

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

А.Ю. ШАТИЛОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОСИГНАЛОВ
ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ SBAS

Учебное пособие
по курсам

«Основы построения спутниковых радионавигационных систем» и
«Особенности спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС, GPS,
Galileo»

для студентов,
обучающихся по направлению «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Москва МЭИ
2015

Предисловие

Данное пособие предназначено для студентов, изучающих курсы по спутниковым радионавигационным системам (СРНС), в том числе:

- «Особенности СРНС ГЛОНАСС, GPS, Galileo»;
- «Основы построения спутниковых радионавигационных систем»;
- «Основы теории радионавигационных систем и комплексов»;
- «Бортовая аппаратура спутниковых радионавигационных систем»;
- «Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем».

Освоение материалов и решение задач по этим курсам вынуждает студентов искать характеристики радионавигационных сигналов в многочисленных и не всегда доступных им интерфейсных контрольных документах (ИКД).

Основная цель пособия состоит в том, чтобы дать студентам объединенные в одном месте справочные материалы по основным характеристикам существующих и перспективных радиосигналов СРНС. Кроме того, в пособии кратко изложены принципы разделения радиосигналов, виды модуляции и характерные для СРНС способы уплотнения отдельных компонент радиосигнала, а также методы кодирования навигационного сообщения, применяемые в СРНС.

В пособии рассмотрены радиосигналы основных существующих и разрабатываемых в настоящее время СРНС: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Евросоюз), Beidou (Китай). Также рассмотрены радиосигналы функциональных дополнений SBAS к спутниковым радионавигационным системам.

1 Разделение радиосигналов в СРНС

1.1 Семейство радиосигналов

Применительно к СРНС введем термин *семейство радиосигналов* – набор радиосигналов одного типа и одной системы, которые излучаются с разных навигационных спутников.

Семейства радиосигналов обычно имеют свои уникальные обозначения, например «ГЛОНАСС СТ», или «GPS L2C». Эти обозначения приведены в графе «сигнал» таблиц раздела 6. (В практике применения СРНС часто встречается ситуация, когда под словом «сигнал» понимается семейство радиосигналов, например «сигнал Galileo E5a»).

Для обеспечения отдельного приема навигационным приемником радиосигналов от навигационных космических аппаратов (НКА) одной или различных СРНС применяют тот или иной принцип разделения

радиосигналов. В существующих СРНС применяются следующие типы разделения радиосигналов: кодовое, частотное, фазовое и временное.

1.2 Кодовое разделение

При кодовом разделении, радиосигналы одного семейства излучаются на одной и той же несущей частоте и отличаются видом модулирующей последовательности дальномерного кода $G_{\text{дк},i}(t)$. Аналитическая запись радиосигнала при кодовом разделении имеет вид [1]

$$s_i(t) = A \cdot G_{\text{дк},i}(t) G_{\text{нс},i}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_{0,i}), \quad (1.1)$$

где i - номер радиосигнала (совпадающий с номером НКА); $G_{\text{дк},i}(t)$ - бинарная модулирующая последовательность дальномерного кода, уникальная для каждого НКА и принимающая значения ± 1 ; ω_0 - несущая частота, одинаковая для всех НКА; $\varphi_{0,i}$ - начальная фаза; A - амплитуда радиосигнала; $G_{\text{нс},i}(t)$ - бинарная последовательность символов навигационного сообщения. Символьная скорость последовательности $G_{\text{дк},i}(t)$ много выше, чем у $G_{\text{нс},i}(t)$.

Спектральные плотности радиосигналов с кодовым разделением идентичны, т.е. накладываются друг на друга, как это показано на рис. 1.1.

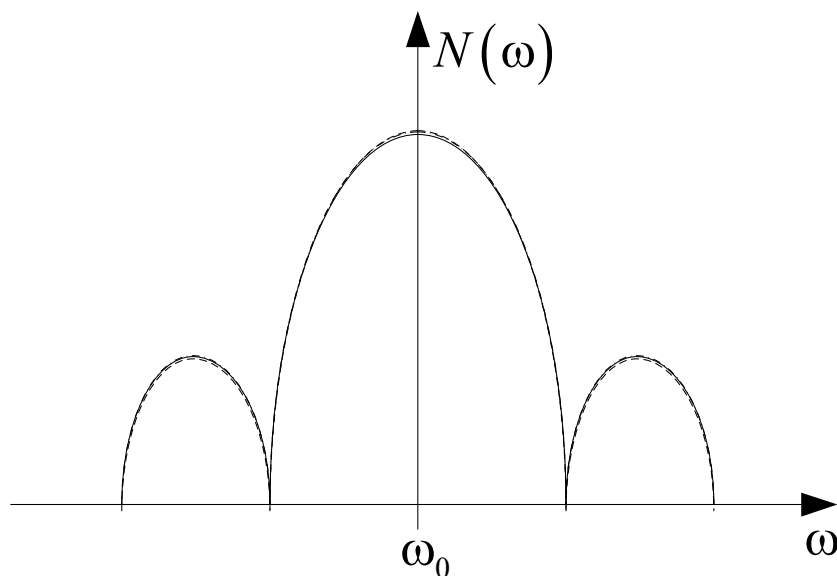


Рисунок 1.1 – График спектральной плотности мощности радиосигналов с кодовым разделением

Кодовое разделение радиосигналов используется во всех существующих зарубежных СРНС. В СРНС ГЛОНАСС кодовое разделение используется в радиосигналах частотного диапазона L3 (L3OC), а также в перспективных

радиосигналах открытого доступа L1OC, L2OC и санкционированного доступа L1SC, L2SC в частотных диапазонах L1, L2.

1.3 Частотное разделение

При частотном разделении, радиосигналы одного семейства излучаются на разных несущих частотах и таким образом разделяются в спектральной области. Аналитическая запись радиосигнала при частотном разделении имеет вид [1]

$$s_i(t) = A \cdot G_{\text{дк}}(t) G_{\text{нс},i}(t) \cos(\omega_{0,i}t + \varphi_{0,i}), \quad (1.2)$$

где i – номер радиосигнала (совпадающий с номером НКА); $G_{\text{дк}}(t)$ – бинарная модулирующая последовательность, которая содержит один и тот же дальномерный код для всех НКА и принимающая значения ± 1 ; $\omega_{0,i}$ – несущая частота, уникальная, для каждого НКА из видимой группировки; $\varphi_{0,i}$ – начальная фаза; A – амплитуда радиосигнала; $G_{\text{нс},i}(t)$ – бинарная последовательность символов навигационного сообщения. Символьная скорость последовательности $G_{\text{дк}}(t)$ много выше, чем у $G_{\text{нс},i}(t)$.

Спектральные плотности радиосигналов с частотным разделением разнесены, как это показано на рис. 1.2, хотя могут и частично пересекаться.

Частотное разделение используется только в СРНС ГЛОНАСС для излучаемых в настоящее время сигналов открытого доступа L1OF, L2OF и санкционированного доступа L1SF, L2SF.

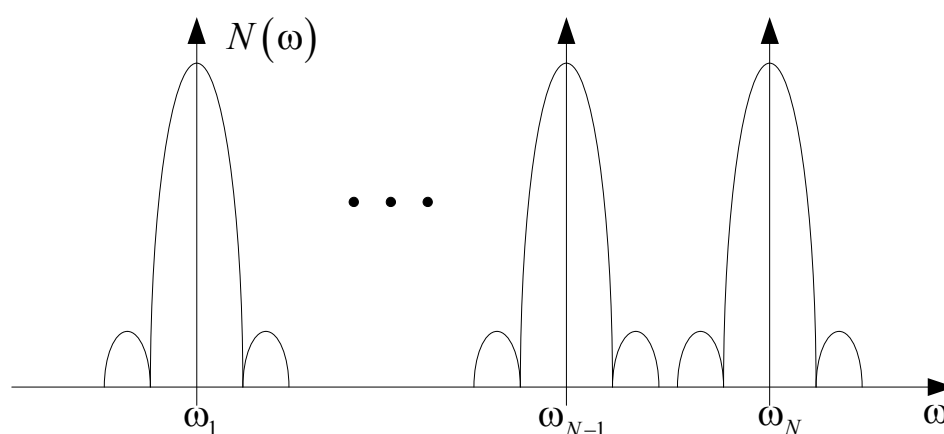


Рисунок 1.2 – График спектральной плотности мощности радиосигналов с частотным разделением.

1.4 Фазовое разделение

При фазовом разделении несущие колебания радиосигналов сдвинуты по фазе на 90° друг относительно друга – таким образом достигается

ортогональность этих радиосигналов. Поскольку фазовое разделение можно применить только к двум радиосигналам, оно не используется для разделения сигналов одного семейства, которых намного больше. Однако фазовое разделение широко применяется во всех СРНС при совместном излучении с каждого НКА двух компонент одного сложного радиосигнала. Принципы фазового разделения радиосигналов в СРНС подробно изложены в п. 4.1 «Квадратурное уплотнение».

1.5 Временное разделение

При временном разделении различные радиосигналы излучаются в различные непересекающиеся промежутки времени. По ряду причин временное разделение не применяется в СРНС для разделения сигналов одного семейства. Исключением является лишь система межспутниковых измерений ГЛОНАСС, в которой сигналы различных групп НКА излучаются в различные временные интервалы. Однако эти радиосигналы не доступны широкому кругу потребителей. В то же время следует отметить, что временное разделение широко применяется в СРНС при совместном излучении с каждого НКА двух компонент одного сложного радиосигнала. Принципы временного разделения применительно к последнему случаю изложены в п. 4.2 «Временное уплотнение».

2 Виды модуляции радиосигналов СРНС

2.1 Бинарная фазовая манипуляция (BPSK)

Бинарная фазовая манипуляция используется, так или иначе, во всех радиосигналах всех СРНС. В отечественной литературе такой вид модуляции обозначают как ФМ-2, а в зарубежной – BPSK (Binary Phase Shift Keying). Принцип бинарной фазовой манипуляции заключается в следующем: при переходе исходной модулирующей последовательности из 0 в 1, фаза синусоидального сигнала несущей частоты меняется на 180° . Это эквивалентно смене знака несущего колебания, как это показано на рис. 2.1. Поэтому в (1.1) или (1.2) за бинарную фазовую манипуляцию несущего колебания отвечают множители $G_{\text{дк}}(t)$, $G_{\text{нс},i}(t)$, принимающие значения +1 или -1.

