

УДК 621.396.969.1

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ АБОНЕНТА СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ ЗА УРОВНЕМ ЗАМИРАНИЙ СИГНАЛА В КАНАЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Е.П. Великанова, Е.П. Ворошилин, Е.В. Рогожников

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: raliens@mail.ru, vep@tor.tusur.ru

Методом прямого статистического моделирования рассмотрено влияние неточности задания ковариационной матрицы наблюдений на погрешность оценки координат абонента, формируемой на выходе алгоритма фильтрации Калмана. Рассчитано, какой выигрыш в повышении точности оценки координат можно получить посредством контроля за изменением отношением сигнал/шум для систем связи.

Ключевые слова:

Оценка координат, расширенный фильтр Калмана, адаптивная фильтрация, ковариационная матрица наблюдений.

Key words:

Position estimation, extended Kalman filter, adaptive filter, observation noise covariance.

В процессе формирования оценки текущего местоположения абонента системы связи требуются знания о дисперсии полезных наблюдений (пеленга, момента прихода и т. п.), содержащих информацию о координатах пользователя. Шумовая погрешность этих наблюдений зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ) и полосы сигнала. В канале распространения сигнал абонента испытывает быстрые и медленные замирания, что приводит к значительным флуктуациям ОСШ, а, следовательно, изменяется и ковариационная матрица полезных наблюдений.

Как правило, в фильтре слежения за координатами пользователя погрешность наблюдений полагается равной некоторой константе. При её заниженном или завышенном (по отношению к истинному) значении нарушается оптимальность процедуры фильтрации. Это обусловлено присвоением наблюдению неверного веса, с которым оно участвует в коррекции текущей оценки местоположения абонента.

Задача адаптации алгоритма фильтрации в условиях априорной неопределённости актуальна и широко обсуждается в литературе [1–11].

Цель представленной работы состоит в исследовании следующих вопросов:

- влияние неточности задания дисперсии наблюдений на погрешность оценки координат пользователя;
- эффективность повышения точности оценки координат посредством контроля за изменением отношением сигнал/шум с течением времени для систем связи.

Исследования проведены путем прямого численного моделирования с привлечением экспериментальных данных.

Рассмотрим задачу местоопределения абонента мобильной связи, который движется равномерно

и прямолинейно. Диапазон скоростей до 120 км/ч. Метод оценки координат — разностно-дальномерный. Интервал поступления наблюдений разностей моментов прихода — $\Delta t = 100$ мкс.

Введём следующие обозначения:

$\mathbf{x} = [x \ vx \ y \ vy \ z \ vz]^T$ — вектор состояния абонента, содержащий набор координат объекта в трехмерном пространстве: x, y, z и набор скоростей по каждой из проекций: vx, vy, vz ; $\mathbf{z} = [\Delta t_{12} \ \Delta t_{34} \ \Delta t_{23}]^T$ — вектор наблюдений: разности моментов прихода в четыре измерительных пункта (ИП). Здесь $\Delta t_{ij} = t_j - t_i$, где t_i — момент прихода сигнала в i -й ИП.

Динамика вектора состояния в дискретном времени:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{F}(k) \cdot \mathbf{x}(k-1), \quad (1)$$

где

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

— матрица перехода; Δt — временной интервал между соседними тактами обработки разностно-временных наблюдений, k — порядковый номер временного интервала.

Вектор состояния связан с вектором наблюдений следующим выражением:

$$\mathbf{z}(k) = h[\mathbf{x}(k)] + \mathbf{w}(k), \quad (2)$$

где $h(\cdot)$ — нелинейная функция, $\mathbf{w}(k)$ — гауссовская последовательность белого шума с нулевым средним и известной ковариационной матрицей $\mathbf{R}(k)$.

