

УДК 629.197  
DOI 10.17285/0869-7035.0097

К. РАДЖАЯ, К. МАНАМОХАН, С. НИРМАЛА, Р. Т. ВЕНКАТАППА, Ч. У. ПРАШАНТХ

## КОРРЕКЦИЯ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ СПУТНИКОВ IRNSS/NavIC

*Точность дальномерных измерений, выполняемых при помощи навигационных спутников, зависит главным образом от поправок бортовых часов, которые периодически транслируются пользователям. В течение срока службы спутника смещение бортовых часов относительно системного времени – важнейший параметр, накапливающийся вследствие сдвига и дрейфа частоты, – должно находиться в заданном интервале. В спутниках Индийской региональной навигационной спутниковой системы (IRNSS) смещение часов удерживается в допустимом интервале путем ввода поправок к частоте бортового генератора. В данной статье обсуждается метод вычисления смещения часов по беззапросным дальномерным измерениям. Описывается применяемый в спутниках IRNSS способ синхронизации, который позволяет удерживать смещение спутниковых часов в допустимом интервале максимальное время.*

**Ключевые слова:** Индийская региональная навигационная спутниковая система (IRNSS), навигация, атомный стандарт частоты, сдвиг частоты, дрейф частоты, стабильность частоты.

### Введение

Приемник потребителя определяет свое местоположение и время с помощью эфемерид и поправок к часам спутников, содержащихся в навигационной части сигналов, которые передаются спутниками глобальных и региональных навигационных спутниковых систем (ГНСС и РНСС). В большинстве ГНСС и РНСС в качестве атомных часов для выработки навигационного сигнала применяются стабильные генераторы частоты, например рубидиевые атомные стандарты частоты (РАСЧ) [1]. В каждом навигационном спутнике время бортовых часов синхронизируется с наземным эталоном при выведении спутника на предназначенную для него орбиту, при этом оно имеет свойство отклоняться от наземного эталона вследствие дрейфа тактовой частоты, свойственного РАСЧ [2], и старения последнего. Разница между временем, определяемым спутником, и наземным опорным сигналом называется смещением часов спутника. Это смещение ежедневно оценивается, прогнозируется на следующие 24 часа и транслируется пользователям в виде поправок спутниковых

---

**Раджая** Кайтха. Научный сотрудник, Спутниковый центр им. Рао, Индийская организация космических исследований (Бангалор, Индия). ORCID 0000-0003-1648-9587.

**Манамохан** Камат. Научный сотрудник, Спутниковый центр им. Рао, Индийская организация космических исследований.

**Нирмала** Срини. Научный сотрудник, Спутниковый центр им. Рао, Индийская организация космических исследований.

**Венкатаппа** Рао Туму. Профессор, Физический факультет Национального технологического института Варангала (Телангана, Индия). ORCID 0000-0003-4978-7011.

**Прашантх** Ч. Упадхья. Доктор наук, научный сотрудник, Лаборатория электрооптических систем, Индийская организация космических исследований. ORCID 0000-0001-7688-8825.

часов, таких как смещение времени или смещение тактового интервала ( $af_0$ ), дрейф часов или относительный сдвиг частоты ( $af_1$ ) и скорость дрейфа часов или дрейф частоты ( $af_2$ ). Для спутников с РАЧ смещения спутниковых часов рассчитываются в приемнике потребителя с использованием квадратичной полиномиальной модели [3]:

$$\delta t^s(t_{\text{sys}}) = af_0 + af_1(t_{\text{sys}} - t_c) + af_2(t_{\text{sys}} - t_c)^2, \quad (1)$$

где  $t_{\text{sys}}$  – системное время, транслируемое спутником;  $\delta t^s(t_{\text{sys}})$  – смещение спутниковых часов, накопленное на момент  $t_{\text{sys}}$ ;  $t_c$  – время, относительно которого рассчитаны поправки.

В каждой спутниковой навигационной системе смещение  $\delta t^s$  может накапливаться только в рамках допустимого интервала, обусловленного ограничениями на объем транслируемых данных. При выходе смещения спутниковых часов за этот интервал дальномерные измерения становятся ненадежными, что приводит к большим погрешностям в определении местоположения пользователя. В связи с этим необходимо удерживать смещение часов в заданном интервале, т.е. обеспечивать синхронизацию часов спутника с системной шкалой времени, которая производится путем введения поправок в данные бортового навигационного оборудования. В зависимости от условий на борту можно использовать различные методы применения поправок:

- 1) перезагрузку смещения времени;
- 2) подстройку относительного сдвига частоты;
- 3) подстройку смещения времени совместно с относительным сдвигом частоты;
- 4) подстройку дрейфа частоты.

