

Интерфейс системы GPS NAVSTAR.

Интерфейс системы подразумевает под собой перечень требований, описаний и технические стандарты сигналов, путем которых происходит передача информации от космического сегмента GPS к сегменту потребителей. Навигационные НКА используют для передачи информации две частоты: $L1$ и $L2$. Все НКА вещают на одинаковых частотах и используется кодовое разделение каналов.

Интерфейс системы GPS 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 общей сложности излучаются три псевдослучайных дальномерных кода:

P-код, являющийся основным дальномерным кодом. Псевдослучайный дальномерный P-код, индивидуальный для каждого НКА, далее мы будем обозначать, как $P_i(t)$, где i – индивидуальный номер НКА. $P_i(t)$ представляет собой последовательность длиной 7 дней, со скоростью передачи 10,23 Мб/с. Эта последовательность формируется сложением по модулю 2 двух подпоследовательностей, обозначаемых, как $X1$ и $X2_i$; их длина соответственно 15,345,000 и 15,345,037 элементов. Последовательность $X2_i$ формируется из последовательности $X2$ избирательной задержкой на длительность от 1 до 37 элементов, что позволяет сформировать 37 индивидуальных последовательностей P-кода длиной 7 дней. Из них 32 варианта используются НКА, остальные 5 зарезервированы для иных целей (например, для наземных передатчиков - псевдолитов и т.п.). Взаимосвязь между кодовыми последовательностями и номером НКА показана в табл. 4.1.

Y-код, применяемый вместо P-кода при включении режима предотвращения преднамеренных помех и несанкционированного доступа к информации A/S (Antispoofing). Y-код представляет собой закрытый P-код, и доступен для расшифровки только лицензированными пользователями, имеющими соответствующий ключ. Поэтому Y-код принято обозначать как P(Y) код. Использование Y-кода определяется специальными документами ICD-GPS-203, ICD-GPS-224 и ICD-GPS-225.

Открытый код C/A (Coarse/Acquision, "грубый захват"), который сначала использовался лицензированными пользователями для первичного вхождения в режим слежения и последующего захвата точного P или P(Y) кода. Сейчас код C/A находится в распоряжении мирового сообщества для использования в целях позиционирования.

Предусмотрена возможность преднамеренного снижения точности определения координат по коду C/A до уровня 100 м. В настоящее время преднамеренное снижение точности не используется, но может быть вновь введено по решению правительства США.

НКА, начиная с серии "Block II" и далее, способны излучать "некорректные" версии C/A и P(Y) кодов для защиты пользователей от приема недостоверных навигационных сигналов, которые могут быть сформированы в результате выхода из строя бортовой системы синтезирования относительных частот. Эти два "некорректных" кода получили название нестандартного C/A (NSC) и нестандартного Y (NSY). Коды NSC и NSY не предназначены для использования потребителями GPS и не входят в стандартный интерфейс. Кодовые последовательности образуют однозначные неразделимые пары, состоящие из соответствующих C/A и P последовательностей (табл. 4.1).

Физические параметры радиосигналов GPS

Частотный план. Сигналы L-каналов излучаются в пределах двух полос шириной 20,46МГц с центральными частотами L1 и L2. 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 10,23 МГц. Для компенсации релятивистских эффектов, возникающих при движении НКА по орбите, эта частота смещается на некоторую величину $\Delta f/f = -4,4647 \cdot 10^{-10}$, эквивалентную изменению скорости передачи P-кода на величину $\Delta f = -4,5674 \cdot 10^{-3}$ Гц. Данное смещение соответствует реальной частоте бортового источника 10,22999999543 МГц.

Частота канала $L1$ соотносится с частотой бортового источника f_0 , как $L1 = 154 f_0$, а частота $L2 = 120 f_0$. В соответствии с релятивистской поправкой, на борту НКА формируются частоты $L1_s = 1575,41999929622$ МГц и $L2_s = 1227,5999994516$ МГц, которые с точки зрения наземного потребителя соответствуют $L1 = 1575,42$ МГц и $L2 = 1227,6$ МГц.

Кроме постоянных релятивистских эффектов, компенсируемых на борту НКА, на номинальные значения частот принимаемых потребителем сигналов воздействует переменное по частоте и знаку доплеровское смещение. Оно имеет максимальное положительное значение, когда НКА движется из-за горизонта навстречу потребителю, постепенно уменьшается и становится равным нулю, когда положение НКА на небосклоне достигает апогея по отношению к наблюдателю. Затем доплеровское смещение меняет знак и увеличивается по мере движения НКА к горизонту. Чем ближе к точке зенита с точки зрения наблюдателя проходит орбита НКА, тем больше величина доплеровского смещения.

Корреляционные потери. Корреляционные потери при приеме сигнала определяются, как разность энергии сигнала, излучаемого передатчиком в полосе 20,46 МГц и энергии сигнала, принятой идеальным корреляционным приемником в той же полосе частот. Для каналов $L1$ и $L2$ наихудшее значение корреляционных потерь имеет место, когда несущая частота модулируется суммой $P(Y)$ кода и навигационного сообщения. В этом случае корреляционные потери определяются следующими составляющими:

1. Неидеальность модуляции в передатчике НКА – 0,6 дБ;
2. Искажение формы сигнала в приемнике вследствие прохождения через фильтр 20,46 МГц – 0,4 дБ.

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 20,46 МГц для частот $L1$ и $L2$ не превышает –40 дБ относительно мощности немодулированных несущих.

Квадратура фазы. Два компонента сигнала $L1$, модулированные двумя различными битовыми последовательностями (код C/A плюс данные и код P(Y) плюс данные) должны находиться в фазовой квадратуре с точностью ± 100 миллирадиан со сдвигом несущей C/A относительно P на 90° . Если вести речь о фа-

зе несущей P , случай, когда $P_{\lambda}(t) = 0$, понимают как "нулевой угол фазы". Генератор кодов $P(Y)$ и C/A управляет фазами соответствующих выходных сигналов по следующему принципу: если $P_{\lambda}(t) = 1$, происходит сдвиг на 180° несущей P ; если $G_{\lambda}(t) = 1$, несущая C/A опережает P на 90° ; если $G_{\lambda}(t) = 0$, то несущая C/A отстает на 90° (таким образом, когда $G_{\lambda}(t)$ меняет состояние, происходит реверс на 180° несущей C/A). Результирующие номинальные составные фазы сигнала, как функция от двоичных значений модулирующих сигналов показаны в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Составные фазы излучаемого сигнала L1

Номинальные значения составной фазы, град	Двоичные состояния	
	P	C/A
0	0	0
-70,5	1	0
+109,5	0	1
180	1	1

Примечание: для комбинации 0,0 знак составной фазы считается положительным.

На рис. 4.3 приведена упрощенная структурная схема, поясняющая принцип генерации последовательностей $P_{\lambda}(t)$ с тактовой частотой 10,23 МГц и $G_{\lambda}(t)$ с тактовой частотой 1,023 МГц для кодов P и C/A соответственно, а также суммирования их по модулю 2 с навигационным сообщением $D(t)$, которое тактируется с частотой 50 Гц.