$$h(\mathbf{x}(k)) = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{(x(k)-x_2)^2 + (y(k)-y_2)^2 + (z(k)-z_2)^2} - \sqrt{(x(k)-x_1)^2 + (y(k)-y_1)^2 + (z(k)-z_1)^2}}{c} \\ \frac{\sqrt{(x(k)-x_4)^2 + (y(k)-y_4)^2 + (z(k)-z_4)^2} - \sqrt{(x(k)-x_3)^2 + (y(k)-y_3)^2 + (z(k)-z_3)^2}}{c} \\ \frac{\sqrt{(x(k)-x_3)^2 + (y(k)-y_3)^2 + (z(k)-z_3)^2} - \sqrt{(x(k)-x_2)^2 + (y(k)-y_2)^2 + (z(k)-z_2)^2}}{c} \end{Bmatrix}$$

где $\{x_i, y_i, z_i\}, i=1, \dots, 4$ – координаты измерительных пунктов; c – скорость света.

Матрица

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta t 12}^2 & 0 & 0,5\sigma_{\Delta t 12}\sigma_{\Delta t 23} \\ 0 & \sigma_{\Delta t 34}^2 & 0,5\sigma_{\Delta t 34}\sigma_{\Delta t 23} \\ 0,5\sigma_{\Delta t 12}\sigma_{\Delta t 23} & 0,5\sigma_{\Delta t 34}\sigma_{\Delta t 23} & \sigma_{\Delta t 23}^2 \end{bmatrix}$$

где $\sigma_{\Delta t ij}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) разностей моментов прихода между i -м и j -м ИП.

При равных во всех пунктах значениях дисперсии разностно-временных измерений:

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta t}^2 & 0 & 0,5\sigma_{\Delta t}^2 \\ 0 & \sigma_{\Delta t}^2 & 0,5\sigma_{\Delta t}^2 \\ 0,5\sigma_{\Delta t}^2 & 0,5\sigma_{\Delta t}^2 & \sigma_{\Delta t}^2 \end{bmatrix}$$

где $\sigma_{\Delta t}^2 = 2\sigma_t^2$, σ_t^2 – дисперсия оценки момента прихода сигнала.

Поскольку наблюдения разностей моментов прихода нелинейно связаны с координатами абонента (2), а сама модель движения линейна (1), то в качестве алгоритма оценки местоположения будет выступать расширенный фильтр Калмана. Его процедура формирования оценок координат носит рекурсивный характер (рис. 1) и приведена в литературе [12, 13].

Начальными входными параметрами фильтра являются:

1. Априорная оценка вектора состояния цели $\hat{\xi}(0)$. В начальный момент времени $\hat{\xi}(0) = [x \ 0 \ y \ 0 \ z \ 0]$,

где x, y, z находим по первой тройке наблюдений разностей моментов прихода, а скорости v_x, v_y, v_z полагаем равными нулю.

2. Ковариационная матрица оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{P}}(0)$.
3. Ковариационная матрица наблюдений $\mathbf{R}(0)$.

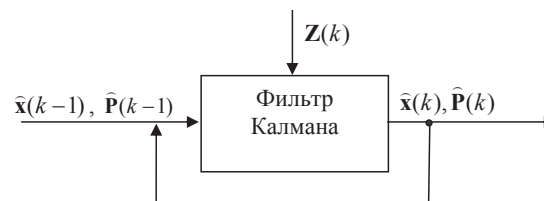


Рис. 1. Входные и выходные данные алгоритма фильтрации

Проведём исследование влияние неверного задания матрицы $\mathbf{R}(k)$ на точностные характеристики алгоритма фильтрации. Пусть СКО измерений моментов прихода σ_t постоянно в течение всего времени наблюдений за абонентом и равно 50 нс. Промоделируем работу фильтра в двух режимах, когда введённое в матрицу \mathbf{R} значение СКО измерений $\hat{\sigma}_t^\phi$ занижено и завышено по отношению к истинному ($\hat{\sigma}_t^\phi = 10$ нс и 100 нс, соответственно). Результаты моделирования для заниженного ($\hat{\sigma}_t^\phi = 10$ нс) значения СКО наблюдений моментов прихода приведены на рис. 2. Усреднение выполнено по 100 реализациям шумов.

