

Цифровое формирование навигационных сигналов системы ГЛОНАСС

Digital generation of GLONASS navigation signals

Ткачев / Tkachev A.

Александр Борисович

(abtkachev@mail.ru)

кандидат технических наук.

АО «Российские Космические Системы»,

ведущий инженер.

г. Москва

Астахов / Astahov D.

Дмитрий Анатольевич

(atismail@yandex.ru)

АО «Российские Космические Системы»,
начальник отделения 74.

г. Москва

Ключевые слова: спутниковая навигация – satellite navigation; ГЛОНАСС – GLONASS; цифровая обработка сигналов – digital signal processing; цифровой синтез частоты – digital frequency synthesis; частотное разделение сигналов – FDMA; кодовое разделение сигналов – CDMA.

Рассмотрены проблемы построения формирователей новых навигационных сигналов ГЛОНАСС. Предложен цифровой формирователь навигационных сигналов, который позволяет обеспечить совместное формирование сигналов с частотным и кодовым разделением и излучение их через единую антенну. Предложена схема формирователя с цифровой модуляцией на промежуточной частоте, удобная для практической реализации.

Problems of construction of generators for new GLONASS navigation signals are described. A digital navigation signal generator is proposed, which allows to ensure simultaneous generation of signals with frequency and code division and their emission through a single antenna. The article offers a diagram of the generator with a digital modulation on an intermediate frequency, which is convenient for practical implementation.

С учетом постоянно растущих потребностей немаловажной при решении навигационной задачи с одновременным использованием нескольких навигационных сигналов является информация о взаимном расположении фазовых центров источников этих навигационных сигналов.

В настоящее время аппаратурой формирования навигационных сигналов системы ГЛОНАСС предусмотрено излучение навигационных с частотным разделением в двух диапазонах L1F (1,602 ГГц) и L2F (1,246 ГГц).

Программой развития навигационной системы ГЛОНАСС предусмотрено расширение количества излучаемых навигационных сигналов и постепенный переход от сигналов с частотным разделе-

нием к сигналам с кодовым разделением. Функцию формирования всех навигационных сигналов на КА нового поколения системы ГЛОНАСС выполняет бортовой информационно – навигационный комплекс (БИНК). В дополнение к сигналам L1F и L2F БИНК должен формировать новые сигналы с кодовым разделением L1C (1,600 ГГц), L2C (1,248 ГГц), L3C (1,202 ГГц) [1].

Такое количество одновременно формируемых сигналов приводит к возникновению следующих проблем при построении формирователей навигационных сигналов (ФНС):

- взаимная временная синхронизация аппаратуры ФНС;
- увеличение потребляемой мощности аппаратуры ФНС и, как следствие, необходимость отведения выделяемого тепла;
- увеличение количества узлов аппаратуры ФНС и, как следствие, увеличение конечной массы аппаратуры ФНС;
- обеспечение информационным наполнением одновременно всех навигационных сигналов и, как следствие, увеличение пропускной способности (скорости передачи, количества каналов и т.п.) канала обмена информацией аппаратуры ФНС;
- обеспечение повторяемости заданных характеристик ФНС при производстве значительно увеличившегося количества приборов (при сохранении структуры построения аппаратуры ФНС количество формирователей на один комплект КА будет составлять 12 штук, а это уже мелкосерийное производство);
- сложность построения суммирующего высокочастотного тракта для формирования группового сигнала на единую антенну.

С целью решения описанных выше проблемных вопросов построения формирователей навигационных сигналов, предлагается применить метод цифрового формирования сигнала.

Метод цифрового формирования сигнала предусматривает вычисление и преобразование в аналоговый

вид в реальном масштабе времени отсчетов сигнала. Основой метода является цифровой синтез частоты (от англ. – *DDS – direct digital synthesizers*), позволяющий создать из опорной частоты на выходе требуемую частоту или набор частот, согласно управляющим сигналам и программной логике выбора цифровых отсчетов [2, 3].

Актуальность применения метода цифрового формирования радиосигнала стала очевидна с момента значительного увеличения количества излучаемых навигационных сигналов. Традиционно аппаратура формирования навигационных сигналов строилась классическим методом с применением аналоговых квадратурных модуляторов и генераторов несущих частот на основе ФАПЧ. Количество таких трактов формирования было равно количеству формируемых навигационных сигналов, а количество необходимых блоков с учетом резервирования было в N раз больше (где N – количество резерва).

Концепция развития навигационной системы ГЛОНАСС предусматривает наличие новых сигналов с кодовым разделением в диапазонах L1, L2 и L3. Это потребует установки дополнительно еще шести блоков формирования навигационных сигналов с кодовым разделением, что приведет к значительному увеличению конечных масса-габаритных и электрических показателей.

Цифровой метод формирования позволяет при помощи одного унифицированного тракта формирования сигнала формировать множество радиосигналов с заданными характеристиками и проводить над ними ряд вычислительных операций, таких как, например, цифровая фильтрация.

Общая функциональная схема обобщенного цифрового формирователя представлена на рис. 1.

