

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА, ОСНОВАННЫЙ НА КООПЕРАТИВНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается новый подход, основанный на кооперативном использовании данных ГНСС, который назван усовершенствованным методом кооперативного использования псевдодальностей (Advanced Shared Pseudorange – ASP). Возможности нового подхода демонстрируются его сравнением с другими кооперативными алгоритмами и результатами испытаний, в которых решалась задача позиционирования с привлечением данных от слабосвязанной системы ГНСС/ИНС при моделировании движения в городских условиях.

Введение

Возросшая по всем мире автомобилизация неизбежно требует новых концепций при решении возникающих экологических и экономических проблем. В последние несколько лет появились термины **интеллектуальная транспортная система** (Intelligent Transportation System – ITS) и **транспортная сеть специального назначения** (Vehicular Ad-Hoc Network – VANET). Они подразумевают сбор, передачу, распределение и обработку данных от транспортных средств в целях общего улучшения состояния дел на транспорте, включающего безопасность дорожного движения, расширение возможностей навигации, эффективность движения на дорогах, электронное взимание платы в местах платного проезда и многое другое. Немало усилий было вложено в определение потенциала автомобильных сетей, в результате чего были разработаны некоторые новые стандарты протоколов связи, инструкций по безопасности, маршрутизации, обслуживанию и взаимодействию сетей [1]. Эти стандарты являются предпосылками для развития услуг, которые основаны на информации, поступающей от автомобиля к автомобилю (А-А), от автомобиля на придорожную полосу (А-ПП) или от автомобиля к инфраструктуре (А-И) системы связи. В поисках высокоскоростной среды передачи данных и малого времени задержки в полосе частот 75 МГц был выделен специальный диапазон на частоте 5,9 ГГц, называемый выделенной областью для ближней связи и используемый также для связи (А-А) и (А-И).

Области возможного применения VANET разнообразны, однако точная информация о местоположении является общим требованием во всех случаях. Как

Рот Йохен. Аспирант Технологического института Карлсруэ (Карлсруэ, Германия).

Шайх Томас. Компания INIT («Передовые технологии в транспортных системах движения и управления», ГмбХ (Карлсруэ, Германия).

Троммер Герт Ф. Профессор, д.т.н., руководитель Института оптимизации систем и декан факультета электротехники и информационной техники Технологического института Карлсруэ. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Научный редактор перевода д.т.н. А.Е.Пелевин.

Статья по докладу на XIX С.-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

правило, локализация транспортного средства осуществляется посредством одновременного использования датчиков счисления пути (например, акселерометров, гироскопов и одометров) и приемника ГНСС. Благодаря их взаимодополняющим характеристикам – долговременной точности ГНСС и постоянной доступности инерциальных датчиков – интегрированная навигационная система ГНСС/ИНС фактически является стандартным оборудованием для определения местоположения транспортного средства. Из экономических соображений в стандартном автомобильном оборудовании не используются дорогие высокоточные инерциальные датчики, в силу чего точность позиционирования сильно зависит от наличия дополнительных датчиков определения положения, таких как ГНСС или системы навигации по видеоизображению (Feature Matching). При обработке данных от приемника ГНСС можно получить точность позиционирования менее 1 м, однако в этом случае проблемой является ее резкое снижение, вызванное затенением сигнала зданиями и растительностью. Кроме того, даже если сигналы ГНСС доступны, многолучевость распространения сигнала препятствует точному позиционированию.

В данной статье рассматривается проблема, связанная с потерей спутникового сигнала в городских условиях. Представлен новый алгоритм, позволяющий обрабатывать измерения псевдодальностей, поступающие в том числе от оборудования автомобилей, находящихся в зоне доступности связи, с тем чтобы использовать их для локализации местоположения каждого участника транспортной сети в отдельности. Благодаря преимуществу, состоящему в том, что разные транспортные средства в городской уличной сети получают сигналы от различных спутников, обеспечивается возможность обмена информацией между ними. Таким образом, набор спутников, используемых для каждого транспортного средства, увеличивается. Кроме того, придорожные посты на перекрестках, оборудованные приемником ГНСС и устройством связи, специально проектируются так, чтобы обеспечить всех участников дорожного движения данными ГНСС. Здесь, в отличие от транспортных средств, установкой антенны на большую высоту может быть обеспечен более надежный прием спутниковых сигналов. К тому же положение такого стационарного пункта может быть определено с очень высокой точностью.

Использование необработанных измерений ГНСС, поступающих от автомобилей сети для локализации их положения, приводит к большим погрешностям, зависящим от расстояния между двумя транспортными средствами. Важно пересчитать эти измерения таким образом, чтобы они соответствовали текущему положению автомобиля, для чего необходимо знать расстояние между транспортными средствами. Обычно такую информацию получают с помощью радиодальномерных технологий, основанных на анализе интенсивности принимаемого сигнала, времени поступления сигнала или разнице во времени поступления сигналов [2]. Обзор этих методов представлен в [3], однако алгоритм, обсуждаемый в этой статье, не зависит от конкретного используемого метода.

В следующем разделе статьи обсуждаются некоторые аналогичные работы в области кооперативных алгоритмов, в основном для автомобильных сетей. Далее приводится подробное описание функциональных возможностей нашего кооперативного алгоритма, а также представлены некоторые аспекты его применения для повышения точности позиционирования. После этого приводятся результаты исследования алгоритма, названного усовершенствованным методом кооперативного использования псевдодальностей – Advanced Shared

Pseudorange (ASP), методом статистических испытаний и при моделировании движения автомобилей в городских условиях. Затем исследуется совместное использование предложенного кооперативного алгоритма и слабосвязанной навигационной системы ГНСС/ИНС.

Обзор аналогичных работ

При кооперативном позиционировании используются различные методы, которые отличаются не только содержанием передаваемых сообщений и обработкой самих данных, но и выходной информацией. Очень простой подход кооперативного позиционирования состоит в сопоставлении текущего положения автомобиля с положением, передаваемым другими участниками дорожного движения для того, чтобы предупредить столкновение [4] или вовремя получить информацию о препятствиях и пробках на дорогах. Однако в подходе, представленном в данной работе, информация, полученная от других транспортных средств, используется в первую очередь для повышения точности определения собственного положения. В этом контексте хорошо зарекомендовали себя так называемые псевдоспутники. Далее автомобили рассматриваются как спутники, т.е. для измерения расстояния между транспортными средствами вместо или в дополнение к измеренной ГНСС псевдодальности применяется принцип трилатерации.