На рис. 2 видно, что введение в фильтр заниженного относительно истинного значения СКО измерений моментов прихода сигнала приводит к ощутимому (в 1,5 раза) ухудшению точностных характеристик алгоритма в переходный период времени. В дальнейшем для большей наглядности будут приведены не абсолютные значения средней ошибки места и скорости, а нормированные (рис. 3, 4). Нормирование выполнено относительно режима, когда в фильтр вводится истинное значение дисперсии: $\hat{\sigma}_t^\phi = \sigma_t = 50$ нс. Уровень, равный единице, помечен пунктирной линией.

На рис. 3 видно, что при занижении СКО измерений на 40 нс по отношению к истинному проигрыш в точности оценки вектора состояния по координатам составил 1.3 раза, а по скорости 2.7 раз.

На рис. 4 показано, что при завышении СКО измерений в 2 раза проигрыш в точности оценки вектора состояния достиг 40%.

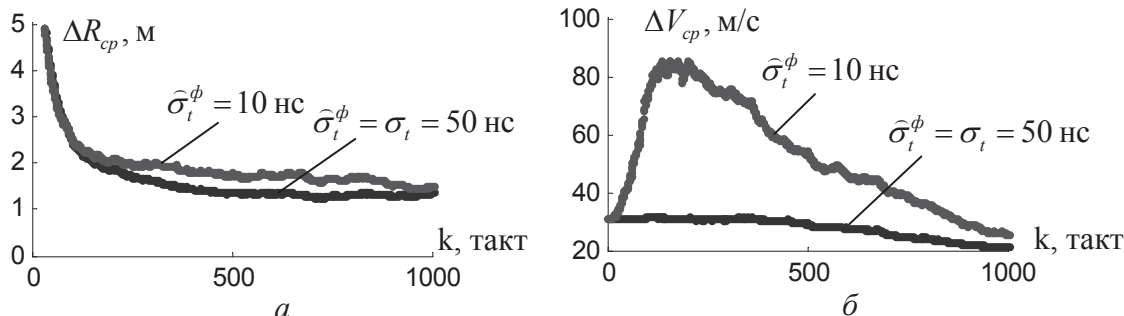


Рис. 2. Точностные характеристики алгоритма фильтрации при нормальном и заниженном значении СКО измерений: а) среднее значение ошибки места; б) среднее значение ошибки оценки скорости

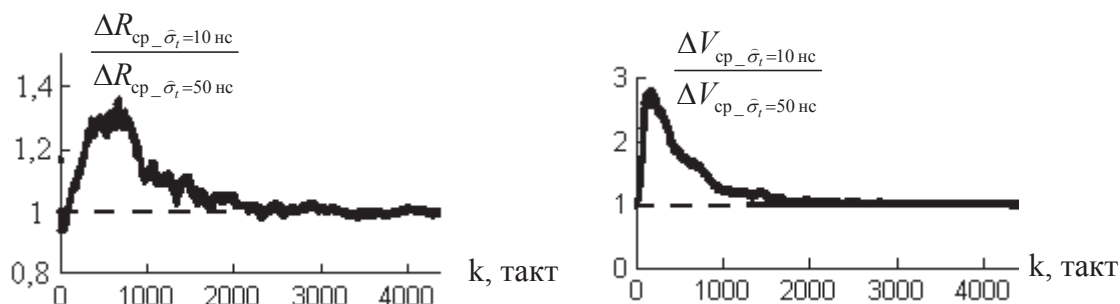


Рис. 3. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости при заниженном в фильтре значении СКО наблюдений: $\sigma_t^\phi = 10$ нс

