

## Создание аппаратно-программного динамического имитатора сигналов модернизированной межспутниковой радиолинии системы ГЛОНАСС

**А. А. Черкасова**, *cherkasova\_aa@navis.ru*

*АО «КБ НАВИС», Москва, Российская Федерация*

**Р. Ф. Салахов**, *otdelenie\_74@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Д. А. Астахов**, *к. т. н., otdelenie\_74@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Работа направлена на создание аппаратно-программного имитатора сигналов модернизированной межспутниковой радиолинии (ММРЛ) системы ГЛОНАСС. Имитатор осуществляет формирование сигналов ММРЛ с динамически меняющимися параметрами доплеровского смещения частоты и задержки, которые соответствуют взаимной динамике движения космических аппаратов (КА) системы ГЛОНАСС.

Модернизированная межспутниковая радиолиния обеспечит, по сравнению с действующей межспутниковой радиолинией (МРЛ), увеличение скорости передачи информации до 4 раз, а также точности измерения псевдоудальности между КА в два раза. Модернизация заключается в дополнении радиосигнала второй ортогональной (сдвинутой по фазе несущей частоты на 90° относительно существующей) компоненты. Для модернизации МРЛ необходимо создать и верифицировать новую аппаратуру для приема и передачи сигналов ММРЛ системы ГЛОНАСС.

Имитатор предназначен для обработки алгоритмов проведения измерений, закладываемых в бортовую аппаратуру межспутниковых измерений и оценки их состоятельности. Оценка состоятельности заключается в измерении и анализе разности между введенными в сигнал параметрами Доплера и задержки и оценкой этих параметров в приемной аппаратуре ММРЛ, данная разность и будет являться ошибкой измерений.

Имитация сигнала ММРЛ производится для 24 системных точек, соответствующих космическим аппаратам системы ГЛОНАСС, на полупериоде обращения спутника (20 280 с). Сигнал формируется на входе антенно-фидерного устройства (АФУ) одного из космических аппаратов в соответствии с информацией для генерации измерительного сигнала, параметров передатчиков сигнала ММРЛ и альманахом спутниковой группировки (поскольку сигнал на вход АФУ навигационного приемника поступает от нескольких КА), задаваемыми пользователем.

**Ключевые слова:** модернизированная межспутниковая радиолиния, динамическая имитация, циклограмма функционирования межспутниковой радиолинии, порядок кодово-временного разделения излучения спутниками сигналов модернизированной межспутниковой радиолинии

## Creation of a Hardware-Software Dynamic Signal Simulator of the Upgraded Inter-Satellite Radio Link of the GLONASS System

**A. A. Cherkasova**, *cherkasova\_aa@navis.ru*

*Joint Stock Company "NAVIS", Moscow, Russian Federation*

**R. F. Salakhov**, *otdelenie\_74@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**D. A. Astachov**, *Cand. Sci. (Engineering), otdelenie\_74@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** This work is aimed at creating a hardware-software signal simulator of the upgraded inter-satellite radio link (ISRL) of the GLONASS system. The simulator shapes ISRL signals with dynamically changing parameters of the Doppler frequency shift and delay, which correspond to the mutual dynamics of spacecraft (SC) motion of the GLONASS system.

The upgraded inter-satellite radio link will provide (as compared to the current ISRL) an increase in the information transfer rate of up to four times, as well as boost the accuracy of measuring the distance between satellites by two times. Modernization consists in complementing the radio signal of the second orthogonal (phase-shifted carrier frequency by 90 degrees relative to the existing one) component. To modernize the ISRL, it is necessary to create and verify new equipment for receiving and transmitting signals of the upgraded ISRL of the GLONASS system.

The simulator is designed to process measurement algorithms embedded in the on-board equipment for inter-satellite measurements and assess their consistency. Consistency evaluation consists in measuring and analyzing the difference between the Doppler parameters and delay introduced into the signal and the estimation of these parameters in the receiving equipment of the ISRL. This difference will be the measurement error.

Dynamic simulation is performed for 24 system points, corresponding to GLONASS satellites, on the half-period of satellite revolution (20 280 seconds). The signal is generated at the input of the antenna-feeder device of one of the satellites in accordance with the information for generating the measuring signal, parameters of the transmitters of the signals of the upgraded ISRL and the almanac of the satellite constellation (because the signal at the input of the antenna-feeder device of the navigation receiver incomes from several SC) specified by the user.

