

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ МЕРЕЖІ GPS-ВИМІРЮВАНЬ

Д. т. н. А. П. Бондарев¹, А. М. Пристай²

Національний університет «Львівська політехніка»¹,
Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України²
Україна, м. Львів
bondap@ukr.net, pristaj@isr.lviv.ua

Описано нову структуру пристрою синхронізації оцифровки даних з магнітотелуричних станцій, яка забезпечує формування тактових сигналів, синхронізованих із системою GPS, та збереження тактування АЦП при зникненні сигналу з GPS. Із використанням запропонованого поняття «віртуальний еталонний генератор» розроблено стохастичну модель функціонування великої кількості вимірювальних станцій. Час моделювання не залежить від часу прогнозування джиттеру у реальній системі. Результати натурних та розрахункових експериментів показали адекватність моделі та шляхи подальшого підвищення якості синхронізації.

Ключові слова: синхронізація вимірювань, GPS-синхронізація, еталонний генератор, стохастична модель.

Для дослідження геологічної будови Земної кори та пошуку корисних копалин проводять електромагнітне розвідування із використанням розподіленої мережі стаціонарних вимірювальних станцій [1]. Гарантією достовірності вимірювань є їхня синхронність, яку забезпечують сигнали GPS [2]. У [3] було проведено математичне моделювання процесу синхронізації. Метою цієї роботи є демонстрація шляху та результату підвищення точності синхронізації сигналів GPS.

Структура, стохастична та кумулянтна моделі розподіленої системи синхронізації. У ході робіт структуру кожної вимірювальної станції із розподіленої мережі було доповнено програмно-апаратними пристроями компенсації теплової нестабільності та адаптивними пристроями підстроювання частоти, а параметри польової станції багатоканальної обробки LEM1-423 відкореговано відповідно до результатів аналізу розробленої моделі. У моделі враховано два аспекти.

1. Значна кількість вимірювальних станцій утворює ансамбль реалізацій і уможливорює застосування статистичних методів аналізу. Сукупність джерел тактових сигналів GPS описана нами як один «віртуальний генератор» із фазовою нестабільністю. Сигнал на виході такого генератора становить $s_{UT}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_{UT}(t))$, де A_0 — амплітуда, ω_0 — частота генератора, $\varphi_{UT}(t)$ — випадковий процес, який характеризує фазову нестабільність.

2. Через порівняно низький рівень завад можна прийняти лінеаризовану модель пристрою фазової синхронізації.

За теорією нелінійної оптимальної фільтрації найкращим для синхронізації із наведеним сигналом є пристрій другого порядку із зворотнім зв'язком по фазі. Його параметри $\mathbf{P} = (K, T, m)$, де K — коефіцієнт підсилення петлі, T — інерційність петльового фільтра, m — коефіцієнт пропорційності. Починний стан пристрою описують фазові змінні $\Phi = (\varphi, \Omega)$, де φ, Ω — фазова та частотна похибки.

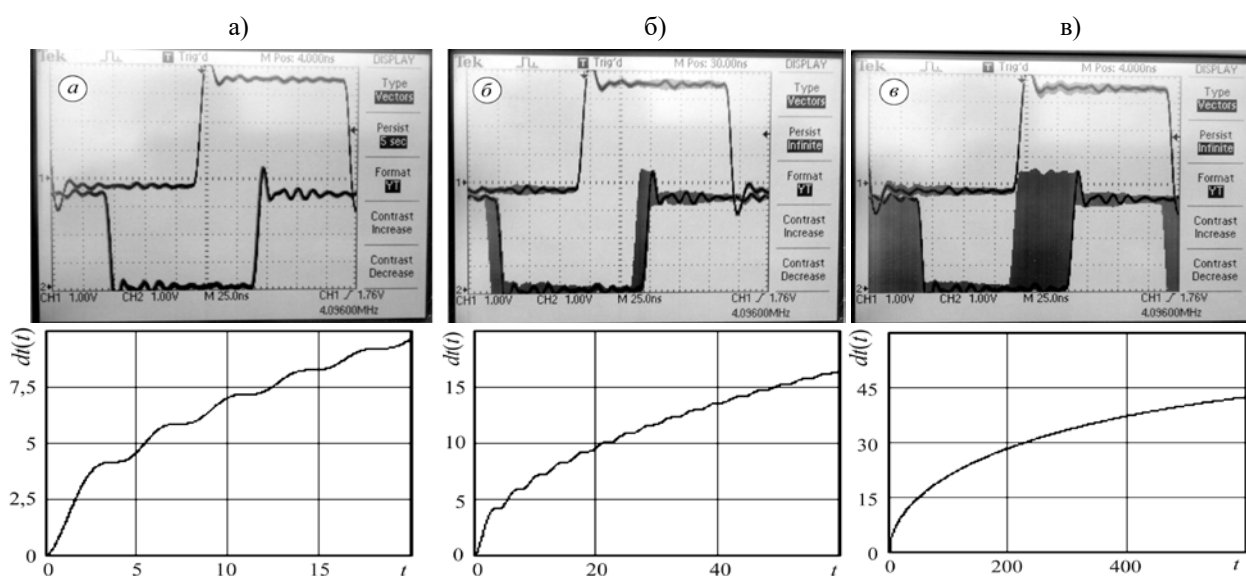
Як модель такого пристрою наводять систему з двох рівнянь $d\Phi(t)/dt = F1(\mathbf{P}, \Phi, t) + n_\varphi(t)$, де $n_\varphi(t)$ — випадковий процес, однозначно пов'язаний з процесом $\varphi_{UT}(t)$. Недоліком такої стохастичної моделі є необхідність генерування багатьох реалізацій $n_\varphi(t)$ і тільки наступний статистичний аналіз $\Phi(t)$.