В работе [5] Benslimane, A и др. используют именно этот принцип для определения положения транспортных средств, не оборудованных приемниками ГНСС. Точно так же N.M.Drawil разработал подход [6], который позволяет решить задачу позиционирования в момент временной недоступности сигнала ГНСС и снижения погрешности от многолучевости за счет применения метода с использованием псевдоспутника. Несколько иной подход представлен в работе S.Quebe и др. [7]. Вместо расстояний между автомобилями в виде скалярных величин в качестве дополнительных измерений для процесса оценивания используются векторы взаимного положения двух автомобилей. Кроме того, данные о положении транспортных средств не являются частью передаваемого сообщения. Эта информация включается в состав оцениваемого вектора состояния. Соответственно каждое транспортное средство определяет координаты и погрешности тактовых генераторов приемников всех участников VANET, при этом обеспечивается обмен всеми псевдодальностями и измерениями относительного положения каждого автомобиля сети. Метод, избранный J. Rife [8], также основан на оценке положения всех участников VANET. Особенностью этого подхода является дополнительная оценка дифференциальной поправки для каждой псевдодальности измеренной ГНСС. Таким образом, можно получить результаты, сопоставимые с результатами при применении дифференциальной ГНСС (ДГНСС), но при этом нет необходимости в стационарном приемнике ДГНСС. В [9] E.Richter и др. предложили процедуру, которая также учитывает погрешности, характерные для групповых измерений. Они устраняются при использовании вторых разностей псевдодальностей, что напрямую дает относительное позиционирование. Кооперативная обработка заключается в обмене псевдодальностями ГНСС, оценке собственного движения и последующей оценке относительного положения участников VANET в парциальном фильтре. Подход к решению задачи кооперативного позиционирования без ГНСС был разработан R.Parker и др. в [10, 11]. Измеренные и полученные в результате обмена данными расстояния между транспортными средствами, в со-

четании с дорожными картами и учетом кинематики автомобилей, используются для оценки относительного положения автомобилей в кластере.

Перерывы в приеме сигналов ГНСС в городской среде и возможная в результате этого недоопределенность оценки положения рассматриваются в [12, 13]. Кооперативный метод трехмерного определения положения с использованием только двух спутников предложили N.Alam и др. [14]. Здесь обычно требуемые 4 спутника заменяются придорожными постами, расположенными на перекрестках. Идентификация двух придорожных постов, расположенных по краям проходимого автомобилем участка дороги и передающих координаты, дает возможность определить соединяющую их линию. Положение транспортного средства определяется как пересечение этой линии и поверхности, которая задается гиперболоидом, полученным по разнице во времени поступления сигналов с использованием измерений двух псевдодальностей.

Во всех этих методах применяются измерения псевдодальности, полученные в приемнике ГНСС позиционируемого средства, или, как альтернатива, осуществляется относительное позиционирование. В противоположность этому в [15] F.Berefelt и др. предложили очень простой метод, который авторы называют методом совместного использования измерений псевдодальностей (Shared Pseudorange – SP). Он позволяет использовать псевдодальности «сотрудничающих» транспортных средств. Необходимым условием для соответствующей адаптации псевдодальностей является знание вектора относительного положения между транспортными средствами. Алгоритм, представленный в данной статье, основан на аналогичном подходе, хотя и с важным преимуществом. Он не опирается на измерения вектора относительного положения. Вслед за обозначениями, принятыми авторами работы [15], мы назвали наш метод усовершенствованным методом кооперативного использования измерений псевдодальностей (ASP).

Усовершенствованный метод кооперативного использования измерений псевдодальностей

Псевдодальность ρ ГНСС представляет собой измеренную дальность до спутника, равную произведению задержки распространения сигнала от конкретного спутника k к приемнику, умноженному на постоянное значение скорости света. Таким образом, ее модель можно представить как

$$\tilde{\rho}_k = \|\vec{r}_{s_k} - \vec{r}_u\| + c\delta t_u + e_{\rho_k}, \quad (1)$$

где $\|\bullet\|$ обозначает оператор евклидовой нормы. Истинное расстояние между положением спутника $\vec{r}_{s_k}$ и положением пользователя $\vec{r}_u$ искажается в основном ошибкой тактового генератора приемника δt_u и ошибкой e_{ρ_k} , вызванной отклонением действительной скорости распространения сигнала от предполагаемой постоянной скорости света c . Тогда как e_{ρ_k} можно представить некоторой моделью, ошибка тактового генератора приемника вносит погрешности в каждую составляющую местоположения пользователя. Чтобы определить четыре неизвестные $(r_x, r_y, r_z, \delta t_u)$, нелинейная модель измерения (1) линеаризуется относительно номинального местоположения пользователя $\hat{\vec{r}}_u$:

$$\Delta \tilde{\rho}_k = -\vec{u}^T \Delta \vec{r}_u + c \delta t_u + e_{\rho_k}, \quad \text{где } \vec{u} = \frac{\vec{r}_{s_k} - \hat{\vec{r}}_u}{\|\vec{r}_{s_k} - \hat{\vec{r}}_u\|}. \quad (2)$$

Имея вектор невязок, образованный из измерений нескольких псевдодальностей $\Delta \tilde{\rho}$, матрицу геометрии G и единичный вектор, направленный от пользователя на спутник $\vec{u}$ (см. уравнение (2)), линеаризованную модель в векторной форме можно представить в следующем виде:

$$\Delta \tilde{\rho} = G \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta \vec{r}_u \\ c \delta t_u \end{pmatrix}}_{\Delta \vec{x}} + \vec{e}_\rho, \quad \text{где: } G = \begin{pmatrix} -\vec{u}_1^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\vec{u}_n^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) методом наименьших квадратов имеет вид

$$\Delta \vec{x} = (G^T G)^{-1} G^T \Delta \tilde{\rho}. \quad (4)$$

Располагая набором по крайней мере из четырех измерений псевдодальностей, можно получить итеративное улучшение оценки положения $\hat{\vec{x}}_{k+1} = \hat{\vec{x}}_k + \Delta \vec{x}$. Этот подход соответствует методу Ньютона – Рафсона, а соответствующее решение обычно называют **моментальным позиционированием** (snapshot positioning).

