

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СВЕРХДЛИННЫХ КОГЕРЕНТНЫХ НАКОПЛЕНИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ОШИБОК МНОГОЛУЧЕВОСТИ В ПРИЕМНИКЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Предложен метод компенсации ошибок псевдодальности и псевдоскорости, вызванных эффектом многолучевости распространения сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Метод основан на улучшении разрешающей способности приемника потребителя в частотной области, что позволяет снизить влияние отраженных сигналов или даже полностью отделить прямой сигнал от помех. Применение метода компенсации ошибок многолучевости распространения сигнала заметно уменьшает погрешность определения координат потребителя. Метод был реализован в приемнике СРНС и апробирован как в модельных условиях с помощью симулятора СРНС, так и в реальных условиях плотной городской застройки.*

### Введение, постановка задачи

В условиях плотной городской застройки, в паркингах, в лесу или горах ошибки многолучевости распространения сигнала СРНС вносят основной вклад в погрешности определения координат потребителя. Эффект многолучевости возникает в тех случаях, когда на антенну приемника СРНС помимо основного сигнала поступают его отражения от рядом стоящих объектов (рис. 1).

Если потребитель движется с постоянной или переменной скоростью в районе источника отраженных сигналов, то имеют место быстро ме-

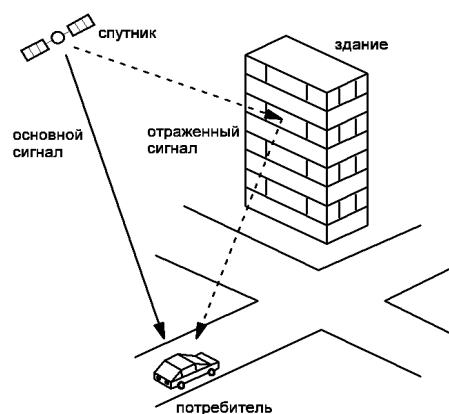


Рис. 1. Эффект многолучевости

**Михайлов** Николай Викторович. Кандидат физико-математических наук, Глава Представительства компании «Уайт Дварф Лимитед» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

**Поспелов** Сергей Сергеевич. Специалист представительства компании «Уайт Дварф Лимитед».

**Васильев** Михаил Васильевич. Кандидат физико-математических наук, директор по навигации Представительства компании «Уайт Дварф Лимитед».

**Юдакин** Дмитрий Евгеньевич. Инженер представительства компании «Уайт Дварф Лимитед».

**Глушков** Петр Валерьевич. Инженер представительства компании «Уайт Дварф Лимитед».

Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

няющаяся ошибка измерений псевдодальности и ошибка измерений псевдоскорости, пропорциональная скорости движения потребителя. В случае когда потребитель неподвижен, ошибка измерения псевдодальности есть медленно меняющаяся функция времени, а ошибка измерения псевдоскорости относительно мала. Отметим, что все сказанное выше верно, только если принят достаточно сильный прямой и несколько отраженных сигналов. Случай с полностью отраженными сигналами в данной работе рассматриваться не будет.

Существует несколько методов уменьшения ошибок измерений, вызванных многолучевостью:

- применение специальных антенн геодезического класса с низким коэффициентом усиления для малых углов места [4];
- применение двух антенн, расположенных на некотором расстоянии друг от друга;
- использование узкоапертурных измерителей, требующих, в свою очередь, более широкой додетекторной полосы приемника сигналов СРНС [5];
- применение фильтров, сглаживающих измерения псевдодальности по измерениям фазы.

Перечисленные выше методы эффективно работают для неподвижного потребителя при условии, что задержка переотраженных сигналов относительно прямого в линейной мере превышает 30-50 м. К недостаткам данных методов можно отнести то, что они либо заметно повышают стоимость аппаратуры, либо требуют стабильно сильного прямого сигнала в случае применения сглаживающих фильтров по фазе несущей. К тому же ни один из методов не компенсирует ошибок измерений псевдоскорости, вызванных многолучевостью при движении потребителя.

Целью данной работы является создание метода компенсации ошибок измерений псевдодальности и, в особенности, псевдоскорости, вызванных эффектом многолучевости распространения сигналов СРНС.

