

Интерфейс системы ГЛОНАСС

Интерфейс системы подразумевает под собой перечень требований, описаний и технические стандарты сигналов, путем которых происходит передача информации от космического сегмента СНС ГЛОНАСС к сегменту потребителей. НКА используют для передачи информации шумоподобные фазоманипулированные сигналы, излучаемые на двух несущих частотах: $L1$ (1600 МГц) и $L2$ (1250 МГц). Навигационные измерения в двух диапазонах частот позволяют свести к минимуму ионосферные погрешности.

Интерфейс СНС ГЛОНАСС беззапросный, т.е. НКА излучают радиосигналы на частотах $L1$ и $L2$ непрерывно, и любой приемник потребителя, находящийся в зоне радиовидимости НКА, в произвольный момент времени может получать от него навигационную информацию в пассивном режиме.

В системе ГЛОНАСС используется частотное разделение каналов. Для НКА, находящихся на взаимно антиподных орбитальных позициях, можно применить одинаковые несущие частоты, поэтому при 24 действующих НКА минимальное число несущих частот в каждом диапазоне равно 12. Наземный или околоземный потребитель не может принимать сигналы одновременно от двух антиподных НКА, поэтому неоднозначность не возникает.

Космическому потребителю могут быть видны одновременно оба антиподных спутника. Но проблема неоднозначности достаточно легко решается за счет пространственной и доплеровской се-

лекции сигналов. Во-первых, невозможно создать такую широконаправленную антенну, которая была бы способна одинаково эффективно принимать сигналы спутников с разных направлений. Поэтому используют разные направленные приемные антенны, подключенные к разным приемникам [1]. Таким образом, происходит пространственное разделение сигналов.

Во-вторых, поиск несущей частоты каждого НКА производится в довольно узкой полосе частот (около 1 кГц) около прогнозируемого значения, с учетом доплеровского сдвига. Для наземных объектов максимальный доплеровский сдвиг может достигать ± 5 кГц, тогда как для низкоорбитальных космических объектов доплеровский сдвиг достигает ± 40 кГц, что позволяет однозначно идентифицировать сигнал НКА по доплеровскому сдвигу.

В СНС ГЛОНАСС излучаются навигационные сигналы двух типов: *стандартной точности* и *высокой точности*. Сигнал стандартной точности с тактовой частотой 0,511 МГц предназначен для использования гражданскими потребителями, находящимися в любой стране мира. Сигнал высокой точности с тактовой частотой 5,11 МГц модулирован специальным (закрытым) кодом и не рекомендован к использованию без согласования с МО РФ. На практике это означает, что аппаратура потребителя, способная использовать закрытый код высокой точности может быть изготовлена и передана потребителю только с разрешения МО РФ. Использование этой аппаратуры также регламентируется соответствующими нормативными актами и должностными инструкциями.

На частоте $L1$ излучаются сигналы стандартной и высокой точности, а на частоте $L2$ (до модификации) – только высокой точности. Таким образом, гражданским пользователям была недоступна двухчастотная коррекция ионосферной задержки распространения радиосигнала. В соответствии с планом модернизации СНС, на спутниках ГЛОНАСС-М реализовано предоставление сигнала стандартной точности и по каналу $L2$. Это позволяет увеличить точность определений для гражданских пользователей.

В системе ГЛОНАСС не используется режим преднамеренного ухудшения навигационных характеристик кода стандартной точности.

Физические параметры радиосигналов ГЛОНАСС

Частотный план. Каждому спутнику системы присвоен не только системный номер, но и определенный частотный канал. Перечень рабочих частот, соответствующих номерам частотных каналов, образует *план частот*.

Система глобального позиционирования ГЛОНАСС

Первоначальный частотный план был несколько иным, но было обнаружено, что излучение передатчиков НКА создает помехи наземным радиоастрономическим наблюдениям в полосе частот 1610,6...1613,8 МГц [25]. Кроме того, на первичной основе полоса частот 1610,6...1625,5 МГц выделена спутниковой службе распределения и службе мобильной космической связи при работе в направлении "Земля-борт", а полоса частот 1613,8...1626,6 МГц на вторичной основе выделена службе мобильной космической связи в направлении "борт-Земля".

Поэтому мероприятия по модернизации СНС ГЛОНАСС включают в себя, начиная с сентября 1993г., поэтапное смещение и сокращение занимаемого системой диапазона частот. Общее число рабочих частот сокращается до двенадцати. План частот, определенный на сегодняшний день интерфейсным контрольным документом [4], приведен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

План частот СНС ГЛОНАСС

Номер канала	Частота, МГц	
	L1	L2
-01	1601,4375	1245,5625
-02	1600,875	1245,1250
-03	1600,3125	1244,6875
-04	1599,75	1244,2500
-05	1599,1875	1243,8125
-06	1598,6250	1243,3750
-07	1598,0625	1242,9375
00	1602,00	1246,0
01	1602,5625	1246,4375
02	1603,125	1246,875
03	1603,6875	1247,3125
04	1604,25	1247,75
05	1604,8125	1248,1875
06	1605,375	1248,625
07	1605,9375	1249,0625

Номер канала	Частота, МГц	
	L1	L2
08	1606,5	1249,5
09	1607,0625	1249,9375
10	1607,625	1259,375
11	1608,1875	1250,8125
12	1608,75	1251,25
13	1609,3125	1251,6875

Ориентировочно до 2005 г. работающие спутники ГЛОНАСС будут использовать каналы с номерами $k = 1...12$. Каналы 0 и 13 будут использоваться как технологические. Так, канал 0 применяется наземным сегментом управления для проверки резервных спутников на орбите при восполнении орбитальной группировки. Начиная с 2005 г. все находящиеся в эксплуатации НКА ГЛОНАСС будут использовать каналы с номерами $k = -7...+4$, а каналы +5 и +6 будут использоваться лишь как технологические в ограниченные периоды времени (при восполнении орбитальной группировки).

Если вернуться к табл. 3.1, то можно видеть, что спутники, работающие на одном частотном канале, имеют системные номера, отличающиеся на 4. Например, это 17-й и 21-й спутники третьей орбитальной плоскости, использующие пятый частотный канал. Распределение номеров каналов между спутниками входит в состав альманаха системы (неоперативная информация).

Номинальные значения несущих частот для поддиапазонов L1 и L2 определяются выражениями:

$$f_{k1} = f_1 + k\Delta f_1,$$

$$f_{k2} = f_2 + k\Delta f_2,$$

где k – номер частотного канала; $f_1 = 1602$ МГц – несущая частота поддиапазона L1; $\Delta f_1 = 562,5$ КГц; $f_2 = 1246$ МГц – несущая частота поддиапазона L2; $\Delta f_2 = 437,5$ КГц.

Несущие частоты для каналов L1 и L2 когерентно формируются из одного источника опорной частоты на борту НКА. С точки зрения наземного наблюдателя номинальная частота этого источника составляет 5 МГц. Для компенсации релятивистских эффектов, возникающих при движении НКА по орбите, эта частота смещается на некоторую величину $\Delta f/f = -4,36 \cdot 10^{-10}$ или $\Delta f = -2,18 \cdot 10^{-3}$ Гц, и равна

4,99999999782 МГц. Это значение соответствует номинальной орбите высотой 19100 км.

Отношение несущих частот, излучаемых каждым НКА системы составляет $f_{k2} / f_{k1} = 7/9$. Допускается отклонение фактических значений несущих частот от номинальных значений на величину, не превышающую $2 \cdot 10^{-11}$. Навигационные сигналы стандартной точности с тактовой частотой 511 КГц занимают в частотном диапазоне L1 полосу шириной $(1598,0625 \dots 1605,375) \pm 0,511$ МГц (рис. 3.4). Эти значения отличаются от прежних значений, приведенных в ряде изданий, в связи с изменением частотного диапазона, отведенного для СНС ГЛОНАСС.

