

ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ДО КВАРЦЕВОГО ДЕФОРМОГРАФА

А. Назаревич, Л. Назаревич

(Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України)

Деформографічні дослідження в Закарпатті проводяться в районі міста Берегово вже ряд років, і за цей час отримано важливі результати про деформаційні процеси в земній корі цього району, їх зв'язок з тектонікою, геодинамікою і сейсмічним режимом регіону [1-3]. Дослідження проводяться за допомогою штангових деформографів з кварцевими штангами [3]. До цього часу застосовувалась пряма фотореєстрація деформацій за допомогою рухомого дзеркальця, закріпленого на голці, яка затискалась між опорним столиком, розміщеним на одному постаменті, і вільним кінцем кварцевої штанги, інший кінець якої жорстко зв'язаний з другим постаментом, розміщеним на віддалі в десятки метрів від першого [1-3]. При деформаціях масиву порід між постаментами, тобто на базі вимірювання L , викликаних тектонічними рухами чи припливними силами, вільний кінець кварцевої труби, яка служить еталоном довжини завдяки унікальній стабільності своїх механічних характеристик, переміщується відносно опорного столика, а затиснута між ними голка з дзеркальцем повертається на певний кут, і промінь, відбитий від дзеркальця, рисує на фотопапері криву, зміщення якої по осі X , яке називається розгорткою, пропорційне часу і задається швидкістю протяжки фотопаперу, а зміщення по осі Y , пропорційне деформації масиву і задається коефіцієнтом підсилення переміщень, так званим збільшенням. Природні деформації масиву порід реально дуже малі, так тектонічні деформації становлять 10^{-7} - 10^{-6} за рік в відносних одиницях, а припливні (тобто добові варіації) - $1-2 \times 10^{-8}$, що складає для бази вимірювання 10 мерів 1-10 мкм і

0,1-0,2 мкм відповідно [3]. Отже, для реєстрацій таких малих відносних зміщень необхідно тим чи іншим способом "підсилити сигнал". При прямій реєстрації таке підсилення досягається за допомогою так званого "оптичного важеля", тобто співвідношення між діаметром голки і відстанню від дзеркальця до фотореєстратора. Так при діаметрі голки 0,4 мм (технічно мінімальній) і відстані від дзеркальця до фотореєстратора 1 м оптичний коефіцієнт підсилення зміщення становить 5000, що дає на фотопапері величину тектонічних деформацій 5-50 мм за рік, а величину припливних, тобто добових деформацій - 0,5-1 мм, і навіть збільшення відстані між дзеркалом і реєстратором до 3-5 метрів дозволяє отримати величину добових варіацій не більше ніж 1,5-5 мм для кварцевої штанги довжиною 10 м і 4,5-20 м для штанги довжиною 30 м, що практично виключає детальний аналіз припливних варіацій, не кажучи вже про реєстрацію на 1-2 порядки менших деформацій при проходженні сейсмічних хвиль від місцевих чи далеких землетрусів та дослідження (такого ж порядку за амплітудами деформацій) крипових рухів при активізації місцевого сейсотектонічного режиму [3-6].

Отже, в першу чергу перед нами стояло завдання підвищити чутливість до деформації вимірювально-реєструючого каналу кварцевого деформографа мінімум на 1-2 порядки, тобто до 10^{-9} - 5×10^{-10} [3, 5], щоб забезпечити якісну реєстрацію припливних деформацій, що необхідно для визначення реальних припливів в корі Закарпаття та вивчення їх впливу на різні геофізичні поля [2, 3, 5].