### **Метод сверхдлинных когерентных накоплений**

Анализ последних публикаций и экспериментальных исследований показывает, что погрешность, вызванная многолучевостью, имеет большой разброс и может достигать 100 и более метров в измерениях псевдодальности и 5 м/с и более в измерениях псевдоскорости [2, 3]. При движении потребителя в городских условиях такие параметры отраженных сигналов, как задержка, частота и мощность, быстро изменяются. Так же быстро может изменяться и мощность прямого сигнала за счет затенения его, например, зданиями. Важно отметить, что при движении в городских условиях характерны заметные доплеровские сдвиги между прямым и отраженными сигналами, а небольшие динамические ускорения потребителя позволяют уверенно прогнозировать изменение этих сдвигов между последовательными измерениями псевдодальности и псевдоскорости. Для снижения влияния эффекта многолучевости предлагается сузить пик взаимной корреляционной функции между принятым и опорным сигналами. Корреляционная функция может быть построена для различных значений задержки и доплеровского сдвига (частоты). Однако достаточным представляется сужение пика по оси частот, что улучшает разрешающую способность по скорости и позволяет снизить влияние отраженных сигналов или полностью отде-

лить прямой сигнал от помех при наличии достаточных доплеровских сдвигов между прямым и отраженными сигналами. Выполнить эту операцию можно путем увеличения времени когерентного накопления, естественным ограничением которого является длительность информационного символа, составляющая 20 мс как в GPS, так и в ГЛОНАСС. Однако анализ структуры навигационных сообщений СРНС показывает высокую временную корреляцию навигационных данных. Например, такая часть навигационной информации, как эфемериды, повторяется в течение длительного времени. Другая часть остается постоянной или может быть предсказана. В случае, когда данные невозможно предвычислить, их можно декодировать непосредственно в ходе обработки сигнала, при достаточной его мощности и сравнительно небольшом уровне помех. Это позволяет большую часть времени использовать сверхдлинные (более 20 мс) когерентные накопления, что благоприятно сказывается и на чувствительности приемника СРНС.

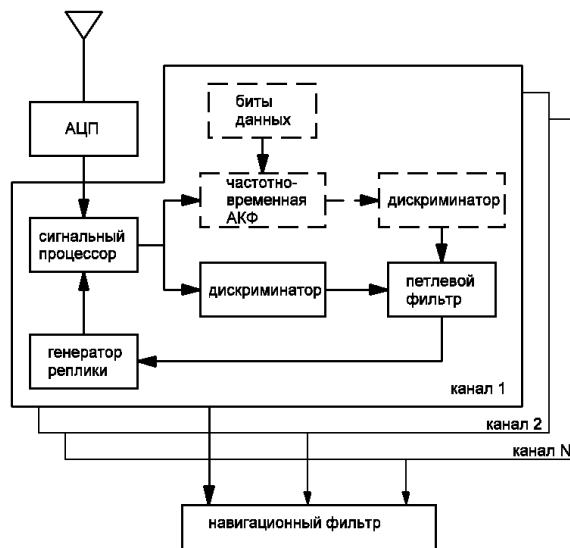


Рис. 2. Архитектура приемника

Дискриминатор вычисляет ошибки слежения за такими параметрами сигнала, как задержка, частота и фаза. Петлевой фильтр сглаживает шумы дискриминатора и подстраивает генератор опорной реплики. На основе канальных измерений навигационный фильтр вычисляет координаты потребителя, скорость и время.

Рассматриваемое применение метода сверхдлинных когерентных накоплений заключается в когерентной обработке навигационного сигнала длительностью, превышающей один информационный символ СРНС (20 мс), для выделения нужного корреляционного пика в частотно-временной области на фоне помех и переотражений. С этой целью в ходе приема навигационного сигнала снимается модуляция битами данных и вычисляется сетка мощностей (частота-задержка) (см. рис. 8). Снятие модуляции битами данных производится либо за счет предвычисления данных, когда есть такая возможность, либо поиском наиболее достоверного набора данных. В ходе обработки полученных двумерных сеток мощностей определяется наличие отраженных сигналов, выделяется корреляционный пик, с наибольшей вероятностью относящийся к прямому сигналу, и вычисляются ошибки слежения за несущей частотой и задержкой сигнала.