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

Канал	$P(Y)$	C/A
L1	-163,0 дБ-Вт	-160,0 дБ-Вт
L2	-166,0 дБ-Вт	

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

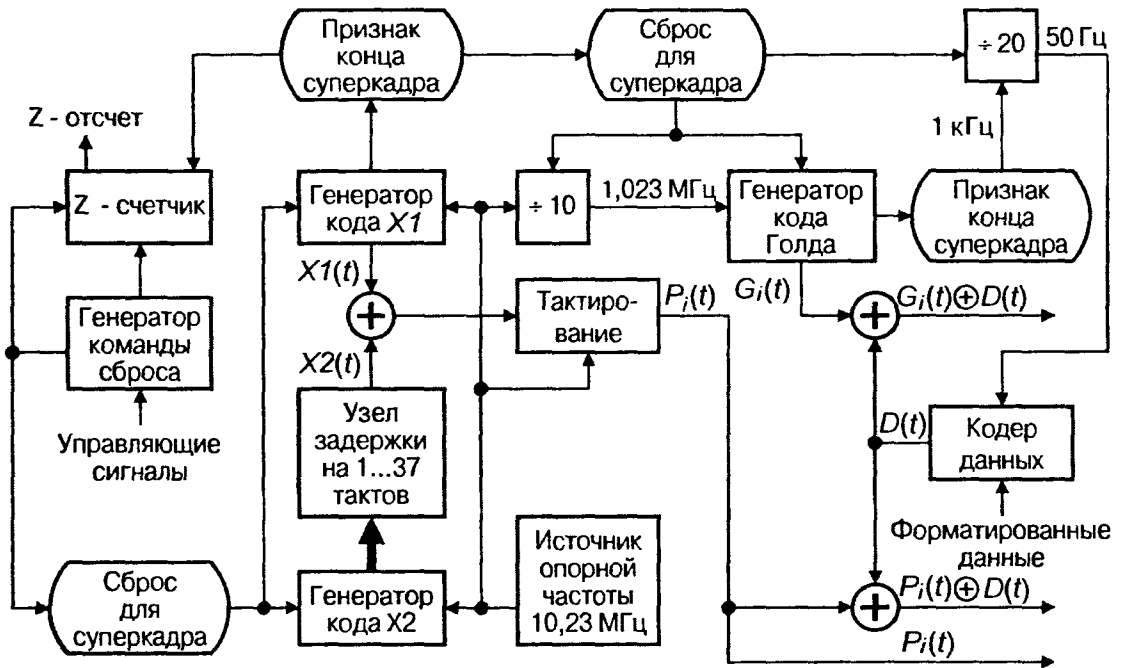


Рис. 4.3. Генерация кодов и модулирующих сигналов

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 составляющие. 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 3 нс.

Кроме того, существует *разность групповых задержек* сигналов L_1 и L_2 , также состоящая из постоянной и случайной составляющих. Среднюю разность групповых задержек принято считать постоянной составляющей, которая может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Абсолютная величина средней задержки не превышает 15 нс. Случайная составляющая не превышает 3 нс.

Когерентность передаваемых последовательностей. Все излучаемые определенным НКА сигналы когерентно сформированы из частоты одного бортового стандарта; все двоичные импульсы тактируются синхронно с Р-кодом в соответствии с его фронтами. Канал L_1 имеет два модулирующих сигнала (код $P(Y)$ и код C/A), для которых допустимый интервал между фронтами не превышает 10 нс.

Поляризация излучаемого сигнала. Излучаемый сигнал имеет правую круговую поляризацию (RHCP). В секторе углов излучения $\pm 14,3^\circ$ относительно оси симметрии диаграммы направленности передающей антенны коэффициент эллиптичности на частоте L1 должен быть не менее 1,2 дБ для НКА серии "Block II/IIA" и не менее 1,8 дБ для серии "Block IIR". Коэффициент эллиптичности на частоте L2 не менее 3,2 дБ для НКА серии "Block II/IIA" и 2,2 дБ для серии "Block IIR".

Формирование кодовых последовательностей

Структура кодовых последовательностей. Двоичная кодовая последовательность $P_i(t)$ формируется суммированием по модулю 2 двух псевдослучайных последовательностей $X1(t)$ и $X2(t - iT)$, где $T = 1/(1,023 \cdot 10^7)$ с – период следования разрядов Р-кода, i – целое число в интервале от 1 до 37, соответствующее номеру НКА. Таким образом, генерируется 37 уникальных последовательностей $P_i(t)$ с использованием одинаковых генераторов кода, как показано в табл. 4.1 и на рис. 4.3.

Линейная последовательность $G_i(t)$ является результатом сложения по модулю 2 двух 1023-битовых линейных последовательностей $G1$ и $G2$. Вторая последовательность избирательно задерживается на целое число разрядов, как показано в табл. 4.1, для формирования 36 уникальных последовательностей $G_i(t)$.

Формирование Р-кода. Как было сказано выше, псевдослучайная последовательность P_i является суммой по модулю 2 двух последовательностей $X1$ и $X2_i$, тактируемых с частотой 10,23 МГц. В свою очередь, $X1$ формируется сложением по модулю 2 выходных сигналов двух 12-разрядных регистров сдвига ($X1A$ и $X1B$) генерирующих сокращенные кадры длиной 4092 и 4093 бит соответственно. Когда число кадров $X1$ достигает 3750, генерируется признак конца эпохи $X1$. Эпоха $X1$ генерируется каждые 1,5 с, когда сформирована последовательность $X1$ из 15,345,000 разрядов. Образующие полиномы для последовательностей $X1A$ и $X1B$, относящиеся к соответствующим регистрам сдвига, имеют следующий вид:

$$(X1A) \quad 1 + X^6 + X^8 + X^{11} + X^{12};$$

$$(X1B) \quad 1 + X^1 + X^2 + X^5 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12}.$$

Упрощенные схемы формирования кодовых последовательностей при помощи регистров сдвига показаны на рис. 4.4, рис. 4.5, рис. 4.6 и рис. 4.7.

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

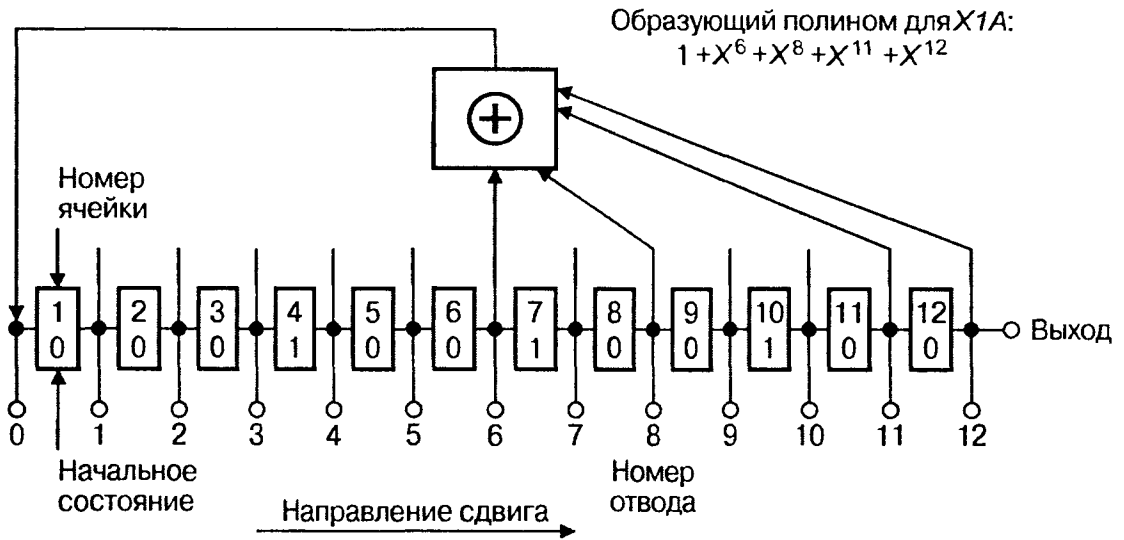


Рис. 4.4. Формирование последовательности X1A

Состояние каждого генератора может быть выражено как слово *кодového вектора*, следующим образом описывающего двоичное состояние каждого регистра:

вектор складывается из двоичных состояний каждого разряда регистра;

значение 12-го разряда последовательно принимает значения всех предыдущих, младших разрядов строго по порядку следования номеров;

сдвиг производится от младших разрядов к старшим и разряд 12 является выходом генератора кода.

