

## ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕ МОДУЛИРУЮЩЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО СООБЩЕНИЯ СРНС

*Существует большое количество методов компенсации ошибок, вызванных многолучевым распространением сигналов. К ним относится метод сверхдлинных накоплений, который заключается в когерентной обработке навигационного сигнала длительностью, превышающей один информационный символ спутниковой радионавигационной системы. Для реализации сверхдлинного когерентного накопления необходимо знать модулирующие символы навигационного сообщения. В данной работе предлагается использовать навигационную информацию, доступную в приемнике потребителя, для предвычисления модулирующих символов.*

### Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) непрерывно развиваются. Совершенствуются космический сегмент и аппаратура потребителя. Одним из направлений развития приемников СРНС является обеспечение точности в сложных условиях. Так, в условиях плотной городской застройки на точность определения координат приемником СРНС существенное влияние оказывают ошибки, вызванные эффектом многолучевого распространения сигналов [1] (рис. 1). Существуют различные аппаратные и программные методы борьбы с многолучевостью [2]. Эти методы в основном применимы для неподвижных потребителей. Основным отличием области навигации подвижных объектов является наличие скорости их движения по отношению к земной поверхности, что приводит к появлению различия между доплеровскими сдвигами частот прямого и отраженного сигнала.

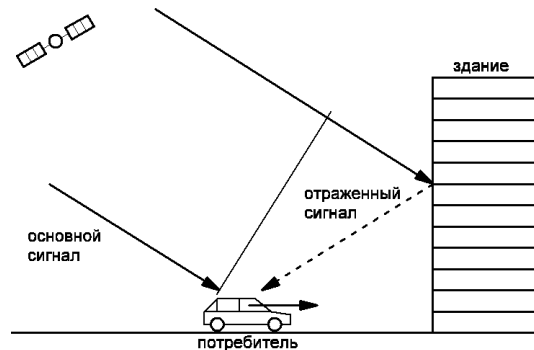


Рис. 1. Эффект многолучевости

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

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

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

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

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

В предыдущей работе [3] был предложен метод борьбы с многолучевостью для подвижного потребителя. Там же представлены результаты апробации этого метода, в том числе в реальных городских условиях. Метод основан на применении сверхдлинных когерентных накоплений, т. е. накоплений навигационного сигнала на интервале, длительность которого превышает один информационный символ СРНС (20 мс).

Реализация метода заключается в использовании сверхдлинных когерентных накоплений для построения двумерных сеток мощности (частота–задержка), в ходе обработки которых определяется наличие отраженных сигналов, выделяется корреляционный пик, с наибольшей вероятностью относящийся к прямому сигналу, и делаются измерения псевдодальности и псевдоскорости. Для реализации такого накопления необходимо знать модулирующие символы навигационного сообщения. Символы можно декодировать непосредственно в ходе обработки сигнала, при достаточной его мощности и сравнительно небольшом уровне помех. В настоящей работе в качестве основного способа определения символов предлагается предвычисление их на основе известной навигационной информации, доступной в приемнике СРНС.

### **Содержание и структура навигационных сообщений GPS и ГЛОНАСС**

На начальном этапе работы проводился анализ структуры навигационных сообщений GPS и ГЛОНАСС. В ходе рассмотрения состава сообщений были выделены части навигационных данных, пригодные для предвычисления.

Цифровая информация, передаваемая спутником СРНС, разделяется на оперативную и неоперативную [4, 5]. Оперативная навигационная информация относится к тому спутнику, с борта которого передается данный навигационный радиосигнал. Оперативная информация необходима для осуществления псевдоскоростных и псевдодальномерных измерений по каждому навигационному спутнику. Неоперативная информация (альманах системы) относится ко всем спутникам, входящим в состав СРНС. Альманах используется для планирования сеансов навигации и обновляется значительно реже, чем оперативная информация.

Кроме информационных элементов в сообщении СРНС присутствуют постоянные элементы, используемые для синхронизации. К таким элементам можно отнести метку времени (МВ) для ГЛОНАСС и преамбулу для GPS.

Структуры навигационных сообщений GPS и ГЛОНАСС очень схожи. Навигационное сообщение передается в виде потока цифровой информации. Структурно поток цифровой информации формируется в виде непрерывно повторяющихся суперкадров (рис. 2).