На рис. 2. сплошными линиями показана стандартная архитектура СРНС приемника. Антенный усилитель и понижающий преобразователь частоты на схеме не показаны. Пунктирными линиями обозначены блоки, реализующие метод сверхдлинных когерентных накоплений.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал промежуточной частоты в цифровой код. Сигнальный процессор осуществляет свертку входного сигнала с опорной репликой. Дискри-

Стоит отметить, что эффективность метода снижается в случае небольших доплеровских сдвигов между прямым и отраженными сигналами. Для приведенного случая в целях идентификации и компенсации отраженных лучей, планируется использовать метод кластерного анализа [6], модифицированный для динамического потребителя.

### Апробация метода сверхдлинных когерентных накоплений

Апробация метода проходила в несколько этапов. На первом функционирование предложенного метода моделировалось при различных частотно-временных и амплитудных соотношениях прямого и отраженного сигналов с помощью программного комплекса MatLab. Моделирование показало, что использование метода позволяет значительно уменьшить как псевдодальномерные, так и псевдоскоростные ошибки измерений, вызванные эффектом многолучевости. Также было показано, что можно найти время когерентного накопления, которое позволяет, с одной стороны, существенно компенсировать ошибки многолучевости, а с другой – не накладывает чрезмерных требований на такие ресурсы приемника СРНС, как память и быстродействие бортового процессора [1]. В ходе моделирования наилучшие результаты были получены при увеличении времени когерентного накопления до 100 мс. Стоит отметить, что увеличение времени когерентного накопления накладывает дополнительное ограничение на такую динамическую характеристику приемника, как максимальное ускорение. Для потребителя, движущегося в условиях города, характерны небольшие динамические ускорения, которые лежат в диапазоне  $\pm 1g$ . В таких условиях приемник обеспечивает уверенное слежение за параметрами навигационных сигналов, используя сверхдлинные когерентные накопления.

На втором этапе моделирование многолучевых эффектов проводилось с помощью симулятора СРНС. Создавались сценарии, в которых задавалось движение по прямоугольнику со скруглением поворотов и многолучевая помеха для одного из спутников. Параметры одного из сценариев приведены ниже:

Длина прямоугольника, м.....	500
Ширина прямоугольника, м.....	250
Максимальная скорость, м/с.....	20
Минимальная скорость (на повороте), м/с.....	3
Радиус поворота, м.....	20
Количество КА, шт.....	5
Мощности сигналов, дБГц.....	28
Мощность многолучевого сигнала, дБГц.....	25
Начальная задержка многолучевого сигнала, м.....	75
Разность доплеровских сдвигов прямого и отраженного сигнала, Гц.....	26
Время действия многолучевой помехи, с.....	15

Помеха включалась два раза с интервалом в 1 с на нижнем участке траектории (рис. 3). Движение осуществлялось по часовой стрелке.

При использовании серийного приемника СРНС компании Mstar Semiconductor (время когерентного накопления - 20 мс) и при заданных параметрах многолучевости, средняя ошибка измерения псевдодальности достигает 7 м (рис.4), а средняя ошибка измерения псевдоскорости достигает 2,8 м/с (рис.5). Отметим, что повышенный интерес к средней ошибке обусловлен последующим сглаживанием высокочастотных ошибок измерений.

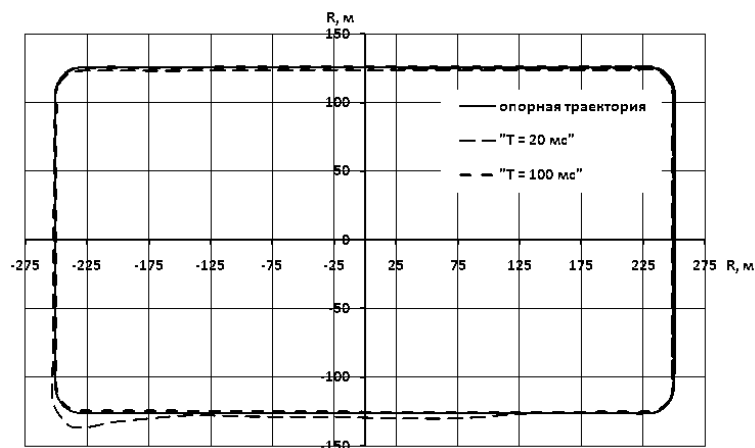


Рис. 3. Траектории движения потребителей для симуляционного сценария с многолучевостью