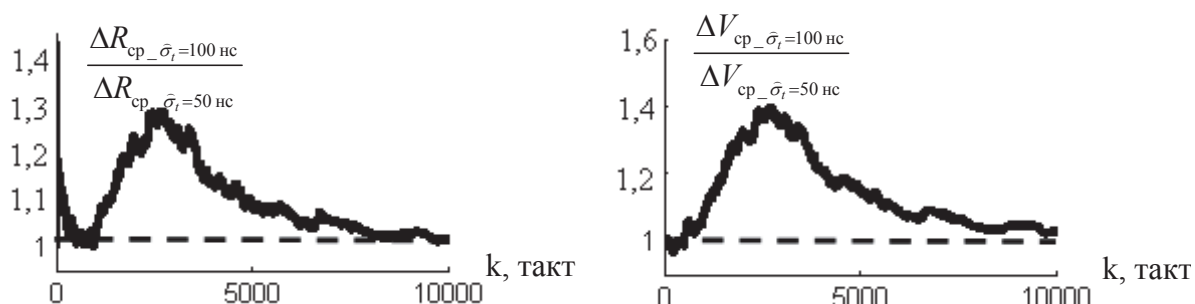


Рис. 4. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости при завышенном в фильтре значении СКО наблюдений: $\sigma_t^\phi = 100$ нс

Известно, что отношение сигнал/шум в фиксированный момент времени является случайной величиной, зависящей от случайных флуктуаций в канале распространения. В результате этого дисперсия измерений моментов прихода меняется с течением времени. Оценим, какой можно получить выигрыш в точности местоопределения пользователя благодаря контролю за текущим отношением сигнал/шум, а следовательно и за дисперсией поступающих измерений.

Формирование оценки времени прихода полагается выполненным оптимальным образом (с помощью корреляционного приёмника). Точность временных измерений зависит от отношения сигнал/шум, полосы сигнала и частоты дискретизации АЦП. В работе будут рассмотрены значения этих параметров, характерные для систем связи:

- ОСШ [2; 20] дБ;
- полоса сигнала $\Delta f_c = 2,5; 5$ и 10 МГц;
- частота дискретизации $f_d = 40$ МГц.

На рис. 5 приведена зависимость СКО временных измерений при разном ОСШ и полосе сигнала.

На рис. 5 видно, что с увеличением полосы сигнала и отношения сигнал/шум СКО временных измерений уменьшается.

В качестве модели флуктуаций отношения сигнал/шум во времени использовался случайный гауссовский процесс с заданной дисперсией и интервалом временной корреляции τ_k . Дисперсия определялась рассматриваемым диапазоном ОСШ (2...20 дБ), а τ_k зависела от скорости движения абонента при стационарности прочих условий в канале распространения:

$$\tau_k = \frac{0,846}{\Delta f_d} = \frac{0,846 \cdot c}{f_0 \cdot v},$$

где Δf_d – доплеровский сдвиг частоты, $f_0 = 2,7$ ГГц – несущая частота сигнала, v – скорость движения объекта; c – скорость света.

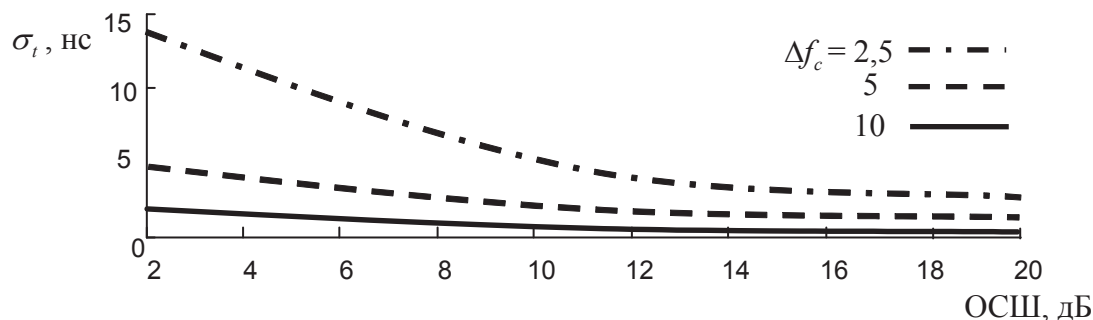


Рис. 5. Зависимость СКО ошибки оценки момента прихода от отношения сигнал шум для разной полосы сигнала (2,5; 5 и 10 МГц) при $f_d = 40$ МГц