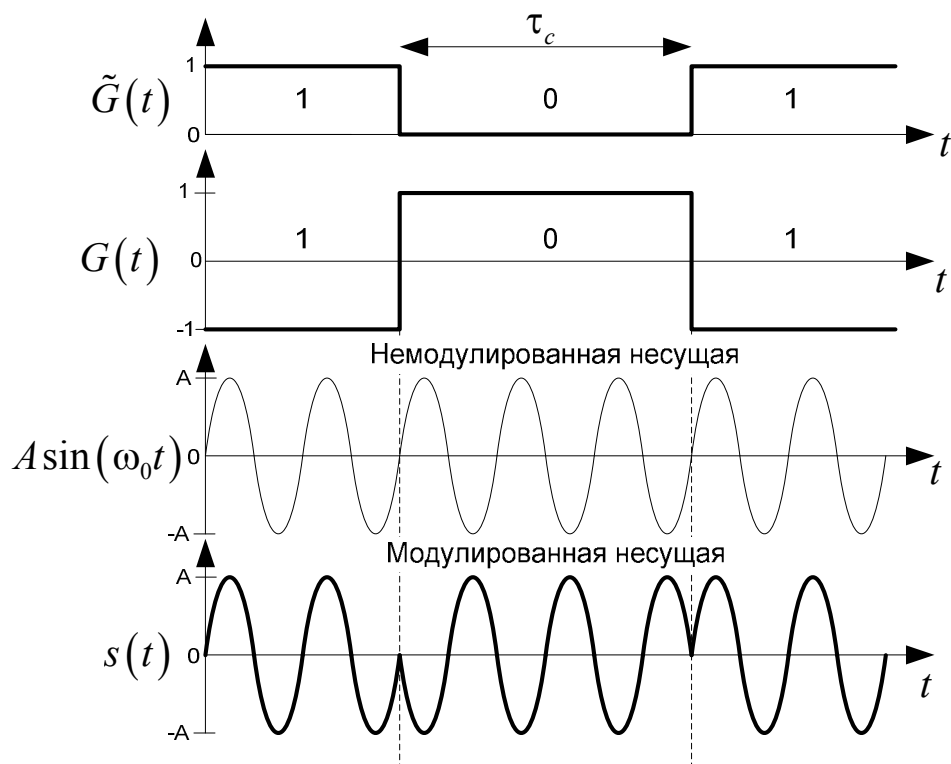


Рисунок 2.1 – Принцип бинарной фазовой манипуляции

Спектральная плотность мощности (СПМ) огибающей $G(t)$ описывается выражением [2]

$$N_0(f) = \tau_c \left(\frac{\sin(\pi f \tau_c)}{\pi f \tau_c} \right)^2, \quad (2.1)$$

где τ_c – длительность элементарного символа модулирующей последовательности $G(t)$, которая совпадает с длительностью символа дальномерного кода.

Выражение (2.1) справедливо в случае, когда последовательность $G(t)$ непериодическая, что соответствует, например, сигналам СРНС с санкционированным доступом. Для сигналов СРНС с открытым доступом последовательность $G(t)$ либо строго периодическая, либо имеет квазипериодический характер при модуляции дальномерного кода навигационным сообщением. В этом случае спектральная плотность мощности для огибающей $G(t)$ становится дискретной, с шагом спектральных линий $\Delta f = 1/T$, где T – период модулирующей последовательности $G(t)$:

$$N_0(f) = \tau_c \left(\frac{\sin(\pi f \tau_c)}{\pi f \tau_c} \right)^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - k/T). \quad (2.2)$$

Спектральная плотность мощности ФМ-2 радиосигнала $s(t)$ соответствует спектральной плотности огибающей (2.1) или (2.2) с учетом нормировки мощности и переноса на несущую частоту f_0 , как схематично показано на рис. 2.2.

Как следует из рис. 2.2, СПМ ФМ-2 радиосигнала носит лепестковый характер. В главном лепестке сосредоточено более 90% всей мощности сигнала. Поэтому ширину спектра ФМ-2 радиосигнала полагают равной ширине главного лепестка. Теоретически, боковые лепестки спектра уходят в бесконечность в обе стороны, однако в передатчике НКА стоят полосовые фильтры, которые ограничивают внеполосное излучение и подавляют боковые лепестки спектра.

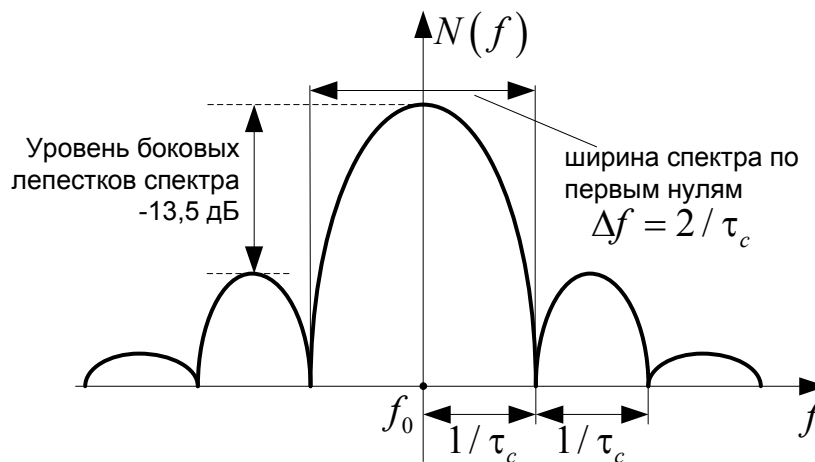


Рисунок 2.2 – Спектральная плотность мощности ФМ-2 радиосигнала

Ширина спектра ФМ-2 радиосигнала определяется длительностью элементарного символа дальномерного кода τ_c , или, что эквивалентно, частотой следования этих символов $f_c = 1 / \tau_c$. В подавляющем большинстве радиосигналов СРНС f_c кратна базовой частоте 1,023 МГц, являющейся скоростью следования символов дальномерного кода в сигнале GPS L1 C/A. Поэтому для обозначения фазоманипулированного радиосигнала с произвольной кратностью n базовой частоте 1,023 МГц используют обозначение **BPSK(n)**.

Примеры:

- сигнал GPS L1 C/A имеет модуляцию **BPSK(1)**, поскольку частота следования символов его дальномерного кода равна 1,023 МГц;

- сигнал ГЛОНАСС L3OC имеет модуляцию **BPSK(10)**, поскольку частота следования символов его дальномерного кода равна $10 \times 1,023$ МГц = 10,23 МГц;

- сигнал Beidou B1I имеет вид модуляции **BPSK(2)**, поскольку частота следования символов его дальномерного кода равна $2 \times 1,023$ МГц = 2,046 МГц.

Исключением являются радиосигналы ГЛОНАСС с частотным разделением, для которых обозначение модуляции вида BPSK(n) неудобно из-за дробного n (511/1023 или 5110/1023).

2.2 Модуляция радиосигнала цифровой поднесущей (ВОС)

Цифровая поднесущая – это меандровое колебание $G_{sc}(t)$, которое модулирует радиосигнал $s(t) = A \cdot G_{dk}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, уже модулированный дальномерным кодом. В общем виде функция модуляции $G_{sc}(t)$ описывается формулой

$$G_{sc}(t) = \text{sign}(\sin(\pi f_s t + \psi)).$$

В СРНС используется значение $\psi = 0$, а частота f_s берется кратной половине базовой частоты, т.е. 0,5115 МГц.

В англоязычной литературе закон модуляции сигнала цифровой поднесущей (с $\psi = 0$) обозначается как “Binary Offset Carrier” (ВОС).

Таким образом, ВОС модуляция — это модуляция несущего колебания сложным цифровым сигналом $G(t) = G_{dk}(t) \cdot G_{sc}(t)$. Рис. 2.3 иллюстрирует формирование сложного модулирующего сигнала $G(t)$ для ВОС(1,1).

Отметим, что границы смены символов дальномерного кода совпадают с границами символов цифровой поднесущей.

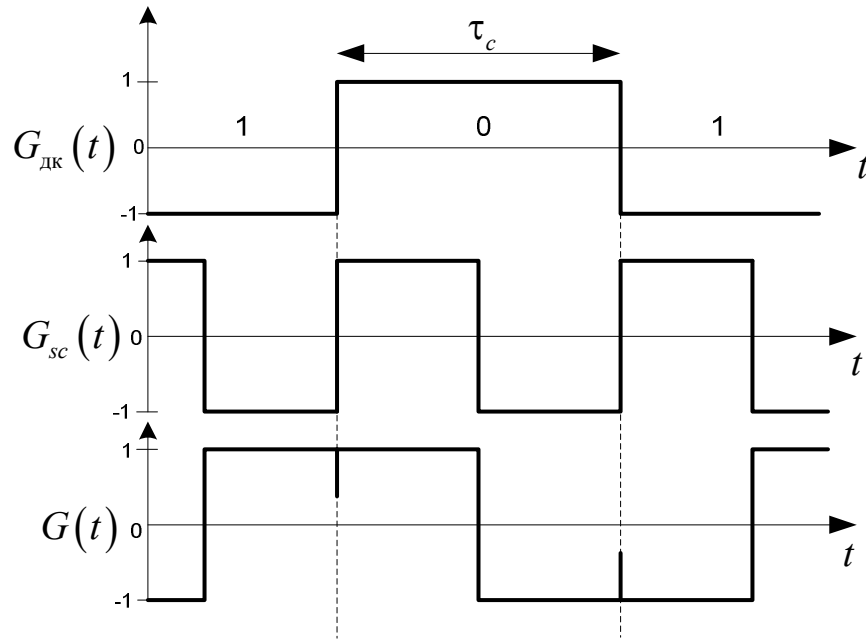


Рисунок 2.3 – Модуляция цифровой поднесущей

Для описания ВОС модуляции используют два параметра: частоту выборки символов дальномерного кода f_c и частоту цифровой поднесущей f_s . Поэтому для закона ВОС модуляции введено обозначение ВОС(m,n), где m – коэффициент кратности частоты поднесущей базовой частоте 1,023 МГц ($m = f_s / 1,023\text{МГц}$), а n – коэффициент кратности тактовой частоты дальномерного кода базовой частоте 1,023 МГц ($n = f_c / 1,023\text{МГц}$). Отметим, что обычно коэффициенты m и n кратны 0,5.

Рисунок 2.3 можно рассматривать как пример модуляции по закону ВОС(1,1) при котором на одном символе дальномерного кода укладывается один период цифровой поднесущей. В СРНС применяются следующие типы ВОС модуляции: ВОС(1,1), ВОС(5,2.5), ВОС(15,10), ВОС(6,1), ВОС(10,5).

СПМ огибающей $G(t)$, для сигнала с ВОС модуляцией описывается выражением [2]

$$N_{\text{ВОС}}(f) = \begin{cases} \frac{1}{f_c} \text{sinc}^2(\pi f / f_c) \text{tg}^2\left(\frac{\pi f}{2 f_s}\right) & \text{при } f_s = k f_c, \\ \frac{1}{f_c} \frac{\cos^2(\pi f / f_c)}{(\pi f / f_c)^2} \text{tg}^2\left(\frac{\pi f}{2 f_s}\right) & \text{при } f_s = \left(k + \frac{1}{2}\right) f_c, \end{cases} \quad (2.3)$$

где k – целое число.

Выражение (2.3) записано для непериодической $G(t)$, что характерно для радиосигналов СРНС санкционированного доступа. При наличии периодичности в $G(t)$, типичной для радиосигналов открытого доступа, СПМ приобретает дискретный характер, аналогично (2.2).

Типичный вид СПМ радиосигнала с модуляцией ВОС приведен на рис. 2.4. Спектральная плотность имеет два главных лепестка, в которых сосредоточено более 90% мощности. Ширину спектра такого радиосигнала принято определять по крайним границам главных лепестков как $\Delta f = 2(f_s + f_c)$.