Суперкадр состоит из нескольких кадров, кадр состоит из нескольких строк (подкадров в терминологии GPS) цифровой информации. Длительность суперкадра у рассматриваемых СРНС различна. В ГЛОНАСС суперкадр имеет длительность 2,5 мин и состоит из 5 кадров длительностью 30 с. Каждый кадр состоит из 15 строк длительностью 2 с. В системе GPS длительность суперкадра составляет 12,5 мин и состоит из 25 подкадров длительностью 30 с. Каждый кадр состоит из 5 подкадров длительностью 6 с.

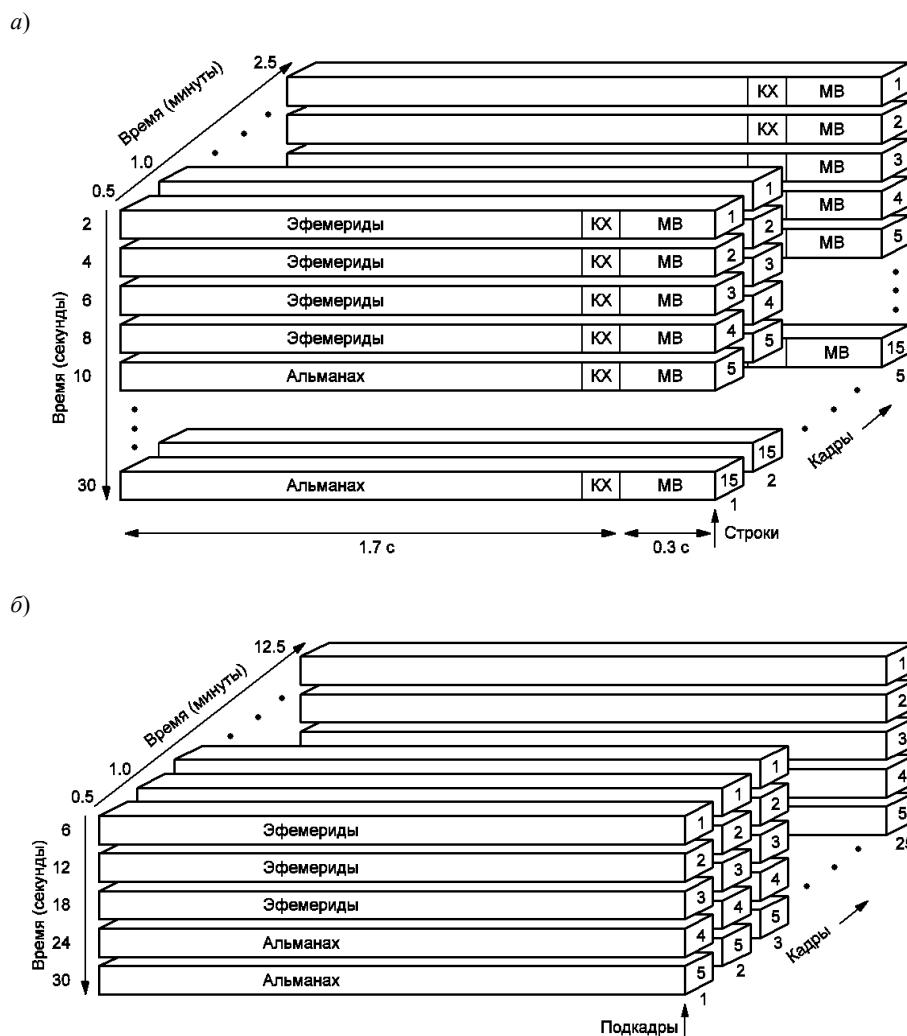


Рис. 2. Структура навигационного сообщения ГЛОНАСС (а) и GPS (б)

В GPS и ГЛОНАСС в пределах каждого кадра передается полный объем оперативной информации для данного навигационного спутника и часть неоперативной информации. Период повторения оперативной информации составляет 30 с для GPS и ГЛОНАСС. Так как оперативная информация занимает значительную часть сообщения и должна быть принята приемником СРНС для решения навигационной задачи, она может использоваться для предвычисления битов навигационного сообщения.