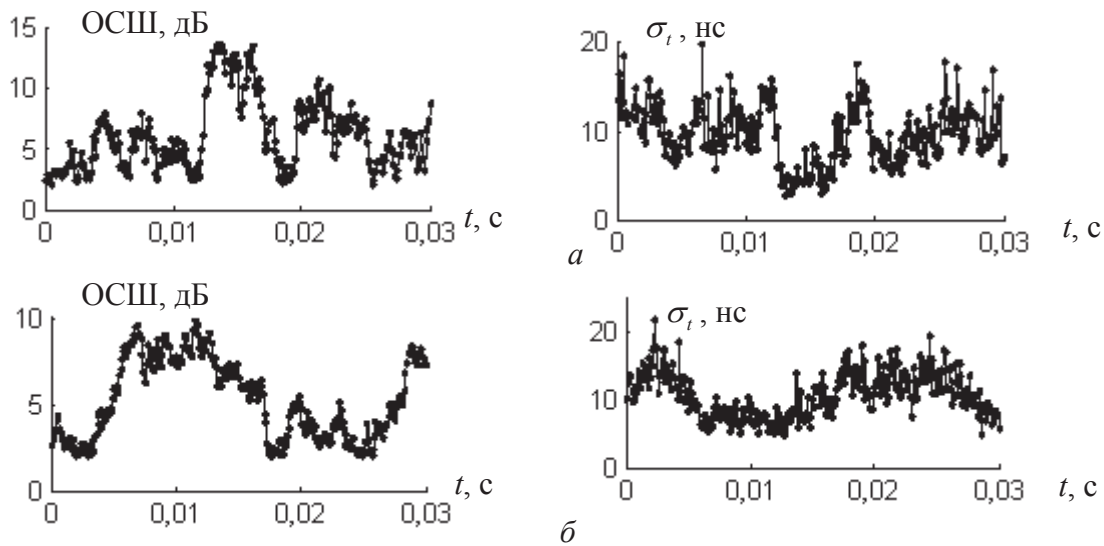


Рис. 6. Динамика изменения отношения сигнал/шум во времени и соответствующие значения СКО временных измерений при движении абонента со скоростью v а) 120; б) 20 км/ч