Методи кумулянтного аналізу дали нам можливість перейти до моделі, яка на відміну від стохастичної дає не поведінку миттєвих значень похибок синхронізації, а поведінку їхніх статистичних характеристик у п'ятивимірному фазовому просторі кумулянтів $\Phi_{\text{КУМ}} = (m_\varphi, m_\Omega, D_\varphi, D_\Omega, R_{\varphi\Omega})$, складовими якого є середні значення і дисперсії фазової та частотної похибок, а також їхній коефіцієнт кореляції. Кумулянтна модель має вигляд п'яти диференціальних рівнянь $d\Phi_{\text{КУМ}}(t) / dt = F2(\mathbf{P}, \Phi_{\text{КУМ}}, t)$, які на відміну від стохастичних є детермінованими.

Лінеаризацією кумулянтної моделі ми отримали аналітичні розв'язки для усіх статистичних характеристик. Дисперсія фазової похибки, яка є важливою для визначення джиттеру сигналу синхронізації, має вигляд $D_\varphi(t) = F3(\mathbf{P}, \Phi_{\text{КУМ}}, t) + D_{\text{СТ}}$. Цей вираз, насправді, є достатньо громіздким, але дозволяє розрахувати дисперсію для довільного моменту часу без інтегрування через перехідний процес.

Ідентифікація параметрів моделі, порівняння результатів натурального і числового експериментів. Завданнями ідентифікації параметрів стохастичної математичної моделі було встановлення інтенсивності дестабілізуючого фактора $n_{\phi}(t)$, який однозначно пов'язаний із параметрами випадкового процесу $\phi_{UT}(t)$, та встановлення відповідності параметрів математичної моделі $\mathbf{P} = (K, T, m)$ значенням параметрів складного реального пристрою. Основою ідентифікації параметрів моделі є однозначна відповідність експериментально спостереженого джитера Δt та розрахованого середньоквадратичного відхилення фазової похибки $(D_{\phi}(t))^{1/2}$.

Результати експериментального та розрахункового визначення нестабільності сигналу пристрою синхронізації, наведені на рисунку, демонструють повний збіг результатів для трьох моментів часу. Як експеримент, так і модель показали зростання джитера з часом та його вихід на деяке стаціонарне значення. Але тривалість експерименту відповідає реальному часу, а розрахунків не залежить від часу прогнозування, що дозволяє оперативно здійснювати перебір параметрів пристрою синхронізації.



Експериментальні (наверху) та отримані моделюванням (внизу) результати визначення нестабільності сигналу пристрою синхронізації для часових інтервалів 5 с (а), 60 с (б) та 600 с (в)

Порівняння результатів розрахунків з використанням розробленої моделі нової структури пристрою синхронізації для оцифровки даних з магнітотелуричних станцій із експериментальними даними показало адекватність моделі, її використання дозволило досягнути у польовій станції LEMI-423 абсолютної точності синхронізації вибірки кращої за ± 60 нс, без стрибків фази.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Broughton Edge A. B., Laby T. H. The principles and practice of geophysical prospecting.— Cambridge University Press, 2012.— 404 p.
2. Prystai A., Korepanov V., Dudkin F., B. Ladanivskyu. Vector magnetometer application with moving carriers // Sensor&Transducer.— 2016.— Vol. 207, iss. 12.— P. 44—49.
3. Бондарев А. П., Пристай А. М. Аналітична модель GPS синхронізації вимірювань і урахуванням стохастичних ефектів // Відбір і обробка інформації.— 2017.— Вип. 45(121).— С. 38—49.

A. P. Bondariev, A. M. Prystai

Stochastic model of a spatially distributed GPS measurement network

A new design of a device for synchronization of data digitization from magnetolectric stations is described, which provides the formation of clock signals synchronized with the GPS system and preservation of ADC clocking for GPS signal loss. Using the proposed concept of "virtual reference generator", a stochastic model for the operation of a large number of measuring stations is developed. The simulation time does not depend on the prediction time of the jitter in the real system. The results of the field and calculation experiments showed the adequacy of the model and the ways to further improve the quality of synchronization.

Keywords: measurement synchronization, GPS synchronization, reference generator, stochastic model.