**Keywords:** upgraded inter-satellite radio link, dynamic imitation, sequence diagram of inter-satellite radio link operation, arrangement of code-time division access of upgraded inter-satellite radio link

## Введение

Модернизированная межспутниковая радиопередача (ММРЛ) системы ГЛОНАСС обеспечивает передачу информации и измерение взаимных параметров движения до 24 космических аппаратов (КА). Под взаимными параметрами движения понимаются псевдодальности, псевдодоплеровские смещения частот несущих колебаний и псевдодоплеровские фазы.

Модернизация заключается в дополнении радиосигнала второй ортогональной (сдвинутой по фазе несущей частоты на  $90^\circ$  относительно существующей) компоненты.

На синфазной компоненте реализован сигнал, соответствующий по структуре действующей МРЛ (МРЛ-1), и предназначен как для передачи информации, так и для измерения взаимных параметров движения КА.

На квадратурной компоненте реализован сигнал МРЛ-2 и предназначен только для передачи информации с повышенной (относительно синфазной компоненты) скоростью.

ММРЛ работает по жесткой 20-секундной циклограмме (в соответствии с [1]):

- 5 секунд — передача (вещание группы КА в своем временном интервале);
- 15 секунд — прием.

Все 24 космических аппарата разбиты на 4 группы по 6 спутников (см. таблицу). Каждой группе выделен фиксированный временной 5-секундный интервал для работы в режиме передачи, остальные 15 секунд работа в режиме приема.

Внутри группы КА различаются сигнальными литерами, одновременно излучают 6 КА, которым

соответствуют 6 сигнальных литер. Каждой сигнальной букве однозначно соответствует несущая частота из диапазона 2200–2225 МГц, как представлено в [1], и полиномы псевдослучайных основной и вспомогательной последовательностей. Номер системной точки КА выбирается из условия недопущения совпадения сигнальных литер (полиномов) при передаче радиосигналов от КА одной группы.

В ММРЛ используется принцип квадратурного, кодово-частотного и временного разделения между КА. Схема формирования сигналов МРЛ-1 и МРЛ-2 представлена на рис. 1.

В ММРЛ используются фазоманипулированные на  $\pi$  радиосигналы. Каждой сигнальной букве однозначно соответствуют коды ПСП синфазной и квадратурной компонент сигнала.

При этом на каждом 5-секундном интервале времени, выделенном для передачи каждой из 4 групп спутников, используется составная ПСП: сначала излучается вспомогательная последовательность (ПСП-В), затем — основная (ПСП-О) в соответствии с [1] (рис. 2).

Время, в которое излучается ПСП-В, предназначено для обнаружения и синхронизации с сигналом в приемной аппаратуре. Во время излучения ПСП-В информация не передается.

Время, в которое излучается ПСП-О, предназначено для передачи информации и/или проведения измерений.

## Динамическая имитация сигналов ММРЛ

Отработка алгоритмов, закладываемых в приемную аппаратуру, производится на имитационном стенде. Функционально-структурная схема имитационного стенда представлена на рис. 3. Блок, отвечающий за формирование сигналов с динамически меняющимися параметрами доплеровского смещения частоты и задержки, соответствующих взаимной динамике движения КА (в дальнейшем КФУ, контрольно-формирующее устройство), представлен векторным формирователем сигналов, рублидеевым стандартом частоты, компьютером и RAID-хранилищем данных [3].

Т а б л и ц а. Циклограмма работы ММРЛ

Временной № интер- плоскости	1-й ин- тервал	2-й ин- тервал	3-й ин- тервал	4-й ин- тервал
Излучающие КА 1-й плоскости	1, 5	2, 6	3, 7	4, 8
Излучающие КА 2-й плоскости	9, 13	10, 14	11, 15	12, 16
Излучающие КА 3-й плоскости	17, 21	18, 22	19, 23	20, 24

