

## **АВТОНОМНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ**

В.В. Перлюк, А.Ю. Федоринов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, институт аэрокосмических приборов и систем»

[Perlvv@mail.ru](mailto:Perlvv@mail.ru)

**Аннотация:** Синхронизация времени спутников в группе важна как для возможностей управления группировкой, так и для автономной работы наноспутников. Для автономного установления и поддержания синхронизации времени в группе наноспутников мы предлагаем компактную систему компенсации разницы во времени (СКРВ), которая представляет собой средства управления таймерами, динамически настраивающие опорную частоту спутника в соответствии с разницей во времени с другими спутниками.

**Ключевые слова:** Измерение разницы по времени, временная синхронизация, динамическая подстройка опорной частоты, группировка наноспутников.

Концепция спутниковой группировки была первоначально сформирована для распределенной космической системы, которая была использована в астрономических и планетарных исследованиях, но позже такие подходы стали применяться и в задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Важным одним преимуществом использования распределенной спутниковой системы для наблюдения за Землей является также то, что она может обеспечить гибкую базовую линию для достижения двух или многостатического радара с синтезированной апертурой (САР) [2].

Чтобы улучшить возможности совместного зондирования группы наноспутников, данные измерений с разных спутников должны быть тщательно помечены единой временной меткой, а синхронизация состояний спутников также важна как для создания группы наноспутников, так и для ее поддержания [3]. Кроме того, предполагается, что будущие космические миссии станут более сложными, будут выполняться на большем расстоянии от Земли, и им потребуется поддерживать автономные операции с минимальным вмешательством человека-оператора [4]. Поэтому принципиально важно создание хорошо автономно работающей спутниковой группировки с единым эталоном времени.

Для достижения цели автономной синхронизации времени для спутниковой группировки мы предлагаем компактную систему компенсации разницы во времени (СКРВ), которая полностью отличается от существующих подходов, поскольку она может обеспечить возможность автономной синхронизации времени на орбите. С точки зрения СКРВ, временная синхронизация достигается за счет динамической настройки опорной частоты спутника в соответствии с текущей разницей во времени, а разница во времени будет компенсирована и, по возможности, обеспечивается близкой к нулю. Текущая разница во времени обычно измеряется методами двусторонней спутниковой передачи времени и частоты [5,6] или GPS-CV [7,8]. Однако в этой работе мы используем систему измерения разницы во времени (СИРВ) на основе архитектуры

TWSTFT, которая вычисляет разницу во времени путем измерения разности фаз псевдощумового кода передатчика между разными спутниками, поскольку фаза кода PN и спутниковые часы управляются одним и тем же бортовым стандартом частоты.

В качестве примера рассматривается два спутника. Спутник, оснащенный СКРВ, обозначается как ведомый, а другой служит ведущим. Таймер ведущего управляется бортовым генератором (OSC) напрямую, в то время как таймер ведомого выводится из опорной частоты  $f_{OSC}$ , которая определяется текущей разницей во времени, обеспечиваемой СКРВ. Повторитель имеет два рабочих состояния: в состоянии разомкнутого контура СКРВ отключен, так что разница во времени изменяется; в состоянии замкнутого контура СКРВ динамически регулирует  $f_{OSC}$ , чтобы гарантировать, чтобы разница во времени сходилась к нулю.

Модель цифрового тактового генератора показана на рисунке 1.  $f_{OSC}$  представляет номинальную частоту генератора. Непосредственная выходная частота программируемого генератора (ПГ NCO) должна иметь большие частотные выбросы, которые вызваны периодическим переполнением фазы NCO во временной области. Следовательно, для регенерации высококачественной опорной частоты используется метод подавления побочных эффектов (код Дизеринга) [9] и контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ PLL) с подкачкой заряда [10].

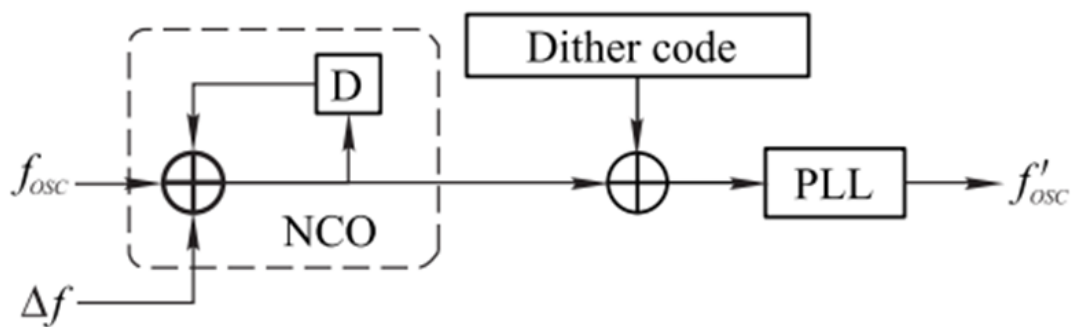


Рисунок 1 - Структура цифрового тактового генератора

Код Дизеринга представляет собой генератор случайных чисел, который нарушает периодичность переполнения фазы ПГ, поэтому мощность частотных пиков будет белеть. Поскольку полоса пропускания ФАПЧ очень мала, большая часть шума будет подавлена, поэтому ФАПЧ с подкачкой заряда можно использовать для извлечения высококачественного однонального аналогового сигнала из цифровой выходной частоты ПГ, которая загрязнена фазовым шумом [10]. Следовательно, регулируемая частота  $f_{OSC}$  может использоваться в качестве опорной частоты для системы.

Результат компьютерного эксперимента с данной моделью СКРВ показывает, что стандартное отклонение временной синхронизации составляет около 102 пикосекунд, когда отношение сигнал/шум составляет 95 дБГц, а стандартное отклонение соответствующей частоты составляет приблизительно 0,36 Гц.

### Список литературы:

1. D'Errico M. Distributed space missions for earth system monitoring. New York: Microcosm Press and Springer, 2013.
2. Pitz W., Miller D. The TerraSAR-X satellite. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 615 – 622.

3. Макаров И.Е., Толстиков А.С. Методы синхронизации пространственно- разнесенных частот, основанные на применении спутниковых навигационных технологий. / Интерэкспо Гео-Сибирь - ФГУП СНИИМ, Новосибирск, 2006.
4. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: physical layer to network layer view / R. Radhakrishnan, W. Edmonson, F. Afghah [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2442 – 2473.
5. Algorithm of intersatellite dynamic two-way time transfer based on GEO satellite / F. Huang, X. Lu, H. Wu, [et al.] // Proc. Of the IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the European Frequency and Time Forum, 2009: 688 – 691.
6. Introduction of software-defined receivers in two-way satellite time and frequency transfer / Y. Huang, W. Tseng, S. Lin [et al.] // Proc. of the IEEE International Frequency Control Symposium, 2016: 1 – 26.
7. Comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques / J. Yao, I. Skakun, Z. Jiang [et al.] // Proc. Of the IEEE Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, 2015: 655 – 661.
8. Precise continuous time and frequency transfer using GPS carrier phase / R. Dach, U. Hugentobler, T. Schildknecht [et al.] // Proc. of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006: 329 – 336.
9. Vankka J, Halonen K. Spur reduction techniques in sine output direct digital synthesizer. Digital Synthesizers and Transmitters for Software Radio, 2005: 113 – 137.
10. Xu X., Liu H., Tan W. Parameters design of 1.25GHz low jitter charge pump PLL. Proc. of the IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2011: 3418 – 3421.