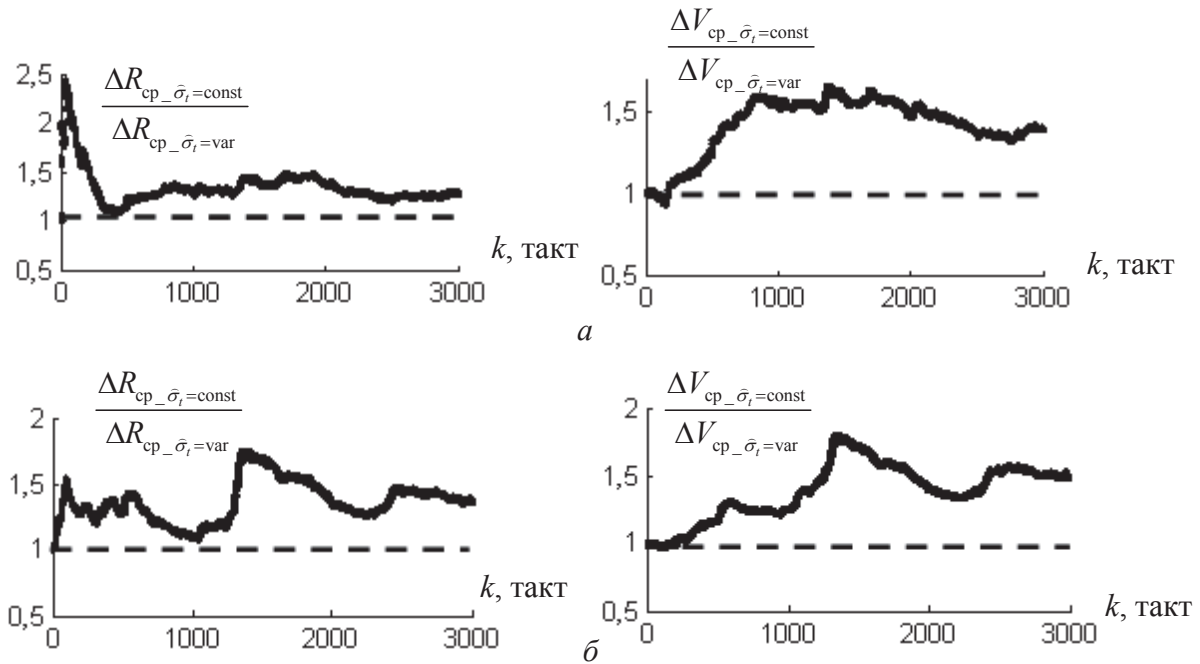


Рис. 7. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости от времени при движении абонента со скоростью а) 120; б) 20 км/ч

Для скоростей пользователя, равных 120 и 20 км/ч, интервал временной корреляции равен 0,0028 и 0,017 с, соответственно. Пример процесса и изменения отношения сигнал/шум и соответствующих погрешностей временных измерений для разных скоростей абонента представлен на рис. 6.

Для сравнительного анализа точности оценки координат пользователя, получаемых с учётом изменения ОСШ, а, соответственно, дисперсии наблюдений, и без него, было проведено следующее моделирование. В уравнениях алгоритма фильтрации Калмана в матрицу $\mathbf{R}(k)$ в первом случае

на каждом такте вводилось истинное значение дисперсии временных измерений $\sigma^2(k)$, а во втором оно считалось константой, равной истинному значению дисперсии в начальный момент времени (на первом такте) $\mathbf{R}(k)=\mathbf{R}(0)$. Результаты моделирования приведены на рис. 7 (усреднение выполнено по 100 реализациям шумов). На рисунках приведено нормированное значение средней ошибки места и скорости в режиме, когда дисперсия измерений считается константой. Нормирование выполнено относительно значений, когда в фильтр вводится истинное значение ковариационной матрицы, изменяющееся с течением времени.

На рис. 7 видно, что учёт изменения ОСШ во времени и соответствующий пересчёт веса текущего измерения при обновлении вектора оценки координат пользователя позволяет повысить точность в среднем в 1,5 раза. Следует отметить, что полученные результаты являются предельными и недостижимыми на практике, поскольку достоверный прогноз дисперсии временных измерений по оценке отношения сигнал/шум невозможен.

В заключение, для подтверждения полученных выводов, приведём результат аналогичных исследований, выполненных на реальных экспериментальных данных. Эксперимент проводился в городской среде. Приёмная аппаратура была размещена на подвижном носителе, который двигался со скоростью 20 и 50 км/ч. Рассматривались два типа трасс: короткая (100...500 м) и протяжённая (1...2 км). Для исследования использовался OFDM сигнал полосой 20 МГц и длительностью 100 мкс на несущей частоте 2,4 ГГц. Регистрация и запись квадратур сигнала в ЭВМ проводилась в течение одной минуты. Полученные зависимости флуктуации мощности принимаемого сигнала от времени

приведены на рис. 8. Уровень шума был в районе -70 дБм. Интервал между соседними наблюдениями составлял 0,028 с.

Оценка выигрыша в точности местоопределения, которую может дать контроль за уровнем сигнала, выполненная на экспериментальных данных приведена на рис. 9.

На рис. 9, а, видно, что на начальном этапе, когда реальное значение СКО наблюдения не сильно отличается от принятого в алгоритме, уточнение ковариации не приносит видимых результатов. Однако, начиная с 400-го такта, когда наблюдается резкое возрастание ОСШ (рис. 8, а), точность местоопределения начинает расти и увеличивается в среднем на 30 %.