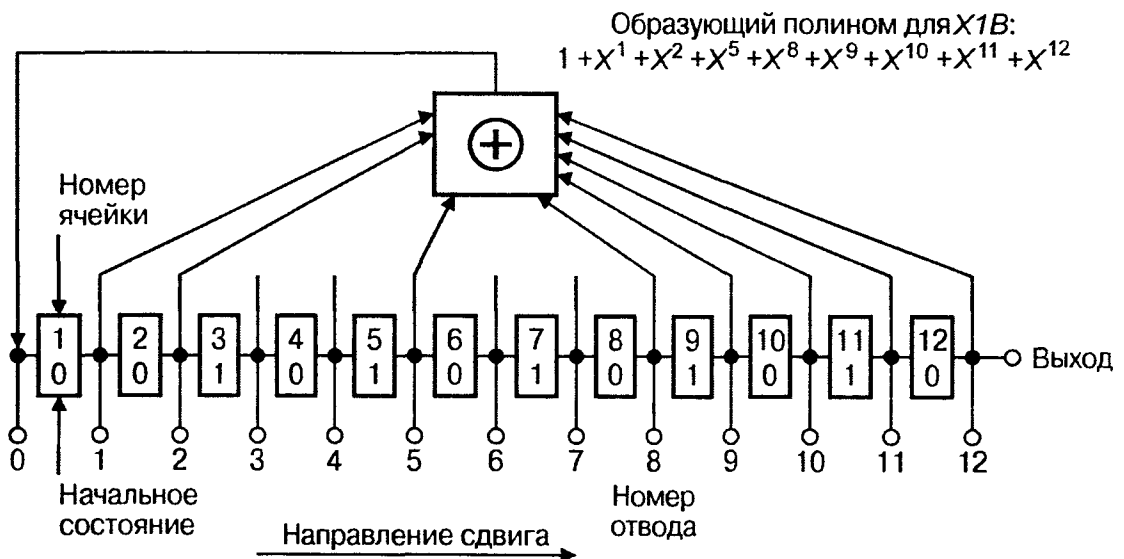


Рис. 4.5. Формирование последовательности X1B

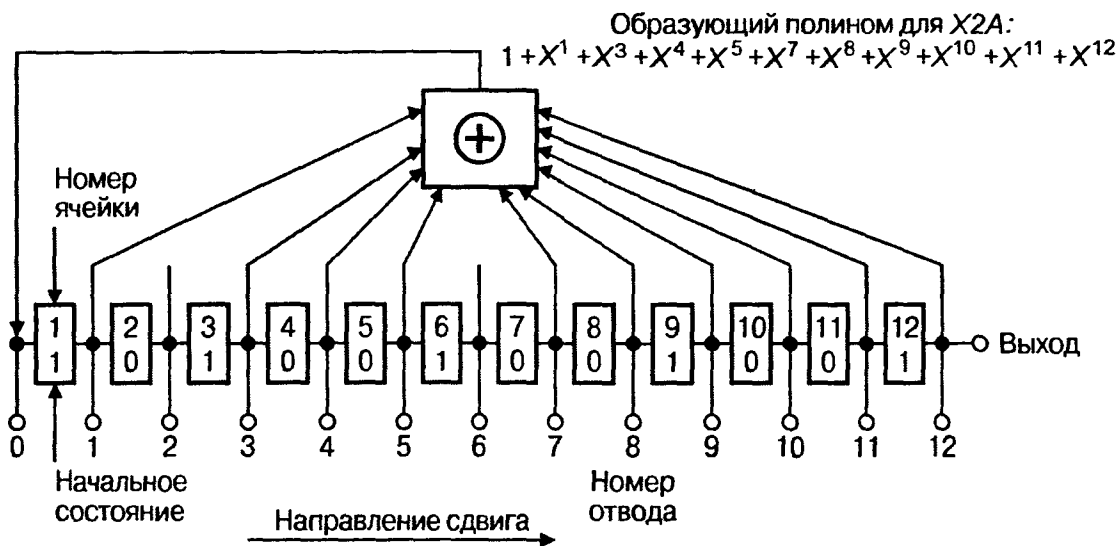


Рис. 4.6. Формирование последовательности X2A

Такой кодовый вектор описывает текущий двоичный уровень на выходе и 11 последующих уровней. В соответствии с этим определением, в начале каждой эпохи X1, сдвиговый регистр X1A инициализируется кодовым вектором 001001001000 и сдвиговый регистр X1B инициализируется кодовым вектором 010101010100. Первый разряд последовательности X1A и первый разряд последовательности X1B формируются одновременно, во время первого такта каждого периода X1.

Исходный 4095-битовый кадр генерируемых последовательностей укорочен для предотвращения прецессии (несинхронизма)

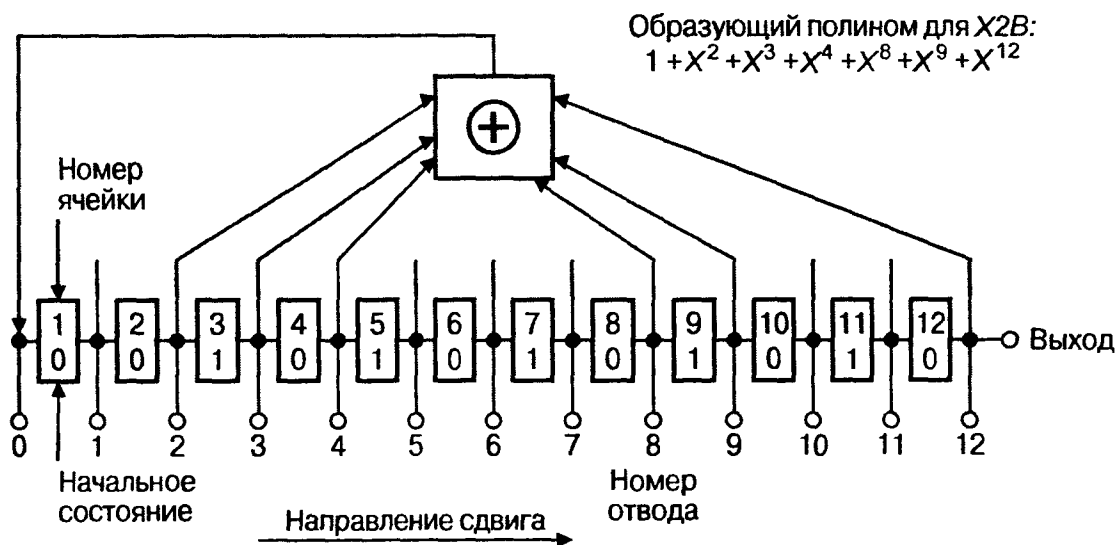


Рис. 4.7. Формирование последовательности X2B

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

последовательности $X1B$ с последовательностью $X1A$ в течение периода $X1$. Реинициализация сдвигового регистра $X1A$ производится после выдачи 4092 бит последовательности, с отбрасыванием последних трех бит (001) действительной 4095-битовой последовательности $X1A$. Реинициализация сдвигового регистра $X1B$ происходит после выдачи 4093 бит последовательности, с отбрасыванием двух последних бит (01) действительной последовательности $X1B$. В результате фаза последовательности $X1B$ сдвигается на один бит для каждого кадра $X1A$ в составе эпохи $X1$.

Как было сказано выше, эпоха $X1$ состоит из 3750 кадров $X1A$ (15,345,000 бит), что не соответствует целому числу кадров $X1B$. Для устранения данного несоответствия сдвиговый регистр $X1B$ фиксирует финальное состояние (бит 4093) своего 3749-го кадра, и удерживает его, пока регистр $X1A$ обрабатывает свой 3750-й кадр (343 дополнительных бита). По окончании 3750-го кадра устанавливается признак начала новой эпохи $X1$, который инициализирует регистры $X1A$ и $X1B$.

Для формирования последовательности $X2$; сначала формируется последовательность $X2$, которая затем задерживается на целое число тактов $i = 1 \dots 37$. Каждая последовательность $X2$; суммируется по модулю 2 с последовательностью $X1$, в результате формируется 37 уникальных последовательностей $P(i)$, из которых первые 32 предназначены для использования навигационными НКА, остальные пять используются альтернативными передатчиками, например наземными псевдолитами локального действия.