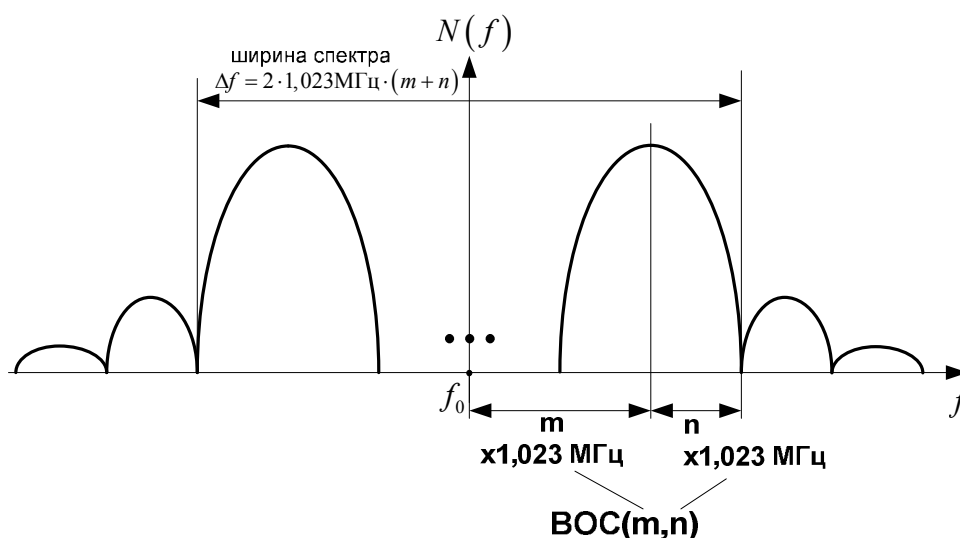


Рисунок 2.4 – Вид спектральной плотности мощности радиосигнала с ВОС модуляцией

3 Методы формирования дальномерного кода

3.1 Табличный метод

Табличный метод является наиболее универсальным и может быть применен для формирования практически любого периодического дальномерного кода. При табличном методе дальномерный код хранится в блоке оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), количество бит которого равно количеству символов дальномерного кода. Биты дальномерного кода выбираются из ОЗУ тактовыми импульсами, которые тактируют счетчик адреса (см. рис. 3.1).

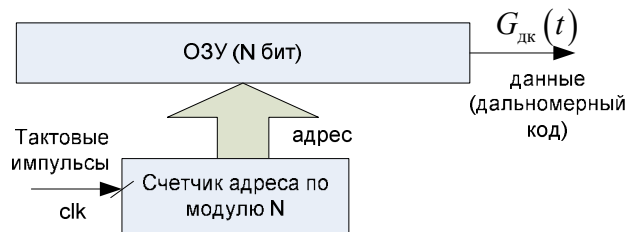


Рисунок 3.1 – Формирование дальнономерного кода табличным методом

Табличный метод официально [3] рекомендован для формирования дальнономерных кодов в сигналах Galileo E1-B/C и E5, несмотря на то, что эти коды могут быть получены другим путём.

3.2 Генерация М-последовательности

М-последовательность (последовательность максимальной длины) имеет наилучшие корреляционные свойства и наиболее простой метод формирования. Формирование М-последовательности основано на сдвиговом регистре с обратными связями, как показано на рис. 3.2. Номера отводов сдвигового регистра, с которых снимается сигнал обратной связи, определяются порождающим полиномом. Например, для дальнономерного кода радиосигнала L1OF ГЛОНАСС порождающий имеет вид [4]

$$g(x) = 1 + x^5 + x^9. \quad (3.1)$$

Эта запись является условной и означает то, что отводы обратной связи берутся с 5-го и 9-го триггеров, а общая длина сдвигового регистра $N = 9$ триггеров.

Выходной сигнал $G_{дк}(t)$ может сниматься с любого триггера. Например, для формирования дальнономерного кода радиосигнала L1OF ГЛОНАСС выходной сигнал снимается с 7-го триггера.

Типичным начальным состоянием для генератора М-последовательности является состояние «все единицы». М-последовательность повторяется каждые $2^N - 1$ бит, поэтому начальное состояние «все единицы» автоматически оказывается во всех ячейках регистра каждый период. Иногда возникает необходимость сформировать *усеченную* М-последовательность, то есть когда период требуемой последовательности L меньше, чем $2^N - 1$. В этом случае сброс в начальное состояние осуществляется принудительно через каждые L бит.

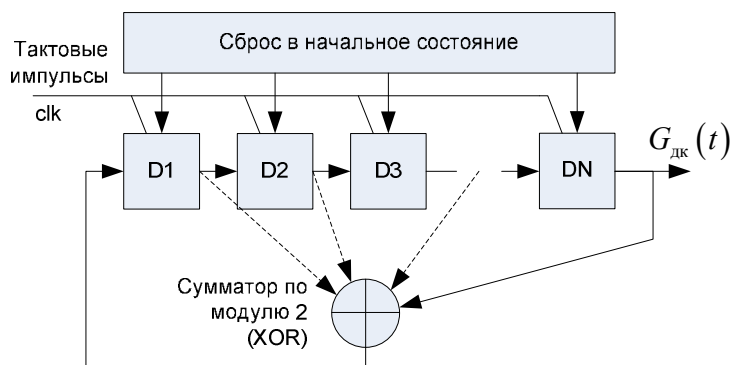


Рисунок 3.2 – Формирование M-последовательности

Генератор M-последовательности является базовым блоком для формирования дальномерных кодов большинства радиосигналов СРНС, как это показано в разделе 3.3. Генератор M-последовательности без сброса и усечения используется только для формирования радиосигналов LxOF ГЛОНАСС. Усеченная M-последовательность используется в радиосигналах LxSF ГЛОНАСС. В таблицах раздела 6, в графе типа дальномерного кода, M-последовательность обозначена как M(N), где N – длина сдвигового регистра генератора.

3.3 Коды, основанные на комбинировании M-последовательностей

Большинство дальномерных кодов, используемых в радиосигналах СРНС, сформированы путём суммирования по модулю 2 отрезков различных M-последовательностей. Один генератор дальномерного кода может насчитывать до 4-х генераторов M-последовательностей, как показано на рис. 3.3.

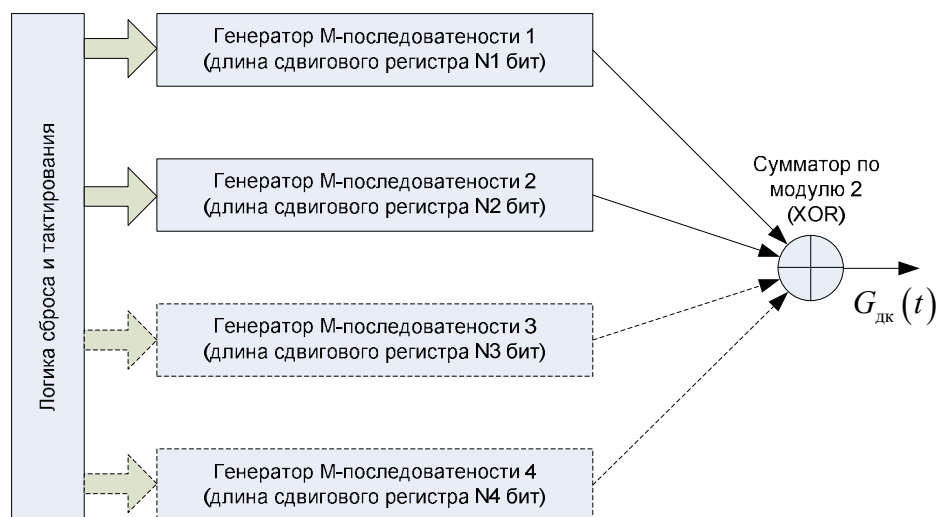


Рисунок 3.3 – Комбинирование M-последовательностей

Фактически, четыре 12-битных генератора М-последовательности используются только для формирования Р-кода системы GPS. Остальные коды основаны на сложении двух М-последовательностей.

В таблицах раздела 6, в графе «Тип дальномерного кода», использовано обозначение $p \times M(N)$, где p – количество генераторов М-последовательности (2 или 4), N – длина сдвигового регистра.

Среди дальномерных кодов, основанных на сложении двух М-последовательностей, наиболее распространенными являются *коды Голда* и *коды Касами*.

3.3.1 Коды Голда

Коды Голда формируются путем сложения (по модулю 2) М-последовательностей от двух генераторов одинаковой длины, но с разными начальными состояниями и разными номерами отводов обратной связи. Схема формирования кода Голда приведена на рис. 3.4. Длина (период) кода Голда совпадает с длиной исходных М-последовательностей.

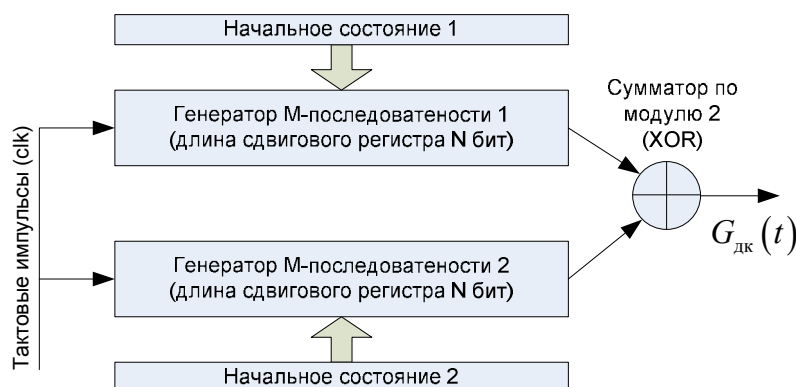


Рисунок 3.4 – Схема формирования кода Голда

Коды Голда используются в радиосигналах GPS C/A; информационной компоненте радиосигнала L1OC ГЛОНАСС, радиосигналах Galileo E5; Beidou B1I, B2I; SBAS L1. Когда требуемая длина дальномерного кода L меньше собственного периода генераторов М-последовательности, применяется усеченный код Голда. В этом случае после формирования L символов оба генератора М-последовательности принудительно сбрасываются в начальное состояние.

В таблицах раздела 6, в графе «Тип дальномерного кода» для кода Голда использовано обозначение «Голд(N)», где N – длина сдвигового регистра в генераторах М-последовательности.

3.3.2 Коды Касами

Коды Касами формируются путем сложения (по модулю 2) M -последовательностей от двух разных генераторов, в которых длины сдвиговых регистров отличаются вдвое. Схема формирования кода Касами приведена на рис. 3.5. Длина кода Касами в битах равна длине M -последовательности от наиболее «длинного» генератора.

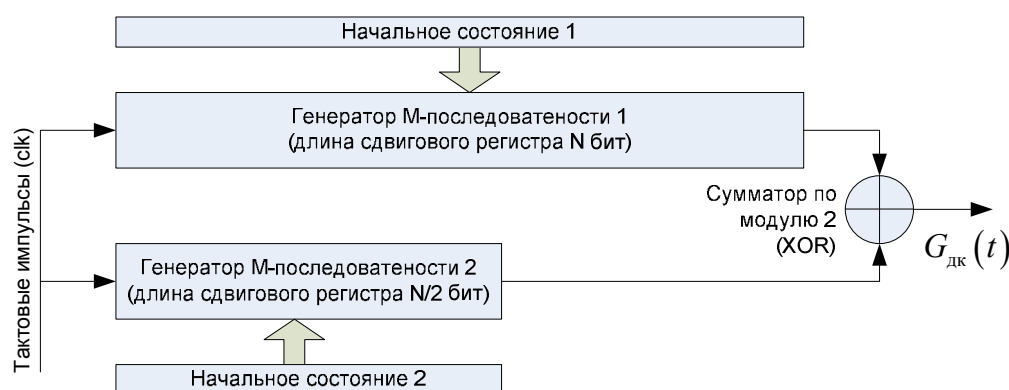


Рисунок 3.5 – Схема формирования кода Касами

Коды Касами используются в пилотных компонентах радиосигналов L1OC, L2OC, и в радиосигнале L3OC ГЛОНАСС. Как правило, требуемая длина дальномерного кода (L) меньше собственного периода генератора кода Касами. В этом случае, после формирования L символов, оба генератора M -последовательности принудительно сбрасываются в начальное состояние, таким образом код Касами усекается до требуемой длины.

В таблицах раздела 6, в графе «Тип дальномерного кода» для усеченного кода Касами использовано обозначение «Усеч. Касами(N)», где N – длина сдвигового регистра в более «длинном» генераторе M -последовательности.