Метод 1 реализован в спутниках GPS-IIA [4], метод 4 – в спутниках GPS-IRR [5], а 2 и 3 используются для синхронизации спутников системы BeiDou [6–8].

В статье описывается способ синхронизации, применяемый в Индийской региональной навигационной спутниковой системе (IRNSS), а также метод вычисления смещения часов спутника ( $\delta t^s$ ) по беззапросным дальномерным измерениям и процедура передачи поправок часов на спутник для трансляции пользователям.

### Индийская региональная навигационная спутниковая система

IRNSS, называемая ранее NavIC, разработана Индийской организацией космических исследований (ISRO) для предоставления навигационных услуг пользователям индийского региона. Системное время IRNSS (IRNSS Network Time – IRNWT) – это наземное опорное время, относительно которого оцениваются эфемериды спутника и параметры часов, далее передаваемые пользователю [9]. Система IRNSS состоит из трех спутников на геостационарных орбитах на долготе 32,5° E, 83° E, 129,5° E и четырех спутников на геосинхронных орбитах на долготе 55° E и 111,75° E [10].

На каждом спутнике IRNSS установлены РАЧ, чья выходная частота (10 МГц) подается на блок контроля атомных часов, синтезирующий основную частоту  $f_0$  (10,23 МГц), которая затем используется для выработки навигационных сигналов на частотах  $L5$  (1176,45 МГц) и  $S$  (2492,028 МГц). IRNSS способна передавать поправку на сдвиг частоты в блок контроля атомных часов посредством телеметрических команд. Поправка вводится в данные синтезатора частоты, который соответствующим образом меняет основную частоту. После запуска спутник IRNSS начинает ра-

боту при размещении его на целевой орбите и синхронизации спутникового времени с наземным опорным сигналом [11]. Стабильность частоты и дрейф бортового РАСЧ измеряются и постоянно отслеживаются на Земле путем обработки дальномерных измерений на частотах  $L5$  и  $S$ .

Оптимальная работа РАСЧ имеет определяющее значение для функционирования навигационной системы, т.к. его нестабильность может напрямую влиять на точность определения местоположения пользователя на Земле. Обычно РАСЧ демонстрируют как стохастическое, так и детерминированное поведение. Стохастическое поведение исследуется путем измерения стабильности частоты, описываемой с помощью перекрывающейся девиации Аллана. На рис. 1 показана типичная стабильность частоты РАСЧ в спутнике IRNSS. Поскольку стохастическое поведение невозможно скорректировать на борту, необходимо выбирать спутниковые часы со стабильностью частоты в заданных пределах.

Детерминированное поведение РАСЧ характеризуется смещением спутниковых часов ( $\delta t^s$ ), которое выражается с помощью полиномиальных коэффициентов  $af_0$ ,  $af_1$  и  $af_2$  (1), передаваемых пользователю, чтобы синхронизировать его приемник с IRNWT. В таблице приведены разрешенные интервалы передаваемых параметров в спутниках IRNSS [12]. Накопленное со временем значение  $af_0$  не должно выходить за границы допустимого интервала ( $\pm 9,7656E-04$  с).

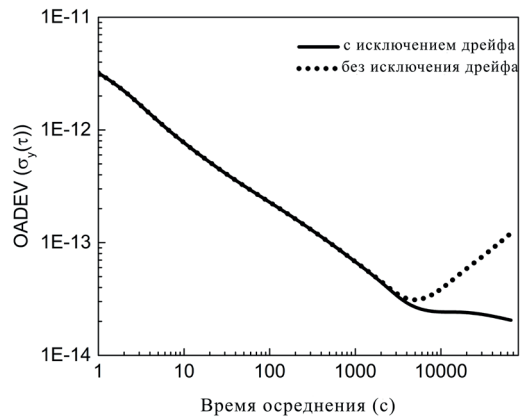


Рис. 1. Типичная стабильность частоты (OADEV – перекрывающаяся девиация Аллана) РАСЧ на спутнике IRNSS, вычисленная на Земле по дальномерным измерениям. Сплошной линией обозначена стабильность частоты, определенная с исключением дрейфа, пунктирной – без исключения дрейфа