Для цього нами було отримано систему фотооптичної реєстрації до кварцевого деформографа виробництва Дослідного заводу ІФЗ (Москва). Система включає блок диференціального оптоелектричного перетворювача: джерело світла, лінзово-дзеркальну оптичну перетворюючу підсистему з рухомим дзеркалом, зв'язаним механічними важелями з рухомим кінцем кварцевої штанги, диференціальний фотоприймач; а також підсистему реєстрації, що складається з надчутливих дзеркальних гальванометрів, реєстраційних джерел світла - коліматорів і фотореєстрів [3]. За рахунок подвійного оптико-механічного підсилення (275 у вузлі оптоелектричного перетворення (за рахунок пари механічних і одного оптичного важеля з подвійним проходження променя через рухоме дзеркало) і до 1000 (за рахунок оптичного важеля) - у вузлі електрооптичної реєстрації) отримується сумарне збільшення по зміщенню до 0,01 мкм на міліметр фотозапису (чутливість до деформації становить $10^{-9} - 5 \times 10^{-10}$) [3]. Перевагою такої системи є ще й те, що підсистему фотореєстрації немає необхідності розміщувати біля деформографа в штільні, її зручніше розмістити в окремо спеціальному приміщенні - фотореєстраційній кімнаті, зв'язавши вихід фотоелектричних перетворювачів з входом гальванометра за допомогою кабеля. Цим значно підвищується зручність обслуговування системи зменшуються можливі завади, пов'язані з впливом оператора на деформограф (мікрівібрації, мікробароваріації і мікротемпературні впливи).

Недоліки такої системи також очевидні - малий динамічний діапазон реєстрації (роздільна здатність - 1 мм, максимальна ширина запису - 120 мм) не дозволяє одночасно з високою якістю реєструвати тектонічні рухи, які в районі Берегово становлять $15-33 \times 10^{-7}$ за рік [1,2], і на 1,5-2 порядки менші (амплітудою $1-2 \times 10^{-8}$) припливи. Залишається трудомісткою, тривалою в часі і малоефективною з точки зору сучасних вимог обробка записів, пов'язана як із звичайними прийомами ручної обробки [3], так і з ручним оцифруванням записів для подальшої обробки на комп'ютері, причому в процесі такого оцифрування якість інформації ще погіршується через вплив суб'єктивного фактора.

Тому нами було застосовано принципово іншу концепцію системи, а саме - сигнал від фотоперетворювача подається на високочутливі і восточастабільні підсилювачі постійного струму, а після них поступає на спеціальний високочутливий і з високим динамічним діапазоном та

роздільною здатністю аналого-цифровий перетворювач, з якого інформація в цифровій формі по телеметричному каналу поступає в систему збору інформації. В якості останньої використовується комп'ютерний модуль цифрової сейсмостанції [7].

Аналіз коефіцієнтів передачі механічних важелів і лінзово-дзеркальної підсистеми блока оптоелектричного перетворення показав, що при зміщенні штанги деформографа на 80 мкм оптичний промінь зміщується на 22 мм, тобто коефіцієнт підсилення цієї частини тракту становить 275. З цього загального діапазону зміщення (деформації) робочими є тільки 15 мкм (тобто приблизно стільки, скільки становить річна деформація короткого плеча деформографа на станції "Берегово", оскільки робочий діапазон зміщення променя на диференціальній світлорозділюючій призмі модуля фотоелементів (тобто коли промінь, що падав тільки на один фотоелемент, зміщується так, що він падає тільки на другий фотоелемент) становить тільки ± 2 мм.

При застосуванні в модулі джерела світла передбаченої конструкцією спеціальної лампи СЦ-12/2,5/0,25 в номінальному режимі (напруга на лампі 2,5 В) максимальний сигнал на одному з фотоелементів становить 2,5 мВ. Отже, для забезпечення на виході сигналу $\pm 7,5$ В, що при робочому діапазоні зміщень 15 мм відповідає шкалі з масштабом 1 В/мкм, необхідно забезпечити підсилення 3000. Для цього нами застосовано двокаскадний підсилювач на прецизійних операційних підсилювачах 140УД17А з лазерним юстуванням їх параметрів. Перший каскад по схемі інвертора-суматора з коефіцієнтом підсилення 200 забезпечує двополярний диференціальний фотоелектричний сигнал за рахунок сумування по входу сигналів з двох фотоелементів, включених в протифазі. Другий каскад - неінвертуючий підсилювач-фільтр з коефіцієнтом підсилення 15, високим входним опором і захистом від короткого замикання по виходу забезпечує необхідне сумарне підсилення і узгодження входного каскаду і фільтра з навантаженням. За рахунок трьох ланок фільтрів з крутизною 20 дБ/дек. (2-х - у колах зворотнього зв'язку кожного з підсилювачів а також міжкаскадного пасивного фільтра) при результуючій частоті зрізу 1 Гц, що дозволяє реєструвати сейсмічні хвилі від землетрусів в діапазоні частот від 0 до 5 Гц, досягнуто режекції завад з частотою 50 Гц більш як на 100 дБ, тобто до рівня менше 0,1 мВ на виході. Цим забезпечується нейтралізація впливу цих завад як безпосередньо на вихідний сигнал, так і їх