В городских условиях часто невозможно оценить местоположение транспортных средств, потому что из-за затенения спутников нельзя получить четыре измерения. Одна из возможностей – это использовать известную высоту, например, из предыдущего оценивания. Таким образом, неизвестными параметрами остаются две составляющие горизонтального положения и ошибка тактового генератора. Для позиционирования автомобиля этого достаточно, поскольку возможный диапазон изменения высоты ограничен. Кроме того, аппроксимация высоты может быть обеспечена дорожными картами. Другая возможность сократить количество неизвестных параметров ошибки тактового генератора – взять их значения из предыдущего шага оценивания. Однако это можно рекомендовать только для очень коротких интервалов времени, поскольку существенные ошибки из-за дрейфа тактовых генераторов приемника быстро приведут к огромным погрешностям позиционирования.

С другой стороны, в основе подхода, выбранного в [15] для метода совместного использования измерений псевдодальностей, лежит кооперативное пользование данными. В нем используется преимущество, заключающееся в том, что, хотя для всех транспортных средств имеет место затенение сигнала, часто оно касается разных спутников. Следовательно, посредством обмена псевдодальностями между автомобилями можно получить необходимый набор четырех независимых измерений псевдодальностей. Использование измерения псевдодальности, которое на самом деле получено другим автомобилем, влечет за собой большие погрешности. Но если вектор относительного положения между двумя транспортными средствами известен, то псевдодальность легко пересчитать.

Метод совместного использования измерений псевдодальностей (SP)

В последующем изложении транспортное средство, местоположение которого нужно определить, называется протагонистом (главным действующим лицом) и отмечается подстрочным индексом p . «Сотрудничающие» транспортные средства, информацию от которых получают в результате обмена данными,

обозначаются подстрочным индексом c . Используя вектор относительного положения $\vec{d}$, местоположение сотрудничающего автомобиля $\vec{r}_c$ можно записать (рис. 1):

$$\vec{r}_c = \vec{r}_p - \vec{d}. \quad (5)$$

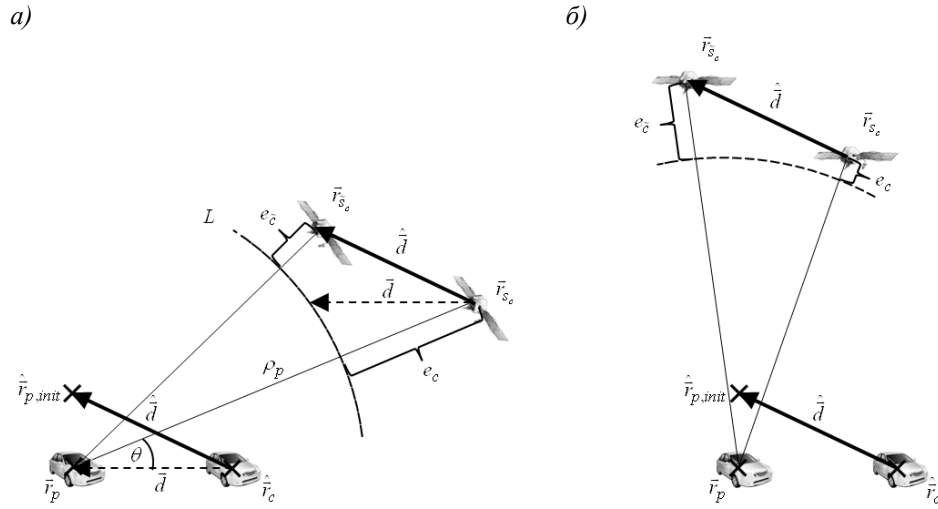


Рис. 1. Перемещение виртуального спутника

Таким образом, уравнение (1) для модели псевдодальности можно переписать в виде

$$\tilde{\rho}_c = \|\vec{r}_{s_c} - \vec{r}_p + \vec{d}\| + c\delta t_p + e_{\rho_k}. \quad (6)$$

Уравнение (6) дает описание модели для «бесшовного» (seamless) включения псевдодальности, измеренной «сотрудничающим» автомобилем, в алгоритм определения его положения. После суммирования $\vec{r}_{s_c} + \vec{d} = \vec{r}_{s_c}$ уравнение (6) приобретает вид уравнения (1) со смещенным положением виртуального спутника $\vec{r}_{s_c}$.

Одна полученная таким образом псевдодальность не дает никаких преимуществ, поскольку она тоже включает в себя дополнительные ошибки тактового генератора δt_c . Однако если вместо измерения псевдодальности доступна оценка δt_c , то для оценки местоположения можно использовать реально измеренное расстояние. Использование n спутников, находящихся в прямой видимости, и m спутников, доступных в транспортной сети, позволяет преобразовать уравнение (3) к виду

$$\begin{pmatrix} \Delta \tilde{\rho}_1 \\ \vdots \\ \Delta \tilde{\rho}_n \\ \Delta \tilde{\rho}_1 \\ \vdots \\ \Delta \tilde{\rho}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\vec{u}_1^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\vec{u}_n^T & 1 \\ -\vec{u}_1^T & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -\vec{u}_m^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \vec{r}_p \\ \Delta c\delta t_p \end{pmatrix} + \vec{e}_\rho, \quad \text{где} \quad \vec{u}_k = \frac{\vec{r}_{s_k} + \vec{d} - \hat{\vec{r}}_p}{\|\vec{r}_{s_k} + \vec{d} - \hat{\vec{r}}_p\|}, \quad (7)$$

где $\vec{u}_k$ обозначает единичный вектор, имеющий направление на виртуальный спутник, а $\tilde{\rho}_m$ – соответствующее кооперативное измерение расстояния. Таким образом, можно определить местоположение протагониста даже в том случае, если последний сам принимает менее четырех псевдодальностей.

Возникает вопрос, каким образом получить необходимый вектор относительного положения $\vec{d}$? Для этой цели, как правило, подходят лазерные дальномерные устройства (LIDAR, LASER) поскольку измерения расстояний связаны с информацией о положении. Помимо финансового аспекта использование этих датчиков влечет за собой дополнительные недостатки. В связи с необходимостью прямой видимости средняя дальность, при которой работают эти датчики, ограничена. Кроме того, согласование измерений относительного положения соответствующих транспортных средств является весьма сложной задачей.