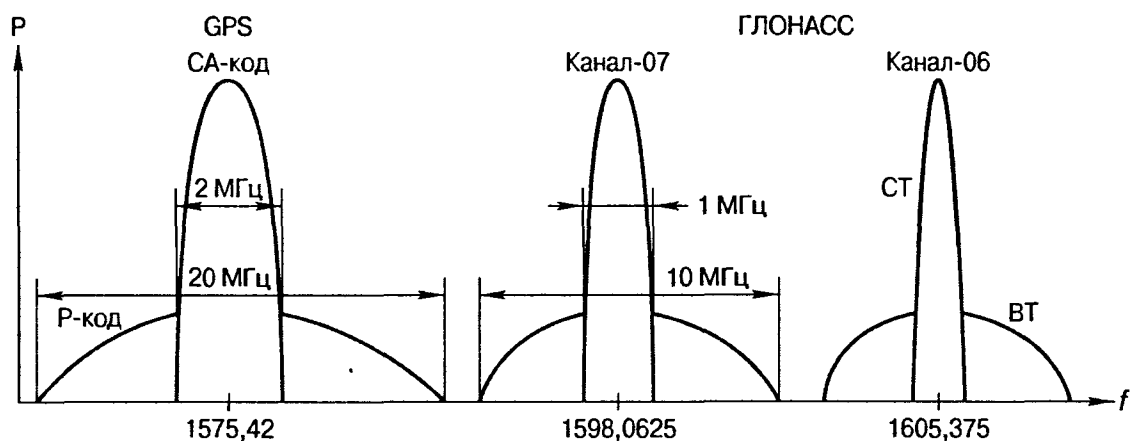


Рис. 3.4. Спектральные характеристики сигналов СНС ГЛОНАСС

Корреляционные потери. Корреляционные потери определяются как разность энергии сигнала, излучаемой передатчиком НКА в полосах

$$(1598,0625 \dots 1605,375) \pm 0,511 \text{ МГц}, (1242,9375 \dots 1248,625) \pm 0,511 \text{ МГц}$$

и энергии сигнала, принятой идеальным корреляционным приемником в тех же полосах частот. Корреляционные потери наиболее велики, когда несущая частота лежит на краях полосы частот (каналы -7 и $+12$). В этом случае корреляционные потери определяются следующими составляющими:

неидеальность модуляции в передатчике НКА – 0,6 дБ;

искажение формы сигнала в приемнике вследствие прохождения через фильтр 0,511 МГц – не более 0,2 дБ.

Для каналов с другими номерами корреляционные потери, обусловленные искажением формы псевдослучайного сигнала, уменьшаются по мере удаления от краев полосы частот.

Фазовые шумы несущей. Спектральная плотность фазовых шумов немодулированной несущей такова, что схема слежения за фазой, имеющая одностороннюю шумовую полосу 10 Гц, обеспечивает точность слежения за фазой несущей не хуже 0,1 радиан (среднеквадратическое значение).

Внеполосное излучение. Мощность внеполосного излучения за пределами полос шириной 0,511 МГц для частот $L1$ и $L2$ не превышает -40 дБ относительно мощности немодулированных несущих.

Внутрисистемные радиопомехи В случае полной системы в зоне видимости потребителя всегда находится более четырех НКА, излучающих радиосигналы. При обработке сигнала от одного спутника сигналы других спутников можно рассматривать, как помеху.

Разность частоты между каналами в диапазоне $L1$ равна 562,5 кГц, а в диапазоне $L2$ – 437,5 кГц и выбрана таким образом [2], что с учетом длительности элемента сигнала $\tau_s = 1/511$ мс, сигналы от иных спутников, находящихся в зоне радиовидимости, могут мешать приему полезного сигнала только вторым и последующими лепестками спектра. При этом отношение мешающего сигнала к полезному не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ или -48 дБ, что соответствует уровню внутрисистемных помех в СНС ГЛОНАСС.

Как отмечается в литературе [2, 22], внутрисистемные помехи в системе GPS значительно выше. В связи с тем, что в GPS используется кодовое разделение сигналов, уровень внутрисистемных помех определяется значением максимального бокового лепестка взаимной корреляционной функции используемых кодов. Для применяемых в GPS кодов Голда длиной 1023 элемента уровень максимального бокового лепестка относительно полезного сигнала составляет около $7 \cdot 10^{-3}$, или $-21,6$ дБ.

Мощность принимаемого сигнала. Мощность принимаемого потребителем сигнала такова, что на выходе изотропной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления $+3$ дБ, расположенной на поверхности земли, и в наихудшем случае ориентированной на угол места 5° , составляет:

не менее -161 дБВт для частот диапазона $L1$;

не менее -167 дБВт для частот диапазона $L2$.

Групповая задержка навигационного сигнала в бортовой аппаратуре. Групповая задержка навигационного сигнала в бортовой аппаратуре определяется как задержка между излучаемым радиосигналом данного НКА (измеряется в фазовом центре передающей антенны), и выходным сигналом бортового стандарта частоты. Групповая задержка включает в себя постоянную и случайную состав-

ляющие. Постоянная составляющая не имеет значения для потребителя, поскольку корректирующие данные для ее исключения входят в состав навигационного сообщения и в аппаратуре потребителя происходит автоматическая компенсация. Величина не поддающейся компенсации случайной составляющей не превышает 8 нс.

Когерентность передаваемых последовательностей. Все излучаемые определенным НКА сигналы когерентно сформированы из частоты одного бортового стандарта. Допустимый интервал между фронтами модулирующих сигналов высокой и стандартной точности составляет не более 6 нс.

Поляризация излучаемого сигнала. Излучаемый сигнал имеет правую круговую поляризацию (RHCP). В секторе углов излучения $\pm 19^\circ$ относительно оси симметрии диаграммы направленности передающей антенны коэффициент эллиптичности по полю не хуже 0,7.

Формирование кодовых последовательностей

Модулирующие последовательности. Несущие частоты диапазона $L1$ модулируются последовательностями сигналов высокой и стандартной точности, несущие частоты диапазона $L2$ модулируются сигналом высокой точности. Планируется предоставление сигнала стандартной точности в диапазоне $L2$.

Фазовая манипуляция несущей осуществляется на π радиан с максимальной погрешностью не более $\pm 0,2$ рад. Последовательности, составляющие сигнал стандартной точности, используются для манипуляции одной из квадратурных составляющих сигнала спутника на верхней частоте. Другая квадратурная составляющая модулируется двоичной последовательностью, образованной из специального дальномерного кода высокой точности. Закон формирования этого кода сообщается только потребителям, имеющим разрешение МО РФ, и в данном издании не рассматривается.

Модулирующая последовательность стандартной точности для диапазона $L1$ образуется сложением по модулю два следующих двоичных сигналов:

- псевдослучайного дальномерного кода, передаваемого со скоростью 511 кбит/с (тактовая частота 511 кГц, период повторения 1 мс);
- навигационной (служебной) информации, передаваемой со скоростью 50 бит/с (тактовая частота 50 Гц);
- вспомогательного меандрового колебания с тактовой частотой 100 Гц;
- кода метки времени (МВ-кода), представляющего собой двоичную ПСП с тактовой частотой 100 Гц.

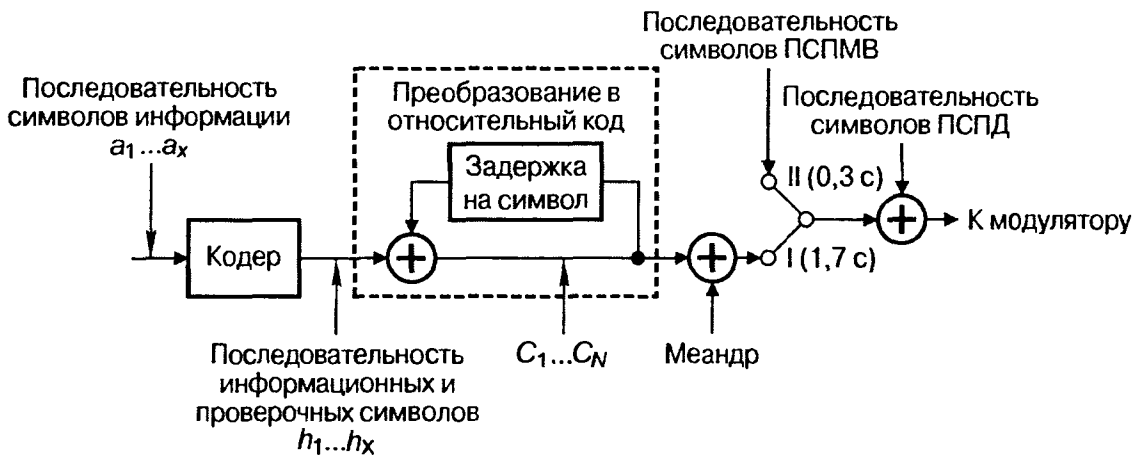


Рис. 3.5. Схема формирования модулирующей последовательности

На рис. 3.5 приведена упрощенная схема формирования модулирующей последовательности.

Псевдослучайный дальномерный код стандартной точности. ПСП дальномерного кода представляет собой M-последовательность длиной $L = 511$ элементов с периодом повторения 1 мс. Эта длина сравнительно невелика, но обеспечивает, по аналогии с C/A-кодом GPS, быстрое входение в режим захвата и приемлемую точность измерения дальности.