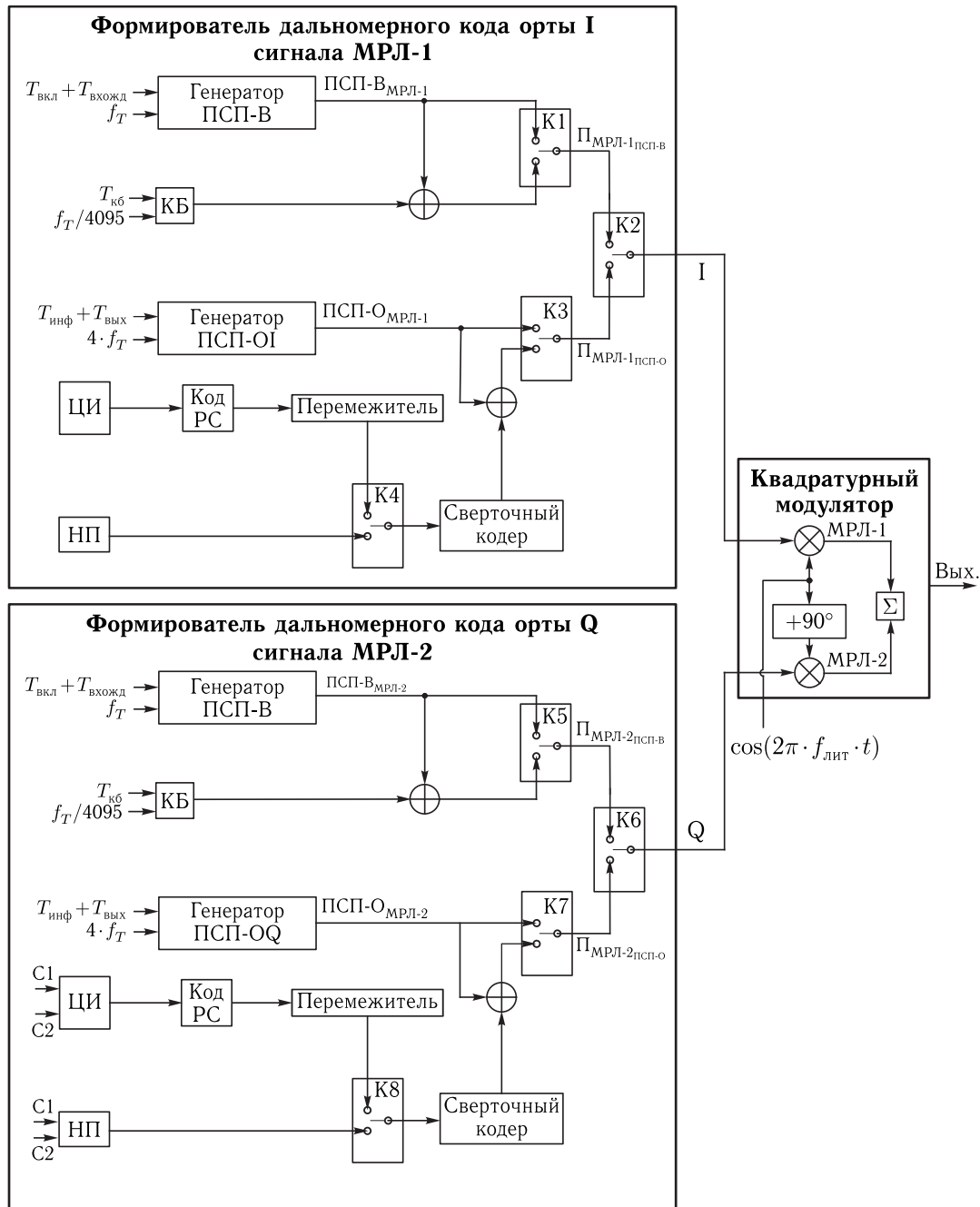


Рис. 1. Схема формирования сигналов ММРЛ

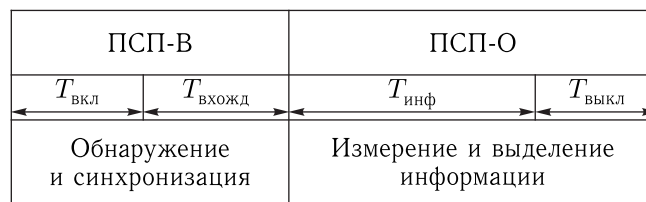


Рис. 2. Распределение времени на 5-секундном интервале, выделяемом для передачи каждой из 4 групп из 6 спутников в жесткой циклограмме работы ММРЛ