Цифровой формирователь навигационных радиосигналов системы ГЛОНАСС состоит из следующих узлов:

- 1) микроконтроллер (МК) мультиплексного канала обмена (МКО);
- 2) МК управления и обработки информации;
- 3) программируемая логическая интегральная схема;
- 4) цифро-аналоговый преобразователь;
- 5) синтезатор частоты дискретизации системы;

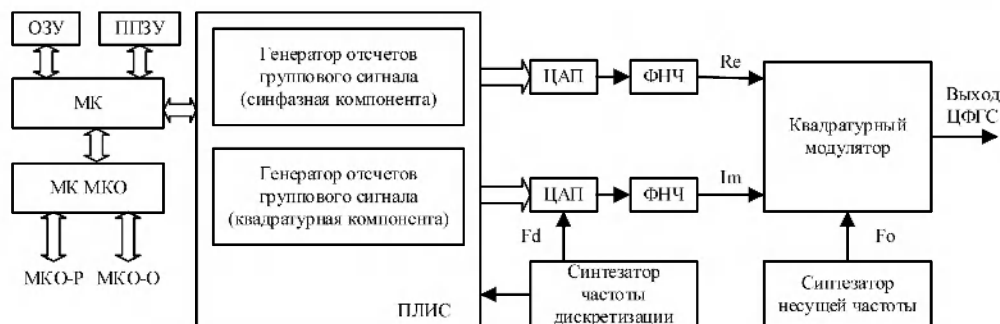


Рис. 1. Общая функциональная схема обобщенного цифрового формирователя

- 6) фильтр нижних частот;
- 7) квадратурный модулятор.

Сигналы ГЛОНАСС удобно описать в комплексном виде, например, сигнал, излучаемый сейчас, с частотным разделением (ЧР)

$$S_{fd}(t) = S_{fd}^{CT}(t) + S_{fd}^{BT}(t), \quad (1)$$

где $S_{fd}^{CT}(t)$ – фазоманипулированный сигнал стандартной точности (СТ), лежащий на одной квадратуре (вещественной), $S_{fd}^{BT}(t)$ – сигнал высокой точности (ВТ), составляющий вторую квадратуру. Выражение (1) описывает комплексную амплитуду сигнала.

Выражение для самого сигнала через его комплексную амплитуду имеет вид

$$s_{fd}(t) = \text{Re} \{ S_{fd}(t) \cdot e^{j2\pi f_{fd}t} \},$$

$$f_{fd} = 1602 + k \cdot 0,5625, k = -7, \dots, 6,$$

где f_{fd} – несущая частота сигнала.

Аналогично можно записать и сигналы с кодовым разделением (КР):

$$s_{cd}(t) = \text{Re} \{ S_{cd}(t) \cdot e^{j2\pi f_{cd}t} \},$$

где $f_{cd} = 1565 \times f_s = 1600,995$ МГц, $f_s = 1,023$ МГц.

Для записи суммарного сигнала (ЧР+КР) через его комплексную амплитуду нужно выбрать единую «несущую» частоту. Тогда

$$s_{\Sigma}(t) = s_{cd}(t) + s_{fd}(t) = \text{Re} \{ S_{\Sigma}(t) \cdot e^{j2\pi f_{cd}t} \}, \quad (2)$$

где

$$S_{\Sigma}(t) = S_{cd}(t) + S_{fd}(t) \cdot e^{j2\pi df t}, \quad (3)$$

$$df = f_{cd} - f_{fd} = 1,005 \text{ МГц} - k \cdot 0,5625 \text{ МГц}.$$

Можно расписать (2) и (3) как

$$s_{\Sigma}(t) = (S_{cd}^{CT}(t) + S_{fd}^{CT}(t) \cdot e^{j2\pi df t}) \cos(2\pi f_{cd}t) - (S_{cd}^{BT}(t) + S_{fd}^{BT}(t) \cdot e^{j2\pi df t}) \sin(2\pi f_{cd}t) \quad (4)$$

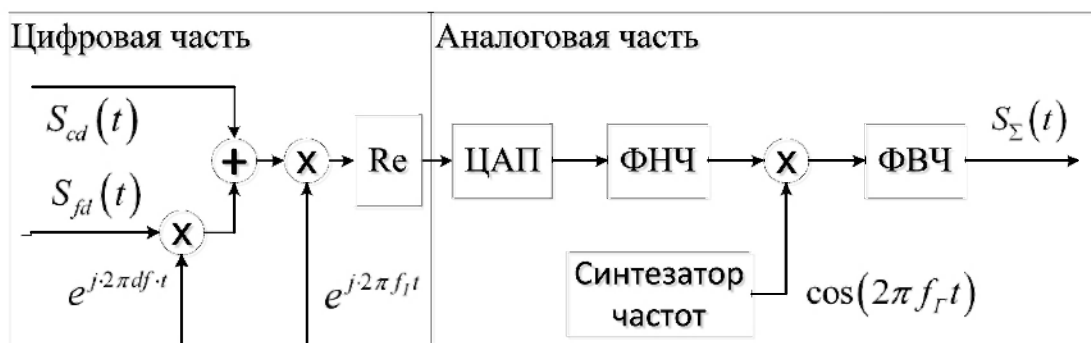


Рис. 2. Функциональная схема формирования сигнала

Таким образом, в идейном плане цифровой метод формирования сигнала реализуется цифро-аналоговым преобразованием вещественной и мнимой (косинусной и синусной) квадратур комплексной огибающей с последующим умножением этих квадратур на косинусные $\cos(2\pi f_{cd}t)$ и синусные $\sin(2\pi f_{cd}t)$ колебания несущей частоты и суммированием в IQ-модуляторе.