3.4 Коды Вейла

Коды Вейла будут применяться только в сигнале GPS L1C. Метод формирования кодов Вейла основан на использовании последовательности Лежандра L_k . Последовательность Лежандра L_k задана в ИКД [5] буквально нулями и единицами и имеет длину 10223 бита, т.е. $k = 0 \dots 10222$. Код Вейла W для заданного номера НКА формируется в зависимости от индекса Вейла w по следующему закону:

$$W_k(w) = L_k \oplus L_{(k+w) \bmod 10223}, \quad k = 0 \dots 10222, \quad (3.2)$$

где « $(k + w) \bmod(10223)$ » – операция взятия суммы индексов $(k + w)$ по модулю 10223.

Как следует из (3.2), длина последовательности $W_k(w)$ равна 10223 бита, тогда как длина дальномерного кода в сигнале L1С равна 10230 бит. Недостающие семь бит вставляются в определенное место последовательности $W_k(w)$, которое называется индексом вставки p . Эти семь бит заданы в ИКД [5] как 0110100. Окончательный дальномерный код из 10230 бит составляется следующим образом:

$$G_{\text{дк}}(w, p) = \begin{cases} \{0110100, W_{0\dots 10222}\} & \text{при } p = 1, \\ \{W_{0\dots(p-2)}(w), 0110100, W_{(p-1)\dots 10222}\} & \text{при } p > 2, \end{cases} \quad (3.3)$$

где $\{*\}$ – операция побитовой конкатенации. Для индекса вставки $p=2$, кодовой последовательности $G_{\text{дк}}(w, p)$ не существует. Параметры w, p заданы в ИКД [5] для каждого номера НКА.

3.5 Наложение оверлейного кода

Наложение дополнительного кода, называемого оверлейным кодом, применяют для снижения отклика от мешающих сигналов на выходе корреляторов навигационного приемника при времени накопления, равном нескольким периодам дальномерного кода. При этом длина дальномерного кода не увеличивается, а, следовательно, поиск радиосигнала не усложняется.

При наложении оверлейного кода результирующая последовательность получается путем суммирования по модулю 2 дальномерного кода с оверлейным кодом. На длительности одного бита оверлейного кода укладывается полный период дальномерного кода (см. рис. 3.6). На нижнем графике рисунка 3.6 приведена результирующая последовательность, которая состоит из прямых и инверсных реплик дальномерного кода, обозначенных как $G_{\text{дк}}$ и $\overline{G_{\text{дк}}}$ соответственно.

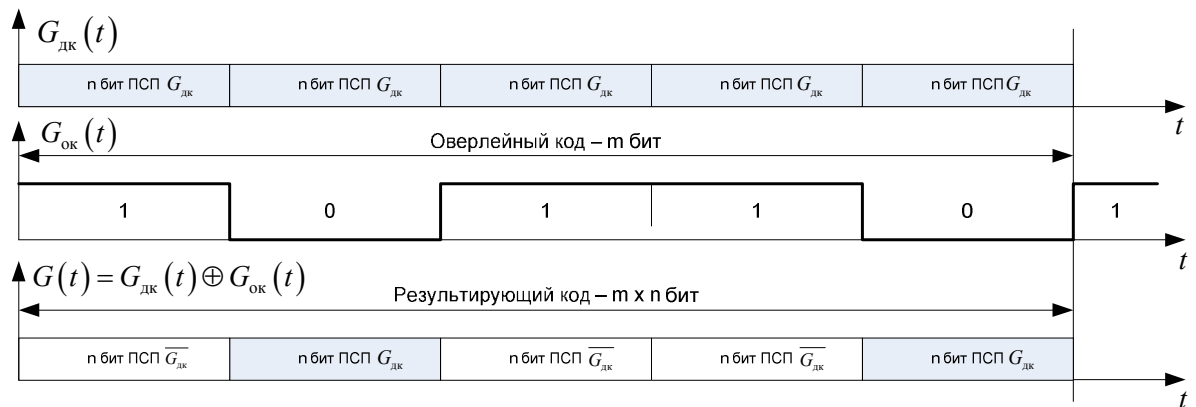


Рисунок 3.6 – Наложение оверлейного кода

Таким образом, результирующая последовательность имеет больший период, равный $n \cdot t$ бит, где n – длина дальномерного кода, t – длина оверлейного кода. Такое «искусственное» увеличение периода позволяет снизить боковые лепестки результирующей автокорреляционной функции модулирующей последовательности. При накоплении в корреляторах навигационного приемника на нескольких периодах дальномерного кода это улучшает характеристики слежения за слабыми радиосигналами в присутствии сильных. Вместе с тем, внутри результирующей последовательности содержатся прямые и инверсные реплики более короткого дальномерного кода, что упрощает поиск такого радиосигнала.

Оверлейный код характеризуется стандартными параметрами: длиной в битах, длительностью одного бита в миллисекундах и периодом, который равен произведению первых двух параметров. Эти параметры приведены в таблицах раздела 6.

4 Уплотнение радиосигналов

В практике применения СРНС возникает необходимость излучать с одного НКА в одном и том же частотном диапазоне сразу несколько радиосигналов. Например, в НКА ГЛОНАСС-М на каждой литерной частоте излучается пара радиосигналов: один для гражданских потребителей, а второй – для специальных потребителей. Другим примером, является концепция излучения пары радиосигналов: *пилотного (Pilot)* и *информационного (Data)*. Пилотный и информационный радиосигналы излучаются на одной и той же несущей частоте и могут рассматриваться как *компоненты одного радиосигнала*. Пилотная компонента не имеет модуляции навигационным сообщением, и это позволяет достичь максимальных характеристик точности оценивания частоты и задержки, а также чувствительности и помехоустойчивости приема. Пилотную компоненту иногда называют измерительным радиосигналом, потому, что она предназначена для измерений первичных

радионавигационных параметров при работе навигационной аппаратуры потребителей (НАП) в режиме слежения. Информационная компонента, как следует из названия, предназначен для передачи данных навигационного сообщения. Примером двухкомпонентного Pilot/Data радиосигнала является L3ОС ГЛОНАСС.

Процедуру, обеспечивающую передачу нескольких радиосигналов по одному радиоканалу НКА—потребитель с возможностью их отдельной обработки на приемной стороне, будем называть *уплотнением радиосигналов*.

Для обеспечения возможностью отдельной обработки на приемной стороне различных компонент передаваемого уплотненного радиосигнала требуется обеспечить их ортогональность, а также постоянство суммарной огибающей (последнее необходимо из-за особенностей построения передающего тракта НКА). Для этого применяют специальные методы уплотнения радиосигналов.

4.1 Квадратурное уплотнение

Квадратурное уплотнение позволяет передавать одновременно два независимых радиосигнала. Радиосигналы сдвинуты по фазе несущей на 90° друг относительно друга, при этом между ними может быть обеспечена теоретически стопроцентная ортогональность. Аналитическая запись радиосигнала с квадратурным уплотнением имеет вид

$$s_{\Sigma}(t) = A \cdot \underset{\text{сигнал 1}}{G_1(t)} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + A \cdot \underset{\text{сигнал 2}}{G_2(t)} \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4.1)$$

где $G_1(t)$, $G_2(t)$ – модулирующие цифровые последовательности, принимающие значения ± 1 и учитывающие наложение на дальномерный код навигационного сообщения, оверлейного кода, и/или цифровой поднесущей; A – постоянная амплитуда радиосигнала; ω_0 – несущая частота; φ_0 – начальная фаза.

Отметим, что постоянство огибающей обеспечивается не только в уплотненном радиосигнале $s_{\Sigma}(t)$, но и в каждой из его составляющих – «сигнал 1» и «сигнал 2». Сигнальное созвездие для всех комбинаций G_1 и G_2 , проиллюстрировано на рис. 4.1, при условии что $\varphi_0 = 0$.

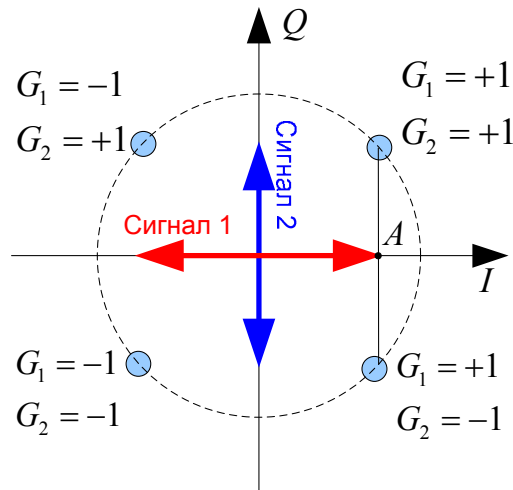


Рисунок 4.1 – Сигнальное созвездие при квадратурном уплотнении

Мощности каждой сигнальной компоненты одинаковы и равны

$$P_1 = P_2 = \frac{A^2}{2}.$$

Например, для сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением обе компоненты радиосигнала (4.1) модулированы по закону ФМ-2 (BPSK), и могут приниматься независимо, как ФМ-2 радиосигналы. При этом суммарный (уплотненный) радиосигнал $s_z(t)$ имеет *квадратурную* фазовую модуляцию, которая в зарубежной литературе обозначена как QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). В случае, когда последовательности G_1 и G_2 имеют одинаковые символьные скорости, QPSK модуляцию обозначают как **QPSK(n)**, где n – частота выборки символов в единицах базовой частоты 1,023 МГц (аналогия с BPSK(n)).

4.2 Временное уплотнение

Временное уплотнение также применяется в СРНС для совместного излучения двух компонент радиосигнала. При временном уплотнении, компоненты передаются в разные непересекающиеся промежутки времени, поэтому они ортогональны на длительном временном интервале. При этом суммарный (уплотненный) радиосигнал является непрерывным. В радиосигналах ГЛОНАСС с кодовым разделением временное уплотнение организовано так, что сначала передается бит дальномерного кода (ДК) первой компоненты, затем – второй, далее следующий бит ДК первой компоненты, затем следующий бит ДК второй компоненты, и так далее, как показано на рисунке 4.2 (побитное чередование (мультиплексирование)). Биты ДК первой компоненты обозначены как «d1,d2...», а биты ДК второй компоненты – как «p1,p2...».

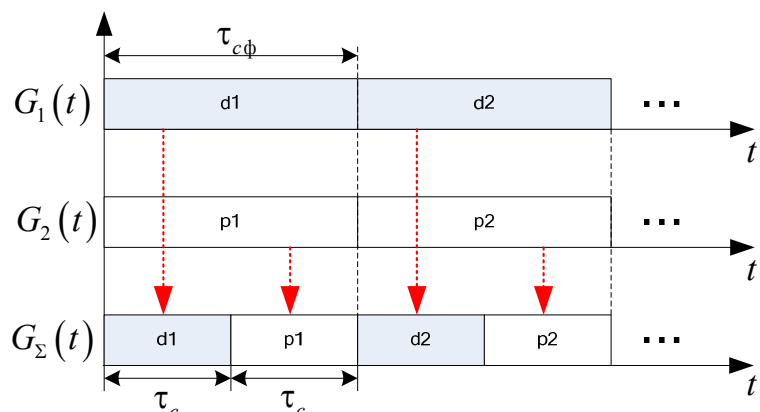


Рисунок 4.2 – Временное уплотнение сигналов

Аналитическая запись радиосигнала с временным уплотнением имеет вид

$$s_{\Sigma}(t) = A \cdot G_{\Sigma}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$G_{\Sigma}(t) = \begin{cases} G_1(t), & \text{при } 0 \leq (t \bmod (2\tau_c)) < \tau_c, \\ G_2(t), & \text{при } \tau_c \leq (t \bmod (2\tau_c)) < 2\tau_c, \end{cases} \quad (4.2)$$

где τ_c – длительность символа результирующей последовательности; $G_1(t)$, $G_2(t)$ – модулирующие цифровые последовательности, принимающие значения ± 1 и учитывающие, при необходимости, наложение на дальномерный код навигационного сообщения, оверлейного кода, и/или цифровой поднесущей; A – постоянная амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; φ_0 – начальная фаза.