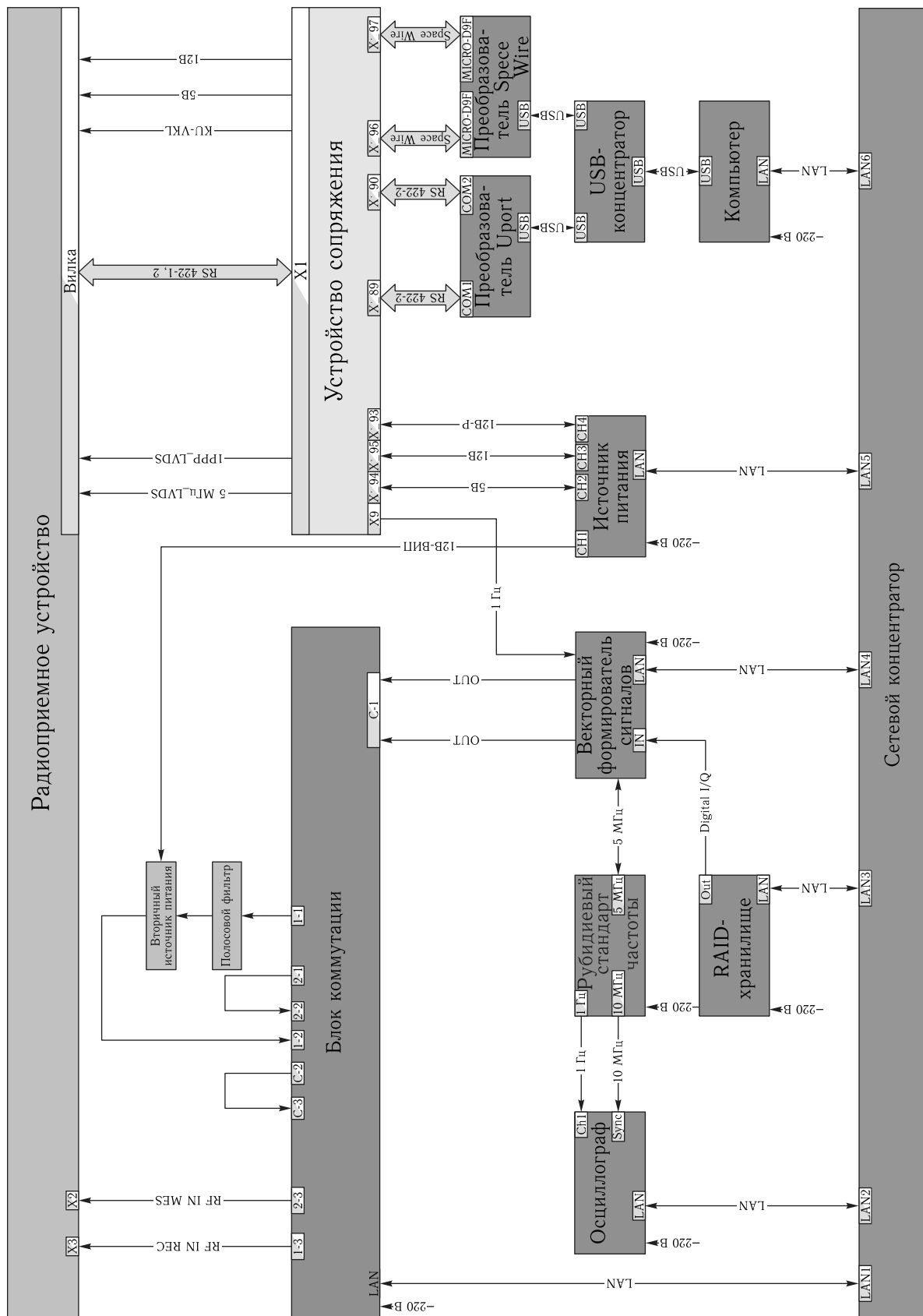


Рис. 3. Функционально-структурная схема имитационного стенда

На компьютер, входящий в состав имитационного стенда, устанавливается программное обеспечение, блок-схема которого представлена на рис. 4. Программа для персонального компьютера (ПК) имитационного стенда отвечает за прием от пользователя входных параметров для имитации сигналов, проверяет данные на валидность и передает программному модулю КФУ. Программный модуль КФУ, пользуясь входными параметрами от пользователя, создает файл с отсчетами эталонных сигналов ММРЛ и записывает его в RAID-хранилище. После того как файл записан в RAID-хранилище, программный модуль управления имитационным стендом запускает векторный формирователь сигналов, который формирует сигнал в соответствии с файлом в RAID-хранилище, а также передает целеуказания радиоприемному устройству. В качестве целеуказаний передается время по бортовой шкале и соответствующие этому времени внесенные в сигнал частота Доплера и задержка для осуществления процедуры поиска сигнала не по всему