непрямий вплив (шляхом детектування на нелінійних елементах каналу) на варіаційне зміщення постійної складової сигналу. Така сильна фільтрація завад з частотою мережі необхідна тому, що в умовах сухої шtolьні (як на станції "Берегово"), пробитої в масиві необводнених, практично повітряно сухих кам'янистих гірських порід, що характеризуються високим питомим опором, а значить, малою провідністю і, відповідно, екрануючою здатністю, поле промислових завад з частотою 50 Гц зменшується порівняно з його величиною на поверхні приблизно не більше ніж на порядок.

Важливою для забезпечення метрологічних характеристик вимірювального тракту є дуже висока стабільність напруг живлення як підсилювачів, так і лампи освітлювача. Так, враховуючи, з одного боку, великий (більше 95 дБ) приведений до входу коефіцієнт нейтралізації нестабільностей і пульсації живлення підсилювачів 140УД17А, а з іншого, великий сумарний їхній коефіцієнт підсилення (3000), низькочастотні дрейфи і флуктуації напруги живлення (пов'язані зі змінами вхідної напруги на $\pm 30\%$, частими в сільській місцевості а також зі змінами струму споживання та добовими і сезонними коливаннями температури повітря) в смузі частот від 0 до 2 Гц не повинні перевищувати для $U_{ж}$ ± 15 В 0,5 мВ. Для лампи освітлювача, враховуючи, що зміна напруги її живлення (2,5 В) на 1 мВ спричиняє зміну вихідного сигналу фотоелементів на 0,5%, необхідно забезпечити стабільність цієї напруги на рівні $\pm 0,1$ мВ. Отже сумарний коефіцієнт стабілізації для стабілізаторів живлення (при робочих змінах вхідної напруги, вихідного струму і зовнішньої температури повинен становити не менше 25-30 тис., в той час, як навіть для кращих серійних стабілізаторів він не перевищує кількох тисяч. Тому для досягнення необхідних характеристик кола живлення виконані з двоступеневими стабілізаторами. Перша від сіткового трансформатора ступінь стабілізаторів спільна для електронних підсилювальних каналів обох плеч деформографа, виконана з захистом від перевантажень і коротких замикань по виходу за рахунок застосування прецизійних термокомпенсованих стабілітронів КС191Ф, забезпечує довготривалу (в тому числі температурну) стабільність живлення з величиною низькочастотних (від 0 до 2-х Гц) варіацій не більше 10 мВ, а високочастотних шумів і пульсацій з частотою 50 Гц - не більше 3 мВ. Конструктивно ця ступінь знаходиться в блоці живлення, який розміщується в апаратній геофізичній станції. Від цього блока до підсилювачів, що розміщуються в шtolьні безпосе-

редньо в блоках оптоелектричних перетворювачів відповідних плеч деформографа, йдуть кабелі вторинного низьковольтного стабілізованого (± 15 В і ± 5 В) живлення постійного струму. Так забезпечується одночасно і дотримання правил техніки безпеки з електробезпеки в шtolьнях і відсутність там змінного струму, а значить, і наводок з боку живлення (як 50 Гц так і імпульсних завад широкого спектру) на вимірювальні канали. Друга ступінь стабілізації окрема для кожного каналу, що забезпечує нейтралізацію перехресних міжканальних впливів по живленню, розміщена в самому блоці оптоелектричних перетворювачів відповідного каналу разом з підсилювачами, забезпечує необхідні результуючі параметри стабілізованих напруг живлення підсилювачів і лампи освітлювача (за рахунок використання прецизійних термокомпенсованих стабілітронів КС191Ф і завдяки стабільній з точністю $\pm 0,1^\circ\text{C}$ температурі в шtolьні).