Т а б л и ц а

Допустимые предельные значения отдельных коэффициентов часов в спутниках IRNSS

Параметр	Максимальное значение
$af_0$	$\pm 9,76560E-04$ с
$af_1$	$\pm 3,72529E-09$ с/с
$af_2$	$\pm 3,55271E-15$ с/с <sup>2</sup>

В IRNSS параметры поправок спутниковых часов оцениваются по дальномерным данным, затем прогнозируются на следующие 24 ч при номинальном поведении часов и передаются на спутники, когда они находятся в зоне постоянной видимости наземной передающей станции. На рис. 2 показана схема выработки и передачи поправок спутниковых часов, используемая в IRNSS. Группа 1 содержит 12 наборов поправок спутниковых часов, рассчитанных на следующие 24 ч начиная с  $n$ -го часа в произвольный день, причем каждый из наборов действителен 2 ч. По прошествии 4 ч, т.е. в момент  $n + 4$  ч, оценивается следующий набор поправок (группа 2) с уче-

том последних четырех часов измерений, и расчет данных на последующие 24 ч производится снова. Эта процедура повторяется каждые четыре часа в скользящем режиме, как показано на рис. 2.

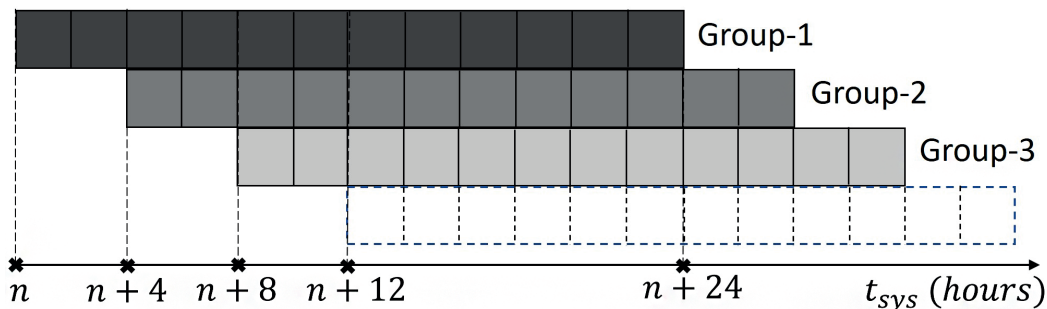


Рис. 2. Схема выработки и передачи на спутник поправок часов в IRNSS. Группа 1, 2 и 3 – спрогнозированные поправки часов 12 наборов с шагом 4 ч

На рис. 3 показана типичная погрешность прогноза часов спутника IRNSS на интервале 24 ч при использовании 12 наборов поправок, относящихся к одной группе. Здесь погрешность прогноза – это разница между наблюдаемым и расчетным смещением часов  $\delta t^s$ .

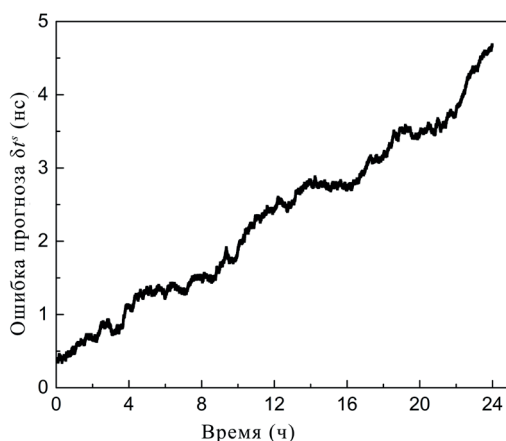


Рис. 3. Типичная погрешность  $\delta t^s$  прогноза часов спутника IRNSS на интервале 24 ч

### Методика синхронизации часов спутника

В IRNSS применяются два подхода для удержания смещения часов спутника  $\delta t^s$  в допустимом интервале: перезапуск бортового времени (т.е. перезапуск  $\delta t^s$ ) и корректировка относительного сдвига частоты ( $af_1$ ), что, в свою очередь, меняет  $\delta t^s$  в соответствии с (1).