Сдвиговые регистры $X2A$ и $X2B$, используемые для формирования последовательности $X2$, функционируют аналогично упомянутым выше $X1A$ и $X1B$. Это также укороченные последовательности, $X2A$ длиной 4092 бит и $X2B$ длиной 4093 бит, следовательно, они имеют такое же соотношение длин, как сдвиговые регистры $X1$. Полный цикл $X2A$ включает в себя 3750 кадров; регистр $X2B$ защелкивает выходное состояние 3749-го кадра и удерживает его, пока регистр $X2A$ обрабатывает свой 3750-й кадр. Образующие полиномы для регистров $X2A$ и $X2B$, относящиеся к соответствующим регистрам сдвига, имеют вид:

$$(X2A) 1 + X^1 + X^3 + X^4 + X^5 + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12};$$


$$(X2B) 1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^8 + X^9 + X^{12}.$$

Регистр $X2A$ инициализируется вектором 100100100101, регистр $X2B$ вектором 010101010100.

Когда начинается новая неделя GPS, сдвиговые регистры X1A, X1B, X2A и X2B инициализируются для выработки первого разряда недели. Прецессии (дискретные биения) регистров сдвига по отношению к X1A циклически продолжаются, пока не закончится последний кадр X1A на интервале текущей недели GPS. В интервале времени последнего кадра X1A регистры X1B, X2A и X2B отработав свои кадры, удерживают последнее выходное состояние, пока не закончится кадр регистра X1A. В этот момент времени все четыре регистра инициализируются и вырабатывается первый разряд новой недели. Временной механизм формирования P-кода, формирования признака конца недели поясняют табл. 4.3, 4.4, рис. 4.8, 4.9 и показывают финальные кодовые векторы на момент окончания недели.

Таблица 4.3

Диаграмма сброса P-кода (последние 400 мкс недели)

Время	Разряд кода			
	X1A	X1B	X2A	X2B
	1	345	1070	967
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	3023	3367	4092	3989
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	3127	3471	4092	4093
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	3749	4093	4092	4093
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	•	•	•	•
	4092*	4093	4092	4093

• Последний бит недели.

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

Формирование C/A-кода. Каждая последовательность $G_i(t)$ представляет собой 1023-битовый код Голда, в свою очередь являющийся суммой по модулю 2 двух 1023-битовых линейных последовательностей $G1$ и $G2_i$.

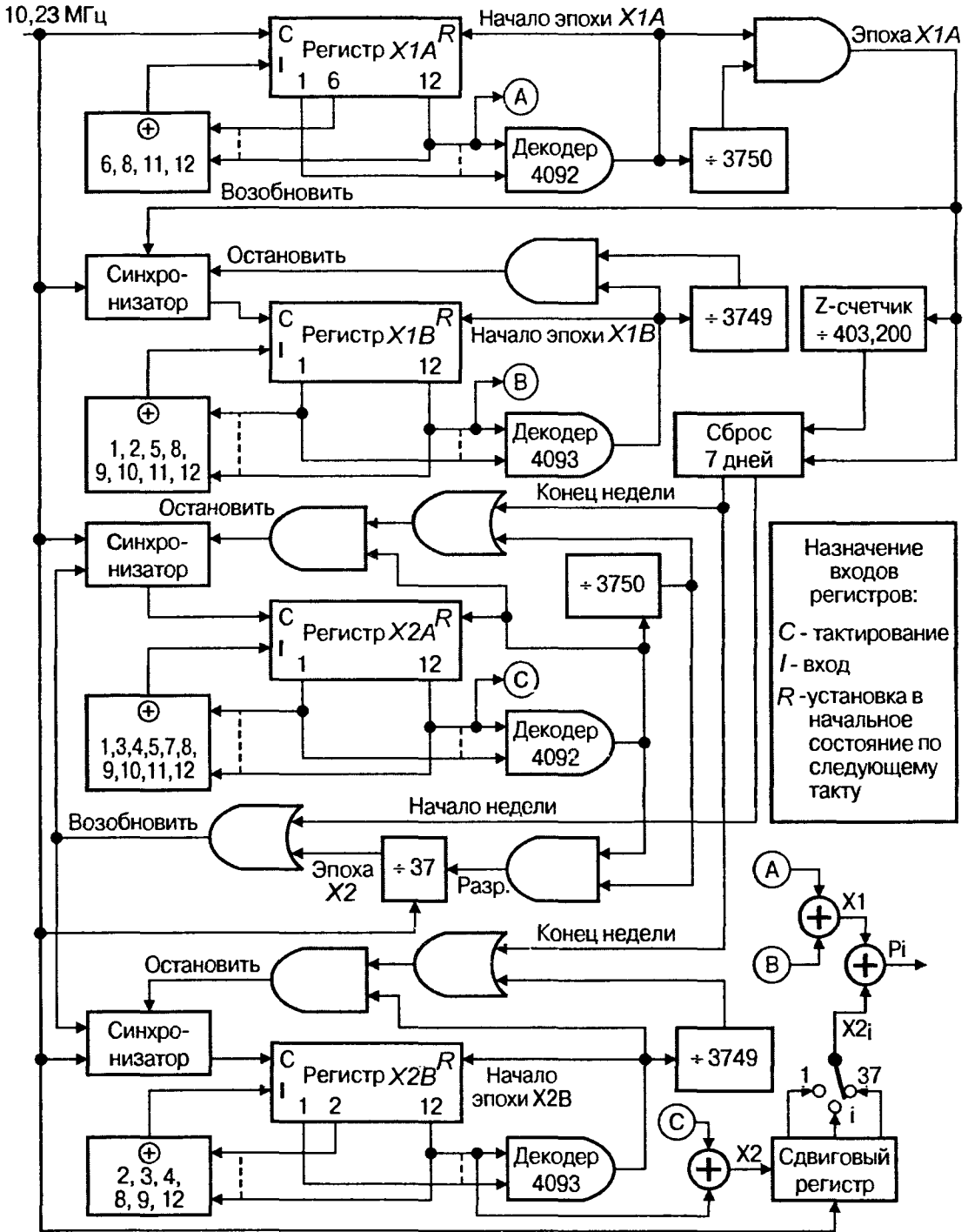


Рис. 4.8. Формирование P-кода

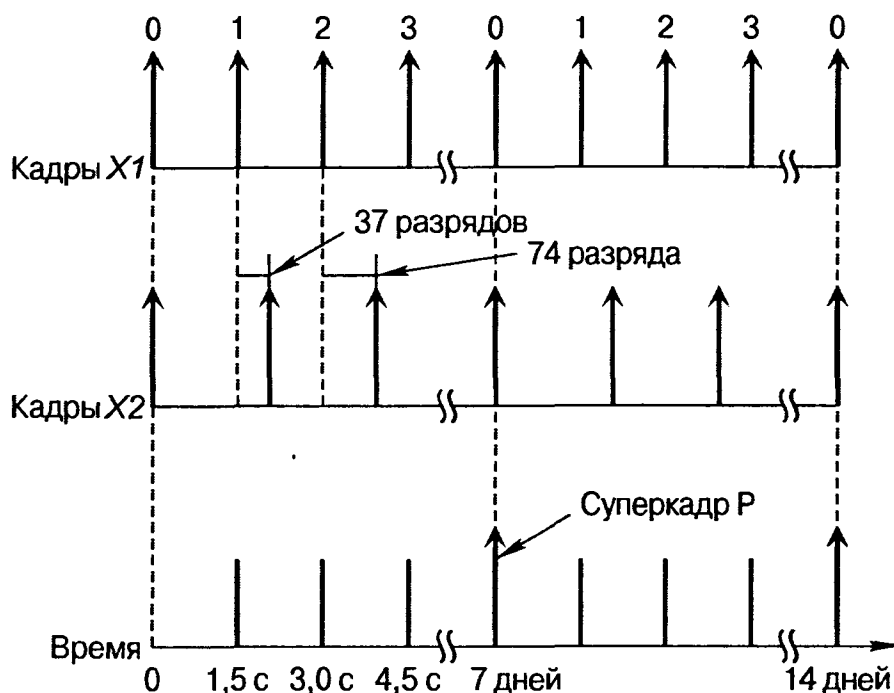


Рис. 4.9. Временные соотношения между компонентами P-кода

Таблица 4.4

Финальные состояния кодовых векторов

Код	Номер разряда	Состояние вектора кода	Состояние вектора для 1-го разряда следующей эпохи
X1A	4091	100010010010	001001001000
	4092	000100100100	
X1B	4092	100101010101	010101010100
	4093	001010101010	
X2A	4091	111001001001	100100100101
	4092	110010010010	
X2B	4092	000101010101	010101010100
	4093	001010101010	

Примечание: Первым разрядом в каждой последовательности является выходной бит, чей передний фронт формируется одновременно с началом эпохи.