Усовершенствованный метод кооперативного использования измерений псевдодальностей (ASP)

По сравнению с SP метод ASP гораздо менее требователен к необходимому оборудованию инфраструктуры. Вместо дорогих лазерных дальномерных устройств здесь можно использовать менее точные измерения дальности, получаемые с помощью радиодальномерных технологий, основанных на анализе интенсивности принимаемого сигнала или времени его поступления. Кроме того, доступность кооперативных измерений псевдодальностей возрастает с увеличением диапазона измерений. Это означает, что ASP позволяет поддерживать позиционирование, когда SP не работает из-за отсутствия измерений относительного положения.

Далее рассматривается ситуация с наблюдением трех видимых спутников и, следовательно, возможностью измерения трех псевдодальностей до них. Отсутствующее четвертое измерение ρ_c поступает от одного автомобиля сети (V_c) в зоне доступности связи. Считается, что V_c «видит» не менее четырех спутников и, следовательно, способен оценить свое местоположение и ошибки тактового генератора приемников. Переданное им измерение ρ_c представляет собой измерение псевдодальности с поправкой на внутреннюю ошибку тактового генератора приемника, и, следовательно, это реальное измерение дальности. В целом, сообщение, полученное от V_c , состоит из всех доступных измерений расстояний ГНСС, оцененного положения транспортного средства $\hat{r}_c$, а также расстояния между транспортными средствами $\tilde{d}$, измеренного радиодальномерным устройством. Последнее не является обязательным, но рекомендуется. Предполагается, что скорость обмена данными соответствует скорости обновления информации ГНСС. Поэтому устройства связи, коммуникационные протоколы, задержки, потери сообщений и т.п. в дальнейшем не рассматриваются.

Основная идея метода ASP состоит в том, что вектор относительного положения уточняется с помощью итерационного алгоритма позиционирования. Первый этап состоит в оценке положения в соответствии с описанным подходом Ньютона – Рафсона – уравнения (3) и (4). В процессе оценивания используются три измерения псевдодальности и четвертое измерение дальности ГНСС, полученное от другого транспортного средства сети:

$$\begin{pmatrix} \Delta \tilde{\rho}_1 \\ \Delta \tilde{\rho}_2 \\ \Delta \tilde{\rho}_3 \\ \Delta \tilde{\rho}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\vec{u}_1^T & 1 \\ -\vec{u}_2^T & 1 \\ -\vec{u}_3^T & 1 \\ -\vec{u}_c^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \vec{r}_p \\ \Delta c \delta t_p \end{pmatrix} + \vec{e}_p. \quad (7)$$

В результате получаем оценку начального положения $\hat{\vec{r}}_{p,init}$, погрешность которой зависит не только от обычных погрешностей измерений псевдодалностей $\vec{e}_p$, но и от истинного расстояния между V_p и V_c . Так как ρ_c относится фактически к местоположению «сотрудничающего» автомобиля, эта погрешность неизбежно увеличивается с расстоянием.

Второй этап метода ASP заключается в итерационном повышении точности позиционирования и, следовательно, является сердцем алгоритма. Рис. 1 иллюстрирует первый этап итерации. Отправной точкой является предположительно неадекватная оценка начального положения $\hat{\vec{r}}_{p,init}$. Эта оценка вместе с переданной оценкой положения «сотрудничающего» автомобиля $\hat{\vec{r}}_c$ служит для оценивания вектора относительного положения, направленного от V_c к V_p :

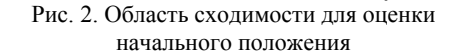
$$\hat{\vec{d}} = \hat{\vec{r}}_{p,init} - \hat{\vec{r}}_c. \quad (8)$$

В принципе, есть две возможности для модификации процесса оценивания. Поскольку известно, что используемое измерение расстояния ρ_c на самом деле представляет собой расстояние между спутником и V_c , наиболее интуитивный подход – уточнить ρ_c . С другой стороны, также можно оставить ρ_c без изменений, а вместо этого, сместить положение соответствующего виртуального спутника. Метод ASP основан на виртуальном перемещении общего спутника, а именно:

$$\vec{r}_{s_c} = \vec{r}_{s_c} + \hat{\vec{d}}. \quad (9)$$

Соответственно, это приводит к изменению единичного вектора $\vec{u}_c$ и, следовательно, к новой оценке положения. Эта процедура повторяется до сходимости оценки местоположения V_p или пока не достигается максимальное число шагов итераций.

Точность начальной оценки положения $\hat{\vec{r}}_{p,init}$ является решающей для сходимости метода ASP. В соответствии с уравнением (9) положение виртуального спутника $\vec{r}_{s_c}$ является результатом смещения на вектор относительного положения $\hat{\vec{d}}$, который, в свою очередь, зависит от начальной оценки положения $\hat{\vec{r}}_{p,init}$. Оптимальное положение виртуального спутника есть любая точка на поверхности сферы L радиусом ρ_c с центром в неизвестном истинном местоположении протагониста $\vec{r}_p$. Пока смещение местоположения спутника дает меньшее расстояние до L , можно ожидать улучшения оценки положения на следующем шаге итерации. Дальнейшие смещения будут приближать виртуальный спутник к L , пока в конце концов не будет достигнута сходимость местоположения. Соответственно для комбинации $\hat{\vec{r}}_{p,init}$ и $\vec{r}_{s_c}$, представленных на рис. 1, а, метод ASP обеспечивает непрерывное улучшение оценки местоположения.



Поскольку смещению спутника соответствует вектор относительного поло-

Для того чтобы увеличить вероятность успешного применения метода ASP,

проксимацией положения $\vec{r}_{s_c}$ совместного спутника.

На втором этапе для повышения точности начальных оценок положения $\hat{r}_p$ внутри сферы используется измеренное расстояние между транспортными средствами $\tilde{d}$ для того, чтобы нормализовать оцененный вектор относительного положения $\hat{d}$:

$$\hat{d}_c = \frac{\hat{d}}{\|\hat{d}\|} \cdot \tilde{d}. \quad (10)$$

В результате проекции и нормализации каждая оценка положения вне пунктирной линии попадает в область сходимости, приведенного на рис. 2.

Обе эти меры не ограничены этапом начальной оценки, они проводятся для оценки положения на всех итерациях. Хотя только начальная оценка $\hat{r}_{p,init}$ имеет решающее значение для функциональности метода ASP, однако имеет смысл использовать такие меры для всех итераций, поскольку это обеспечивает более быструю сходимость.