полю поиска, а по части поля, близкой к целеуказаниям («теплый старт»).

Алгоритм, используемый программным модулем КФУ для создания файлов с отсчетами эталонных сигналов ММРЛ с динамически меняющимися параметрами доплеровского смещения частоты и задержки, повторяющих реальную взаимную динамику движения КА, представлен на рис. 5.

**Шаг 1.** Получение входных данных и их обработка

Входные данные поступают от пользователя и представляют собой четыре пакета.

1. Пакет бортовой шкалы времени (единый для всех КА), состоящий из:

- информации о текущем времени (начальный момент);
- информации о длительности интервала формирования.

Максимальное время непрерывной динамической имитации сигналов ММРЛ составляет



Рис. 4. Программное обеспечение имитационного стенда

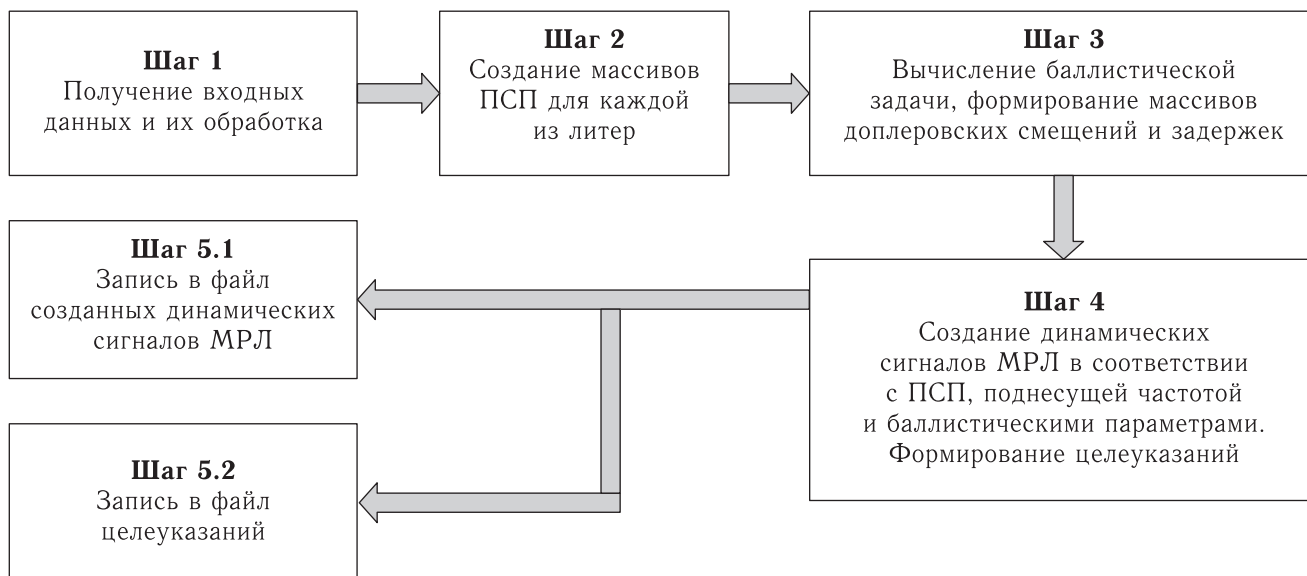


Рис. 5. Алгоритм программного модуля КФУ

половину периода обращения спутника, а именно 20 280 секунд, как представлено в [1].

Пользователь может задавать начальное время имитации и интервал формирования. Они должны находиться в рамках времени жизни заданного альманаха, интервал формирования не должен превышать максимального времени непрерывной динамической имитации сигналов ММРЛ и должен быть кратен 20 с.