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

Последовательность $G2_i$ формируется путем задержки $G2$ на целое число тактов в диапазоне от 5 до 950. Образующие полиномы для $G1$ и $G2$ описываются следующими выражениями:

$$G1 = X^{10} + X^3 + 1$$

$$G2 = X^{10} + X^9 + X^8 + X^6 + X^3 + X^2 + 1.$$

На рис. 4.10 и 4.11 показано формирование последовательностей $G1$ и $G2$.

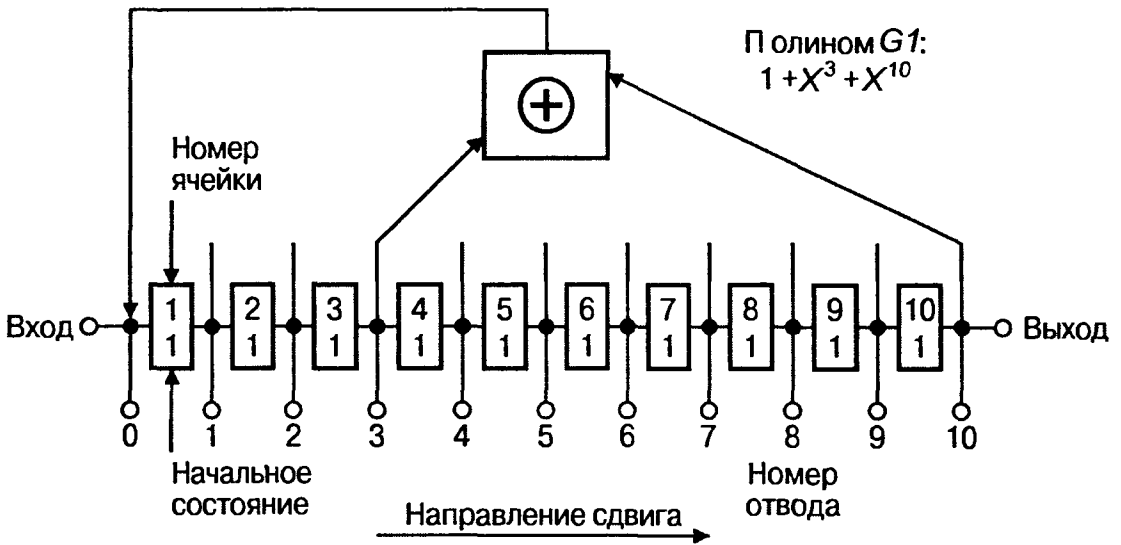


Рис. 4.10. Формирование последовательности $G1$

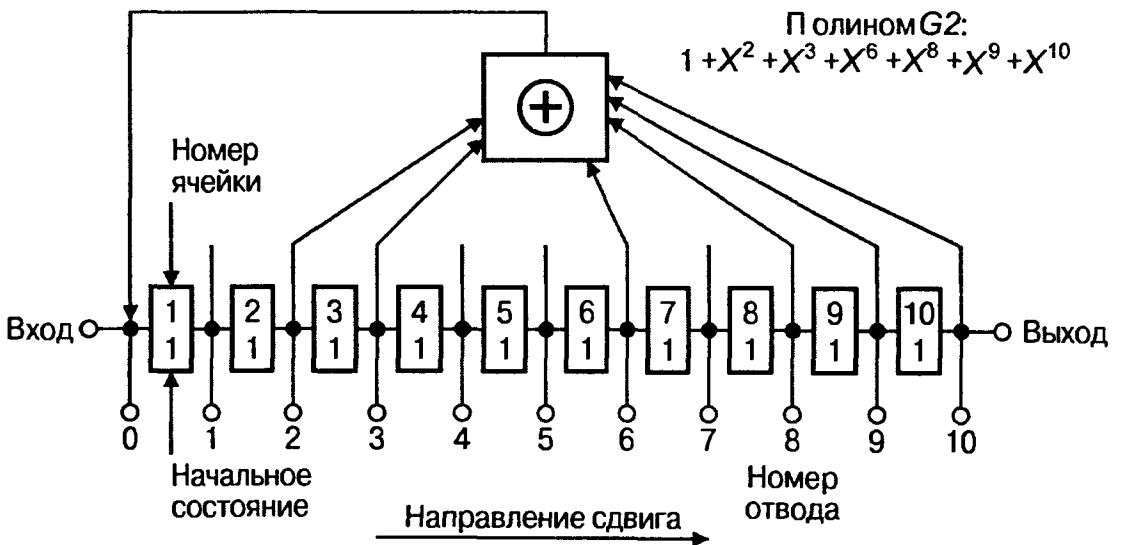


Рис. 4.11. Формирование последовательности $G2$

Начальный вектор обеих последовательностей имеет вид 1111111111. Сдвиговые регистры $G1$ и $G2$ инициализируются по началу эпохи $X1$. Для тактирования регистров $G1$ и $G2$ используется частота 1,023 МГц, образуемая делением частоты 10,23 МГц, поступающей из кодера P -последовательности. Инициализация регистров в фазе с эпохами $X1$ гарантирует, что первый бит C/A -кода начнется синхронно с первым битом P -кода.

Действующая задержка последовательности $G2$, благодаря которой формируется индивидуальная последовательность $G2_i$, достигается коммутацией двух выводов сдвигового регистра $G2$ с последующим суммированием по модулю 2, как показано на рис. 4.12. Выбирается одна из 36 возможных комбинаций подключения выходов регистра, соответствующая одному варианту P -кода.