Порождающий полином имеет вид $G(x) = 1 + x^5 + x^9$. Упрощенная схема регистра сдвига, соответствующего порождающему полиному, показана на рис. 3.6. Дальномерный код снимается с 7-го разряда девятиразрядного регистра сдвига. Код начального состояния регистра сдвига соответствует "1" во всех разрядах регистра. Начальным символом в периоде ПСП дальномерного кода является первый символ в группе 11111100, повторяющийся через 1 мс.

На рис. 3.7 показана упрощенная схема формирователя дальномерного кода и синхроимпульсов для навигационного сигнала.

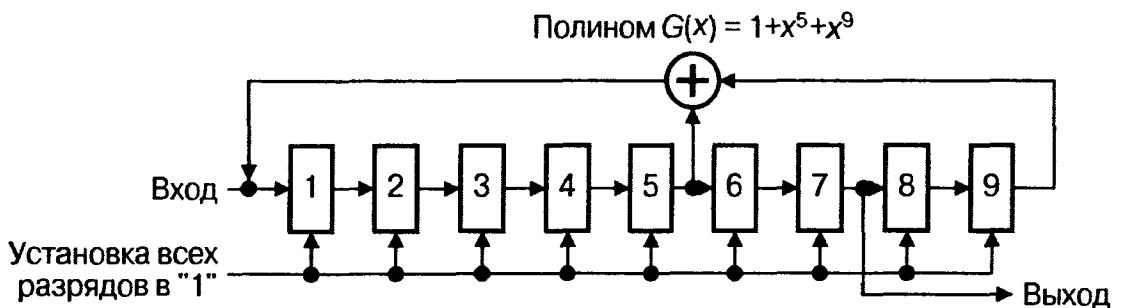


Рис. 3.6. Упрощенная схема регистра сдвига

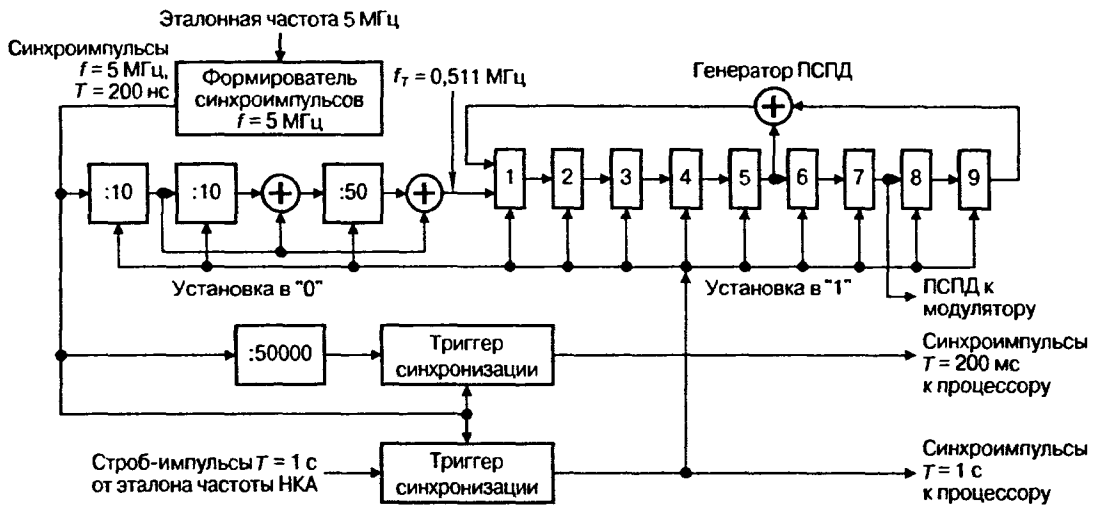


Рис. 3.7. Схема формирования ПСПД и синхроимпульсов

Формирование навигационного сообщения. Навигационное сообщение (иначе именуемое кодом служебной информации или СИ-кодом) представляет собой преобразованную цифровую последовательность навигационных данных [2], передаваемых потребителям СНС. Навигационные данные кодируются помехоустойчивым кодом Хэмминга с кодовым расстоянием, равным четырем. Вновь обратимся к рис. 3.5. Выходные сигналы кодера h_i преобразуются в относительный код по правилу $C_i = h_i \oplus C_{i-1}$, где C_i – последовательность символов в относительном коде. Длительность информационных символов $T_{си} = 20$ мс. Таким образом, в канале передачи используется сигнал с относительной фазовой манипуляцией, исключаяющий явление обратной работы фазового детектора.

Окончательная двоичная последовательность навигационного сообщения образуется при сложении по модулю два символов навигационной информации C_i и меандрового колебания (М-код) с длительностью символа 10 мс. Получаемый бидвоичный код обеспечивает потребителю возможность простой синхронизации по СИ-коду, содержащему серии нулей или единиц.

Информация навигационного сообщения формируется в виде непрерывно следующих строк длительностью 2 с. В первой части строки в течение 1,7 с передаются символы навигационного сообщения. Во второй части строки в течение 0,3 с передаются символы метки времени.

Метка времени. Код метки времени (МВ-код, ПСПМВ) представляет собой укороченную двоичную псевдослучайную последовательность длиной 30 символов с длительностью символа 10 мс, описывается порождающим полиномом $g(x) = 1 + x^3 + x^5$ и имеет вид:

111110001101110101000010010110.

Данная последовательность является двухсекундной меткой времени, так как задний фронт ее последнего символа в навигационном сигнале соответствует окончанию очередного двухсекундного интервала относительно начала суток по бортовой шкале времени. При помощи этой метки осуществляется синхронизация по строкам навигационного сообщения и устраняется возможная неоднозначность дальномерных измерений.

Первым символом в каждой строке всегда является "0". Он не относится к навигационным данным, но дополняет укороченную ПСПМВ предыдущей строки до полной (не укороченной).

Поскольку все сигналы тактируются от одного опорного источника, то в излучаемом радиосигнале границы строк, границы символов цифровой информации, границы символов меандра, символов ПСПМВ и ПСПД синхронизированы между собой. Границы символов меандра и границы символов цифровой информации совпадают с передними фронтами начальных символов ПСПД.

Временные соотношения между синхроимпульсами навигационного сообщения и дальномерным кодом ПСПД приведены на рис. 3.8.

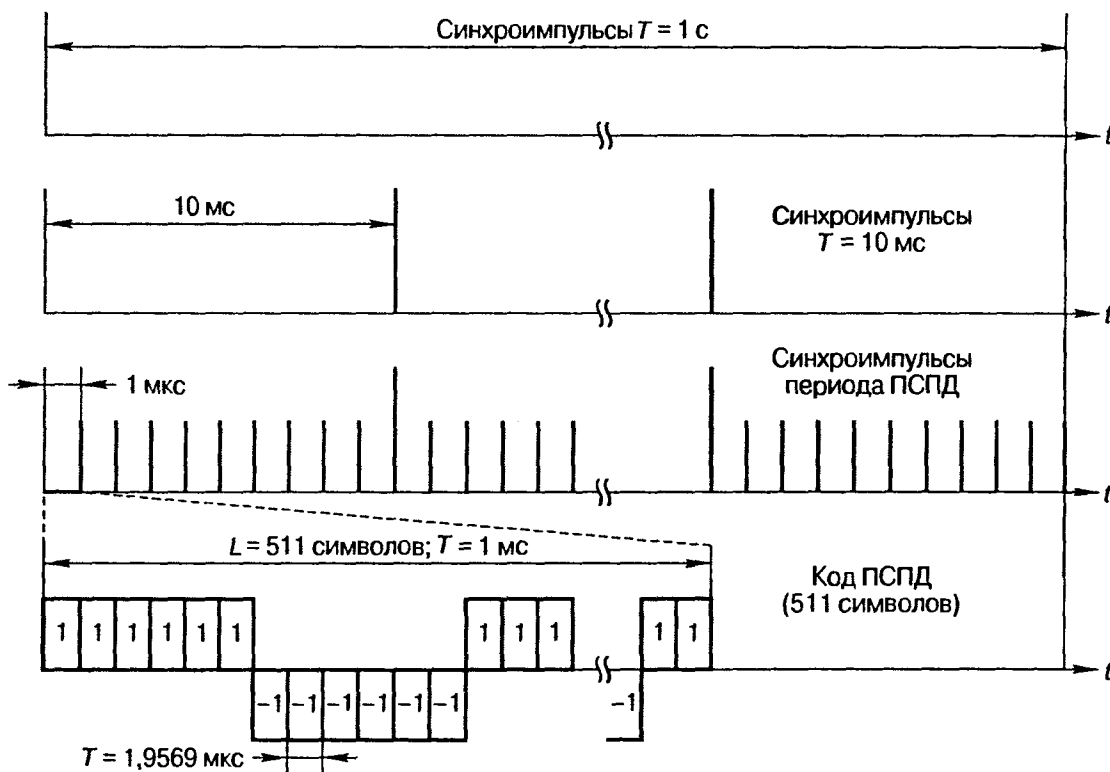


Рис. 3.8. Временные соотношения между синхроимпульсами НС и дальномерным кодом ПСПД