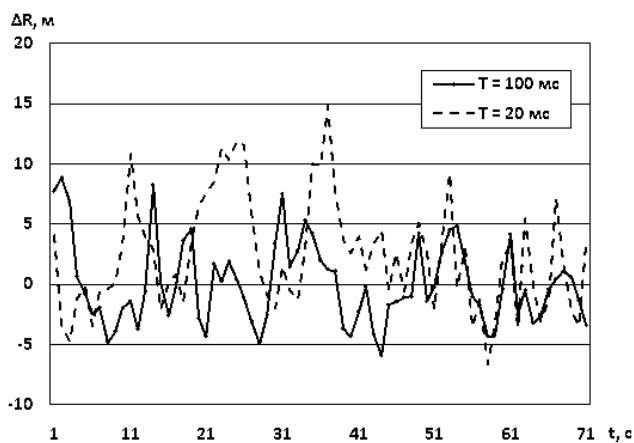


Рис. 4. Ошибки измерений псевдодальности

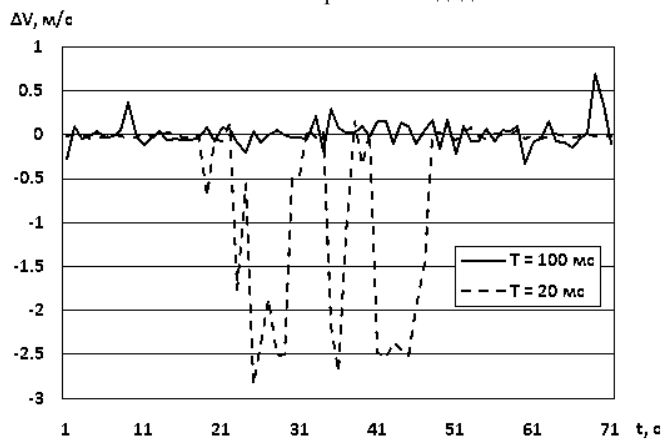


Рис. 5. Ошибки измерений псевдоскорости

Применение в том же приемнике СРНС предложенного метода полностью компенсирует ошибку многолучевости в измерениях псевдоскорости, снижает среднюю ошибку измерения псевдодальности до 1 м и делает вычисленную траекторию движения потребителя заметно ближе к опорной траектории, заданной в симуляторе СРНС (см. рис.3).



Рис. 6. Городская застройка  
ных городских условиях. Рассмотрим подробнее один из таких тестов. Часть маршрута потребителя проходила по узким, плотно застроенным улицам (рис. 6.).

Примыкающие к улице здания затеняют прямые сигналы со спутников и являются источником переотраженных сигналов.

На рис. 7. пунктирной линией обозначена траектория движения потребителя, вычисленная в ходе эксперимента серийным приемником СРНС. На том же рисунке сплошной линией показана траектория движения, полученная тем же приемником СРНС, только с использованием метода сверхдлинных когерентных накоплений.