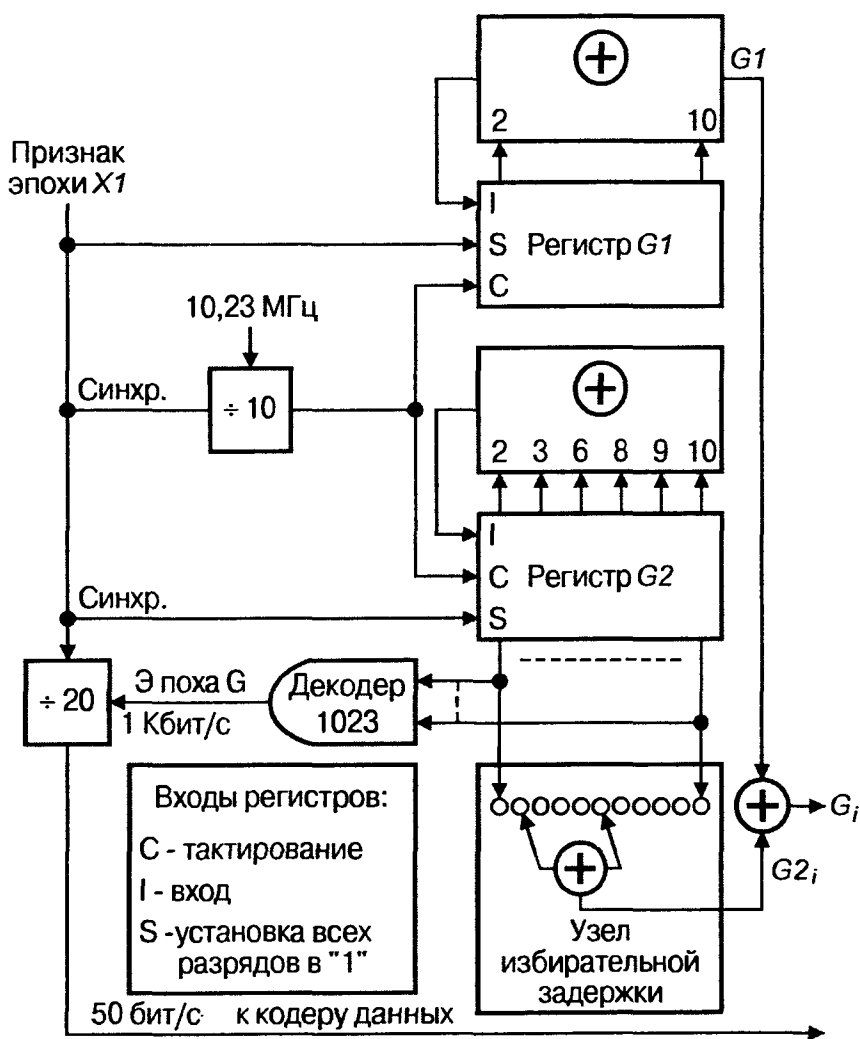


Рис. 4.12. Формирование C/A -кода

Системное время GPS и Z-отсчет. Системное время GPS устанавливается контрольным сегментом и соотносится со шкалой Координированного всемирного времени UTC (USNO). Нулевой точкой отсчета, когда началась нулевая неделя GPS, считается момент смены суток в полночь с 5 на 6 января 1980 г. Наибольшей единицей измерения времени GPS считается неделя, содержащая 604,800 с. Системное время GPS может отличаться от UTC на целое число секунд, так как системная шкала времени GPS должна быть непрерывной, тогда как UTC периодически корректируется на целое число секунд по рекомендации Международной службы вращения Земли (IERS). Погрешность привязки шкалы GPS к шкале UTC не превышает 1 мкс.

Навигационное сообщение содержит данные для привязки системного времени к UTC в приемном устройстве пользователя. Точность этих данных в интервале передачи выдерживается такой, что обеспечивает привязку системного времени GPS (задаваемого Главной станцией сегмента управления) к UTC(USNO) не менее 90 нс. Данные генерируются сегментом управления; следовательно их точность может снижаться, если по какой-либо причине сегмент управления не сможет передать обновленные данные на НКА. Компоненты погрешностей измерения дальности (например, уход бортовой частоты и погрешность определения положения НКА) увеличивают ошибку передачи точного времени. В стандартных условиях, когда производится передача системного времени по двум частотам и ошибка измерения дальности пользователем не превышает восьми метров, среднеквадратическая погрешность определения системного времени достигает 97 нс. К этой погрешности добавляются погрешность времени прохождения сигнала и задержка сигнала в приемнике, индивидуальные для каждого пользователя.

Эпоха $X1$ P-кода, передаваемого каждым НКА, содержит значение, используемое для вычисления системного времени приемным устройством. Время, передаваемое таким способом, именуется, как Z-отсчет, который представлен 29-битным числом, содержащим два следующих компонента:

1. Двоичное число, представленное последними 19 битами Z-отсчета, относится к отсчету времени недели (time of week, TOW) и равняется количеству эпох $X1$, сформированных за время, прошедшее с момента перемены недель. Это короткий отсчет, так как TOW может принимать значения лишь в диапазоне от 0 до 403199 эпох $X1$ (одна неделя) и сбрасывается в ноль в конце каждой недели. Нуле-

вое состояние отсчета TOW означает, что эпоха $X1$, реализуемая в этот момент, соответствует началу новой недели. Такая эпоха формируется приблизительно в ночь с субботы на воскресенье, где полночь определяется как 00 ч 00 мин UTC на Гринвичском меридиане. В течение года момент начала "нулевой эпохи" может на несколько секунд расходиться с нулевой точкой полночи UTC в связи с упомянутым выше расхождением шкал времени. С целью быстрого захвата P-кода наземными потребителями, в потоке данных HOW (HandOver Word, ключевое слово, указывающее точную фазу кода) по L-каналу передается усеченная версия TOW-отсчета в виде 17-ти старших бит. Соотношение между действительным TOW-отсчетом и его усеченной HOW-версией показано на рис. 4.13.

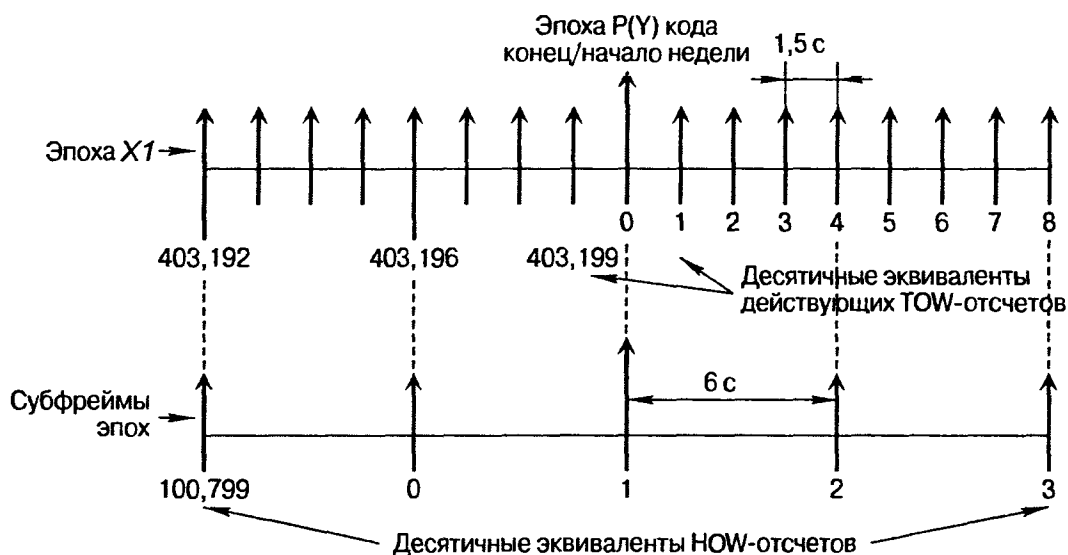


Рис. 4.13. Временное соотношение TOW- и HOW-отсчетов

2. Десять старших значащих бит Z-отсчета являются двоичным представлением по модулю 1024 последовательно задаваемого номера, соответствующего текущей неделе GPS. Диапазон значений этого счетчика от 0 до 1023, причем нулевое состояние соответствует нулевой неделе GPS и далее возрастает на единицу каждые 1024 недели. Таким образом, последовательным значениям старших 10 бит Z-отсчета соответствуют значения 0, 1024, 2048 и т.д. недель. Как особо отмечено в ICD-GPS-200C, пользователи должны иметь в виду, что номер недели, содержащийся в навигационном сообщении, не обязательно отражает полный системный номер недели GPS. Так, например, существует понятие "GPS system time rollover", когда завершается 1024-недельный цикл, по

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

которому изменяется навигационное сообщение НКА, и отсчет начинается заново. Этому моменту соответствует приращение на единицу счетчика, содержание которого соответствует 10 старшим разрядам Z-отсчета. Последний раз смена 1024-недельного цикла происходила в полночь с 21 на 22 августа 1999 г.

Относительные параметры времени. Многие параметры времени, характеристические для НКА и системы GPS в целом, отличаются от истинного времени и должны быть выражены как функции времени с коэффициентами, указанными в навигационном сообщении и извлекаемыми оборудованием потребителя. Следующие необходимые параметры являются функциями от времени GPS:

- бортовое время НКА;
- истинная аномалия;
- долгота восходящего узла;
- UTC;
- наклонение.