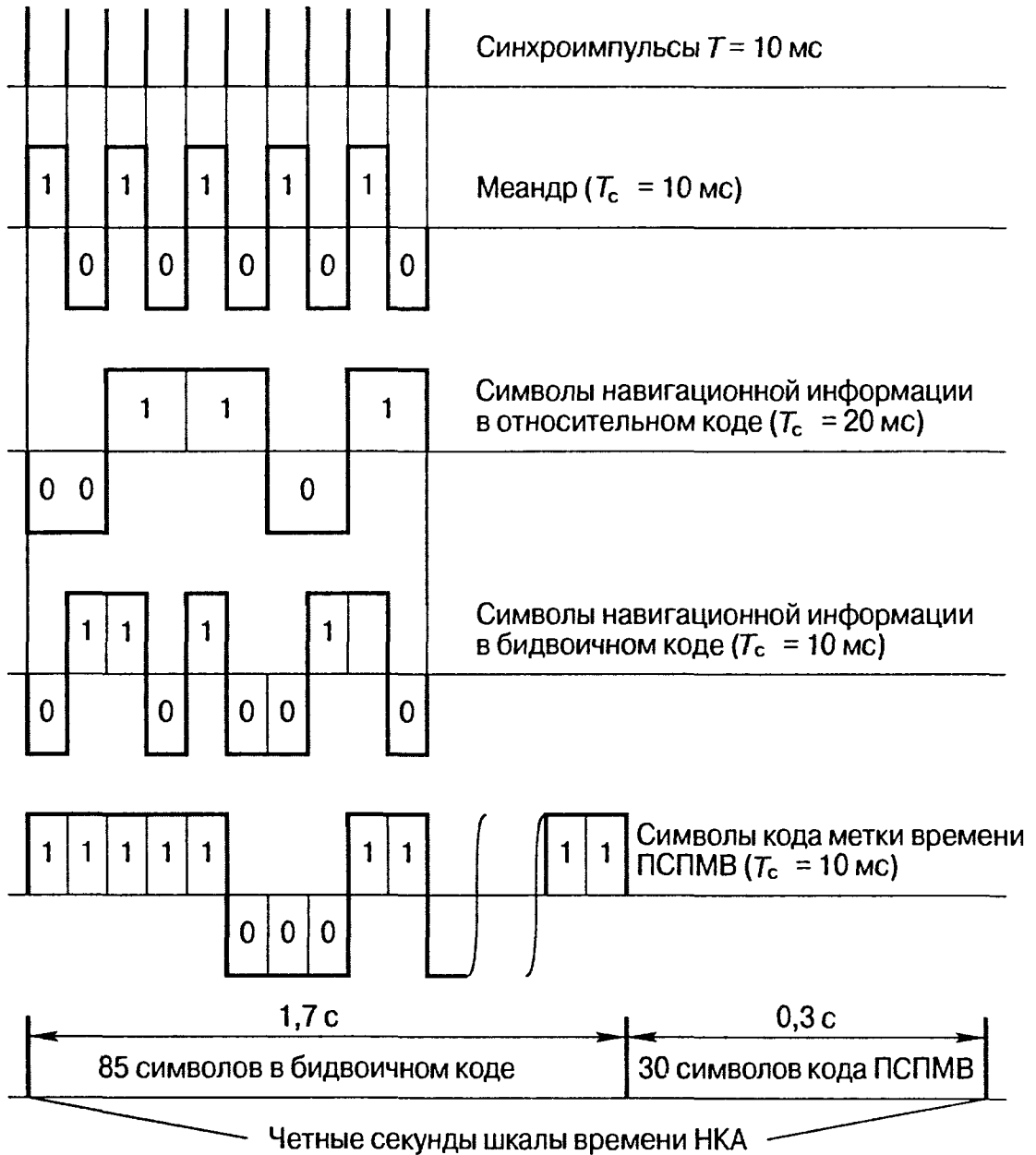


Рис. 3.9. Формирование двоичной последовательности НС

На рис. 3.9 схематически изображен процесс формирования двоичной последовательности информации навигационного сообщения.

Время системы ГЛОНАСС

Суточная нестабильность цезиевых атомных стандартов частоты, установленных на борту НКА, не превышает $5 \cdot 10^{-13}$ с. Шкала времени системы основывается на водородном стандарте частоты

наземного Центрального синхронизатора, суточная нестабильность которого составляет $5 \cdot 10^{-14}$ с.

Допускаются следующие погрешности привязки и синхронизации:

- точность взаимной синхронизации бортовых шкал времени НКА – 20 нс (среднеквадратическое значение);
- расхождение между шкалой системного времени ГЛОНАСС и шкалой Госэталона Координированного всемирного времени UTC(SU) – не более 1 мс;
- погрешность привязки шкалы системного времени ГЛОНАСС к шкале UTC(SU) – не более 1 мкс;
- погрешность сверки шкалы времени НКА со шкалой времени Центрального синхронизатора – не более 10 нс.

Шкала Координированного всемирного времени UTC подвергается периодической плановой коррекции на целое число секунд. Синхронно с этим событием производится коррекция системного времени ГЛОНАСС.

Коррекцию шкалы UTC на величину ± 1 с производит Международное Бюро Времени (BIPM) по рекомендации Международной службы вращения Земли (IERS). Коррекция производится, как правило, раз в год, в один из следующих моментов: 00 ч 00 мин 00 с в полночь с 31 декабря на 1 января; с 31 марта на 1 апреля; с 30 июня на 1 июля; с 30 сентября на 1 октября всеми пользователями, использующими или воспроизводящими шкалу UTC.

До настоящего времени навигационные сообщения НКА ГЛОНАСС не содержали данных о коррекции UTC, поэтому потребители должны пользоваться информационными бюллетенями, распространяемыми различными путями не менее, чем за три месяца до события коррекции. В навигационном кадре спутника ГЛОНАСС-М предусмотрено заблаговременное уведомление потребителей о факте, величине и знаке секундной коррекции UTC.

При коррекции системного времени ГЛОНАСС метка времени строки навигационного кадра, передаваемая каждые 2 с, изменяет свое положение на непрерывной шкале времени для достижения синхронизма с 2-секундной эпохой скорректированной шкалы UTC. Смещение метки времени происходит в 00 ч 00 мин 00 с UTC.

Между системным временем ГЛОНАСС и UTC(SU) не существует сдвига на целое число секунд, но существует постоянный сдвиг на целое число часов, обусловленный особенностями функционирования наземного комплекса управления: $t_{GL} = t_{UTC(SU)} + 03 \text{ ч } 00 \text{ мин}$.

Для вычисления эфемерид НКА на момент измерения навигационных параметров используется следующее соотношение [4]:

$$t_{UTC(SU)} + 03 \text{ ч } 00 \text{ мин} = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b)(t - t_b),$$

где t – время излучения сигнала по бортовой шкале времени, параметры τ_c , τ_n , γ_n и t_b рассмотрены в подпараграфе 3.4.4.

Коррекция времени UTC и аппаратура потребителя. Интерфейс системы ГЛОНАСС включает в себя описание организации вычислений в аппаратуре потребителя при проведении плановой секундной коррекции UTC [4]. Наличие особых требований объясняется тем, что при проведении плановой коррекции возникает необходимость одновременного использования нескорректированного времени UTC и скорректированного времени, пока не будут приняты новые эфемериды всех наблюдаемых в данный момент времени НКА ГЛОНАСС.

Приемник должен обеспечивать достоверные измерения псевдодальностей и выполнять повторную синхронизацию с меткой времени строки навигационного кадра без срыва слежения.

Данные о моменте и величине коррекции UTC могут быть введены с пульта приемника, или выделены из навигационного сообщения ГЛОНАСС или GPS. После проведения коррекции приемник должен использовать UTC следующим образом [4]:

- использовать старые значения UTC вместе со старыми значениями эфемерид, переданными до 00 ч 00 мин 00 с UTC;
- использовать скорректированное время UTC вместе с новыми эфемеридами, передаваемыми после 00 ч 00 мин 00 с UTC.

Программное обеспечение приемника должно включать в себя алгоритм контроля за использование скорректированного времени UTC, который вводится в действие за секунду до события коррекции. При контроле правильности вычисления измеренных псевдодальностей алгоритм действует до момента завершения коррекции бортовых шкал времени всех наблюдаемых НКА и шкалы времени навигационного приемника.

При вычислении эфемерид спутников алгоритм действует до момента приема новых эфемерид всех наблюдаемых НКА, т.е. эфемерид, отнесенных к моменту времени 00 ч 15 мин 00 с скорректированного времени UTC.