Как следует из записи (4.2), уплотнению подлежат только биты цифровой огибающей, а несущее колебание $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ сохраняется неразрывным по фазе.

При формировании модулирующего сигнала предполагается, что длительности символов дальномерного кода исходных последовательностей $G_1(t)$ и $G_2(t)$ вдвое больше, чем длительность символа результирующей последовательности: $\tau_{c\phi} = 2\tau_c$.

При временном уплотнении энергия передатчика распределяется поровну между компонентами $G_1(t)$ и $G_2(t)$ за счет равенства длительностей передачи. Поэтому энергия излучения суммарного радиосигнала на длительности периода на 3 дБ выше, чем энергия излучения каждой сигнальной компоненты в отдельности на том же временном интервале.

Временное уплотнение применяется в сигнале GPS L2C, а также в сигналах L1OC, L1SC, L2OC, L2SC ГЛОНАСС. Во всех случаях первая

последовательность $G_1(t)$ модулирует несущее колебание для формирования информационной компоненты с данными навигационного сообщения (Data-радиосигнал), а вторая $G_2(t)$ модулирует несущее колебание для формирования пилотной компоненты без навигационного сообщения (Pilot-радиосигнал).

4.3 Комбинированные виды уплотнения

4.3.1 Квадратурно-временное уплотнение радиосигналов

ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазонах L1 и L2

В системе ГЛОНАСС внедряются перспективные навигационные радиосигналы с кодовым разделением. В диапазоне L1 будут передаваться следующие радиосигналы [6]:

L1SCd – радиосигнал санкционированного доступа, модулированный данными (информационная компонента);

L1SCp – радиосигнал санкционированного доступа, не модулированный данными (пилотная компонента);

L1OCd – радиосигнал открытого доступа, модулированный данными (информационная компонента);

L1OCp – радиосигнал открытого доступа, не модулированный данными (пилотная компонента).

В диапазоне L2 будут передаваться следующие радиосигналы [6]:

L2SCd – радиосигнал санкционированного доступа, модулированный данными;

L2SCp – радиосигнал санкционированного доступа, не модулированный данными (пилотная компонента);

L2 КСИ – сигнал для передачи служебной информации (в том числе информации космической системы поиска и спасения (КСПС));

L2OCp – радиосигнал открытого доступа, не модулированный данными (пилотная компонента).

Таким образом, в каждом диапазоне передается по 4 независимых радиосигнала. Для сохранения постоянства огибающей их суммы, применена техника квадратурно-временного уплотнения. При этом радиосигналы открытого и санкционированного доступа передаются на разных квадратурах несущей (I и Q), а Pilot- и Data- радиосигналы в каждой квадратуре мультиплексированы по времени. Схематически это показано на рис. 4.3.

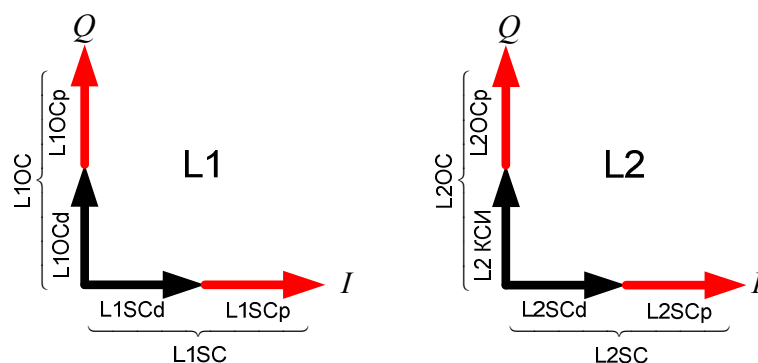


Рисунок 4.3 – Квадратурно-временное уплотнение радиосигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазонах L1 и L2

4.3.2 Модуляция TMBOC в сигнале GPS L1C

В пилотной компоненте сигнала GPS L1C применено временное уплотнение двух компонент сигнала, одна из которых имеет модуляцию BOC(1,1), а другая — BOC(6,1). При этом чередование типов модуляции реализуется путём смены частоты цифровой поднесущей. Каждый период из 33-х бит дальномерного кода модулируется цифровой поднесущей так, что биты с номерами 1,5,7,30 модулируются по закону BOC(6,1), а все остальные биты — по закону BOC(1,1) (см. рис. 4.4).

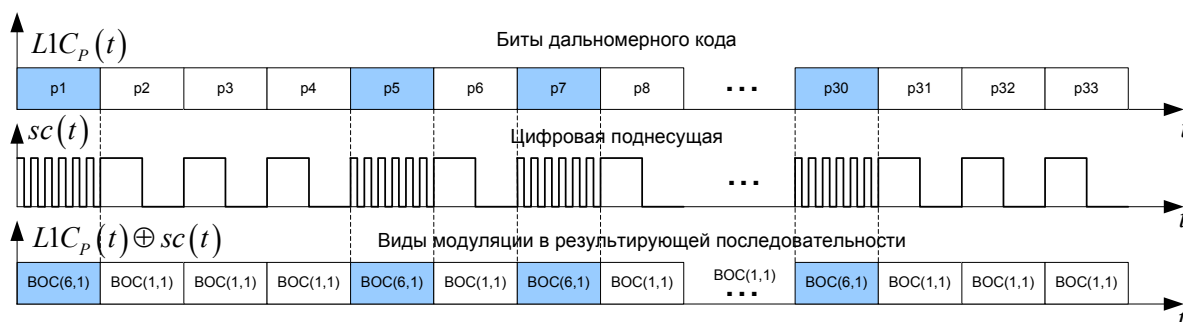


Рисунок 4.4 – Мультиплексная модуляция TMBOC(6,1,4/33) в радиосигнале GPS L1C_p

Таким образом, 4/33 энергии радиосигнала L1C_p отводится на модуляцию BOC(6,1), а 29/33 — на модуляцию BOC(1,1). В ряде случаев, компонентой BOC(6,1) можно пренебречь и принимать такой радиосигнал как BOC(1,1). Компонента с модуляцией BOC(6,1) требуется для повышения точности измерений фазы дальномерного кода в условиях многолучевого распространения радиосигнала.

Несмотря на то, что модуляция TMBOC обеспечивает постоянство огибающей пилотной компоненты L1C_p, суммарный радиосигнал GPS L1C не имеет постоянную огибающую.

4.3.3 Модуляция СВОС в сигнале Galileo E1-B/C

Радиосигнал E1-B является открытым информационным радиосигналом в диапазоне L1. Радиосигнал E1-C является парным ему пилотным радиосигналом. Каждый из этих радиосигналов имеет составной вид ВОС модуляции, получивший название “Composite ВОС” (СВОС). Суть модуляции СВОС заключается в том, что каждый бит дальномерного кода модулируется суммой двух цифровых поднесущих, соответствующих функциям ВОС(1,1) и ВОС(6,1). Таким образом, в суммарном радиосигнале, присутствует как компонента с модуляцией ВОС(1,1), так и компонента с модуляцией ВОС(6,1). Эти компоненты могут приниматься как совместно, так и отдельно.

Огибающая радиосигнала E1-B/C записывается в виде

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} G_B(t) G_{HC}(t) \cdot (\alpha \cdot sc_{(1,1)}(t) + \beta \cdot sc_{(6,1)}(t)) - \frac{1}{\sqrt{2}} G_C(t) G_O(t) \cdot (\alpha \cdot sc_{(1,1)}(t) - \beta \cdot sc_{(6,1)}(t)), \quad (4.3)$$

где $G_B(t)$ – дальномерный код информационной компоненты, следующий с символьной скоростью 1,023 Мбит/с и принимающий значения ± 1 ;

$G_C(t)$ – дальномерный код пилотной компоненты, следующий с символьной скоростью 1,023 Мбит/с и принимающий значения ± 1 ;

$G_{HC}(t)$ – символы навигационного сообщения, принимающие значения ± 1 ;

$G_O(t)$ – оверлейный код, принимающий значения ± 1 ;

$sc_{(1,1)}(t)$ – цифровая поднесущая с частотой 1,023 МГц;

$sc_{(6,1)}(t)$ – цифровая поднесущая с частотой 6x1,023 МГц;

α и β – постоянные коэффициенты, равные: $\alpha = \sqrt{\frac{10}{11}}$, $\beta = \sqrt{\frac{1}{11}}$.

Из (4.3) следует, что при модуляции типа СВОС используются составные модулирующие функции:

$(\alpha \cdot sc_{(1,1)}(t) + \beta \cdot sc_{(6,1)}(t))$ – для сигнала E1-B, и

$(\alpha \cdot sc_{(1,1)}(t) - \beta \cdot sc_{(6,1)}(t))$ – для сигнала E1-C.

Вид этих функций приведен на рис. 4.5.

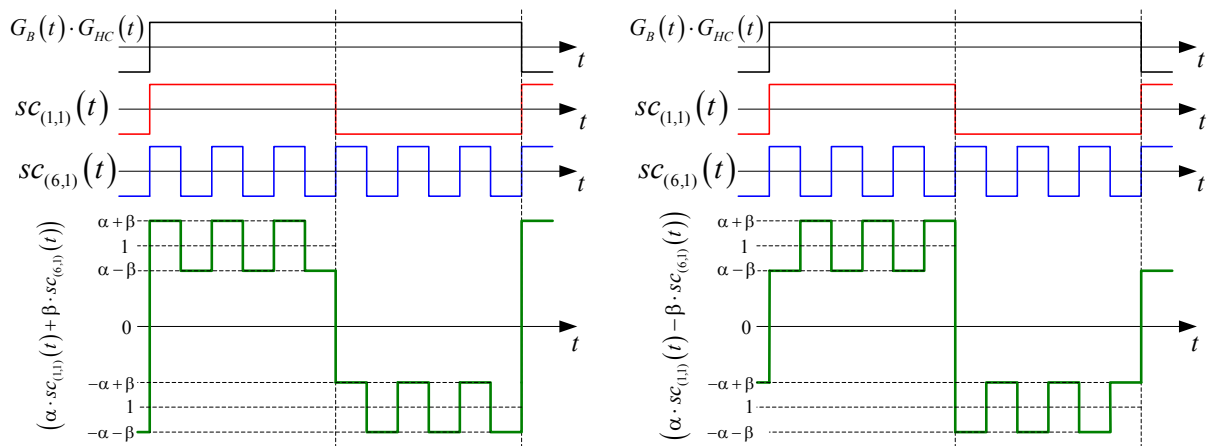


Рисунок 4.5 – Формирование составных модулирующих функций для сигнала с модуляцией СВРС

4.3.4 Модуляция AltBOC в сигнале Galileo E5

Радиосигналы Galileo E5a и E5b образуют единый радиосигнал Galileo E5 с видом модуляции AltBOC(15,10), в котором, по сути, уплотнено 4 независимых радиосигнала: E5a-I, E5a-Q, E5b-I, E5b-Q. В результате такого уплотнения формируется радиосигнал, спектральная плотность мощности которого имеет два главных лепестка, аналогично спектру радиосигнала с BOC модуляцией (см. рис. 4.6). Причем левый лепесток спектра содержит только радиосигналы E5a-I и E5a-Q, которые можно принимать как квадратурные радиосигналы с модуляцией BPSK(10), а правый лепесток спектра – только радиосигналы E5b-I и E5b-Q, которые также можно принимать как квадратурные радиосигналы с модуляцией BPSK(10), что отражено в таблице 6.3.