Практическая реализация может потребовать некоторых модификаций и дополнений. В частности, реализация IQ-модулятора на несущей частоте в цифровом виде затруднительна. В таком случае удобна следующая модификация алгоритма (2–4) и схемы на рис. 1.

Введем некоторую промежуточную частоту f_I и представим суммарный сигнал как

$$\begin{aligned} s_\Sigma(t) &= \operatorname{Re}\{S_\Sigma(t) \cdot e^{j2\pi f_I t} \cdot e^{j2\pi(f_{cd}-f_I)t}\} = \\ &= \operatorname{Re}\{\tilde{S}_\Sigma(t) \cdot e^{j2\pi f_I t}\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\tilde{S}_\Sigma(t) = S_\Sigma(t) \cdot e^{j2\pi f_I t}$ – комплексная амплитуда суммарного сигнала $s_\Sigma(t)$ на частоте $f_r = f_{cd} - f_I$. $\tilde{S}_\Sigma(t)$ реализуется в цифровом виде, т.е. значение f_I должно быть не слишком велико. Можно выбрать промежуточную частоту $f_I = 30.69$ МГц. Это значение кратно базовой частоте $f_o = 1,023$ МГц и создает достаточный запас для формирования спектра навигационного сигнала. Вместо формирования $s_\Sigma(t)$ по формуле (4) в IQ-модуляторе представим (5) как

$$\begin{aligned} s_\Sigma(t) &= |\tilde{S}_\Sigma(t)| \cdot \operatorname{Re}\{e^{j[2\pi(f_r+f_I)t+\Psi]}\} = \\ &= |\tilde{S}_\Sigma(t)| \cdot \cos[2\pi(f_r+f_I)t+\Psi], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Psi = \arg(S_\Sigma(t))$. Рассмотрим произведение

$$\begin{aligned} &2 \operatorname{Re}\{\tilde{S}_\Sigma(t)\} \cdot \operatorname{Re}\{e^{j2\pi f_r t}\} = \\ &= 2|S_\Sigma(t)| \cos(2\pi f_I t + \Psi) \cos(2\pi f_r t) = \\ &= |\tilde{S}_\Sigma(t)| \left\{ \cos[2\pi(f_r + f_I)t + \Psi] + \right. \\ &\quad \left. + \cos[2\pi(f_r - f_I)t + \Psi] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

т.е. оно отличается от (6) дополнительным слагаемым, спектр которого лежит на $2f_I$ левее частот первого слагаемого, лежащих вокруг несущей частоты $f_r + f_I = f_{cd}$.

Его несложно отфильтровать и оставить только нужный нам сигнал $s_\Sigma(t)$. Соответствующая этому алгоритму схема приведена на рисунке 2.

Возможен вариант схемы, где для отсекающей лишней составляющей нужно использовать фильтр нижних частот (ФНЧ), что сочетается с фильтром для радиоастрономии в L1.

Отличие схемы на рис. 2 от схемы на рис. 1 – усложнение цифровой части при упрощении аналоговой части схемы. Более того, исчезают все известные проблемы реализации IQ-модулятора. Фильтрация зеркальной составляющей на высокой частоте, по-видимому, не представляет проблем при ее отстройке $2f_I > 60$ МГц. Плата за это – дополнительная цифровая реализация комплексного умножения на $e^{j2\pi f_I t}$ и необходимое в ряде случаев повышение частоты дискретизации.

В заключение перечислим основные результаты работы:

1. Для решения проблем построения формирователей перспективных навигационных сигналов ГЛОНАСС предлагается применить метод цифрового формирования сигнала.

2. Предложенный цифровой формирователь навигационных сигналов позволяет обеспечить совместное формирование сигналов с частотным и кодовым разделением и излучение их через единую антенну.

3. Предложена схема формирователя с цифровой модуляцией на промежуточной частоте, удобная для практической реализации.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М: Радиотехника, 2010.
2. Cordesses, L. Direct Digital Synthesis: A Tool for Periodic Wave Generation (Part 1) / L. Cordesses // IEEE Signal Processing Magazine, DSP Tips & Tricks column. – 2004. – Vol. 21. – No. 4. – P. 50–54.
3. Cordesses, L. Direct Digital Synthesis: A Tool for Periodic Wave Generation (Part 2) / L. Cordesses // IEEE Signal Processing Magazine, DSP Tips & Tricks column. – 2004. – Vol. 21. – No. 5. – P. 110–117.