Заключение

Дисперсия измеряемой величины, несущей информацию о координатах пользователя, непосредственно участвует в уравнениях фильтрации его координат. Её завышенное или заниженное (по сравнению с истинным) значение приводит к ухудшению точностных характеристик алгоритма место-

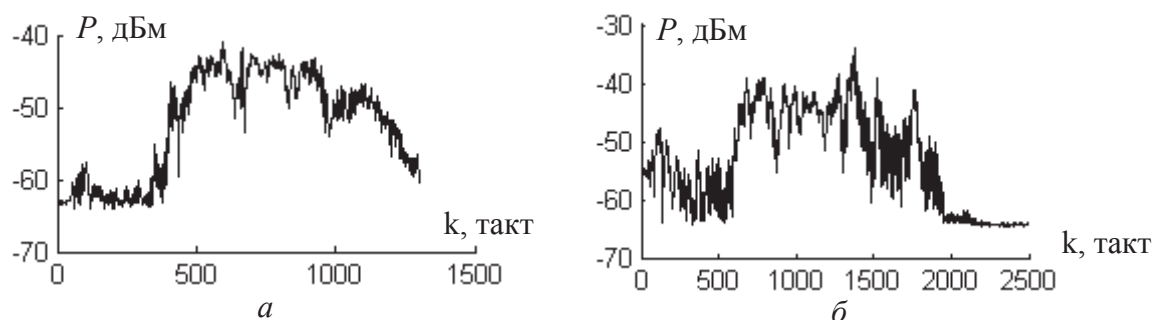


Рис. 8. Экспериментальная запись мощности принимаемого сигнала с течением времени. Трасса: а) короткая; б) длинная

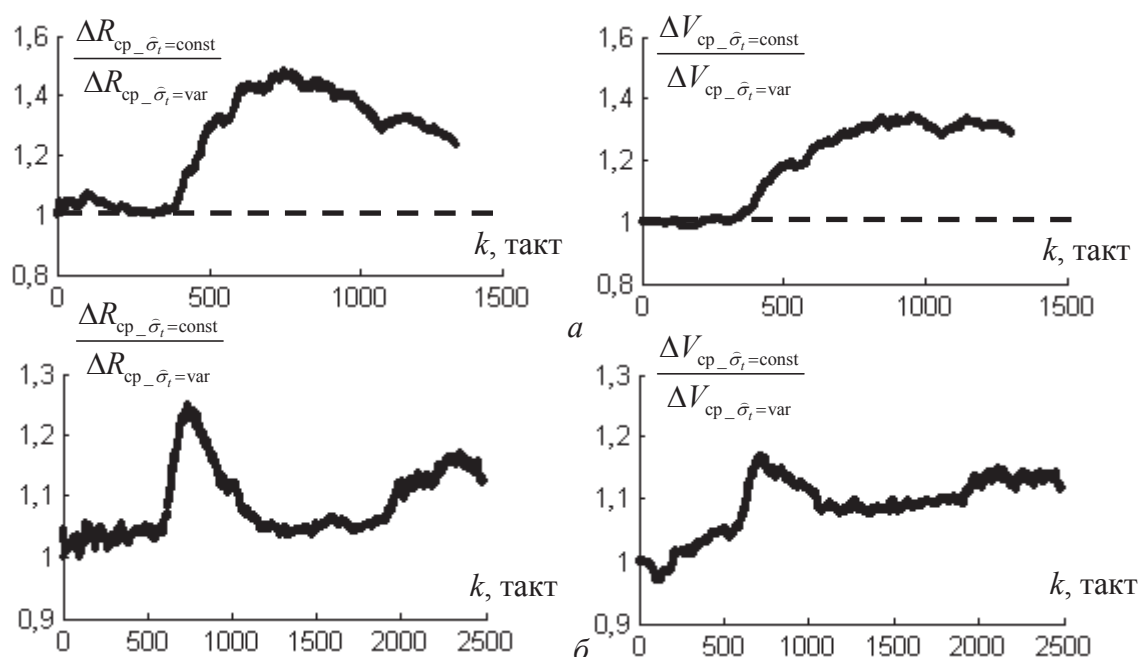


Рис. 9. Зависимость нормированной средней ошибки места и скорости от времени по экспериментальным данным. Трасса: а) короткая; б) длинная

определения. Это обусловлено неправильным распределением веса (вклада) предыдущей оценки вектора состояния и текущего измерения при обновлении оценки координат пользователя. Моделирование показало, что при завышенной в 2 раза погрешности задания СКО измерений (по отношению к истинной), проигрыш в точности оценки вектора состояния достигает 40 %.