2. Пакет информации для генерации информационного сигнала, для каждого КА, состоящий из:

- номера пятисекундного интервала жесткой циклограммы МРЛ, во время которого производится излучение;
- номера системной точки.

3. Пакет с параметрами передатчиков сигнала ММРЛ, для каждого КА, состоящий из:

- номера сигнальной литеры;
- кода начальной фазы ПСП.

4. Пакет альманаха (в соответствии с [2]) для каждого КА, состоящий из:

- периода обращения спутника в секундах ( $T_{об}$ );
- эксцентриситета ( $e$ );
- наклона орбиты в градусах ( $i$ );
- географической долготы восходящего узла в градусах ( $L_{\Omega}$ );
- аргумента перигея ( $\omega$ );

- времени прохождения восходящего узла в секундах ( $T_{\Omega}$ );

- скорости изменения драконического периода ( $\Delta T$ );

**Шаг 2.** Генерация массивов ПСП для каждой из литер

Массивы ПСП генерируются в соответствии с пакетом с параметрами передатчиков сигнала ММРЛ.

**Шаг 3.** Решение баллистической задачи, формирование доплеровских смещений и задержек

Баллистический расчет выполняется в соответствии с [1] и обеспечивает необходимую для данной задачи привязку ко времени. Баллистический расчет направлен на вычисление динамических параметров, а именно дальностей и взаимных скоростей между КА системы ГЛОНАСС, которые пересчитываются в задержки и доплеровские частоты соответственно и вводятся в сигнал. Шаг расчета динамических параметров (составляет 1 мс, а отсчеты сигнала имеют шаг дискретизации  $1/F_d$  (где  $F_d$  – частота дискретизации, формула (4)). Так как шаг дискретизации на 4 порядка меньше шага расчета динамических параметров, производится линейная интерполяция динамических параметров, в результате которой динамические параметры предоставляются с шагом дискретизации.

Частота дискретизации выбирается единой для всех шести литер и в соответствии с теоремой Котельникова. Сигнал ММРЛ — это QPSK-сигнал [4]. Главные лепестки спектров 1-й и 6-й литер сигнала ММРЛ представлены на рис. 6.

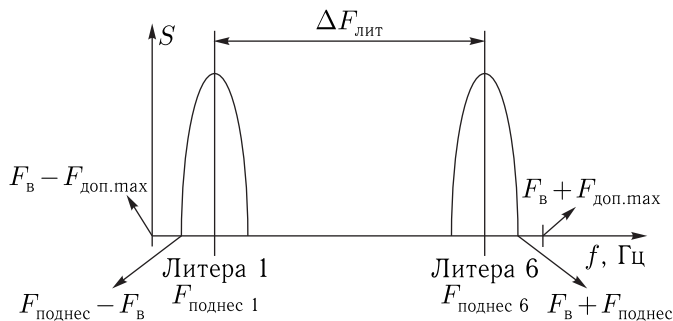


Рис. 6. Главные лепестки спектров 1-й и 6-й литер сигнала ММРЛ

Формирование сигналов ММРЛ в цифровом виде на несущей частоте приведет к огромным вычислительным затратам, потому сигналы формируются на поднесущих частотах, представленных на рис. 6 как  $F_{\text{поднес } 1}$  и  $F_{\text{поднес } 6}$  (поднесущие частоты первой шестой и литер соответственно). Значения этих частот представлены в формулах

$$\begin{aligned} F_{\text{поднес } 1} &= F_B + F_{\text{доп.мах}} = \frac{\Delta F}{2} + F_{\text{доп.мах}} = \\ &= \frac{10,4 \text{ МГц}}{2} + 64 \text{ кГц} = 10,464 \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{поднес } 6} &= F_{\text{поднес } 1} + \Delta F_{\text{лит}} = \\ &= 10,464 \text{ МГц} + 1,5 \text{ МГц} = 11,964 \text{ МГц}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F_B$  — половина ширины спектра сигнала ММРЛ;

$F_{\text{доп.мах}}$  — максимальный доплер, обусловленный взаимной динамикой движения КА;

$\Delta F$  — ширина спектра сигнала ММРЛ;

$\Delta F_{\text{лит}}$  — смещение между литерами.