Если момент излучения сигнала спутника и момент приема этого сигнала находятся в разных системах отсчета (до и после коррекции), то измеренное значение псевдодальности необходимо скорректировать поправкой, равной значению величины коррекции UTC, умноженной на скорость света. Затем значение псевдодальности должно быть отнесено к моменту времени, отсчитанному по нескорректированной шкале времени.

До момента приема новых эфемерид с текущего спутника, его положение вычисляется по старым эфемеридам, в нескорректированной шкале UTC. Как только со спутника поступают новые эфемериды, его положение вычисляется по новым эфемеридам с применением скорректированного времени UTC.

Все результаты решения навигационной задачи, выполненные приемником после момента коррекции его часов и выдаваемые через его интерфейс, должны быть привязаны к шкале скорректированного времени UTC, согласно шкале времени ГЛОНАСС, сформированной в приемнике.

Структура навигационного сообщения

Навигационное сообщение содержит *оперативную* и *неоперативную* информацию. Оперативная информация относится к НКА, излучающему сигнал, и содержит:

- признаки достоверности навигационного сообщения в кадре;
- время начала кадра t_k ;
- эфемеридную информацию координаты и производные координат НКА в прямоугольной геоцентрической системе координат на момент времени t_0 ;
- частотно-временные поправки (ЧВП) на момент времени t_0 в виде относительной поправки к несущей частоте навигационного радиосигнала и поправки к бортовой шкале времени НКА;
- время t_0 .

Неоперативная информация содержит альманах системы, включающий в себя:

- данные о состоянии всех НКА системы (альманах состояния);
- время, к которому относится альманах;
- параметры орбиты всех НКА (альманах орбит);
- номер пары несущих частот и поправку к БШВ для каждого НКА (альманах фаз);
- поправку шкалы времени системы ГЛОНАСС относительно UTC(SU), погрешность поправки не более 1 мкс.

Навигационное сообщение СНС ГЛОНАСС иерархически структурировано в виде *строк*, *кадров* и *суперкадров*. Строка навигационного сообщения имеет длительность 2 с (вместе с меткой времени) и содержит 85 двоичных символов, передаваемых в относительном коде (рис. 3.9). Первый символ является холостым для относительного кода. Последние восемь символов в каждой строке являются проверочными символами кода Хэмминга, позволяющими исправлять одиночный ошибочный символ и обнаруживать два

ошибочных символа в строке.

Альманах системы необходим аппаратуре потребителя для *планирования сеанса*, т.е. выбора оптимального созвездия и прогнозирования для составляющих его НКА доплеровского сдвига несущей частоты. Отсутствие альманаха системы в памяти приемника потребителя приводит к значительному увеличению длительности сеанса, за счет времени, затрачиваемого на поиск сигналов и определение оптимального созвездия. Тем не менее, структура навигационного сигнала СНС ГЛОНАСС обеспечивает более быстрое обновление (или первичный прием) альманаха за счет меньшей длительности суперкадров (2,5 мин) по сравнению с GPS (12,5 мин) [26].

Оперативная информация используется непосредственно в сеансе навигации. Частотно-временные поправки вносятся в результаты измерений, а эфемериды применяются при определении координат и вектора скорости потребителя.

Структура кадра и суперкадра. Кадр имеет длительность 30 с и состоит из 15 строк длительностью 2 с каждая. Он содержит полный объем оперативной информации для излучающего НКА (строки 1...4) и четверть альманаха. В кадрах с первого по четвертый передается альманах по пяти спутникам, в пятом кадре по оставшимся четырем. Альманах для каждого спутника занимает по две строки.

Суперкадр содержит 5 кадров и длится 2,5 мин. В пределах суперкадра оперативная информация и строка 5 (системные данные) повторяются в каждом кадре. Границы строк, кадров и суперкадров различных НКА синхронны с погрешностью не более 2 мс (табл.3.4).

Таблица 3.4

Распределение альманаха по кадрам суперкадра

Номер кадра в суперкадре	Номера соответствующих НКА
1	1 – 5
2	6 – 10
3	11 – 15
4	16 – 20
5	21 – 24

На рис. 3.10 показана структура суперкадра и кадров, его составляющих.

Номер кадра в суперкадре	Номер строки в кадре	2 с				
		1,7 с			0,3 с	
I	1	0	оперативная	KX	MB	
	2	0	информация для	KX	MB	
	3	0	передающего	KX	MB	
	4	0	НКА	KX	MB	
	неоперативная информация (альманах)					
	15	0	для пяти НКА	KX	MB	
II	1	0	оперативная	KX	MB	
	2	0	информация для	KX	MB	
	3	0	передающего	KX	MB	
	4	0	НКА	KX	MB	
	неоперативная информация (альманах)					
	15	0	для пяти НКА	KX	MB	
III	1	0	оперативная	KX	MB	
	2	0	информация для	KX	MB	
	3	0	передающего	KX	MB	
	4	0	НКА	KX	MB	
	неоперативная информация (альманах)					
	15	0	для пяти НКА	KX	MB	
IV	1	0	оперативная	KX	MB	
	2	0	информация для	KX	MB	
	3	0	передающего	KX	MB	
	4	0	НКА	KX	MB	
	неоперативная информация (альманах)					
	15	0	для пяти НКА	KX	MB	
V	1	0	оперативная	KX	MB	
	2	0	информация для	KX	MB	
	3	0	передающего	KX	MB	
	4	0	НКА	KX	MB	
	неоперативная информация (альманах) для четырех НКА					
		14	0	резерв	KX	MB
		15	0	резерв	KX	MB

30 с x 5 = 2,5 мин

85 84.....9 8...1

номер разряда в строке информационные символы в относительном бидвоичном коде символы кода Хэмминга в относительном бидвоичном коде

Рис. 3.10. Структура суперкадра и составляющих его кадров

Система глобального позиционирования ГЛОНАСС

Оперативная информация и эфемериды. Основываясь на данных [4], подробно рассмотрим содержание и соответствующие обозначения параметров эфемеридной информации.

Условные обозначения параметров, разрядность, номер содержащей параметр строки, а также место параметра в строке сведены в табл. 3.5. В словах, которые могут принимать положительные или отрицательные значения, старший разряд является знаковым, символ "0" соответствует знаку "плюс", а символ "1" – знаку "минус".

Таблица 3.5.

Разрядность, единицы измерения и диапазон значений слов оперативной информации

Обозначение слова	Число разрядов	Цена младшего разряда	Диапазон значений	Единица измерения
m	4	1	0...15	безразмерная
t_k	5	1	0...23	час
	6	1	0...59	мин
	1	30	0; 30	с
t_b	7	15	15...1425	мин
$M^{(1)}$	2	1	0 – 3	безразмерная
$\gamma_n(t_b)^{(2)}$	11	2^{-40}	$\pm 2^{-30}$	безразмерная
$\tau_n(t_b)^{(2)}$	22	2^{-30}	$\pm 2^{-9}$	с
$x_n(t_b), y_n(t_b), z_n(t_b)^{(2)}$	27	2^{-11}	$\pm 2,7 \cdot 10^4$	км
$\dot{x}_n(t_b), \dot{y}_n(t_b), \dot{z}_n(t_b)^{(2)}$	24	2^{-20}	$\pm 4,3$	км/с
$\ddot{x}_n(t_b), \ddot{y}_n(t_b), \ddot{z}_n(t_b)^{(2)}$	5	2^{-30}	$\pm 6,2 \cdot 10^{-9}$	км/с ²
B_n	3	1	0...7	безразмерная
$P^{(1)}$	2	1	00,01,10,11	безразмерная
$N_T^{(1)}$	11	1	0...2048	сутки

Обозначение слова	Число разрядов	Цена младшего разряда	Диапазон значений	Единица измерения
$F_T^{(1)}$	4	(табл. 3.7)		
$n^{(1)}$	5	1	0...31	безразмерная
$\Delta\tau_n^{(2)}$	5	2^{-30}	$\pm 13,97 \cdot 10^{-9}$	с
E_n	5	1	0...31	сутки
$P1$	2	(табл. 3.6)		
$P2$	1	1	0; 1	безразмерная
$P3$	1	1	0; 1	безразмерная
$P4^{(1)}$	1	1	0; 1	безразмерная
$I_n^{(1)}$	1	1	0; 1	безразмерная

⁽¹⁾ Слово передается в навигационном сообщении спутника ГЛОНАСС-М.

⁽²⁾ Параметр может быть как положительным, так и отрицательным.

Слово m – номер строки в навигационном кадре.