В оперативной информации можно выделить несколько частей. К первой части относится информация, период обновления которой составляет от 30 до 120 мин – это, в частности, эфемериды спутника. Тем не менее неизменность этой информации не гарантируется. Вторая часть – это информация, которая изменяется, но может быть предвычислена: время начала кадра внутри текущих суток для ГЛОНАСС и Z-count для GPS. Помимо информационных в сообщении присутствуют резервные биты и проверочные символы. Проверочные символы, могут быть рассчитаны по известным информационным и резервным битам.

Период повторения неоперативной информации определяется длительно-

стью суперкадра и составляет 12.5 мин для GPS и 2.5 мин для ГЛОНАСС. Моменты смены этой информации в рассматриваемых СРНС жестко не регламентированы.

На втором этапе работы анализировалась частота смены оперативных и неоперативных данных, а также исследовался алгоритм предвычисления данных. Для этого навигационная информация в течение длительного времени принималась с помощью GPS-ГЛОНАСС приемника и сохранялась на жестком диске компьютера для постобработки. В целях минимизации возможных ошибок при приеме данных использовалась геодезическая антенна, расположенная на крыше здания. Достоверность информации контролировалась с помощью проверочных символов, содержащихся в сообщении. Алгоритм предвычисления битов данных и программа статистической обработки наблюдений были первоначально реализованы и апробированы в среде MatLab.

### **Исследование ГЛОНАСС**

Структурной единицей сообщения ГЛОНАСС является строка (рис. 3). Каждая строка содержит 76 информационных бит (позиции 84-9) и 8 проверочных символов кода Хэмминга (КХ) (позиции 8-1). Эти биты передаются в относительном бидвоичном коде. Передача цифровой информации осуществляется старшими разрядами вперед. В каждой строке присутствует «холостой» символ (позиция 85), он необходим для реализации последовательного относительного кода при передаче навигационной информации по радиолинии. В качестве «холостого» символа принят «0». В конце каждой строки расположена метка времени в виде укороченной псевдослучайной последовательности. Она необходима для разделения строк навигационного сообщения, и ее длительность составляет 0.3 с.

Оперативная информация передается в первых четырех строках каждого кадра, она не изменяется в пределах суперкадра. Информация пятой строки в кадре относится к неоперативной информации, но так же, как и оперативная информация, она не изменяется в пределах суперкадра. Строки с шестой по пятнадцатую каждого кадра заняты неоперативной информацией (альманах) для 24 НКА системы: по пяти НКА в кадрах с первого по четвертый и по четырем НКА в пятом кадре. Неоперативная информация для одного НКА занимает две строки.

Алгоритм предвычисления навигационных данных включает в себя несколько шагов. На рис. 3 приведена структурная схема алгоритма. Справа отражены промежуточные результаты формирования строки навигационного сообщения. На первом шаге происходит выделение эфемеридной и частотно-временной информации из сообщения. Далее формируется информационное наполнение строк последующих кадров. Как было отмечено ранее, эфемеридная информация разделяется на 2 группы: неизменная часть и часть, которую можно достоверно предвычислить. В ходе формирования сообщения предвычисляется та часть информации, которая прогнозируется с высокой достоверностью, а остальная часть копируется без изменений. По полученному информационному наполнению строки вычисляются биты четности и добавляются к сообщению. Алгоритмы формирования битов четности приведены в интерфейсных контрольных документах [4, 5]. Далее сообщение претерпевает кодирование в относительный бидвоичный код. Формирование строки навигационного сообщения завершается после добавления метки времени.

