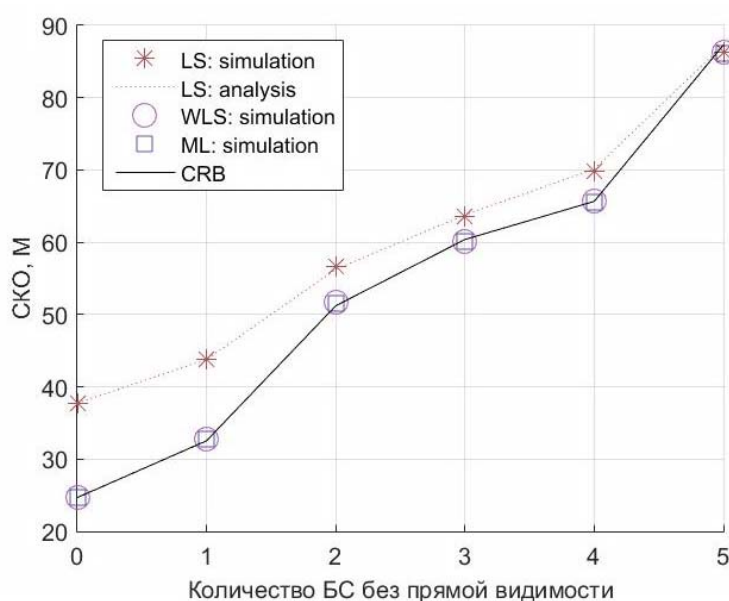


Рисунок. Зависимость СКО от числа БС без прямой видимости

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод, что при увеличении числа БС с непрямой видимостью точность позиционирования уменьшается, в случае увеличения с одной БС до двух погрешность увеличивается на 70 % (с 32 до 51 метра), следовательно, позиционирование объектов методом измерения времени прихода сигнала нецелесообразно при наличии больше чем одной БС без прямой видимости. Результаты статистически подтверждаются оценкой границей Крамера-Рао. Метод наименьших квадратов обладает худшей точностью по сравнению МНК с весовыми коэффициентами и методом максимального правдоподобия, особенно это заметно при малом количестве БС без прямой видимости. Необходимо отметить, что МНК с весовыми коэффициентами и метод максимального правдоподобия обладают большей вычислительной сложностью, и поэтому являются более точными. В то же время классический МНК применим для задач первоначальной оценки, как требующий меньшей вычислительной мощности.

В дальнейшем планируется провести эксперимент с реальными сигналами с использованием программно-конфигурируемого радио [5, 6].

Литература

1. Gustafsson F., Gunnarsson F. Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements // IEEE Signal processing magazine. 2005. Vol. 22. Iss. 4. pp. 41–53.
2. Foy W. H. Position-location solutions by Taylor-series estimation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1976. Iss. 2. pp. 187–194.
3. Cramér H. A contribution to the theory of statistical estimation // Scandinavian Actuarial Journal. 1946. Vol. 1946. Iss. 1. pp. 85–94.
4. Rao C. R. Information and the accuracy attainable in the estimation of statistical parameters // Breakthroughs in statistics. 1992. pp. 235–247.
5. Киреев А. В., Фокин Г. А. Позиционирование объектов в сетях LTE посредством измерения времени прохождения сигналов // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 1. С. 68–72.
6. Киреев А. В., Фокин Г. А. Пеленгация источников радиоизлучения LTE мобильным пунктом радиоконтроля с круговой антенной решеткой // Труды Научно-исследовательского института радио. 2015. № 2. С. 68–71.

References

1. Gustafsson F., Gunnarsson F. Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements // IEEE Signal processing magazine. 2005. Vol. 22. Iss. 4. pp. 41–53.
2. Foy W. H. Position-location solutions by Taylor-series estimation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1976. Iss. 2. pp. 187–194.
3. Cramér H. A contribution to the theory of statistical estimation // Scandinavian Actuarial Journal. 1946. Vol. 1946. Iss. 1. pp. 85–94.
4. Rao C. R. Information and the accuracy attainable in the estimation of statistical parameters // Breakthroughs in statistics. 1992. pp. 235–247.
5. Kireev A., Fokin G. Positioning of Objects in LTE Networks by Measuring Signal Time of Arrival // Proceedings of Telecommunication Universities. 2016. Vol. 2. Iss. 1. pp. 68–72.
6. Kireev A., Fokin G. Radio Direction-Finding of LTE Emissions using Mobile Spectrum Monitoring Station with Circular Antenna Array // Proceedings of Radio Research and Development Institute. 2015. Iss. 2. pp. 68–71.

- Киреев Артем Валерьевич*** – аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, kireyev@list.ru
- Фокин Григорий Алексеевич*** – кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, grihafokin@gmail.com
- Kireev Artem*** – Postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, kireyev@list.ru
- Fokin Grigory*** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, grihafokin@gmail.com