Слово t_k – время начала кадра внутри текущих суток, исчисляемое в шкале бортового времени НКА. В пяти старших разрядах записывается количество целых часов, прошедших с начала текущих суток; в шести средних – число целых минут, в младшем – число тридцатисекундных интервалов, прошедших с начала текущей минуты. Начало суток по бортовому времени НКА совпадает с началом очередного суперкадра.

Слово B_n – признак достоверности кадра. Аппаратура потребителя анализирует только старший разряд этого слова. Передача в нем "1" обозначает непригодность данного НКА для навигационных измерений.

Слово t_b – порядковый номер временного интервала внутри текущих суток по шкале системного времени ГЛОНАСС, к середине которого относится передаваемая в кадре оперативная информация. Длительность данного временного интервала (i , соответственно, максимальное значение слова t_b) определяется значением слова $P1$.

Слово $P1$ – признак смены оперативной информации. Сообщает величину интервала времени между значениями t_b (мин) в данном и предыдущем кадрах. Соответствующие значения приведены в табл. 3.6.

Значения слова P1 и значение t_b

Значение слова P1	Величина интервала времени между значениями слова t_b , мин
00	0
01	30
10	45
11	60

Слово **P2** – признак смены. Он представляет собой признак нечетности ("1") или четности ("0") порядкового номера b 30(60) – минутного текущего отрезка времени, середина которого оцифрована числовым значением слова t_b .

Слово **P3** – признак, состояние "1" которого означает, что в данном кадре передается альманах для пяти, а состояние "0" – для четырех НКА.

Слово $\Delta\tau_n$ – смещение излучаемого навигационного радиосигнала поддиапазона L2 относительно навигационного радиосигнала поддиапазона L1 для n -го НКА.

$$\Delta\tau_n = t_{l2} - t_{l1},$$

где t_{l1} , t_{l2} – аппаратные задержки в соответствующих поддиапазонах.

Слово **E_n** – характеризует "возраст" оперативной информации, т.е. интервал времени, прошедший от момента расчета (закладки) оперативной информации до момента времени t_b для n -го спутника. Формируется на борту НКА.

Слово $\gamma_n(t_b)$ – относительное отклонение прогнозируемого значения несущей частоты излучаемого навигационного радиосигнала n -го спутника от номинального значения на момент времени t_b

$$\gamma_n(t_b) = \frac{f_n(t_b) - f_{нн}}{f_{нн}},$$

где $f_n(t_b)$ – прогнозируемое значение несущей частоты излучаемого навигационного радиосигнала n -го спутника с учетом гравитационного и релятивистского эффектов на момент времени t_b ; $f_{нн}$ – номинальное значение несущей частоты навигационного радиосигнала n -го спутника.

Слово $\tau_n(t_b)$ – сдвиг шкалы времени n -го спутника t_n относительно шкалы времени системы ГЛОНАСС t_c , равный смещению по фазе ПСПД излучаемого навигационного радиосигнала n -го спутника относительно системного опорного сигнала на момент времени t_b :

$$\tau_n(t_b) = t_c(t_b) - t_n(t_b).$$

Слова $x_n(t_b)$, $y_n(t_b)$, $z_n(t_b)$ – координаты данного НКА в системе координат ПЗ-90 на момент времени t_b .

Слова $x_n(t_b)$, $y_n(t_b)$, $z_n(t_b)$ – составляющие вектора скорости данного НКА в геодезической системе координат ПЗ-90 на момент времени t_b .

Слова $x_n(t_b)$, $y_n(t_b)$, $z_n(t_b)$ – составляющие ускорения данного НКА в геодезической системе координат ПЗ-90 на момент времени t_b , обусловленные действием Луны и Солнца.

Следующие слова передаются спутниками серии ГЛОНАСС-М:

Слово M – признак модификации НКА, излучающего данный сигнал; "00" означает НКА ГЛОНАСС, "01" – ГЛОНАСС-М.

Слово P – признак режима работы НКА по предоставлению частотно-временной информации (ЧВИ). Значения признака следующие:

00 – ретрансляция параметра τ_c , ретрансляция параметра τ_{GPS} ;

01 – ретрансляция параметра τ_c , размножение параметра τ_{GPS} на борту НКА;

10 – размножение параметра τ_c на борту НКА, ретрансляция параметра τ_{GPS} ;

11 – размножение параметра τ_c на борту НКА, размножение параметра τ_{GPS} на борту НКА.

Слово $P4$ – признак, смена состояния "0" или "1" которого означает, что в данном кадре передается обновленная эфемеридная или частотно-временная информация.

Слово N_T – текущая дата, календарный номер суток внутри четырехлетнего интервала, начинающегося с високостного года.

Слово n – номер НКА, излучающего данный сигнал и соответствующий его рабочей точке.

Слово I_n – признак достоверности кадра n -го НКА. Состояние "1" означает факт непригодности сигнала данного спутника для навигации.

Слово F_T – фактор точности. В виде эквивалентной ошибки характеризует ошибку набора данных, излучаемых в навигационном сообщении в момент времени t_b . Соответствие значений приведено в табл. 3.7.

Значения слова F_T

Значения слова	Точность измерений σ , м
0	1
1	2
2	2,5
3	4
4	5
5	7
6	10
7	12
8	14
9	16
10	32
11	64
12	128
13	256
14	512
15	Не используется

В табл. 3.8. приведено размещение оперативной информации навигационного сообщения в кадре.

Таблица 3.8

Размещение слов оперативной информации навигационного сообщения в кадре

Слово	Количество разрядов	Номер строки в кадре	Номера разрядов в строке
m	4	1...15	81 – 84
t_k	12	1	65 – 76
t_b	7	2	70 – 76
M	2	4	9 – 10
$\gamma_n(t_b)$	11	3	69 – 79
$\tau_n(t_b)$	22	4	59 – 80

Слово	Количество разрядов	Номер строки в кадре	Номера разрядов в строке
$x_n(t_b)$	27	1	9 – 35
$y_n(t_b)$	27	2	9 – 35
$z_n(t_b)$	27	3	9 – 35
$\dot{x}_n(t_b)$	24	1	41 – 64
$\dot{y}_n(t_b)$	24	2	41 – 64
$\dot{z}_n(t_b)$	24	3	41 – 64
$\ddot{x}_n(t_b)$	5	1	36 – 40
$\ddot{y}_n(t_b)$	5	2	36 – 40
$\ddot{z}_n(t_b)$	5	3	36 – 40
P	2	3	66 – 67
N_T	11	4	16 – 26
n	5	4	11 – 15
F_T	4	4	30 – 33
E_n	5	4	49 – 53
B_n	3	2	78 – 80
$P1$	2	1	77 – 78
$P2$	1	2	77
$P3$	1	3	80
$P4$	1	4	34
$\Delta\tau_n$	5	4	54 – 58
I_n	1	3,5,7,9,11,13,15	65(3-я строка), 9(5,7,9,11,13,15 строки)

Неоперативная информация (альманах системы).

Рассмотрим содержание альманаха системы ГЛОНАСС:

Слово τ_c – поправка к системной шкале времени ГЛОНАСС относительно UTC(SU). Поправка дана на начало суток с номером N^A .

Слово N^A – календарный номер суток внутри четырехлетнего периода, начиная с високостного года, к которым относятся поправки τ_c и данные альманаха системы (альманахи орбит и фаз).

Система глобального позиционирования ГЛОНАСС

Слово n^A – условный номер НКА в системе, соответствующий рабочей точке орбиты.

Слово H_n^A – литер несущей частоты радиосигнала, излучаемого НКА с номером n^A .

Слово λ_n^A (полуцикл) – долгота первого внутри суток с номером N^A восходящего узла орбиты спутника с номером n в геодезической системе координат ПЗ-90.

Слово $t_{\lambda n}^A$ – ближайшее к началу суток с номером N^A время прохождения восходящего узла орбиты спутника с номером n^A .

Слово Δi_n^A (полуцикл) – поправка к среднему значению наклона орбиты для спутника с номером n^A на момент $t_{\lambda n}^A$ (среднее значение наклона орбиты принято равным 63).

Слово ΔT_n^A – поправка к среднему значению драконического периода обращения ($T = 43\,200$ с) НКА с номером n^A на момент времени $t_{\lambda n}^A$.

Слово $\Delta \dot{T}_n^A$ – скорость изменения драконического периода обращения спутника с номером n^A .

Слово ε_n^A – эксцентриситет орбиты спутника с номером n^A на момент времени $t_{\lambda n}^A$.

Слово ω_n^A – аргумент перигея орбиты спутника с номером n^A на момент времени $t_{\lambda n}^A$.

Слово τ_n^A – грубое значение сдвига бортовой шкалы времени НКА с номером n^A относительно шкалы времени системы на момент времени $t_{\lambda n}^A$. Это слово равно смещению ПСПД излучаемого радиосигнала относительно номинального положения.