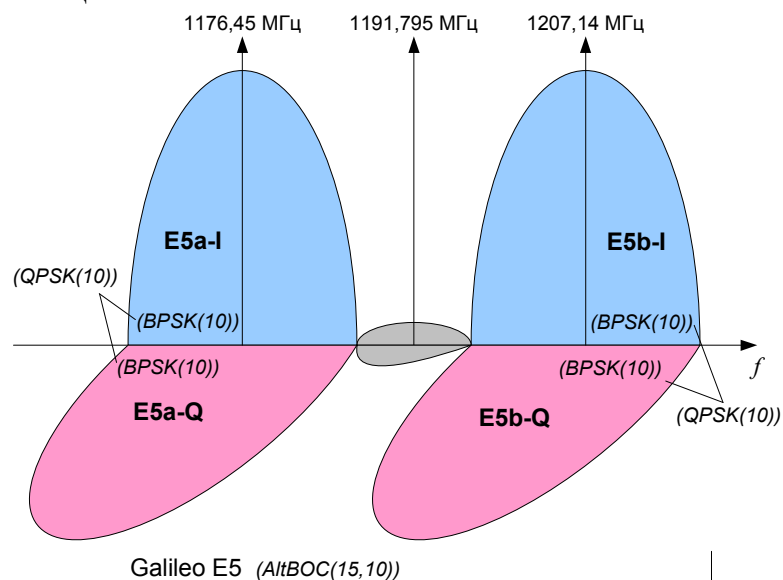


Рисунок 4.6 – Компоненты радиосигнала Galileo E5 с модуляцией AltBOC(15,10)

Комплексная огибающая составного радиосигнала Galileo E5 с модуляцией AltBOC формируется по следующему закону [3]:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{E5}(t) = & \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5a-I}(t) + je_{E5a-Q}(t)) [sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{s,E5}/4)] + \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5b-I}(t) + je_{E5b-Q}(t)) [sc_{E5-S}(t) + jsc_{E5-S}(t - T_{s,E5}/4)] + \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5a-I}(t) + j\bar{e}_{E5a-Q}(t)) [sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{s,E5}/4)] + \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5b-I}(t) + j\bar{e}_{E5b-Q}(t)) [sc_{E5-P}(t) + jsc_{E5-P}(t - T_{s,E5}/4)], \end{aligned} \quad (4.4)$$

где:

$e_{E5a-I}(t)$ – бинарная последовательность информационной компоненты сигнала E5a (E5a-I);

$e_{E5a-Q}(t)$ – бинарная последовательность пилотной компоненты сигнала E5a (E5a-Q);

$e_{E5b-I}(t)$ – бинарная последовательность информационной компоненты сигнала E5b (E5b-I);

$e_{E5b-Q}(t)$ – бинарная последовательность пилотной компоненты сигнала E5b (E5b-Q);

$$\bar{e}_{E5a-I} = e_{E5a-Q}e_{E5b-I}e_{E5b-Q}; \quad \bar{e}_{E5a-Q} = e_{E5a-I}e_{E5b-I}e_{E5b-Q};$$

$$\bar{e}_{E5b-I} = e_{E5b-Q}e_{E5a-I}e_{E5a-Q}; \quad \bar{e}_{E5b-Q} = e_{E5b-I}e_{E5a-I}e_{E5a-Q};$$

$sc_{E5-S}(t)$, $sc_{E5-P}(t)$ – составные модулирующие функции с периодом $T_{s,E5}$, вид которых приведен на рис. 4.7 [3]; $T_{s,E5} = 1/(15 \times 1,023 \text{ МГц})$.

Последовательности $e_{E5a-I}(t)$, $e_{E5a-Q}(t)$, $e_{E5b-I}(t)$, $e_{E5b-Q}(t)$ принимают значения ± 1 (+1 соответствует логическому нулю, -1 – логической единице) и имеют скорость следования элементарных символов дальномерного кода 10,23 Мбит/с.

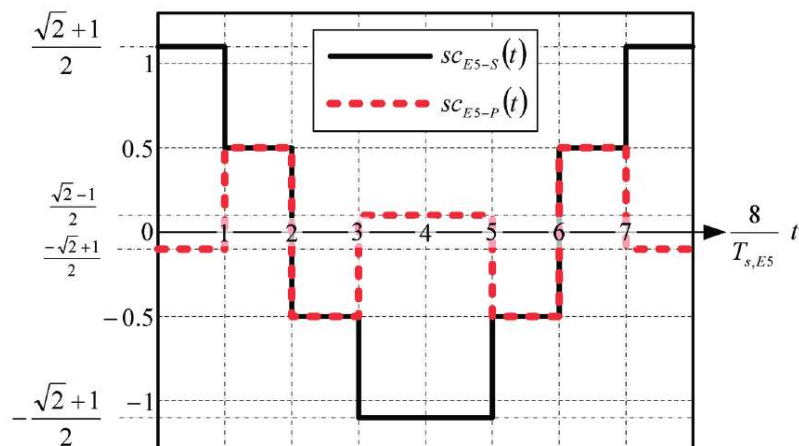


Рисунок 4.7 – Составные модулирующие функции для радиосигнала Galileo E5 с модуляцией AltBOC (показан один период)

5 Методы кодирования навигационного сообщения

5.1 Наложение меандра

Наложение меандра используется в радиосигналах ГЛОНАСС с частотным разделением. Информационные биты навигационного сообщения, следующие со скоростью 50 бит/с, суммируются по модулю 2 с меандровой последовательностью, период которой равен 20 мс и синхронен с интервалом символа навигационного сообщения, как это показано на рис. 5.1. Таким образом, наложение меандра является одним из простейших вариантов кодирования, после которого кодовая скорость цифровой информации удваивается.

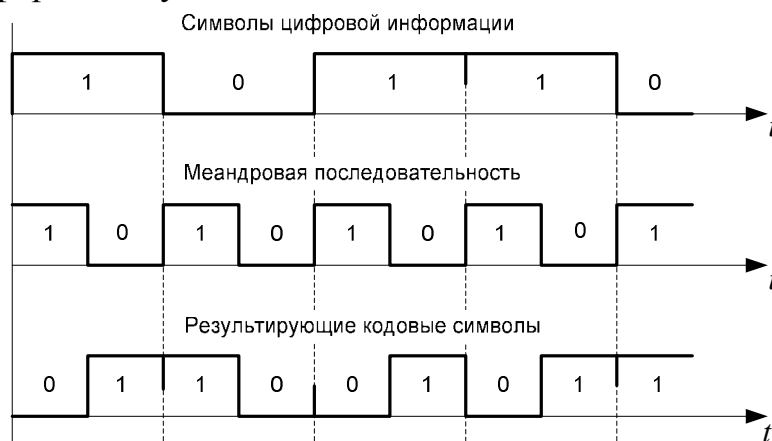


Рисунок 5.1 – Наложение меандра при кодировании навигационного сообщения

Наложение меандра вводилось в сигналы ГЛОНАСС с целью улучшения символьной синхронизации на однородных участках

навигационного сообщения, когда передаются только одни нули, или единицы.

5.2 Использование ОФМ и проверочных символов

Относительная фазовая манипуляция (ОФМ) применяется в радиосигналах ГЛОНАСС с частотным разделением. Схема, поясняющая принцип работы ОФМ-кодера, показана на рис. 5.2.

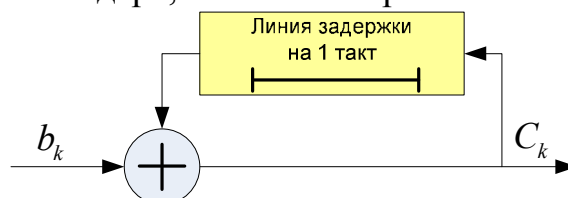


Рисунок 5.2 – ОФМ-кодер

Выходные биты кодера C_k формируются как сумма по модулю 2 входных бит цифровой информации b_k и выходных бит C_k , задержанных на 1 такт:

$$C_k = b_k \oplus C_{k-1}, \quad C_0 = 0. \quad (5.1)$$

ОФМ-кодирование применяется для устранения возможности инверсного приема данных в зависимости от неопределенной начальной фазы сигнала, а также для устойчивости к единичным срывам сопровождения в системе ФАП. Действительно, как следует из (5.1), при передаче нуля, фаза сигнала не меняется, а при передаче единицы происходит скачок фазы передаваемого сигнала: $b_k = C_k \oplus C_{k-1}$. Таким образом, информация о нулях и единицах передаваемого сообщения содержится только в скачках фазы демодулированного сигнала, а не в абсолютном значении фазы.

Проверочные символы добавляются к исходному навигационному сообщению на той же битовой скорости для контроля ошибок приема сообщения. Например, в радиосигналах ГЛОНАСС LxOF проверочные символы являются 8-битным кодом Хэмминга, приходящимся на каждые 77 информационных бит. Эти проверочные символы могут быть использованы для устранения однократных ошибок, а также для выявления четного числа ошибок. В радиосигнале GPS L1 C/A используется 6 проверочных символов на каждые 24 информационных. Они служат как для выявления ошибок (контроль четности), так и для устранения возможности инверсного приема данных (вместо ОФМ, используемой в системе ГЛОНАСС).

ОФМ-кодирование и проверочные символы не изменяют битовой скорости исходного цифрового потока.

5.3 Сверточный кодер FEC(133,171)

Сверточное кодирование навигационного сообщения (Forward Error Correction – FEC) применяется для повышения помехоустойчивости его приема. В подавляющем большинстве перспективных радиосигналов СРНС ГЛОНАСС, GPS, Galileo, а также в радиосигналах SBAS применяется сверточный кодер FEC(133, 171) с кодовым ограничением 7 и кодовой скоростью $\frac{1}{2}$. Структура этого кодера приведена на рис. 5.3 [7].

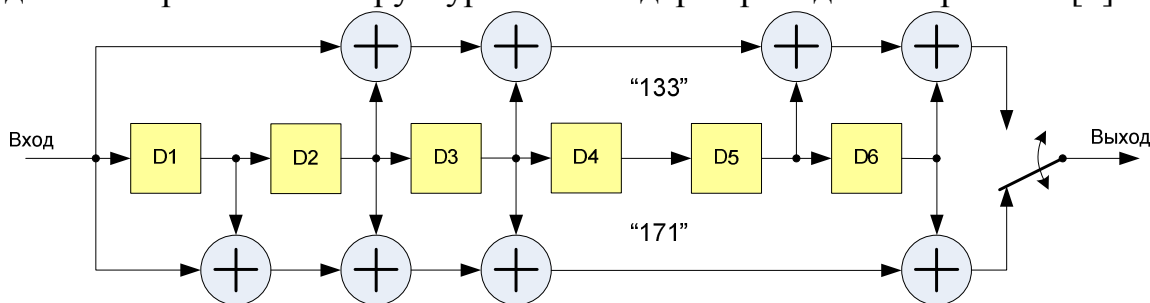


Рисунок 5.3 – Сверточный кодер FEC(133,171)

Числа (133,171) записаны в восьмеричном коде и обозначают маски отводов с линий задержки для верхнего и нижнего плеча, соответственно: $133 = 1011011$, $171 = 1111001$. Значение кодовой скорости $\frac{1}{2}$ означает, что длительность кодовых (выходных) символов вдвое меньше длительности информационных (входных) символов: на один информационный приходится два кодовых символа. Переключатель в сверточном кодере (см. рис. 5.3) должен находиться в нижнем положении в первой половине каждого информационного символа.