Каждый из этих параметров выражается, как полином во времени. Соответствующий порядок разложения может быть разным. Поскольку в формате навигационного сообщения, как будет рассмотрено далее, доступны поля данных ограниченной длины, номинальная эпоха полинома выбирается вблизи центра диапазона разложения, так что ошибка квантования мала. Далее, при рассмотрении содержания навигационного сообщения мы опишем алгоритмы применения каждого из относительных параметров времени, ниже приведем таблицу, содержащую перечисление параметров, которые передаются в навигационном сообщении, будучи выраженными по модулю 604800 с:

Интервал охвата, ч	Интервал передачи, ч	Кол-во часов после первого валидного времени передачи			
		t_{oc} (частота)	t_{oe} (эфемериды)	t_{oa} (альманах)	t_{ot} (UTC)
4	2*	2	2		
6	4	3	3		
8	6	4	4		
14	12	7	7		
26	24	13	13		
50	48	25	25		
74	72	37	37		

Интервал охвата, ч	Интервал передачи, ч	Кол-во часов после первого валидного времени передачи			
		t_{oc} (частота)	t_{oe} (эфмериды)	t_{oa} (альманах)	t_{of} (UTC)
98	96	49	49		
122	120	61	61		
146	144	73	73		
144 (6 дней)	144			70	70
144 (6 дней)	4080			70	70

* Некоторые НКА имеют интервал передачи 1 ч.

Коэффициенты разложения напрямую зависят от выбора параметра, и, таким образом, параметр времени и коэффициенты разложения должны рассматриваться, как неразделимый набор параметров. Потребитель, использующий текущий набор параметров, будет работать с отрицательными значениями $(t - t_{oc})$ и $(t - t_{oe})$ в оценке разложения.

Сегмент управления вносит некоторые девиации в параметры для предотвращения неоднозначности, в момент, когда поток передаваемых с НКА данных переключается на новый набор. Изменение начального времени относительно используемого потребителем означает изменение значений в наборе данных.

Достоверность навигационного сообщения в автономном режиме. НКА серии "Block II" и "Block IIA" способны хранить в бортовой памяти навигационные данные, соответствующие 182 дням функционирования системы. При этом обеспечивается доступность услуги позиционирования в течение 180 дней. Это означает, что если для некоторого НКА обмен данными с наземным комплексом управления по каким-либо причинам будет невозможен, то полученных от наземной станции данных будет достаточно для формирования навигационного сообщения в течение 180 дней от момента последнего обновления бортовой памяти.

НКА "Block IIR" способны хранить в памяти навигационные данные для 182 дней при работе в режиме, аналогичном "Block IIA", либо хранят данные полученные из сегмента управления, достаточные для формирования навигационного сообщения в течение 210 дней в режиме "Autonav".

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

Поскольку при функционировании системы в расширенном режиме не происходит обновление данных о состоянии ионосферы, не корректируются бортовые стандарты частоты и данные альманаха, точность позиционирования постепенно снижается. В течение краткосрочного интервала (около 14 дней) точность снижается медленно, и к концу этого периода достигает 425 м (SEP). Затем скорость падения точности возрастает, и к концу 180-дневного интервала погрешность позиционирования достигает 10 км (SEP).

Режим, в котором навигационные НКА формируют навигационное сообщение без ежесуточного обмена данными с комплексом управления, называется расширенным навигационным режимом (Extended Navigation Mode, ENM). На сохранность данных в бортовой памяти могут повлиять такие объективные причины, как жесткое ионизирующее излучение, перепады напряжения в бортовой сети, перепады температуры и т.п. В силу этих причин для НКА серии "Block II" не гарантируется достоверность передаваемых навигационных данных в течение всего 180-дневного срока, но гарантируется их достоверность в течение 14 дней для поддержания краткосрочной расширенной функциональности. При обнаружении сбоя в памяти НКА начинает передавать чередующиеся нули и единицы в словах 3-10, как это будет рассмотрено далее.

НКА серии "Block IIА" имеют более надежную память, сохранность данных в которой гарантируется на протяжении всего 180-дневного периода. Для серии "Block IIR" гарантируется сохранность содержимого памяти в течение 210 дней.

Несмотря на то, что содержимое бортовой памяти периодически изменяется в процессе загрузки, передача достоверных навигационных данных остается непрерывной. Это достигается применением буферной памяти, переключаемой синхронно с началом цикла передачи навигационного сообщения. Объем данных, передаваемых наземной станцией, может быть разным для разных НКА, с целью исправления ошибок в модулях бортовой памяти.

Структура навигационного сообщения ID2

Далее мы рассмотрим специфическую структуру данных, передаваемых в навигационном сообщении и именуемых ID2 (блок данных номер 2). Когда эти данные передаются в навигационном сообщении, им соответствует двоичная нотация 01. Блок данных ID1 в системе больше не используется.

Данные передаются по каналам L1 и L2 со скоростью 50 бит/с, одинаково для обоих каналов и независимо от применяемых псевдослучайных дальномерных кодов.

Рассматривая навигационное сообщение, будем использовать терминологию, принятую в [11], когда структурными единицами сообщения являются *страницы, кадры, подкадры* и *слова*. Это позволит нам соблюсти терминологическое единство с прочими зарубежными публикациями, описывающими функционирование GPS. Но не следует думать, что иерархия структурных единиц настолько проста и соответствует приведенному выше порядку.

Структура навигационного сообщения основана на базовом формате с длиной кадра 1500 бит, разбитого на 5 подкадров по 300 бит. В процессе передачи навигационного сообщения подкадры 4 и 5 подкоммутируются к различным источникам данных, образуя 25 уникальных комбинаций, тогда как подкадры с 1 по 3 имеют постоянные источники информации. Таким образом, для передачи законченного навигационного сообщения необходимо 25 полных кадров. В каждом из этих 25 кадров подкадры 4 и 5 имеют различное информационное наполнение, поэтому принято говорить, что они образуют *25 страниц (с номерами от 1 до 25)*. Иначе говоря, в данном случае страница не является старшей структурной величиной, а характеризует способ передачи данных внутри подкадров, когда некоторые подкадры в цикле навигационного сообщения повторяются, а некоторые несут в себе данные, разбитые на страницы.

Каждый подкадр содержит 10 слов по 30 бит, старший разряд каждого слова передается первым. Каждый подкадр и/или страница содержит слово телеметрии TLM и ключевое слово HOW, сгенерированные НКА. Первым передается слово TLM, непосредственно за ним следует HOW и восемь слов данных. Каждое слово содержит биты четности. Структура навигационного сообщения показана на рис. 4.14(1) – рис. 4.14(11).

Сокращения и условные обозначения, использованные в рис.4.14(1) – 4.14(11):

** зарезервировано для системного применения, кроме страницы 17, где используется для специального сообщения;

*** зарезервировано для будущего использования;

P – 6 битов четности

t – 2 неинформационных выравнивающих бита для вычисления четности;

C – резервные биты слова TLM;

Страницы 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 и 10 подкадра 4 имеют одинаковый формат со страницами с 1-й по 24-ю подкадра 5.

Слово телеметрии (TLM). Слово телеметрии, длиной 30 разрядов, передается в кадре данных каждые 6 с и всегда является первым в каждом подкадре/странице. Формат слова TLM показан на рис. 4.15.

Старший разряд передается первым. Каждое слово TLM начинается преамбулой, за которой следует сообщение, два резервных разряда и шесть битов четности. Информация, которую несет сообщение, предназначена для авторизованных потребителей и наземных станций управления.

Ключевое слово захвата фазы кода (HOW). Слово HOW, длиной 30 разрядов, передается в кадре данных каждые 6 с непосредственно после слова TLM. Формат и содержание слова HOW показаны на рис. 4.15.

Старший разряд передается первым. Слово HOW начинается с 17-ти старших разрядов счетчика TOW, отсчитывающего время внутри текущей недели системы. В свою очередь, TOW содержит 19 младших разрядов 29-разрядного Z-отсчета (см. подпункт.4.4.2). Упомянутые 17 разрядов соответствуют TOW-отсчету количества эпох X1, прошедших до начала (передний фронт) последующего подкадра.

Разряд 18 является "аварийным" флагом. Если флаг установлен (разряд 18 = "1"), это сигнализирует неавторизованным потребителям, что реальная точность измерения дальности может быть хуже, чем указано в подкадре 1, и они могут использовать принятые данные только на свой риск. Интерфейс для авторизованного пользователя в этом случае описывается соответствующими закрытыми документами.