Слово C_n^A – обобщенный признак состояния НКА с номером n^A на момент выгрузки на борт неоперативной информации (альманаха). Значение "0" указывает на непригодность НКА для навигационных определений.

Следующие слова передаются спутниками серии ГЛОНАСС-М:

Слово N_4 – порядковый номер четырехлетнего периода. Первым годом нулевого четырехлетия является 1996г.

Слово M_n^A – признак модификации n -го НКА: "00" – ГЛОНАСС, "01" – ГЛОНАСС-М.

Слово τ_{GPS} – поправка на расхождение системных шкал времени GPS (T_{GPS}) и ГЛОНАСС ($T_{ГЛ}$). Поправка входит в состав выражения

$$T_{GPS} - T_{ГЛ} = \Delta T + \tau_{GPS},$$

где ΔT – целая часть, τ_{GPS} – дробная часть расхождения в секундах.

Целая часть должна быть определена потребителем самостоятельно из сообщения системы GPS.

Слова **B1** и **B2** – коэффициенты линейного полинома для определения величины $\Delta UT1$ расхождения всемирного времени $UT1$ и координированного времени UTC(SU): $\Delta UT1 = UT1 - UTC(SU)$.

Слово **B1** – величина $\Delta UT1$ на начало суток с номером N^A .

Слово **B2** – скорость изменения параметра $\Delta UT1$, измеряется в секундах за средние солнечные сутки (с/ссс). Полином имеет следующий вид:

$$\Delta UT1 = B1 + B2 (N_T - N^A).$$

Слово **KP** – признак ожидаемой секундной коррекции шкалы UTC на величину ± 1 с, как показано в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Значения слова KP

KP	Информация о секундной коррекции UTC
00	В конце текущего квартала коррекции UTC не будет
01	В конце текущего квартала будет коррекция на плюс 1 с.
11	В конце текущего квартала будет коррекция на минус 1 с.

Признак **KP** помещается в навигационный кадр не позднее, чем за 8 недель до проведения коррекции. Но решение о проведении коррекции может быть принято раньше, чем за 8 недель. Поэтому с начала квартала и вплоть до принятия решения передается код "10", а затем один из кодов табл. 3.9.

Разрядность, единицы измерения и диапазон значений слов альманаха системы приведены в табл. 3.10, а обозначение отрицательных значений номера несущей частоты в кадре навигационного сообщения в табл. 3.11.

Размещение слов альманаха системы в кадре навигационного сообщения показаны в табл. 3.12.

Среднеквадратические значения погрешностей при определении дальности и радиальной скорости НКА аппаратурой потребителя зависят от "возраста" данных альманаха, т.е. от времени, прошедшего с момента передачи данных альманаха на борт НКА. В табл. 3.13 показана зависимость погрешности навигационных определений от "возраста" данных альманаха [4].

Система глобального позиционирования ГЛОНАСС

Целая часть должна быть определена потребителем самостоятельно из сообщения системы GPS.

Слова **B1** и **B2** – коэффициенты линейного полинома для определения величины $\Delta UT1$ расхождения всемирного времени $UT1$ и координированного времени UTC(SU): $\Delta UT1 = UT1 - UTC(SU)$.

Слово **B1** – величина $\Delta UT1$ на начало суток с номером N^A .

Слово **B2** – скорость изменения параметра $\Delta UT1$, измеряется в секундах за средние солнечные сутки (с/ссс). Полином имеет следующий вид:

$$\Delta UT1 = B1 + B2 (N_T - N^A).$$

Слово **KP** – признак ожидаемой секундной коррекции шкалы UTC на величину ± 1 с, как показано в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Значения слова KP

KP	Информация о секундной коррекции UTC
00	В конце текущего квартала коррекции UTC не будет
01	В конце текущего квартала будет коррекция на плюс 1 с.
11	В конце текущего квартала будет коррекция на минус 1 с.

Признак **KP** помещается в навигационный кадр не позднее, чем за 8 недель до проведения коррекции. Но решение о проведении коррекции может быть принято раньше, чем за 8 недель. Поэтому с начала квартала и вплоть до принятия решения передается код "10", а затем один из кодов табл. 3.9.

Разрядность, единицы измерения и диапазон значений слов альманаха системы приведены в табл. 3.10, а обозначение отрицательных значений номера несущей частоты в кадре навигационного сообщения в табл. 3.11.

Размещение слов альманаха системы в кадре навигационного сообщения показаны в табл. 3.12.

Среднеквадратические значения погрешностей при определении дальности и радиальной скорости НКА аппаратурой потребителя зависят от "возраста" данных альманаха, т.е. от времени, прошедшего с момента передачи данных альманаха на борт НКА. В табл. 3.13 показана зависимость погрешности навигационных определений от "возраста" данных альманаха [4].

Таблица 3.11

Обозначение отрицательных значений номера несущей частоты в кадре навигационного сообщения

Номер несущей частоты	Значение слова H_n^A
-01	31
-02	30
-03	29
-04	28
-05	27
-06	26
-07	25

Таблица 3.12

Размещение слов альманаха системы в кадре навигационного сообщения

Слово	Число разрядов	Номера строк в кадре ⁽¹⁾	Номера разрядов в строках
τ_c	32	5	38 – 69 (см. сноску ⁽⁴⁾ к табл. 3.10)
N_4	5	5	32 – 36
τ_{GPS}	22	5	10 – 31
N^A	11	5	70 – 80
n^A	5	6, 8, 10, 12, 14	73 – 77
H_n^A	5	7, 9, 11, 13, 15	10 – 14
λ_n^A	21	6, 8, 10, 12, 14	42 – 62
$t_{\lambda_n^A}$	21	7, 9, 11, 13, 15	44 – 64
Δi_n^A	18	6, 8, 10, 12, 14	24 – 41
ΔT_n^A	22	7, 9, 11, 13, 15	22 – 43
$\Delta \dot{T}_n^A$	7	7, 9, 11, 13, 15	15 – 21
ε_n^A	15	6, 8, 10, 12, 14	9 – 23
ω_n^A	16	7, 9, 11, 13, 15	65 – 80

Система глобального позиционирования ГЛОНАСС

Слово	Число разрядов	Номера строк в кадре ⁽¹⁾	Номера разрядов в строках
M_n^A	2	6,8,10,12,14	78 – 79
$B1$	11	74	70 – 80
$B2$	10	74	60 – 69
KP	2	74	58 – 59
τ_n^A	10	6, 8, 10, 12, 14	63 – 72
C_n^A	1	6, 8, 10, 12, 14	80

⁽¹⁾ Приведены номера строк первых четырех кадров суперкадра. В пятом кадре строки 14 и 15 не содержат параметров альманаха.

Таблица 3.13

Зависимость погрешности навигационных определений от "возраста" данных альманаха

"Возраст" данных альманаха	СКО погрешности определения	
	дальности, км	радиальной скорости, м/с
1 сутки	0,83	0,33
10 суток	2,0	0,7
20 суток	3,3	4,2

Резервные разряды в суперкадре. Совершенствование СНС ГЛОНАСС может потребовать ввода дополнительной информации в суперкадр. Она размещается за счет резервных разрядов в массиве данных. Часть резерва была задействована при разработке модификации ГЛОНАСС-М. Расположение оставшихся разрядов показано в табл. 3.14 [4]. Используется сплошная нумерация строк в пределах суперкадра, без разбиения на кадры.

Контроль достоверности навигационных данных. Применяемый при кодировании навигационной информации СНС ГЛОНАСС код Хэмминга позволяет исправлять одиночные ошибки на стороне потребителя, когда неверно принят один разряд строки, и обнаруживать четное число ошибок (2, 4, ... неверных разрядов).

Строка навигационной информации состоит из 85 разрядов, где старшие 77 разрядов содержат информационные символы ($b_{85}, b_{84}, \dots, b_{10}, b_9$), а младшие 8 разрядов – проверочные символы ($\beta_8, \beta_7, \dots, \beta_1$).

Размещение резервных разрядов в суперкадре

Номера строк в суперкадре	Расположение разрядов в строке
1, 16, 31, 46, 61	79, 80
2, 17, 32, 47, 62	65 – 69
3, 18, 33, 48, 63	68
4, 19, 34, 49, 64	27, 28, 29, 35 – 48
5, 20, 35, 50, 65	37
74	9 – 57
75	10 – 80

Проверка и исправление навигационной информации происходит с применением контрольных сумм. Вычисление контрольных сумм производится в соответствии с алгоритмом [4], приведенным ниже. Для исправления однократных ошибок в строках формируются контрольные суммы C_1, C_2, \dots, C_7 , а для обнаружения четного числа ошибок вычисляется контрольная сумма C_Σ .