Сумарні нестабільності електронного підсилювального тракту (без фотоперетворювачів), визначені в лабораторних умовах, лежать в межах ± 5 мВ. В реальних умовах шtolьні, де нижча і дуже стабільна на протязі цілого року температура ($11 \pm 0,1^\circ\text{C}$), а також значно знижений рівень різних (особливо високочастотних) електромагнітних завад, загальний рівень апаратних варіацій цілого тракту (включаючи оптоелектронний вимірювальний канал) за результатами аналізу пробних записів менший за 1 мВ.

Підсумовуючи, констатуємо що при запропонованому вихідному масштабі шкали оптоелектронного вимірювально-підсилювального каналу 1 В/мкм і амплітуді припливних деформацій для довгого ($L=27$ м) плеча деформографа на станції "Берегово" біля 0,3 мкм, а для короткого ($L=10$ м) - 0,1 мкм амплітуда аналогового сигналу на виході цих каналів становить близько 0,3 В і 0,1 В відповідно. Отже, при роздільній здатності АЦП 1 мВ і такій-же величині завад на виході підсилювачів розділення припливних варіацій буде на рівні 0,3 % і 1%, що цілком достатньо для спектрального аналізу і виділення основних припливних хвиль, та для кореляційного аналізу спільно з різними геофізичними полями. При цьому річні тектонічні деформації (14 мкм для короткого плеча) цілком вкладаються в робочий діапазон деформографа (15 мкм), а для довгого (річні деформації 33 мкм) вимагатимуть періодичної компенсації за допомогою спеціально передбаченого в блоці оптоелектричного перетворення мікрометричного гвинта приблизно що півроку.

Додатково до складу одного з блоків підсилювача включений високочутливий канал вимірювання температури, виконаний по мостовій схемі з терморезисторами ММТ-1 в якості термочутливих елементів і підсилювачами постійного струму на прецизійних операційних підсилювачах 140УД17. Вихідна шкала сигналу - $1 \text{ В}^\circ\text{C}$ і нулю відповідає 18°C . Оскільки термодатчики розміщені безпосередньо в блоці електрооптичних перетворювачів, куди входить і вільний кінець кварцевої штанги, цей канал дасть можливість вивчити зміни температури різного часового і амплітудного порядку, спричинені різними факторами: метеорологічними (сезонні і добові), зміною напруги в мережі, впливом конвекційних потоків в штольні і т. п. На основі отриманих таким чином результатів можна буде знайти кореляційні залежності між різними завадами і їх впливом на вимірювальний сигнал і нейтралізувати цей вплив як при обробці отриманих даних, так і шляхом вдосконалення структури і схемотехніки каналу.

Щодо перспектив такого вдосконалення апаратури нами вже намічено ряд наступних кроків. Це, зокрема, застосування в освітлювачі замість ламп розжарювання лазерних світлодіодів з відповідним оптичним оформленням, що збільшить стабільність, надійність і довготривалість роботи цього вузла а також рівень сигналу на фотоелементах, і одночасно зменшить споживану ним потужність і, як наслідок, додатковий температурний нагрів блока і відповідні паразитні впливи в кілька разів. Ще на 1-2 порядки зменшити вплив цих факторів і створюваних ними завад на роботу апаратури, а також довести ресурс освітлювача з лазерним світлодіодом до десятків років дозволить застосування імпульсного режиму живлення світлодіода з великою скважністю і робочою частотою порядку 100 Гц, та одночасне застосування прецизійних пристроїв виборки-зберігання вимірюваного сигналу на час між імпульсами живлення світлодіода.