Выбор спутника

Чем точнее оценка исходного положения, тем более эффективным является метод ASP. Если в распоряжении «сотрудничающего» автомобиля имеется более чем одно дополнительное измерение псевдодальности, которым не обладает протагонист, то в этом случае наиболее важно правильно выбрать последовательность обработки данных. Это значит, что для оценки начального положения надо использовать именно то измерение псевдодальности, которое обещает наиболее высокую точность. Затем для следующей псевдодальности получается уже приемлемая по точности оценка положения. Таким образом, при правильной последовательности можно успешно использовать совместные псевдодальности, имеющие небольшие области сходимости.

Чтобы оценить различные совместные псевдодальности, рассмотрим два аспекта: высоту спутника и геометрический фактор (Geometric Dilution of Precision – GDOP). Основная часть погрешности начального положения вызвана не погрешностями псевдодальности, например, из-за атмосферных задержек, многолучевости и т.д. В уравнении (8) измерение ρ_c используется в качестве расстояния между совместным спутником и автомобилем V_p , в то время как на самом деле это расстояние до V_c . С одной стороны, разница между обоими расстояниями уменьшается с уменьшением расстояния между автомобилями V_p и V_c . Таким образом, если в зоне доступности связи находятся несколько транспортных средств, то для определения оценки начального положения используется наиболее близкое из них. С другой стороны, с увеличением углов возвышения спутника разница между двумя расстояниями уменьшается. Плоскость, содержащая V_p , V_c и совместно используемый спутник, при этом перпендикулярная плоскости север-восток, представляет собой наихудший случай. Для этой комбинации разность между двумя расстояниями, зависящими от высоты, наибольшая. Максимальная разность между двумя расстояниями соответствует

расстоянию между транспортными средствами $\|\vec{d}\|$, когда угол возвышения θ равен нулю (см. рис. 1). Отклонение, зависящее от высоты, в процентах определяется по формуле

$$q(\theta) = \frac{\rho_p - \rho_c}{\|\vec{d}\|}. \quad (11)$$

При $d \ll \rho_p$ уравнение (11) можно преобразовать в следующее:

$$q(\theta) = \frac{\rho_p - \sqrt{\rho_p^2 - 2 \cdot d \cdot \rho_p \cdot \cos(\theta)}}{\|\vec{d}\|}. \quad (12)$$

Помимо угла возвышения θ дополнительным критерием выбора псевдодальности является значение GDOP, поскольку оно тоже является мерой повышения точности. Вычисление значения GDOP требует аппроксимации положения пользователя. В связи с большим расстоянием до спутников смещение на несколько сот метров существенно не влияет на значение GDOP. По этой причине использование переданного положения $\hat{r}_c$ вместо неизвестного положения протагониста $\hat{r}_p$ оправдано. Таким образом, вычисляется и хранится значение GDOP группировки, включающей все доступные для протагониста спутники и каждый совместно используемый спутник.

В результате анализа экспериментальных данных зависимости ошибок положения от $q(\theta)$ и GDOP имеем модель:

$$e_{\text{RMS}}(\text{GDOP}, \theta) \approx \text{GDOP} \cdot a \cdot \exp\left(\frac{q(\theta)}{\tau}\right) \cdot \sigma_{\text{URE}}, \quad (13)$$

где $a = 0.41$ и $\tau = 0.30$.

Эта грубая оценка является критерием для принятия решения при расстановке приоритетов в списке совместно используемых спутников. Благодаря последовательному улучшению оценки местоположения можно достичь области сходимости для спутников, которые сначала из нее выпадали. Это, в свою очередь, увеличивает количество доступных совместно используемых спутников и, следовательно, дает благоприятную геометрию спутников, о чем свидетельствует значение GDOP. Типичная последовательность оценки положения методом ASP показана на рис. 3.

В соответствии со списком приоритетов измерения трех совместных спутников включены последовательно в процесс оценивания. Таким образом, при каждом дополнительном измерении происходит улучшение точности позиционирования. Несмотря на все меры, невозможно полностью исключить того, что начальные оценки положения окажутся вне области сходимости. Пример показан на рис. 3. В этом случае очень важно обнаружить ухудшение точности позиционирования. Простой, но эффективный способ сделать это основан на использовании измеренного расстояния между транспортными средствами V_p и V_c . Из набора оценок положения всех совместных спутников и шагов итераций для окончательного решения в выборе положения $\hat{r}_{p,fin}$ выбирается та оценка, в которой оцененное расстояние ближе всего к измеренному расстоянию $\tilde{d}$, а именно:

$$\hat{\vec{r}}_{p,fin} = \min_{\hat{\vec{r}}_p} \left(\left\| \hat{\vec{r}}_p - \hat{\vec{r}}_c \right\| - \tilde{d} \right). \quad (14)$$

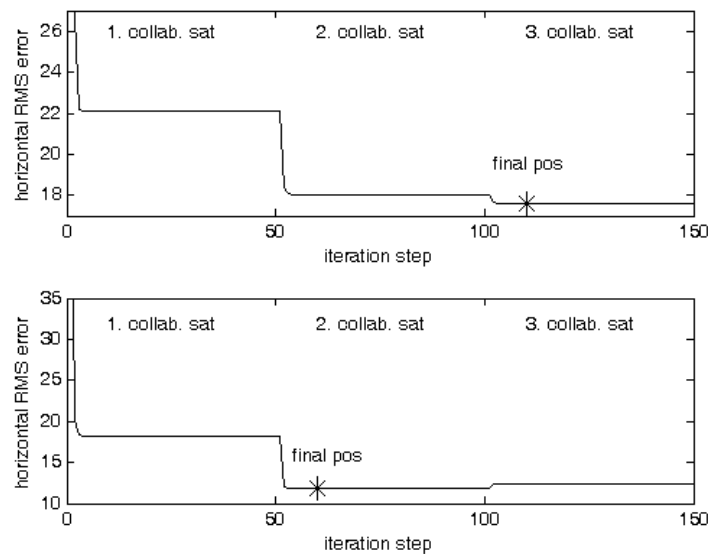


Рис. 3. Улучшение точности определения местоположения с каждым совместно используемым спутником и выбор окончательного положения: Collab. sat – совместно используемый спутник; Final pos – окончательное положение; Iteration step – шаг итерации; Horizontal RMS error – СКО горизонтальной составляющей

На рис. 3 выбранные окончательные положения отмечены звездочками. Ухудшение оценки положения из-за использования псевдодальностей от «неподходящего» спутника можно предотвратить, используя соотношение (14).