Разряд 19 является флагом включения антиспуфинга. Если разряд 19 = "1", это означает, что на *данном* НКА включен режим антиспуфинга.

Разряды 20, 21, и 22 несут номер подкадра, в котором передано слово HOW:

Подкадр	Двоичный номер
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

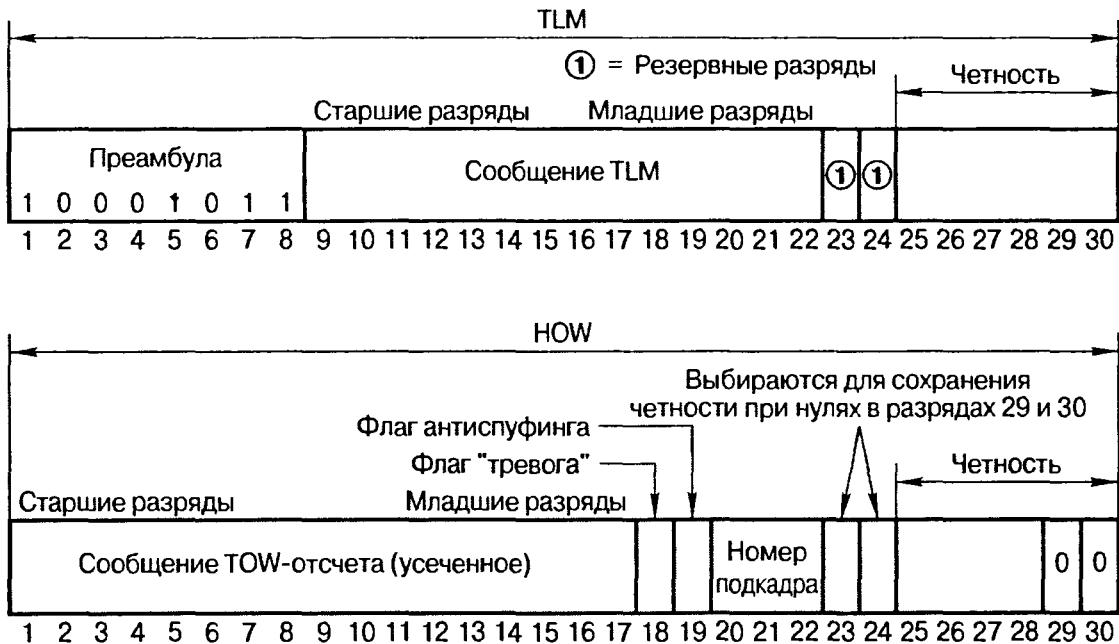


Рис. 4.15. Формат слов TLM и HOW

Далее мы рассмотрим содержание навигационного сообщения применительно к подкадрам.

Основные системные различия GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС

Основываясь на приведенной в [22] сравнительной таблице технических параметров двух СНС, отметим основные различия между

GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС.

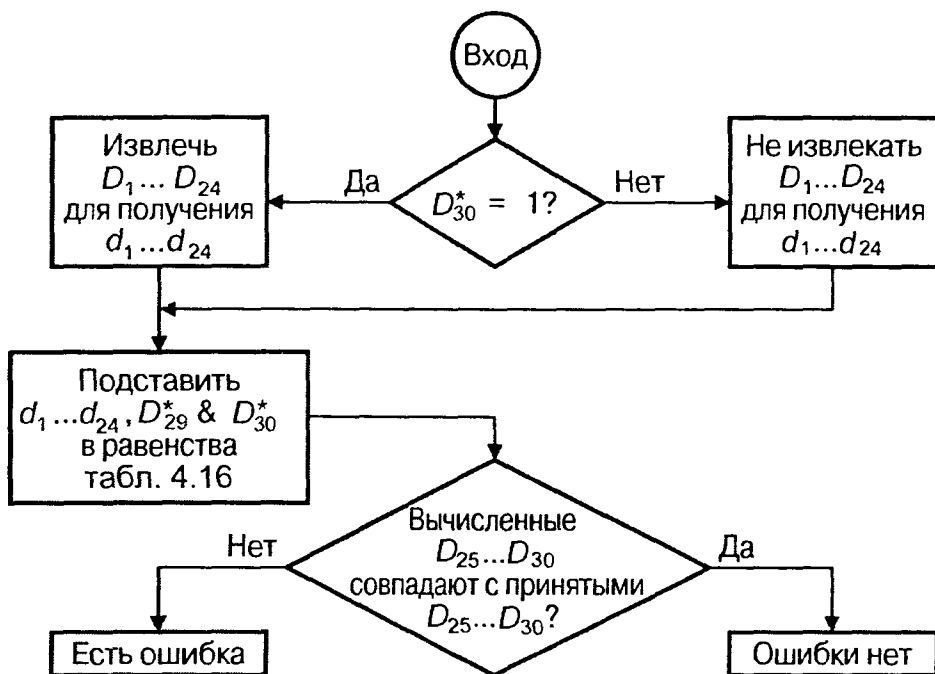


Рис. 4.17. Пример алгоритма проверки четности в аппаратуре потребителя

Несмотря на то, что имеются некоторые различия в орбитальной структуре систем, к основным отличиям прежде всего следует отнести различия в навигационных сигналах. Во-первых, в GPS применяется кодовое разделение каналов, а в ГЛОНАСС - частотное. Во-вторых, в отличие от GPS, в ГЛОНАСС никогда не применялось преднамеренное ухудшение характеристик сигнала стандартной точности. На данный момент преднамеренное ухудшение характеристик отменено и в системе GPS, но правительство США оставило за собой право введения помех в случае необходимости.

Показатель	ГЛОНАСС	GPS NAVSTAR
Число НКА в полной системе	24	24
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число НКА в каждой плоскости	8	4
Наклонение орбиты, °	64,8	55
Высота орбиты, км	19 130	20 180
Период обращения НКА	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 58 мин 00 с
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Масса НКА, кг	1450	1055

Система глобального позиционирования NAVSTAR, США

Показатель	ГЛОНАСС	GPS NAVSTAR
Мощность солнечных батарей, Вт	1250	450
Срок активного существования, лет	3	7,5
Средства вывода на орбиту	Протон-К/ДМ	Delta 2
Число НКА, выводимых за один запуск	3	1
Космодром	Байконур	Мыс Канаверал
Эталонное время	UTC (SU)	UTC (NO)
Метод доступа	FDMA	CDMA
Несущая частота:		
L1	1598,0625—1604,25	1575,42
L2	7/9 L1	60/77 L1
Поляризация излучения	Правосторонняя	Правосторонняя
Тип ПСП	М-последовательность	Код Голда
Число элементов кода		
C/A	511	1023
P	51 1000	2,35x10 ¹⁴
Скорость кодирования, Мбит/с		
C/A	0,511	1,023
P	5,11	10,23
Уровень внутрисистемных радиопомех, дБ	- 48	- 21,6
Структура навигационного сообщения		
Скорость передачи, бит/с	50	50
Вид модуляции	BPSK (Манчестер)	BPSK NRZ
Длина суперкадра, мин	2,5 (5 кадров)	12,5 (25 кадров)
Длина кадра, с	30 (15 строк)	30 (5 строк)
Длина строки, с	2	6

Различается и структура навигационного сообщения. Благодаря тому, что длительность суперкадра в СНС ГЛОНАСС составляет 2,5 мин (в отличие от 12,5 мин для GPS), в ней происходит более быстрое обновление альманаха.

Орбитальная группировка СНС ГЛОНАСС построена таким образом, что меньше, чем у GPS, подвержена влиянию нецентричности поля тяготения Земли и коррекция положения СНС требуется намного реже.

Различия в алгоритмах формирования навигационных сигналов и применяемых системах времени и координат менее важны с точки зрения конечного потребителя при построении комбинированной аппаратуры или выборе СНС, так как эти различия преодолеваются соответствующими алгоритмическими и вычислительными методами, используемыми в приемоиндикаторе.