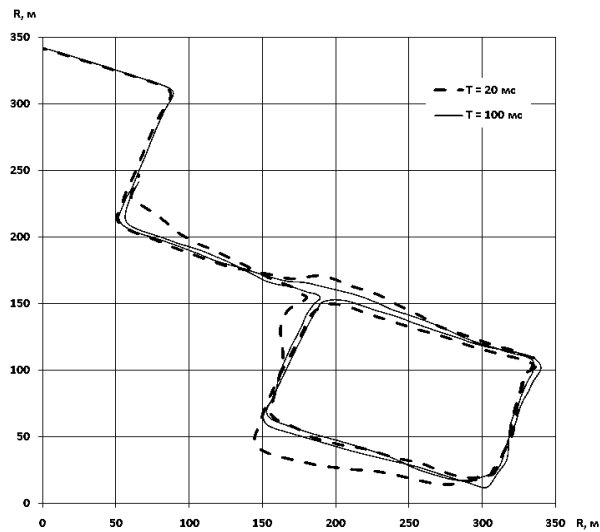


Рис. 7. Траектории движения потребителей

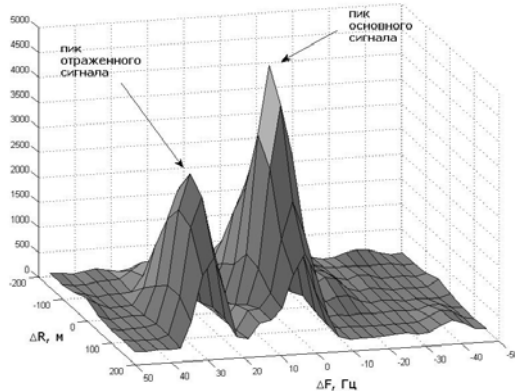


Рис. 8. Сетка мощностей (частота-задержка) накопленных за 100 мс

псевдодальности.

В рассмотренном выше сценарии имел место только один отраженный сигнал постоянной мощности. В реальных условиях приемник СРНС принимает вместе с основным множество отраженных сигналов, а мощности прямого и отраженных сигналов могут изменяться в большом диапазоне.

На следующем этапе апробации предлагаемого метода использовались записи сигналов с выхода АЦП СРНС приемника (см. рис. 2.), полученные при тестах приемника СРНС в реаль-

ных городских условиях. Очевидно, что в данном эксперименте предлагаемый метод существенно улучшает качество определения траектории движения потребителя с помощью приемника СРНС.

Сетка мощностей (частота-задержка) для одного из спутников с многолучевой помехой показана на рис. 8. Для времени когерентного накопления – 100 мс пик многолучевого сигнала разрешается относительно основного по частоте и не оказывает значительного влияния на измерения псевдоскорости и

Многочисленные проезды по улицам, дворам и вблизи высотных зданий показали, что компенсация ошибки многолучевости в измерениях псевдоскорости приводит к заметному улучшению траектории потребителя в тех местах, где активно срабатывал предлагаемый метод выделения нужного корреляционного пика в частотно-временной области на фоне помех и переотражений.

### **Заключение**

В заключение хотелось бы отметить некоторые важные преимущества предлагаемого метода по сравнению с упомянутыми во введении методами борьбы с многолучевостью: отсутствие требований на изменение архитектуры приемника СРНС; приемлемая загрузка бортового процессора; компенсация ошибок многолучевости в измерениях не только псевдодальности, но и в псевдоскорости; возможность использования как в GPS, так и в ГЛОНАСС.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **O'Driscoll.C., Lachapelle.G., Tamazin. M.** Combined GPS/GLONASS Receivers in Urban Environments, URL: [http:// www.gpsworld.com/transportation/road/dynamic-duo-10902,page\\_id=1](http://www.gpsworld.com/transportation/road/dynamic-duo-10902,page_id=1)
2. **Assessment** of Ground Accuracy and Multipath Effects for a Differential-GPS Ground Segment / G. Amabili, C. Carciofi, M. Frullone, M. Zanzi // Proceedings of the GNSS-2003. – The European Navigation Conference, 22–25 April 2003.
3. **Ionospheric** Delay Validation using Dual Frequency Signal from GPS at GEO Uplink Subsystem Locations / M.S. Grewal, W. Brown, P. Hsu, R. Lucy // ION GPS' 99 – 14 – 17 September, 1999. – Nashville, TN, USA.
4. **Analysis** of a choke ring groundplane for multipath control in Global Positioning System (GPS) / J.M. Tranquilla, J. P. Carr, H.M. Al-Rizzo.
5. **Theory** and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver / A.J. Van Dierendonck, P. Fenton, T. Ford.
6. **Метод** получения сверхбыстрого первого навигационного определения для радионавигационных приемников массового применения /М.В.Васильев [и др.] - Гироскопия и навигация. - 2011. - № 1. - С. 26-36.

**Abstract.** We propose a method to compensate the errors in pseudo range and Doppler shift measurements resulting from multipath propagation of GNSS signals. The method is based on improving the receiver frequency resolution, which reduces the multipath effect or even separates a Line of Sight (LOS) signal from a reflected one. Multipath mitigation significantly enhances the positioning accuracy. The method was implemented in a GNSS receiver and tested with GNSS simulator and in real urban canyons

**Key words:** multipath errors, GNSS.