#### *Перезапуск бортового времени*

Смещение часов спутника синхронизируется (путем перезапуска) с IRNWT при приближении к границе допустимого интервала. Этот метод синхронизации борто-

вых часов в IRNSS подробно описан в [11]. Поправки подаются на блок выработки навигационных сигналов и в течение трехэтапного процесса синхронизации продолжительностью около 4-6 ч спутник недоступен для потребителей. Не рекомендуется часто проводить синхронизацию бортового времени, т.к. она нарушает непрерывность дальномерных измерений и увеличивает время простоя спутника. Данная схема используется в IRNSS только на начальном этапе работы после запуска спутника, а не для последующей синхронизации времени спутника.

### Вычисление сдвига частоты

Метод заключается в корректировке  $af_1$  путем подачи сдвига частоты ( $\Delta f = af_1 \cdot f_0$ ) на блок контроля атомных часов, который затем синтезирует скорректированную частоту, чтобы удерживать  $\delta t^s$  в пределах заданного интервала. Для внесения поправок требуется всего пара минут, работа спутника восстанавливается через 20 мин. Знак и величина поправки по сдвигу частоты зависят от значений  $\delta t^s$  и  $af_2$ , накопленных к моменту расчета поправки. Значение поправки должно быть оптимизировано таким образом, чтобы интервал между двумя последовательными поправками был максимальным. Такая поправка называется оптимальным сдвигом частоты.

Математическое выражение, использованное при расчете оптимального значения  $af_1$ , объясняется ниже. Квадратичный полином, применяемый для прогноза смещения часов (1), может быть представлен в обобщенном виде следующим образом:

$$\delta t^s(t_{\text{sys}}) = af_2(t - t_{OL})^2 + \delta t_{OL}^s, \quad (2)$$

где  $t = t_{\text{sys}} - t_c$ ,

$$(t_{OL}, \delta t_{OL}^s) = \left( -\frac{af_1}{2af_2}, \frac{4af_0af_2 - af_1^2}{4af_2} \right). \quad (3)$$

Здесь  $t_{OL}$  – время, когда  $\delta t^s$  достигает экстремального значения  $\delta t_{OL}^s$ . Смещение  $\delta t_{OL}^s$  считается равным операционному пределу (Operating Limit – OL)  $\delta t^s$ , который положителен при  $af_2 < 0$  и отрицателен при  $af_2 > 0$ , как показано на рис. 4. Задание OL необходимо для создания безопасного запаса до границ допустимого интервала (Broadcast Limit – BL на рис. 4) и непревышения  $\delta t^s$  вследствие случайных изменений  $af_2$ . Из (3) следует, что оптимальное значение  $af_1$ , соответствующее желаемому операционному пределу (т.е.  $\delta t_{OL}^s$ ), определяется как

$$af_1 = \begin{cases} +2\sqrt{af_2(af_0 - \delta t_{OL}^s)}, & af_2 < 0 \\ -2\sqrt{af_2(af_0 - \delta t_{OL}^s)}, & af_2 > 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Параметры  $af_0$  и  $af_2$  в (4) являются наблюдаемыми, а  $\delta t_{OL}^s$  – задаваемым.

Величины  $af_0$  и  $af_2$  в любой момент времени зависят от характерного поведения наблюдаемого смещения  $\delta t$ . Средства наземного сегмента IRNSS (поставщик услуг) вычисляют и постоянно отслеживают  $\delta t^s$ , а затем оценивают  $af_0$ ,  $af_1$  и  $af_2$ . Далее эти коэффициенты прогнозируются на ближайшие 24 ч и транслируются пользователю. Вычисление  $\delta t^s$  по беззапросным дальномерным измерениям описывается в следующем разделе.