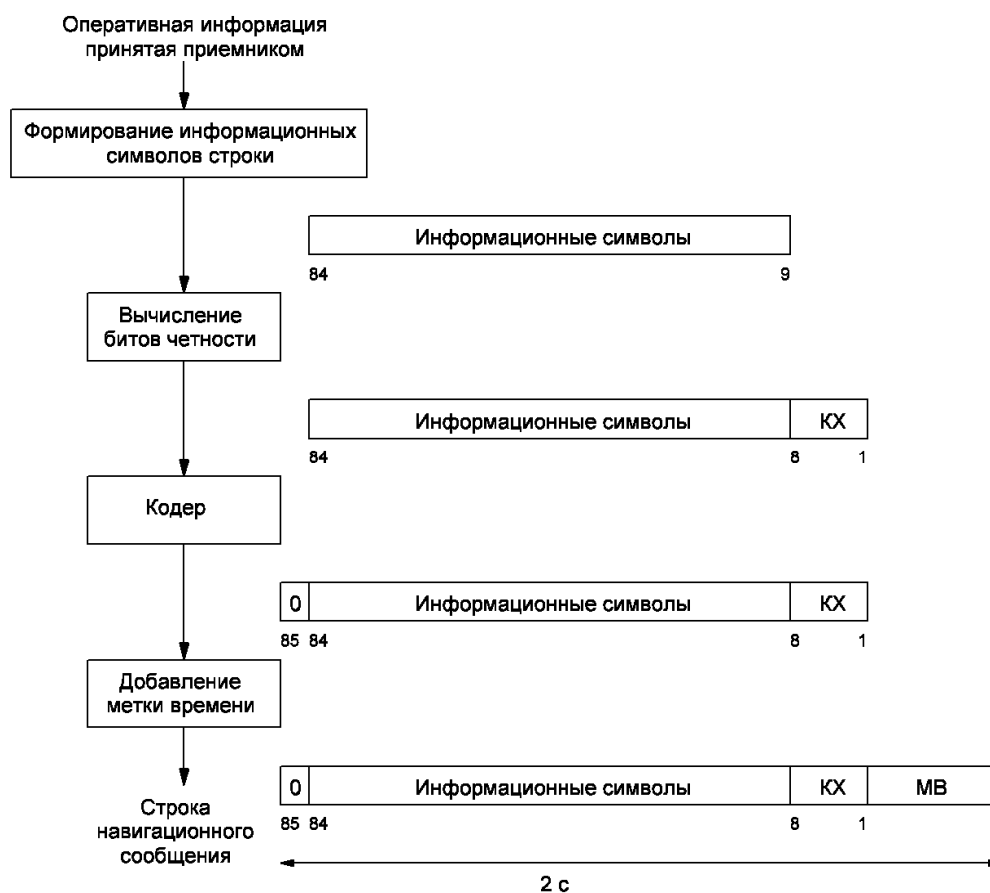


Рис. 3. Структурная схема алгоритма предвычисления навигационных данных

Экспериментальные исследования показали, что можно с высокой степенью достоверности предвычислить весь объем оперативной информации (строки 1–4) и системные данные (строка 5) с момента ее приема и до ее обновления. Вместе с неизменной частью неоперативной информации это составляет примерно 50% суперкадра. Также исследования показали, что смена неоперативной навигационной информации, прогнозирование которой вызывает наибольшую сложность, происходит не более 2 раз за время нахождения спутника в зоне видимости.

### Исследование GPS

В GPS оперативная информация передается в первых трех подкадрах каждого кадра и имеет постоянные источники информации. Подкадры 4 и 5 содержат неоперативную информацию и имеют различное информационное наполнение для каждого кадра. Каждый подкадр содержит 10 слов по 30 бит. Слово включает в себя 24 информационных бита и 6 проверочных символов. На рис. 4 в качестве примера приведено первое слово кадра. Оно содержит преамбулу для разделения подкадров.

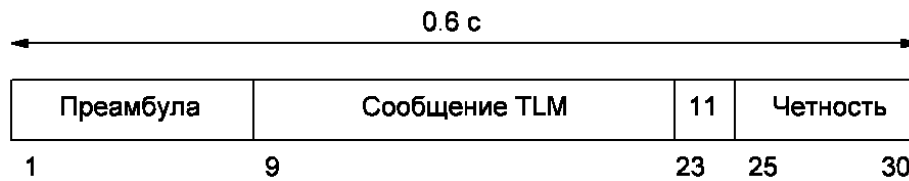


Рис. 4. Формат слова TLM

Алгоритм предвычисления навигационных данных GPS аналогичен алгоритму предвычисления данных для ГЛОНАСС. Основные отличия обусловлены особенностями формирования подкадров и вычислением проверочных битов GPS.

Экспериментальные исследования показали, что в GPS возможны изменения некоторых информационных полей с момента загрузки оперативной информации и до ее смены. В связи с этим возникали ошибки в предвычислении навигационных данных, которые приводили к ошибкам в вычислении битов четности. В ГЛОНАСС таких ситуаций не наблюдалось. В ходе исследования было установлено, что можно предвычислить до 60% навигационных данных. Так же, как и в ГЛОНАСС, смена неоперативной навигационной информации происходит не более 2 раз за время нахождения спутника в зоне видимости.