Далее вычисленные контрольные суммы анализируются и принимается решение о наличии ошибок, исправлении одиночной ошибки или выбраковке строки. Решение принимается в соответствии со следующими правилами:

1. Строка считается неискаженной, если все контрольные суммы C_1, C_2, \dots, C_7 и сумма C_Σ равны нулю, либо лишь одна из контрольных сумм C_1, C_2, \dots, C_7 равна единице и при этом $C_\Sigma = 1$.

2. Если две или более контрольных сумм C_1, \dots, C_7 равны единице и $C_\Sigma = 1$, то символ $b_{i_{кор}}$ в разряде с порядковым номером

$$i_{кор} = C_7C_6C_5C_4C_3C_2C_1 + 8 - K \text{ (при условии, что } i_{кор} \leq 85),$$

считается искаженным и исправляется на противоположный. Двоичное число $C_7C_6C_5C_4C_3C_2C_1$ формируется из контрольных сумм записью младшими разрядами вправо. K – номер старшей из отличных от нуля контрольных сумм. Если получается, что $i_{кор} > 85$, это означает факт наличия нечетного числа кратных ошибок и строка бракуется.

3. Если хотя бы одна из контрольных сумм C_1, C_2, \dots, C_7 равна единице, а $C_\Sigma = 0$, или все контрольные суммы C_1, C_2, \dots, C_7 равны нулю, а $C_\Sigma = 1$, это означает наличие кратных ошибок и строка бракуется.

Система глобального позиционирования ГЛОНАСС

В случае выбраковки строки (строк) навигационная информация считается недостоверной. Аппаратура потребителя должна произвести повторный прием навигационной информации.

Пример алгоритма вычисления контрольных сумм при проверке достоверности информации в строке

$b_{77}, b_{76}, \dots, b_2, b_1$ – информационные символы (9.85);

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_8$ – проверочные символы кода Хэмминга (1.8);

$C_1, C_2, \dots, C_7, C_\Sigma$ – контрольные суммы;

$$C_1 = \beta_1 \oplus \left[\sum_i b_i \right]_{\text{mod}2}$$

$i = 9, 10, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 65, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 84.$

$$C_2 = \beta_2 \oplus \left[\sum_j b_j \right]_{\text{mod}2}$$

$j = 9, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 25, 26, 29, 30, 33, 34, 36, 37, 40, 41, 44, 45, 48, 49, 52, 53, 56, 57, 60, 61, 64, 65, 67, 68, 71, 72, 75, 76, 79, 80, 83, 84.$

$$C_3 = \beta_3 \oplus \left[\sum_k b_k \right]_{\text{mod}2}$$

$k = 10-12, 16-19, 23-26, 31-34, 38-41, 46-49, 54-57, 62-65, 69-72, 77-80, 85.$

$$C_4 = \beta_4 \oplus \left[\sum_l b_l \right]_{\text{mod}2}$$

$l = 13-19, 27-34, 42-49, 58-65, 73-80.$

$$C_5 = \beta_5 \oplus \left[\sum_m b_m \right]_{\text{mod}2}$$

$m = 20-34, 50-65, 81-85.$

$$C_6 = \beta_6 \oplus \left[\sum_{n=35}^{65} b_n \right]_{\text{mod}2},$$

$$C_7 = \beta_7 \oplus \left[\sum_{p=66}^{85} b_p \right]_{\text{mod} 2},$$

$$C_\Sigma = \left[\sum_{q=1}^8 \beta_q \right]_{\text{mod} 2} \oplus \left[\sum_{q=9}^{85} b_q \right]_{\text{mod} 2}.$$

3.4.5. Контроль целостности радионавигационного поля СНС ГЛОНАСС

В связи с тем, что СНС ГЛОНАСС применяется в таких чрезвычайно критичных к достоверности навигационной информации приложениях, как авиация, боевые действия войск, морская навигация и т.п., контроль целостности радионавигационного поля СНС ГЛОНАСС придает большое значение.

Контроль целостности радионавигационного поля системы заключается в контроле качества передаваемых НКА радиосигналов и качества передаваемых ими навигационной информации. Кратко рассмотрим способы контроля целостности, применяемые в СНС ГЛОНАСС.

Самоконтроль на борту НКА. На спутниках СНС ГЛОНАСС предусмотрен непрерывный автономный контроль функционирования основных бортовых систем. При обнаружении нарушений работы систем, которые влияют на качество излучаемого радиосигнала или достоверность цифровой информации и не могут быть устранены внутренними средствами (например, включением резервного модуля), на спутнике формируется признак его неисправности, который передается потребителю в составе оперативной информации. Дискретность передачи такого признака составляет 30 с. Соответственно, максимальная задержка от момента обнаружения неисправности до момента передачи сообщения об этом не превышает 1 мин. В сигнале спутников серии ГЛОНАСС-М присутствует признак I_n (см. подпараграф 3.4.4), передаваемый с дискретностью не более 4 с, что позволяет сократить задержку оповещения потребителей до 10 с.

Бортовая система самоконтроля не может считаться достаточной, так как не позволяет обнаружить все возможные нарушения в работе СНС. Кроме того, не могут быть обнаружены отказы в работе самой системы контроля и искажение эфемеридной информации.

Контроль наземными средствами. В состав наземного комплекса контроля и управления входит специальная аппаратура контроля поля (АКП). При обнаружении непригодности НКА, информация об этом появляется в альманахе системы не позднее, чем через 16 часов. Соответствующий признак передается один раз в составе каждого суперкадра, т.е. дискретность передачи составляет 2,5 мин.

В соответствии с двумя способами контроля радионавигационного поля, в составе служебной информации каждого НКА системы передаются два типа признаков состояния (см. подпараграф 3.4.4):

$B_n(I_n)$ – нулевое значение признака обозначает пригодность данного НКА для навигационных определений. В скобках указано наименование признака для НКА ГЛОНАСС-М. Признак входит в состав оперативной информации.

C_n – совокупность ($n = 1...24$) обобщенных признаков состояния всех НКА системы на момент закладки альманаха. Значение $C_n = 0$ указывает на непригодность НКА, имеющего системный номер n^A , для навигационных определений. Значение $C_n = 1$ говорит о пригодности НКА с номером n^A . Признак входит в состав неоперативной информации (альманаха).

Признак $B_n(I_n)$ становится известен потребителю значительно раньше, чем признаки C_n , но формирование признаков C_n основано на более глубоком анализе качества радионавигационного поля. Аппаратура потребителя должна анализировать оба этих признака и принимать решение о пригодности сигнала конкретного НКА на их основе. В [4] приведено правило, по которому делается вывод о работоспособности НКА с точки зрения получения максимальной достоверности:

Значение $B_n(I_n)$	Значение C_n	Пригодность НКА
0	0	нет
0	1	да
1	0	нет
1	1	нет

Существует мнение, что до получения данных альманаха, основанных на глубоком анализе, спутник можно считать годным (условно годным) даже если признак C_n говорит об обратном. В интерфейсном контрольном документе GPS NAVSTAR также введено понятие ограниченной пригодности НКА, когда достоверность передаваемой информации не гарантируется, но потребитель может

использовать сигнал НКА *исключительно под свою ответственность*. В случае с ГЛОНАСС вариант правила, допускающего условную пригодность, выглядит так:

Значение $B_n(I_n)$	Значение C_n	Пригодность НКА
0	0	нет
0	1	да
1	0	нет
1	1	условная

Условная пригодность может считаться допустимой для некритичных (например, бытовых) применений, в условиях недостаточного количества доступных спутников. Но, в любом случае, признак C_n имеет высший приоритет и своим нулевым значением говорит об однозначной непригодности НКА с номером n^A .

Для наиболее критичных применений принимаются дополнительные меры по сокращению времени оповещения об отказе НКА. Существующие подходы к решению проблемы предусматривают проведение дифференциальных измерений и оповещение потребителей по дополнительным каналам связи, таким, как геостационарные ИСЗ и локальные УКВ передатчики.

Автономный контроль целостности в приемнике потребителя (RAIM). Благодаря избыточности навигационной информации, получаемой приемником потребителя от рабочего созвездия НКА, потребитель может самостоятельно организовать контроль качества радионавигационного поля. Как известно (гл.2), для определения вектора потребителя, включающего широту, долготу, высоту, вектор скорости и системное время достаточно созвездия из четырех спутников. При наличии в созвездии хотя бы одного дополнительного спутника становится возможным провести пять сеансов навигационных определений, поочередно исключая один из спутников.

Далее, анализируя результаты определений и сравнивая их между собой, можно сделать вывод о наличии неисправного НКА, а при большем числе доступных ("видимых") спутников и определить его номер.

Существует множество разнообразных способов реализации RAIM, отличающихся статистическим подходом, применяемыми правилами анализа, необходимым числом НКА и т.п.