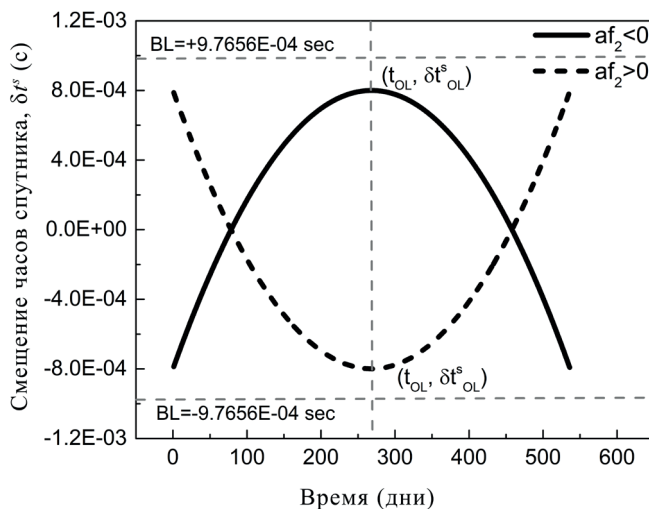


Рис. 4. Смещение часов  $\delta t^s$  как функция времени, рассчитанная по (1) и (4). При расчете использованы типичное значение  $af_2$  ( $\pm 2,57E^{-13}$ /день) и желаемое значение  $\delta t_{OL}^s$ .  $\delta t_{OL}^s = +8,0E^{-4}$  с, если  $af_2 < 0$ , и  $-8,0E^{-4}$  с, если  $af_2 > 0$

#### Вычисление смещения часов ( $\delta t^s$ )

Дальномерно-контрольные станции IRNSS (IRNSS Range and Integrity Monitoring Stations – IRIMS) обеспечивают дальномерные измерения, используя кодовые и фазовые измерения на частотах  $L5$  и  $S$ . Кодовые измерения не имеют сдвига нуля, но зашумлены, в то время как фазовые измерения содержат меньше шума, но имеют сдвиг нуля вследствие неизвестной целочисленной неопределенности [13]. На каждой IRIMS-станции с опорой на IRNWT определяются дальномерные измерения, на основании которых рассчитывается величина  $\delta t^s$ . Смещение часов приемника этих станций относительно наземного опорного сигнала известно точно. Уравнение псевдодальности для любого наземного приемника IRIMS относительно спутника можно представить в виде [14]

$$\rho = r + c [\delta t_u - \delta t^s] + I + T + \varepsilon, \quad (5)$$

где  $\rho$  – псевдодальность (кодовое измерение),  $r$  – реальная дальность,  $\delta t_u$  – смещение часов приемника относительно наземного опорного сигнала,  $I$  – ионосферная задержка,  $T$  – тропосферная задержка,  $\varepsilon$  – шум кодовых измерений. Шум кодовых измерений дальности по уровню выше фазового шума и может быть снижен за счет сглаживания кода по фазе на основе фильтра Хэтча [15–16].

Чтобы вычислить  $\delta t^s$ , сначала сглаженная псевдодальность от опорного приемника корректируется по значениям  $r$ ,  $\delta t_u$ ,  $I$  и  $T$ . Реальная дальность ( $r$ ) вычисляется по известным координатам опорной станции IRIMS и эфемеридам спутников [17]. Смещение  $\delta t_u$  станции IRIMS известно. Ионосферную задержку можно исключить за счет использования комбинации двухчастотных измерений, не содержащей ионосферной задержки [12]:

$$\rho_{Iono-free} = \frac{f_{L5}^2 \rho_{L5} - f_S^2 \rho_S}{f_{L5}^2 - f_S^2}, \quad (6)$$



где  $\rho_{L5}$  и  $\rho_S$  – измерения псевдодалности, полученные наземным приемником на частотах  $L5$  и  $S$ , обозначенных  $f_{L5}$  и  $f_S$  соответственно.

Тропосферная задержка корректируется с использованием модели Саастамойнена [18]. Затем смещение  $\delta t^s$  рассчитывается по (5) и используется для оценки  $af_0$ ,  $af_1$  и  $af_2$ , которые затем прогнозируются и транслируются пользователям. Эти поправки оцениваются путем применения квадратичной полиномиальной модели с использованием метода наименьших квадратов (batch least square technique). В качестве входных данных при оценивании служит накопленное за три дня значение  $\delta t^s$ . Вместе с тем, если поведение часов не соответствует квадратичной полиномиальной модели, для оценивания применяются только данные последнего (третьего) дня.

### Коррекция частоты

В течение определенного периода времени точно отслеживаются расчетные значения  $\delta t^s$  и соответствующих  $af_1$  и  $af_2$ . В нужный момент для оценки оптимального сдвига частоты (скорректированной  $af_1$ ) учитывается подходящее значение  $af_1$ , но со знаком, противоположным знаку  $af_2$ . Знак и величина  $af_2$  в момент введения поправки имеют большое значение, см. (4). После введения поправки на сдвиг частоты производится прогноз смещения  $\delta t^s$  на следующий период времени в соответствии с (1).