Примечание. В системе Galileo структура данного кодера модифицирована так, что символ с верхнего плеча, соответствующего маске 133, инвертируется перед подачей на выход. В таблице 6.3 такой сверточный кодер обозначен как FEC(133,171).

5.4 Коды БЧХ (BCH)

Коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) являются широким классом циклических кодов с возможностью построения кода с минимальным кодовым расстоянием. В англоязычной литературе эти коды обозначаются как BCH (Bose-Chaudhuri-Nocquenghem). Общая структура БЧХ-кодера приведена на рис. 5.4. В основе кодера лежит генератор ПСП на сдвиговом регистре с обратными связями длиной N бит.

Исходная цифровая информация разбивается на блоки по m бит каждый, причем $m \geq N$. В первую очередь исходный блок из m бит передается на выход кодера без изменений, что соответствует нижнему положению переключателя на рис. 5.4. Сдвиговый регистр инициализируется от входного информационного блока по заранее определенному закону. (Например, в кодере сигнала GPS L1C размер входного блока совпадает с

длиной сдвигового регистра, поэтому все биты входного блока просто записываются в соответствующие ячейки памяти). Затем переключатель на рис. 5.4 переводится в верхнее положение, генератор ПСП тактируется ($n-m$) раз, в результате чего на выход поступает ($n-m$) символов с генератора. Описанный процесс повторяется для последующих m -битных информационных блоков.

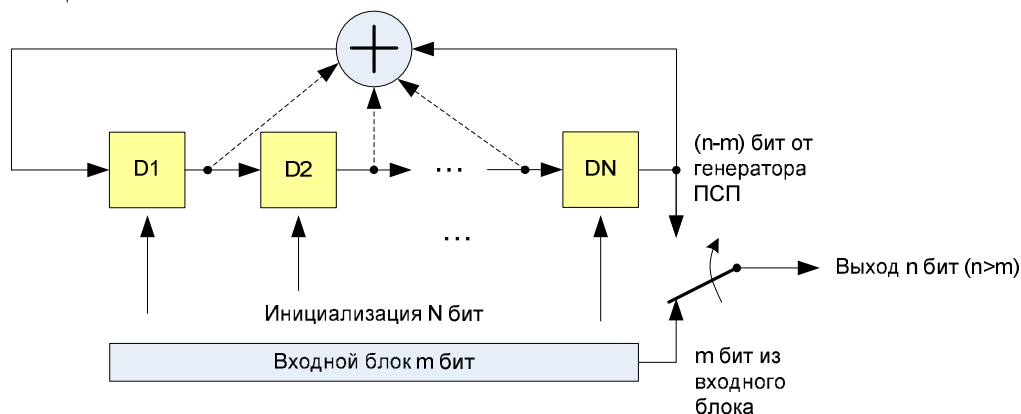


Рисунок 5.4 – Кодер БЧХ: $VCH(n,m)$

Таким образом, БЧХ-кодер кодирует цифровую информацию по блокам. Каждому информационному блоку из m бит соответствует кодовый блок из n бит ($n > m$). Следовательно, кодовая скорость символов на выходе кодера в (n/m) раз выше скорости входного информационного потока.

БЧХ-кодер с параметрами $n=51$, $m=8$, $N=8$ применяется для кодирования времени опорного интервала (параметр TOI) в радиосигнале GPS L1C и обозначен в таблице 6.2 как $VCH(51,8)$. БЧХ-кодер с параметрами $n=15$, $m=11$, $N=4$ применяется для кодирования навигационного сообщения в сигналах B1I, B2I CPHC Weidou и обозначен в таблице 6.3 как $VCH(15,11)$.

5.5 Коды LDPC

Код с малой плотностью проверок на чётность называется в англоязычной литературе “Low-density parity-check code” (LDPC). Этот код применяется для кодирования навигационного сообщения в радиосигнале GPS L1C. LDPC-кодер работает поблочно, причем входной информационный блок из m бит кодируется в выходной блок из $2m$ бит. $m = 600$ бит для 2-го кадра навигационного сообщения радиосигнала GPS L1C, и $m = 274$ бита для 3-го кадра. Структура LDPC-кодера основана на матрице проверок чётности $\mathbf{H}(m, 2m)$, состоящей из m строк и $2m$ столбцов [5]. Каждый элемент матрицы $\mathbf{H}(m, 2m)$ равен «0», или «1». Матрица $\mathbf{H}(m, 2m)$ разбивается на подматрицы **A**, **B**, **T**, **C**, **D** и **E**, как показано на рис. 5.5.

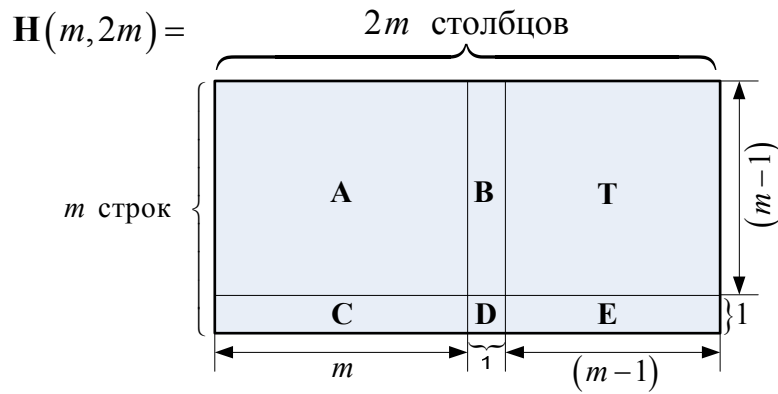


Рисунок 5.5 – Матрица проверок четности для LDPC-кодера

Подматрицы **A**, **B**, **T**, **C**, **D** и **E** полностью заданы в [5]. **T** является нижнетреугольной матрицей.

Алгоритм кодирования можно изложить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \phi &= -\mathbf{E} \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{D}, \\
 \mathbf{p}_1^T &= -\phi^{-1} \cdot (-\mathbf{E} \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{C}) \cdot \mathbf{s}^T, \\
 \mathbf{p}_2^T &= -\mathbf{T}^{-1} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{s}^T + \mathbf{B} \cdot \mathbf{p}_1^T), \\
 \mathbf{r} &= \left| \mathbf{s} \quad p_1 \quad \mathbf{p}_2 \right|,
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

где **s** – блок из *m* входных информационных бит, представленный в виде вектора-строки; p_1 – бит контроля четности, **p**₂ – блок, состоящий из бит контроля четности, представленный как вектор-строка; **r** – результат кодирования: блок из 2*m* бит на выходе кодера.

Как следует из нижней строки (5.2), выходной блок кодера формируется путём последовательного склеивания входного блока **s**, бита контроля четности p_1 и блока бит контроля четности **p**₂. Отметим, что в алгоритме (5.2) используются только двоичные числа. Операции сложения, умножения и матричного обращения следует трактовать как операции, определенные на поле Галуа **GF**(2), аналогичные тем же операциям на поле действительных чисел **R**.

6 Характеристики радионавигационных сигналов СРНС и SBAS

Характеристики радиосигналов СРНС ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou, а также радиосигналов SBAS приведены в таблицах 6.1 – 6.5, соответственно. Данные, которые недоступны по причине отсутствия (или секретности) описательных документов обозначены в таблицах как «н/д».

Таблица 6.1 – Сигналы СРНС ГЛОНАСС

Сигналы	Несущая частота, МГц	Уплотнение компонента	Сигнальная компонента	Модуляция	Дальномерный код			Оверлейный код			Навигационное сообщение				Мощность сигнала у поверхности Земли, дБВт	Ширина спектра сигнала по первым нулям, МГц	
					Символьная скорость, Мбит/с	Длина, бит	Период, мс	Тип	Длина, бит	Период, мс	Кодовая скорость, бит/с	Длительность кодового символа, мс	Длительность кодового символа, мс	Информ-я скорость, бит/с			Тип кодирования
L1xF	$1602 + k \cdot 0,5625$ ($k = -7 \dots +6$ – литерный номер)	Квадратурное	L1OF (L1 CT)	BPSK	0,511	511	1	M(9)	нет	100	10	50	Ме-андр	-161	1,022		
			L1SF (L1 BT)	BPSK	5,11	5110000	1000/нет ¹⁾	Усеч. M(25)	нет	100	10	50	Ме-андр	-161	10,22		
L2xF	$1246 + k \cdot 0,4375$ ($k = -7 \dots +6$ – литерный номер)	Квадратурное	L2OF (L2 CT)	BPSK	0,511	511	1	M(9)	нет	100	10	50	Ме-андр	-167	1,022		
			L2SF (L2 BT)	BPSK	5,11	5110000	1000/нет ¹⁾	Усеч. M(25)	нет	н/д	н/д	н/д	н/д	-167	10,22		
L1OC	1600,995	Временное	L1Ocd	BPSK(1)	0,5115	1023	2	Голд(10)	2	2	4	250	4	125	FEC (133,171)	н/д	4,092
			L1Ocp	BOC(1,1)	0,5115	4092	8	Усеч. Касами (12)	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	н/д	
L2OC	1248,06	Временное	L2KCI	BPSK(1)	0,5115	1023	2	Голд(10)	нет	нет	2	250	2	250	FEC (133,171)	н/д	4,092
			L2Ocp	BOC(1,1)	0,5115	10230	20	Усеч. Касами (14)	20	50	1000	нет	нет	нет	нет	н/д	
L1SC, L2SC	L1: 1600,995 L2: 1248,06	Временное	L1SCd, L2SCd	BOC(5,2.5)	1,27875	5115 ²⁾	4	Усеч. Голд(13)	нет	250	4	125	FEC (133,171)	н/д	15,345		
			L1SCp, L2SCp	BOC(5,2.5)	1,27875	10230 ²⁾	8	Усеч. Касами (14)	нет	нет	нет	нет	нет	нет		н/д	
L3OC	1202,025	Квадратурное	L3Ocd	BPSK(10)	10,23	10230	1	Усеч. Касами (14)	1	5	5	200	5	100	FEC (133,171)	-158	20,46
			L3Ocp	BPSK(10)	10,23	10230	1	Усеч. Касами (14)	1	10	10	нет	нет	нет	нет	-158	

Примечания: ¹⁾ В режиме санкционированного доступа последовательность ВТ-кода не периодична.²⁾ Для режима открытого доступа. В режиме санкционированного доступа дальномерные коды LxSC не периодичны.