Теорема Котельникова гласит: если наивысшая частота в спектре функции  $s(t)$  меньше, чем  $f$ , то функция  $s(t)$  полностью определяется последовательностью своих значений в моменты, отстоящие друг от друга не более чем на  $1/(2 \cdot f)$  с [5]. Наивысшая частота в спектре находится по фор-

муле (3). Тогда частота дискретизации рассчитывается как удвоенная наивысшая частота в спектре (4).

$$\begin{aligned} F &= F_{\text{поднес}} + \Delta F_{\text{лит}} + F_{\text{доп.мах}} + F_B = \\ &= 17,228 \text{ МГц}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_d = 2 \cdot F = 17,228 \text{ МГц} \cdot 2 = 34,456 \text{ МГц}. \quad (4)$$

**Шаг 4.** Создание отсчетов эталонных динамических сигналов ММРЛ в соответствии с циклограммой и структурой сигналов ММРЛ, поднесущей частотой и динамическими параметрами. Формирование целеуказаний для приемной аппаратуры производится на момент начала каждого пятисекундного интервала.

**Шаг 5.1 и 5.2** включают в себя запись в файл с отсчетами эталонных сигналов ММРЛ с динамически изменяющимися параметрами доплеровского смещения частоты и задержки, а также запись в файл целеуказаний для ПРМ на момент начала каждого 5-секундного интервала.

Сформированные файлы отсчетов эталонных сигналов ММРЛ воспроизводятся векторным формирователем сигналов с возможностью изменения отношения сигнал/шум.

Динамика движения КА значительно влияет на работу приемной аппаратуры, на рис. 7 хорошо видны наиболее неблагоприятные участки траектории с наибольшим ускорением. В связи с этим необходимо обработать ситуации, возникающие во время

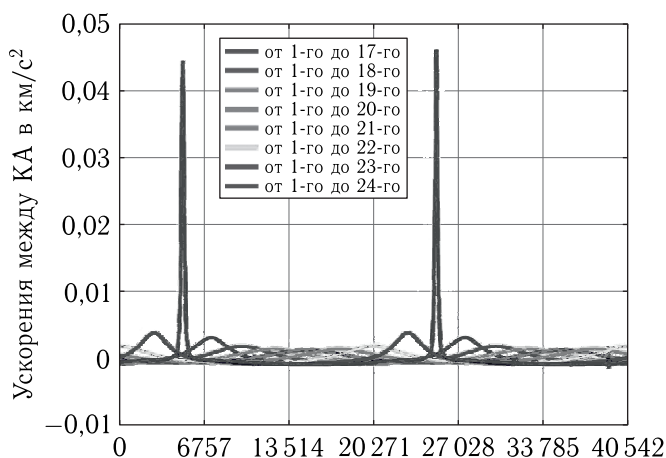


Рис. 7. Зависимость ускорений между спутниками от времени относительно 1-го спутника и спутников 3-й орбиты



полета КА, еще на Земле. Имитатор, осуществляющий формирование сигналов ММРЛ с динамически меняющимися параметрами доплеровского смещения частоты и задержки, которые соответствуют взаимной динамике движения космических аппаратов (КА), позволит проверить состоятельность алгоритмов обработки сигналов, закладываемых в приемную аппаратуру ММРЛ. Преимущество работы с имитатором в том, что точно известны введенные в сигнал параметры доплеровского смещения частоты и задержки, соответствующие взаимной динамике движения космических аппаратов системы ГЛОНАСС. Благодаря этому мы можем определить разность между введенными в сигнал параметрами Доплера и задержки и оценкой этих параметров в приемной аппаратуре ММРЛ, данная разность и будет являться ошибкой измерений. С помощью созданного имитатора сигналов ММРЛ планируется исследовать зависимость ошибки измерений от отношения сигнал/шум, а также отработать наиболее неблагоприятные участки траектории дви-

жения КА, выявить динамическую ошибку измерений и произвести калибровку приемной аппаратуры.

## Список литературы

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Издание 4-е перераб. и доп. Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Радиотехника, 2010.
2. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1,0. Москва, 2016. [http://russianspacesystems.ru/wpcontent/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wpcontent/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf)
3. *Patterson D. A., Gibson G. and Katz R. H.* A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID).
4. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Издание 2-е, испр. М.: ИД «Вильямс», 2003.
5. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971.