Реализация метода синхронизации часов описана далее на примере типового спутника IRNSS-1B. Наблюдение за смещением его часов  $\delta t^s$  велось в течение восьми с половиной месяцев – с 01.01.2019 по 16.09.2019. На 17 сентября 2019 г. наблюдаемые значения  $af_0$ ,  $af_1$  и  $af_2$  составили  $-2,50E-4$  с,  $-4,01E-11$  с/с и  $-3,30E-14$ /день соответственно. По  $af_0$  и  $af_2$  рассчитывается оптимальное значение  $af_1$  ( $+4,0E-11$  с/с) при задании желаемого рабочего предела в (4)  $\delta t_{OL}^s = 8,0E-4$  с. Таким образом, скорректированное значение  $af_1$  положительно, т.к.  $af_2$  отрицательно. Поправка была применена 17 сентября 2019 г., ее дата/время обозначается  $T_c$ . График расчетного смещения  $\delta t^s$  по (1) при введении поправки представлен на рис. 5 (кривая C1). Кривая C0 – это

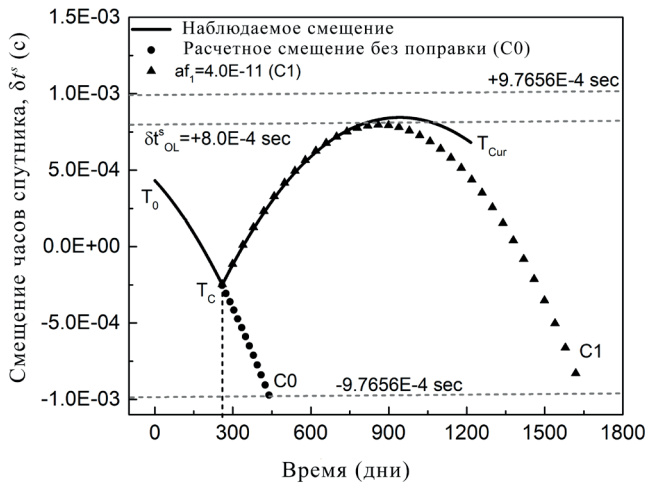


Рис. 5. Спрогнозированное смещение часов спутника IRNSS-1B без внесения поправок (C0) и с оптимальной поправкой в момент  $T_c$  (C1).

График  $\frac{T_0 T_c T_{Cur}}{T_0 T_c T_{Cur}}$  показывает наблюдаемые смещения часов до и после поправки

расчетное нескорректированное смещение  $\delta t^s$ , которое могло бы достичь границ допустимого интервала через 185 дней.

Можно заметить, что введение поправки в виде оптимального сдвига частоты обеспечивает ситуацию, при которой границы допустимого интервала достигаются за максимальный период времени (1400 дней). Тем не менее поведение наблюдаемого смещения  $\delta t^s$  после поправки зависит от изменений  $af_2$  во времени. На графике  $T_C T_{Cur}$  на рис. 5 видно, что наблюдаемое смещение  $\delta t^s$  после ввода поправки хорошо согласуется с расчетным смещением до 490-го дня. После этого наблюдаемое смещение медленно отклоняется от расчетного значения из-за изменения величины  $af_2$ . Таким образом, максимальное значение наблюдаемого смещения  $\delta t^s$  (график  $T_C T_{Cur}$ ) достигает  $8,45E-04$  с, что превышает  $\delta t_{OL}^s$ , но не выходит за пределы допустимого интервала.

Выбор подходящего времени для применения поправки по сдвигу частоты основан на оптимальном соотношении между величиной поправки и расчетным периодом, в течение которого накопленное смещение достигает границ допустимого интервала после применения поправки. Слишком поспешное применение поправки (например, задолго до  $T_C$  на рис. 5) приведет к сокращению интервала между двумя поправками. С другой стороны, этот интервал может увеличиться, если поправка будет применена значительно позднее, чем  $T_C$ , однако при этом она должна быть

большой величины. Кроме того, в последнем случае значение  $\delta t^s$  становится более восприимчивым к изменениям  $af_2$  во времени.