Таблица 6.2 – Сигналы СРНС GPS

Сигналы	Несущая частота, МГц	Уплотнение компонента	Сигнальная компонента	Модуляция	Дальномерный код			Оверлейный код			Навигационное сообщение				Мощность сигнала у поверхности Земли (мин), дБВт	Ширина спектра сигнала по первым нутям, МГц
					Символьная скорость, Мбит/с	Длина, бит	Период, мс	Тип	Длительность символа, мс	Длина, бит	Период, мс	Кодовая скорость, бит/с	Длительность кодового символа, мс	Информ-я скорость, бит/с		
L1	1575,42	Квадратурное	C/A	BPSK(1)	1,023	1023	1	Голд(10)	нет	нет	50	20	50	Parity	-158,5	2,046
			P(Y)	BPSK(10)	10,23	$\sim 6.2 \times 10^{12}$ (нет ¹⁾)	7 дней (нет ¹⁾)	4xM (сгрупп ¹⁾)	нет	нет	50	20	50	Parity	-161,5	20,46
L1C	1575,42	Синфазная сумма	L1Cd	BOC(1,1)	1,023	10230	10	Вейл	нет	нет	100	10	50	BCH (51,8) / LDPC	-163	4,092
			L1Cp	29/33 BOC(1,1) + 4/33 BOC(6,1) ²⁾	1,023	10230	10	Вейл	10	1800	18000	нет	нет	нет	нет	-158,25
M-code ³⁾	L1: 1575,42 L2: 1227,6	н/д	-	BOC(10,5)	5,115	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	FEC	-158 / -138 ⁴⁾	24 ³⁾	
L2 P(Y)	1227,6	Квадратурное с L2C	P(Y)	BPSK(10)	10,23	$\sim 6.2 \times 10^{12}$ (нет ¹⁾)	7 дней (нет ¹⁾)	4xM (сгрупп ¹⁾)	нет	нет	50	20	50	Parity	-164,5 / -161,5	20,46
			L2 CM	BPSK(1)	0,5115	10230	20	Усеч. M(27)	нет	нет	50	20	25	FEC (133,171)	-164,5 / -158,5	2,046
L2C	1227,6	Временное	L2 CL	BPSK(1)	0,5115	767250	1500	Усеч. M(27)	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет
			I5	BPSK(10)	10,23	10230	1	2xM(13)	1	10	10	100	10	50	FEC (133,171)	-157,9 / -157,0
L5	1176,45	Квадратурное	Q5	BPSK(10)	10,23	10230	1	2xM(13)	1	20	20	нет	нет	нет	-157,9 / -157,0	20,46

Примечания:

¹⁾ В режиме санкционированного доступа P-код GPS складывается по модулю 2 с непериодической криптостойкой последовательностью W-кода. Длительность одного символа W-кода равна 20-ти символам P-кода.

²⁾ Сигнал со сложной модуляцией TMBOC (см. п. 4.3.2).

³⁾ Данные из статьи [8].

⁴⁾ Мощность для режима «Spot Beam», при котором излучение НКА концентрируется в заданном регионе.

Таблица 6.3 – Сигналы СРНС Galileo

Сигналы	Несущая частота, МГц	Уплотнение компонента	Сигнальная компонента	Модуляция	Дальномерный код			Оверлейный код			Навигационное сообщение				Мощность сигнала у поверхности Земли (мин), дБВт	Ширина спектра сигнала по первым нулям, МГц	
					Символьная скорость, Мбит/с	Длина, бит	Период, мс	Тип	Длительность символа, мс	Длина, бит	Период, мс	Кодовая скорость, бит/с	Длительность кодового символа, мс	Информ-я скорость, бит/с			Тип кодирования
E1	1575,42	Простая разность	E1-B	10/11 ВОС(1,1) + 1/11 ВОС(6,1) ¹⁾	4092	4	Табл.	Нет	4	25	100	250	4	125	FEC (133,171)	-160	4,092 / 14,322 ²⁾
			E1-C	10/11 ВОС(1,1) + 1/11 ВОС(6,1) ¹⁾	4092	4	Табл.					нет	нет	нет	нет	нет	-160
E6	1278,75	Простая разность	E6-B	BPSK(5)	н/д	н/д	н/д	нет	н/д	100	н/д	1000	1	500	FEC (133,171)	-158	10,23
			E6-C	BPSK(5)	н/д	н/д	н/д					нет	нет	нет	нет	нет	
E5a ³⁾	1176,45	Квадратурное	E5a-I	BPSK(10)	10230	1	Усеч. Голд(14)	1	20	20	50	20	25	FEC (133,171)	-158	20,46	
			E5a-Q	BPSK(10)	10230	1	Усеч. Голд(14)	1	100	100	нет	нет	нет	нет	-158		
E5b ³⁾	1207,14	Квадратурное	E5b-I	BPSK(10)	10230	1	Усеч. Голд(14)	1	4	4	4	250	4	125	FEC (133,171)	-158	20,46
			E5b-Q	BPSK(10)	10230	1	Усеч. Голд(14)	1	100	100	нет	нет	нет	нет	-158		

Примечания:

- ¹⁾ Сигнал со сложной модуляцией СВРС (см. п. 4.3.3).
- ²⁾ Ширина спектра с учетом сигнальной компоненты с модуляцией ВОС(6,1).
- ³⁾ Компоненты сигнала Galileo E5 со сложной модуляцией AltВОС(15,10) (см. п. 4.3.4).

Таблица 6.4 – Сигналы СРНС BeiDou

Сигналы	Несущая частота, МГц	Уплотнение компонента	Сигнальная компонента	Модуляция	Дальномерный код				Оверлейный код				Навигационное сообщение					Мощность сигнала у поверхности Земли (мин), дБВт	Ширина спектра сигнала по первым нулям, МГц
					Символьная скорость, Мбит/с	Длина, бит	Период, мс	Тип	Длительность символа, мс	Длина, бит	Период, мс	Кодовая скорость, бит/с	Длительность кодового символа, мс	Информ-я скорость, бит/с	Тип кодирования	Мощность сигнала у поверхности Земли (мин), дБВт	Ширина спектра		
B1	1561,098	Квадратурное	B1I	BPSK(2)	2,046	2046	1	Усеч. Голд(11)	1	20	20	50	20	50*11/15	BCH (15,11)	-163	4,092		
					н/д	н/д	н/д	н/д	нет ¹⁾	н/д	н/д	н/д	500	2	500*11/15				
B2	1207,14	Квадратурное	B2I	BPSK(2)	2,046	2046	1	Усеч. Голд(11)	1	20	20	50	20	50*11/15	BCH (15,11)	-163	4,092		
					н/д	н/д	н/д	н/д	нет ¹⁾	н/д	н/д	н/д	500	2	500*11/15				
			B2Q	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	-163	20,46			

Примечания:

1) Для НКА типа «ГЕО» оверлейный код отсутствует, кодовая скорость передачи данных навигационного сообщения равна 500 бит/с.

Таблица 6.5 – Сигналы SBAS

Сигналы	Несущая частота, МГц	Уплотнение компонента	Сигнальная компонента	Модуляция	Дальномерный код				Оверлейный код					Навигационное сообщение					Мощность сигнала у поверхности Земли (мин), дБВт	Ширина спектра сигнала по первым нулям, МГц
					Символьная скорость, Мбит/с	Длина, бит	Период, мс	Тип	Длительность символа, мс	Длина, бит	Период, мс	Кодовая скорость, бит/с	Длительность кодового символа, мс	Информ-я скорость, бит/с	Тип кодирования	Мощность сигнала у поверхности Земли (мин), дБВт	Ширина спектра			
L1 СДКМ, WAAS, MSAS, EGNOS	1575,42	Нет	C/A	BPSK(1)	1,023	1023	1	Голд(10)	нет	нет	нет	500	2	250	FEC (133,171)	-161... -153,5	2,046			
L5 SBAS ¹⁾	1176,45	Нет	I5	BPSK(10)	10,23	10230	1	2xM(13)	н/д	н/д	н/д	500	2	250	FEC (133,171)	н/д	20,46			

Примечания:

1) Предварительная информация по данным из источника [9].

Список литературы

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ под ред. А.И.Перова, В.Н.Харисова. – М.:Радиотехника, 2010.
2. А.И. Перов. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. М: Радиотехника, 2012 г.
3. Интерфейсный контрольный документ Galileo OS SIS ICD (http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/galileo/files/galileo-os-sis-icd-issue1-revision1_en.pdf)
4. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Ред. 5.1, 2008 г. (<http://www.spacecorp.ru/upload/iblock/9ea/mup-tstlrklp%205.1%20RUS%20%20v2014.02.18u.pdf>)
5. Интерфейсный контрольный документ NAVSTAR IS-GPS-800D (<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800D.pdf>)
6. КА Глонасс-К2. Структура излучаемых навигационных радиосигналов с кодовым разделением частотных диапазонов L1, L2, L3. 25.04.2012.
7. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазоне L3 с открытым доступом и кодовым разделением (редакция 1), 2011 г.
8. Brian C. Barker, John W. Betz and others. Overview of the GPS M Code Signal. Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, January 26 – 28, 2000.
9. T. Walter, J. Blanch, P. Enge. L1/L5 SBAS MOPS to Support Multiple Constellations. 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville TN, September 17-21, 2012.
10. Интерфейсный контрольный документ NAVSTAR IS-GPS-200H (<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf>)
11. Интерфейсный контрольный документ NAVSTAR IS-GPS-705D (<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705D.pdf>)

Обозначения и сокращения

БАМИ	- бортовая аппаратура межспутниковых измерений
БЧХ	- Боуз-Чоудхури-Хоквингем (авторы алгоритмов кодирования)
ГЛОНАСС	- глобальная навигационная спутниковая система
ДК	- дальномерный код
ИКД	- интерфейсный контрольный документ
КСИ	- канал служебной информации
КСПС МО	- космическая система поиска и спасения Министерства обороны
НАП	- навигационная аппаратура потребителей
НКА	- навигационный космический аппарат
НС	- навигационное сообщение
ОЗУ	- оперативное запоминающее устройство
ОФМ	- относительная фазовая манипуляция
ПСП	- псевдослучайная последовательность
СДКМ	- система дифференциальной коррекции и мониторинга
СПМ	- спектральная плотность мощности
СРНС	- спутниковая радионавигационная система
ФАП	- фазовая автоподстройка
ФМ	- фазовая манипуляция
ФМ2	- двоичная фазовая манипуляция
ЦИ	- цифровая информация
AltBOC	- Alternative BOC
BCH	- Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
BOC	- Binary Offset Carrier
BPSK	- Binary Phase-Shift Keying
СВОС	- Composite BOC
EGNOS	- European Geostationary Navigation Overlay Service
FEC	- Forward Error Correction
GAGAN	- GPS Aided Geo Augmented Navigation
GPS	- Global Positioning System
IRNSS	- Indian Regional Navigation Satellite System
LDPC	- Low-Density Parity-Check Code
MOPS	- Minimum Operational Performance Standard
MSAS	- Multi-Functional Satellite Augmentation System
QPSK	- Quadrature Phase-Shift Keying
QZSS	- Quasi-Zenith Satellite System
SBAS	- Satellite-Based Augmentation System
TOI	- Time of Interval
TМВОС	- Time-Multiplexed BOC
WAAS	- Wide Area Augmentation System

Оглавление

Предисловие	2
1. Разделение радиосигналов в СРНС.....	2
1.1 Семейство радиосигналов	2
1.2 Кодовое разделение	3
1.3 Частотное разделение	4
1.4 Фазовое разделение	4
1.5 Временное разделение	5
2. Виды модуляции радиосигналов СРНС	5
2.1 Бинарная фазовая манипуляция (BPSK)	5
2.2 Модуляция цифровой поднесущей (BOC)	8
3. Методы формирования дальномерного кода	10
3.1 Табличный метод	10
3.2 Генерация М-последовательности	11
3.3 Коды, основанные на комбинировании М-последовательностей	12
3.3.1 Коды Голда	13
3.3.2 Коды Касами	14
3.4 Коды Вейла	14
3.5 Наложение оверлейного кода	15
4. Уплотнение радиосигналов	16
4.1 Квадратурное уплотнение	17
4.2 Временное уплотнение	18
4.3 Комбинированные виды уплотнения	20
4.3.1 Квадратурно-временное уплотнение радиосигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазонах L1 и L2	20
4.3.2 Модуляция ТМВОС в сигнале GPS L1С	21
4.3.3 Модуляция СВООС в сигнале Galileo E1-B/C	22
4.3.4 Модуляция AltВОС в сигнале Galileo E5	23
5. Методы кодирования навигационного сообщения	25
5.1 Наложение меандра	25
5.2 Использование ОФМ и проверочных символов	26
5.3 Сверточный кодер FEC(133,171)	27
5.4 Коды БЧХ (BCH)	27
5.5 Коды LDPC	28
6. Характеристики радионавигационных сигналов СРНС и SBAS	29
Список литературы	34
Обозначения и сокращения	35