Анализ результатов моделирования

Функционирование метода ASP сильно зависит от группировки спутников. Следовательно, для статистически достоверного анализа важно рассмотреть различные ситуации. Это обеспечивается моделированием с помощью метода Монте-Карло на основе реальных данных альманаха спутников. Реалистические измерения псевдодальности вырабатываются специализированной программой, в которой используется моделирование ошибок псевдодальности в соответствии с [16]. Таким образом, различные виды ошибок (например, ионосферные задержки, тропосферные задержки и т.д.) моделируются отдельно, давая в целом стандартное отклонение, эквивалентное погрешности измерения дальности $\sigma = 6,2$ м. Полученные положения $\vec{r}_c$ основаны на моментальном позиционировании с использованием всех имеющихся (7–9) спутников.

Как и в исследованиях по навигации в закрытых помещениях [17, 18] была определена модель погрешностей времени прихода сигнала (Time of Arrival) при измерении расстояния. С учетом того, что постоянная погрешность измерения доходит до 100 м [19] и далее увеличивается в зависимости от фактического расстояния, график погрешностей измерения расстояний между автомобилями представлен на рис. 4.

Для статистической достоверности проведено моделирование с участием 10 различных группировок спутников. Кроме того, исследованы все перестановки трех непосредственно доступных для протагониста спутников из набора n дос-

тупных спутников, т. е. $\binom{3}{n}$. Таким образом, в общей сложности количество выборок при моделировании с помощью метода Монте-Карло вычисляется следующим образом:

$$n_{Sim} = \left[3 \cdot \binom{7}{3} + 5 \cdot \binom{8}{3} + 2 \cdot \binom{9}{3} \right] \cdot 30 = 16590. \quad (15)$$

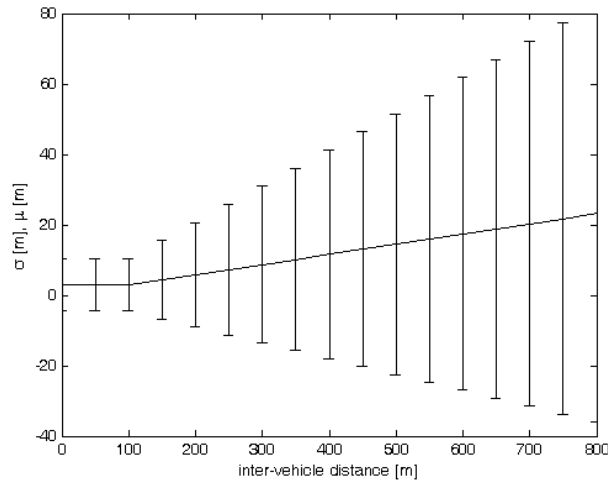


Рис. 4. Моделированные погрешностей измерения расстояний между автомобилями (Inter-vehicle Distance)

В статическом тесте сопоставляются быстродействие метода ASP и трех различных кооперативных методов:

- *Трилатерация*. Измеренные расстояния между транспортными средствами и переданные положения всех совместных транспортных средств используются в оценке положения методом наименьших квадратов в соответствии с принципом трилатерации.
- *Редуцированный метод наименьших квадратов* (Reduced Least-Squares – RLS). Оценивание положения проводится методом наименьших квадратов для вектора состояния, включающего две горизонтальные составляющие положения и ошибку тактового генератора.
- *Автомобиль-псевдоспутник* (Pseudolite Vehicle – PV). «Сотрудничающие» транспортные средства рассматриваются как спутники. Это означает, что в процессе оценивания вместо псевдодальности и положения спутника используются расстояние между транспортными средствами и положение «сотрудничающего» транспортного средства. Метод PV представляет собой совокупность обычного спутникового позиционирования и метода трилатерации.

Истинные расстояния до пяти «сотрудничающих» транспортных средств соответствуют – 50, 80, 150, 300 и 500 м. Результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло приведены в таблице. Для того чтобы оценить погрешность позиционирования, в таблице также приводятся «теоретические» значения соответствующих величин, которые получены на основании оценки погрешности позиционирования при использовании информации от всех (т.е. 7-9) спутников.

Поскольку методом RLS не определяется высота положения, трехмерная среднеквадратическая ошибка (СКО) не имеет значения. Большая разница между средним и медианным значением является признаком возникновения многочисленных выбросов, вызванных недостатками геометрической группировки спутников. Горизонтальная погрешность метода PV меньше, чем погрешность алгоритма трилатерации, при этом погрешность трехмерного положения выше более чем на 6 м.

СКО различных подходов кооперативного позиционирования

	Контрольное значение [м]	RLS [м]	Трилатерация [м]	PV [м]	ASP [м]
Погрешности определения горизонтального положения (среднее / медиана)	5.8 / 5.9	44.2/16.1	21.0 / 18.4	16.4/16.1	14.3/11.6
Погрешности определения трехмерного положения (среднее / медиана)	12.1 / 12.2	-/-	21.7 / 19.0	28.0/27.2	17.7/15,5

Самая высокая точность определения положения из всех методов совместно-го позиционирования обеспечивается с применением метода ASP. Что касается средней горизонтальной СКО, она улучшается на 30% по сравнению с трилатерацией и на 10% по сравнению с методом PV. Медианные значения улучшаются в еще большей степени. Это показывает, что позиционирование методом ASP также дает некоторые отклонения. Уменьшение погрешности трехмерного позиционирования составляет 18 и 38% по сравнению с методами трилатерации и PV соответственно.

На сегодняшний день изучена ситуация только с тремя спутниками в зоне видимости. В этом случае невозможно получить информацию о положении обычным оцениванием. Хотя при четвертом видимом спутнике позиционирование снова становится возможным, достижимая точность зависит от плохой геометрии спутников.