Эффективность оптимальной поправки, описанной выше, зависит от изменения  $af_2$  во времени. И  $\delta t^s$ , и  $af_2$  постоянно отслеживаются. Если наблюдаемые изменения  $af_2$  являются значительными, смещение  $\delta t^s$  быстро накапливается и выходит за рамки допустимого интервала. Чтобы этого избежать, применяются промежуточные поправки. Например, при использовании спутника IRNSS-1I оптимальная поправка была применена во время  $T_{C1}$ , как показано на рис. 6. График  $T_{C1} T_{C2}$  показывает наблюдаемое смещение  $\delta t^s$  после поправки. Вследствие из-

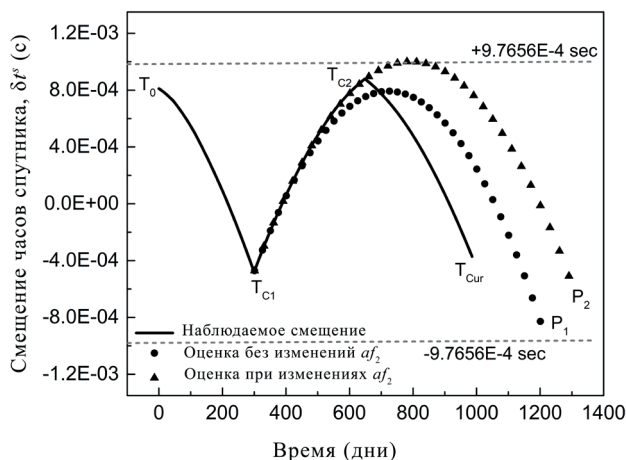


Рис. 6. Наблюдаемое и расчетное смещение  $\delta t^s$  спутника IRNSS-1I.

Графики  $T_0 T_{C1}$  и  $T_{C1} T_{C2}$  показывают наблюдаемое смещение  $\delta t^s$  до и после поправки на сдвиг частоты соответственно,  $P_1$  и  $P_2$  – расчетное смещение  $\delta t^s$  при отсутствии и наличии изменений  $af_2$  соответственно

менений  $af_2$  во времени смещение  $\delta t^s$  отклоняется от расчетной траектории, поэтому требуется повторная поправка во время  $T_{C2}$  (через 349 дней после  $T_{C1}$ ), чтобы удержать накопление  $\delta t^s$  в рамках допустимого интервала. Графики  $P_1 (T_{C1} P_1)$  и  $P_2 (T_{C1} P_2)$  на рис. 6 представляют собой оценку смещения  $\delta t^s$  при отсутствии изменений  $af_2$  во времени и при их наличии. Расхождение между этими данными вызвано изменениями  $af_2$ . Нескорректированные изменения  $af_2$  приведут к выходу накопленного сдвига  $\delta t^s$  за рамки допустимого интервала (как показано на графике  $P_2$ ).