На практике зачастую оценивают дисперсию измерений экспериментально (непосредственно по поступающим наблюдениям), а далее полагают её равной константе. В действительности же отношение сигнал/шум меняется во времени и представляет со-

бой случайный коррелированный процесс. Поэтому учёт изменения дисперсии наблюдений остаётся актуальным. В работе по экспериментальным данным для систем связи показано, что слежение за относительным уровнем сигнала и шума, а соответственно, и за дисперсией наблюдений позволяет снизить погрешность местоопределения в среднем на 30 %.

Полученные результаты носят теоретический характер, но имеют практическую значимость, поскольку дают информацию о степени возможного выигрыша в точности местоопределения за счёт контроля за уровнем замираний сигнала в канале распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понятский В.М. Исследование способов реализации адаптивной системы управления с фильтром Калмана // Интернет. 2008. URL: http://www.math.spbu.ru/user/gran/soi4/ponyatskiy08_2.pdf (дата обращения: 05.04.2012).
2. Згуровский М.З., Подладчиков В.Н. Аналитические методы калмановской фильтрации для систем с априорной неопределенностью. – К.: Наукова думка, 1995. – 298 с.
3. Забегаев А.Н., Павловский В.Е. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системами навигации // Интернет. 2009. URL: <http://www.raai.org/resurs/papers/kii-2010/doklad/zabegaev.pdf> (дата обращения: 08.05.2012).
4. Дегтярёв А.А., Тайл Ш. Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – М.: Связь, 2003. – № 26. – 35 с.
5. Sung W.J., Choi S.O., You K.H. TDoA based UGV Localization using Adaptive Kalman Filter Algorithm // Интернет. 2009. URL: http://www.sersc.org/journals/IJCA/vol2_no1/1.pdf (дата обращения: 18.04.2012).
6. Xiong K., Zhang H., Liu L. Adaptive Robust Extended Kalman Filter // Интернет. 2009. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/6327/InTech-Adaptive_robust_extended_kalman_filter.pdf (дата обращения: 18.04.2012).
7. Jwo D.-J., Chung F.-C. Adaptive Kalman filter for navigation sensor fusion // Интернет. 2009. URL: <http://ebookbrowse.com/gdoc.php?id=326155547&url=0761dcbcc180093566925b023b9f88e7> (дата обращения: 18.04.2012).
8. Mohamed A.H., Schwarz K.P. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS // Интернет. 1999. URL: http://www.sfric.ufl.edu/nagem/docs/refereed_journals/Mohamed%20and%20Schwarz%20%201999%20-%20Adaptive%20Kalman%20filtering%20for%20INS/GPS.pdf (дата обращения: 18.04.2012).
9. Jwo D.-J., Chen M.-Y. Adaptive and Nonlinear Kalman filtering for GPS Navigation Processing // Интернет. 2008. URL: <http://ebookbrowse.com/gdoc.php?id=311579672&url=c5a49d3355e2ccacdc99067238c9cdf> (дата обращения: 18.04.2012).
10. Moriya N. Non-Stationary noise estimation in Adaptive Linear and Extended Kalman Filtering // Интернет. 2007. URL: <http://ebookbrowse.com/gdoc.php?id=238899060&url=e26036679ab305cc1c49cbfc118de255> (дата обращения: 18.04.2012).
11. Kim S.-J., Iltis R.A. STAP for GPS Receiver Synchronization // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 2004. – V. 40. – № 1. – P. 132–144.
12. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.
13. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Б.Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 495 с.

Поступила 26.07.2012 г.