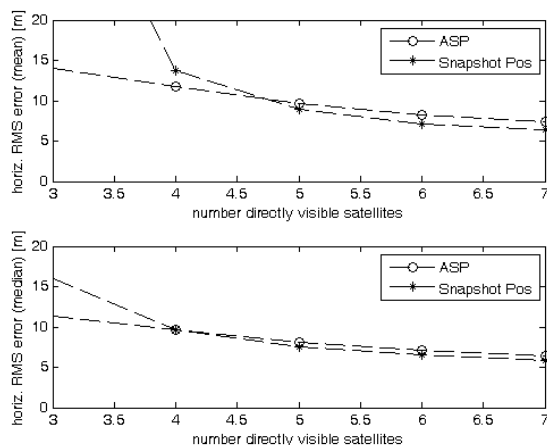


Рис. 5. Погрешности определения горизонтального положения в зависимости от количества видимых спутников

На рис. 5 показано сравнение ошибок при позиционировании с четырьмя спутниками в зоне видимости и при использовании метода ASP, но также с четырьмя спутниками.

Моделирование движения в городских условиях

Автомобильная навигация производится, как правило, с использованием интегрированной системы навигации, которая объединяет инерциальную навигацию и ГНСС. Таким образом, измерения ГНСС используются для коррекции непрерывно поступающих данных инерциальной навигационной системы (ИНС). Отсутствие измерений ГНСС приводит за короткое время к сильно растущей погрешности определения положения вследствие погрешностей датчиков ИНС. В частности, проблемы возникают в слабо связанных интегрированных навигационных системах ГНСС/ИНС. Поскольку от ГНСС поступают оценки положения, это требует наличия в поле зрения по крайней мере четырех спутников. Часто, особенно в условиях города, коррекция невозможна. В таком случае для определения положения используются кооперативные методы.

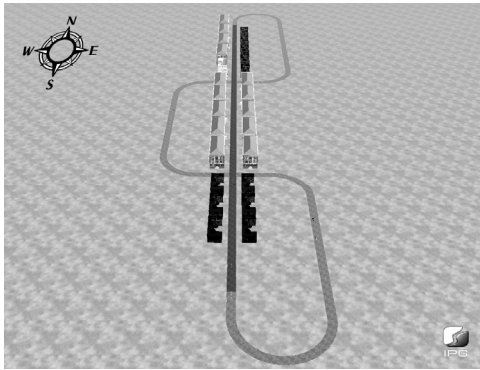


Рис. 6. Моделирование участка городской улицы

Для того чтобы оценить потенциал метода ASP в таких ситуациях, было проведено моделирование участка городской улицы. С этой целью использовалась программа *CarMaker* [20], которая позволяет реалистично моделировать динамику транспортного средства и соответствующие измерения датчиков, таких как акселерометр, гироскоп и одометр. Кроме того, получены натурные данные ГНСС, включающие прерывания сигнала вследствие затенения зданиями, а также измерения радиодальномерными методами.

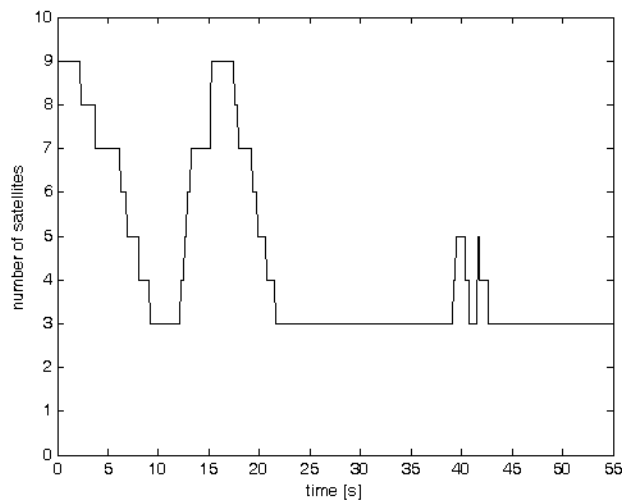


Рис. 7. Количество наблюдаемых спутников за время моделирования

На рис. 6 показана траектория движения при испытании (темная прямая линия). Статистика количества видимых спутников за время моделирования длительностью 55 с представлена на рис. 7. С двух сторон 700-метрового пути стоят три здания, каждое высотой 30 м. Помимо протагониста на этом участке дороги равномерно распределены семь потенциально «сотрудничающих» транспортных средств. Максимальная дальность связи – 185 м.

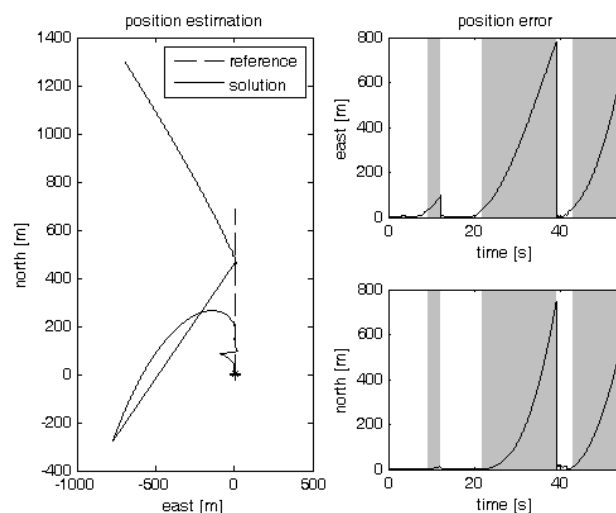


Рис. 8. Стандартное решение, полученное слабосвязанной системой

Стандартное решение получено на основе слабосвязанной системы с фильтром Калмана (рис. 8). В основе такого решения лежит обычное определение положения в соответствии с (3) и (4). Области, где доступны менее четырех спутников, выделены серым цветом, и, следовательно, решение здесь получено только с использованием инерциальной системы. Из-за ошибок датчиков точность положения быстро ухудшается.

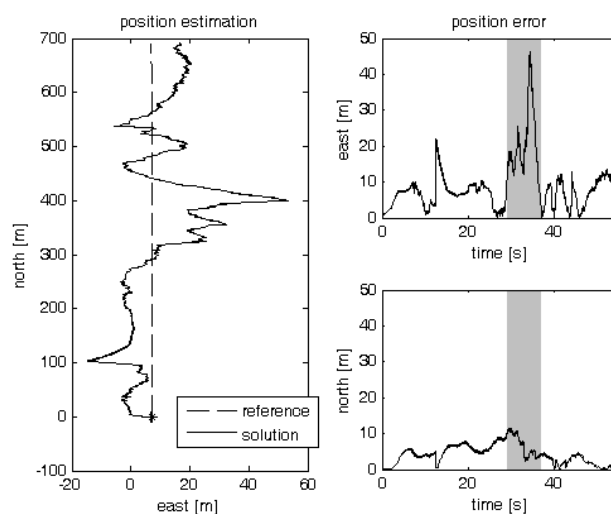


Рис. 9. Решение, полученное слабосвязанной системой с использованием метода ASP

Тот же тестовый проезд проводился для слабосвязанной системы с использованием метода ASP. Результаты представлены на рис. 9. Кооперативный метод ASP используется при определении местоположения в течение всего времени моделирования. СКО горизонтального положения – менее 15 м, однако она сильно зависит от количества кооперативно использующихся транспортных средств, находящихся в пределах доступной связи. Здесь серым цветом показана

на область, когда всего один автомобиль находился в зоне связи. За пределами этой зоны СКО горизонтальной составляющей погрешности значительно меньше. Она составляет менее 10 м.