## Заключение

Смещение часов спутника обусловлено сдвигом и дрейфом частоты. В спутниках IRNSS применяются поправки в виде оптимального сдвига частоты, чтобы постоянно удерживать смещение часов в рамках допустимого интервала, причем между поправками он должен быть максимальным. Наблюдаемое смещение часов спутника отклоняется от расчетного значения после применения оптимальной поправки вследствие изменения дрейфа частоты, из-за чего требуется дополнительная промежуточная поправка. Метод синхронизации часов спутника IRNSS, описанный в данном исследовании, сокращает время простоя спутника и, соответственно, повышает качество его работы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность всем членам группы космической навигации Спутникового центра им. Рао Индийской организации космических исследований (Бангалор) за их помощь в исследовании. Работа выполнена при финансовой поддержке Индийской организации космических исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mallette, L. A., White, J., and Rochat, P., Space qualified frequency sources (clocks) for current and future GNSS applications, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2010, pp. 903–908.
2. Liu, C., Xu, F., Qu, Y., Zhang, Y., Du, E., Cheng, M., Tang, T., and Zhang, W., Analysis on Factors Influencing Frequency Drift of Rubidium Clocks for Satellite Navigation, *China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings: Volume III. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Singapore., 2016, vol. 390, pp. 645–652.
3. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, Interface Specification, (Global Positioning Systems Directorate, California 2013), IS-GPS-200H, 2013.
4. Epstein, M., and Dass, T., Management of phase and frequency for GPS IIR satellites, *33<sup>rd</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) meeting*, The university of New South Wales, 2001, pp. 481–492.
5. Phelan, J., Dass, T., Freed, G., Rajan, J., D’Agostino, J., and Epstein, M., GPS block IIR clocks in space: current performance and plans for the future, *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005*, pp. 19–25.
6. Huang, G., Cui, B., Zhang, Q., Li, P., and Xie, W., Switching and performance variations of on-orbit BDS satellite clocks, *Advances in Space Research*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 1681–1696.
7. Geng, T., Jiang, R., Lv, Y., and Xie, X., Analysis of BDS-3 Onboard Clocks Based on GFZ Precise Clock Products, *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 1389.
8. Kudrys, J., Prochniewicz, D., Zhang, F., Jakubiak, M., and Maciuk, K., Identification of BDS Satellite Clock Periodic Signals Based on Lomb-Scargle Power Spectrum and Continuous Wavelet Transform, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 21, pp. 7155.
9. Ganeshan, A.S., Ratnakara, S. C., Nirmala, S., Babu, R., Neetha, T., and Kartik, A., Successful Proof-of-Concept Demonstration First Position Fix with IRNSS, *Inside GNSS*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 48–52.
10. Ganeshan, A.S., Ratnakara, S.C., Gupta, R., and Jain, A.K., Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) Concept, *Journal of Spacecraft Technology*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 19–23.
11. Rajaiah, K., Manamohan, K., and Nirmala, S., IRNSS/NavIC On-Board Time Synchronization with Ground Reference Time, *Journal of Spacecraft Technology*, 2020, vol. 31, no. 2, pp. 01–05.
12. Indian Space Research Organisation, Indian Regional Navigation Satellite System, Signal In Space ICD for Standard Positioning Service, Version 1.1, U. R. Rao Satellite Centre, Bangalore, ISRO-IRNSS-ICD-SPS-1.1, 2017.
13. Huayi Zhang, Shengyue Ji, Zhenjie Wang, and Wu Chen, Detailed assessment of GNSS observation noise based using zero baseline data, *Advances in Space Research*, 2018, vol. 62, no. 9, pp. 2454–2466.

14. **Misra, P., and Enge, P.**, *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*, Revised second edition, Lincoln, Mass.: Ganga-Jamuna Press, 2001.
15. **Hatch, R.**, The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements, *Proceedings of 3rd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, New Mexico State University, 1982, vol. 2, pp. 1213–1231.
16. **Qinghua Zhang, Zhengsheng Chen, Fengjuan Rong, and Yang Cui**, An improved Hatch filter and its application in kinematic positioning with single-frequency GPS, *Measurement*, 2019, vol. 146, pp. 868–878.
17. **Rajaiah, K., Manamohan, K., Nirmala, S., and Ratnakara, S.C.**, Modified Empirical Solar Radiation Pressure Modelling for IRNSS, *Advances in Space Research*, 2017, vol. 60, no. 10, pp. 2146–2154.
18. **Saastomoinen, J.**, Atmospheric Correction for Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites, *Geophysics Monograph Series*, American Geophysical Union, 1972, vol. 15, pp. 247–251.

---

**Rajaiah, K., Manamohan, K., Nirmala, S.** (U.R. Rao Satellite Centre, Indian Space Research Organisation, Bangalore-560017, India), **Venkatappa, R.T.** (Department of Physics, National Institute of Technology Warangal, Telangana-506004, India), and **Prashanth, C.U.** (Laboratory for Electro-Optics Systems, Indian Space Research Organisation, Bangalore-560058, India)  
Satellite Time Keeping Methodology for IRNSS/NavIC Constellation, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 3 (118), pp. 31–40.

**Abstract.** Accuracy of range measurements using navigation satellites primarily depends on on-board clock correction parameters which are broadcasted to users periodically. The on-board clock offset, a critical correction parameter which accumulates due to fractional frequency offset as well as frequency drift, has to be maintained within the allocated broadcast limit throughout the satellite's service. In IRNSS satellites, the clock offset is maintained within the broadcast limit by applying frequency offset corrections to the on-board atomic clock monitoring unit. In this paper, we discuss the methodology implemented for computing the clock offset using one-way range measurement data. Further, we report the time keeping methodology employed in IRNSS satellites that enables maintaining the satellite clock offset within the broadcast limit with minimum number of intervening frequency offset corrections throughout their operational life time.

**Key words:** IRNSS, navigation, atomic frequency standard, frequency offset, frequency drift, frequency stability.

Материал поступил 05.07.2022