При моделировании метода сверхдлинных когерентных накоплений показано, что оптимальное время накопления соответствует длительности 5 информационных битов и составляет 100 мс [3, 6]. Между 5 битами данных возможны только 4 фазовых перехода и, соответственно, существует 16 вариантов модуляции битами данных. В том случае, когда нет возможности достоверно предвычислить 5 информационных бит, предпринимается попытка их декодирования непосредственно из накопления. Для этого в аппаратуре потребителя формируются пять 20-миллисекундных накоплений синфазных и квадратурных составляющих сигнала и производится 16-точечное дискретное преобразование Фурье для каждого из 16 вариантов битовой модуляции. Стоит отметить, что в данных условиях спектры мощности, вычисленные для накоплений с взаимно инверсными четными битами, будут отличаться лишь расположением спектральных составляющих. Таким образом, для 5-битовой последовательности необходимо вычислить 8 вариантов спектров мощности. В ходе обработки мощностных спектров определяется наличие многолучевой помехи, а также производится поиск наиболее достоверного набора данных. Алгоритм выбора битовой последовательности использует псевдоскоростные измерения и информацию о предвычисленных битах данных (при ее наличии).

При исследовании системы GPS показано, что возможны ошибки в прогнозировании навигационных данных. Поэтому метод сверхдлинных когерентных накоплений применяется только в случае детектирования многолучевой помехи, которая в городских условиях может действовать в течение нескольких секунд. Такие помехи приводят к появлению смещения в измерениях псевдодальности и псевдоскорости. В то же время ошибки в прогнозировании данных, как правило, однократны и приводят к появлению разовой ошибки дискриминаторов в петлях слежения [3] за псевдодальностью и псевдоскоростью. В этом случае дискриминатор псевдодальности, построенный на основе сверхдлинных накоплений, теряет свои преимущества. Ошибка дискриминатора петли слежения за скоро-

стью будет случайна. Фильтры, входящие в состав петель слежения, существенно снижают влияние однократных ошибок на псевдоскоростные и псевдодальномерные измерения. Таким образом, ошибки прогнозирования данных в незначительной степени снижают эффективность применения сверхдлинных когерентных накоплений.

### **Заключение**

Апробация способа предсказания модулирующей последовательности в модельных условиях симулятора СРНС и в реальных условиях плотной городской застройки показала, что объем предвычисленных битов данных достаточен для эффективного функционирования метода сверхдлинных когерентных накоплений. Недостаток метода заключается в невозможности предвычислить полный объем навигационных данных. В ходе проведенных исследований установлено, что возникновение ошибки предвычисления данных представляет собой редкое событие, которое незначительно снижает выигрыш от применения метода сверхдлинных когерентных накоплений.

Метод компенсации многолучевости на базе сверхдлинных когерентных накоплений совместно с алгоритмом предвычисления модулирующей последовательности были реализованы в ПО GPS-ГЛОНАСС приемника компании Mstar Semiconductor.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **Understanding** GPS principles and applications / Elliott D. Kaplan.
2. **Markus Irsigler, Günter W. Hein, Bernd Eissfeller** (2004): Multipath Performance Analysis for future GNSS Signals; ION NTM 2004, 26-28 January 2004, San Diego, CA.
3. **Михайлов, Н. В.** Использование метода сверхдлинных когерентных накоплений для устранения ошибок многолучевости в приемнике СРНС / Н.В.Михайлов [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2012. - № 1. - С. 85-91.
4. **Глобальная** навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный сигнал в диапазонах L1, L2 с открытым доступом и частотным разделением (редакция 5.1).
5. **ICD-GPS-200**, Revision C.
6. **O'Driscoll, C., G. Lachapelle and M. Tamazin** (2011) Dynamic Duo-Combined GPS/GLONASS Receivers in Urban Environments. GPS World, 22, 1, 51-58 (January Issue).

**Abstract.** GNSS development created numerous methods of compensating errors caused by multipath propagation of signals. One of them is the method of extra-long coherent accumulations. The basic idea behind the method is to coherently process the signal on a time span longer than one GNSS information symbol (20 ms). Knowledge of modulating symbols in the navigation message is mandatory to implement the method. The paper proposes to precompute the modulating symbols using navigation data available in the user's receiver.

**Key words:** multipath errors, GNSS