Выводы

В этой статье представлен усовершенствованный метод кооперативного использования измерений псевдодальностей (ASP). Это новый подход кооперативного определения положения, основанный на данных ГНСС, который позволяет улучшить определение местоположения транспортных средств при неблагоприятных условиях приема сигнала с привлечением измерений псевдодальностей ГНСС, полученных от автомобилей, находящихся в зоне связи. Вместо применения дорогостоящего оборудования для определения относительного положения между «сотрудничающими» автомобилями этот подход позволяет обойтись измерениями дальности низкой точности, которые получают радиодальномерными методами.

Алгоритм ASP состоит из оценки положения с использованием метода наименьших квадратов с применением итеративного алгоритма, использующего информацию от соседних автомобилей. Сравнение метода ASP с различными кооперативными алгоритмами указывает на то, что погрешности определения положения уменьшаются на несколько метров. Кроме того, моделирование движения на участке городской улицы доказывает возможность применения метода ASP в сочетании с фильтром интегрированной навигационной системы. Использование фильтра Калмана в слабосвязанной интегрированной системе позволяет уменьшить погрешности положения менее чем до 15 м, в то время как обычная система не смогла обеспечить удовлетворительное решение из-за отсутствия в зоне видимости достаточного количества спутников. Метод ASP не только улучшает точность определения положения, его особенностью в первую очередь является то, что он дает возможность оценить положение транспортных средств в условиях города.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zeadally, S., Hunt, R., Chen, Y., Irwin, A., and Hassan, A.,** Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Status, Results, and Challenges, *Telecommunication Systems*, 2010, pp. 1--25.
2. **Alam, N., Balaei, A., and Dempster, A.,** Range and Range-Rate Measurements Using DSRC: Facts and Challenges, 2009.
3. **Caffery, J.J. and Stuber, G.L.,** Overview of Radiolocation in CDMA Cellular Systems, *IEEE Communications Magazine*, 1998, vol. 36, no. 4, pp. 38--45.
4. **Tan, H.-S. and Huang, J.,** DGPS-Based Vehicle-to-Vehicle Cooperative Collision Warning: Engineering Feasibility Viewpoints, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, vol. 7, no. 4, pp. 415--428.
5. **Benslimane, A.,** Localization in Vehicular Ad Hoc Networks, 2005.
6. **Drawil, N.M. and Basir, O.,** Intervehicle-Communication-Assisted Localization, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 678--691.
7. **Quebe, S., Campbell, J., DeVilbiss, S., and Taylor C.,** Cooperative GPS Navigation, 2010.
8. **Rife, J.,** Collaborative Vision-Integrated Pseudorange Error Removal: Team-Estimated Differential GNSS Corrections with No Stationary Reference Receiver, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, vol. 13, no. 1, pp. 15--24.
9. **Richter, E., Obst, M., Schubert, R., and Wanielik, G.,** Cooperative Relative Localization Using Vehicle-To-Vehicle Communications, in *IEEE*, 2009.
10. **Parker R. and Valaee, S.,** Cooperative Vehicle Position Estimation, 2007.
11. **Parker, R. and Valaee, S.,** Vehicular Node Localization Using Received-Signal-Strength Indicator, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, vol. 56, no. 6, pp. 3371--3380.

12. Tan, Y., Li, B., Scott, C., and Dempster, A., Positioning Techniques for Fewer Than Four GPS Satellites, in *Citeseer*, 2009.
13. Phatak, M., Chansarkar, M., and Kohli, S., Position Fix from Three GPS Satellites and Altitude: A Direct Method, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, vol. 35, no. 1, pp. 350--354.
14. Alam, N., Three Dimensional Positioning with Two GNSS Satellites and DSRC for Vehicles in Urban Canyons, *ION GNSS 2011*, 2011.
15. Berefelt, F., Boberg, B., Nygard, J., Strömbäck, P., and Wirkander, S., *Collaborative GPS/INS Navigation in Urban Environment*, 2004.
16. Rankin, J., *An Error Model for Sensor Simulation GPS and Differential GPS*, 1994.
17. Alavi, B., and Pahlavan, K., Modeling of the Distance Error for Indoor Geolocation, in *IEEE*, 2003.
18. Alsindi, N., Li, X., and Pahlavan, K., Performance of TOA Estimation Algorithms in Different Indoor Multipath Conditions," in *IEEE*, 2004.
19. Kukshya, V., Krishnan, H., and Kellum, C., Design of a System Solution for Relative Positioning of Vehicles Using Vehicle-To-Vehicle Radio Communications during GPS Outages," in *IEEE*, 2005.
20. IPG Automotive GmbH, <http://www.ipg.de/CarMaker.609.0.html?&L=1>

Abstract. A very promising method for coping with the increasing demands on position accuracy for vehicular networks is cooperative positioning. Instead of adding more and more sensors in a self-contained system this technique aims exploiting information which already exists. This paper addresses a new cooperative GNSS positioning approach which is referred to as Advanced Shared Pseudorange (ASP) method. It customizes broadcasted GNSS pseudorange measurements of collaborating vehicles in a way that they can be applied in standard positioning algorithms. Specifically, in urban environments the increased number of usable satellites improves position accuracy or even makes GNSS position estimation possible in the first place. Moreover, the adjustment of pseudoranges from collaborating vehicles only requires inter-vehicle distance measurements as provided by radio ranging techniques. Thereby hardware costs are kept to a minimum. The capability of the new approach is emphasized by a comparison with other cooperative algorithms and test results of a loosely coupled GNSS/INS position estimation for a simulated urban road-segment scenario.

Key words: cooperative positioning, vehicular ad-hoc networks (VANET), GNSS positioning