Покращення схемотехніки підсилювачів, зокрема, шляхом застосування підсистеми періодичної компенсації дрейфу і інфранизькочастотних шумів дозволить зменшити цього типу завади на виході каналу до $0,1 \text{ мВ}$ і менше. Застосування при необхідності третього, проміжного між першим і другим каскаду стабілізації напруг, конструктивно розташованого також в штольні недалеко блоків оптоелектричного перетворення, де стабільна температура, дозволить повністю нейтралізувати до рівня одиниць мкВ нестабільності живлення а та-

кож непрямий електротемпературний ефект [4-6]. В результаті реалізації цих заходів сумарний рівень завад на виході каналу, за розрахунками, знизиться до $0,1 \text{ мВ}$ і нижче. Застосовувавши відповідний АЦП з чутливістю $0,1 \text{ мВ}$ і повним динамічним діапазоном до 10 В , вдається при одночасній реєстрації тектонічних рухів отримати розділення по припливних складових деформацій на рівні $0,1\%$, тобто такого ж порядку, як в обсерваторних гравіметрів і кварцевих деформографів з ємнісними чи індуктивними перетворювачами [3]. Це дозволить вивчати тонку структуру припливних деформацій, визначати з точністю порядку $0,1\%$ їх фундаментальні константи, вивчати збуджуючий вплив морських припливів, надійно з запасом на порядок відносно фонові величини реєструвати рівень власних коливань Землі і на цій основі досліджувати регіональні, надрегіональні субматерикові, материкові характеристики тектоносфери в цілому, в тому числі астеносфери і верхньої мантії, (зокрема в Закарпатті) а також відповідні геодинамічні процеси. Вивчення спектрально-часової структури середньоперіодичних варіацій та їх часової еволюції дозволить відслідковувати крипові рухи при тектонічних процесах, виявляти періоди активізації місцевого і регіонального сейсмотектонічного режиму, локалізувати в просторі зони цієї активізації - майбутні вогнищеви зони місцевих Закарпатських землетрусів. Детальна реєстрація деформацій при проходженні сейсмічних хвиль і порівняльний аналіз цих даних разом з даними сейсмічної апаратури дозволить визначати пружні і реологічні характеристики порід кори, взаємокалібрувати сейсмічні і деформаційні канали в різних частотних діапазонах.

Література

1. Латынина Л.А., Юркевич О.И., Вербицкий Т.З., Игнатьшин В.В., Бойсарович И.М. О характере современных движений в районе Берегово по данным деформационных наблюдений. - В кн.: 1-ша Українська наукова конференція "Комплексні дослідження сучасної геодинаміки земної кори". Львів, 1993, с36.
2. Т.Вербицкий, В.Ігнатишин, Л.Латиніна, О.Юркевич. Сучасні деформації земної кори Березівської горстової зони. - Геодинаміка, 1998, №1, с. 118-120.
3. Л.А.Латынина, Н.А.Жаринов, М.В.Краммер, И.В.Савин, И.А.Широков. Методические рекомендации по исследованию деформационных предвестников землетрясений. - Москва, ИФЗ АН СССР, 1988, 81 с.

4. А.Назаревич, Л.Назаревич. Параметричний сейсмогеоакустичний моніторинг геодинамічних процесів. - Збірник тез міжнародного симпозіуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища. Алушта, 1996, с 13.
5. Назаревич А.В. Експериментальні дослідження спектрально-часової структури варіацій параметрів пружних хвиль в масивах гірських порід. Автореф. дис. канд. фіз.-мат. наук. Київ, 1997, 24 с.
6. А.Назаревич, Л.Назаревич. Спектрально-часові характеристики сейсмогеоакустичних аномалій - провісників катастрофічних геодинамічних явищ. - Збірник тез другого симпозіуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища. Алушта, 1997, с.34-37.
7. О.Кендзера, Т.Вербицький, С.Вербицький, Ю.Вербицький. Цифровий сейсмограф для регіональних спостережень та результати його випробувань. - Геодинаміка, 1998, №1, с. 120-126.

A. Nazarevych, L. Nazarevych

OPTICAL-ELECTRONIC MEASURING CHANNEL TO THE QUARTZ DEFORMOGRAPH

Summary

Optical-electronic measuring channel to the quartz deformograph which provide high-quality registration of seismotectonic and tidal deformation was described.

А. Назаревич, Л. Назаревич

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ К КВАРЦЕВОМУ ДЕФОРМОГРАФУ

Резюме

Описан оптоэлектронный измерительный канал к кварцевому деформографу, обеспечивающий качественную регистрацию сейсмотектонических и приливных деформаций.